TEXTE
82/2020

Aktualisierung der Daten des BVT-Merkblattes Energy Efficiency

Abschlussbericht

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 82/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 53 3123
FB000174

Aktualisierung der Daten des BVT-Merkblattes Energy Efficiency

Abschlussbericht

von

Dr. Hagen Hilse, Falk Wittmann, Stefan Zorn, Paul Kanig,
Jan Schulze
GICON Grossmann Ingenieur Consult GmbH

Prof. Dr.-Ing. habil Tobias Zschunke, Prof. Dr. Tino Schütte,
Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert, Ralf Pohl
Hochschule Zittau/Görlitz

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Das Projekt wurde durch einen Fachbeirat begleitet.

Mitglieder des Fachbeirates:

Reinhard Albert, Dr. Fabian Jäger-Gildemeister,
Dr. Klaus Ebert, Rainer Remus, Sebastian Plickert, Anja Nowack, Christoph Mordziol, Dr. Carmen Gottwald
Umweltbundesamt

Hans Peter Klein, Ronan Nedelec, Sabrina Rippl,
Andrea Schäfer
Bundesministerium für Umwelt und Bau

Thomas Damm, Dr. Franz Beneke, Dr. Andreas Brand,
Friedrich Klütsch, Manfred Könning
VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

Dr. Stefan Leitschuh, Alexandra Frisch, Thiemo Müller
Bayrisches Landesamt für Umwelt

Sebastian Treptow, Bernhard Sattler
ZVEI Fachverband Licht

Uwe Schrader
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz

Dr. Werner Möhring-Hüser
Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein

Achim Bobeth
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft

Erwin Ruppelt, Dr. Thomas Pschiwul
KAESER Kompressoren

Lutz Kalkutschke
Bundeswirtschaftsministerium

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH
Tiergartenstraße 48
01219 Dresden

Abschlussdatum:
Mai 2019

Redaktion:
Fachgebiet V 1.4 Energieeffizienz
Reinhard Albert

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Aktualisierung des BVT-Merkblattes Energy Efficiency

Der größte Teil des Energieverbrauchs in der Industrie ist Querschnittstechnologien zuzuordnen. Zu diesen Technologien zählen unter anderem Feuerungsanlagen, Dampfsysteme, elektromotorische Antriebe, Druckluftsysteme, Pumpensysteme, lufttechnische Systeme, Beleuchtung und Trocknungsanlagen. Im weiteren Sinn gehören dazu auch betriebliche Systeme und Maßnahmen zur Organisation und Überwachung sowie kontinuierlichen Verbesserung des effizienten Energieeinsatzes. Seit der Veröffentlichung des Merkblattes über beste verfügbare Techniken bezüglich der Energieeffizienz von Querschnittstechnologien durch die EU-Kommission im Jahr 2009 sind zum Teil mit bedeutende Verbesserungen der Energieeffizienz dieser Technologien erreicht worden.

Gegenstand des Forschungsvorhabens war die Aktualisierung wesentlicher Kapitel des BVT-Merkblattes. Die in diesem Abschlussbericht dargestellten Ergebnisse sollen sowohl als deutscher Beitrag für den Aktualisierungsprozess des BVT-Merkblattes auf EU-Ebene als auch als unmittelbare Informationsquelle für die Verwendung in Planungs- und Genehmigungsverfahren dienen. Das Forschungsvorhaben wurde durch einen mit Fachexperten verschiedener Behörden und Verbände besetzten Beirat begleitet.

Es wurden zahlreiche Darstellungen der aktuell besten verfügbaren Techniken neu aufgenommen oder zum Teil deutlich überarbeitet. Besonders herausgearbeitet wurde die gewachsene Rolle von betrieblichem Energiemanagement einschließlich der umfassenden Nutzung detaillierter messtechnisch erfasster energiebezogener Daten. Weiterhin wurden methodische Hinweise zur qualifizierten Analyse, Bewertung und Planung neuer und zu optimierender Anlagen ergänzt.

Abstract: Brief description: Update of the BREF - Energy Efficiency

The majority of energy consumption in industry is attributable to cross-cutting technologies. These technologies include firing systems, steam systems, electric motor drives, compressed air systems, pump systems, ventilation systems, lighting and drying systems. In a broader sense, this also includes operational systems and measures for organization and monitoring as well as continuous improvement of the efficient use of energy. Since the publication by the EU Commission in 2009 of the Best Available Techniques leaflet on the energy efficiency of cross-cutting technologies, some significant improvements in the energy efficiency of these technologies have been achieved.

The object of the research project was to update key chapters of the BREF. The results presented in this final report are intended to serve both as a German contribution to the updating process of the BREF at EU level and as a direct source of information for use in planning and permitting procedures. The research project was accompanied by an advisory board made up of experts from various authorities and associations.

Numerous presentations of current best available techniques have been newly incorporated or, in some cases, significantly revised. Particular emphasis was placed on the increased role of operational energy management, including the comprehensive use of detailed metrologically recorded energy-related data. In addition, methodological notes for qualified analysis, evaluation and planning of new and optimized installations were supplemented.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 13
Tabellenverzeichnis 15
Abkürzungsverzeichnis 18
Zusammenfassung 23
Summary 32
1 Einführung und Zielsetzung 40
1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung 40
1.2 Anwendungsbereich dieses Dokuments 41
1.3 Struktur und Inhalt dieses Dokuments 42
2 Für das Erreichen der Energieeffizienz auf Anlagenebene zu berücksichtigende Techniken 43
2.1 Energiemanagement 43
2.2 Planung und Feststellung von Zielen und Plansoll 54
2.3 Energieeffizientes Design 54
2.4 Erhöhte Prozessintegration 54
2.5 Die treibende Kraft der Initiativen zur Energieeffizienz aufrechterhalten 54
2.6 Fachwissen - Humankapital aufrechterhalten 54
2.7 Kommunikation 54
2.8 Wirkungsvolle Prozesskontrolle 54
2.9 Instandhaltung 55
2.10 Überwachung und Messung 55
2.11 Energie-Audits und Energiediagnose 60
2.12 Pinch Methodologie 69
2.13 Enthalpie und Exergieanalyse 69
2.14 Thermowissenschaft 69
2.15 Energiemodelle 69
2.16 Benchmarking 69
2.17 Andere Instrumente 78
3 Für das Erreichen der Energieeffizienz in energieverwendenden Systemen, Prozessen oder Aktivitäten zu berücksichtigende Techniken 79
3.1 Feuerungsanlagen 79
3.1.1 Energetische Optimierung von Brennern für Industrieöfen 93
3.1.2 Optimierung des Luftüberschusses 101
3.1.3 Wahl des Brennstoffes 108
3.1.4 Reduzierung der Wärmeverluste durch Wärmedämmung 110

3.1.5 Reduzierung der Verluste durch die Öffnungen von Industrieöfen 114
3.2 Dampfsysteme 115
3.2.1 Übersicht über die Maßnahmen zum Verbessern der Leistung des Dampfsystems 120
3.2.2 Drosselgeräte und der Einsatz von Gegendruckturbinen 125
3.2.3 Betriebs- und Steuerungstechniken 126
3.2.4 Speisewasservorwärmung 126
3.2.5 Vermeidung und Entfernung von Kesselsteinablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen 131
3.2.6 Minimierung der Verluste durch Absalzung und Abschlämmung 134
3.2.7 Energetische Optimierung der Entgasungsanlage 140
3.2.8 Minimierung der Verluste des Betriebskessels durch kurze Zykluszeiten 143
3.2.9 Energetische Optimierung der Dampfverteilungssysteme 145
3.2.10 Wärmedämmung von Dampfrohrleitungen und Kondensat-Rücklaufrohren 146
3.2.11 Umsetzung eines Steuerungs- und Reparaturprogramms für Kondensatableiter 148
3.2.12 Sammeln und Rückführung von Kondensat an den Kessel zur Wiederverwendung 152
3.2.13 Wiederverwendung von Entspannungsdampf 153
3.3 Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme 155
3.3.1 Wärmeübertrager 157
3.3.2 Wärmespeicher 161
3.3.3 Wärmepumpen 170
3.3.4 Rückkühlsysteme 179
3.4 Kraft-Wärme-Kopplung 181
3.5 Elektrische Energieversorgung 181
3.6 Elektromotorische Antriebssysteme 181
3.6.1 Energieeffiziente Motoren 184
3.6.2 Angemessene Bemessung der Motoren Beschreibung und Betriebsdaten 190
3.6.3 Antriebe mit variabler Drehzahl 191
3.6.4 Rückspeisung von Bremsenergie 192
3.6.5 Verluste bei der mechanischen Kraftübertragung 193
3.6.6 Reparatur und Neuwicklung von Motoren 193
3.6.7 Erreichter Nutzen für die Umwelt, medienübergreifende Effekte, Anwendbarkeit und andere Überlegungen zu ENE-Techniken bei Elektromotoren 194
3.7 Druckluftsysteme <Compressed air systems> (CAS) 196
3.7.1 Druckluftbedarf 202
3.7.1.1 Anpassung der Druckluft-Qualitäten/-reinheiten an die verbraucherseitigen Erfordernisse 203

3.7.1.2 Optimierung des Druckniveaus ... 203
3.7.1.3 Optimierung der Druckluftverbraucher ... 205
3.7.1.4 Reduzierung von Leckagen im Druckluftsystem ... 205
3.7.2 Übertragung und Speicherung ... 208
3.7.2.1 Übertragung: Optimierung des Verteilsystems ... 208
3.7.2.2 Speicherung ... 210
3.7.2.3 Zu- und Abschalten von Systemabschnitten ... 210
3.7.3 Regelung und Steuerung ... 211
3.7.3.1 Interne Regelung der Erzeuger ... 211
3.7.3.2 Druckluftsystem – übergeordnete Regelung/Monitoring ... 214
3.7.4 Druckluftbereitstellung ... 217
3.7.4.1 Grundlagen für die Auslegung der Anlagen zur Erzeugung und Aufbereitung von Druckluft ... 217
3.7.4.2 Druckluftaufbereitung ... 217
3.7.4.3 Drucklufterzeugung ... 221
3.7.5 Wartung ... 228
3.7.6 Schulung der Mitarbeiter ... 230
3.8 Pumpensysteme ... 230
3.8.1 Analyse der Förderaufgabe bei geplanten und vorhandenen Pumpensystemen Beschreibung und Betriebsdaten ... 232
3.8.2 Rohrleitungssystem ... 234
3.8.3 Analyse des Pumpensystems ... 235
3.8.4 Auswahl der Pumpe ... 238
3.8.5 Motor und Getriebe ... 245
3.8.6 Steuerung und Regelung des Pumpensystems Beschreibung und Betriebsdaten ... 245
3.8.7 Instandhaltung ... 249
3.8.8 Erreichter Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit und andere Überlegungen zu ENE-Techniken in Pumpensystemen ... 250
3.9 Industrielle Lufttechnik ... 254
3.9.1 Einführung ... 254
3.9.2 Auslegung bestehender und geplanter prozesslufttechnischer (PLT-) Anlagen ... 255
3.9.3 Dimensionierung des lufttechnischen Verteilsystems ... 257
3.9.4 Anforderung an die Dichtigkeit des lufttechnischen Systems ... 258
3.9.5 Einbauten zur Gefahrstoffentfernung aus dem Luftstrom und zur Konditionierung der Luft ... 259
3.9.6 Auswahl des Ventilators ... 260

3.9.7 Motor und Getriebe ... 262
3.9.8 Steuerung und Regelung des Lufttechnischen Anlagen ... 263
3.9.9 Instandhaltung ... 264
3.9.10 Erreichter Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit und andere Überlegungen für die Lufttechnik ... 264
3.10 Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen <Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systems ... 265
3.10.1 Heizsysteme ... 267
3.10.1.1 Analyse, Planung und Betrieb von Heizsystemen ... 267
3.10.1.2 Wärmebedarf ... 267
3.10.1.3 Wärmeübergabe ... 269
3.10.1.4 Wärmeverteilung ... 272
3.10.1.5 Heizwärmeerzeugung ... 273
3.10.1.6 Steuerung, Regelung und Energiedatencontrolling von Heizsystemen ... 276
3.10.1.7 Instandhaltung und Monitoring von Heizsystemen ... 277
3.10.2 Kühlung ... 278
3.10.2.1 Beschreibung des Vorgehens bei der Planung und dem Betrieb von Kühlsystemen ... 278
3.10.2.2 Kühlbedarf ... 279
3.10.2.3 Wärmeentzug aus den Nutzungsbereichen ... 279
3.10.2.4 Kälteverteilung ... 280
3.10.2.5 Kälteerzeugung ... 280
3.10.2.6 Steuerung, Regelung und Energiedatencontrolling von Kühlsystemen ... 282
3.10.2.7 Wartung, Instandhaltung und Monitoring von Kühlsystemen ... 283
3.10.3 Lüftung und Klimatisierung ... 284
3.10.3.1 Beschreibung des Vorgehens bei Planung und Betrieb von Lüftungsanlagen ... 284
3.10.3.2 Lüftungsbedarf ... 285
3.10.3.3 Luftförderung ... 285
3.10.3.4 Luftaufbereitung ... 288
3.10.3.5 Steuerung, Regelung und Energiedatencontrolling von Lüftungssystemen ... 290
3.10.3.6 Instandhaltung und Monitoring von HVAC-Anlagen ... 290
3.10.4 Erreichter Umweltnutzen, Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung und Beispiele ... 292
3.11 Beleuchtung ... 294
3.11.1 Grundlagen ... 294
3.11.1.1 Einleitung ... 294
3.11.1.2 Lichttechnische Größen ... 295

3.11.1.3 Gütemerkmale ... 298
3.11.1.4 Anforderungen an Innen- und Außenbeleuchtung ... 302
3.11.1.5 Leuchtmittelarten ... 304
3.11.2 Effiziente Leuchtmittel ... 307
3.11.3 Beleuchtungsplanung ... 308
3.11.3.1 Beleuchtungsanlage messen und überprüfen ... 308
3.11.3.2 Planung einer Neuanlage ... 310
3.11.4 Lichtmanagement ... 313
3.11.4.1 Regelung nach Tageslicht ... 314
3.11.4.2 Regelung nach Anwesenheit ... 314
3.11.4.3 Human Centric Lighting ... 315
3.11.5 Erzielter Umweltnutzen, Medienübergreifende Effekte, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkräfte ... 316
3.12 Trocknungsprozesse ... 319
3.12.1 Prozess der Auswahl von Trocknungsverfahren/Trocknungstechniken ... 323
3.12.2 Berechnung des Energiebedarfs und der Energieeffizienz ... 327
3.12.3 Stand der Technik bezüglich Energiebedarf ... 330
3.12.4 Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ... 331
3.12.4.1 Reduzierung der notwendigen Verdampfungsleistung ... 331
3.12.4.2 Verringerung von Verlusten des thermischen Trocknungsvorganges ... 333
3.12.4.3 Verbesserung des Versorgungssystems ... 337
4 Beste verfügbare Techniken ... 337
4.1 Einführung ... 337
4.2 Beste verfügbare Techniken zum Erreichen der Energieeffizienz auf Anlagenebene ... 338
4.2.1 Energiemanagement ... 338
4.2.2 Planung und Feststellung von Zielen und Plansoll ... 339
4.2.2.1 Erkennen der Energieeffizienzaspekte einer Anlage und der Möglichkeiten zur Einsparung von Energie ... 340
4.2.2.2 Ein Systemansatz für Energie-Management ... 340
4.2.2.3 Ein System-Ansatz für Energiemanagement ... 341
4.2.2.4 Ziele und Indikatoren der Energieeffizienz feststellen und überprüfen ... 341
4.2.2.5 Benchmarking ... 341
4.2.3 Energieeffizientes Design (EED) ... 341
4.2.4 Erhöhte Prozessintegration ... 341
4.2.5 Die treibende Kraft der Initiativen zur Energieeffizienz in energieverbrauchenden Systemen, Prozessen, Tätigkeiten oder Ausrüstungen ... 341

4.2.6 Fachwissen aufrechterhalten ... 341
4.2.7 Effektive Prozess-Steuerung ... 341
4.2.8 Instandhaltung ... 341
4.2.9 Überwachung und Messung ... 341
4.3 Beste verfügbare Techniken zum Erreichen der Energieeffizienz in energieverbrauchenden Systemen, Prozessen, Tätigkeiten oder Ausrüstungen ... 342
4.3.1 Feuerungsanlagen ... 342
4.3.2 Dampfsysteme ... 343
4.3.3 Wärmerückgewinnung ... 345
4.3.4 Kraft-Wärme-Kopplung ... 346
4.3.5 Elektrische Energieversorgung ... 346
4.3.6 Elektromotorische Antriebe ... 346
4.3.7 Druckluftsysteme ... 349
4.3.8 Pumpensysteme ... 351
4.3.9 Heizungs-, Belüftungs- und Klimaanlagen-Systeme <Heating, Ventilation and Air Conditioning systems> (HVAC) ... 354
4.3.10 Beleuchtung ... 356
4.3.11 Trocknungssysteme ... 358
5 Neu entstehende Techniken für die Energieeffizienz ... 359
6 Abschließende Bemerkungen ... 359
7 Literaturverzeichnis ... 360
8 Anhänge ... 382
9 Zusätzlicher Anhang ... 382

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1-1: Laufende Verbesserung eines Energieeffizienz-Managementsystems 44
Abbildung 2.10-1: Struktur eines komplexen Messsystems 57
Abbildung 2.16-1: Methodik Benchmarking 70
Abbildung 2.16-2: Festlegung Benchmarking-Grenze 71
Abbildung 2.16-3: Individuelle Aussagestärke des Benchmarking 72
Abbildung 2.16-4: Zusammensetzung der eingesetzten Energieträger 73
Abbildung 2.16-5: Elektrischer Energieeinsatz pro Beschäftigtem in [kWhel/MA] 75
Abbildung 2.16-6: Relevante Hauptverbraucher der Subsektoren 76
Abbildung 3.1-1: Wärmeströme des Bilanzraumes Feuerung 80
Abbildung 3.1-2: Energieströme des Bilanzraumes Industrieofen 82
Abbildung 3.1-3: Vergleich des Energiebedarfs zwischen einfacher und energieeffizienter Thermoprozessanlage 83
Abbildung 3.1-4: Schema einer Feuerungsanlage mit Luftvorwärmer 88
Abbildung 3.1-5 Taupunkttemperatur des Wasserdampfes für verschiedene Brennstoffe 91
Abbildung 3.1-6: Abgasverlust in Abhängigkeit von der Abgastemperatur ohne sowie mit regenerativer bzw. rekuperativer Wärmerückgewinnung 94
Abbildung 3.1-7: Schema rekuperativer Brenner 95
Abbildung 3.1-8: Schema Arbeitsprinzip von regenerativen Brennern 95
Abbildung 3.1-9: Idealisiertes Schema der flammenlosen Oxidation 96
Abbildung 3.1-10: Darstellung der Verbrennungsbereiche 97
Abbildung 3.1-11: Brennstoffeinsparpotential durch Senkung der Abgastemperatur in Abhängigkeit der Ofenraumtemperatur 98
Abbildung 3.1-12: NO_x- Emissionen von unterschiedlichen Brennerarten 98
Abbildung 3.1-13: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Luftvorwärmung 99
Abbildung 3.1-14: Schematische Darstellung der Einsparung an elektrischer Hilfsenergie durch Drehzahlregelung bei Gebläsebrennern 102
Abbildung 3.1-15: Einschätzung der Empfindlichkeit verschiedener Thermoprozesse in Bezug auf Gasbeschaffenheitsschwankungen 106
Abbildung 3.1-16: Stationäre Wärmeleitung durch Ofenwand mit a) Steinzustellung, b) Modulzustellung mit gleicher Dicke, c) Modulzustellung normaldick 113
Abbildung 3.2-1: Typisches Dampfsystem mit Erzeugung, Verteilung und Rückgewinnung 116
Abbildung 3.2-2: Schematische Darstellung der Kesselbilanz 118
Abbildung 3.2-3: Optionen zur Speisewasservorwärmung 127
Abbildung 3.2-4: Effizienzsteigerung mit Economisern 128
Abbildung 3.2-5: Exemplarische Temperaturniveaus und Verschaltung einer optimierten Kesselanlage 129
Abbildung 3.2-6: Verminderung des Wärmedurchgangs k durch Kalk- und Kesselstein 132
Abbildung 3.2-7: Einbindung der Wärmerückgewinnung aus Absalzung und Abschlämmung 135
Abbildung 3.2-8: Beispiel für Durchflussdiagramm Abschlammventil 138
Abbildung 3.2-9: Schema Entgaser 141
Abbildung 3.2-10: Wärmeverlust von Rohrleitungen in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Stärke der Dämmung 147

Abbildung 3.2-11: Entstehender Entspannungsdampf in Abhängigkeit vom Druckverhältnis 154
Abbildung 3.3-1: Warmwasserspeicher 163
Abbildung 3.3-2: Latentwärmespeicher 166
Abbildung 3.3-3: Nassdampf-Speicher 167
Abbildung 3.3-4: Kompressions-Wärmepumpe 171
Abbildung 3.3-5: Absorptions-Wärmepumpe 173
Abbildung 3.3-6: MVR-Anlage 174
Abbildung 3.3-7: Absorptions-Kältemaschine 175
Abbildung 3.6-1: Drehmoment-über-Drehzahl-Kennlinienfeld mit Referenzpunkten für die elektrische Verlustleistung nach DIN EN 61800-9-2 183
Abbildung 3.6-2: Vereinfachte Übersicht praxisüblicher Motorbauarten 184
Abbildung 3.6-3: Schnitt durch den Rotor eines Synchron-Reluktanzmotors 186
Abbildung 3.6-4: Beispielhafter Vergleich der elektrischer Wirkungsgrade zweier 7,5 kW Drehstrommotoren unterschiedlicher Bauart unter Teillastbedingungen 186
Abbildung 3.6-5: Vor- und Nachteile energieeffizienter Bauarten von Drehstrommotoren 188
Abbildung 3.6-6: Wirkungsgrade netzbetriebener Asynchronmotoren unterschiedlicher Effizienzklassen am Beispiel eines 4-poligen Motors 189
Abbildung 3.6-7: Typische Wirkungsgradbelastungskurven für Drehstrom-Induktionsmotoren mit Käfigläufer verschiedener Leistungsbereiche (ca. 1,1 kW; 15 kW; 150 kW) (DIN CLC/TS 60034-31) 191
Abbildung 3.6-8: Lebenszykluskosten eines 11kW IE3 Elektromotors mit 4.000 Betriebsstunden/a über 15 Jahre 195
Abbildung 3.7-1 : Typische Komponenten eines Druckluftsystems (144) in kompakter, schematischer Darstellung 197
Abbildung 3.7-2: diskontinuierliche Regelung 212
Abbildung 3.7-3: einfache kontinuierliche Regelung (Drehzahlregelung) 212
Abbildung 3.7-4: Entwicklung übergeordneter Steuerung/Regelung 215
Abbildung 3.7-5: Typen von Kompressoren 221
Abbildung 3.7-6: Typische Einsatzbereiche von Kompressorenbauarten 222
Abbildung 3.7-7: Spezifischer Leistungsbedarf für die Drucklufterzeugung, p_0 ist als Umgebungsdruck, p_1 als Systemdruck im Netz am Ausgang des Kompressors definiert 223
Abbildung 3.7-8: Exergieflussdiagramme (links ohne und rechts mit Wärmerückgewinnung) für ein Anwendungsbeispiel einer industriellen Druckluftanlage 225
Abbildung 3.7-9: Exergieverluste in einer beispielhaften herkömmlichen pneumatischen Anwendung, Fortführung aus Abbildung 3.7-8 226
Abbildung 3.7-10: Anstieg des Druckverlusts über einen Filter während der Nutzungsdauer, ergänzte Darstellung 229
Abbildung 3.8-1: Gesamteffizienz von konventionellen und energieeffizienten Pumpensystemen 231
Abbildung 3.8-2: Anlagenkennlinie im Q/H Diagramm 236
Abbildung 3.8-3: Pumpenkennlinie einer Kreiselpumpe 237
Abbildung 3.8-4: Klassifizierung von Strömungs- und Verdrängerpumpen 239

Abbildung 3.8-5: Typische Kennlinien einer Kreiselpumpe. Förderhöhe, Leistungsaufnahme, Wirkungsgrad und NPSH (Haltedruckhöhe) werden als Funktion des Förderstroms dargestellt ... 242
Abbildung 3.8-6: Betriebsbereich von Wasserpumpen nach Förderstrom in Abhängigkeit der Förderhöhe ... 243
Abbildung 3.8-7: Eigenschaften von Regelungsmethoden ... 248
Abbildung 3.8-8: Beispielhafte Kostenverteilung einer Kreiselpumpe über einen gesamten Lebenszyklus ... 251
Abbildung 3.9-1: Veranschaulichung der verschiedenen Aufgaben lufttechnischer Systeme ... 256
Abbildung 3.9-2: Prüfschema zur Optimierung des Energieverbrauchs in der Prozesslufttechnik am Beispiel einer Absauganlage ... 257
Abbildung 3.9-3: Ventilator-Kennlinie ... 261
Abbildung 3.10-1: Darstellung der Luftarten ... 288
Abbildung 3.11-1: Einsparpotentiale bei Innenbeleuchtung ... 295
Abbildung 3.11-2: Veranschaulichung der Definitionen lichttechnischer Größen ... 296
Abbildung 3.11-3: Lichtstärkeverteilungskurve einer LED-Lampe mit 10 Watt und Glühlampe mit 60 Watt ... 297
Abbildung 3.11-4: Gütekriterien guter Beleuchtung ... 299
Abbildung 3.11-5: Übersicht über die gebräuchlichsten Lichtquellen ... 304
Abbildung 3.11-6: Energieeffizienzklassen für Lampen ... 308
Abbildung 3.11-7: Sanierungsoptionen und Einsparpotential ... 310
Abbildung 3.11-8: Lebenszykluskosten über 20 Jahre verschiedener Leuchten ... 317
Abbildung 3.12-1: Vorgehensweise bei der Auswahl von Trocknungsverfahren, Trocknerbauform und Trocknerauslegung ... 325
Abbildung 3.12-2: Möglicher Aufbau eines Lösungskataloges zur Auswahl von Trocknungsverfahren und Trocknerbauform ... 326
Abbildung 3.12-3: Auswahl von Trocknern nach Eigenschaften des Trocknungsgutes ... 327
Abbildung 3.12-4: Bandbreiten für den spezifischen Energieverbrauch verschiedener Typen von Trocknern während der Verdampfung von Wasser (zum Vergleich $qth = 0{,}68kWhkg$) ... 330
Abbildung 3.12-5: Bandbreiten für den spezifischen Energiebedarf verschiedener Typen von Konvektionstrocknern ... 331
Abbildung 3.12-6: Vergleich des Energiebedarfs zwischen mechanischer und thermischer Trennung (Trocknung), Bezugsvolumen ist jeweils das Volumen des Ausgangs-Stoffgemisches ... 333

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.10-1: Orientierungswerte für die angemessene Ausrüstung mit Systemen zur Energiedatenerfassung ... 58
Tabelle 2.11-1: Hinweise und Details zu verschiedenen Energie-Audit-Typen nach ISO 50.002:2014-07 ... 62
Tabelle 2.16-1: Umsatzbezogene Kennziffern ... 74
Tabelle 2.16-2: Bruttowertschöpfungsbezogene Kennziffern ... 74

Tabelle 2.16-3: Beschäftigtenbezogene Kennziffern ... 74
Tabelle 2.16-4: Benchmark für EPI Prozesskälteerzeugung und -bewahrung ... 77
Tabelle 2.16-5: Benchmark für gewerbliche Kühlschränke ... 77
Tabelle 3.1-1: Maßnahmen/Techniken zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen ... 85
Tabelle 3.1-2: Brennstoffspezifische Konstanten für verschiedene Brennstoffe ... 89
Tabelle 3.1-3: Beispielrechnung Verbrennungsluftvorwärmung ... 93
Tabelle 3.1-4: Übersicht über Brenner für Industrieöfen ... 100
Tabelle 3.1-5: Einsatzmatrix verschiedener Modernisierungsoptionen für Heizkessel ... 103
Tabelle 3.1-6: Ökodesign- Mindestanforderungen an das Luftverhältnis ... 103
Tabelle 3.1-7: Einsparungen bei Installation von O_2- Regelung, O_2/CO-Regelung und Drehzahlregelung bei einem Heizkessel mit umgebauten 5 MW-Zweistoffbrenner ... 107
Tabelle 3.1-8: Vergleich der Amortisation der Reduktion des Luftüberschusses für unterschiedliche Ofenarten und -größen ... 107
Tabelle 3.1-9: Übersicht über Feuerfestmaterialien und Hochtemperaturdämmstoffe ... 113
Tabelle 3.1-10: Überblick über die Verteilung der (normierten) Material- und Montagekosten sowie Wandverluste für drei Beispiele der Dämmung von Industrieöfen ... 114
Tabelle 3.2-1: Einsparmaßnahmen und jeweils zugehöriges Einsparpotential bezüglich des nicht optimierten Grundprozesses ... 119
Tabelle 3.2-2: Maßnahmen/Techniken zur Erhöhung der Energieeffizienz von Dampfsystemen ... 122
Tabelle 3.2-3: Mittels Economiser rückgewinnbare Leistung ... 130
Tabelle 3.2-4: Amortisationszeit verschiedener Maßnahmen der Kesselmodernisierung ... 131
Tabelle 3.2-5: Verluste durch Absalzung ... 137
Tabelle 3.2-6: Kosten Absalzlaugenentspanner ... 140
Tabelle 3.2-7: Berechnungsbeispiel Wärmeverlust pro Zyklus/Anlauf ... 144
Tabelle 3.2-8: Wärmeverluste von Dampfleitungen ... 147
Tabelle 3.2-9: Erfahrungswerte Kondensatanfall, 100 m Rohrleitung, 100 mm Wärmedämmung ... 149
Tabelle 3.2-10: Leckageverluste durch undichte Kondensatableiter ... 149
Tabelle 3.2-11: Exemplarische Liste der Fehlerbeschreibung bei der Begehung ... 150
Tabelle 3.6-1: Maßnahmen zur Energieeinsparung bei motorgetriebenen Subsystemen ... 194
Tabelle 3.7-1: Häufig anwendbare Einsparmaßnahmen in Druckluftsystemen, nach (145), aktualisiert durch ... 198
Tabelle 3.7-2 Vor- und Nachteile Druckluftantriebe in der Handhabungstechnik ... 200
Tabelle 3.7-3 Beispiele für mögliche Alternativlösungen ... 200
Tabelle 3.7-4 Beispielrechnung: Kosten im Verhältnis zum Innendurchmesser einer Druckluftleitung von 200 m Länge bei 6 bar Systemdruck ... 209
Tabelle 3.7-5: Berechnungsbeispiel der Kompressorauslegung mit Lebenszykluskosten ... 224
Tabelle 3.7-6: Beispiel von Kosteneinsparungen (überschlägige Betrachtung) ... 227
Tabelle 3.8-1: Übersicht über die Bewertungsstufen ... 233
Tabelle 3.8-2: Eignungsbereiche gebräuchlicher Pumpentypen ... 241

Tabelle 3.8-3: Abnahmeklassen der Pumpenprüfung und die entsprechende Toleranz 243
Tabelle 3.8-4: Statische Kapitalrenditen aller Leuchtturmprojekte 252
Tabelle 3.9-1: Technisch häufig angewendete Dichtheitsklassen bei Luftverteilungen 259
Tabelle 3.9-2: Ab 2015 geltende Wirkungsgrade für Ventilatoren gemäß Ökodesign-Richtlinie Nr. 327/2011 Angabe der Stützwerte* 262
Tabelle 3.10-1: Mindestwerte der Lufttemperatur in Arbeitsräumen 268
Tabelle 3.10-2: Mindestanforderungen an Rohrdämmung von Wärmetransportsystemen 273
Tabelle 3.10-3: Heizwertbezogene Primärenergiefaktoren 275
Tabelle 3.10-4 Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe bezogen auf den Heizwert inclusive Vorketten..... 276
Tabelle 3.10-5: Arten von Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsystemen 286
Tabelle 3.10-6: Mindestabscheidegrad basierend auf der Außenluftqualität (Feinstaub) 289
Tabelle 3.11-1: Beleuchtungsstärken-Tabelle laut Arbeitsstättenrichtlinie 298
Tabelle 3.11-2: Farbwiedergabe-Index R_a verschiedener Leuchtmittel 302
Tabelle 3.11-3: Gesetzliche Vorgaben der lichttechnischen Güte für die Beleuchtung im Innenbereich und Freien 311
Tabelle 3.12-1: Erwähnung spezifisch bedeutsamer Trocknungsverfahren in technologiespezifischen BREF‘s (Auszug, exemplarisch)..... 320
Tabelle 3.12-2: Grundsätzliche Einflussmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz..... 334
Tabelle 3.12-3: Vergleich von Wirbelschichttrocknern (konventionell und modifiziert) mit anderen, konkurrierenden Trocknern für partikelförmige Feststoffe..... 336
Tabelle 4.3-1: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen 342
Tabelle 4.3-2: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Dampfsystemen..... 343
Tabelle 4.3-3: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz bei von Elektromotoren angetriebenen Systemen..... 349
Tabelle 4.3-4: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Druckluftsystemen 350
Tabelle 4.3-5: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Pumpensystemen..... 351
Tabelle 4.3-6: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Lufttechnik 353
Tabelle 4.3-7: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz bei HVAC-Systemen..... 354
Tabelle 4.3-8: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Beleuchtungssystemen..... 356
Tabelle 4.3-9: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Trocknungssystemen..... 359

Abkürzungsverzeichnis

AC	**(Alternating Current), Wechselstrom**
AFD	**(Adjustable Frequency Drive), frequenzvariabler Antrieb**
AIG	**Arbeitsgemeinschaft Instandhaltung Gebäudetechnik**
Al-RCF	**(Aluminosilicate Refractory Ceramic Fibres), Feuerfeste Keramikfasern aus Aluminosilikat**
ASR	**Arbeitsstättenrichtlinie**
BImSchV	**Bundes-Immissionsschutzverordnung**
BMU	**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit**
BMWi	**Bundesministerium für Wirtschaft und Energie**
BREF	**(Best Available Techniques Reference Document), BVT-Merkblatt**
BVT	**Beste Verfügbare Technik**
BVU	**Bidirektionale ventilatorgestützte Lüftungsanlage**
CAS	**(Compressed Air Systems), Druckluftsysteme**
CBA	**Cost-benefit analysis**
cd	**Candela**
CEN	**(Comité Européen de Normalisation), Europäisches Komitee für Normung**
CIE	**(Commission International de l'Eclairage), Internationale Beleuchtungskommission**
COP	**(Coefficient of Performance), Leistungszahl im Heizbetrieb**
DC	**(Direct Current), Gleichstrom**
Dena	**Deutsche Energie-Agentur GmbH**
DIN	**Deutsches Institut für Normung, Deutsche Industrienorm**
DS	**Dunkelstrahler**
DSP	**Deckenstrahlplatten**
E	**Beleuchtungsstärke**
EBPD	**(Energy Performance of Buildings Directive), Europäische Gebäuderichtline**
EC-Motor	**„Electronically commutated“ Motor**
ECO	**(Economiser), Speisewasservorwärmer**
EEI	**Energie-Effizienz-Index oder Energie-Effizienz-Indikator (anderer Kontext)**
EEM	**Energieeffizienter Motor**
EER	**(Energy Efficiency Ratio), Leistungszahl im Kühlbetrieb**
EEV	**Elektronisches Expansionsventil**
EG	**Europäische Gemeinschaft**
EGS	**Ecosystem Goods and Services**
ElektroG	**Elektro- und Elektronikgerätegesetz**

EMAS	**Eco-Management and Audit Scheme, Öko-Audit**
E_{min}	**Minimale Beleuchtungsstärke**
E_m	**Wartungswert der Beleuchtungsstärke**
EMDS	**(Electric Motor - Drive System), elektromotorisch angetriebenes System**
EN	**Europäische Norm**
ENE	**(Energy Efficiency), Energieeffizienz**
ENE BREF	**(Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency), Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken (BVT) für Energieeffizienz**
EnEV	**Energieeinsparverordnung**
EnMS	**Energiemanagementsystem**
EPI	**(Energy Performance Indicator), Energieleistungskennzahl**
ErP	**(Energy-related Products), energieverbrauchsrelevante Produkte**
E_v	**vertikale Beleuchtungsstärke**
EVG	**elektronisches Vorschaltgerät**
EVU	**Energieversorgungsunternehmen**
E_z	**zylindrische Beleuchtungsstärke**
F/F	**Flüssigkeit/Flüssigkeit**
FLOX	**Flammenlose Oxidation**
F/G	**Flüssigkeit/Gas**
FU	**Frequenzumrichter**
G/G	**Gas/Gas**
GuD	**Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk**
GWP	**(Global Warming Potential), Erderwärmungspotenzial**
HELCOM	**Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area).**
HS	**Hellstrahler**
HVAC	**(Heating, Ventilation and Air Conditioning), Heizung, Lüftung und Klimatisierung**
HTW	**Hochtemperaturwolle**
IE	**(International Efficiency class), Internationale Effizienzklasse**
IE1	**Standard Effizienz**
IE2	**Hohe Effizienz**
IE3	**Premium Effizienz**
IE4	**Super Premium Effizienz**
IE5	**Ultra Premium Effizienz**
IEA	**(International Energy Agency), Internationale Energieagentur**
IED	**(Industrial Emissions Directive), Industrieemissionsrichtlinie**

IDA-C1	**Konstant laufende Anlagen**
IDA-C2	**Manuell regelbare Anlagen**
IDA-C3	**Selbstregelnde Anlagen mit vorgegebenem Zeitplan**
IDA-C4	**Belegungsabhängig geregelte Anlagen mit Auslöser**
IDA-C5	**Bedarfsabhängig geregelte Anlagen**
IDA-C6	**Sensorisch erfasste bedarfsabhängig geregelte Anlagen**
IGCC	**(Integrated Gasification Combined Cycle), Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung**
ISO	**(International Organization for Standardization), Internationale Organisation für Normung, Internationale Norm**
JAZ	**Jahresarbeitszahl**
KMU	**Kleine und mittlere Unternehmen**
KWK	**Kraft-Wärme-Kopplung**
KWKK	**Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung**
KVG	**Konventionelle Vorschaltgeräte**
LED	**(Light Emitting Diode), Leuchtdiode**
LiTG	**Deutsche Lichttechnische Gesellschaft**
LCC	**(Life Cycle Costs), Lebenszykluskosten**
LCP	**(Large Combustion Plants), Großfeuerungsanlagen**
LH	**Luftheizer / Lufterhitzer**
LLMF	**(Lamp Lumen Maintenance Factor), Lampenlichtstrom-Wartungsfaktor**
LMF	**(Luminaire Maintenance Factor), Leuchtenwartungsfaktor**
lm	**Lumen**
LNG	**(Liquefied Natural Gas), Flüssigerdgas/ verflüssigtes Erdgas**
LSF	**(Lamp Survival Factor), Lampenlebensdauerfaktor**
LuVo	**Luftvorwärmer**
LVB	**Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH**
lx	**Lux**
MA	**Mitarbeiter**
MEI	**Mindest-Effizienz-Index**
MF	**(Maintenance Factor), Wartungsfaktor**
MVR	**(Mechanical Vapor Recompression), Mechanische Brüdenkompression**
NACE	**(Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne), Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft**
NEC	**(National Emission Ceilings Directive), Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe**

NPSH	**(net positive suction head), Haltedruckhöhe**
OLED	**(organic light emitting diode), organische Leuchtdiode**
ODA	**Außenluft (DIN EN 16798-3)**
ODP	**(Ozon Depletion Potential), Ozonzerstörungspotenzial**
PCM	**(Phase Change Material), Phasenwechselmaterial**
PM	**Permanent-Magnet**
PN	**(Pressure Nominal), Nenndruck**
Ra	**allgemeiner Referenzindex, Farbwiedergabeindex**
REACH	**(Regulation concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe**
R_G	**Blendwert**
RGB-Mischung	**Mischung des Lichtes von roten, grünen und blauen LED**
RMF	**(Room Maintenance Factor), Raumwartungsfaktor**
RLT	**Raumlufttechnische Anlagen**
RoHS	**(Restriction of certain Hazardous Substances Directive), Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten**
ROI	**(Return on Investment), Kapitalrendite/ Anlagenrendite**
SCR	**(Selective Catalytic Reduction), Selektive Katalytische Reduktion**
SER	**(Specific Energy Requirement), spezifischer Leistungsbedarf**
SEER	**(Saisonal Energy Efficiency Ration), jahreszeitbedingte Leistungszahl im Kühlbetrieb**
SP	**Speichermedium**
SPEC	**(Specification), Spezifikationen**
STIG	**(Steam Injected Gas Turbine), „Cheng-Prozess”, Gasturbine mit Abwärmenutzung durch Dampferzeugung und Rückführung in die Brennkammer**
SUP	**Zuluft (DIN EN 16798-3)**
SVHC	**(Substances of Very High Concern), besonders besorgniserregende Stoffe**
TA Luft	**Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft**
Tcp	**Farbtemperatur**
TDS	**(Total Dissolved Solids), Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen**
THG	**Treibhausgas**
TEV	**Thermostatisches Expansionsventil**
TOC	**(Total Organic Carbon), gesamter organischer Kohlenstoff**
UGR	**(Unified Glare Rating), vereinheitlichte Blendungsbewertung**
UMS	**Umwelt-Managementsystem**

UNEP	**(United Nations Environment Programme), Umweltprogramm der Vereinten Nationen**
Uo	**Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke**
UVU	**Unidirektionale ventilatorgestütze Lüftungsanlagen**
VDI	**Verein Deutscher Ingenieure**
VDMA	**Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau**
VSD	**(Variable Speed Drive), drehzahlregelbarer Antrieb**
VVG	**verlustarmes Vorschaltgerät**
WHG	**Wasserhaushaltgesetz**
WQ	**Wärmequelle**
WS	**Wärmesenke**
WT	**Wärmeträger**
Zr-RCF	**(Zirconia Aluminosilicate Refractory Ceramic Fibres), feuerfeste Keramikfasern aus Zirkoniumaluminosilikat**

Zusammenfassung

Veranlassung und Aufgabenstellung

Querschnittstechnologien bilden in der Industrie oft die Basis für spezielle technologische Prozesse oder sind wichtige Komponenten von komplexen Anlagensystemen. Sie sind somit für mehrere Anwendungsgebiete bzw. Wirtschaftszweige relevant. Ein großer Teil des Energieverbrauchs in der Industrie ist Querschnittstechnologien zuzuordnen. Typisch für Querschnittstechnologien ist, dass Endenergieformen, wie Brennstoffe oder Elektroenergie, in die für konkrete Produktionstechnologien erforderlichen Nutzenergieformen umgewandelt werden. Nutzenergieformen sind beispielsweise mechanische Bewegungen oder Prozesswärme. Häufig werden damit wichtige Produktionsvoraussetzungen geschaffen, zum Beispiel ein Temperaturniveau oder eine Luftqualität eingestellt.

Auf Grund der weiten Verbreitung von Querschnittstechnologien besitzen Verbesserungen der Energieeffizienz bei solchen Prozessen ein hohes Multiplikationspotenzial. Allerdings wurde in der Vergangenheit in den Planungsprozessen für Industrieanlagen der Energieeffizienz von Querschnittstechnologien oft wenig Beachtung geschenkt, weil sie im konkreten Einzelfall häufig nur Nebenanlagen bzw. Infrastruktur zugeordnet werden.

Um der Bedeutung von Querschnittstechnologien für den Energieverbrauch in der Industrie Rechnung zu tragen, verabschiedete die EU-Kommission im Februar 2009 ein eigenständiges Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken bezüglich der Energieeffizienz von Querschnittstechnologien (1). Seit 2009 sind bei vielen der beschriebenen Querschnittstechnologien Weiterentwicklungen zu beobachten, welche zum Teil mit bedeutenden Verbesserungen der Energieeffizienz verbunden sind. Eine entsprechende Aktualisierung dieses Merkblattes wird deshalb im EU-Rahmen vorbereitet.

Zur Vorbereitung des Aktualisierungs-Prozesses auf EU-Ebene hat das Umweltbundesamt als Grundlage für einen deutschen Beitrag ein Forschungsvorhaben in Auftrag gegeben. Der vorliegende Abschlussbericht dokumentiert die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens mit dem Titel „Aktualisierung des BVT-Merkblattes zur Energieeffizienz von Querschnittstechnologien“.

Gegenstand des Forschungsvorhabens war die Aktualisierung wesentlicher, jedoch nicht aller Kapitel des BVT-Merkblattes.

Die einzelnen von der Überarbeitung umfassten Hauptkapitel der zweiten Gliederungsebene sind inhaltlich jeweils in sich abgeschlossen und verständlich. Der vorliegende deutschsprachige Abschlussbericht soll vor allem als Informationsquelle für Planungs- und Genehmigungsverfahren dienen.

Als weiteres Ergebnis des Forschungsvorhabens wurden alle Kapitel auch in die englische Sprache übersetzt, um unmittelbar im Aktualisierung-Prozess auf EU-Ebene verwendet werden zu können.

Als drittes Ergebnis wurden die Inhalte der von der Aktualisierung erfassten Kapitel des Abschnittes 3 in verdichteter Form in einem separaten Dokument nochmals zusammengefasst. Dieses Dokument soll eine in sich eigenständige Anlage zum hier vorliegenden Forschungsbericht sein.

Es ist speziell für den Zweck der Verwendung in Genehmigungsverfahren in Deutschland erarbeitet worden. Neben den wichtigsten Merkmalen der besten Verfügbaren Technik bei den jeweiligen Querschnittstechnologien sind darin Vorschläge beschrieben, welche Informationen in den Unterlagen von Vorhabensträgern bzw. in den behördlichen Bescheiden zu der jeweiligen Querschnittstechnologie enthalten sein sollten. Damit soll eine sinnvolle und angemessene Berücksichtigung von Belangen der Energieeffizienz in Planungs- und Genehmigungsverfahren unterstützt werden.

Anwendungsbereich dieses Dokuments

Die IVU-Richtlinie verlangt, dass alle Anlagen so betrieben werden, dass die Energie effizient eingesetzt wird. Dies wird im deutschen Bundesimmissionsschutzgesetz durch das Energieeffizienzgebot in § 5 (1) umgesetzt. Bislang wurde dieses Gebot für umweltrechtliche Genehmigungsverfahren jedoch noch nicht umfassend in untergesetzlichen Vorschriften oder Richtlinien konkretisiert.

Es gehört zu den grundlegenden Strategien für die Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen, eine bestmögliche Energieeffizienz bereits auf der Ebene von Planungs- und Genehmigungsverfahren zu fördern. Für diesen Zweck sollen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens einen Beitrag als Orientierungshilfe leisten.

Deshalb enthält dieser Bericht Anleitungen und Schlussfolgerungen zu den Energieeffizienztechniken, die als kompatibel angesehen werden mit der besten verfügbaren Technik für alle Anlagen, die von der IVU-Richtlinie erfasst werden. Dieses Dokument gibt auch Hinweise auf BVT-Merkblätter und rechtsverbindliche Vorschriften sowie international anerkannte Normen und Richtlinien, in denen besondere Techniken zur Energieeffizienz bereits im Detail abgehandelt wurden und die auf spezifische Sektoren angewandt werden können.

Beispiele dafür sind

- das LCP-BVT-Merkblatt (Beste verfügbare Technik bei Großfeuerungsanlagen): Es behandelt auch wesentliche Aspekte der Energieeffizienz in Bezug auf Verbrennungsprozesse in Großfeuerungsanlagen. Diese Techniken können auch in Verbrennungsanlagen mit einer Kapazität von unter 50 MW angewendet werden;
- das ICS- BVT-Merkblatt (Beste verfügbare Technik bei industriellen Kühlsystemen).

Der vorliegende Bericht

- enthält keine Informationen, speziell über Prozesse und Aktivitäten, die von anderen BVT-Merkblättern abgedeckt werden,
- verweist nicht auf sektorspezifische BVT.

Eine Zusammenfassung von sektorspezifischen BVT für die Energieeffizienz aus anderen BVT-Merkblättern kann jedoch zur Information im EIPPCP-Arbeitsplatz(„workspace“) (2) gefunden werden.

Das BVT-Merkblatt zur Energieeffizienz von Querschnittstechnologien wurde mit dem Ziel entwickelt, die Vorschriften der IVU-Richtlinie zur Energieeffizienz zu fördern. Es geht vom effizienten Einsatz von Energie als erster Priorität aus und betrachtet nicht die Bereitstellung von Energie aus erneuerbaren bzw. nachhaltigen Energiequellen.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die Beschränkung auf Energieeffizienz zur vollständigen Bewertung der Nachhaltigkeit technischer Systeme nicht ausreicht. Beispielsweise kann ein Prozess mit geringerer Energieeffizienz, der mit regenerativen Energiequellen und/oder Abwärme versorgt wird, nachhaltiger sein kann als ein energieeffizienterer Prozess, für den Primärenergie aus fossilen Brennstoffen eingesetzt wird.

Energieeffizienz ist ein spezieller, sogenannter horizontaler Aspekt bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren. Deshalb wird in diesem Bericht bei den dargestellten Technologien nicht vertiefend auf andere umweltbezogene Auswirkungen eingegangen. Solche Auswirkungen können beispielsweise Ressourcenverbrauch und Emissionen sein.

Struktur und Inhalt dieses Dokuments

Soweit möglich und angemessen, werden für manche Techniken einige Richtwerte für mögliche Energieeinsparungen angegeben, die für BVT in Betracht zu ziehen sind. Teilweise werden diese mit Beispielen ergänzt.

Um eine einfache Einordnung der Aktualisierung in die Struktur des BVT-Merkblattes zu ermöglichen, wurde die Gliederung des BVT-Merkblattes in der originalen Fassung von 2009 für den vorliegenden Forschungsbericht ab Kapitel 2 weitgehend übernommen. Kapitel, welche nicht Bestandteil der Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens waren, sind als Gliederungspunkt, aber ohne Textinhalt, im Bericht enthalten.

Kapitel 1 des ursprünglichen BVT-Merkblattes enthält überwiegend allgemeine und theoretische Grundlagenbetrachtungen zur Energieeffizienz. Diese sind kaum von Aktualisierungsbedarf betroffen und deshalb nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens. Im vorliegenden Bericht beinhaltet Kapitel 1 die Einführung in die Aufgabenstellung des UBA für das bearbeitete Forschungsvorhaben.

In Kapitel 2 sind ausgewählte Kapitel des ursprünglichen BVT-Merkblattes in überarbeiteter Form enthalten. Die darin behandelten Themen betreffen vor allem organisatorische Aspekte, die auf der betrieblichen bzw. der Anlagenebene angewendet werden können. Zu den Themen Energiemanagement, Überwachung und Messung, Energieaudits und Energieanalyse sowie Benchmarking sind in den letzten 10 Jahren bedeutende Weiterentwicklungen erfolgt. Diese haben bereits eine erhebliche praktische Bedeutung erlangt, konkretisieren die beste verfügbare Technik somit auf einem neuen Niveau.

Energiemanagementsysteme auf der Grundlage der internationalen Normenreihe EN ISO 50001 ff. sowie Energieaudits nach der Norm DIN EN 16247-1 sind als beste verfügbare Technik etabliert.

Weitere Techniken, die ein Energiemanagementsystem und Energieaudits unterstützen, profitieren von der dynamischen Entwicklung in der Informationstechnik und Messtechnik. Für die Überwachung und Messung des Energieverbrauchs ist es in energieintensiven Branchen beste verfügbare Technik, mindestens 90 % des Gesamtenergieverbrauchs über komplexe Messsysteme bis auf die Ebene größerer Einzelverbraucher oder Verbrauchergruppen detailliert und kontinuierlich zu erfassen. Die dabei entstehenden großen Datenmengen können mittels speziellen Softwarelösungen für eine Analyse und Bewertung verdichtet und aufbereitet werden.

Die Bewertung der Daten wiederum wird unterstützt durch die Anwendung von Kennzahlen. Die Methoden zur Kennzahlbildung sowie die Anwendung von Benchmarks befinden sich im Zusammenhang mit den erweiterten informationstechnischen Möglichkeiten ebenfalls in einem Prozess der ständigen Weiterentwicklung bzw. Aktualisierung. Durch eine bessere Aufschlüsselung der Energiedaten auf einzelne Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen wird auch die Bildung prozessspezifischer Kennzahlen möglich. Derartige Kennzahlen sind gerade im Bereich der Querschnittstechnologien oft unternehmens- und branchenübergreifend vergleichbar, was die Analyse und die Identifizierung von eventuellen Schwachstellen erleichtert.

Die im vorliegenden Bericht enthaltenen Beispiele sollen Unternehmen ermutigen, solche Kennzahlen anzuwenden und eigene Daten für Benchmarks zur Verfügung zu stellen. Damit werden kontinuierliche Verbesserungsprozesse, in diesem Fall die Verbesserung der Energieeffizienz, wirksam unterstützt.

Kapitel 3 betrachtet Techniken für die Energieeffizienz in den am häufigsten und in vielen Industriebranchen angewendeten Systemen, Prozessen und Ausrüstungen, die in größeren Mengen Energie einsetzen bzw. umwandeln. Diese sogenannten Querschnittstechnologien, für welche der vorliegende Bericht Informationen zu den besten verfügbaren Techniken enthält, sind

- Feuerungsanlagen,

- Dampfsysteme,
- Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme,
- Elektromotorische Antriebssysteme,
- Pumpensysteme,
- Druckluftsysteme,
- Industrielle Lufttechnik (Prozesslufttechnische Anlagen),
- Heizung-, Lüftungs- und Klimaanlagen (Raumlufttechnische Anlagen),
- Beleuchtung,
- Trocknungsprozesse.

Einzelne dieser Querschnittstechnologien können auch Bestandteil von speziellen komplexen Prozessen sein, für die bereits sogenannte vertikale BVT-Merkblätter veröffentlicht worden sind (wie z. B. für Schmelzöfen). In diesen Fällen sind vorrangig die entsprechenden vertikalen BVT-Merkblätter anzuwenden.

Die Unterkapitel zum Kapitel 3 dieses Berichtes weisen zum Teil sehr umfassende Änderungen gegenüber dem jeweiligen Kapitel im ursprünglichen BVT-Merkblatt auf. Nur in einigen wenigen Fällen betreffen die Aktualisierungen lediglich die Fortschreibung von Zahlenwerten, welche z. B. die höhere Effizienz mittlerweile bester verfügbarer Techniken ausdrücken.

In einigen Unterkapiteln wurden neuartige technische Lösungen in die Darstellung aufgenommen, wenn diese seit 2009 klar erkennbar als neue beste verfügbare Techniken identifiziert werden konnten. Dies trifft beispielsweise auf Beleuchtungen mit LED-Technik zu.

Neu eingegliedert wurde der Technologiebereich der industriellen Lufttechnik (Prozesslufttechnik) als gleichrangiges Kapitel wie die anderen Querschnittstechnologien.

Die bedeutendste Änderung stellt die vom Anwendungsziel ausgehende Betonung des Systemgedankens für die jeweiligen Technologien dar. Diese Änderung ist das Ergebnis der Auswertung vieler Erfahrungen aus der praktischen Anwendung von Querschnittstechnologien. Demnach ist die höchste Energieeffizienz nicht allein durch den Einsatz einzelner, energetisch optimierter Aggregate bzw. eindimensionale verfahrenstechnische Prozesse erreichbar. Der Bilanzkreis für die Bewertung der Energieeffizienz und dementsprechend der Planungsraum für die Lösung der technischen Aufgabenstellung müssen ausreichend groß gewählt werden. Damit soll gewährleistet werden, dass alle wichtigen Einflüsse auf die Energieumwandlungs- und Transportketten berücksichtigt werden.

Für die im Einzelnen betrachteten Querschnittstechnologien wurde eine jeweils ähnliche Systematik der untersetzenden Gliederungspunkte gewählt. Es werden hauptsächlich folgende Aspekte dargestellt:

- Anwendungsbereiche der jeweiligen Querschnittstechnologie in der Industrie,
- Anteil bzw. Größenordnung des von dieser Querschnittstechnologie beeinflussten Energieeinsatzes in Bezug zum Energieverbrauch des Industriesektors insgesamt,
- technologische Schritte zwischen der Nutzenergieebene (unmittelbare Anwendung) und der eingesetzten Endenergie,
- soweit relevant, Hinweise auf alternative technologische Lösungen in der Anwendungsebene (z. B. elektrische an Stelle von pneumatischen Antrieben),
- soweit vorhanden, Beschreibung der technischen Kriterien für beste verfügbare Technik bei den einzelnen technologischen Schritten,
- soweit relevant, Beschreibung von Ansatzpunkten für technologieübergreifende Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz (z. B. Abwärmeerfassung und -nutzung),
- Untersetzung mit Beispielen.

Die Mehrzahl der Planungs- und Genehmigungsverfahren in der Praxis sind Änderungen oder Erweiterungen eines vorhandenen Bestandes technischer Anlagen. Naturgemäß ist ein vorhandener, bereits längere Zeit in Nutzung befindlicher Bestand auch in Bezug auf die Energieeffizienz oft nicht kompatibel mit der aktuell besten verfügbaren Technik. Aus diesem Grund sind in den einzelnen Kapiteln teilweise auch Informationen zur Optimierung von Bestandssystemen integriert, weil dadurch oft erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz erschlossen werden können.

Für alle in Kapitel 3 beschriebenen Querschnittstechnologien gehören folgende Prinzipien zur besten verfügbaren Technik:

1. Bewertungs- und Planungsprozesse gehen methodisch vom Energiebedarf in der Anwenderebene (Nutzenergieebene) aus, also entgegengesetzt der Richtung des Energieflusses bei der Energieumwandlung aus der jeweiligen eingesetzten Endenergie. Die technische Anlage bzw. den Prozess zur Energieumwandlung zu dimensionieren, ist der letzte methodische Schritt.
2. Die entsprechend den Fortschritten in der Informationstechnik entstandenen Möglichkeiten der Messung und Verarbeitung energierelevanter Daten werden bei der Planung im Hinblick auf die Steuerung und Optimierung der Prozesse berücksichtigt.
3. Die Planung von neuen technischen Systemen erfolgt mit Anwendung moderner Planungstechniken (softwaregestützt, Vorab-Simulation der in den Systemen ablaufenden Prozesse etc.). Die Auslegungskriterien, Randbedingungen und Planungsergebnisse werden angemessen und nachvollziehbar dokumentiert und dem Betreiber der Anlage zur Verfügung gestellt.
4. Die Überwachung des laufenden Betriebs, auch in Bezug auf den Energieverbrauch und eine angepasste Wartung/Instandhaltung, sind entscheidende Voraussetzungen, dass das Niveau der Energieeffizienz langfristig aufrechterhalten wird. Dadurch können Abweichungen von einer energieeffizienten Betriebsweise schnell erkannt und korrigiert werden. Eine angemessene Überwachung, Wartung und Instandhaltung muss deshalb betriebsorganisatorisch sichergestellt werden.

Beste verfügbare Techniken

Das BVT-Kapitel dieses Berichtes (Kapitel 4) identifiziert diejenigen Techniken, die auf einer europäischen Ebene als BVT angesehen werden, und zwar auf der Grundlage der Informationen in den Kapiteln 2 und 3. Der folgende Text ist eine Zusammenfassung dieses BVT-Kapitels. Im vollständigen Kapitel 4 ist der definitive Text für BVT-Schlussfolgerungen enthalten.

Auf die Darstellung des im originalen BVT-Merkblatt beschriebenen Kontextes zur Berücksichtigung der BVT bei Planungs- und Genehmigungsverfahren wird an dieser Stelle verzichtet (1).

Die im vorliegenden Dokument enthaltenen Informationen sind als Unterstützung bei der Bestimmung der BVT für Energieeffizienz in speziellen Fällen gedacht. Bei der Bestimmung der BVT und bei den auf BVT basierenden Genehmigungsauflagen sollte stets das Gesamtziel eines hohen Schutzniveaus für die Umwelt als Ganzes einschließlich der Energieeffizienz beachtet werden.

Im Kapitel 4 werden die Techniken aufgeführt, die allgemein den Anforderungen an die besten verfügbaren Techniken entsprechen. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass dieser Bericht keine Energieeffizienzwerte für Genehmigungen vorschlägt. Es ist davon auszugehen, dass neue Anlagen so ausgelegt werden können, dass sie gleich gute oder bessere als die hier präsentierten BVT-Werte erreichen. Es wird in vielen Fällen auch möglich sein, dass sich bestehende Anlagen unter der Voraussetzung der technischen und wirtschaftlichen Anwendbarkeit der Techniken den BVT-Niveaus annähern oder sie übertreffen könnten.

Die in Kapitel 4 benannten Techniken werden nicht notwendigerweise für alle Anlagen geeignet sein.

Es ist wichtig, die Bedeutung der Energieeffizienz im Auge zu behalten. Allerdings können bestimmte Techniken, die zu einer hohen Energieeffizienz führen, für andere Schutzgüter der Umwelt nachteilige Auswirkungen haben. Diese Nachteile können im Rahmen einer übergeordneten Abwägung größer sein als der Vorteil, der sich aus der höheren Energieeffizienz ergibt. Als Folge daraus

- kann es sein, dass es nicht möglich ist, die Energieeffizienz aller Tätigkeiten und/oder Systeme in einer Anlage gleichzeitig zu maximieren;
- kann es sein, dass es nicht möglich ist, sowohl die Gesamt-Energieeffizienz zu maximieren als auch anderen Verbrauch und Emissionen zu minimieren (z. B. kann es sein, dass es nicht möglich ist, in die Luft gehende Emissionen ohne den Einsatz von Energie zu reduzieren);
- kann es sein, dass die Energieeffizienz eines oder mehrerer Systeme nicht bis zum jeweiligen Maximum verbessert werden kann, um das Maximum an Effizienz für eine Anlage als Ganzes zu erzielen;
- ist es erforderlich, eine Balance zwischen der Maximierung der Energieeffizienz und anderen Faktoren, wie der Qualität des Produkts, der Stabilität des Prozesses, etc., zu halten;
- kann der Einsatz von nachhaltigen Energiequellen und/oder ‚Abfallwärme‘ oder überflüssiger Wärme nachhaltiger sein als der Einsatz von primären Brennstoffen, selbst dann, wenn die Energieeffizienz bei deren Einsatz geringer ist.

Energieeffizienz-Techniken werden deshalb als “Optimierung der Energieeffizienz“ vorgeschlagen.

In den meisten Fällen ist es wirtschaftlich sinnvoll, die Energieeffizienz zu optimieren. Innerhalb einer bestehenden Anlage ist die Umsetzung von BVT wegen der bestehenden Infrastruktur und der lokalen Umstände im Allgemeinen nicht so leicht. Die wirtschaftliche und technische Durchführbarkeit der Modernisierung dieser Anlagen muss in Betracht gezogen werden. In den Kapiteln 2 und 3 ist die Anwendbarkeit der Techniken berücksichtigt. Dies ist für jede BVT in Kapitel 4 zusammengefasst.

Allgemeine BVT zum Erreichen der Energieeffizienz auf Anlagenebene

Ein Schlüsselelement zur Erreichung von Energieeffizienz auf Anlagenebene ist ein formeller Leitungsansatz, d. h., der effiziente Umgang mit Energie wird als Aufgabe von der Unternehmensführung vorgegeben und ist organisatorisch in das Unternehmensmanagement integriert.

Die anderen BVT, die auf der Ebene des Standorts angewandt werden, unterstützen das Energiemanagement und geben mehr Details, um dies zu erreichen. Diese Techniken sind für alle Anlagen anwendbar. Der Umfang (z. B. Detaillierungsgrad, Häufigkeit der Optimierung, die jeweils in Betracht zu ziehenden Systeme) und die eingesetzten Techniken hängen ab vom Umfang und der Komplexität der Anlage und von den Energieverbräuchen der Anlagenteile.

Energiemanagement

BVT ist es, ein Energiemanagementsystem (EnMS) einzuführen und daran festzuhalten, das– für die lokalen Umstände passend - die folgenden Merkmale enthält:

- Engagement der Unternehmensspitze,
- Festlegen einer betrieblichen Energieeffizienz-Politik durch die Unternehmensspitze,
- Planung und Festschreibung der Ziele und Vorgaben,
- Durchführung von Maßnahmen unter besonderer Beachtung von

  - Struktur und Zuständigkeiten der Belegschaft, Ausbildung, Bewusstsein und Kompetenz, Kommunikation, Einbindung der Mitarbeiter, Dokumentation, effizienter Kontrolle der Prozesse, Wartungsprogrammen, Bereitschaft bei und Reaktion auf Notfälle, Sicherstellung der

Einhaltung der energieeffizienz-bezogenen gesetzlichen Vorgaben und Vereinbarungen (wo solche Vereinbarungen existieren).

- Setzen von Maßstäben (Benchmarking),
- Prüfung der Effizienz und Durchführung von Korrekturmaßnahmen unter besonderer Beachtung von

  - Überwachung und Messung, korrigierenden und vorbeugenden Maßnahmen, Erhaltung der Aufzeichnungen; unabhängiger (wo durchführbar) interner Prüfung, um festzustellen, ob das EnMS mit den geplanten Vorgaben übereinstimmt und ordnungsgemäß umgesetzt und gepflegt wurde.

- Überprüfung des EnMS und dessen weiterer Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit durch die Unternehmensspitze,
- bei der Auslegung einer neuen Anlage Berücksichtigung der Umweltauswirkung und des Energieverbrauches bis zur letztendlichen Außerbetriebnahme (Betrachtung des Lebenszyklus),
- Entwicklung von neuen energieeffizienten Verfahren und Verfolgung von Entwicklungen bei Energieeffizienztechniken.

Ein EnMS kann optional die folgenden Maßnahmen enthalten:

- Aufstellung und Veröffentlichung (mit oder ohne externe Bestätigung) eines regelmäßigen Berichtes über die Energieeffizienz, das einen alljährlichen Vergleich mit den Zielvorstellungen ermöglicht;
- das Managementsystem und das Prüfverfahren extern prüfen und bestätigen lassen;
- Umsetzung und Festhalten an einem auf nationaler oder internationaler Ebene akzeptierten freiwilligen Managementsystem für die Energieeffizienz (z. B. entsprechend DIN EN ISO 50001 ff.).

Energieeffizienzziele und -kennziffern festlegen und überprüfen

BVT ist es, Energieeffizienzkennziffern durch die Ausführung aller folgenden Maßnahmen festzulegen:

- Identifizierung geeigneter Energieeffizienzkennziffern für die Anlage und, wo erforderlich, die einzelnen Prozesse, Systeme und/oder Einheiten und Messung ihrer Änderungen im Lauf der Zeit oder nach der Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz;
- Identifizierung und Aufzeichnung der mit den Indikatoren verbundenen entsprechenden Systemgrenzen;
- Identifizierung und Aufzeichnung von Faktoren, die Veränderungen der Energieeffizienz der entsprechenden Prozesse, Systeme und/oder Einheiten verursachen können.

Für die Überwachung der Energieeffizienz von Anlagen und Prozessen werden im Allgemeinen die Verbräuche an Sekundär- oder Endenergie verwendet. In einigen Fällen kann es sein, dass mehr als eine Sekundär- oder Endenergie-Kennziffer für einen Prozess verwendet wird (z. B. sowohl Dampf als auch Elektrizität). Sekundär- oder Endenergie-Kennziffern können auch als Leitwert für die Entscheidung über die Verwendung (oder den Wechsel) von Energieträgern und Versorgern dienen. Andere Kennziffern, wie Primärenergie oder Kohlenstoffbilanz, können jedoch auch verwendet werden, um abhängig von den lokalen Umständen die Produktionseffizienz eines jeden Sekundärenergieträgers und seine multimedialen Wirkungen zu berücksichtigen.

Maßstäbe (Benchmarks) setzen

BVT ist es, systematische und regelmäßige Vergleiche mit branchenspezifischen, nationalen oder regionalen Benchmarks durchzuführen, wenn verfizierte Daten vorliegen.

Der Zeitraum zwischen dem Setzen von Benchmarks ist branchenspezifisch und beträgt gewöhnlich mehrere Jahre, da sich die Daten für das Ermitteln von Benchmarks selten in einem kurzen Zeitraum schnell oder bedeutend ändern.

Überwachung und Messung

- BVT ist es, dokumentierte Abläufe für eine regelmäßige Überwachung und Messung der entscheidenden Kenndaten von Arbeitsgängen und Abläufen festzulegen und zu pflegen, die eine bedeutende Auswirkung auf die Energieeffizienz haben können. Einige geeignete Techniken werden in diesem Dokument aufgeführt.

Die besten verfügbaren Techniken zum Erreichen von Energieeffizienz in Energie nutzenden Systemen, Prozessen, Abläufen oder Anlagen

Die oben aufgeführten allgemeinen BVT zeigen die Bedeutung der Betrachtung einer Anlage als Ganzes. Dies schließt ein, die verschiedenen Teil-Systeme, ihre zugehörigen Energieverbräuche und ihre wechselseitigen Beeinflussungen konkret zu beurteilen. BVT umfassen auch:

- Das System bzw. die Teil-Systeme hinsichtlich der energiebezogenen Leistung analysieren und bewerten (Benchmarks setzen);
- Planung von Aktionen und Investitionen zur Optimierung der Energieeffizienz unter Betrachtung des Kosten-Nutzen-Effekts und der multimedialen Wirkung;
- bei neuen Systemen die Energieeffizienz bei der Auslegung der Anlage, der Einheit oder des Systems und bei der Wahl der Prozesse optimieren;
- bei bestehenden Systemen die Energieeffizienz des Systems durch Verbesserungen beim Betreiben und Steuern und regelmäßiger Durchführung von Überwachungs- und Wartungsmaßnahmen optimieren.

Die folgenden BVT setzen voraus, dass diese allgemeinen BVT auch auf die unten aufgeführten Systeme als Teil ihrer Optimierung angewandt werden. ***BVT für häufig in industriellen Anlagen vorkommende Querschnittstechnologien können wie folgt zusammengefasst werden:***

BVT ist es,

- Feuerungs- und
- Dampfsysteme

durch den Einsatz relevanter Techniken zu optimieren, wie zum Beispiel

- jene, die spezifisch sind für die in den vertikalen BVT-Merkblättern angegebenen Branchen,
- jene, die im LCP- und diesem Forschungsbericht angegeben sind.

BVT ist es, unter Einsatz von Techniken, wie sie in diesem Dokument beschrieben sind, folgende Verfahren zu optimieren:

- Druckluftsysteme,
- Elektromotorische Antriebe,
- Pumpensysteme,
- Prozesslufttechnische Systeme,
- Raumlufttechnische Systeme,
- Beleuchtung,
- Trocknungsverfahren. Für diese Verfahren ist es auch BVT, nach Möglichkeiten zu suchen, mechanische Trennverfahren in Kombination mit thermischen Prozessen einzusetzen.

Andere BVT im Zusammenhang mit Querschnittstechnologien sind:

Wärmerückgewinnung und Rückkühlsysteme

BVT ist es, Abwärmepotenziale zu analysieren und ggf. Maßnahmen zur Abwärmenutzung zu implementieren. Die Maßnahmen dafür sollen nach folgender Hierarchie geprüft und ggf. umgesetzt werden:

1. Vermeidung von Abwärme bzw. deren Reintegration in den Prozess,
2. direkte Nutzung der Abwärme über Wärmeübertrager oder
3. indirekte Nutzung der Abwärme zur Bereitstellung von Wärme auf einem höheren Temperaturniveau (Wärmepumpe) oder zur Erzeugung von Nutzkälte,
4. Ausgleich zeitlicher Diskrepanzen zwischen Wärmebereitstellung und Wärmebedarf durch Einsatz von thermischen Speichern,
5. Zuführung von Abwärme, die nicht im Unternehmen genutzt werden kann, an nahe gelegene externe Wärmeverbraucher,
6. unvermeidbare, nicht nutzbare Abwärme muss in umweltverträglicher Art und Weise an die Umgebung abgegeben werden.

BVT ist es, die Effizienz von Wärmetauschern sowohl durch

- die regelmäßige Überwachung der Effizienz als auch durch
- das Verhindern oder Entfernen von Verschmutzung

zu erhalten.

Summary

Background and task description

In industry, cross-cutting technologies often form the basis for special technological processes or are important components of complex plant systems. They are therefore relevant for several application areas or business sectors. A large part of energy consumption in industry is attributable to cross-cutting technologies. A typical feature of cross-cutting technologies is that the ultimate energy forms, such as fuels or electrical energy, are converted into the useful energy forms required for specific production technologies. Useful energy forms are, for example, mechanical movements or process heat. This often creates important production conditions, such as a temperature level or air quality.

Due to the widespread use of cross-cutting technologies, improvements in energy efficiency in such processes have a high multiplication potential. However, in the past, little attention was often paid to the energy efficiency of cross-cutting technologies in the planning processes for industrial plants, because im most cases they are only assigned to ancillary systems or infrastructure.

In February 2009, in order to account for the importance of cross-cutting technologies for energy consumption in industry, the EU Commission adopted a separate leaflet on Best Available Techniques regarding the energy efficiency of cross-cutting technologies (1). Since 2009, further developments have been observed in many of the cross-cutting technologies described, some of which are associated with significant improvements in energy efficiency. A corresponding update of this leaflet is therefore being prepared within the EU framework.

To prepare the updating process at EU level, the German Federal Environment Agency commissioned a research project as the basis for a German contribution. The present final report documents the results of this research project with the title "Update of the BREF on the Energy Efficiency of Cross-Cutting Technologies".

The object of the research project was to update essential, but not all, sections of the BREF.

The individual main chapters of the second level, which were covered by the revision, are self-contained and understandable in terms of content. This German-language final report is primarily intended to serve as a source of information for planning and approval procedures.

As a further result of the research project, all chapters were also translated into English so that they could be used directly in the updating process at EU level.

As a third result, the contents of the chapters of Section 3 covered by the update were summarized in a separate document. This document is intended to be an independent annex to this research report.

This document has been specifically designed for use in approval procedures in Germany. In addition to the most important features of the best available technology for the respective cross-cutting technologies, proposals are described as to which information should be contained in the documents of project executing entities or in the decisions of the permitting authorities on the respective cross-cutting technology. This is intended to support a meaningful and appropriate consideration of energy efficiency issues during planning and permitting procedures.

Scope of this document

The IPPC Directive requires that all installations be operated in such a way that energy is used efficiently. This is implemented in the German Federal Immission Control Act (Bundesimmissionsschutzgesetz) by the energy efficiency requirement in § 5 (1). So far, however, this requirement for approval procedures under environmental law has not yet been comprehensively specified in subordinate regulations or guidelines.

One of the basic strategies for reducing energy-related greenhouse gas emissions is to promote optimum energy efficiency at the planning and permitting stage. For this purpose, the results of this research project should make a contribution as a guide.

Therefore, this report provides guidance and conclusions on energy efficiency technologies that are considered to be compatible with best available techniques for all installations covered by the IPPC Directive. This document also provides references to BAT reference documents and legally binding rules, as well as internationally recognized standards and guidelines which have already covered specific energy efficiency techniques in detail and which can be applied to specific sectors.

Examples of this are:

- The LCP-BREF (Best Available Technique for Large Combustion Plants): it also deals with essential aspects of energy efficiency in relation to combustion processes in large combustion plants. These techniques can also be applied in incinerators with a capacity of less than 50 MW.
- The ICS-BREF (Best Available Technique for Industrial Cooling Systems).

This report does not:

- contain specific information on processes and activities covered by other BREFs
- refer to sector-specific BATs.

However, a summary of sector-specific BAT for energy efficiency from other BREFs can be found for information in the EIPPCP workspace (2) at the end of this document.

The BREF on energy efficiency of cross-cutting technologies has been developed with the aim of promoting the provisions of the IPPC Directive on energy efficiency. It is based on the efficient use of energy as a first priority and does not consider the provision of energy from renewable or sustainable energy sources.

It is important to note that the limiting the assessment to energy efficiency is not sufficient to fully assess the sustainability of technical systems. For example, a process with lower energy efficiency supplied with renewable energy sources and/or waste heat may be more sustainable than a more energy efficient process using primary energy from fossil fuels.

Structure and content of this document

Energy efficiency is a special, so-called horizontal aspect of environmental permitting procedures. Therefore, this report does not go into other environmental impacts in more detail in the technologies presented. Such effects can be, for example, resource consumption and emissions.

Where possible and appropriate, some indicative values for potential energy savings to be considered for BAT are given for some techniques. Some of these are supplemented with examples. In order to facilitate a simple classification of the update into the structure of the BREF, the complete structure of the BREF has been adopted in the original version of 2008 for the present research report. Chapters that did not form part of the research project's scope are included in the report as a bullet point, but without text content.

Chapter 1 of the original BREF contains mainly general and theoretical basic considerations on energy efficiency. These are not really affected by the need for updating and are therefore not the subject of the research project and consequently not the subject of this report.

Chapter 2 contains selected chapters of the original BREF in a revised form. The topics dealt with in the report primarily concern organizational aspects that can be applied at the operational or plant level. In the last 10 years, significant developments have taken place in the areas of energy management, monitoring and measurement, energy audits and energy analysis as well as

benchmarking. These have already attained a considerable practical significance, thus substantiating the best available technology at a new level.

Energy management systems based on the international series of standards EN ISO 50001 ff. and energy audits according to the standard DIN EN 16247-1 are established as the best available technology.

Other technologies that support an energy management system and energy audits benefit from the dynamic development in information technology and measurement technology. For the monitoring and measurement of energy consumption in energy-intensive industries, best available technology is to record at least 90 % of total energy consumption in detail and continuously via complex measurement systems down to the level of larger individual consumers or consumer groups. The resulting large amounts of data can be condensed and processed for analysis and evaluation using special software solutions.

The evaluation of the data is supported by the use of key indicators. The methods for key indicator formation and the application of benchmarks are also engaged in a process of constant further development and updating in connection with the extended information technology possibilities. A better breakdown of the energy data into individual consumers or consumer groups also makes it possible to form process-specific key indicators. Such indicators are often comparable across companies and industries, especially in the area of cross-cutting technologies, which facilitates the analysis and identification of possible weak points.

The examples contained in this report are intended to encourage companies to use such indicators and to provide their own data for benchmarks. This effectively supports continuous improvement processes, in this case the improvement of energy efficiency.

Chapter 3 looks at energy efficiency techniques in the most common and widely used industrial systems, processes and equipment that use or convert energy in larger quantities. These so-called cross-cutting technologies, for which the present report contains information on the best available technologies, include:

- firing plants
- steam systems
- heat recovery and re-cooling systems
- electromotive drive systems
- pump systems
- compressed air systems
- industrial air handling technology (process air systems)
- heating, ventilation and air-conditioning systems (ambient air systems)
- lighting
- drying processes

Some of these cross-cutting technologies may also be part of specific complex processes for which so-called vertical BREFs have already been published (e.g. for melting furnaces). In such cases, the corresponding vertical BREFs have priority and should be consulted first.

Some of the sub-chapters of Chapter 3 of this report contain very extensive changes compared to the respective chapters in the original BREF. Only in a few cases do the updates only concern the updating of numerical values, which, for example, express the higher efficiency of best available techniques.

In some sub-chapters, novel technical solutions have been included in the description if they have been clearly identified as new best available techniques since 2009. This applies, for example, to lighting with LED technology.

The technology area of industrial air handling technology (process air systems) was newly integrated as a chapter of equal importance to the other cross-cutting technologies.

The most significant change is the emphasis on the system concept for the respective technologies based on the application objective. This change is the result of the evaluation of many experiences from the practical application of cross-cutting technologies. Accordingly, the highest energy efficiency cannot be achieved solely by using individual, energetically-optimized aggregates or one-dimensional engineering processes. The balancing group for the assessment of energy efficiency and, accordingly, the planning area for the solution of the technical task must be sufficiently large. This is to ensure that all important influences on the energy conversion and transport chains are taken into account.

For the cross-cutting technologies considered in detail, a similar system of subordinating points was chosen. The following main aspects are presented:

- areas of application of the respective cross-cutting technology in industry
- share or magnitude of the energy use influenced by this cross-cutting technology in relation to the total energy consumption of the industrial sector
- technological steps between the useful energy level (direct application) and the final energy used
- where relevant, references to alternative technological solutions in the field of application (e. g. electric instead of pneumatic actuators)
- where available, description of the technical criteria for best available techniques at each technological step
- where relevant, description of starting points for cross-technology potentials for improving energy efficiency (e. g. waste heat collection and use)
- reinforcement using examples

The majority of planning and permitting procedures in practice are modifications or expansions of an existing inventory of technical installations. Naturally, an existing inventory that has been in use for some time is often incompatible with the current best available technology, also in terms of energy efficiency. For this reason, some information on the optimization of existing systems is also integrated in the individual chapters, as this often opens up considerable potential for improving energy efficiency.

For all cross-cutting technologies described in Chapter 3, the following principles belong to the best available technology:

1. Assessment and planning processes are based methodically on the energy demand at the user level (useful energy level), i.e. in the opposite direction to the energy flow during energy conversion from the respective final energy used. Dimensioning of the technical installation or the energy conversion process is the final methodical step.
2. The possibilities of measuring and processing energy-relevant data which have arisen in accordance with advances in information technology shall be taken into account in planning with regard to the control and optimization of processes.
3. New technical systems are planned using modern planning techniques (software-supported, preliminary simulation of the processes running in the systems, etc.). The design criteria, boundary conditions and planning results are adequately and comprehensibly documented and made available to the plant operator.
4. The monitoring of ongoing operations, also with regard to energy consumption, and appropriate maintenance and repair are crucial prerequisites for maintaining the level of energy efficiency in the long term. This allows deviations from an energy-efficient operating mode to be quickly detected and corrected. Adequate monitoring, servicing and maintenance must therefore be ensured in terms of operational organization.

Best Available Techniques

The BAT chapter of this report (Chapter 4) identifies those techniques that are considered to be BAT at a European level on the basis of the information in Chapters 2 and 3. The following text is a summary of this BAT chapter. The full Chapter 4 contains the definitive text for BAT conclusions.

The description of the context described in the original BREF for the consideration of BAT in planning and permitting procedures is omitted here (1).

The information contained in this document is intended to assist in determining BAT for energy efficiency in specific cases. When determining BAT and BAT-based permit conditions, the overall objective of a high level of protection for the environment as a whole, including energy efficiency, should always be taken into account.

Chapter 4 lists the techniques that generally meet the requirements for best available techniques. However, it should be noted that this report does not propose energy efficiency values for permits. It can be assumed that new plants can be designed to achieve BAT values equal to or better than those presented here. In many cases it will also be possible for existing installations to approach or exceed BAT levels, provided that the techniques are technically and economically applicable.

The techniques mentioned in Chapter 4 will not necessarily be suitable for all installations.

It is important to keep in mind the importance of energy efficiency. However, certain techniques that lead to high energy efficiency may have adverse effects on other environmental assets. These disadvantages can be greater than the advantage resulting from higher energy efficiency in the context of an overall assessment. As a result:

- it may not be possible to maximize the energy efficiency of all activities and/or systems in an installation at the same time;
- it may not be possible to both maximize overall energy efficiency and minimize other consumption and emissions (e.g. it may not be possible to reduce airborne emissions without the use of energy);
- the energy efficiency of one or more systems may not be improved to the maximum in order to achieve the maximum efficiency for an installation as a whole;
- it is necessary to maintain a balance between maximizing energy efficiency and other factors such as the quality of the product, the stability of the process, etc.;
- the use of sustainable energy sources and/or 'waste heat' or superfluous heat may be more sustainable than the use of primary fuels, even if their use results in lower energy efficiency.

Energy efficiency technologies are therefore proposed as an "optimization of energy efficiency".

In most cases it makes economic sense to optimize energy efficiency. Within an existing installation, the implementation of BAT is generally not so easy due to the existing infrastructure and local circumstances: the economic and technical feasibility of modernizing these installations must be taken into account. Chapters 2 and 3 consider the applicability of the techniques. This is summarized for each BAT in Chapter 4.

General BAT for achieving energy efficiency at plant level

A key element for achieving energy efficiency at plant level is a formal management approach, i.e. the efficient use of energy is defined as a task by company management and is integrated organizationally into company management.

The other BAT, applied at site level, support energy management and provide more details to achieve this. These techniques are applicable to all plants. The scope (e.g. degree of detail, frequency of optimization, the systems to be considered) and the techniques used depend on the scope and complexity of the plant and on the energy consumption of the plant components.

Energy management

BAT includes implementing and maintaining an energy management system (EnMS) that includes the following characteristics, appropriate for the plant-specific circumstances:

- commitment of the top management
- establishment of an operational energy efficiency policy by the top management of the company
- planning and definition of objectives and specifications
- implementation of measures with special attention to:

  - staff structure and responsibilities, training, awareness and competence, communication, employee involvement, documentation, efficient control of processes, maintenance programs, emergency preparedness and response, ensuring compliance with energy efficiency legislation and agreements (where such agreements exist).

- setting standards (benchmarking)
- review the efficiency and implementation of corrective actions with particular emphasis on:

  - monitoring and measurement, corrective and preventive actions, maintenance of records; independent (where practicable) internal audit to determine whether the EnMS complies with planned requirements and has been properly implemented and maintained.

- review of the EnMS and its further suitability, appropriateness and effectiveness by top management.
- when designing a new plant, consideration of the environmental impact and energy consumption up to the final decommissioning (consideration of the life cycle).
- development of new energy efficient processes and monitoring of developments in energy efficiency techniques.

An EnMS can optionally contain the following measures:

- preparation and publication (with or without external confirmation) of a regular report on energy efficiency, allowing an annual comparison with the objectives.
- external review and confirmation of the management system and the test procedure
- implementation and adherence to a voluntary management system for energy efficiency accepted at national or international level (e.g. according to DIN EN ISO 50001 ff.)

Set and review energy efficiency targets and indicators

BAT includes establishing energy efficiency indices by implementing all of the following measures:

- identify appropriate energy efficiency indicators for the plant and, where necessary, the individual processes, systems and/or units and measure their changes over time or after the implementation of energy efficiency improvement measures.
- identification and recording of the corresponding system boundaries associated with the indicators.
- identify and record factors that may cause changes in the energy efficiency of the relevant processes, systems and/or units.

In general, secondary or final energy consumption is used to monitor the energy efficiency of plants and processes. In some cases, more than one secondary or final energy index may be used for a process (e.g. both steam and electricity). Secondary or final energy indicators can also serve as a guide value for the decision on the use (or change) of energy sources and suppliers. However, other indicators, such as primary energy or carbon balance, can also be used to take into account the

production efficiency of each secondary energy source and its multi-media effects, depending on local circumstances.

Setting standards (benchmarks)

BAT includes making systematic and regular comparisons with sector-based, national or regional benchmarks, when verified data are available.

The time between benchmarks being set is industry-specific and usually several years, as the data for benchmarking rarely changes quickly or significantly in a short period of time.

Monitoring and measurement

- BAT includes defining and maintaining documented procedures for regular monitoring and measurement of the critical characteristics of operations and procedures that can have a significant impact on energy efficiency. Some suitable techniques are listed in this document.

Using the best available techniques for achieving energy efficiency in energy - systems, processes, operations or facilities

The general BAT listed above demonstrate the importance of considering an installation as a whole. This includes a concrete assessment of the various subsystems, their associated energy consumption and their mutual influences. BAT also includes:

- analyzing and assessing the system or subsystems in terms of energy performance (benchmarking)
- planning of actions and investments to optimize energy efficiency, taking into account the cost-benefit effect and the multi-media effect.
- for new systems, optimizing energy efficiency in the design of the plant, unit or system and in the choice of processes
- optimizing the energy efficiency of existing systems through improvements in operation and control and regular monitoring and maintenance

The following BAT presuppose that these general BAT are also applied to the systems listed below as part of their optimization. **BAT for cross-cutting technologies commonly found in industrial installations can be summarized as follows:**

BAT includes optimizing:

- firing systems
- steam systems

This is accomplished through the use of relevant techniques, such as:

- those specific to the sectors indicated in the vertical BREFs
- those stated in the LCP and this research report

BAT includes optimizing the following procedures using techniques as described in this document:

- compressed air systems
- electromotive drives
- pumping systems
- process air handling systems
- ventilation systems
- lighting
- drying process

For these processes it is also BAT to look for possibilities to use mechanical separation processes in combination with thermal processes.

Other BAT in relation to cross-cutting technologies include:

Heat recovery and re-cooling systems

BAT includes analyzing waste heat potentials and, if necessary, implementing measures for waste heat utilization. The measures for this are to be checked according to the following hierarchy and, if necessary, implemented:

1. avoidance of waste heat or its reintegration into the process
2. direct use of the waste heat via heat exchangers, or
3. indirect use of waste heat to provide heat at a higher temperature level (heat pump) or to generate useful cooling
4. compensation of temporal discrepancies between heat supply and heat demand through the use of thermal storage,
5. supply of waste heat that cannot be used in the company to nearby external heat consumers

Unavoidable, unusable waste heat must be released into the environment in an environmentally compatible manner.

BAT includes improving the efficiency of heat exchangers by maintaining:

- regular monitoring of efficiency
- prevention or removal of contamination.

1 Einführung und Zielsetzung

1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Querschnittstechnologien bilden in der Industrie oft die Basis für spezielle technologische Prozesse oder sind wichtige Komponenten von komplexen Anlagensystemen. Sie sind somit für mehrere Anwendungsgebiete bzw. Wirtschaftszweige relevant. Ein großer Teil des Energieverbrauchs in der Industrie ist Querschnittstechnologien zuzuordnen. Typisch für Querschnittstechnologien ist, dass Endenergieformen, wie Brennstoffe oder Elektroenergie, in die für konkrete Produktionstechnologien erforderlichen Nutzenergieformen umgewandelt werden. Nutzenergieformen sind beispielsweise mechanische Bewegungen oder Prozesswärme. Häufig werden damit wichtige Produktionsvoraussetzungen geschaffen, zum Beispiel ein Temperaturniveau oder eine Luftqualität eingestellt.

Auf Grund der weiten Verbreitung von Querschnittstechnologien besitzen Verbesserungen der Energieeffizienz bei solchen Prozessen ein hohes Multiplikationspotenzial. Allerdings wurde in der Vergangenheit in den Planungsprozessen für Industrieanlagen der Energieeffizienz von Querschnittstechnologien oft wenig Beachtung geschenkt, weil sie im konkreten Einzelfall häufig nur Nebenanlagen bzw. Infrastruktur zugeordnet werden.

Um der Bedeutung von Querschnittstechnologien für den Energieverbrauch in der Industrie Rechnung zu tragen, verabschiedete die EU-Kommission im Februar 2009 ein eigenständiges Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken bezüglich der Energieeffizienz von Querschnittstechnologien (1). Seit 2009 sind bei vielen der beschriebenen Querschnittstechnologien Weiterentwicklungen zu beobachten, welche zum Teil mit bedeutenden Verbesserungen der Energieeffizienz verbunden sind. Eine entsprechende Aktualisierung dieses Merkblattes wird deshalb im EU-Rahmen vorbereitet.

Zur Vorbereitung des Aktualisierungs-Prozesses auf EU-Ebene hat das Umweltbundesamt als Grundlage für einen deutschen Beitrag ein Forschungsvorhaben in Auftrag gegeben. Der vorliegende Abschlussbericht dokumentiert die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens mit dem Titel „Aktualisierung der Daten des BVT-Merkblattes zur Energieeffizienz von Querschnittstechnologien“.

Gegenstand des Forschungsvorhabens war die Aktualisierung wesentlicher, jedoch nicht aller Kapitel des BVT-Merkblattes. Die einzelnen von der Überarbeitung umfassten Hauptkapitel der zweiten Gliederungsebene sind inhaltlich jeweils in sich abgeschlossen und verständlich. Der vorliegende deutschsprachige Abschlussbericht soll vor allem als Informationsquelle für Planungs- und Genehmigungsverfahren dienen.

Als weiteres Ergebnis des Forschungsvorhabens waren alle Kapitel auch in die englische Sprache zu übersetzen, um unmittelbar im Aktualisierung-Prozess auf EU-Ebene verwendet werden zu können.

Als drittes Ergebnis wurden die Inhalte der von der Aktualisierung erfassten Kapitel des Abschnittes 3 in verdichteter Form in einem separaten Dokument nochmals zusammengefasst. Dieses Dokument soll eine in sich eigenständige Anlage zum hier vorliegenden Forschungsbericht sein.

Die letztgenannte gesonderte Anlage ist speziell für den Zweck der Verwendung in Genehmigungsverfahren in Deutschland erarbeitet worden. Neben den wichtigsten Merkmalen der besten Verfügbaren Technik bei den jeweiligen Querschnittstechnologien sind darin Vorschläge beschrieben, welche Informationen in den Unterlagen von Vorhabensträgern bzw. in den behördlichen Bescheiden zu der jeweiligen Querschnittstechnologie enthalten sein sollten. Damit soll eine sinnvolle und angemessene Berücksichtigung von Belangen der Energieeffizienz in Planungs- und Genehmigungsverfahren unterstützt werden.

1.2 Anwendungsbereich dieses Dokuments

Die IVU-Richtlinie verlangt, dass alle Anlagen so betrieben werden, dass die Energie effizient eingesetzt wird. Dies wird im deutschen Bundesimmissionsschutzgesetz durch das Energieeffizienzgebot in § 5 (1) umgesetzt. Bislang wurde dieses Gebot für umweltrechtliche Genehmigungsverfahren jedoch noch nicht umfassend in untergesetzlichen Vorschriften oder Richtlinien konkretisiert.

Es gehört zu den grundlegenden Strategien für die Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen, eine bestmögliche Energieeffizienz bereits auf der Ebene von Planungs- und Genehmigungsverfahren zu fördern. Für diesen Zweck sollen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens einen Beitrag im Sinne einer Orientierungshilfe leisten.

Deshalb enthält dieser Bericht Anleitungen und Schlussfolgerungen zu den Energieeffizienztechniken, die als kompatibel angesehen werden mit der besten verfügbaren Technik für alle Anlagen, die von der IVU-Richtlinie erfasst werden. Dieses Dokument gibt auch Hinweise auf BVT-Merkblätter und rechtsverbindliche Vorschriften sowie international anerkannte Normen und Richtlinien, in denen besondere Techniken zur Energieeffizienz bereits im Detail abgehandelt sind und die auf spezifische Sektoren angewandt werden können.

Beispiele dafür sind

- das LCP-BVT-Merkblatt (Beste verfügbare Technik bei Großfeuerungsanlagen): Es behandelt auch wesentliche Aspekte der Energieeffizienz in Bezug auf Verbrennungsprozesse in Großfeuerungsanlagen. Diese Techniken können auch in Verbrennungsanlagen mit einer Kapazität von unter 50 MW angewendet werden;
- das ICS- BVT-Merkblatt (Beste verfügbare Technik bei industriellen Kühlsystemen).

Der vorliegende Bericht

- enthält keine Informationen, speziell über Prozesse und Aktivitäten, die von anderen BVT-Merkblättern abgedeckt werden,
- verweist nicht auf sektorspezifische BVT.

Eine Zusammenfassung von sektorspezifischen BVT für die Energieeffizienz aus anderen BVT-Merkblättern kann jedoch zur Information im EIPPCP-Arbeitsplatz(„workspace“) (2) gefunden werden.

Das BVT-Merkblatt zur Energieeffizienz von Querschnittstechnologien wurde mit dem Ziel entwickelt, die Vorschriften der IVU-Richtlinie zur Energieeffizienz zu fördern. Es geht vom effizienten Einsatz von Energie als erster Priorität aus und betrachtet nicht die Bereitstellung von Energie aus erneuerbaren bzw. nachhaltigen Energiequellen.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die Beschränkung auf Energieeffizienz zur vollständigen Bewertung der Nachhaltigkeit technischer Systeme nicht ausreicht. Beispielsweise kann ein Prozess mit geringerer Energieeffizienz, der mit regenerativen Energiequellen und/oder Abwärme versorgt wird, nachhaltiger sein kann als ein energieeffizienterer Prozess, für den Primärenergie aus fossilen Brennstoffen eingesetzt wird.

Energieeffizienz ist ein spezieller, sogenannter horizontaler Aspekt bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren. Deshalb wird in diesem Bericht bei den dargestellten Technologien nicht vertiefend auf andere umweltbezogene Auswirkungen eingegangen. Solche Auswirkungen können beispielsweise Ressourcenverbrauch und Emissionen sein.

1.3 Struktur und Inhalt dieses Dokuments

Um eine einfache Einordnung der Aktualisierung in die Struktur des bisherigen BVT-Merkblattes zu ermöglichen, wurde ab Kapitel 2 die Gliederung des BVT-Merkblattes in der originalen Fassung von 2009 für den vorliegenden Forschungsbericht übernommen. Kapitel, welche nicht Bestandteil der Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens waren, sind als Gliederungspunkt, aber ohne Textinhalt, im Bericht enthalten.

Soweit möglich und angemessen, werden für manche Techniken einige quantifizierte Richtwerte für mögliche Energieeinsparungen angegeben, die für BVT in Betracht zu ziehen sind. Teilweise werden diese mit Beispielen ergänzt.

Auf Grund der teilweise enormen Anwendungsvielfalt einzelner Querschnittstechnologien würde die alleinige Ausrichtung von BVT an konkreten quantitativen Effizienzkriterien bzw. Kennzahlen eine Vielzahl von Fallunterscheidungen erfordern. Die vollständige Darstellung solcher Fallunterscheidungen überschreitet den Rahmen eines BVT-Merkblattes bei weitem. Abgesehen davon verändern sich quantitative Kennwerte in teilweise relativ kurzen Fristen infolge technischer Fortschritte, so dass für solche Werte das Merkmal „best verfügbar“ schnell veralten kann.

Daher wurde bei der Aktualisierung besonders auf die methodischen Grundprinzipien einer energieeffizienzorientierten Planung incl. moderner Planungswerkzeuge Wert gelegt. Weitere Schwerpunkte der Aktualisierung betreffen u. a.

- die Betonung der lebensdauerorientierten Betrachtung der Technologien (z. B. Wartung, Instandhaltung, Möglichkeiten effizienter Anpassung an sich ändernde Randbedingungen etc.),
- die Hinweise auf technologieübergreifende Effizienzeffekte wie z. B. Sektorkopplungen, aterialgebundene Energieeinsätze etc.).

2 Für das Erreichen der Energieeffizienz auf Anlagenebene zu berücksichtigende Techniken

2.1 Energiemanagement

Beschreibung

Industrieunternehmen können eine bessere Energieeffizienz durch die Anwendung der gleichen Managementprinzipien erreichen, die sie anderweitig im Geschäftsbetrieb mit den Hauptressourcen einsetzen, wie zum Beispiel den Finanzen, Rohstoffen und Arbeitskräften sowie in den Bereichen Umwelt, Gesundheit und Sicherheit. Diese Praktiken des Managements umfassen die vollständige Verantwortlichkeit der obersten Leitung für den Energieeinsatz. Das bewusste Management des Energieverbrauchs und der Energiekosten vermeidet die Ressourcenverschwendung und führt im Lauf der Zeit zu kumulativen Einsparungen.

Die vorteilhafteste Umweltbilanz wird gewöhnlich durch die Verwendung der besten verfügbaren Technologie und ihren effektiven sowie effizienten Betrieb erreicht. Durch die Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU (kurz IED) wird diesem Umstand durch die Definition von „Techniken“ als „die Art und Weise, wie die Technologie eingesetzt wird und wie die Anlage ausgelegt, gebaut, gewartet, betrieben und außer Betrieb gesetzt wird“ Rechnung getragen.

Für IED-Anlagen ist ein Umwelt-Managementsystem (UMS) ein Arbeitsmittel, das die Betreiber nutzen können, um die umweltgerechte Auslegung, Konstruktion, Wartung sowie den Betrieb und die Außerbetriebnahme in einer systematischen und transparenten Art und Weise umzusetzen. Ein UMS umfasst die organisatorische Struktur, Zuständigkeiten, Verfahren, Prozesse und notwendigen Ressourcen für die Planung, Umsetzung, Überwachung und ständige Verbesserung der Managementpraktiken sowie der Umweltleistung. Umweltmanagementsysteme sind am wirkungsvollsten und effizientesten, wo sie einen inhärenten Teil des gesamten Managements und des Anlagenbetriebs bilden.

Das betriebliche Energiemanagement erfordert in ähnlicher Weise die strukturierte Aufmerksamkeit mit dem Ziel, den Energieverbrauch ständig zu überwachen und die Energieeffizienz in den Produktions- und Versorgungsanlagen unter betriebswirtschaftlichen und qualitätsbezogenen Gesichtspunkten zu verbessern sowie die erreichten Verbesserungen dauerhaft zu erhalten. Ein Energiemanagementsystem (EnMS) bietet die Struktur und die Basis für die Bewertung der gegenwärtigen Energieeffizienz, die Identifikation und Prüfung der Möglichkeiten zur Verbesserung und die Planung von organisatorischen und technischen Maßnahmen zur ständigen Verbesserung hinsichtlich der Energieeffizienz aber auch der Managementprozesse. Alle gängigen Managementsystemstandards, wie das Energie- und das Umweltmanagement sowie entsprechende Programme und Leitfäden fokussieren den Grundsatz der ständigen Verbesserung. Dementsprechend ist das Energiemanagement ein laufender Prozess und kein kurzfristiges Projekt, das schließlich zu Ende geht.

Managementsystemprozesse bieten unterschiedlichste Gestaltungs- und Ausführungsmöglichkeiten, jedoch beruhen die meisten Managementsysteme auf dem Ansatz „planen-umsetzen-prüfen-handeln“, der weitgehend in anderen Zusammenhängen des Firmenmanagements verwendet wird. Der Zyklus ist ein sich wiederholendes, dynamisches Modell, bei dem das Ende eines Zyklus in den Beginn des Nächsten mündet, siehe Abbildung 2.1-1.

Abbildung 2.1-1: Laufende Verbesserung eines Energieeffizienz-Managementsystems

Quelle: (3)

Ein systembasiertes organisatorisches Energiemanagement für eine IED-Anlage sollte entsprechend die folgenden Komponenten enthalten:

- Energiepolitik - Explizite Verpflichtung des Top-Managements und Definition von Leitlinien zum Thema Energieeinsatz und –effizienz,
- Energieplanung – Energetische Bewertung, Zielsetzung und Planung von Maßnahmen zur Zielerreichung,
- Einführung und Umsetzung – Festlegung von klaren organisatorischen Zuständigkeiten und Informationswegen für den Energieeinsatz, die Energieplanung und -überwachung, nach Möglichkeit integriert in die Kernprozesse des Unternehmens,
- Bewusstseinsbildung – bedarfsgerechte Befähigung, Unterweisung und Information zur Unterstützung der energetischen Ziele und Beteiligung der Mitarbeiter am ständigen Verbesserungsprozess,
- Überprüfung - Messung der energiebezogenen Leistung und Bewertung über Kennzahlenbildung und Benchmarking sowie Information über deren Entwicklung an die zuständigen Unternehmensfunktionen,
- Auslegung und Beschaffung – transparente Bewertung von Energieeffizienzkriterien in der Planung von Anlagen und Prozessen sowie der Beschaffung unter Beachtung des Energieeinsatzes als wesentlichen Bestandteil der Lebenszykluskosten,
- Bewertung durch das Management,
- Regelmäßige Erklärung zur Energieeffizienz,
- Validierung oder Zertifizierung durch einen zugelassenen externen Prüfer.

Diese Merkmale werden unten noch weiter erläutert und untersetzt. Detaillierte Informationen über die Punkte (a) bis (h) werden in den diesbezüglichen Abschnitten wiedergegeben. Energiemanagementsysteme haben sich seit 2015 wegen verschiedener steuer- und abgabenpolitischer Anreize insbesondere in Deutschland weit verbreitet. Über Beispiele wird umfassend in allgemein zugänglichen Informationsquellen wie Internet und Printmedien berichtet.

a) Verpflichtung des Top-Managements

Die Verpflichtung des Top-Managements ist die Voraussetzung für ein erfolgreiches Energiemanagement. Die Leitungsebene sollte:

- die energetische Leistung auf die Tagesordnung des Unternehmens setzen, sie sichtbar machen und dem Energiemanagement Glaubwürdigkeit verleihen,
- einen Verantwortlichen für das Energiemanagement festlegen (das muss nicht die Person sein, die für die Energie verantwortlich ist, analog Qualitätsmanagementsystemen und der Qualitätssicherung),
- dazu beitragen, eine Kultur der Energieeffizienz zu schaffen und die dazu erforderlichen treibenden Kräfte für ihre Umsetzung fördern,
- eine Strategie definieren (langfristige Ausrichtung), um die Energieeffizienz als Bestandteil der integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung zu erreichen,
- Unternehmensziele setzen, um diese Zielvorstellungen der Energieeffizienz mit den Zielvorstellungen der IED zu erreichen,
- kurz- und mittelfristige konkrete Aktionen planen, um langfristige Ziele zu erreichen,
- die Plattform für einen ganzheitlichen Entscheidungsfindungsprozess bieten, um Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung einschließlich des Energiesparens zu integrieren, besonders dann, wenn neue Anlagen oder wesentliche Änderungen geplant sind,
- das Unternehmen so führen, dass bei Investitions- und Beschaffungs-Entscheidungen regelmäßig die integrierte Vermeidung von Verschmutzung zusammen mit Energieeinsparungen berücksichtigt wird. Die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung wird durch die integrierte Entscheidungsfindung und daraus folgende Handlungen erreicht, bei der Beschaffung von Investitionsgütern, Planung, Produktion und Wartung ebenso wie im Umwelt- und Energiemanagement.
- eine Energiepolitik definieren, siehe (b) unten.

b) Definition einer Energiepolitik

Das Top-Management ist zuständig für die Festlegung einer Energiepolitik und hat sicherzustellen, dass diese:

- angemessen und geeignet ist für die Unternehmensumwelt, Anlagen und Tätigkeiten sowie Art und Umfang des Energieeinsatzes und der betrieblichen Anlagen und Prozesse,
- eine Verpflichtung zur kontinuierlichen Verbesserung der energiebezogenen Leistung enthält,
- eine Verpflichtung zur Sicherstellung der Verfügbarkeit von Informationen und zur Zielerreichung notwendigen Ressourcen enthält,
- eine Verpflichtung beinhaltet, die alle gesetzlichen und anderen Anforderungen, die auf den Energieeinsatz, -verbrauch und die Energieeffizienz anwendbar sind, einzuhalten,
- den Rahmen bietet für die Festsetzung und Überprüfung der Ziele und Zielvorgaben der Energieeffizienz,
- innerhalb der Organisation dokumentiert und allen Mitarbeitern übermittelt wird,
- den Erwerb energieeffizienter Produkte und Dienstleistungen unterstützt, welche zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung bestimmt sind,
- regelmäßig geprüft und bei Bedarf aktualisiert wird.

c) Energieplanung (siehe Kapitel 2.2)

- Ermittlung und Umsetzung rechtlicher und anderer Anforderungen, zu denen die Organisation verpflichtet ist und die auf die Energieaspekte ihrer Aktivitäten anwendbar sind.
- Energieaspekte sind Bestandteile von Dienstleistungen, Waren oder Tätigkeiten, welche die Nutzung von Energie oder den Energieverbrauch beeinflussen.

- Verfahren um den Energieeinsatz und -verbrauch auf Basis von Messungen und anderen Daten zu analysieren und die Bereiche mit dem wesentlichen Energieeinsatz zu ermitteln.
- Bewertung von Energieeinflussfaktoren im Hinblick auf die wesentlichen Energieverbraucher.
- Identifikation, Priorisierung und Aufzeichnung von Verbesserungspotentialen in Bezug auf die energiebezogene Leistung.
- Einführung und Überwachung von dokumentierten strategischen und operativen Zielen unter Berücksichtigung der rechtlichen und anderen Anforderungen und der Ansichten interessierter Parteien sowie technologischer Optionen und finanzieller sowie betrieblicher Randbedingungen.
- Einführung, Verwirklichung und Aufrechterhaltung eines oder mehrere Aktionspläne zur Erreichung der Zielvorgaben, einschließlich der Festlegung von Zuständigkeiten, erforderlicher Mittel und des Zeitrahmens sowie der Methodik zur Prüfung der Verbesserung der energiebezogenen Leistung und der Maßnahmenwirksamkeit.

d) Einführung und Umsetzung

Zur Umsetzung der Aktivitäten aus der Energieplanung muss die Organisation Regelungen und Verfahren einführen, die ein wirkungsvolles Energiemanagement ermöglichen:

(i) Struktur und Zuständigkeiten:

- Definition, Dokumentation und Mitteilung der Funktionen, Zuständigkeiten und Befugnisse, die im Rahmen der Managementprozesse erforderlich sind.
- Beauftragung eines oder mehrerer Vertreter des Managements mit tragenden Rollen für das Energiemanagement (siehe (a) oben).

(ii) Fähigkeiten, Schulung und Bewusstsein:

- Bereitstellung der Ressourcen, die für die Umsetzung des Energiemanagements, einschließlich der Personalentwicklung, erforderlich sind.
- Sicherstellung der Kenntnis von Mitarbeitern und aller im Namen der Organisation Tätigen über die Konformität zur Energiepolitik und dem EnMS inkl. der eigenen Aufgaben im Managementsystem sowie der Energieeinflussfaktoren und dem Beitrag zur Erreichung der Zielvorgaben im persönlichen Wirkungsbereich.
- Ermittlung des Aus- und Fortbildungsbedarfs und Angebot von Schulungsmaßnahmen und anderen geeigneten Methoden, um sicherzustellen, dass das gesamte Personal, dessen Arbeit eine bedeutende Auswirkung auf die Energieeffizienz der Tätigkeit hat, eine entsprechende Qualifikation und Bewusstseinsbildung erhalten hat (siehe Kapitel 2.6).

(iii) Kommunikation:

- interne Kommunikation der energiebezogenen Leistung und des EnMS entsprechend der Größe der Organisation,
- Regelung der internen Kommunikation zwischen den verschiedenen Ebenen und Funktionen der Organisation einführen - Schwerpunkt sind die Positionen und Teams, die einen wesentlichen Einfluss auf die energiebezogene Leistung haben, wie zum Beispiel im Rahmen der Anlagenauslegung und Beschaffung sowie der Produktion, Wartung und Instandhaltung.
- Entscheidung über ein Verfahren, das den Dialog mit externen interessierten Parteien fördert, Informationen zur Energiepolitik und energiebezogenen Leistung bei einer entsprechenden Entscheidung veröffentlicht und die Beantwortung relevanter Anfragen und Mitteilungen von externen interessierten Parteien regelt (siehe Kapitel 2.7).

(iv) Beteiligung der Mitarbeiter:

- Umsetzung eines Verfahrens, um Kommentare und Verbesserungsvorschläge für neue Prozesse, Anlagen und Ausrüstungen, Umbauten und Austausch zu fördern und zu bewerten, die zu einer Steigerung der Energieeffizienz führen können (siehe Kapitel 2.7).

(v) Dokumentation und Dokumentenlenkung:

- Dokumentation von erforderlichen Informationen zur Verwirklichung und Aufrechterhaltung eines EnMS inklusive eventuell normgeforderter Elemente, wie die Energiepolitik, den Geltungsbereich und die Ziele sowie Aktionspläne.
- Art und Umfang der Dokumentation richten sich nach der Größe der Organisation, den Tätigkeiten und der energetischen Komplexität sowie den Fähigkeiten des Personals.
- Einführung und Umsetzung eines Verfahrens zur Erstellung, Prüfung, Freigabe, Aktualisierung, Außerkraftsetzung und Archivierung von Dokumenten.
- Sicherstellung des Zugriffs und der eindeutigen Identifizierbarkeit, Änderungsverfolgung und Verteilung von Dokumenten sowie der Verhinderung der Nutzung ungültiger Ausgaben.

(vi) Wirkungsvolle Steuerung und Kontrolle der Prozesse (siehe Kapitel 2.8):

- Ermittlung und Planung von Prozessen und Tätigkeiten, die im Zusammenhang mit relevanten Energieeinsätzen stehen unter besonderer Beachtung der Energiepolitik, -ziele und Energieaktionspläne.
- betroffen sind Festlegungen der Anlagenfahrweise genauso wie solche im außergewöhnlichen Betrieb, wie z. B. bei Wartung und Instandhaltung (siehe folgender Gliederungspunkt),
- Angemessene Kontrolle der Prozesse bei allen Betriebsarten, d. h. Vorbereitung, Inbetriebnahme, Routinebetrieb, Abschaltung und anormale Bedingungen.
- Identifikation der wichtigsten Leistungsindikatoren für Energieeffizienz und Methoden zur Messung und Kontrolle dieser Parameter (z. B. Durchfluss, Druck, Temperatur, Zusammensetzung und Menge).
- Optimierung dieser Parameter für den energieeffizienten Betrieb unter Beachtung weiterer Randbedingungen wie Qualität und Verfügbarkeit.
- Geeignete und wirksame Kommunikation von Festlegungen zur Ablauflenkung an die betroffenen Personen mit Einflussmöglichkeiten auf den Prozess.
- Erfassung und Analyse anormaler Betriebsbedingungen, um die Ursachen zu ermitteln und sicherzustellen, dass entsprechende Vorkommnisse nicht wieder auftreten.

(vii) Wartung und Instandhaltung (siehe Kapitel 2.9):

- Erstellung eines strukturierten Programms für die Wartung und Instandhaltung auf der Grundlage der technischen Spezifikationen der Ausrüstung, Normen, etc. ebenso wie dem Zustand und aufgetretenen Störungen der Ausrüstung und deren Konsequenzen.
- Unterstützung des Wartungs- und Instandhaltungsprogramms durch entsprechende Aufzeichnungssysteme und Diagnosen.
- Aus der routinemäßigen Wartung, dem Ausfall und/oder anormalen Zuständen mögliche Energieeffizienznachteile oder energetische Verbesserungspotentiale erkennen.
- Eindeutige Zuständigkeiten für die Planung und Ausführung der Wartung zuweisen.

(viii) Störungen und Notfälle:

- Sowohl Ausfälle von Energieversorgungs- und Produktionsanlagen als auch Ausschussproduktion können zu unnötigen Energieeinsätzen führen.
- Infolgedessen sollten die notwendigen Energieeinsätze durch Verwertung oder Überarbeitung von Rohstoffen oder Produkten berücksichtigt werden, die im Rahmen von Störungen oder Notfallsituationen erforderlich werden.

- Die ordnungsgemäße Wartung und Instandhaltung sowie die gezielte Anlagen- und Qualitätsüberwachung sind wichtige Grundlagen zur Vermeidung von solchen energierelevanten Störungen.

(ix) Auslegung

- Energieeffizienz sollte integrierter Bestandteil jeglicher Aktivitäten zur Auslegung von Anlagen und Prozessen sein.
- Die technischen und ökonomischen Kriterien, wie z. B. Amortisationszeiten und Renditen, zur Entscheidung über Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sind von den Unternehmen selbst festzulegen.
- Bei der Planung und Projektierung neuer Standorte, Anlagen oder Prozesse sollte die energiebezogene Leistung des zukünftigen Betriebs genauso wie Aspekte der Wartung und Instandhaltung betrachtet werden.
- Alternative Techniken, die frühestmöglich während der Auslegung auf Anwendbarkeit geprüft werden, bieten Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz (siehe Kapitel 2.3).
- Die Entwicklung von Prozessen und Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz kann durch F&E-Aktivitäten oder Studien gefördert werden - als eine Alternative zur betriebsinternen Durchführung können Kooperationen mit anderen Betreibern oder Forschungsinstituten gebildet werden, um verstärkte Kapazitäten und externes Knowhow zu nutzen.

(x) Beschaffung

- die Verbesserung der energiebezogenen Leistung kann wesentlich über den Prozess des Beschaffungsmanagements beeinflusst werden, wobei ganze Anlagen und Maschinen genauso wie Komponenten und Dienstleistungen Ansatzpunkte für die Energieeffizienz bieten,
- je nach energetischer Bedeutung sollten Prüfroutinen etabliert werden, die sicherstellen, dass die ganzheitlich optimale Lösung inkl. der Energieeffizienz ausgewählt wird,
- für Leistungen, die mit nicht bedeutenden Energieeinsätzen einhergehen, lohnt sich die Festlegung von Mindestkriterien zur Energieeffizienz ohne vertiefte Prüfung wodurch sich eine erhöhte Energieeffizienz ohne erhöhten Bearbeitungsaufwand im Beschaffungswesen ermöglichen lässt,
- Einkaufsrichtlinien, Verträge und interne Regelwerke sollten entsprechende Vorgaben aufnehmen.

(xi) Außerbetriebnahme der Anlage am Ende der Lebensdauer

- Berücksichtigt man die Umweltauswirkung aus der Außerbetriebnahme einer Anlage zum Zeitpunkt der Auslegung einer Neuen, so ermöglichen Vorbetrachtungen zur Außerbetriebnahme oft effizientere, umweltfreundlichere und kostengünstigere Alternativen im Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus.
- Die Außerbetriebnahme birgt Umweltrisiken für Boden und Wasser und verursacht oft große Mengen von festem Abfall.
- Vorbeugende Techniken sind prozessspezifische, aber oft auch allgemeine Ansätze, die Energieeinsätze und Umweltbelastungen bei Außerbetriebnahme und Rückbau reduzieren - folgende Schwerpunkte können bei der Auswahl energieeffizienter und umweltfreundlicher Techniken relevant sein:

  - unterirdische Strukturen vermeiden,
  - Funktionen aufnehmen, die die Demontage erleichtern,
  - Oberflächenveredelungen wählen, die leicht zu dekontaminieren sind,
  - eine Konfiguration der Ausrüstung einsetzen, die eingebundene Chemikalien minimiert und die Dekontamination erleichtert,

- Auslegung von flexiblen, in sich geschlossenen Einheiten, die eine abschnittsweise Außerbetriebnahme ermöglichen,
- wo immer möglich, biologisch abbaubare und wiederverwertbare Materialien verwenden,
- die Verwendung von gefährlichen Substanzen vermeiden, z. B. dort, wo es Ersatzstoffe gibt (wie zum Beispiel bei Wärmeträgern oder Isolierflüssigkeiten).

e) Überprüfung

(i) Überwachung, Messung und Analyse (siehe Kapitel 2.10)

- ► Planung für Energiemessungen und der Überwachungseinrichtungen entsprechend der Größe und Komplexität der Organisation,
- ► Festlegung von Erfordernissen für die Beobachtung und Messung energierelevanter Parameter der Anlagen, Arbeitsvorgänge und Aktivitäten, die eine bedeutende Auswirkung auf den Energieeinsatz haben (können),
- ► Aufzeichnung und Analyse der Informationen und relevanter betrieblicher Kontrollen zur Prüfung auf Verbesserungspotentiale, Abweichungen und der Übereinstimmung mit den Zielvorgaben,
- ► Einführung und Aufrechterhaltung eines dokumentierten Verfahrens für die periodische Bewertung der Einhaltung der relevanten Gesetzgebung zur Energieeffizienz inkl. Genehmigungen aus dem Bereich Umweltschutz, den Regelungen und eigenen Verpflichtungen.

(ii) Benchmarking (siehe Kapitel 2.16)

- ► Analyse der Energieleistungskennzahlen in geplanten Zeitabständen,
- ► Organisationsinterne Bewertung von historischen Entwicklungen der energiebezogenen Leistung sowie Vergleiche zwischen z. B. Standorten, Anlagen, Prozessen und Produkten,
- ► Systematische und regelmäßige Vergleiche mit branchenspezifischen, nationalen oder regionalen Benchmarks durchführen.

(iii) interne Auditierung des EnMS (siehe Kapitel 2.11)

- ► Durchführung von internen Überprüfungen in geplanten Zeitabständen,
- ► Koordinierte Planung mit Ablauf- und Zeitplänen entsprechend der energetischen Bedeutung der zu überprüfenden Bereiche und Prozesse,
- ► Gewährleistung der Objektivität und Unparteilichkeit der Auditoren,
- ► Prüffelder sind das Systemaudit zur Überwachung der Konformität zu Managementnormen und der Wirksamkeit des Managementsystems, das Compliance-Audit zur Bewertung der Einhaltung rechtlicher und sonstiger Verpflichtungen sowie das Performance-Audit zur Prüfung der Verbesserung der energiebezogenen Leistung, der Erreichung von Zielvorgaben und Aktionsplänen sowie der Wirksamkeit von organisatorischen und technischen Maßnahmen,
- ► Dokumentation der Auditergebnisse und Kommunikation an das Top-Management (ggf. im Zusammenhang mit der Managementbewertung (siehe (g)),
- ► Die internen Audits können managementsystemübergreifend durchgeführt werden und Themen wie Umweltaspekte und Qualität integrieren.

(iv) Nichtkonformitäten, Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen

- ► Definition von Abweichungen und Mängeln im Rahmen des EnMS,
- ► Überprüfung von entsprechenden Nichtkonformitäten, die aufgetreten sind oder noch auftreten könnten,
- ► Einführung und Aufrechterhaltung eines Verfahrens zur Ursachenermittlung und Umsetzung von Folgemaßnahmen inkl. der Festlegung von Zuständigkeiten und Berechtigungen für die Behandlung von fehlenden Übereinstimmungen mit rechtlichen Anforderungen und anderen

Verpflichtungen ebenso wie von Zielvorlagen und Zielen mit jeweils geeigneten Aufzeichnungspflichten,
- Betrachtung von Korrekturmaßnahmen zur Heilung oder Wiederherstellung eines Zustands, Vermeidung von Fehlerwiederholungen und präventiven Vorsorge,
- Überprüfung der Wirksamkeit von Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen,
- Gegebenenfalls kann die Anpassung des EnMS als Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahme notwendig werden.

(v) Unterlagen und Aufzeichnungen

- Aufzeichnungen sind alle dokumentierten Informationen, die zum Nachweis der Konformität zu Managementsystemnormen und Darstellung sowie Verfolgung der energiebezogenen Leistung erforderlich sind.
- Einführung und Aufrechterhaltung von Verfahren für die Identifizierung, Pflege und Verteilung für rückverfolgbare Aufzeichnungen zum EnMS und zur Energieeffizienz, einschließlich Ausbildungsunterlagen und Ergebnisse von Prüfungen und Inspektionen.

f) Bewertung durch das Management

- Prüfung des EnMS durch das Top-Management in festgelegten Zeitabständen, um dessen fortdauernde Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit sicherzustellen (siehe Kapitel 2.5).
- Die Managementbewertung basiert auf als erforderlich eingestuften (z. B. durch interne Festlegungen und Normvorgaben) und dementsprechend erfassten Informationen, um es dem Management zu ermöglichen, eine systematische Auswertung durchzuführen.
- Wesentliche inhaltliche Schwerpunkte sollten die Entwicklung der energiebezogenen Leistung und die Erreichung der Zielvorgaben sein, auf deren Grundlage das Top-Management Entscheidungen für zukünftige Aktivitäten und die Ausrichtung des EnMS trifft.
- Die notwendige Aufzeichnung der Managementbewertung bietet sich in Berichtsform unter Zuordnung der Entscheidungen des Top-Managements zu den jeweiligen Berichtsinhalten an.

g) Regelmäßige Erklärung zur Energieeffizienz:

- Als Anwender eines EnMS sollten Organisationen entscheiden inwieweit sie ihre Energiepolitik und ihre energiebezogene Leistung vor allem unternehmensextern kommunizieren.
- Denkbar ist die Ausarbeitung einer Erklärung zur Energieeffizienz, die besonderen Wert auf die von einem Standort oder einer Anlage erzielten Ergebnisse im Vergleich zu ihren Zielvorgaben zur Energieeffizienz legt.
- Die Erklärungen, beispielsweise in Form eines kompakten Energieberichts, sollten regelmäßig von einmal pro Jahr bis hin zu kürzeren Intervallen in Abhängigkeit von der Bedeutung des Energieverbrauchs angefertigt werden.
- Eine Integration mit weiteren Berichtspflichten oder -schwerpunkten, wie den Geschäftsergebnissen oder dem Umweltschutz, ist möglich und zweckmäßig.
- Der Informationsbedarf von relevanten interessierten Kreisen sollte beachtet werden und eine entsprechend geeignete Zugangsmöglichkeit, von der Bereitstellung auf Anfrage bis hin zur großflächigen Verteilung in elektronischer Form, geschaffen werden.

Die Erklärung kann die Energiekennzahlen der internen Energieplanung verwenden und soll dabei sicherstellen, dass die ausgewählten Indikatoren:

- eine nachvollziehbare Beurteilung der Leistung der Anlage ermöglichen,
- verständlich und eindeutig sind,
- einen Vergleich der energiebezogenen Leistung von Jahr zu Jahr ermöglichen,

- einen Vergleich mit Benchmarks je nach Bedarf ermöglichen,
- bei Bedarf einen Vergleich mit behördlichen Anforderungen ermöglichen.

h) Validierung oder Zertifizierung durch einen zugelassenen externen Prüfer

- die Glaubwürdigkeit des Managementsystems kann deutlich durch die wiederkehrende externe und unabhängige Überprüfung und Bestätigung verbessert werden und sollte daher Ziel bei jeglichen Managementsystemansätzen sein (siehe Anwendbarkeit, unten).

Erreichter Umweltnutzen

Die Umsetzung und Weiterentwicklung des betrieblichen Energiemanagements lenken die Aufmerksamkeit der Organisation auf die energiebezogene Leistung der Anlage. Besonders die Festlegung und Einhaltung von Verfahren für sowohl normale als auch anormale Situationen und die damit verbundenen Zuständigkeiten sollen sicherstellen, dass die Zulassungsbedingungen und Genehmigungsvorschriften für die Anlage und die Zielvorgaben des Energiemanagements jederzeit eingehalten werden.

Systeme zum betrieblichen Energiemanagement sichern typischerweise die laufende Verbesserung der energiebezogenen Leistung der Anlage. Je schwächer der Ausgangszustand ist, desto bedeutendere kurzfristige Verbesserungen können erwartet werden. Falls die Anlage bereits eine gute Gesamtleistung der Energieeffizienz aufweist, kann das System dem Betreiber dabei behilflich sein, einen hohen Leistungsstand aufrechtzuerhalten.

Medienübergreifende Wirkungen

Managementtechniken der Energieeffizienz sollten so ausgelegt werden, dass sie sich in andere umweltbezogene Zielvorgaben integrieren lassen und die gesamten Umweltauswirkungen berücksichtigen, die mit dem integrierten Ansatz der IED-Richtlinie vereinbar ist. Die Energieeffizienz ist jedoch meist nur eine der verschiedenen zu erfüllenden Zielvorgaben (wie zum Beispiel das Einsparen von Rohstoffen, verbesserte Produktqualität, Reduktion der Emissionen in die Umwelt). Vertiefende Betrachtungen dazu sind dem ECFM REF <REFeference document ons Economics and Cross-media Effects> (Bezugsdokument zu betriebswirtschaftlichen Aspekten und medienübergreifende Wirkungen BVT-Merkblatt zu ökonomischen und medienübergreifenden Effekten) zu entnehmen.

Betriebsdaten

Es liegen keine spezifischen Informationen zu Betriebsdaten vor. Beispiele für mögliche Einsparungen sind im Abschnitt „Beispiele“ dargestellt.

Anwendbarkeit

1. Managementsystemelemente

Die oben beschriebenen Managementsystemelemente können typischerweise in allen IED-Anlagen angewandt werden. Der Geltungsbereich (z. B. für Teilanlagen oder einen Gesamtstandort), die Detailtiefe und die Art des Managementsystems (z. B. genormt oder nicht genormt) werden generell durch den Umfang und die Komplexität der energetischen Prozesse beeinflusst ebenso wie durch den Umfang weiterer Umwelteinwirkungen und den Betrieb von anderen Managementsystemen. Daraus folgen unter anderem folgende Möglichkeiten:

- In kleinen Anlagen kann der Spitzenmanager in Kapitel 2.1(a), (d) und (i) die gleiche Person sein.
- Die Energiepolitik 2.1(b) kann veröffentlicht werden als Teil einer Erklärung zur Umweltpolitik oder über einen Bericht zur sozialen Verantwortung der Firma.
- Andere Faktoren, wie zum Beispiel die betrieblichen Regelungen zum Wettbewerb und der Vertraulichkeit, müssen berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.1(h)). Bei einer externen Erklärung

kann die Energieeffizienz durch die Verwendung von Indizes (z. B. Y % Reduzierung, wobei der Energieverbrauch im Jahr X 100 % beträgt) anonymisiert werden.

2. Genormte und nicht genormte UMS und EnMS

Innerhalb der Europäischen Union haben viele Organisationen auf freiwilliger Basis beschlossen, Managementsysteme einzuführen, die auf die Verbesserung der energiebezogenen Leistung abzielen. Die folgenden Systeme haben sich dabei im Bereich der gesamten EU etabliert. Länderspezifische Ansätze sind zwar verfügbar und anwendbar, nehmen jedoch seit der Ausgabe von internationalen Normen weniger bedeutende Rollen ein.

Schwerpunktsetzung in anderen Managementsystemen:

Eine Möglichkeit besteht in der Ergänzung von spezifischen Anforderungen zur Energieeffizienz in bestehenden Managementsystemen. Geeignet, aber nicht ausschließlich darauf beschränkt, sind insbesondere EMS. Ein EMS kann nach ISO 14001 (4) oder dem EU Eco-Management- und Prüfprogramm (5) entwickelt und eingeführt werden. EMAS enthält dabei die Anforderungen der ISO 14001, legt aber darüber hinaus besonderen Wert auf die Rechtskonformität, ständige und verbindliche Verbesserung der Umweltleistung und Engagement der Mitarbeiter. EMAS fordert die externe Überprüfung des Managementsystems und einer öffentlichen Umwelterklärung. Bei der EN ISO 14001 ist die Erklärung eine freiwillige Ergänzung zur externen Überprüfung.

Zahlreiche Unternehmen haben zudem beschlossen, nicht genormte EMS einzusetzen, die sich in der Regelungstiefe unterscheiden oder nur Teile der verfügbaren Normen, dann aber teilweise auch detaillierter, umsetzen.

Eigenständige Energiemanagementsysteme:

- Energiemanagement auf der Grundlage der ISO 50001 (6),
- Energie-Managementsysteme auf einer nicht genormten Grundlage und angepasst, um den eigenen Bedürfnissen und Managementstrukturen zu entsprechen.

Vorteile eines genormten Systems:

- Energieeffizienz wird eine organisatorische Anforderung durch die Unternehmensführung,
- Strukturierter Ansatz und einheitliche Systematik-Konzentration auf das Thema Energieansatz - leicht integrierbar, falls ein anderes ISO-Managementsystem bereits vorhanden ist (Struktur und Terminologie parallel zu ISO 14001 und ISO 9001),
- große Unternehmen ziehen normbasierte und zertifizierte Managementsysteme vor,
- der Zertifizierungsprozess ist eine wesentliche Triebkraft für die Weiterentwicklung des EnMS und die Verbesserung der energiebezogenen Leistung,
- EnMS mit ganzheitlichem Ansatz sind am wirkungsvollsten und umfassen alle Themen der Energieversorgung, -umwandlung und -verwendung, Verhalten, Technologie und das Personal,
- Vorteile durch Dokumentationen und Aufzeichnungen sind die Transparenz und Reproduzierbarkeit von Prozessen.

Die Einführung eines international anerkannten genormten Managementsystems, wie zum Beispiel der ISO 50001, kann dem betrieblichen Energiemanagement eine höhere Glaubwürdigkeit verleihen, insbesondere wenn es einer ordnungsgemäß durchgeführten Prüfung unterliegt. EMAS bietet zusätzliche Glaubwürdigkeit aufgrund der erhöhten Öffentlichkeitswirksamkeit durch die Umwelterklärung und den Mechanismen, um die Einhaltung der Umweltgesetzgebung sicherzustellen. Im Prinzip können nicht genormte Systeme ebenso wirkungsvoll sein, vorausgesetzt, dass sie ordnungsgemäß ausgelegt und umgesetzt werden.

3. Externe Prüfung

Abhängig vom ausgewählten System kann sich der Betreiber für eine externe Prüfung entscheiden. Je nach Standard werden die Umsetzung von Normanforderungen, Wirksamkeit des Managementsystems, die Bewertung der Zielerreichung und die Konsistenz von Berichten überwacht.

4. Die Veröffentlichung der Energiepolitik (siehe (h) oben) kann durch Gründe der Vertraulichkeit und des Wettbewerbs eingeschränkt werden. Obwohl sie als ein Treiber wirken kann, steigert sie nicht die Energieeffizienz als solche. Die allgemeine Politik für die Energieeffizienz kann der Öffentlichkeit neben Daten zur energiebezogenen Leistung in einem Unternehmensbericht zur sozialen Verantwortung zugänglich gemacht werden - z. B. siehe „Beispiele“ und Anhang 7.4.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Es ist schwierig, die Kosten und den wirtschaftlichen Nutzen der Einführung und der Aufrechterhaltung eines wirksamen Energiemanagements genau zu bestimmen. Man sollte sich jedoch immer vor Augen halten, dass Nettoenergiekosteneinsparungen unmittelbar zum Bruttogewinn beitragen.

Siehe Beispiele unten.

Triebkräfte für die Einführung eines Energiemanagements

Managementsysteme zur Steigerung der Energieeffizienz können eine Anzahl von Vorteilen bieten, zum Beispiel:

- verbesserte Einsicht in die Energieaspekte des Unternehmens,
- Erhöhung der Energieeffizienz und Übereinstimmung mit Energieeffizienzzielen (siehe Anhang 7.4),
- verbesserte Wettbewerbsfähigkeit, besonders hinsichtlich des Trends von steigenden Energiepreisen,
- zusätzliche Möglichkeiten für betriebliche Kostenreduzierung und Verbesserung der Produktqualität,
- verbesserte Grundlage für Beschlussfassungen im Bereich Energie,
- verbesserte Motivation des Personals,
- verbessertes Firmenimage,
- gesteigerte Attraktivität für Mitarbeiter, Kunden und Investoren,
- gesteigertes Vertrauen der Kontrolleure, was zu einer reduzierten Beaufsichtigung durch die Aufsichtsbehörden führen könnte,
- Kumulation anlagenbezogener Effizienzmaßnahmen zu regionalen Effekten in der Energieversorgung (siehe z. B. Anhang 7.11), Umsetzung politischer Energieabkommen und Nutzung der Anreize zur Energieeffizienz (siehe z. B. Anhänge 7.12, 7.13 und 7.14).

Beispiele

Übersichten zu Energieeffizienzsteigerungen durch systematische Energiemanagementsysteme finden sich zum Beispiel in den Umwelterklärungen der EMAS-Organisationen in Deutschland. Ein Register aller EMAS-Betriebe ist unter http://www.emas.de/fileadmin/user_upload/03_teilnahme/PDF-Dateien/EMAS-TN-Register.pdf aufgelistet.

Nachfolgend sind zwei Beispiele aufgelistet.

Beispiel 1: CWS-Lackfabrik GmbH & Co. KG (7)

Die CWS Lackfabrik mit Standorten in Düren-Merken und Hamburg ist ein Produzent von Lacken und Farben mit 195 Mitarbeitern. Das Unternehmen führt bereits seit 1996 Umweltbetriebsprüfungen durch und erstellt jährliche Umwelterklärungen. Sie enthält eine Übersicht über die Verbrauchsentwicklung und Energiekennzahlen sowie über die bereits durchgeführten und geplanten Umweltziele. In den letzten 3 Jahren konnte der Energiebezug jährlich im Durchschnitt um 3 %

gesenkt werden. Die Umwelterklärung kann unter http://cws-powder.de/file_download/246/Umwelterkl%C3%A4rung_2016.pdf eingesehen werden.

Beispiel 2: HUMAN Gesellschaft für Biochemica und Diagnostica mbH (8)

Die HUMAN Gesellschaft für Biochemica und Diagnostica mbH (HUMAN) ist ein etablierter Hersteller von in-vitro-diagnostischen Reagenzien und Geräten. Im Jahr 2014 wurde ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 und EMAS III für die Standorte in Wiesbaden und Magdeburg eingeführt. Die Umweltleistung und Umweltaspekte des Unternehmens werden in dieser Umwelterklärung 2015 zusammengefasst. Sie kann unter http://www.human.de/fileadmin/content/01_About_HUMAN/Documents/2015_Umwelterklaerung_Logo_de.pdf eingesehen werden.

Wichtige länderübergreifende Normen für Managementsysteme zur Steigerung der Energieeffizienz

- ISO 50001:2018 Energiemanagementsysteme (international),
- Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung (EMAS), (http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32009R1221),
- ISO 14001:2015, Umweltmanagementsysteme (international).

Leitfäden und Arbeitsmaterialien zur Einführung von Energiemanagementsystemansätzen

- https://www.izu.bayern.de/branchenleitfaeden/,
- https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3959.pdf,
- https://www.izu.bayern.de/emaskompass/.

2.2 Planung und Feststellung von Zielen und Plansoll

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.3 Energieeffizientes Design

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.4 Erhöhte Prozessintegration

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.5 Die treibende Kraft der Initiativen zur Energieeffizienz aufrechterhalten

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.6 Fachwissen - Humankapital aufrechterhalten

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.7 Kommunikation

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.8 Wirkungsvolle Prozesskontrolle

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.9 Instandhaltung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.10 Überwachung und Messung

Beschreibung

Überwachung und Messung sind ein unbedingt erforderlicher Teil einer Prüfung in einem Energiemanagementsystem (siehe Kapitel 2.1(f)(i)), da sie in jedem Managementsystem ‘planen-umsetzen-prüfen-handeln‘ zu finden sind. Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über grundlegende Techniken zum Messen, Berechnen und Überwachen von Energiedaten. Kapitel 2.15.1 diskutiert auch die Datenerfassung, Datenbanken und die Automatisierung von Steuerungssystemen und Ausrüstung, insbesondere mehrere vernetzte Systeme, um deren Energieverbrauch zu optimieren.

Messung und Überwachung sind Teil der Prozesskontrolle (siehe Kapitel 2.8) und der Prüfung (siehe Kapitel 2.11). Die Messung ist wichtig, um zuverlässige und auffindbare Informationen über Themen zu erhalten, die die Energieeffizienz beeinflussen, was sowohl die Mengen (MWh, kg, Dampf etc.) als auch die Qualitäten (Temperatur, Druck etc.) in Übereinstimmung mit dem Energieträger (Dampf, heißes Wasser, Kühlung etc.) betrifft. Für einige Energieträger kann es gleichermaßen wichtig sein, die Parameter des Energieträgers in den Rücklaufleitungen oder den Emissionen von Abfall (z. B. Abgase, Einleitungen von Kühlwasser) zu kennen, um Energieanalysen zu ermöglichen und Ausgleiche zu erstellen etc. (siehe Beispiele in Kapitel 2.12).

Ein Kernaspekt der Überwachung und Messung ist es zu ermöglichen, dass die Kostenrechnung auf der Grundlage des realen Energieverbrauchs und nicht auf willkürlichen oder geschätzten Daten (die überholt sein können) erfolgt. Sie liefert den Impuls, für die Verbesserung der Energieeffizienz Änderungen vorzunehmen. Es kann jedoch in bestehenden Anlagen zum Beispiel schwierig sein, die erforderlichen langen Rohrleitungsstränge zu finden, um niedrige, turbulenzfreie Bereiche für die Durchflussmessung zu bekommen. In solchen Fällen oder wo der Energieverbrauch der Ausrüstung oder der Aktivitäten verhältnismäßig niedrig ist (im Verhältnis zum größeren System oder Anlagen, in denen sie enthalten sind), können Schätzungen oder Berechnungen noch verwendet werden.

Neben der Zuordnung des mengenmäßigen Energieverbrauchs auf einzelne Verbraucher oder Verbrauchergruppen besteht eine weitere Hauptaufgabe der Messung und Überwachung darin, den zeitlichen Verlauf des Verbrauchs darzustellen. Die volatile Erzeugung erneuerbarer Energien, wie zum Beispiel aus Photovoltaik oder Windkraft, führt zu einem schwankenden Stromangebot. Zukünftig werden sich vermehrt Preismodelle durchsetzen, bei denen sich die Kosten der Energieträger nach dem aktuellen Angebot am Markt orientieren. Durch das bedarfsgerechte Zu- und Abschalten von Lasten, dem sogenannten Demand-Side-Management, können Unternehmen ihren Strombezug abhängig von der Einspeisung volatiler erneuerbarer Energien steuern. Voraussetzung für das Demand-Side-Management ist es zu wissen, wie der zeitliche Verlauf des Verbrauchs im Unternehmen ist und welche Verbraucher ihn maßgeblich bestimmen. Die Kenntnis ist auch die Voraussetzung, um die Anschaffungen von Eigenerzeugungsanlagen auf Grundlage erneuerbarer oder konventioneller Energiequellen, wie zum Beispiel Blockheizkraftwerke oder Photovoltaikanlagen, prüfen und bewerten zu können.

Zusätzlich werden oft Stoffflüsse für die Prozesskontrolle gemessen und diese Daten können verwendet werden, um Indikatoren der Energieeffizienz etc. einzuführen (siehe z. B. (9)).

Für die Überwachung und Messung von Energiedaten ist die Methodik, wie diese Daten erfasst werden, ausschlaggebend. Im Allgemeinen lassen sich diesbezüglich folgende Methoden unterscheiden:

Theoretische Ansätze

Zu den theoretischen Ansätzen zählen die Schätzungen und Berechnungen des Energieverbrauchs. Sie können für Ausrüstung und Systeme durchgeführt werden, üblicherweise auf der Grundlage der Spezifikationen der Hersteller oder Planer. Oft erfolgen die Berechnungen auf der Grundlage eines leicht gemessenen Parameters, wie zum Beispiel Betriebszeitmesser an Motoren oder Pumpen. In diesen Fällen müssen jedoch auch andere Parameter, wie zum Beispiel die Last oder Druckhöhe und Drehzahl, bekannt (oder berechnet) sein, da dies eine unmittelbare Wirkung auf den Energieverbrauch hat. Der Hersteller der Ausrüstung liefert üblicherweise diese Information.

Im Internet (siehe die verweisenden Informationen unten und in spezifischen Abschnitten dieses Dokuments) ist eine Vielzahl von Berechnungshilfen verfügbar. Diese sind üblicherweise darauf ausgerichtet, Energieeinsparungen für verschiedene Ausrüstungen einzuschätzen.

Messungen

Im Allgemeinen kann bei der Überwachung und Messung zwischen der temporären und der kontinuierlichen Messung unterschieden werden.

Bei temporären Messungen werden über einen begrenzten Zeitraum Daten aufgezeichnet, die sonst nicht zur Verfügung stehen würden. Aufgrund der begrenzten Messperiode besteht jedoch die Gefahr, dass die Ergebnisse nicht repräsentativ für die gemessene Anlage/das gemessene System sind.

Kontinuierliche Messungen schließen diese Fehlerquelle aus. Sie ermöglichen es zudem Langzeitentwicklungen aufzuzeigen und so Einflussfaktoren auf den Verbrauch zu bestimmen.

Indirekte Messtechniken

Rückschlüsse auf den Energieverbrauch von Anlagen und Geräten können auch durch indirekte Messtechniken erfolgen. So liefern z. B. Infrarotaufnahmen von schwerer Maschinerie fotografischen Nachweis von heißen Stellen, die Energieabflüsse und unnötige Beanspruchungen auf den beweglichen Teilen verursachen. Dies kann als Teil einer Prüfung verwendet werden.

Bei kritischer Ausrüstung mit Auswirkung auf den Energieverbrauch, z. B. Lager, Kondensatoren (siehe Kapitel 3.5.1) und andere Ausrüstungen kann die Betriebstemperatur fortlaufend oder in regelmäßigen Abständen überwacht werden: Wenn das Lager oder die Kapazität anfangen abzubauen, steigt die Temperatur des Gehäuses.

Andere Messungen von anderen Änderungen bei Energieverlusten, wie zum Beispiel bei steigendem Lärm etc., können durchgeführt werden.

Komplexe Messsysteme

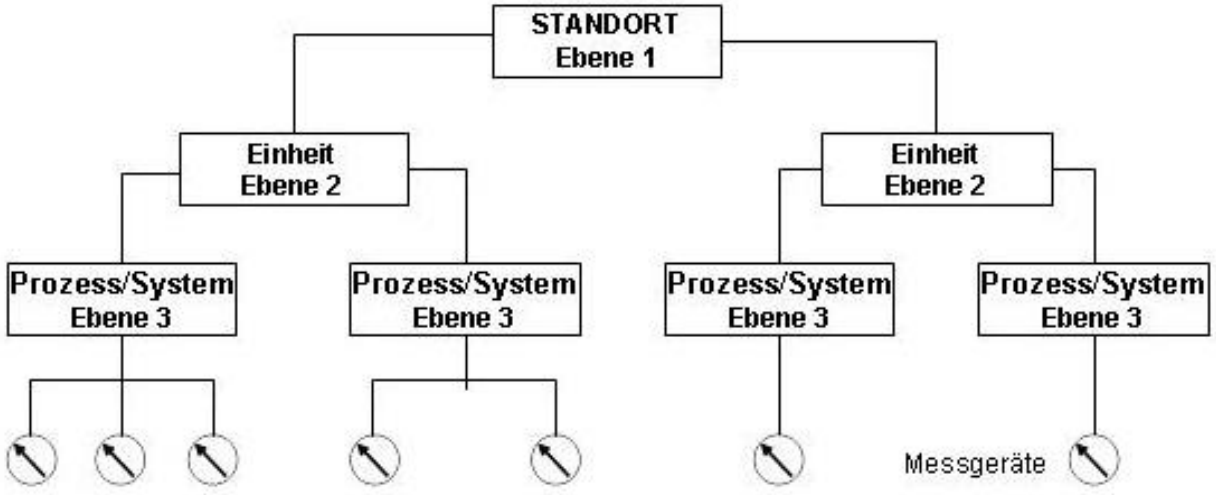
Moderne technologische Fortschritte haben zu immer billigeren Zählern geführt, die viel weniger Platz benötigen und installiert werden können, ohne die Energieversorgung zu unterbrechen (z. B. wenn sie mit Klappkern-Stromsensoren eingebaut werden). Dadurch wird es ermöglicht, Daten von nahezu allen Verbrauchern zu messen, aufzunehmen und zu analysieren. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass mit der Anzahl der Messpunkte auch die Kapazitäten für die Auswertung und Speicherung der Daten mitentwickelt werden müssen.

Komplexe Messsysteme ermöglichen es, diese Daten übersichtlich aufzuarbeiten und den Energieverbrauch mit Produktionsvariablen, wie zum Beispiel Durchsatz, in Verbindung zu bringen (siehe Kapitel 1.4). Diese Infrastruktur enthält Hardware und Software für Kommunikation mit vom Kunden verbundenen Systemen und dem Datenmanagement der Zähler.

Ein Beispiel für eine Struktur eines komplexen Messsystems wird in Abbildung 2.10-1 gezeigt.

Ein komplexes Messsystem ist unbedingt erforderlich für automatisierte Energie-Managementsysteme, siehe die Kapitel 2.15 und 2.15.2.

Abbildung 2.10-1: Struktur eines komplexen Messsystems



Quelle: (10)

Anwendbarkeit

Theoretische Ansätze

- Schätzungen und Berechnungen liefern eine erste Einschätzung über die Verteilung des Energieverbrauchs im Unternehmen.
- Abhängig von der Komplexität der Energieversorgung und der Höhe des Energieverbrauchs sollten die Ergebnisse von Berechnungen und Schätzungen durch genauere Messverfahren überprüft werden.
- Bei Schätzungen und Berechnungen ist zu beachten, dass die Datenbasis regelmäßig aktualisiert wird, da es sonst zu teureren Irrtümern führen kann (siehe Beispiele in Anhang 7.7.1). Die Grundlage der Berechnungen sollte regelmäßig überprüft werden.

Temporäre Messungen

- Zur Bestimmung des Energieeinsatzes von gängigen- und kontinuierlich betriebenen Geräten, wie Drucklufterzeugung, Pumpen, Ventilatoren, Antriebsmotoren, Wärme- und Kälteerzeugung sowie Beleuchtung und Bürogeräte.
- Temporäre Messungen ermöglichen eine Abschätzung, ob es sich bei dem gemessenen Verbraucher um einen wesentlichen Energieverbraucher im Unternehmen handelt und eignen sich daher dazu zu bestimmen, ob eine kontinuierliche Messung empfehlenswert ist.
- Auf Grundlage von temporären Messungen können Einsparungen von Energieeffizienzmaßnahmen berechnet, die Effizienz von Systemen und Anlagen bestimmt und Lastprofile erstellt werden.

Kontinuierliche Messungen

- Zur Bestimmung des Energieeinsatzes von wesentlichen Energieverbrauchern, bei denen eine Hochrechnung auf Grundlage einer temporäre Messung zu ungenau ist.
- Aufgrund der sinkenden Kosten für Messtechnik verfügen neue Anlagen/Maschinen häufig bereits über integrierte Messtechnik.
- Ein kontinuierliches Messkonzept ist die Voraussetzung für ein Energiecontrolling mit einer Echtzeit-Datenverarbeitung.

- In komplexen Systemen werden kontinuierliche Messungen genutzt, um den Energiefluss zu strukturieren. Abhängig von der Unternehmensgröße und -komplexität sowie des Energiebedarfs steigt der Bedarf an kontinuierlichen Messungen.

Indirekte Messungen

- als Teil der vorbeugenden Instandhaltung

  - vermeidet sie die unerwartete Abschaltung der Anlage,
  - ermöglicht sie den geplanten Austausch,
  - erweitert sie die Lebensdauer der Ausrüstung etc.

komplexe Messsysteme

- Überall da, wo es mehrere Systemeinheiten gibt, die Energie verbrauchen,
- Je komplexer ein System ist, desto höher entwickelt muss das Messsystem sein.

Umfang und Aufwand für die Überwachung und Messung in einem Unternehmen sollten sich an der Höhe des betrieblichen Energieverbrauchs orientieren. Nachfolgende Tabelle beinhaltet Orientierungswerte darüber, welche Methoden für die Überwachung der energetischen Hauptmerkmale und der energetischen Leistung angemessen sind. Als Gruppierungsmerkmale dienen hierbei die Energiekosten je Standort und Jahr. Je höher die Energiekosten sind, desto genauer sollte die Messung und Überwachung erfolgen (10).

Tabelle 2.10-1: Orientierungswerte für die angemessene Ausrüstung mit Systemen zur Energiedatenerfassung

Energiekosten je Standort und Jahr (Orientierungswerte)	Überwachung der energetischen Hauptmerkmale und der energetischen Leistung
bis 10.000 €	EVU-Messung[a], theoretische Abschätzung, Messkonzept
10.000 – 100.000 €	EVU-Messung, theoretische Abschätzung, Verifizierung durch mobile Messung, Messkonzept und ggf. Nachrüstung einzelner Zähler
100.000 – 1.000.000 €	EVU-Messung, theoretische Abschätzung, Verifizierung durch mobile Messung, kontinuierliche Untermessung, Messkonzept, langfristig automatische Datenerfassung empfohlen
Über 1.000.000 €	EVU-Messung, kontinuierliche Untermessung, theoretische Abschätzung für Unterverteilungen möglich, Verifizierung durch mobile Messung, Messkonzept, automatische Datenerfassung

[a] EVU-Messungen sind Messungen zur Abrechnung des Energieverbrauchs für das Energieversorgungsunternehmen
[b] Untermessungen sind Messungen an einer Unterverteilung im System, z. B. die Messung des Stromverbrauchs eines einzelnen Gebäudebereichs oder die Messung des Wärmeverbrauchs einzelner Räume. Die Festlegung, wo Untermessungen sinnvoll sind, erfolgt im Messkonzept

Quelle: (11)

In der Praxis hat sich etabliert, dass durch die Messung und Überwachung mindestens 90 % des Gesamtenergieverbrauchs abgedeckt werden sollte. Es sind also die Bereiche zu identifizieren, die 90 % des Gesamtenergieverbrauchs verursachen. In diesen Bereichen sind die Verbräuche auf konkrete Verbrauchertypen aufzuschlüsseln; vgl. (12), (13).

Erreichter Umweltnutzen

Leistet Hilfe beim Erkennen und Erzielen von Energieeinsparungen.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine bekannt.

Betriebsdaten

Siehe Beschreibung

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Schätzungen und Berechnungen erfordern keine Investition in die Ausrüstung. Es sollte jedoch die Arbeitszeit der Belegschaft für die Erstellung genauer Berechnungen berücksichtigt werden, ebenso wie das Kostenrisiko für Fehler.

Messungen ermöglichen eine Zuweisung der Kosten auf der Basis des Verbrauchs. Mit steigender Messdauer sinkt das Risiko einer Fehlbewertung des Verbrauchs. Hierfür sind jedoch Investitionen in die Ausrüstung notwendig.

In vielen Unternehmen sind technische Verantwortlichkeiten (z. B. für das Erkennen und Planen von Effizienz-Maßnahmen) und betriebswirtschaftliche Verantwortlichkeiten (z. B. für die Freigabe von Investitionen) organisatorisch getrennt. Dies stellt höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit/ Genauigkeit der betriebswirtschaftlichen Bewertung der Effizienz-Maßnahmen. Eine messtechnische Erfassung der wesentlichen Verbraucher im Unternehmen ermöglicht es, Risiken bei der Investition zu minimieren und Einspareffekte konkreten Maßnahmen und Bereichen zuzuordnen. Liegen keine messtechnischen Belege für das Einsparpotenzial von Energieeffizienz-Maßnahmen vor, werden wegen der höheren Unsicherheit Investitionen für die Maßnahmen oft nicht freigegeben.

Ein weiterer Vorteil der detaillierten Energiedatenerfassung besteht darin, dass nach der Umsetzung von Maßnahmen besser nachvollzogen werden kann, ob die erwarteten Einsparungen eingetreten sind. Damit kann den betreffenden Bereichen der Nutzen aus einer Einsparung von Energiekosten direkt zugeordnet werden.

Triebkraft für die Umsetzung

Siehe betriebswirtschaftliche Aspekte.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

- Beispiele von Online-Rechnern, siehe verweisende Informationen unten,
- Beispiel hoch entwickeltes Messsystem:

  Zwei Unternehmensbereiche (betriebliche Einheiten) teilten sich einen Zähler der Elektrizitätsversorgung. Die Kosten wurden auf einer Grundlage von 60/40 aufgeteilt. Die 60 % zahlende Einheit hatte unverhältnismäßig hohe Energiekosten und als Folge dieser zugewiesenen Festkosten wurde die Schließung und Umsiedlung der Einheit an einen anderen Standort in Erwägung gezogen. Ein fortschrittlicheres Messungssystem mit automatischen Zählerablesungen wurde installiert (siehe Kapitel 2.15.2). Dies zeigte, dass der 60 % zahlende Bereich tatsächlich < 41 % der gesamten elektrischen Energie verwendete. Es erkannte auch einen Wärmebehandlungsprozess, der einmal wöchentlich eine Stromspitze von 175 kW verursachte. Dieser wurde auf eine Tageszeit mit einem billigeren Tarif verlagert (siehe Kapitel 7.11). Die gesamten Einsparungen betrugen 324.000 USD (≈ 240.000 Euro) pro Jahr (14), (15).

Verweisende Informationen

(10); (11); (12); (13); (16)

Folgendes wurde bei einer Suche im Internet nach ‚Industrieller Energieeffizienz, Rechner‘ gefunden (Hinweis: Diese Seiten können sich im Lauf der Zeit ändern oder aufhören zu existieren):

- Online-Tool zum Überblick über Software zum Monitoring von Energiedaten: http://www.energieagentur.nrw/energieeffizienz/unternehmen/ems.marktspiegel
- Energiesparchecks: http://www.co2online.de/service/energiesparchecks/
- Online-Tool zum Thema Demand Side Management: http://www.dsm-bayern.de/toolbox/kurzcheck-dsm/
- Online-Rechner Center. Eine große Liste von Energierechnern: http://www.martindalecenter.com/Calculators1A_4_Util.html
- Energierechner und Benchmark-Werkzeuge: http://energypathfinder.blogspot.com/2007/02/energy-calculators-and-benchmarking.html
- Allgemeines Geschäft, Beleuchtung, Ausrüstung, Büroeinrichtung: http://www1.eere.energy.gov/femp/procurement/eep_eccalculators.html
- Beleuchtung: http://www1.eere.energy.gov/femp/procurement/eep_hid_lumen.html

2.11 Energie-Audits und Energiediagnose

Beschreibung

Im Allgemeinen ist ein Audit eine Bewertung einer Person, Organisation, eines Systems, Prozesses oder Produkts. Audits werden durchgeführt, um die Gültigkeit und Zuverlässigkeit von Informationen sicherzustellen und auch, um eine Beurteilung der internen Kontrolle eines Systems zu liefern. Historisch entwickelten sich Audits zunächst im Finanz- und Steuersektor, zur Beurteilung von finanziellen Systemen und Aufzeichnungen.

Energieaudits fokussieren sich dementsprechend darauf, die „systematische Inspektion und Analyse des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs einer Anlage, eines Gebäudes, eines Systems oder einer Organisation mit dem Ziel, Energieflüsse und das Potenzial für Energieeffizienzverbesserungen zu identifizieren und über diese zu berichten“ (17).

Ein Audit beruht auf Probenahmen und Feststellungen zum Auditzeitpunkt und es gibt keine Zusicherung, dass die Feststellungen eines Audits frei von Irrtümern sind. Das Ziel ist jedoch, jegliche Irrtümer zu minimieren, also die Informationen gültig und zuverlässig zu machen. Typischerweise wird ein Energie-Audit durchgeführt, um Möglichkeiten zu suchen, die Menge der Energieeingabe in das System ausgehend von einem analysierten Bezugszustand ohne negative Auswirkungen auf die Leistung(en) zu verringern.

In der Praxis gibt es weite Bereiche von Typen und Komplexitäten der Energie-Audits. Verschiedene Arten von Audits können in verschiedenen Phasen des Energiemanagements und/oder sich unterscheidender Komplexitäten der Situationen eingesetzt werden. Für viele Arbeitsschritte wurden unterstützende Softwarelösungen entwickelt, welche frei am Markt verfügbar sind. Infolge der sehr dynamischen Entwicklung von unterstützenden Softwarelösungen für betriebliches Energiemanagement empfiehlt sich in der Regel eine Recherche der aktuellen Marktlage.

Für die Durchführung von Energieaudits haben sich bereits europaweit geltende Normen etabliert. Im Wesentlichen besteht der Energieauditprozess aus nachfolgenden Elementen; vgl. (17), (18):

1. Einleitender Kontakt,

2. Auftaktbesprechung,
3. Datenerfassung,
4. Außeneinsatz,
5. Analyse,
6. Bericht,
7. Abschlussbesprechung.

Abhängig von den Bedürfnissen eines Unternehmens kann der Umfang und die Detailtiefe für die Bearbeitung der einzelnen Elemente eines Energieaudits spezifiziert werden. In der nachfolgenden Tabelle werden drei verschiedene Typen von Energieaudits aufgezeigt, die sich bezüglich typischer Anwendung, Zielstellung, Datenerfassung, Analyse, Identifizierung und Bewertung von Energieeinsparmöglichkeiten und Ergebnissen unterscheiden. Dabei handelt es sich jedoch lediglich um Empfehlungen, die auf die Bedürfnisse des Unternehmens angepasst werden können. Der angemessene Umfang eines Energieaudits und der Tiefe der Betrachtung hängen unter anderem von den Objekten, auf das sich das Audit bezieht, dem Energieeinsatz, der Energienutzung und den für das Audit verfügbaren Kapazitäten ab.

Begriffliche Abgrenzung zwischen Energie-Audit und EnMS

Das Wesen der in Kapitel 2 beschriebenen **Energiemanagement**systeme ist ein **kontinuierlicher** Verbesserungsprozess, d. h., Energiemanagement ist eine Daueraufgabe für ein Unternehmen. Inhaltlicher Schwerpunkt ist die **Organisation** der energiebezogenen Abläufe im Unternehmen. Der Begriff **Energie-Audit** wird sowohl für das methodische Instrument zur energetischen Bewertung als auch für die in einem **eng begrenzten Zeitraum** stattfindende Aktion der zeitpunktbezogenen **energetischen Bewertung** verwendet. Das Wesen von Energie-Audits ist eine zeitpunktbezogene Sachstandsdarstellung energietechnischer Fakten und die Identifikation von energetischen Verbesserungspotentialen.

Energieaudits können Initialstufe und auch wiederkehrender Bestandteil eines EnMS sein. Es ist wiederum abzugrenzen von den internen Audits von ISO-Managementsystemen (System-Audits), die insbesondere die organisatorischen Aspekte der Umsetzung und betrieblichen Einhaltung von Managementvorgaben und -verfahren überwachen. Folgend sind wesentliche Unterschiede beider Ansätze aufgeführt:

Energie-Audit	Energiemanagementsystem
Instrument/Methodik zur energetischen Bewertung	Ansatz zur Unternehmensführung
Kurzfristig ausgerichtete Durchführung (< 1 Jahr)	Langfristig ausgerichtet (> 5 Jahre)
Mögliche Beschränkung auf einzelne Energieträger, Unternehmensbereiche, Anlagen	Üblicherweise unternehmensweite Einführung ohne Einschränkungen in der Energiebilanz
Momentaufnahme der energetischen Situation, üblich in größeren Intervallen	Wiederkehrende Abläufe mit regelmäßigen bis kontinuierlichen Betrachtungen
Charakter einer Energie-Studie bzw. eines Energiekonzeptes mit überwiegend technischen und wirtschaftlichen Angaben	Charakter eines Betrieblichen Regelwerks (Fokus auf organisatorische Aspekte und betriebliche Regelungen)

Tabelle 2.11-1: Hinweise und Details zu verschiedenen Energie-Audit-Typen nach ISO 50.002:2014-07

Typ	1	2	3
Typische Anwendung	Gebäude/Prozesse oder Flotten Geeignet als: Energieaudit von kleinen Organisationen oder Einrichtungen oder Vorprüfung für große Organisationen oder Einrichtungen	Einzelstandort/-prozesse oder Flotten. Detailliertes Energie-Audit. Im Allgemeinen nicht kosteneffektiv für Unternehmen mit kleineren Energiebudgets.	Alle Standorte, Prozesse, Systeme oder Flotten. Umfassendes Energieaudit mit signifikanten Input aus der Organisation. Im Allgemeinen nur kosteneffizient für Organisationen mit hohem Energieverbrauch oder Institutionen mit gezielten Investitionszuschüssen Auch anwendbar auf Systemebene (z. B. Druckluft)
Zielstellung	Hinweise auf Einsparpotenziale und Vorteile, die aus genaueren Untersuchungen resultieren könnten, wie beispielsweise Typ 2 oder Typ 3 Energie-Audits. Identifizierung der Schwerpunkte für die Energie-Management-Ressourcen. Verbessertes Bewusstsein für Energiekosten und die potenziellen Vorteile des Energie-Managements.	Identifikation und Bewertung einer Reihe von kohärenten und spezifischen Chancen mit quantifizierten Kosten und Nutzen. Identifizierung von Möglichkeiten für eine weitere oder detailliertere Untersuchung. Auditoren sollten geeignete technische, unternehmerische und berufliche Erfahrungen und Fähigkeiten haben und mit der auditierten Energienutzung vertraut sein. Auditoren mit entsprechenden beruflichen Fähigkeiten und Know-how analysieren Energie- und Prozess, um Chancen zu identifizieren und zu bewerten.	Identifizierung und Bewertung einer Reihe von kohärenten und spezifischen Energieeffizienz-Verbesserungsmöglichkeiten mit identifizierten Kosten und Nutzen, einschließlich Quantifizierung von "Nicht-Energie-Gewinnen". Auditoren sollten angemessene technische, unternehmerische und berufliche Erfahrungen und Fähigkeiten haben und mit der spezifischen auditierten Energienutzung vertraut sein. Auditoren sollten detaillierte Energy- und Prozessdaten analysieren, um so Energieeinsparmöglichkeiten zu identifizieren, zu prüfen und zu bewerten. Detailliertere Untersuchung von Möglichkeiten. Prüfung von Geschäftsstrategien im Audit.
Datenerfassung	Technische Planungen oder Zeichnungen zum allgemeinen Verständnis von Energiequellen und -systemen	Insgesamt verfügbare Energiedaten, einschließlich Tageslastprofile Relevante variable Daten (z. B. Produktionsdaten, Belegungsdaten), um	Betriebs-/Lastprofil des Standortes oder der Flotte. Relevante variable Daten (z. B. Produktionsdaten, Belegungsdaten), um EnPIs

Typ	1	2	3
	Energiedaten der Gebäude, einschließlich Unterzähler und Tageslastprofile (wo verfügbar) Dazugehörige Daten zu relevanten Variablen (z. B. Produktionsdaten, Belegungsdaten), um Gesamt-EnPIs zu etablieren Inventarlisten des Standortes inklusive von Energiedaten, Gerätebeschreibungen, Betriebspläne und Schätzungen der Belastungsfaktoren	EnPIs für wesentliche Energieverbraucher zu etablieren Daten von Unterzähler Volle Nutzung der verfügbaren Standortdaten; es ist nicht erforderlich, dass der Auditor im Rahmen der Prüfung zusätzliche Messungen durchführt, es sei denn der Bedarf an zusätzlichen Daten ist erforderlich, um die Anforderungen des Prüfungsumfangs zu erfüllen. Energiedaten und Informationen, die im Audit gesammelt werden, könnten umfassen: Detaillierte Daten über energie-verbrauchende Systeme, Prozesse und Ausrüstungen, einschließlich bekannter relevanter Variablen Überwachungsgeräte -Konfiguration und Analyseinformationen Planungs-, Betriebs- und Wartungsdokumente Energie-Audits oder frühere Studien im Zusammenhang mit Energie und Energieeffizienz Pläne für die Zukunft, die den Energieverbrauch beeinflussen Produktions- und Prozessdaten für die Leistungsbewertung	für wesentliche Energieverbraucher zu etablieren. Unterzählerdaten, bewertet bis zur Lastprofil-Ebene für signifikante Zähler. Energieverbrauchsdaten für die Hauptprozesse, -systeme und -geräte. Volle Nutzung der verfügbaren Standortdaten, einschließlich gemessener Intervalldaten. Installation zusätzlicher Unterzähler zur Überwachung oder Ausführung spezifischer Aufzeichnungsübungen sollte in Betracht gezogen werden. Die Daten sollten für einen ausreichenden Zeitraum gesammelt werden, um den erwarteten Bereich von Werten für die relevanten Variablen und Systemanforderungen zu ermitteln. Energiedaten und Informationen, die in der Prüfung analysiert werden, könnten umfassen: Detaillierte Daten über energie-verbrauchende Systeme, Prozesse und Ausrüstungen, einschließlich bekannter relevanter Variablen Überwachungsgeräte-Konfiguration und Analyseinformationen Planungs-, Betriebs- und Wartungsdokumente Energie-Audits oder frühere Studien im Zusammenhang mit Energie und Energieeffizienz Pläne, die den zukünftigen Energieverbrauch beeinflussen Informationen darüber, wie die Organisation die eigene Energieeffizienz managt

Typ	1	2	3
			Lieferantenangebote für Verbesserungsmöglichkeiten.
Analyse	Energieverbrauchsdaten und Gerätedaten, um Geräte, Systeme und/oder Prozesse zu organisieren Energieverbrauch und Gerätedaten, um eine vorläufige Energiebilanz vorzubereiten und den wesentlichen Energieverbrauch zu identifizieren. High-Level-Review der Verbrauchs-profile, um Anomalien in Tages-, Wochen-, Monats- oder Saison-lastgängen zu identifizieren Vergleich mit verfügbaren Benchmarks, um wesentliche Energieverbraucher oder Ineffizienzen zu identifizieren.	Analyse der aktuellen und historischen Energiedaten. EnPIs auf Anlagen-, Flotten-, System-, Prozess- oder Geräteebene für die Analyse von spezifischen Chancen, wo anwendbar. Detaillierte Energiebilanz unter Berücksichtigung von Untermessdaten auf Jahres- und Profil-Ebene, einschließlich saisonaler oder produktionsbedingter Schwankungen, soweit anwendbar. Massenbilanzen für Geräte, Systeme und/oder Verfahren, die wesentliche Produktflüsse umfassen und den Energieverbrauch beeinflussen oder eine gleichwertige Analyse von Energie- und Stoffströme. Bilanzen, um die aktuelle Leistung und Verbesserungspotenziale festzustellen. Auswertung der Planungs- und Konfigurationsoptionen, um die Systemanforderungen zu bestimmen. Bewertung der Verbesserung der Energieeffizienz im Zusammenhang mit Ausrüstungs-, System- oder Prozessänderungen.	Analyse der aktuellen und historischen Energiedaten . EnPIs auf Werksbereichs- oder Flotten-Ebene und für den wesentlichen Energieverbrauch. Detaillierte Energiebilanz unter Berücksichtigung von Daten von Unterzählern, unter Verwendung von Daten mit ausreichender Auflösung, um Schwankungen in der Leistung zu erfassen. Massenbilanz für Vorgänge, die wesentliche Produktflüsse umfassen und den Energieverbrauch beeinflussen (oder eine entsprechende Analyse der Energie- und Massenströme). Bewertung von Planung und Konfiguration von Optionen, um die Systemanforderungen zu bestimmen. Anwendung einer Reihe von Analyseverfahren, um eine Beziehungen zwischen Energieverbrauch und den relevanten Variablen zu erkunden. Empfehlungen für zusätzliche Daten/ Untersuchung zur Verbesserung der Datengenauigkeit
Identifikation von möglichen Maßnahmen	Begehungen zur Sichtkontrolle des Energieverbrauchs Identifizierung und Quantifizierung von geringinvestiven und leicht umsetzbaren Energieeffizienz-Verbesserungsmöglichkeiten Identifizierung kapitalintensiver Verbesserungsmöglichkeiten im Bereich der Energieeffizienz auf einer generischen Ebene, aber nicht bis zur technischen Lösung betrachtet.	Ein oder mehrere Besichtigungen von Standorten bezüglich des Energieverbrauchs können für die Erfüllung der Audit-Anforderungen notwendig sein Identifizierung einer Reihe von spezifischen und realisierbaren Energieeffizienz-Verbesserungsmöglichkeiten, einschließlich kurz-, mittel- und langfristiger Maßnahmen zu Energieeinsparungen in Abstimmung mit der detaillierten Energiebilanz	Ein oder mehrere Besichtigungen von Standorten bezüglich des Energieverbrauchs können für die Erfüllung der Audit-Anforderungen notwendig sein Quantifizierung einer Reihe von spezifischen und realisierbaren Energieeffizienz-Verbesserungsmöglichkeiten, einschließlich kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen (falls gewünscht) mit Energieeinsparungen in Abstimmung mit der detaillierten Energiebilanz.

Typ	1	2	3
		Alle oder die meisten der Energieeffizienz-Verbesserungsmaßnahmen liefern Kosten und Nutzen einschließlich Hinweise auf "Nicht-Energie-Gewinne" (z. B. Erhöhung der Sicherheit durch Einsparungen bei der Wartung oder Verringerung der Umweltauswirkungen). HINWEIS: Nicht-Energiegewinne werden nicht immer im Rahmen des Audits quantifizierbar sein. Identifizierung von Verbesserungsmöglichkeiten der Energieeffizienz, wo zusätzliche Daten/Maßnahmen notwendig wären, um Messungen zu verbessern oder klarzustellen. Die Organisation kann vorab einen Entwurf einer Maßnahmenliste erhalten, um die Durchführbarkeit und die Eignung der vorgeschlagenen Maßnahmen vor der detaillierten Analyse/Untersuchung zu bestätigen. Vergleich mit Benchmarks	Ermittlung jeglicher Energieeffizienz-Verbesserungsmöglichkeiten, wo zusätzliche Daten/Untersuchungen erforderlich sind, um Daten oder Auswertungsgenauigkeit zu verbessern. Vorstellung des Entwurfs der Maßnahmenliste für die Organisation zur Diskussion, um die Machbarkeit der Maßnahmen vor einer detaillierten Analyse/Untersuchung abzuklären. Andere Analysen, Techniken oder experimentelle Ansätze (zum Beispiel technische Planung, Fahrzeugversuche, Pilotstudien, logistische Ansätze, Computersimulationen, Ultraschall-Untersuchungen oder Thermographie) können vollständig genutzt werden, um den Energieverbrauch zu verstehen. Diskussion mit Anbietern, um die neuesten Technologien für Energieeffizienz-Verbesserung zu identifizieren bzw. zu verifizieren.
Bewertung der Maßnahmen	Angabe von hinweisenden oder typischen Einsparungen, unter Nutzung von allgemeingültigen Regeln und unter Berücksichtigung der Energiebasis Benennung von typischen Amortisationszeiten. Übersicht über die erforderlichen Schritte, um spezifische EPIs zu erzeugen, die implementiert werden können	Angabe von Einsparungen, die anhand technologiespezifischer Energieeffizienz-Verbesserungsmaßnahmen berechnet wurden und die detaillierte Energiebilanz berücksichtigen. Ermittlung von Kapital- und Arbeitskosten durch Verwendung von Faustregeln und standardisierten Kosten/leicht verfügbaren Lieferanteninformationen. Angebote von Lieferanten sind nicht erforderlich. Präsentation der vereinbarten wirtschaftlichen Analyse, in der Regel inklusive einer einfache Amortisationszeitberechnung oder ggf. unter Berücksichtigung von Methoden wie Interner Zinsfuß oder Kapitalwert	Berechnung von Einsparungen auf Grundlage von technologiespezifischen Energieeffizienzeinsparmaßnahmen, die mit der detaillierten Energiebilanz abgestimmt und bei denen Wechselwirkungen berücksichtigt wurden. Kostenberechnung unter Berücksichtigung von Kapital- und Arbeitskosten mit dem Genauigkeitslevel, das vom Unternehmen für den Investitionsprozess gefordert wird. HINWEIS: Die Organisation muss möglicherweise den Auditor bei der Ermittlung von Kostendaten unterstützen.

Typ	1	2	3
			Kosten und Erlösen aller Energieeinsparmöglichkeiten inklusive der "Nicht-Energie-Gewinne" Präsentation der vereinbarten wirtschaftlichen Analyse, typischerweise inklusive interner Zinsfuß- oder Kapitalwertmethode mit einfacher Amortisationszeitberechnung als Minimum, um dem Unternehmen Informationen für den Investitionsprozess zu liefern.
Ergebnisse	Identifizierung und grobe Bewertung von kostengünstigen Maßnahmen, die leicht umgesetzt werden können. Kenntnis des Energieverbrauchs auf Standort-, System-, Prozess- oder Flotten-Ebene Verbessertes Bewusstsein für den relativen Beitrag jedes Energieträgers des Standortes, durchschnittliche spezifische Kosten für jeden Energieträger und potenzielle Vorteile eines Energiemanagements. Bestimmung des Ausmaßes von kapitalintensiven Maßnahmen.	Detailliertes Verständnis von Energieverbrauch und -nutzung. Verständnis des relativen Beitrags jeder Energiequelle des Standortes, Durchschnitts- und Grenzkosten für jede Energiequelle. Identifizierung und grobe Bewertung von kostengünstigen Maßnahmen, die leicht umgesetzt werden können. Ermittlung und Analyse einschließlich umfassender Berechnung der Einsparungen und der vorläufigen Investitionskosten für Kapitalmaßnahmen. Zusammenstellung von Daten für Energie-Review- oder Monitoring-Zwecke Betriebsprofil und detaillierte Energiebilanz	Detailliertes Verständnis von Energieverbrauch und -nutzung. Identifizierung und Analyse von Energieeinsparmaßnahmen ohne, mit geringen und mit hohen Investitionskosten inklusive der energetischen und nicht-energetischen Vorteile, einer vorläufigen Ausrüstungsplanung oder Prozessverbesserung sowie detaillierten Kostenanforderungen. Daten für Energie-Review-Zwecke Prüfung der Messsysteme und Empfehlungen zur Schließung von Datenlücken
HINWEIS: Diese Tabelle enthält eine detaillierte Zusammenfassung der Anforderungen von drei definierten Audit-Typen. Jede der benannten Anforderungen ist ein Minimum für den jeweiligen Typ. In manchen Fällen kann es, nach Absprache zwischen der Organisation und dem Energie-Auditor, sinnvoll sein, über die Anforderungen in der der Tabelle hinauszugehen.			

Quelle: (18)

Erreichter Umweltnutzen

Das Energieaudit liefert eine detaillierte Auskunft über den Energiebezug und die Energieverwendung im auditierten Bereich eines Unternehmens und identifiziert Energieeinsparmöglichkeiten. Die berichteten Ergebnisse können dazu verwendet werden, die kostenwirksamen Möglichkeiten für die Energieeinsparung zu bewerten und ihnen die entsprechende Priorität gegenüber anderen betrieblichen Maßnahmen einzuräumen.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine.

Betriebsdaten

Für Informationen über Betriebsdaten siehe Tabelle 2.11-1.

Anwendbarkeit

Die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von Energieaudits unterschieden nach der jeweiligen Zielstellung sind in Tabelle 2.11-1 dargestellt.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die betriebswirtschaftlichen Aspekte von Energieaudits sind in Tabelle 2.11-1 dargestellt.

Triebkraft für die Umsetzung

- Kosteneinsparungen,
- Festhalten an Vereinbarungen zur Energieeinsparung etc.,
- EU-Energieeffizienz-Richtlinie 2012/27/EU (Verpflichtung von Nicht-KMU zur regelmäßigen Durchführung eines Energieaudits).

Beispiele

Beispiel 1: Energieaudit im kunststoffverarbeitenden Gewerbe

Bei einem Unternehmen mit einer Spezialisierung auf die Fertigung technischer Kunststoffteile aus Thermo- und Duroplasten wurde 2014 ein Energieaudit nach DIN EN 16247-1 durchgeführt. Zuerst erfolgte eine detaillierte Bestandsanalyse. Anhand der Ergebnisse wurden Energieeinsparmaßnahmen abgebildet, technisch und wirtschaftlich bewertet und auf deren Umsetzbarkeit geprüft. Als Maßnahmen mit hohem Einsparpotential wurden beispielsweise die Umrüstung auf LED-Beleuchtung, die Modernisierung von Kälteanlagen und die Nutzung von Abwärme identifiziert. Die Ergebnisse wurden in einem Maßnahmen- und Umsetzungsplan zusammengefasst, der auch investive Förderanreize berücksichtigt. Das Energieaudit ergab, dass sich bis zu 20 % Endenergie pro Jahr – bezogen auf das Basisjahr 2013 und etwa gleichbleibende Produktionsmengen vorausgesetzt - einsparen lassen. Die CO_2-Emission des Unternehmens kann so um ca. 175 Tonnen pro Jahr reduziert werden. Auf Grundlage der im Energieaudit durchgeführten Analyse des Energieverbrauchs und dem Aufzeigen möglicher Energieeinsparmaßnahmen hat das Unternehmen sich entschlossen, die Aktivitäten im Bereich der betrieblichen Energieeffizienz zu verstetigen und ein Energiemanagementsystem nach DIN ISO 50.001 einzuführen (19) [S. 6].

Beispiel 2: Einführung eines Energiemanagementsystems in einem Unternehmen der metallverarbeitenden Industrie

In einem Unternehmen der metallverarbeitenden Industrie wurde 2015 beschlossen, ein Energiemanagementsystem nach ISO 50001 einzuführen. Dafür wurden im Unternehmen zunächst organisatorische Voraussetzungen geschaffen, in dem ein Energiemanagementbeauftragter bestellt wurde. Vertreter verschiedener Unternehmensbereiche wurden als Mitglieder eines Energieteams berufen, für welches regelmäßige (in diesem Fall quartalsweise) Meetings zu Themen der betrieblichen Energieeffizienz vereinbart wurden. Durch die Geschäftsführung wurde eine strategische Energiepolitik des Unternehmens formuliert, beschlossen und im Unternehmen als verbindlich bekannt gegeben.

Weiterhin wurden Verfahrensanweisungen entwickelt und durch die Unternehmensführung in Kraft gesetzt, welche betriebliche Abläufe im Zusammenhang mit energiebezogenen Aufgaben beschreiben, u. a. die Schulung von Mitarbeitern zu energiebezogenen Aufgaben und Themen, die Informationswege bei der Feststellung von Verbesserungsmöglichkeiten energierelevanter Produktionsphasen usw..

In der Einführungsphase des Systems wurde durch die verantwortlichen Mitarbeiter des Unternehmens und mit Unterstützung durch externe Berater außerdem eine Erfassung der Energiebezugsmengen und der Hauptverbraucher vorgenommen und in einer fortschreibungsfähigen Form als energetische Ausgangssituation für das Basisjahr 2014 dokumentiert. Es wurde ein Messstellenkonzept entwickelt, mit welchem in den Folgejahren schrittweise der Energieverbrauch in einzelnen Produktionsabschnitten und an einigen durch hohen Energieverbrauch gekennzeichneten einzelnen Maschinen detailliert und dauerhaft gemessen werden soll. Durch das Energieteam wurden Kennzahlen definiert, welche in Zukunft als Maß für die betriebliche Energieeffizienz verfolgt werden sollen.

Alle wesentlichen für den Energieverbrauch relevanten Aspekte, bei denen bereits ein konkretes Verbesserungspotenzial festgestellt worden ist, wurden in einem Energieaktionsplan eingetragen und mit Maßnahmenvorschlägen für das Erreichen der Verbesserung untersetzt. Den Maßnahmenvorschlägen wurden konkrete Umsetzungsfristen und Verantwortlichkeiten zugeordnet.

Die gesamte Organisation des Energiemanagements hinsichtlich Aufbau/Verantwortlichkeiten und Ablauf der wesentlichen Prozesse wurde in einem Energiemanagementhandbuch zusammenfassend dokumentiert. Dieses Managementhandbuch sowie die damit in Verbindung stehenden Verfahrensanweisungen wurden allen Mitarbeitern des Unternehmens in innerbetrieblichen Unterweisungen vorgestellt.

Nach Abschluss der Einführungsphase wurde in Form interner Systemaudits in allen wesentlichen Unternehmensbereichen überprüft, ob die Vorgaben des Energiemanagementsystems bei den Mitarbeitern bekannt sind. Die Ergebnisse der energetischen Bewertung, der internen Systemaudits und der bis dahin erreichte Stand des Energieaktionsplans wurden anschließend zwischen dem Energiemanagementbeauftragten und der Geschäftsführung in Form eines Management-Reviews bewertet. Dabei wurden durch die Geschäftsführung Zielvorgaben für die nächsten Jahre konkretisiert und für einige kostenrelevante Maßnahmen auch Budgets eingeräumt. Das Management-Review wurde in einem Bericht dokumentiert.

Die abschließende Phase der Systemeinführung fand als erstes Zertifizierungsaudit durch eine Zertifizierungsorganisation statt. Dabei wurden durch einen unternehmensfremden, unabhängigen Auditor durch Interviews mit zahlreichen Funktionsträgern im Unternehmen geprüft, inwieweit die betrieblichen Regelungen zum Energiemanagement mit den Vorgaben der Norm übereinstimmen. Die Übereinstimmung wurde in Form eines Zertifikates dokumentiert. Geringfügige Abweichungen wurden dem Unternehmen als Korrekturmaßnahmen aufgetragen, deren Umsetzung in einem weiteren Überwachungsaudit im Folgejahr belegt werden soll.

Verweisende Informationen

- EN 16247-1:2012-10 (17)
- ISO 50002:2014-07 (18)

2.12 Pinch Methodologie

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.13 Enthalpie und Exergieanalyse

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.14 Thermowissenschaft

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.15 Energiemodelle

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

2.16 Benchmarking

Beschreibung

In seiner einfachsten Form ist ein „Benchmark“ ein Referenzpunkt. Er dient als Vergleichsmaßstab. In Unternehmen ist „Benchmarking“ ein Verfahren, um Ergebnisse, Arbeitsmethoden oder Prozesse im Verhältnis zur bestmöglichen Praxis zu bewerten. Benchmarking ist der kontinuierliche Vergleich von Produkten, Dienstleistungen sowie Prozessen und Methoden, um die Differenz zum Klassenbesten (Unternehmen, Prozesse, Methoden etc.) zu schließen. Grundidee ist es, festzustellen, welche Unterschiede bestehen, warum diese Unterschiede bestehen und welche Verbesserungsmöglichkeiten es gibt. Hierfür müssen geeignete Daten gesammelt und analysiert werden. Es werden dann Indikatoren der Energieeffizienz eingeführt, die es dem Betreiber ermöglichen, die Leistung der Anlage im Lauf der Zeit zu beurteilen oder mit anderen im gleichen Bereich zu vergleichen. Wichtig ist zu beachten, dass die Kriterien, die bei der Datenerfassung verwendet wurden, rückverfolgbar sind und auf dem neuesten Stand gehalten werden.

Die Vertraulichkeit der Daten kann in gewissen Fällen wichtig sein. Deshalb ist es unbedingt erforderlich, die Ansichten der teilnehmenden Gesellschaften und der Interessenverbände des Bereichs zu berücksichtigen, um die Benutzerfreundlichkeit der Instrumente sicherzustellen. Die Vertraulichkeit kann bspw. geschützt werden durch Verträge oder Vertraulichkeitsvereinbarungen. Die Vorlage von Daten kann zudem auf eine Weise erfolgen, die die Vertraulichkeit schützt (z. B. gemeinsame Darstellung von Daten für mehrere Anlagen oder Produkte). Darüber hinaus kann man Daten von vertrauenswürdigen Dritten (z. B. Berufsverband, Regierungsagentur) zusammenstellen lassen.

Energieeffizienz allg. beschreibt das Verhältnis zwischen einer erzielten Leistung bzw. einem Ertrag (Dienstleistungen, Gütern oder Energie) und der eingesetzten Energie. Eine Einordnung ist notwendig. Gem. DIN EN 16231:2012 heißt es: „Zweck des Energieeffizienz-Benchmarkings ist es, durch den Vergleich der Leistung zwischen oder innerhalb von Einheiten die maßgeblichen Daten und Indikatoren zum Energieverbrauch sowohl in technischer als auch in verhaltensbestimmter sowie in quantitativer wie qualitativer Hinsicht festzulegen“ (20). Es kann intern (innerhalb einer bestimmten Organisation) und/oder extern (zwischen Organisationen) erfolgen. Wichtig ist, die Grenzen, auf die sich das Benchmarking bezieht, genau zu definieren (z. B. Einrichtungen, Tätigkeiten, Prozesse, Produkte, Dienstleistungen und Organisationen). Schwerpunkt sind spezifische Energieverbräuche.

Energieeffizienz-Benchmarking ist als Teil der kontinuierlichen Verbesserungsprozesse zu verstehen, wie sie in der Energiemanagementnorm ISO 50001:2011 gefordert sind (6).

Die Methodik zur Erhebung und Auswertung von Energiedaten für ein erfolgreiches Energieeffizienz-Benchmarking ist in der DIN EN 16231:2012 beschrieben; Abbildung 2.16-1. Folgende Schritte sind vorzusehen:

1. Zielsetzung und Planung (Abgrenzen der Zielstellungen für das Benchmarking einschließlich Bestimmung sowie Auswahl von Ansatz und Art des Benchmarkings, Aufstellen eines Projektplanes und Zuweisung von Mitteln),
2. Datenerhebung und -verifizierung (Übereinkunft zum Verfahren der Datenerhebung; Erhebung und Verifizierung der Daten sowie Zuordnung der Ergebnisse, um eine Auswertung zu ermöglichen),
3. Auswertung und Ergebnisse (Beurteilung gegenwärtiger Leistungsgrade, Erstellung von Tabellen, Diagrammen und Schaubildern, um die Auswertung zu unterstützen und nach Erklärungen für Unterschiede in der Leistung zu suchen),
4. Berichtswesen (Kommunikation der Ergebnisse einschließlich der sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen),
5. Optional: Überwachung und Maßnahmen (Umsetzung spezieller Maßnahmen, Überwachung der Entwicklung und Umsetzung spezifischer Maßnahmen, einschließlich der sich aus den Schlussfolgerungen ergebenden Maßnahmen).

Abbildung 2.16-1: Methodik Benchmarking

Quelle: (3)

Die Erfassung von Energiedaten muss sorgfältig vorgenommen werden. Daten sollten aussagekräftig und vergleichbar sein. In einigen Fällen können Daten Korrekturfaktoren (z. B. Normalisierung oder Temperaturbereinigung) benötigen. Verwertbare Daten können auch in den Sektor-BREFs gefunden werden. Außerdem bieten Fachverbände, Anleitungen oder auch theoretische Berechnungen nutzbare Datengrundlagen. Im Ergebnis sind Energieleistungskennzahlen zu bilden, die eine Vergleichbarkeit ermöglichen. Um diese Aufgabe zu erfüllen, müssen sie u. a. ein hohe Erklärungskraft und Verständlichkeit sowie Konsistenz und Überprüfbarkeit aufweisen. Zudem müssen sie analytisch fundiert und aktualisierbar sein. Damit verbunden sind hohe Anforderungen an die Datenverfügbarkeit und -qualität.

Grundsätzlich ist ein sachbezogenes Energieeffizienz-Benchmarking bzgl. Zeit und Ort möglich. Eine Bewertung im Zeitvergleich veranschaulicht den Nutzen einer Maßnahme (oder einer Gruppe von Maßnahmen). Dies ist eine einfache Methode, die intern angewendet werden kann, wenn die entsprechenden Bezugsdaten verfügbar sind und wo es schwierig ist, externe Benchmarks einzuführen. Der wesentliche Nachteil eines Vergleichs in der Zeitfolge ist, dass die grundlegenden Bedingungen gleich bleiben müssen, um eine Bewertung der Energieeffizienz zu ermöglichen. (vgl. Abbildung 2.16-2).

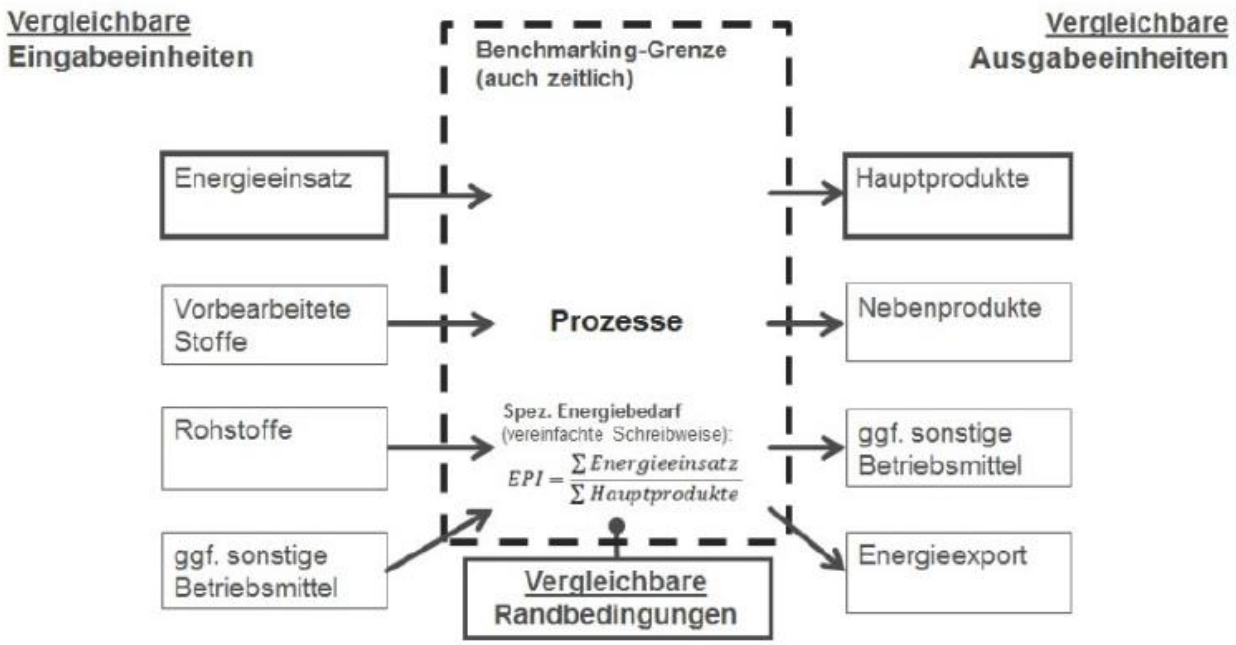
Werden Anlagen oder Prozesse miteinander verglichen, spielt häufig die Betriebsführung eine entscheidende Rolle. Im direkten Vergleich mit Wettbewerbern fehlt es zum Teil aber an detaillierten, individuellen Daten, sodass man – wenn überhaupt – nur auf aggregierte Zahlen zurückgreifen kann. Im externen Benchmarking können auch Vergleiche in Bezug auf die Örtlichkeit erfolgen. Zum

Beispiel: Wie stellt sich ein verwandter Prozess bei einem Wettbewerber energetisch dar, der ggf. mit anderen Umgebungsbedingungen konfrontiert ist?

Eine Bewertung kann auch ausgeführt werden gegenüber dem theoretischen Energie- oder Enthalpiebedarf. Diese werden z. B. aus den thermischen Energien, Schmelzenergien, kinetischen oder potentiellen Energien für einen Prozess berechnet. Sie sind ein guter Ansatz für anfängliche Schätzungen und können mit entsprechender Erfahrung relativ einfach verwendet werden. Im Ergebnis sollte der Abstand zwischen dem tatsächlichen Energieverbrauch und dem theoretischen Bedarf deutlich werden. Hier kann auch eine Kopplung mit einem Vergleich in der Zeitfolge hilfreich sein. Ein Nachteil von Theorie-Praxis-Vergleichen ist, dass Berechnungen (da modellbasiert) niemals alle spezifischen Merkmale einer Anlage berücksichtigen können.

In einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes erfolgte eine umfangreiche Darstellung der methodischen Grundlagen für den Aufbau von Energieeffizienz-Benchmarkingsystemen nach DIN EN 16231 sowohl auf der Ebene der Anlagentechnik als auch auf Unternehmensebene mit einer Vielzahl an Beispielen für über 30 Industrie- und Gewerbebranchen (20). Es werden dabei ergänzende Empfehlungen bei der Umsetzung der DIN EN 16231 ausgesprochen. Wichtig ist beispielsweise eine genaue Definition der Benchmarking-Grenze, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten (Abbildung 2.16-2.)

Abbildung 2.16-2: Festlegung Benchmarking-Grenze



Quelle: (20)

Zudem ist eine aussagekräftige Definition von Energieeffizienzindikatoren (EEI)/Energieleistungskennzahlen (EPI) unumgänglich. Hier sollte man insb. auch den Primärenergiebedarf einbeziehen (Formel 2.16-1).

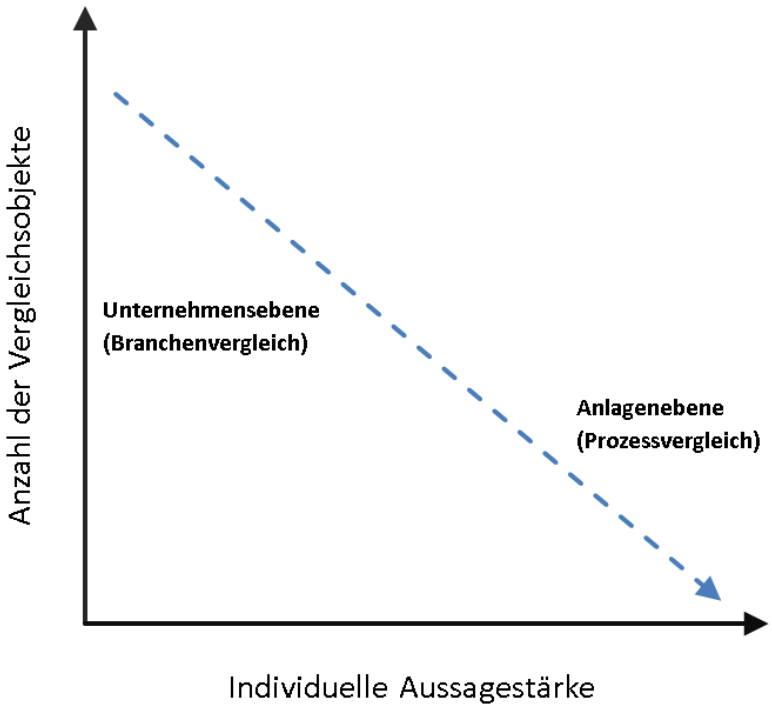
Formel 2.16-1: Energieleistungskennzahl (Energy Performance Indicator)

$$EPI(allg.) = \frac{\sum Energieeinsatz(Primär-, End-oder\ Nutzenergie)}{\sum Ergebnis(Produkte, Dienstleistungen\ oder\ Nutzenergie)}$$

Quelle: (20)

Im Allgemeinen gilt, dass mit steigender Anzahl der Unternehmen/Vergleichsobjekte die individuelle Aussagekraft des Benchmarking sinkt, da jedes Objekt – egal, ob Anlage/Prozess oder Unternehmen – seine spezifischen Merkmale aufweist und mithin die vergleichbare Basis („der kleinste gemeinsame Nenner“) schrumpft (Abbildung 2.16-3). Vergleicht man Objekte miteinander, die überwiegend heterogen sind, besteht die Gefahr von falschen Schlussfolgerungen.

Abbildung 2.16-3: Individuelle Aussagestärke des Benchmarking



Quelle: eigene Abbildung, Hochschule Zittau-Görlitz, 2016

Erreichter Umweltnutzen

Unterstützungsinstrument zur kontinuierlichen Steigerung der Energieeffizienz.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine bekannt.

Betriebsdaten

Siehe Beschreibung.

Anwendbarkeit

Benchmarking kann leicht von jeder Anlage, Unternehmensgruppe, Anlagen- oder Fachverbänden eingesetzt werden. Es kann auch nützlich sein, einzelne Einheiten, Prozesse oder Versorgungseinrichtungen zu bewerten. Verfügbare Daten beinhalten diejenigen im vertikalen Bereich der BREFs oder die von Dritten bestätigten Daten. Der Zeitraum zwischen dem Benchmarking ist bereichsspezifisch und üblicherweise lang (d. h. Jahre). Fragen der Wettbewerbsfähigkeit müssen angesprochen werden, so dass die Vertraulichkeit der Daten möglicherweise angesprochen werden muss. So können zum Beispiel die Ergebnisse des Benchmarking vertraulich bleiben oder es ist nicht möglich, Benchmarking durchzuführen, z. B. wenn nur eine kleine Anzahl von Anlagen in der EU oder in der Welt das gleiche Produkt herstellen.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die hauptsächlichen Kosten liegen in der Datensammlung, -pflege und -auswertung.

Triebkraft für die Umsetzung

Kosteneinsparungen, Wettbewerbsvorteile, Energieeinsparungen, THG-Einsparungen.

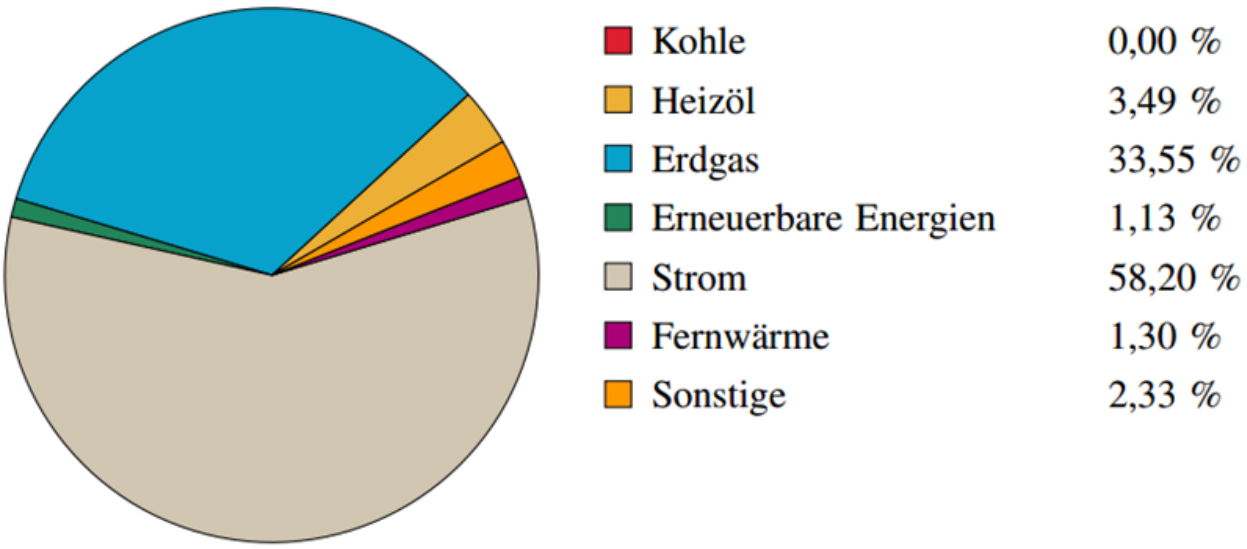
Beispiele

Energieeffizienz-Benchmark für kleine und mittlere Unternehmen der Industrie

Durch ein Angebot der Hochschule Zittau/Görlitz können sich KMU des verarbeitenden Gewerbes mit Mittelwerten der statistischen Erhebung in Deutschland aus über 300 Wirtschaftszweigen (4-stelliger NACE-Code, insges. 44 000 Unternehmen ab 20 Beschäftigten) vergleichen. Es werden dabei Kennziffern gebildet, welche sich auf den Gesamtenergie-, Strom- und Brennstoffverbrauch sowie auf die CO_2-Emissionen beziehen. Bezugsgrößen sind der Umsatz, die Bruttowertschöpfung sowie die Anzahl der Beschäftigten des Unternehmens. Der Energieeffizienz-Benchmark ist nutzbar für alle Betriebe (bevorzugt für KMU ohne spezielles Fachpersonal) des Wirtschaftsbereiches Verarbeitendes Gewerbe sowie Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden (Wirtschaftszweige 0510 - 3320). Der innerbetriebliche Zeitaufwand für Kennziffernermittlung und -vergleich ist relativ gering. Durch die EU-einheitliche Wirtschaftszweigsystematik ist ein Effizienzvergleich neben Deutschland grundsätzlich auch in anderen Staaten der EU, bevorzugt in Staaten des EUR-Raumes (da dann keine Währungsumrechnung erforderlich ist) umsetzbar. Hier ein Beispiel für den Wirtschaftszweig 25.

Kennziffern zur Energieeffizienz des Wirtschaftszweiges Herstellung von Metallerzeugnissen für das Jahr 2014. Die Kennziffern stellen den Mittelwert von 6.928 Betrieben dieses Wirtschaftszweiges in Deutschland dar.

Abbildung 2.16-4: Zusammensetzung der eingesetzten Energieträger



Quelle: (21)

Tabelle 2.16-1: Umsatzbezogene Kennziffern

Kennziffer	Wert	Einheit
Gesamtenergieverbrauch des Umsatzes	0,93	GJ / 1000 €
Brennstoffverbrauch des Umsatzes	0,39	GJ / 1000 €
Stromverbrauch des Umsatzes	150,32	kWh / 1000 €
CO_2-Emission des Umsatzes	106,42	kg CO_2 / 1000 €

Quelle: (21)

Tabelle 2.16-2: Bruttowertschöpfungsbezogene Kennziffern

Kennziffer	Wert	Einheit
Gesamtenergieverbrauch der Bruttowertschöpfung	2,55	GJ / 1000 €
Brennstoffverbrauch der Bruttowertschöpfung	1,07	GJ / 1000 €
Stromverbrauch der Bruttowertschöpfung	412,89	kWh / 1000 €
CO_2-Emission der Bruttowertschöpfung	292,31	kg CO_2 / 1000 €

Quelle: (21)

Tabelle 2.16-3: Beschäftigtenbezogene Kennziffern

Kennziffer	Wert	Einheit
Gesamtenergieverbrauch pro Beschäftigten	152,31	GJ / MA
Brennstoffverbrauch pro Beschäftigten	63,67	GJ / MA
Stromverbrauch pro Beschäftigten	24 640,68	kWh / MA
CO_2-Emission pro Beschäftigten	17 444,30	kg CO_2 / MA

Quelle: (21)

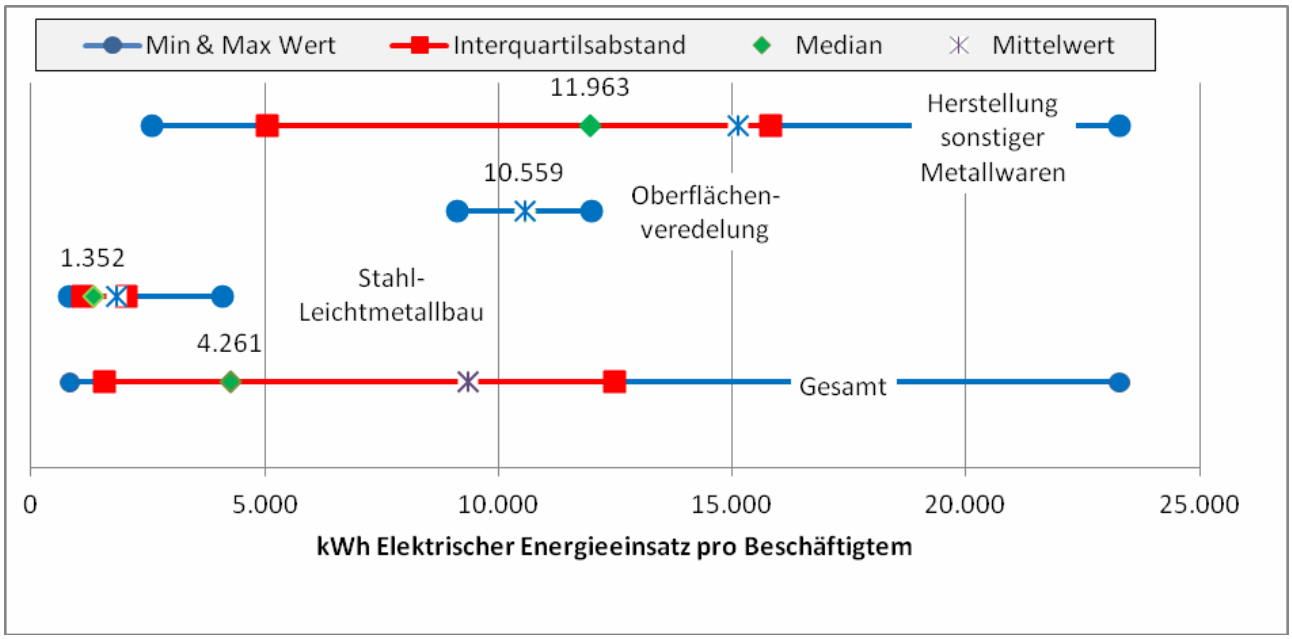
Von Unternehmensseite her müssen die Energieträger erfasst werden, unterteilt nach Strom, Fernwärme, Erneuerbare Energien, Erdgas, Heizöl, Kohle und sonstige Energieträger. Um Unternehmen unterschiedlicher Größe vergleichbar zu machen, wird mit drei Werten normalisiert: Umsatz, Bruttowertschöpfung und Anzahl der Beschäftigten. Aus diesen Angaben wird eine Reihe von Vergleichskennzahlen gebildet. Eine betriebsinterne Durchführung des Energieeffizienz-Benchmarks kann mittels Kennzahlenkatalog oder in digitaler Form mit Rückgriff auf eine fortlaufend aktualisierte Datenbank erfolgen. Der Energieeffizienz-Benchmark kann jährlich wiederholt werden, wodurch Entwicklungstrends zwischen dem teilnehmenden Unternehmen und dem Wirtschaftszweig deutlich werden (21).

klima: aktiv *KMU- Initiative zur Effizienzsteigerung*

In der KMU-Initiative der Österreichischen Energieagentur wurden in Österreich bis Ende 2011 ca. 1.600 Betriebe aus mehr als 85 Branchen zur Energieeffizienz beraten. Mit der Initiative wurden Anreize für Energieberatungen und die Umsetzung wirtschaftlich geeigneter Maßnahmen geschaffen. Um die Herausforderung darzustellen, beim Benchmarking geeignete Kennzahlen mit hoher Aussagekraft zu finden, zu denen gleichzeitig eine große Vergleichsdatenbasis vorhanden ist, wird im Folgenden ein Beispiel aus dieser Initiative vorgestellt. Wie im vorausgegangenen Beispiel handelt es sich um den Wirtschaftszweig 25, welcher jedoch zusätzlich in die drei Subsektoren Sonstige Metallwaren, Oberflächenveredlung und Stahl- und Leichtmetallbau untergliedert ist. In Abbildung 2.16-5 wird der Strombedarf pro Mitarbeiter für die drei Subsektoren sowie den gesamten Wirtschaftszweig dargestellt. Obwohl sich diese Kennzahl grundsätzlich sehr gut für ein Energieeffizienz-Benchmarking eignet, ist deutlich zu erkennen, dass der spezifische Strombedarf für die homogene Gruppe der Stahl- und Leichtmetallbaubetriebe deutlich geringer ist als der des gesamten Wirtschaftszweiges. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Gruppe der Hersteller sonstiger Metallwaren eine breite Streuung aufweist, was auf die Heterogenität der Betriebsstrukturen

innerhalb dieser Gruppe zurückgeführt werden kann. Damit kann exemplarisch gezeigt werden, dass der Vergleich heterogener Gruppen leicht zu falschen Schlussfolgerungen führen kann bzw. dass die individuelle Aussagekraft einer Benchmark mit abnehmender Anzahl der Vergleichsobjekte und Bildung homogener Gruppen steigt (vgl. Abbildung 2.16-3). Voraussetzung für die Aussagekraft des Energieeffizienz-Benchmarking ist zudem eine aktuelle Datengrundlage zur Bildung von Kennziffern. Erhältlich sind aktuelle Daten z. B. bei Branchenverbänden.

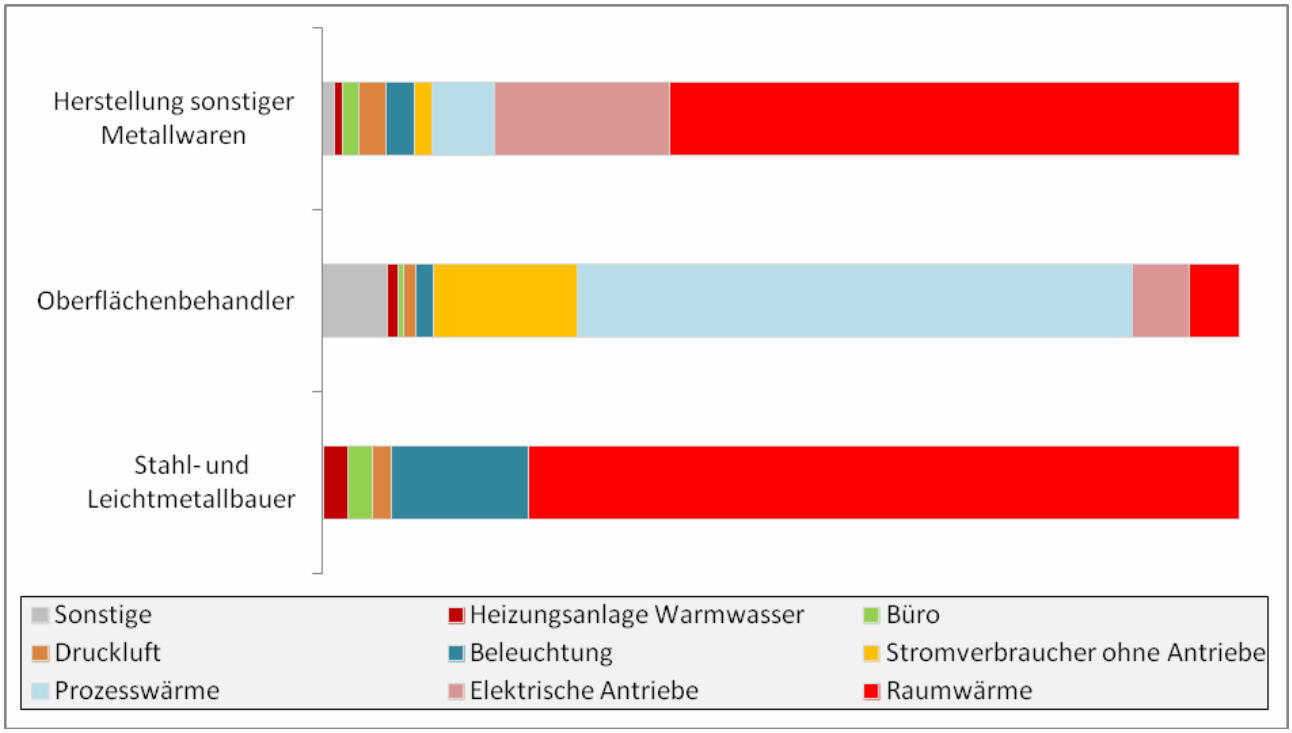
Abbildung 2.16-5: Elektrischer Energieeinsatz pro Beschäftigtem in [kWhel/MA]



Quelle (22)

Weiterhin lässt sich anhand der Daten aus der KMU-Initiative zeigen, dass sich auch die Hauptverbraucher (und damit Einsparpotentiale) der drei Subsektoren/Gruppen stark unterscheiden (Abbildung 2.16-6). Dies hat bspw. Auswirkungen auf die Auswahl von Ansatz und Art des Benchmarkings (internes Benchmarking), auf den nötigen Aufwand zur Datenerhebung sowie auf die im Anschluss an das Benchmarking zu ergreifenden Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz (22).

Abbildung 2.16-6: Relevante Hauptverbraucher der Subsektoren



Quelle: (22)

Industriebenchmarking – Modul Energieeffizienz

Mit dem Fraunhofer ISI Benchmark Energieeffizienz besteht die Möglichkeit, den eigenen Betrieb hinsichtlich der Verbesserung der Energieeffizienz in technischer und organisatorischer Hinsicht systematisch zu prüfen und sich mit anderen nicht-energieintensiven Betrieben zu vergleichen. Er basiert auf Umfragen (23).

Methodische Grundlagen für die Entwicklung von Benchmarkingsystemen nach EN 16231

In einer Studie von adelphi und der Österreichischen Energieagentur im Auftrag des Umweltbundesamtes erfolgte eine umfangreiche Darstellung der methodischen Grundlagen für den Aufbau von Energieeffizienz-Benchmarkingsystemen nach EN 16231 sowohl auf der Ebene der Anlagentechnik als auch auf Unternehmensebene mit einer Vielzahl an Beispielen für über 30 Industrie- und Gewerbebranchen. Neben den zusammengestellten Kennzahlen werden Besonderheiten der jeweiligen Branche diskutiert und Empfehlungen für geeignete Energieleistungskennzahlen (EPIs) gegeben. Im Folgenden wird ein Beispiel aus dieser Studie für Benchmarking auf Anlagenebene (Prozesskälteerzeugung) angegeben. Orientiert am Ökodesign werden Kühlmöbel als Gesamtsystem mit einer zeitlichen Benchmarking-Grenze von 48 h (zwei Werktage) bewertet. Bezugsgröße ist das nutzbare Kühlvolumen. In allgemeiner Form wird der EPI folgendermaßen ausgedrückt:

Formel 2.16-2: Energieleistungskennzahl für Prozesskälteerzeugung und -bewahrung

$$EPI = \frac{Endenergiebedarf\ \left[\frac{kWh}{48h}\right]}{Ladehöhe\ [m] * Ladebreite[m] * Ladetiefe[m] * Korrekturfaktor\ Türen/Deckel}$$

Für Kühlmöbel mit transparenter Tür (bzw. Deckel) gilt ein Korrekturfaktor von 1,1. Für alle Anderen beträgt er 1. Nachfolgend beispielhaft einige Richtwerte.

Tabelle 2.16-4: Benchmark für EPI Prozesskälteerzeugung und -bewahrung

Anwendung	Temperaturniveau	Nutzvolumen	Benchmark
Kühlschränke	+5°C	<600l	$= \frac{7 * \left[\frac{kWh}{48h}\right]}{Nutzvolumen\ [m^3]}$
		>600l	$= \frac{6 * \left[\frac{kWh}{48h}\right]}{Nutzvolumen\ [m^3]}$
Gefrierschränke	-18°C	<600l	$= \frac{24 * \left[\frac{kWh}{48h}\right]}{Nutzvolumen\ [m^3]}$
		>600l	$= \frac{21 * \left[\frac{kWh}{48h}\right]}{Nutzvolumen\ [m^3]}$
Gefriertruhen	-18°C	alle	$= \frac{20 * \left[\frac{kWh}{48h}\right]}{Nutzvolumen\ [m^3]}$
Begehbare Kühlräume	+2°C	alle	$= \frac{1{,}5 * \left[\frac{kWh}{48h}\right]}{Nutzvolumen\ [m^3]}$

Quelle: (20)

Die angegebenen Benchmarks beziehen sich auf spezielle Messbedingungen (siehe Studie) und die Klimaklasse 4 (Umgebungstemperatur 30 °C und 55 % Luftfeuchtigkeit). Es sollte geprüft werden, inwieweit die Abweichungen zu den Bedingungen im praktischen Betrieb der Geräte zur Norm ausgeglichen werden kann (z. B. über Kühlgradtage).

Es ist darauf hinzuweisen, dass der hier unterstellte Nutzen ein gekühltes Luftvolumen und nicht die Kühlung einer bestimmten Menge an Substrat beschreibt. Letzteres würde bedeuten, dass der Nutzer die Häufigkeit der Befüllung protokolliert sowie die Masse und spezifische Wärmekapazität des zu kühlenden Substrates kennt (20).

Verordnung (EU) 2015/1095 der Kommission zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG

In der Verordnung 2015/1095 der Europäischen Kommission werden Benchmarks („unverbindliche Richtwerte“) für gewerbliche Kühlschränke, Verflüssigungssätze und Prozesskühler angegeben. Zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der Verordnung stellen diese die beste auf dem Markt verfügbare Technik dar. Die verwendeten Energiekennziffern sind bspw. der folgende Energieeffizienzindikator:

$$EEI = \frac{JEV}{JNEV} * 100$$

mit $JEV = E24h * af * 365$

und $JNEV = M * Vn + N$

JEV jährlicher Energieverbrauch des Gerätes in kWh/a
E24h Energieverbrauch des Gerätes in 24 Stunden
af Anpassungsfaktor, welcher lediglich auf Niedrigleistungskühlschränke anzuwenden ist (siehe Verordnung)
JNEV jährlicher Normenergieverbrauch des Gerätes in kWh/a
Vn Nettorauminhalt als Summe der Nettonutzinhalte aller Fächer des Lagerschranks in Litern
M,N Koeffizienten (siehe Verordnung)

Tabelle 2.16-5: Benchmark für gewerbliche Kühlschränke

	Nettorauminhalt [l]	Energieverbrauch p. a. [kWh]	EEI

Vertikaler Kühlschrank	600	474,5	29,7
Tischkühlschrank	300	547,5	21,4
Vertikaler Gefrierschrank	600	1.825,0	41,2
Tischgefrierschrank	200	1.460,0	41,0

Quelle (24)

Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse

In einer Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft wurde eine Methodik zur Ermittlung spezifischer Energiekennzahlen entwickelt. Neben der energetischen Effizienz von Anlagen und Herstellungsverfahren werden auch Ressourcenaufwand und Emissionen bewertet. Es wird die Abgrenzung von Prozessen mittels Systemgrenzen aufgezeigt und Basisdaten für Energienutzungskonzepte sowie die ganzheitliche Bilanzierung von Produkten beschrieben (25).

Entwicklung einer Methodik zur Aufstellung von Energiekennzahlen in Unternehmen

In dieser Studie von Ökotec wird eine standardisierte Methodik zur systematischen Aufstellung von Energiekennzahlen auf Anlagenebene entwickelt. Neben einer kritischen Betrachtung bereits existierender Kennzahlensysteme und Methoden wird ein eigener Kennzahlenkatalog für sieben weit verbreitete Querschnittstechnologien angegeben (9).

Kennzahlen für Betriebsvergleiche

Im Auftrag der Sächsischen Energieagentur wurde der Einsatz von Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche zur Steigerung der Energieeffizienz untersucht und ein möglicher Energiekennzahlenkatalog entworfen (26).

2.17 Andere Instrumente

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

3 Für das Erreichen der Energieeffizienz in energieverwendenden Systemen, Prozessen oder Aktivitäten zu berücksichtigende Techniken

3.1 Feuerungsanlagen

Einführung

Eine Feuerungsanlage dient dazu, chemische Energie aus festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen zu entbinden und Temperaturen oberhalb der Umgebungstemperatur bereitzustellen.

Die dabei ablaufende Verbrennung ist ein komplexer Ablauf von exothermen chemischen Reaktionen zwischen den brennbaren Elementen eines Brennstoffes und einem Oxidationsmittel (z. B. Sauerstoff der Verbrennungsluft). Die chemisch gebundene Energie des Brennstoffes wird in Form von Wärme und Licht frei. Träger der Wärme ist das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas und darin enthaltene Feststoffpartikel. Weiterhin werden durch Wärmestrahlung Wandungen und Nutzgut erwärmt.

Die in diesem Kapitel diskutierten Feuerungsanlagen sind Heizgeräte oder Anlagen, welche die Verbrennung eines Brennstoffs (einschließlich als Brennstoffe klassifizierte Abfälle) benutzen, um Wärme zu erzeugen und auf einen vorgegebenen Prozess zu übertragen. Dies schließt die folgenden Anwendungen ein:

- Heizkessel: Feuerungsanlagen, in denen die erzeugte Wärme zur Bereitstellung von Heizwasser oder Dampf (Wasserrohr- und Großwasserraumkessel, siehe Kapitel 3.2) genutzt wird.
- Thermoprozessanlagen (Industrieöfen): Feuerungsanlagen, in denen die erzeugte Wärme direkt an ein Nutzgut zur thermochemischen und thermophysikalischen Behandlung übertragen wird.

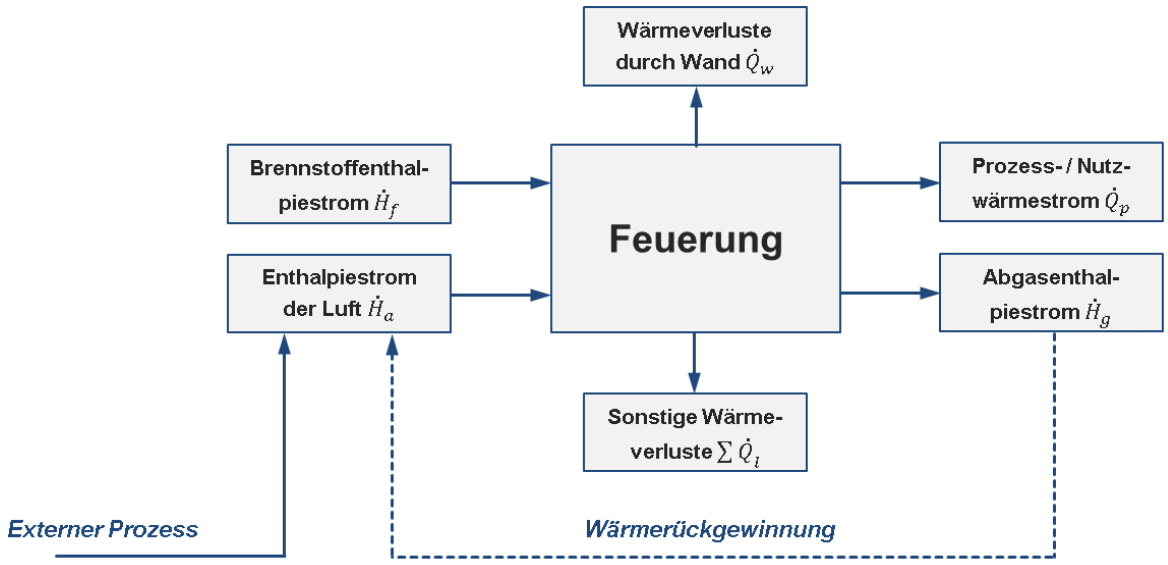
Allgemeine Energiebilanz und Effizienz einer Feuerungsanlage

Die folgenden Informationen gelten sowohl für die Verbrennung fester Brennstoffe in Rost-, Wirbelschicht oder Staubfeuerungen als auch für die Verbrennung flüssiger/gasförmiger Brennstoffe mit Brennern (Düsensysteme). Der betrachtete Bilanzraum ist hier die Feuerungsanlage. Die Bilanzierung/Betrachtung auf Seiten des Wasser-/Dampfsystems erfolgt in Kapitel 3.2. Teilweise Überschneidungen lassen sich jedoch nicht vermeiden.

Heizkessel

In Abbildung 3.1-1 werden die ein- und ausgehenden Wärmeströme des Bilanzraumes Feuerung schematisch dargestellt.

Abbildung 3.1-1: Wärmeströme des Bilanzraumes Feuerung



Quelle: eigene Abbildung, Hochschule Zittau-Görlitz, 2016

Der Brennstoffenthalpiestrom $\dot{H}_f$ ist das Produkt aus zugeführtem Brennstoffmassestrom und seinem Heiz- bzw. Brennwert (siehe auch (1) Kapitel 1.3.6.2).

Der zugeführte Enthalpiestrom der Verbrennungsluft $\dot{H}_a$ stellt das Oxidationsmittel (Luftsauerstoff oder verfahrenstechnisch gewonnenen Sauerstoff) für den Verbrennungsprozess zur Verfügung. Zum Erreichen einer vollständigen Verbrennung muss ausreichend Luftsauerstoff zur Verfügung stehen, um alle brennbaren Elemente des Brennstoffes vollständig zu oxidieren (stöchiometrischer Mindestluftbedarf). Der Massestrom Verbrennungsluft kann unterteilt werden in den Massestrom entsprechend Mindestluftbedarf und den durch Luftüberschuss. Letzterer nimmt nicht aktiv an der Verbrennung teil, muss aber durch die Verbrennung erwärmt werden. Da er gemeinsam mit den Rauchgasen aus der Brennkammer ausströmt, stellt er einen Teil des Abgasverlustes dar.

Die Prozess- bzw. Nutzwärme $\dot{Q}_p$ ist die freigesetzte thermische Energie, die indirekt mittels Wärmeübertrager aus der Feuerung ausgekoppelt wird (z. B. Dampf- oder Heißwassererzeugung). Die für die Anwendung/den Prozess tatsächlich zur Verfügung stehende thermische Energie hängt von den Wärmeverlusten ab.

Der Abgasverlust $\dot{H}_g$ ist die technisch nicht nutzbare bzw. nicht genutzte thermische Energie, die an die Umwelt abgegeben wird. Er stellt den größten Einzelverlust der Feuerungsanlage dar und steht in direktem Zusammenhang zur Temperatur des Abgases sowie zum Brennstoff- und Luftmassestrom. Der Abgasmassestrom setzt sich aus einem stöchiometrischen Anteil proportional zum Brennstoffmassestrom (zur vollständigen Verbrennung) und dem Luftüberschuss (λ>1) zusammen. Der Abgasverlust ist weiterhin von der Temperatur und Wärmekapazität des Abgases (aufgrund dessen chemischer Zusammensetzung) sowie der latenten Wärme des darin enthaltenen Wasserdampfes abhängig.

Der Wärmeverlust durch die Wände $\dot{Q}_w$ ist die thermische Energie, die durch Leitung, Konvektion und Wärmestrahlung von der Außenfläche der Feuerungsanlage an die Umgebung abgegeben wird. Diese Verluste sind hauptsächlich abhängig von der Qualität der Wärmedämmung der Feuerungsanlage.

Sonstige Wärmeverluste $\sum \dot{Q}_l$ umfassen nicht oder nur teilweise oxidierte Brennstoffbestandteile (Unverbranntes), wie Kohlenstoff, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe. Dies gilt hauptsächlich für feste Brennstoffe. Bei flüssigen und gasförmigen Brennstoffen sind die Verluste vernachlässigbar klein. Ebenfalls für feste Brennstoffe muss der Verlust durch die fühlbare Wärme der Asche und Schlacke berücksichtigt werden.

Zusätzlich zu den Wärmeverlusten muss auch der Energiebedarf für den Betrieb von Hilfsaggregaten in Betracht gezogen werden (Förder-, Zerkleinerungs- und Reinigungstechnik, z. B. Ausrüstung für den Transport von Brennstoff, Kohlenmühlen, Pumpen und Ventilatoren, Systeme für die Entfernung von Asche, Säuberung der Heizflächen, etc.).

Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik (1), Kapitel 1.2.2.1) gilt:

Formel 3.1-1

$$\dot{H}_f + \dot{H}_a = \dot{Q}_p + \dot{H}_g + \dot{Q}_w + \sum \dot{Q}_l$$

$\dot{H}_f$	Enthalpiestrom Brennstoff und chem. gebundene Brennstoffenergie [kW]
$\dot{H}_a$	Enthalpiestrom Verbrennungsluft (Oxidationsmittel) [kW]
$\dot{Q}_p$	Prozess- / Nutzwärmestrom [kW]
$\dot{H}_g$	Abgasverlustenthalpiestrom [kW]
$\dot{Q}_w$	Verlustwärmestrom über Wände [kW]
$\sum \dot{Q}_l$	Sonstige Verlustenergieströme [kW]

Abhängig von der Konfiguration der Feuerungsanlage/der Prozessführung müssen möglicherweise andere Energieströme in die allgemeine Bilanz aufgenommen werden, z. B. bei Einspritzung von Wasser in die Brennkammer zur Beeinflussung der Emissionen.

Die Energieeffizienz einer Feuerungsanlage ist prinzipiell das Verhältnis zwischen der Prozess- bzw. Nutzwärme $\dot{Q}_p$ und der Energiezufuhr durch den Brennstoff $\dot{H}_f$ und die Verbrennungsluft $\dot{H}_a$.

Formel 3.1-2

$$\eta = \frac{\dot{Q}_p}{\dot{H}_f + \dot{H}_a}$$

Um ein besseres Verständnis für die Höhe der einzelnen Verluste zu entwickeln und daraus Einsparpotentiale abzuleiten, kann die Kombination der beiden o. g. Gleichungen verwendet werden:

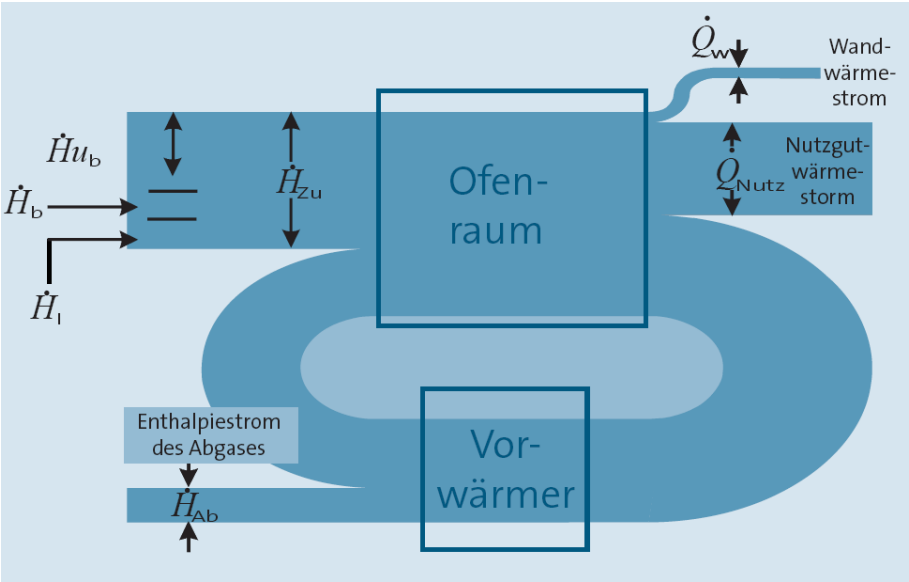
Formel 3.1-3

$$\eta = 1 - \frac{\dot{H}_g + \dot{Q}_w + \sum \dot{Q}_l}{\dot{H}_f + \dot{H}_a}$$

Industrieöfen

Die energetische Bilanzierung für Thermoprozessanlagen kann nach folgendem Schema erfolgen:

Abbildung 3.1-2: Energieströme des Bilanzraumes Industrieofen



Quelle: (27 S. 11)

$\dot{H}u_b$ Chemischer Enthalpiestrom des Brennstoffes [kW]
$\dot{H}_b$ Kalorischer Enthalpiestrom des Brennstoffes [kW]
$\dot{H}_l$ Kalorischer Enthalpiestrom der Verbrennungsluft [kW]
$\dot{H}_{Zu}$ Zugeführter Enthalpiestrom [kW]
$\dot{H}_{Ab}$ Enthalpiestrom des Abgases [kW]
$\dot{Q}_{Nutz}$ Nutzwärmestrom [kW]
$\dot{Q}_w$ Wandwärmestrom [kW]

Für die dargestellten Energieströme bei der Bilanzierung von Thermoprozessanlagen gelten die unter „Heizkessel“ aufgeführten Beschreibungen.

Zur Beurteilung der Effizienz der Beheizung eines Industrieofens kann der feuerungstechnische Wirkungsgrad als Verhältnis zwischen dem Ofenwärmestrom $\dot{Q}_o$ als Nutzen und dem zugeführten Enthalpiestrom als Aufwand herangezogen werden:

Formel 3.1-4

$$\eta_f = \frac{\dot{H}_{Zu} - \dot{H}_{Ab}}{\dot{H}_{Zu}}$$

Formel 3.1-5

$$\dot{Q}_o = \dot{H}_{Zu} - \dot{H}_{Ab}$$

Der Ofenwirkungsgrad gibt das Verhältnis von Nutzwärmestrom $\dot{Q}_{Nutz}$ zum Ofenwärmestrom $\dot{Q}_o$ wieder:

Formel 3.1-6

$$\eta_{Of} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{H}_{Zu} - \dot{H}_{Ab}}$$

Der Ofenwärmestrom $\dot{Q}_o$ teilt sich auf in den Nutzwärmestrom $\dot{Q}_{Nutz}$ (auch Gutwärmestrom $\dot{Q}_g$), der für die Erwärmung des Gutes und zur Deckung des Energiebedarfs von Umwandlungsvorgängen dient,

und den Wandwärmestrom $\dot{Q}_w$, der an Ofenwände und -einbauten abgegeben oder bei der Öffnung des Ofens abgestrahlt wird.

Formel 3.1-7

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_{Nutz} + \dot{Q}_w$$

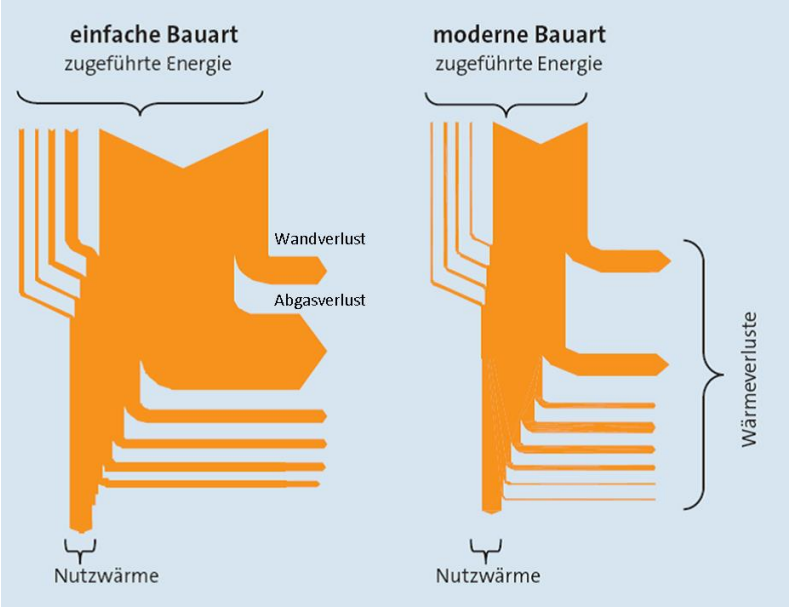
Die Energieausnutzung einer Thermoprozessanlage kann anhand des Gesamtwirkungsgrades (auch wärmetechnischer Wirkungsgrad) beurteilt werden:

Formel 3.1-8

$$\eta_{ges} = \eta_f \eta_{Of} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{H}_{Zu}}$$

Abbildung 3.1-3 vergleicht anhand einer konkreten Anwendung den Energiebedarf zwischen einer einfachen und einer energieeffizienten Bauart einer Thermoprozessanlage (27 S. 6). Gegenüber der einfachen, „älteren“ Anlage können mit der modernen Bauart ca. 75 % des Abgasverlustes und ca. 20 % der Wandverluste eingespart werden (28 S. 38).

Abbildung 3.1-3: Vergleich des Energiebedarfs zwischen einfacher und energieeffizienter Thermoprozessanlage



Quelle: (27 S. 6); (28 S. 38)

Weitere Verluste an Thermoprozessanlagen sind z. B. Wärmeverluste durch Ofentüren und Öffnung zum Be- und Entladen (Chargierverluste), Wärmeverluste durch Kühlung von Produkten (z. B. kontrolliertes und schnelles Abkühlen durch Ventilation mit Luft oder Wasserkühlung), Wärmeverluste durch den Einsatz von Schutzgasen sowie Verluste durch Wasserdampf und ventilierte Heißluft (Trocknungs- und Härtungsprozesse) (siehe auch (29 S. 267 f., S. 273 ff.)).

Strategien zur Erhöhung der Energieeffizienz beruhen auf der Reduzierung der Verlustwärmeströme. Dies führt zu einer Reduzierung des Brennstoffbedarfs und damit zu niedrigeren CO_2- Emissionen bei konstantem Nutzwärmestrom, oder aber zu einer Erhöhung des Nutzwärmestromes bei konstantem Brennstoffmassestrom, wodurch sich die Kapazität der Produktionseinheit steigert (siehe auch (1), Kapitel 1.4.1). Dabei sind die absoluten CO_2- Emissionen zwar konstant; bezogen auf die Nutzwärmeleistung/Produktionskapazität sind diese aber ebenfalls reduziert.

Bei der Erhöhung der Effizienz der Prozesswärmeversorgung sollte folgendermaßen vorgegangen werden:

1. Reduzierung der erforderlichen Nutzenergie,
2. Reduzierung von Anlagenverlusten,
3. Nutzung der Abwärme.

Auswahl der Feuerungstechniken

Allgemeine Techniken zur Energieerzeugung in großen Feuerungsanlagen (> 50 MW thermische Leistung) für verschiedene Brennstoffe werden detailliert im LCP BREF erläutert (30). Da eine Anlage von mehr als 50 MW thermischer Leistung aus mehr als einer kleineren Einheit bestehen kann, sind die dort erläuterten Energieeffizienzmaßnahmen laut LCP BREF auch für kleinere Anlagen gültig.

Tabelle 3.1-1 gibt eine Übersicht der Techniken und Energieeffizienzmaßnahmen von Feuerungsanlagen, welche in dem LCP BREF (klassifiziert nach Art des verwendeten Brennstoffes) und dem vorliegenden Dokument beschrieben werden. Die im LCP BREF erläuterten Maßnahmen sind nicht Bestandteil dieses Dokuments, es existieren jedoch Überschneidungen. Weiterhin werden in diesem Dokument bestimmte Maßnahmen näher erläutert und zusätzliche Informationen zur Verfügung gestellt. Die Anwendbarkeit der in diesem Dokument vorgestellten Techniken ist abhängig von der Prozessführung (vor allem bei bestehenden Anlagen), der Art der Anwendung der Prozesswärme sowie teilweise vom verwendeten Brennstoff. Stellt die Feuerungsanlage einen wichtigen Teil eines IED- Prozesses dar (z. B. Schmelzöfen in der Glas- oder Metallindustrie), werden die verwendeten Techniken in den entsprechenden vertikalen Sektoren-BREFs abgehandelt. Dort sind ebenfalls Daten zur Energieeffizienz und Berechnungen für verschiedene Verbrennungsprozesse zu finden. Weitere Quellen können z. B. die DIN EN 12952-15:2003 zur Berechnung der Energieeffizienz von Wasserrohrdampfkesseln und Hilfsanlagen oder DIN EN 12953-11:2003 über Großraumkessel (31), (32) sowie die Ökodesign- Vorstudien zu Dampfkesseln (33) und Thermoprozessanlagen (29) darstellen. Energieeffizienzmess- und -berechnungsmethoden für Thermoprozessanlagen sind in der Normenreihe ISO 13579 sowie im VDMA- Einheitsblatt 24206:2002-03 zu finden (34), (35), (36), (37), (27).

Tabelle 3.1-1: Maßnahmen/Techniken zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen

	Maßnahmen/Techniken im LCP BREF 2017 nach Art des Brennstoffes und Kapitel						Maßnahmen/ Techniken in diesem Dokument nach Kapitel
	Allg. Beschreibung/ Energieeffizienz	Kohle und Braunkohle	Biomasse und Torf	Müll	Flüssige Brennstoffe	Gasförmige Brennstoffe	
Brennstoffwahl	3.1.1.4	5.1.3.2	5.2.3.2		6.3.2.3		3.1.3
Brennstoffcharakterisierung		5.1.1.1, 5.1.1.4	5.2.1.1	9.1.3	6.1.1	7.1.1.1, 7.2, 7.3.1.1	
Brennstoffaufbereitung/ Konditionierung (Trocknung, etc.)	3.2.3.18	5.1.1.2 5.1.1.4.1, 5.1.3.4.3.1, 5.1.3.3, 11.4.1.1	5.2.1.2, 5.2.3.3	9.1.3, 9.3.2	6.1.2	7.1.3.1, 7.3.1.1	
Vergasung	4, 4.3.4	4.1.1,	4.1.2, 5.2.3.3	4.1.3,			
Energieeffizienzmaßnahmen	3.2.3	5.1.1.3, 5.1.3.3,	5.2.1.4, 5.2.3.3	9.2.3	6.2.2, 6.3.2.2, 6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1, 7.3.3.1, 7.4.3.2	
Wärmerückgewinnung/ Reduktion der Abgastemperatur	3.2.3.1	5.1.3.3	5.2.3.3			7.1.3.1, 7.4.3.2	3.1.1
Kraft-Wärme-Kopplung	2.5, 3.2.3.2	5.1.3.3	5.2.3.3		6.3.2.2, 6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1, 7.1.3.1.3.1	3.4
Cheng-Cycle/Steam Injected Gas Turbine (STIG)	3.2.3.3					7.1.3.2.2	
Verbrennungsluft-vorwärmung	3.2.3.4					7.1.3.1	3.1.1
Einsatz moderner Werkstoffe	3.2.3.5	5.1.3.3			6.3.2.2	7.1.3.1	
Zweifache Zwischenüberhitzung	3.2.3.6	5.1.3.3	5.2.3.3		6.3.2.2	7.1.3.1	
Speisewasservorwärmung unter Nutzung rückgewonnener Wärme	3.2.3.7	5.1.3.3	5.2.3.3		6.3.2.2	7.1.3.1	3.1.1, 3.2.4
Moderne Steuerungssysteme	3.2.3.8	5.1.3.2	5.2.3.2		6.3.2.1, 6.3.2.2, 6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1, 7.1.3.2.1, 7.1.3.2.2	3.1.2

	Maßnahmen/Techniken im LCP BREF 2017 nach Art des Brennstoffes und Kapitel						Maßnahmen/ Techniken in diesem Dokument nach Kapitel
	Allg. Beschreibung/ Energieeffizienz	Kohle und Braunkohle	Biomasse und Torf	Müll	Flüssige Brennstoffe	Gasförmige Brennstoffe	
Wärmespeicherung in KWK oder bei reiner Wärmeerzeugung	3.2.3.9				6.3.2.2, 6.3.3.1	7.1.3.1	
GuD- Prozess mit integrierter Vergasung (IGCC)	3.2.3.10	4.1.1, 5.1.3.3	4.1.2	4.1.3			
GuD-Prozess (LCP BREF: Combined-cycle combustion)	3.2.3.11				6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1	
Topping-cycle	3.2.3.12						
Upgrade von Dampfturbinen und anderen Komponenten	3.2.3.13	5.1.3.3	5.2.3.3		6.3.3.1, 6.3.2.2		
Überkritische Dampfparameter	3.2.3.14	5.1.3.3			6.3.2.2		
Rauchgaskondensator	3.2.3.15		5.2.3.3				3.1.1
Cooling tower air emission discharge (LCP BREF)	3.2.3.16	5.1.3.3			6.3.2.2		
Nasskamin (LCP BREF: wet stack)	3.2.3.17	5.1.3.3					
Brennstoffvorwärmung und -trocknung	3.2.3.18	5.1.3.3	5.2.1.2	9.1.3.2		7.1.3.1	3.1.1
Kühlsystem	3.2.3.19					7.1.3.1.3.3	
Optimierung der Verbrennung	3.2.2.7.1	5.1.3.2				7.1.3.2.2	3.1.2
Integrierter Verbrennungsprozess (Integrated Combustion Process)	3.1.1, 3.2.3.8	5.1.3.2					
Wärmerückgewinnung bei Rostkühlung und Wirbelschichtfeuerung			5.2.3.3				
Luftstufung	3.2.2.3.2	5.1.3.3			6.3.2.3	7.1.3.2.1	

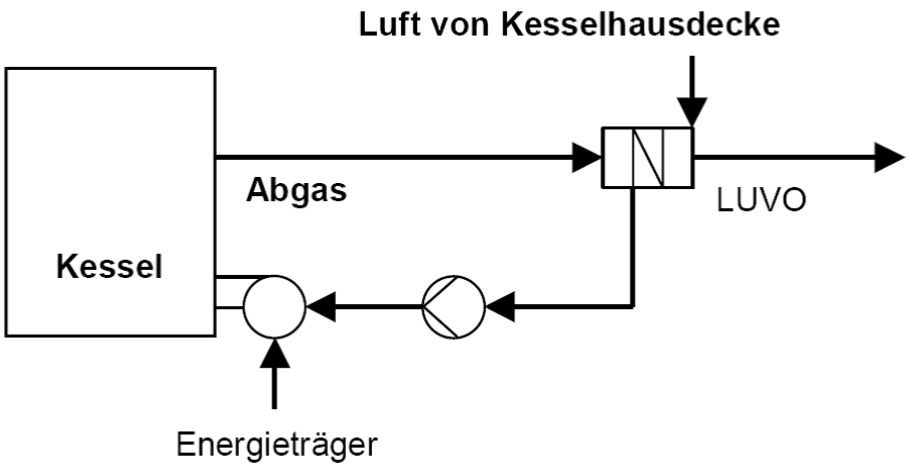
	Maßnahmen/Techniken im LCP BREF 2017 nach Art des Brennstoffes und Kapitel						Maßnahmen/ Techniken in diesem Dokument nach Kapitel
	Allg. Beschreibung/ Energieeffizienz	Kohle und Braunkohle	Biomasse und Torf	Müll	Flüssige Brennstoffe	Gasförmige Brennstoffe	
Trockene Brennkammerentaschung	3.2.5.2	5.1.3.3					
Expansionsturbine zur Rückgewinnung des Energiegehalts von Gasen unter Druck						7.1.3.1.2.1	
Optimierung der Strömungswege (-strecke)						7.1.3.1.3.2	
Rekuperativer Gasturbinenprozess						7.1.3.1.3.4	
Energetische Optimierung von Brennern für Industrieöfen Rekuperative Brenner Regenerative Brenner Sauerstofffeuerung (Oxyfuel)							3.1.1
Reduzierung von Verlusten durch Wärmedämmung und Öffnungen							3.1.4, 3.1.5
Reduktion des Luftüberschusses					6.3.2.3	7.1.3.2.1	3.1.2

Quelle: eigene Abbildung, Hochschule Zittau-Görlitz, 2016

allem in Haushaltsanlagen verbreitet ist, kann diese z. B. auch in Hochdruckdampferzeugern erfolgreich eingesetzt werden (38 S. 109).

Exemplarisch kann die Effizienzsteigerung anhand der Verbrennungsluftvorwärmung eines Heizkessels erklärt werden: Verbrennungsluft wird durch Wärmeaustausch mit dem Abgas vorgewärmt. Dadurch kann der Anteil an Primärenergie eingespart werden, der sonst für die Erwärmung der Verbrennungsluft bereitgestellt werden müsste. Durch den gesunkenen Brennstoffbedarf sinkt der Bedarf an Verbrennungsluft, und der Abgasverlust wird weiter reduziert. Ein Schema eines Feuerungssystems mit einem Luftvorwärmer wird Abbildung 3.1-4 dargestellt. Eine weniger effiziente, aber einfache Art des Vorwärmens könnte sein, den Lufteinlass des Brenners unter der Decke des Kesselhauses ohne zusätzlichen Luftvorwärmer zu installieren. Im Allgemeinen ist die Luft hier im Vergleich zur Außentemperatur 10 bis 20 °C wärmer.

Abbildung 3.1-4: Schema einer Feuerungsanlage mit Luftvorwärmer



Quelle: (39 S. 32)

Nach sorgfältiger Analyse des Energiebedarfs für die Gesamtanlage kann eine Wärmerückgewinnung bei Thermoprozessanalagen durch Verknüpfung von Austrittsenergien aus einer Komponente mit Eintrittsenergien einer anderen Komponente erfolgen. So kann z. B. die Abwärme eines Erwärmungsofens aus der Stahl- und Keramikindustrie (> 1000 °C) zur Beheizung eines Vorwärmofens oder Trockners (ca. 300 °C) genutzt werden. Energieeinsparungen in großer Höhe können erreicht werden, wenn das Gut auf eine Temperatur deutlich über der Raumtemperatur vorgewärmt wird (z. B. Warmeinsatz von Brammen in die Wärmöfen vor dem Warmwalzen). Ähnlich hohe Einsparungen lassen sich z. B. durch Kopplung der Prozessschritte Entbindern und Sintern ohne Zwischenkühlung in der keramischen Industrie erreichen (27 S. 27 f.).

Erreichter Umweltnutzen

Reduzierung des Brennstoffbedarfs, Verringerung der CO_2-Emissionen.

Medienübergreifende Wirkungen

Die Senkung der Abgastemperaturen kann in einigen Fällen eine Erhöhung der Schadstoffemissionen zur Folge haben:

- Das Vorheizen von Verbrennungsluft führt zu einer höheren Flammentemperatur und folglich zu einer Zunahme von thermischen NO_x-Emissionen (ab ca. 1300 °C). Werden dabei vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte überschritten, kann der Einsatz von Minderungsmaßnahmen erforderlich werden. Dies können Primärmaßnahmen (Rauchgasrezirkulation, Luft- und/oder Brennstoffstufung) oder Sekundärmaßnahmen sein. Letztere basieren üblicherweise auf der

Eindüsung von Ammoniak oder Harnstoff als Reduktionsmittel, wobei ein Teil des Ammoniaks (potentiell) mit den Abgasen in die Umwelt entlassen wird (sog. Ammoniakschlupf). In Thermoprozessanlagen können zur NO_x-Minderung sog. Low-NO_x-Brenner, Hochgeschwindigkeitsbrenner sowie FLOX-Brenner eingesetzt werden (Kapitel 3.1.1).

- Der Einsatz eines Abgaswärmeübertragers bedeutet eine höhere Druckdifferenz des Abgases, die durch das Brennergebläse überwunden werden muss. Dadurch steigt der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie (Strombedarf der Peripheriegeräte). Vorgewärmte Verbrennungsluft weist ein höheres Volumen auf und kann die Stabilität der Flamme und damit die Qualität der Verbrennung negativ beeinflussen, was evtl. höhere Emissionen zur Folge hat.
- Beim Einsatz von Speise- oder Heizwasservorwärmung werden zusätzliche Pumpen benötigt, und es steigt ebenfalls der Hilfsenergiebedarf.
- Bei der Brennwertnutzung kommt es zu einer Abscheidung von Feinstaub und Schwermetallen, die nicht mehr in die Luft emittieren, sondern mit dem Kondensat entsorgt werden. Weiterhin muss saures Kondensat neutralisiert werden (z. B. mit Natronlauge).

Betriebsdaten

Laut 1. BImSchV kann Formel 3.1-5 (Siegert‘sche Formel) zur Bestimmung des Abgasverlustes verwendet werden für Feuerungsanlagen (Heizkessel) mit Feuerungswärmeleistungen von (40), (41 S. 4):

- Kohle- und Holzfeuerungsanlagen < 1 MW,
- Feuerungsanlagen für Stroh, Getreide und weitere pflanzliche Brennstoffe < 0,1 MW,
- Öl- und Gasfeuerungsanlagen < 20 MW.

Die Siegert’sche Formel kann auch zur Abschätzung des Abgasverlustes für Industrieöfen verwendet werden (42 S. 354).

Formel 3.1-9

$$q_A = (\theta_A - \theta_L)\left(\frac{A}{21 - O_{2,A}} + B\right)$$

q_A	Abgasverlust [%]
θ_A	Abgastemperatur [°C]
θ_L	Zulufttemperatur / Verbrennungslufttemperatur [°C]
$O_{2,A}$	Sauerstoffgehalt im trockenen Abgas [Vol.%]
A, B	Brennstoffabhängige Konstanten

Die verwendeten Koeffizienten sind brennstoffspezifische Parameter. Der Abgasverlust ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Verbrennungsluft sowie der O_2 Konzentration. Die Werte für verschiedene Brennstoffe können Tabelle 3.1-2 entnommen werden.

Tabelle 3.1-2: Brennstoffspezifische Konstanten für verschiedene Brennstoffe

	Heizöl EL, naturbelassene Pflanzenöle, Pflanzenöl-methylester	Gase der öffentlichen Gasversorgung	Kokereigas	Flüssiggas und Flüssiggas-Luft-Gemische
A	0,68	0,66	0,60	0,63
B	0,007	0,009	0,011	0,008

Quelle: (40 S. 19)

In der Praxis kann ein Luftvorwärmer die Effizienz von Heizkesseln um 3 bis 5 % steigern (Erhöhung feuerungstechnischer Wirkungsgrad bis 5 % (43 S. 18). Generell kann mit jeder Senkung der Abgastemperatur von ca. 20 °C eine Steigerung der Effizienz um 1 % erzielt werden: Für einen mit Erdgas betriebenen Dampfkessel, der eine Abgastemperatur von 160 °C, eine Verbrennungslufttemperatur von 20 °C und einen O_2- Anteil von 10 % im Abgas aufweist, beträgt der Abgasverlust laut obiger Gleichung 9,66 %. Bei einer Erhöhung der Verbrennungslufttemperatur auf 40 °C (z. B. durch Neupositionierung des Lufteinlasses) beträgt der Abgasverlust 8,28 %, d. h. eine Erhöhung der Effizienz um 1,38 %. Wird gleichzeitig die Abgastemperatur auf 120 °C gesenkt (durch Wärmerückgewinnung), beträgt der Abgasverlust 5,52 %. Gegenüber dem Wert ohne Luftvorwärmung/Abgaswärmerückgewinnung bedeutet dies eine Steigerung der Effizienz von 4,14 %. Eine weitere Erhöhung der Effizienz wird durch die Absenkung des Sauerstoffgehaltes im Abgas erreicht: wird der Luftüberschuss im Abgas auf 5 % reduziert, ergibt sich in Verbindung mit den bereits genannten Maßnahmen ein Abgasverlust von 4,02 %, dies entspricht einer Erhöhung gegenüber dem Ausgangszustand von 5,64 % (siehe Kapitel 3.1.2).

Die Brennstoffeinsparungen durch den Einsatz von Luftvorwärmung (η_b) bei Industrieöfen können auch folgendermaßen berechnet werden (44 S. 11):

Formel 3.1-10

$$\eta_b = 1 - \frac{\dot{H}_{Zu,V}}{\dot{H}_{Zu,O}} = 1 - \frac{\eta_{f,O}}{\eta_{f,V}}$$

$\dot{H}_{Zu,V}$ Zugeführter Enthalpiestrom mit Vorwärmung [kW]

$\dot{H}_{Zu,O}$ Zugeführter Enthalpiestrom ohne Vorwärmung [kW]

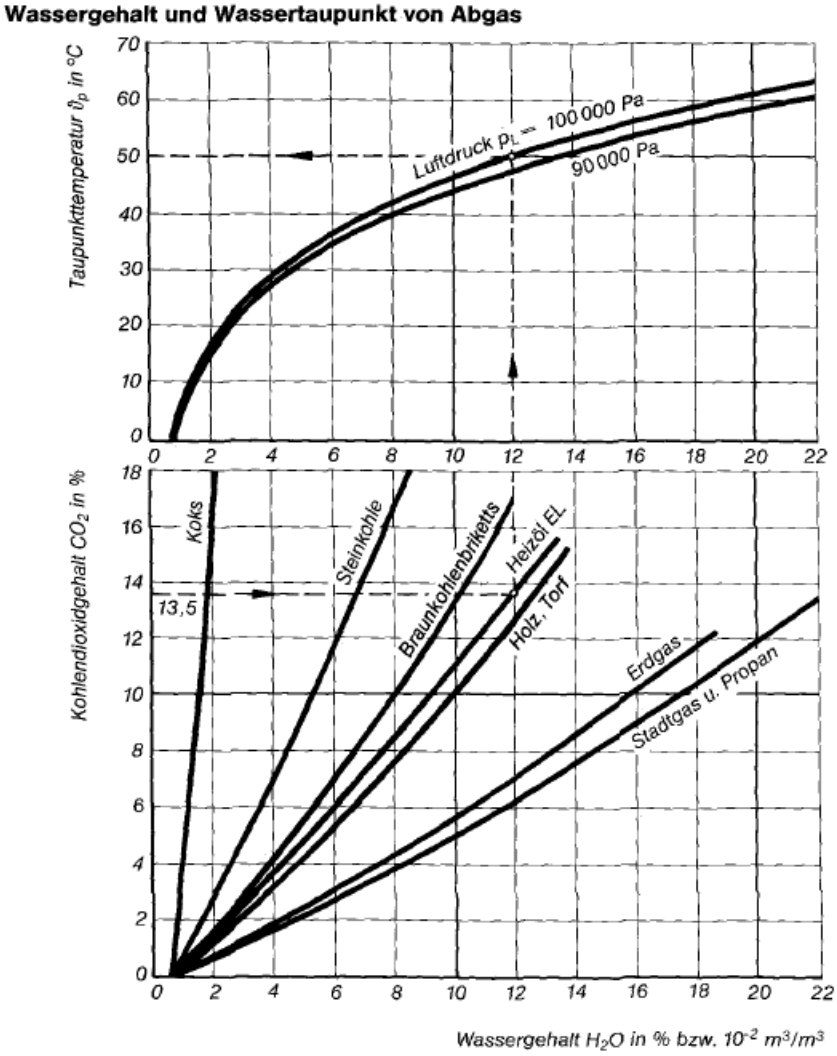
$\eta_{f,V}$ Feuerungstechnischer Wirkungsgrad mit Vorwärmung [-]

$\eta_{f,O}$ Feuerungstechnischer Wirkungsgrad ohne Vorwärmung [-]

Die möglichen Effizienzsteigerungen durch Speisewasservorwärmung mittels Economiser betragen zwischen 5 und 7 % (siehe (45 S. 11), Kapitel 3.2.4). Bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Brennstoffen muss darauf geachtet werden, dass ab einer Temperatur von ca. 120 – 150 °C (sog. Säuretaupunkt) hochkorrosive Schwefelsäure aus dem Abgas auskondensiert (46 S. 595). Das säurehaltige Kondensat muss gesammelt und nachbehandelt werden.

Bei der Brennwertnutzung wird das Abgas bis unterhalb des Wasserdampftaupunktes abgekühlt. Die dabei nutzbare latente Wärme ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes (Wasserstoffanteil und Feuchte) und der Verbrennungsluft sowie deren Feuchte. Der Taupunkt beträgt ca. 45-75 °C (46 S. 595). Die genaue Taupunkttemperatur ist neben dem Wassergehalt im Abgas auch abhängig vom Luftverhältnis der Verbrennung (und resultierendem CO_2- Gehalt des Abgases) (Abbildung 3.1-5). Mit der Brennwertnutzung sind beispielsweise Effizienzsteigerungen von bis zu 10 % für Erdgaskessel möglich (47 S. 9), (48 S. 1). Aufgrund der höheren Wassergehalte sind bei Einsatz von Biomasse noch größere Effizienzsteigerungen erreichbar (z. B. bis zu 20 % bei Einsatz von Waldholz mit einer Holzfeuchte von 66 % (47 S. 9).

Abbildung 3.1-5 Taupunkttemperatur des Wasserdampfes für verschiedene Brennstoffe



Quelle: (49 S. 4-47)

Anwendbarkeit

Jede Feuerungsanlage sollte sorgfältig dimensioniert werden. Wird nachträglich eine geringere Leistung benötigt (z. B. durch Effizienzmaßnahmen auf der Verbraucherseite), sollte überprüft werden, inwieweit die Leistung bzw. der Betrieb angepasst werden können bzw. ob ein Austausch der Feuerungsanlage aus Effizienz- und Kostengründen sinnvoll ist.

Bei Heizkesseln kann die regelmäßige manuelle Reinigung der Wärmeübertragungsflächen während der Abschaltung im Rahmen von Inspektions- und Wartungsarbeiten oder während des laufenden Betriebs mittels Online-Reinigungssystemen (z. B. Rußbläser, Bürstensysteme) erfolgen.

Bei der Verbrennungsluftvorwärmung muss auf die Zusammensetzung des Abgases geachtet werden. Bestimmte Formen der brennerinternen Wärmerückgewinnung bei Thermoprozessanlagen sind z. B. mit staub- oder ölhaltigen Abgasen nicht zu realisieren (Kapitel 3.1.1). Für die Anwendung der externen Verbrennungsluftvorwämung muss ausreichend Bauraum vorhanden sein, da Gas/Gas-Wärmeübertrager einen hohen Raumbedarf haben (siehe auch Kapitel 3.3). Weiter entstehen zusätzliche Wärmeverluste über Rohrleitungen. Die Verbrennungsluftvorwärmung ist bei Heizkesseln vor allem dann sinnvoll, wenn keine Möglichkeit zum Einsatz eines Economisers besteht, z. B. aufgrund hoher Kondensatrücklaufmengen oder einer geringen Gleichzeitigkeit mit möglichen Niedertemperaturverbrauchern (45 S. 16).

Die Verbrennungsluftvorwärmung kann unter Umständen zu einer Überschreitung der NO_x-Emissionen führen und infolge dessen die Installation von technisch aufwändigen primären Maßnahmen (Luft- und/oder Brennstoffstufung) bzw. aufwändigen und kostspieligen Sekundärmaßnahmen zur Reduktion (Abgasreinigung) erfordern. Die Installation bzw. der Betrieb weiterer notwendiger Abgasreinigungsvorrichtungen sowie von Wärmerückgewinnungsanlagen wird durch die sekundäre NO_x- Reduktion erschwert, wodurch sich in bestimmten Fällen nur geringe Effizienzsteigerungen erreichen lassen. In Thermoprozessanlagen können durch die Wahl geeigneter Brenner erhebliche NO_x-Reduktionen erreicht werden (Kapitel 3.1.1).

Eine Anwendung der Luftvorwärmung ist für Naturzugkessel nicht möglich.

Bei Wärmerückgewinnungsmaßnahmen ist ebenfalls auf die Abgaszusammensetzung zu achten. Bei korrosiven Bestandteilen kann der Einsatz von korrosionsbeständigen Werkstoffen für Wärmeübertrager notwendig werden. Die ist bspw. bei Abkühlung des Abgases unter den Säuretaupunkt bzw. bei der Brennwertnutzung (saures Kondensat) der Fall. Für die Brennwertnutzung ist eine kontinuierliche Wärmesenke mit Temperaturen möglichst weit unterhalb des Taupunktes für Wasserdampf notwendig. Dies können z. B. Niedertemperaturheizungen, Brauchwarmwasserbereitung oder Prozesswärme für verfahrenstechnisch erforderliche Vorwärmstufen bei niedrigen Temperaturen sein (43 S. 17), (38 S. 110). Weiterhin lässt sich Niedertemperaturwärme z. B. mittels Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau anheben (z. B. (50 S. 55 ff.)). Die Brennwertnutzung ist für erdgasbefeuerte Heizkessel ohne größeren technologischen Aufwand sowie für Hochdruckdampferzeuger erfolgreich umzusetzen (38 S. 109). Bei Feuerungen mit Heizöl muss der niedrigere Taupunkt des Wasserdampfes sowie die Rußbildung beachtet werden. In Kohle-, Holz- und Abfallfeuerungsanlagen kommt es ebenfalls zu Rußbildung und Ablagerungen von Flugasche und Flugstaub. Bei Holzfeuerungen muss zusätzlich darauf geachtet werden, dass in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Holzes, den Prozessbedingungen sowie einer unvollkommenen Verbrennung bei Temperaturen von ca. 70°C Harze und Teere kondensieren, die einen zähen Belag bilden. Da zu diesem Zeitpunkt (bzw. an dieser Zone im Wärmeübertrager) aber noch kein Wasser auskondensiert, entsteht keine reinigende Wirkung des Kondensats, und es müssen evtl. physikalische Wäscher oder andere Methoden vorgesehen werden, um den Wärmeübertrager regelmäßig zu reinigen (51). Der entstehende Kondensatschlamm hat einen niedrigen Feststoffgehalt und muss evtl. aufbereitet werden (Entwässerung, Neutralisation).

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Für einen wirtschaftlichen Betrieb jeder Feuerungsanlage ist die sorgfältige Dimensionierung Voraussetzung. Die Reinigung der Wärmeübertragerflächen im Rahmen von regelmäßigen Wartungsarbeiten verursacht nur geringen Aufwand und erhält dabei eine hohe Effizienz der Wärmeübertragung.

Durch die Senkung von Abgastemperaturen lassen sich bei Heizkesseln beträchtliche Effizienzsteigerungen und damit kurze Amortisationszeiten erzielen. Die Effizienzsteigerung ist abhängig von der erreichbaren Absenkung der Abgastemperatur. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Wärmerückgewinnung ist eine verfahrenstechnisch sinnvolle Einbindung in den Gesamtprozess.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Absenkung der Abgastemperatur für Heizkessel mittels Economiser gegenüber einem Wärmetauscher zur Luftvorwärmung vorzuziehen, da der Effizienzgewinn größer, die Kosten jedoch etwa in gleicher Höhe anfallen (45 S. 16). Maßnahmen, wie die Entnahme der Verbrennungsluft von unterhalb der Decke des Kesselhauses, sind nur mit sehr geringen Kosten verbunden.

Nachfolgend ein Beispiel für die Nachrüstung einer Feuerungsanlage mit einem Luftvorwärmer, mit welchem eine Abgastemperatur von 1200 °C um 350 K gesenkt werden soll (52 S. 18):

Tabelle 3.1-3: Beispielrechnung Verbrennungsluftvorwärmung

	Einheit	Wert
Brennerleistung	kW	1000
Energieeinsparung	%	25
Investitionskosten (Material und Installation)	EUR	39.000
Volllaststunden	h/a	1.500
Minderung des Erdgasverbrauchs	m³/a	37.500
Kosteneinsparungen Erdgas	EUR/a	18.563
Betrachtungszeitraum	a	15
Durchschnittliche Annuität	EUR/a	16.628
Rendite	%	47
Kumulierter Erlös	**EUR**	**270.000**

Quelle: (52 S. 18)

Für einen mittelgroßen Schmelzofen (ca. 1 t Kapazität) kann durch die Anschaffung eines dreizügigen Wärmeübertragers ca. 20 – 30 % der Wärme des Abgases für Hochtemperaturprozesse (> 1000 °C) bzw. ca. 10 % der Wärme bei niedrigerer Prozesstemperatur (z. B. 500 °C) zurückgewonnen werden. Die Investitionskosten für den Wärmeübertrager betragen ca. 30.000 EUR (29 S. 331).

Ein Hersteller von Keramik-Brennöfen gibt die Investitionskosten eines Wärmeübertragers zur Rückgewinnung der Wärme von Abgasen, die bereits einen Vorwärmer durchströmt haben, mit ca. 400.000 EUR an. Dies sind ca. 10 % der Investitionskosten eines großen Industrieofens (> 10 t Kapazität als Batch-Prozess bzw. 20 t/d als kontinuierlicher Prozess). Damit können ca. 15 % Brennstoff eingespart werden. Gleichzeitig gibt es technische Einschränkungen bei der Anwendung, und es ist weiterhin eine geeignete Wärmesenke nötig (29 S. 332).

Triebkraft für die Umsetzung

Gesteigerte Energieeffizienz der Prozesse, Reduktion von Brennstoffkosten.

Beispiele

Weitgehend eingesetzt.

3.1.1 Energetische Optimierung von Brennern für Industrieöfen

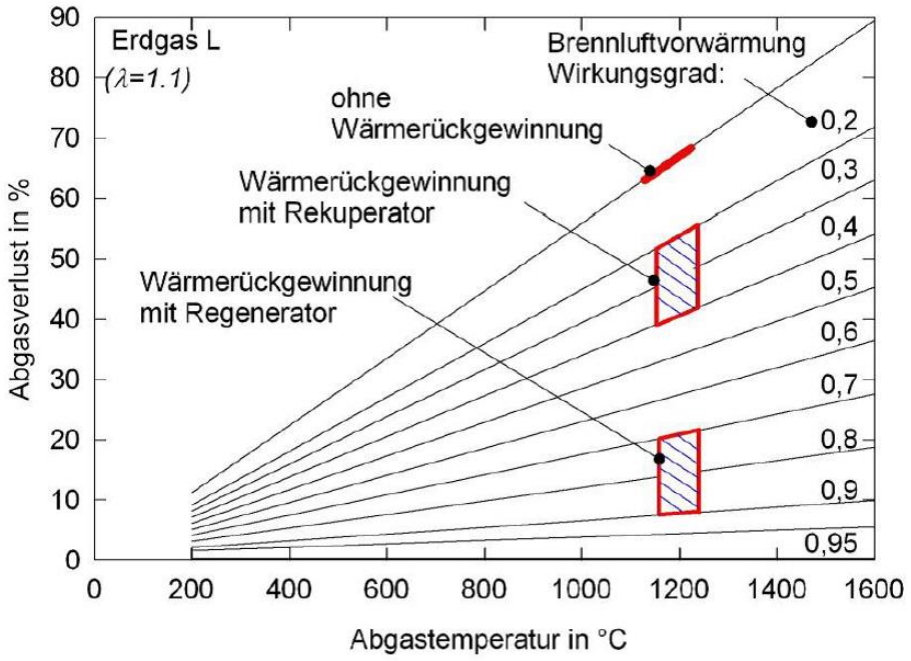
Beschreibung

Da das Einsparpotential an Primärenergie mit steigender Prozesstemperatur steigt, ist dies vor allem bei Industrieofenprozessen mit hohen Temperaturen (400 – 2000 °C) relevant. Mit konventioneller Brennertechnologie gehen bei Prozesstemperaturen von ca. 1300 °C ca. 70 % der Brennstoffwärme ohne externe Wärmerückgewinnung verloren. Da externe Luftvorwärmer einen hohen Raumbedarf benötigen und die Luft häufig lediglich auf ca. 400 °C vorgewärmt werden kann ((53 S. 57), (13 S. 35)), stellen rekuperative und regenerative Brenner sowie Sauerstoffbrenner für flüssige und gasförmige Brennstoffe eine interessante Alternative dar. Diese Brenner sind vor allem in der Glas- und Metallindustrie weit verbreitet.

Bei rekuperativen und regenerativen Brennern ist die Vorwärmung von Verbrennungsluft durch die Abgaswärme direkt integriert, wodurch mit geringem Platzbedarf hohe Verbrennungslufttemperaturen von 500 –1000 °C erreicht werden können ((53 S. 57), (13 S. 35)). Die Verbrennungslufttemperatur wird entscheidend von der Austrittstemperatur des Abgases aus dem Ofen sowie dem Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung beeinflusst (vgl. Abbildung 3.1-6). Weiterhin kann die Verbrennungsluft nicht vollständig auf das Temperaturniveau des Abgases

angehoben werden, da die Verbrennungsluftmenge lediglich ca. 75 % der Rauchgasmenge beträgt (54 S. 35).

Abbildung 3.1-6: Abgasverlust in Abhängigkeit von der Abgastemperatur ohne sowie mit regenerativer bzw. rekuperativer Wärmerückgewinnung

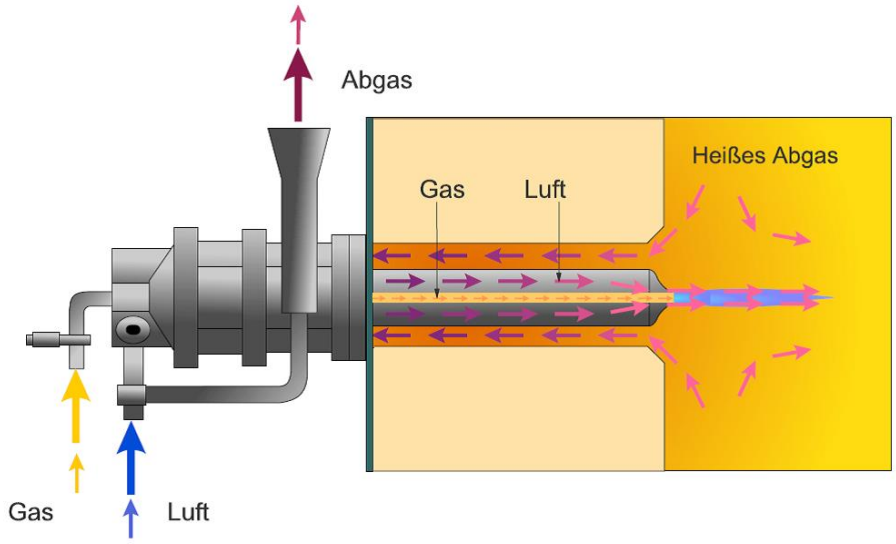


Quelle: (55 S. 1)

Rekuperative Brenner

Heißes Abgas wird direkt an der Außenwand der Verbrennungsluftzufuhr entlanggeleitet, wodurch die Abgaswärme auf die Verbrennungsluft übertragen wird. Erreichbare Verbrennungslufttemperaturen liegen üblicherweise bei 500 – 700 °C (53 S. 57). Um einen möglichst großen Wärmeübergang zu erhalten, wird die wärmeübertragende Oberfläche durch Rippen, Lamellen oder eine möglichst große Anzahl einzelner Verbrennungsluftzuleitungen vergrößert (Abbildung 3.1-7). Aufgrund der Bildung von thermischem NO_x sind viele rekuperative Brenner als Low-NO_x- oder FLOX- Brenner ausgeführt.

Abbildung 3.1-7: Schema rekuperativer Brenner



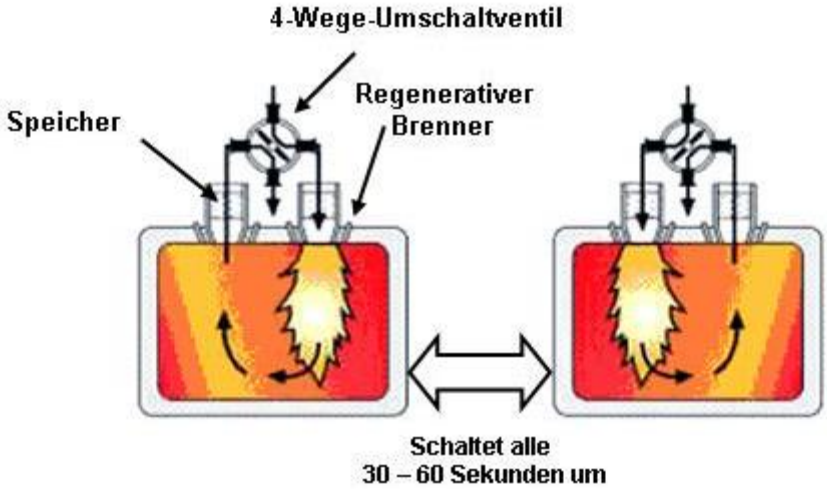
Quelle: (56)

Regenerative Brenner

Bei regenerativen Brennern wird die Abgaswärme kurzzeitig in Feststoff-Speichermaterialien, wie Stahl, Keramik oder Graphitkugeln, gespeichert und anschließend auf die Verbrennungsluft übertragen. Dabei können ca. 85 - 90 % der Wärme an die Verbrennungsluft abgegeben werden (43 S. 18).

In der Praxis wird zwischen alternierenden und kontinuierlichen Regeneratorbrennern unterschieden. Alternierende Brenner werden paarweise betrieben, wobei der Brenner-/ Regeneratorbetrieb jeweils taktweise wechselt (z. B. aller 30 - 90 s (57)) (Abbildung 3.1-8). Alternierende Brenner können auch mit einem zentralen Regenerator betrieben werden. Kontinuierliche regenerative Brenner besitzen einen drehenden Regenerator. Das darin enthaltene Wärmespeichermaterial wird durch das heiße Abgas thermisch beladen. Damit kann eine beliebige Anzahl von unterschiedlichen Brennern mit heißer Verbrennungsluft versorgt werden. Gleichzeitig eignet es sich für die zentrale Wärmerückgewinnung von mehreren Ofenanlagen.

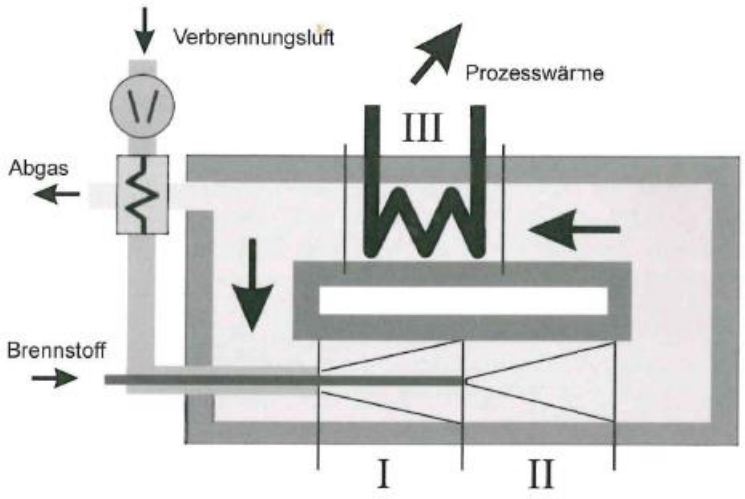
Abbildung 3.1-8: Schema Arbeitsprinzip von regenerativen Brennern



Quelle: (1 S. 127)

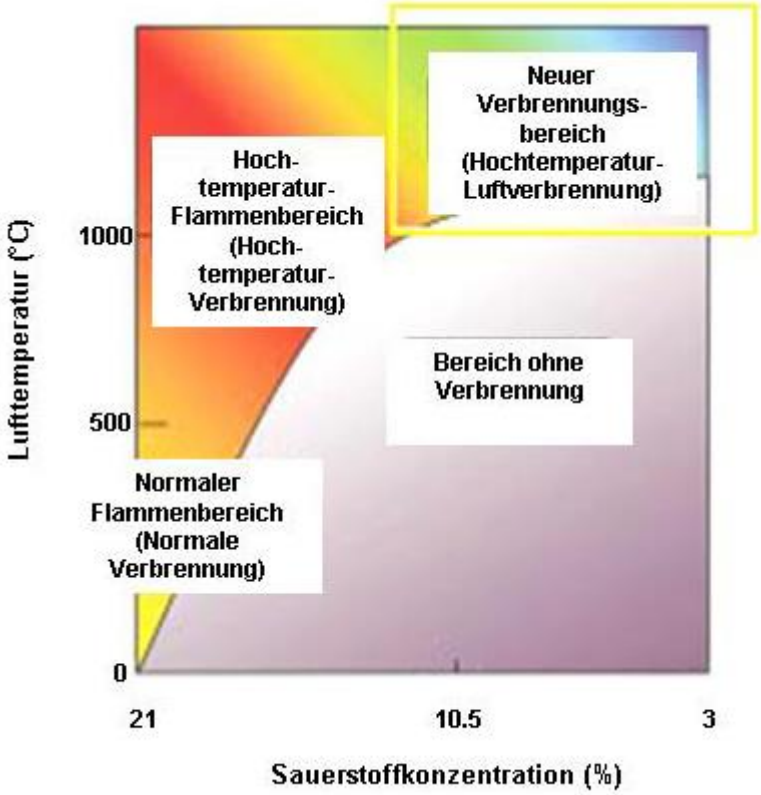
Steigende Verbrennungslufttemperaturen führen zu einem Anstieg der thermischen NO_x-Emissionen. Dies kann durch den Einsatz von verschiedener Brennertechnologie verhindert werden. Zur Reduzierung der NO_x-Emissionen können beispielsweise Brenner mit Luft- und/oder Brennstoffstufung eingesetzt werden. Im Bereich der Thermoprozessanlagen sind häufig Brenner mit Luftstufung anzutreffen, bei denen eine zweistufige Verbrennung durch die Brennerkonstruktion erreicht wird. Es erfolgt dabei primär eine unterstöchiometrische Verbrennung (λ = 0,7 - 0,9), wobei zum einen die adiabate Verbrennungstemperatur nicht erreicht wird, zum anderen durch das mangelnde Sauerstoffangebot die Bildung von NO_x unterdrückt wird. Der vollständige Ausbrand erfolgt nach Zugabe der Sekundärluft und möglichst in einem Bereich, in dem die Flamme schon Wärme abgegeben hat. Dadurch werden hohe Spitzentemperaturen der Verbrennung vermieden (53 S. 85). Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz von Hochgeschwindigkeits- bzw. Impulsbrennern. Dabei wird das Brennstoff-Luft-Gemisch mit hoher Geschwindigkeit (> 100 m/s) in den Brennraum eingebracht, wodurch die Verbrennungsgase innerhalb des Ofenraumes zirkulieren und sich schnell mit den Flammen vermischen (53 S. 56). Es handelt sich dabei um eine interne Rauchgasrezirkulation, wobei ca. 30 % der Rauchgase rezirkuliert werden können, bevor die Flammenstabilität negativ beeinflusst wird (53 S. 86). Durch die Vermischung des Brennstoffes bzw. der Verbrennungsluft sinkt die adiabate Verbrennungstemperatur. Dieser Effekt wird auch durch den Einsatz der flammenlosen Oxidation (FLOX-Brenner) erreicht, mit denen sich die NO_x-Emissionen gegenüber Hochgeschwindigkeitsbrennern nochmals senken lassen. Dabei werden Brennstoff und Verbrennungsluft mit hoher Geschwindigkeit in die Brennkammer eingebracht. Durch die Strömungsführung wird ein hoher Anteil Rauchgas rezirkuliert (teilweise > 30 %). Flammenlose Oxidation erfolgt, wenn die Temperatur des rezirkulierten Rauchgases die Selbstentzündungstemperatur übersteigt (ca. 850 °C) (53 S. 69). Abbildung 3.1-9 zeigt das Prinzip der flammenlosen Oxidation: Verbrennungsluft wird mit hoher Geschwindigkeit eingeblasen und vermischt sich mit zirkuliertem Rauchgas (Schritt I). In Schritt II wird Brennstoff zugegeben, wobei die Temperaturerhöhung von der Menge des rezirkulierten Rauchgases abhängt. In Schritt III erfolgt schließlich die Wärmeauskopplung (53 S. 61). Die Verbrennung erfolgt dabei homogen im gesamten Ofenraum. Da sich dabei keine Flammenfront ausbildet, in der sich Stickoxide bilden, lässt sich mit FLOX-Brennern die Bildung von NO_x stark reduzieren. Erfolgt die flammenlose Oxidation in Verbindung mit regenerativer Verbrennungsluftvorwärmung auf > 1000 °C, wird auch von High-Temperature-Air-Combustion (HiTAC) gesprochen. Abbildung 3.1-10 zeigt die verschiedenen Bereiche der Verbrennung bei sich ändernden Sauerstoffkonzentrationen und Lufttemperaturen.

Abbildung 3.1-9: Idealisiertes Schema der flammenlosen Oxidation



Quelle: (53 S. 61)

Abbildung 3.1-10: Darstellung der Verbrennungsbereiche



Quelle: (1 S. 127)

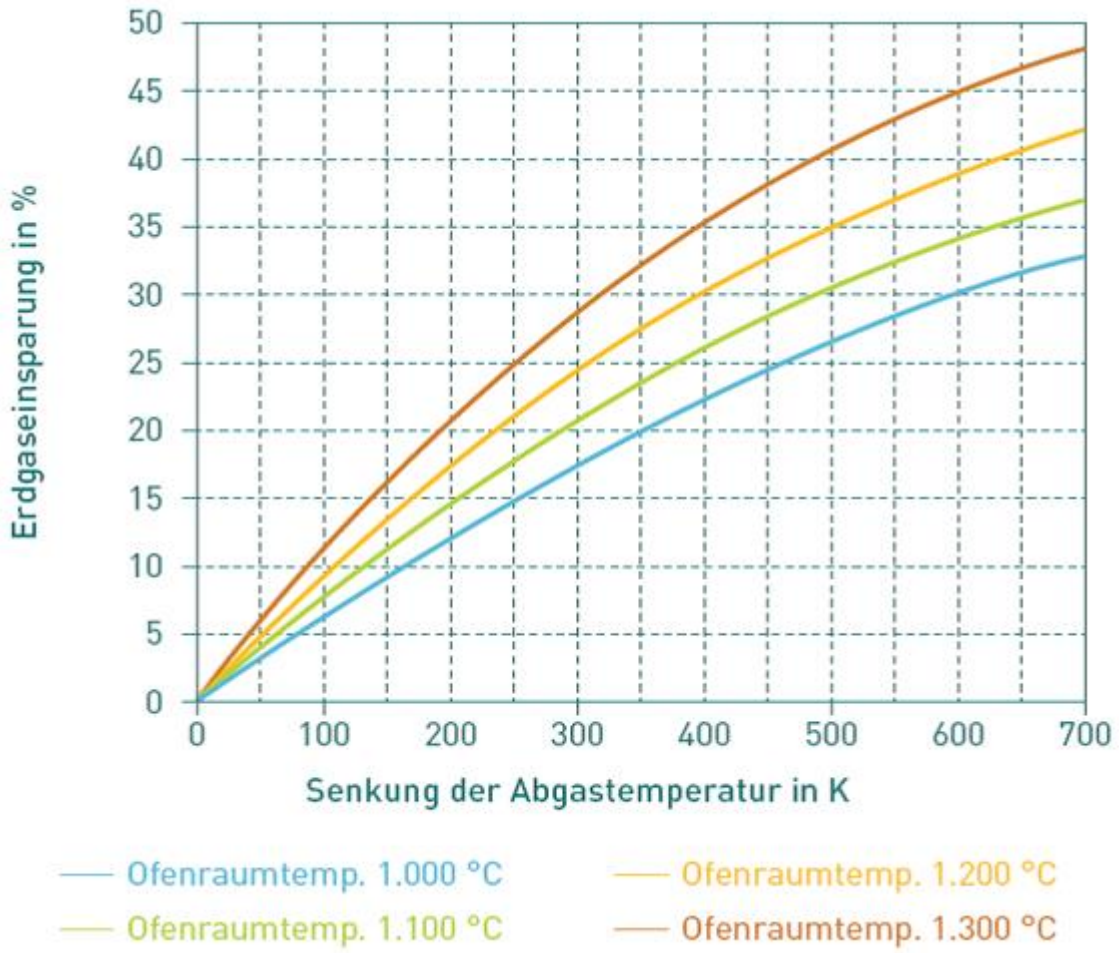
Sauerstoffbrenner

Erfolgt die Verbrennung mit Luft als Oxidationsmittel, muss Luftstickstoff (ca. 79 % der Verbrennungsluft) als Inertgas, welches nicht aktiv an der Verbrennung beteiligt ist, mit aufgeheizt werden. Wird dagegen Sauerstoff als Oxidationsmittel eingesetzt, kann die für die Erwärmung des Luftstickstoffes andernfalls notwendige Brennstoffenergie eingespart werden. Gleichzeitig verringern sich die Abgasmenge und damit der Abgasverlust, wodurch sich der feuerungstechnische Wirkungsgrad erhöht und in etwa dem eines Regeneratorbrenners entspricht (relative Luftvorwärmung 0,7 bis 0,9 bei Verwendung von reinem Sauerstoff) (53 S. 116). Durch das Fehlen des Luftstickstoffs treten bei der Sauerstoffverbrennung nahezu keine therm. NO_x- Emissionen auf. Zur Regelung der Verbrennungstemperatur kann Abgas rezirkuliert werden. Durch die Reduktion von Temperaturspitzen ist eine homogene Temperaturverteilung in Industrieöfen möglich, wodurch eine Steigerung der Produktivität erreicht wird.

Erreichter Umweltnutzen

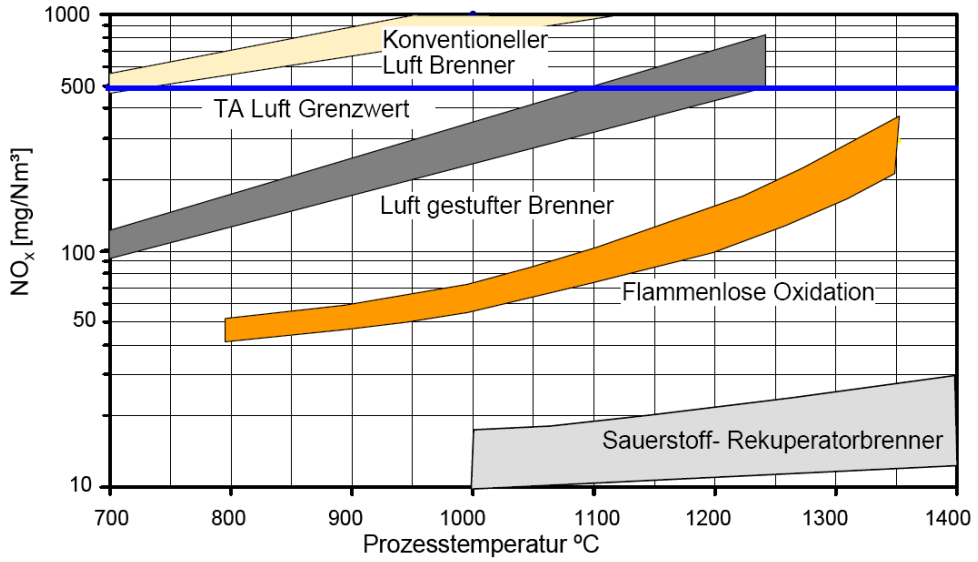
Generell lässt sich mit den o.g. Maßnahmen der Brennstoffbedarf und damit die THG- Emissionen verringern (Abbildung 3.1-11). Bei Einsatz von Low-NO_x-, FLOX- oder Sauerstoffbrennern wird der Anteil an NO_x- Emissionen erheblich reduziert (Abbildung 3.1-12).

Abbildung 3.1-11: Brennstoffeinsparpotential durch Senkung der Abgastemperatur in Abhängigkeit der Ofenraumtemperatur



Quelle: (52 S. 35)

Abbildung 3.1-12: NO_x- Emissionen von unterschiedlichen Brennerarten



Quelle: (58 S. 6), (59 S. 84)

Da bei der Verbrennung mit Sauerstoff ein wesentlich geringeres Rauchgasvolumen anfällt, können Aufbereitungssysteme kleiner dimensioniert werden, wodurch der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie reduziert werden kann. Zu beachten ist dabei, wie der Sauerstoff gewonnen wird (siehe Medienübergreifende Wirkung). Weiterhin besitzt die Sauerstoffverbrennung das Potential, die Abtrennung von CO_2 aus dem Abgas für zukünftige Anwendungen wesentlich zu erleichtern.

Medienübergreifende Wirkungen

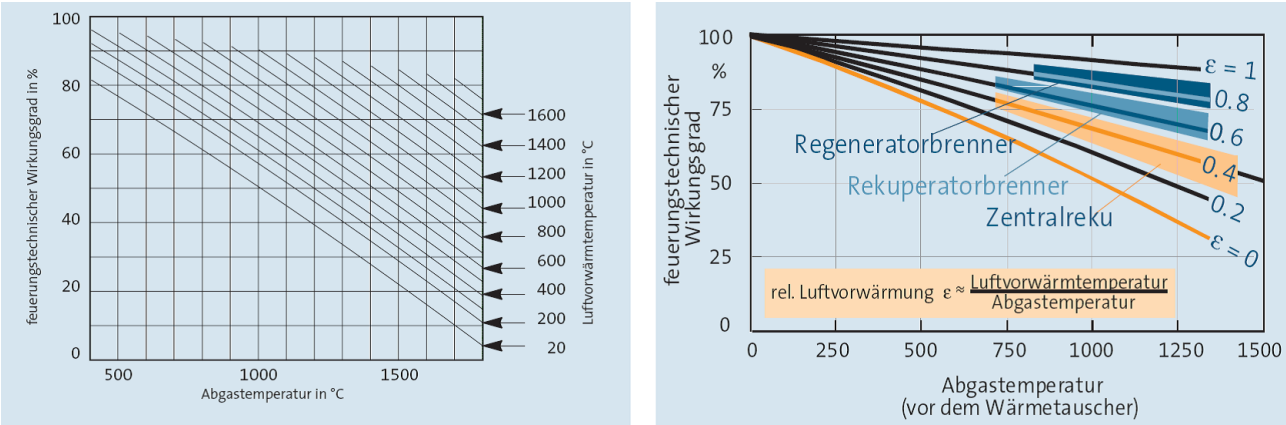
Mit rekuperativen und regenerativen Brennern lassen sich hohe Verbrennungslufttemperaturen und damit hohe Flammentemperaturen erreichen. Dies begünstigt die Bildung von thermischen NO_x. Werden Grenzwerte überschritten, kann die Bildung von NO_x durch den Einsatz von Low-NO_x bzw. FLOX-Brennern unterbunden werden. Alternativ können NO_x-Minderungsmaßnahmen im Abgaskanal umgesetzt werden.

Bei Einsatz von Sauerstoffbrennern muss der beträchtliche Energiebedarf für die Abtrennung des Sauerstoffs aus der Luft in die Berechnung der Effizienzsteigerung einbezogen werden. Soll z. B. ein Rekuperatorbrenner gegen einen Sauerstoffbrenner getauscht werden, muss zur Bestimmung der Energieeffizienz das Äquivalent der Primärenergie, welches zur Erzeugung des Sauerstoffs aufgebracht werden muss, der Energieeinsparung gegenübergestellt werden. Erst dann ist erkennbar, ob tatsächlich eine Effizienzsteigerung erreicht wird.

Betriebsdaten

Im Verhältnis zu Kaltluftbrennern können mit rekuperativen Brennern ca. 30 % Primärenergieeinsparungen erreicht werden (Abbildung 3.1-13) (54 S. 35). Rekuperative Brenner sind im Leistungsbereich von ca. 10 -1000 kW erhältlich (60), (61). Der feuerungstechnische Wirkungsgrad regenerativer Brenner beträgt zwischen 80 - 90 %. Bei Ofentemperaturen von 800 - 1500 °C können bis zu 60 % Energieeinsparungen gegenüber Brennern ohne Wärmerückgewinnung erreicht werden (43 S. 18). Mit kontinuierlichen regenerativen Brennern sind Regenerationsgrade von über 80 % erreichbar, d. h., Rauchgas von einer Temperatur von ca. 1200 °C kann Verbrennungsluft auf max. 1000 °C vorwärmen (57). Das Abgas verlässt den Regenerator mit ca. 150 - 200 °C ((54 S. 39), (57)). Regenerative Brenner sind im Leistungsbereich von ca. 100 kW (WS 2017c) bis zu 12 MW (57) erhältlich. Sauerstoffbrenner sind mit geringen Leistungen ab 10 kW bis hin zu großen Leistungen von 5 MW erhältlich ((62), (63)).

Abbildung 3.1-13: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Luftvorwärmung



Quelle: (27 S. 19)

Bei Prozesstemperaturen zwischen 1300 und 1500 °C in der Glasindustrie fallen die Abgastemperaturen entsprechend höher aus. Ohne Verbrennungsluftvorwärmung betragen diese typischerweise ca. 1300 °C. Mit rekuperativen Brennern können die Abgastemperaturen auf ca. 980 °C gesenkt werden, beim Einsatz von regenerativen Brennern liegen die Abgastemperaturen zwischen

320 und 540 °C (64 S. 30). Mit Sauerstoffbrennern können Verbrennungstemperaturen bis ca. 2000 °C erreicht werden. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad liegt bei über 80 %.

Für alle Thermoprozessanlagen können die Abgastemperaturen durch direkte oder indirekte Wärmerückgewinnung weiter gesenkt werden.

In Tabelle 3.1-4 werden die vorgestellten Brennersysteme exemplarisch anhand ihrer Betriebsdaten miteinander verglichen (54 S. 33), (64 S. 27 ff.).

Tabelle 3.1-4: Übersicht über Brenner für Industrieöfen

Auswahlkriterium	Kaltluftbrenner	Sauerstoffbrenner	Rekuperativer Brenner	Regenerativer Brenner
Kosten	Gering	Hoch	Mittel	Hoch
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	50 - 65 %	85 - 90 %	70 - 85 %	80 - 90 %
Verbrennungs-temperaturen	1.200 °C	2.000 °C	1.300 °C	1.300 °C
Abgastemperaturen	600 – 1.300 °C	600 – 1.000 °C	400 - 980 °C	150 - 540 °C

Quellen: (54 S. 33); (64 S. 27 ff.)

Anwendbarkeit

Die vorgestellten Brennersysteme werden hauptsächlich in großen, gasbefeuerten Industrieöfen mit hohen erforderlichen Prozesstemperaturen (vorwiegend in der Glas- und Metallindustrie, aber auch in der Keramik- und Chemieindustrie) eingesetzt (29 S. 247). Als Brennstoffe kommen hauptsächlich gasförmige Brennstoffe zum Einsatz; Sauerstoffbrenner sind für den Einsatz sämtlicher flüssigen und gasförmigen Brennstoffe erhältlich. Die Auswahl bestimmter Brennersysteme erfolgt hauptsächlich nach den Prozessanforderungen, vor allem nach benötigtem Temperaturniveau.

Rekuperative Brenner benötigen einen dichten Brennraum. Weiterhin sind diese nur für saubere Ofenatmosphären geeignet, da Staub die Wärmeübertragerflächen verschmutzt, damit den Wärmeübergang behindert und einen hohen Reinigungsaufwand mit entsprechenden Stillstandszeiten zur Folge hat. Um eine Rezirkulation der Rauchgase in der Brennkammer zu ermöglichen, sind hohe Flammenaustrittsgeschwindigkeiten notwendig (bis 120 m/s) (54 S. 36).

Rekuperative FLOX-Brenner werden bspw. auch bei der Gasnachverbrennung von Restgasen zur Einhaltung von Emissionswerten eingesetzt. Durch das Verbrennungsprinzip kann trotz Schwankungen in Menge und Zusammensetzung des Restgases eine stabile Verbrennung erreicht werden (53 S. 68).

Alternierende regenerative Brenner erzeugen Temperaturschwankungen und sind daher ungeeignet für Prozesse mit hoher geforderter Temperaturgleichmäßigkeit. Regenerative Brenner sind für den Einsatz unter korrosiven und staubigen Bedingungen geeignet. Das Speichermaterial muss dementsprechend regelmäßig gereinigt und/oder getauscht werden. Durch den durch das Speichermaterial verursachten Druckverlust bei Brennluft und Rauchgasen entsteht ein Mehraufwand an elektrischer Hilfsenergie.

Bei der Anwendung von Sauerstoffbrennern sind aufgrund des Explosionsrisikos höhere Sicherheitsanforderungen als bei der Verbrennung mit Luft einzuhalten. Durch die geringere Menge an Verbrennungsgasen ist der Brennerimpuls bei Sauerstoffbrennern deutlich kleiner. Dies muss beachtet werden, wenn der Brenner zur Umwälzung von Rauchgasen im Ofen und damit zur Vergleichmäßigung der Temperatur eingesetzt werden soll (53 S. 116). Wird der Sauerstoff vor Ort mittels Luftzerlegung gewonnen, kann der dabei abgetrennte Stickstoff zur Erzeugung einer chemisch inaktiven Atmosphäre genutzt werden (z. B. für selbstentzündliche Prozesse in der NE-

Metallindustrie). Oxyfuel-Feuerungen erfordern einen gegenüber der Luftverbrennung höheren Aufwand zur Regelung und Steuerung des Verbrennungsprozesses.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Auswahl von Brennern erfolgt vorrangig nach den jeweiligen Anforderungen des Prozesses.

Die Investitionskosten für rekuperative Brenner sind aufgrund des komplexeren Brenneraufbaus höher als die für Kaltluftbrenner. Bei regenerativen Brennern muss mit nochmals höheren Investitionskosten als bei rekuperativen Brennern gerechnet werden. Ein Kaltluftbrenner mit 150 kW Leistung kostet ca. 1.000 bis 2.000 EUR. Ein regenerativer Brenner derselben Kapazität kostet ca. 7.000 bis 8.000 EUR (29 S. 331).

Neben hohen Investitionskosten für regenerative Brenner, FLOX- und Sauerstoffbrenner sind Kosten für die Steuerung, Rohrleitungen und Armaturen sowie die Sicherheitstechnik zu beachten. Bei dem Einsatz von Sauerstoffbrennern sind weiterhin Investitions- und Betriebskosten für die Luftzerlegungsanlage bzw. Kosten für den Einkauf von Sauerstoff einzukalkulieren. Einsparungen sind durch reduzierten Brennstoffbedarf sowie die höhere Produktivität des Prozesses erreichbar. Hohe Investitionskosten können bei Betrachtung der Lebenszykluskosten durch den höheren Wirkungsgrad der Brenner mehr als ausgeglichen werden.

Für den jeweiligen Anwendungsfall muss aus betriebswirtschaftlicher und verfahrenstechnischer Sicht die optimale Lösung bestimmt werden.

Triebkraft für die Umsetzung

Höhere Produktivität des Ofens, reduzierter Brennstoffbedarf und niedrigere NO_x- Emissionen.

Beispielhafte Anlagen

Weithin eingesetzt.

3.1.2 Optimierung des Luftüberschusses

Beschreibung

Ein zu hoher Luftüberschuss bedeutet einen höheren Abgasverlust und damit eine Wirkungsgradsenkung (siehe Kapitel 3.1). Bei zu niedrigem Sauerstoffgehalt entsteht eine unvollständige Verbrennung, was zum einen eine Verschlechterung des Wirkungsgrades aufgrund unverbrannter brennbarer Gase und zum anderen einen höheren Schadstoffausstoß bedeutet. Seit den 1980er Jahren erfolgt die Regelung von Verbrennungsprozessen häufig über den Restsauerstoffgehalt im Abgas (O_2- Regelung mittels Lambda-Sonden). Damit lassen sich folgende Störgrößen/Schwankungen kompensieren (65 S. 45):

- Verbrennungsluft (Temperatur, Druck, Feuchte),
- Brennstoff (Heizwert, Temperatur, Viskosität),
- Verschmutzung (Brenner, Feuerraum, Kessel, Abgaskanal),
- Schornsteinzug (Wind, Temperatur, Luftdruck),
- Mechanik (Spiel, Hysterese, Verschleiß).

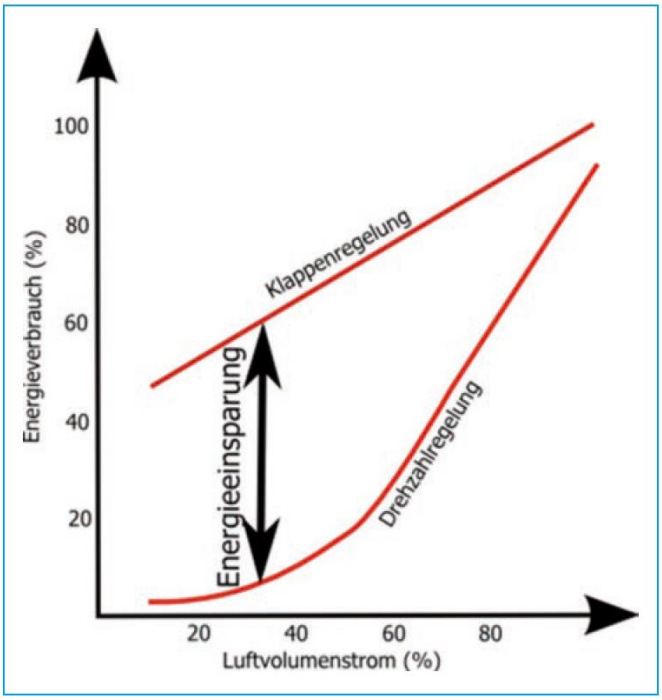
Wird die O_2- Regelung in eine automatisierte Steuerung (elektronische Verbundregelung anstelle mechanischer Verbundregelung) eingebunden, können Wärmebedarf und Restsauerstoff bestimmt und dementsprechend die Brennstoff- und Luftzufuhr geregelt werden.

Eine weitere Reduktion des Abgasverlustes durch Luftüberschuss lässt sich durch Einsatz von O_2/CO-Regelungen erreichen (38 S. 119). Dabei kommt eine Sonde zum Einsatz (z. B. Zirkondioxidsonden), die sowohl den O_2-Gehalt im Abgas als auch den Anteil an CO und H_2 bestimmen kann. Der Feuerungsmanager reduziert den Luftüberschuss regelmäßig soweit, bis ein charakteristischer

Anstieg des CO-Anteils im Abgas detektiert wird. Daraufhin wird der Luftüberschuss geringfügig erhöht, womit die Anlage in jedem Betriebspunkt mit minimalem Luftüberschuss gefahren werden kann. Damit kann der Wirkungsgrad der Feuerungsanlage maximiert und gleichzeitig der Schadstoffausstoß minimiert werden (siehe auch Kapitel 2.10 und (1), Kapitel 2.15.2).

Durch drehzahlgeregelten (modulierenden) Betrieb von Gebläsebrennern können Heizkessel gezielt in Teillastbereiche gefahren werden und so effizienter auf Lastschwankungen reagieren. Dabei werden Verluste durch häufiges An- und Abschalten der Anlage vermieden (z. B. Durchlüftungsverluste, Kapitel 3.2.8). Weiterhin lassen sich bei Teillastbetrieb durch die Drehzahlregelung der Gebläse signifikante Einsparungen an elektrischer Hilfsenergie erreichen (Abbildung 3.1-14). Bei durchschnittlicher Kesselauslastung können ca. 40 % der Stromkosten eingespart werden (38 S. 118).

Abbildung 3.1-14: Schematische Darstellung der Einsparung an elektrischer Hilfsenergie durch Drehzahlregelung bei Gebläsebrennern



Quelle: (66 S. 252)

Erreichter Umweltnutzen

Reduzierung des Brennstoffbedarfes und Reduzierung von Schadstoffemissionen. Durch Drehzahlregelung Einsparung an elektrischer Hilfsenergie.

Medienübergreifende Wirkungen

Wird der Luftüberschuss zu stark reduziert, können durch unvollständige Verbrennung Schadstoffe emittiert werden. In der Praxis werden durch die Steuerung/Regelung von Feuerungsanlagen gültige Grenzwerte eingehalten.

Durch Einsatz von drehzahlgeregelten Brennern können häufige Abschaltvorgänge vermieden werden, wodurch Schadstoffemissionen reduziert werden.

Betriebsdaten

Der für eine vollständige Verbrennung in Heizkesseln notwendige Luftüberschuss λ ist hauptsächlich abhängig vom Brennstoff. Für Öl- und Gasfeuerungen beträgt $1 < \lambda < 1{,}1$ (46 S. 55)), wobei λ für feste Brennstoffe höhere Werte annimmt (Kohlefeuerungen bis zu $\lambda = 1{,}3$, Holzfeuerungen $\lambda = 1{,}5 \ldots 2{,}5$ (67

S. 651), Müllverbrennungsanlagen ca. λ = 1,6-1,9 (68 S. 59). Im Teillastbetrieb steigt der Luftüberschuss nochmals an.

Bei Gas- und Ölfeuerungen mit O_2-Gehalten von > 5 Vol.% im Abgas und schwankender Last können Maßnahmen zur Reduktion geprüft werden (45 S. 19). Tabelle 3.1-5 zeigt eine Einsatzmatrix von Maßnahmen zur energetischen Optimierung der Verbrennung sowie die Drehzahlregelung des Brennergebläses. Dargestellt werden die erreichbaren Effizienzsteigerungen im Verhältnis zu den dazu notwendigen Investitionen in Abhängigkeit vom Lastverhalten des Kessels.

Tabelle 3.1-5: Einsatzmatrix verschiedener Modernisierungsoptionen für Heizkessel

Last/ Betriebs-weise	Intermit-tierender Betrieb Kleinlast	Intermit-tierender Betrieb Volllast	Wechseln-de Betriebs-weise (Woche-Wochen-ende)	Kontinu-ierlicher Betrieb Kleinlast	Wechseln-der Betrieb mittlere Last	Kontinu-ierlicher Betrieb mittlere Last	Wechseln-der Betrieb Volllast	Kontinu-ierlicher Betrieb Volllast
O_2-Regelung	-	o	o	o	++	++	++	+
O_2/CO-Regelung	-	o	o	o	++	++	++	+
Drehzahl-geregeltes Gebläse*	++	++	++	++	+	+	+	o
Optimierung der Brenner-steuerung	++	++	++	++	+	+	o	o

Effizienzsteigerung/ Investition	**sehr gut**	**gut**	**vorteilhaft**	**nicht zu empfehlen**
	++	+	o	-

Quelle: (66 S. 255)* Nur bei Gebläsebrennern möglich

Die in (29 S. 281) ermittelten durchschnittlichen Werte für den Luftüberschuss für indirekt beheizte Industrieöfen variieren von λ = 1,1 – 1,4, während BVT-Werte für gasbefeuerte Industrieöfen von λ = 1,05 bis 1,15 variieren (für LPG als Brennstoff λ = 1,25) Der sehr niedrige Wert von 1,05 wurde in einem Zementdrehofen mit nur einem installierten Brenner erreicht, wodurch der Ofen näher am stöchiometrischen Luftverhältnis betrieben werden kann, als dies im Fall eines Ofens mit mehreren Brennern möglich wäre (siehe „Anwendbarkeit“) (69 S. 22).

In (29 S. 338) wurden folgende Grenzwerte für die max. zulässigen λ-Werte für Industrieöfen vorgeschlagen (Tabelle 3.1-6):

Tabelle 3.1-6: Ökodesign- Mindestanforderungen an das Luftverhältnis

Brennstoff	Maximaler λ-Wert	
	1. Stufe (ab 2016)	2. Stufe (ab 2019)
Erdgas	1,25	1,15
LPG	1,25	1,15
Heizöl	noch zu bestimmen	noch zu bestimmen

Quelle: (69 S. 22)

Dabei gelten folgende Ausnahmen:

- elektrischen Feuerungen und Öfen,
- direkt befeuerte Feuerungen und Öfen,

wenn spezielle atmosphärische Bedingungen benötigt werden. Bestimmte Prozesse benötigen eine reduzierende Atmosphäre (z. B. λ = 0,95), während andere Prozesse größere Mengen an Luft benötigen (z. B. Prozesse, bei denen Metalloberflächen oxidiert werden).

Bei Einführung dieser Grenzwerte für Industrieöfen könnte mit relativ geringen Brennstoffeinsparungen von ca. 1 - 2 % gerechnet werden (gilt nur für fossile Brennstoffe, indirekt beheizte Öfen und Prozesse mit hohen Temperaturen) (29 S. 323).

Anwendbarkeit

Der minimal erreichbare Luftüberschuss ist abhängig vom Brennstoff, dem eingesetzten Brenner und dem Prozess. So kann z. B. in bestimmten Fällen ein höherer Luftüberschuss notwendig sein, um thermische Schädigungen zu vermeiden.

Im Falle von Industrieöfen kann der Luftüberschuss für kleinere Öfen mit nur einem Brenner wesentlich leichter kontrolliert/gesteuert werden als bei großen Industrieöfen mit z. B. 300 einzeln gesteuerten Brennern. Dies hängt damit zusammen, dass die Überwachung des Sauerstoffgehaltes im Abgaskanal erfolgt, und das Abgas eine Mischung der Verbrennungsgase von allen Brennern darstellt, und kleine Abweichungen im Luftverhältnis jedes einzelnen Brenners unvermeidlich sind. Diese Abweichungen können vor allem bei Industrieöfen mit komplexen Mehrfachbrennern dafür sorgen, dass es bei zu niedrigem Luftverhältnis zu Perioden mit unterstöchiometrischer Verbrennung kommt, was wiederum zur Bildung von Kohlenstoffmonooxid führt (29 S. 337).

In direkt befeuerten Industrieöfen (< 650 °C) können die vorgeschlagenen Werte nicht umgesetzt werden, da hier die erforderliche Prozesstemperatur durch die Zumischung von kalter Luft erreicht wird. In indirekt befeuerten Öfen erfolgt dagegen keine Verdünnung mit kalter Luft. Ebenfalls nicht sinnvoll ist eine Regulierung des Sauerstoffüberschusses bei Oxyfuel-Brennern, da dies zum einen einen weit geringeren Einfluss auf die Effizienz des Prozesses hat als bei der Verwendung von Luft als Oxidationsmittel, und es zum anderen aufgrund der hohen zusätzlichen Kosten für Sauerstoff einen bereits sehr hohen Ansporn gibt, den λ-Wert zu minimieren (29 S. 338).

Eine weitere Einschränkung der Anwendbarkeit der für Ökodesign vorgeschlagenen λ-Werte ergibt sich aus der schwankenden Gasqualität bei Bezug des Erdgases aus dem Erdgasnetz. Je nach Quelle des Gases sind neben dem Hauptanteil Methan verschieden große Mengen Ethan, Propan und weitere Kohlenwasserstoffe enthalten. Die Komposition des Gases entscheidet über die zur stöchiometrischen Verbrennung notwendige Sauerstoffmenge.

Aufgrund der Liberalisierung des deutschen Energiemarktes, der steigenden Einspeisung brennbarer, regenerativ erzeugter Gase (Biogas, Wasserstoff) und LNG sowie der Diversifizierung der Quellen zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit (Vermeidung der Abhängigkeit von wenigen Förderländern), kommt es zu stärkeren Schwankungen in der Gaszusammensetzung und höheren Schwefelgehalten als bisher in Deutschland üblich. Um diese Schwankungen zu begrenzen, berät die Europäische Kommission im Rahmen des Mandates M/400 über eine EU-weit einheitliche Formulierung von zulässigen Gaszusammensetzungen durch einen minimal und maximal zulässigen Wert des Wobbe-Index (https://ec.europa.eu/energy/en/topics/markets-and-consumers/wholesale-market/gas-quality-harmonisation).

Ziel dieser Regulierung ist es, die maximal mögliche Versorgungssicherheit zu gewährleisten, indem der zulässige Bereich so groß wie technisch möglich gewählt wird. Dies steht jedoch im Widerspruch zu der angestrebten Minimierung des Energiebedarfs durch die Ökodesign- Maßnahmen zur Begrenzung der λ-Werte.

Der vorgeschlagene Bereich des Wobbe-Index beträgt 47-54 MJ/m^3, was einer Änderung von 15 % entspricht. Anders ausgedrückt entspricht der Bereich einer Gaszusammensetzung von a) 100 % Methan bis b) 80 % Methan + 20 % Ethan. Der zur stöchiometrischen Verbrennung notwendige Sauerstoffgehalt steigt dabei um 13 %, d. h., bei Änderungen in der Gaszusammensetzung müssen die Gas- und Sauerstoffdurchflüsse angepasst werden, um die notwendige Energiezufuhr zu regulieren, eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten (also die Bildung von CO zu verhindern) und dabei den Luftüberschuss zu minimieren.

Bei Industrieöfen mit einer niedrigen Anzahl von Brennern können mittels einer Analyse der Brenngaszusammensetzung Schwankungen erkannt und dem Betreiber durch Warnungen mitgeteilt werden, dass die Durchflüsse manuell angepasst werden müssen. Bei Industrieöfen mit einer Vielzahl von Brennern (z. B. Tunnelöfen zum Ziegelbrennen mit z. T. über 300 Brennern) ist die manuelle Anpassung praktisch unmöglich. Diese Öfen werden daher teilweise mit einem höheren Luftüberschuss betrieben und sind dementsprechend weniger effizient. Kleinere Öfen und Brennöfen werden z. T. ebenfalls mit einem höheren Luftüberschuss betrieben, da die Amortisationszeiten der Analysegeräte für die Gaszusammensetzung sehr hoch sind.

Ob sich Betriebsprobleme aufgrund schwankender Gaszusammensetzung ergeben, hängt vom jeweiligen Prozess und der Mess- und Regelungstechnik der eingesetzten Anlage ab. Während bestimmte Anlagen robust gegenüber Schwankungen sind, reagieren andere Anlagen nur mit geringen Veränderungen (Wirkungsgrad und Emissionen). Weitere Prozesse reagieren wiederum sehr sensibel, sofern kein geeignetes Kompensationsverfahren installiert ist (Glas-, Keramik- und Metallindustrie, aber auch chemische Industrie), und es entstehen erhebliche Auswirkungen auf die Effizienz, die Schadstoffemissionen, die Lebensdauer der Anlage sowie auf die Produktqualität. Die Maßnahmen zur Kompensation schwankender Gaszusammensetzung richten sich nach der Art des Prozesses bzw. der Anlage und reichen von einfachen (Systemeinstellungen anpassen) bis zu aufwändigen und kostenintensiven Maßnahmen (Analyse der Gaszusammensetzung) (70 S. 2).

Heizkessel reagieren weniger sensibel gegenüber Schwankungen in der Gaszusammensetzung, zum einen aufgrund der räumlichen Trennung von Verbrennung und Wärmenutzung, zum anderen aufgrund der weniger empfindlichen Natur des Produktes Dampf bzw. Heißwasser. Schwankende Gasqualität führt dennoch zu Problemen beim Verbrennungsprozess, die denen von Thermoprozessanlagen ähnlich sind. Bei vielen gasbetriebenen Heizkesseln wird der Brenngasvolumenstrom über einen festgelegten Druckverlust für eine zu diesem Zeitpunkt vorhandene Brenngasqualität eingestellt. Der Volumenstrom der Verbrennungsluft bleibt konstant. Schwankungen in der Gaszusammensetzung führen nun zu Schwankungen in der Leistung des Kessels sowie zu Schwankungen des Luftüberschusses (70 S. 87). Wird der stöchiometrische Luftbedarf unterschritten, führt dies zu höheren CO-Emissionen und kann die Flammenstabilität negativ beeinflussen. Ein hoher Luftüberschuss dagegen führt zu einer niedrigeren energetischen Effizienz.

Abbildung 3.1-15: Einschätzung der Empfindlichkeit verschiedener Thermoprozesse in Bezug auf Gasbeschaffenheitsschwankungen

Branche	Prozess	Effizienz	Sicherheit (Emissionen und/oder thermische Überlast)	Produkt-qualität
Bei Umstellung von niederen auf höheren Wobbe- Index (gesamte mögliche Schwankungsbreite DVGW G 260)				
Wärme	Heiz- und Dampfkessel			
	Hellstrahler			
	Direkte und indirekte Trocknung			
Metallurgie	Vorwärmung (Metalle)			
	Thermochem. Wärmebehandlung			
	Verzinkungsprozesse			
	Schmelzprozesse (NE- Metalle)			
Keramik	Kalköfen, Kalzinierung von Tonerden			
	Ziegelfertigung			
	Porzellanbrennen			
Glas	Glasschmelzen (Flachglas)			
	Glasschmelzen (Behälterglas), Feeder			
	Glasnachbehandlung			
Chemie	Chemie, Kunststoffindustrie			

Kein Handlungsbedarf
Z.T. Handlungsbedarf
Handlungsbedarf

Quelle: (70 S. 35)

Die Bestimmung des Wobbe-Index kann auf zwei Wegen erfolgen: entweder über die Bestimmung des Heizwertes (in Verbindung mit der Dichte des Gases) oder über die Bestimmung der Gaszusammensetzung mittels Gaschromatografen. Die so aufgezeichneten Daten können zur Steuerung der Gasdurchflüsse verwendet werden, was jedoch unter Umständen erhebliche Kosten verursachen kann (siehe dazu „Wirtschaftlichkeit“) (29 S. 313), (69 S. 24 f.).

Die Messung des O_2-Gehaltes im Abgas von Heizkesseln kann mittels periodischer Messungen mit kostengünstigen Testverfahren erfolgen. Weiterhin können computerbasierte Analysegeräte, welche zusätzlich die Abgastemperatur messen und daraus den feuerungstechnischen Wirkungsgrad bestimmen, eingesetzt werden. Dabei ist die Messung möglichst nahe an der Brennkammer durchzuführen, um einen etwaigen Einfluss von Falschluft auszuschließen (Kessel mit Unterdruck). Ab einer Leistung von > 200 kW können automatische O_2-Regelungen bei Heizkesseln wirtschaftlich eingesetzt werden (50 S. 19).

Drehzahlregelung bei Heizkesseln mit Gebläsebrennern können bei elektrischen Anschlussleistungen > 8 kW (Motorleistung) und einer mittleren jährlichen Auslastung des Kessels von ca. 50 % in Betracht gezogen werden (38 S. 118).

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die erreichbaren Einsparungen für Heizkessel können mit der Siegert‘schen-Formel berechnet werden. Als Faustformel gilt, dass mit einer Absenkung des O_2-Gehaltes von einem Vol.% eine Wirkungsgradsteigerung von ca. 0,5 % erreicht werden kann. Den Einsparungen sind die Kosten für Messung bzw. Regelung gegenüberzustellen. Analysegeräte zur Messung des Sauerstoffs und Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades sind ab 500 – 1.000 EUR erhältlich. Automatische O_2-Regelungen sind in Abhängigkeit von der Kesselleistung ab 6.000 – 10.000 EUR verfügbar (50 S. 19).

Die Investitionskosten für die Drehzahlregelung eines Heizkessels liegen bei ca. 3.500 EUR (38 S. 118).

In Tabelle 3.1-7 werden exemplarisch Ersparnisse durch Umrüstung eines Heizkessels mit einem 5 MW-Zweistoffbrenner auf aktuelle Steuerungstechnik angegeben (65 S. 48)

Tabelle 3.1-7: Einsparungen bei Installation von O_2- Regelung, O_2/CO-Regelung und Drehzahlregelung bei einem Heizkessel mit umgebauten 5 MW-Zweistoffbrenner

Einsparungen je Brenner	Einheit	Schwachlast	Mittellast	Volllast	Einsparung
Betriebsstunden	h/a	800	800	6400	
Brennstoffkosten*	€/h	46	105	159	
O_2-Reduktion durch O_2-Regelung	Vol.%	1,28	1,46	1,33	
Einsparungen durch O_2-Regelung	€/a	464	1.223	13.598	15.286
zus. O_2-Reduktion durch O_2/CO-Optimierung	Vol.%	0,33	0,22	0,33	
Einsparungen durch O_2-CO-Optimierung	€/a	120	186	3.353	3660
Einsparungen mit Drehzahlregelung	€/a				2.974
Gesamteinsparungen	**€/a**				**21.920**

Quelle: (65 S. 48), *Annahme: 0,035 €/kWh Gas, 0,12 €/kWh Strom

Stationäre Analysegeräte zur permanenten Überwachung des O_2-Gehaltes für Industrieöfen im Geltungsbereich der IED kosten inklusive der Installation ca. 5.000 EUR. Portable Analysegeräte zur Bestimmung von Sauerstoff, Kohlenstoffmonooxid, Stickstoffoxiden und weiteren Gasen sind für ca. 2.400 EUR erhältlich, und können zur Überwachung mehrerer Öfen (kleine und mittelgroße Anlagen) eingesetzt werden. Da diese sowohl O_2 als auch CO messen, sind sie ideal zur Bestimmung des optimalen Luftverhältnisses. Tabelle 3.1-8 gibt eine Abschätzung über Kosten und Amortisationszeiten bei einer angenommenen Brennstoffeinsparung von 5 % bei Reduktion des Luftüberschusses von $\lambda = 1{,}2$ auf $\lambda = 1{,}15$. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Luftüberschuss manuell korrigiert wird, was bei allen mittelgroßen Industrieöfen möglich ist. Bei großen Industrieöfen kann eine Steuerung auch automatisch erfolgen, was zu höheren Energieeinsparungen, aber auch zu wesentlich höheren Kosten führen würde (29 S. 339).

Tabelle 3.1-8: Vergleich der Amortisation der Reduktion des Luftüberschusses für unterschiedliche Ofenarten und -größen

Ofentyp und -größe	Zusätzliche Kosten [%]	Brennstoffein-sparung [%]	Amortisation [a]
Mittelgroße Industrieöfen (Batch, >750 l, <10 t Kapazität)	8,0-9,6	5	2,1

Ofentyp und -größe	Zusätzliche Kosten [%]	Brennstoffein-sparung [%]	Amortisation [a]
Mittelgroße Industrieöfen (kontinuierlich, > 120 l, < 20 t/d Kapazität)	5,3-6,9	5	1,8
Große Industrieöfen (Batch ≥ 10 t / Kontinuierlich ≥ 20 t/d)	0,19-0,37	5	0,05-0,32

Quelle: (29 S. 339), Klassifikation der Industrieöfen siehe (69 S. 5 und 52)

Muss auf schwankende Gaszusammensetzungen reagiert werden, bleibt für größere Öfen mit einer Vielzahl von Brennern lediglich die Option der automatischen Anpassung der Gasdurchflüsse. Die höchste Präzision kann dabei mit Massendurchflussreglern erreicht werden, welche für diesen Anwendungsbereich ca. 4.000 EUR/Stück kosten. Bei z. B. 300 Brennern pro Ofen entsprechen die Kosten für die Gasanalyse (ca. 20.000 EUR), den Durchflussreglern sowie der Steuerung ca. 25 % der ursprünglichen Investitionskosten des Ofens. Dies führt zu einer sehr hohen Amortisationsdauer von ca. 10 Jahren und damit zu einem Betrieb des Ofens mit einem höheren Luftüberschuss als dem technisch minimal notwendigem. Aufgrund hoher Amortisationsdauern werden z. T. auch Investitionen in die Analyse der Gaszusammensetzung bei kleinen Öfen und Brennöfen vermieden, indem diese mit z. T. ineffizienten λ-Werten betrieben werden (69 S. 24 f.).

Triebkraft für die Umsetzung

Erhöhte Wirtschaftlichkeit, Einsparungen durch niedrigeren Brennstoffbedarf und eingesparte elektrische Hilfsenergie.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

3.1.3 Wahl des Brennstoffes

Beschreibung

Die Auswahl des Brennstoffes erfolgt in der Regel bei der Auslegung der Anlage. Auswahlkriterien können sein:

- Wirtschaftlichkeit (Kosten Beschaffung, Lagerung, Handling),
- Energieeffizienz der Verbrennung,
- Versorgungssicherheit/Unabhängigkeit,
- Umweltschutz, niedrige Schadstoffemissionen.

Brennstoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung. Dies hat Auswirkungen auf ihren Energieinhalt, ausgedrückt durch den Heiz- bzw. Brennwert sowie die Schadstoffemissionen (siehe (1), Kapitel 1.3.6.2). Unterschieden werden kann weiterhin in gasförmige, flüssige und feste Brennstoffe hinsichtlich des für einen stabilen Verbrennungsprozess notwendigen Luftüberschusses: gasförmige und flüssige Brennstoffe benötigen im Allgemeinen sehr niedrige Luftüberschüsse ($1 < \lambda < 1{,}1$), feste Brennstoffe haben einen höheren Luftbedarf (siehe Kapitel 3.1.2). Die Wahl des Brennstoffs ist daher eine Option für die Reduzierung der überschüssigen Luft und damit des Abgasverlustes und die Steigerung der Energieeffizienz im Verbrennungsprozess. Weiteren Einfluss hat die Wahl des Brennstoffes beispielsweise auf die Möglichkeit zur Brennwertnutzung (Kapitel 3.1.1).

Aufgrund der Liberalisierung des deutschen Energiemarktes, der steigenden Einspeisung brennbarer, regenerativ erzeugter Gase und LNG sowie der Diversifizierung der Quellen zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit, kommt es zu stärkeren Schwankungen in der Gaszusammensetzung und höheren Schwefelgehalten als bisher in Deutschland üblich. Die Versorgung erfolgte zum größten Teil mit Erdgas aus Russland und der Nordsee, woraus geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung

(70 S. 44 ff.) sowie geringe Schwefelgehalte resultierten (H_2S ohne Odorierung < 1 mg/m^3 - 3 mg/m^3 aus einzelnen Feldern der Nordsee) (71 S. 9). Im Rahmen der Harmonisierung der Gasqualität auf EU-Ebene (Mandat M/400) wurde die DIN EN 16726 erarbeitet. In den zuständigen Gremien konnte keine Einigung bezüglich der zulässigen Schwankungen bei der Gaszusammensetzung, ausgedrückt durch den Wobbe-Bereich (siehe Kapitel 3.1.2), erzielt werden. Weiter sieht die DIN EN 16726 mit 20 mg/m^3 (unodoriert) wesentlich höhere Grenzwerte für Gesamtschwefel vor, als das bisher in Deutschland der Fall ist (ca. 8 mg/m^3 (odoriert) in der 10. BImSchV) (72 S. 8), (73 S. 4). Aus diesem Grund wurde eine sog. „A- Abweichung“ beantragt, welche im Anhang zur Norm aufgeführt wird.

Höhere Gesamtschwefelgehalte können zum einen Anlagen schädigen (z. B. Korrosion durch den Ausfall schwefliger Säure bei der Brennwertnutzung, siehe Kapitel3.1.1), zur Vergiftung von Katalysatoren führen (Brennstoffzellen, Formaldehydkatalysatoren) und erschweren dementsprechend den Einsatz effizienter Technologien. Zum anderen verursachen höhere Schwefelgehalte im Brennstoff entsprechend höhere Gesamt-Schwefeldioxid-Emissionen, wodurch die Einhaltung der Minderungsverpflichtungen nach NEC-Richtlinie gefährdet wird.

Niedrigere Gesamtschwefelgehalte lassen sich zusätzlich durch den Einsatz schwefelfreier Odoriermittel erreichen. In Deutschland beträgt der Anteil an schwefelfreien Odoriermitteln ca. 25 % (74 S. 5).

Erreichter Umweltnutzen

Durch Reduzierung des Luftüberschusses wird Primärenergie eingespart, wodurch Schadstoffemissionen gesenkt werden. Bei Verwendung schwefelarmer Brennstoffe (z. B. Erdgas, schwefelarmes Heizöl) kann mit Brennwerttechnologie der Energieinhalt von Brennstoffen nahezu vollständig und mit verhältnismäßig geringem Aufwand genutzt werden.

Weiterer Umweltnutzen kann erreicht werden durch:

- Brennstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Holz, Biogas, Biomethan, Bioöl),
- Verwendung von Prozessgasen, flüssigen oder festen Abfällen als Brennstoffe,
- Minimierung anderer Auswirkungen auf die Umwelt, z. B. Transport.

Medienübergreifende Wirkungen

Die chemische Zusammensetzung des Brennstoffes entscheidet über die Höhe der Schadstoffemissionen bei der Verbrennung (CO_2, CO, Schwefel- und Stickoxide, Staub). Weitere Informationen zur Auswahl des Brennstoffes und den damit verbundenen Emissionen sind in den vertikalen Sektoren-BREFs bzw. im LCP-BREF zu finden.

Betriebsdaten

Keine geliefert.

Anwendbarkeit

Wird bei der Auslegung oder Erweiterung einer Feuerungsanlage weithin angewendet.

Bei bestehenden Anlagen ist die Auswahl der Brennstoffe durch die Auslegung der Feuerungsanlage begrenzt (z. B. kann eine kohlebefeuerte Anlage nicht ohne erheblichen Aufwand auf die Verbrennung von Erdgas umgestellt werden) oder kann durch das Kerngeschäft der Anlage eingeschränkt sein (z. B. Müllverbrennungsanlage).

Weiterhin kann die Wahl der Brennstoffe auch durch Gesetzgebung und Regulierungen, einschließlich lokaler und grenzüberschreitender Umweltforderungen, beeinflusst werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Wahl des Brennstoffes ist im Allgemeinen eine betriebswirtschaftliche Entscheidung.

Triebkraft für die Umsetzung

- Wirtschaftlichkeit,
- Effizienz des Verbrennungsprozesses,
- Reduzierung emittierter Schadstoffe.

Beispiele

- Verbrannte Abfälle als Dienstleistung in Abfall-zu-Energie Anlagen (Müllverbrennungsanlagen mit Wärmerückgewinnung),
- in Zementöfen verbrannte Abfälle,
- verbrannte Abgase, z. B. Kohlenwasserstoffgase in einer Raffinerie oder CO in der Verarbeitung eisenfreier Metalle,
- Biomasseheizwerke oder Biomasseheizkraftwerke.

3.1.4 Reduzierung der Wärmeverluste durch Wärmedämmung

Beschreibung

Durch den Verbrennungsprozess mittels Strahlung und Konvektion erwärmte Außenwände und Rohrleitungen der Feuerungsanlage geben Wärme an die Umgebung durch Konvektion, Wärmestrahlung und -leitung ab. Der Wärmeverlust wird bestimmt durch die Temperaturdifferenz der erwärmten Bauteile zur Umgebungstemperatur und der wärmeabgebenden Oberfläche. Durch Dämmung mit einem Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit kann ein großer Teil der Wärmeverluste verhindert werden.

Die effiziente thermische Dämmung, um die Wärmeverluste durch die Wandungen auf einem Minimum zu halten, ist normalerweise bereits bei Inbetriebnahme der Anlage installiert.

Das Isoliermaterial kann sich zunehmend zersetzen (externe Dämmung an Heizkesseln) bzw. verschleißen (Industrieöfen) und muss dann erneuert bzw. ersetzt werden. Mit Wärmebildkameras kann im laufenden Betrieb die Funktionalität der Isolierung einer Feuerungsanlage geprüft werden (siehe auch (1), Kapitel 2.10.1). Beschädigte Dämmung kann dann während der Abschaltung zur Wartung der Anlage erneuert bzw. unzureichende Dämmung nachgerüstet werden.

Erreichter Umweltnutzen

Energieeinsparungen.

Medienübergreifende Wirkungen

Verwendung von Dämmmaterial.

Betriebsdaten

Wandverluste durch Abstrahlung und Konvektion an den äußeren Bauteiloberflächen sind an modernen Heizkesseln relativ niedrig (< 1 % des Brennstoffenergiestroms, bei neuen Kesselanlagen 0,2 - 0,4 %), wobei Wasserrohrkessel im Vergleich zu Großwasserraumkesseln höhere Verluste aufweisen. Da Wandverlustwärmeströme abhängig von der Betriebstemperatur und damit relativ konstant sind, steigen diese prozentual zum Brennstoffeinsatz bei Teillastbetrieb (50 S. 26):

Formel 3.1-11

$$V_{Wandverlust,Teil} = \frac{\dot{Q}_{Voll}}{\dot{Q}_{Teil}} * V_{Wandverlust,Voll}$$

$V_{Wandverlust,Voll}$ Relative Wandverluste bei Volllast [%]
$V_{Wandverlust,Teil}$ Relative Wandverluste bei Teillast [%]
$\dot{Q}_{Voll}$ Leistung der Feuerungsanlage bei Volllast [kW]

$\dot{Q}_{Teil}$ Leistung der Feuerungsanlage bei Teillast [kW]

Die Oberflächen der Wärmedämmung sollten grundsätzlich nicht höher als 15 - 20 K über der Umgebungstemperatur liegen (38 S. 203); (50 S. 26). Verluste sollten 100 W/m² nicht überschreiten (38 S. 203).

Für Thermoprozessanlagen wird die maximal zulässige Oberflächentemperatur in der ISO 13732-1 in Abhängigkeit vom Oberflächenmaterial und der Dauer des Kontaktes zwischen Mensch und Oberfläche angegeben. Für lackierte Metalloberflächen gelten ca. 85 °C (Kontaktdauer 0,5 s) bzw. < 55 °C (Kontaktdauer ca. 10 s) (75 S. 11 f.). Bei nahestehenden Öfen können die Oberflächentemperaturen unter Umständen höher sein. Durch regelmäßige Wartung und fristgerechte Kontrolle der Dämmung können weiterhin Leckagen erkannt und die damit verbundenen Energieverluste vermieden bzw. minimiert werden.

Anwendbarkeit

Feuerfeste Werkstoffe und Isoliermaterial können vielfältigen Beanspruchungen ausgesetzt sein (76 S. 4):

- thermisch (Temperaturen, Temperaturwechsel),
- chemisch (gasförmige, flüssige und korrosive Stoffe, Schmelzen, Schlacken),
- mechanisch (Druck, Zug, Reibung, Stoß, Vibration).

Bei Thermoprozessanlagen ist die Wahl der geeigneten Dämmung häufig ein Kompromiss zwischen den oben genannten gegensätzlichen Anforderungen. So müssen bspw. mechanische Festigkeit, chemische Beständigkeit und maximale Wärmedämmeigenschaften miteinander kombiniert werden. Um dies zu erreichen, werden häufig mehrere (bis zu 8) Schichten verschiedenen Materials eingesetzt. Es kommen dabei drei Typen von Wärmedämmung zum Einsatz: dichte feuerfeste Werkstoffe (Steine, Schamotte), leichte feuerfeste Werkstoffe (Feuerleichtsteine und Platten) und Hochtemperaturwolle (HTW) (69 S. 146). Letztere wird aufgrund ihrer geringen Dichte, der Flexibilität, ihrer geringen thermischen Leitfähigkeit sowie geringen Wärmespeicherkapazität für Feuerungen und Industrieöfen mit hohen Temperaturen eingesetzt (76 S. 7). 2011 wurden bestimmte feuerfeste Keramikfasern aus Aluminosilikat (Al-RCF) und Zirkoniumaluminosilikat (Zr-RCF) in den Anhang XIV der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), Candidate List of the Substances of Very High Concern, SVHCs) aufgenommen, da diese die Kriterien zur Einstufung als karzinogene Substanzen erfüllen. Diese Klassifizierung wird seitdem zwischen den betroffenen Industriezweigen und der europäischen Kommission diskutiert. Für bestimmte Anwendungen lassen sich nur schwer wirtschaftliche Alternativen zum Einsatz von HTW finden, vor allem, wenn eine geringe Masse der Ofenwände erforderlich ist. Der wirtschaftliche Einsatz von Hochtemperaturdämmmaterial ist weiterhin eine Voraussetzung zur Einhaltung der in der Ökodesign-Vorstudie vorgeschlagenen Mindest-Anforderungen an die Wärmedämmung für industrielle und Laborfeuerungen und -öfen (69 S. 10). Die Aufnahme in den Anhang XIV der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 wurde vorläufig aufgeschoben, um über den besten Regulierungsansatz zu entscheiden (77 S. 3).

Weiterhin müssen bei der Dämmung die unterschiedlichen Betriebsarten von Industrieöfen berücksichtigt werden (stationärer oder instationärer Betrieb). Bei stationär betriebenen Öfen (Durchlauföfen) ist die Speicherkapazität der Wärmedämmung nicht relevant für den gesamten Wärmeverlust über die Ofenwand, daher können dort große thermische Massen eingesetzt werden. Im Fall instationär betriebener Öfen (Einsatz- oder Batch-Öfen) ist die Speicherkapazität möglichst gering zu halten, da sich die Wärmeverluste aus den Wand- und den Speicherverlusten ergeben, wobei letztere im instationären Betrieb deutlich höher sind (27 S. 15). Eine hohe thermische Masse der Wärmedämmung ergibt in Verbindung mit einer niedrigen thermischen Leitfähigkeit eine niedrige Wärmeverlustrate. Dies kann neben den entstehenden Energieverlusten im Batchbetrieb auch dann hinderlich für den Prozess (und damit für Durchsatz und Produktivität der Anlage) sein, wenn in der

Anlage Nutzgut/Bauteile abgekühlt werden müssen, bevor die nächste Charge der abgekühlten Feuerung zugeführt werden kann. Im Fall von auftretenden (stark) exothermen Reaktionen muss teilweise Wärme abgeführt werden, damit die Dämmung nicht selbst schmilzt (z. B. Kupferschmelzen aus Sulfiderz) (69 S. 13). Eine Kühlung der Dämmung ist bspw. auch dort nötig, wo korrosive Flussmittel in Verbindung mit sehr hohen Temperaturen eingesetzt werden (Lichtbogenschmelzöfen). In diesem Fall muss aus energetischer Sicht ebenfalls Dämmmaterial mit suboptimalen Eigenschaften eingesetzt werden (69 S. 20).

Die Nachrüstung von Dämmmaterial mit größeren Wandstärken kann bei Industrieöfen weiterhin durch die verfügbare Aufstellungsfläche begrenzt sein (29 S. 209).

Für die Vielzahl unterschiedlicher Prozesse muss aus verfahrenstechnischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht die optimale Lösung aus Dämmstärke und -material bestimmt werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Wärmedämmung von Heizkesseln ist eine Effizienzmaßnahme mit geringem Aufwand und kurzen Amortisationszeiten. Die Berechnung der wirtschaftlichen Dämmstärke kann auf Grundlage der VDI 2055 (78) erfolgen. Die Wartung der Dämmung verursacht ebenfalls niedrige Kosten, sofern diese während der Stillstandszeiten im Rahmen von regelmäßigen Wartungsintervallen erfolgt.

Die Wärmedämmung von Industrieöfen ist aufgrund der durch den Prozess gestellten Anforderungen und Belastungen aufwändiger als bei Heizkesseln. Tabelle 3.1-9 gibt einen Überblick über Eigenschaften, Einsatzbereich und Kosten für Feuerfestmaterialien und Hochtemperaturdämmstoffe.

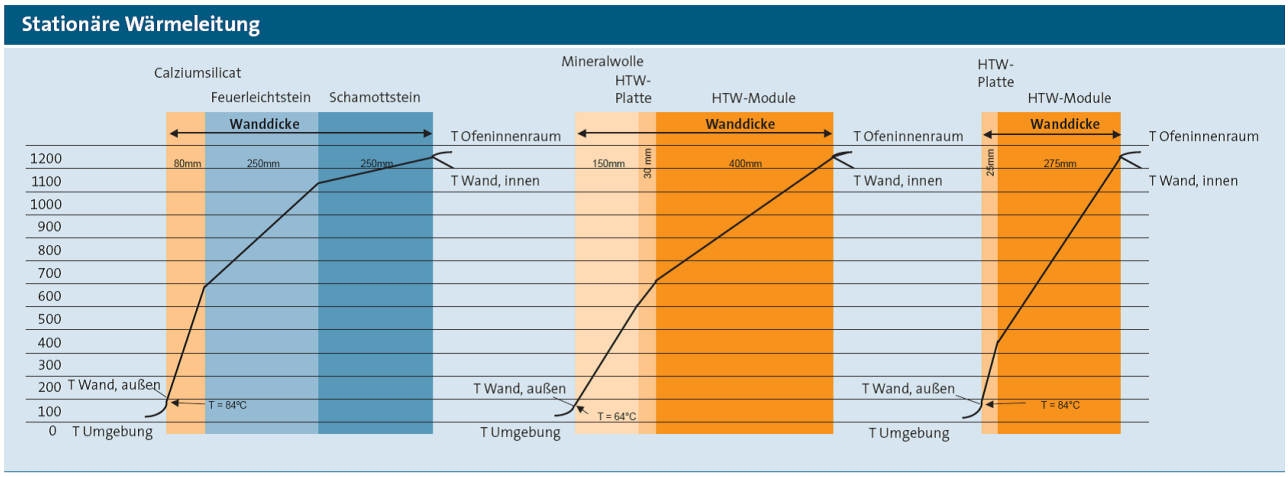
Tabelle 3.1-9: Übersicht über Feuerfestmaterialien und Hochtemperaturdämmstoffe

Name	Bezeichnung	Daueranwen-dungstempe-ratur [°C]	Wärmeleit-fähigkeit [W/mK]	Wärmespei-cherfähigkeit* [kJ/m³K]	Dichte [kg/m³]	Material-kosten
Betone	Leichtbetone	1300	0,5	1500	1400	↓↓
Betone	Alumina-reiche Betone	1450	2,4	2700	2400	↓
Schamotte	Schamotte-Steine	1350	2,1	2500	2400	↓
Tonerde-reiche Steine	Andalusit-Steine	1500	2,0	2900	2600	↑
Feuer-Leichtstein	Alumina-SilikatSteine	1250	0,4	640	800	↓↓
Feuer-Leichtstein	Korund-Leichtsteine	1600	0,5	1200	1100	↑
Glasige HTIW	Alumina-Silikat-Wolle	1300	0,2*	140	130	↓↓
Polycristalline HTIW	Polycristalline Wolle	1600	0,25*	90	80	↑↑↑

Quelle: (27 S. 13) *Durchschnittswert 200°C bis 1200°C Hochtemperaturwolle gemäß EN 1094-1 (2008)

In Abbildung 3.1-16 wird die Wärmeleitung für drei Arten der Wärmedämmung für den stationären Fall angegeben. Bei gleicher Dicke der Ofenwand lässt sich mit der Modulzustellung eine um ca. 20 K niedrigere Außenwandtemperatur als mit der Steinzustellung erreichen. Dies entspricht einer Reduktion der Wärmeverluste von 45 %. In der Praxis könnte bspw. auf die zusätzliche Mineralwolledämmung verzichtet und damit die Ofenwanddicke deutlich reduziert werden. In Tabelle 3.1-10 werden die normierten Kosten sowie die Aufteilung der Kosten in Material- und Montagekosten für die drei Beispiele miteinander verglichen (27 S. 14).

Abbildung 3.1-16: Stationäre Wärmeleitung durch Ofenwand mit a) Steinzustellung, b) Modulzustellung mit gleicher Dicke, c) Modulzustellung normaldick



Quelle (27 S. 14)

Tabelle 3.1-10: Überblick über die Verteilung der (normierten) Material- und Montagekosten sowie Wandverluste für drei Beispiele der Dämmung von Industrieöfen

		Gesamt-kosten normiert	Kosten für		Wandverluste (stationär)	Wandverluste (instationär)
			Material	Montage		
Steinzustellung	250 Schamotte 250 Leichtstein 80 Calziumsilikat	100	51	49	100	100
HTW Modulzustellung extra dick	400 HTW-Module 30 HTW-Platte 150 Mineralwolle	75	70	30	55	15
HTW Modulzustellung normal	275 HTW-Module 25 HTW-Platte	58	72 [sic]	29[sic]	100	18

Quelle: (27 S. 16)

Triebkraft für die Umsetzung

Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur, Brennstoffeinsparungen.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

3.1.5 Reduzierung der Verluste durch die Öffnungen von Industrieöfen

Beschreibung

Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion können an Ofenöffnungen beim Be- und Entladen (Tür- und Chargierverluste) auftreten. Diese Verluste steigen mit zunehmenden Prozesstemperaturen und können folgendermaßen reduziert werden (27 S. 8):

- Ofentüren sollten so klein wie möglich sein und so kurz wie möglich geöffnet werden (Handhabungsautomat- oder Roboterbeschickung),
- Öffnungen sollen sicher dicht sein,
- Wärmespeicherkapazität der Transportgitter beachten (Transportgitter müssen mit erhitzt und abgekühlt werden),
- Verhältnis zwischen Nutzgut und Transportgittermasse optimieren,
- Chargierverluste sollten minimiert werden, z. B. durch Chargierschleusen.

Mit einer intelligenten Ofensteuerung kann neben der Regelung von Prozessparametern (Solltemperaturen, Ofendruck) auch eine automatische Beschickung und/oder Entnahme erfolgen (27 S. 8). Zusätzlich kann geprüft werden, ob die Prozessführung optimiert werden kann. So kann z. B. die Beladung eines Schmelzofens mit Metall von oben in den kalten Bereich des Schachtes erfolgen, statt durch Öffnung von Türen im heißen Bereich des Schmelzraumes. Dadurch können enorme Wärmeverluste vermieden werden.

Erreichter Umweltnutzen

Keine Daten vorliegend.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine Daten vorliegend.

Betriebsdaten

Die Verluste sind hauptsächlich abhängig vom Temperaturniveau des Prozesses. Maßnahmen zur Minimierung der Verluste können durch Verkürzung der Chargierdauer sowie Optimierung der Prozessführung erreicht werden. Die Feststellung von Verlusten kann bspw. mit Wärmebildkameras erfolgen.

Anwendbarkeit

Keine Daten vorliegend.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Keine Daten vorliegend.

Triebkraft für die Umsetzung

Keine Daten vorliegend.

Beispiele

Keine Daten vorliegend.

3.2 Dampfsysteme

Als Dampfsysteme werden Energiesysteme betrachtet, in denen Wasser zirkuliert und dabei zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand wechselt. Die Phasenumwandlung in Dampf bietet einerseits den Vorteil, ein expansions- und damit arbeitsfähiges Gas zur Verfügung zu bekommen und bei dieser sogenannten Dampferzeugung hohe Energiestromdichten aufzuweisen. Andererseits ermöglicht die Kondensation des Dampfes die Wärmeabgabe bei weitgehend konstanter Temperatur.

Als weitere Arbeitsmedien können Heißwasser oder Thermoöl eingesetzt werden. Flüssiges Wasser kann verwendet werden, wenn durch Druckanhebung mittels Pumpen der Druck über den Siededruck der erforderlichen Temperaturen angehoben werden kann. So können bei einem Absolutdruck von 8 bar Temperaturen bis zu ca. 170 °C in flüssigem Wasser realisiert werden. Thermoöle werden nach dem gleichen thermodynamischen Prinzip wie Wasserdampf eingesetzt, haben jedoch i. A. einen höheren Siedepunkt, teilweise eine erhöhte Toxizität, niedrigere Wärmekapazitäten, im Zusammenhang mit Wärmeübertragern niedrigere Wärmeübertragungskoeffizienten als verdampfendes Wasser und sind thermisch instabil bei Überschreitung des jeweils zulässigen Anwendungstemperaturbereiches.

Nachfolgend werden zur Darstellung der Relationen Zahlenbeispiele für typische Wärmeübergangskoeffizienten angegeben, die aber außer vom Arbeitsmedium noch von vielen strömungstechnischen Parametern abhängen:

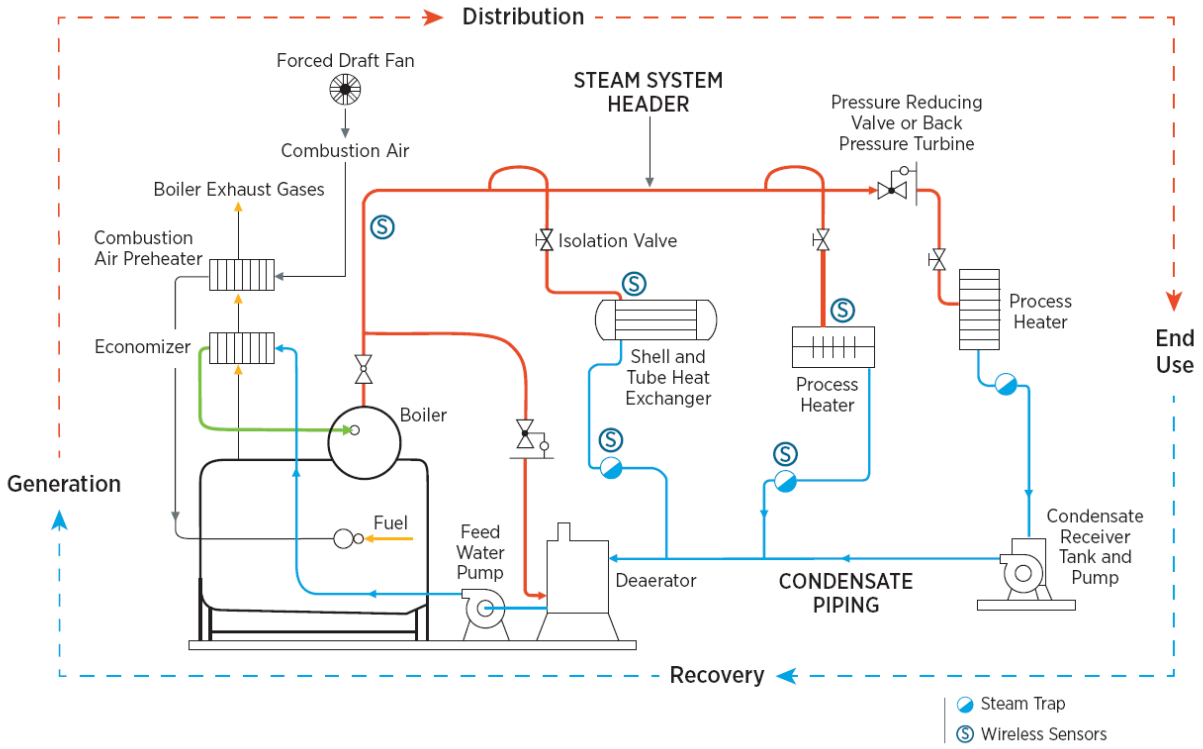
- Wasser 4000 $W/m^2 K$
- Thermoöl 1500 $W/m^2 K$
- Verdampfung von Wasser im Strömungssieden >10000 $W/m^2 K$

Sowohl Heißwasser als auch organische Arbeitsmittel (Thermoöle) werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Beschreibung

In Abbildung 3.2-1 ist ein typisches Dampfsystem, bestehend aus Erzeugung, Verteilung, Endanwendung und Rückgewinnung (Kondensat) schematisch dargestellt (79 S. 3).

Abbildung 3.2-1: Typisches Dampfsystem mit Erzeugung, Verteilung und Rückgewinnung



Quelle (79 S. 3)

Erzeugung

- Übertragung der Wärme aus Rauchgasen oder elektrischen Heizungen auf aufbereitetes Speisewasser,
- Phasenwechsel des Wassers bei ausreichender Wärmeaufnahme,
- Anschließend teilweise weitere Energiezufuhr (Überhitzung des Dampfes),
- Übergabe an das Verteilsystem.

Verteilung

- Dampf wird über das Dampfnetz bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturniveaus der Endanwendung zugeführt.
- Im Dampfnetz sind Armaturen, wie Absperr- und Drosselventile, Kondensatableiter sowie teilweise Gegendruckturbinen, integriert.

Endanwendung

- Anwendung als Wärmeträger für industrielle Prozesse aufgrund des durch Kondensation erschließbaren hohen spezifischen Energieinhaltes sowie der konstanten Temperatur bei Kondensation des Wasserdampfes.
- Ausnutzung der Expansions- und damit Arbeitsfähigkeit des Wasserdampfes zur Bereitstellung mechanischer Antriebsenergie (z. B. Antrieb von Pumpen, Generatoren).
- Wasserdampf als Träger chemischer Substanzen (z. B. als Moderator) in der chemischen Industrie (z. B. Wasserdampfdestillation) oder als Wasser- bzw. Wasserstoffquelle.
- Typische Komponenten sind dementsprechend Wärmeübertrager, Turbinen, Fraktionierkolonnen, Dampfstripper und chemische Reaktionsbehälter.

Rückgewinnung

- Sammlung und Rückführung von flüssigem Wasser (Kondensat) im Kondensatnetz mittels Pumpen.
- Zuführung des Kondensats zur Speisewasseraufbereitung, wobei eine thermische Entfernung von Sauerstoff und anderen Gasen (Entgasung) sowie eine chemische Aufbereitung erfolgt (Entsalzung, Konditionierung).
- Rückgewinnung des Entspannungsdampfes aus Hochdruckkondensat, aus der Absalzung und Abschlämmung des Kessels sowie aus der Entgasung (Brüdenkondensator).

Relevante Besonderheiten von Dampfsystemen

- Hohe Drücke und Druckdifferenzen,
- hohe Temperaturen und Temperaturdifferenzen,
- Verdampfungsvorgänge, bei denen sich Salze absondern,
- Verknüpfung mit Verbrennungsprozessen – Dampferzeugung als Wärmeabfuhr aus Verbrennungsprozessen,
- umfangreiche Rohrleitungssysteme,
- umfangreiche Wärmeübertragungssysteme,
- Integration von Dampfturbinen.

Aufgrund der hohen Betriebsdrücke in Dampfsystemen und der deshalb bei unnormalen Betriebszuständen möglicherweise frei werdenden Kräfte ist die Sicherheit ein äußerst wichtiger Aspekt bei Dampfprozessen. Zusätzlich ist ein Dampfsystem Wasserschlägen, Erosion und Korrosion ausgesetzt. Deshalb hängen die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer der verschiedenen Bauteile stark von der Auslegung, dem Aufbau und der Instandhaltung der Anlage ab. Die Auswahl des/der Druckniveaus wird durch die Anwendung vorgegeben.

Dampf unter höherem Druck hat die folgenden Vorteile:

- Höhere Sattdampftemperatur;
- das Volumen ist kleiner, das heißt die erforderlichen Verteilungsrohre sind kleiner;
- es ist möglich, den Dampf unter hohem Druck zu verteilen und seinen Druck vor der Anwendung zu reduzieren. Damit wird der Dampf trockener und die Zuverlässigkeit höher;
- ein höherer Druck ermöglicht einen stabileren Siedeprozess im Heizkessel.

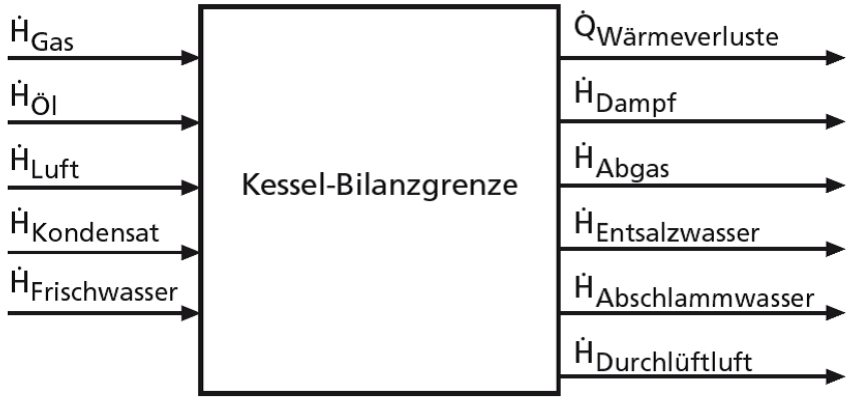
Systeme mit niedrigerem Druck haben die Vorteile:

- Geringere Oberflächenverluste am Kessel und Verteilungssystem,
- geringere Verluste durch Leckagen im Dampf- und Kondensatnetz,
- geringere Bildung von Kesselstein bzw. geringerer Aufwand der Wasseraufbereitung.

Energieeffizienz von Dampfsystemen

Abbildung 3.2-2 zeigt eine stark vereinfachte Bilanz eines befeuerten Dampfkessels mit den typisch zugehörigen In- und Outputs. In Abhängigkeit von dem verwendeten Brennstoff und der Prozessführung müssen weitere Enthalpieströme bzw. Verluste berücksichtigt werden.

Abbildung 3.2-2: Schematische Darstellung der Kesselbilanz



Quelle: (66 S. 249)

Die chemischen und physikalischen Enthalpieströme des Brennstoffes und der physikalische Enthalpiestrom der Verbrennungsluft werden der Feuerung zugeführt (Kapitel 3.1.1). Handelt es sich um einen anderweitig beheizten Dampfkessel (z. B. elektrische Heizung), ist die zugeführte Energie dementsprechend einzusetzen. Aus der Speisewasseraufbereitung werden dem Kessel Frischwasser und rückgeführtes Kondensat zur Verfügung gestellt. Neben dem Enthalpiestrom des erzeugten Frischdampfes fallen kontinuierliche Verlustströme durch das Abgas sowie durch Wärmeverluste an die Umgebung durch Konvektion, Strahlung und Leitung an. Hinzu kommen zyklisch auftretende Verluste durch Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit, wie Durchlüftung, Absalzung und Abschlämmung. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ((1), Kapitel 1.2.2) kann der Wirkungsgrad vereinfachend folgendermaßen bestimmt werden:

Formel 3.2-1

$$\eta_K = \frac{Nutzen}{Aufwand} = \frac{\dot{H}_{Dampf} - \left(\dot{H}_{Kondensat} + \dot{H}_{Frischwasser}\right)}{\dot{H}_{Brennstoff} + \dot{H}_{Luft}}$$

Formel 3.2-2

$$\eta_K = \frac{Aufwand - Verluste}{Aufwand} = \frac{\dot{H}_{Brennstoff} + \dot{H}_{Luft} - \left(\dot{H}_{Absalz} + \dot{H}_{Abschlamm} + \dot{H}_{Durchlüft} + \dot{Q}_{Verlust}\right)}{\dot{H}_{Brennstoff} + \dot{H}_{Luft}}$$

η_K	Kesselwirkungsgrad
$\dot{H}_{Absalz}$	Enthalpiestrom Absalzung [kW]
$\dot{H}_{Abschlamm}$	Enthalpiestrom Abschlämmung [kW]
$\dot{H}_{Brennstoff}$	Enthalpiestrom Brennstoff (physikalischer und chemischer Enthalpiestrom)[kW]
$\dot{H}_{Kondensat}$	Enthalpiestrom Kondensat [kW]
$\dot{H}_{Frischwasser}$	Enthalpiestrom Frischwasser (Zusatzwasser) [kW]
$\dot{H}_{Dampf}$	Enthalpiestrom Dampf [kW]
$\dot{H}_{Durchlüft}$	Enthalpiestrom Durchlüftung / Spülung [kW]
$\dot{H}_{Luft}$	Enthalpiestrom Verbrennungsluft [kW]
$\dot{Q}_{Verlust}$	Wärmeverluste durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung [kW]

Bei der Erhöhung der Effizienz von Dampfsystemen sollte folgendermaßen vorgegangen werden:

a) Reduzierung der erforderlichen Nutzenergie, z. B. Absenkung des Dampfbedarfes durch Effizienzmaßnahmen auf Verbraucherseite oder Einsatz von Heißwasser anstelle von Dampf,
b) Reduzierung von Anlagenverlusten z. B.
   a. Verminderung der Wärmeabgabe an die Umgebung, z. B. Wärmedämmung, undichte Kondensatableiter
   b. Nutzung von Druckunterschieden für die Gewinnung von mechanischer Antriebsenergie
   c. Nutzung großer Temperaturunterschiede für mehrfach gestufte Wärmeübertragung (Pinch-Methode), um Rauchgas stärker auszukühlen und Brennstoff einzusparen.
   d. Minimierung ungenutzter Entnahme von Arbeitsmedium aus dem System oder aus höheren Energieniveaus innerhalb des Systems für periodisch auszuführende Maßnahmen, die der Aufrechterhaltung der Funktionssicherheit dienen.
      i. Absalzung
      ii. Abschlämmung
      iii. Durchlüftung
c) Maßnahmen zur Abwärmenutzung.

Die größten Potenziale für Senkung unnötiger Wärmeverluste und damit für Steigerung der Energieeffizienz liegen in der optimalen Ausnutzung der thermischen Energie von Verbrennungsabgasen. Die größten exergetischen Verluste des Gesamtprozesses aus Verbrennung und Dampfkreislauf treten bei der Übertragung der Wärme auf das Dampfsystem auf. Grund sind die hohen Temperaturdifferenzen zwischen der Temperatur des Verbrennungsabgases und der Verdampfungstemperatur. Tabelle 3.2-1 zeigt verschiedene Effizienzmaßnahmen für Dampferzeuger mit dem jeweiligen Einsparpotential, wobei die erreichbaren Effizienzsteigerungen jeweils nur bei Umsetzung als Einzelmaßnahme erreicht werden können. In Kombination von Maßnahmen sind die Einsparpotentiale in Summe geringer. Weiterhin sind diese Angaben Richtwerte. Die tatsächlich erreichbaren Einsparungen sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, z. B. Anlagenkonfiguration, Temperatur- und Druckniveaus, Brennstoffen etc. Von diesen Faktoren ist ebenfalls die grundsätzliche Umsetzbarkeit von bestimmten Maßnahmen abhängig. Die Integration von Maßnahmen und deren Nachhaltigkeit ist von qualifiziertem Fachpersonal durch umfangreiche Analyse und Berechnung/Simulation des Gesamtprozesses festzustellen.

Tabelle 3.2-1: Einsparmaßnahmen und jeweils zugehöriges Einsparpotential bezüglich des nicht optimierten Grundprozesses

Energiesparmaßnahme	Einsparungspotential
Economizer	bis 7 % Brennstoffeinsparung
Brennwertwärmetauscher	bis 5 % Brennstoffeinsparung
Laugenentspanner- und Wärmerückgewinnung	bis 2 % Brennstoffeinsparung, Frischwasserersparnis, Abwasserreduzierung
Brüdenwärmetauscher	bis 0,5 % Brennstoffeinsparung
Hochdruckkondensatsystem	bis 12 % Brennstoffeinsparung, Frischwasserersparnis
Automatisierte und kontinuierliche Wasseranalyse	bis 0,5 % Brennstoffeinsparung, Chemikalieneinsparung, Personalkosteneinsparung
Regelmäßige Optimierung der Regelparameter	bis 3 % Brennstoffeinsparung, verlängerte Lebensdauer, Prozesssicherheit

Quelle: (45 S. 11)

Erreichter Umweltnutzen

Dampf selbst ist nicht toxisch. Bei Erhöhung der Effizienz von Dampfsystemen wird eine Verringerung des Brennstoffbedarfes und der damit verbundenen Emissionen erreicht.

Medienübergreifende Wirkungen

- Dampferzeugung hat die üblichen Emissionen aus der Verbrennung,
- Chemikalienemissionen aus der Speisewasseraufbereitung,
- Wasserdampf oder heißes Kondensat kann die Temperaturen in den aufnehmenden Abwasserkanälen oder -gewässern erhöhen.

Betriebsdaten

Effiziente Wärmeerzeugung, Verteilung, Betrieb und Instandhaltung tragen bedeutend zur Reduzierung der Wärmeverluste bei. Die Energieerzeugung wird im LCP BREF (30), die Kraft-Wärme-Kopplung und die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung werden in Kapitel 3.4 bzw. 3.4.2 dieses Dokuments behandelt. Der europaweite Konsens über die Berechnung der Effizienz von Dampfkesseln erscheint in DIN EN 12952-15:2003 (80) und DIN EN 12953-11:2003 (32).

Anwendbarkeit

Bestimmte in diesem Dokument vorgestellte Energieeffizienzmaßnahmen sind grundsätzlich bei allen Dampfsystemen anwendbar und zeichnen sich durch relativ geringen Aufwand und kurze Amortisationszeiten aus (z. B. Wärmedämmung, Instandhaltung von Kondensatableitern). Andere Maßnahmen sind stark abhängig von der Anlagenkonfiguration sowie von Druck- und Temperaturniveaus und erfordern eine umfangreiche Analyse (z. B. Pinch-Point-Analyse), sorgfältige Berechnung und sind mit höherem technischen Aufwand und Investitionen verbunden. Die Feststellung von Wärme-/Dampfbedarf der Verbraucher und die Bereitstellung innerhalb der gesamten Anlage können mittels Energieaudit erfolgen (Kapitel 2.11)

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Da die Wirtschaftlichkeit von Dampfsystemen maßgeblich durch die Kosten für Ressourcen, speziell für Brennstoffe, bestimmt wird (ca. 50 % der Produktkosten mit deutlichen Abweichungen nach oben und unten) können die Ressourcenfragen als komplett internalisiert betrachtet werden. Energieverluste, die durch die Erhöhung der Energieeffizienz verringert werden sollen, sind direkt mit Kosten belegt. Die Energieeffizienzbetrachtungen sind daher Teil der betriebswirtschaftlichen Optimierung.

Triebkraft für die Umsetzung

Reduzierung der Energiekosten, der Emissionen und teilweise hohe Rendite der Investition.

Dampfverwendung: Hoher spezifischer Energiegehalt, konstante Temperatur während Kondensation, Arbeitsfähigkeit zur Bereitstellung von mechanischer Energie, Moderator bzw. Rohstoff für chemische Reaktionen.

Beispiele

Weithin in vielen IED-Bereichen angewendet, z. B. Energieerzeugung, alle Sektoren der chemischen Industrie, Zellstoff-/Papierindustrie und Lebensmittelindustrie.

3.2.1 Übersicht über die Maßnahmen zum Verbessern der Leistung des Dampfsystems

Dampfsysteme werden im LCP BREF im Detail beschrieben. Typische Maßnahmen zur Effizienzsteigerung für die Bereiche Erzeugung, Verteilung und Rückgewinnung von Dampfsystemen sind in Tabelle 3.2-2 aufgelistet. In den meisten Fällen wird Dampf in einer industriellen Anlage mittels Wärmeübertragung aus einer Verbrennungsreaktion erzeugt, somit kann eine gewisse Überschneidung der umfassenden Maßnahmen der Energieeffizienz, die sich sowohl auf die Verbrennungs- als auch die Dampfbereiche beziehen, nicht vermieden werden.

Um eine dieser Maßnahmen umzusetzen, ist es äußerst wichtig, über relevante und quantifizierte Informationen und Wissen über die Verwendung von Brennstoffen, Dampferzeugung und das

Dampfnetz zu verfügen. Das Messen und Überwachen des Dampfes tragen zum Verständnis des Prozessbetriebs bei (siehe Kapitel 2.10), zusammen mit einem Wissen darüber, wie weit die Betriebsparameter geändert werden können. Sie sind somit absolut erforderlich für die erfolgreiche Umsetzung von bestimmten Effizienzmaßnahmen, z. B. Integration der Wärmerückgewinnung in einen Prozess.

Die in diesem Dokument angegebenen Daten für einzelne Effizienzmaßnahmen sind als exemplarische Richt- bzw. Orientierungswerte zu verstehen und können in Abhängigkeit von den verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Randbedingungen stark abweichen.

Tabelle 3.2-2: Maßnahmen/Techniken zur Erhöhung der Energieeffizienz von Dampfsystemen

	Maßnahmen/Techniken im LCP BREF Juni 2016 (Final Draft) nach Art des Brennstoffes und Kapitel						Maßnahmen/ Techniken in diesem Dokument nach Kapitel
	Allg. Beschreibung/ Energieeffizienz	Kohle und Braunkohle	Biomasse und Torf	Müll	Flüssige Brennstoffe	Gasförmige Brennstoffe	
Energieeffizienzmaßnahmen	3.2.3	5.1.1.3, 5.1.3.3,	5.2.1.4, 5.2.3.3	9.2.3	6.2.2, 6.3.2.2, 6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1, 7.3.3.1, 7.4.3.2	3.1
Wärmerückgewinnung/ Reduktion der Abgastemperatur	3.2.3.1	5.1.3.3	5.2.3.3			7.1.3.1, 7.4.3.2	3.1.1, 3.1.2
Kraft-Wärme-Kopplung	2.5, 3.2.3.2	5.1.3.3	5.2.3.3		6.3.2.2, 6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1, 7.1.3.1.3.1	
Cheng-Cycle/Steam Injected Gas Turbine (STIG)	3.2.3.3					7.1.3.2.2	
Einsatz moderner Werkstoffe	3.2.3.5	5.1.3.3			6.3.2.2	7.1.3.1	
Zweifache Zwischenüberhitzung	3.2.3.6	5.1.3.3	5.2.3.3 Nur EINFACHE Zwischenüberhitzung		6.3.2.2	7.1.3.1	
Speisewasservorwärmung unter Nutzung rückgewonnener Wärme	3.2.3.7	5.1.3.3	5.2.3.3		6.3.2.2	7.1.3.1	3.1.1
Moderne Steuerungssysteme	3.2.3.8	5.1.3.2	5.2.3.2		6.3.2.1, 6.3.2.2, 6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1, 7.1.3.2.1, 7.1.3.2.2	3.1.3
Wärmespeicherung in KWK oder bei reiner Wärmeerzeugung	3.2.3.9				6.3.2.2, 6.3.3.1	7.1.3.1	3.3.2
GuD-Prozess mit integrierter Vergasung (IGCC)	3.2.3.10	4.1.1, 5.1.3.3	4.1.2	4.1.3			
GuD-Prozess (LCP BREF: Combined-cycle combustion)	3.2.3.11				6.3.3.1, 6.3.4.1	7.1.3.1	
Topping-cycle	3.2.3.12						

	Maßnahmen/Techniken im LCP BREF Juni 2016 (Final Draft) nach Art des Brennstoffes und Kapitel						Maßnahmen/ Techniken in diesem Dokument nach Kapitel
	Allg. Beschreibung/ Energieeffizienz	Kohle und Braunkohle	Biomasse und Torf	Müll	Flüssige Brennstoffe	Gasförmige Brennstoffe	
Upgrade von Dampfturbinen und anderen Komponenten	3.2.3.13	5.1.3.3	5.2.3.3		6.3.3.1, 6.3.2.2		
Überkritische Dampfparameter	3.2.3.14	5.1.3.3			6.3.2.2		
Rauchgaskondensator	3.2.3.15		5.2.3.3				3.1.1
Expansionsturbine zur Rückgewinnung des Energiegehalts von Gasen unter Druck						7.1.3.1.2.1	
Vermeidung und Entfernung von Kesselsteinablagerungen auf Wärmeübertragungs-flächen							3.2.5
Minimierung der Verluste durch der Absalzung und Abschlämmung							3.2.6
Optimierung der Entgasungsanlage							3.2.7
Minimierung der Verluste des Betriebskessels durch kurze Zykluszeiten							3.2.8
Optimierung der Dampfverteilungssysteme							3.2.9
Wärmedämmung von Dampf- und Kondensatleitungen							3.2.10
Umsetzung eines Steuerungs- und Reparaturprogramms für Kondensatableiter							3.2.11

	Maßnahmen/Techniken im LCP BREF Juni 2016 (Final Draft) nach Art des Brennstoffes und Kapitel						Maßnahmen/ Techniken in diesem Dokument nach Kapitel
	Allg. Beschreibung/ Energieeffizienz	Kohle und Braunkohle	Biomasse und Torf	Müll	Flüssige Brennstoffe	Gasförmige Brennstoffe	
Sammeln und Rückführung von Kondensat an den Kessel zur Wiederverwendung							3.2.12
Wiederverwendung von Entspannungsdampf							3.2.13

Quelle: eigene Tabelle, Hochschule Zittau-Görlitz, 2018

3.2.2 Drosselgeräte und der Einsatz von Gegendruckturbinen

Beschreibung

Mit Drosselgeräten (hauptsächlich Ventilen) erfolgt eine isenthalpe Druckreduktion (Enthalpie bleibt während des Vorganges konstant). Gleichzeitig kommt es bei der Entspannung zu einem Anstieg der Entropie, d. h., die Arbeitsfähigkeit (Exergie) des Fluides wird verringert. Damit ist das Fluid in geringerem Maße in der Lage, mechanische Arbeit zu verrichten (z. B. in einer Expansionsturbine).

Bei großen Druckdifferenzen und hohen Dampfmasseströmen kann es unter Umständen energetisch (und betriebswirtschaftlich) sinnvoller sein, Gegendruckturbinen anstelle von Drosselventilen einzusetzen. Damit kann mechanische Energie für den Betrieb von einem Motor, Kompressor oder Ventilator gewonnen werden oder eine anschließende Umwandlung in elektrische Energie erfolgen.

Drosselventile werden in Dampfsystemen auch verwendet, um den Dampfdruck am Turbineneintritt zu steuern und zu reduzieren (Drosselregelung). Dem gegenüber steht die sog. Gleitdruckregelung, bei der der Druck im Dampferzeuger durch die Regulierung der Speisewasserpumpenleistung erfolgt. Durch den Teillastbetrieb der Speisewasserpumpe kann die Gleitdruckregelung energetisch günstiger sein als die Drosselregelung (81 S. 8).

Erreichter Umweltnutzen

Reduziert Energieverluste.

Medienübergreifende Wirkungen

Beeinflusst den Brennstoffverbrauch.

Betriebsdaten

Der Einsatz von Gegendruckturbinen kann ab einem Betriebsdruck von > 10 bar, einem Differenzdruck von > 7 bar und einem Dampfmassestrom von > 1,4 t/h in Erwägung gezogen werden, (82 S. 1).

Anwendbarkeit

Anwendbar in neuen oder bedeutend modernisierten Systemen. Bei Anlagenplanung kann erwogen werden, einen Kessel mit höherem Druckniveau anzuschaffen und eine Entspannung auf das im Dampfsystem benötigte Druckniveau mittels einer Gegendruckturbine zur Stromerzeugung vorzunehmen. Bei nahe beieinanderliegenden Druckniveaus ist der Einsatz einer Gegendruckturbine nicht funktional. Weiterhin wird ein möglichst hoher Dampfmassestrom mit hoher Verfügbarkeit benötigt sowie ausreichend Abnehmer von Niederdruckdampf.

Die Gleitdruckregelung kann in Wasserrohrkesseln mit Zwangsdurchlauf eingesetzt werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Gegendruckturbinen sind in verschiedenen Größenordnungen erhältlich und bedeutend teurer als Steuerungsventile. Die wirtschaftliche sinnvolle Dimensionierung ergibt sich aus der Dampfbilanz, wobei die Druckdifferenz, der Dampfmassestrom sowie die zeitliche Verfügbarkeit ausschlaggebend sind. Mögliche Gewinne entstehen z. B. aus der Einsparung von Hilfsenergie.

Triebkraft für die Umsetzung

Kosteneinsparungen.

Beispiele

Keine Daten vorliegend.

3.2.3 Betriebs- und Steuerungstechniken

Beschreibung

Verbesserung der Betriebsverfahren und Kesselsteuerung

Ein modernes Steuerungssystem, das den Kesseleinsatz optimiert, wird in (1), Kapitel 2.15 abgehandelt.

Einsatz von Kesselablaufsteuerungen

An Standorten mit mehr als einem Kessel sollte der Dampfbedarf analysiert und die Kessel zur Optimierung des Energieeinsatzes durch die Reduzierung von kurzen Durchläufen etc. optimiert werden.

Installation von Rauchgasabsperrklappen

Betrifft nur Systeme, wo es zwei oder mehr Kessel mit einem gemeinsamen Kamin gibt.

Erreichter Umweltnutzen

Energieeinsparungen.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine Daten vorliegend.

Betriebsdaten

Keine Daten vorliegend.

Anwendbarkeit

Bei Systemen mit zwei oder mehr Kesseln.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Keine Daten vorliegend.

Triebkraft für die Umsetzung

Energiekostenreduzierung

Beispiele

Keine Daten vorliegend.

3.2.4 Speisewasservorwärmung

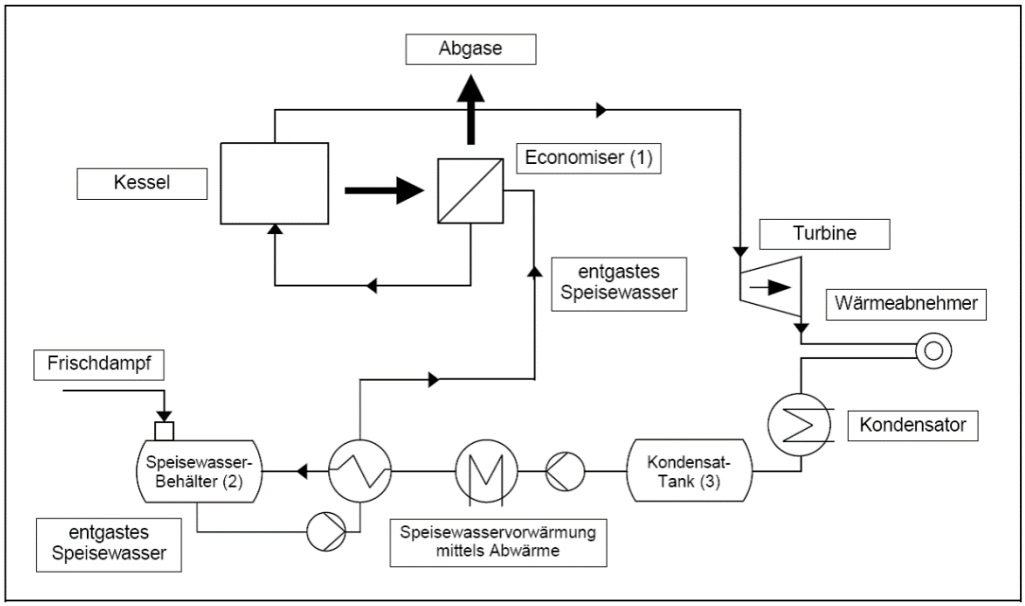
Beschreibung

Die aus dem Abgas bzw. Prozess zurückgewonnene Wärme kann zur Vorwärmung des Speisewassers eingesetzt werden. Dadurch sinkt der zur Dampferzeugung notwendige Brennstoffbedarf, und die Effizienz des Prozesses steigt. Die Speisewasservorwärmung kann auf folgenden Wegen erfolgen (Abbildung 3.2-3):

1. Einsatz eines Economisers: Mittels eines Gas/Wasser- Wärmeübertragers wird dem Rauchgas Wärme entzogen und auf das Speisewasser übertragen. Durch die Erhöhung der Speisewassertemperatur sowie die Absenkung der Abgastemperatur sinkt der Brennstoffbedarf ((1) in Abbildung 3.2-3)
2. Verwendung von Abwärme: Mittels eines Wasser/Wasser-Wärmeübertragers kann Abwärme (z. B. des Prozesses) genutzt werden, um Speisewasser vorzuwärmen (abhängig vom Temperaturniveau der Abwärme ist die Einkopplung des Wärmeübertragers beispielsweise in die Speisewasserzufuhr nach dem Kondensatbehälter (3) möglich)

3. Vorwärmung von Speisewasser mittels Brüdenkondensator (Kapitel 3.2.7)
4. Verwendung von Entspannungsdampf, z. B. aus der Absalzung/Abschlämmung (Kapitel 3.2.6) oder des Siedekondensats (Kapitel 3.2.13)
5. Verwendung von entgastem Speisewasser: Mittels eines Wasser/Wasser-Wärmeübertragers wird dem bereits entgastem Speisewasser ein Teil seiner Wärme entzogen und auf das Speisewasser übertragen, welches dem Speisewasserbehälter (2) zugeführt wird. Dadurch wird die Temperatur der Speisewasserzufuhr aus dem Kondensattank (3) weiter erhöht, wodurch sich der Energieaufwand für die Entgasungsanlage reduziert. Gleichzeitig sinkt die Temperatur des entgasten Speisewassers, wodurch das Abgas weiter abgekühlt werden kann und sich die Effizienz des Economisers erhöht.
6. Abgaskondensation: Das Abgas wird unter die Kondensationstemperatur des darin enthaltenen Wasserdampfes abgekühlt, wodurch die im Abgas enthaltene latente Wärme zurückgewonnen wird (Brennwerttechnik). Dies kann entweder innerhalb des Economisers oder separat mittels eines Abgaskondensators erfolgen.

Abbildung 3.2-3: Optionen zur Speisewasservorwärmung



Quelle: (39 S. 31)

Erreichter Umweltnutzen

Senkung des Brennstoffbedarfes zur Dampferzeugung. Die erreichbare Wirkungsgradsteigerung bei Einsatz eines Economisers ist abhängig von der Rauchgastemperaturabsenkung, die mittels der Speisewasservorwärmung erreicht werden kann.

Medienübergreifende Wirkungen

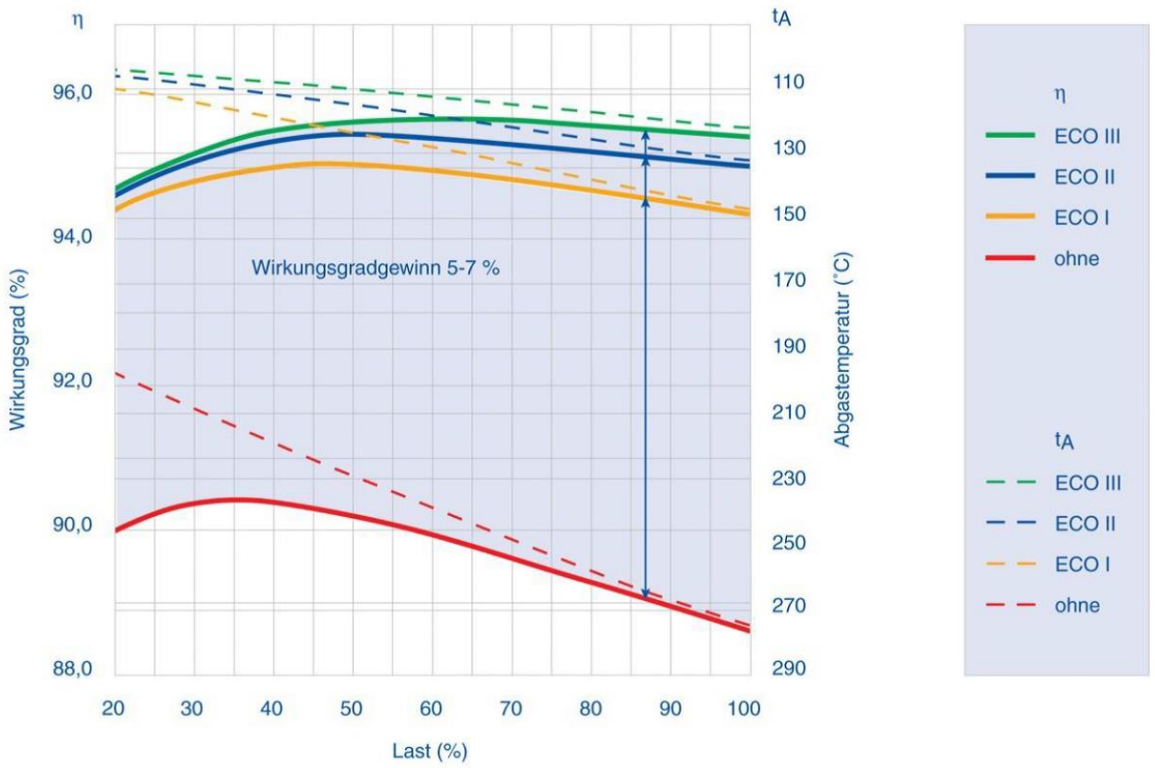
Keine Daten vorliegend.

Betriebsdaten

Der Abgasverlust von Dampfkesseln ohne Wärmerückgewinnung kann bis zu 12 % betragen, da die Rauchgastemperaturen am Kesselaustritt aus physikalischen Gründen typischerweise ca. 60 – 80 K oberhalb der Sattdampftemperatur liegen (38 S. 43). Sattdampf bei einem Druck von 10 bar hat eine Temperatur von ca. 180 °C. Die Rauchgastemperatur liegt dementsprechend bei ca. 250 °C. Mit Economisern ohne Brennwertnutzung können die Abgastemperaturen von Gaskesseln auf ca. 120 – 130 °C, bei Biomassekesseln auf ca. 160 °C abgesenkt werden. Das Speisewasser wird dabei von

ca. 105 °C auf ca. 120 – 140 °C vorgewärmt. Die erreichbare Effizienzsteigerung ist abhängig von der erreichbaren Senkung der Rauchgastemperatur und kann mit der Siegert‘schen-Formel berechnet werden (Kap. 3.1.1) (45 S. 16). Diese Formel gilt nicht für Anlagen mit Brennwertnutzung. Als Faustformel gilt, dass mit einer Absenkung der Rauchgastemperatur um 20 °C eine Erhöhung der Effizienz des Kessels (Feuerungstechnischer Wirkungsgrad) um 1 % erreicht wird. In der Praxis sind Effizienzsteigerungen von bis zu 7 % realisierbar (45 S. 11), (Abbildung 3.2-4). Wird Rauchgas kondensiert (Brennwertnutzung), sind Wirkungsgradsteigerungen von 5 % (33 S. 142 f.) bis 10 % erreichbar (45 S. 17), (48 S. 1).

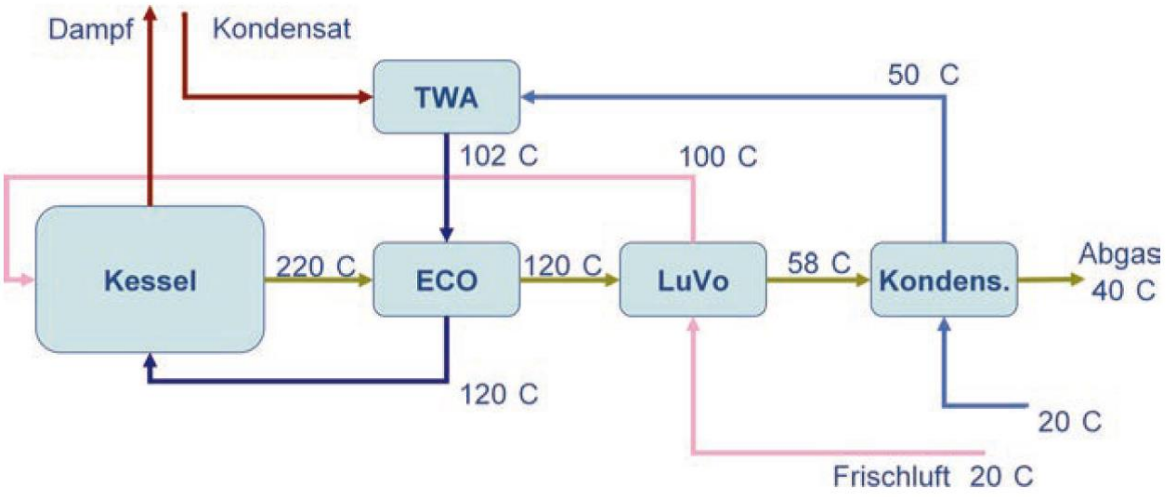
Abbildung 3.2-4: Effizienzsteigerung mit Economisern



Quelle: (83 S. 11)

Eine weitere Senkung der Rauchgastemperaturen kann durch die Verbrennungsluftvorwärmung (Abbildung 3.2-4) oder durch betriebsinterne Nutzung der Rauchgaswärme (z. B. Einbindung in Warmwassersystem) erreicht werden (siehe Kapitel 3.1.1). Die Auslegung von Economisern erfolgt nach Massestrom und Temperatur des Rauchgases sowie des Speisewassers und der Rauchgastemperatur am Economiser-Austritt (für weitere Informationen zu Betriebsdaten und Anwendbarkeit von Wärmeübertragern siehe Kapitel 3.3) (38 S. 43).

Abbildung 3.2-5: Exemplarische Temperaturniveaus und Verschaltung einer optimierten Kesselanlage



TWA: Thermische Wasseraufbereitung, ECO: Economiser, LuVo: Luftvorwärmung, Kondens.: Rauchgaskondensator.
Quelle: (66 S. 256)

Anwendbarkeit

In Wasserrohrkesseln für Großkraftwerke (Druck > 32 bar, Dampferzeugung > 30 t/h) sind zur Senkung von Abgasverlusten und Erhöhung der Wirtschaftlichkeit seit jeher Konvektionsheizflächen zur Speisewasservorwärmung installiert. Industrielle Dampferzeugung erfolgt meist mit Flammrohrkesseln (Großwasserraumkessel). In Neuanlagen dieses Kesseltyps sind Economiser als effizienzsteigernde Maßnahme bereits häufig integriert (1 S. 144).

Der Einsatz (die Nachrüstung) eines Economisers sollte dann in Betracht gezogen werden, wenn (45 S. 15):

- die Abgastemperaturen für Gaskessel über 130 °C liegen (z. B. > 150 °C),
- die Abgastemperaturen >100 °C liegen sowie ausreichend Niedertemperaturverbraucher vorhanden sind,
- bei 24 h-Schicht und hoher Kesselauslastung (auch unter 500 kW, z. B. ab Kesselleistungen > 75 kW bei Betriebsdrücken > 5 bar (84 S. 2)),
- bei Einschichtbetrieb und einer Systemlast > 50 % für Kessel ab 2 MW Leistung,
- bei ausreichend vorhandenem Bauraum.

Die Nachrüstung bestehender Anlagen kann aufgrund des Raumbedarfes für die Wärmetauscher und die Komplexität (und Individualität) bestehender Anlagen nicht in jedem Fall möglich sein. Bei alten Bestandsanlagen (mit hoher Betriebszeit) kann eine Modernisierung der Kesselsteuerung notwendig werden.

Bei Nutzung der Brennwerttechnik muss auf die Verwendung von korrosionsbeständigen Werkstoffen für Wärmeübertrager und Kamin (bzw. Abgassystem) geachtet werden (Kapitel 3.1.1). Dies ist in Neuanlagen meist problemlos möglich (43 S. 17). Bei einem hohen Anteil an rückgeführtem (Siede-)-Kondensat muss für die Brennwertnutzung ein Niedertemperaturkreislauf zur Verfügung stehen (43 S. 17). Dabei sollten kontinuierlich verfügbare Wärmesenken mit Temperaturen unterhalb des brennstoffabhängigen Taupunktes des Rauchgases vorhanden sein (38 S. 109).

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Amortisationszeit der Maßnahmen zur Speisewasservorwärmung ergibt sich aus dem Verhältnis von Investitionskosten (evtl. auch Betriebskosten) zu den Einsparungen bei Brennstoffkosten. Diese sind abhängig von der erreichbaren Senkung der Rauchgastemperatur, der Anzahl der jährlichen Volllaststunden sowie den Brennstoffkosten. Die Investitionskosten können für eine erste grobe Abschätzung anhand der thermischen Leistung des Economisers $\dot{Q}_{ECO}$ mit folgender Funktion ermittelt werden (38 S. 107):

Formel 3.2-3

$$K_{ECO}[EUR] = 11.500 + 23{,}94 \cdot \dot{Q}_{ECO}$$

Bei der Nutzung der Brennwerttechnik in Neuanlagen werden durch die Verwendung von korrosionsbeständigen Werkstoffen etwas höhere Investitionen notwendig, die sich in der Regel in kurzer Zeit amortisieren. Bei der Modernisierung von Anlagen muss mittels einer Kosten-Nutzen-Rechnung die Wirtschaftlichkeit der Brennwertnutzung überprüft werden.

In Verbindung mit der Faustformel, dass sich pro 20 K Senkung der Abgastemperatur eine Wirkungsgraderhöhung von ca. 1 % erreichen lässt, können die Einsparungen nach folgender Formel abgeschätzt werden (45 S. 16):

Formel 3.2-4

$$Einsparung\ [EUR] = Brennstoffkosten_{Alt} * \left(1 - \frac{\eta_{Alt}}{\eta_{neu}}\right)$$

Mit steigendem Betriebsdruck (und damit steigender Rauchgastemperatur **ohne** Verwendung ECO) des Kessels steigt der mittels Economiser rückgewinnbare Wärmestrom (z. B. Tabelle 3.2-3). Ein Economiser kann durch die erreichbaren Einsparungen in unter 2 Jahren refinanziert sein (84 S. 1).

Tabelle 3.2-3: Mittels Economiser rückgewinnbare Leistung

Rückgewinnbare Leistung [kW] in Abhängigkeit von der Temperatur am Economiser-Eintritt und der Kesselleistung				
	Thermische Leistung des Kessels [kW]			
Anfängliche Temperatur des Abgases, [°C]	7.327	14.654	29.307	58.614
204	381	762	1.553	3.107
260	674	1.348	2.696	5.393
316	967	1.905	3.810	7.649

Brennstoff: Erdgas, Temperatur am Economiser- Austritt ca. 120°C, Luftüberschuss 15%, adaptiert nach (84 S. 1)

Nachfolgend ein Fallbeispiel zur Modernisierung einer Kesselanlage bei einem mittelständischen Betrieb (85 S. 10). Es handelt sich um einen 15 Jahre alten Dampfkessel, welcher mit Leichtöl befeuert wird und bei einem Betriebsüberdruck von 10 bar ca. 10 t/h Dampf erzeugt. Da der Kessel im 6-Tage-Betrieb häufig in Teillast betrieben wird, ergibt sich eine durchschnittliche Last von 3.900 kg/h bei 5.000 Betriebsstunden pro Jahr. Es fallen 2000 kg/h Kondensat an (6 % sauerstofffrei, 50 % sauerstoffhaltig). Die Kosten für Brennstoff, Strom und Wasser/Abwasser betragen:

- Leichtöl 0,44 €/kg,
- Erdgas H 0,30 €/Nm^3,
- Strom 0,16 €/kWh,
- Wasser/Abwasser jeweils 2 €/m^3.

Tabelle 3.2-4**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die ökonomischen Daten der umgesetzten Modernisierungsmaßnahmen. Es wird darauf verwiesen, dass in Abhängigkeit von Lastverhalten und Kondensatparametern auch noch weitere Maßnahmen, wie z. B. Luftvorwärmung, Brüden- und Kondensatwärmeübertrager, rentabel sein können.

Tabelle 3.2-4: Amortisationszeit verschiedener Maßnahmen der Kesselmodernisierung

Modernisierungsmaßnahme	Kostenersparnis [EUR]	CO2- Reduzierung [t]	Investitionen [EUR]	Amortisationszeit [Monate]
Umstellen auf Erdgas	244.000	2.000	80.000	4
Economiser	55.000	370	50.000	11
Brennwertwärmetauscher	46.000	310	60.000	16
Drehzahlregelung Gebläse	6.000	20	10.000	19
O_2/CO- Regelung	5.000	30	15.000	40
Wärmerückgewinnung Lauge	18.000	120	10.000	6
Summe	**374.000**	**2.850**	**225.000**	**7**

Quelle: (85 S. 10)

Triebkraft für die Umsetzung

Reduzierung der Energiekosten und Minimierung der CO_2-Emissionen.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

3.2.5 Vermeidung und Entfernung von Kesselsteinablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen

Beschreibung

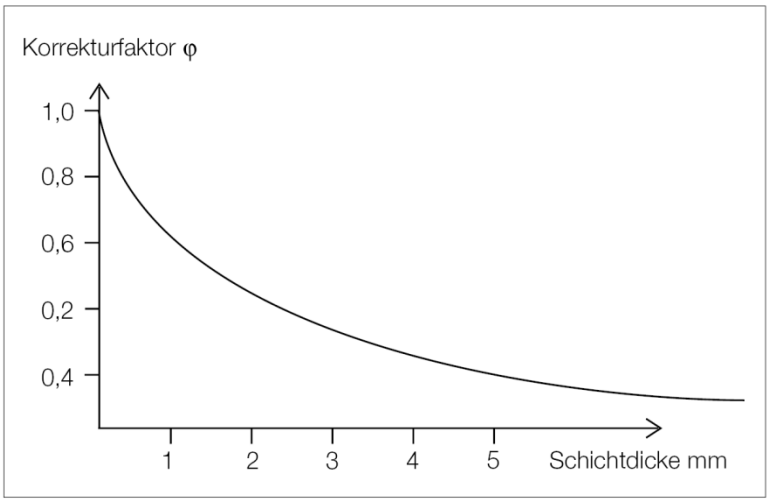
Im Wasser gelöste Erdalkalien (Calcium und Magnesium, sog. Härtebildner) fallen beim Erhitzen und in Anwesenheit von Kohlenstoffdioxid an Wärmeübertragungsflächen (Verdampfungszonen) aus und bilden (wasserseitig) einen festen Belag, den sog. Kesselstein. Die thermische Leitfähigkeit des Belages richtet sich nach seiner chem. Zusammensetzung und beträgt für gipsreichen Kesselstein 0,6 - 2,3 W/mK bzw. 0,08 - 0,18 W/mK für silikatreichen Kesselstein. Sie ist damit wesentlich geringer ist als die von Stahl (ca. 50 W/mK) (86 S. 84). Damit bildet sich eine wärmeisolierende Schicht aus, die den Wärmedurchgang k zwischen Feuerungs- und Wasserseite behindert (Abbildung 3.2-6). Dies führt zu Beginn zu erhöhten Rauchgastemperaturen am Kesselaustritt und damit zu einer Wirkungsgradverschlechterung. Fortgeschrittene Belagbildung kann schließlich aufgrund mangelnder Wärmeabfuhr zur Zerstörung der Heizflächen führen.

Formel 3.2-5

$$k = \varphi k_0$$

k	Realer Wärmedurchgangskoeffizient [W/mK]
k_0	Wärmedurchgangskoeffizient ohne isolierende Schichten [W/mK]
φ	Korrekturfaktor

Abbildung 3.2-6: Verminderung des Wärmedurchgangs k durch Kalk- und Kesselstein



Quelle: (87 S. 35)

Verluste durch Kesselstein können bis zu 2 % bei Wasserrohrkesseln und bis zu 5 % bei Flammrohrkesseln betragen. Um dies zu verhindern, müssen vorbeugende Maßnahmen, wie Wasseraufbereitung, Kondensatbehandlung, und die Absalzung/Abschlämmung (Kapitel 3.2.6, angewendet werden (45 S. 14), (88 S. 1).

Dabei können generell zwei Typen der Wasseraufbereitung unterschieden werden (89 S. 20):

- Externe Wasseraufbereitung: Entfernung (oder Modifikation) von Salzen vor Eintritt des Speisewassers in den Kessel (z. B. Enthärtung mittels Ionentauscher und Umkehrosmose),
- Interne Wasseraufbereitung (sog. Konditionierung): Zugabe von Chemikalien ins Speise- bzw. Kesselwasser zur Vermeidung von Kesselstein und Korrosion.

Um die Anforderungen an die Speisewasserqualität einzuhalten, muss das Frischwasser aufbereitet werden. Dazu kommt häufig eine Kombination von chemischer und thermischer Wasseraufbereitung zum Einsatz.

Bei kleinen und mittleren Anlagen oder hohen Kondensatrückflussraten wird häufig die Enthärtung eingesetzt. Dabei werden Calcium- und Magnesium-Ionen in einem Ionentauscher gegen Natriumionen ausgetauscht. Die Regeneration des Ionentauschers erfolgt mit preisgünstiger Kochsalzlösung (90 S. 2). Bei diesem Prozess verringert sich jedoch nicht der Salzgehalt des Speisewassers, weshalb eine Absalzung des Kessels vorgesehen werden muss.

Teilentsalzung

Für Anlagen mit hohem Frischwasserbedarf oder gefordertem niedrigen Salzgehalt wird die Umkehrosmose eingesetzt. Dabei wird das Rohwasser mit hohem Druck (größer als der osmotische Druck) durch eine einseitig durchlässige Membran gepresst, welche als Filter im Molekülbereich arbeitet. Im Wasser gelöste Ionen werden zum großen Teil zurückgehalten, während Wasser und ein Teil kleiner Salz-Ionen durch die Membran diffundieren. Um ein Verblocken der Poren zu verhindern, wird häufig eine Vorenthärtung (typisch bei kleineren Anlagen) oder eine Zudosierung von Chemikalien zur Enthärtung (Entsalzung großer Wassermengen) vorgeschalten. Im Anschluss erfolgt häufig eine Nachenthärtung, bei der verbliebene Erdalkalien entfernt werden (90 S. 2).

Der Ionenaustausch (sog. Entkarbonisierung) ist ein Verfahren zwischen Enthärtung und Osmose. Das Rohwasser wird über einen (stark sauren) Kationenaustauscher geleitet. Dort erfolgt die Zugabe von Wasserstoffionen (H+), wobei Kohlenstoffdioxid aus Karbonatverbindungen gelöst wird. Im darauffolgenden Schritt wird das Wasser über einen stark basischen Anionenaustauscher geleitet,

wobei die gelösten Calcium- und Magnesiumionen durch Natrium ersetzt werden. Die Regeneration erfolgt mit Salz- oder Schwefelsäure (Kationenaustauscher) bzw. Natronlauge (Anionenaustauscher) (90 S. 2).

Vollentsalzung

Die Vollentsalzung erfolgt mit demselben Verfahren wie in Ionenaustausch beschrieben. Es erfolgt eine Entkarbonisierung in einem schwach sauren Kationenaustauscher. Anschließend werden die verbliebenen Kationen (Ca, Mg, und Na) in einem stark sauren Kationenaustauscher gegen Wasserstoffionen ausgetauscht. Die dabei entstehende freie, aggressive Kohlensäure wird physikalisch mit einem CO_2-Rieseler entfernt. Im zweiten Teil der Vollentsalzung wird das entgaste Wasser mit einem stark basischen Anionenaustauscher entsalzt. Dabei werden die im Wasser enthaltenen Anionen (Cl, SO_4, NO_3, HCO_3 und SiO_2) gegen Hydroxylionen (OH-) ausgetauscht. Der eigentlichen Vollentsalzung kann zusätzlich ein Mischbettfilter nachgeschaltet werden, der aus einer Kombination von saurem Kationenaustauscher und basischem Anionenaustauscher besteht (91).

Zur Vermeidung von Kesselstein kann weiterhin, sofern der Prozess dies zulässt, die Temperatur des Dampfsystems durch die Absenkung des Betriebsdruckes gesenkt werden. Eine weitere Option zur Vermeidung von Kesselstein ist die Erhöhung der Absalzrate oder der Abschlämmung. Dies führt jedoch zu Energieverlusten (siehe Kapitel 3.2.6).

Die Entfernung von Kesselstein kann mechanisch oder durch Einsatz von sauren Lösungen (verdünnte Säure) während der Instandhaltung erfolgen. Durch die Vermeidung sowie das regelmäßige Entfernen von Kesselsteinablagerungen können Energieverluste und damit Betriebskosten gesenkt werden.

Erreichter Umweltnutzen

Reduzierte Energieverluste.

Medienübergreifende Wirkungen

Evtl. gesteigerter Einsatz von Chemikalien zur Speisewasserkonditionierung (z. B. Phosphat, Sulfit, Ammoniak, Natronlauge oder Hydrazin). Das Entfernen von Kesselstein kann mit sauren Lösungen erfolgen. Diese müssen im Anschluss evtl. aufbereitet (neutralisiert) oder entsorgt werden.

Betriebsdaten

Die Verschlechterung des Wärmeübergangs an Heizflächen ist abhängig von der Stärke des Belages sowie dessen chemischer Zusammensetzung.

Indirekte Indikatoren der Bildung von Kesselstein oder Ablagerungen sind die Abgastemperatur und der Brennstoffbedarf. Falls die Abgastemperatur bei konstanter thermischer Leistung des Kessels sowie konstantem Luftüberschuss steigt, ist die Wirkung wahrscheinlich dem Vorhandensein von Kesselstein zuzuschreiben.

Der Aufwand für die Wasseraufbereitung ist abhängig von der Chemie des unbehandelten Speisewassers (Rohwasser), vom Kesseltyp sowie dessen Betriebsdruck. Die zulässigen Grenzwerte der Gesamthärte bzw. der Speisewasserqualität im Allgemeinen können der DIN EN 12953-10:2003 für Großwasserraumkessel (92) und der DIN EN 12952-12:2003 für Wasserrohrkessel entnommen werden (80). Häufig schreiben Hersteller von Dampferzeugern strengere Grenzwerte als die im Regelwerk aufgeführten vor.

Bereits gebildete Beläge können während der Instandhaltung durch Sichtkontrolle erkannt und anschließend entfernt werden. Tritt Kesselstein innerhalb kurzer Zeit wieder auf, ist die Wasseraufbereitung zu überprüfen und gegebenenfalls die Qualität des Speisewassers zu verbessern.

Die Entfernung von Kesselstein erfolgt mechanisch (Bürsten, Abklopfen) oder chemisch mit Säuren (z. B. Zitronensäure, Ameisensäure, Essigsäure, Amidosulfonsäure). Der Einsatz von Säuren bei der

Entfernung von Ablagerungen muss – vor allem bei Hochdruckkesseln – aufgrund der Korrosionsgefahr sorgfältig abgewogen werden.

Anwendbarkeit

Zur Vermeidung bzw. zur Minimierung des Entstehens von Kesselstein und damit zur Gewährleistung eines effizienten, zuverlässigen und sicheren Anlagenbetriebes sind die Herstellerangaben bzw. Richtwerte zur Speise- und Kesselwasserqualität in den Regelwerken einzuhalten.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Den Investitions- und Betriebskosten für die Wasseraufbereitung sowie den Kosten zur Entfernung bereits gebildeten Belages sind die Einsparungen durch

- geringere Betriebskosten für Brennstoff,
- geringere Kosten für Abreinigung,
- höhere Verfügbarkeit des Kessels und damit Vermeidung von längeren und/oder häufigeren Stillstandszeiten (Betriebsstillstand) mit entsprechenden Verlusten (auch Langzeitschäden durch Korrosion),
- im schlimmsten Fall Zerstörung von Heizflächen bzw. des Kessels und erforderliche Neuinvestition und
- bei Ignorieren von Herstellerangaben evtl. Verlust von Garantien/Gewährleistungen

gegenüberzustellen.

Triebkraft für die Umsetzung

Reduzierung von Energieverlusten, erhöhte Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer) des Dampfsystems sowie Reduzierung zusätzlicher Betriebskosten durch Reinigungsaufwand.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

3.2.6 Minimierung der Verluste durch Absalzung und Abschlämmung

Beschreibung

Während des Verdampfungsvorganges erhöht sich die Konzentration von Salzen und Schwebstoffen im Kesselwasser (auch Total Dissolved Solids, TDS). Dies führt zur Bildung von Belägen und verschlechtertem Wärmeübergang (siehe Kapitel 3.2.5) und begünstigt die Korrosion. Weiterhin kann sich Schaum bilden, welcher mit dem Dampf mitgerissen werden kann. Dadurch sinkt die Dampfqualität, und es können nachfolgende Bauteile des Dampfsystems geschädigt werden. Durch die Absalzung wird in Großwasserraumkesseln ein Teil des Kesselwassers durch aufbereitetes Speisewasser ersetzt, womit die Salzkonzentration unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte gehalten werden kann. Die Abschlämmung dient dazu, die sich am Kesselboden bildende Schlammschicht aus Härtebildnern zu entfernen (Entstehung durch Zugabe von Trinatriumphosphat und Bindung) (45 S. 20).

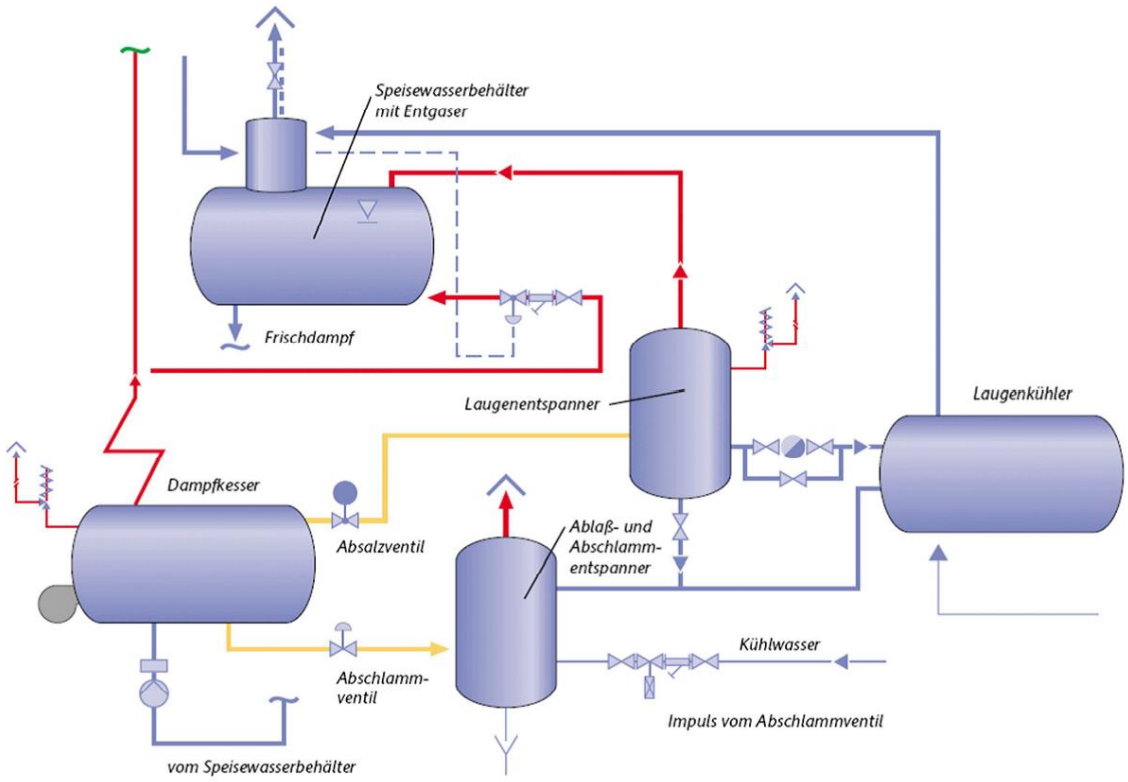
Die Wärmeverluste durch Absalzung und Abschlämmung lassen sich folgendermaßen reduzieren:

- Sammlung und Rückführung von Kondensat zum Speisewasserbehälter (Kapitel 3.2.12). Kondensat muss nicht entsalzt werden und hat bereits ein hohes Temperaturniveau. Bei einer Rückführung von 50 % des Kondensats kann die Absalzung um 50 % reduziert werden. Die Abschlammverluste reduzieren sich ebenfalls.
- Erhöhung der Qualität der Wasseraufbereitung (Kapitel 3.2.5**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Je geringer die Konzentration der im Speisewasser gelösten Salze, desto seltener muss die Absalzung erfolgen. Die Wärmeverluste durch Absalzung sinken

proportional zur Steigerung der Qualität der Wasseraufbereitung. Weiterhin wird Speisewasser thermisch entgast (Kapitel 3.2.7) und in Abhängigkeit von der Speisewasserqualität auf chemischem Weg Restsauerstoff und Resthärtebildner gebunden.

- Installation einer Absalzungsregelung (automatische Absalzung). Eine im Kessel montierte Elektrode misst die Leitfähigkeit des Kesselwassers und öffnet bei Erreichen eines Grenzwertes das Absalzventil. Dadurch kann die Zuverlässigkeit der Anlage bei minimalen Wärmeverlusten durch Absalzung gewährleistet werden. Die zulässigen Grenzwerte sind durch den Kesselhersteller bzw. durch Regelwerke vorgegeben (92).
- Möglichst kurze Öffnungszeit des Ventils zur Abschlämmung.
- Wärmerückgewinnung: Die Wärme aus der Absalzung/Abschlämmung kann mittels Wärmeübertrager zurückgewonnen oder durch Entspannung (Verdampfung) in einem Dampfnetz mit einem geringeren Druck als dem Kesselbetriebsdruck verwendet werden (siehe Abbildung 3.2-7 sowie Kapitel 3.2.13). Die Verwendung von Entspannungsdampf kann exergetisch günstiger sein als die Rückgewinnung von sensibler Wärme.

Abbildung 3.2-7: Einbindung der Wärmerückgewinnung aus Absalzung und Abschlämmung



Quelle: (45 S. 26)

Erreichter Umweltnutzen

Die oben dargestellten Maßnahmen im Bereich der Absalzung/Abschlämmung von Dampferzeugern führen zu folgenden positiven Effekten:

- Minimierung von Energieverlusten,
- reduzierter Brennstoffbedarf und dadurch verminderte Emissionen durch Erhöhung der Effizienz der Dampferzeugung
- Reduzierung der Abwassermenge sowie des für die Abkühlung des entnommenen Speisewassers auf die von Genehmigungsbehörden vorgeschriebene Temperatur evtl. notwendigen Kühlwassers.

Medienübergreifende Wirkungen

Eine Verringerung der Absalz- und Abschlammrate kann zu steigendem Einsatz von Chemikalien zur Wasseraufbereitung führen (Regenerierung des Vollentsalzers, Konditionierungsmittel). Gleichzeitig sinkt die evtl. zu entsorgende Abwassermenge.

Betriebsdaten

Die Wärmeverluste durch Absalzung und Abschlämmung sind abhängig von der ausgeschleusten Menge Kesselwasser und dem Betriebsdruck des Kessels. Die Verluste durch Absalzung können bis zu 3 % des erzeugten Frischdampfes betragen (bei älteren Kesseln bis zu 5 %) (45 S. 23).

Die Absalzung wird häufig als Oberflächen- oder Abschöpfabsalzung ausgeführt, da sich an der Oberfläche die gelösten Salze aufkonzentrieren. Oft handelt es sich dabei um einen kontinuierlichen Prozess, der automatisch geregelt ist. Die Regelung erfolgt dabei über die Messung der Leitfähigkeit des Kesselwassers. Dabei sind die Richtwerte der Hersteller bzw. die Grenzwerte aus dem Regelwerk einzuhalten (DIN EN 12953-10:2003 für Großwasserraumkessel (92) sowie DIN EN 12952-12:2003 für Wasserrohrkessel (80)). Die optimale Absalzrate wird in Abhängigkeit von der Chemie des Speisewassers, der Qualität der Wasseraufbereitung, der Menge des rückgeführten Kondensates, der Art des Kessels und des Betriebsdruckes festgelegt.

Die erforderliche Absalzrate ergibt sich aus dem Verhältnis der Leitfähigkeit des Speisewassers und der einzuhaltenden Leitfähigkeit des Kesselwassers:

Formel 3.2-6

$$Absalzrate\ [\%] = \frac{\delta_{Speisewasser}}{\delta_{Kessel} - \delta_{Speisewasser}} * 100$$

δ Leitfähigkeit [µS/cm]

Die Verluste durch Absalzung sollten 5 % der Speisewassermenge nicht überschreiten, andernfalls sind Wasseraufbereitungsmaßnahmen einzusetzen bzw. die vorhandene Aufbereitung zu überprüfen (45 S. 21).

Der Absolutwert ergibt sich aus der Multiplikation mit dem Speisewassermassestrom: Werden z. B. für einen Kessel mit einer geforderten maximalen Leitfähigkeit von 5000 µS/cm 10 t/h Speisewasser mit einer durchschnittlichen Qualität von 500 µS/cm benötigt, muss 1 t/h heißes Kesselwasser ausgeschleust werden (45 S. 21).

Die Absalzverluste können folgendermaßen berechnet werden:

Formel 3.2-7

$$\dot{Q}_{Absalzung} = \dot{m}_{Absalz} * (h'_{Kesselwasser} - h'_{Zusatzwasser})$$

$\dot{Q}_{Absalzung}$ Wärmestrom Absalzung [kJ/s]
$\dot{m}_{Absalz}$ Massestrom Absalzung [kg/s]
$h'_{Kesselwasser}$ Enthalpie des Kesselwassers (flüssig) [kJ/kg]
$h'_{Zusatzwasser}$ Enthalpie des Zusatzwassers [kJ/kg]

Tabelle 3.2-5: Verluste durch Absalzung

Verluste in % der Kesselleistung (Sattdampf) in Abhängigkeit des Betriebsdruckes				
	Betriebsdruck des Kessels in bar			
Absalzrate in % des Speisewasser-massestromes	2	5	16	32
1	0,19	0,23	0,30	0,35
2	0,38	0,46	0,59	0,71
4	0,76	0,91	1,19	1,41
5	0,95	1,14	1,48	1,76
6	1,14	1,37	1,78	2,12
8	1,52	1,82	2,37	2,82
10	1,91	2,28	2,96	3,53

Bemerkung: Zusatzwassertemperatur 10°C

Quelle: eigene Tab elle, Hochschule Zittau-Görlitz, 2017

Der prozentuale Verlust kann weiterhin auf den Enthalpiestrom des Brennstoffes bezogen werden:

Formel 3.2-8

$$V_{Absalzung} = \frac{\dot{Q}_{Absalzung}}{\dot{m}_{Brennstoff} * H_i}$$

$V_{Absalzung}$ Absalzverluste in %

$\dot{Q}_{Absalzung}$ Wärmestrom Absalzung [kJ/h]

$\dot{m}_{Brennstoff}$ Brennstoff über die betrachtete Zeiteinheit [kg/h]

H_i Heizwert des eingesetzten Brennstoffs [kJ/kg]

Die diskontinuierliche Abschlämmung vom Kesselboden kann manuell oder automatisch mittels einer Zeitschaltung erfolgen. In Abhängigkeit von der Rohwasserqualität und der angewandten Methode der Wasseraufbereitung können Abschlammverluste bis zu 15 % des Speisewasserbedarfes betragen. Es sollten Werte unterhalb von 5 % angestrebt werden, wobei der Verlust auf bis zu 1 % reduziert werden kann (45 S. 20).

Die Abschlamm-Impulsdauer (Öffnungszeit des Ventils) kann bis zu 10 s betragen, sollte jedoch wesentlich geringer, z. B. 2 - 3 s, gewählt werden (45 S. 21), (93 S. 7). Die Abschlamm-Intervalldauer (Ventil ist geschlossen) kann 1 - 24 h betragen. Die Impulsdauer sowie die Intervalle der Abschlämmung müssen in Abhängigkeit der Chemie des Speisewassers, der Qualität der Wasseraufbereitung, des Betriebsdrucks des Kessels sowie der Betriebslast festgelegt werden. Eine typische Einstellung der Zeitschaltung ist 3 s Öffnungszeit aller 8 h. Der Abschlammverlust ergibt sich über die Dauer der Abschlämmung und den Durchfluss des Abschlammventils (Abbildung 3.2-8).

Formel 3.2-9

$$\dot{Q}_{Abschlammverlust} = \dot{m}_{Abschlamm} * (h'_{Kesselwasser} - h'_{Zusatzwasser}) * t$$

$\dot{Q}_{Abschlammverlust}$ *Wärmestrom Abschlämmung [kJ/h]*

$\dot{m}_{Abschlamm}$ *Massestrom Abschlämmung, Heißwasserdurchsatz [kg/s]*

$h'_{Kesselwasser}$ *Enthalpie des Kesselwassers (flüssig) [kJ/kg]*

$h'_{Zusatzwasser}$ *Enthalpie des Zusatzwassers [kJ/kg]*

t *Impulsdauer Abschlämmung (Öffnungszeit des Ventils) [s/h]*

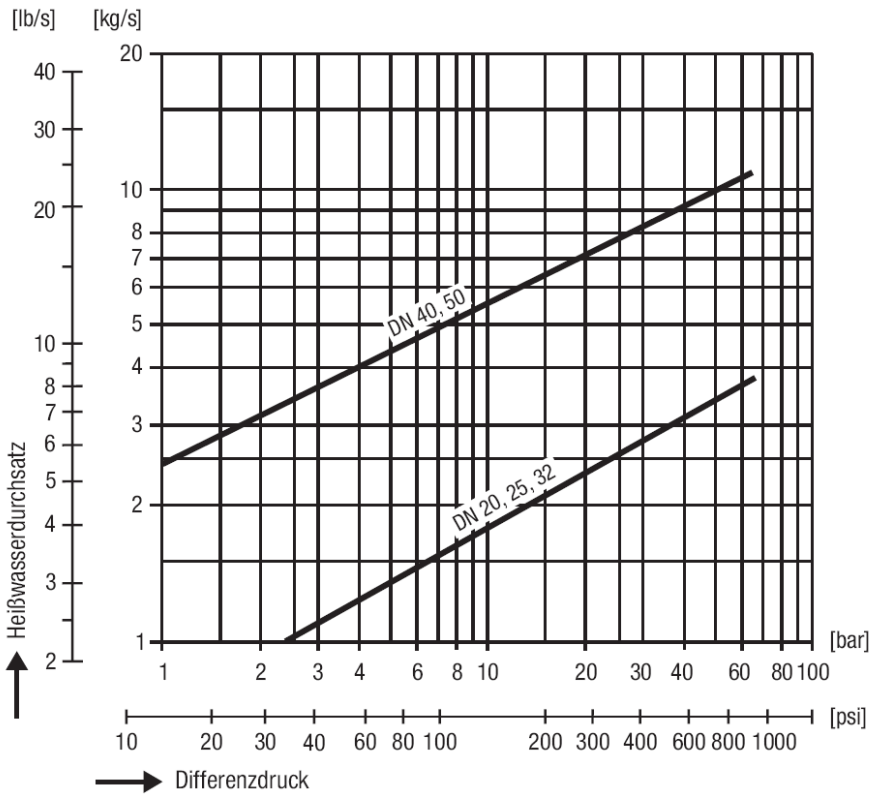
Der prozentuale Verlust kann folgendermaßen ermittelt werden:

Formel 3.2-10

$$V_{Abschlammung} = \frac{\dot{Q}_{Abschlammverlust}}{\dot{m}_{Brennstoff} * H_i}$$

$V_{Abschlämmung}$	Abschlammverluste [%]
$\dot{Q}_{Abschlammverlust}$	Wärmestrom Abschlämmung [kJ/h]
$\dot{m}_{Brennstoff}$	Massestrom Brennstoff über die betrachtete Zeiteinheit [kg/h]
H_i	Heizwert des eingesetzten Brennstoffs [kJ/kg]

Abbildung 3.2-8: Beispiel für Durchflussdiagramm Abschlammventil



Quelle: (93 S. 15)

Wärmerückgewinnung aus der Absalzung

Bei kontinuierlicher Absalzung können über Entspanner ca. 50 - 75 % der Wärme zurückgewonnen werden (45 S. 23). Die bei der Druckverringerung entstehende Menge an Nachdampf kann folgendermaßen berechnet werden:

Formel 3.2-11

$$\dot{m}_{Entspannungsdampf} = \dot{m}_{Absalzmenge} * \frac{\left(h'_{HD,Absalzung} - h'_{ND,Absalzung}\right)}{r_{ND}}$$

$\dot{m}_{Absalzmenge}$	Massestrom des aus dem Kessel ausgeschleusten Wassers [kg/h]. Grob lässt sich die Menge mit ca. 3 %, für ältere Kessel mit 5 % abschätzen.
$\dot{m}_{Entspannungsdampf}$	Massestrom Entspannungsdampf [kg/h]
$h'_{HD,Absalzung}$	Enthalpie des Absalzstroms vor Entspannung [kJ/kg]
$h'_{ND,Absalzung}$	Enthalpie des Absalzstroms nach Entspannung [kJ/kg]
r_{ND}	Verdampfungsenthalpie für Wasser bei Niederdruck [kJ/kg]

Die Kostenersparnisse können über den Wärmestrom des Entspannungsdampfes berechnet werden:

Formel 3.2-12

$$\dot{Q}_{Entspannungsdampf} = \dot{m}_{Entspannungsdampf} * \left(h''_{ND,Kondensat} - h'_{Zusatzwasser}\right)$$

Formel 3.2-13

$$Einsparung = \frac{\dot{Q}_{Entspannungsdampf} * t * K_{Brennstoff}}{\eta_{Kessel}}$$

$\dot{Q}_{Entspannungsdampf}$	Wärmestrom Entspannungsdampf [kJ/h]
$\dot{m}_{Entspannungsdampf}$	Massestrom Entspannungsdampf [kg/h]
t	Betriebszeit Kessel [h]
$K_{Brennstoff}$	Brennstoffkosten [EUR/kJ]
η_{Kessel}	Brennstoffnutzungsgrad Kessel [-]
$h''_{ND,Kondensat}$	Enthalpie des Entspannungsdampfes nach Entspannung [kJ/kg]
$h'_{Zusatzwasser}$	Enthalpie des Zusatzwassers [kJ/kg]

Anwendbarkeit

Die Optimierung der Absalzung ist nur für Großwasserraumkessel relevant, da diese häufig mit salzhaltiger Fahrweise betrieben werden. Wasserrohrkessel werden dagegen mit salzfreier Fahrweise betrieben (Leitfähigkeit < 0,2 µS/cm). Die Abschlämmung wird bei Großwasserraumkesseln und Wasserrohrkesseln mit Trommel eingesetzt.

Eine zu geringe Absalz- und Abschlammrate kann zu Kesselsteinbildung und Schaumbildung und damit zu einer Verschlechterung der Effizienz, Anlagenschäden und einer verringerten Zuverlässigkeit und Sicherheit der Anlage führen. Eine zu hohe Absalz- und Abschlammrate führt jedoch zu vermeidbaren Energieverlusten. Weitere Maßnahmen zur Verringerung dieser Verluste sind die Rückführung möglichst großer Mengen an Kondensat (Kapitel 3.2.12) und die Verbesserung der Qualität der Wasseraufbereitung (Kapitel 3.2.5).

Wird lediglich eine geringe Menge an Kondensat zum Kessel zurückgeführt, steigt der Bedarf an Zusatzwasser und damit die Absalzrate. Bei kontinuierlicher Absalzung, die 4 % (bzw. 5 % in (94 S. 1)) der Dampfrate übersteigt, sollten Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung in Betracht gezogen werden. Dies kann mittels eines Wärmeübertragers zur Vorwärmung des Zusatzwassers oder durch die Einleitung des Entspannungsdampfes in den Entgaser erfolgen. Weitere Möglichkeiten zur Nutzung von Entspannungsdampf werden in Kapitel 3.2.13 diskutiert. Die rückgewinnbare Energie ist umso größer, je höher der Betriebsdruck des Kessels ist.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Reduzierte Brennstoffkosten, reduzierte Kosten für Chemikalien, Speisewasser und Kühlung sowie Entsorgung des Abwassers machen die Optimierung der Absalz- und Abschlammrate in allen Fällen rentabel. Zusätzliche Kosten können entstehen, wenn die Absalz- und Abschlammraten zu weit reduziert werden und es aus diesem Grund zu erhöhtem Aufwand für Wartung, Reinigung (Entfernung Kesselstein) oder sogar zu Schäden am Dampfsystem und daraus resultierenden Stillstandszeiten mit entsprechenden Verlusten kommt.

Die erzielbaren Einsparungen bei der Verwendung von Entspannungsdampf der Absalzung sind abhängig von dem Massestrom der Absalzung und dem Druck vor und nach der Entspannung sowie den Brennstoffkosten und dem Nutzungsgrad des Kessels. Den Einsparungen sind die Investitionskosten sowie die Kosten für die Installation gegenüberzustellen (exemplarisch in Tabelle 3.2-6). Die Effizienzsteigerung durch führt in der Regel zur Kostendeckung innerhalb von wenigen Jahren.

Tabelle 3.2-6: Kosten Absalzlaugenentspanner

Komponente	Ungefähre Kosten
Kondensatentspanner 300 kg - 1.000 kg/h, 13 - 32 bar, Zulässige Betriebstemperatur 200-250 °C	1.800 bis 3.000 EUR
Installation	ca. 2.000 EUR
Verrohrung	ca. 5.000 EUR

Quelle: (45 S. 24)

Triebkraft für die Umsetzung

Reduktion von Kosten für Brennstoff, Chemikalien, Speisewasser, Abwasserentsorgung. Bei optimaler Abstimmung der Absalz- und Abschlammrate neben Kosteneinsparungen Erhöhung von Zuverlässigkeit und Sicherheit des Anlagenbetriebes.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

3.2.7 Energetische Optimierung der Entgasungsanlage

Beschreibung

Mit der thermischen Wasseraufbereitung werden die im Wasser gelösten Gase Sauerstoff (O_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) ausgetrieben. Dies ist notwendig, da die Löslichkeit der Gase mit steigender Temperatur abnimmt und diese während der anschließenden Verdampfung vollständig freigesetzt werden. Freier O_2 geht chemische Verbindungen mit ferritischem Stahl ein, was in Folge zu Korrosion im Kessel führt (sog. Lochfraß). Mit der Entgasungsanlage werden die Konzentrationen der Gase auf ein Maß reduziert, bei dem die Korrosion minimiert wird. Dazu werden Speisewasser sowie rückgeführtes Kondensat bis zum Siedepunkt erwärmt und bei geringem Überdruck und einer Temperatur von ca. 105 °C gehalten, wodurch die Wiederaufnahme von Gasen verhindert wird (38 S. 60). Die akzeptierte O_2-Konzentration ist abhängig vom Betriebsdruck der Anlage. Die Richtwerte der O_2-Konzentration sind in DIN EN 12952-12:2003 sowie DIN EN 12953-10:2003 festgelegt ((92), (80)). Bei Entgasungsanlagen kann unterschieden werden in:

- Hochdruckanlagen: Es erfolgt eine **Vollentgasung** bei einem Betriebsdruck von 1,1 – 1,3 bar (entspricht ca. 102 – 108 °C) (38 S. 60);
- Niederdruckanlage, kleine Leistung, niedriger Druck und/oder hoher Kondensatrückfluss: Es erfolgt häufig eine **Teilentgasung** unter atmosphärischem Druck (ca. 90 °C). Der im Vergleich zur Vollentgasung höhere Anteil an O_2 muss mittels Sauerstoffbindemitteln reduziert werden (chemische Nachbehandlung) (38 S. 61).

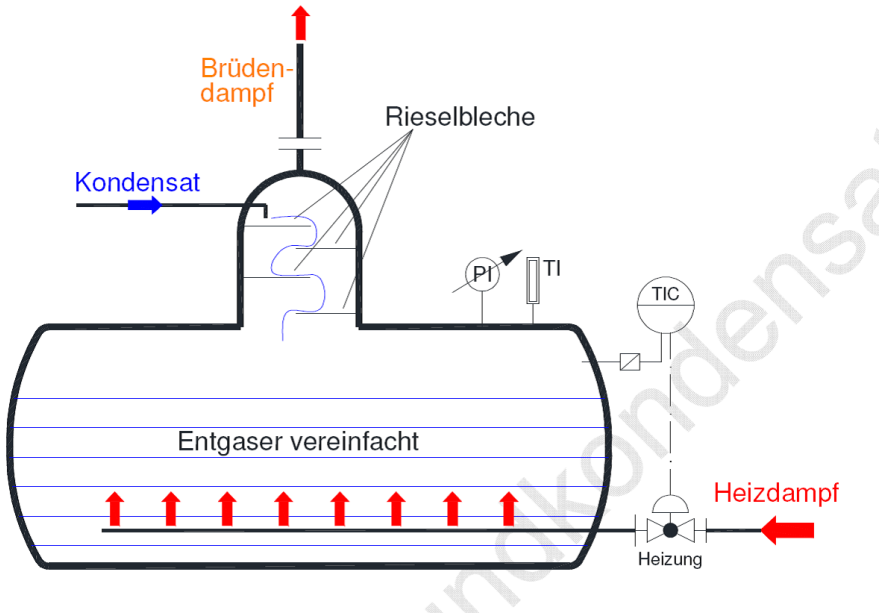
Die Aufheizung des Speisewassers auf Siedetemperatur erfolgt über Dampflanzen im Speisewasserbehälter. In einem auf den Speisewasserbehälter aufgesetzten Entgaserdom wird das Zusatzwasser und Kondensat häufig im Gegenstrom über Verteiler und Rieselbleche erwärmt (Abbildung 3.2-9). Die freigesetzten Gase steigen mit dem nicht kondensierten Teil des Heizdampfes auf und entweichen als Brüdendampf aus dem Entgaser. Die dadurch entstehenden Energieverluste können folgendermaßen minimiert werden (45 S. 29 f.):

- Die Öffnungszeit des Ventils des Entgasungsbehälters sollte so kurz wie möglich gewählt werden, um eine zufriedenstellende Entgasung bei minimalem Energieverlust zu erreichen. Keinesfalls sollte die Entgasungsöffnung dauerhaft geöffnet sein. Die Regelung der Öffnung kann bspw. über die Sauerstoffkonzentration des Wassers im Entgasungsbehälter erfolgen oder in Abhängigkeit des Zuströmens von Zusatzwasser.

- In größeren Anlagen kann die Enthalpie des Brüdendampfes mittels eines Brüdenkondensators zur Vorwärmung des aufbereiteten Zusatzwassers genutzt werden.

Nach Umbau- oder Effizienzmaßnahmen am Dampf- und Kondensatsystem sollte der Heizdampfbedarf sowie die Möglichkeiten von Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung erneut geprüft werden. Mit der kontinuierlichen Überwachung der Sauerstoffkonzentration können Betriebspraktiken erkannt werden, die zu einer unzureichenden Entfernung des gelösten Sauerstoffs führen. Weiterhin sollte sichergestellt werden, dass auf der Ansaugseite der Pumpen kein Einbruch von Luft erfolgt (z. B. durch lockere Flanschverbindungen oder ungeeignete Pumpendichtungen).

Abbildung 3.2-9: Schema Entgaser



Quelle: (95 S. 5)

Erreichter Umweltnutzen

Verringerung der Energieverluste bei der thermischen Wasseraufbereitung.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine berichtet.

Betriebsdaten

Die Auslegung/Dimensionierung der Entgasungsanlage ist abhängig von der Gaskonzentration im Rohwasser, vom Betriebsdruck des Kessels und des Speisewassermassestromes in Verbindung mit der Menge des zurückgeführten Kondensates.

Für Großwasserraumkessel sind nach DIN EN 12953-10:2003 die Grenzwerte für O_2 von < 0,05 mg/l für Betriebsdrücke > 0,5 - 20 bar und < 0,02 mg/l für Betriebsdrücke > 20 bar für Speisewasser (mit Feststoffgehalt) einzuhalten (92). Für Wasserrohrkessel gelten laut DIN EN 12952-12:2003 Grenzwerte für O_2 von < 0,02 mg/l Speisewasser mit Feststoffgehalt für Betriebsdrücke von > 0,5 - 100 bar und < 0,1 mg/l für entsalztes Speise- und Einspritzwasser (80).

Die für die Entgasung benötigte Dampfmenge beträgt ca. 2 - 5 % des im Kessel erzeugten Dampfes. Dabei entsteht Abdampf (Brüden-, Fegedampf) in Höhe von ca. 0,3 - 0,5 % des Speisewassermassestromes (45 S. 29):

Formel 3.2-14

$$\dot{m}_{Abdampf} = 0{,}5\% * zugeführte\ Speisewasser - und\ Kondensatmenge \left[\frac{kg}{h}\right]$$ Formel

Eine weitere Abschätzung/Berechnung der Abdampfmenge kann über den Ventildurchsatz und die Öffnungszeit des Entgasungsventils erfolgen. Der Verlust durch die Entgasung ergibt sich zu (45 S. 29):

Formel 3.2-15

$$\dot{Q}_{Entgasungsverlust} = \dot{m}_{Abdampf} * \left(h''_{Dampf} - h'_{Zusatzwasser}\right)$$

$\dot{Q}_{Entgasungsverlust}$	Wärmeverlust [kJ/h]
$\dot{m}_{Abdampfmenge}$	Abdampfmenge [kg/h]
h''_{Dampf}	Enthalpie des Abdampfes [kJ/kg]
$h'_{Zusatzwasser}$	Enthalpie des Zusatzwassers (Speisewasser und Kondensat) [kJ/kg]

In der Praxis wird die zur Speisewassererwärmung benötigte Heizdampfmenge berechnet und dann sichergestellt, dass diese Menge zur physikalischen Abscheidung der gelösten Gase ausreichend ist. Bei hoher Kondensatrückführrate (> 80 %) und einem im Vergleich zur Entgasungsanlage hohen Druck des Kondensates können Maßnahmen zur Kondensation des Entspannungs- bzw. Brüdendampfes getroffen werden (96 S. 1).

Anwendbarkeit

Ist an allen Standorten mit Entgasungsanlagen auf Dampfsystemen anwendbar. Die Optimierung ist eine laufende Instandhaltungsmaßnahme.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die potentiellen Kosteneinsparungen ergeben sich aus dem Entgasungsverlust, der Betriebszeit des Kessels, den Brennstoffkosten sowie dem Nutzungsgrad des Kessels (45 S. 29):

Formel 3.2-16

$$Einsparungen\ [EUR] = \frac{\dot{Q}_{Entgasungsverlust} * t * K_{Brennstoff}}{\eta_{Kessel}}$$

t	Betriebszeit Kessel [h]
$K_{Brennstoff}$	Brennstoffkosten [EUR/kJ]
η_{Kessel}	Brennstoffnutzungsgrad Kessel

Nachfolgend ein Berechnungsbeispiel für die Wärmerückgewinnung aus dem Brüdendampf mittels Brüdenkondensator (Beispiel adaptiert nach (45 S. 30):

Es wird empfohlen, den Brüdenkondensator für ca. 0,5 – 1 % der Kesselleistung auszulegen. In diesem Beispiel wird der Brüdenkondensator für einen Kessel mit 2 t/h für 0,75 % der Leistung ausgelegt, also für 15 kg/h. (Wird von einem Dampfanteil von ca. 0,75 ausgegangen, ergibt sich eine Leistung von ca. 9 kW). Damit kann ein Massestrom Wasser von ca. 386 kg/h um ca. 20 K erwärmt werden (z. B. 50 °C auf 70 °C). Durch die Nutzung des Brüdendampfes zur Speisewasservorwärmung wird entsprechend weniger Frischdampf zur Aufheizung benötigt. Handelt es sich dabei um Sattdampf bei einem Betriebsdruck von 10 bar, können ca. 11,6 kg/h Frischdampf eingespart werden. Bei einer Auslastung der Anlage von 5280 h/a (220 Tage a 24 Stunden) und Kosten von 40 – 80 EUR/t Dampf beträgt die jährliche Ersparnis ca. 2.450- bis 4.900 EUR/a. Die Kosten für einen Drallrohrwärmeübertrager betragen in diesem Leistungsbereich ca. 3.100 EUR, zusätzlich fallen noch Kosten für Installation und Verrohrung an.

Triebkraft für die Umsetzung

Kosteneinsparungen durch Vermeidung unnötiger Dampfverluste bzw. durch Wärmerückgewinnung.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

3.2.8 Minimierung der Verluste des Betriebskessels durch kurze Zykluszeiten

Beschreibung

Während eines Arbeitszyklus wird der Brennraum des Kessels mit Frischluft gespült (Vor- und Nachspülung mit Luft), um die Verpuffung zündfähiger Gemische zu vermeiden. Die dabei entstehenden Wärmeverluste sind abhängig von der Feuerungsleistung, dem Dampfdruck und der Wärmedämmung des Kessels sowie der Vorbelüftungszeit (45 S. 28). Für einen 10 MW-Dampfkessel betragen die Durchlüftverluste ca. 30 kWh pro Startvorgang (66 S. 250). Im Idealfall taktet der Brenner nicht häufiger als ein- bis zweimal pro Stunde (45 S. 28). Um die Durchlüftverluste zu minimieren, können eine Vielzahl von Maßnahmen angewendet werden:

- Art des Kessels: Großwasserraumkessel sind aufgrund ihres Wasserinhalts (und damit ihrer Speicherwirkung) eher träge (langsames Anfahrverhalten/lange Aufheizzeit, langsame Anpassung an Laständerungen) und für eine kontinuierliche Dampfbereitstellung geeignet. Wasserrohrkessel (z. B. Schnelldampferzeuger) haben ein wesentlich geringeres Wasservolumen, dementsprechend geringere Anfahrzeiten und können schneller an Laständerungen angepasst werden (97 S. 24 ff.), (98 S. 3).
- Dimensionierung: Ist der Kessel überdimensioniert, kommt es zu einer häufigen Taktung mit den dementsprechenden Verlusten. Da der Dampfbedarf gegenüber der ursprünglichen Auslegung gesunken sein kann (z. B. durch Energiesparmaßnahmen im Produktionsprozess), sollte der Bedarf regelmäßig überprüft und der Kesselbetrieb entsprechend angepasst bzw. bei einer dauerhaft niedrigen Auslastung von z. B. 25 % der Austausch des Kessels geprüft werden (1 S. 151).
- Auslastung: Der Betrieb mehrerer Kessel in Teillast ist ebenfalls ineffizient, da bestimmte Verluste (z. B. Oberflächenverluste) einen festen Wert haben und dementsprechend bei sinkender Last steigen. So beträgt der Wärmeverlust über die Oberfläche bei Volllast ca. 1 %, bei 50 % Last 2 % und bei 25 % Last 4 % (99 S. 1), (100 S. 6). Bei Teillastbetrieb steigen weiterhin der benötigte Luftüberschuss und damit der Abgasverlust.
- Anzahl der Kessel: Durch Installation mehrerer Kessel geringerer Leistung anstatt eines Kessels mit hoher Kapazität können kurze Arbeitszyklen vermieden werden. Gleichzeitig erhöhen sich Flexibilität (z. B. bei saisonalen Schwankungen beim Dampfbedarf) und Zuverlässigkeit des Systems (Redundanz).
- Modulierende Brenner (mit großem Regelbereich) und Brennerdrehzahlregelung.
- Kesselsteuerung/-management: Die Dampfbereitstellung durch mehrere Kessel erfolgt durch sukzessives Zuschalten der Kessel nach aufsteigenden Grenzkosten für die Dampferzeugung (damit nach absteigender Energieeffizienz (99 S. 2) (siehe auch Kapitel 3.2.3).
- Gleitende Speisewasserregelung.
- Dampfspeicher: Der Kessel kann trotz zyklischem Dampfbedarf bzw. hohen Lastspitzen mit relativ konstanter Last gefahren werden (100 S. 9 ff.).
- Isolierung des Kessels.

Erreichter Umweltnutzen

Reduzierung von Energieverlusten.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine bekannt.

Betriebsdaten

Die Abschätzung des Wärmeverlustes pro Kesselstart (Anlauf) kann über folgende Faustformel erfolgen (83 S. 25):

Formel 3.2-17

$$Q_{Einschaltverlust} = 1{,}26 * Q_{Feuerung} * \Delta\vartheta * t_{Ges} * 10^{-7}$$

Formel 3.2-18

$$t_{Ges} = \left[\frac{(t_{Ö} + t_S)}{2}\right] + t_L$$

Die Temperaturdifferenz zwischen Ansaugluft und Temperatur im Kessel wird folgendermaßen abgeschätzt:

Formel 3.2-19

$$\Delta\vartheta = \vartheta_M - \vartheta_{Luft}$$

Tabelle 3.2-7: Berechnungsbeispiel Wärmeverlust pro Zyklus/Anlauf

Symbol	Beschreibung	Wert
$t_{Ö}$	Öffnungszeit Stellantrieb	40 s
t_L	Vorbelüftungszeit	30 s
t_S	Schließzeit Stellantrieb	30 s
$\dot{Q}_{Feuerung}$	Feuerungsleistung (ohne Economiser)	3642 kW
ϑ_M	Mediumtemperatur (10 bar Dampfdruck)	184 °C
ϑ_{Luft}	Lufttemperatur	24 °C

Quelle: (83 S. 25), Kessel mit 5000 kg/h Dampflieferung bei 10 bar (Kessel UL-S 5000 x 13)

Der Wärmeverlust pro Anlauf beträgt für dieses Beispiel 4,77 kWh. Die Öffnungs- und Schließzeiten sind abhängig von der Kesselgröße und betragen normalerweise ca. 40 - 60 s. Die Vorbelüftungszeit beträgt bis zu 120 s (45 S. 28).

Anwendbarkeit

Die Anwendbarkeit der einzelnen Maßnahmen ist in Abhängigkeit der jeweiligen Prozessführung zu prüfen.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Werden kurze Betriebszyklen festgestellt, ist unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten zu prüfen, welche der oben angeführten Effizienzmaßnahmen zur Vermeidung von Energieverlusten geeignet sind.

Triebkraft für die Umsetzung

Einsparungen bei Brennstoffkosten durch Vermeidung von Energieverlusten. Weiterhin können durch o. g. Maßnahmen die Flexibilität und Zuverlässigkeit des Systems erhöht werden.

Beispiele

Siehe Betriebswirtschaftliche Aspekte.

3.2.9 Energetische Optimierung der Dampfverteilungssysteme

Beschreibung

Das Verteilungssystem transportiert Dampf vom Kessel zu den verschiedenen Endeinsätzen. Obwohl Verteilungssysteme als passiv erscheinen können, regulieren diese Systeme die Lieferung von Dampf und reagieren auf sich ändernde Temperaturen und Druckanforderungen. Folglich erfordert die ordnungsgemäße Leistung des Verteilungssystems sorgfältige Praxis bei der Auslegung und wirksame Instandhaltung.

Erreichter Umweltnutzen

Reduzierung von Energieverlusten.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine Daten vorliegend.

Betriebsdaten

Bei der Verlegung von Dampfleitungen (ebenso Kondensatleitungen) sollten folgende Grundsätze beachtet werden (101 S. 6):

- Neigung der Leitung in Strömungsrichtung, um Kondensatabfluss zu gewährleisten (1:100 – 1:200),
- Längenausdehnung kompensieren, (vor allem die Ausdehnung bei Inbetriebnahme/Anfahren der Anlage und Außerbetriebnahme),
- sorgfältiger Einsatz von Fest- und Loslagern, um die notwendige Flexibilität für Längendehnung zu gewährleisten,
- ausreichend Entwässerungsstellen vorsehen (Kondensatableitung), z. B. für Sattdampfleitungen ca. aller 25m Rohrleitung,
- Tiefpunkte und Leitungsenden entwässern,
- ausreichend Entlüftungsstellen für Dampfleitungen vorsehen, Einsatz von Kondensatableitern mit guten Entlüftungseigenschaften.

Bei der Dimensionierung der Dampfleitungen ist auf ausreichende Rohrdurchmesser zu achten. Bei zu geringen Durchmessern führt die dadurch entstehende hohe Strömungsgeschwindigkeit zu Druck- und damit Energieverlusten. Weiterhin steigen die Erosion, die Gefahr von Wasserschlägen und Beschädigungen von Armaturen durch mitgerissene Wassertropfen. Ein zu geringer Durchmesser erhöht ebenfalls die Geräuschemission durch die Strömung. Sattdampfleitungen werden typischerweise für eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 25 m/s, Heißdampfleitungen für ca. 40 m/s und Kondensatleitungen für 1 - 3 m/s ausgelegt (101 S. 18). Aufgrund des Entstehens von Nachdampf müssen Kondensatleitungen ebenfalls sorgfältig dimensioniert werden. Andernfalls entsteht durch das Nachdampfvolumen ein höherer Gegendruck, was wiederum zu negativen Auswirkungen auf die Kondensatableitung führt. Damit steigt ebenfalls die Gefahr von Wasserschlägen. Die für einen zuverlässigen Betrieb notwendige Kondensatableitung ist sowohl für den Normalbetrieb als auch für die Inbetriebnahme ausreichend zu dimensionieren, da es bei Dampfströmung durch kalte Rohrleitungen zu einem wesentlich höheren Kondensatanfall kommt (siehe auch Kapitel 3.2.11). Armaturen sind auf ihre Eignung für den jeweiligen Einsatz zu überprüfen, angemessen zu dimensionieren und korrekt zu installieren.

Um Energieverluste durch Abstrahlung zu minimieren, ist weiterhin auf eine gute und vollständige Wärmedämmung zu achten. Für Armaturen bzw. für unregelmäßige Komponenten des Systems im Allgemeinen können wiederverwendbare Dämmbeläge und -formteile eingesetzt werden (Kapitel 3.2.10).

Neben der sorgfältigen Dimensionierung von Rohrleitungen ist die regelmäßige Wartung wichtig für einen effizienten und zuverlässigen Anlagenbetrieb. Besonders folgende Punkte sollte beachtet werden (97 S. 9):

- Sicherstellen, dass die Kondensatabscheider korrekt arbeiten (Kapitel 3.2.11),
- korrekte und vollständige Wärmedämmung von Rohrleitungen und Armaturen und regelmäßige Wartung (Kapitel 3.2.10),
- Erkennen (z. B. Meldung durch Mitarbeiter) und Beheben von Leckstellen (auch Luftlecks auf der Saugseite von Pumpen) durch geplante Instandhaltung,
- Prüfen und Beseitigen von ungenutzten Dampfleitungen,
- Prüfung von Rohrleitungen und Armaturinnenteilen auf Beläge (Kapitel 3.2.5),
- Sicherstellen der Dichtigkeit von Flanschen, Verschraubungen und Stopfbuchsen.

Anwendbarkeit

Bei allen Dampfsystemen. Angemessene Dimensionierung des Rohrleitungssystems, Minimierung der Anzahl der engen Biegungen, etc. können am besten in den Stadien der Auslegung und Installation einschließlich bedeutender Instandsetzungen, Änderungen und Nachrüstungen berücksichtigt werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die ordnungsgemäße Dimensionierung im Stadium der Auslegung erbringt innerhalb der Nutzungsdauer des Systems eine gute Amortisation. Während zu gering dimensionierte Rohrleitungen und Armaturen zu Schäden führen, führen zu groß dimensionierte Leitungen und Armaturen zu erhöhten Anschaffungskosten (Rohre, Wärmedämmung) und Wärmeverlusten über die Oberfläche. Für Dampftransport über längere Strecken (z. B. > 50 m) kann es aus Effizienz- und Kostengründen günstiger sein, mit kleinen Querschnitten und damit höheren Drücken zu arbeiten (101 S. 24). Die aus technischer und wirtschaftlicher Sicht optimale Auslegung muss für den Einzelfall bestimmt werden.

Maßnahmen zur Instandhaltung (z. B. Minimierung der Leckstellen, Reparatur bzw. Austausch von Kondensatableitern, Wärmedämmung von Dampf- und Kondensatleitungen) amortisieren sich innerhalb kurzer Zeit.

Triebkraft für die Umsetzung

Kosteneinsparungen durch Energieeffizienz sowie zuverlässigen Anlagenbetrieb und erhöhte Lebensdauer von Anlagenkomponenten.

Beispiele

Weithin eingesetzt.

Dimensionierung von Dampf- und Kondensatleitungen über Onlinerechner, z. B.: Spirax Sarco: http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Calculators/pipes.aspx

3.2.10 Wärmedämmung von Dampfrohrleitungen und Kondensat-Rücklaufrohren

Beschreibung

Durch Wärmedämmung von heißen Oberflächen des Dampfsystems lassen sich Wärmeverluste an die Umgebung erheblich reduzieren. Dadurch lässt sich die Energieeffizienz des Systems steigern (es steht mehr Dampf für die Endanwendung zur Verfügung bei gleichem Brennstoffmassestrom), und es werden instabile Betriebszustände aufgrund von zu starker Kondensation in Dampfleitungen verhindert. Weiterhin dient die Dämmung der Betriebssicherheit, da die Verletzungsgefahr bei Berührung der heißen Oberflächen reduziert wird.

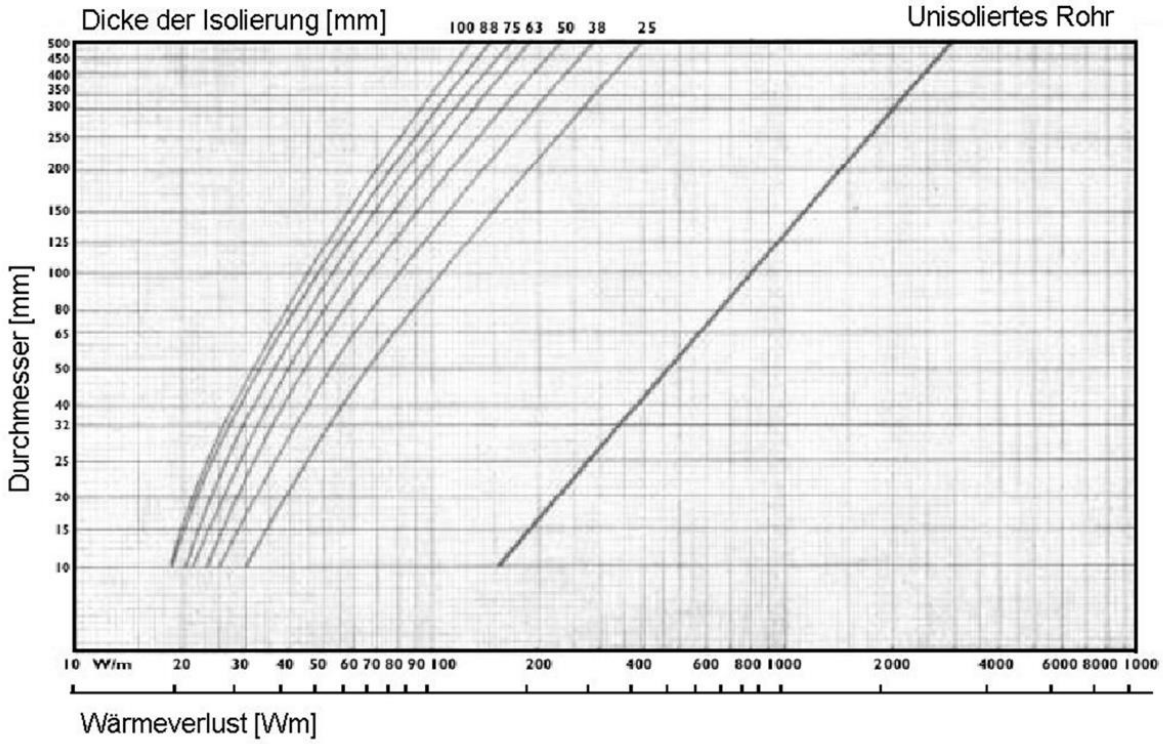
Um Wärmverluste zu vermeiden, müssen Schäden durch mechanische, chemische oder thermische Einwirkung an der Dämmung behoben werden. Nasse oder verhärtete Dämmung kann durch

beschädigte Rohrleitungen hervorgerufen werden. Nach Reparatur der Rohrleitungen muss die Dämmung ersetzt werden. Zum Zwecke von Instandhaltungsarbeiten entfernte Dämmung sollte ebenfalls ersetzt werden. Bei Bauteilen, bei denen häufiger ein Zugang zu Wartungszwecken notwendig ist (z. B. Ventile, Flansche, Armaturen im Allgemeinen, aber auch große, unregelmäßig geformte Komponenten wie Turbinen) bietet sich die Verwendung von wiederverwendbaren und einfach zu demontierenden Dämmbelägen und -formteilen an.

Erreichter Umweltnutzen

Der erreichte Umweltnutzen ergibt sich exemplarisch aus der Differenz der Wärmeverluste einer gedämmten gegenüber einer ungedämmten Rohrleitung (Abbildung 3.2-10, Tabelle 3.2-8) und der damit verbundenen Reduzierung des Brennstoffbedarfes sowie der Emissionen.

Abbildung 3.2-10: Wärmeverlust von Rohrleitungen in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Stärke der Dämmung



Quelle: (45 S. 31). Die Verluste beziehen sich auf eine Oberflächentemperatur des Rohres von 150°C

Tabelle 3.2-8: Wärmeverluste von Dampfleitungen

Typische Wärmeverluste von Dampf- und Kondensatleitungen und Oberflächen in W/m			
Rohrnenndurchmesser	Dämmung	Dampfleitung	Kondensatleitung
Alle Rohre	Gut gedämmt	40-60	20-35
50 mm	Ohne Dämmung	500	230
75 mm	Ohne Dämmung	650	300
100 mm	Ohne Dämmung	800	400
150 mm	Ohne Dämmung	1.200	560
Andere Oberflächen und Flanschverbindungen	Ohne Dämmung	2.500 W/m²	1.000 W/m²

Quelle: (45 S. 32)

Medienübergreifende Wirkungen

Verwendung von Dämmmaterial.

Betriebsdaten

Die Wärmeverluste sollten unter Beachtung der gültigen Standards und Richtlinien ≤ 100 W/m² betragen (38 S. 203). Für gut gedämmte Dampfleitungen betragen die Oberflächenverluste ca. 40 – 60 W/m, für gut gedämmte Kondensatleitungen ca. 20 – 35 W/m (45 S. 32). Die Oberflächen der Wärmedämmung sollten grundsätzlich nicht höher als 15 – 20 K über der Umgebungstemperatur liegen (38 S. 203), (45 S. 26).

Anwendbarkeit

Grundsätzlich sollten alle Rohrleitungen, die heiße Medien transportieren, aus Gründen der Energieeffizienz sowie des Hitzeschutzes gedämmt sein. Der ordnungsgemäße Zustand der Wärmedämmung sollte regelmäßig überprüft werden. Dazu können während des laufenden Anlagenbetriebes beispielsweise Infrarotthermometer und Wärmebildkameras eingesetzt werden. Wiederverwendbare Dämmung kann vorteilhaft bei unregelmäßig geformten Bauteilen sowie dort, wo häufiger Zugang zu Wartungszwecken notwendig ist, eingesetzt werden. Zu- und Ableitung für thermische Kondensatableiter (Kapselkondensatableiter, Bimetall-Kondensatableiter) dürfen nicht gedämmt werden, da sonst kein korrekter Betrieb möglich ist (45 S. 36).

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Dämmung von Rohrleitungen stellt eine der häufigsten und wirtschaftlichsten Effizienzmaßnahmen dar (45 S. 31). In Abhängigkeit der Höhe der Verluste, der Jahresnutzungsdauer sowie der Brennstoffkosten können Amortisationszeiten von weniger als einem Jahr erreicht werden (100 S. 36). Bei der Berechnung von Verlusten in Dampfleitungen, die zu Turbinen führen, sind evtl. Verluste bei der erzielbaren elektrischen Leistung mit einzukalkulieren. Die Berechnung der wirtschaftlichen Dämmstärke kann auf Grundlage der VDI 2055 erfolgen (78) (zur Bestimmung von Wärmeverlusten siehe auch (75)).

Triebkraft für die Umsetzung

Geringer Aufwand der Effizienzmaßnahme, Kosteneinsparungen (kurze Amortisationszeiten), Betriebssicherheit.

Beispiele

Weithin angewandt.

3.2.11 Umsetzung eines Steuerungs- und Reparaturprogramms für Kondensatableiter

Beschreibung

Dampf kondensiert beim Durchströmen von Rohrleitungen aus. Die Menge an Kondensat kann, in Abhängigkeit von Temperatur- und Druckniveau (der Überhitzung des Dampfes), während der Inbetriebnahme bis 4 kg/h und während des Dauerbetriebes bis zu 2 kg/h pro Meter Rohrleitung betragen (102 S. 14) (Tabelle 3.2-9). Die Trennung von Dampf und Kondensat, die Ableitung des Kondensates sowie die Entlüftung der Rohrleitung erfolgt mittels Kondensatableiter. Durch Fehlfunktionen und Verschmutzungen von Kondensatableitern kann es zu erheblichen Energieverlusten (Durchblasen von Dampf) sowie zu Schädigungen am Dampfsystem kommen (bei Störung der Ableitung z. B. Entstehung von Druckstößen und Erosion der Dampfleitungen).

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Typen von Kondensatableitern für verschiedene Einsatzgebiete und mit unterschiedlichen Funktionsweisen sowie zu beachtenden Spezifikationen (siehe z. B. (101 S. 30 ff.).

Tabelle 3.2-9: Erfahrungswerte Kondensatanfall, 100 m Rohrleitung, 100 mm Wärmedämmung

	Anfahrbetrieb (kg/h)			Dauerbetrieb (kg/h)		
100 m	2 bar	5 bar	10 bar	2 bar	5 bar	10 bar
DN 15	4,2	5,2	6,5	2,8	3,8	5
DN 50	20	25	30	4	5,5	7,5
DN 100	60	75	90	6	8,2	11

Quelle: (101 S. 1). Bei ungedämmten Rohrleitungen sind die Dauerbetriebsverluste 10- 20fach höher

Erreichter Umweltnutzen

In Tabelle 3.2-10 werden Leckageverluste von defekten Kondensatableitern in Abhängigkeit von Druckniveau und Größe der Kondensatableiteröffnung angegeben.

Tabelle 3.2-10: Leckageverluste durch undichte Kondensatableiter

Leckageverlust in kg/h in Abhängigkeit von Betriebsdruck und Größe der Ausströmöffnung				
	Betriebsüberdruck in bar			
Kondensatableiteröffnung in mm	1	7	10	20
0,8	0,39	1,5	2,12	-
1,6	1,54	5,99	8,57	16,42
3,2	6,21	23,95	34,38	65,77
4,8	13,93	53,98	77,11	147,87
6,4	24,81	95,71	137,44	262,63
9,5	55,79	215,46	309,35	591,03

Quelle: (103 S. 1)

Betriebsdaten

Die Beurteilung der Kondensatableiter erfolgt anhand akustischer, visueller und thermischer Prüfungen sowie auf Prüfung der elektrischen Leitfähigkeit. Die Kontrolle und Fehlererkennung kann folgendermaßen erfolgen (45 S. 38 f.):

Thermometer

- Geeignet, um Wasserblockaden festzustellen. Einen Durchblasenden Ableiter kann man damit im Allgemeinen nicht identifizieren. Ausnahme: Bimetall-Ableiter führen Kondensat mit Unterkühlung unter Sattdampftemperatur ab. Beim Durchblasen dieses Ableitertyps stellt sich vor dem Ableiter Sattdampftemperatur ein.

Schaugläser (Vaposkope)

- Mittels Spezialschaugläsern in der Dampfleitung kann erkannt werden, ob der Kondensatableiter ordnungsgemäß arbeitet, durchbläst oder verstopft ist. Dazu sind regelmäßige Kontrollen durch das Betriebspersonal notwendig. Die Vaposkope müssen gut zugänglich und einzusehen sein.

Niveausonden

- In einer dem Kondensatableiter vorgeschalteten Prüfkammer (aber auch in Rohrleitung bzw. direkt im Kondensatableiter) sammelt sich Kondensat, dessen Leitfähigkeit gemessen wird. Beim Durchblasen des Ableiters (Sonde im Dampf) ändert sich der elektrische Widerstand. Bei blockierendem Ableiter kühlt sich das Kondensat in der Prüfkammer ab; dies wird mittels Temperaturmessung festgestellt. Diese Überwachungssysteme können mit Handprüfgeräten gekoppelt oder mit einer aktiven Rückmeldung zur Leitwarte ausgestattet werden (100 S. 89).

Ultraschallmessungen (bevorzugt gegenüber dem Abhören mit Stethoskop, da unabhängig von Störgeräuschen aus dem Umfeld)

- Es können unterschiedliche Geräuschstärken bei Ableitern mit (normalerweise) identischem Durchfluss festgestellt werden. Die Funktionsfähigkeit kann durch die Feststellung von zyklisch auftretenden Geräuschen aufgrund des Öffnens und Schließens des Kondensatableiters sowie Ausströmen des Kondensats überprüft werden. Anhand der Stärke der Geräusche können Durchblasen (starke Geräuschentwicklung) sowie Blockade (ungewöhnlich schwache Geräusche) identifiziert werden.
- Die Ultraschallmessung lässt sich auch automatisiert einsetzen. Die gesammelten Daten werden unter Berücksichtigung von kondensatableiterspezifischen Vorgaben mittels EDV ausgewertet. Es existieren Systeme, mit denen ein Vergleich mit historische Daten erfolgen kann.

Thermodynamische Kondensatableiter

- Feststellen des typischen Strömungsgeräusches (ohne Hilfsmittel möglich) und der Schließzeiten ohne Strömungsgeräusch (ca. 15-20 s und mehr, unter 10 s deuten Abnutzung an, keine Schließzeiten Durchblasen).
- Im geschlossenen Zustand sollte nur sehr wenig Dampf (Verdampfung verbleibender Wassertropfen), im geöffneten Zustand Nachdampf sichtbar sein.

Schwimmer-, Bimetallableiter

- Falls der Ausblasstrom nahe der Ausblasöffnung unsichtbar ist, bläst der Kondensatableiter Dampf aus. Falls der Kondensatableiter im offenen Zustand blockiert ist, weist ein lauter und konstanter Ausstrom auf einen Fehler hin (Durchblasen).

Ein Wartungssystem für Kondensatableiter sollte folgende Punkte beinhalten (45 S. 41):

- Ausbildung und Erfahrung des zuständigen Personals,
- Aufnahme jedes Kondensatableiters (in einer Tabelle oder Datenbank),
- Begehung, Beurteilung des Zustandes nach Funktionsweise (in Ordnung/nicht in Ordnung) und Prüfung des Typs, der Größe sowie der korrekten Installation,
- regelmäßige Beurteilung des Zustandes in Abhängigkeit des Druckniveaus
    - > 10 bar: etwa monatliche Überprüfung,
    - 2 - 10 bar: etwa vierteljährliche Überprüfung,
    - < 2 bar: jährliche Überprüfung.

Tabelle 3.2-11: Exemplarische Liste der Fehlerbeschreibung bei der Begehung

Beschreibung	Maßnahme
OK	Keine Maßnahme notwendig
Durchblasen	Dampf strömt aus, maximaler Verlust. Reparatur oder Ersatz des Ableiters
Leck	Dampf strömt aus. Reparatur oder Ersatz des Ableiters
Schnelles Schalten	Thermodynamischer Ableiter ist zu ersetzen
Verstopft	Kondensat kann nicht austreten
Geflutet	Kondensatableiter ist zu klein
Nicht in Betrieb	Die Dampflinie ist außer Betrieb
Nicht getestet	Konnte nicht überprüft werden

Quelle: (45 S. 41)

Anwendbarkeit

Für jedes Dampfsystem wird ein systematisches Wartungsprogramm benötigt, um nicht funktionstüchtige Kondensatableiter zu identifizieren und schnellstmöglich zu ersetzen. Neben den Kondensatableitern sollten auch damit verbundene Bypass-, Absperr- und Rückschlagventile geprüft werden.

Automatisierte Überwachungssysteme können mit jedem Kondensatableitertyp verwendet werden. Besonders sinnvoll ist deren Einsatz bei Ableitern mit hohen Betriebsdrücken und dementsprechend hohen Verlusten bei Leckagen sowie Ableitern, deren Fehlfunktion (Blockade) zu Schäden an der Anlage und Produktionsausfällen führen kann.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Es sind sehr kurze Amortisationszeiten erreichbar, da die Kosten für das Auffinden und Austauschen von defekten Kondensatableitern beträchtlich niedriger sind als die Verluste durch die Leckage.

Eine Abschätzung der Verluste kann mittels Tabelle 3.2-10 erfolgen: Für eine 10 bar Dampfleitung und eine Kondensatableitung mit einer Leckageöffnung von 1,6 mm beträgt der Dampfverlust 8,57 kg/h. Bei einer angenommenen Betriebszeit von 8000 h/a beträgt der Verlust 68,56 t/a. Bei angenommenen Kosten der Dampferzeugung von 40 EUR/t ergeben sich Kosten aufgrund des defekten Kondensatableiters von ca. 2.742 EUR jährlich. Die Kosten für einen Kondensatableiter betragen je nach Anschlussart ca. 200 - 300 EUR (45 S. 41).

Die Intervalle zur Überprüfung von Kondensatableitern bzw. die Wartungsprogramme allgemein müssen über eine Kosten-Nutzen-Analyse festgelegt werden, wobei Faktoren, wie die Anzahl der Ableiter (abhängig von der Größe der Anlage) sowie deren Größe, Alter, Betriebsdruck und Durchsatz, einfließen. So können bspw. bei Anlagen mit 500 leicht zugänglichen Ableitern geringere Prüfintervalle wirtschaftlich sinnvoll sein als bei einer Anlage mit 10.000 Kondensatableitern.

Nachfolgend ein Beispiel zur Berechnung der Dampfverluste (104):

Berechnungsformel der Dampfverluste in [kg/a]:

Formel 3.2-20

$$D = A \cdot B \cdot C$$

Berechnung der Verlustkosten in [EUR/a]:

Formel 3.2-21

$$Verluste = \frac{D}{1000} \cdot E$$

A	Anzahl der defekten Kondensatableiter = 10
B	Dampfverlust je Kondensatableiter = 3 kg/h
C	jährliche Betriebsstunden = 8.000 h/a
D	jährliche Dampfverluste in kg/a
E	Dampfkosten je Tonne Dampf = ca. 35 - 45 EUR (Stand 01.2012)

Der Dampfverlust beträgt 240.000 kg/a, und die jährlichen Verluste betragen ca. 8.400 bis 10.800 EUR. Die Kosten für einen neuen Kondensatableiter betragen je nach Anschlussart inklusive Montage ca. 190 bis 250 EUR, für den Austausch der 10 defekten Ableiter insgesamt 1.900 – 2.500 EUR.

Triebkraft für die Umsetzung

Durch Effizienzsteigerung Einsparung an Brennstoffkosten, Kosten für Wasser sowie Wasseraufbereitung.

Beispiele

Weithin eingesetzt. Siehe auch Betriebswirtschaftliche Aspekte.

3.2.12 Sammeln und Rückführung von Kondensat an den Kessel zur Wiederverwendung

Beschreibung

Bei der Wärmeabgabe in einem Wärmetauscher kondensiert Dampf unter Abgabe von latenter Wärme. Das dabei entstehende Kondensat hat einen beträchtlichen Energieinhalt und sollte, sofern möglich, weitestgehend wiederverwendet werden. Dazu wird das Kondensat von einzelnen Prozesswärmeübertragern innerhalb eines geschlossenen Kondensatnetzes zusammengeführt und in Sammelleitungen mittels Pumpen zum Speisewasserbehälter geleitet. Die Menge und Temperatur des Kondensates sollte durch Schließen von Lecks in den Leitungen und Kondensatableitern sowie durch Wärmedämmung des Kondensatnetzes weitestgehend erhalten werden.

Die Sammlung des Kondensats kann unter atmosphärischem Druck oder Unterdruck geschehen. Fällt Kondensat aus Hochdruckleitungen an, kann eine Rückgewinnung des Entspannungsdampfes erfolgen (Kapitel 3.2.14).

Erreichter Umweltnutzen

Effizienzsteigerung und damit Senkung des Brennstoffbedarfes durch die Rückgewinnung des Energieinhaltes des Kondensats. Geringerer Bedarf an Nachfüll- bzw. Zusatzwasser und Chemikalien zu dessen Aufbereitung sowie geringere Mengen an Abwasser.

Medienübergreifende Wirkungen

Geringerer Bedarf an Nachfüll- bzw. Zusatzwasser und Chemikalien zu dessen Aufbereitung sowie geringere Mengen an Abwasser.

Betriebsdaten

Keine Daten vorliegend.

Anwendbarkeit

Es sollte in allen Dampfsystemen so viel Kondensat wie möglich wiederverwendet werden. Diese Maßnahme ist jedoch nicht anwendbar, falls der erzeugte Dampf direkt für den Prozess verwendet wird. Weiterhin sind Kontaminationen des Kondensats zu beachten. Bei der Auslegung von Anlagen ist es Praxis, die Kondensate in saubere und möglicherweise kontaminierte Kondensatströme zu trennen. Saubere Kondensate stammen aus Anlagenkomponenten, bei denen der Dampfdruck größer als der Prozessdruck ist, wodurch bei Leckagen keine Kontamination erfolgen kann. Diese Kondensate können ohne weitere Maßnahmen verwendet werden. Ist der Dampfdruck niedriger als der Prozessdruck, besteht bei Leckagen die Möglichkeit einer Kontamination. Laut DIN EN 12952-12:2003 und DIN EN 12953-10:2003 ist sicherzustellen, dass rückgeführtes Kondensat die Speisewasserqualität nicht beeinflusst. Gegebenenfalls ist eine Aufbereitung des Kondensates vorzusehen ((92), (80)). Bei möglichen Kontaminationen wird unterschieden in Fremdstoffe, die die Leitfähigkeit anheben (z. B. Säuren, Laugen) und solchen, die die Lichtbrechung verändern (z. B. Öle, Fette, Benzin). Dementsprechend kann eine automatische Überwachung mittels Leitfähigkeitsmessung oder Trübungsüberwachung (auch Messung ph-Wert oder Gesamtkohlenstoff, TOC) erfolgen. Die Kondensate können verwendet werden, wenn eine Kontamination ausgeschlossen wurde.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Wiederverwendung des Kondensates bedeutet erhebliche Reduzierung der Kosten für Brennstoff, Zusatzwasser, Wasseraufbereitung (Chemikalien) und die Abwasserentsorgung (sofern erforderlich).

Triebkraft für die Umsetzung

Kostenreduktion bei Brennstoffbedarf, benötigte Rohwassermenge sowie dessen Aufbereitung und Abwasserentsorgung.

Beispiele

Allgemein angewendet.

3.2.13 Wiederverwendung von Entspannungsdampf

Beschreibung

Bei der Entspannung von Kondensat (Siedekondensat) aus Hochdruckleitungen entsteht ein Teil Kondensat sowie Entspannungsdampf. Die Enthalpie bleibt dabei in Summe konstant, wobei der Entspannungsdampf jedoch wesentlich mehr Enthalpie hat als der Kondensatanteil (101). Der Entspannungsdampf hat die gleiche Qualität wie Frischdampf. Die Verwendung in einem Niederdrucksystem kann zu erheblichen Energieeinsparungen führen. Die Nutzung dieses Entspannungsdampfes (auch Nachdampf) kann energetisch günstiger sein, als lediglich die sensible Wärme des Kondensates zu nutzen. Ist beispielsweise eine Speisewasservorwärmung installiert, kann durch die Senkung der Kondensattemperatur eine Erhöhung der Effizienz der Vorwämung erreicht werden. Da dadurch die Abgastemperatur des Kessels gesenkt wird, steigt dessen Effizienz. Gleichzeitig steht der Entspannungsdampf zur Verfügung. Dieser kann z. B. folgendermaßen genutzt werden (100 S. 110 ff.):

Prozessintern:

1. Thermische Wasseraufbereitung: Werden große Mengen Frischdampf benötigt, steigt der Bedarf an Heizdampf für die Entgasungsanlage. Gleichzeitig entstehen bei hohem Frischdampfbedarf große Mengen Kondensat. Statt den Entgaser mit Hochdruckdampf zu beheizen, kann Entspannungsdampf verwendet werden.
2. Einbindung in die Heizfläche einer dampfverbrauchenden Anlage: Ein Teil der Heizfläche wird abgetrennt und mit Entspannungsdampf versorgt. Das Angebot an Kondensat ist immer dann groß, wenn Entspannungsdampf zum Heizen benötigt wird.
3. Alle Niederdruck-Wärmeübertrager bzw. Anwendungen, die bisher mit Hochdruckdampf über Reduzierung (Drosselung des Dampfdruckes) versorgt wurden: z. B. Verdampfer, Beheizungen durch Dampfeinspritzung.
4. Verbraucher, die von einem Druck von 3 - 8 bar auf einen Betrieb mit 0,5 bar Überdruck umgestellt werden können. Evtl. kann die Anschaffung eines zusätzlichen Wärmeübertragers zur Deckung des Spitzenbedarfes notwendig werden.
5. Luftvorwärmung (siehe auch Kapitel 3.1.1).
6. Der Entspannungsdampf kann mittels eines Thermoverdichters auf ein höheres Druckniveau angehoben werden.

Betriebsintern:

Nutzung für Raumheizung oder Brauchwassererwärmung, wobei beachtet werden muss, dass in Zeiten geringen Heizungs- oder Warmwasserbedarfs nicht der gesamte Nachdampf genutzt werden kann. Die Auskopplung kann z. B. mit einem Kondensatentspanner oder einem Brüdenkondensator erfolgen.

Erreichter Umweltnutzen

Bei Siedekondensat einer Dampfleitung mit Druck 3 - 12 bar und der Entspannung auf 0 - 1 bar entstehen zwischen 5 - 15 % (Gewichtsprozent), bei Drücken von 50 bar entstehen bis zu 30 % Nachdampf (100 S. 104) (vergleiche auch Abbildung 3.2-11). Bei geschickter Einbindung in den Prozess lassen sich Brennstoffeinsparungen in etwa der gleichen Höhe erzielen (100 S. 107).

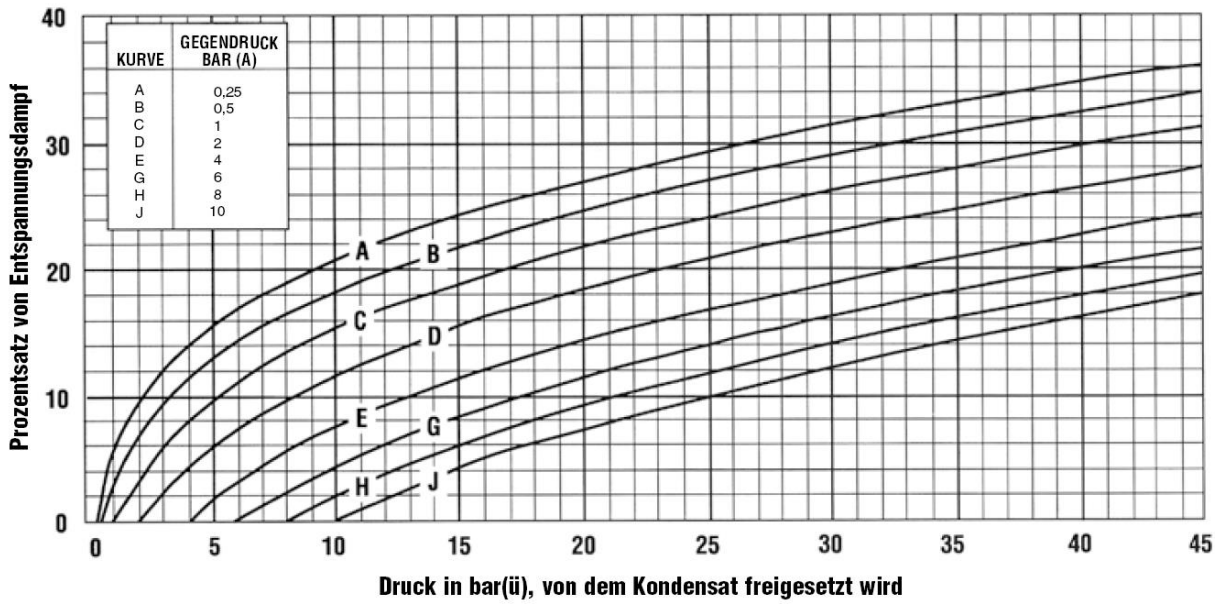
Medienübergreifende Wirkungen

Die Verwendung von Entspannungsdampf kann die Atmosphäre am Arbeitsplatz verbessern, da Nachdampfwolken reduziert werden.

Betriebsdaten

Kondensatrückführung und Nachdampfverwertung werden häufig miteinander verbunden. Die Sammlung des Kondensates kann in Kondensatrohren oder in Kondensatbehältern (Kondensatentspannern) erfolgen. Abbildung 3.2-11 zeigt die auf die Menge des Kondensates bezogene prozentuale Menge des entstehenden Nachdampfes in Abhängigkeit von dem Druck vor und nach der Entspannung. Bei Nutzung von Entspannungsdampf sollte der Entspannungsdruck (Druck nach Entspannung) möglichst gering sein (bis 0,2 - 0,5 bar Überdruck), da die rückgewinnbare Energie mit der Druckdifferenz zunimmt (45 S. 44), (100 S. 108).

Abbildung 3.2-11: Entstehender Entspannungsdampf in Abhängigkeit vom Druckverhältnis



Quelle: (105 S. 6), vgl. (100 S. 105)

Durch den Einsatz eines Thermoverdichters ist es möglich, das Druckniveau des Entspannungsdampfes anzuheben. Dazu wird Hochdruckdampf (sog. Treibdampf) eingesetzt, um Niederdruckdampf anzusaugen. Wenn Niederdruckdampf mit einem Überdruck von 0,5 bar zur Verfügung steht, sollte der Treibdampf mindestens einen Überdruck von 5 bar aufweisen (106 S. 4). Das Dampfgemisch kann wieder als Heizdampf eingesetzt werden.

Anwendbarkeit

Entspannungsdampf kann sowohl aus dem Kondensat als auch aus der Absalzung und Abschlämmung gewonnen werden (Kapitel 3.2.6). Niederdruckdampf kann für Prozesse eingesetzt werden, in denen eine Erwärmung auf knapp unter 100 °C erfolgt. Die Verwendung von Entspannungsdampf kann vor allem dann eine sinnvolle Option sein, wenn Hochdruckkondensat aus wirtschaftlichen Gründen nicht bis zum Kessel zurücktransportiert werden kann. Für die direkte Nutzung von Entspannungsdampf müssen ein Niederdrucknetz und/oder geeignete Verbraucher in räumlicher Nähe zur Verfügung stehen. Der Bedarf an Niederdruckdampf sollte dabei das Angebot an Nachdampf übersteigen. Besteht ein zu großes Angebot an Entspannungsdampf (z. B. Raffinerien, Chemiefabriken) sollte das Kondensat

zur Entgasungsanlage zurückgeführt oder der Einsatz eines Thermoverdichters geprüft werden, da die Ableitung von Entspannungsdampf in die Umwelt Energieverschwendung wäre.

Die Anwendbarkeit der oben beschriebenen Maßnahmen ist aus technischer und wirtschaftlicher Sicht für den einzelnen Anwendungsfall zu prüfen.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Brennstoffeinsparungen, Einsparungen bei Kosten für Zusatzwasser und dessen Aufbereitung. Die Nutzung von Entspannungsdampf führt zu wesentlich höheren Einsparungen als bei der Wärmerückgewinnung aus dem flüssigen Kondensat. Die erzielbaren Einsparungen durch die oben beschriebenen Maßnahmen müssen für den Einzelfall innerhalb einer Kosten-Nutzen-Rechnung dem Aufwand durch benötigte Anlagenkomponenten (z. B. Wärmeübertrager) und Rohrsystemen gegenübergestellt werden.

Triebkraft für die Umsetzung

Kosteneinsparungen Brennstoff

Beispiele

Keine Daten vorliegend.

Berechnungstool: http://www.tlv.com/global/DE/calculator/flash-steam-generation.html

3.3 Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme

Die Wärme kann nur von einem Ort höherer Temperatur (Wärmequelle) zu einem Ort niedrigerer Temperatur (Wärmesenke) fließen (siehe Kapitel 1.2.2.2, Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik), ohne dass dabei Arbeit aufgewendet werden muss (z. B. in Wärmepumpen). Wärmeströme, die von Prozessen, Systemen oder Bauteilen an die Umgebung gezielt (Kühlung) oder ungewollt (Verluste) abgegeben werden, heißen Abwärmeströme.

Das Ziel einer energieeffizienten Prozessgestaltung muss darin bestehen, Abwärme zu vermeiden und einen möglichst großen Anteil der nicht vermeidbaren Abwärme zurückzugewinnen und einer weiteren Verwendung zuzuführen, wenn die dazu erforderlichen Voraussetzungen, z. B. ein passender Wärmeverbraucher, vorhanden sind.

Abwärmeströme können entsprechend der Ausprägung der Wärmequelle wie folgt eingeteilt werden:

1. Diffuse Abwärmeströme, z. B. Strahlung aus Öffnungen von Brennöfen, Strahlung und Konvektion von heißen Bauteiloberflächen bzw. abkühlenden Werkstücken.
2. Stoffgebundene Abwärmeströme wie
   - Heiße Verbrennungsabgase (z. B. aus Wärmekraftmaschinen),
   - Heiße/warme Abgase/Abluft aus thermischen oder Trocknungsprozessen bzw. aus luftbasierten Kühlsystemen (z. B. Kondensatoren von Kältemaschinen),
   - Flüssige Wärmeträger aus Kühlsystemen unterschiedlichster Anlagen (z. B. Kühlwasser aus Motoren, Thermoöle),
   - Überhitzter bzw. kondensierender Wasserdampf aus Prozessdampfsystemen (z. B. aus verfahrenstechnischen bzw. Formgebungsprozessen).

Die Wärmerückgewinnung aus stoffgebundenen Abwärmequellen ist technologisch deutlich einfacher (z. B. durch Wärmeübertrager) als aus diffusen Quellen.

Die „Qualität von Wärme“ und damit deren Wiederverwendbarkeit steigt mit der Temperatur (Exergie der Wärme, siehe Kapitel 1.2.2.2). Man kann grob unterscheiden in

- ► Hochtemperaturwärme (Temperatur > 350 °C), z. B. aus heißen Abgasen,

- Mitteltemperaturabwärme (Temperatur 80 … 350 °C), z. B. aus Thermoölen oder kondensierendem Wasserdampf und
- Niedertemperaturwärme (Temperatur < 80 °C), z. B. aus Warmwasser oder Abluft.

Niedertemperaturwärme kann durch anteiligen Einsatz zusätzlicher Energie in Mitteltemperaturwärme transformiert werden, z. B. durch Wärmepumpen.

In einfachen Systemen kann eine Wärmerückgewinnung direkt unter Einsatz der in diesem Kapitel beschriebenen Technologien und Komponenten erfolgen. In komplexeren Anlagen mit mehreren Wärmequellen und/oder Wärmesenken wird die Wärmerückgewinnung optimaler Weise standort- oder prozessbezogen untersucht. Dazu können u. a. Werkzeuge wie die Pinch-Methode verwendet werden, um eine prozessinterne Wärmenutzung oder den Wärmetransport zwischen einzelnen Prozessen zu realisieren (siehe Kapitele 2.3, 2.4 und 2.12).

Abwärme in unterschiedlichen Mengen und auf variablen Temperaturniveaus (Temperatur aufsteigend in Aufzählung) entsteht z. B.

- in Großküchen, -bäckereien und -wäscherein (Temperatur < 100 °C),
- in der Lebensmittel-, Textil- und Papierindustrie,
- im Maschinen- und Fahrzeugbau,
- in der Gummi- und Kunststoffindustrie,
- in der Metall bearbeitenden Industrie und der Nichteisenmetallurgie,
- in der chemischen Verfahrenstechnik,
- in der Mineral verarbeitenden Industrie,
- in der Stahlerzeugung und -verarbeitung und
- in der Glas- und Keramikindustrie (Temperatur bis rund 2000 °C).

Wärmerückgewinnungstechnologien

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung (13):

1. **Direkte Wärmerückgewinnung:** Die Abwärme wird an ein anderes Medium übertragen und für einen Wärmeverbraucher niedrigerer Temperatur genutzt. Dazu dienen Wärmeübertrager (siehe 3.3.1), wenn das Entstehen der Abwärme und der Wärmebedarf des Verbrauchers gleichzeitig erfolgen. Eine zeitversetzte Nutzung der Abwärme ist nur durch den Einsatz thermischer Speicher realisierbar.
2. **Indirekte Wärmerückgewinnung:**
   - Die Temperatur der Abwärme wird mittels einer Wärmepumpe (siehe 3.3.2) angehoben und kann dann für einen Wärmeverbraucher höherer Temperatur genutzt werden. Dazu wird zusätzliche Energie benötigt in Form von Strom bei Kompressions-Wärmepumpen oder Brenngas bei Ab-/Adsorptions-Wärmepumpen.
   - Die Abwärme dient als Heizmedium für eine Ab-/Adsorptions-Kältemaschine (siehe 3.3.2), mit der Kälte für einen geeigneten Verbraucher erzeugt wird (faktisch ein Absenken der Temperatur der Abwärme).
   - Die Abwärme wird in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt und Verbrauchern (z. B. Stromnetz) zur Verfügung gestellt. Dazu eignet sich nur Hochtemperaturabwärme in einem Dampfkraft-, ORC-, Gasturbinen- oder Stirlingprozess oder durch Nutzung thermoelektrischer Generatoren.

Die hier getroffene Einteilung deckt sich weitestgehend mit dem Vorgehen in zahlreichen der angegebenen Quellen und stellt eine mögliche Variante dar. Zur zeitversetzten direkten Nutzung von Abwärme sind unterschiedliche **Wärmespeichertechnologien** bekannt und teilweise marktverfügbar (siehe Kapitel 3.3.2). Die Verfahren der indirekten Abwärmenutzung durch Umwandlung der Wärme in Strom werden in (13) (außer Thermoelektrik) im Überblick beschrieben.

Bei der Umsetzung von Abwärme-Nutzungskonzepten müssen sowohl technologische als auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Daher ist folgende Rangfolge zu beachten:

1. Vermeiden der Abwärmeentstehung durch geeignete Maßnahmen (Wärmedämmung, Prozessoptimierung),
2. Reintegration der Abwärme in den Prozess (prozessinterne Wärmerückgewinnung, z. B. für die Vorwärmung von Bauteilen),
3. Nutzung der Abwärme im selben Betrieb (betriebsinterne Wärmerückgewinnung, Vermeidung eines ineffizienten Wärmetransportes),
4. Abgabe der Wärme an Dritte (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung, 3.4) bzw. vorherige Umwandlung der Wärme in Kälte oder Strom.

Zur Untersuchung der Abwärmenutzungspotenziale muss zunächst eine systematische Analyse der Wärmequelle erfolgen, dazu zählen:

- die Wärmemenge bzw. die Wärmeleistung sowie deren zeitliche Verfügbarkeit (kontinuierlich oder schwankend),
- das Temperaturniveau der Abwärme und deren Erscheinungsform (diffuse Abwärme, gasförmiger oder flüssiger Wärmeträger),
- das Vorhandensein eines Wärmeverbrauchers mit den passenden Spezifikationen zur Nutzung der verfügbaren Abwärme.

Zur erfolgreichen wärmetechnischen und wirtschaftlichen Integration eines Abwärmenutzungssystems in einen Prozess müssen weitere Faktoren analysiert und beachtet werden:

- Die Temperatur der Abwärmequelle muss höher sein als die der Wärmesenke (Verbraucher) – anderenfalls werden eine Wärmepumpe und damit Zusatzenergie benötigt.
- Die Abwärmeleistung sollte dauerhaft größer sein als die Wärmeleistung des Verbrauchers – anderenfalls muss ein zusätzlicher Wärmeerzeuger bereitgehalten werden.
- Der zeitliche Verlauf der Abwärmebereitstellung und des Wärmebedarfes müssen übereinstimmen – anderenfalls werden zusätzlich Wärmespeicher benötigt.

Sehr hilfreich bei der Bewertung der Potenziale von Abwärme zur weiteren Nutzung ist der Abwärmerechner des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (107).

Im nachfolgenden Kapitel werden zunächst die Methoden der direkten Wärmerückgewinnung durch Wärmeübertrager beschrieben.

3.3.1 Wärmeübertrager

Beschreibung

Die direkte Wärmerückgewinnung wird durch Wärmeübertrager realisiert, wobei ein strömendes oder ruhendes heißes Fluid (Gas, Flüssigkeit) Wärme an ein entsprechendes kaltes Fluid überträgt. Bei **Mischwärmeübertragern** stehen beide Fluide in direktem Kontakt und werden vermischt, meist kondensiert dabei eine dampfförmige Komponente. Die Phasengrenze Dampf/Flüssigkeit kann dabei als virtuelle Wärmeübertragerfläche betrachtet werden.

Mischwärmeübertrager können nur eingesetzt werden, wenn beide Fluide die gleiche Qualität aufweisen, typischer Weise in der Kombination Gas/Flüssigkeit mit einem kondensierenden Dampf als gasförmige Komponente (Wasserdampf/Wasserflüssigkeit). Durch den Direktkontakt der Fluide ergeben sich kompakte Bauformen, typische Beispiele sind

- Einspritzkondensatoren (Einspritzen von Wasserflüssigkeit in Wasserdampf),
- Speisewasser-Mischvorwärmer (Einleiten von Wasserdampf in Wasserflüssigkeit).

Werden die Fluide stofflich durch eine Wand (materielle Wärmeübertragerfläche) getrennt, so spricht man von Oberflächenwärmeübertragern und unterscheidet:

- Rekuperatoren – beide Fluide strömen durch den Wärmeübertrager (z. B. Platten- oder Rohrbündel-Wärmeübertrager),
- Regeneratoren – die Fluide strömen zeitlich alternierend über eine (rotierende) Speichermasse (z. B. Luftvorwärmer),
- Rührkessel – eines der Fluide ruht in einem Behälter (z. B. Warmwasserbereiter)

und einige Sonderbauformen (z. B. Wärmerohr-Wärmeübertrager).

Die Wärmeübertragung erfolgt durch Konvektion, Wärmeleitung und ggf. auch durch Strahlung. Es gibt eine sehr große Vielfalt unterschiedlicher Ausführungen von Wärmeübertragern. Bei der Auswahl der Oberflächenwärmeübertrager spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle, hauptsächlich der Zustand der Fluide (Gas/Gas, Gas/Flüssigkeit, Flüssigkeit/Flüssigkeit, mit bzw. ohne Phasenwechsel [Verdampfen/Kondensieren], evtl. Korrosivität, Verschmutzungen), das Druck- und Temperaturniveau, die Stromführung der Fluide (Gleich-, Gegen-, Kreuzstrom) und der zur Verfügung stehende Bauraum.

Nachfolgend werden ausgewählte wichtige Bauformen aufgezählt und einige wichtige Auswahlfaktoren beschrieben (G … Gas, F … Flüssigkeit). Die angegebenen leistungsspezifischen Kosten (falls verfügbar) basieren auf Internetrecherchen und unterliegen ständigen Änderungen (13).

<u>Rekuperatoren (inklusive Sonderbauformen):</u>

- *Plattenwärmeübertrager* – typisch für G/G und F/F (ohne Phasenwechsel), parallele (perforierte) Platten, dazwischen Spalte mit wechselseitiger Strömung der Fluide, bis etwa 750 °C, nur für niedrige Drücke, bis 400 MW Leistung verfügbar, Kosten kleiner 10 €/kW;
- *Rohrbündel-Wärmeübertrager* – typisch für F/F bzw. G/F (auch mit Phasenwechsel), parallele Rohre in Behälter, evtl. mit (Mehrfach-)Umlenkung, je ein Fluid im Rohr bzw. im Außenraum, Hochdruckfluide in Rohren, bis etwa 550 °C, bis 20 MW verfügbar, Kosten bis 150 €/kW;
- *Rippenrohr- bzw. Lamellenwärmeübertrager* – typisch für G/F, Flüssigkeit im Rohr (auch mit Phasenwechsel und/oder unter Druck), Oberflächenvergrößerung auf Gasseite durch Rippen (Lamellen), bis etwa 300 °C, verfügbar bis 1.000 kW, Kosten kleiner 15 €/kW;
- *Doppelrohr-Wärmeübertrager* – typisch für F/F (auch mit Phasenwechsel), koaxiale Rohre (auch als Spirale), moderate Drücke, bis etwa 150 °C, bis 3,5 MW verfügbar;
- *Wärmerohr-Wärmeübertrager* – typisch für G/G (ohne Phasenwechsel), Rippenrohr-Wärmeübertrager mit geteilter Stromführung für Heiß-/Kaltgas → Kopplung über Wärmerohre, bis etwa 650 °C, enger Arbeitstemperaturbereich, bis 3 kW je Wärmerohr;
- *Spiral-Wärmeübertrager* – typisch für F/F und G/G (ohne Phasenwechsel), spiralförmig um einen Kern gewickelte Bleche, dazwischen Spalte mit wechselseitiger Strömung der Fluide, bis etwa 700 °C, nur für niedrige Drücke, bis 800 kW Leistung verfügbar.

<u>Regeneratoren:</u>

- *Rotations-Wärmeübertrager* – typisch für G/G (ohne Phasenwechsel), zylindrische Speichermasse (meist Lamellenstruktur) rotiert in geteiltem Strömungskanal für Heiß-/Kaltgas, bis etwa 650 °C, nur für niedrige Drücke, bis 1,6 MW Leistung verfügbar.

<u>Rührkessel:</u>

- *Rührkessel-Wärmeübertrager* – typisch für F/F (auch mit Phasenwechsel), ein Fluid ruht im Behälter, zweites Fluid (auch kondensierend/verdampfend) strömt durch innen liegende Rohrwendel bzw. Behälter-Doppelwand, bis 350 °C, Hochdruckfluid nur im Rohr.

Außerdem sind sog. *Rekuperator- bzw. Regenerator-Brenner* verfügbar, diese können jedoch nur die Abwärme der eigenen Abgase zur Verbrennungsluftvorwärmung nutzen und stellen damit keine universelle Technologie der direkten Abwärmenutzung dar.

Ein typischer Anwendungsbereich von Rippenrohr-, Lamellen- bzw. Rotations-Wärmeübertragern liegt in der Klimatisierung (siehe Kapitel 3.9).

Wärmeübertrager sollten entsprechend der typischen Betriebsbedingungen der Anlage, in die sie integriert werden, angepasst werden. Sich verändernde Anlagenparameter beeinflussen auch die Betriebsparameter des Wärmeübertragers (z. B. durch variable Wärmedurchgangskoeffizienten), umgekehrt beeinflussen die Wärmeübertrager auch die Anlage (z. B. durch Druckverluste).

Die Wärmeleistung eines Wärmeübertragers ist bei vorgegebenen Fluidtemperaturen proportional zum Wärmedurchgangskoeffizienten und der Wärme übertragenden Fläche (Trennwand bei Oberflächenwärmeübertragern). Der Wärmedurchgangskoeffizient hängt hauptsächlich von den Wärmeübergangskoeffizienten der Fluide an die Wand ab, deren Wärmeleitfähigkeit ist von untergeordneter Bedeutung. Für den Wärmeübergang gilt allgemein:

a) In Gasströmungen ist der Wärmeübergang eher schlecht, bei Flüssigkeiten ergibt sich ein Wärmeübergang in der Höhe des etwa Fünfzigfachen, bei kondensierenden/verdampfenden Fluiden etwa des Fünfhunderfachen des Gaswärmeüberganges.
b) Wärmeübergangskoeffizienten können durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten (höhere Volumenströme der Fluide), Turbulenzen (Umlenkungen, strukturierte Oberflächen) oder Rauigkeiten (Sandstrahlen) vergrößert werden. Die thermische Leistung des Wärmeübertragers erhöht sich nicht im gleichen Maße. All diese Maßnahmen führen jedoch auch zu höheren Druckverlusten (Wärme-Impulstransport-Analogie).
c) Verschmutzungen (Fouling) der Wärme übertragenden Fläche verringern durch Bildung einer thermischen Isolierschicht den Wärmeübergang teils drastisch. Auskondensierende Feuchtigkeit bei verschmutzten Gasströmungen intensiviert die Schmutzanhaftung deutlich. Schmutzablagerungen können durch
   - Verwendung gering verschmutzter Fluide bzw. deren vorheriger Reinigung,
   - hohe Strömungsgeschwindigkeiten bei minimalen Turbulenzen und
   - glatte bzw. antihaftbeschichtete Oberflächen

reduziert werden. Anderenfalls sind die Wärmeübertrager – falls möglich – in Intervallen zu reinigen. Dünnschicht-Wärmeübertrager für Spezialanwendungen bei stark verschmutzten Fluiden bzw. bei einer gewünschten Bildung von Ablagerungen (z. B. das Auskristallisieren von Feststoffen aus Fluiden) verfügen über eine permanente einseitige mechanische Reinigung der Wärme übertragenden Fläche.

Die Wärme übertragende Fläche kann durch Rippen (meist auf der Gasseite von Wärmeübertragern) deutlich vergrößert werden, wobei die Flächenvergrößerung nicht linear zur Vergrößerung des übertragenen Wärmestromes beiträgt. Typische Bauformen berippter Wärmeübertrager sind Rippenrohr-, Lamellen- und Wärmerohr-Wärmeübertrager.

Erreichter Umweltnutzen

Die aus Abwärmenutzung gewonnene Wärme substituiert dieselbe Wärmemenge, die infolgedessen nicht aus Primärenergieträgern bereitgestellt werden muss und vermeidet – speziell bei Wärmeerzeugung aus fossilen Brennstoffen – die daraus resultierenden Umweltbelastungen.

Medienübergreifende Wirkungen

Der Betrieb von Wärmeübertragern hat keine signifikanten Auswirkungen auf die Umwelt. Wärmeübertrager werden meist aus Metallen (Bau- bzw. Edelstähle, Kupfer, Aluminium) gefertigt und können am Ende der Betriebszeit recycelt werden.

Betriebsdaten

Wärmeübertrager benötigen für den Betrieb in der Regel weder Energie (außer evtl. Antriebsleistung für Fluidpumpen) noch Betriebsstoffe (Ausnahme Reinigung, siehe unten). Für die Installation der Wärmeübertrager muss der entsprechende Bauraum bei minimaler Länge der Zu- und Ableitungen der Fluide verfügbar sein.

Der Betrieb eines Wärmeübertragers kann durch Messung der Ein- und Austrittstemperaturen (z. B. durch Thermoelemente bzw. Widerstandsthermometer) und der Druckverluste der Fluidströme (z. B. Druckmesstechnik) erfolgen. Aus dem Massestrom, den spezifischen Wärmekapazitäten und den Temperaturdifferenzen lässt sich die Wärmeleistung des Wärmeübertragers berechnen (siehe 1.2.2.1). Diffuse Wärmeverluste über die Oberfläche des Systems (Hotspots) können mit Infrarot-Messtechnik (siehe 2.10.1) detektiert werden.

Steigende Druckverluste und sinkende Wärmeleistung sind Indikatoren für eine Verschmutzung des Wärmeübertragers, z. B. durch chemische, mineralische oder biologische Ablagerungen aus kontaminierten Fluiden (z. B. organischer oder anorganischer Schmutz, Karbonate (siehe 3.2.6), Kesselstein). Verschmutzte Fluide dürfen nur in Wärmeübertragern eingesetzt werden, die sich in Intervallen reinigen lassen. Dazu existieren z. B. folgende Möglichkeiten:

- Einsatz von Chemikalien (z. B. Beizen mit Säuren) bzw. Lösungsmitteln, die die Ablagerungen ohne Angriff der Wärmeübertragerstruktur beseitigen (Gefahr von medienübergreifenden Wirkungen),
- Einsatz von zu Wartungszwecken demontierbaren Plattenwärmeübertragern (Reinigung mechanisch),
- Mechanische Reinigung der Rohrinnenseite von Rohrbündel-Wärmeübertragern durch Kugeln, Bürsten oder Wasserstrahlbohren.

Wartungsintervalle sind anhand der speziellen Betriebserfahrungen des jeweiligen Wärmeübertragers festzulegen.

Anwendbarkeit

Wärmeübertrager werden in den verschiedensten Bereichen (siehe oben) zur direkten Nutzung von Abwärme sehr erfolgreich eingesetzt (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung 3.4 inkl. Anhang 7.10.3, Klimatisierung 3.9). Der erfolgreiche Einsatz hängt davon ab, ob es einen geeigneten Verbraucher für die zurückgewonnene Wärme gibt.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Amortisationszeit eines Wärmeübertragers berechnet sich überschlägig aus den Invest- und Betriebskosten für den Wärmeübertrager (evtl. einschließlich Kapitaldienst) und den kumulierten Wärmegestehungskosten der durch die Abwärmenutzung substituierten Wärme. Typische Amortisationszeiten sollten zwischen wenigen Monaten und max. 3 Jahren liegen.

Die Amortisationszeit kann deutlich verkürzt werden, wenn für bestimmte Arten der Abwärmenutzung Fördermittel bzw. zinsgünstige Kredite eingesetzt werden können.

Triebkraft für die Umsetzung

- Senkung der Kosten der Wärmeerzeugung durch Wärmerückgewinnung,
- Einsparung von Primärenergieträgern und – speziell bei fossilen Energieträgern – der damit verbundenen Emissionen (CO_2, NO_x, Staub),
- Verbesserung des Anlagenbetriebes durch anlageninterne Optimierung der Wärmeströme (Senkung der Betriebskosten).

Beispiele

a) Die Limbacher Oberflächenveredlung GmbH in Limbach-Oberfrohna installierte einen Wärmeübertrager zur Rückgewinnung von Abwärme eines Pulvereinbrennofens. Die Wärme wird als Prozesswärme für die Vorbehandlung von Produkten wiederverwertet (108).

b) Die Bergquell Brauerei in Löbau hat 2010 einen Wärmeübertrager zur Schwadenkondensation in Betrieb genommen. Mit der rückgewonnenen Wärme wird Prozesswärme für den Maischebehälter kostengünstig und umweltfreundlich bereitgestellt (109).

c) Die Bruichladdich Distillery in Bruichladdich hat im Jahr 2013 einen Wärmeübertrager zur Abwärmenutzung integriert. Dieser transferiert überschüssige Destillations-Prozesswärme auf den Heizkreislauf des Besucherzentrums (110).

d) Das Portland-Zementwerk in Rohrdorf installierte im Jahr 2011 einen innovativen Wärmeübertrager zur Nutzung von Abwärme aus gebranntem Klinker. Damit wird Wärme für den Betrieb einer SCR-Anlage (SCR… Selektive Katalytische Reduktion) bereitgestellt (111).

3.3.2 Wärmespeicher

Beschreibung

Wärmespeicher dienen der Überbrückung zeitlicher, bei mobilen Speichern auch örtlicher Diskrepanzen zwischen der Bereitstellung von Wärme (Abwärme) und deren Bedarf (Nutzwärme). Damit sind Wärmespeicher eine energetische Schlüsselkomponente zur Nutzung von Abwärme aus zyklischen thermischen Prozessen, bei denen sich Heiz- und Kühlphasen zeitlich abwechseln und die beim Kühlen frei werdende Abwärme mittels eines Wärmespeichers für die sich anschließende nächste Heizphase nutzbar gemacht wird.

Im Gegensatz zu Wärmeübertragern, die Wärmeströme nur stationär (zeitgleich) übertragen können, erfordern Wärmespeicher eine instationäre Betriebsweise mit zeitlich wechselnden Be- und Entladephasen. Regeneratoren (siehe Kapitel 3.3.1) verfügen als spezielle Ausführung eines Wärmeübertragers ebenfalls über eine Speichermasse und repräsentieren damit eine Übergangstechnologie zwischen Wärmeübertrager und Wärmespeicher.

Prinzipiell besteht der Vorgang der Wärmespeicherung aus drei Phasen, dem Beladen (Zufuhr der Abwärme in den Speicher), der Bereitschaftsphase (Speichern) und dem Entladen (Abfuhr der Nutzwärme aus dem Speicher). Die Wärmezufuhr und -abfuhr erfolgt mit Hilfe eines fluiden Wärmeträgers (flüssig oder gasförmig, auch kondensierend/verdampfend). Aus diesem Grund sind stoffgebundene Abwärmeströme gut speicherbar, diffuse Abwärme kann i. d. R. nicht eingespeichert werden. Die Speicherung der Wärme übernimmt das eigentliche Speichermedium. Die einzelnen Phasen können sich auch überlagern, z. B. bei gleichzeitigem Be- und Entladen eines sog. Pufferspeichers.

Das Be- bzw. Entladen kann direkt erfolgen, dann fungiert das Speichermedium gleichzeitig als Wärmeträger und es ist kein zusätzlicher Wärmeübertrager erforderlich (nur bei fluiden Speichermedien). Beim indirekten Be- bzw. Entladen erfolgt der Wärmetransport zwischen Wärmeträger und Speichermedium mit Hilfe eines rekuperativen Wärmeübertragers (siehe Kapitel 3.3.1).

Es gibt drei unterschiedliche physikalische Prinzipien zur Speicherung thermischer Energie, die nachfolgend kurz erläutert werden und als Grundlage zur Strukturierung des Kapitels dienen:

a) Sensible Wärmespeicher nutzen die Wärmekapazität eines festen oder flüssigen Speichermediums in Zusammenhang mit einer Temperaturdifferenz, deshalb wird von sensibler (fühlbarer) Wärme gesprochen. Die Speicherung der zugeführten Wärme erfolgt als innere Energie des Speichermediums, ohne dass dabei ein Phasenwechsel auftritt.

b) Latente Wärmespeicher nutzen den Phasenwechsel fest/flüssig eines Speichermediums, dem sog. Phasenwechselmaterial (PCM … Phase Change Material). Im Ausnahmefall des sog. Nassdampf- oder Gefällespeichers wird anteilig der Phasenwechsel flüssig/gasförmig genutzt. Da der Phasenwechsel bei konstanter Temperatur abläuft wird von latenter (versteckter) Wärme gesprochen. Die Speicherung der zugeführten Wärme erfolgt ebenfalls als innere Energie des Speichermediums, wobei ein Phasenwechsel auftritt.

c) Sorptive Speicher nutzen die physikalische oder chemische Bindung eines Zweistoffsystems zur Speicherung von Wärme. Bei dem Zweistoffsystem handelt es sich um ein Gas und (meist) einen Feststoff. Bei Zufuhr von Abwärme (Beladen des Speichers) wird diese Bindung getrennt, die Stoffe liegen einzeln vor und werden gelagert (Bereitschaft). Beim Wiederherstellen der Bindung wird die Nutzwärme wieder frei (Entladen des Speichers). Es können physikalische (physisorptive Speicher) oder chemische Bindungen (chemisorptive bzw. thermochemische Speicher) genutzt werden.

Während des Be- und Entladens treten immer Wärmeverluste vom Wärmeträger bzw. Speichermedium an die Umgebung auf, während der Bereitschaft gibt es Wärmeverluste i. d. R. nur bei sensiblen und latenten Speichern (sog. Bereitschaftsverluste, minimierbar durch Wärmedämmung). Die Auswahl eines Wärmespeichers muss anhand unterschiedlicher Kriterien erfolgen, die im Wesentlichen vom Energiesystem, in das der Wärmespeicher integriert werden soll, abhängen. Dazu zählen:

- das Temperaturniveau der anfallenden Abwärme und der benötigten Nutzwärme,
- die Speicherkapazität (speicherbare Wärmemenge),
- die Speicherleistung (übertragbare Wärmemenge pro Zeiteinheit beim Laden/Entladen),
- der zeitliche Leistungsverlauf der Wärmequelle (Abwärmeressource) und der Wärmesenke (Nutzwärmeverbraucher) sowie
- weitere Kriterien wie ökonomische, ökologische und sicherheitstechnische Aspekte.

Die Effizienz eines Wärmespeichers kann durch unterschiedliche Wirkungs- oder Nutzungsgrade beschrieben werden. Der energetische Wirkungsgrad eines Wärmespeichers wird entsprechend

Formel 3.3-1

$$\eta_{en} = \frac{ausgespeicherte\ Wärmemenge}{eingespeicherte\ Wärmemenge + Hilfsenergie}$$

bestimmt, wobei bei kurzen Bereitschaftsphasen (hohe Zyklenzahlen) und thermisch gut gedämmten Speichern energetische Wirkungsgrade $\eta_{en} > 0{,}9$ problemlos möglich sind. Die ein- und ausgespeicherten Wärmemengen können beim Be- und Entladen z. B. durch Wärmemengenmesser bestimmt werden. Nutzt man statt der Wärmemengen (Energie) die Exergie der Wärme (siehe Kapitel 1.2.2.3), so ergibt sich ein exergetischer Wirkungsgrad, der zusätzlich Informationen über das Temperaturniveau der ein- und ausgespeicherten Wärme enthält.

Alternativ kann auch ein energetischer Nutzungsgrad angegeben werden, der die in einem definierten Zeitraum – z. B. ein Jahr (Jahresnutzungsgrad) – insgesamt gespeicherte tatsächliche Wärmemenge zu der in diesem Zeitraum maximal speicherbaren Wärmemenge in Relation setzt

Formel 3.3-2

$$\eta_{Nutz} = \frac{kumuliert\ gespeicherte\ Wärmemenge\ in\ einem\ Zeitraum}{maximal\ speicherbare\ Wärmemenge\ im\ selben\ Zeitraum}.$$

Der Nutzungsgrad ist eine sehr wichtige Größe zur Auslastung und damit zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines Wärmespeichers.

Weitere Grundlagen zur Wärmespeicherung finden sich in übersichtlicher Form in (112).

Sensible Wärmespeicher

Sensible Wärmespeicher nutzen die Wärmekapazität eines flüssigen oder festen Speichermediums und prägen diesem eine Temperaturdifferenz auf. Dieser Zusammenhang lässt sich anschaulich als Gleichung der Form

Formel 3.3-3

$$Q = \frac{1}{3600}\, \varrho\, c_p\, V\, \Delta T$$

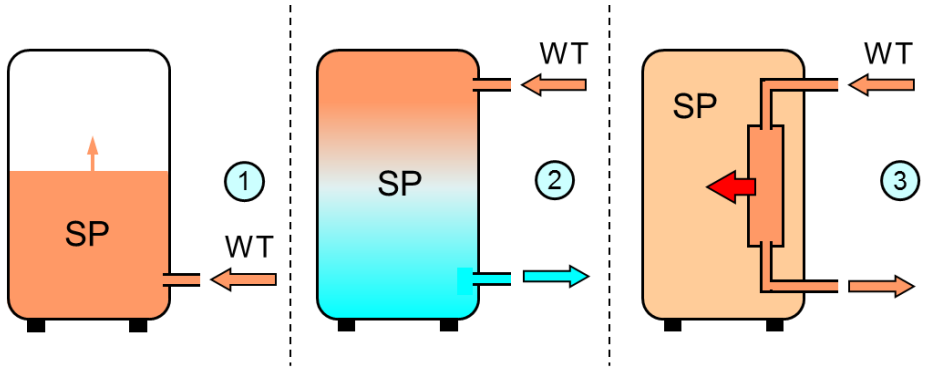
darstellen, wobei Q den Wärmeinhalt (in kWh) beschreibt, ϱ die Dichte (in kg/m^3) und c_p die spezifische Wärmekapazität [in kJ/(kg K)] des Speichermediums, V das Speichervolumen (in m^3) und ΔT die aufgeprägte Temperaturdifferenz (in K). Letztere ergibt sich im einfachsten Fall näherungsweise aus der Differenz der Temperatur der eingespeicherten Abwärme (Wärmequelle) und der der ausgespeicherten Nutzwärme (Wärmesenke).

Warmwasserspeicher

Die am weitesten verbreiteten Ausführungen sensibler Wärmespeicher nutzen das flüssige Speichermedium Wasser, da dieses über optimale Eigenschaften verfügt. Aufgrund der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität von Wasserflüssigkeit ergibt sich als charakteristische Speicherdichte ein Wert von 1,16 kWh/(m^3 K), d. h. pro 10 K Temperaturdifferenz können je 1 m^3 Speichervolumen 11,6 kWh Wärme gespeichert werden. Außerdem ist Wasser wirtschaftlich in großen Mengen verfügbar, umweltfreundlich, bei ausreichendem Korrosionsschutz des Speicherbehälters chemisch neutral, nicht brennbar und recyclebar (falls kontaminiert).

Warmwasserspeicher können für Nieder- und Mitteltemperaturabwärme von Raumtemperatur bis etwa 95 °C als drucklose Systeme eingesetzt werden. Bei höheren Speichertemperaturen (Heißwasserspeicher) muss zur Vermeidung des Siedens der Druck im Speicher angehoben werden, damit werden die Speicher zu Druckbehältern, die entsprechend der Richtlinien für Druckgeräte aufwändig gefertigt und regelmäßig gewartet werden müssen.

Abbildung 3.3-1: Warmwasserspeicher



Prinzipdarstellung der Beladevarianten eines Warmwasserspeichers (© Hochschule Zittau/Görlitz)

Liegt die Abwärme als stoffgebundener Abwärmestrom (siehe Kapitel 3.3) in Form von Warmwasser vor (Wärmeträger WT), kann dieses direkt als Speichermedium (SP) genutzt werden, man spricht von einer direkten Beladung [Fälle (1) und (2) in Abbildung 3.3-1, Entladen umgekehrt]. Dabei wird kein Wärmeübertrager benötigt, die Be- und Entladeleistung kann bei fixen Temperaturen einfach über den Wärmeträgervolumenstrom (Pumpe) geregelt werden. Bei Mengenspeichern (1) variiert das Volumen

des Speichermediums im Speicherbehälter je nach Ladezustand. Die Temperatur des Speichermediums ist im gesamten Speicher nahezu konstant (energetische Mitteltemperatur).

Bei sog. Schichtenspeichern (2) besteht das Ziel in der Erhaltung einer durch Dichteunterschiede des Wassers bedingten Temperaturschichtung im Speicher (Warmwasser oben, Kaltwasser unten). Damit kann aus dem Speicher oben Nutzwärme entnommen werden, deren Temperatur oberhalb der Mitteltemperatur des Speichermediums liegt. Beim Beladen wird – wie in Abbildung 3.3-1 Fall (2) gezeigt – Warmwasser (Abwärme) im oberen Bereich eingebracht und gleichzeitig unten Kaltwasser entnommen, der Behälter ist immer vollständig mit Speichermedium gefüllt. Beim Entladen wird oben Warmwasser (Nutzwärme) entnommen bei gleichzeitiger Kaltwasserzufuhr unten.

Handelt es sich beim Wärmeträger nicht um Wasser, so muss dieser stofflich vom Speichermedium getrennt werden, es kommt ein rekuperativer Wärmeübertrager im Speichermedium zum Einsatz (indirektes Be-/Entladen, Fall (3) in Abbildung 3.3-1). In Spezialfällen kann der Wärmeübertrager auch außerhalb des Speichers liegen, dann muss das Speichermedium umgepumpt werden. Die Be- bzw. Entladeleistung hängt in diesem Falle von der Wärmeleistung des Wärmeübertragers ab (siehe Kapitel 3.3.1). Der Speicherbehälter ist vollständig mit Speichermedium gefüllt, in dem keine gezielte Temperaturschichtung auftritt.

Warmwasserspeicher sind in Größen von einigen Litern bis zu mehreren Tausend Kubikmetern kommerziell verfügbar und lassen sich kapazitäts- und leistungstechnisch für jeden Einsatzzweck im Rahmen der oben genannten Parametergrenzen anpassen.

Thermoölspeicher

Im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und maximal 380 °C können Thermoöle als flüssige sensible Speichermedien in drucklosen Wärmespeichern eingesetzt werden (Temperaturlimit durch thermische Zersetzung der Thermoöle). Thermoöle erreichen allerdings lediglich Speicherdichten von 0,4 … 0,5 kWh/(m^3 K), so dass deren Einsatz erst bei Temperaturen über 100 °C rentabel wird, wenn Heißwasserspeicher als Druckbehälter ausgeführt werden müssen.

Konstruktiv sind Thermoölspeicher ähnlich den Warmwasserspeichern (siehe Abbildung 3.3-1) aufgebaut, wobei die Fälle (1) und (3) als typisch angesehen werden können. Eine Ausführung als Schichtenspeicher ist bei Thermoölen nicht üblich. Anbieter von Warmwasserspeichern bzw. Hersteller von Wärmeübertragern oder verfahrenstechnischen Anlagen können derartige Speicher nach Kundenwunsch liefern.

Andere flüssige sensible Speichermedien wie z. B. Nitratsalzschmelzen werden nur für spezielle Anwendungen genutzt und sind daher nicht Stand der Technik.

Feste sensible Wärmespeicher

Alternativ zu flüssigen sensiblen Speichermedien können auch feste Stoffe eingesetzt werden. Feste Speichermedien können nur indirekt beladen werden, wobei der Wärmetransport zwischen dem fluiden Wärmeträger (z. B. Heißluft, Abgase, Warmwasser) und der Oberfläche der festen Speichermedien stattfindet. Der Vorteil fester sensibler Wärmespeicher besteht in einem deutlich größeren Einsatztemperaturbereich, der nach oben i. d. R. nur durch die Schmelztemperatur der Speicher- oder Behältermedien begrenzt wird.

Derartige Wärmespeicher werden seit Jahrhunderten eingesetzt, so beispielsweise durch Nutzung von Lehm/Ton oder Schamotte in Kachelöfen. Zur Speicherung von Abwärme soll nachfolgend eine Auswahl prinzipiell geeigneter fester sensibler Speichermedien angegeben werden, die Speicherdichten markieren dabei lediglich Werte zur Groborientierung:

- *Metalle:* Speicherdichte 0,95 … 1,1 kWh/(m^3 K); hohe Wärmeleitfähigkeit und gute Formbarkeit erlaubt maßgeschneiderte Speicherleistungen, teilweise korrosiv in Wasser, preisintensiv, Einsatz z. B. als Lamellen (Blechform) in Rotations-Wärmeübertragern (siehe Kapitel 3.3.1),

- *Beton:* Speicherdichte 0,45 … 0,55 kWh/(m^3 K); frei formbar (Gießen), temperaturbeständig bis etwa 500 °C, sehr preiswert, schlecht Wärme leitend,
- *Schamotte- bzw. Ziegelstein:* Speicherdichte 0,4 … 0,45 kWh/(m^3 K); temperaturbeständig bis etwa 1.000 °C, sehr preiswert, schlecht Wärme leitend,
- *Sand, Kies, Gestein:* Speicherdichte 0,35 … 0,4 [0,57] kWh/(m^3 K) [Granit]; temperaturbeständig bis rund 800 °C, reichlich verfügbar, preiswert, schlecht Wärme leitend.

Feste sensible Wärmespeicher sind in der Regel so aufgebaut, dass die Speicherelemente (Kugeln, Quader, Zylinder, Platten/Bleche, Steine, …) in einem Behälter regelmäßig oder in einer Schüttung angeordnet sind und direkt vom gasförmigen Wärmeträger – Kompatibilität zum Speichermaterial vorausgesetzt – durchströmt werden. Neuere Entwicklungen kombinieren preisintensive flüssige Speichermedien (Thermoöle, Doppelfunktion als Wärmeträger) mit sehr preiswerten festen Speichermedien (z. B. Flusskiesel) in sog. Zweistoff-Speichern (fest/flüssig), um die Kostenstruktur der Speicher zu verbessern.

Aufgrund der geringen Kosten der Speichermaterialien sind sehr große Speicherkapazitäten realisierbar, die Speicherleistung hängt von der Größe der Speicherelemente respektive der Länge des Wärmetransportweges im Speicherelement und der Wärmeleitfähigkeit des Speichermateriales ab. Hohe volumenbezogene Speicherleistungen erreichen nur metallische Speichermaterialien. Feste sensible Wärmespeicher sind nicht kommerziell verfügbar, sondern müssen anhand der gewünschten Einsatzbedingungen ausgelegt und dann gefertigt werden.

Bei den oben beschriebenen Schüttungen von Speicherelementen muss beachtet werden, dass die Oberfläche der Speicherelemente beim Beladen vom Abwärmeträger und beim Entladen vom Nutzwärmeträger beaufschlagt wird, so dass oberflächige Ablagerungen (z. B. Teere oder Ruß aus Verbrennungsabgasen) den Nutzwärmeträger (z. B. Heißluft) verunreinigen können. Eine stoffliche Trennung der Wärmeträgerströme ist nur bei Platten-/Zylindergeometrien möglich. Beton bietet durch die freie Formbarkeit (Gießen) zahlreiche Freiheitsgrade bei der Speicherkonstruktion, z. B. durch Eingießen von Rohrbündeln für die Wärmeträger in ein Betonvolumen oder die Verwendung metallischer Armierungen zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit.

Latente Wärmespeicher

Unter dem Begriff der latenten Wärmespeicher sollen zunächst die Speicher verstanden werden, die im Wesentlichen den Phasenwechsel fest/flüssig, also das Schmelzen/Erstarren eines Speichermediums zur Wärmespeicherung nutzen. Dies lässt sich vereinfacht als Gleichung der Form

Formel 3.3-4

$$Q = \frac{1}{3600}\, m_{Sp}\, (\Delta h_{Sch} + c_p\, \Delta T)$$

darstellen, wobei Q die Wärmespeicherkapazität (in kWh) beschreibt; m_{Sp} die Masse (in kg), Δh_{Sch} die spezifische Schmelzwärme (in kJ/kg) und c_p die spezifische Wärmekapazität [in kJ/(kg K)] des Speichermediums sowie ΔT eine eventuell zusätzlich auftretende Temperaturdifferenz (in K). Der erste Summand in der Klammer beschreibt also den latenten, der zweite Summand den eventuell vorhandenen (bei $\Delta T > 0$) sensiblen Anteil der Speicherkapazität eines Latentwärmespeichers.

Latente Wärmespeicher können nur indirekt be- und entladen werden, da das Speichermedium im entladenen Zustand fest und damit nicht pumpbar ist. Die Speichermedien werden als Phasenwechselmaterialien (PCM) bezeichnet und können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

a) *Paraffine* – organische PCM (Kohlenwasserstoffe), Schmelztemperaturen bis rund 100 °C, verfügen mit 30 … 50 kWh/m^3 über eine geringe Speicherdichte (volumenbezogene Schmelzwärme), sind nicht korrosiv, brennbar, umweltfreundlich, recyclebar, preisintensiv.

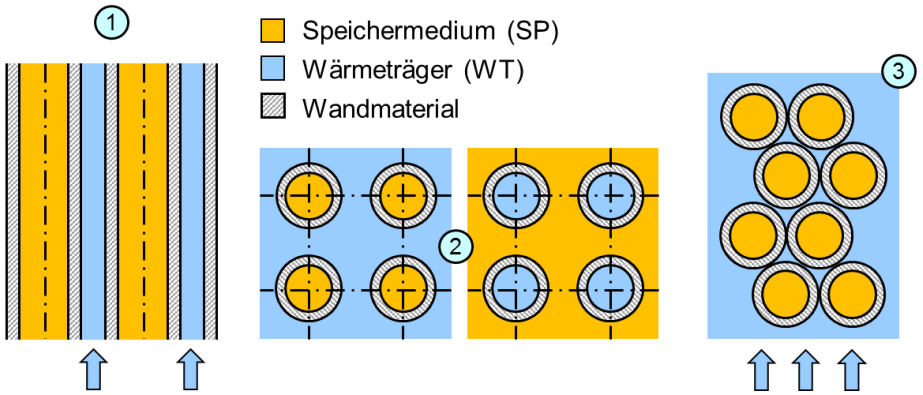
b) *Salzhydrate* – anorganische PCM (z. B. Metallsalz-Wasser-Verbindungen), Schmelztemperaturen bis etwa 120 °C, Speicherdichte 50 … 100 kWh/m^3 (auch höher), extrem korrosiv gegen Metalle, nicht brennbar, teils toxisch, sehr empfindlich gegenüber Änderungen der Gemischzusammensetzung (erfordert wasserdichte Verkapselung), preiswert.

c) *Andere organische PCM* – z. B. Fettsäuren, Zuckeralkohole, Polymere; Schmelztemperaturen bis 165 °C, Speicherdichten 40 … 130 kWh/m^3, derzeit im Entwicklungsstadium und noch nicht als PCM kommerziell verfügbar, preisintensiv.

d) *Salze* – anorganische PCM (z. B. Nitratsalze/-gemische), Schmelztemperaturen 135 °C bis 335 °C (andere Salze auch höher), Speicherdichten 55 … 190 kWh/m^3, korrosiv gegen Metalle, teilweise explosiv, u. U. gesundheitsschädigend, preiswert.

Alle genannten PCM weisen sehr geringe Wärmeleitfähigkeiten auf, so dass die erreichbaren Speicherleistungen im Normalfall niedrig sind. Dieser Nachteil kann durch gezielte Speicherkonstruktionen zur Erreichung geringer PCM-Schichtdicken kompensiert werden. Abbildung 3.3-2 zeigt die grundlegend möglichen Konstruktionsprinzipien latenter Wärmespeicher zur Optimierung der Speicherleistung.

Abbildung 3.3-2: Latentwärmespeicher



Möglichkeiten der konstruktiven Ausführung von Latentwärmespeichern (© Hochschule Zittau/Görlitz)

Wie bereits erwähnt, müssen PCM (Speichermedium SP) und fluider Wärmeträger (WT) stofflich durch eine Wand (Verkapselung) getrennt werden. An das Kapselwandmaterial werden höchste Anforderungen gestellt, es muss chemisch kompatibel zum Wärmeträger und zum PCM sein, gegen thermische (Aufwärmen/Abkühlen) und mechanische Wechselbelastungen stabil sein (Ausgleich der Volumenänderung des PCM beim Schmelzen/Erstarren) und die Stoffdichtheit über die gesamte Speicherlebensdauer zuverlässig garantieren. Bei dieser indirekten Beladung kann die Speicherleistung nur durch die Länge des Wärmetransportweges im PCM beeinflusst werden.

Bei einer Plattengeometrie [(1) in Abbildung 3.3-2] strömt der Wärmeträger zwischen den PCM-gefüllten Platten, damit entspricht der Wärmetransportweg der halben inneren Plattendicke. Nutzt man Rohrbündelgeometrien [(2), siehe auch Rohrbündel-Wärmeübertrager, Kapitel 3.3.1] für Latentwärmespeicher, dann kann das Speichermedium in den Rohren oder im Rohraußenraum angeordnet werden, der Wärmetransportweg entspricht dann dem Rohrinnenradius bzw. grob näherungsweise dem halben Rohrabstand. Häufig werden PCM in Kugeln verkapselt (3) und in einer Schüttung vom Wärmeträger durchströmt, dann ist der Kugelinnenradius die maßgebliche Größe.

Latentwärmespeicher befinden sich aktuell im Stadium der Markteinführung, es sind bisher nur wenige Speicher verfügbar, so beispielsweise Salzhydrat-Speicher in Rohrbündelausführung. Aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich mit dem Einbringen verkapselter PCM (Paraffine oder Salzhydrate)

in Warmwasserspeicher zur Erhöhung der Speicherkapazität im Bereich der Schmelztemperatur des PCM (hybride Wärmespeicher sensibel/latent).

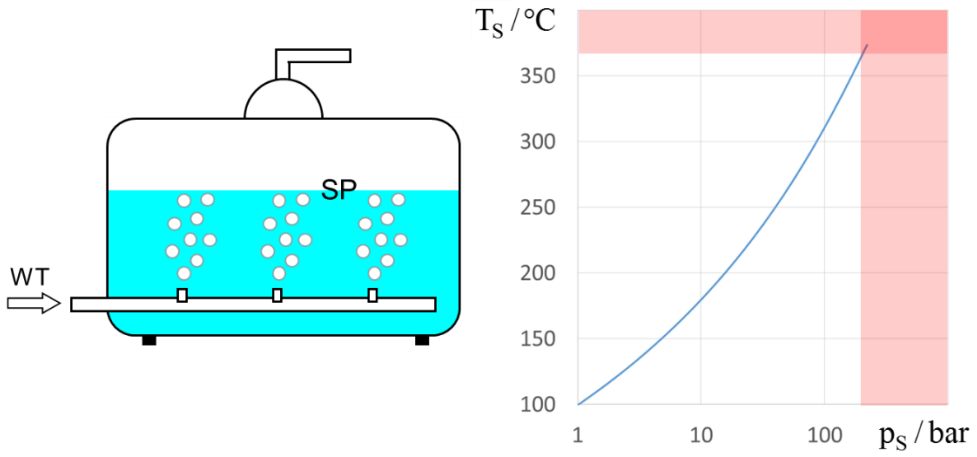
Sonderfall Nassdampf- bzw. Gefälle-Speicher

Beim sog. Nassdampf- oder Gefälle-Speicher [auch Ruths-Speicher nach J. K. Ruths (schwedischer Ingenieur, 1879 – 1935)] wird der Phasenwechsel flüssig/gasförmig (Verdampfen/Kondensieren) zur Wärmespeicherung ausgenutzt, als Speichermedium wird ausschließlich Wasser verwendet. Aufgrund der je nach Druckniveau des Speichers enormen Volumenausdehnung des Speichermediums beim Verdampfen kann dieser Phasenwechsel nur anteilig genutzt werden.

Abbildung 3.3-3 (links) zeigt schematisch einen Nassdampf-Speicher, in diesem befindet sich Wasser im Zweiphasengebiet flüssig/gasförmig (sog. Wasser-Nassdampf, SP) bestehend aus siedender Flüssigkeit (Sattwasser) und trocken gesättigtem Dampf (Sattdampf). Druck und Temperatur im Speicher korrelieren entsprechend der Dampfdruckkurve (rechts in Abbildung 3.3-3). Bei Normaldruck von 1 bar beträgt die Siedetemperatur in einem Nassdampf-Speicher rund 100 °C.

Nassdampf-Speicher werden direkt beladen, indem überhitzter Wasserdampf bzw. Sattdampf (Wärmeträger WT) über eine Verteilerschiene eingeleitet wird, aufgrund des daraus resultierenden Druck- und Temperaturanstieges kondensiert ein Teil des Dampfes. Damit eignen sich derartige Wärmespeicher für Anlagen, in denen Abwärme in Form von Prozessdampf anfällt. Das Entladen erfolgt durch Entnahme von Sattdampf (Nutzwärme) aus dem oberen Teil, dabei sinken Druck und Temperatur (aus dem Druckabfall resultiert die Bezeichnung Gefälle-Speicher) und es kommt zu einer Nachverdampfung von Flüssigkeit.

Abbildung 3.3-3: Nassdampf-Speicher



Links: Nassdampf-Speicher beim Beladen, rechts: Dampfdruckkurve von Wasser (© Hochschule Zittau/Görlitz)

Nassdampf-Speicher sind eine seit Jahrzehnten etablierte Technologie und werden bis zu Drücken von rund 200 bar (Siedetemperatur 365 °C) ausgeführt, wobei der technologische Aufwand und damit die Kosten mit steigendem Druck deutlich anwachsen. Nassdampf-Speicher werden von Herstellern verfahrens- bzw. kraftwerkstechnischer Anlagen entsprechend kundenspezifischer Parameter ausgelegt und angeboten. Eine Übersicht der wichtigsten ingenieurtechnischen Grundlagen zu dieser Technologie enthält (113).

Sorptive Wärmespeicher

Sorptive Wärmespeicher befinden sich aktuell noch im Stadium der Entwicklung bzw. von Demonstratoren und können daher noch nicht als BVT betrachtet werden. Aus diesem Grunde sollen hier nur einige grundlegende Erläuterungen erfolgen.

Sorptive Wärmespeicher nutzen zur Wärmespeicherung die physikalische oder chemische Bindungsenergie eines Zweistoffsystems, wobei eine Komponente in jedem Fall gasförmig ist. Es können folgende sorptive Wärmespeichertechnologien unterschieden werden:

a) In *Absorptions-Wärmespeichern* wird die physikalische Bindungswärme eines sich in einer Flüssigkeit lösenden Gases genutzt. Beim Lösen des Gases in der Flüssigkeit (Absorption) wird Wärme freigesetzt, der Wärmespeicher wird entladen. Durch Wärmezufuhr (Beladen des Speichers) wird das gelöste Gas wieder aus der Flüssigkeit ausgedampft (Desorption). Als Stoffsysteme kommen z. B. Wasserflüssigkeit und Ammoniakdampf oder Lithiumbromidlösung und Wasserdampf in Frage, damit lassen sich Speichertemperaturen von 80 °C bis 120 °C realisieren. Dieses physikalische Prinzip wird auch in den Absorbern und Austreibern von Absorptions-Kältemaschinen und -Wärmepumpen eingesetzt (siehe Kapitel 3.3.3).

b) In *Adsorptions-Wärmespeichern* wird die physikalische Bindungswärme zwischen einem Feststoff und einem sich an der Oberfläche anlagernden Gas genutzt. Während dieser Anlagerung (Adsorption) wird Wärme frei (Entladen des Speichers). Durch Wärmezufuhr (Beladen) wird das Stoffsystem wieder getrennt (Desorption). Typische Stoffsysteme sind Zeolith (Alumosilikat) bzw. Silikagel (Kieselgel) und Wasserdampf, mögliche Speichertemperaturen liegen deutlich höher (bis über 200 °C). Dieses physikalische Prinzip wird auch in Adsorptions-Kältemaschinen und -Wärmepumpen verwendet (siehe Kapitel 3.3.3).

c) In *thermochemischen Wärmespeichern* wird die Reaktionswärme eines Gas-Feststoff-Systems zur Wärmespeicherung eingesetzt. Die Ausgangsstoffe reagieren unter Wärmefreisetzung (exotherm, Entladen des Wärmespeichers) und bilden ein Reaktionsprodukt. Unter Wärmezufuhr (endotherm, Beladen des Speichers) zerfällt dieses Reaktionsprodukt wieder in die Ausgangsstoffe. Als Reaktionen kommen z. B. die Bildung eines Hydroxides (aus Metalloxid und Wasserdampf), eines Hydrides (aus Metall und Wasserstoff), eines Karbonates (aus Metalloxid und Kohlenstoffdioxid) oder eines Salzhydrates (aus Metallsalz und Wasserdampf) infrage. Die erreichbaren Speichertemperaturen liegen im Bereich bis 1.000 °C und höher.

Ab- und Adsorptions-Wärmespeicher gehören zu den physisorptiven Speichern, thermochemische Speicher werden als chemisorptiv bezeichnet. Die Vorteile dieser Speichertechnologien liegen in den sehr hohen Speicherdichten (bis zu 1.000 kWh/m^3 und mehr) und in der Tatsache, dass der beladene Wärmespeicher nahezu unbegrenzt verlustfrei in Bereitschaft bleiben kann, wenn die Komponenten des Stoffsystems getrennt gelagert werden. Nachteile sind die sehr aufwändige Technologie und das ggf. große Speichervolumen für die gasförmige Komponente des Stoffsystems. Letzteres kann vermieden werden, wenn die gasförmige Komponente aus der Umgebungsluft kommt (Wasserdampf aus Luftfeuchte), dann handelt es sich um ein offenes Speichersystem.

Sorptive Wärmespeicher befinden sich noch im Stadium der Entwicklung, ausgewählte Speicherdemonstratoren wurden im Rahmen von Forschungsprojekten errichtet und getestet. Die genannten Stoffsysteme für physisorptive Speicher werden in marktverfügbaren Ab- bzw. Adsorptions-Wärmepumpen und -Kältemaschinen eingesetzt, so dass entsprechende Wärmespeicher schnell serienreif angeboten werden könnten, Informationen bezüglich einer aktuellen Marktverfügbarkeit liegen jedoch nicht vor.

Erreichter Umweltnutzen

Die mit Hilfe von Wärmespeichern genutzte Abwärme ersetzt in gleichem Maße Nutzwärme, die anderenfalls aus Primärenergieträgern erzeugt werden müsste. Insbesondere bei der dadurch möglichen Substitution fossiler Brennstoffe werden Umweltbeeinflussungen durch die Bereitstellung der Brennstoffe sowie umweltgefährdende Emissionen (CO_2, NO_x, Staub) vermieden.

Medienübergreifende Wirkungen

Der störungsfreie Betrieb von Wärmespeichern hat keine signifikanten Auswirkungen auf die Umwelt. Insbesondere im Falle der Havarie eines Speichers können jedoch Umweltbeeinträchtigungen auftreten. Dies gilt insbesondere für sensible Wärmespeicher mit Thermoöl als Speichermedium und für latente Wärmespeicher mit PCM, da im Falle des unkontrollierten Austritts des flüssigen Speichermediums die Umwelt, speziell das Erdreich, kontaminiert wird (Wassergefährdungspotenzial). Entsprechende Vorschriften sind einzuhalten (z. B. volumenadäquate Schutzwannen). Bei sensiblen Speichern mit Feststoffen ist das Gefahrenpotenzial sehr gering.

Die Herstellung bzw. das Recycling bzw. die Entsorgung von Speichermedien wie Thermoöl bzw. verschiedene PCM (Paraffine, Salzhydrate, Salze, andere organische Substanzen) kann u. U. sehr energieintensiv und technologisch aufwändig sein, um eine Beeinflussung der Umwelt zu vermeiden.

Betriebsdaten

Wärmespeicher benötigen für den Betrieb in der Regel nur wenig Energie in Form von Antriebsleistung für Fluidpumpen oder Gebläse. Betriebsstoffe sind nicht erforderlich. Für die Installation der Wärmespeicher müssen der entsprechende Bauraum und die Anschlüsse für die Wärmeträgermedien (Ab-/Nutzwärme) vorhanden sein. Der Bauraum (Speichervolumen) lässt sich aus der benötigten Speicherkapazität und der effektiven Speicherdichte – die aufgrund von Einbauten, Behältern, Dämmung und peripheren Komponenten teilweise deutlich geringer ist als die Speicherdichten der reinen Speichermedien – abschätzen.

Der Betrieb eines Wärmespeichers kann durch Messung der während eines Speicherzyklus zu- und abgeführten Wärmemengen überwacht werden. Dazu sind die Masseströme der zu- und abgeführten Wärmeträger sowie die Ein- und Austrittstemperaturen (Thermoelemente oder Widerstandsthermometer) in definierten Zeitintervallen zu messen. Die zu verwendenden Bilanzgleichungen hängen von der Konfiguration des Speichersystems ab. Die Differenz aus der zugeführten Abwärmemenge und der abgeführten Nutzwärmemenge ergibt die während des Speicherzyklus aufgetretenen Wärmeverluste. Diffuse Wärmeverluste über die Oberfläche des Systems (Hotspots) können mit Infrarot-Messtechnik (siehe 2.10.1) detektiert werden.

Durch zusätzliche Messung des Druckverlustes zwischen Ein- und Austritt des Wärmeträgers (Druckverlustmesstechnik) kann die für das Be- und Entladen benötigte Hilfsenergie abgeschätzt werden. Steigende Druckverluste sind ein Indiz für eine Verschmutzung der Wärmeträgerkanäle (Reinigung analog Wärmeübertrager, siehe 3.3.1).

Anwendbarkeit

Sensible Wärmespeicher mit dem Speichermedium Wasser werden in thermischen Energiesystemen bei Temperaturen kleiner 100 °C (z. B. Heizsystemen) sehr erfolgreich eingesetzt. Entsprechende Speicher sind in vielen Größen und Ausführungen marktverfügbar. Dampfspeicher sind Stand der Technik und kommen im Zusammenhang mit Systemen zum Einsatz, in denen Wasserdampf als thermodynamisches Arbeitsmittel (Kreisprozesse) oder als Wärmeträger (Prozessdampf) eingesetzt wird. Latente Wärmespeicher mit einem Phasenwechselmaterial sind bisher wenig verbreitet und können daher wirtschaftlich noch nicht mit Warmwasserspeichern konkurrieren, sind jedoch prinzipiell für eine Vielzahl von Anwendungen in den unterschiedlichsten Temperaturbereichen geeignet.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Amortisationszeit eines Wärmespeichers berechnet sich überschlägig aus den Invest- und Betriebskosten (inkl. Entsorgung) für den Wärmespeicher (evtl. einschließlich Kapitaldienst) und den kumulierten Wärmegestehungskosten der durch die Abwärmenutzung substituierten Wärme. Typische Amortisationszeiten sollten im Bereich weniger Jahre liegen. Die kumuliert eingesparten Wärmegestehungskosten hängen dabei ganz entscheidend von der Zahl der pro Jahr durchgeführten

Speicherzyklen ab. Wärmespeicher sollten für eine maximal mögliche Zahl an Speicherzyklen pro Jahr ausgelegt und eingesetzt werden.

Die Amortisationszeit kann deutlich verkürzt werden, wenn für bestimmte Arten der Abwärmenutzung Fördermittel bzw. zinsgünstige Kredite eingesetzt werden können (siehe z. B. Anhang 7.13).

Triebkraft für die Umsetzung

- Senkung der Kosten der Wärmeerzeugung durch Wärmerückgewinnung,
- Einsparung von Primärenergieträgern und – speziell bei fossilen Energieträgern – der damit verbundenen Emissionen (CO_2, NO_x, Staub).

Beispiele

a) Das Fernheizwerk Bad Elster, betrieben durch die eins energie in Sachsen GmbH & Co. KG, betreibt seit 1982 eine Dampfspeicheranlage (Ruths-Speicher). Diese Anlage dient – je nach Jahreszeit – als Puffer, damit die Gegendruckturbine, ausgeführt als Sattdampfturbine, mit optimaler Leistung gefahren werden kann (114).

b) Sensible Wärmespeicher auf Basis von Flüssigsalzen werden im Parabolrinnen-Kraftwerk Andasol 1 – 3 in Südspanien eingesetzt. Die Salzschmelze wird tagsüber von 280 °C mit Hilfe von Solarwärme auf ca. 390 °C erhitzt, um die Stromerzeugung auch in den Nachtstunden zu gewährleisten. Ein vollständig beladener Speicher sichert dabei die Stromproduktion für ca. 8 Stunden.

c) Die N-ERGIE AG setzt im Fernwärmenetz der Stadt Nürnberg einen sensiblen Wärmespeicher mit 33.000 m^3 Wasser als Speichermedium ein. Insgesamt können so 1.500 MWh Wärme gespeichert werden (115).

d) Im Rahmen eines Verbundprojektes zwischen dem ZAE Bayern und der Gießerei Heunisch GmbH wurde ein Zweistoff-Speicher (Feststoffschüttung mit flüssigem Wärmeträger als zweites Speichermedium) entwickelt und getestet. Dieser Speicher kann bis zu einer Temperatur von 300 °C diskontinuierlich Wärme bis zu 10 MWh aufnehmen (116).

3.3.3 Wärmepumpen

Beschreibung

Wärmepumpen transformieren Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau – und damit niedrigen Exergieniveau – auf ein höheres Temperatur- bzw. Exergieniveau. Dazu wird zusätzliche Energie bzw. Exergie benötigt, die bei Kompressions-Wärmepumpen in Form elektrischer Energie (Elektromotor) und bei Ab-/Adsorptions-Wärmepumpen in Form thermischer Energie (Wärme) zugeführt werden muss.

Typische Niedertemperatur-Wärmequellen liegen zwischen Umgebungstemperatur und 40 … 50 °C und können natürlich (Erdreich, Wasserreservoir, Umgebungsluft) oder künstlich (industrielle Abwärmeträger) sein. Die Temperaturen der Wärmesenke (Anwendungen im gewerblichen oder industriellen Bereich, z. B. Heizungsanlagen) können bis rund 100 °C reichen, bei Adsorptions-Wärmepumpen auch höher.

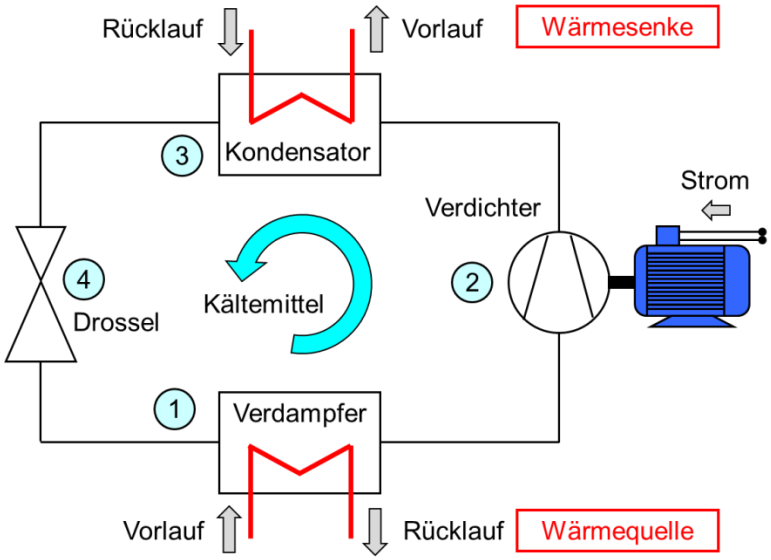
Die Einteilung der Wärmepumpen erfolgt nach dem Prinzip der Verdichtung des Arbeitsmittels, Kompressions-Wärmepumpen verfügen über einen mechanischen Verdichter, Absorptions-Wärmepumpen über einen sog. thermischen Verdichter (siehe unten). Nachfolgend werden das jeweilige Funktionsprinzip und die Möglichkeiten der energetischen Bewertung vorgestellt.

Kompressions-Wärmepumpen

Kompressions-Wärmepumpen verfügen über einen mechanischen Verdichter, der in den meisten Fällen durch einen Elektromotor angetrieben wird. Kompressions-Wärmepumpen sind in Leistungsklassen von wenigen Kilowatt bis zu mehreren Megawatt verfügbar und werden überall dort eingesetzt, wo keine Mitteltemperatur-Abwärme (> 80 °C) zum Antrieb einer Absorptions-Wärmepumpe verfügbar ist.

In einer Kompressions-Wärmepumpe läuft der sog. Kaltdampfprozess – ein linkslaufender modifizierter Clausius-Rankine-Kreisprozess – ab, bei dem ein Arbeitsmittel eingesetzt wird, welches zyklisch verdichtet und entspannt wird und dabei ebenfalls zyklisch einen Phasenwechsel flüssig/gasförmig erfährt. Dieses Arbeitsmittel wird auch bei Wärmepumpen als Kältemittel bezeichnet, typische Kältemittel sind Wasser, Ammoniak oder sog. Sicherheits-Kältemittel (halogenierte Kohlenwasserstoffe).

Abbildung 3.3-4: Kompressions-Wärmepumpe



Prinzipdarstellung einer Kompressions-Wärmepumpe mit Hauptkomponenten (© Hochschule Zittau/Görlitz)

Das physikalische Prinzip der Wärmetransformation während des Kreisprozesses basiert darauf, dass die Siedetemperatur jedes Kältemittels druckabhängig ist (sinkt und steigt mit dem Druck). Abbildung 3.3-4 veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau einer Kompressions-Kältemaschine aus den vier Komponenten Verdampfer, Verdichter, Kondensator und Drosselventil. Aufbau und Funktionsweise einer Kompressions-Kältemaschine sind identisch, diese arbeiten jedoch bei niedrigeren Temperaturen.

Das Arbeitsmittel strömt mit einem hohen Flüssigkeitsanteil in den Verdampfer (1) und nimmt dort bei niedrigem Druck und entsprechend niedriger Temperatur Wärme aus einer natürlichen oder künstlichen Wärmequelle auf. Dabei verdampft das Kältemittel vollständig. Der Kältemitteldampf wird anschließend im elektrisch angetriebenen Verdichter (2) auf den höheren Kondensatordruck komprimiert. Hierbei erfolgt ein deutlicher Anstieg der Temperatur des Kältemittels. Im Kondensator (3) erfolgt durch Wärmeabgabe bei hohem Druck und damit hoher Kondensationstemperatur an eine Wärmesenke die vollständige Kondensation bzw. Verflüssigung des Arbeitsmittels. Der Kondensator wird daher auch als Verflüssiger bezeichnet. Im Drosselventil (4) erfolgt danach eine Entspannung der Flüssigkeit auf Verdampferdruck mit dem Zusatzeffekt einer bereits teilweisen Verdampfung.

Die Effizienz einer Kompressions-Wärmepumpe wird durch die sog. Leistungszahl bzw. Coefficient of Performance (COP) angegeben. Dabei werden der Nutzen – der an die Wärmesenke abgegebene

Kondensatorwärmestrom – und der Aufwand – die elektrische Antriebsleistung des Verdichters – ins Verhältnis gesetzt:

Formel 3.3-5

$$COP = \frac{Kondensatorwärmestrom}{Verdichterantriebsleistung} \quad \rightarrow \quad [COP] = 1\ \frac{kW_{th}}{kW_{el}}$$

Kompressions-Wärmepumpen können Leistungszahlen bis 6,0 erreichen, das bedeutet, dass mit Hilfe einer elektrischen Antriebsleistung von 1 kW insgesamt 6 kW Hochtemperaturwärme erzeugt werden, wobei der Niedertemperatur-Wärmesenke 5 kW thermische Leistung entzogen werden.

Die maximale Leistungszahl erreicht eine Kompressions-Wärmepumpe nur im Volllastbetrieb, bei Teillastzuständen sinkt die Effizienz. Generell hängt die Leistungszahl von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ab, diese beeinflusst maßgeblich das Druckverhältnis der Anlage (Verhältnis Kondensator- zu Verdampferdruck). Steigende Druckverhältnisse senken die Effizienz des Verdichters, bei zu großen Druckverhältnissen müssen technologisch aufwändige und damit kostenintensive mehrstufige Kompressions-Wärmepumpen eingesetzt werden.

Durch die Jahresarbeitszahl JAZ werden, im Unterschied zur Leistungszahl COP, alle im Verlaufe eines Jahres auftretenden Lastzustände einer Kompressions-Wärmepumpe erfasst und nicht nur der Idealzustand des Volllastbetriebes. Die Jahresarbeitszahl setzt die im Laufe eines Jahres erzeugte Nutzwärme ins Verhältnis zur im gleichen Zeitraum verbrauchten elektrischen Arbeit:

Formel 3.3-6

$$JAZ = \frac{Kondensatorwärme\ pro\ Jahr}{Verdichterarbeit\ pro\ Jahr} \quad \rightarrow \quad [JAZ] = 1\ \frac{kWh_{th}/a}{kWh_{el}/a}$$

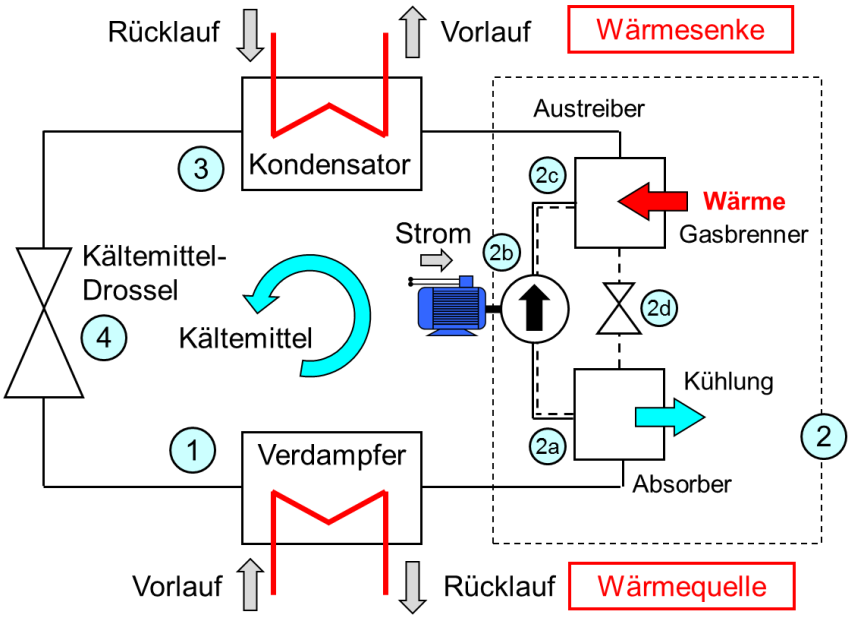
Da elektrische Energie auch direkt und nahezu verlustfrei in Wärme fast jeder beliebigen Temperatur umgewandelt werden kann, muss die Jahresarbeitszahl JAZ einer Kompressions-Wärmepumpe höher sein als das Verhältnis zwischen Strom- und Wärmebezugskosten des jeweiligen Anwenders (siehe betriebswirtschaftliche Aspekte). Nach (117 S. 35) sollten bei elektrisch angetrieben Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von mindestens 4 erreicht werden.

Absorptions-Wärmepumpen

Absorptions-Wärmepumpen unterscheiden sich von Kompressions-Wärmepumpen dadurch, dass der mechanische Verdichter durch einen sog. thermischen Verdichter ersetzt wird. Das Funktionsprinzip gleicht dem der Absorptions-Kältemaschinen. Abbildung 3.3-5 veranschaulicht ein prinzipielles Schaltschema einer gasbeheizten Absorptions-Wärmepumpe (Gas-Absorptions-Wärmepumpe). Die Komponenten Verdampfer, Kondensator und Drosselventil sind identisch zu den Kompressions-Wärmepumpen, auch die dort ablaufenden oben beschriebenen Teilprozesse.

Im Folgenden wird nur die Funktion des thermischen Verdichters (2) kurz beschrieben: Der aus dem Verdampfer (1) austretende Kältemitteldampf wird im Absorber (2a) vom flüssigen Absorptionsmittel aufgenommen (absorbiert). Dabei entsteht Wärme bei niedriger Temperatur, die durch Kühlen abgeführt werden muss. Die entstandene Lösung aus Kälte- und Absorptionsmittel wird durch die Lösemittelpumpe (2b) von Verdampfer- auf Kondensatordruck verdichtet. Im Austreiber (2c) erfolgt dann das Austreiben (Desorbieren, vergleichbar mit Destillieren) des Kältemittels aus der Lösung durch Zufuhr von Wärme bei hoher Temperatur, z. B. durch einen Gasbrenner. Der Kältemitteldampf strömt weiter zum Kondensator (3). Die restliche Lösung wird in der Lösemitteldrossel (2d) wieder auf Verdampferdruck entspannt und dem Absorber zugeführt.

Abbildung 3.3-5: Absorptions-Wärmepumpe



Prinzipdarstellung einer gasbeheizten Absorptions-Wärmepumpe (© Hochschule Zittau/Görlitz)

Die elektrische Antriebsleistung der Lösemittelpumpe ist verschwindend gering im Vergleich zum Austreiber-Wärmestrom, so dass man von einem „thermisch angetriebenen“ Verdichter sprechen kann. Als Stoffpaare in Absorptions-Wärmepumpen werden ausschließlich Wasser/Lithiumbromid bzw. Ammoniak/Wasser (Kältemittel/Absorptionsmittel) eingesetzt, wobei Ammoniak und Wasser schwerer trennbar sind und deshalb ein technologisch aufwändiger Austreiber erforderlich ist.

Die Effizienz einer Absorptions-Wärmepumpe wird durch ein Wärmeverhältnis, die sog. Heizzahl, angegeben. Diese setzt wiederum den energetischen Nutzen – den im Kondensator an die Wärmesenke abgegebenen Wärmestrom – ins Verhältnis zum Aufwand – den dem Austreiber durch den Gasbrenner zugeführten Wärmestrom:

Formel 3.3-7

$$Heizzahl = \frac{Kondensatorwärmestrom}{Austreiberwärmestrom} \quad \rightarrow \quad [Heizzahl] = 1\,\frac{kW_{th}}{kW_{th}}$$

Typische Heizzahlen von Absorptions-Wärmepumpen liegen bei maximal 1,5. Auch hier ist es zur Berechnung einer jahresgemittelten Effizienz sinnvoll, eine Jahresarbeitszahl JAZ zu definieren.

Formel 3.3-8

$$JAZ = \frac{Kondensatorwärme\ pro\ Jahr}{Austreiberwärme\ pro\ Jahr} \quad \rightarrow \quad [JAZ] = 1\,\frac{kWh_{th}/a}{kWh_{th}/a}$$

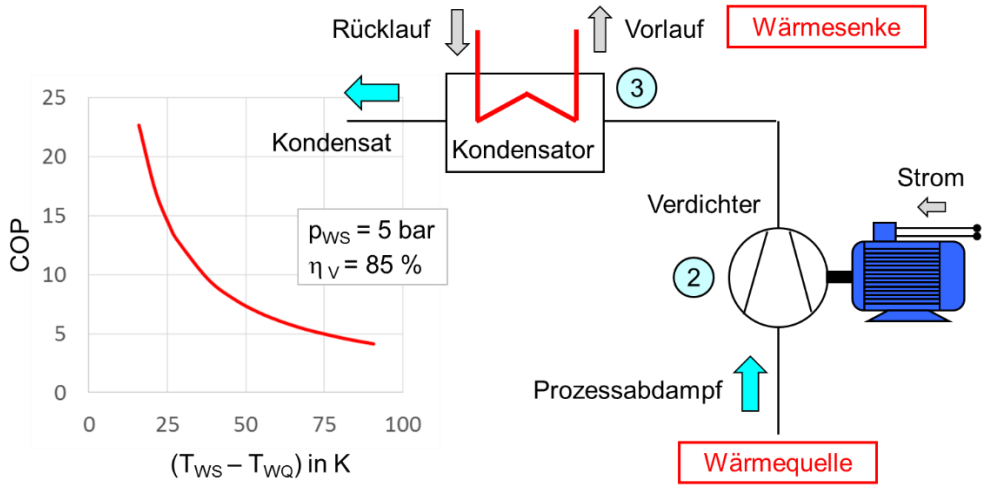
Bei gasbeheizten Wärmepumpen kann die Austreiberwärme pro Jahr näherungsweise aus dem Jahresbrennstoffverbrauch und dem Heizwert des Brennstoffes berechnet werden. Nach (117 S. 35) sollten bei derartigen Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von mindestens 1,2 erreicht werden.

Mechanische Brüdenkompression (Mechanical Vapor Recompression, MVR)

Die mechanische Brüdenkompression (auch Thermokompression) repräsentiert eine halboffene Wärmepumpe und bietet sich überall dort an, wo Prozessabdampf (Wasserdampf) niedriger Temperatur zur Verfügung steht und Wärme höherer Temperatur benötigt wird. Prinzipiell ist das Verfahren auch für andere Abdämpfe einsetzbar.

Abbildung 3.3-6 stellt das Funktionsprinzip vereinfacht dar: Der Prozessabdampf (Wärmequelle, Sattdampf oder wenig überhitzter Dampf aus Kesseln, Kochern, Verdampfern, Reaktoren) wird direkt angesaugt und durch einen mechanischen Verdichter (2) unter Verbrauch elektrischer (Elektromotor) oder mechanischer Leistung (z. B. Turbine) auf einen höheren Druck komprimiert, wodurch ein Anstieg der Siedetemperatur verursacht wird. Im Kondensator (3) erfolgt die vollständige Verflüssigung des Arbeitsmittels, wobei Wärme auf dem hohen Niveau der Siedetemperatur bei Kondensatordruck abgegeben wird. Das Hochdruckkondensat kann wieder in die Anlage eingespeist werden, aus der der Prozessabdampf entnommen wurde.

Abbildung 3.3-6: MVR-Anlage



Prinzipdarstellung einer einfachen MVR-Anlage und temperaturabhängige COP (© Hochschule Zittau/Görlitz)

Das Prinzip kann nur dann eingesetzt werden, wenn der Prozessabdampf über die für einen störungsfreien Verdichterbetrieb erforderliche Reinheit verfügt. Anderenfalls sollte der Prozessabdampf als Wärmequelle für den Verdampfer einer klassischen Kompressions-Wärmepumpe nach Abbildung 3.3-4 eingesetzt werden. Durch den Wegfall einiger Komponenten beim MVR-System gegenüber einer Kompressions-Wärmepumpe ist dieses technologisch einfacher und kostengünstiger.

Die Effizienz einer MVR-Anlage wird wieder in Form einer Leistungszahl (COP) angegeben, die den Nutzen – den Kondensatorwärmestrom – ins Verhältnis zum Aufwand – der Antriebsleistung des Verdichters – setzt:

Formel 3.3-9

$$COP = \frac{Kondensatorwärmestrom}{Verdichterantriebsleistung} \quad \rightarrow \quad [COP] = 1\,\frac{kW_{th}}{kW_{el/mech}}$$

In Abbildung 3.3-6 ist die Abhängigkeit des COP einer MVR-Anlage über der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (WQ = Prozessabdampf, Annahme hier Sattdampf bei 5 bar) und Wärmesenke (WS = Kondensator) aufgetragen. Reibungsverluste im Verdichter wurden durch einen Gütegrad von 85 % berücksichtigt. Man erkennt eine starke Abhängigkeit, bei einer Temperaturerhöhung um 75 K – dies entspricht einer Verdichtung auf 26,5 bar Kondensatordruck – ist jedoch immer noch ein COP = 5 erreichbar. Bei überhitztem Prozessabdampf als Wärmequelle sinkt der COP teils drastisch.

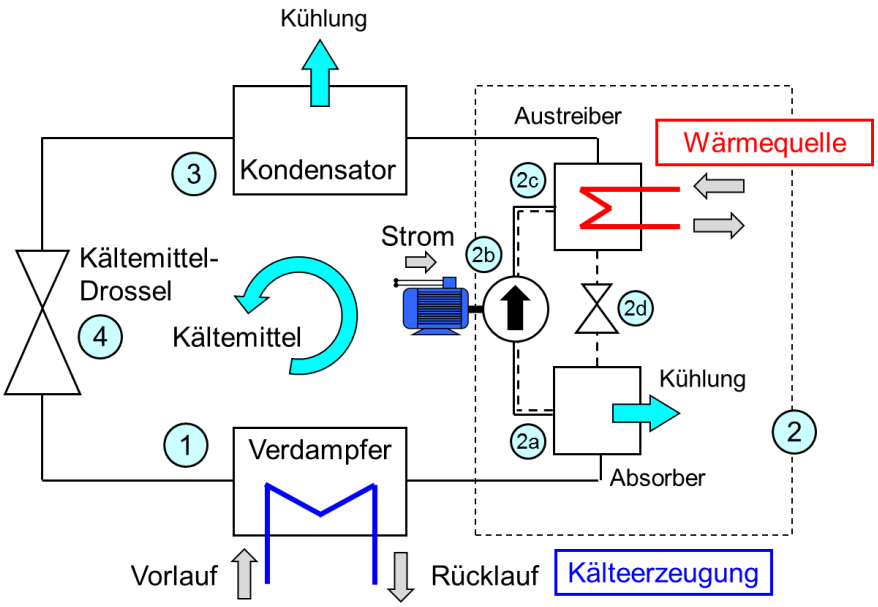
Eine Darstellung als Jahresarbeitszahl ist ebenfalls möglich. Auch hier gilt, dass der COP der Anlage größer sein muss als das Verhältnis zwischen Strombezugskosten und Wärmeerzeugungskosten der Wärme, die durch die Kondensatorwärme substituiert wird, um einen betriebswirtschaftlich sinnvollen Einsatz zu gewährleisten.

Absorptions-Kältemaschinen

Das Arbeitsprinzip einer Absorptions-Kältemaschine ist identisch zu dem einer Absorptions-Wärmepumpe und muss deshalb an dieser Stelle nicht noch einmal erläutert werden. Unterschiede bestehen lediglich hinsichtlich der Temperaturniveaus sowie der aufgewendeten und genutzten Energie:

- **Gas-Absorptions-Wärmepumpe** – Die Verdampfertemperatur entspricht ungefähr der Umgebungstemperatur, die Kondensatortemperatur liegt auf dem Niveau eines mit Wärme zu versorgenden Heizsystems (bis etwa 100 °C).
- **Absorptions-Kältemaschine** – Die Verdampfertemperatur liegt teilweise deutlich unterhalb der Umgebungstemperatur (bei Klimakälte < 6 °C, bei Temperierung von Kühl- oder Gefrieranlagen bis zu -70 °C), die Kondensatortemperatur liegt etwa auf dem Niveau der Umgebungstemperatur.

Abbildung 3.3-7: Absorptions-Kältemaschine



Prinzipdarstellung einer Absorptions-Kältemaschine (© Hochschule Zittau/Görlitz

Absorptions-Kältemaschinen werden häufig bei der sog. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK, vgl. Kapitel 3.4.2) eingesetzt und dort ebenfalls noch einmal näher beschrieben. Selbstverständlich kann eine Absorptions-Kältemaschine aber auch mit Abwärme betrieben werden, die nicht aus einer Wärmekraftmaschine stammt.

Abbildung 3.3-7 zeigt das vereinfachte Schaltschema einer Absorptions-Kältemaschine und unterscheidet sich von Abbildung 3.3-5 nur dadurch, dass die Abwärme (Wärmequelle, Aufwand) hier zur Beheizung des Austreibers benutzt wird und der Nutzen in der im Verdampfer erzeugten Kälteleistung besteht. Die Heizwärme für den Austreiber muss Temperaturen > 80 °C aufweisen (bis etwa 120 °C) und kann aus flüssigen oder kondensierenden Abwärmeträgern (z. B. Prozessdampf bei niedrigen Drücken) gewonnen werden.

Die Effizienz einer Absorptions-Kältemaschine wird ebenfalls durch ein Wärmeverhältnis angegeben, welches Nutzen – die Kälteleistung des Verdampfers – und Aufwand – der Heizwärmestrom des Austreibers – ins Verhältnis setzt:

Formel 3.3-10

$$Wärmeverhältnis = \frac{Verdampferwärmestrom}{Austreiberwärmestrom} \quad \rightarrow \quad [Wärmeverhältnis] = 1\ \frac{kW_{th}}{kW_{th}}$$

Wärmeverhältnisse von Absorptions-Kältemaschinen sind meist deutlich kleiner als Eins, dies ist jedoch kein Problem, da der energetische Aufwand aus einer – quasi kostenlosen – Abwärmequelle gedeckt wird und die Kälteleistung als Nutzen eine hochwertige (weil aufwändig zu erzeugende) thermische Energieform darstellt. Auch hier bietet sich zur Berücksichtigung unterschiedlicher Lastzustände und damit variabler Wärmeverhältnisse über ein Jahr die Angabe einer Jahresarbeitszahl an.

Im Unterschied zur Gas-Absorptions-Wärmepumpe können Abwärmeressourcen mit Temperaturen zwischen 80 und 120 °C auch bei Absorptions-Wärmepumpen zur Beheizung des Austreibers verwendet und damit Niedertemperaturwärme einer zusätzlichen (natürlichen) Wärmequelle in Wärme höherer Temperatur (Kondensatorwärme) transformiert werden. Da der Kondensator einer Absorptions-Wärmepumpe immer bei niedrigeren Temperaturen als der Austreiber arbeitet, ist hierbei ein Wärmeverhältnis größer Eins unabdingbar, da anderenfalls die Kondensatorwärme direkt durch die Austreiberheizwärme substituiert werden könnte. In Abbildung 3.3-7 müssten für diesen Fall am Kondensator der Begriff „Wärmesenke“ ergänzt und der Begriff „Kälteerzeugung“ durch den Begriff „natürliche Wärmequelle“ ersetzt werden.

Adsorptions-Wärmepumpen (und -Kältemaschinen)

Adsorptions-Wärmepumpen nutzen statt des flüssigen Absorptionsmittels ein festes Adsorptionsmittel, an das sich das gasförmige Kältemittel anlagert. Typische Adsorptionsmittel sind Zeolithe (kristalline Alumosilikate) oder Silikagel (Kieselgel, amorphes Siliziumoxid) mit Wasser als Kältemittel, in der Erprobung befindet sich auch Aktivkohle mit Ammoniak als Kältemittel. Ein Hauptmerkmal der Adsorptionsmittel ist eine extrem hohe volumenspezifische freie Oberfläche (mikroporöse Strukturen). Beim Anlagern des gasförmigen Kältemittels an das feste Adsorptionsmittel (Adsorption) wird Hochtemperaturwärme frei, die genutzt werden kann. Zum Trennen der Stoffe (Desorption) wird Wärme benötigt.

Adsorptions-Wärmepumpen können aufgrund der festen und damit nicht pumpbaren Komponente nur zyklisch arbeiten, bei den häufig verwendeten Zeoltih/Wasser-Systemen funktioniert dies folgender Maßen:

- In Phase 1 wird der Zeolith durch Hochtemperaturwärme getrocknet (Ausheizen, Desorption), die i. d. R. durch einen Gasbrenner bereitgestellt wird (Gas-Adsorptions-Wärmepumpe). Der entstehende Wasserdampf wird im Kondensator verflüssigt, wobei Wärme auf dem Temperaturniveau der Siedetemperatur im Kondensator z. B. zum Heizen freigesetzt wird.
- In Phase 2 wird durch Zufuhr von Niedertemperaturwärme zum Verdampfer auf dem Niveau der Verdampfer-Siedetemperatur Wasserdampf erzeugt, der den Zeolith befeuchtet (Adsorption) und dabei Hochtemperaturwärme freisetzt, die mittels eines flüssigen Wärmeträgers abgeführt und nutzbar gemacht wird.

Durch Senken des Verdampferdruckes und damit der Temperatur der Wärmezufuhr kann im Verdampfer optional Kälte erzeugt werden (Adsorptions-Kältemaschine), dann muss das Ausheizen des Zeolithes jedoch mit Abwärme erfolgen, um als Technologie der indirekten Abwärmenutzung eingesetzt werden zu können.

Adsorptions-Wärmepumpen erzielen Heizzahlen zwischen 1,3 und 1,6 wohingegen Adsorptions-Kältemaschinen nur Wärmeverhältnisse zwischen 0,6 und 0,7 erreichen. Durch Verkürzen der Dauer der Phasen 1 und 2 und damit der Zyklenzeiten kann ein quasikontinuierlicher Betrieb gesichert

werden. Aus diesem Grund steht die Kinetik des Wärme- und Stofftransportes in Adsorptionssystemen derzeit im Fokus aktueller Forschungsprojekte.

Erreichter Umweltnutzen

Wärmepumpen transformieren Niedertemperaturwärme auf ein höheres Temperaturniveau und substituieren damit exergetisch wertvolle Hochtemperaturwärme, die sonst aus alternativen Wärmequellen erzeugt werden müsste. Basieren diese Alternativwärmequellen auf fossilen Brennstoffen werden die mit der Nutzung verbundenen Umweltemissionen (Kohlendioxid, Stickoxide, Schwefeldioxid) vermieden.

Ad-/Absorptions-Kältemaschinen substituieren Kälte, die ansonsten mit Hilfe von Kompressions-Kältemaschinen unter Verbrauch elektrischer Energie erzeugt werden müsste. Dabei entspricht der Elektroenergieverbrauch einem mit dem COP des Kompressions-Kältemaschine korrelierenden Bruchteil/Vielfachen der erzeugten Kälte. Mit der eingesparten Elektroenergie werden auch die eventuell damit verbundenen Umweltbeeinflussungen vermieden.

Medienübergreifende Wirkungen

In Wärmepumpen und Kältemaschinen werden Kältemittel eingesetzt, die – außer im Falle des Wassers – teilweise gefährlich in der Handhabung (toxisch, gesundheitsgefährdend, brennbar) und/oder umweltschädlich (Sicherheitskältemittel = halogenierte Kohlenwasserstoffe) sein können. Dabei bezieht sich die Umweltschädlichkeit einerseits auf das sog. Global Warming Potential (GWP, Erderwärmungspotenzial) und andererseits auf das Ozon Depletion Potential (ODP, Ozonzerstörungspotenzial). GWP- und ODP-Werte von Kältemitteln findet man in der Literatur. Kältemittel mit hohen GWP- und/oder ODP-Werten sind bereits verboten, in Neuanlagen dürfen nur zugelassene Kältemittel eingesetzt werden.

Betriebsdaten

Der Betrieb von Kompressions- sowie Ab-/Adsorptions-Wärmepumpen (oder -Kältemaschinen) kann durch Messung der wesentlichen Energieströme und Berechnung (Gleichungen siehe oben) der für den Betrieb maßgeblichen Kennzahlen (Momentanwerte wie COP, Heizzahl, Wärmeverhältnis oder Jahresarbeitszahl) überwacht werden.

Zur Messung der aufgenommenen elektrischen Arbeit einer Kompressionswärmepumpe dienen Stromzähler, die abgegebene Wärmemenge kann mittels eines Wärmemengenzählers erfasst werden. Bei Gas-Ab-/Adsorptions-Wärmepumpen wird die zugeführte Wärme aus der verbrauchten Brenngasmenge und dessen Heizwert bestimmt.

Die Effizienz einer Wärmepumpe bzw. Kältemaschine sinkt generell mit wachsender Temperatur zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, weil infolgedessen das Verhältnis zwischen Kondensator- und Verdampferdruck ansteigt und sich dadurch steigende Verluste (z. B. im Verdichter, Strömungsdruckverluste, Dichtheitsverluste usw.) ergeben. Bei großen Druckverhältnissen empfiehlt sich – falls verfügbar – der Einsatz mehrstufiger Systeme.

Anwendbarkeit

Kompressions- bzw. Gas-Absorptions-Wärmepumpen können aufgrund der Spezifik der verwendeten Kältemittel Wärme bis zu Temperaturen von max. 120 °C liefern. In Absorptions-Wärmepumpen kann Abwärme bis etwa 120 °C zur Beheizung des Austreibers eingesetzt werden, das Temperaturniveau der nutzbaren Kondensatorwärme liegt entsprechend darunter. Adsorptions-Wärmepumpen können auch Wärme bei höheren Temperaturen liefern (auch über 200 °C).

Typische Einsatzbereiche sind daher die Versorgung von Heizungs- (Büro-, Werk-, Wohnräume) oder Warmwassersystemen mit Wärme zwischen 60 °C und 80 °C bzw. die Versorgung thermischer Prozesse mit sog. Prozesswärme bis max. 120 °C (Trocknungs-, Wärmebehandlungs-, Um-/Urformprozesse, Waschen, Garen).

MVR-Anlagen nutzen Prozessdampf als Abwärmequelle zur Wärmetransformation in Nutzwärme (meist Wasserdampf, evtl. auch organische Dämpfe, z. B. in der Petrolchemie) und finden sich daher nur in industriellen Anwendungen. Entsprechend der Anlagenspezifikation (siehe Abbildung 3.3-6) liegt die Temperatur der Nutzwärme maximal 70 K über der Temperatur der Abwärmequelle.

Absorptions-Kältemaschinen mit dem Stoffsystem Ammoniak/Wasser eignen sich zur Kälteerzeugung bis -70 °C. Damit können Kühl-/Gefrierräume oder -häuser ebenso mit Kälte versorgt werden wie technische Prozesse.

Absorptions-Kältemaschinen mit dem Stoffsystem Wasser/Lithiumbromid und Adsorptions-Kältemaschinen können aufgrund der Eigenschaften des Kältemittels Wasser nur Kälte bei Temperaturen von 3 °C aufwärts erzeugen (sog. Klimakälte). Damit wird i. d. R. die Klimatisierung von Büro-, Werk- oder Wohnräumen dezentral oder durch zentrale Kältemaschinen über sog. Kaltwassersysteme (Vorlauftemperatur des Kälteträgers meist 6 °C) realisiert.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe kann durch Vergleich der Kosten für die Beschaffung (Investition) und den Betrieb (Hilfsenergie = energetischer Aufwand, Wartung) des Systems mit den durch die erzeugte Nutzenergie eingesparten Kosten bewertet werden. Grundsätzlich sind die Anlagen umso wirtschaftlicher, je höher die die Effizienz des Systems beschreibenden Kennzahlen (COP, Heizzahl, Wärmeverhältnis) sowie die Zahl der Betriebsstunden pro Jahr und damit die Jahresarbeitszahl sind. Allgemein muss gelten:

Formel 3.3-11

$$\frac{Erzeugte\ Energiemenge\ [kWh]\ x\ spez.\ Energiekosten\ \left[\frac{€}{kWh}\right]}{Verbrauchte\ Energiemenge\ [kWh]\ x\ spez.\ Energiekosten\ \left[\frac{€}{kWh}\right] + Wartungskosten\ [€]} \geq 1$$

Nur unter dieser Bedingung kann eine Wärmepumpe wirtschaftlich arbeiten.

Triebkraft für die Umsetzung

- Senkung der Kosten der Wärmeerzeugung durch Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme (Wärmepumpen),
- Senkung der Kosten der Kälteerzeugung durch Abwärmenutzung (Ab-/Adsorptions-Wärmepumpen),
- Einsparung von Primärenergieträgern und – speziell bei fossilen Energieträgern – der damit verbundenen Schadstoffemissionen (CO_2, NO_x, SO_2, Staub), Vermeidung von Gebühren.

Beispiele

a) Die Firma Purkart Systemkomponenten ist ein metallverarbeitender Betrieb in Großrückerswalde und betreibt eine Wärmepumpe zur Wärmerückgewinnung aus dem Abgas des Einbrennofens und aus dem Kühlwasser von Laserschneidanlagen. Die Wärme wird nach der Rückgewinnung als Raum- und Prozesswärme zur Beheizung von Reinigungsbädern eingesetzt. So konnten bei gleichbleibendem Stromverbrauch 38 % des ursprünglichen Gaseinsatzes eingespart werden (118).

b) An der StoraEnso Sulfithütte in Nymölla, Schweden, wurde 1999 ein mechanisches Brüdenkompressionssystem (MVR-Prozess) installiert. Die Wärmequelle ist der aus der Vorverdampfung der Schwarzlauge abgegebene Dampf, welcher vor der Wiederverwendung gereinigt wird. Der Druck wird auf ca. 1,7 bar erhöht und der kondensierende Dampf für die Erwärmung von Speisewasser und für die Fernheizung verwendet.

3.3.4 Rückkühlsysteme

Rückkühlsysteme kommen dann zum Einsatz, wenn Abwärme aus einem Prozess abgeführt werden muss und dabei nicht genutzt (zurückgewonnen) werden kann. Dabei handelt es sich meist um Niedertemperatur-Abwärme, z. B. aus Kondensations-Kraftwerken oder thermischen Prozessen in Industrie und Gewerbe. Die Abwärme muss dann an die Umgebung abgegeben werden, z. B. an die Atmosphäre oder fließende bzw. stehende Gewässer. Ziel ist die Rückkühlung des Abwärme-Trägermediums in den Bereich der Umgebungstemperatur.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über verfügbare Technologien der Rückkühlung von Wärmeträgermedien. Im einfachsten Fall wird ein Wärmeübertrager (siehe 3.3.1) genutzt, wobei der Abwärmeträger das Heizmedium und die Umgebungsluft bzw. das Wasser aus einem Gewässer das Kühlmedium repräsentieren. Ein typisches Beispiel sind Luftkondensatoren (luftgekühlte Kondensatoren), in denen ein dampfförmiger Abwärmeträger verflüssigt und die Abwärme an die Umgebungsluft transportiert wird.

Es existieren je nach erforderlicher thermischer Leistung auch komplexere Rückkühlsysteme, im BVT-Merkblatt „Industrielle Kühlsysteme“ sind diese Technologien detaillierter beschrieben. Auf folgende industrielle Kühlsysteme wird darin eingegangen:

a) **Durchlauf-Kühlsysteme** – Diese Rückkühlsysteme nutzen Wasser aus einem Oberflächengewässer als Kühlmedium eines Wärmeübertragers (z. B. Oberflächenkondensatoren) und leiten dieses ungekühlt wieder in das Gewässer ein.
b) **Ablauf-Kühlsysteme** (offene Umlaufkühlsysteme mit Nasskühlturm) – Dem aus einem Oberflächengewässer entnommenen und zur Rückkühlung verwendeten Wasser wird vor dem Wiedereinleiten in das Gewässer zumindest ein Teil der Wärme in einem Nasskühlturm entzogen. Dazu wird das Wasser im Kühlturm verdüst, im Gegenstrom wird die Wärme sehr effektiv durch Konvektion und Verdunstung (Phasenwechsel) von der Tropfenoberfläche an die Kühlluft übertragen. Durch die Wasserverdunstung können am Luftaustritt des Kühlturms Wasserschwaden entstehen, die bei großen Anlagen das Kleinklima in der Kühlturmumgebung beeinflussen. Die Kühlluftströmung im Kühlturm kann durch Naturzug oder Ventilation (Hilfsenergiebedarf) erzeugt werden.
c) **Umlauf-Kühlsysteme** (geschlossener Kreislauf) – Diese Rückkühlsysteme übertragen die Abwärme über einen Zwischenkreislauf vollständig an die Umgebungsluft.
   - **mit Trockenkühltürmen** – Das im Kreislauf befindliche Kühlmedium nimmt die Abwärme in einem Wärmeübertrager vom Abwärmeträger auf und gibt diese in einem zweiten, in der Kühlluft des Trockenkühlturmes befindlichen Wärmeübertrager an die Atmosphäre ab. Die Leistung von Trockenkühltürmen ist bei gleicher Baugröße deutlich geringer als bei Nasskühltürmen (fehlender Verdunstungswärmetransport, keine Schwadenbildung). Die Kühlluftströmung kann durch Naturzug bzw. Ventilation entstehen.
   - **mit Nasskühltürmen** – Das im Kreislauf befindliche Kühlmedium wird wie in b) beschrieben abgekühlt, sammelt sich in der Kühlturmtasse und wird von dort zurück in den Kreislauf gespeist (evtl. vorherige Aufbereitung/Filtration).
   - **mit Hybridkühltürmen** (Nass-Trocken-Kühltürme) – Das im Kreislauf befindliche Kühlmedium wird zum großen Teil durch einen in der Kühlluftströmung des Kühlturmes (Naturzug oder Ventilation) befindlichen Wärmeübertrager geleitet, ein Teil des Kühlmediums wird zusätzlich auf die luftseitige Oberfläche dieses Wärmeübertragers verdüst, um dort zu verdunsten. Dadurch kann die Wärmeleistung im Vergleich zum Trockenkühlturm gesteigert werden, die Schwadenbildung ist eher gering.

Bei der Verwendung von Oberflächenwasser als Kühlmedium sind insbesondere die Auswirkungen auf die Umwelt zu beachten. Gerade bei Rückkühlung im großen Maßstab (MW-Bereich) ist die Kühlwasserentnahme aus Gewässern reglementiert, da größere Kühlsysteme Einfluss auf die Biodiversität eines Gewässers nehmen können (Verminderung der Sauerstofflöslichkeit im Wasser bei

steigender Temperatur). Die zulässige Temperaturerhöhung eines Flusses durch Wärmeeintrag von Rückkühlsystemen ist von der Gewässerart abhängig und beträgt maximal 3 Kelvin (Wasserhaushaltsgesetz- WHG, 2009). Somit sollen ein „Umkippen“ eines Flusses oder Sees verhindert und ein ausgeglichener Temperatur- und Sauerstoffhaushalt für Fische und andere Lebewesen sichergestellte werden.

Primär müssen eine Prozessoptimierung oder Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung entsprechend des Standes der Technik in Betracht gezogen werden, ehe die Abwärme mittels eines Rückkühlsystems an die Umgebung abgegeben wird. Eine Rückkühlung sollte nur in technologisch nicht anders lösbaren Ausnahmefällen mit Hilfe einer Kompressions-Kältemaschine und damit unter Einsatz weiterer Primärenergie erfolgen.

Nachfolgend werden einige wichtige Auswahl- und Standortkriterien für Rückkühlsysteme im Überblick zusammengefasst. Weitere Informationen dazu finden sich auch im ICS BREF im Kapitel 4.2.1 in Form von Tabellen mit Bezügen zu Kapiteln, in denen spezielle Technologien im Detail beschrieben werden.

Für die Auswahl von Rückkühlsystemen sollten folgende allgemeine Grundsätze beachtet werden:

- Abwärme bei Temperaturen über 60 °C sollte nach Möglichkeit zurückgewonnen werden. Ist dies aufgrund des Fehlens passender Verbraucher nicht möglich, so ist eine direkte Abgabe an die Umgebungsluft bzw. ein Vorkühlen mit derselben zu empfehlen, um Oberflächengewässer als Wärmesenke thermisch nicht zu überlasten.
- Abwärme im Bereich zwischen Umgebungstemperatur und 60 °C kann bei Vorhandensein geeigneter Gewässer durch Wasserkühlung entsorgt werden.
- Bei der Wärmeabfuhr aus Gefahrstoffen sind indirekte Kühlsysteme einzusetzen, um den Gefahrstoff und die Umgebung als Wärmesenke stofflich zu entkoppeln und Umweltschädigungen durch austretende Gefahrstoffe zu vermeiden.

Für die Standortwahl eines Rückkühlsystems gilt Folgendes:

- Es sind die klimatischen Bedingungen am Standort zu beachten, speziell bei Rückkühlsystemen auf Basis der Umgebungsluft (Jahreszyklus der Lufttemperatur, Luftfeuchte), aber auch bei der Nutzung von Oberflächengewässern. Die Rückkühlung eines Abwärmeträgers kann unter idealen Bedingungen minimal bis zur Umgebungstemperatur erfolgen, dies muss den Betrieb der Abwärme erzeugenden Anlage ganzjährig sicherstellen.
- Rückkühlsysteme müssen hinsichtlich der Baugröße und – z. B. bei Dachkonstruktionen – auch in Bezug auf Masse, Montage, Windlast und andere Größen an die Randbedingungen des Standortes angepasst werden.
- An Standorten mit einer begrenzten Verfügbarkeit an Oberflächenwasser muss eine direkte Wärmeabgabe an die Umgebungsluft oder der Einsatz eines Rückkühlsystems mit einem geschlossenen Wasserkreislauf erfolgen.
- An Standorten mit Oberflächengewässern, die eine hohe Empfindlichkeit gegen das Einbringen thermischer Lasten (Biodiversivität) aufweisen, müssen die Masseströme der Kühlwasserentnahme und Wiedereinspeisung entsprechend der Vorgaben limitiert werden.
- An Standorten von Rückkühlsystemen großer Leistung in der Nähe von Wohn- oder Industrieparks mit Auflagen bezüglich der Reduzierung der Schwadenbildung bzw. der Kühlturmhöhe können alternativ zum Nasskühlturm Hybridkühltürme eingesetzt werden. Diese weisen jedoch bei gleicher Baugröße geringere thermische Leistungen auf.

Erreichter Umweltnutzen

entfällt

Medienübergreifende Wirkungen

Bei Nutzung von Oberflächengewässern ist die gesetzlich zulässige Temperaturerhöhung einzuhalten, außerdem muss die Ansaugöffnung durch geeignete Filter geschützt werden. Bei Nasskühltürmen kann es zu Schwadenbildung kommen, welche das lokale Kleinklima beinträchtigen.

Betriebsdaten

Für den Betrieb eines Rückkühlsystems muss in jedem Fall Hilfsenergie aufgewendet werden (Pumpen, Ventilatoren, Wasseraufbereitungstechnik). Bei Nass- und Hybridkühltürmen kann eine Rückkühlung bis nahe der Umgebungstemperatur erfolgen, bei Trockenkühltürmen liegt die Rückkühltemperatur einige Kelvin über der Umgebungstemperatur.

Insbesondere Bauteile, welche mit Kühlwasser aus Oberflächengewässern beaufschlagt werden, sind in regelmäßigen Intervallen zu reinigen. Reinigungs-/Wartungsintervalle sind anhand der speziellen Betriebserfahrungen des jeweiligen Rückkühlsystems festzulegen.

Anwendbarkeit

Rückkühlsysteme werden in erster Linie im Zusammenhang mit Wärmekraftmaschinen ohne Wärmenutzung (keine KWK-Anlage) eingesetzt. Typische Anwendungen sind Rückkühlsysteme für zentrale Kühlwasserkreisläufe in gewerblichen bzw. industriellen Produktionsanlagen, Serverräumen, Druckluftkompressoren und dergleichen.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Rückkühlsysteme sichern den Betrieb der übergeordneten Anlage, in der die Abwärme anfällt, und sind aus diesem Grund bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung der jeweiligen Anlage zu berücksichtigen.

Triebkraft für die Umsetzung

- Sicherung des Betriebes der übergeordneten Anlage.

3.4 Kraft-Wärme-Kopplung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

3.5 Elektrische Energieversorgung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

3.6 Elektromotorische Antriebssysteme

Einführung

Ein elektromotorischer Antrieb wandelt mit Hilfe eines Elektromotors elektrische in mechanische Energie um, die dem Antrieb einer Maschine dient. Im engeren Sinne definiert sich nach DIN EN 61800-9-2 (119) ein elektrisches Antriebssystem (Power Drive System, PDS) als Kombination aus Elektromotor und einem vollständigem Antriebsmodul (Complete Drive Module, CDM). Dieses Antriebsmodul kann z. B. ein Frequenzumformer (FU) sein, der mit allen Schutz- und Hilfseinrichtungen ausgestattet ist.

Wird ein Elektromotor ohne Antriebsmodul direkt am Netz betrieben, muss dieser mit einem Motorstarter ausgerüstet werden und wird dann als „Motorsystem“ bezeichnet. Ein elektromotorisches Antriebssystem kann analog als „Motorsystem“ bezeichnet werden.

Bezieht man die angetriebene Maschine („Lastmaschine“), z. B. eine Zentrifugalpumpe, und ggf. vorhandene mechanische Kraftübertragungselemente (Getriebe) noch mit in den Betrachtungsrahmen ein, wird von einem „von Elektromotoren angetriebenen System“ bzw. einem erweiterten Produkt

gesprochen (z. B. Pumpe, Druckluftkompressor etc.). In den meisten industriellen Anwendungen wird die mechanische Arbeitsleistung über eine rotierende Welle auf die angetriebene Maschine übertragen. Elektromotoren sind die am häufigsten verwendeten Antriebsmaschinen im industriellen Einsatz und dienen u. a. dem Betrieb von Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Mischern, Förderanlagen, Entrindungstrommeln, Schleifgeräten, Sägen, Extrudern, Zentrifugen, Pressen, Walzwerken.

Elektromotoren bilden weltweit die größte Gruppe an Stromverbrauchern. Schätzungen besagen, dass Motoren zwischen 43 % und 46 % des gesamten globalen Stromverbrauchs ausmachen. In der Industrie sind es sogar 69 % des genutzten Stroms (119). Prinzipiell ist zwischen drehzahlkonstanten und drehzahlgeregelten Antrieben zu unterscheiden.

Der Stromverbrauch der elektromotorisch angetriebenen Systeme wird durch viele Faktoren beeinflusst, wie zum Beispiel durch:

- Effizienz und angemessene Leistungsgröße der Motoren,
- Art der Motorsteuerung/des Antriebsmoduls (CDM),
- Qualität der Energieversorgung,
- Effizienz des mechanisches Getriebes,
- Praktiken der Instandhaltung,
- Effizienz der angetriebenen Maschine.

Es bestehen mindestens zwei verschiedene Herangehensweisen, um von Elektromotoren angetriebene Systeme energieeffizient zu gestalten und zu optimieren:

1. Einzelbetrachtung: Die Bestandteile des elektromotorisch angetriebenen Systems werden einzeln betrachtet. Es wird sichergestellt, dass nur Ausrüstungen mit hoher Effizienz eingesetzt werden.
2. Systembetrachtung: Um die Energieeffizienz des Gesamtsystems einschätzen und optimal gestalten zu können, gilt es den Bedarf des (Produktions-)Prozesses, die Fahrweise des Systems, die Effizienz und das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems zu analysieren und aufeinander abzustimmen.

> Anmerkung zur inhaltlichen Abgrenzung des Themengebietes und zur Darstellung im Rahmen des BVT-Merkblattes und den Vollzugshinweisen:
>
> Elektromotoren sind auch integrierter Bestandteil komplexer technischer Systeme, die eigenständig als Querschnittstechnologien bezeichnet werden, insbesondere Pumpen, Ventilatoren und Drucklufterzeugungsanlagen (Kompressoren). Deshalb bestehen teilweise inhaltliche Überschneidungen zu den diese Technologien beschreibenden Dokumenten. Soweit für das unmittelbare Verständnis zweckmäßig, werden diese Überschneidungen in den jeweiligen Kapiteln bewusst beibehalten. Teilweise wird in bei der Darstellung der Antriebskomponente der jeweiligen Querschnittstechnologien auch auf die hier nachfolgenden speziellen Darstellungen zu elektromotorischen Antrieben verwiesen.

Eine normative Herangehensweise, die das elektrische Antriebssystem umfassender berücksichtigt, als dies eine getrennte Bilanzierung der Systemkomponenten ermöglicht, beschreibt die Norm DIN EN 61800-9-2:2018-01 (119).

In dieser Norm wird zusätzlich zu der IE-Klassifizierung von Elektromotoren (120) der Frequenzumrichter (Complete-Drive-Module, CDM) sowohl getrennt als auch in Kombination mit dem Elektromotor als Antriebssystem (Power Drive System, PDS) bilanziert. Für die getrennte Betrachtung des Frequenzumrichters sind folgende Effizienzklassen definiert:

- IE0: mindestens 25% höhere Verluste als Referenz
- **IE1 (technischer Standard) = Referenz**

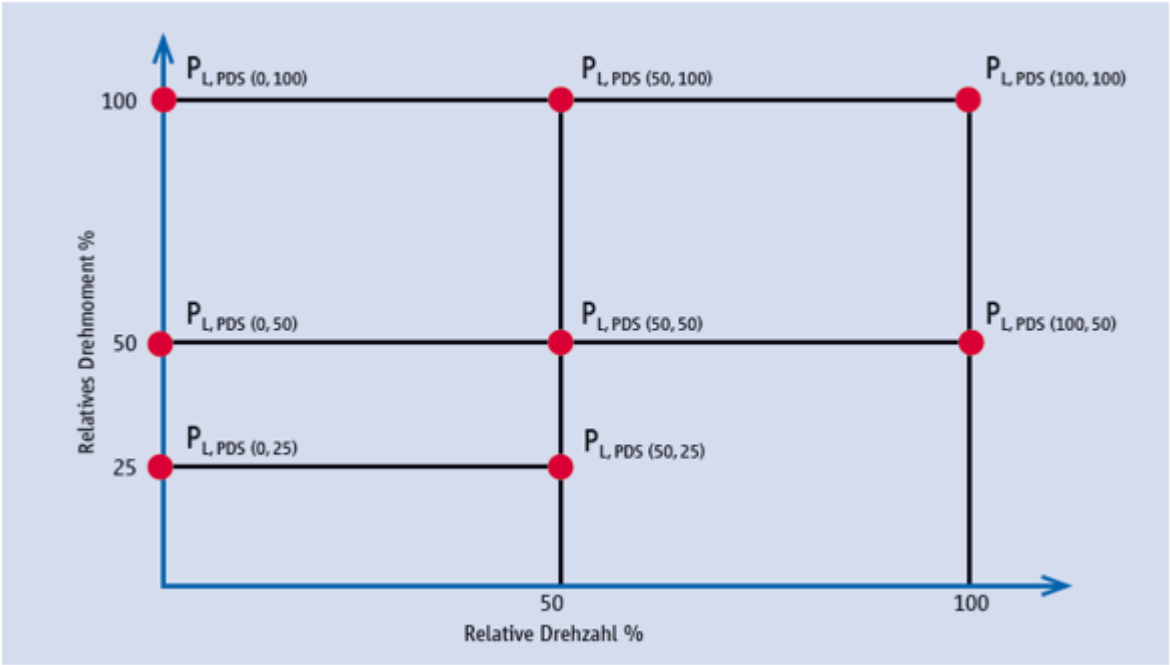
- IE2: mindestens 25% geringere Verluste als Referenz

Die Kombination aus Elektromotor und Frequenzumrichter (Power Drive System) wird durch die Effizienzklassen IES (International Efficiency of System) beschrieben. Dabei bildet die Klasse IES1 wiederum das Referenzsystem ab:

- IES0: mindestens 20% höhere Verluste als Referenz
- **IES1 (technischer Standard) = Referenz**
- IES2: mindestens 20% geringere Verluste als Referenz

Das Besondere dieser Norm ist die Beurteilung des gesamten Antriebssystems (PDS) in charakteristischen Teillastbereichen. Das Antriebsystem wird dabei in acht verschiedenen, praxistypischen Betriebspunkten getestet und in Bezug auf ein definiertes Referenzsystem über die IES-Klassen bewertet. Die Test-Referenzpunkte für die ermittelte Verlustleistung P_L des Gesamtsystems (PDS) werden dabei durch die Werte für die relative Drehzahl (Bezug: 100% = Nenndrehzahl) und das relative Drehmoment (Bezug: 100% = Nenndrehmoment) spezifiziert, die in dieser Reihenfolge in Klammern angegeben sind, siehe nachfolgende Abbildung 3.6-1.

Abbildung 3.6-1: Drehmoment-über-Drehzahl-Kennlinienfeld mit Referenzpunkten für die elektrische Verlustleistung nach DIN EN 61800-9-2



Quelle: (121)

Lasten mit einer quadratischen Drehzahl-/Drehmomentkennlinie (z. B. übliche Pumpen-aggregate) können über die Betriebspunkte $P_{L,PSD(50,25)}$, $P_{L,PSD(100,50)}$ und $P_{L,PSD(100,100)}$ hinreichend für ihren Anwendungsbereich charakterisiert werden (122). Lasten mit konstantem Drehmoment (z. B. Hebeeinrichtungen) benötigen zusätzlich die Punkte $_{PL, PSD(0,25)}$, $_{PL, PSD(0,50)}$ und $P_{L, PSD(0,100)}$ (ebd.), damit die Motorverluste bestimmt werden können.

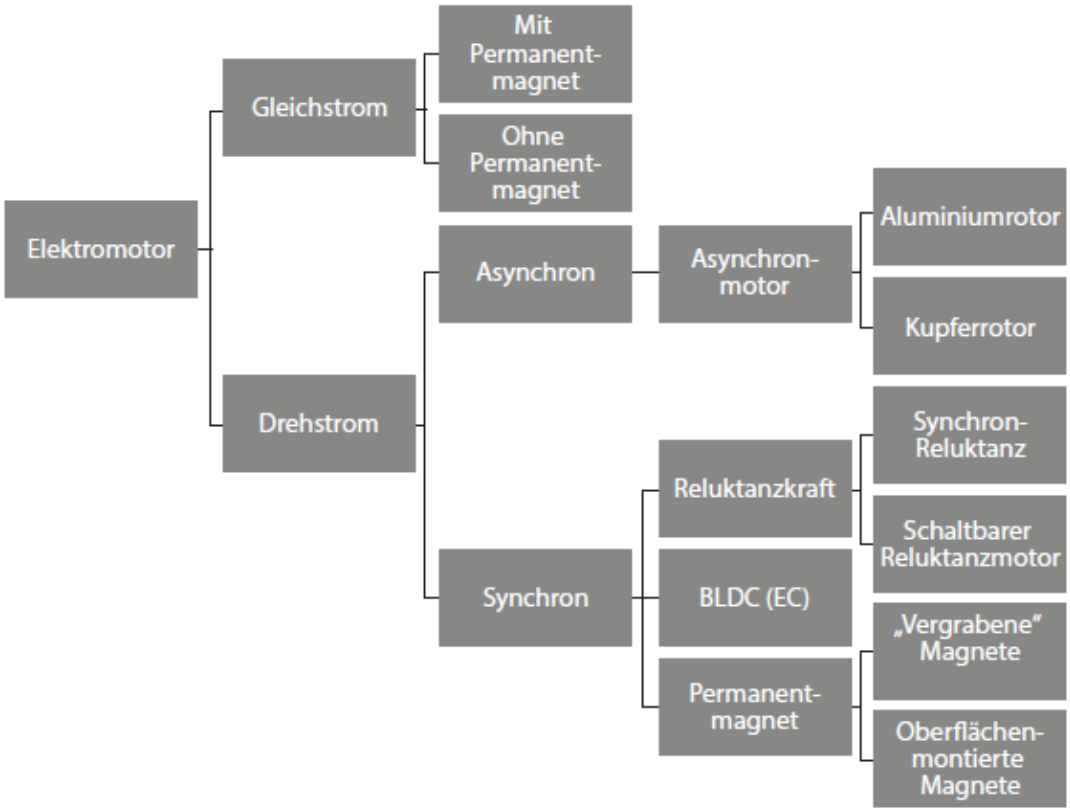
Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten eines elektrischen Antriebs, beginnend mit der Hauptkomponente - dem Elektromotor - kurz beschrieben. Die rotierenden Arbeitsmaschinen werden nicht dargestellt, da diese bereits Gegenstand eigenständiger Einzelkapitel im Hauptbericht zur Aktualisierung des BVT-Merkblattes "Energy Efficiency" sind.

3.6.1 Energieeffiziente Motoren

Beschreibung und Betriebsdaten

Elektromotoren können in zwei Hauptgruppen aufgeteilt werden: Gleichstrommotoren (DC-Motoren) und Wechselstrommotoren (AC-Motoren). Wechselstrommotoren unterscheiden sich wiederum in einphasig betriebene Wechselstrommotoren und Drehstrommotoren. Einphasige Wechselstrommotoren werden vorwiegend in kleinen Baugrößen bzw. für geringe mechanische Antriebsleistungen produziert. Drehstrommotoren sind in der Industrie sowohl hinsichtlich der Anzahl als auch des Anteils am Energieverbrauch von Antrieben insgesamt deutlich dominierend. Nachfolgend ist eine grobe Systematik praxisüblicher Motorenbauarten dargestellt (Abbildung 3.6-2).

Abbildung 3.6-2: Vereinfachte Übersicht praxisüblicher Motorbauarten



Quelle: (123)

Drehstrommotoren

<u>Asynchronmotoren</u>

Drehstrom-Asynchron- oder Drehstrom-Induktionsmotoren sind die am häufigsten eingesetzten elektrischen Antriebsmaschinen. Diese sind sehr robust in der Bauart, einfach auszulegen, relativ preisgünstig in der Anschaffung und stellen geringe Anforderungen an die Instandhaltung. Im Gehäuse dieses Motors befindet sich der Stator, ein Blechpaket mit der darin eingelegten Mehrphasenwicklung (auch als Ständer bezeichnet). Innerhalb des Stators befindet sich als bewegliches Element ein Rotor (Läufer). Dieser besteht bei den üblicherweise verwendeten Kurzschluss- oder Käfigläufern aus massiven, gut leitfähige Stäben, die an beiden Enden des Rotors ringförmig kurzgeschlossen sind. Der Stromfluss durch die Ständerwicklungen baut ein Magnetfeld auf, welches aufgrund des Drehstroms kreisförmig wandert. Dieses Magnetfeld induziert eine Spannung im Rotor, die einen Stromfluss zur Folge hat und ebenfalls ein Magnetfeld aufbaut. Das Ständerfeld kann nun auf das Läuferfeld wirken

und ein Drehmoment auf den Läufer ausüben. Somit muss der Läufer nicht an eine Spannungsversorgung angebunden sein, um ein wirksames Magnetfeld aufzubauen. Da ein wirksames Drehmoment nur dann aufrechterhalten werden kann, wenn die Drehfrequenz beider Magnetfelder leicht unterschiedlich ist, stellt sich eine leicht geringere Drehfrequenz des Rotors im Vergleich zur Frequenz des Drehfeldes des Stators dar, der Motor läuft als asynchron (unsynchron). Vorteil von Asynchronmotoren ist deren Möglichkeit, direkt am Netz gestartet und betrieben zu werden. Konstruktionsbedingt weist diese Bauart beim Direktstart jedoch nur ein geringes Drehmoment und einen hohen Anlaufstrom auf. Bei direktem Netzbetrieb können Drehstrom-Asynchronmaschinen nur mit konstanter Drehzahl betrieben werden, die lastabhängig geringfügig schwankt. Variable Drehzahlen können nur durch Sonderbauformen (polumschaltbare Ausführung) oder durch zusätzliche Antriebsmodule (Frequenzumrichter) realisiert werden. Drehstrommotoren sind für Antriebsleistungen zwischen wenigen 100 W bis zu mehreren 100 MW erhältlich.

Synchronmotoren

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Drehstrom-Asynchronmotoren sind Synchronmotoren dadurch gekennzeichnet, dass der Läufer (Rotor) synchron mit der Frequenz des Drehfeldes des Stators läuft. Drei wesentliche Bauarten sind hierbei zu unterscheiden:

- EC-Motoren (EC = Electronically Commutated Motor - elektronisch kommutierter Motor) bzw. synonyme Bezeichnung BLDC- Motoren (BLDC = Brushless Direct Current Motor - bürstenloser Gleichstrommotor),
- Reluktanzmotoren,
- Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotoren.

EC-Motoren/BLDC-Motoren

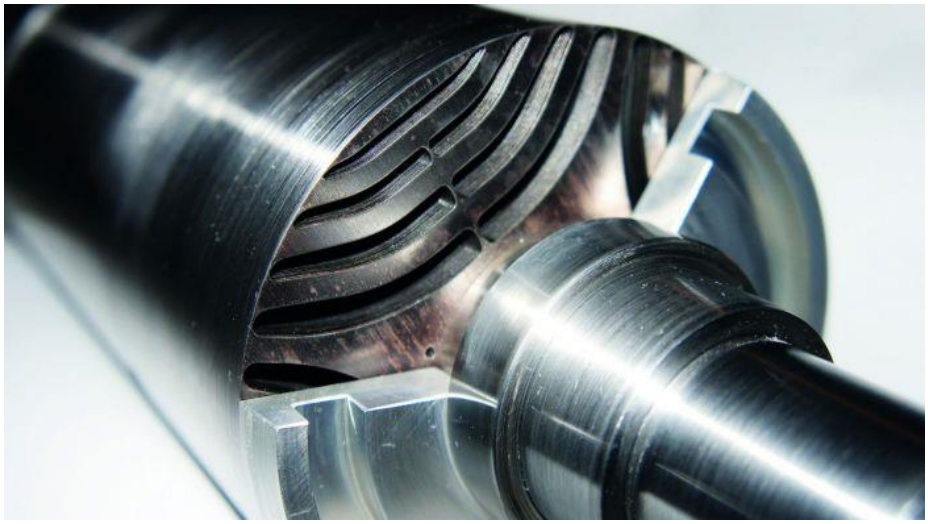
EC-Motoren/BLDC-Motoren sind entgegen ihrer Namensgebung keine Gleichstrommotoren, sondern im Aufbau mit einem Synchronmotor mit Permanentmagnet-Rotor vergleichbar. Die oft dreisträngige Drehstromwicklung des Stators wird durch eine geeignete Schaltung (elektronische Kommutierung) so angesteuert, dass sie ein drehendes magnetisches Feld erzeugt, welches den permanenterregten Rotor mitzieht. Typische Baugrößen von EC-Motoren reichen von wenigen Watt bis zu ca. 10 kW. Eine häufige Anwendung von EC-Motoren sind Ventilatoren. Besonders in kleinen Leistungsbereichen in einphasiger Ausführung sind EC-Motoren herkömmlichen Motorbauformen, wie Universal- oder Spaltpolmotoren (hier nicht näher erläutert), im Hinblick auf deren Wirkungsgrad deutlich überlegen, auch in größeren Leistungsbereichen werden mit EC-Motoren gute Wirkungsgrade erreicht und ermöglichen eine drehzahlvariable Fahrweise.

Reluktanzmotoren

Reluktanzmotoren unterscheiden sich von Induktions- und Synchronmotoren mit Permanentmagnet durch deren physikalisches Prinzip der Drehmomenterzeugung. Im Gegensatz zur sogenannten Lorenz-Kraft, die eine Ladung in einem magnetischen oder elektrischen Feld erfährt (Wirkprinzip der Induktions- und Synchronmotoren) wirkt bei Reluktanzmotoren die sogenannte Reluktanzkraft. Diese entsteht aufgrund der Änderung des magnetischen Widerstands im Rotor. Dieser besitzt in einer Richtung einen möglichst geringen Widerstand und rechtwinklig dazu eine hohe magnetische Reluktanz (d. h. eine gute magnetische „Isolation“). Das Drehmoment entsteht dadurch, dass der Rotor versucht, die magnetisch leitfähige Richtung am Statorfeld auszurichten. Der Aufbau eines Synchron-Reluktanzmotors ist im Stator identisch mit dem eines herkömmlichen Induktionsmotors. Der Unterschied besteht im Aufbau des Rotors. Dieser ist unerregt, besitzt keine Wickelungen oder Permanentmagneten, sondern besteht aus einem massiven oder geblechten Metall mit einer möglichst

ausgeprägten magnetischer Vorzugsrichtung (z. B. Elektrobleche mit Luftsperren, siehe nachfolgende Abbildung).

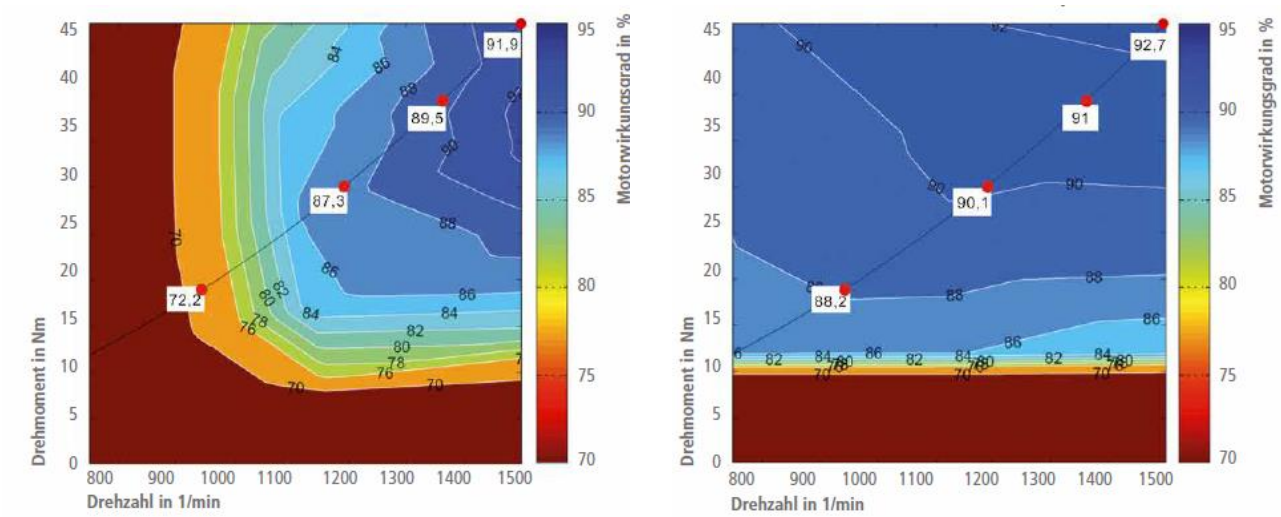
Abbildung 3.6-3: Schnitt durch den Rotor eines Synchron-Reluktanzmotors



Quelle: (124)

Zum Anfahren ist beim Synchron-Reluktanzmotor ein Frequenzumrichter (FU) notwendig. Großer Vorteil dieser Technologie sind die kaum vorhandenen Läuferverluste im Betrieb, die bei Asynchronmotoren etwa 25 - 30% der Gesamtverluste ausmachen. Dementsprechend lassen sich sehr hohe Wirkungsgrade (insbesondere im Teillastbetrieb) erreichen. Hierdurch kommt es zu einer geringeren Erwärmung im Rotor, was sich vorteilhaft auf die Widerstandsfähigkeit von Lagern und Wicklungsisolationen auswirkt. Einen beispielhaften Vergleich des Wirkungsgradverhaltens eines 7,5 kW IE4 Synchron-Reluktanzmotors und eines leistungsgleichen IE3-Asynchronmotors bei Betrieb am Frequenzumrichter unter Nenn- und Teillastbedingungen ist in Abbildung 3.6-4 dargestellt.

Abbildung 3.6-4: Beispielhafter Vergleich der elektrischer Wirkungsgrade zweier 7,5 kW Drehstrommotoren unterschiedlicher Bauart unter Teillastbedingungen



7,5 kW Asynchronmotor IE3 am FU

7,5 kW Synchron-Reluktanzmotor IE4 mit integriertem FU

Quelle: (125)

Geschaltete Reluktanzmotoren sind ähnlich aufgebaut, die Rotoren haben aber eine ausgeprägte Zahnstruktur und die Statoren konzentrierte Wicklungen (Pole). Für den Betrieb dieser Motoren ist eine besondere elektronische Regelung notwendig, die dafür sorgt, dass die Statorwicklungen auf eine besondere Weise mit Spannung versorgt werden und die Statorpole damit rotierend entsprechende Magnetfelder aufbauen. Die Pole (Zähne) des Rotors folgen über die wirkenden Reluktanzkräfte dieser Bewegung und generieren damit ein Drehmoment. Geschaltete Reluktanzmotoren lassen sich aus diesem Grund auch nicht direkt am Netz betreiben.

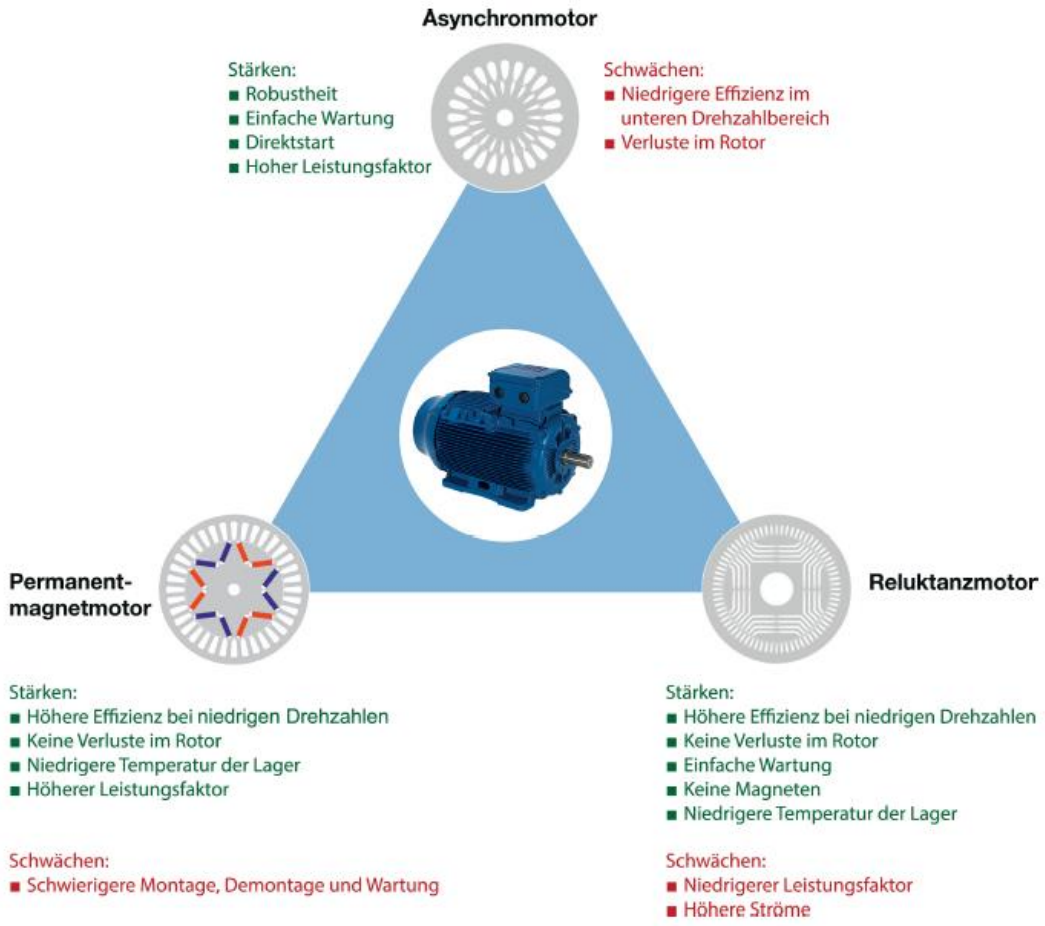
Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotoren

Ähnlich hohe Wirkungsgrade wie Synchron-Reluktanzmotoren erreichen Synchron-Motoren mit Permanentmagnet-Rotoren. Diese benötigen analog einen Frequenzumrichter, um am Netz betrieben werden zu können. Aufgrund der Verwendung von Permanent-Magneten auf Basis seltener Erden sind diese teurer als äquivalente Baugrößeren anderer Drehstrommotoren.

Eine besondere Bauart ist der sogenannte LSPM-Motor (Line Start Permanent Magnet Motor). Dieser Motor ist konstruktiv ein Drehstrom-Asynchronmotor, der im Kurzschlussläufer zusätzlich Permanentmagnete enthält. Der Motor kann auch ohne Frequenzumrichter direkt am Netz betrieben werden. Nach einem asynchronen Anlauf synchronisiert sich der Motor auf die Speisefrequenz und läuft anschließend im Synchronbetrieb. Hierdurch treten im Betrieb keine Rotorverluste auf, und es können hohe Wirkungsgrade realisiert werden.

Nachfolgende Abbildung stellt grundlegende Vor- und Nachteile verschiedener Bauarten von Drehstrommotoren zusammenfassend gegenüber, mit denen nach Stand der Technik eine hohe Energieeffizienz erreicht werden kann (Abbildung 3.6-5):

Abbildung 3.6-5: Vor- und Nachteile energieeffizienter Bauarten von Drehstrommotoren



Quelle: (126)

Gleichstrommotoren

Die Statoren von Gleichstrommotoren sind entweder als Permanentmagnete ausgeführt oder werden durch eine Erregerwicklung magnetisiert. Das wesentliche Merkmal von Gleichstrommotoren ist ein am Rotor installierter mechanischer Wechselrichter, der als Kommutator oder auch Polwender bezeichnet wird. Mit dessen Hilfe wird im Motorbetrieb im Rotor ein drehzahlabhängiger Wechselstrom erzeugt.

Der große Vorteil von Gleichstrommotoren war über lange Zeit deren einfache Möglichkeit einer Drehzahlanpassung. Außerdem verfügen sie über ein hohes Anlaufdrehmoment und können unter Last anlaufen, was in einigen Anwendungen von Vorteil ist. Die schnelle Entwicklung der Leistungselektronik mit den Möglichkeiten einer Drehzahlregelung für Drehstrommotoren hat jedoch die Stellung der Drehstrommotoren deutlich verbessert, so dass es keine wesentlichen Vorteile der Gleichstromtechnologie gegenüber den Drehstromantrieben mehr gibt. Da es jedoch weitere Anwendungen gibt, die eine präzise Drehzahl- und Drehmomentsteuerung erfordern, wie beispielsweise Antriebe von Werkzeugmaschinen, ist entsprechende Antriebstechnik weiter im Einsatz.

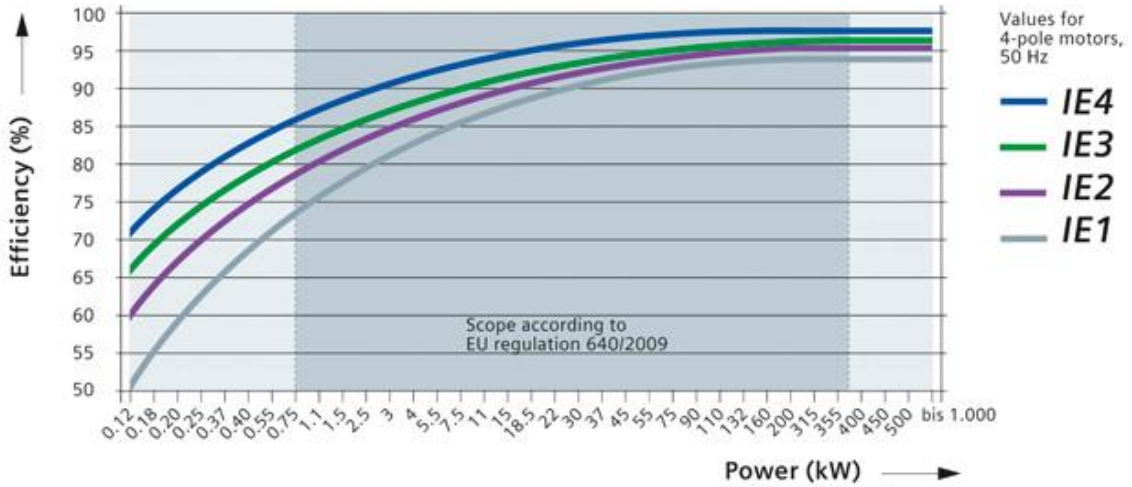
Netzgespeiste Drehstrommotoren werden seit Veröffentlichung der Norm DIN EN 60034-30-1:2014-12 im Dezember 2014 entsprechend ihres elektrischen Wirkungsgrades im Nennpunkt in die Effizienzklassen IE1 - IE4 eingeteilt (120). Sie gilt für einen Leistungsbereich von 0,12 bis 1.000 kW. Die Leistungsangabe bezieht sich dabei auf die mechanische Wellenleistung des Motors. Begleitend zur

Einführung dieser Wirkungsgradklassifikation erfolgte auch eine Anpassung der Normenwerke zur messtechnischen Bestimmung des Motorwirkungsgrades. Mit der Veröffentlichung der Norm DIN VDE 5030-30-2:2019-02 im Februar 2019 (127) gelten nunmehr die Wirkungsgradklassifikationen auch für Bauarten von Wechselstrommotoren, die mit variabler Drehzahl am Frequenzumrichter betrieben werden (z. B. Synchron-Reluktanzmotoren). Es gelten somit folgende Effizienzklassen für die praxisüblichsten Motorbaugrößen:

- IE1 Standard Effizienz,
- IE2 Hohe Effizienz,
- IE3 Premium Effizienz,
- IE4 Super Premium Effizienz,
- IE5 Ultra Premium Effizienz *(derzeit nur für Motoren definiert, die mit variabler Drehzahl betrieben werden und über die DIN VDE 5030-30-2:2019 erfasst sind).*

Nachfolgend sind beispielhafte Wirkungsgrade für 4-polige, netzbetriebene Asynchronmotoren mit den Effizienzklassen IE 1 - 4 dargestellt (Abbildung 3.6-6):

Abbildung 3.6-6: Wirkungsgrade netzbetriebener Asynchronmotoren unterschiedlicher Effizienzklassen am Beispiel eines 4-poligen Motors



Quelle: (128)

In der Verordnung Nr. 640/2009 der Europäischen Kommission (Quellenangaben) wurden verbindliche Ökodesign-Anforderungen für 2 - 6-polige, netzbetriebene Asynchronmotoren (< 1000 V) im Leistungsbereich zwischen 0,75 und 375 kW definiert. Nicht erfasst sind Motoren entsprechend DIN VDE 5030-30-2:2019-02 (127), die nur mit Frequenzumrichter betrieben werden können (z. B. Permanentmagnet-Synchronmotoren oder Synchron-Reluktanzmotoren) sowie 8-polige Asynchronmotoren. Stufenweise gelten u. a. folgende Anforderungen:

- Ab 1. Januar 2015 müssen Motoren mit einer Nennleistung zwischen 7,5 - 375 kW mindestens das Effizienzniveau IE3 erreichen oder dem Energieeffizienzniveau IE2 entsprechen und mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sein.
- Ab 1. Januar 2017 gelten die genannten Anforderungen auch für Motoren mit einer Nennleistung zwischen 0,75 - 7,5 kW.

Ausgeschlossen von dieser Verordnung sind:

- Motoren, welche vollständig in Flüssigkeit betrieben werden,

- Motoren, deren Effizienz einzeln nicht erfasst werden können, da sie in ein Produkt vollständig integriert sind,
- Bremsmotoren mit einer elektromechanischen Bremsleistung,
- Motoren für extreme Einsatzbedingungen.

Diese Anforderungen gelten für das Inverkehrbringen der Motoren, auch wenn sie in anderen Produkten eingebaut sind.

Beste verfügbare Technik sind derzeit Motoren, die die Mindestanforderungen der Ökodesign-Richtlinie (Verordnung Nr. 640/2009 der Europäischen Kommission) überschreiten. Für Drehstrom-Asynchronmotoren sind zahlreiche Produkte mit der Effizienzklasse IE4 marktverfügbar, für Permanentmagnet-Synchronmotoren oder Synchron-Reluktanzmotoren, die am Frequenzumrichter betrieben werden müssen, sind Produkte mit dem Energieeffizienzniveau IE4 und sogar IE5 bereits in einigen Leistungsbereichen marktverfügbar. Energieeffiziente Produkte erfüllen mindestens die gesetzlichen Standards.

Die wichtigsten von den Motorenherstellern angewendeten Strategien zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Elektromotoren sind:

- Vergrößerung des Leiterquerschnittes oder bessere Wickeltechniken in den Wickelungen,
- Verwendung von Materialien mit verbesserten magnetischen Eigenschaften, z. B. Dynamoblech,
- Verbesserung der Kühlung,
- kleine Fertigungstoleranzen.

Das Maß der Verluste hängt direkt mit dem Temperaturanstieg im Motor zusammen. Ein höherer Wirkungsgrad führt somit zu einem geringeren Temperaturanstieg im Motor, wodurch die Lebensdauer der Isolationen der Motorwicklungen und der Lager verlängert wird. Dies kann zu folgenden zusätzlichen positiven Effekten führen:

- Steigerungen der Zuverlässigkeit,
- Reduzierung der Kosten für Ausfallzeiten und Wartung,
- Steigerung der Toleranz gegenüber Temperaturspannungen,
- Verbesserung der Fähigkeit, mit Überlastbedingungen auszukommen,
- Verbesserung des Widerstands gegen unnormale Betriebsbedingungen, wie z. B. Unter- und Überspannung, Phasenungleichheit, schlechtere Spannung und Stromwellenformen (z. B. Oberschwingungen),
- Steigerung des Leistungsfaktors,
- Lärmreduzierung.

3.6.2 Angemessene Bemessung der Motoren Beschreibung und Betriebsdaten

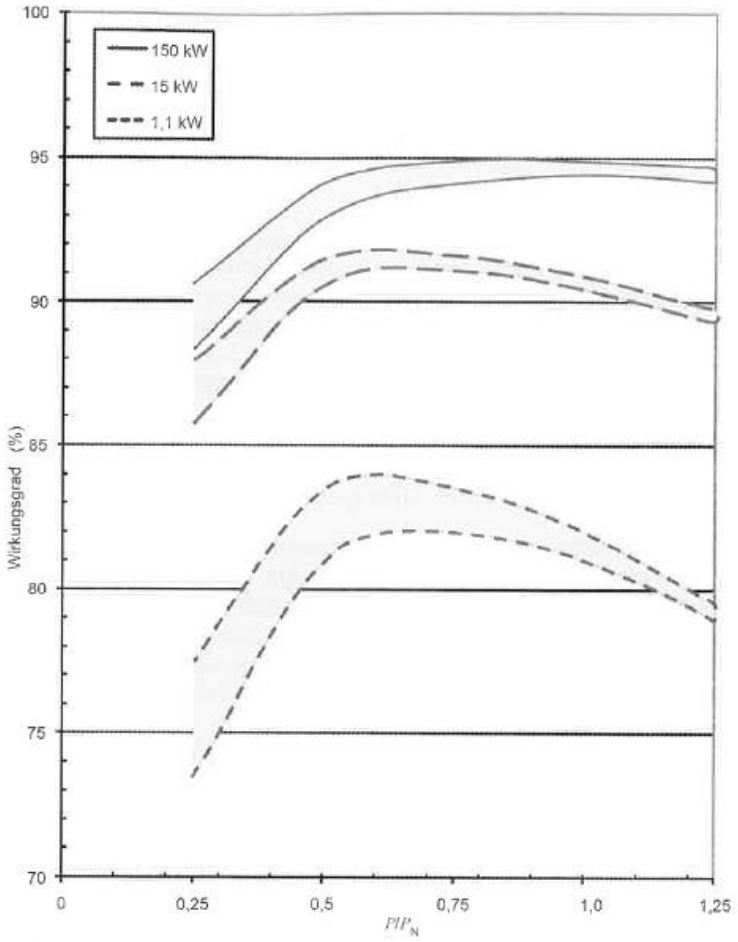
(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkräfte für die Umsetzung und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Elektromotoren werden in Kapitel 3.6.7 aufgeführt).

Elektromotoren sind oft für die von ihnen zu bewältigende Last überdimensioniert. In der Europäischen Union weisen Feldversuche darauf hin, dass die Motoren im Durchschnitt bei circa 60 % ihrer Nennlast laufen.

Bei der Auswahl und Bemessung elektrischer Motoren ist zu beachten, wie sich deren elektrische Wirkungsgrade unter verschiedenen Belastungssituationen darstellen. Nachfolgende Abbildung 3.6-7 zeigt typische Wirkungsgradbelastungskurven für Asynchron-motoren verschiedener Leistungsbereiche. Es ist erkennbar, dass das Wirkungsgrad-optimum vor allem Elektromotoren kleinerer Leistung unterhalb des Nennpunktes liegt, meist in einem Bereich zwischen 60 - 90% der

Nennlast. Motoren größerer Leistungsklassen (hier: 150 kW) zeigen kein ausgeprägtes Optimum, sondern einen vergleichsweise weiten Lastbereich mit hoher Effizienz. Unterhalb von ca. 30% Last arbeiten Elektromotoren nicht mehr unter optimalen Bedingungen (siehe Abbildung 3.6-7).

Abbildung 3.6-7: Typische Wirkungsgradbelastungskurven für Drehstrom-Induktionsmotoren mit Käfigläufer verschiedener Leistungsbereiche (ca. 1,1 kW; 15 kW; 150 kW) (DIN CLC/TS 60034-31)



Quelle: (129)

Eine energetisch optimierte Bemessung von Elektromotoren sollte somit immer berücksichtigen, unter welchen Lastbedingungen das angetriebene System überwiegend betrieben werden soll. Dementsprechend sind insbesondere bei Motoren kleiner und mittlerer Leistung (hier beispielhaft 1,1 und 15 kW), die mit konstanter Drehzahl betrieben werden sollen, größere Leistungsreserven des Motors zulässig.

3.6.3 Antriebe mit variabler Drehzahl

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkräfte für die Umsetzung und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Elektromotoren werden in Kapitel 3.6.7 aufgeführt).

Die Anpassung der Motordrehzahl mit Hilfe von Frequenzumrichtern kann zu bedeutenden Energieeinsparungen führen. Insbesondere für Anwendungen, bei denen Flüssigkeiten oder Gase in Rohrleitungen oder Kanälen mit variablen Massenströmen gefördert werden (Ventilatoren und Gebläse, Kreiselpumpen, Verdichter, Zentrifugen), lassen sich die größten Einsparungen erreichen. Bei

diesen Anwendungen verhält sich das Lastmoment proportional zum Quadrat und die mechanische Leistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl. Beispielhaft ergibt sich hier bei Halbierung der Drehzahl eine Reduzierung des mechanischen Leistungsbedarfs auf 1/8 der Nennleistung. Alternativ anzuwendende Drossel- oder Bypassschaltungen erreichen eine Durchflussregulierung nur mit geringfügig verringertem Leistungsbedarf. Auch bei anderen technologischen Aufgaben lassen sich durch bedarfsgerechte Anpassung der Motordrehzahl zum Teil deutliche Energie-einsparungen erreichen.

Weitere Effekte des Einsatzes von Frequenzumrichtern sind verbesserte Möglichkeiten der Prozesssteuerung (genaue Drehmoment- bzw. Drehzahleinstellung), ein geringerer Verschleiß mechanischen Komponenten und die Verringerung von Lärmemissionen.

Frequenzumrichter sind jedoch nicht für alle Anwendungen geeignet. Besonders bei konstanter Last (z. B. Wirbelschicht-Eingabeventilatoren, Kompressoren für Oxidationsluft) kommt es aufgrund der Eigen- und Zusatzverluste bei Betrieb des Frequenzumrichters zu einer Reduzierung des Gesamtsystemwirkungsgrades. Der Betrieb von Frequenz-umrichtern erhöht die Motorverluste durch zusätzliche Oberschwingungen um ca. 15 - 25% (122). Bei Nennlast des Motors weisen Frequenzumrichter je nach Leistungsgröße Wirkungsgrade zwischen 96 - 98% auf: Die Verluste entsprechen in diesem Betriebspunkt folglich 2 - 4% der zugeführten elektrischen Energie. Im Vorfeld des Einsatzes von Frequenzumrichtern sind somit immer die Lastanforderungen und Betriebsbedingungen der Motoren/ angetriebenen Maschinen zu überprüfen und hieraus Schlussfolgerungen für den Einsatz dieser Steuergeräte zu ziehen.

Bei der Auswahl von Frequenzumrichtern bieten die mit der Norm DIN EN 61800-9-2:2018-01 (122) eingeführten Effizienzklassen IE0 - IE2 eine gute Bewertungsbasis. Für das gesamte elektrische Antriebssystem, bestehend aus Elektromotor und Frequenzumrichter, bietet die Klassifizierung nach IES0 - 2 eine gute Bewertungsbasis zur Stand der Technik.

3.6.4 Rückspeisung von Bremsenergie

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkräfte für die Umsetzung und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Elektromotoren werden in Kapitel 3.6.7 aufgeführt).

Anwendungen wie Zentrifugen, Walzen, Förderbänder und Hebeanwendungen verfügen über ein kinetisches Energiepotential, welches in häufigen Intervallen beschleunigt und gebremst wird. Um einen Antrieb zu bremsen, muss dem System Energie entzogen werden. Die einfachste Variante ist, die Energie über einen Bremswiderstand in Wärme umzuformen. Diese Wärmeenergie steht für den Betreiber anschließend nicht mehr zur Verfügung. Aus ökologischer Sicht ist es daher sinnvoll, mechanische Energie im Bremsvorgang in elektrische Energie umzuwandeln und zu speichern oder in das Netz rückzuspeisen. Die rückgewonnene Energie kann durch das Laden von Netzdrosseln, Kondensatoren oder interner Batterien für spätere Beschleunigungen der gleichen Maschine nutzbar gemacht oder für die elektrische Versorgung anderer Verbraucher unmittelbar in einem Zwischennetz verwendet werden (128). Alternativ kann der Strom auch in das Stromnetz eingespeist werden (128). In Einzelfällen kann ein Energieeinsparungspotenzial von bis zu 50 % (130) gegenüber einem rein widerstandsbasierten Bremssystem erreicht werden.

Eine Bremsenergierückspeisung bietet keinen vollständigen Ersatz zum Bremswiderstand. Dieser muss als Sicherheitsoption im System weiterhin installiert sein. Für die Nutzung der Bremsenergie sind spezielle rückspeisefähige Umrichter notwendig. Diese sind auf dem Markt vorhanden, jedoch sind sie mit einem teilweise deutlichen Investitionsmehraufwand verbunden. Eine Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme muss daher im Detail überprüft werden.

Verweisende Informationen

(131); (130); (132)

3.6.5 Verluste bei der mechanischen Kraftübertragung

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkräfte für die Umsetzung und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Elektromotoren werden in Kapitel 3.6.7 aufgeführt).

Innerhalb des Systems muss das im elektrischen Motor erzeugte Drehmoment auf die angetriebene Maschine übertragen werden. Bei dieser Übertragung kommt es teilweise zu bedeutenden Verlusten. Es kann demnach ratsam und ökonomisch sein, zuerst die Übertragung bzw. Kopplung des Systems zu optimieren, um signifikante Effizienzsteigerungen zu erzielen. Die energieeffizienteste Lösung bietet hier eine direkte Kupplung. Im einfachsten Fall ist dies eine starre Welle, die beide Maschinen miteinander verbindet. Somit ist Drehzahl und Drehmoment gleich. Die benötigte Nutzdrehzahl kann dann mithilfe eines Frequenzumrichters vor dem Motor eingestellt werden.

Ist es aus unterschiedlichen Gründen (z. B. Änderung der Drehrichtung, Bewegungsart) nicht möglich, Motor und angetriebene Maschine direkt miteinander zu verbinden, müssen andere Übertragungssysteme montiert werden. Bauteile, die den Energiefluss bewusst reduzieren, wie zum Beispiel Drosseln, Dämpfer und ein Bypass, sind zu vermeiden. Grundsätzlich steigen die Übertragungsverluste mit der Anzahl der Übertragungsglieder und der Größe des Übersetzungsverhältnisses. Das Schneckengetriebe ist ein Beispiel für eine Übersetzung, bei der die Übertragungsverluste sehr hoch sein können.

Bei Übertragungen, bei denen eine elastische Verbindung notwendig ist (z. B. Vermeidung von Vibrationen in der angetriebenen Maschine), wurde in der Vergangenheit häufig auf den klassischen Keilriemen zurückgegriffen. Dieser ist jedoch, besonders nach längerer Betriebszeit, stark verlustbehaftet. Der Wirkungsgrad eines Keilriemens liegt zwischen 85 und 98 %. Lassen die Systemparameter es zu, sollten hier andere Übertragungstechnologien installiert werden. Als Beispiel sind der Flachriemen mit einem Wirkungsgrad von 95 - 99 % bei notwendigem Schlupf und der Zahnriemen mit 95 - 99 % Wirkungsgrad, wenn ein Schlupf nicht zwingend notwendig ist, erwähnt (133).

3.6.6 Reparatur und Neuwicklung von Motoren

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkräfte für die Umsetzung und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Elektromotoren werden in Kapitel 3.6.7 aufgeführt).

Motoren können ausfallen und werden oft mehrmals während ihrer Lebensdauer repariert. Jedoch lassen sich durch Reparatur oder Neuwicklung von Motoren keine Effizienzverbesserungen erreichen. In der Praxis kann sich durch solche Maßnahmen die Effizienz der Motoren im Vergleich zur Bestandssituation sogar verschlechtern. Nur bei sehr alten, großen Motoren sind ggf. Effizienzverbesserungen durch eine Neuwicklung aufgrund besserer Werkzeuge und Wicklungstechniken erreichbar.

In beiden Fällen empfiehlt es sich, die Mehrkosten eines neuen, energieeffizienten Motors den Kosten einer Reparatur oder Neuwicklung gegenüberzustellen und mit möglichen Energieeinsparungen über die (Rest-)Lebenszykluszeit zu vergleichen. Fällt ein Motor mit hoher Betriebsstundenzahl aus, ist es häufig wirtschaftlicher, einen neuen, hocheffizienten Motor zu erwerben, als den alten Motor reparieren zu lassen. Die Mehrkosten für die Neuanschaffung refinanzieren sich in der Regel in 0,5 bis

3 Jahren (134). Motorreparatur oder Neuwicklungen sind somit nicht als Energieoptimierungsmaßnahme anzusehen.

3.6.7 Erreichter Nutzen für die Umwelt, medienübergreifende Effekte, Anwendbarkeit und andere Überlegungen zu ENE-Techniken bei Elektromotoren

Erreichter Umweltnutzen

Tabelle 3.6-1 zeigt potentiell bedeutende Maßnahmen zur Energieeinsparung, die auf ein motorgetriebenes Subsystem anwendbar sein könnten. Obwohl die Werte in der Tabelle typisch sind, wird die Anwendbarkeit der Maßnahmen von den spezifischen Eigenschaften der Anlage abhängig sein.

Tabelle 3.6-1: Maßnahmen zur Energieeinsparung bei motorgetriebenen Subsystemen

Energieeinsparende Maßnahmen für ein motorgetriebenes Subsystem	Typischer Sparbereich (%)
Installation oder Erneuerung des Systems	
Energieeffiziente Motoren (EEM)	2 - 6
Korrekte Bemessung	10 - 30
Drehzahlregelbare Antriebe (FU, VSD)	-4 - 50
Hocheffizienzgetriebe/Untersetzungen	1 - 14
Optimierung auf Systemebene: Rohrleitungssysteme, Regelkonzept, Pumpen/Armatur-Abstimmung, bedarfsgerechte Fahrweise	bis zu 60 %
Systembetrieb und Instandhaltung	
Schmierung, Einstellungen, Abstimmung	1 - 5

Quelle: (1), aktualisiert

Medienübergreifende Wirkungen

Von Drehzahlsteuerungen etc. ausgelöste Oberschwingungen führen zu Verlusten in Motoren und Transformatoren. Des Weiteren benötigt ein energieeffizienter Motor mehr natürliche Ressourcen (Kupfer und Stahl) für seine Herstellung. Reluktanzmotoren haben den Vorteil, dass sie keine seltenen Erde für den Aufbau des Rotors brauchen und somit den Verbrauch dieser knappen Ressource mindern.

Anwendbarkeit

Elektrische Motorantriebe existieren praktisch in allen industriellen Anlagen.

Die Anwendbarkeit von bestimmten Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz im Bestand und deren betriebswirtschaftliche Effekte sind stark von den Randbedingungen im Einzelfall abhängig.

Dagegen ist bei der Neuplanung von Anlagen der Einsatz hocheffizienter Motoren nach bester verfügbarer Technik meist auch aus wirtschaftlichen Gründen vorteilhaft, insbesondere bei hohen Benutzungsstundenzahlen.

Mit einer Systembetrachtung lassen sich die vorhandenen Energieeinsparpotenziale besser ausschöpfen als ausschließlich durch Komponentenoptimierung. Aufgrund der Komplexität einer solchen Gesamtbetrachtung ist eine manuelle Berechnung jedoch meist aufwändig oder fast unmöglich. Daher kann es als beste verfügbare Technik für den Planungsprozess angesehen werden, spezielle Engineering-Software zur optimalen Auslegung eines Antriebssystems einzusetzen. Damit kann der Prozessbedarf detailliert ermittelt und die Energieeffizienz des kompletten Antriebssystems berechnet werden. Ebenfalls können Teillastwirkungsgrade und gegenseitige Einflüsse der

Komponenten berücksichtigt und ein Energieeffizienzvergleich verschiedener Antriebskonzepte durchgeführt werden.

Nicht in allen Fällen führt der Einsatz von Motoren einer höheren Energieeffizienzklasse auch einer höheren Effizienz des Antriebssystems insgesamt. Bei energieeffizienteren Motoren wird oft mehr Material in Form von Kupfer und Stahl verwendet wird, um Widerstandsverluste zu reduzieren. Dies bedeutet im Ergebnis jedoch neben der besseren Energieeffizienz auch eine niedrigere Schlupffrequenz und eine größere Masse. Somit benötigt der Motor beim Anfahren höhere Drehzahlen und dementsprechend auch einen höheren Einschaltstrom. Die folgenden Fälle zeigen, wann eine solche Maßnahme keine optimale Lösung darstellt.

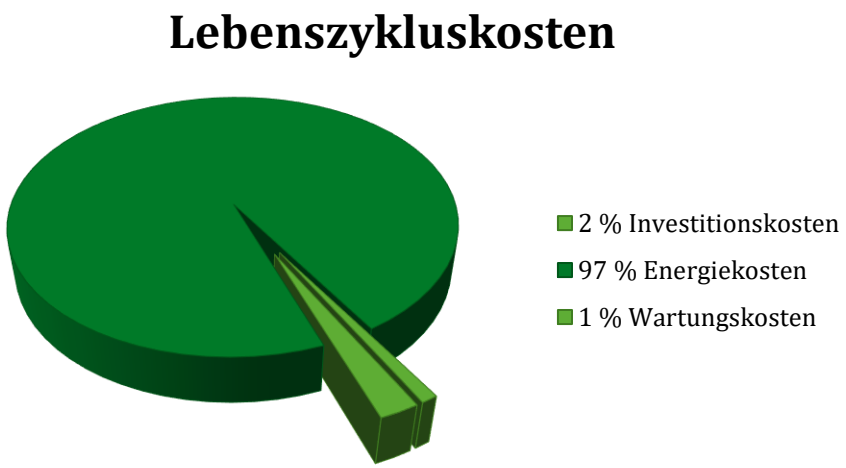
- Falls die Anwendung weniger als 1.000 – 2.000 Stunden pro Jahr (diskontinuierlicher Antrieb) läuft, kann der energieeffiziente Motor möglicherweise keine bedeutende Wirkung auf die Energieeinsparungen haben.
- Falls die Anwendung häufig starten und stoppen muss, können die Einsparungen wegen des höheren Einschaltstroms des energieeffizienten Motors möglicherweise kompensiert werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Lebenszykluskosten eines Elektromotors werden dominiert von dessen Energiekosten, wie nachfolgende Abbildung 3.6-8 für eine Motoranwendung nach Stand der Technik beispielhaft zeigt, die im industriellen Umfeld typisch ist. Die Kosten für einen energieeffizienten Motor bester verfügbarer Technik liegen je nach Hersteller circa 20% höher als für Motoren nach Stand der Technik. Für einen Motor der Effizienzklasse IE4 mit 11 kW bei unterstellten 4.000 Betriebsstunden / a und einem überschlägigen Strompreis von 15 Ct/kWh (135) würden sich die Mehrkosten gegenüber einer Ausführung nach Effizienzklasse IE3 in einem Zeitraum von ca. 2 – 3 Jahren über die erzielbaren Energiekosteneinsparungen amortisieren.

Bedingung für die kurze Amortisationszeit der Mehrkosten besonders energieeffizienter Motoren und Systeme ist ein möglichst konstanter Betrieb mit hoher Auslastung über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Abbildung 3.6-8: Lebenszykluskosten eines 11kW IE3 Elektromotors mit 4.000 Betriebsstunden/a über 15 Jahre



Quelle: (136)

Triebkräfte für die Umsetzung

- Betriebswirtschaftliche Vorteile,

- Verordnung Nr. 640/2009 der europäischen Kommission bezüglich der Ökodesign-Anforderungen (Zeitrahmen für die Umsetzung und Energieoptimierung von Elektromotoren).

Beispiele

- LKAB (Schweden) – Diese Bergwerksgesellschaft verbraucht 1700 Gigawattstunden an Elektrizität pro Jahr, davon werden 90 % zum Betreiben von 15.000 Motoren verwendet. Durch den Übergang zu Motoren mit hoher Effizienz verringert LKAB die jährliche Energierechnung um mehrere Hunderttausend Dollar (kein Datum).
- Die Lebensmittel verarbeitende Fabrik Heinz (UK) - Ein neues Energiezentrum wird um 14 % effizienter sein aufgrund von Verbrennungsluftventilatoren, die von geregelten Wechselstrommotoren angetrieben werden. Das Energiezentrum hat vier Kessel und hat die bestehende Kesselanlage ersetzt.
- Das Unternehmen South Staffordshire PLC versorgt das Ballungsgebiet Black Country (westlich von Birmingham, 500.000 Haushalte) täglich mit 330 Mio. Liter Wasser. Bislang wurde eine 20 Jahre alte 115 kW Asynchronmaschine zum Betrieb einer Bohrlochpumpe eingesetzt. Diese besaß bereits schon einen modernen Frequenzumrichter. Der Motor wurde durch einen Reluktanzmotor mit gleicher Nennleistung ausgetauscht. Es konnte eine Energieeinsparung von 6 % festgestellt werden. Bei älteren Motoren sei hier sogar eine Energieeinsparung von 10 – 15 % möglich. (137)

Verweisende Informationen

(138) (133) (128) (134) (139) (140) (121) (141)

3.7 Druckluftsysteme <Compressed air systems> (CAS)

Beschreibung

Druckluft ist Luft, die unter höherem als dem atmosphärischen Druck gespeichert und verwendet wird. Drucklufterzeuger nehmen eine bestimmte Menge an Luft auf, die ein vorgegebenes Raumvolumen einnimmt, und drücken sie in einem kleineren Raum zusammen. Hierbei wird der Druck erhöht.

Auf die Erzeugung von Druckluft entfallen im Industriesektor je nach Branche geschätzt zwischen 5 – 25 % des jeweiligen betrieblichen Gesamtstromverbrauchs. [in (142), Anhang A.2]

Häufige industrielle Anwendungen (siehe u. a. (143)) sind beispielsweise:

(I) als direkt wirkendes Arbeitsmedium:

- Blasprozesse (Freistrahl) Reinigen, Sortieren, Rückspülen,
- Materialförderung (z. B. Mehl, Getreide),
- Luftstrahlmahlen (Jet Milling),
- Farb- und Lackauftrag,
- Formen (Kunststoff, Glas),
- Rühren (insbesondere bei Hochtemperaturprozessen wie Stahl- und Glasschmelzen),
- in Verbindung mit der chemischen Reaktionsfähigkeit des Luftsauerstoffs (z. B. Belebung einer Abwasserbehandlung, Abgas-Entschwefelung, Bodenbehandlung),
- in Verbindung mit den physikalischen Eigenschaften: Kühlung (seltener auch Erwärmung), Trocknung, Isolation (Luftpolster),
- Dämpfung (Fahrzeugreifen),
- Sperrluft,
- Steuerluft,
- Atemluft.

(II) als indirekt wirkendes Energiemedium:

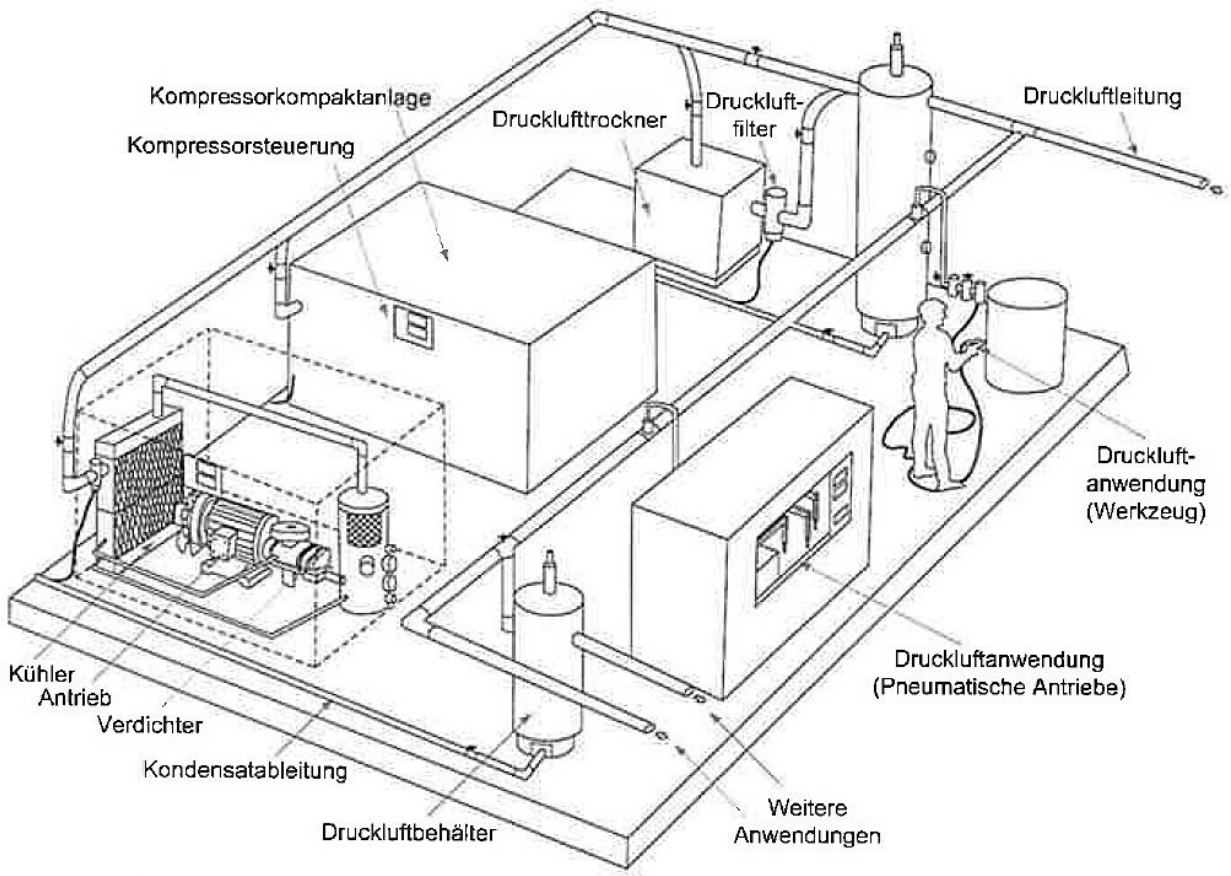
- Antrieb von Druckluftwerkzeugen,
- Antrieb von Antriebselementen (z. B. Zylinder).

Die Verwendung von Druckluft in IED-Anwendungen ist ein wichtiger Bestandteil in industriellen Prozessen. Der Druck, die Reinheit der Druckluft und das verbrauchsbezogene Lastprofil werden vom Prozess selbst vorbestimmt. Die Versorgung mit Druckluft stellt oft einen integralen Teil der Auslegung der Anlage dar und muss parallel mit dem Gesamtbedarf der Anlage an Druckluft analysiert werden. Im Allgemeinen ist die Wahl eines Energiemediums (z. B. Druckluft) von vielen Parametern der Anwendung abhängig und muss von Fall zu Fall nutzungsabhängig analysiert werden.

Aufbau und Energieeffizienz eines Druckluftsystems

Für eine ganzheitliche Optimierung des Druckluftsystems ist es notwendig, alle Teilsysteme zu betrachten. Ein Schema der typischen Bestandteile eines Druckluftsystems wird in Abbildung 3.7-1 gezeigt.

Abbildung 3.7-1 : Typische Komponenten eines Druckluftsystems (144) in kompakter, schematischer Darstellung



Quelle: (144)

Die Mehrzahl der Anlagen hat eine Station mit mehreren Kompressoren, einer zentralen Druckluftaufbereitung und einem großen Verteilungssystem. Es gibt jedoch keine standardmäßige Auslegung für spezifische Anwendungen. Abhängig von den druckluftverbrauchenden Prozessen und deren Parametern ist es erforderlich, die richtigen Bestandteile auszuwählen und ihre Wechselwirkung zu steuern.

Die Energieeffizienz des Systems wird durch die Qualität der Planung, Herstellung und Instandhaltung beeinflusst. Es ist sinnvoll, diese Maßnahmen in ein Energiemanagementsystem einzubetten, in

welchem ein zuverlässiges Monitoring des Druckluftsystems durch eine gute Datenbasis unterstützt wird (siehe Kapitele 2.1 und 2.15.1).

Mögliche Energieeinsparpotentiale

Im Jahr 2000 wurde unter dem europäischen SAVE-Programm eine Studie durchgeführt, um die Potentiale der Energieeffizienz in einem Druckluftsystem zu analysieren. Sie liefert eine gute Übersicht über die entsprechenden Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz eines Druckluftsystems. Eine vergleichbare, jedoch wesentlich aktuellere Untersuchung fand 2012 in Deutschland durch das sogenannte EnEffAH-Projektkonsortium statt.

Eine Zusammenfassung beider Studien enthält Tabelle 3.7-1. Die Beschreibung der einzelnen Maßnahmen erfolgt in den Kapiteln 3.7.1 bis 3.7.6.

Tabelle 3.7-1: Häufig anwendbare Einsparmaßnahmen in Druckluftsystemen, nach (145), aktualisiert durch

Maßnahme zum Einsparen von Energie	% Anwend-barkeit 1)	% Einsparung 2)	% Potentieller Beitrag 3)	Kommentar
Druckluftbedarf				
Optimierung des Druckniveaus	50	15	7,5	
Bildung der Mitarbeiter	80	k. A.		
Übertragung und Speicherung				
Reduzierung der Rohrverluste	30	15	4,5	
Reduzierung von Leckagen	80	20	16,0	Sowohl im Netz als auch in der Anlage/Anwendung zu prüfen
Druckluftspeicherung	40	10	4,0	Besonders bei sporadischen großen Verbräuchen
Regelung und Steuerung				
Interne Kompressorsteuerung	25	15	3,8	
Übergeordnete Steuerung	20	12	2,4	Bei mehreren Kompressoren
Druckluftbereitstellung				
Kompressorauslegung	20	20	4,0	
Energieeffiziente Motoren	30	3	0,9	
Wärmerückgewinnung	50	95	47,5	Einsparung bezieht sich auf das Nutzungspotential der Abwärme für weitere Anwendungen
Optimierung von Filtern, Trocknern und Kondensatabscheidern	10	5	0,5	
Wartung				
Wartung der Druckluftaufbereitung	80	20	16	
Zeichenerklärung der Tabelle:		Maßnahme nimmt eine Sonderstellung ein. Der Nutzen entsteht nicht als Einsparung in der		

1) % von Druckluftsystemen, bei denen die Maßnahme anwendbar und kostenwirksam ist. 2) % Reduzierung des jährlichen Energieverbrauchs 3) Potentieller Beitrag = Anwendbarkeit * Reduzierung	Energieumwandlungskette von Drucklufterzeugung bis Verbrauch, sondern erst bei geeigneter Wärmeverwendung in anderen Unternehmensbereichen

Quelle: (146)

Vorgehensweise bei der Optimierung eines Druckluftsystems

Anforderungen an die Durchführung und Berichterstattung der Ergebnisse einer Energiebewertung von Druckluftsystemen sind in DIN EN ISO 11011 und VDMA Einheitsblatt 4370 (147) definiert. Normierte Anforderungen sind dabei die Analyse der Daten aus der Energiebewertung, die Berichterstattung, Dokumentation und die Bestimmung der erwarteten Energieeinsparungen. Des Weiteren werden Verantwortlichkeiten und Rollen bei der Energiebewertungstätigkeit bestimmt.

In Anlehnung an die Internationale Norm DIN EN ISO 11011 sollen Druckluftsysteme stets als Zusammenwirken von drei funktionalen Teilsysteme betrachtet werden:

- Erzeugung: unmittelbare Herstellung von Druckluft mittels geeigneter Maschinen, die den Druck von Gasen unter Einsatz eines Endenergieträgers (meist Elektroenergie, in Einzelfällen auch Erdgas oder Kraftstoffe) auf ein prozesstechnisch erforderliches Niveau ändern; eingeschlossen sind hierbei auch Aggregate zur Einstellung der erforderlichen Reinheitsklassen nach ISO 8573-1;
- Übertragung, die den Transport von Druckluft vom Ort der Erzeugung zum Ort des Verbrauchs umfasst;
- Bedarf, der die Gesamtheit aller Druckluftverbraucher, einschließlich produktiver Endanwendungen und verschiedener Arten von Druckluftverlust umfasst.

Dabei ist es von Vorteil, die Auslegung eines Druckluft-Systems entgegen der Druckluft-Flussrichtung zu berechnen – also beim Verbraucher anzufangen und bei der Erzeugung abzuschließen. Nur so wird eine optimale Auslegung des Drucklufterzeugungssystems gewährleistet und eine komplexe Rückkopplung von Ineffizienzen und Fehldimensionierungen vermieden.

Erreichter Umweltnutzen

Das Ziel der meisten Maßnahmen, die zur Auslegung oder Modifizierung eines Druckluftsystems eingesetzt werden, ist es, die Energieeffizienz dieses Systems zu verbessern. Zusätzlich kann häufig eine Reduzierung der Lärmemission und der Emission nicht nutzbarer Abwärme erreicht werden.

Medienübergreifende Wirkungen

Emissionen sind begrenzt auf Lärm und Abwärme, im Defektfall auch Ölnebel. Andere Auswirkungen eines Druckluftsystems auf die Umwelt sind gering im Verhältnis zum Energieverbrauch.

In den meisten Unternehmen ist das Druckluftsystem ein eigenständiger Bestandteil der Versorgungs-Infrastruktur. Bei Modifizierungen und energetischen Optimierungen des Druckluftsystems sind zu unterscheiden,

- ob ausschließlich die Prozesskette der Drucklufterzeugung betroffen ist, ohne Veränderungen der Liefermenge und -qualität der Druckluft, oder
- ob die Versorgungsbedingungen für Druckluftverbraucher verändert werden. In diesen Fällen sind Auswirkungen auch in der Anwenderebene möglich und entsprechend zu prüfen.

Anwendbarkeit

Druckluft als Arbeits- und Energiemedium besitzt im praktischen Einsatz eine Reihe von Vorteilen, unter anderem ein geringes Entzündungs- und Explosionsrisiko auch gegenüber Objekten mit hoher Temperatur. Deshalb wird sie vielfach in gefährlichen Bereichen der chemischen oder damit

zusammenhängenden Industrie eingesetzt. Im Gegensatz zum Strom benötigt sie keinen Rückleiter. Beim Antrieb von Werkzeugen liefert sie eine vergleichsweise hohe Energiedichte und im Fall von positiven Verdrängungswerkzeugen, selbst bei niedrigen Drehzahlen konstante Drehmomente unter konstantem Druck. Im Vergleich zu elektrischen Werkzeugen stellt dies in vielen Anwendungen einen Vorteil dar. Sie lässt sich auch leicht an sich ändernde Erfordernisse in der Produktion anpassen (oft in Situationen mit hohem Produktionsvolumen) und kann mit ihrer eigenen pneumatischen Verknüpfungssteuerung eingesetzt werden. Diese ist leicht zu installieren und zuverlässig.

Im Folgenden werden einige Vor- und Nachteile von Druckluftantrieben gegenüber elektrischen Alternativen aufgezeigt.

Tabelle 3.7-2 Vor- und Nachteile Druckluftantriebe in der Handhabungstechnik

Vorteile Druckluftantriebe	Nachteile Druckluftantriebe
Überlastfähigkeit	Exakte Positionierung nur gegen Anschlag
Robustheit	Weiche Antriebskennlinien
Einfacher konstruktiver Aufbau	Geringe Flexibilität einfacher Antriebe
Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen	Kondensatanfall
Leistungsloses Halten	Abluftgeräusche
Kontinuierliche Spitzenkraft	Gleichförmige Bewegungen bei variabler Belastung wegen Kompressibilität schwierig
Vergleichsweise hohe Leistungsdichte	

Quellen: (146) (144)

Sofern für bestimmte technische Aufgaben sowohl druckluftbasierte Lösungen als auch alternative technische Systeme verfügbar sind, ist eine ganzheitliche Beurteilung vorzunehmen. Wesentliche Kriterien sind dabei:

- die speziellen technischen Rahmenbedingungen des Einzelfalles,
- die Energiebilanz,
- ökologische und arbeitsschutztechnische Aspekte,
- wirtschaftliche Aspekte (Investitionen und laufende Kosten).

In Tabelle 3.7-3 werden einige Beispiele für Alternativlösungen dargestellt.

Tabelle 3.7-3 Beispiele für mögliche Alternativlösungen

Funktion	Einsatzbereich	Alternative
Kraftübertragung	Antriebsmotoren (Bohr-, Schraubenmaschinen, Metallbearbeitung	Elektrische Antriebe, hydraulische Antriebe
Transport	Materialförderung	elektrische/hydraulische Antriebe
Abtransport von Verunreinigungen	Ausblasinstrumente	Ventilatoren, Bürsten, Spülung mit Flüssigkeit
Kühlung	Trocken laufende Fertigungsmaschinen	Ventilatoren, flüssige Kühlmittel
Prüfung und Kontrolle	Sensorik	Elektronische Systeme
Steuerung	Steuerinstrumente (Ventile)	Elektronische Systeme

Quelle: (148)

Sofern der Hauptzweck der Druckluft allein in der Verrichtung mechanischer Arbeit besteht, ist zu beachten, dass der Prozess der Drucklufterzeugung und -verteilung physikalisch bedingt mit hohen Exergieverlusten verbunden ist. Dadurch steht nur ein Bruchteil der mechanischen Antriebsenergie für die Drucklufterzeugung auch als mechanische Energie am Endverbraucher der Druckluft zur Verfügung, in der Praxis meist etwa 10 – 30 %, bei ungünstiger Systemgestaltung auch noch weniger. Die Umwandlungsverluste nehmen mit zunehmendem Systemdruck zu. Die Antriebsenergie zur Drucklufterzeugung wird während des Verdichtungsprozesses zu einem großen Teil in thermische Energie (Wärme) umgewandelt. Die Wärme sollte daher genutzt werden (s. Kap. 3.7.4.3.2).

Es ist Stand der Technik, durch geeignete Systemgestaltungen die Einsatzbereiche der Druckluft auf die vorteilhaften Anwendungsbereiche zu konzentrieren, unnötige Verluste zu vermeiden und die insbesondere bei der Drucklufterzeugung anfallende thermische Energie bestmöglich zu nutzen.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Kosten für die Druckluft sind abhängig vom Energiepreis der Antriebsenergie, der zu erzeugenden Druckluftqualität/-reinheit, des Volumenstroms der zu komprimierenden Luft (Menge) sowie Druck der zu erzeugenden Druckluft. Der Preis für Druckluft ist in Europa unternehmensabhängig mit einer Spanne von 0,006 bis 0,097 Euro/pro Nm^3 sehr unterschiedlich (Stand 2016, wenn man berücksichtigt, dass im Jahr 2016 der Preis für Elektrizität zwischen 0,0574 Euro/kWh in Norwegen und 0,1315 Euro/kWh in Großbritannien schwankte (149)). Bei mittelgroßen Kompressoren mit einer Drucklufterzeugung von 5 – 20 m^3/min entfallen durchschnittlich 75 % der Kosten auf den für den Betrieb benötigten Strom. Bei größeren Kompressoren ist dieser Anteil tendenziell noch höher, bei kleineren Kompressoren niedriger. Die Investitionskosten und die Instandhaltungskosten haben dementsprechend nur einen Anteil von 10 % bzw. 15 % (150).

Die Energieeffizienz der Drucklufterzeugung kann mit der Kennzahl des spezifischen Leistungsbedarfs < Specific Energy Requirement> (SER) in kW pro (m^3/min) bewertet werden. Dieses Verhältnis stellt die Qualität der Auslegung und des Betriebs der Druckluftanlage für einen bestimmten erzeugten Druck dar. Es ist empfehlenswert, diese Kennzahl zu überwachen (siehe dazu u. a. Kapitel 2.16).

Initiativen im Bereich der Verbesserung der Energieeffizienz wurden bereits von Organisationen der Mitgliedsstaaten und von Herstellern ergriffen. Solche Programme haben gezeigt, dass die Umsetzung der beschriebenen Techniken eine gute Amortisierung der Investition erbringt.

Triebkraft für die Umsetzung

Die Verbesserung der Energieeffizienz in der Kombination mit kurzen Amortisationszeiten ist die entsprechende Motivation für die Umsetzung der beschriebenen Techniken (normale Marktkräfte).

Beispiele

Siehe nachfolgende Kapitel mit Beispielen zu einzelnen technischen Effizienzmaßnahmen. Generell ist Drucklufteinsatz für fast alle Industriebranchen relevant.

Verweisende Informationen

(148) (144) (146) (151)

Wichtige Länderübergreifende Normen und Einheitsblätter für Druckluftsysteme

Die wichtigsten Normen und Einheitsblätter für die Energieoptimierung in Druckluftsystemen sind:

- DIN EN ISO 11011, 2015,
- VDMA 4370, 2012,
- ISO 1217,
- ISO 8573er Reihe,
- VDMA 15390,
- VDMA 15391.

3.7.1 Druckluftbedarf

Grundlagen

Die korrekte und genaue Bestimmung des Druckluftbedarfs ist die erste Maßnahme bei der Optimierung und Auslegung eines Druckluftsystems. Dabei ist zwischen dem technologischen Druckluftbedarf und dem verlustbedingten Mehraufwand infolge von Druckverlusten und Leckagen zu unterscheiden.

Der technologische Druckluftbedarf bezieht sich auf die in den Maschinen und Werkzeugen benötigte Druckluft. Neben Druckniveau und Volumenstrom ist hier die benötigte Druckluftqualität/-reinheit von entscheidender Bedeutung.

Druckverluste entstehen bei allen strömenden Medien, besonders hoch sind diese bei negativen Querschnittsänderungen und an Übergängen in Leitungssystemen einschließlich der unmittelbaren Zuführung zu den Verbrauchern. Ebenso sind Druckverluste prozessbedingt in der Druckluftaufbereitung zu verzeichnen. Dabei hat die von der geforderten Druckluftqualität abhängige Technologie der Druckluftaufbereitung einen Einfluss auf die Druckverluste (siehe Pkt. 3.7.1.1).

Eine weitere Ursache für Effizienzverluste von Druckluftsystemen sind Leckagen. Diese werden hervorgerufen durch Undichtigkeiten, welche z. B. durch Korrosion, fehlerhafte Rohrleitungsverbindungen und mangelhaft gewartete Werkzeuge entstehen.

Die Summe aus dem technologischen Druckluftbedarf einerseits und dem Mehraufwand zur Kompensation von Leckage- sowie Druckverlusten andererseits muss durch die Drucklufterzeugungsanlagen gedeckt werden. Das Ziel der Auslegung ist, die Druckluft stets in benötigter, jedoch keiner höheren Qualität und Quantität an den Verbraucher zu liefern. Die bestmögliche Energieeffizienz wird erreicht, wenn sowohl der Systemdruck am Ausgang der Drucklufterzeugungsanlage als auch die Leckagemengen minimiert sind.

Die kalkulatorische Auslegung für ein Druckluftsystem soll deshalb der Richtung des Volumenstroms entgegengesetzt in folgenden Schritten durchgeführt werden:

1. Bestimmung des technologisch benötigten Druckluftvolumenstroms und des Druckniveaus unmittelbar am Anschluss der Verbraucher.
2. Hier ist insbesondere darauf zu achten, dass das genaue erforderliche Druckniveau und die Qualität/Reinheit bestimmt werden. Ein zu geringes Druckniveau führt zu einer Minderung der Arbeitsleistung der Verbraucher. Eine zu geringe Druckluftqualität kann zu Prozessstörung und Maschinenausfall führen. Zu hohe Werte erhöhen die Energieverluste und die Betriebskosten.
3. Um auch die Spitzenlast (maximal kurzzeitig benötigter Druckluftvolumenstrom, der sicher geliefert werden muss) im System energieoptimiert abschätzen zu können, müssen hier auch die Speicherkapazität und der Gleichzeitigkeitsfaktor aller Verbraucher Beachtung finden.
4. Berechnung der Leitungs-Druckverluste (Siehe Kapitel 3.7.2.1);
5. Bewertung der Menge an Leckagen (Siehe Kapitel 3.7.1.4);
   Diese sollten bei einem gut ausgelegten und gewarteten System, je nach Größe nicht über 5 - 10 % (branchenabhängig) liegen.
6. Bestimmung der Verluste über Filter und Trocknungsanlage sowie ggf. Maschinenanschlüsse;
7. Zusammenfassende Berechnung zur benötigten Drucklufterzeugungskapazität, d. h. maximal von Kompressoren zu erzeugender Druckluftvolumenstrom und Druckniveau am Ausgang der Kompressoren unter Berücksichtigung der Wirkung der Speicher auf das System.

Verweisende Informationen

(152) (153)

3.7.1.1 Anpassung der Druckluft-Qualitäten/-reinheiten an die verbraucherseitigen Erfordernisse

Beschreibung

Erster wichtiger Schritt bei der Auslegung eines Druckluftsystems ist es, für jeden Verbraucher die benötigte Druckqualität/-reinheit zu definieren. ISO 8573-1:2010 definiert hierfür verschiedene Reinheitsklassen, die sich über die Festlegung eines bestimmten Maximalgehalts an Verunreinigung in der Luft ergeben. Als Verunreinigungen sind definiert: Festpartikel, Wasser und Öl (Kohlenwasserstoffe). Die zulässigen Verunreinigungen nehmen mit numerisch aufsteigender Reinheitsklasse zu.

Erreichter Umweltnutzen

Mit steigender Druckluftqualität/-reinheit steigt auch der energetische Aufwand für die Aufbereitung (z. B. durch Druckverluste von Filtern, Absenkung des Drucktaupunktes usw.). Durch die genaue Bestimmung der benötigten Druckluft-Qualität/-reinheit der einzelnen Verbraucher kann gewährleistet werden, dass die Reinheit der Druckluft dem Bedarf entspricht. Die energetisch günstigste Wahl der Aufbereitungskomponenten führt zu einer Energieeinsparung und entlastet somit die Umwelt.

Anwendbarkeit

Die benötigte Druckluftqualität/-reinheit ist durch die Druckluftanwendung bestimmt. Für weitere Informationen kann z. B. das VDMA Einheitsblatt 15390-Reihe herangezogen werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Begrenzung der Reinigung der Druckluft auf die tatsächlich benötigte Druckluftqualität/-reinheit führt neben Einsparungen bei den verbrauchsgebunden Kosten (z. B. sinkender Energiebedarf) auch zu geringeren Investitionskosten und Betriebskosten.

Triebkraft für die Umsetzung

Energie- und Kosteneinsparungen.

Verweisende Informationen

(154), (143), (155), (156)

3.7.1.2 Optimierung des Druckniveaus

Beschreibung

Je niedriger das Druckniveau der Druckluft ist, umso kostengünstiger ist die Erzeugung. Es ist jedoch sicherzustellen, dass alle aktiven Verbraucher zu jeder Zeit mit ausreichendem Druckniveau und Druckluftvolumenstrom versorgt werden. Durch eine Optimierung der Rohrleitungsquerschnitte und Verbraucheranschlüsse soll die Differenz zwischen dem maximalen Systemdruck und dem bei den Verbrauchern benötigten Druckniveau minimiert werden. Möglichkeiten zur Optimierung durch Steuerungen werden im Kapitel 3.7.3 näher erläutert.

Grundsätzlich sollte angestrebt werden, dass alle an einem Druckluftnetz angeschlossenen Systeme ein einheitliches Betriebsdruckniveau aufweisen. Im Idealfall haben alle angeschlossenen Verbraucher den gleichen Arbeitsdruck. Werden an einem Standort mehrere stark unterschiedliche Drücke benötigt, so soll das Hauptnetz auf den Betriebsdruck derjenigen Verbraucher ausgelegt werden, welche den größten Volumenstromanteil erfordern. Druckhöhere Verbraucher können dann mit Hilfe von Nachverdichtern versorgt werden. Eine Druckreduzierung von höheren Systemdrücken auf niedrige Arbeitsdrücke sollte nur in Ausnahmefällen für Verbraucher mit sehr geringem Volumenstrombedarf in Betracht gezogen werden, deren Anteil sollte nicht über 5 % der insgesamt

erzeugten Druckluftmenge liegen. In besonderen Fällen kann es effizienter sein, ein zweites Druckluftnetz mit entsprechend angepasstem Betriebsdruck zu betreiben.

Erreichter Umweltnutzen

Die Reduzierung des Systemdrucks um 1 bar führt in vielen praktischen Anwendungsfällen durchschnittlich zu einer Minderung des Energieeinsatzes am Kompressor um etwa 6 %.

Da bei geringerem Druck Leckageverluste sinken, erhöht sich die Gesamteinsparung je nach Leckageart auf bis zu 10 % des Gesamtenergieeinsatzes. Diese Einsparpotenziale sind als vereinfachte Orientierungswerte im Standardnetz mit Netznenndrücken zwischen 6 - 8 bar zu werten. Außerhalb dieses Bereiches ist mit Abweichungen zu rechnen.

Anwendbarkeit

Die Bestimmung und Optimierung des Druckluftbedarfs ist mithilfe eines Audits nach ISO 11011 in der Bestandsanlage und entsprechender Auslegungssoftware, ggf. unterstützt durch geeignete Messungen, gut umsetzbar.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

In einem Berechnungsbeispiel bewirkt die Reduzierung des Systemdrucks um 1 bar, wie bereits beschrieben, eine Energieeinsparung von 10 %. Bei einem Kompressor mit einer Motorleistung von 110 kW und 4000 Betriebsstunden pro Jahr können dadurch jährlich ca. 44.000 kWh eingespart werden. Bei einem Strompreis von 0,15 €/ kWh (157) beträgt die finanzielle Einsparung 6.600 € pro Jahr. Wenn dies mit geringen Investitionskosten erreichbar ist, kann sich eine solche Maßnahme schon nach wenigen Monaten amortisieren. Beispiele für relativ gering investive Maßnahmen sind z. B. der Austausch weniger, besonders druckverlustrelevanter Ventile oder Endverbraucherzuleitungen, wenn diese zu geringe Querschnitte aufweisen. Dadurch wird eine Anpassung der Systemdruckregelung auf ein niedrigeres Niveau möglich. Allerdings darf die Druckreduzierung nicht zu einer Minderung der Produktivität der versorgten Systeme führen (z. B. bei Unterschreitung vorgegebener Auslegungsdrücke).

Triebkraft für die Umsetzung

Kosteneinsparungen.

Beispiele von Werksanlagen

Die Getzner Textil AG ist eines der führenden Hersteller von Modestoffen im gehobenen Segment, 2013 wurde ein Jahresumsatz von 150 Millionen Euro erreicht. Am Hauptstandort Bludenz waren 720 Mitarbeiter beschäftigt. Am Hauptstandort wird Druckluft vorrangig für die Druckluftwebmaschinen benötigt. Notwendig sind hierfür 5,5 bar. Zusätzlich ist das Heizhaus mit 6,5 bar zu versorgen. Die zwei Druckluftstationen (Weberei und Heizhaus) speisen jedoch beide mit 7 bar in ein gemeinsames Netz ein.

Als Maßnahme wurde hier 2013 das gemeinsame Druckluftnetz getrennt und so das Heizhaus mit 6,5 bar und die Weberei mit 5,5 bar betrieben. In diesem Zusammenhang wurden mehrere neue Kompressoren mit Wärmerückgewinnungen installiert, übergeordnete Regelungen zum Teil neu eingerichtet, zum Teil wurde die bestehende Regelung optimiert. Die einmaligen Investitionskosten betrugen insgesamt 836.000 €. Die jährlichen Energieeinsparungen beliefen sich auf 1.164.200 kWh/a Elektroenergie bzw. 111.000 €/a. (158)

Verweisende Informationen

(148) (144) (153) (159)

3.7.1.3 Optimierung der Druckluftverbraucher

Beschreibung

Besonders bei Bestandsanlagen besteht bei den Druckluftverbrauchern häufig Energieeinsparpotential. Beispielsweise sind pneumatische Antriebe häufig überdimensioniert. Die Antriebskraft ist meist viel höher als notwendig und aus vermeintlichen Sicherheitsgründen werden zu große Zylinder eingesetzt, obwohl auch kleinere Baugrößen ausreichend wären (146). Zudem treten häufig Leckagen direkt an oder in den Druckluftverbrauchern auf (für Maßnahmen zur Reduzierung von Leckagen siehe Kapitel 3.7.1.4). Daher ist es wichtig, für die Bestandanlagen eine Bedarfsanalyse, z. B. gemäß DIN EN ISO 11011 oder VDMA Einheitsblatt 4370, durchzuführen.

Ist der Druckluftverbrauch stark schwankend oder die Last einzelner Verbraucher kurzfristig sehr hoch, kann die Installation eines dezentralen Druckluftbehälters vorteilhaft sein (siehe Kapitel 3.7.2.2.)

Anwendbarkeit

Die Analyse der Druckluftverbraucher kann für alle Anwendungen durchgeführt werden.

3.7.1.4 Reduzierung von Leckagen im Druckluftsystem

Beschreibung

Die Reduzierung von Leckagen in einem Druckluftsystem besitzt bei weitem das größte Energieeinsparpotential. Die Leckvolumenströme sind direkt proportional zum Druck des Systems. Leckagen sind in jedem Druckluftsystem vorhanden bzw. entstehen allmählich durch Nebeneffekte der Systemnutzung, diverse Umwelteinflüsse sowie Alterungs- und Verschleißprozesse und sind dann 24 Stunden am Tag wirksam, nicht nur während der Produktion.

Der Prozentsatz der durch Kompressoren erzeugten Druckluftmenge, der durch Leckage verloren geht, sollte in einem gut gewarteten großen System je nach Branche weniger als 10 % betragen. Für kleine Systeme werden Leckagenraten von weniger als 5 % angestrebt (160). Der Umfang der Leckagen in schlecht gewarteten und 'historisch gewachsenen' Druckluftsystemen erreicht in der Praxis allerdings bis zu 50 % der erzeugten Mengen. Dabei entstehen Leckagen nicht nur im Verteilungsnetz, besonderes Augenmerk sollten diesbezüglich auch die Druckluftanwendungen erhalten. Die größten Leckageanteile sind oft unmittelbar an den Verbrauchern vorhanden.

Die vorbeugenden Instandhaltungsprogramme für Druckluftsysteme sollten deshalb Maßnahmen zu Identifizierungen und Verhinderungen von Leckagen und zu regelmäßigen Leckagen-Tests enthalten. Im laufenden Betrieb können Leckagen z. T. anhand typischer Geräuschemissionen (Zischen) ermittelt werden. Durch Einsatz spezieller Ultraschall-Messgeräte sind dabei auch schwer zugängliche Stellen überprüfbar, auch das Ausblenden von Störgeräuschen ist möglich. Dadurch können in den meisten Fällen große Teile der Druckluftnetze mit relativ hohe Empfindlichkeit überprüft werden, in bestimmten Fällen ist mit diesen Messgeräten auch eine Quantifizierung einzelner Leckverluste, jedoch nicht der Leckagen des Gesamtsystems möglich. Sobald die Leckagen gefunden und instandgesetzt werden, sollte das System neu bewertet werden.

Die nachfolgend beschriebenen Tests werden empfohlen, um Leckverluste in einem Gesamtsystem zu quantifizieren. Allerdings müssen dafür die Voraussetzungen erfüllt sein, dass im Betrachtungszeitraum keine Druckluftentnahme durch Verbraucher erfolgt und alle Geräte, die Luft verbrauchen, abgeschaltet werden können. Der gesamte Luftverbrauch ist dann nur auf die Leckage zurückzuführen.

- Die direkte Messung ist möglich, falls ein Messgerät für den Verbrauch an Druckluft installiert ist.
- In einem Druckluftsystem mit Kompressoren ohne Leistungsregelung (Start/Stopp-Steuerungen) ist die Schätzung des Umfangs der Leckage durch die Feststellung der Lastzeit (Arbeitszeit) $t_{Laufzeit}$ des Kompressors im Verhältnis zur gesamten Zeit der Messung möglich. Um einen

repräsentativen Wert zu erhalten, sollte die Messungszeit $t_{Messung}$ mindestens fünf Starts des Kompressors enthalten. Die Leckage, dargestellt als ein Prozentsatz des Kompressorvolumens, wird dann wie folgt berechnet:

Formel 3.7-1

$$\text{Leckageanteil [\%]} = 100 * \frac{t_{Lastzeit}}{t_{Messung}}$$

- Die Leckage kann auch durch den Druckabfall im System über eine definierte Zeitspanne geschätzt werden. Hierfür ist ein Ventil zwischen Kompressor und System sowie eine Schätzung des gesamten Volumens des Systems und ein Druckmessgerät hinter dem Ventil notwendig. Das System wird dann auf den Betriebsdruck (P_1) gebracht, der Kompressor wird abgeschaltet und das Ventil geschlossen. Die Zeit (t), die das System benötigt, um von P_1 zu einem niedrigeren Druck P_2 zu gelangen, wird gemessen. P_2 sollte circa 50 % des Betriebsdrucks (P_1) betragen. Die Verlustströmung kann dann wie folgt berechnet werden:

Formel 3.7-2

$$\dot{V}_{Leckage}[m^3/min] = \frac{1}{P_{Umgebung}[bar]} * \frac{1{,}25 * V_{DL_Speicher}[m^3] * (P_1 - P_2)[bar]}{t_{Messung}[min]}$$

- Der Multiplikator 1,25 ist eine Korrektur für die reduzierte Leckage bei fallendem Systemdruck.
- Leckage ausgedrückt als ein Prozentsatz der Kompressorleistung wird dann wie folgt berechnet:

Formel 3.7-3

$$\text{Leckagenanteil [\%]} = 100* \frac{\dot{V}_{Leckage}[m^3/min]}{\dot{V}_{Kompressoreinlass}\,[m^3/min]}$$

Dieses Verfahren ist näherungsweise anwendbar, wenn das Rohrvolumen < 10 % des Kesselvolumens beträgt, bei großen Leitungssystemen ist die näherungsweise Ermittlung des Rohrvolumens erforderlich. Alternativ haben sich bei großen Systemen Laufzeitmessungen zum Identifizieren von Leckagen während eines Produktionsstillstandes bewährt.

- Reduzierung der Leckagemengen: Der Aufwand für die Beseitigung von einzelnen Leckagen ist sehr unterschiedlich. Einfache Maßnahmen sind beispielsweise das Festziehen von Anschlüssen. Kompliziertere Maßnahmen sind beispielsweise das Ersetzen von fehlerhafter Ausrüstung, wie Kupplungen, Armaturen, Rohrteilen, Schläuchen, Verbindungen, Abflüssen und Abscheidern. In vielen Fällen werden Lecks durch schlecht oder unordentlich angewendete Gewindedichtungen verursacht. Ausrüstungen oder ganze Teile des Systems, die nicht mehr benutzt werden, sollten vom aktiven Teil des Druckluftsystems getrennt werden.

Eine zusätzliche Möglichkeit zur Reduzierung von Leckagen ist, den Betriebsdruck so niedrig wie möglich zu halten. Je niedriger der Betriebsdruck, desto geringer sind die Verluste durch Leckagen.

Erreichter Umweltnutzen

Energieeinsparungen.

Neben der negativen Wirkung als Nutzenergieverlust können Lecks auch zu weiteren betrieblichen Verlusten beitragen:

- Sie verringern die produktiv genutzten Volumina.

- Größere Leckagen verursachen unter Umständen einen Abfall im Systemdruck und können damit die Effizienz von Anwendungen wie Druckluftwerkzeugen beeinträchtigen.
- Leckagen verursachen eine höhere Benutzung der Aggregate zur Drucklufterzeugung und -aufbereitung und verkürzen dadurch die Lebensdauer aller Systemkomponenten (einschließlich des Kompressors selbst) bzw. können auch zu zusätzlichen Anforderungen an die Instandhaltung führen sowie zu erhöhter ungeplanter Stillstandszeit.
- Es wird unnötige zusätzliche Kompressor- und Aufbereitungskapazität benötigt.

Betriebsdaten

Für das Detektieren von Leckagen gibt es verschiedene Methoden:

- Einsatz eines akustischen Ultraschall-Detektors,
- Suche nach hörbarem, von größeren Lecks verursachtem Geräusch,
- Benetzen von Oberflächen mit Flüssigkeiten (Einpinseln mit Seifenlaugen, Einsatz von Sprays).

Grundsätzlich können Leckagen in jedem Teil des Systems auftreten, die häufigsten Problembereiche sind:

- Anschlüsse, Schläuche, Rohre und Einbauteile,
- Druckregler,
- offene Kondensatabscheider und Absperrventile,
- Rohrverbindungen, Trennungen und Gewindedichtungen,
- Druckluftwerkzeuge.

Leckagen sind oft nicht vollständig zu vermeiden. Sie geben jedoch rund um die Uhr, also auch zu Produktionspausen (nachts, Betriebsruhe), Druckluft an die Umgebung ab. Da der Druckverlust über Leckagen von der Druckhöhe abhängig ist, ist die wirksamste Effizienzmaßnahme, den Kompressor in Zeiten ohne Druckluftbedarf auszuschalten. Ist dies nicht möglich, sollte eine Druckabsenkung innerhalb dieses Zeitraumes geprüft und ggf. umgesetzt werden.

Anwendbarkeit

Generell bei allen Druckluftsystemen anwendbar.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die Kosten für das Feststellen von Lecks und deren Instandsetzung hängen von dem einzelnen Druckluftsystem und dem Fachwissen des Instandhaltungspersonals ab. Nachfolgend zeigt ein fiktives Berechnungsbeispiel auf, welche Einsparungen bei typischen Einsparpotenzialen (siehe Tabelle 3.7-1) in einem mittelgroßen Druckluftsystem von 50 kW möglich sind:

50 kW x 3.000 h/Jahr x 0,15 Euro/kWh x 20 % = 4.500 Euro/Jahr
(entspricht einer Einsparung von 30.000 kWh)

Die typischen Kosten für eine wirksame, regelmäßige Leckagesuche in mittelgroßen Druckluftsystemen betragen etwa 1.000 Euro/Jahr.

Die Identifizierung und Reduzierung von Leckagen erfordert in der Regel keine signifikanten Investitionen. In den meisten Fällen kann diese Aufgabe von betrieblichem Instandhaltungspersonal eigenständig durchgeführt werden. Weil dadurch ein hohes Verlustpotenzial vermieden werden kann, ist die regelmäßige Leckagesuche und -reduzierung Stand der Technik zur Minimierung des Energieverbrauchs eines Druckluftsystems.

Beispiel

Die Firma Rondo Ganahl AG betreibt in St. Ruprecht ein Wellpappwerk mit 180 Mitarbeitern und einem Umsatz von 50 Mio. € (Stand 2012). Die Druckluft wird im Unternehmen vornehmlich für den

Transport des Produktionsgutes verwendet. Installiert sind für die Leistungsanforderungen zwei Kompressoren mit 90 kW und 110 kW Anschlussleistung, jedoch wurden beide an ihre Leistungsgrenze gefahren, so dass ein weiterer Kompressor hinzugefügt werden sollte. Dies konnte durch eine Beseitigung von Leckagen abgewandt werden. Insgesamt wurden 55 Leckagen identifiziert und beseitigt und damit eine Energieeinsparung von 489.200 kWh/a erzielt (39 % des Druckluftenergiebedarfs). Bei einer einmaligen Investition von 10.000 € wurden jährliche Einsparungen von 48.900 €/a erreicht (158).

3.7.2 Übertragung und Speicherung

Für eine energetische Optimierung des Druckluftsystems müssen auch die Übertragungsverluste betrachtet werden. Hohe Druckverluste im Leitungssystem führen zu überproportionalen Energieverlusten. Als Grundregel sollte der Druckabfall zwischen der Bereitstellung und dem Verbraucher 1 bar nicht überschreiten.

Die Aufschlüsselung dieser Druckverluste sollte sich im Regelfall an folgenden Werten orientieren (161):

- Rohrleitungen (Haupt-, Verteil- und Anschlussleitung) < 0,1 bar,
- Aufbereitung (Kältetrockner und Filter) < 0,2 bar,
- Anschlusszubehör (Abscheider, Schlauch, Öler) < 0,5 bar,
- Schalthysterese am Kompressor: 0,2 bar (max. bis 0,5 bar).

Im Bereich der Verteilung wird auch die Druckluftspeicherung mit betrachtet. Sie weist sowohl energetische als auch systematische Vorteile auf, welche im Anschluss weiterführend betrachtet werden.

3.7.2.1 Übertragung: Optimierung des Verteilsystems

Reduktion von Druckverlusten durch optimale Rohrleitungsauslegung.

Beschreibung

In der Praxis werden Rohrleitungen eines Druckluftsystems häufig nicht nach energetischen Gesichtspunkten ausgelegt, sondern nach Investitionskosten. Besonders zu niedrige Leitungsquerschnitte, ungünstige Leitungs- und Kurvenführung und Verbindungsstücke führen bei einer schlechten Auslegung mit schlechten Strömungseigenschaften zu großen Druckverlusten. Kurzfristige Einsparungen bei Investitionskosten können deshalb zu Mehraufwand an Energieeinsatz und damit Betriebskosten führen.

Erreichter Umweltnutzen

Durch eine Verringerung der Druckverluste im Verteilsystem kann das Druckluftniveau im System insgesamt reduziert werden. Dies ermöglicht eventuell, die Kompressorleistung kleiner auszulegen und damit Primärenergie einzusparen, ggf. Abwärme zu vermindern, Stellfläche zu sparen usw.

Betriebsdaten

Folgende Kriterien sollten bei einer Optimierung oder Auslegung eines Leitungssystems beachtet werden (161):

- Rohrdurchmesser ausreichend groß wählen (siehe Tabelle 3.7-4),
- kleine Gesamt-Rohrleitungslänge,
- keine Sitzventile verwenden,
- Leitungen möglichst gradlinig verlegen,
- bei unvermeidbaren Ecken sind lange Bögen zu bevorzugen,
- sogenannte „Hosenstücke“ bieten bessere Strömungseigenschaften als Knie- und T-Stücke,
- Vermeidung von abrupten Querschnittsverengungen,

- Vermeidung von Spiralschläuchen (max. 3 m),
- Verringerung von Verschleißanfälligkeit durch Auswahl geeigneter Materialien,
- Verwendung von turbulenzvermeidenden Verbindungen und Materialien,
- Ringleitung,
- vermaschte Systeme.

Betriebswirtschaftliche Betrachtung

Die Investitionskosten für größere Rohrdurchmesser und strömungsoptimierte Leitungen, Verbindungen und Anschlüsse sind höher, jedoch amortisieren sich diese Kosten durch Einsparung von Energiekosten in wenigen Jahren. Hinzu können durch möglich geringere Leistungsgrößen der Drucklufterzeugungsanlagen unter Umständen auch Investitionskosten an anderer Stelle reduziert werden.

Tabelle 3.7-4 Beispielrechnung: Kosten im Verhältnis zum Innendurchmesser einer Druckluftleitung von 200 m Länge bei 6 bar Systemdruck

Rohrinnendurchmesser	Druckabfall	Investitionskosten	Energiekosten zur Kompensation des Druckabfalls
90 mm	0,04 bar	10.000 €	175 € p. a.
70 mm	0,2 bar	7,500 €	700 € p. a.
50 mm	0,86 bar	3.000 €	3.815 € p. a.

Quelle: (159)

In diesem Beispiel amortisiert sich die Rohrdurchschnittsvergrößerung von 50 mm auf 90 mm innerhalb von 1,9 Jahren bei einem Strompreis von 14 Cent/kWh und 4.000 Betriebsstunden pro Jahr.

Anwendbarkeit

Die Rohr-Druckverluste in einem Druckluftsystem nachträglich zu optimieren, ist sehr kostspielig. Daher empfiehlt es sich, bereits bei der Auslegung des Übertragungssystems genügend Reserven für Erweiterungen einzuplanen. Die Optimierung von Verbindungen und Verschlüssen ist jedoch zu jeder Zeit anwendbar.

Beispiel:

Das Unternehmen Mangel Formenbau GmbH in Roggendorf stellt vorrangig Spritzgussformen für die Automobil-, Luftfahrt-, Unterhaltungs- und Elektronikindustrie her. Es wurden vor der Energieoptimierungsmaßnahme drei Kompressoren für die Versorgung von CNC Bearbeitungszentren betrieben. Als Versorgungsleitungen wurden insgesamt ca. 150 Laufmeter Rohre und häufig flexible Druckluftschläuche, Durchmesser < 20 mm, verwendet und dabei oftmals nicht der kürzeste Weg genutzt. In diesem Betrieb wurden 2011 folgende Maßnahmen umgesetzt.

- Zusätzlicher Druckluftspeicher,
- Neuinstallation der Versorgungsleitungen (Leitungslängen- und Leckagenreduzierung),
- Austausch der flexiblen Druckleitungen durch Stahl-Versorgungsleitungen (Durchmesser = 50 mm, Gesamtlänge ca. 80 m).

Durch diese Maßnahmen konnte der Systemdruck von 10 bar auf 7 bar reduziert werden.

Die Investitionskosten betrugen 15.000 €, die Energieeinsparung betrug 65.000 kWh/a, was eine Kostenreduzierung von 7.500 €/a (68 % der Energiekosten) bedeutet (158).

3.7.2.2 Speicherung

Beschreibung

Da praktisch fast jedes Druckluftsystem schwankende Verbräuche aufweist, gehören Druckluftspeicher zu den Standard-Komponenten eines Druckluftsystems. Das kann z. B. benötigte Spitzenverbräuche bei den Erzeugern nivellieren und mitunter auch Schaltungen der Kompressoren und auch die Größe der Kompressoren verringern. Zweiter Effekt eines Speichers ist die zusätzliche Druckstabilität. Druckluftspeicher können sowohl zentral als auch dezentral eingesetzt werden. Dezentrale Speicher sind besonders bei kurzfristigen Lastenwechseln von einem einzelnen Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen vorteilhaft, da diese einen ungewollten Druckabfall im Gesamtsystem auffangen können.

In Druckluftsystemen mit drehzahlgeregelten Kompressoren dienen Speicher zur Stabilisierung der Regelung, bei schaltenden Spitzenlastkompressoren zur Verringerung der Schalthäufigkeit. Sie sind in keinem System zu vernachlässigen.

Erreichter Umweltnutzen

Große Behälter verringern bei schwellenden Spitzenverbräuchen die regeltechnischen Verluste der Kompressoren und stabilisieren den Druck. Somit wird Primärenergie gespart.

Betriebsdaten

Aufgrund von möglichem wachsenden Druckluftbedarf im System sollte der Speicher ebenso wie die Verrohrung (siehe Kapitel 3.7.2.1) mit einer Reserve ausgelegt werden.

Anwendbarkeit

Druckluftbehälter tragen zur Druckstabilität bei und nivellieren das Verhältnis zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsmenge. Es gilt die Faustformel, dass das Volumen der Behälter in einem System gleich sein soll der Liefermenge des größten Kompressors. Dies gilt unabhängig von der Regelungsart.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Reduzierte Kapital- und Betriebskosten.

3.7.2.3 Zu- und Abschalten von Systemabschnitten

Beschreibung

Besonders bei verzweigten Druckluftsystemen zur Versorgung verschiedener Produktionsbereiche mit zeitlich diskontinuierlichem Druckluftbedarf kann es von Vorteil sein, einzelne Abschnitte im Leitungsnetz abzuschalten. Dies kann über eine zentrale elektronische Steuerung geschehen. Mithilfe der Abschaltung der Teilsysteme ist zudem eine optimierte Wartung des Druckluftsystems möglich. Große Leckagen können auf diese Weise auf einen bestimmten Bereich eingeschränkt und so die Leckagesuche wesentlich beschleunigt werden (144). Das erneute Zuschalten der abgeschalteten Systeme darf nicht schlagartig durchgeführt werden, sondern geregelt durch sogenannte Druckhaltesysteme, damit der Druck in den aktiven Systemen bei Zuschalten des abgesperrten Systems nicht zusammenbricht.

Erreichter Umweltnutzen

Durch das Abschalten einzelner Teilabschnitte können in diesen Bereichen keine Leckageverluste auftreten, abgesehen von der zum Zeitpunkt des Abschaltens im abgesperrten System enthaltenen Luftmenge. Der reduzierte Druckluftbedarf führt zu einer Senkung des Gesamtenergiebedarfs. Beachtet werden muss jedoch die Zunahme an Hilfsenergie für die Stellmotoren und Sensoren (Druckhaltesysteme).

Anwendbarkeit

Ein Absperren von Teilsystemen bringt nur dann eine signifikante Energieeffizienzsteigerung, wenn die Teilsysteme entsprechend groß und eine entsprechend hohe Stundenzahl, im Vergleich zum übrigen System, außer Betrieb sind.

Triebkraft für die Umsetzung

Einsparung von Energiekosten.

Verweisende Informationen

(144)

3.7.3 Regelung und Steuerung

Eine Regelung bzw. Steuerung wird für eine optimale Versorgung der Druckluftverbraucher benötigt. Grundsätzlich ist eine Regelung ein kontinuierlicher Prozess zwischen Messung einer oder mehrerer Regelgrößen, deren Auswertung und Maßnahmen zu deren Beeinflussung. Das Ziel einer Regelung ist es, einen Ist-Wert zu jedem Zeitpunkt möglichst an einen Soll-Wert (Bsp.: Druckhöhe) anzunähern. Im Gegensatz dazu findet bei der Steuerung keine ständige und automatisierte Rückkopplung statt. Hier werden Eingriffe in das System nach festen Vorgaben getätigt. Ein Beispiel hierfür ist die Maschinensteuerung nach Arbeits- und Pausenzeiten der Mitarbeiter. Somit ist die Anpassung der Druckluftversorgung an den Druckluftverbrauch grundsätzlich als Regelung einzustufen, auch wenn häufig von Steuerung gesprochen wird.

Eine Regelung in einem Druckluftsystem kann sowohl übergeordnet für mehrere Kompressoren als auch individuell für einzelne Kompressoren installiert sein.

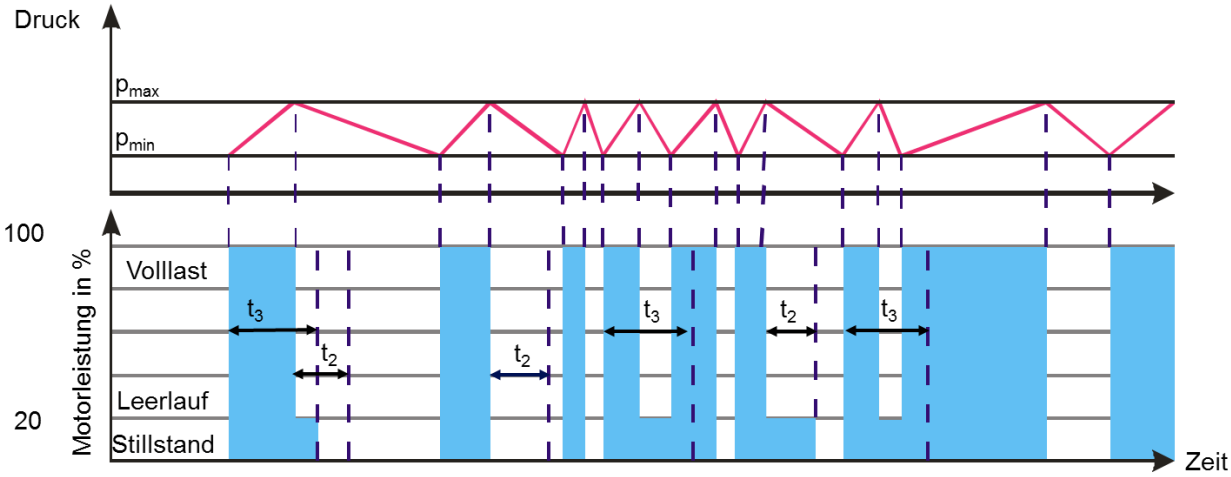
3.7.3.1 Interne Regelung der Erzeuger

Die interne Regelung von Druckluftsystemen kann in kontinuierliche und diskontinuierliche Regulierungen gegliedert werden. Beide bieten Vor- und Nachteile und werden im Folgenden erörtert. Hauptziel der verschiedenen Regelungen ist es, die Auslastung der Kompressoren zu optimieren, da bei geringer Auslastung spezifisch höhere Energieverbräuche zu verzeichnen sind.

<u>Diskontinuierliche Regelung (2-Punkt-Regelung)</u>

Bei einer diskontinuierlichen Regelung wird ein sogenanntes Druckband, bestehend aus Einschalt- und Abschaltdruck, vorgegeben. Im Druckluftsystem wird der Ist-Druck kontinuierlich gemessen. Sollte dieser unter den Einschaltdruck fallen, springt der Kompressor an und arbeitet mit Volllast. Es wird nun solange Luft komprimiert, bis das obere Druckniveau erreicht wird. Der Kompressor wird dann entweder abgeschaltet oder in den Leerlauf gesetzt. Fortgeschrittener als die Volllast-Leerlauf-Regelung ist eine Volllast-Leerlauf-Regelung mit Aussetz- oder Nachlaufregelung, wie sie in Abbildung 3.7-2 dargestellt wird. Hier wird der Motor entweder nach einer definierten Zeit oder beim Überschreiten des Abschaltdruckes vollständig gestoppt. Im Gegensatz zum Leerlauf wird im Stillstand keine Energie benötigt. Die Kompressor-Laufzeit und Schalthäufigkeit wird durch das Druckband bestimmt und sollte genau eingestellt werden (159).

Abbildung 3.7-2: diskontinuierliche Regelung



Quelle: (159)

Kontinuierliche Regelung

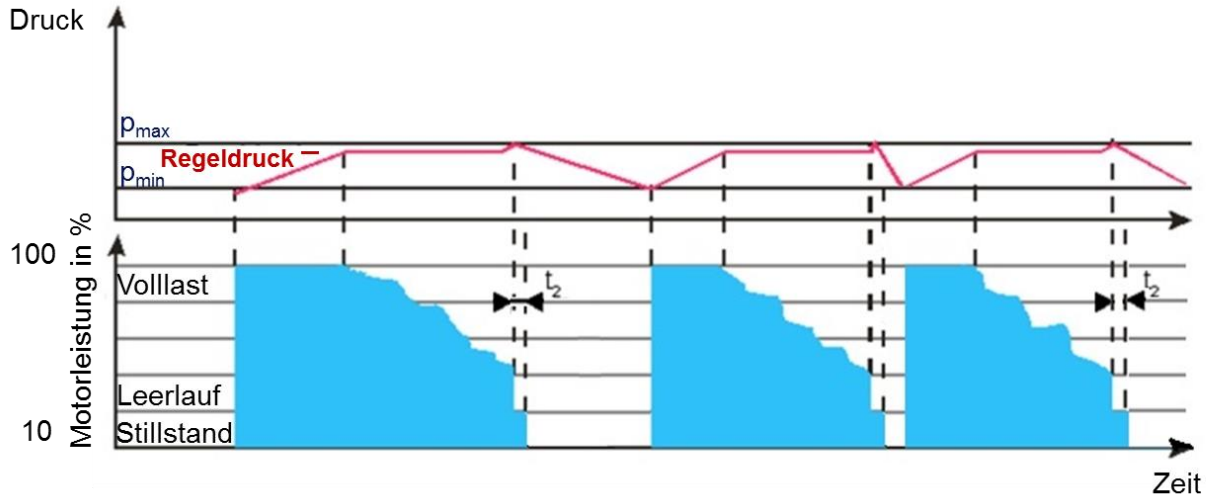
Stand der Technik zur kontinuierlichen Regelung der Drucklufterzeugungsmenge sind Drehzahlregelungen (im Englischen Variable Speed Drive VSD) des Antriebsmotors. Diese können in Anlagen mit Gleichstrommotor oder als Frequenzumrichter in Anlagen mit Drehstromasynchronmotor, Permanentmagnetmotor oder Reluktanzmotor ausgeführt werden. Eine saugseitige Drosselung ist als Regelungsmethode veraltet, da sehr energie-ineffizient.

Zur Abdeckung der systembedingten Verbrauchsschwankungen einer Druckluftanlage werden entweder frequenzgeregelte Spitzenlastkompressoren oder mehrere kleinere Kompressoren eingesetzt, um Verbrauchsschwankungen möglichst wirtschaftlich abzudecken.

Welche Art der Spitzenlastregelung die wirtschaftlichste ist, hängt vom Anwendungsfall ab und sollte auf Grundlage eines Druckluftaudits [siehe z. B. (142)] entschieden werden.

In Abbildung 3.7-3 wird eine schematische Fahrweise einer kontinuierlich geregelten Druckluftanlage dargestellt.

Abbildung 3.7-3: einfache kontinuierliche Regelung (Drehzahlregelung)



Quelle: (159)

Der frequenzgeregelte Kompressor befüllt das Druckluftnetz unter Volllast, bis der Regeldruck erreicht ist. Ab hier beginnt die Frequenzregelung. Die Anlage fährt die Motordrehzahl zurück und versucht den Regeldruck zu halten. Ist kein Druckluftverbrauch mehr vorhanden, so steigt der Druck bis zum Ausschaltdruck p_{max} und die Anlage wird intern entlüftet (t_2). Sobald der vorgegebene Leerlaufdruck, der für einen entlasteten Start benötigt wird, erreicht ist, schaltet die Anlage ab. Wird nach der Entlüftungszeit der Einschaltdruck p_{min} unterschritten, so geht der Kompressor wieder auf Last.

Erreichter Umweltnutzen

Einsparungen an Energie.

Betriebsdaten

Je nach Ausführung hat die Regelung von Drucklufterzeugungsanlagen folgende Aufgaben:

- Sicherstellung der in den Verbrauchern benötigten Volumenströme und Drücke,
- Reduzierung Energiekosten,
- Möglichkeit zum Monitoring, d. h., Betriebsdaten der Station können vom PC aus erfragt werden.

Anwendbarkeit

Die heute verfügbaren Regelungsarten bei Kompressoren sind unabhängig von Branchen, jedoch abhängig vom Druckluftverbrauchsmuster. Je nach Einsatzfall können kontinuierliche oder auch schaltende Regelungen optimal energieeffizient sein. Ziel ist es, die regeltechnischen Verluste der Drucklufterzeugung in einem Betrieb auf unter 20 % zu senken.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Da die Energiekosten der Hauptanteil der Druckluftkosten sind, gilt es, diese zu reduzieren. Gleichzeitig soll eine konstante Versorgung des Betriebes sichergestellt werden.

Typischerweise verursachen die Energiekosten bei Kompressoren circa 75 % der Lebenszykluskosten. Der Rest von 25 % setzt sich aus den Kosten für Investitionen und Instandhaltung zusammen. Die Installation eines frequenzgeregelten Kompressors bedeutet zusätzliche Investitionskosten, welche die Lebenszykluskosten jedoch nur um 2 bis 5 % erhöhen. Im Lastbereich zwischen 35 % und 80 % der Nennlast ist der Energieverbrauch eines drehzahlgeregelten Kompressors um ca. 15 % geringer im Vergleich zu einem Kompressor gleicher Nennlast bei Volllast-Leerlauf-Regelung. Ein drehzahlgeregelter Kompressor ist daher speziell dann sinnvoll eingesetzt, wenn er tatsächlich überwiegend in diesem Lastbereich betrieben wird. In der Praxis wird bei größeren Druckluftsystemen durch die Kombination aus drehzahlgeregelten Kompressoren und Kompressoren mit 2-Punkt-Regelung die energieeffizienteste und wirtschaftlichste Systemkonfiguration erreicht, wobei dafür eine übergeordnete Regelung (siehe 3.7.3.2) erforderlich ist.

Triebkraft für die Umsetzung

Einsparung von Energiekosten.

Beispiel

Das Unternehmen Mahle Filtersysteme Austria GmbH umfasst insgesamt 66.000 Mitarbeiter an ca. 150 Produktionsstandorten. Es gehört zu den zwanzig größten Automobilzulieferern in der Welt.

Die Druckluft wird in diesem expliziten Beispiel für pneumatische Aktoren (Zylinder, Greifer und Saugstationen), die Produktionsmaschinen und für Blaseluft zum Vortrocknen benötigt. Vor der Maßnahme befanden sich drei unterschiedliche Kompressoren mit 2-Punkt-Regelung an unterschiedlichen Positionen. Zwei Kompressoren wurden durch drehzahlgeregelte Kompressoren ausgetauscht und in eine Regelungssoftware eingebunden. Der dritte Kompressor mit 2-Punkt-Regelung soll nur noch als Redundanz für Notfälle oder geplante Wartungen dienen. Durch diese

Druckluftoptimierungsmaßnahme konnten 221.600 kWh/a, also 22.200 €/a eingespart werden. Die Investition im Jahre 2015 betrug 57.200 €, was eine Amortisationszeit von 2,6 Jahren bedeutet (158).

Verweisende Informationen

(145) (159) (162)

3.7.3.2 Druckluftsystem – übergeordnete Regelung/Monitoring

Beschreibung

Druckluftsysteme werden vor allem aus Gründen eines in größerer Bandbreite schwankenden Druckluftbedarfes und der Versorgungssicherheit mit mehreren Kompressoren ausgerüstet. Zur Sicherstellung einer guten Energieeffizienz derartiger Anlagen mit mehreren Kompressoren ist eine kompressorübergreifende/-übergeordnete Regelung Stand der Technik. Diese übergeordneten Regelungssysteme erfassen Betriebsdaten der Kompressoren und anderer Systemkomponenten sowie den Druckluftverbrauch und wählen die optimalen Komponenten aus, um die jeweils benötigte Druckluftmenge mit minimalem Energieeinsatz zu erzeugen.. Ziel ist es, das Zusammenspiel zwischen Drucklufterzeugung und -verbrauchern zu koordinieren und zu optimieren.

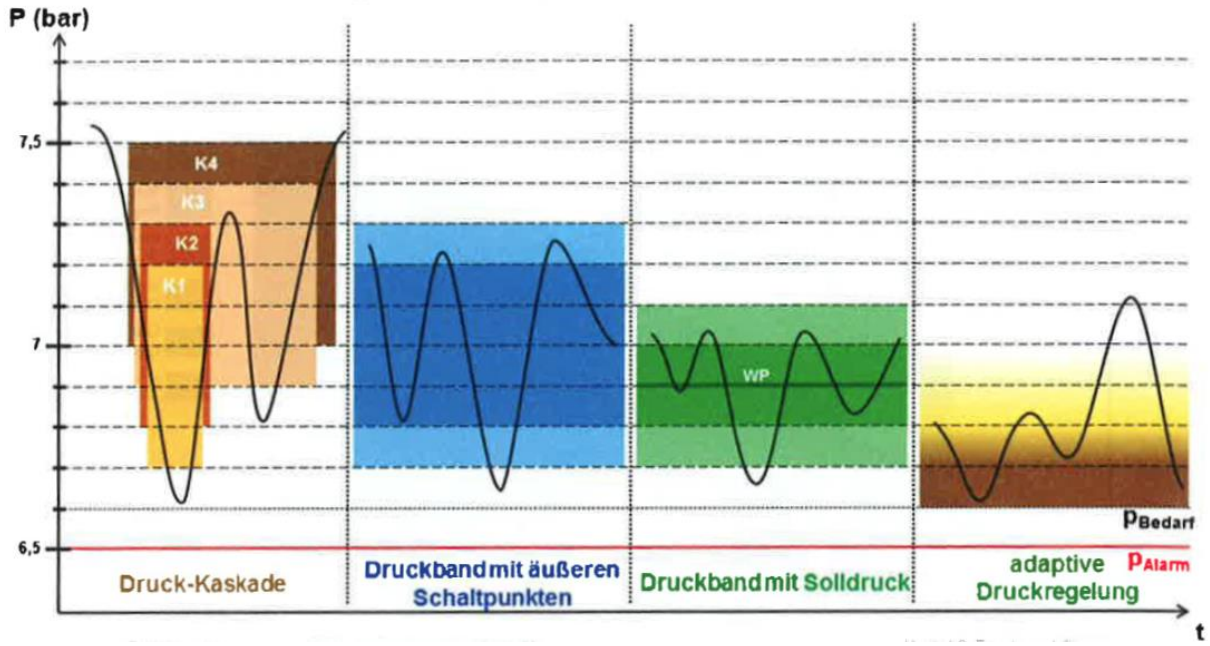
Die technischen Systeme und Regelstrategien von kompressorübergeordneten Regelungen werden durch die Herstellerfirmen von Drucklufttechnik ständig weiterentwickelt und insbesondere in Bezug auf die Energieeffizienz des Gesamtsystems weiter verbessert. Die prinzipiellen Strategien einer übergeordneten Regelung sind nachfolgend aufgelistet, aufsteigend geordnet nach ihrem Effizienz-Effekt:

1. Kaskadensteuerung: jedem Kompressor wird ein fest definiertes Druckband vorgeschrieben, steigender Druckbereich mit Anzahl der Kompressoren;
2. Druckbandregelung: alle Kompressoren werden, wenn möglich, innerhalb desselben vorgegebenen Druckbandes gehalten, keine Erhöhung der Abschaltdruckes;
3. Druckbandregelung mit Solldruck: weitere Reduzierung des maximalen Betriebsdrucks durch Berücksichtigung des Druckverlaufes zu bestimmten Zeitbereichen;
4. Adaptive Druckregelung (3D Regelung): weitere Druckreduzierung und Annäherung an den niedrigst möglichen Bedarfsdruck unter Wahrung der Produktionssicherheit und bei Wahl der wirtschaftlichsten Kompressoren.

Die Funktionsweise dieser unterschiedlichen Regelungsarten ist in Abbildung 3.7-4 mit zugehörigem Druckband veranschaulicht. In den weitaus meisten Anwendungsfällen sind aktuell die Druckbandregelung mit Solldruck (Nr. 3) bzw. die Adaptive Druckregelung (Nr. 4) Stand der Technik.

Eine Druckbandregelung mit Solldruck ist seit mehreren Jahren im Einsatz. Die jüngste am Markt verfügbare Technik im Bereich der übergeordneten Kompressorsteuerung, welche einen weiteren Zugewinn an Energieeffizienz bietet, ist die adaptive 3D-Regelung. Hier werden neben dem optimalen Netzdruck auch die Schaltverluste, Regelverluste und der prognostizierte produktionsabhängige Druckbedarf betrachtet und in die Regelung einbezogen. So kann das System beispielsweise frühzeitig auf Produktionspausen (Mittagspause) eingehen und so Leerlaufverluste mindern, ohne die Bereitstellungssicherheit von Druckluft zu riskieren.

Abbildung 3.7-4: Entwicklung übergeordneter Steuerung/Regelung



Quelle: (153)

Die bedeutendsten Merkmale von übergeordneten Regelungen mit Monitoringfunktion können wie folgt zusammengefasst werden:

- Moderne Kommunikation (z. B. graphische Darstellung der Stationsdaten auf Bildschirm und PC);
- umfassender Zugriff der Druckluft-Hauptsteuerung auf die Betriebsdaten der einzelnen Kompressoren;
- selbstlernende Optimierung der Regelung, einschließlich der Erkennung der Druckluft-Eigenschaften;
- Bestimmung und Aktivierung von energieeffizienten Kombinationen von Kompressoren unter Last, im Leerlauf und Stillstand und Übergängen zwischen diesen Zuständen, um das Luftfördervolumen an den Bedarf anzupassen;
- wirkungsvolle Steuerung von Kompressoren mit variabler Drehzahl, um Schwankungen im Druckluft-Bedarf auszugleichen und den ineffizienteren Betrieb bei maximaler Drehzahl bzw. bei besonders niedrigen Frequenzen zu vermeiden;
- Minimierung der Schaltfrequenzen und des Leerlaufbetriebs bei Kompressoren mit konstanter Drehzahl;
- hoch entwickelte Vorhersagemethoden und -modelle für den gesamten Druckluft-Bedarf, einschließlich der Erkennung von zyklischen Bedarfsmustern (tägliche oder wöchentliche Strukturen von Schicht- und Arbeitsbereich etc.);
- zusätzliche Funktionen, wie ferngesteuerte Überwachung, Erfassung von Werksdaten, Planung der Instandhaltung, Teleservice und/oder Lieferung von vorverarbeiteten Betriebsdaten, über Web-Server;
- Steuerung anderer Druckluftsystem-Komponenten zusätzlich zu den Kompressoren.

Erreichter Umweltnutzen

- Verbesserte Energieeffizienz,
- Stromverbrauch und anfallende Abwärme sind geringer,
- Reduzierung der Wartung/des Teileverbrauchs.

Betriebsdaten

Die Integration eines Kompressors mit variabler Frequenz oder Spitzenlast-Splitting in eine Anlage mit mehreren Kompressoren mit 2-Punkt-Regelung kann in Verbindung mit einer übergeordneten Regelung Einspareffekte erzielen, besonders wenn das System mit einer relativ niedrigen Speicherkapazität ausgerüstet ist und starke Schwankungen im Druckluftbedarf vorliegen. Zusätzlich sollte auf jeden Fall eine Vergrößerung der Speicherkapazität durchgeführt werden. Ein Druckluftsystem mit angemessen gestuften Kompressorgrößen ermöglicht es andererseits, das produzierte Luftfördervolumen präzise an den Druckluftbedarf anzupassen. Durch intelligente Steuerung einer Vielzahl von verschiedenen Kompressoren erreicht man niedrige Schaltfrequenzen und kurze Leerlaufzeiten.

Typischerweise betreiben übergeordnete Regelungen mehrere Kompressoren auf einem gemeinsamen Druckbereich, um einen definierten Mindestdruck zu gewährleisten. Hoch entwickelte Regelstrategien ermöglichen einen niedrigst möglichen Betriebsdruck, ohne die Schaltfrequenzen und die Leerlaufzeiten der Kompressoren zu erhöhen. Dies ermöglicht den niedrigsten spezifischen Energiebedarf für die unter Last laufenden Kompressoren zu erreichen.

Anwendbarkeit

Nach verschiedenen Studien ist die Nachrüstung hoch entwickelter Regelungssysteme für mindestens 20 % der bestehenden Druckluftsysteme kostengünstig anwendbar. Für typische große Druckluftsysteme in IED-Anlagen wird der Einsatz von hochentwickelten übergeordneten Regelungen als Stand der Technik angesehen.

Die höchsten Kosteneinsparungen können erzielt werden, falls die Implementation von hoch entwickelten übergeordneten Regelungen in der Phase der Auslegung des Systems zusammen mit der anfänglichen Auswahl der Kompressoren oder in Kombination von größerem Austausch der Komponenten (Kompressoren) geplant wird.

Wegen der langen Lebensdauer eines Druckluftsystems und energieeffizienter Neuentwicklungen im Bereich der Kompressoren und der Regelung besteht auch bei einer ursprünglich optimalen Konfiguration nach gewisser Zeit ein Optimierungspotential. Daher sollten mehrere Regelungs- und Managementsysteme die Veränderungen aufzeichnen.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Der Kostenminderungseffekt durch die Integration von übergeordneten Regelungen in ein neu ausgelegtes Druckluftsystem ist von unterschiedlichen Umständen abhängig, wie den Bedarfsprofilen, Leitungslängen und Kompressortypen. Die sich ergebenden Energieeinsparungen werden auf 12 – 15 % (163) geschätzt. Im Fall der Nachrüstung übergeordneter Regelungen in ein bestehendes Druckluftsystem ist der Unsicherheitsbereich noch größer, eine Amortisationszeit von weniger als einem Jahr wird in der Praxis aber oft erreicht.

Triebkraft für die Umsetzung

Die wesentlichen Triebkräfte für übergeordnete Regelungssysteme sind die Sicherstellung der Druckluftversorgung in Verbindung mit einer Minimierung der Energiekosten. Weitere Vorteile, die als Triebkraft wirken, sind:

- umfassende Betriebsdatenerfassung über die installierte Regelung und Managementsystem. Dies lässt zum einen eine intensive Überwachung des Systemverhaltens zu, zum anderen ermöglicht sie eine Planbarkeit oder Vorhersage von notwendigen Servicetätigkeiten (predictive maintenance),
- Kostenerfassung,
- Einbindung in ein Energiedatencontrolling innerhalb eines Energiemanagementsystems.

Dies kann zu einer Reduzierung der Kosten für die Instandhaltung, einer Steigerung der betrieblichen Verfügbarkeit und einem höheren Bewusstsein bei den Produktionskosten von Druckluft beitragen.

Beispiel

BRP Powertrain GmbH & Co KG ist ein Tochterunternehmen von Bombardier Recreational Products Inc. und entwickelt 2-Takt-Hochleistungsmotoren. Vor der Maßnahme waren im Unternehmen sechs Kompressoren (2 mal Drehzahlgeregelt, 4 mal starr) installiert. Diese Kompressoren wurden lediglich dezentral durch die integrierte Steuerung geregelt. Ohne eine zentrale Regelungseinheit musste das Druckluftsystem mit einem breiten Druckband in Druckkaskaden gefahren werden. Als Maßnahme wurde eine übergeordnete Regelung installiert. Es konnten die Leerlaufzeiten der vier starren Kompressoren stark reduziert und der Netzdruck im Vergleich zur Kaskadenregelung um 0,9 bar gesenkt werden. Es wurde eine jährliche Energieeinsparung von 120.000 kWh/a erzielt. Durch zusätzliche Reduzierung von Leckagen konnten insgesamt 296.000 kWh/a (20 % der Energiekosten für Druckluft) eingespart werden. In diesem Fall amortisierten sich diese Maßnahmen nach 0,2 Jahren (158).

Verweisende Informationen

(148) (153) (159)

3.7.4 Druckluftbereitstellung

3.7.4.1 Grundlagen für die Auslegung der Anlagen zur Erzeugung und Aufbereitung von Druckluft

Die Aufgabe der Druckluftbereitstellung ist es, Druckluft in benötigter Druckhöhe, Menge und Qualität/-reinheit zu liefern. Dabei ist aus energetischer Sicht darauf zu achten, dass die Anforderungen nicht unbegründet hoch gesetzt werden, da eine hohe Luftqualität mit Druckverlusten einhergeht. Anforderungen an die Luftqualität/-reinheit werden in der Norm ISO 8573-1 beschrieben, inklusive der Wartungskosten. Im Kapitel 3.7.4.2.1 wird darauf Bezug genommen.

Um die Anlagen zur Drucklufterzeugung richtig auslegen zu können, ist es notwendig, den genauen Bedarf an Druckluft zu kennen, um eine Über- oder Unterdimensionierung zu vermeiden. Die Ermittlung dieser bedarfsseitigen Randbedingungen wurde in den vorangegangenen Kapiteln 3.7.1 - 3.7.3 beschrieben. Die Auslegung der Anlagen zur Druckluftaufbereitung und Drucklufterzeugung bzw. bei bestehenden Systemen die Betrachtung von Optimierungsmaßnahmen an den Kompressoren (siehe 3.7.4.3.1) sind methodisch somit der letzte Kalkulationsschritt bei der Betrachtung eines gesamten Druckluftsystems.

3.7.4.2 Druckluftaufbereitung

Beschreibung

Die Nutzung der Druckluft ohne Aufbereitung, insbesondere der Trocknung, ist heute für die meisten Anwendungen nicht mehr ausreichend und würde zu einer mitunter kritischen Minderung der Produktqualität führen (163).

Bei der Konzeption sollte daher zwingend der Hersteller der Verbrauchssysteme oder ein Druckluftfachmann einbezogen werden.

Verweisende Informationen

(163), (159), (146)

3.7.4.2.1 Aufbereitungssystem

Beschreibung

An die Druckluft sind je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Anforderungen an die Qualität gestellt. Die Qualität umfasst feste Partikel, Feuchtigkeit, flüssiges Wasser und den Ölgehalt. ISO 8573-1:2010 definiert die Qualität der Druckluft für drei Arten von Schadstoffen für unterschiedliche Anwendungsbereiche.

- Feste Partikel 8 Klassen
- Feuchtigkeit und flüssiges Wasser 10 Klassen
- gesamter Ölgehalt 5 Klassen

Die Aufbereitung der Druckluft ist auf der einen Seite notwendig, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten, Umweltverschmutzung zu minimieren und Korrosion vorzubeugen. Auf der anderen Seite bedarf sie Zusatzenergie und verursacht Druckverluste, welche sich wiederum durch einen höheren Ausgangsdruck widerspiegeln. Daher sollte bei der Aufbereitung der Druckluft die Regel, „So viel wie nötig, so wenig wie möglich“ beachtet werden.

Die Druckluft wird meist zentral nach der Erzeugung aufbereitet. Es kann jedoch auch von Vorteil sein, eine dezentrale Variante zu installieren, wenn einzelne wenige Verbraucher besondere Ansprüche an die Qualität haben.

Betriebsdaten

Kondensatabscheider

Bei der Verdichtung von angesaugter Raumluft und nachfolgender Abkühlung der verdichteten Luft auf Umgebungstemperatur entsteht oft eine Übersättigung der Druckluft mit Wasser, was zu Kondensatausfall führt. Daraus resultiert die Notwendigkeit, dieses Kondensat aus dem System abzuführen, da es sonst mit der Druckluft durch das Leitungssystem zum Verbraucher transportiert wird. Durch einen Zyklonabscheider am Kompressoraustritt können bereits bis ca. 70 % des Wassers abgeschieden werden. Es wird mit Hilfe eines Kondensatableiters aus dem System abgeleitet und muss gemäß WHG entsorgt werden. Dafür gibt es unterschiedliche technische Lösungen. Stand der Technik sind hier automatisierte Ableiter mit Kondensat-Füllstandsensoren.

Trockner

Die Luft nach dem Kondensatabscheider ist im gesättigten Zustand, das heißt die Luftfeuchtigkeit beträgt 100 %. Um diese weiter zu senken, werden Trockner benötigt. Hierfür existieren mehrere Verfahren, welche sich durch das Kriterium Restwassergehalt nach der Trocknung unterscheiden. Mit den Drucktaupunkttemperaturen bestimmt man den Wassergehalt der Druckluft. Dieser gibt an, bei welcher Temperatur die Druckluft mit Wassergehalt vollständig gesättigt ist. Tendenziell gilt die Abhängigkeit: je niedriger der Restwassergehalt, desto größer der zusätzliche Energieaufwand für die Trocknung.

Bei der **Kältetrocknung**, den am häufigsten genutzten Trocknungssystemen, wird mithilfe eines zusätzlichen Kältekreislaufes die Temperatur der Druckluft auf die gewünschte Taupunkttemperatur herabgekühlt. Es bilden sich Kondensat und Öltröpfchen, die aus dem System wieder abgeführt werden. Die Kälteerzeugung benötigt viel Elektroenergie (ca. 3 – 5 % des Gesamtaufwandes für die Druckluftbereitstellung), daher erfolgt die Kühlung in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Druckluft mit der zurückströmenden, bereits gekühlten Luft vorgekühlt. Im zweiten Schritt wird dann mit einem durch eine Kältemaschine versorgten Kühlkreislauf die Temperatur auf die gewünschte Endtemperatur herabgesetzt. Besonders im Teillastbereich, der den typischen Arbeitsmodus eines Trockners darstellt, können im Vergleich zu herkömmlichen, konstant kühlenden Kältetrocknern je nach Auslastungszyklen bis zu 80 % der trocknerbezogenen Energiekosten eingespart werden durch

- Verwendung zusätzlicher Energiespeicher (Latent- oder Massewärmespeicher) und/oder
- Taktung der Kältetrocknung. Besteht kein Bedarf an Druckluft, fährt das Kälteaggregat in einen Standby-Modus und verbraucht so weniger Energie.

Adsorptionstrockner entziehen der Druckluft die Feuchtigkeit über ein Trocknungsmittel. Um das Trockenmittel zu regenerieren muss Energie zugeführt werden. Diese Trockner haben den Vorteil gegenüber der typischen Kältetrocknung, dass viel tiefere Taupunkttemperaturen erreicht werden können. Jedoch ist der Energiebedarf der Absorptions- und Adsorptionstrocknung signifikant höher (10 % bis 30 % Energiebedarfsanteil bei der Drucklufterzeugung). Häufig werden sie eingesetzt, wenn eine zentrale Drucklufttrocknung mit Kältetrockner vorhanden ist und z. B. in einzelnen Laborbereichen niedrigere Drucktaupunkte benötigt werden. Koppelt man die Regeneration des Trockenmittels mit der Wärmerückgewinnung des Kompressors, kann hier eine energetische Einsparung bestehen. Dies ist vor allem relevant bei trocken laufenden Kompressoren.

Als weitere Option der Drucklufttrocknung existiert die **Membrantrocknung.** Diese kommt typischerweise bei kleinen Volumenströmen zum Einsatz.

Kälte-Drucklufttrocknung und Adsorptions-Trocknung sind bedarfsabhängig einzusetzen und stehen nicht in Konkurrenz zueinander.

Filter

Filter werden zur Reinigung der Druckluft von Staub und Ölaerosolen eingesetzt. Als Aktivkohlefilter oder in Verbindung mit Aktivkohleadsorber können auch Kohlenwasserstoffe separiert werden. Jeder Filter geht mit einem Druckverlust im System einher und ist damit mit einem Energiemehraufwand verbunden. Zudem müssen Filter gewartet werden (siehe 3.7.5) (159).

Erreichter Umweltnutzen

Durch eine der Versorgungsaufgabe angepasste Auslegung der Druckluftaufbereitung kann der für die Aufbereitung erforderliche Energie-und Wartungsaufwand minimiert werden. Nicht erforderliche zu hohe Qualitäten der Druckluft sind dagegen meist mit einem Mehrverbrauch an Energie verbunden, der hauptsächlich durch höhere Druckverluste in den Aufbereitungssystemen verursacht wird.

Medienübergreifende Wirkung

Durch die Verwendung von Einwegfiltern entsteht zusätzlicher Abfall, der fachgerecht entsorgt werden muss. Auch das Kondensat aus dem Flüssigkeitsabscheider muss gesondert und fachgerecht entsorgt werden. Des Weiteren wird durch eine richtig ausgelegte Druckluftbereitstellung der Aufwand für Wartungen reduziert und die Lebensdauer der gesamten Anlage signifikant verlängert (Bsp. Korrosion).

Anwendbarkeit

Die Druckluftaufbereitung ist für jedes Druckluftsystem anwendbar, jedoch muss aus energetischer Sicht das Prinzip „So viel wie nötig, so wenig wie möglich“ eingehalten werden.

Triebkraft für die Umsetzung

Einhaltung der Druckluftqualität mit geringen Energiekosten und Optimierung der Produktion.

Beispiel

Die Wolf Plastics Verpackungen GmbH in Kammern (Österreich), ein Unternehmen aus der Kunststoff-Verpackungsbranche, hatte bis zum Jahr 2009 sechs Kompressoren unterschiedlicher Leistungen installiert, die ausschließlich in 2-Punkt-Regelung in grober Leistungsabstufung und mit veralteten Drucklufttrocknern betrieben wurden. Der Druckluftbedarf betrug an Wochentagen 40 – 55 m^3/min und an Wochenenden 18 - 25 m^3/min. Es wurde eine komplexe Modernisierungsmaßnahme des Druckluftbereitstellungssystems durchgeführt, bestehend aus

- der Anschaffung eines frequenzgesteuerten 160 kW-Kompressors,
- dem Ersatz der alten, überlasteten Trockner durch der erforderlichen Druckluftqualität angepasste Trockner sowie
- der Installation einer übergeordnete Steuerung.

Durch das Maßnahmenpaket wurde eine Absenkung des Systemdruckes ermöglicht. Insgesamt betrug der Einspareffekt 247.000 kWh/a (rund 25.000 €/a, Preisbasis 2009). Der Effekt setzt sich zusammen aus der deutlichen Verringerung der Leerlaufverluste, dem verringerten Energieaufwand wegen der Systemdruckabsenkung und dem Effekt der optimierten Kältetrocknung in Verbindung mit der verbesserten Druckluftqualität (158).

3.7.4.2.2 Kühlung und Belüftung der Drucklufterzeugungsanlagen

Beschreibung

Die vom Kompressor und seinen Nebenaggregaten, zum Beispiel Kältetrockner, Kühlwasserpumpen, erzeugte Wärmemenge muss abgeführt werden, da es sonst zur Überschreitung der für den Kompressor zulässigen Umgebungsbedingungen kommen kann (159).

Nach VDMA-Einheitsblatt 4363 der für die Drucklufterzeugung zulässigen Umgebungsbedingungen befinden sich die zulässigen Temperaturen im Aufstellbereich von Kompressoren zwischen +5 °C (Vermeidung des Einfrierens der Kompressor-Sicherheitsorgane) und +40 °C (Vermeidung der thermischen Überlastung von Bauteilen).

Prinzipiell kann zwischen Luft- und Wasserkühlung unterschieden werden.

Die Luftkühlung ist die einfachste Art der Wärmeabfuhr. Möglich ist die Zu- und Abfuhr der Luft über freie Öffnungen, unterstützt durch Ventilatoren oder durch spezielle Zu- und Abluftkanäle. Häufig wird die Zuluft über freie Öffnungen angesaugt und die Abluft über Kanäle abgeführt. Im Winter kann es vorteilhaft sein, Teilströme der Abluft in den Raum zu führen, um dadurch für Frostfreiheit zu sorgen.

Wichtig ist es, den warmen Abluftstrom nicht auf die gleiche oder andere Kompressoranlagen oder andere Komponenten der Drucklufterzeugung/Aufbereitung zu führen, um einen „Wärmekurzschluss“ zu vermeiden.

Bei großen abzuführenden Wärmemengen (große Kompressoren oder mehrere Kompressoren in einem Raum und Komponenten) und/oder schlechter Zugänglichkeit des Kompressorraumes kann die erforderliche Kühlluftmenge für die Abführung der Restwärme nicht problemlos bereitstellbar sein, so dass die Kühlung über Wasser erfolgen muss. Hierbei ist zu beachten, dass es aufgrund der Strahlungswärme der Bauteile trotzdem notwendig ist, ausreichend Kühlluft für den Aufstellbereich der Kompressoren zur Verfügung zu stellen.

Nahezu die gesamte Wärmeabgabe der Kompressoren kann technisch kontrolliert erfasst und diversen Nutzungen zugeführt werden (Wärmerückgewinnung siehe Kapitel 3.7.4.3.2).

Anwendbarkeit

Bei jedem Druckluftsystem muss bei der Planung der Druckluftstation auf eine Einhaltung der optimalen Umgebungstemperaturbedingungen durch entsprechende Kühlung und Belüftung geachtet werden.

3.7.4.3 Drucklufterzeugung

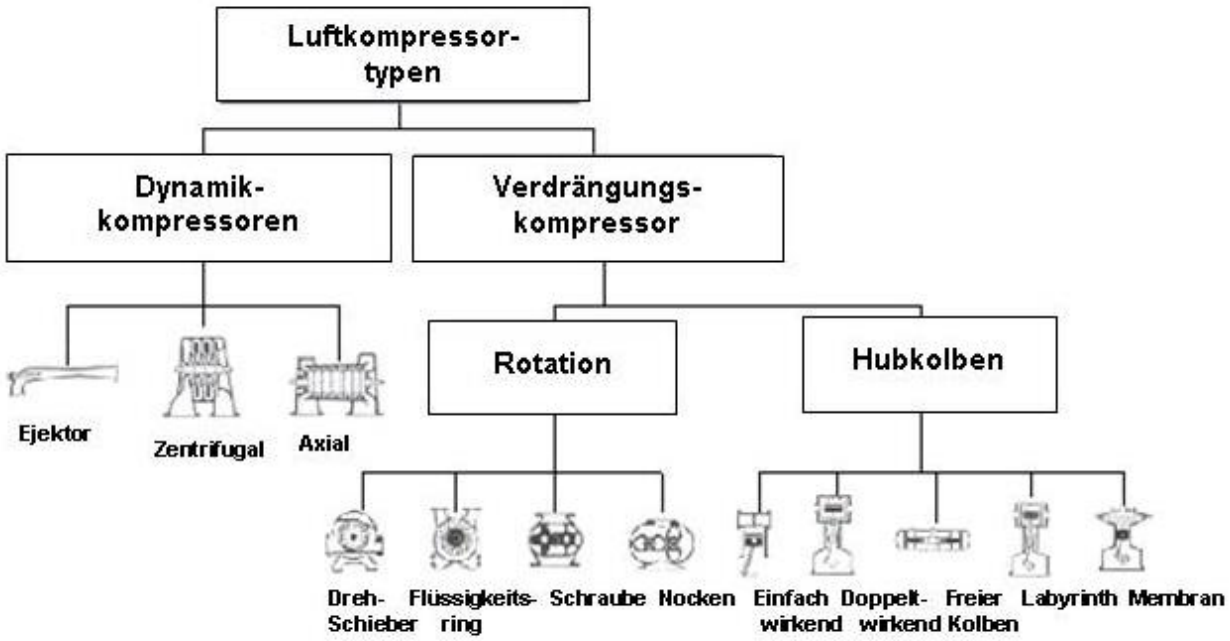
3.7.4.3.1 Kompressoren-Systeme und Einsatzbereiche

Beschreibung

Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Kompression von Luft, dabei hat jede Technologie Eigenschaften, die sich bei bestimmten Anwendungen optimal einsetzen lassen. Mithilfe der Parameter Druck, Luftmenge und Qualität/Reinheit lassen sich die Entscheidungsmöglichkeiten eingrenzen. Für eine betriebswirtschaftliche Wahl des Kompressors spielen die Betriebskosten und damit einhergehend besonders die Energieeffizienz im Verhältnis zu den Investitionskosten einen übergeordneten Anteil.

Betriebsdaten

Abbildung 3.7-5: Typen von Kompressoren



Quelle: (145)

Kompressoren einer Technologie werden durch weitere Parameter, wie zum Beispiel ein- und mehrstufige Ausführung, mit und ohne Zwischenkühlung oder Kühl- und Schmiermittel, differenziert. Weiterführende Informationen zu den einzelnen Kompressortypen sind beispielsweise unter (164) auffindbar. Die drei für den industriellen Einsatz am häufigsten verwendeten Konstruktionsprinzipien und deren Einsatzbereiche werden im Folgenden benannt:

<u>Kolbenkompressor</u>

Kolbenkompressoren werden vorrangig bei kleinen Volumenströmen und/oder hohen Drücken verwendet. Sie arbeiten nach dem Verdrängungsprinzip. Als praktisches Beispiel sei hier die Fahrradpumpe erwähnt.

<u>Schraubenkompressor</u>

Schraubenkompressoren sind die verbreitetsten industriellen Kompressoren in dem Bereich von 2,2 kW bis zu ca. 800 kW elektrischer Antriebsleistung. Sie sind sowohl als öleinspritzende als auch als ölfreie Konfigurationen verfügbar. Die Beliebtheit der Schraubenkompressoren ist im

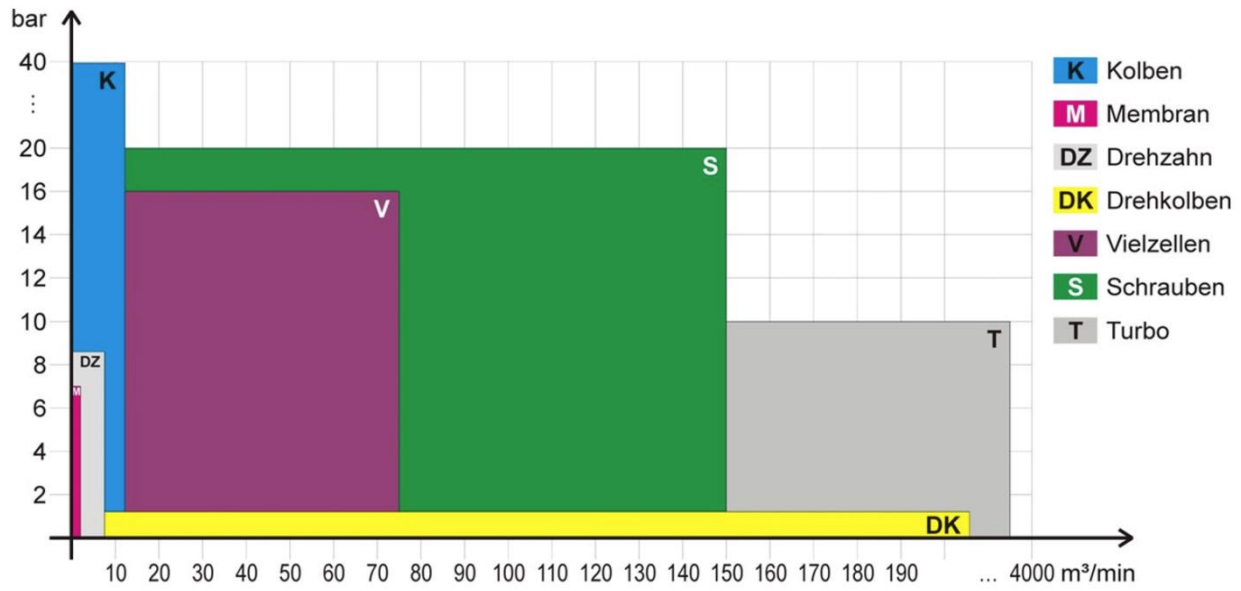
Mitteldruckbereich auf eine hohe Energieeffizienz, eine einfache Regelbarkeit und eine hohe Zuverlässigkeit zurückzuführen.

Turbokompressor

Turbokompressoren werden zur Klasse der dynamischen Kompressoren gezählt. Dynamische Kompressoren sind typischerweise bei großen Durchflussmengen und kleinen Druckänderungen zu bevorzugen.

Für eine physikalisch sinnvolle Auswahl der Kompressoren sind besonders der Volumenstrom und das Druckniveau relevant. Nachfolgende Abbildung stellt unterschiedliche Verdichterbauarten gegenüber und ordnet sie entsprechend ihres primären Arbeitsbereiches zu. Entsprechend dieser Darstellung sollten Kolbenkompressoren vorrangig bei hohen Druckniveaus und kleinen Volumenströmen und Turbokompressoren bei kleinen Druckunterschieden und großen Volumenströmen eingesetzt werden.

Abbildung 3.7-6: Typische Einsatzbereiche von Kompressorenbauarten



Quelle: (163)

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Kompressoren zu ermöglichen, werden Kennzahlen gebildet. Im Bereich der Kompressoren ist die Verwendung der folgenden Kennzahl Stand der Technik:

Formel 3.7-4

$$P_{spezif}(p_{Netz})\ [kW/(m^3/min)] = P_{zu,\ gesamt}\ [kW] / \dot{V}\ [m^3/min]$$

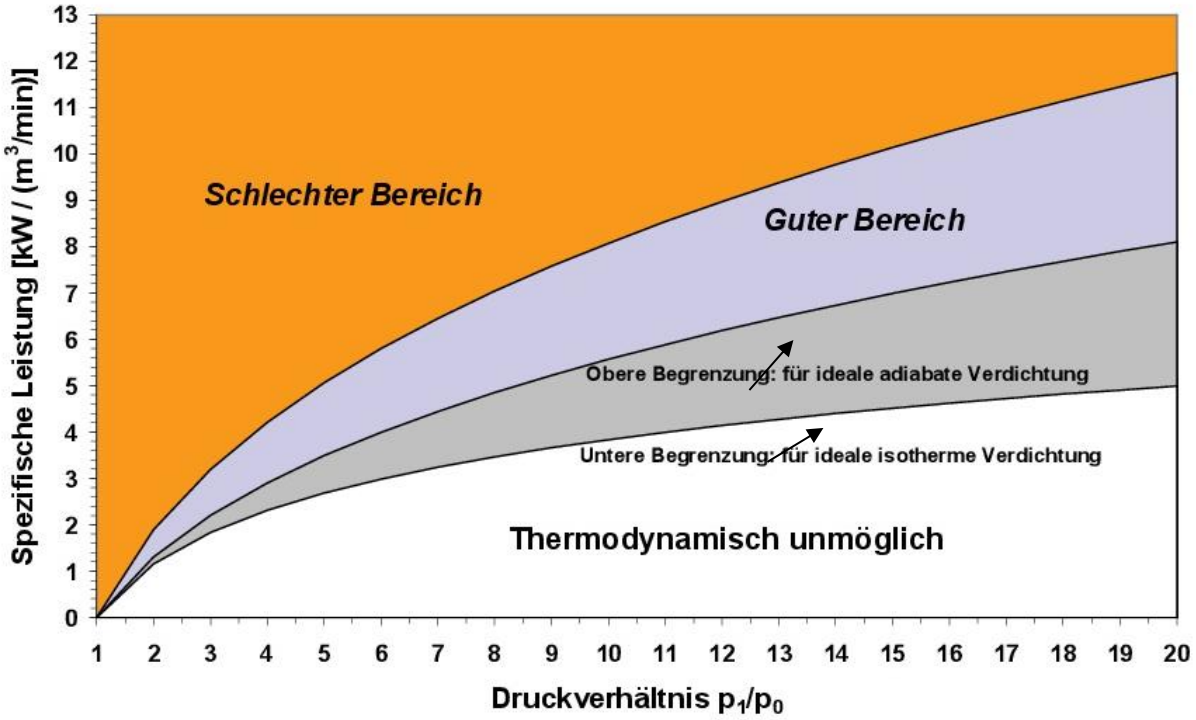
Die Formelzeichen bedeuten:

- Pspezif (pNetz) [kW/(m3/min)]: spezifische Leistung des Kompressors (bezogen auf Druck im Verteilnetz pNetz),
- Pzu, gesamt [kW]: Gesamt-Leistungsaufnahme des Kompressors nach ISO 1217:2009 Annex C oder Annex E,
- $\dot{V}$ [m³/min]: Volumenstrom bezogen auf Umgebungsbedingungen nach ISO 1217:2009 Annex C oder Annex E.

Die spezifische Leistung gibt an, wieviel Energie für die Erzeugung eines Kubikmeters Druckluft gebraucht wird.

Innerhalb einer Bauart- und Leistungsklasse können bei Kompressoren verschiedener Hersteller z. T. erhebliche Unterschiede bei der spezifischen Leistung, d. h. bei der energetischen Effizienz bestehen. Abbildung 3.7-7 verdeutlicht die Bandbreite dieser Kennzahl in dem in der Industrie am weitesten verbreiteten Druckbereich. Vorhabenträger sollten sich bei der Auswahl der Drucklufterzeugungsanlagen auf den guten Kennzahlbereich orientieren. Da in den meisten Anwendungsfällen, vor allem bei hohen Benutzungsstundenzahlen, die Energiekosten mehr als 75 %, teilweise mehr als 90 % der Lebenszykluskosten betragen, ist eine hohe Priorität dieses Auswahlkriteriums ökologisch wie ökonomisch sinnvoll.

Abbildung 3.7-7: Spezifischer Leistungsbedarf für die Drucklufterzeugung, p_0 ist als Umgebungsdruck, p_1 als Systemdruck im Netz am Ausgang des Kompressors definiert



Quelle: (163)

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die richtige Auslegung von Kompressoren ohne eine Überdimensionierung führt zu zwei wirtschaftlichen Vorteilen. Mithilfe einer energetisch genauen und korrekten Auslegung der Kompressoren kann die Kompressorgröße verringert bzw. bei mehreren Kompressoren teilweise sogar einzelne Kompressoren eingespart werden. Somit verringern sich die Investitionskosten. Auf der anderen Seite verringern sich mit der Reduzierung der Kompressorleistung auch die Energiekosten, welche in Abhängigkeit von der jährlichen Betriebsstundenzahl und der Größe der Anlage meist mehr als 75 %, in manchen Fällen mehr als 90 % der Lebenszykluskosten einer Druckluftanlage entsprechen.

Anwendbarkeit

Die bedarfsangepasste Kompressorauslegung ist für jedes Unternehmen anwendbar und als Planungsschritt Stand der Technik.

Beispiel

Im Folgenden wird ein Beispiel aus der Studie „Ecodesign Preparatory Study on Electric motor systems/Compressors DG ENER Lot 31 FINAL Report of Task 6, 7 & 8“ (150) gezeigt, um eine Kompressorauslegung mit Zahlen zu veranschaulichen. Die Zahlen beziehen sich auf öleingespritzte Schraubenkompressoren ohne variable Drehzahlregelung und einem Durchfluss von 7,2 m^3/min. Vereinfachend wurden die Instandhaltungs-, Filter- und Installationskosten beider Varianten als gleich hoch angenommen.

Tabelle 3.7-5: Berechnungsbeispiel der Kompressorauslegung mit Lebenszykluskosten

	Referenzkompressor	Hocheffizienter Kompressor**
Investitionskosten	11.401 €	13.706 €
Energiebedarf	134.534 kWh/a	127.271 kWh/a
Energiekosten	10.036 €/a	9.226 €/a
Installationskosten	493 €	493 €
Instandhaltungskosten	13.273 €	13.273 €
Filterkosten	781 €/a	781 €/a
Betriebsdauer	12 Jahre	12 Jahre
Lebenszykluskosten*	154.971 €	147.556 €
Amortisationszeit	Referenz	2.8 Jahre

***** Dynamische Berechnung unter Berücksichtigung von durchschnittlichen Preissteigerungen und Referenzzinssätzen
** 20% weniger Verlust als Referenzkompressor, beide verglichen mit dem idealen (theoretischen) isentropen Verdichtungsprozess, siehe in (150 S. 34 ff.).
Quelle: (150)

Verweisende Informationen

(150) (163) (165)

3.7.4.3.2 Abwärmenutzung

Beschreibung

Aus dem Verdichtungsprozess eines industriellen Druckluftkompressors muss eine Energiemenge, welche fast 100 % der Antriebsenergiemenge entspricht, in Form von Wärme abgeführt werden. Ein großer Teil (bis zu 95 %) dieser thermischen Energie kann auf einem Temperaturniveau von etwa 80 °C als Nutzwärme verwendet werden. Die Wärmeenergie, die bei der Erzeugung der Druckluft entsteht, sollte daher bei der Neuplanung einer Anlage berücksichtigt werden.

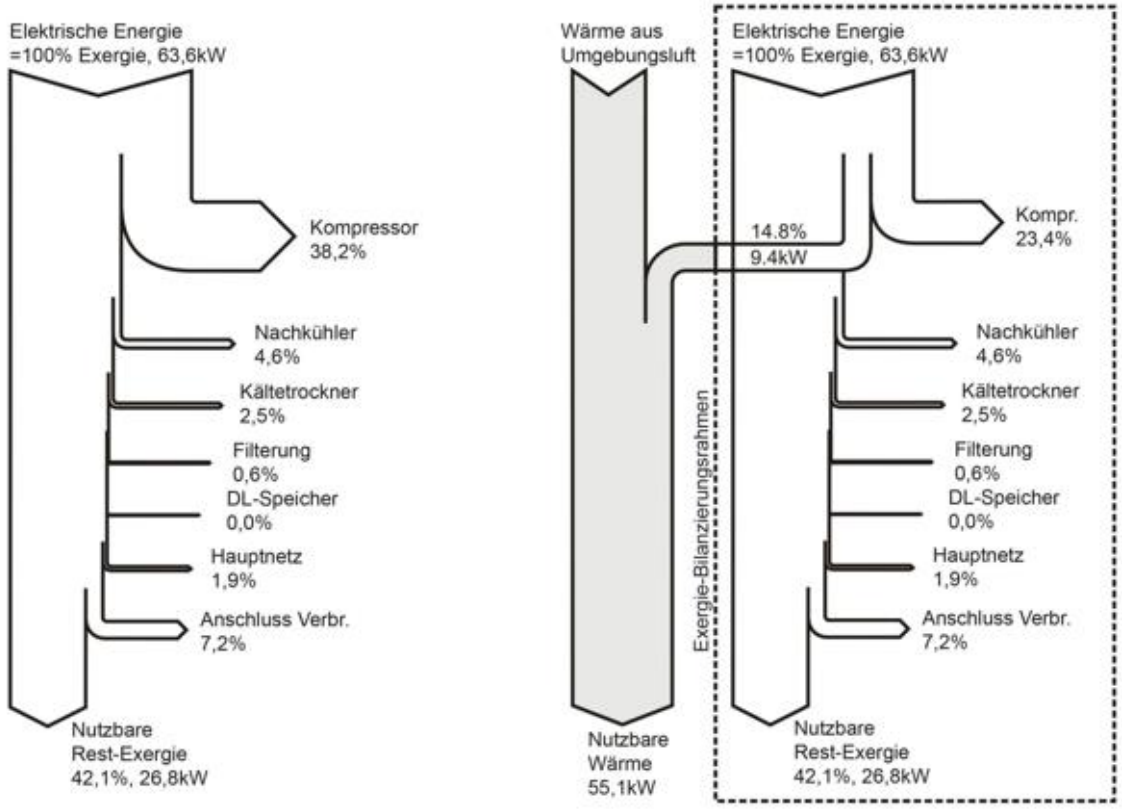
Beim Entspannungsprozess der Druckluft wiederum sinkt deren Temperatur meist unter die Umgebungstemperatur, so dass sie der Umgebung Wärme entzieht, was physikalisch als Energie für die Verrichtung von mechanischer Arbeit nutzbar ist.

Ein Energieflussdiagramm mit einem Bilanzrahmen um den Drucklufterzeugungsprozess eines Kompressors ist für eine Veranschaulichung und Bewertung der Energieumwandlungsprozesse in einem Druckluftsystem wegen des komplexen thermodynamischen Prozesses ungeeignet. Das Energiepotenzial der komprimierten Luft würde dabei nicht korrekt abgebildet. Eine wesentlich bessere Prozessbewertung ist mit Hilfe der Zustandsgröße Exergie möglich, weil diese das Potenzial zum Verrichten von Arbeit gegenüber dem thermodynamischen Gleichgewichtszustand mit der Umgebung beschreibt.

Die Exergie, also das theoretische Energiepotenzial der Druckluft zur Umwandlung in mechanische Arbeit, liegt je nach Systemdruck und Randbedingungen bei den meisten industriellen Anwendungen

bei ca. 25 % - 45 % der ursprünglich aufgewendeten Elektroenergie für die Anlagen zur Drucklufterzeugung und -aufbereitung. Bei herkömmlichen pneumatischen Anwendungen, wie z. B. Druckluftschraubern, wird wiederum nur ein Teil dieses Energiepotenzials tatsächlich als mechanische Antriebsleistung wirksam.

Abbildung 3.7-8: Exergieflussdiagramme (links ohne und rechts mit Wärmerückgewinnung) für ein Anwendungsbeispiel einer industriellen Druckluftanlage

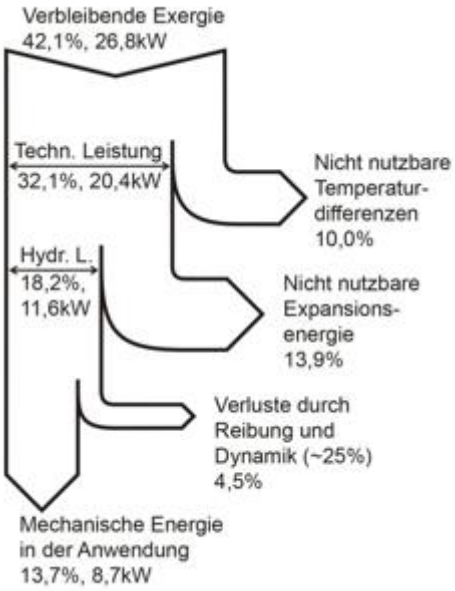


Quelle: (166)

Abbildung 3.7-8 zeigt typische Exergiebilanzen einer Druckluftanlage, berechnet aus einem konkreten Anwendungsbeispiel. Qualitativ sind alle technischen Anwendungen mit dieser Darstellung vergleichbar, es können sich allerdings erheblich andere quantitative Verhältnisse ergeben.

Das rechte Diagramm verdeutlicht außerdem das Potenzial der Wärmenutzung unter Beachtung des Wärmeenergieinhaltes der angesaugten Umgebungsluft. Die nutzbare Rest-Exergie der komprimierten Druckluft könnte theoretisch wieder in mechanische Energie umgewandelt werden. Die tatsächliche Ausnutzung des Exergiepotenziales ist sehr stark von den Randbedingungen der Anwendung abhängig, wie beispielhaft in Abbildung 3.7-9 veranschaulicht wird.

Abbildung 3.7-9: Exergieverluste in einer beispielhaften herkömmlichen pneumatischen Anwendung, Fortführung aus Abbildung 3.7-8



Systeme für die Wärmerückgewinnung sind für die meisten Kompressoren am Markt als Zubehör verfügbar, entweder integriert in die Kompressoreinheit oder als eine externe Lösung. Auch ein bestehendes Druckluftsystem kann oft zu wirtschaftlich interessanten Konditionen nachgerüstet werden.

Voraussetzung für die Installation einer Wärmerückgewinnung ist jedoch, dass für die zurückgewonnene Wärme auch Wärmeabnehmer bzw. Wärmesenken zur Verfügung stehen, bei denen durch die Einbindung der Abwärme aus der Drucklufterzeugung andere Endenergiemengen substituiert werden. Ein geeignetes Tool zur Bewertung des Abwärmepotenzials ist z. B. in (107) enthalten.

Betriebsdaten

Über die Wärmerückgewinnung können Heizmedien typischerweise ungefähr auf ein Temperaturniveau von ca. 80 °C erhitzt werden. Zwei verschiedene Rückgewinnungsmedien stehen hierfür zur Verfügung:

<u>Erwärmung von Luft</u>

Luftgekühlte Kompaktkompressoren eignen sich bezüglich der Wärmerückgewinnung für eine Raumheizung, industrielle Trocknung, das Vorheizen von angesaugter Luft für Ölbrenner oder für jegliche andere Anwendung, die warme Luft benötigt. Atmosphärische Umgebungsluft wird durch die Kompressorkühlungen geleitet, wo sie die Wärme aus dem Druckluftprozess entzieht.

Da Kompaktkompressoren typischerweise im Gehäuse eingeschlossen sind und bereits Wärmetauscher und Ventilatoren enthalten, sind die einzigen erforderlichen Systemänderungen das Hinzufügen von Leitungen und eines weiteren Ventilators, um das Beladen des Kanals zu handhaben und jeglichen Gegendruck auf den Kühlventilator des Kompressors zu beseitigen. Diese Systeme zur Wärmerückgewinnung können mit einer einfachen, thermostatisch gesteuerten und schwenkbaren Entlüftungsöffnung reguliert werden.

<u>Erwärmung von Wasser</u>

Sowohl luftgekühlte wie auch wassergekühlte Kompressoren können über Wasser-Wärmerückgewinnungssysteme Wärme im Wasser bereitstellen.

Bei Kompressoren mit Öleinspritzung führt das Öl die Kompressionswärme aus dem verdichteten Volumen als Wärmeenergie ab, diese Menge entspricht ca. 70 - 80 % (vgl. u. a. (167)) der zugeführten elektrischen Energie. Diese bei ca. 80 °C anfallende Wärmemenge kann genutzt werden. Je nach Auslegung können mittels Wärmeübertragern Brauchwasser oder Trinkwasser erwärmt werden. Wenn Warmwasser nicht benötigt wird, leitet man das Kühlöl je nach System über den wasser- oder luftgekühlten Ölkühler um. Das bereitgestellte Warmwasser kann in Zentralheizungs- oder Heizkesselsystemen, Duschsystemen, industriellen Reinigungsprozessen, Beschichtungsverfahren, Wärmepumpen, Wäschereien oder jeglichen anderen Anwendungen, bei denen Warmwasser benötigt wird, eingesetzt werden.

Bei einer Kopplung des Druckluftsystems mit der Wärmebereitstellung ist auf die unterschiedlichen Prozesszyklen zu achten. So wird beispielsweise Heizungswasser vorrangig in den Wintermonaten benötigt, Druckluft wird in der Regel jedoch ganzjährig bereitgestellt. Solche Unterschiede in der Nutzungszeit können auch in anderen Kopplungen auftreten. Daher ist es notwendig, diese zu ermitteln und Maßnahmen, wie zum Beispiel ein Pufferspeicher oder Sekundarwärmenetze, zu implementieren.

Mitunter kann die Wärme zum Antrieb von Ad- oder Absorbtionskältemaschinen genutzt werden, beispielsweise zur Kühllufterzeugung. Es ist jedoch nicht ratsam, die Drucklufterzeugung vom Wärmebedarf abhängig zu machen, da die Primärenergiekosten zur Erzeugung von Strom für die Druckluft im Verhältnis zu den Primärenergiekosten zur Erzeugung von Heizwärme ca. dreimal höher sind.

Anwendbarkeit

Systeme für die Wärmerückgewinnung sind für die meisten Kompressoren im Markt als Zubehör verfügbar, entweder integriert in die Kompressoreinheit oder als eine externe Lösung. Ein bestehendes Druckluftsystem kann in der Regel leicht und wirtschaftlich nachgerüstet werden. Systeme für die Wärmerückgewinnung sind sowohl für mit Luft als auch mit Wasser gekühlte Kompressoren verfügbar. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass für die zurückgewonnene Wärme auch Wärmeabnehmer bzw. Wärmesenken zur Verfügung stehen.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

In vielen Fällen kann aus einer richtig ausgelegten Anlage zur Abwärmenutzung einer Drucklufterzeugungsanlage thermische Energie in der Größenordnung von ca. 50 - 90 % der eingesetzten elektrischen Antriebsenergie zurückgewonnen und zum Aufheizen von Luft oder Wasser nutzbar gemacht werden.

Die potentiellen Energieeinsparungen sind abhängig vom Druckluftsystem und den zur Verfügung stehenden Wärmesenken, den Betriebsbedingungen und der Nutzung.

Ein Beispiel für die Berechnung der Energieeinsparungen eines mit Öl injizierten Schraubenkompressors wird in Tabelle 3.7-6 gezeigt:

Tabelle 3.7-6: Beispiel von Kosteneinsparungen (überschlägige Betrachtung)

Nennleistung Kompressor	Rückgewinnbare Wärme (ca. 80 % der Nennleistung)	Jährliche Heizenergieeinsparungen bei 4.000 Betriebsstunden/Jahr	Jährliche Kosten-einsparungen 0,47 Euro/l Heizöl (Hu=9,9 kWh/l)
kW	kW	kWh/Jahr	EUR/Jahr
90	72	384.000	18.165

Berechnungsparameter: Nutzungsgrad der Ölheizung = 75 %

Quelle: (145)

Triebkraft für die Umsetzung

Kosteneinsparungen.

Beispiele

Greiner Packaging GmbH produziert und entwickelt Verpackungslösungen für den Food- und Non-Food-Bereich, umfasste 2008 2.935 Mitarbeiter und erzielte einen Jahresumsatz von 376 Mio. €. Druckluft wird hier besonders für die Druckluftzylinder zur Verformung der Kunststoffbehälter im Tiefziehverfahren benötigt. Im Werk Wartberg wurde vor der Sanierung keinerlei Wärme zurückgewonnen. Es wurde ein Wärmetauscher hinzugefügt, mit dessen Hilfe das Heizungswasser erwärmt wurde. Mit der Abwärme der Druckluftkompressoren konnten 590.000 kWh für Heizzwecke eingespart werden. Die Gaskosten für die Heizung konnten in diesem Betrieb um 70 % reduziert werden (158).

Verweisende Informationen

(148) (145) (159) (161) (107)

3.7.4.3.3 Energieeffiziente Motoren

Beschreibung

Siehe Kapitel 3.6.1 in diesem Dokument über die Aktualisierung des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz – Querschnittstechnologien“.

3.7.5 Wartung

Die Wartung und Instandhaltung eines Druckluftsystems ist unverzichtbar, um langfristig eine gleichbleibend hohe Effizienz der Drucklufterzeugung sowie Qualität der Druckluft sicherzustellen. In einem ungewarteten bzw. nicht ausreichend gewarteten Druckluftsystem können sich im Laufe der Zeit erhebliche energetische Verluste entwickeln. Regelmäßig zu wartende Komponenten sind:

- Kompressor,
- Trockner,
- Filter,
- Kühlsystem,
- Kondensatableiter,
- Öl-Wassertrenner,
- Verteilsystem ,
- Druckluft-Werkzeuge/Endverbraucher/Steuerung.

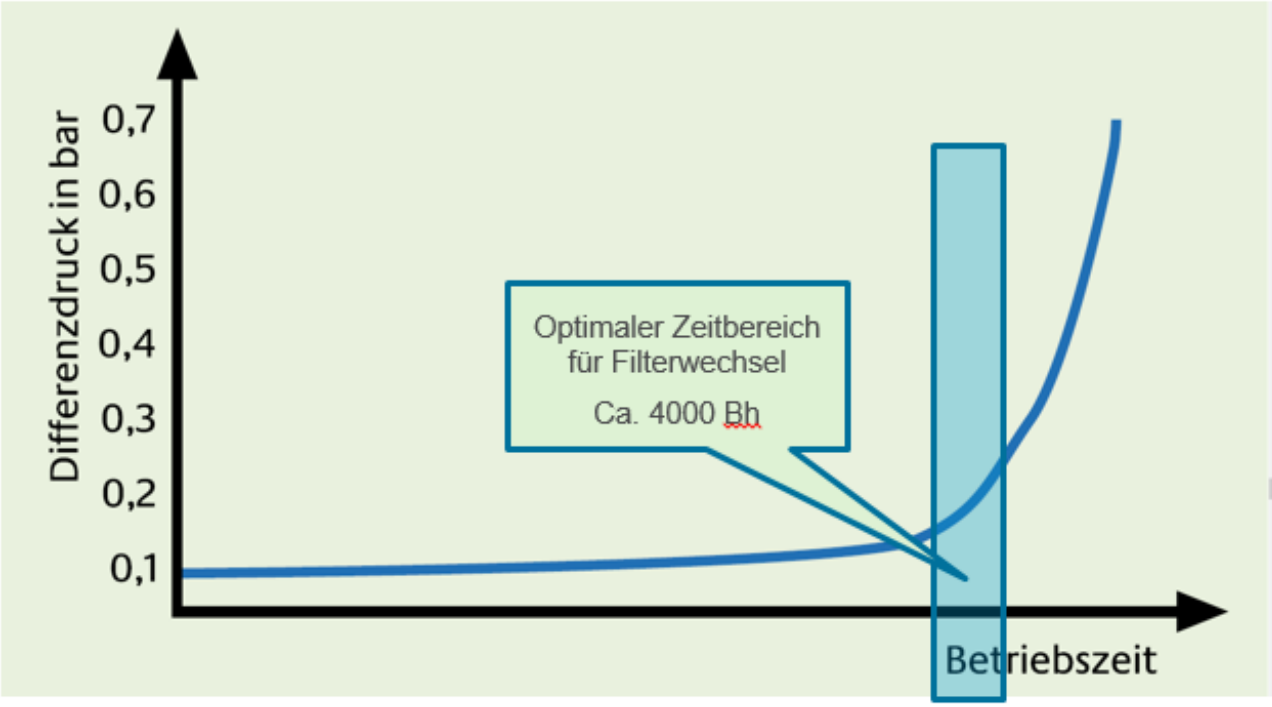
Neue Entwicklungen im Zusammenhang mit der Digitalisierung vieler Industrieprozesse führen zu einer durchgängigen Daten- und Zustandserfassung aller Systemkomponenten. Somit können Fehler und Abweichungen von Betriebsparametern schneller und besser identifiziert werden. Mit diesem Daten- und Informationsaustausch ist eine vorausschauende, zustandsabhängige Wartung möglich.

<u>Beispiel: Wartung von Filtern</u>

Beschreibung

Bis zu einem gewissen Punkt der Sättigung steigt der Differenzdruck eines Filters nur geringfügig an. Wird dieser Punkt überschritten, so steigt der Differenzdruck exponentiell an (siehe Abbildung 3.7-10). Eine Verlängerung des Wartungsintervalls über diesen Punkt hinaus ist somit energetisch aber auch servicetechnisch und zur Absicherung der Druckluftqualität/-reinheit sinnlos.

Abbildung 3.7-10: Anstieg des Druckverlusts über einen Filter während der Nutzungsdauer, ergänzte Darstellung



Quelle: (159)

Erreichter Umweltnutzen

Durch die regelmäßige Wartung der Filter verhindert man einen zu hohen Druckverlust in der Druckluftaufbereitung. Dieser bewirkt einen geringeren Energieeinsatz am Kompressor. Des Weiteren ist die Reinigungswirkung verschmutzter Filter gehemmt, so dass ein Wechsel die Druckluftqualität aufrechterhält.

Medienübergreifende Wirkungen

Entsorgung der Filterpatronen als Abfall.

Betriebsdaten

Das Wartungs- und Wechselintervall einer Filteranlage hängt vom verwendeten System ab. In der Regel spricht man von einem Wechselzyklus von 4.000 Betriebsstunden bei Feinstfiltern und zwischen 500 – 1000 Betriebsstunden bei Aktivkohlefiltern. In der Praxis sind Wartungsintervalle variabel und hängen von der Verschmutzung der Druckluft ab.

Bei hochwertigen Aktivkohle-Adsorbern kann, je nach Hersteller, eine Standzeit von bis zu 10.000 Betriebsstunden möglich sein. Dieser Wert hängt jedoch von der Drucklufteingangstemperatur und dem Ölgehalt ab. Die Standzeit hängt auch vom Druckniveau und dem Volumenstrom ab.

Anwendbarkeit

Ist für alle Druckluftsysteme anwendbar und Stand der Technik.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Ein zu hoher Differenzdruck, durch einen verstopften Filter benötigt mehr Kompressorleistung, um das erforderliche höhere Druckniveau zu erzeugen, und somit mehr Energie. Sollte im anderen Fall das Druckniveau beim Verbraucher nicht gemessen und dementsprechend nachreguliert werden, reduziert die höhere Druckdifferenz das Druckniveau am Verbraucher. Das verminderte Druckniveau

am Verbraucher kann wiederum z. B. die Produktivität von Werkzeugen beeinträchtigen bzw. sogar zum Ausfall von Verbrauchern führen (siehe Kapitel 3.7.1.1).

3.7.6 Schulung der Mitarbeiter

Beschreibung

Sachgemäße Verwendung von Druckluft

Druckluft ist ein energieaufwändiges Medium. Daher sollte der Druckluftverbrauch auf das Notwendige reduziert werden. Diese Erkenntnis muss an die Mitarbeiter weitergetragen werden, damit sie diese bewusst und sparsam nutzen. Druckluft sollte nicht zweckentfremdet werden.

Beispiele für Fehlverhalten von Mitarbeitern sind das Reinigen von Arbeitsflächen mit Druckluft und das Abdichten von Leckagen mithilfe von einfachem Klebeband.

Wirkungsvolle Leckagenmeldung durch Mitarbeiter

Des Weiteren ist es ratsam, den Mitarbeitern die Möglichkeit zu geben, Leckagen einfach und schnell zu markieren und einen dafür Verantwortlichen zu benennen. Dies erleichtert die gezielte und zügige Beseitigung solcher Schwachstellen erheblich.

Betriebsdaten

Eine Schulung von Mitarbeitern zu energierelevanten Themen erfolgt bei Unternehmen, die ein zertifiziertes Energiemanagementsystem betreiben, im Rahmen von vorgeschriebenen Mitarbeiterschulungen (siehe Kapitel 2.1 d ii). Verfügt ein Unternehmen über einen nennenswerten Druckluftbedarf, sollte hierbei zwingend auch auf das Thema effiziente Druckluftnutzung eingegangen werden. Unabhängig davon sollte auch bei Unternehmen ohne EnMS eine regelmäßige Mitarbeiterschulung zu diesem Thema erfolgen. Eine Möglichkeit zur regelmäßigen Schulung ist beispielsweise durch die IHK gegeben (Druckluftspezialist). Alternativ bzw. ergänzend können externe Schulungsangebote zu einer Sensibilisierung und Aktualisierung des Wissensstandes zum Fachthema wirkungsvoll beitragen.

3.8 Pumpensysteme

Einführung

Als Pumpensysteme werden in diesem Merkblatt technische Anlagen zum Transport inkompressibler Fluide (fließfähige Medien) verstanden. Diese Systeme sind in Industrie und Gewerbe weit verbreitet und kommen in sehr unterschiedlichen Ausführungsformen und Größenordnungen in fast allen Branchen zum Einsatz. Zu häufigen Anwendungsaufgaben für Pumpen zählen z. B.

- Förderung flüssiger Rohstoffe und Produkte,
- Umwälzung von flüssigen Wärmeträgern,
- Druckauflastung in hydraulischen Systemen,
- Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser,
- Förderung von Abwasser und Gemischen aus Flüssigkeiten und Feststoffen.

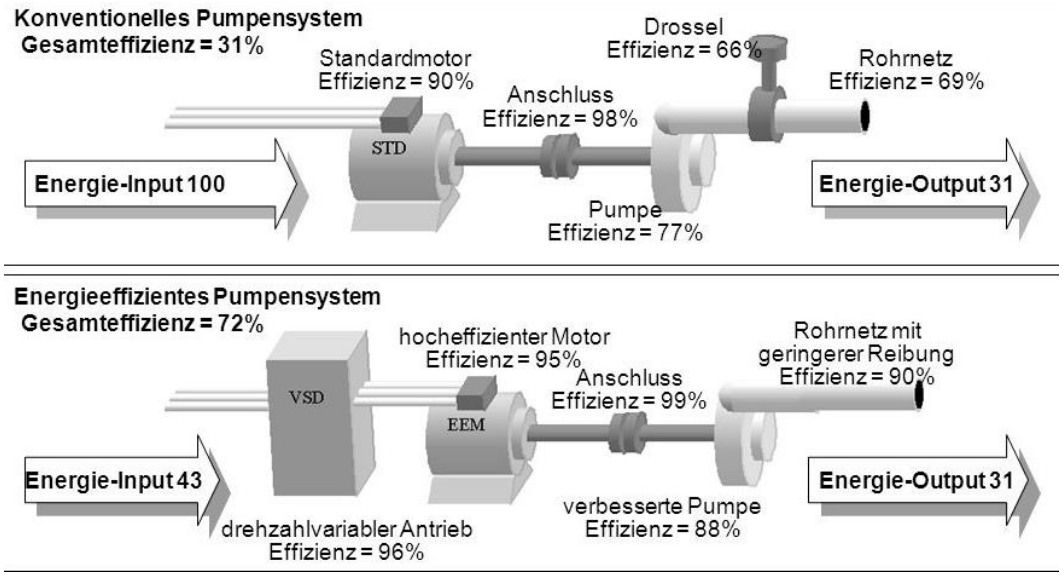
Pumpensysteme beanspruchen über 10 Prozent (168) des weltweiten Strombedarfs. In bestimmten Industrieunternehmen erreicht der Anteil des Verbrauchs der Pumpen am Gesamtenergieverbrauch sogar über 30 Prozent (168). Vorhandene Pumpensysteme bieten ein hohes Potential für Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung. Die höchsten Effizienzsteigerungen werden erreicht, wenn die energieumwandelnden Systeme als Ganzes optimiert werden, statt nur einzelne Systemkomponenten isoliert zu betrachten. Dabei kann durch Maßnahmen, wie die Optimierung bzw. der Austausch einzelner Systemkomponenten sowie die Einbindung einer intelligenten Steuerung und Regelung, der

Gesamtwirkungsgrad eines bestehenden Pumpensystems auf über 70 Prozent und somit um mehr als 40 Prozent-Punkte gesteigert werden (siehe Abbildung 3.8-1) (169).

Maßnahmen zur energetischen Optimierung sowohl im Bestand als auch bei der Planung neuer Anlagen müssen jedoch für jedes Pumpensystem individuell entwickelt und wirtschaftlich bewertet werden. Eine eindeutige Beschreibung der besten verfügbaren Technik im Sinne von technischen Merkmalen für alle Systemkomponenten kann folglich nicht allgemeingültig für alle Anwendungsbereiche formuliert werden.

Die Energieeffizienz eines Pumpensystems wird durch die Qualität der Planung, der Herstellungsprozesse der Komponenten, der Montageprozesse und der Betriebsführung, einschließlich Wartung und Instandhaltung, beeinflusst. Es ist sinnvoll, die letztgenannten Maßnahmen in ein Energiemanagementsystem einzubetten, in welchem eine regelmäßige Überprüfung des Systems durch eine gute Datenbasis unterstützt wird (siehe Kapitele 2.1 und 2.15.1 des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“).

Abbildung 3.8-1: Gesamteffizienz von konventionellen und energieeffizienten Pumpensystemen



STD Standard Drive (deutsch: Standardmotor)
VSD Variable Speed Drive (deutsch: drehzahlvariabler Antrieb)
EEM Energy Efficient Motor (deutsch: hocheffizienter Motor)
Quelle: (169)

<u>Technisches Regelwerk</u>

In der Norm DIN EN ISO 17769:2012-11 – Teil 1 „Flüssigkeitspumpen“ (170) und Teil 2 „Pumpensysteme“ (171) – werden allgemeine Begriffe, Definitionen, Größen, Formelzeichen und Einheiten

- zur Verbesserung und Vereinheitlichung der Verständigung und der Präzisierung bei der Beschreibung von Pumpen und deren Auslegung sowie
- im Hinblick auf die Förderung von Flüssigkeiten durch Kreisel- und Verdrängungspumpen und zugehörige Installation

definiert.

3.8.1 Analyse der Förderaufgabe bei geplanten und vorhandenen Pumpensystemen Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über Erreichten Umweltnutzen, Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und Verweisende Informationen für ENE-Techniken für Pumpensysteme werden in Kapitel 3.8.8 dargestellt.)

Zur Erkennung der anwendbaren Maßnahmen zur Energieeinsparung und Optimierung eines Pumpensystems ist die Analyse der Förderaufgabe und bei bereits vorhandenen Pumpensystemen außerdem die Erstellung einer Bestandsaufnahme und Bewertung der Pumpen in der Anlage notwendig.

Wesentliche Kriterien für die Analyse einer Förderaufgabe sind typischerweise (Aufzählung nicht abschließend):

- zu fördernder maximaler Volumenstrom,
- zu überwindende geodätische Höhe bzw. Druckdifferenz (maximaler Systemdruck ausgangsseitig/minimaler Systemdruck eingangsseitig),
- zu überwindende Transportentfernung (Länge der Rohrleitungen),
- Eigenschaften des zu fördernden Mediums (z. B. Scherempfindlichkeit, Viskosität, Abrasivität bei Feststoffanteilen, Temperaturbereich, chemische Aggressivität, Gefahrstoffeigenschaften),
- Lastprofil (konstant/variabel), Anforderungen an Regelbarkeit,
- Betriebsstundenzahl,
- Dichtheits- und Hygieneanforderungen,
- Verfügbarkeitsanforderungen,
- Aufstellbereich/Zugänglichkeit von Systemkomponenten für Wartung/Instandhaltung.

Wegen der oft komplexen, durch viele Einzelkriterien bestimmten Förderaufgaben ist ebenso wie zur Durchführung einer Bestandserfassung und Bewertung vorhandener Pumpensysteme ein bestimmtes Niveau an technischer Sachkenntnis erforderlich.

Der unterstützende Einsatz von Software für die Berechnung der Druckverluste in einem Rohrnetzsystem, die darauf aufbauende Auslegung/Planung des Rohrnetzes und seiner Komponenten, die Dokumentation sowie die Erfassung und Auswertung von Betriebsdaten ist Stand der Technik. Hersteller technischer Komponenten für Pumpensysteme können in der Regel alle planungs- und bewertungsrelevanten Daten, z. B. Kennlinien, Verlustbeiwerte etc. in elektronischer Form als Planungshilfe bereitstellen. Damit reduziert sich bei Anwendung professioneller Planungs- und Bewertungsinstrumente die Wahrscheinlichkeit von fehlerhaften Berechnungen und entsprechend fehlerhaften Anlagendimensionierungen.

Die Bestandsaufnahme vorhandener Systeme muss durch ein Bewertungsteam entweder von der internen technischen Belegschaft oder von Dritten durchgeführt werden. Es gilt vorab, die Befugnisse und Aufgaben des Bewertungsteams zu definieren und diese - in Absprache mit dem Eigentümer der Anlage - in einem Aktionsplan festzuhalten.

Abhängig von den Anforderungen muss nach der Norm DIN EN ISO 14414 (172) eine oder mehrere Bewertungsstufen festgelegt werden (siehe Tabelle 3.8-1). In diesen ist definiert, welche Maßnahmen erforderlich sind, um eine fachgerechte Bewertung der Energieeffizienz des Pumpensystems durchführen zu können.

Tabelle 3.8-1: Übersicht über die Bewertungsstufen

Maßnahmen	Bewertungsstufe 1	Bewertungsstufe 2	Bewertungsstufe 3
Vorauswahlmöglichkeiten	Erforderlich	Erforderlich	Erforderlich
Ortsbesichtigung	Optional	Erforderlich	Erforderlich
Ermittlung der Systeme mit potentiellen Einsparmöglichkeiten	Erforderlich	Erforderlich	Erforderlich
Beurteilung von Systemen mit potentiellen Einsparmöglichkeiten	Optional	Erforderlich	Erforderlich
Messung von Betriebsdaten für einen charakteristischen einzelnen Arbeitspunkt	Optional	Erforderlich	Erforderlich
Messung/Messwerterfassung von Systemen mit veränderlichen Betriebsbedingungen	Nicht zutreffend	Nicht zutreffend	Erforderlich
Anmerkung Bewertungsstufe 1 ist eine qualitative Überprüfung mit möglichen quantitativen Elementen, die zur Bestimmung des Potentials signifikanter Energieeinsparungen auf der Grundlage weiterer Bewertungen und zur Identifizierung der spezifischen Systeme vorgesehen ist, die eine besondere Aufmerksamkeit verdient. Bewertungsstufe 2 ist eine quantitative Überprüfung, die zur Bestimmung des Energieverbrauchs und der potentiellen Einsparungen auf der Grundlage einer Messung einer einzelnen stationären Betriebsbedingung vorgesehen ist, die eine einzelne Messreihe erfordert. Bewertungsstufe 3 ist eine quantitative Überprüfung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Systemanforderungen, die mittels Überwachung des Systems über eine Zeitspanne erfolgt, die ausreichend lang ist, um die verschiedenen Betriebsbedingungen zu erfassen, die ihre Messreihe erfordern.			

Quelle: (172)

Die daraus erforderliche Dokumentation und Messung der folgenden Elemente ist für alle Pumpensysteme grundsätzlich wünschenswert und für große Systeme über 100 kW (172) zwingend erforderlich.

Relevante Daten für die jeweiligen Bewertungsstufen werden nach DIN EN ISO 14414 vorgeschrieben und umfassen u. a. für die Bestandsaufnahme des Pumpensystems (172):

- Erstellung einer Liste der Pumpen mit Beschreibung (Hersteller, Typ);
- Erfassung der technischen Daten (z. B. Größe/Nennweite, Anschlussleistung, max. Förderhöhe und Volumenstrom);
- Identifizierung der Pumpenanwendung (einschließlich Fördermedium und versorgte Verbraucher);
- Ermittlung der Daten des physikalischen Standortes der Pumpen;
- Erstellung des Bedarfsprofils (Betriebszeiten der Pumpe sowie geschätzte Schwankungen während des Tages/der Woche);
- Erfassung ineffizienter Einrichtungen durch Befragung des Instandhaltungs- und Betriebspersonals sowie durch Überprüfung des Instandhaltungsprotokolls.

Technisches Regelwerk

- In der Norm DIN EN ISO 14414:2017-07 (172) „Energetische Bewertung von Pumpensystemen“ werden die Anforderungen an die Durchführung und Aufzeichnung energetischer Bewertungen von Pumpensystemen vom Energieeintrag bis hin zur damit geleisteten Arbeit beschrieben.

- In dem VDMA-Einheitsblatt 24262:2011-03 (173) „Energieeffiziente Pumpensysteme - Leitfaden zur Erkennung und Bewertung vorhandener Schwachstellen und korrekter Erfassung des Energieeinsparpotentials“ werden

  1. der Begriff Pumpensystem definiert,
  2. das Beratungskonzept und die mit diesem Konzept verbundenen Erwartungen an den Energieberater grundsätzlich erläutert,
  3. die wichtigsten Regeln für die Beratungsdurchführung festgehalten und
  4. eine ausführliche Beschreibung der beiden Beratungsmodule „Initialberatung“ und „vertiefende Energieanalyse“ gegeben.

3.8.2 Rohrleitungssystem

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Pumpensysteme werden in Kapitel 3.8.8 dargestellt.)

Aus der Festlegung des technischen Prozesses leitet sich ein Bedarf an verfahrenstechnischen Apparaten und Behältern ab. Durch die geforderten Drücke und Volumenströme der Systemkomponenten und die räumliche Aufstellung derselben ergibt sich eine Förderaufgabe (vgl. Pkt. 3.8.1 und (174)). Für die Feinplanung der Leitungsnetze ist es sinnvoll, jeweils Anlagenabschnitte zwischen zwei Apparaten oder Behältern als Einzelsystem zu betrachten, um die von außen aufgegebene Förderaufgabe an das System umzusetzen. Dabei sind Rohrleitungsdurchmesser und Regelstrategie festzulegen.

Die Auswahl geeigneter Rohrführungen und Rohrquerschnitte ist von erheblicher Bedeutung für die Energieeffizienz des Systems. Diese Parameter beeinflussen den Druckverlust einer Anlage, die als

- Einzelverluste (Widerstand beim Durchströmen von Formstücken, wie Rohrkrümmern, Abzweigungen und Einbauten, wie Armaturen, Flanschen oder Ventilen) und
- streckenabhängige Verluste (auftretende Reibung zwischen dem strömenden Fluid und der Rohrinnenwand)

auftreten.

Die Energieverluste durch Reibung sind wiederum abhängig vom Strömungsverhalten und Eigenschaften des Fluides sowie der Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit) der Rohrinnenwand. Die Summe der Einzelverluste der jeweiligen Rohrabschnitte sowie der aufzubringende Betriebsdruck ergeben den gesamten Druck- bzw. Energieverlust und folglich die von der Pumpe zu erbringende Förderleistung (175).

Demnach gilt es, zur Reduzierung des Energieaufwandes nachfolgende Maßnahmen zu prüfen (175) (176):

- Minimierung von Rohrlängen, Beseitigung unnötiger Rohrarmaturen oder Drosselventile,
- Vermeidung von Querschnittsänderungen, Vereinigung und Verzweigungen (z. B. T-Stücken) sowie überflüssigen Biegungen,
- Vergrößerung des Rohrquerschnitts,
- Minimierung der Oberflächenrauheit der Rohrinnenwand.

Dabei kann i. d. R. bereits durch einfache Maßnahmen, wie dem Austausch von Ventilen und Klappen, die Gesamteffizienz des Pumpensystems erheblich gesteigert und dadurch Einsparungen von 10 Prozent, bei Einzelmaßnahmen sogar knapp 30 Prozent, erzielt werden (177).

Mit einer softwarebasierten werden sämtliche im Rohrleitungssystem auftretenden Druckverluste erfasst, die als Rohrnetzkennlinie dargestellt werden. Mit dem daraus ermittelten Massenstrom kann der hydraulische Abgleich am Leitungsnetz vorgenommen werden.

Hydraulischer Abgleich

Ein hydraulischer Abgleich ist bei vermaschten Rohrnetzsystemen fast immer sinnvoll. Dadurch werden Mängel, wie z. B. ungleichmäßige bzw. nicht bestimmungsgemäße Wärme-/Kälteverteilung bzw. Volumenströme am Verbrauchsort, zu hohe oder zu geringe Pumpenleistung, falsch angepasste Regelkurven sowie übermäßige Geräuschbildung, vermieden.

Beispielsweise wird bei Warmwasserheizungen durch den hydraulischen Abgleich erreicht, dass alle Heizkörper jederzeit mit der Menge an Heizwasser versorgt werden können, die eine der Auslegung entsprechende Wärmeleistungsabgabe in Verbindung mit der vorgesehenen Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt ermöglicht. Alle Komponenten, wie Pumpen, Rohre und Heizkörper, werden hierbei optimal aufeinander abgestimmt. Das gesamte Effizienzpotential der Heizungsanlage wird ausgeschöpft und die Wärme genau dorthin transportiert, wo sie gebraucht wird.

Wird dagegen kein hydraulischer Abgleich bei einem Leitungsnetz vorgenommen, kann es dazu führen, dass im Strömungskreis mit dem geringsten Widerstand ein erhöhter Durchfluss erfolgt, sich in diesem eine erhöhte Rücklauftemperatur einstellt und andere Teile des Leitungsnetzes nicht ausreichend mit Warmwasser versorgt werden.

Übersteigt der Heizrücklauf die gewünschte Rücklauftemperatur, entstehen unnötige thermische Verluste im Leitungsnetz.

Technische Regelwerke

Für bestimmte, besonders häufige technische Anwendungen, beispielsweise bei Warmwasserheizungen, aber auch bei Kühlsystemen und Trinkwassernetzen, existieren technische Regelwerke mit Vorschriften zum hydraulischen Abgleich.

Einen umfassenden Überblick enthält das VDMA-Einheitsblatt 24199 (178). Darin wird weiterhin auf die folgenden Richtlinien verwiesen:

- DIN EN 14336 (179): Gemäß Absatz 7 müssen die Wasserdurchflussmengen hydraulisch abgeglichen werden und deren Planungsunterlagen entsprechen.
- DIN V 4701-10 (180).
- DIN 18380 (181).

3.8.3 Analyse des Pumpensystems

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Pumpensysteme werden in Kapitel 3.8.8 dargestellt.)

Bei der Analyse des Pumpensystems werden die in der Bestandsaufnahme ermittelten Kenndaten der einzelnen Pumpen als Pumpenkennlinie und die Gesamtdruckverluste des Rohrleitungssystems zzgl. der Widerstände der Regelarmaturen (u. a. für den hydraulischen Abgleich) als Anlagenkennlinie dargestellt und daraus abgeleitet, ob die installierten Pumpen im (in ausreichender Nähe zum) optimalen Betriebspunkt arbeiten.

Anlagenkennlinie

Mit einem Pumpensystem wird einer Flüssigkeit Energie zugeführt, um diese entweder auf eine bestimmte Höhe zu transportieren, deren Druck und/oder Fließgeschwindigkeit zu erhöhen. Die

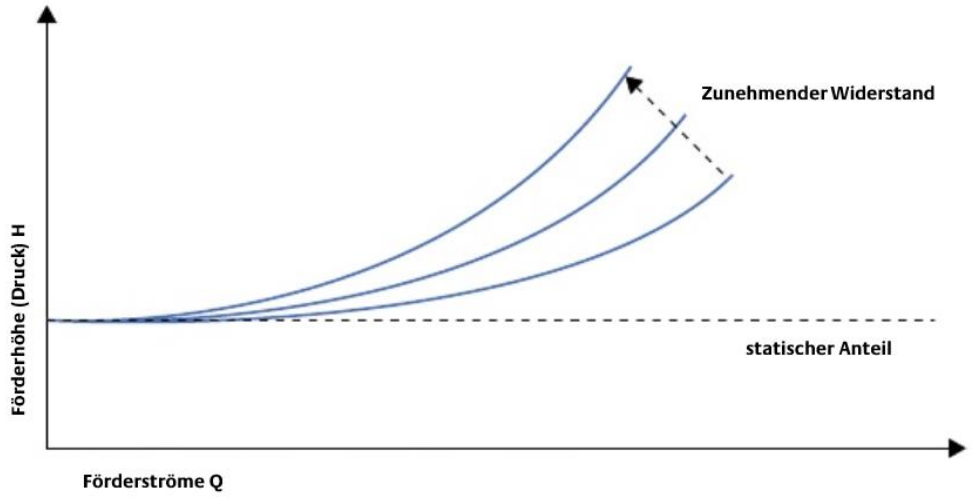
Druckerhöhung durch die Pumpe muss folglich bestehende Höhen- oder Druckdifferenzen (statischer Anteil) und zusätzlich strömungsbedingte Druckverluste (dy-namischer Anteil) bis zum Zielpunkt der Förderung überwinden:

- Der statische Anteil ist vom Förderstrom unabhängig und beschreibt den geodätischen Höhenunterschied und/ oder die Druckdifferenz zwischen Ein- und Austrittspunkt des betrachteten Systems.
- Der dynamische Anteil steigt mit wachsendem Förderstrom quadratisch an und wird durch folgende Druckverluste beeinflusst:
  - Einzeldruckverluste (Widerstand beim Durchströmen von Formstücken wie Rohrkrümmern, Abzweigungen und Einbauten wie Armaturen, Flanschen oder Ventilen)
  - streckenabhängige Druckverluste (auftretende Reibung zwischen dem strö-menden Fluid und der Rohrinnenwand)

Die Druckverluste durch Reibung sind abhängig vom Strömungsverhalten und den Ei-genschaften der transportierten Flüssigkeit sowie der Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit) der Rohrinnenwand.

Die Anlagenkennlinie beschreibt demnach den Zusammenhang zwischen der erforderlichen Förderhöhe und dem Förderstrom (siehe Abbildung 3.8-2).

Abbildung 3.8-2: Anlagenkennlinie im Q/H Diagramm



Quelle: (182)

Form und Lage der Anlagenkennlinie ergeben sich folglich aus den folgenden Bestandteilen für die Förderhöhe der Anlage:

- *Geodätische Förderhöhe* ist der Höhenunterschied zwischen saug- und druckseitigem Flüssigkeitsspiegel. Mündet die Druckleitung oberhalb des Flüssigkeitsspiegels, wird auf die Mitte des Ausflussquerschnittes bezogen.
- *Manometrische Druckhöhendifferenz* ist die Differenz der über dem saug- und druckseitigen Flüssigkeitsspiegel liegenden Druckhöhen bei mindestens einem geschlossenen Behälter.
- *Differenz der Geschwindigkeitshöhe* ist die Differenz der Geschwindigkeiten in den Behältern, kann in der Praxis vernachlässig werden.
- *Druckhöhenverluste* sind die Summen der Strömungswiderstände in Rohrleitungen, Armaturen, Formstücken usw. in der Saug- und Druckleitung sowie der Ein- und Auslaufverluste, die in der Praxis als Druckverluste in der Anlage bezeichnet werden.

Die Anlagenkennlinie hängt dabei von der Art des betreffenden Systems ab. Es wird zwischen geschlossenen und offenen Systemen unterschieden.

- Offene Systeme haben meist die Aufgabe der Förderung (stoffstromorientiert) zu einem bestimmten Zielpunkt, wie z. B. bei Wasserversorgungsanlagen, Bewässerungssystemen und industriellen Prozessanlagen. In solchen Systemen muss die Pumpe die statische Förderhöhe bewältigen und die Reibungsverluste in Rohren und Bauteilen überwinden. Die offenen Systeme werden in solche mit positiver bzw. negativer geodätischer Förderhöhe unterschieden.
- Geschlossene Systeme sind in den meisten Fällen Kreislauf- bzw. Umwälzsysteme, in denen das umlaufende Medium als Träger fungiert, meist als Energieträger, wie beispielsweise in Heizsystemen oder Klimaanlagen. In diesen Fällen muss die Pumpe ausschließlich die dynamischen Verluste im System überwinden.

Pumpenkennlinie

Anhand der Pumpenkennlinie wird ersichtlich, welche Volumenströme die Pumpe bei verschiedenen zu überwindenden Druckdifferenzen fördern kann.

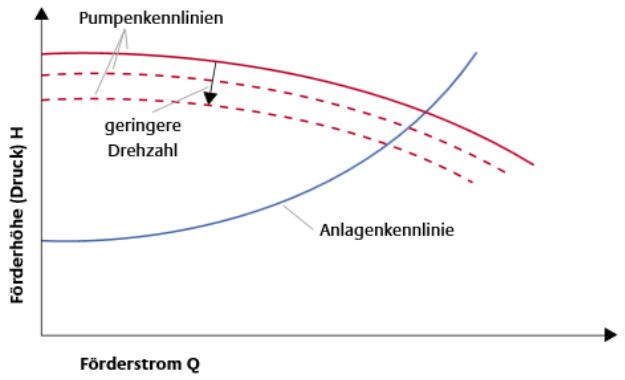
Bei Verdrängerpumpen hängt der Förderstrom hauptsächlich von der Drehzahl ab. Er nimmt bei steigendem Gegendruck nur um so viel ab, wie sich die Drehzahl des Pumpenantriebs aufgrund des höheren Drehmoments reduziert (183).

Bei Strömungspumpen hingegen ist der Förderstrom neben der Drehzahl auch stark von der Förderhöhe abhängig. Dabei sind die in der Pumpe erzeugte Druckerhöhung und der durch die Pumpe fließende Förderstrom voneinander abhängig. Die maximale Förderhöhe (auch Nullförderhöhe) entsteht, wenn die Pumpe gegen ein geschlossenes Ventil läuft. In diesem Punkt entsteht der maximale Pumpendruck. Durch Öffnen des Ventils steigt der Volumenstrom bei abnehmendem Druck (184).

Betriebspunkt (Pumpen- und Anlagenkennlinie)

Der Betriebspunkt der Pumpe ergibt sich, wie in der nachfolgenden Abbildung 3.8-3 dargestellt, im Schnittpunkt der Anlagen- und der Pumpenkennlinie. An diesem Punkt ist ein Gleichgewicht zwischen dem Leistungsangebot der Pumpe und dem Leistungsbedarf des Rohrnetzes gegeben.

Abbildung 3.8-3: Pumpenkennlinie einer Kreiselpumpe



Quelle: (183)

Bei der Systemanalyse wird der Leistungsbedarf der Pumpen über die zuvor beschriebenen Anlagen- und Pumpenkennlinie anhand verschiedener Mess- und Berechnungsverfahren bestimmt. Zur Ermittlung können u. a. folgende Messmethoden angewendet werden (176):

Bestimmung des Energiebedarfs (Messung über elektrische Leistungsaufnahme)

Die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme der Antriebsmaschine kann durch die Installation stationärer oder mobiler Messtechnik erfolgen.

Bestimmung des Förderstroms (Durchflussmenge)

Der Förderstrom kann entweder über im System installierte Messinstrumente sowie Ultraschall-, Schwebkörper- oder Blenddurchflussmesser bestimmt werden.

Bestimmung der Gesamtförderhöhe

Die Gesamtförderhöhe kann durch die Messung der Druckdifferenz über die Pumpe bestimmt werden.

Durch Vergleich mit den durch das Design der Pumpe bestimmten nominalen Leistungsdaten (Herstellerangaben, z. B. auf dem Typenschild erkennbar) kann der tatsächliche Wirkungsgrad im aktuellen Betriebspunkt und somit die Effizienz der Pumpe bestimmt werden. Wird eine geringe Effizienz erkannt, d. h. eine große negative Abweichung zu den vom Hersteller gelieferten Kenndaten, sind die einzelnen Systemkomponenten zu bewerten und entsprechende energiebezogene Optimierungen durchzuführen.

3.8.4 Auswahl der Pumpe

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über Erreichten Umweltnutzen, Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und Verweisende Informationen für ENE-Techniken für Pumpensysteme werden in Kapitel 3.8.8 dargestellt.)

Die Auswahl von Pumpentyp bzw. -bauart, -größe bzw. -leistung sowie die Regelungsart sollten durch die exakte Berechnung der benötigten Förderhöhe und des Volumenstroms auf Grundlage der Analyse des Pumpensystems erfolgen. Werden in vorhandenen Systemen überdimensionierte Pumpen erkannt, ist eine Anpassung der Leistung an den tatsächlichen Bedarf zu prüfen. Alternativ kommen entweder ein kompletter Austausch der Pumpe durch ein optimal dimensioniertes Aggregat oder eine technische Nachrüstung der vorhandenen Pumpe mit verschiedenen möglichen Methoden (siehe Kapitel 3.8.6), wie zum Beispiel durch die Verwendung von variablen Drehzahlregelungen, in Betracht. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass bei Pumpenaustausch durch den Einsatz von effizienten Pumpen, die genau auf den Förderbedarf ausgelegt werden, Energieeffizienzsteigerungen von bis zu 30 Prozent erzielt werden. (177).

Dieses Kapitel beschreibt zusammenfassend das methodische Vorgehen, für ein neu zu planendes System oder für einen Pumpenaustausch die geeignete Pumpe auszuwählen.

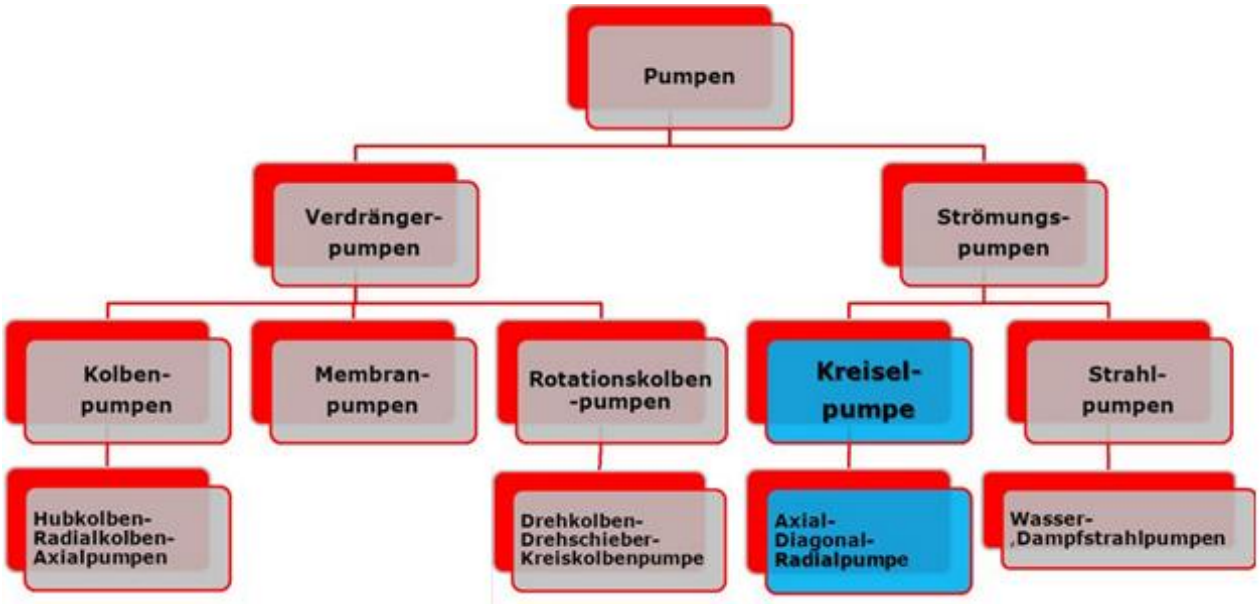
Pumpen werden entsprechend ihres Funktionsprinzips, die Antriebsenergie an die Flüssigkeit zu übertragen und diese in eine gerichtete Bewegung zu versetzen, in zwei Hauptgruppen eingeteilt:

- Strömungspumpen (in der technischen Praxis häufiger als Kreiselpumpen bezeichnet) und
- Verdrängerpumpen.

Die beiden Hauptgruppen unterschieden sich wiederum nach deren technischen Ausführung und können weiter untergliedert werden. Abbildung 3.8-4 zeigt eine vereinfachte Übersicht über die Klassifizierung der am häufigsten im industriellen Bereich eingesetzten Pumpentypen, sie bildet jedoch nicht die Gesamtheit aller am Markt verfügbaren Typen ab.

Für hohe Förder- bzw. Umwälzleistungen mit entsprechend hohem Bedarf an Antriebsenergie werden im industriellen Anwendungsbereich vor allem Kreisel- und Verdrängerpumpen eingesetzt, deshalb werden nachfolgend einige wichtige Auslegungsmerkmale für diese Bauformen beschrieben.

Abbildung 3.8-4: Klassifizierung von Strömungs- und Verdrängerpumpen



Quelle: (185)

Kreiselpumpe

Kreiselpumpen arbeiten auf der Grundlage von Laufrädern, die innerhalb der Flüssigkeit rotieren, um auf die Flüssigkeit eine Kraft auszuüben und diese entsprechend zu beschleunigen. Hauptmerkmal dieser Pumpen ist ein durchgängiger freier Strömungsquerschnitt. Deshalb können diese Pumpen Flüssigkeiten ohne zusätzliche Systemausrüstungen nicht selbst ansaugen. Wesentliche Vorteile von Kreiselpumpen sind die einfache und kompakte Bauweise, das stetige Förderverhalten und die relativ hohe Drehzahl, die einen Direktantrieb durch einen Norm-Elektromotor gestattet. Die wichtigsten Einsatzbereiche von Kreiselpumpen sind der Wasser- bzw. Abwasserbereich, die chemische Industrie sowie Raffinerieanwendungen (186).

Die Einteilung der Kreiselpumpen erfolgt nach mehreren Kriterien. Dabei spielen Laufradform, Antrieb, Gehäuseaufbau, Stufenzahl und das zu befördernde Medium eine Rolle. Die Laufradform (radial, diagonal, axial) hängt von der spezifischen Drehzahl, die die Förderhöhe und die Fördermenge miteinander in Beziehung setzt, ab. Je nach geforderter Förderhöhe bzw. -menge werden ein- oder mehrstufige Pumpensysteme verwendet.

Radialpumpe (Laufradtyp)

Bei der Radialpumpe tritt das Fördermedium radial (also senkrecht zur Pumpenwelle) aus dem Laufrad aus. Im Gegensatz zu Axialpumpen wird durch die Bauart des Laufrades eine höhere Zentrifugalkraft eingebracht und dadurch ein hoher Förderdruck ermöglicht, allerdings bei kleineren Volumenströmen. Diese Pumpenart ist für die Förderung von dickflüssigen Medien besonders geeignet und findet daher beispielweise in der erdölverarbeitenden Industrie zum Erdöltransport Anwendung (186).

Axialpumpe (Gehäusetyp)

Bei der Axialpumpe wird das Fluid mit einer Drehbewegung axial, das heißt parallel zur Pumpenwelle gefördert. Sie bestehen aus einem rohrförmigen Pumpengehäuse, in welchem ein Propeller ähnliches Laufrad rotiert. Über einen Rohrbogen wird die Flüssigkeit durch den Pumpenläufer spiralförmig transportiert. Anwendung finden diese Pumpen bevorzugt bei Förderaufgaben für große Volumenströme, beispielsweise in Wasserwerken, in der Landwirtschaft oder in Schwimmbädern (186).

Diagonalpumpe

Die Diagonalkreiselpumpe fördert das fluide Medium schräg zur Laufradachse. Durch Anpassung der Bauweise der Laufräder kann sie das gesamte Spektrum zwischen axialer und radialer Förderung des Fluids abdecken.

Um Kreiselpumpen für eine Vielzahl von Anwendungen auslegen zu können und vor allem eine zuverlässige, energieeffiziente und wirtschaftliche Förderung zu gewährleisten, gelten verschiedene internationale Normen.

- Die Norm EN 733 (187) gilt für Kreiselpumpen mit axialem Saugstutzen, die auch als Wassernormpumpen mit einem Nenndruck (PN) von 10 bar bekannt sind. Diese legen

  - Leistungsraster und
  - Hauptabmessungen

  so fest, dass ein Austausch gegen „Normpumpen“ verschiedener Fabrikate ohne Änderung an Rohrleitung und Grundplatte möglich ist.
- Die Norm DIN EN ISO 2858:2011-12 (188) gilt für Kreiselpumpen, die auch als Chemienormpumpen mit einem Nenndruck (PN) von 16 bar bekannt sind.

Verdrängerpumpe

Verdrängerpumpen fördern das Medium in einem in sich geschlossenen Volumen. Dabei wird durch Trennelemente, wie Ventile, Klappen oder Dichtungen, der Zeitpunkt des Ein- und Austritts des Fördermediums so gesteuert, dass durch das wechselweise Ansaugen und Verdrängen ein Förderstrom erzeugt wird.

Es wird zwischen fester (Konstantpumpe) und einstellbarer Volumenverdrängung (Verstellpumpe) unterschieden. Je nach Bewegung gibt es Konstruktionen mit oszillierenden oder rotierenden Verdrängungskörpern. Die oszillierende Bewegung kann wiederum geradlinig wie bei der Hubkolben- sowie Membranpumpe oder bogenförmig (z. B. Flügelpumpe) erfolgen. Die Steuerung des Rückflusses des Mediums in die Saug- oder Druckleitung erfolgt dabei durch selbstgesteuerte Rückschlagventile oder -klappen. Bei den rotierenden Verdrängerpumpen (z. B. Dreh- oder Kreiselkolbenpumpe) dienen wiederum Spaltdichtungen, die sich mit der Drehbewegung der Verdrängerkörper verändern, als Trennelement.

Typische Anwendungsgebiete von Verdrängerpumpen im industriellen Bereich sind Anlagen mit Bedarf an Druckwasser und -öl (Presspumpe) in der chemischen Industrie (z. B. Dosierpumpe) und in kleineren bis mittleren Industrieanlagen (189).

- In der Norm DIN EN 14847 (190) „Rotierende Verdrängerpumpen – Technische Anforderungen“ werden die technischen Anforderungen (ausgenommen Prüfung) für rotierende Verdrängerpumpen und –pumpenaggregate festgelegt.
- In der Norm DIN EN 14343 (191) „Rotierende Verdrängerpumpen - Leistungsprüfung zur Abnahme“ werden die Auswahl von Prüfungen, die eine zufriedenstellende Verfügbarkeit und Leistung von oszillierenden sowie rotierenden Verdrängerpumpen sicherstellen, beschrieben.

Charakteristiken von Kreisel- und Verdrängerpumpen

Einer großen Vielfalt der Aufgabenbereiche für Pumpen steht eine große Vielfalt von Bauformen und Leistungsgrößen gegenüber, so dass dem Auswahlprozess für die am besten geeignete technische Lösung und Dimensionierung eine große Bedeutung zukommt. Dabei spielt das Kriterium der Energieeffizienz eine wesentliche Rolle, ist jedoch nicht allein entscheidend.

In der nachfolgenden Tabelle 3.8-2 ist die Eignung von Kreiselpumpen und verschiedener Verdrängerpumpen in Bezug auf einige technisch wichtige Auswahlkriterien dargestellt. Diese Darstellung deckt nicht das gesamte Kriterien- und Bauformenspektrum ab, verdeutlicht aber die

Notwendigkeit eines sorgfältigen und dokumentierten Planungsprozesses, um die besten verfügbaren Techniken für eine Anwendungsaufgabe zu identifizieren:

Tabelle 3.8-2: Eignungsbereiche gebräuchlicher Pumpentypen

	Kreiselpumpe	Verdrängerpumpe			
Auswahlkriterium		**Drehkolben-pumpe**	**Kreiskolben-pumpe**	**Zahnrad-pumpe**	**Schlauch-pumpe**
Niedrigviskose Medien	✓	✓	✓	✓	✓
Hochviskose Medien	✗	✓	✓	✓	✓
Niedrige Pulsation und Vibration	✓	✓	✗	✓	✗
Verschleiß & Ersatzteilhaltung	✓	✓	✓	✗	✗
Abmessungen	✓	✓	✓	✓	✓
Selbstansaugend	✗	✓	✓	✓	✓
Trockenlaufempfindlichkeit	✗	✓	✓	✓	✓
Förderdruck (über 16 bar)	✗	✗	✓	✓	✗
Drehrichtungsunabhängig	✗	✓	✓	✓	✓
Investitionskosten	✓	✗	✗	✓	✓

Quelle: (192), leicht bearbeitet

Die Anwendbarkeit ist für Kreisel- und Verdrängerpumpen sehr verschieden und muss für den jeweiligen Einsatzbereich, beispielsweise als

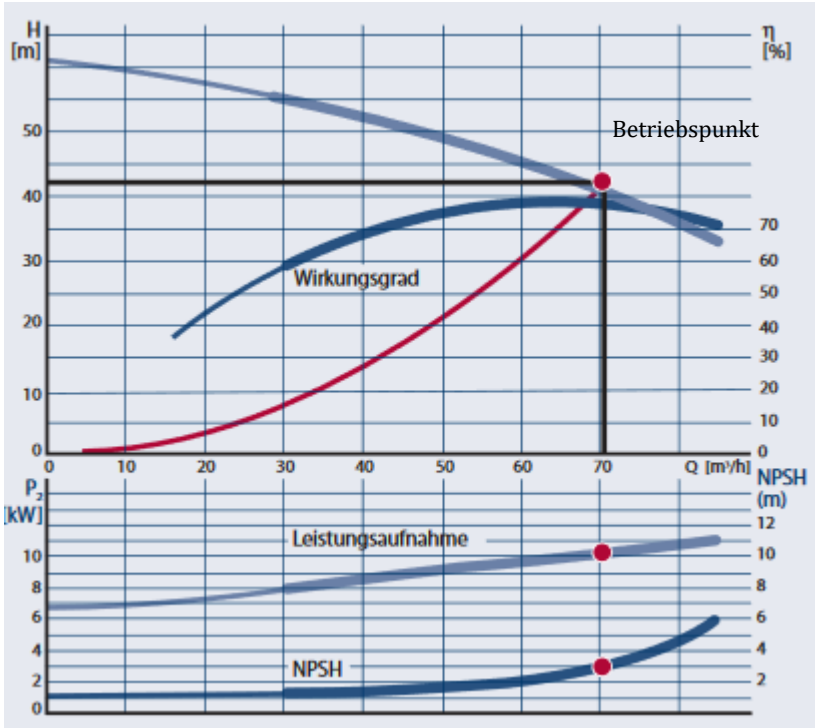
- Prozesspumpe,
- Abwasserpumpe,
- Heizungspumpe,
- Trinkwasserpumpe sowie
- Eintauch- oder Bohrlochpumpe

im Einzelnen geprüft werden.

Eine eindeutige Zuordnung einzelner Pumpentypen und -bauarten zu speziellen Anwendungsaufgaben ist auf Grund der oben beschriebenen Vielfalt und Komplexität der Anwendungsfälle nicht möglich. Grundsätzlich soll jedoch die Auswahl der Pumpe so erfolgen, dass man damit einen Betriebspunkt wählt, der so nah wie möglich am Punkt der besten Effizienz liegt.

Dieses Grundprinzip wird im Folgenden am Beispiel von Kreiselpumpen verdeutlicht (siehe Abbildung 3.8-5).

Abbildung 3.8-5: Typische Kennlinien einer Kreiselpumpe. Förderhöhe, Leistungsaufnahme, Wirkungsgrad und NPSH (Haltedruckhöhe) werden als Funktion des Förderstroms dargestellt



Quelle: (193)

Wie Abbildung 3.8-5 zeigt, weist jede Kreiselpumpe einen Punkt der Wirkungsgradkurve als Maximalpunkt aus. Dieser Punkt des besten Wirkungsgrads trifft nur auf eine bestimmte Förderhöhe und einen dazugehörigen Förderstrom zu. In der Praxis müssen Pumpen meist einen größeren Parameterbereich (Förderhöhe/Förderstrom) abdecken, was bestimmte Kompromisse bei der Auswahl und Dimensionierung erfordert. Daher ist es zweckmäßig, sich an typischen Betriebsbereichen für bestimmte Bauformen (siehe Abbildung 3.8-6) zu orientieren. Der Betriebsbereich einer Pumpe ist vornehmlich durch den Wirkungsgradabfall begrenzt. Abhängig vom Verlauf der Wirkungsgradkurve ist in vielen Fällen ein Betrieb der Pumpe zwischen 70 % (Teillast) und 120 % (Überlast) des Auslegungsförderstroms sinnvoll.

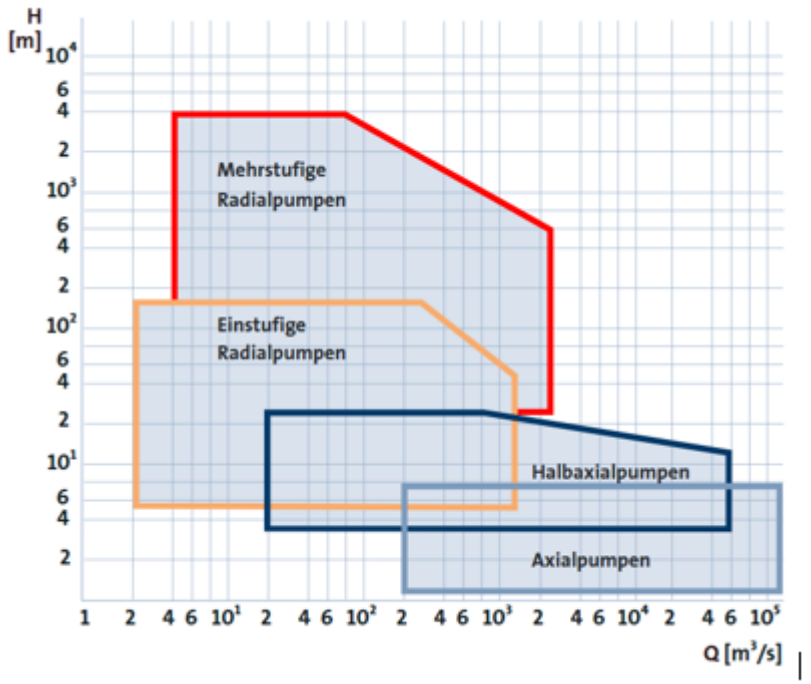
Ändern sich die Anforderungen an eine vorhandene Pumpe hinsichtlich Förderstrom oder Förderhöhe, ggf. auch wegen geänderter Viskosität des zu fördernden Mediums, so muss geprüft werden, ob die vorhandene Pumpe die Anforderungen innerhalb ihres Betriebsbereiches erfüllen kann oder ob sie ersetzt werden muss. Die Pumpenkennlinien werden normalerweise mit reinem Wasser von ungefähr 20 °C ermittelt. Wenn jedoch zum Beispiel Pumpen für Flüssigkeiten mit Frostschutzmittel unter 0 °C verwendet werden, muss überprüft werden, ob die Pumpe die erforderliche Leistung erbringen kann oder ggf. ein größerer Motor erforderlich ist (193).

Prüfung der Pumpenleistung im praktischen Einsatz am Beispiel von Kreiselpumpen

Im Regelfall müssen Hersteller von Kreiselpumpen garantieren, dass die gemessene Pumpenkennlinie für den Betriebspunkt (bzw. Bemessungspunkt) in einem durch die geltende Abnahmeklasse nach DIN EN ISO 9906 (194) festgelegten Toleranzbereich verläuft. Diese Norm kann auf Kreiselpumpen jeder Größe sowie auf alle durch die Pumpen geförderten Flüssigkeiten angewendet werden, sofern die Flüssigkeiten sich wie reines kaltes Wasser verhalten. (194)

Anwender und Hersteller sollen eine von sechs Abnahmeklassen vereinbaren, um zu beurteilen, ob eine bestimmte Pumpe dem Bemessungspunkt entspricht. Der DIN EN ISO 9906 (194) kann die geeignete Abnahmeklasse für verschiedene Anwendungsbereiche entnommen werden. Je nach gewählter Abnahmeklasse können in nachfolgender Tabelle 3.8-3 (nach DIN EN ISO 9906, Tabelle 8) die zugehörigen Toleranzwerte, als Prozentsätze der garantierten Werte, entnommen werden.

Abbildung 3.8-6: Betriebsbereich von Wasserpumpen nach Förderstrom in Abhängigkeit der Förderhöhe



Quelle: (193)

Tabelle 3.8-3: Abnahmeklassen der Pumpenprüfung und die entsprechende Toleranz

Klasse	**1**			**2**		**3**	
$\Delta\tau_Q$	10 %			16 %		18 %	Garantieanforderung
$\Delta\tau_H$	6 %			10 %		14 %	
Abnahmeklasse	**1U**	**1E**	**1B**	**2B**	**2U**	**3B**	
τ_Q	+ 10 %	± 5 %		± 8 %	+ 16 %	± 9 %	Verbindlich gefordert
τ_H	+ 6 %	± 3 %		± 5 %	+ 10 %	± 7 %	
τ_P	+ 10 %	+ 4 %		+ 8 %	+ 16 %	+ 9 %	Wahlfrei
τ_η	≥ 0 %		- 3 %	-		- 7 %	

Legende:
τ_x (x= Q, H, P, η) steht für die Toleranz der angegebenen Größen
Q: Förderstrom (Volumenstrom)
H: Förderhöhe der Pumpe
P: Druck
η: Wirkungsgrad
Δ: zweiseitiger Toleranzbereich

Quelle: (194)

Um die höchste Energieeffizienz zu erzielen, ist die Klasse 1E vorzuziehen, die ein hohes Maß an Genauigkeit erfordert. Für Pumpen mit einer Leistungsaufnahme von weniger als 10 KW sind wiederum geringere Toleranzfaktoren definiert (194).

Technisches Regelwerk

- DIN EN 16480:2017-07 (195) „Pumpen - Geforderte Mindesteffizienz bei Kreiselpumpen für Wasser“; enthält Effizienzanforderungen an Kreiselpumpen für Wasser, die im Anwendungsbereich der geltenden EU-Verordnung 547/2012 liegen, und gilt für

  - Wasserpumpen mit Stopfbuchsen (Trockenläuferpumpen) für das Pumpen von klarem Wasser, einschließlich solcher Pumpen, die in anderen Produkten verbaut sind,
  - Pumpen, die als Niedrigleistungspumpen für Drücke bis 16 bar bei Pumpen mit axialem Eintritt und bis 25 bar bei mehrstufigen Pumpen und
  - für Temperaturen zwischen -10 und +120 °C und für klares Wasser ausgelegt sind.

- DIN EN ISO 9906:2013-03 (194) „Kreiselpumpen - Hydraulische Abnahmeprüfungen – Klassen 1, 2 und 3“; legt Prüfungen des hydraulischen Leistungsverhaltens für die Abnahme von Kreiselpumpen (Radial-, Halbaxial- und Axialpumpen) durch den Anwender fest und enthält Angaben zu

  - Toleranzfaktoren,
  - zulässige Schwankungen und
  - Messunsicherheiten.

- Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG (196);
  regelt Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Energy-related Products, ErP). Für in der Praxis häufig eingesetzte Pumpenanwendungen und für Elektromotoren (siehe Kapitel 3.8.5) sind bisher bereits mehrere konkretisierende Verordnungen veröffentlicht, welche als Maßstab für den Stand der Technik bzw. die beste verfügbare Technik gelten. Auszugsweise werden hier folgende Anforderungen zitiert:

  aus Verordnung (EU) Nr. 547/2012 (197)*: Anforderungen an Wasserpumpen*

  Der Mindest-Effizienz-Index (MEI) setzt die Messergebnisse der jeweiligen Wassernormpumpe in Relation zu dem energieeffizientesten Produkt auf dem Markt (Stand 2010). Die Angaben zum MEI beziehen sich nach auf einen gemittelten hydraulischen Wirkungsgrad f (η_{Teillast}, η_{BEP} und $\eta_{\text{Überlast}}$) bei einer Medientemperatur zwischen -10 und +120 °C.

  - Es muss ein MEI ≥ 0,4 erreicht werden.
  - Der unverbindliche Referenzwert für die beste auf dem Markt verfügbare Technologie entspricht einem MEI von ≥ 0,70.

  Neben den Produktdaten, wie Baujahr, Art und Größe des Produkts oder Herstellername und -ort der Wasserpumpe, müssen u. a. folgende Informationen in der technischen Dokumentation der Wasserpumpe bereitgestellt werden:

  - Mindesteffizienzindex (MEI) ≥ [x,xx],
  - hydraulischer Pumpenwirkungsgrad (%) bei korrigiertem Laufraddurchmesser [xx,x],
  - Leistungskurve, einschließlich Effizienzkennlinie der Pumpe.

  aus Verordnung (EG) Nr. 641/2009 (198)*; Anforderungen an Nassläufer-Umwälzpumpen*

  Der Energie-Effizienz-Index (EEI) ist eine dimensionslose Kennzahl. Der EEI ist das Verhältnis aus berechneter elektrischer Leistungsaufnahme einer Referenzpumpe gleicher hydraulischer

Leistung im Nennpunkt und der gewichteten elektrischen Leistungsaufnahme der getesteten Pumpe für ein definiertes Lastprofil, welches mit einem Skalierungsfaktor multipliziert wird. Zur Festlegung des EEI geht die Verordnung von Referenzwerten verfügbarer Pumpen aus.

- Standard ist ein EEI von ≤ 0,23 (Stand der Technik),
- Umwälzpumpen gelten als hocheffizient, wenn sie einen EEI von ≤ 0,20 erreichen.

3.8.5 Motor und Getriebe

(Die Informationen über Erreichten Umweltnutzen, Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und Verweisende Informationen für ENE-Techniken für Pumpensysteme werden in Kapitel 3.8.8 dargestellt.)

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, gilt stets primär, die für eine Förderaufgabe am besten geeignete Pumpe auszuwählen, um darauf aufbauend die korrekte Größe des Motors bzgl. des Pumpbedarfs bestimmen zu können.

In der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG (196) werden nach der EU-Verordnung Nr. 640/2009 (199) und Nr. 4/2014 (200) die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren nach deren IE-Effizienzklassen (IE = International Efficiency), IEC 60034-30 (120) festgelegt.

Elektromotoren mit einer Leistung von 0,75 - 375 kW müssen seit 2017 entweder:

- ► die IE3-Norm (Premiumwirkungsgrad) oder
- ► die IE2-Norm (gehobener Wirkungsgrad) unter Verwendung eines Frequenzumrichters sowie
- ► die Nenn-Mindesteffizienz nach Anhang I, Nummer 1 der EU-Verordnung Nr. 640/2009

erfüllen.

Seit 2014 stehen die Spezifikationen für die Energieeffizienzklasse IE4 (Super Premium Effizienz), die im Jahr 2014 offiziell in den Entwurf der Norm IEC 60034-30-1 aufgenommen wurde, zur Verfügung. Diese wurde durch die Gebäudetechnikpumpen mit der Klassifizierung IE5 (Ultra Premium) gemäß IEC 60034-30-2 für drehzahlverstellbare Motoren mit einer Leistung von 11 KW abgelöst und stellt seit Januar 2017 die am Markt beste verfügbare Technik dar. (201)

Weitere Anforderungen werden im Kapitel 3.6 „Durch Elektromotoren angetriebene Subsysteme“ beschrieben.

3.8.6 Steuerung und Regelung des Pumpensystems Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über Erreichten Umweltnutzen, Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und Verweisende Informationen für ENE-Techniken für Pumpensysteme werden in Kapitel 3.8.8 dargestellt.)

Wie in Kap. 3.8.4 beschrieben, hat jede Pumpe einen bestimmten optimalen Arbeitspunkt, in welchem sie ihren höchsten Wirkungsgrad erzielt. Jedoch müssen Pumpen in der Praxis verschiedene Betriebssituationen mit unterschiedlichen Anforderungen an Leistung, Fördervolumen oder zu förderndes Medium abdecken. Weiterhin kann es aufgrund von Änderungen äußerer Bedingungen, beispielsweise anderer Effizienzmaßnahmen im Gesamtsystem, dazu kommen, dass die volle Auslegungsleistung des Pumpensystems nicht mehr benötigt wird. Laufen Pumpen dann noch mit der Auslegungsleistung weiter, ist das Gesamtsystem ineffizient (174).

In diesem Fall sind Maßnahmen zur Anpassung der Pumpenleistung, wie insbesondere ein Steuerungs- und Regelungssystem, wichtig, um die Arbeitsbedingungen unter Nennleistung für die Druckhöhe und den Förderstrom zu optimieren und die Pumpen bei geänderten Systembedingungen in einen stabileren oder effizienteren Betriebszustand zurückzuführen. Laut (177) kann durch

geeignete Steuer- und Regelsysteme bei Pumpenanwendungen im Durchschnitt eine Reduzierung des Energieverbrauches um 30 Prozent erzielt werden.

Die Regelung von Pumpenleistungen kann auf verschiedene Arten verwirklicht werden. Die nachfolgenden Erläuterungen stellen die wesentlichen in der technischen Praxis gebräuchlichen Methoden vor. Die aus Sicht der Energieeffizienz beste verfügbare Technik ist stets einzelfallabhängig zu bestimmen und kann unter Umständen auch aus einer Kombination der benannten Grundtechniken bestehen:

An-/Aus-Regelung

Eine sehr einfache und effiziente Methode ist die Abschaltung von nicht benötigter Pumpenleistung über einen Druckschalter (Ein/Aus-Regler). Dabei muss zwischen Ein- und Mehrpumpensystemen unterschieden werden.

Regelung einer Pumpe

Wird für die Förderaufgabe nur eine Pumpe eingesetzt, spricht man von einem einfachen Zweipunktregler. In diesem Fall gibt es nur Betrieb oder Nichtbetrieb. Voraussetzung für den intermittierenden Pumpenbetrieb ist, dass ein Speicher als Systembestandteil auf der Saug- oder Druckseite der Pumpe einen flexiblen Flüssigkeitsspiegel erlaubt. Dadurch kann die Pumpe jederzeit in ihrem Auslegungspunkt betrieben werden (183). Jedoch führen häufige Schaltvorgänge bei dieser Art der Regelung zu einer hohen Belastung der Pumpe und des Motors.

Regelung von Mehrpumpensystemen

Werden wegen häufiger Änderungen der Förderaufgabe verschiedene Betriebspunkte benötigt, ist ein System mit mehreren parallelen Pumpen, die je nach Leistungsbedarf einzeln oder gemeinsam angeschaltet werden, zweckmäßig. Diese Anordnung hat gegenüber der Variante mit einer Pumpe den Vorteil, dass ein kontinuierlicher, stufenweise einstellbarer Teillast-Förderstrom möglich ist (183). Eine oder mehrere Pumpen können abgeschaltet werden, wenn der Durchfluss des Systems niedrig ist, während andere Pumpen mit hoher Effizienz arbeiten. Dadurch entfällt bzw. reduziert sich die Größe des Pufferbehälters gegenüber der Variante mit einer einzelnen Pumpe.

Drosselregelung

Ein Drosselventil wird mit der Pumpe in Reihe geschaltet, sodass der Betriebspunkt eingestellt werden kann. Da sich beim Drosseln des Ventils der Rohrleitungswiderstand erhöht, steigt der Gegendruck an der Pumpe, und es stellt sich entsprechend der Pumpenkennlinie ein neuer Förderstrom ein. Der Energieverbrauch bleibt dabei jedoch nahezu unverändert, wodurch eine geringere Pumpeneffizienz erzielt wird.

Grund für die geringere Effizienz ist

- die Umwandlung der hydraulischen Energie am Regelventil in Wärme und
- die Entfernung des Betriebspunktes vom Auslegungspunkt durch Drosselung der Pumpe und des Motors, die in der Regel zur Verschlechterung des Wirkungsgrades führt.

Bypassregelung

Bei der Bypassregelung wird durch ein Regelventil in einer Rohrleitung parallel zur Pumpe ein Teil des Förderstroms von der Druckseite auf die Saugseite der Pumpe (z. B. in einen Vorlaufbehälter) zurückgeführt.

Hauptsächlich findet die Bypassregelung bei Verdrängerpumpen Anwendung, wo eine Drosselung des Volumenstroms nicht möglich ist. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Mindestmengenregelung bei Hochdruckkreiselpumpen oder wenn ein intermittierender Förderstrom benötigt wird, aber der Motor zum Schutz vor Überhitzung nicht so häufig geschaltet werden darf.

Nachteilig sind vor allem der hohe Platzbedarf für die Rohrleitung bei großen Förderströmen und dass die nicht benötigte hydraulische Energie im Bypass komplett in Wärme umgewandelt wird (183). Daher ist die Bypassregelung bei Kreiselpumpen meistens energetisch noch ungünstiger als die Drosselregelung. Eine Ausnahme bilden Pumpen (z. B. Axialpumpen), deren Leistungsaufnahme mit fallendem Förderstrom steigt.

Änderung des Laufraddurchmessers

Eine weitere Möglichkeit, die Leistung einer vorhandenen Kreiselpumpe anzupassen, besteht darin, den Laufraddurchmesser in der Pumpe zu ändern, d. h., durch sog. „Abdrehen des Laufrades“ den Durchmesser (Austrittswinkel der Schaufel sowie die Breite des Laufrades am Austritt) und damit die Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt einer Kreiselpumpe zu verringern, um deren Betriebspunkt an die Förderaufgabe anzupassen. Die Wirkung dieser Maßnahme ist abhängig von der Bauart des Laufrades. Beispielsweise können Einschaufel- und Diagonalräder nur in engen Grenzen abgedreht werden.

Im Gegensatz zur beschriebenen Drosselung, die bei Kreiselpumpen mit konstanter Drehzahl keine gleichzeitige Reduzierung von Förderstrom und Förderhöhe erlaubt, kann das Verkleinern des Laufradaußendurchmessers eine relativ einfache und zudem hydraulisch sehr wirksame Maßnahme sein, um bei unveränderter Drehzahl Förderstrom und -höhe dauerhaft zu verringern.

Das Abdrehen von Laufrädern ist jedoch nicht im Betrieb möglich und nicht umkehrbar (183) und insofern eine technische Anpassungsmaßnahme, aber keine Regelung. Bei weitgehend stationär betriebenen Systemen ist diese Lösung aber oft energieeffizienter als Drosselung oder Bypassregelung, deshalb findet diese einfache Technik an dieser Stelle Erwähnung.

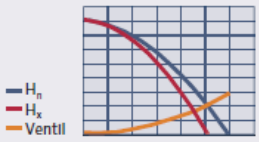
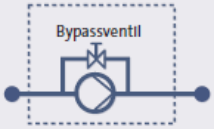
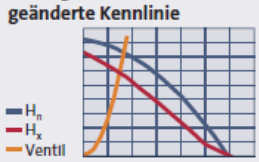
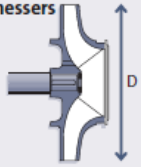
Drehzahlregelung

Die Drehzahlregelung beeinflusst mittels eines Frequenzumrichters mechanische Leistung des elektromotorischen Pumpenantriebs und dadurch die hydraulische Leistung der Pumpe (Pumpenkennlinie). Sie ist bei variablen Förderstromanforderungen in den meisten Fällen die energieeffizienteste Methode zum Anpassen der Pumpenleistung. Bei einer Kreiselpumpe hängt die abgegebene hydraulische Leistung von der Umfangsgeschwindigkeit des Laufrads ab. In Abhängigkeit vom Rohrleitungswiderstand stellt sich darauf ein Förderstrom ein. Daher sollten vorhandene Drossel- oder Bypass-Regelungen aufgrund der geringen energetischen Effizienz möglichst durch eine Drehzahlregelung mit Frequenzumrichter ersetzt werden. Eine solche Lösung bietet eine Vielzahl von Vorteilen (202):

- Bei Kreiselpumpen werden Volumenstrom und Druck kontinuierlich regelbar.
- Bei geschlossenen Systemen, etwa bei Umwälzpumpen, gilt, dass sich der Betriebspunkt entlang einer Linie konstanten sowie optimalen Wirkungsgrades bewegt.
- Da die aufgenommene Leistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl ist, lassen sich gerade bei Teillastbetrieb erhebliche Energieeinsparungen erreichen.
- Die Kavitationsgefahr sinkt.
- Der Anlauf erfolgt sanfter, insbesondere bei optionalem Einsatz eines Motorstarters.
- Es ist keine Blindleistungskompensation erforderlich.

Zur Ermittlung der genauen Energieeinsparung bei Reduzierung der Pumpendrehzahl muss zudem der Wirkungsgrad des Frequenzumrichters und des Motors berücksichtigt werden. Verallgemeinernd lässt sich feststellen, dass sich ein drehzahlvariabler Antrieb fast immer rentiert, wenn das Lastprofil über die Betriebszeit große Unterschiede ausweist, der Anteil der Reibungsverluste hoch ist und eine stufenweise Regelung mit parallelen Pumpen nicht machbar oder nicht wirtschaftlich ist (183).

Abbildung 3.8-7: Eigenschaften von Regelungsmethoden

Methode	Kontinuierliche Anpassung möglich?	Merkmale der resultierenden Pumpenkennlinie	Gesamtwirkungsgrad des Pumpensystems	Relativer Energieverbrauch bei Reduzierung des Förderstroms um 20%
Drosselregelung	Ja	Geringerer Förderstrom Q 	Erheblich niedriger	94%
Bypassregelung 	Ja	Niedrigere Förderhöhe H und geänderte Kennlinie 	Erheblich niedriger	110%
Änderung des Laufraddurchmessers 	Nein	Geringerer Förderstrom Q und Förderhöhe H	Etwas niedriger	67%
Drehzahlregelung	Ja	Geringerer Förderstrom Q und Förderhöhe H	Etwas niedriger	65%

H_n ursprüngliche QH-Kennlinie der Pumpe
H_x neue QH-Kennlinie nach Regelung (Drossel-, Bypass-, oder Drehzahlregelung sowie Änderung des Laufraddurchmessers)
H_y neue QH-Kennlinie durch Erhöhung der Drehzahl über der Nenndrehzahl der Pumpen
Quelle: (193)

Sobald äußere Einflüsse bestimmen, wann Pumpen zu- oder abgeschaltet werden, ist ein Schaltgerät notwendig. Man unterscheidet dabei zwischen niveau-, uhrzeit-, temperatur- oder druckabhängigen Schaltgeräten. Darüber hinaus gibt es verschiedene Fehler- und Zustandsmeldemöglichkeiten, um Pumpe und Steuerung jederzeit flexibel überprüfen zu können. Dabei ist eine messtechnisch unterstützte elektronische Steuerung seit mehreren Jahren Stand der Technik. Anzeigen für Pumpenstrom, Netzspannung und Netzüberwachung gehören ebenso dazu wie Meldezubehör in Form von Blitzleuchten (203).

Gibt es darüber hinaus auch noch analog gemessene äußere Größen, an denen sich die Regelung der Pumpe orientieren soll, wird zusätzlich zur Pumpensteuerung ein elektronischer Frequenzumrichter notwendig. Anwendung finden die folgenden Kombinationsmöglichkeiten von drehzahlgeregelten Pumpen mit Regler und Sensoren zur Messung von Systemparametern:

- Proportionaldruck-Regelung,
- Konstantdruck-Regelung,
- Konstante Kennlinienregelung,
- Konstanttemperatur-Regelung.

Bei modernen Pumpen macht die selbständige Anpassung der Kennlinie an die Anlagenbedingungen die manuelle Einstellung der Pumpe bei der Installation überflüssig. Verändern sich im laufenden

Betrieb die Anlagenbedingungen, berechnet die Pumpenelektronik die neue, ideale Kennlinie und den energieeffizientesten Betriebspunkt. In Kombination mit der Förderstrom-Begrenzung werden nach einem definierten Maximalwert die Förderströme überwacht und begrenzt. Wird der Maximalwert erreicht, wird die Kennlinie entsprechend verändert.

3.8.7 Instandhaltung

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über Erreichten Umweltnutzen, Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und Verweisende Informationen für ENE-Techniken für Pumpensysteme werden in Kapitel 3.8.8 dargestellt.)

Um eine dauerhaft optimale Leistung und Energieeffizienz zu erreichen, müssen Pumpensysteme überwacht und in einem guten Zustand gehalten werden. Die Instandhaltung von Pumpensystemen soll systematisch und vorausschauend erfolgen (siehe auch Kapitel 2.9. „Instandhaltung“). Bei der Planung neuer Anlagen sollte der Instandhaltungsaufwand als wichtiger Kostenblock bereits im Vorfeld optimiert werden. Hierzu sind die Anlagenkomponenten bereits im Angebotsstadium entsprechend zu spezifizieren und die für die Instandhaltungsplanung notwendigen Daten vom Hersteller/Lieferanten abzufragen (183). Die Instandhaltung beschreibt dabei die Kombination aus:

- Wartung: Bewahrung des Sollzustandes,
- Inspektion: Feststellung und Beurteilung des Istzustandes,
- Instandsetzung: Wiederherstellung des Sollzustandes,
- Verbesserung: Beseitigung von strukturellen Schwachstellen.

In den Normen DIN 31051 (204) und DIN EN 13306 (205) ist allgemein festgelegt, was unter Instandhaltung und deren Einzelmaßnahmen zu verstehen ist, nämlich die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes, der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ (206).

Wartung & Inspektion

Zur regelmäßigen Wartung zählt die äußere Pflege der Pumpen und Aggregate sowie die Wartung der Lager und Wellendichtungen. Die notwendigen Angaben zur Art und Umfang von Wartungsarbeiten können aus den jeweiligen Betriebsanleitungen der Systemkomponenten entnommen oder aus den Ergebnissen relevanter Analyse-, Mess- und Inspektionsarbeiten bei bestehenden Anlagen abgeleitet werden. Unter Inspektion versteht man wiederum Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands der Pumpe. Wichtig für die Beurteilung des Istzustands ist die Kenntnis des Sollzustands. Dazu sollten nach Auslieferung bzw. erfolgreichen Grundüberholung Referenzwerte aufgenommen und systematisch dokumentiert werden (183). Die relevanten Referenzwerte sind dem Abnahmeprotokoll nach DIN EN 9906 (194) zu entnehmen. Neue oder grundüberholte Pumpen sollten erst nach einer angemessenen Betriebszeit gemessen werden, damit sich stationäre Betriebsbedingungen einstellen können (183).

Als Beispiel müssen durch das Betriebspersonal bei der Inspektion folgende Punkte regelmäßig geprüft werden:

- Überprüfen der Laufruhe von Pumpe und Antriebsmaschine,
- Kontrolle der Motorleistung unter Berücksichtigung der Stromaufnahme,
- Kontrolle der Kupplungsausrichtung,
- Überprüfen der elastischen Übertragungselemente auf Verschleiß (z. B. an Kupplungsscheibe, -bolzen und -paketen),
- Dichtheit von Lager- und Wellendichtungen sowie Flanschverbindungen.

Bei Vernachlässigung der Wartungsarbeiten ist mit erheblichen Instandhaltungskosten zum Beispiel durch übermäßige Abnutzung von Lagern oder Kavitation der Pumpen zu rechnen. Um einen langfristig energetisch optimalen Betrieb eines Pumpensystems gewährleisten zu können, soll die Einbindung der Daten aus den Analyse- und Messarbeiten in ein Energiedatencontrolling/ Energiemonitoring erfolgen (siehe Kapitel 2.15. „ Energiemodelle“).

Instandsetzung & Verbesserung

Ziel der Maßnahmen der Instandsetzung (auch Reparatur) ist es, die planmäßige Funktionsfähigkeit bzw. den Soll-Zustand einer Anlage oder Maschine wiederherzustellen. Werden bei diesem Vorgang Schwachstellen beseitigt, um die Funktionssicherheit zu erhöhen, ist dies laut DIN 31051 eine Verbesserung. Diese zählt man zu den Instandhaltungsmaßnahmen, wenn dadurch die Funktion der Pumpe nicht verändert wird (183).

Technisches Regelwerk

Die Norm DIN 31051:2012-09 (207) „Grundlagen der Instandhaltung“ gliedert die Instandhaltung vollständig in Grundmaßnahmen und definiert Begriffe, die zusammen mit den Begriffen nach DIN EN 13306 (208) zum Verständnis der Zusammenhänge notwendig sind.

3.8.8 Erreichter Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit und andere Überlegungen zu ENE-Techniken in Pumpensystemen

Erreichter Umweltnutzen

Pumpensysteme verursachen in vielen industriellen Prozessen einen hohen Anteil am Energieverbrauch. Die Anwendung der besten verfügbaren Techniken bei Pumpensystemen bietet im Vergleich zum tatsächlichen technischen Stand vieler vorhandener Pumpensysteme ein hohes Energieeinsparpotential. Bei einer Optimierung des gesamten Pumpensystems können häufig 30 Prozent der Energiekosten des Systems eingespart werden (209).

Die Projektmodule „Leuchttürme energieeffizienter Pumpensysteme in Industrie und Gewerbe“ der Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) zeigen, dass durch eine Optimierung des Gesamtsystems Pumpe der Energiebedarf zwischen 18 und 90 Prozent eingespart werden kann (177). Dementsprechend sollte bei der Neuauslegung von Systemen dieses Einsparpotenzial von vornherein durch eine qualifizierte Planung in den Systemen realisiert werden.

Medienübergreifende Wirkungen

Keine berichtet.

Anwendbarkeit

Die Anwendbarkeit von besonderen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in vorhandenen Pumpensystemen und das Ausmaß der Energie- und Kosteneinsparungen sind abhängig von der Größe und der spezifischen Art der Anlage und des Systems. Durch eine systematische Analyse der Förderaufgabe und der vorhandenen Anlagenkonfiguration kann ein Kosten-Nutzen-Verhältnis ermittelt werden. Dafür sollten qualifizierte Fachkräfte, beispielsweise externe spezialisierte Dienstleister oder qualifiziertes internes technisches Personal eingesetzt werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Das entscheidende Kriterium für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen ist ihre Wirtschaftlichkeit. Denn jede Entscheidung für energieeffiziente Technologien ist auch eine Investitionsentscheidung. Um die Wirtschaftlichkeit der geplanten Investitionen zur Energieeffizienzsteigerung genau bewerten zu können, müssen die verschiedenen Kostenarten eines Pumpensystems über seinen gesamten Lebenszyklus betrachtet werden (174).

Europump, Hydraulic Institute haben mit dem Programm namens „Pump Life Cycle Costs“ (LCC) einen Leitfaden entwickelt, mit dem die sog. Lebenszykluskosten (LCC, Life Cycle Costs) anhand der nachfolgenden LCC-Gleichung bestimmt werden können. Die Lebenszykluskosten im Sinne des Betriebes einer Pumpe oder Pumpenanlage werden ermittelt, indem die Jahreskosten des Betriebes sowie die Verzinsung und Abschreibung der Anlagenwerte wie der Maschinenanlage für verschiedene Alternativen bestimmt werden.

Formel 3.8-1

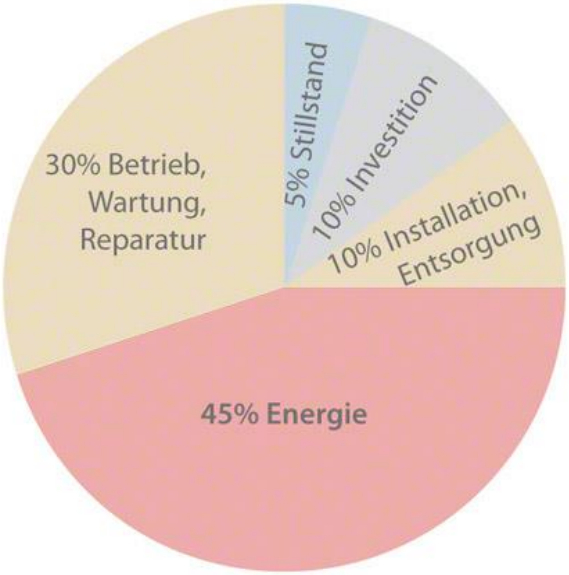
$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d$$

Legende:

LCC	Lebenszykluskosten
C_{ic}	Anschaffungskosten (Einkaufskosten von Inbetriebnahme, Planungskosten, Kosten der Qualifizierungsmaßnahmen für das Personal etc.)
C_{in}	Installationskosten (Kosten für Einrichtung und Inbetriebnahme)
C_e	Energiekosten (Produkt aus Energieverbrauch und dem Energiepreis)
C_o	Betriebskosten (Überwachung und Diagnose)
C_m	Instandhaltungskosten (Wartungsarbeiten sowie vorbeugende und korrektive Instandsetzung)
C_s	Produktionsausfallkosten (Kosten in Folge von Ausfallzeiten und Produktionsverlust)
C_{env}	Umweltkosten (Entsorgungskosten von Hilfsstoffen, auszutauschenden Bauteilen und ggf. von nicht verkaufbaren Produkt bei Fehlproduktion)
C_d	Außerbetriebnahmekosten (Kosten für Stilllegung und Entsorgung) (210)

Dadurch wird ein Vergleich mit neuen Pumpensystemen möglich, wodurch entsprechend der individuellen Systemanforderungen das für den Betreiber effizienteste System ausgewählt werden kann. Wie in Abbildung 3.8-8 beispielhaft dargestellt wird, haben bei Kreiselpumpen i. d. R. die Energie- (Ce) sowie die Betriebs- (Co) und Instandhaltungskosten (Cm) den größten Kostenanteil (211).

Abbildung 3.8-8: Beispielhafte Kostenverteilung einer Kreiselpumpe über einen gesamten Lebenszyklus



Quelle: (211)

Je nach Anwendungsfall kann es jedoch sinnvoll sein, noch weitere Kostenblöcke zu definieren. Bei Produktionsanlagen in der Chemie-, Pharma- oder Lebensmittelindustrie empfiehlt es sich, z. B. die Reinigungskosten C_{cip} oder Qualitätskosten C_{qu} als gesonderte Blöcke hinzuzufügen.

Für die zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit durchzuführenden Optimierungsmaßnahmen sollten u. a. folgende Punkte berücksichtigt werden (211):

- Rohrleitungen mit geringen Querschnitten verringern die Anlagenkosten, vergrößern aber durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten den Druckverlust und damit Energieaufwand und Verschleiß. Niedrige Investitionskosten und höhere Strömungsgeschwindigkeiten sind daher nur bei kurzen Betriebszeiten zu rechtfertigen.
- Bei langen Betriebszeiten von Pumpen entfällt der größte Teil der Lebenszykluskosten auf die Energiekosten, sodass sich ein Mehraufwand für energiesparende Maßnahmen, beispielsweise für eine Drehzahlregelung in kurzer Zeit, amortisiert.
- Bei Mehrpumpensystemen mit parallelen Pumpen erreicht eine geringere Zahl größerer Pumpen oft bessere Wirkungsgrade und so niedrigere Energiekosten. Mit zunehmender Redundanz von Pumpen steigen außerdem die Kosten für die Anlagen.

Technisches Regelwerk

- Die VDI-Richtlinie 2885 (212) „Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten“ bietet einen systematischen Ansatz zur Kostenerfassung. Diese beinhaltet auch Tabellen, mit denen die erforderlichen Daten beim Systemlieferanten abgefragt werden können.
- Im VDMA-Einheitsblatt 34160 (213) „Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen“ befinden sich ebenfalls Hinweise auf relevante Kostenelemente.

Triebkraft für die Umsetzung

Einsparungen von Energie und Kosten.

Beispiele

Leuchttürme - Energieeffizienter Pumpensysteme in Industrie und Gewerbe

Um Unternehmen über die hohen Einsparpotenziale zu informieren und zu Investitionen in energieeffiziente Pumpensysteme zu motivieren, hat die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) im Rahmen ihrer Initiative *EnergieEffizienz* das Projektmodul „Leuchttürme energieeffizienter Pumpensysteme in Industrie und Gewerbe“ durchgeführt. Die daraus erarbeiteten Maßnahmen überzeugen mit hohen Kapitalrenditen zwischen 31 und mehr als 100 Prozent (177).

Tabelle 3.8-4: Statische Kapitalrenditen aller Leuchtturmprojekte

Unternehmen	Kapitalrendite (RoI)
ArcelorMittal Bremen GmbH	43 % p.a.
Bayer Scherling Pharma AG	> 100 % p.a.
Daimler AG	> 100 % p.a.
KRONOS TITAN GmbH	65 % p.a.
Neue Torgauer Brauhaus GmbH	31 % p.a.
Sappi Stockstadt GmbH	67 % p.a.

Quelle: (177)

Die Amortisationszeit beläuft sich bei den jeweiligen Projekten auf zwei bis drei Jahren (177).

Beispiel 1: Daimler AG: Energetische Optimierung bei einem Automobilhersteller (214)

Das Mercedes-Benz Werk in Untertürkheim beschäftigt über 19.000 Mitarbeiter.

Im Rahmen des Projekts „Energieoptimierung zur Steigerung der Energieeffizienz im Mercedes-Benz Werk Untertürkheim“ wurde als zentrales Fallbeispiel die Energiebilanz einer Waschpumpe bei einer Teilereinigungsanlage betrachtet. Über einen Produktionstag hinweg wurden die verschiedenen Systemparameter des Waschprozesses gemessen und analysiert. Es zeigte sich, dass statt den erforderlichen 3 bar, die Pumpe kontinuierlich einen Druck von 10 bar zur Verfügung stellt. Dabei erfolgt die Reduktion des Drucks über einen Druckregler und eine Bypassleitung.

Ausgehend vom Bedarf wurden als **Maßnahme**

- die überdimensionierte Pumpe mit einer Leistung von 18,5 kW durch eine neue, kleinere und energieeffiziente Pumpe mit einer Leistung von 1,5 kW ersetzt,
- die Bypassleitung entfernt und
- der Einbau eines Frequenzumrichters (zur Drehzahlregelung bei Schwankungen im Förderbedarf)

umgesetzt.

Durch den Umbau der Teilereinigungsanlage wurde die gewünschte Waschqualität erreicht und der Stromverbrauch von 57.000 auf 5.590 kWh gesenkt. Dadurch werden Stromeinsparungen von über 90 Prozent erzielt und Kosten in Höhe von rund 6.200 € eingespart. Bei einer Investition von insgesamt nur 3.800 € ergibt sich eine Kapitalrendite von weit über 100 Prozent bei einer Amortisationszeit von knapp 8 Monaten.

Beispiel 2: Neue Torgauer Brauhaus GmbH, Pumpenoptimierung in einem KMU (215)

Die Torgauer Brauhaus GmbH beschäftigte 2010 rund 40 Mitarbeiter bei einem jährlichen Ausstoß von 71.000 Hektolitern an Bier und Softdrinks.

Zwischen Januar und Mai 2010 wurde im Rahmen des Projektmoduls „Leuchttürme energieeffizienter Pumpensysteme in Industrie und Gewerbe“ bei der Neuen Torgauer Brauhaus GmbH eine Energieanalyse der Pumpensysteme durchgeführt. Die installierten Systeme verursachten insgesamt ein Drittel des jährlichen Gesamtstromverbrauchs in Höhe von rund 1,3 Millionen kWh.

Im Rahmen der Analyse lag der Fokus auf Pumpensystemen, deren Optimierung das größte Einsparpotenzial erwarten lassen: die Pumpen für Kühlturm- und Kesselwasserspeisung, Brunnen-, Heizungs- und Filterpumpen (Betriebswasser) sowie Pumpen für die Systeme.

Ausgehend von der Analyse wurden als **Maßnahme**

- der Austausch der Kühlturmpumpen gegen ein Modell mit temperaturgeführter Drehzahlregelung,
- die Verlegung des Vorlagebehälters zur Reduzierung der Förderhöhe und folglich der Förderverluste,
- der Austausch der Kesselspeisepumpen durch drehzahlgeregelte Pumpen mit Drucksensor sowie
- die Installation von Ventilregelungen

umgesetzt.

Durch die Umsetzung der erarbeiteten Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung kann die Brauerei Torgau den Stromverbrauch der untersuchten Pumpensysteme um 76 Prozent im Jahr senken. Insgesamt reduziert das Unternehmen seinen jährlichen Stromverbrauch um 55.400 kWh und kann dadurch Kosten in Höhe von 8.870 Euro sparen. Bei einer Investition von insgesamt nur 28.600 € ergibt sich eine Kapitalrendite von 31 Prozent.

Verweisende Informationen

(170) (173) (179) (180) (181) (216) (187) (190) (191) (195) (196) (198) (199) (200) (204) (205) (212) (213)

3.9 Industrielle Lufttechnik

3.9.1 Einführung

Als industrielle Lufttechnik werden in diesem Merkblatt technische Anlagen zur Konditionierung und zum Transport von Luft und Luft-Stoff-Gemischen verstanden. Diese Systeme sind in der Industrie und im Gewerbe weit verbreitet und kommen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Ausführungsformen und Größenordnungen in fast allen Branchen zum Einsatz.

Das gesamte Fachgebiet der Lufttechnik wird in zwei wesentliche Aufgabengebiete unterschieden:

1. die Raumlufttechnik, z. B.
   - Erhalten eines Normklimas in Arbeitsräumen, Arbeitsbereichen in Laboren etc.,
   - Konditionierung (Luftfeuchte, Wärme, Kälte) von Frischluft für Arbeitsstätten.

2. die Prozesslufttechnik, z. B.
   - Umwälzen und Verteilen von Luftströmen für prozesstechnische Zwecke,
   - Absaugen von Emissionen aus Arbeitsstätten und Prozessanlagen,
   - Transport von Feststoffen.

Hinweise zur begrifflichen und inhaltlichen Abgrenzung des Themengebietes:

Für das erstgenannte Aufgabengebiet, das speziell auf die Schaffung eines definierten Raumklimas in Arbeitsstätten ausgerichtet ist und insofern eine Kombination der Querschnittstechnologien Beheizung, Feuchteregelung, Be- und Entlüftung, ggf. in Verbindung mit Filterung darstellen, wird an dieser Stelle auf das gesonderte Kapitel Raumlufttechnische Systeme (3.10) in diesem BVT-Merkblatt verwiesen.

Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die mit prozesstechnischen Aufgaben verbundenen lufttechnischen Systeme sowie übergreifende Aspekte der Energieeffizienz bei der Förderung kompressibler gasförmiger Medien. Da in der weitaus überwiegenden Zahl der Anwendungsfälle Luft atmosphärischen Ursprungs den Hauptbestandteil der zu fördernden Volumina ausmacht, wird in der weiteren Darstellung stets der Begriff „Luft“ als Synonym für alle für solche Förderaufgaben in Frage kommenden gasförmigen Medien verwendet.

Die wesentlichen Bestandteile lufttechnischer Anlagen sind:

- ► Luftförderung (Ventilator, Antrieb, Übertragungssystem),
- ► Luftführung (Kanäle, Wetterschutzgitter, Dachhauben etc.),
- ► Luftverteilung (Zu-, Abluftgitter, Dralldurchlässe),
- ► Luftregulierung (Volumenstromregler, Jalousieklappen) sowie Zusatzsysteme wie
- ► Luftkonditionierung, (Be- und Entfeuchten, Heizen, Kühlen),
- ► Abluft-/Abgasreinigungssysteme (Filter, Wäscher etc.),
- ► Schalldämmsysteme,
- ► Brandschutzsysteme,
- ► Prozesslufttechnische Zusatzsysteme (Abrasionsschutz, Korrosionsschutz).

Der weltweite Anteil am Elektroenergieverbrauch durch Lufttechnik steigt aufgrund steigender Nachfrage an. Die IEA geht derzeit von etwa 10 % weltweit aus (217). Der Energieverbrauch einer lufttechnischen Anlage hängt im Wesentlichen von der transportierten Luftmenge, den Druckverlusten im gesamten Fördersystem, der Dichtheit des luftführenden Systems und der Effizienz des Energieeintrags zur Förderung der Luft im Lüftungsgerät ab. Sofern die Enthalpie der Luft genutzt wird, um Wärmeenergie zu transportieren, muss der Bilanzkreis zur Bewertung der Energieeffizienz

solcher Systeme ggf. auf die entsprechenden Bereiche der Wärmezu- und -abführung erweitert werden.

Bestehende lufttechnische Anlagensysteme weisen oft ein hohes Potential von mehr als 10 % des bisherigen Energieeinsatzes für Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung auf. Eine wesentliche Voraussetzung für das bestmögliche Erschließen dieses Potenzials ist die sachgerechte Formulierung der Aufgabenstellung für das Lüftungssystem. Nur dann können die technisch möglichen Effizienzsteigerungen tatsächlich erreicht werden. Hohe technische Potenziale zur Effizienzsteigerung sind beispielsweise erreichbar durch

- effiziente Antriebe und Ventilatoren,
- Minimierung der internen Druckverluste, z. B. durch kurze Kanalwege mit wenigen Einbauten,
- regelmäßige Wartung sowie
- eine optimale Luftregelung und optimierte Betriebszeiten.

Bei Bilanzkreiserweiterung auf den Wärmeenergietransport sind unter Umständen auch Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung für eine Steigerung der Energieeffizienz von großer Bedeutung.

Maßnahmen zur energetischen Optimierung sowohl im Bestand als auch bei der Planung neuer Anlagen müssen jedoch für jede lufttechnische Aufgabenstellung und Anlage individuell entwickelt und wirtschaftlich bewertet werden. Eine eindeutige Beschreibung der besten verfügbaren Technik im Sinne von technischen Merkmalen für alle Systemkomponenten kann folglich nicht allgemeingültig für alle Anwendungsbereiche formuliert werden.

Die Energieeffizienz einer lufttechnischen Anlage wird durch die Qualität der Planung, der Herstellungsprozesse der Komponenten, der Montageprozesse und der Betriebsführung einschließlich Wartung und Instandhaltung beeinflusst. Es ist sinnvoll, die letztgenannten Maßnahmen in ein Energiemanagementsystem einzubetten, in welchem eine regelmäßige Überprüfung des Systems durch eine gute Datenbasis unterstützt wird (siehe Kapitel 2.1 und 2.15.1 des BVT-Merkblattes Energieeffizienz).

3.9.2 Auslegung bestehender und geplanter prozesslufttechnischer (PLT-) Anlagen

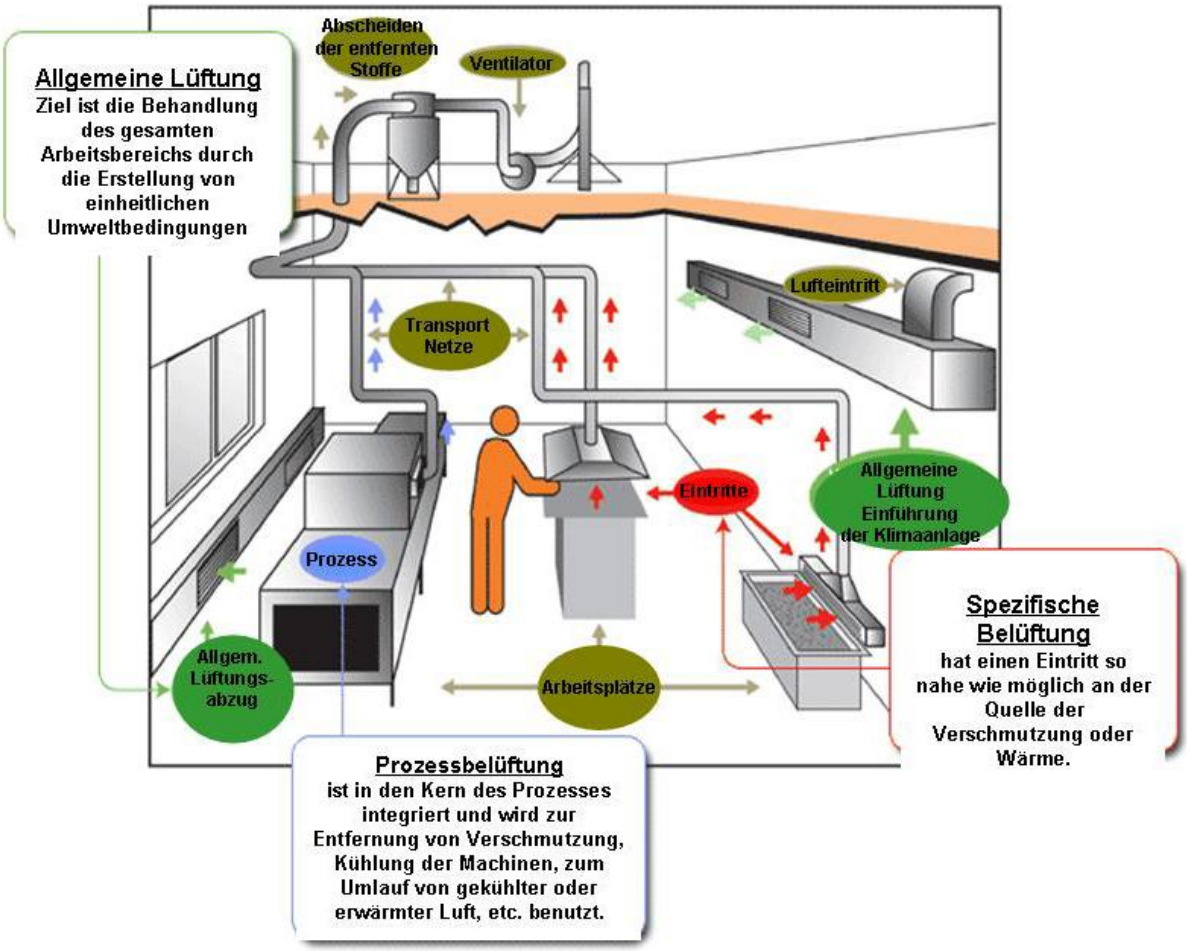
Beschreibung der Förderaufgabe und Betriebsdaten

Die Prozesslufttechnik ist eine verfahrenstechnische Anwendung der Lufttechnik zur Gestaltung eines Arbeits- bzw. Produktionsprozesses. Dazu ist es erforderlich, eine klare Vorstellung der Anforderungen und örtlichen Bedingungen zu erstellen, um die richtige Auswahl und Auslegung zu erstellen.

Lufttechnische Systeme sind für viele industrielle Anlagen unbedingt erforderlich, damit sie gut funktionieren. Wie Abbildung 3.9-1 veranschaulicht, ist das Spektrum der Anwendungen und Förderaufgaben sehr vielfältig. Grundlegend wird unterschieden in

- Allgemeine Lüftung (in der Regel auf einen (Arbeits-)Raum als Ganzes bezogen), oft eher RLT-Anlagen (siehe Kap. 3.10) zuzuordnen, ausgenommen Anwendungsfälle, bei denen die Einhaltung von Gefahrstoff-Grenzwerten primärer Aufgabenbestandteil ist,
- Spezifische Be- bzw. Entlüftung/Absaugung (arbeitsplatzbezogene gezielte Erfassung von Emissionen von Gefahrstoffen und Wärme aus kleinräumigen Quellen zur Verhinderung einer Ausbreitung im gesamten Arbeitsraum, Arbeitsschutz ist primäres Ziel),
- Prozessbelüftung (Belüftung innerhalb von verfahrenstechnischen Prozessen, primäres Ziel ist eine definierte Arbeitsatmosphäre, um die Produktqualität bzw. die Verfahrensbedingungen zu sichern).
- Prozessluftversorgung (z. B. für pneumatische Förderung, Verbrennungsluft für Öfen, primäres Ziel ist die Prozessfunktion selbst).

Abbildung 3.9-1: Veranschaulichung der verschiedenen Aufgaben lufttechnischer Systeme

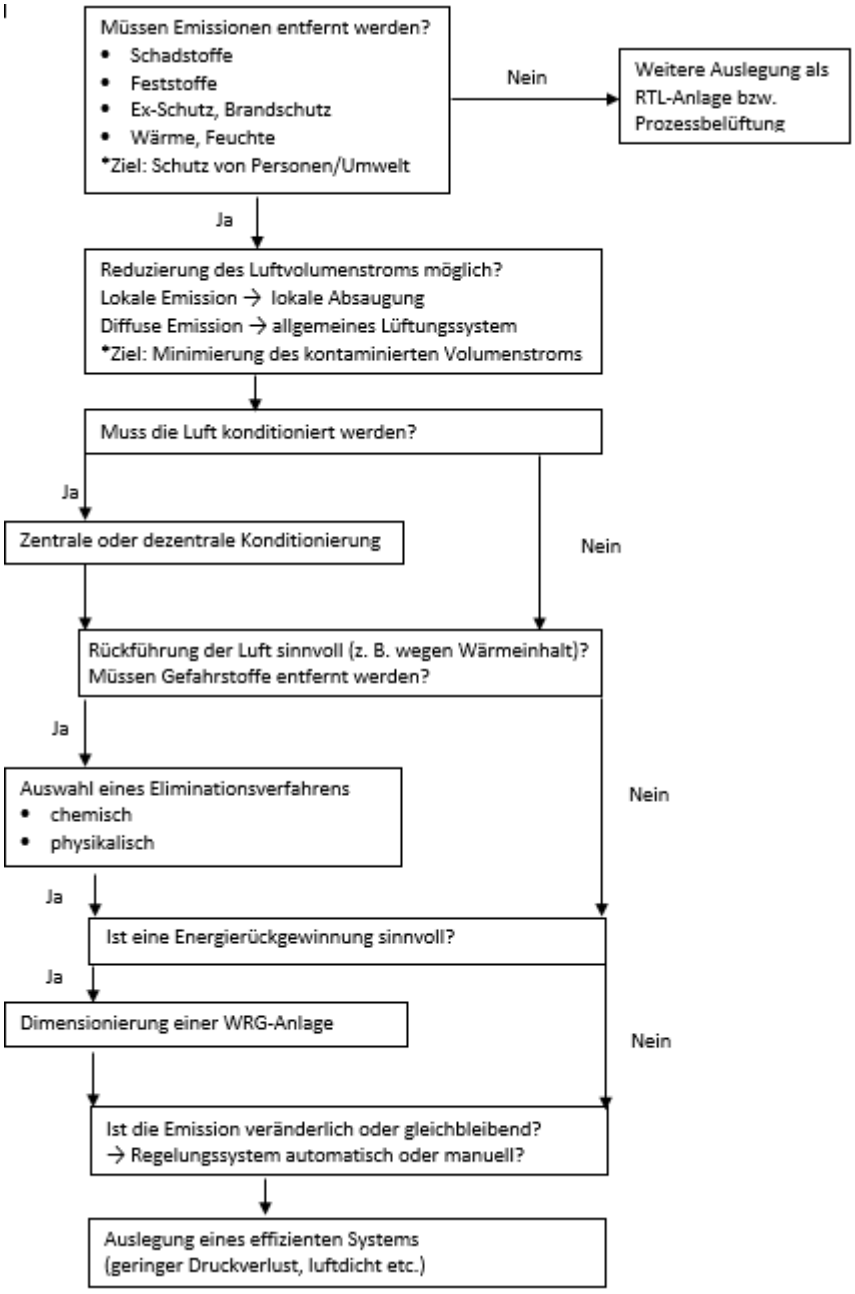


Quelle: : (1 S. 238)

Das nachfolgende Ablaufdiagramm in Abbildung 3.9-2 kann zu einer energieeffizienten Lösung der Aufgabenstellung beitragen.

Vor einer Auslegung insbesondere spezifischer Lüftungssysteme sollte zunächst die Frage betrachtet werden, ob sich die abzuführenden Emissionen durch ein geeignetes technisches Verfahren generell vermeiden oder reduzieren lassen, was ggf. zum Entfall der lufttechnischen Aufgabe führen könnte.

Abbildung 3.9-2: Prüfschema zur Optimierung des Energieverbrauchs in der Prozesslufttechnik am Beispiel einer Absauganlage



Quelle: eigene Abbildung, GICON, 2019

3.9.3 Dimensionierung des lufttechnischen Verteilsystems

Beschreibung und Betriebsdaten

Aus der Festlegung der lufttechnischen Betriebsparameter, der zu fördernden Volumenströme und der Förderaufgabe leitet sich Dimensionierung des lufttechnischen Verteilsystems (adäquater Begriff: Luftführungssystem, bestehend aus Luftleitungen/Kanälen und Einbauten) und der fördernden Geräte (Ventilatoren) ab.

Für eine energieeffiziente Auslegung muss zwingend eine Feinplanung des lufttechnischen Verteilsystems erfolgen und entsprechend dokumentiert werden. Diese Planung schließt die Bestimmung der Druckverluste der einzelnen Zu- und Abgänge mit allen Einbauten und den

entsprechenden Regelungsstrategien ein. Ziel der Planung ist es, die Erfüllung der Förderaufgabe für alle Betriebszustände bei geringstmöglichem Druckverlust des Gesamtsystems sicherzustellen.

Eine geeignete Leitungsführung und -dimensionierung ist von erheblicher Bedeutung für die Energieeffizienz des Systems. Ein zu klein dimensionierter Leitungsquerschnitt führt zu einer hohen Strömungsgeschwindigkeit und dadurch zu höheren Druckverlusten infolge höherer Wandreibung und Turbulenzen. In der Prozesslufttechnik sind Luftleitungen mit kreisförmigen Querschnitten zu bevorzugen, vor allem für Gefahrstoffabsaugungen und pneumatische Förderungsaufgaben. Sie halten einem relativen Über- oder Unterdruck besser Stand und reduzieren das Risiko von Ablagerungen. Außerdem sind sowohl die Druckverluste als auch die zulässigen Leckagen in kreisförmigen Rohrleitungen geringer als in rechteckigen Kanälen mit gleicher Querschnittsfläche.

Bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten der Luft muss planerisch ein Optimum gefunden werden. Niedrigere Luftgeschwindigkeiten reduzieren den Energiebedarf für die Luftförderung. Um Ablagerungen von zu fördernden festen Partikeln zu vermeiden, müssen jedoch oft Mindestgeschwindigkeiten eingehalten werden. In bestimmten Fällen (z. B. bei Absaugarmen) sind auch maximal mögliche Leitungsdurchmesser handhabungs- oder baubedingt begrenzende Randbedingungen.

Insbesondere bei mehreren Belüftungs- oder Absaugstellen in komplexeren Systemen ist für die Auslegung des Systems die am ungünstigsten gelegene Stelle zu betrachten. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass an dieser durch nicht ausreichenden Differenzdruck zuerst eine Unterversorgung auftritt, siehe z. B. (218).

Die Energieverluste durch Reibung sind abhängig vom Strömungsverhalten der Luft, dem Turbulenzgrad sowie der Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) der Leitungsinnenwand. Die Oberflächenbeschaffenheit ist in der Lufttechnik nicht so stark von Bedeutung wie bei der Förderung flüssiger Medien, eine größere Rolle spielen Verwirbelungen (Turbulenzen), die z. B. durch stumpfe Kanaleinbindungen entstehen. Turbulenzverstärkende Einbauten und Leitungsführungen sollten dementsprechend vermieden bzw. minimiert werden. Die Summe der Einzelverluste der jeweiligen Kanalabschnitte ergibt den Gesamtdruckverlust, welcher durch den Ventilator überwunden werden muss. Bei konstantem Volumenstrom ist der Gesamtdruckverlust der entscheidende Einflussfaktor auf die elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators (219).

Dem Stand der Technik entsprechen somit Planungen/Systemauslegungen, welche folgende Grundsätze berücksichtigen:

- Strömungsgeschwindigkeit im Kanal und Gerät gering halten, insbesondere dann, wenn keine Gefahr von Ablagerungen besteht (partikelfreie Luft),
- Strömungsquerschnitte ausreichend dimensionieren,
- Kanalführung möglichst gerade ausführen,
- Anzahl der Umlenkungen, Verzweigungen etc. auf ein Minimum reduzieren,
- erforderliche Umlenkungen, Verzweigungen, etc. strömungsgünstig ausführen, d. h., Radien möglichst groß wählen und die Länge flexibler Luftleitungen (Schläuche) minimieren,
- Strömungsabrisse und Wirbelbildungen durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Leitbleche) vermeiden.

3.9.4 Anforderung an die Dichtigkeit des lufttechnischen Systems

Beschreibung und Betriebsdaten

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Energieeffizienz lufttechnischer Anlagen ist die Dichtheit der luftführenden Systemkomponenten, insbesondere der Luftleitungen/Kanäle. Bei unbekannter Dichtheitsklasse ist im Durchschnitt mit einem Effizienzverlust von 15 % zu rechnen. Undichtheiten führen neben unkontrolliertem Lufteintritt oder -austritt auch zur erhöhten Geräuschentwicklung,

Wärmeverlust sowie Verschmutzung und Gefahrstoffemission. Bei Absaugsystemen beispielsweise führen Undichtheiten im Kanalnetz dazu, dass Luftmengen im Kanalnetz transportiert werden, welche nicht zum beabsichtigten Absaugeffekt an der geplanten Absaugstelle beitragen. Die auf diese Falschluftmengen entfallende Förderleistung des Ventilators ist als Energieverlust zu bewerten. 10 % Falschluft entsprechen ungefähr einem 33 % höheren Energiebedarf für die Luftförderung (220).

Die Norm DIN EN 16798-3 (221) und die Produktnormen, wie z. B. DIN EN 1507 (222) und DIN EN 12237 (223), definieren die Dichtheitsklassen A bis D (siehe Tabelle 3.9-1) bzw. ATC1 (höchste Dichtheitsanforderung) bis ATC 7. Die benannten Normen sind für raumlufttechnisch übliche Randbedingungen anwendbar. Spezielle industrielle Absaug- oder Belüftungsanlagen mit deutlich höheren Druckdifferenzen zwischen System- und Umgebungsdruck sind durch die zitierte Normung nicht abgedeckt. Um sicherzustellen, dass die von den Ventilatoren geförderte Luftmenge möglichst vollständig dem vorgesehenen Zweck dient, muss schon in der Planung die geeignete Luftleitungskomponente entsprechend der Anwendungsaufgabe berücksichtigt werden. Vor Ort wird eine Dichtheitsprüfung nach DIN EN 12599 (224) möglichst in der Einbauphase durchgeführt. Zur Durchführung ist ein genauer Messstellenplan zu erstellen. Dazu gehört:

- Festlegung der zu prüfenden Teilstrecken in Abstimmung zum Montageplan,
- Liste der Luftleitungskomponenten,
- Benennung eines Abnahmeberechtigten mit entsprechender Prüfeinrichtung,
- Terminkoordination mit anderen Gewerken und
- Bereitstellung geeigneter Abdichtmaterialien.

Bei Übergabe der Anlage vom Bauunternehmen an den Betreiber muss eine vollständige Dokumentation übergeben werden. Dazu gehören u. a. Vollständigkeitsprüfungs-, Funktionsprüfungs- und Funktionsmessungsprotokolle gemäß DIN EN 12599 (225).

Tabelle 3.9-1: Technisch häufig angewendete Dichtheitsklassen bei Luftverteilungen

Luftdichtheitsklasse	Grenzwert des Leckluftvolumenstroms (f_{max}) $\left[\frac{m^2}{s \cdot m^2}\right]$	Grenzwert des statischen Druckes (p_s) $[Pa]$			
		Negativ für alle Druckklassen	Positiv bei Druckklassen 1	2	3
A	0,027 x $p_{test}{}^{0,65}$ x 10^{-3}	200	400	1.000	2.000
B	0,009 x $p_{test}{}^{0,65}$ x 10^{-3}	500	400	1.000	2.000
C	0,003 x $p_{test}{}^{0,65}$ x 10^{-3}	750	400	1.000	2.000
D	0,001 x $p_{test}{}^{0,65}$ x 10^{-3}	750	400	1.000	2.000

* Die dargestellten Dichtheitsklassen decken den technisch häufigsten Bereich ab. Dichtheitsklasse C wird gemäß DIN EN 16798-3 als Standardwert für Luftverteilungsanlagen empfohlen, mindestens aber Dichtheitsklasse B.

Quelle: (221)

3.9.5 Einbauten zur Gefahrstoffentfernung aus dem Luftstrom und zur Konditionierung der Luft

Bei vielen Anwendungen der Prozesslufttechnik sind zwischen dem Eintritt von Luft in das System und dem Austritt aus dem System eine oder mehrere Einbauten zu durchströmen, welche eine Veränderung der Luftqualität bezwecken. Typische Aufgaben dieser eingebauten Systeme sind

- Abscheidung von Staub und Aerosolen (meist über speichernde bzw. abreinigbare Filtersysteme oder Schwerkraftabscheider),
- Abscheidung von gasförmigen Gefahrstoffen (meist über Wäscher oder reaktive bzw. adsorbierende Filter),
- Änderung der Temperatur des Luftstroms (Wärmeübertrager),

- Be- oder Entfeuchtung des Luftstroms,
- Schalldämpfung.

Speziell unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz sind diese Einbauten auf Grund des von ihnen verursachten Druckverlustes relevant. Sofern hinsichtlich der zu erreichenden verfahrenstechnischen Wirkung (=primäres Auswahlkriterium!) mehrere gleichwertige Alternativen verfügbar sind, sollen die Systeme/Komponenten mit dem geringsten zusätzlichen Druckverlust ausgewählt werden.

Insbesondere Luftfilter sind Komponenten, bei denen infolge ihrer verfahrenstechnischen Funktion (Rückhaltung von Gefahrstoffen) während der Betriebszeit der Druckverlust zunimmt. Der regelmäßigen Überwachung und Wartung, z. B. durch rechtzeitigen Austausch von beladenem Filtermaterial, kommt deshalb eine große Bedeutung zu.

Jedoch beeinflussen verschiedene Filtermaterialien (Synthetikmaterialien mit oder ohne elektrostatischer Aufladung, Glasfasermaterialien etc.) und Konstruktionen (Filtermedienfläche etc.) in hohem Maße die Abscheideleistung, den Druckverlust, die Standzeit und den Energieverbrauch.

Stand der Technik ist es, die Auswahl der Filter unter dem Gesichtspunkt der Lebenszykluskosten vorzunehmen. Folgende Zusammenhänge sind unter Effizienzgesichtspunkten besonders wichtig:

- Längere Standzeiten führen zu niedrigeren Wartungskosten.
- Ein über die Betriebszeit langsamerer ansteigender Druckverlust führt zu geringeren Energiekosten.

Daher sind allein auf den Anschaffungskosten basierende Auswahlentscheidungen oft nicht die wirtschaftlichsten Lösungen (226).

3.9.6 Auswahl des Ventilators

Beschreibung und Betriebsdaten

Der Auswahl von Ventilator-Bauart, Größe bzw. Leistung sollte eine exakte Berechnung des Druckverlustes im Kanalsystem und des benötigten Volumenstroms an den Absaug- bzw. Belüftungsorten zu Grunde liegen. Zusätzlich müssen eventuell erforderliche Systeme zur Gefahrstoffentfernung oder sonstigen Konditionierung des Luftstroms berücksichtigt werden. Bei Ventilatoren wird die Luft durch einen Rotor beschleunigt. Die Luftströmung weist nach dem Ventilator einen dynamischen und einen statischen Druckanteil auf.

Die wichtigsten Bauformen von Ventilatoren in der industriellen Lufttechnik sind:

- Radialventilatoren mit vorwärts gekrümmten Schaufeln,
- Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln (nach dem Stand der Technik besonders häufig eingesetzt, auch als freilaufende Räder),
- Diagonalventilatoren,
- Seitenkanalverdichter,
- Axialventilatoren,
- Querstromventilatoren.

Die Vielfalt der technischen Lösungen wird nochmals durch die Möglichkeit der mehrstufigen Ausführung, vor allem für das Erreichen höherer Druckdifferenzen, erweitert. Die Hauptunterschiede zwischen den beiden Bauformen der Radialventilatoren sind der Wirkungsgrad und die Anschaffungskosten. Dabei hat der Radialventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln einen höheren Wirkungsgrad. Konstruktions- bzw. installationsbedingt sind in vielen Fällen die Investitionskosten der Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln etwas höher, die

Betriebskosten auf Grund des höheren Wirkungsgrades aber niedriger. Bei hohen Benutzungsstundenzahlen ist diese Bauform deshalb meist wirtschaftlicher.

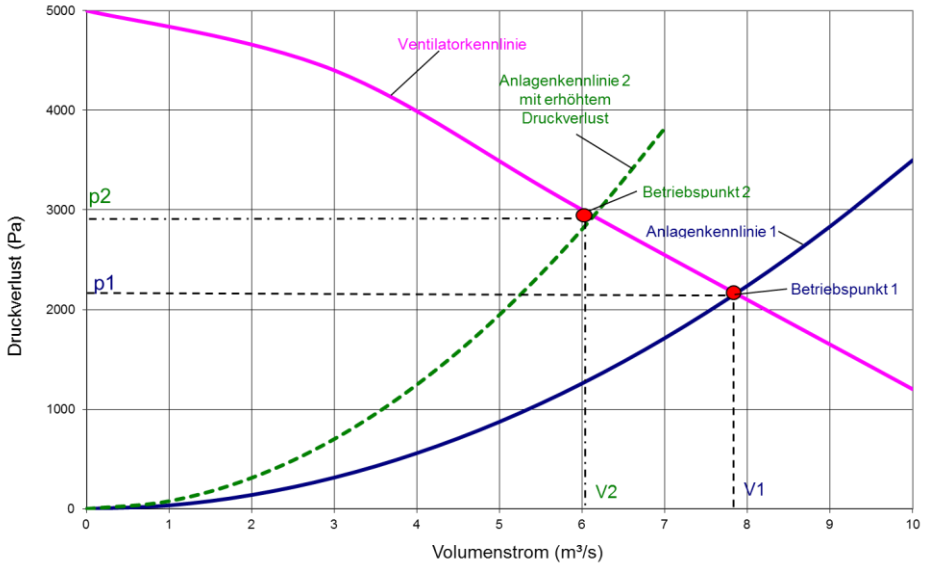
Aufgrund der unterschiedlichen Laufraddurchströmung haben die genannten Ventilatorbauarten unterschiedliche Betriebseigenschaften und eignen sich somit für unterschiedliche Einsatzfälle.

Welcher Ventilator am effizientesten ist, hängt nicht nur von der Technik des Antriebsmotors (siehe Kapitel 3.8.5) ab, sondern auch vom Laufrad und von der Bauform des gesamten Ventilators. Die Einbausituation muss so erfolgen, dass eine möglichst ungestörte und über den Querschnitt möglichst gleichmäßige Zu- und Abströmung der Luft möglich ist. Um gute Wirkungsgrade zu erreichen, sollte beispielsweise das Laufrad eines Axialventilators in einem aerodynamisch optimierten Wandring positioniert sein. Bei Radialventilatoren wird die Strömung über eine feststehende und in den Saugmund des Laufrades eintauchende Einlaufdüse in das Laufrad geleitet (220).

Der vom Ventilator bereitgestellte Druck und Volumenstrom sind keine fixen Größen. Die Leistungsgrenze des Ventilators ist durch die Ventilatorkennlinie definiert, welche zur jeweils maximalen Druckdifferenz den zughörigen Volumenstrom angibt. Zur Bestimmung der Baugröße des Ventilators wird eine genau berechnete Anlagenkennlinie mit unterschiedlichen Betriebszuständen ermittelt. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen erforderlicher Druckerhöhung und Fördervolumenstrom. Der Betriebspunkt der lufttechnischen Anlage ergibt sich, wie in Abbildung 3.9-3 dargestellt, aus dem Schnittpunkt aus Anlagen- und Ventilator-Kennlinie. (227) (228) (229) Mit der Ventilator-Kennlinie des Herstellers werden die Wirkungsgrade in den Betriebspunkten bestimmt, welche für den angebotenen Ventilator maximale Werte aufweisen sollten.

In der Ökodesign-Richtlinie Nr. 327/2011 (230) werden die Anforderungen an die energieeffiziente Gestaltung von Ventilatoren mit einer elektrischen Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW definiert. Das darin definierte Kriterium für die Energieeffizienz von Ventilatoren ist der Systemwirkungsgrad bzw. Gesamtenergieeffizienz, der sich aus den Wirkungsgraden des Ventilators, des Motors und der Steuerungselektronik zusammensetzt.

Abbildung 3.9-3: Ventilator-Kennlinie



Quelle: (228)

Die Anforderungen wurden per 1. Januar 2015 in einer zweiten Stufe nochmals angehoben (siehe Tabelle 3.9-2).

Tabelle 3.9-2: Ab 2015 geltende Wirkungsgrade für Ventilatoren gemäß Ökodesign-Richtlinie Nr. 327/2011 Angabe der Stützwerte*

Ventilatorkategorie	Mess-kategorie (A–D)	Ventilator-druck	Leistungsbereich > 0,125 kW Wirkungsgrade	Leistungsbereich > 10 kW Wirkungsgrade	Leistungsbereich > 500 kW Wirkungsgrade
Axialventilator	A, C B, D	statisch total	28 46	40 58	43 61
Radialventilator mit vorwärtsgekrümmten Schaufeln und Radialventilator mit Radialschaufeln	A, C B, D	statisch total	32 37	44 49	47 52
Radialventilator mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln **ohne** Gehäuse	A, C	statisch	42	62	66
Radialventilator mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln **mit** Gehäuse	A, C B, D	statisch total	41 44	61 64	65 68
Diagonalventilator	A, C B, D	statisch total	30 42	50 62	54 66
Querstromventilator	B, D	total	16	21	21

* Zwischen den benannten Stützwerten ist der Mindestwirkungsgrad über eine jeweils in (229) vorgegebene Interpolationsformel zu berechnen.

Quelle: (230)

3.9.7 Motor und Getriebe

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, gilt stets primär, den für eine Förderaufgabe am besten geeigneten Ventilator auszuwählen, um darauf aufbauend die korrekte Größe des Motors bestimmen zu können. Die Leistungsübertragung kann dabei direkt vom Motor erfolgen oder indirekt mit einer Drehzahlübersetzung.

Aus Sicht der Energieeffizienz sind direkte Antriebe stets zu bevorzugen. Die Energieverluste bei indirekter Kraftübertragung können bis zu 20 % betragen und müssen bei der Motorenauswahl berücksichtigt werden. Die Notwendigkeit einer indirekten Übertragung kann aber durch Randbedingungen der Anwendungsaufgabe, z. B. Ex-Schutz/Brandschutz, vorgegeben sein (229).

In der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG (231) werden nach der EU-Verordnung Nr. 640/2009 (232) und Nr. 4/2014 (200) die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren nach deren IE-Effizienzklassen (IE = International Efficiency), IEC 60034-30 (120) festgelegt.

Elektromotoren mit einer Leistung von 0,75 - 375 kW müssen seit 2017 entweder

- die IE3-Norm (Premiumwirkungsgrad) oder
- die IE2-Norm (gehobener Wirkungsgrad) unter Verwendung eines Frequenzumrichters sowie
- die Nenn-Mindesteffizienz nach Anhang I, Nummer 1 der EU-Verordnung Nr. 640/2009

erfüllen.

Seit 2014 stehen die Spezifikationen für die Energieeffizienzklasse IE4 (Super Premium Effizienz), die im Jahr 2014 offiziell in den Entwurf der Norm IEC 60034-30-1 aufgenommen wurde, zur Verfügung. Diese wurde mit der Klassifizierung IE5 (Ultra Premium) gemäß IEC 60034-30-2 für drehzahlverstellbare Motoren mit einer Leistung von 11 kW abgelöst und stellt seit Januar 2017 die am Markt beste verfügbare Technik dar. (201) Insbesondere für Anlagen, die auch im Teillastbereich betrieben werden, ergeben sich deutliche Einsparungen bei Einsatz von IE4- bzw. IE5-Motoren.

Weitere Anforderungen werden im Kapitel 3.6 „Durch Elektromotoren angetriebene Subsysteme“ beschrieben.

3.9.8 Steuerung und Regelung des Lufttechnischen Anlagen

Beschreibung und Betriebsdaten

Die Regelung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Energieeffizienz und den Lebenszyklus. Viele Anwendungen benötigen keine konstante Leistung, sondern nur in relativ wenigen Betriebsstunden die maximale Auslegungsleistung. Ein effizienter Betrieb ist nur in Kombination mit übergeordneten Steuerungen und Leitsystemen zu erreichen. Die Regelgrößen und Regelungskonzepte sind vielfältig und für jede Anwendung spezifisch erstellt. In diesem Merkblatt werden nur kurz die wesentlichen Konzepte zur Beeinflussung des Volumenstroms und der Druckdifferenz aufgezeigt. Die Wahl der energieeffizientesten Regelstrategie ist insbesondere von einer gut ermittelten Anlagenkennlinie abhängig. Lufttechnische Anlagen sind installationsseitig oft mit Gebäuden verbunden. Auch bei neuen Investitionsvorhaben innerhalb vorhandener Industrie-Infrastruktur kommt es deshalb relativ häufig zu technischen Schnittstellen mit Systemen des vorhandenen Bestandes. Deshalb wird im Folgenden auch kurz auf mechanische Regelungen eingegangen, welche nicht mehr Stand der Technik sind.

Mechanische Regelungen (überwiegend nicht mehr Stand der Technik)

Mechanische Volumenstromregelungen (Drossel-, Bypass- und Drallregelung) reduzieren den vom bzw. zum Anwendungsbereich gerichteten Volumenstrom, ohne dass sich die Leistungsaufnahme des Ventilators wesentlich ändert. Dadurch sind diese Regelungen sehr ineffizient und sollten nur noch in Ausnahmefällen eingesetzt werden, z. B. wenn die Anlagen überwiegend in Volllast betrieben werden und der Volumenstrom nur selten reduziert werden muss.

- ***Drosselregelung***

  Durch einen verstellbaren Widerstand (Drosselklappe) im Leitungskanal wird der Druckverlust erhöht und die Anlagenkennlinie steiler (siehe Abbildung 3.9-3 Betriebspunkt 2). Die Leistungsaufnahme des Motors ändert sich unwesentlich, jedoch sinkt der Volumenstrom merklich. Aus energetischer Sicht ist von dieser Regelung abzusehen, da ein Teil der Strömungsenergie nicht genutzt werden kann und so der Wirkungsgrad der Anlage sinkt.

- ***Bypassregelung***

  Bypass ist eine Umgehungsleitung von der Druckseite zur Saugseite des Ventilators. Durch Öffnen des Bypasses sinkt der effektive Fördervolumenstrom bei gleichzeitiger Reduzierung der Druckerhöhung durch den Ventilator. Dabei kann aber der Energieverbrauch des Ventilators durch einen schlechteren Wirkungsgrad steigen, weshalb in der Praxis von der Bypassregelung abgesehen wird.

- ***Drallregelung***

  Ein Drallregler ist ein Leitrad mit verstellbaren Schaufeln vor dem Ventilator, durch den die Luft in eine Drehbewegung (Drall) versetzt wird. Drehen sich Leitrad und Ventilator in die gleiche Richtung (Gleichdrall) nimmt der Fördervolumenstrom ab, bei Gegendrall kann er sogar höher liegen als der Nennvolumenstrom des Ventilators. Letzteres funktioniert jedoch nur bei Axialventilatoren, daher werden Drallregler bei rückwärts gekrümmten Radialventilatoren nur zur

Reduzierung eingesetzt. Neben dem Volumenstrom sinkt auch die Leistungsaufnahme des Ventilators bei einem Wirkungsgradverlust von 2 bis 3 %. Drallregler sind nur sinnvoll für Anlagen, die überwiegend bei maximalem (Volllast) bzw. leicht verminderten Volumenstrom (oberer Teillastbereich) arbeiten.

Drehzahlregelung

Die Drehzahlregelung bezieht sich auf das Antriebsaggregat des Ventilators, in der weit überwiegenden Zahl der Anwendungsfälle einen Elektromotor (siehe dazu auch Kap 3.6 des BVT-Merkblattes Energieeffizienz). Die Drehzahlregelung verschiebt die Ventilatorkennlinie, wodurch sich der Betriebspunkt ändert. Bei richtiger Auslegung wandert der Betriebspunkt entlang der besten Wirkungsgradlinie. So wird eine Volumenstromänderung bei gleichzeitiger Änderung der Leistungsaufnahme des Elektromotors erreicht. Diese Form der Regelung ist geeignet für alle Anlagen, die häufig unterschiedliche Luftmengen benötigen. Zur stufenlosen Regulierung der Motordrehzahl werden nach dem aktuellen Stand der Technik vorrangig Frequenzumrichter verwendet. Die höchste Effizienz wird beim Einsatz von EC-Motoren erreicht.

Drehzahlregelung mit Frequenzumrichtern bei den noch weit verbreiteten Antrieben mit Asynchronmotoren ist besonders effizient, wenn die Anlage überwiegend im mittleren Teillastbereich (30 % - 80 % der Volllast) arbeitet.

Laufschaufelregelung bei Axialventilatoren

Bei Axialventilatoren kann durch Verstellen der Laufschaufeln der Volumenstrom erhöht oder gesenkt werden. So kann der Volumenstrom zwischen Null und hundert Prozent eingestellt werden bei gleichzeitig guten Wirkungsgraden.

Laufschaufelregelung ist daher von Vorteil, wenn der Volumenstrom in einem großen Variationsbereich benötigt wird und/oder wenn Betriebspunkte auf stark unterschiedlichen Widerstandslinien liegen.

3.9.9 Instandhaltung

Beschreibung und Betriebsdaten

Um eine dauerhaft optimale Erfüllung der verfahrenstechnischen Aufgabe einerseits und der Energieeffizienz andererseits zu erreichen, müssen lufttechnische Anlagen überwacht und in einem guten Zustand gehalten werden. In regelmäßigen Abständen muss auf Ablagerungen kontrolliert und gegebenenfalls gereinigt werden, insbesondere bei Hygieneanlagen (siehe auch Kapitel 2.9 „Instandhaltung“ sowie analog zu den Ausführungen in Kapitel 3.8.7 des BVT-Merkblattes Energieeffizienz). Gesetzlich ohnehin vorgeschriebene Überprüfungszyklen, z. B. wegen der Handhabung von Gefahrstoffen bzw. der Sicherheit von Arbeitsstätten sollten zweckmäßigerweise auch für die Prüfung von Kriterien der Energieeffizienz mit genutzt werden.

3.9.10 Erreichter Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit und andere Überlegungen für die Lufttechnik

Erreichter Umweltnutzen

Lufttechnische Anlagen sind sehr häufig Bestandteil moderner Fertigungsstätten. Auf diese entfällt allerdings in vielen industriellen Prozessen auch ein hoher Anteil am Energieverbrauch. Viele lufttechnische Anlagen dienen der gezielten Erfassung und Rückhaltung von Gefahrstoffen, so dass deren primärer Nutzen die Emissionsminderung ist. Die Anwendung der besten verfügbaren Techniken bei lufttechnischen Systemen bietet im Vergleich zum tatsächlichen technischen Stand ein hohes Energieeinsparpotential und führt damit zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung. Dies wird oft auch als ökonomischer Vorteil unmittelbar messbar. Die meisten Effizienzmaßnahmen mit Bezug auf veraltete lufttechnische Anlagen sind mit Amortisationszeiten von weniger als zwei

Jahren und hohen Kapitalrenditen von über 25 Prozent für Unternehmen wirtschaftlich sehr attraktiv (229).

Medienübergreifende Wirkungen

Keine Daten vorliegend.

Anwendbarkeit

Die Anwendbarkeit des beschriebenen Vorgehens zur Planung, Betrieb, Instandhaltung neuer Anlagen und Ersatz bestehender lufttechnischer Anlagen ist für jeden Bereich gegeben. Das Maß der Energie- und Kosteneinsparungen ist dabei abhängig von der Anlagengröße und der spezifischen Förderaufgabe und ist immer in einem Kosten-Nutzen-Verhältnis zu betrachten. Dazu sollte die Bearbeitung immer durch qualifizierte Fachplaner in Verbindung mit der Anwendung entsprechender Planungssoftware vorgenommen werden. Dadurch wird sichergestellt, dass der Volumenstrombedarf hinsichtlich Qualität und Quantität nachvollziehbar ermittelt wird. Darauf aufbauend kann die Auslegung des lufttechnischen Systems auf den Bedarf bezogen werden. Der Planungsprozess ist nachvollziehbar zu dokumentieren.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die in dem Kapitel 3.9 aufgeführten Maßnahmen helfen, eine Auswahl energieeffizienter Systeme zu treffen. Mit der Lebenszykluskostenrechnung (LCC - Life Cycle Costing) lassen sich lufttechnische Anlagen unter Berücksichtigung aller relevanten Kosten auf ihre Wirtschaftlichkeit hin vergleichen. Somit erweisen sich umweltfreundliche Produkte bei höheren Investitionskosten dennoch als wirtschaftliche Variante. (233) Die Lebenszykluskostenrechnung setzt sich im Wesentlichen aus den folgenden Kosten zusammen:

- Investitionskosten,
- Installationskosten,
- Kapitaldienst,
- Betriebskosten (Strom, Wärme, Wasser, Kühlmittel),
- Filterwechselkosten,
- Wartungs- und Instandhaltungskosten,
- Entsorgungskosten.

Durch den Vergleich der LCC von neu geplanten und bestehenden Anlagen ist es möglich, für die spezifische Anforderung ein effizientes und wirtschaftliches System auszuwählen.

Triebkraft für die Umsetzung

Einsparungen von Energie und Kosten.

3.10 Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen <Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systems

Einführung

Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen (im Weiteren wird die englische Abkürzung HVAC benutzt) stellen wichtige technische Komponenten für die zweckmäßige Nutzung von IED-Anlagen dar, auf die oft ein erheblicher Anteil am gesamten Energieverbrauch der Anlage entfällt. HVAC wird im Folgenden als eine Querschnittstechnologie behandelt, obwohl es sich dabei streng genommen um eine Kombination mehrerer verschiedener Querschnittstechnologien, nämlich insbesondere

- Wärmeerzeugung und -verteilung (vgl. u. a. Kap.3.1 – Feuerungsanlagen und3.2 – Dampfsysteme)

- Kälteerzeugung und -verteilung sowie Wärmeübertragung (Heizung bzw. Kühlung incl. sogenannte Rückgewinnungssysteme) (vgl. auch Kap.3.3 – Wärmerückgewinnung und Rückkühlsysteme)
- Lüftungssysteme (Förderung und Verteilung von Luftströmen) (vgl. Kap. 3.10.3 bzw. Kap. 3.9)
- Pumpensysteme (Förderung und Verteilung von flüssigen Medien) (vgl. Kap. 3.8)

handelt, für welche teilweise auch noch gesonderte Fachkapitel dieses BVT-Merkblattes vorliegen. Der Fokus der folgenden Darstellung liegt deshalb auf den Effekten, welche sich durch Schnittstellen zwischen den Einzeltechnologien sowie deren Kombination und äußeren Randbedingungen ergeben.

HVAC-Anlagen im Sinne dieses BVT-Kapitels werden insbesondere eingesetzt, um:

- die erforderlichen Arbeitsbedingungen (Raumtemperatur und Luftqualität am Arbeitsplatz) zu erhalten,
- die Produktqualität aufrecht zu erhalten (z. B. in Kühlräumen) und
- die Qualität der zu verarbeitenden Materialien sowie die Behandlungsmerkmale zu gewährleisten, soweit deren Handhabung in Räumen stattfindet, die gleichzeitig Arbeitsplätze beinhalten (z. B. Verhütung von
  - Korrosion und Verschmutzung an Aufbereitungsbauteilen bei der Oberflächenbehandlung in der Metallindustrie,
  - Verschmutzungen von Kontakten und isolierenden Bauelementen in der Elektronikindustrie,
  - Ausbreitung von Keimen in der Lebensmittelindustrie).

Zur Bewertung der Effizienz solcher Systeme sind zahlreiche Randbedingungen zu beachten, die wichtigsten davon sind:

- Nutzungsart der Räume (z. B. Büro, Produktionshalle, Werkshalle, Kühlraum),
- klimatische Bedingungen am Standort (z. B. wesentliche Unterschiede zwischen Süd- und Nordeuropa),
- konstruktive Randbedingungen der Gebäudehülle und der Innenausbauten,
- Qualität und Alter der Gebäudehülle (Wärmedurchgangskoeffizient der einzelnen Bauteile, Wärmebrücken, Undichtigkeiten usw.).

Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die gebäudetechnische Ausrüstung. Hinzu kommt, dass durch ein großes Spektrum an verfügbaren Technologien oft verschiedene Kombinationen technischer Einzelkomponenten möglich sind, die eine eindeutige Bewertung und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systemlösungen erschweren.

Im nachfolgenden Kapitel wird daher nur ausnahmsweise auf technologische Details von Einzelkomponenten eingegangen, in der Regel wird auf die entsprechenden BVT-Fachkapitel der jeweiligen Querschnittstechnologie verwiesen. Ausnahmen sind insbesondere dann gegeben, wenn sie Technologien betreffen, die nicht in die Systematik der anderen Fachkapitel dieses BVT-Merkblattes fallen.

Stattdessen spielen bei HVAC-Anlagen zum Erreichen der besten verfügbaren Technik die methodischen Aspekte

- qualifizierte Planung,
- bedarfsgerechte Betriebsführung und
- fachgerechte Instandhaltung

eine entscheidende Rolle.

Die folgenden Kapitel beziehen sich auf den gebäudetechnischen Aspekt der Konditionierung des Innenraumklimas für Arbeitsbereiche in geschlossenen Räumen.

Ausschließlich prozessrelevante Klimatisierung, z. B. innerhalb von Maschinen und Anlagen, ist nicht Teil der Betrachtung.

Weiterhin geht das Kapitel nicht detailliert auf die Innenraumklimatisierung von Gebäuden oder Gebäudeteilen ein, deren Nutzung durch Büro- sowie Sozialbereiche bestimmt werden. Dies ist damit zu begründen, dass diese Nebenbereiche im Vergleich zum Hauptprozess der IED-Anlage nur eine untergeordnete Rolle spielen und in der Regel nicht Gegenstand umweltrechtlicher Bewertungen im Rahmen von Genehmigungsverfahren für IED-Anlagen sind.

Dementsprechend konzentrieren sich die folgenden Darstellungen auf die Funktionen Beheizung, Kühlung sowie Lüftung/Klimatisierung von Gebäuden, in denen sich relevante Bereiche von IED-Anlagen befinden können, also beispielsweise Produktionshallen oder klimatisierte Lagerbereiche.

Obwohl die benannten Funktionen oft in Systemlösungen miteinander verbunden sind, erfolgt die Beschreibung aus Gründen der Übersichtlichkeit und Systematik in getrennten Teilkapiteln.

Die für die Ausarbeitung von BVT-Merkblättern vorgeschrieben Teilaspekte

- Erreichter Umweltnutzen,
- Medienübergreifende Wirkungen,
- Anwendbarkeit,
- Betriebswirtschaftliche Aspekte,
- Triebkraft für die Umsetzung und Beispiele

werden gesammelt im Kapitel 3.10.4 abgehandelt.

3.10.1 Heizsysteme

3.10.1.1 Analyse, Planung und Betrieb von Heizsystemen

Eine qualifizierte Planung und Optimierung von Neu- und Bestandsanlagen zur Versorgung von Arbeitsbereichen mit Raumwärme setzt eine hinreichende Analyse der Versorgungsaufgabe, ggf. der Bestandssituation und der Rahmenbedingungen voraus. Methodisch ist es zweckmäßig, die Systemauslegung in entgegengesetzter Richtung des Energieflusses vorzunehmen. Dementsprechend sind für eine bedarfsgerechte Systemkonfiguration und einen langfristigen energieeffizienten Betrieb folgende Teilaufgaben zu berücksichtigen:

1. Wärmebedarf: Analyse des Nutzwärmebedarfs in der Anwendungsebene,
2. Wärmeübergabe: Auswahl von geeigneten Wärmeübergabeeinrichtungen,
3. Wärmeverteilung: Auslegung von Wärmeverteilsystemen und Vorgaben für die Rohrdämmung,
4. Wärmeerzeugung: Kriterien für die Auswahl und Dimensionierung geeigneter Wärmequellen,
5. Steuerung, Regelung, Energiedatencontrolling von Heizsystemen,
6. Instandhaltung von Heizsystemen.

3.10.1.2 Wärmebedarf

Beschreibung

Der Nutzwärmebedarf ist definiert als rechnerisch ermittelter Wärmebedarf, der zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumkonditionen innerhalb einer Gebäudezone während der Heizzeit benötigt wird (234). Das methodische Vorgehen zur Ermittlung des Nutzwärmebedarfs wird im Folgenden beschrieben.

Betriebsdaten

Zonierung

Bei unterschiedlichen konstruktiven Aufbauten und/oder Nutzungen innerhalb von Gebäudekomplexen ist es notwendig, jeweils gleichartige Teilabschnitte des Gebäudes zu Zonen zusammen zu fassen.

Anschließend wird für jede Zone der entsprechende Nutzwärmebedarf berechnet. Die Summe der Nutzwärmebedarfe aller Zonen ergibt den Gesamtnutzwärmebedarf.

Kategorien von Nutzungsarten

Bei der Bildung von Bereichen gleicher Nutzung wird jeder Bereich einer Kategorie zugeordnet, z. B.:

- Büroflächen,
- Lager, Technikräume, Archive,
- gewerbliche und industrielle Hallen,
- Lagerhallen und Logistikhallen.

Aus jeder dieser Kategorien ergeben sich spezifische Anforderungen an die Raumtemperatur. Diese Anforderungen sind sowohl in Normen (235) als auch in Regelungen zum Arbeitsschutz (236) festgehalten. Ein Beispiel hierfür ist in Tabelle 3.10-1 aufgezeigt.

Tabelle 3.10-1: Mindestwerte der Lufttemperatur in Arbeitsräumen

Überwiegende Körperhaltung	Arbeitsschwere		
	Leicht	Mittel	Schwer
Sitzen	+20°C	+19°C	-
Stehen, Gehen	+19°C	+17°C	+12°C

Quelle: (236)

Bestimmung des Nutzwärmebedarfes

Auf der Grundlage der Zonenfestlegungen und Nutzungsarten ist unter Einbeziehung weiterer Randbedingungen, wie Außentemperaturen und Nutzungsintensität, der Nutzwärmebedarf mit einer geeigneten Methode (z. B. dem Monatsbilanzverfahrens (237)) zu ermitteln.

Der Nutzwärmebedarf in jeder Gebäudezone wird außerdem beeinflusst durch die Bilanz der zusätzlich auftretenden Energiezu- und -abflüsse in Form von Wärmequellen und -senken (237).

Hierbei sind folgende Wärmequellen und -senken in den Bilanzierungsprozess mit einzubeziehen:

- Transmissionswärmesenken oder -wärmequellen infolge von Wärmeleitung in den Bauteilen und Wärmeübergang an den Bauteilen der Begrenzungsflächen der Gebäudezone;
- Lüftungswärmesenken oder -wärmequellen infolge von Luftaustausch der Raumluft durch Außenluft (lnfiltration und Fensterlüftung) und/oder durch Luft aus anderen Gebäudezonen;
- Lüftungswärmesenken oder -wärmequellen infolge von Luftaustausch der Raumluft mit Hilfe von Lüftungssystemen durch in der Regel vortemperierte Zuluft;
- solare Wärmequellen (Wärmeeinträge) infolge von solarer Einstrahlung durch transparente Bauteile;
- Wärmesenken oder Wärmequellen infolge von Strahlungsabsorption und Wärmeabstrahlung an der Außenfläche nicht transparenter Bauteile;
- interne Wärmequellen oder Wärmesenken durch Betrieb von Produktionsanlagen, sonstigen Geräten, künstliche Beleuchtung, Körperwärme von Mensch und Tier, Einbringen von warmen

oder kalten Materialien in die Gebäudezone, Durchleitung von Heiz- oder Kühlmedien in Verteilleitungen und Luftkanälen;
- bei reduziertem Heizbetrieb außerhalb von Produktionszeiten bzw. Nutzungszeiten der jeweiligen Räume ist ein Übertrag der an Nutzungstagen in den Raumumschließungsflächen sowie den im Rauminneren vorhandenen Gegenständen gespeicherter und an den Tagen des reduzierten Betriebs entspeicherter Wärme zu berücksichtigen.
- thermisch aktivierte Betondecken (Betonaktivierung) ermöglichen auf Grund des sehr großen thermischen Puffervermögens eine erhebliche Reduzierung der zu installierenden Heizleistung (Auslegung nicht auf extreme Minustemperaturen).

Beste verfügbare Technik zum Erreichen einer hohen Energieeffizienz im Bereich der Heizsysteme schließt auch die Berücksichtigung von Einflussgrößen und Randbedingungen für die Minimierung des Nutzwärmebedarfs ein, insbesondere

- die Minimierung der Wärmeverluste (z. B. Dämmung der Gebäudehülle),
- Begrenzung der Innenraumtemperatur auf das erforderliche Niveau,
- Minimierung der offenen Zeiten von Fenstern, Türen und Toren usw.,
- Einsatz effizienter Wärmerückgewinnungssysteme (vgl. Kapitel 3.3) in Verbindung mit technischen Be- und Entlüftungsanlagen für Räume mit hohen kontrollierten Luftwechselraten,
- gezielte Nutzung der Möglichkeiten der Bauteilaktivierung (Nutzung der Wärmespeicherkapazität massereicher Gebäudekomponenten, wie z. B. Betonelementen/-fundamenten/-decken). Die Bauteilaktivierung wird zukünftig eine immer größere Bedeutung bekommen, da hiermit eine teilweise Entkopplung von Betriebszeiten der Wärmeerzeugung und Bedarfszeiten zur Raumbeheizung möglich ist;
- darüber hinaus sind Funktionen der Sektorkopplung im Rahmen des Regelenergiemanagements möglich. Beispielsweise kann mit Wärmepumpen in Verbindung mit Bauteilaktivierung der Strombezug zeitlich flexibel und stromnetzdienlich gesteuert werden.

Der Nutzwärmebedarf ergibt sich aus der Differenz zwischen der ermittelten Bilanz und der Wärmemenge, die zum Erreichen der nutzungsspezifischen Solltemperatur aufzuwenden ist (237).

Für den so ermittelten Wärmebedarf sind anschließend die technischen Komponenten zum Eintrag der Wärme in die entsprechende Zone auszulegen. Die Auslegung der Komponentenleistung, in der Summe als Heizlast bezeichnet, wird im Regelfall auf den standortbezogen anzunehmenden klimatischen Extremfall, also die maximale Differenz zwischen Innenraum- und Außentemperatur bezogen. Ein genormtes Berechnungsverfahren für die Auslegungs-Heizlast ist in der europäischen Norm DIN EN 12831 (238) dargelegt.

3.10.1.3 Wärmeübergabe

Beschreibung

Als Wärmeübergabe ist der unmittelbare Wärmeenergieeintrag in den zu beheizenden Raum definiert. Dabei sind praktisch zwei physikalische Grundprinzipien von Bedeutung:

- Konvektiver Wärmeeintrag (Zuführen von erwärmter Luft),
- Wärmestrahlung.

Konvektive Wärmeeinträge sind insbesondere dann vorteilhaft anwendbar, wenn:

- die Raumluft auf Grund hygienischer oder technologischer Anforderungen gezielt auf mehrere Parameter (Temperatur, Feuchte, Reinheitsgrade) eingestellt werden muss,
- der Raumluftinhalt auf Grund hygienischer oder technologischer Anforderungen durch relativ große Mengen Frischluftanteile ersetzt werden muss (hohe Luftwechselzahlen),

- niedrige Raumhöhen und komplexe, großvolumige Einbauten in den Räumen vorhanden sind,
- bei nur zeitweise benutzten Arbeitsbereichen eine schnelle Aufheizung der Raumluft erforderlich ist,
- regelmäßig Abwärme mit niedriger Temperatur als Ressource für Heizenergie verfügbar ist, z. B. von Kompressorenanlagen.

Nachteile der konvektiven Wärmeeinträge sind insbesondere

- Schichtung von Raumluft unterschiedlicher Temperatur, vor allem in hohen Räumen, oft entgegengesetzt zur Bedarfssituation (hohe Temperatur im Deckenbereich, niedrige Temperatur im Arbeitsbereich am Boden), meist verbunden mit erhöhten Wärmeverlusten über die Gebäudeaußenhülle,
- Zuglufterscheinungen im Bereich der Lufteintragszonen,
- Aufwirbelung und Verteilung von Staubpartikeln,
- relativ hohe Wärmeenergieverluste bei vorhandenen Gebäudeöffnungen bzw. häufig offen stehenden Türen und Toren zu Außenbereichen, z. B. bei starkem Transportaufkommen.

Wärmestrahlungsbasierte Heizsysteme sind insbesondere dann vorteilhaft anwendbar, wenn:

- Der Heizzweck vor allem auf die Behaglichkeit von Personen in ihrer Arbeitsumgebung ausgerichtet ist und keine erhöhten Anforderungen an Luftwechsel und Luftqualitätsparameter bestehen,
- bei hohen Räumen/Werkshallen,
- bei häufig offen stehenden Türen und Toren zu Außenbereichen.

Wärmestrahlungsbasierte Heizsysteme erreichen gegenüber konvektiven Heizsystemen ein vergleichbares Behaglichkeitsempfinden von Personen bei deutlich niedrigerer mittlerer Raumlufttemperatur. Wenn der Heizzweck primär auf die Behaglichkeit von Personen ausgerichtet ist, sind wärmestrahlungsbasierte Heizsysteme deshalb meist energieeffizienter, weil sie den gleichen Nutzen mit geringerem Endenergieeinsatz erreichen.

Typische Anwendungen von Strahlungsheizungen in Industriehallen benötigen im Vergleich zu konvektiven Heizungen 20 – 30 % weniger Endenergie bei gleichem Wärmekomfort in den Arbeitsbereichen.

Betriebsdaten

Luftheizer/Lufterhitzer (LH) (Einzelgeräte oder in Verbindung mit Klimatisierungsanlagen)

Lufterhitzer sind konvektive Wärmeeintragsapparate, bei denen ein Luftstrom, dessen Temperatur über der Raumtemperatur liegt, in den Raum eingeleitet wird. Der Luftstrom wird durch einen Ventilator gefördert und vor Einleitung in den Raum gerichtet über Wärmeübertragerflächen (Heizregister) geführt. In der Regel bieten Lufterhitzer die Möglichkeit, Außenluft einzubinden – sie können dann mit Um-, Außen- oder Mischluft betrieben werden. Lufterhitzer können prinzipiell auch zur Kühlung eingesetzt werden; ggf. ist ein Kondensatablauf vorzusehen (239).

Lufterhitzer können auch Bestandteil einer komplexeren Klimatisierungsanlage sein, in welcher außer der Temperatur auch noch andere Raumluftparameter beeinflusst werden.

Zur Vermeidung der technologischen Nachteile des konvektiven Wärmeeintrags sind folgende Maßnahmen beste verfügbare Technik:

- Großflächige Lufteintragsbereiche im Höhenniveau der Arbeitsbereiche mit sehr geringen Temperaturüberhöhungen und geringen Strömungsgeschwindigkeiten,
- optimierte Anordnung von Eintragsbereichen der Zuluft und Absaugbereichen von Abluft, ggf. in Verbindung mit gezielter Umwälzung der Raumluft zur dauerhaften und wirksamen

Unterdrückung von Schichtenbildung unterschiedlich temperierter Raumluftanteile (Temperatur-Differenz-Ausgleichssysteme).

Hellstrahler (HS)

Hellstrahler sind Strahlungsheizgeräte, die durch eine relativ kleine abstrahlende Oberfläche und eine hohen Oberflächentemperatur gekennzeichnet sind (meist 800 – 1200 °C). Damit verbunden ist ein hoher Anteil kurzwelliger infraroter Strahlung bis in den Rot- und Gelb-Bereich des sichtbaren Lichts. Als Endenergieträger zum Aufheizen der Abstrahlfläche werden entweder elektrische Energie oder gasförmige Brennstoffe (Erd- oder Flüssiggas) verwendet. Bei letzteren erfolgt eine flammlose Verbrennung an einer hochtemperaturbeständigen porösen Brennfläche. Die Strahlung erwärmt die angestrahlten Oberflächen direkt; eine Erwärmung der Raumluft findet nur im geringen Maß durch Konvektion an den angestrahlten Oberflächen und z. T. am Strahler (vorwiegend durch Verbrennungsabgase, welche i. d. R. über die Raumluft abgeführt werden) statt (239).

Wegen der hohen Oberflächentemperaturen und der Abgaseinleitung in die Raumluft sind bestimmte sicherheitstechnische Vorschriften und teilweise auch Einsatzbeschränkungen zu beachten (kein Einsatz in explosionsgefährdeter Atmosphäre, Mindestabstände zur Strahlungsquelle usw.).

Hellstrahler eignen sich vor allem für hohe Räume mit geringer Verschattung durch Einbauten. Hocheffiziente Hellstrahler setzen bei gasbetriebener, raumluftunabhängiger Betriebsweise mehr als 80 % der Endenergie in Strahlung um.

Kurzwellige Infrarotstrahlung weist ein anderes Absorptionsverhalten auf als langwellige Infrarotstrahlung. Sie führt bei den angestrahlten Oberflächen materialabhängig auch in tieferen Schichten zur Wärmefreisetzung. Vor- und Nachteile dieser Eigenschaft müssen einzelfallspezifisch beurteilt werden.

Dunkelstrahler (DS)

Als Dunkelstrahler werden Strahlungsheizgeräte bezeichnet, welche Infrarotstrahlung ausschließlich im nicht sichtbaren langwelligen Spektrum aussenden. Sie weisen im Vergleich zu Hellstrahlern spezifisch größere Oberflächen und niedrigere Oberflächentemperaturen auf. Eine typische Anwendung im Industriebereich sind gasbetriebene Anlagen, bei denen der Brennstoff in einer langen Flamme durch ein temperaturbeständiges Strahlrohr geführt wird – oft als U-Rohre in kompakten Geräten oder auch als Ringanordnungen ausgeführt. Das durch die Flamme und den Abgasstrom stark erwärmte Strahlrohr mit Oberflächentemperaturen meist von 400 – 600 °C gibt Infrarotstrahlung in den Raum ab. Die Verbrennungsabgase von Dunkelstrahlern werden über Abgasanlagen, entweder geräteweise oder in Gruppen mehrerer Dunkelstrahler, nach außen abgeführt (239).

Deckenstrahlplatten (DSP) und Strahlungsheizkörper (Radiatoren)

Deckenstrahlplatten bestehen aus Wärmeleit-/Strahlblechen, in die das Heizmedium - meist Wasser - führende Rohre eingelassen sind. Sie werden üblicherweise waagerecht montiert, z. T. aber auch geneigt. Oberseitig sind Deckenstrahlplatten i. d. R. gedämmt, um die nicht nutzbare Wärmeabgabe nach oben zu minimieren. Die nutzbare Wärmeabgabe erfolgt im Wesentlichen durch Wärmestrahlung. Im Vergleich zu Hell- und Dunkelstrahlern werden Strahlplatten immer indirekt über ein umzuwälzendes Medium im Temperaturbereich von 50 – 200 °C betrieben, dementsprechend wird für einen vergleichbaren Wärmeeintrag eine größere Oberfläche benötigt.

Deckenstrahlplatten können auch zur Kühlung eingesetzt werden; hierbei muss eine Taupunktunterschreitung jedoch sicher ausgeschlossen werden, um Kondensatbildung zu vermeiden (239).

Nach dem gleichen Prinzip arbeiten auch vertikal, meist im Wandbereich montierte Strahlungsheizkörper (Radiatoren), wobei je nach Einbausituation und Konstruktion ein Anteil konvektiver Wärmeübertragung auf Grund freier Konvektion stattfindet.

Flächenheizungen, auch in Verbindung mit Bauteilaktivierung

Bei Flächenheizungen werden Heizrohre aus geeignetem Material in Boden, Decken oder Wänden verlegt. Die nutzbare Wärmeabgabe erfolgt bei einer Flächenheizung durch Wärmestrahlung und durch freie Konvektion im bodennahen Bereich.

Flächenheizungen können auch zur Kühlung eingesetzt werden; wie auch bei Deckenstrahlplatten muss eine Taupunktunterschreitung ausgeschlossen werden (239).

Industrielle Gebäude mit besonders großvolumigen, massereichen Betonelementen/-fundamenten/-decken haben außerdem ein erhebliches Potential an Wärmespeicherung. Wegen der großen Trägheit und Pufferwirkung dieser Gebäudekomponenten kann bei solchen Gebäuden die theoretisch berechnete maximale Heizlast nach herkömmlichen Methoden erheblich gesenkt werden. Diese sogenannte Bauteilaktivierung gewinnt zunehmend an Bedeutung wegen der möglichen teilweisen Entkopplung von Betriebszeiten der Wärmeerzeuger und Bedarfszeiten der Raumbeheizung.

3.10.1.4 Wärmeverteilung

Beschreibung

Neben der Art des Wärmeeintrags unterscheidet man zwischen Hallenheizungen mit zentraler und dezentraler Wärmeerzeugung. Wärmeverteilung ist notwendig, wenn der Ort der Wärmeerzeugung nicht dem Ort der Wärmeabgabe entspricht.

Betriebsdaten

Verteilung nach zentraler Wärmeerzeugung

Bei zentraler Wärmeerzeugung wird die Wärme in der Regel mittels eines flüssigen Wärmeträgers, meist Wasser, von einem zentralen Erzeuger zum Ort des Bedarfs transportiert. Bei zentralen Heizsystemen kann der Wärmeerzeuger mit vergleichsweise geringem Aufwand ausgetauscht werden. Dies ermöglicht eine nachträgliche Umrüstung auf Erneuerbare Energiequellen (239).

Die Wärmeübergabe und entsprechend die Betriebstemperatur der Verteilsysteme sollten auf ein möglichst niedriges Temperaturniveau ausgelegt werden. Dies bietet folgende Vorteile:

- größere Auswahl an effizienten Wärmeerzeugern (siehe Kapitel 3.10.1.5). Beispielsweise muss für die Nutzung der Kondensationswärme von Brennwertkesseln die Abgas-Taupunkttemperatur (beträgt beispielsweise bei Erdgas 57 °C und bei Heizöl 47 °C) unterschritten werden. Hierfür sind entsprechend geringe Rücklauftemperaturen notwendig. Auch die Effizienz von Wärmepumpen steigt mit sinkenden Systemtemperaturen deutlich.
- Geringere Wärmeverluste des Systems in Bereichen, die nicht beheizt werden sollen, aber für den Wärmetransport durchquert werden müssen.

Wärmeverteilung findet im gebäudetechnischen Bereich in der Regel in Rohrleitungssystemen statt. Um ein solches System energieeffizient zu gestalten, gilt es darauf zu achten, die rohrinternen Druckverluste und somit die benötigte Pumpenleistung zu minimieren. Eine Beschreibung des Vorgehens bei der Auslegung und Planung von hydraulischen Wärmetransportsystemen ist in Kapitel 3.8enthalten. Angaben über die Planungskriterien von Wärmeverteilsystemen finden sich in der europäischen Norm DIN EN 12828 (240).

Neben rohrinternen Druckverlusten sind zumindest außerhalb der zu beheizenden Räume auch die Wärmeverluste an die Umgebung gering zu halten. Tabelle 3.10-2 zeigt beispielsweise

Mindestanforderungen gemäß der deutschen Energieeinsparverordnung (2014/2016) für die Dimensionierung von Rohrdämmungen, die sich in nicht beheizten Bereichen befinden.

Tabelle 3.10-2: Mindestanforderungen an Rohrdämmung von Wärmetransportsystemen

Zeile	Art der Leitungen/Armaturen	Mindestdicke der Dämmschicht, bezogen auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(m*K)
1	Innendurchmesser bis 22 mm	20 mm
2	Innendurchmesser über 22 mm bis 35 mm	30 mm
3	Innendurchmesser über 35 mm bis 100 mm	gleich Innendurchmesser
4	Innendurchmesser über 100 mm	100 mm
5	Leitungen und Armaturen nach den Zeilen 1 bis 4 in Wand- und Deckendurchbrüchen, im Kreuzungsbereich von Leitungen, an Leitungsverbindungsstellen, bei zentralen Leitungsverzweigen	½ der Anforderungen der Zeilen 1 bis 4
6	Wärmeverteilungsleitungen nach den Zeilen 1 bis 4, die zwischen beheizten Räumen verschiedener Nutzung verlegt werden	½ der Anforderungen der Zeilen 1 bis 4
7	Leitungen nach Zeile 6 im Fußbodenaufbau	6 mm
8	Kälteverteilungs- und Kaltwasserleitungen, sowie Armaturen von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen	6 mm

Quelle: (241)

Direkter Wärmeeintrag nach dezentraler Wärmeerzeugung

Bei dezentralen Hallenheizungen (Hell- und Dunkelstrahler sowie direkt beheizte Lufterhitzer) erfolgt die Energieumwandlung von einer Endenergieform in Wärme direkt an den Orten des Eintrags in den Raum. Wärmeerzeugung und Eintrag finden mittels desselben Gerätes statt, wodurch der Wärmetransport entfällt. Hierdurch können transportbedingte Energieverluste sowie Investitionskosten eingespart werden. Die Nutzung von Abwärme und Erneuerbarer Energien ist bei dezentralen Hallenheizungen allerdings nur bedingt möglich. Ein nachträglicher Wechsel des genutzten Energieträgers ist auf Grund der Einheit von Wärmeerzeugung und Übergabe nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand (Austausch des kompletten Systems) erreichbar (239).

Neuere Geräte, speziell Lufterhitzer, werden z. T. mit integrierten elektrischen Wärmepumpen angeboten, sodass ein bivalenter Betrieb und die Nutzung von Umweltwärme möglich werden (239).

3.10.1.5 Heizwärmeerzeugung

Beschreibung

Die Aufgabe von Heizwärmeerzeugungsanlagen ist es, stets genügend Wärme auf ausreichendem Temperaturniveau für die Deckung des aktuellen Wärmebedarfs des Gebäudes zu liefern. Auslegungsgröße für die Maximalleistung ist die Heizlast des zu versorgenden Bereichs (239). Wie aus

Kapitel 3.10.1.4 hervorgeht, unterscheidet man zwischen Anlagen zur zentralen bzw. dezentralen Heizwärmeerzeugung.

Zentrale Wärmeerzeugung

Für die Ausführung einer zentralen Wärmeerzeugung, welche durch eine räumliche Trennung von Energieumwandlung zu Heizwärme (Erzeugungsanlage) und zu versorgenden Räumen gekennzeichnet ist, kommen im Wesentlichen folgende Technologien in Frage:

- Feuerungsanlagen (siehe Kapitel 3.1),
- Kraft-Wärme-Kopplung,
- Nutzung von Abwärme durch Wärmerückgewinnung (siehe Kapitel 3.3),
- Wärmepumpen (siehe Kapitel 3.3.3),
- Solarthermie,
- Elektrische Wärmeerzeugung.

Diese können auch in Kombination angewandt werden, d. h., in ein Wärmeverteilnetz können mehrere Wärmeerzeugungsanlagen einspeisen.

In der Gesamtenergiebilanz der zentralen Wärmeversorgung müssen die Verluste bei der Wärmeverteilung berücksichtigt werden.

Dezentrale Wärmeerzeugung

Bei dezentralen Systemen findet Wärmeerzeugung und Übertragung an den zu versorgenden Bereich im selben Gerät statt (siehe Kapitel 3.10.1.4). Der Endenergieträger (meist Erdgas, Flüssiggas oder Heizöl, ggf. auch Elektroenergie) wird in der Regel leitungsgebunden zugeführt (239).

Auswahlkriterien für Wärmeerzeugungsanlagen

Welcher Wärmeerzeuger im konkreten Anwendungsfall jeweils die aus energetischer Sicht beste verfügbare Technik ist, hängt von vielen Rahmenbedingungen ab und kann besonders im Nichtwohnbereich nicht allgemeingültig festgelegt werden. Die Entscheidung muss individuell auf Grundlage einer ingenieurtechnischen Fachplanung getroffen werden.

Nachfolgende Punkte sind daher methodische Hinweise zum Erreichen einer hohen Energieeffizienz bzw. bester verfügbarer Technik, bei denen jedoch individuell geprüft werden muss, ob sie bei den jeweiligen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden können.

- Nutzung bestehender Abwärme- und Wärmerückgewinnungspotenziale.
- Bevorzugte Nutzung erneuerbarer Energien vor fossilen Brennstoffen als Endenergieträger.
- Möglichst geringes Temperaturniveau (geringe Vor- und/oder Rücklauftemperaturen) des Wärmeträgermediums in Wärmeverteilsystemen, dies gilt insbesondere bei Einsatz von solarthermischen Anlagen, Wärmepumpen und Brennwertgeräten.
- Wärmebedarfsgeführter Betrieb von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung, Auslegung der Anlagen auf eine hohe Volllast-Benutzungsstundenzahl.
- Einsatz von Wärmespeichern (vgl. hier Kap. 3.3.2), insbesondere zum Ausgleich von größeren zeitabhängigen Schwankungen im Wärmebedarf bzw. Wärmeangebot, beispielsweise bei zeitlichem Auseinanderfallen von Abwärmeaufkommen und Heizbedarf, zur Vergleichmäßigung des Betriebs von KWK-Anlagen etc.
- Bevorzugter Einsatz von Heizsystemen mit hohem Strahlungsanteil gegenüber Systemen mit hohem konvektiven Anteil im Fall von unvermeidbaren unkontrollierten hohen Luftwechselraten, z. B. durch technologisch erforderliche bzw. konstruktiv bedingte Gründe.

Betriebsdaten

Die beste verfügbare Technik der technischen Komponenten zur Endenergieumwandlung in Wärme (Wärmeerzeuger) differenziert sich sowohl nach Technologieklassen als auch nach Endenergieträgern.

Für brennstoffbasierte Wärmeerzeuger kann der Wirkungsgrad, darstellbar als das Verhältnis der ins Verteilnetz bzw. bei dezentralen Erzeugern in den Raum abgegebenen Nutzwärmemenge zum chemischen Energieinhalt des Brennstoffes, als Maß für die Identifizierung bester verfügbarer Technik verwendet werden. In der Praxis werden Wirkungsgrade unter standardisierten Testbedingungen ermittelt und ergeben sich aus dem Verhältnis von maximaler Wärmeleistung eines Erzeugers und der über den Brennstoff zugeführten Wärmeleistung (Heizwert). Es ist für Raumheizaufgaben Stand der Technik, die latente Wärme des Wasserdampfes durch dessen Kondensation innerhalb von systeminternen Wärmeübertragern zu nutzen (Brennwerteffekt), Da Wärmeerzeuger jedoch nicht durchgängig mit Maximalleistung betrieben werden, sollte stets auch der Jahresnutzungsgrad einer Anlage für die Bewertung der Effizienz mit berücksichtigt werden. Hierbei werden auch die Betriebsbereitschaftsverluste und Teillastbetrieb mit einbezogen.

Für den Vergleich von Erzeugern, die unterschiedliche Endenergieträger einsetzen, ist als weiteres Kriterium für beste verfügbare Technik der aus dem Endenergieverbrauch resultierende Primärenergiefaktor bzw. die resultierende CO_2-Emission anwendbar.

Die Berechnung des Primärenergiebedarfs erfolgt durch Multiplikation des Brennstoffverbrauchs mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor. Darin sind sämtliche Faktoren der Primärenergieerzeugung mit den Vorketten (einschließlich Hilfsenergien) für die Förderung, Aufbereitung, Umwandlung, den Transport und die Verteilung der betrachteten Energieträger enthalten. Die Ermittlung der Faktoren erfolgt durch Modellierung der entsprechenden Prozessketten (242). Die nachfolgende Tabelle 3.10-3 enthält eine Übersicht über die wichtigsten für Raumheizzwecke verwendeten Endenergieträger und deren jeweilige Primärenergiefaktoren.

Tabelle 3.10-3: Heizwertbezogene Primärenergiefaktoren

Energieträger [a)]		Primärenergiefaktor PEF	
		gesamt	nicht erneuerbar
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
Biogene Brennstoffe	Holz	1,2	0,2
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	1,8
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Umweltenergie	Solarenergie	1	0
	Erdwärme, Geothermie	1	0
	Umgebungswärme	1	0
	Umgebungskälte	1	0
Abwärme innerhalb des Gebäudes	aus Prozess	1	0

a) Bezugsgröße Endenergie: Heizwert Hi
b) Angaben sind typisch für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %

Auszug aus Quelle: (242)

Die Bestimmung der CO_2-Emissionen erfolgt durch Multiplikation des Brennstoffverbrauchs mit dem jeweiligen spezifischen Kohlenstoffdioxid-Emissionsäquivalent des verwendeten Brennstoffs. Eine entsprechende Übersicht ist in der folgenden Tabelle enthalten.

Tabelle 3.10-4 Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe bezogen auf den Heizwert inclusive Vorketten

Brennstoff	Emissionen in $kgCO_2/kWh$
Heizöl	0,319
Erdgas	0,250
Flüssiggas	0,277
Holz-Pellets	0,027
Holz-Hackschnitzel	0,024
Stückholz	0,019
Strom (Bundesmix)	0,565

Quelle: (www.iinas.org, derzeit Version 4.95, Stand 04/2017) GEMIS-Datenbank des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS)

3.10.1.6 Steuerung, Regelung und Energiedatencontrolling von Heizsystemen

Beschreibung

Die Aufgabe der Regelung bzw. Steuerung eines Heizsystems besteht darin, die Raumtemperatur im versorgten Bereich auf dem bedarfsgerechten Niveau zu halten. Unnötige Betriebszeiten und Betriebszustände mit nicht erforderlichem Energieeintrag sind zu vermeiden.

Für die fachgerechte Planung eines Regelungssystems sind konstruktions- und nutzungsbedingte Parameter des Gebäudes mit einzubeziehen (240).

Betriebsdaten

System-Ebene

Auf System-Ebene unterscheidet man zwischen zentraler Regelung sowie Zonen- und Raumregelungen. Sie sind für die Regelung der zugeführten Wärmemenge des gesamten Systems, einer Gebäudezone (siehe Kapitel 3.10.1.2) oder eines Raumes zuständig (240).

Es ist Stand der Technik, durch Signale von Temperatursensoren im Bereich der Nutzerebene den Wärmeeintrag so zu regeln, dass bei stationärem Betrieb das nutzungsabhängige Temperaturniveau im Genauigkeitsbereich von 1 K eingehalten wird.

Funktionale Ebene

Auf funktionaler Ebene wird in vier Kategorien unterschieden:

- Manuell (von Hand betrieben),
- automatisch,
- zeitabhängig (nach vorgegebenem Zeitplan),
- optimierend zeitabhängig (bedarfsoptimierte Laufzeit).

Zum Erreichen einer hohen Energieeffizienz sollte immer geprüft werden, eine zeit- und/oder bedarfsabhängige Temperaturregelung einzusetzen, so dass auf Zeiten ohne bzw. mit reduziertem Wärmebedarf reagiert werden kann (240).

3.10.1.7 Instandhaltung und Monitoring von Heizsystemen

Beschreibung

Um einen langfristigen, effizienten Betrieb von Heiz-, Kühl- und Lüftungsanlagen zu gewährleisten, ist eine fachgerechte Instandhaltung unerlässlich. Die DIN-Norm DIN 31051 (243) strukturiert die Instandhaltung in vier Grundmaßnahmen.

- Wartung,
- Inspektion,
- Instandsetzung,
- Verbesserung.

Zusätzlich zur Instandhaltung ist die Durchführung eines umfassenden Monitorings der Betriebsdaten der Anlage von entscheidendem Vorteil.

Die Kapitel 3.10.1.7, 3.10.2.7 und 3.10.3.6 geben daher das Vorgehen bei Instandhaltung und Monitoring des jeweiligen Anlagentyps wieder.

Betriebsdaten

Wartung

Die Zielsetzung der Wartung von Heizsystemen ist es, den Sollzustand der Anlage zu bewahren. Man unterscheidet zwischen periodisch durchzuführenden und bedarfsabhängigen Wartungsleistungen.

Periodisch durchzuführende Wartungsleistungen bei Heizsystemen bestehen im Wesentlichen im Prüfen und Messen der einzelnen Komponenten.

Beispiele für periodisch durchzuführende Wartungsleistungen bei Heizsystemen sind:

- Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion und Befestigung prüfen (gilt für beinahe alle Komponenten),
- Kollektortemperaturfühler auf festen Sitz prüfen (Solarkollektor),
- Feuerungswärmeleistung prüfen (Gasbrenner mit Gebläse).

Bedarfsabhängige Wartungsleistungen bei Heizsystemen bestehen im Reinigen, Auswechseln, Nachfüllen, Nachstellen, Dokumentieren etc. von Komponenten, Betriebsmitteln und Zuständen.

Beispiele für bedarfsabhängige Wartungsleistungen bei Heizsystemen sind:

- Funktionserhaltendes Reinigen (gilt für fast alle Komponenten),
- Abschlämmen (Wasserkessel),
- Anschlüsse der Starterbatterie nachziehen (Blockheizkraftwerk),
- Lager mit Nachschmiereinrichtung fetten (Ölbrenner).

Der genaue Ablauf der Wartungsarbeiten von Heizsystemen wird in Normen und Richtlinien genauer beschrieben (siehe beispielsweise (244)).

Inspektion

Durch §14 der EU-Gebäuderichtlinie EBPD 2010 wird eine regelmäßige Inspektion der zugänglichen Teile von Gebäudeheizungen ab einer Kesselnennleistung von 20 kW vorgeschrieben. Je nach Bauart und Nennleistung der Heizungsanlage können die Mitgliedstaaten unterschiedliche Inspektionsintervalle festlegen (245).

Im VDMA-Einheitsblatt 24197-2 (246) wird das Vorgehen bei der energetischen Inspektion von heiztechnischen Geräten im Sinne der EnEV beschrieben.

Demnach gilt es, folgende Komponenten zu prüfen:

- Wärmeerzeuger,
- Feuerungsanlagen,
- Abgasanlagen,
- Wassererwärmungsanlagen,
- Druckhalteeinrichtungen,
- Rohrnetze,
- Druckausdehnungsgefäße,
- Dosieranlagen,
- Heizflächen,
- Schaltschränke, MSR-Einrichtungen und Gebäudeautomatisierungssysteme,
- Antriebselemente,
- Heizraum und Brennstofflager.

Des Weiteren gilt es, die Inspektion zu dokumentieren und inspizierte Anlagen entsprechend zu kennzeichnen.

Ein anderes Verfahren für die Durchführung der Inspektion von Kesseln und Heizanlagen findet sich in der europäischen Norm DIN EN 15378-1 (247). Eine Erläuterung des Vorgehens findet sich in (248).

Die energetische Inspektion von Klimaanlagen/Luftheizungen wird in Kapitel 3.10.3.6 beschrieben.

Instandsetzung von Heizsystemen

Umsetzung der im Inspektionsbericht aufgelisteten Handlungsempfehlungen, um den Sollzustand der Heizanlage wieder herzustellen.

Verbesserung von Heizsystemen

Umsetzung von Maßnahmen, um die Behaglichkeit, Energie- oder Kosteneffizienz weiter zu verbessern (siehe Anhang E von (247)).

Monitoring

Mit Monitoring ist in diesem Fall die systematische Überwachung, Aufzeichnung sowie Bewertung des Verhaltens einer Anlage an Hand von Betriebsdaten gemeint. Die Daten werden hierbei entweder händisch oder automatisiert mittels Messtechnik erfasst (siehe Kapitel 2.10). Monitoring ist eine zwingende Voraussetzung für die Durchführbarkeit einer zustandsorientierten Instandhaltung, welche die oben beschriebene reaktive bzw. präventive Instandhaltung ersetzen kann. Wartungen werden hierbei nicht mehr periodisch, sondern bedarfsgerecht durchgeführt. Besonders bei Prozessen mit hohem Verschleiß kann dies von Vorteil sein (z. B. Produktionslinien).

Im gebäudetechnischen Rahmen (relativ wenig Verschleiß) besteht der Nutzen von Monitoring primär in der Dokumentation des Anlagenbetriebs. Anhand der Aufzeichnungen können Abweichungen von Sollwerten frühzeitig erkannt werden. Weiterhin können an Hand der Dokumentation Effizienzpotenziale erkannt werden.

3.10.2 Kühlung

3.10.2.1 Beschreibung des Vorgehens bei der Planung und dem Betrieb von Kühlsystemen

Im folgenden Teilkapitel wird aufgezeigt, welche Schritte für die qualifizierte Planung und Optimierung von Neu- und Bestandsanlagen zur Kühlung von Gebäuden notwendig sind. Des Weiteren sollen die Rahmenbedingungen für einen bedarfsgerechten Betrieb sowie die nötigen Maßnahmen für eine fachgerechte Instandhaltung aufgezeigt werden.

Folgende Themenstellungen sind hierbei zu berücksichtigen:

1. Kältebedarf: Bestimmung des Kältebedarfs im gesamten relevanten Gebäudebereich;

2. Wärmeentzug aus den Nutzungsbereichen: Auswahl geeigneter technischer Lösungen zur Wärmeabführung;
3. Kälteverteilung: Auslegung von Verteilsystemen für das Kühlmedium und Vorgaben für die Rohrdämmung;
4. Kälteerzeugung: Auswahl von geeigneten Kälteerzeugern;
5. Steuerung, Regelung, Energiedatencontrolling von Kühlsystemen;
6. Instandhaltung und Monitoring von Kühlsystemen.

3.10.2.2 Kühlbedarf

Beschreibung

Der Kühlbedarf von Gebäuden bzw. Zonen und Räumen innerhalb baulicher Anlagen ergibt sich in der Regel analog zum Heizbedarf aus der Vorgabe einer Raumtemperatur im jeweiligen Nutzungsbereich, wenn zur Einhaltung der Temperatur überschüssige Wärme aus dem Nutzungsbereich abgeführt werden muss. Bei der Bestimmung des Kältebedarfs eines Gebäudes oder Gebäudekomplexes geht man analog zur Bestimmung des Wärmebedarfs vor (siehe Kapitel 3.10.1.2). Für den Heiz- und den Kühlfall gelten jedoch in der Regel unterschiedlicher Rahmenbedingungen (z. B. Außentemperaturen, unterschiedliche Gebäudezonen bzw. Räume), weshalb die Bestimmung von Heiz- und Kühlbedarf nicht in einem Schritt durchgeführt werden kann. Die Durchführung separater Bilanzierungsverfahren zur Bestimmung der Bedarfe ist daher notwendig (237).

Generell sollte zunächst geprüft werden, inwieweit Wärmeeinträge (externe und interne) in den zu kühlenden Nutzungsbereich minimiert werden können (z. B. aktiver außenliegender Sonnenschutz, Dämmung der Gebäudehülle, Wärmedämmung von wärmeabstrahlenden Aggregaten etc.). Beste verfügbare Technik bedeutet in diesem Fall die Durchführung einer entsprechenden Analyse der jeweiligen Nutzungsbereiche, den durch Kühlung zu erreichenden Wärmeentzug durch Vermeidung unnötiger Wärmeeinträge zu minimieren.

3.10.2.3 Wärmeentzug aus den Nutzungsbereichen

Beschreibung

Nach der Ermittlung des Kältebedarfs ist festzulegen, über welche technischen Systeme überschüssige Wärme dem jeweiligen Nutzungsbereich entzogen werden soll. Analog zu den physikalischen Prinzipien für den Wärmeeintrag basieren auch Kühlprozesse an den Schnittstellen zu den Nutzungsbereichen im Wesentlichen auf konvektiver Wärmeübertragung und Wärmestrahlung. Die für die industrielle Praxis wesentlichen Grundprozesse sind:

- Zuführen von kalter und Abführen erwärmter Luft (Luftaustausch),
- Flächenkühlung/Bauteilaktivierung.

Betriebsdaten

Kühlung durch Luftaustausch

Luftaustausch mit Außenluft

Die einfachste und energieeffizienteste Art der Raumkühlung ist der Austausch von Raum- und Außenluft, sofern letztere eine niedrigere Temperatur aufweist. Es sollte stets geprüft werden, dieses ggf. saisonal unterschiedliche Potenzial zumindest teilweise zu nutzen, bevor energieintensivere technische Maßnahmen zur Raumkühlung ergriffen werden.

Auch die Nutzung des thermischen Speichervermögens der Gebäudehülle kann zur Ausweitung dieses Potenzials in Betracht gezogen werden (Verstärkte Nachtkühlung) (249).

Kühlung von Zuluft durch technische Anlagen

Die Zuluftkühlung funktioniert nach demselben Prinzip wie die Erwärmung (konvektiv, siehe Kapitel 3.10.1.3) über entsprechende Wärmeübertrager (vgl. dazu auch Kap. 3.3.1 dieses BVT-Merkblattes, wobei der Zuluftstrom dabei Wärmeenergie an ein Kühlmedium abgibt. Das Kühlmedium kann dem Wärmeübertrager hierbei je nach Anwendungsfall aus einem zentralen Kälteverteilsystem oder aus Einzel-Anlagen vor Ort zugeführt werden.

Die Technologie der Rückkühlung des Kühlmediums ist oft der für die Energieeffizienz des Kühlsystems bedeutendste Systemteil (vgl. 3.3.4 dieses BVT-Merkblattes).

Bauteilaktivierung

Deckenstrahlplatten (DSP)

Wie bereits in Kapitel 3.10.1.3 angemerkt, können Deckenstrahlplatten auch zur Raumkühlung genutzt werden, indem sie mit Kaltwasser durchströmt werden. Um die Bildung von Kondensat zu vermeiden, muss eine Taupunktunterschreitung sicher ausgeschlossen werden (239).

Flächenkühlung (FK)

Genau wie Deckenstrahler können auch Flächenheizungen zur Raumkühlung umfunktioniert werden. Eine Taupunktunterschreitung gilt es auch hier zu vermeiden (239).

Kühlsysteme durch Bauteilaktivierung werden in der Regel durch ein zentrales Kälteverteilsystem betrieben (siehe Kapitel 3.10.2.4).

3.10.2.4 Kälteverteilung

Beschreibung

Analog zur Wärmeverteilung sind Kälteverteilsysteme in der Regel mit Wasser oder anderen Kühlmedien durchströmte Rohrsysteme (siehe Kapitel 3.8 des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“). Eine Aussage über die Dämmungsbestimmungen ist in Tabelle 3.10-2 enthalten.

Weil zur Umwälzung des Kühlmediums Energie erforderlich ist, die über Pumpen eingetragen wird, die letztlich über Reibungseffekte in Wärme umgewandelt wird, sind für die energieeffiziente Gestaltung des Verteilsystems sowohl die Minimierung der Antriebsenergie als auch die Minimierung zusätzlicher Wärmeeinträge durch die Antriebsaggregate wichtige Auslegungskriterien (vgl. hierzu Kap. 3.7 dieses BVT-Merkblattes).

3.10.2.5 Kälteerzeugung

Beschreibung

Die wesentlichen Technologien zur Erzeugung von Kälte sind im nachfolgenden Punkt „Betriebsdaten“ kurz beschrieben. Welche Technologie für den jeweiligen Einsatzfall die beste verfügbare Technik darstellt, sollte durch eine fachgerechte ingenieurtechnische Planung ermittelt werden. Analog zum Kapitel 3.10.1.5 sind hierfür alle Rahmenbedingungen zu beachten und individuell zu bewerten.

Dabei ist insbesondere zu prüfen, ob und in welchem Umfang die Kühlung ohne Einsatz einer Kältemaschine erreicht werden kann, indem ein vorhandenes Temperaturgefälle zur Umgebung genutzt wird. Erst wenn dies nicht oder nicht in ausreichender Menge möglich ist, sollten Kältemaschinen eingesetzt werden.

Stand der Technik ist die Deckung des Kältebedarfs durch Freikühler bei niedrigen Außentemperaturen, so dass Kältemaschinen erst in Betrieb gehen müssen, wenn aufgrund höherer Außentemperaturen die Nutzung von Freikühlern nicht mehr ausreichend ist.

Betriebsdaten

Kälteerzeugung durch Kältemaschinen

Kompressions-Kältemaschine

Die Funktionsweise von Kompressions-Kältemaschinen beruht auf demselben Prinzip wie Kompressions-Wärmepumpen (siehe Kapitel 3.3.3). Der Unterschied besteht darin, dass der am Verdampfer aufgenommene Wärmestrom hier die Nutzkälteleistung und somit den Nutzen der Maschine verkörpert.

Man unterscheidet zwischen wasser- und luftgekühlten Kompressionskältemaschinen.

Die Effizienz von Kompressions-Kältemaschinen wird durch die Leistungszahl EER (energy efficiency ratio) wiedergegeben.

Formel 3.10-1

$$EER = \frac{Verdampfer\text{w}\ddot{\text{a}}\text{rmestrom}}{Verdichterantriebsleistung} \rightarrow [EER] = 1\,\frac{kW_{th}}{kW_{el}}$$

Der EER ist somit das Verhältnis zweier Leistungen bei stationären Betriebsbedingungen. Der EER-Wert ändert sich, wenn sich Verdampfungs- und/oder Verflüssigungstemperatur ändern. Ein Vergleich von EER-Werten unterschiedlicher Kälteanlagen ist demnach nur bei gleichen Betriebszuständen möglich.

Analog zur Bewertung von Wärmepumpen (siehe Kapitel 3.3.3) gibt es auch für die Bewertung von Kältemaschinen eine Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz im Zeitverlauf. Hierbei handelt es sich um die „jahreszeitbedingte Leistungszahl im Kühlbetrieb“ SEER. Sie beschreibt die Effizienz des Anlagenverhaltens innerhalb eines wiederkehrenden Betriebszyklus (Saison) von Wochen-, Monats- oder Jahreslänge.

Formel 3.10-2

$$SEER = \frac{Gesamtk\text{ü}hlbedarf\ pro\ Saison}{Elektroenergiebedarf\ pro\ Saison} \rightarrow [SEER] = 1\,\frac{kWh_{th}/Saison}{kWh_{el}/Saison}$$

Eine ausführlichere Methodik zum Vergleich der Energieeffizienz von Kälteanlagen ist dem VDMA-Einheitsblatt 24247-2 (250) zu entnehmen.

Absorptions-Kältemaschine

Absorptions-Kältemaschinen funktionieren im Prinzip wie Kompressions-Kältemaschinen. Der maßgebliche Unterschied besteht in der Verwendung eines thermischen Verdichters an Stelle des Kompressors. Das Funktionsprinzip eines thermischen Verdichters wird in Kapitel 3.3.3 beschrieben.

Das Kapitel 3.3.3 gibt außerdem Informationen über die Effizienzbewertung von Absorptions-Kältemaschinen.

Adsorptions-Kältemaschine

Das Funktionsprinzip von Adsorptions-Kältemaschinen wird in Kapitel 3.3.3 des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“ beschrieben.

Der Einsatz von Ab- und Adsorptions-Kältemaschinen ist besonders lohnenswert, wenn sie in Verbindung mit bestehenden Abwärmepotenzialen (z. B. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung oder Prozessabwärme) zum Einsatz kommen (251).

Kälteerzeugung ohne Kältemaschinen

Freie Kühlung

Unter freier Kühlung versteht man ganz allgemein die Nutzung der Umgebungstemperatur bzw. -luft zur direkten oder indirekten Kühlung von Prozessen und Räumen.

Man unterscheidet zwischen direkter und indirekter Freikühlung:

Unter direkter Freikühlung versteht man die in Kapitel 3.10.2.3 beschriebene Kühlung durch Luftaustausch mit Außenluft. In Bezug auf Raumlufttechnische Anlagen ist dies die einfachste und häufigste Variante der Freikühlung, da das Kühlpotential der Außenlufttemperatur hierbei direkt als Kühlleistung zur Verfügung steht (249).

Als Indirekte Freikühlung bezeichnet man die Nutzung der Umgebungsluft zur Ab- bzw. Vorkühlung bestehender Kühlsysteme (Effizienzsteigerung).

Übliche Bauformen sind hierbei:

- Freikühlung mit vorhandenen Rückkühlwerken im Alternativ- oder Parallelbetrieb zur Kältemaschine (249),
- Freie Kühlung mit luftgekühlten Kältemaschinen mit integrierten Freikühlregistern (249).

Indirekte Freikühlung zur Raumluftklimatisierung findet eher in Räumen mit erhöhten Anforderung an die Luftqualität und einem höheren Kühlbedarf Anwendung (z. B. Server- und Kühlräume).

Geothermische Kühlung

Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke (252).

Grund- und Oberflächenwasserkühlung.

Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser als Wärmesenke (252).

3.10.2.6 Steuerung, Regelung und Energiedatencontrolling von Kühlsystemen

Bei der Regelung von Kälteanlagen unterscheidet man zwischen drei Automatisierungsstufen:

1. Elementares Steuern und Regeln der Anlagenkomponenten;
2. Gesamtautomatisierung von Kälteanlagen mit gegenseitiger Abstimmung der Einzelsteuerungen/ -regelungen;
3. Automatisierung eines energetischen Systemverbundes unter Einbindung von Kälteanlagen (z. B. Wärme-Kälte-Kopplung) inkl. Hydraulik und Speicher.

Stufe 1 bezieht sich lediglich auf die Steuerung der Kältemaschine bzw. ihrer Komponenten:

Komponentenregelung

Die einzelnen Komponenten können je nach Bauform die Effizienz der Kälteanlage maßgeblich beeinflussen.

<u>Verdampfer-Leistungsregelung</u>

Der Kältemassenstrom wird über das Einspritzorgan geregelt.

Beispiele für Verdampfer-Leistungsregelungen:

- Fixdrossel/Kapillarrohr,
- Thermostatisches Expansionsventil (TEV),
- Elektronisches Expansionsventil (EEV),
- Überfluteter Betrieb/Pumpenbetrieb als Ablauf- oder Füllstandsregelung.

<u>Verdichter-Leistungsregelung:</u>

Gewährleistung eines stabilen Anlagenbetriebs bei minimalem Energieverbrauch durch Regelung des Verdichters.

Beispiele für Verdichter-Leistungsregelung (aufgelistet nach abnehmender Energieeffizienz):

- Drehzahlregelung (stufig; stufenlos),
- Abschaltung einzelner Verdichter im Verbundbetrieb,
- Saugdampfabsperrung (Zylinderkopfabschaltung),
- schiebergesteuerte Schraubenverdichter,
- Saugdruckregelung und
- Heißgasbypassregelung (veraltet, nicht mehr Stand der Technik).

Verflüssiger-Leistungsregelung bei trocken luftbeaufschlagten Verflüssigern:

Regelung der Kältemaschine durch Reduzierung des Luft-Volumenstromes bei Erreichung der minimal zulässigen Verflüssigungstemperatur.

Kühlstellenregelung

Die Kühlstellenregelung passt ganz allgemein die Kühlleistung der Anlage auf die aktuelle Kühllast an den Kühlstellen im jeweiligen Nutzungsbereich an. Sie ist für alle drei Automatisierungsstufen relevant. Die Funktionsweise und Energieeffizienz der Kühlstellenregelung ist abhängig vom Aufbau der Kältemaschine bzw. vom Automationsgrad und Zusammenspiel der einzelnen Komponenten.

Eine hochwertige Kühlstellenregelung in Verbindung mit gut regelbaren und aufeinander abgestimmten Komponenten ist in der Regel die Voraussetzung für einen energieeffizienten Kältemaschinenbetrieb (253).

Stufe 2 bezieht sich auf die Automatisierung der kompletten Kälteanlage.

Bei der Automatisierungsstufe 2 wird nicht nur den Kältemittelkreislauf, sondern die gesamte Kälteanlage mit allen vorhandenen Verbrauchern einbezogen und geregelt (Kälteverteilsystem, Pumpen, Hilfsenergie) (253).

Stufe 3 bezeichnet die Einbindung der Kälteanlage in ein Gesamtenergiekonzept.

Durch die Kopplung der Kälteanlage an die restliche Gebäudetechnik können ein energetisches Gesamtkonzept entwickelt und somit vorhandene Potenziale besser ausgenutzt werden (z. B. Nutzung von Abwärme zum Betrieb einer Absorptions-Kältemaschine) (253).

Je höher die angewandte Automatisierungsstufe, umso besser kann der Betrieb der Kälteanlage an den Bedarf bzw. die Potenziale eines Gesamtbetriebes angepasst werden, wodurch Energie eingespart werden kann.

3.10.2.7 Wartung, Instandhaltung und Monitoring von Kühlsystemen

Beschreibung

Siehe Kapitel 3.10.1.7

Betriebsdaten

Instandhaltung

Wartung

Die Zielsetzung der Wartung von Kühlsystemen ist es, den Sollzustand der Anlage zu bewahren. Man unterscheidet zwischen periodisch durchzuführenden und bedarfsabhängigen Wartungsleistungen.

Periodisch durchzuführende Wartungsleistungen bei Kühlsystemen bestehen im Wesentlichen im Prüfen und Messen der einzelnen Komponenten.

Beispiele für periodisch durchzuführende Wartungsleistungen:

- Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion und Befestigung prüfen (gilt für beinahe alle Komponenten),
- Saugdruck messen (Hubkolben- und Rotationsverdichter),
- Kühlwasserregler auf Funktion prüfen (wassergekühlte Verflüssiger).

Bedarfsabhängige Wartungsleistungen bei Kühlsystemen bestehen im Reinigen, Auswechseln, Nachfüllen, Nachstellen, Dokumentieren etc. von Komponenten, Betriebsmitteln und Zuständen.

Beispiele für periodisch durchzuführende Wartungsleistungen:

- Funktionserhaltendes Reinigen (gilt für fast alle Komponenten).
- Abschlämmmenge nach Auslegungsdaten einstellen (Verdunstungs-Verflüssiger),
- Filtertrockner auswechseln (Rohrleitungen).

Der genaue Ablauf der Wartungsarbeiten von kältetechnischen Geräten wird in Normen und Richtlinien genauer beschrieben (siehe (254) und (251)).

Energetische Inspektion Kühlsystemen

Das Vorgehen bei der energetischen Inspektion von Klimaanlagen mit Kühlung wird in Kapitel 3.10.3.6 genauer geschrieben.

Ein Ablaufplan für die Inspektion von Kühlsystemen ist beispielsweise im VDMA-Einheitsblatt 24197-3 (255) beschrieben.

Instandsetzung von Kühlsystemen

Umsetzung der im Inspektionsbericht aufgelisteten Handlungsempfehlungen, um den Sollzustand der Anlage wieder herzustellen.

Verbesserung von Kühlsystemen

Umsetzung von Maßnahmen, um die Behaglichkeit, Energie- oder Kosteneffizienz weiter zu verbessern.

Monitoring

Siehe Kapitel 3.10.1.7

3.10.3 Lüftung und Klimatisierung

3.10.3.1 Beschreibung des Vorgehens bei Planung und Betrieb von Lüftungsanlagen

Im folgenden Teilkapitel wird aufgezeigt, welche Schritte für die qualifizierte Planung und Optimierung von Neu- und Bestandsanlagen zur Lüftung von Gebäuden notwendig sind. Des Weiteren sollen die Rahmenbedingungen für einen bedarfsgerechten Betrieb sowie die nötigen Maßnahmen für eine fachgerechte Instandhaltung aufgezeigt werden.

Grundsätzlich sind die folgenden Typen von Lüftungssystemen zu unterscheiden:

- Allgemeine Belüftung: Diese Systeme werden eingesetzt, um die Luft in Arbeitsbereichen mit großem Rauminhalt auszuwechseln. Verschiedene Arten von Belüftungssystemen mit reiner Luft sind möglich. Sie sind abhängig von den zu belüftenden Räumlichkeiten, der Verschmutzung und ob eine Klimatisierung erforderlich ist. Der Luftdurchsatz ist eine entscheidende, den Energieverbrauch beeinflussende Kenngröße. Je geringer der Luftdurchsatz ist, umso geringer der Energieverbrauch.
- Spezifische Absaugsysteme und Prozessluftsysteme: Spezifische Absaugsysteme sind darauf ausgelegt, Emissionen so nahe wie möglich an ihrer Quelle zu entfernen. Prozessluftsysteme sind in der Regel unmittelbar in verfahrenstechnische Prozesse integriert. Für die besonderen

energierelevanten Aspekte der spezifischen Absaugsysteme und Prozessluftsysteme wird auf das Kapitel 3.9 verwiesen.

Dieses Kapitel befasst sich mit der allgemeinen Belüftung. Es fokussiert sowohl auf ausschließlich durch Luftaustausch raumluftkonditionierende Lüftungsanlagen als auch auf die Lüftungskomponente von HVAC-Anlagen, welche auch aktive Heiz- und Kühlfunktionen aufweisen (256). Dementsprechend sind entsprechende Wechselwirkungen bzw. zu Heiz- und Kühlsystemen zu beachten, wobei die technischen Aspekte dieser Systeme in den Kap. 3.10.1 und 3.10.2 separat dargestellt sind.

Folgende Themenstellungen sind für allgemeine Lüftungssysteme zu berücksichtigen:

1. Lüftungsbedarf: Bestimmung des Lüftungsbedarfs eines bestehenden Gebäudes oder Neubaus,
2. Lüftungssysteme: Auswahl eines geeigneten Lüftungssystems,
3. Luftaufbereitung: Gasreinigung und Feuchtigkeitskonditionierung,
4. Steuerung, Regelung, Energiedatencontrolling von Lüftungssystemen,
5. Instandhaltung und Monitoring von Lüftungssystemen.

3.10.3.2 Lüftungsbedarf

Beschreibung

Lüftungssysteme tragen als eigenständige Anlagen oder in Kombination mit Heiz- und Kühlsystemen als sogenannte HVAC-Anlagen (deutsche Entsprechung: raumlufttechnische (RLT) Anlagen) dazu bei, ein gewünschtes Innenraumklima zu erreichen. Die wichtigsten durch solche Systeme einzustellenden Parameter sind Raumtemperatur, Raumluftfeuchtigkeit und stoffbezogene Raumluftqualität, ferner kann es Wechselwirkungen mit der Akustik im Raum geben (256).

Betriebsdaten

Die Bestimmung des Lüftungsbedarfs bzw. das Vorgehen bei der Auslegung von Lüftungsanlagen in Nichtwohngebäuden wird durch die europäische Norm DIN EN 16798-3 (256) beschrieben.

Hiernach gilt es, folgende Auslegungskriterien zu bestimmen:

- Allgemeine Gebäudeeigenschaften (Umgebung, Wetterdaten, Betriebsdaten),
- Konstruktionsdaten des Gebäudes,
- geometrischer Aufbau des Gebäudes,
- Raumnutzung (Personenbelegung, innere Wärmeeinträge, Verunreinigungsquellen, vorgegebene Abluftströme),
- Anforderung in Räumen (Regelungsart, Thermische Behaglichkeit, Luftqualität für Personen),
- Anlagenanforderungen,
- Wärmeübertragung der Oberflächen von Lüftungsanlegen,
- Feuchte der Zuluft.

3.10.3.3 Luftförderung

Beschreibung

Um ein Lüftungssystem energieeffizient zu planen, gilt es darauf zu achten (257), dass:

- der Bedarf richtig bestimmt wird (keine Über- oder Unterdimensionierung),
- die einzelnen Komponenten einen hohen Energieeffizienzstandard erfüllen,
- das Zusammenspiel der Systemkomponenten (Gesamtsystem) aufeinander abgestimmt ist, dies schließt ausdrücklich die Integration von Heiz- und/oder Kühlsystemen ein.

Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die strömungstechnischen Aspekte des Lufttransportes sowie die Einstellung von Feuchte und stoffbezogenen Qualitätsparametern.

Energieeffizienzrelevante Aspekte der temperaturbeeinflussenden Funktionen Heizen und Kühlen sind in den Kap. 3.10.1 und 3.10.2 dieses Merkblattes dargelegt.

Betriebsdaten

Die europäische Norm DIN EN 16798-3 (256) unterscheidet zwischen vier Grundtypen von Lüftungsanlagen.

Unidirektionale ventilatorgestütze Lüftungsanlagen (UVU):

UVUs sind Lüftungsanlagen, bei denen ein Luftvolumenstrom entweder durch einen Zu- oder einen Abluftventilator erzeugt wird. Der Ausgleich erfolgt durch eine Luftübertragungseinrichtung ohne Ventilator.

Bidirektionale ventilatorgestützte Lüftungsanlage (BVU):

BVUs sind Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluftluftventilator.

Natürliche Lüftungsanlage:

Lüftungsanlagen, welche durch natürliche Antriebskräfte funktionieren und somit keine zusätzlichen Komponenten zur Erzeugung eines Luftstromes benötigen.

Hybridlüftungsanlage:

Lüftungsanlagen, die sowohl unter Nutzung natürlicher Effekte als auch mit technischen Systemen betrieben werden. Die Regelung erfolgt hierbei situationsabhängig.

Je nach Anlagentyp setzen sich lüftungstechnische Anlage aus folgenden Komponenten zusammen:

Tabelle 3.10-5: Arten von Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsystemen

Anlagen	Zuluftventilator	Abluftventilator	Sekundärlüftung	Wärmerückgewinnung	Wärmepumpe	Filtration	Heizung	Kühlung	Befeuchtung	Entfeuchtung
Uidirektionale Zulüftungsanlage	x	-	-	-		o	o	-	-	-
Uidirektionale ventilatorgestützte Fortluftanlage	-	x	-		o	-	-	-	-	-
Bidirektionale ventilatorgestützte Lüftungsanlage	x	x	-	x	o	x	o	-	-	-
Bidirektionale Lüftungsanlage mit Befeuchtung	x	x		x	o	x	o	-	x	-
Bidirektionale Klimaanlage	x	x		x	o	x	o	(x)	o	(x)
Vollklimaanlage	x	x		x	o	x	x	x	x	x
Raumkühlsystem (Gebläsekonvektor, Splitklimagerät etc.)	-	-	x	-	-	o	o	x	-	(x)
Raumluftheizsystem	-	-	x	-	-	o	x	-	-	-
Raumkühlsystem (ohne erzwungenen Luftstrom)	-	-	-	-	-	-	o	x	-	-

x ausgestattet mit

(x) ausgestattet mit, jedoch möglicherweise mit eingeschränkter Funktion
- nicht ausgestattet mit.
o je nach Anforderung möglicherweise ausgestattet mit

Quelle: (256)

Die bidirektionale Belüftung (BVU), die das Einblasen (die Aufnahme von Frischluft) mit dem Entzug (dem Entfernen von verschmutzter Luft) kombiniert, bietet eine bessere Steuerung des Luftdurchsatzes und kann deshalb insgesamt leichter gesteuert werden, z. B. durch ein Prozessleitsystem für die Klimatisierung und Rückgewinnung von Energie.

Luftförderung

Die zentrale technische Komponente zur Förderung von Luftströmen sind Ventilatoren (auch Gebläse genannt). Ventilatoren sind entscheidende Energieumwandlungskomponenten zur Beschleunigung/Förderung von Luftströmen in technischen Anlagen. Ihr Typ, ihre Leistung und deren Regelung sind wesentliche Faktoren unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz.

Überdimensionierungen von Ventilatoren führen zu Effizienzverlusten im energetischen und ökonomischen Sinn. Die Wahl eines Ventilators von hoher Effizienz mit der optimal dimensionierten Leistung kann bedeuten, dass ein kleinerer Ventilator ausgewählt werden kann und Einsparungen beim Kaufpreis erzielt werden können. Zur Auslegung von Ventilatoren wird auf das Kapitel 3.9 verwiesen.

Für Elektromotoren als Antrieb von Ventilatoren ist in gleicher Weise die effizienzorientierte Auswahl zu treffen (siehe von Elektromotoren angetriebene Subsysteme in Kapitel 3.6 des BVT-Merkblattes Energieeffizienz).

Luftleitungssysteme

Die Auslegung eines Luftleitungssystems muss gewisse Bedingungen erfüllen, um energieeffizient zu sein:

- Die Kanäle müssen ausreichend groß im Durchmesser sein (eine Zunahme von 10 % im Durchmesser kann eine Reduzierung von 72 % in der aufgenommenen Energie erbringen).
- Bevorzugt Einsatz kreisförmiger Kanäle, diese haben bei gleicher Querschnittsfläche und Länge weniger Druckverlust als rechtwinklige Kanäle.
- Vermeiden von langen Strecken und Hindernissen (Biegungen, engere Abschnitte etc.).
- Dichtheit, besonders an Verbindungsstellen.
- Abgleich des Systems in Bezug auf verteilungsbedingte Druckverluste im Stadium der Auslegung, um sicherzustellen, dass alle 'Anwender' die erforderliche Belüftung erhalten. Der Abgleich des Systems nach dem Einbau bedeutet, dass in einigen Kanälen einzelne Drosselklappen eingebaut werden müssen, welche die Verluste an Druck und Energie erhöhen.

Einstellung des Luftdurchsatzes: Der Luftdurchsatz ist ein grundlegender Parameter, wenn es sich um den Energieverbrauch durch Lüftungssysteme handelt. So wird zum Beispiel bei einer Reduzierung des Durchsatzes um 20 % vom Ventilator 50 % weniger Energie verbraucht. Die meisten Belüftungsanlagen müssen nicht konstant mit ihrer maximalen Leistung laufen. Deshalb ist es wichtig, dass man in der Lage ist, die Betriebsdrehzahl des Ventilators anzupassen in Übereinstimmung mit, z. B.

- Produktion (Menge, Art des Produkts, Maschine ein/aus etc.),
- Zeitraum (Jahr, Monat, Tag etc.),
- Belegung des Arbeitsbereichs mit Personal.

Bei der Planung von Luftleitsystemen ist auf eine strömungs-, schall- und wärmetechnisch korrekte Auslegung zu achten. Als Bemessungsgrundlage kann hierbei die VDI-Richtlinie 2087 (258) genutzt werden.

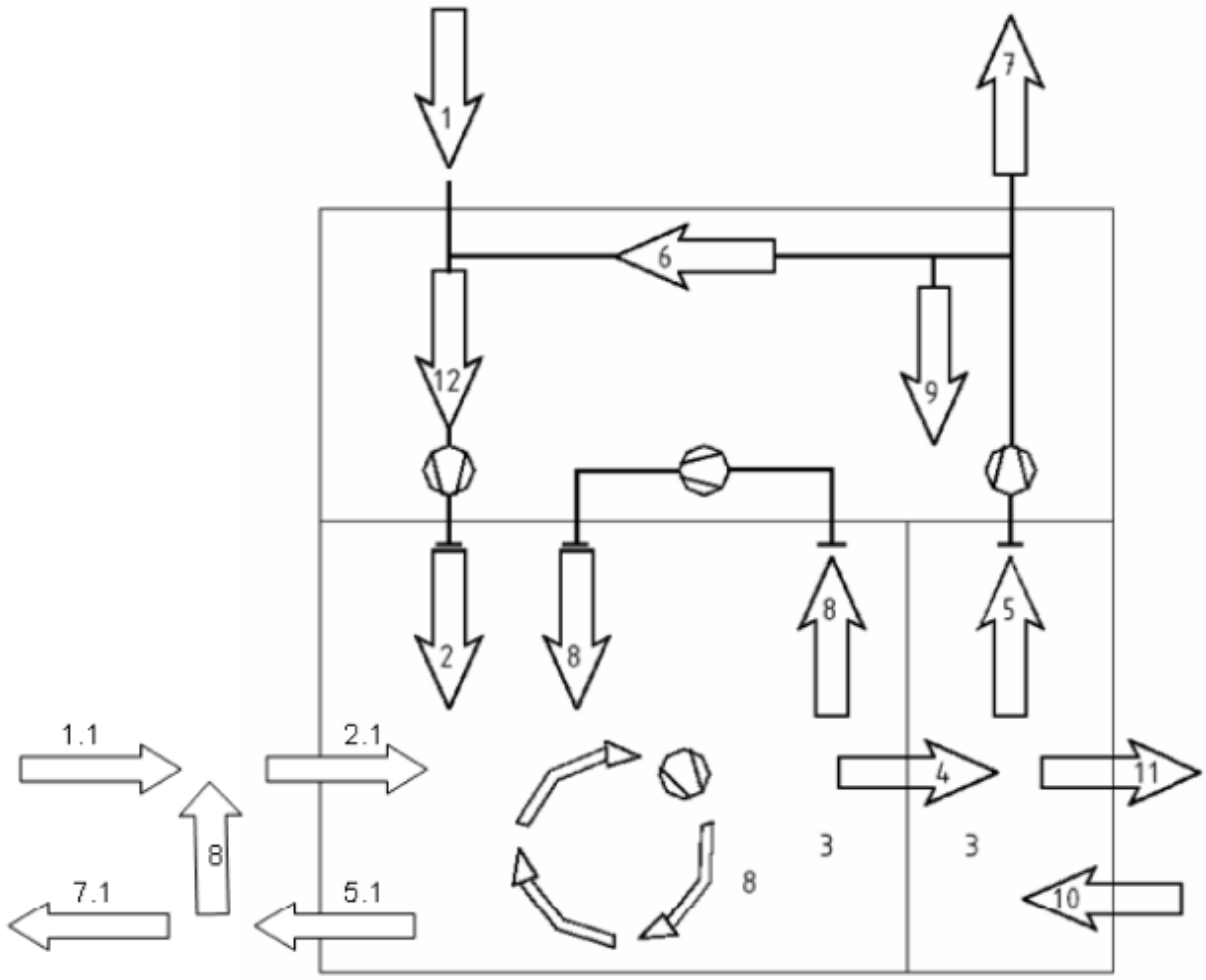
3.10.3.4 Luftaufbereitung

Beschreibung

Luftaufbereitung ist dann nötig, wenn die vorgegebenen Qualitätskriterien eines Luftstromes ohne technische Maßnahmen nicht sicher eingehalten werden können.

Man unterscheidet zwischen Außenluft [1], Zuluft [2], Raumluft [3], Überströmluft [4], Abluft [5], Umluft [6], Fortluft [7], Sekundärluft [8], Leckluft [9], Infiltration [10], Exfiltration [11] und Mischluft [12]. Für Räume, deren Luftversorgung mit Hilfe eines Einzelraum-Luftbehandlungsgeräts aufbereitet wird, gibt es weiterhin Außen- [1.1], Zu- [2.1], Ab- [5.1] und Fortluft [7.1]. Die Systemgrenze besteht hierbei in der Grenze zwischen dem Raum und dem Luftbehandlungsgerät (256).

Abbildung 3.10-1: Darstellung der Luftarten



Quelle: (256)

Von besonderem Interesse für das Thema Luftaufbereitung sind die Qualität von Außen- und Zuluft (werden dem Gebäude bzw. dem Raum zugeführt) sowie die der Fortluft (wird aus dem Gebäude an die Umgebung abgegeben).

Die europäische Norm DIN EN 16798-3 (256) klassifiziert Außenluft in die Kategorien ODA 1-3 und Zuluft in SUP 1-5. In beiden Fällen wird die Belastung mit partikel- und/oder gasförmigen Verunreinigungen mit zunehmender Konzentration wiedergegeben (siehe (256) Anhang A.4.3).

Sowohl für Zu- als auch Fortluft ist darauf zu achten, dass die Luftqualität (Schadstoffbelastung) so eingestellt werden kann, dass Gefährdungen von Mensch und Umwelt vermieden und gesetzliche Rahmenbedingungen eingehalten werden.

Neben der Belastung mit Schadstoffen ist in vielen Anwendungsfällen auch die Feuchtigkeit der Luft so zu regulieren, dass die Bildung von Kondensat und daraus resultierende mikrobielle Belastungen im Gebäudeinneren verhindert werden.

Betriebsdaten

Luftaufbereitung durch Filtration

Luftfilter werden verwendet, um Zu- oder Abluft von partikel- und/oder gasförmigen Schadstoffen zu entfrachten.

Die erforderliche Filterstufe für Zuluft ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen gegebener Außen- und gewünschter Raumluftqualität. Des Weiteren sind die Betriebsbedingungen in den zu versorgenden Nutzungsbereichen (Betriebszeit, Staubbelastung) in den Dimensionierungsprozess mit einzubeziehen (256).

Für Abluft sind Filterstufen an Hand der Schadstoffbelastung sowie des weiteren Weges der Luft zu bemessen. Wird die Abluft an die Umgebung abgegeben (Fortluft), müssen ggf. Emissionsgrenzwerte für Schadstoffe eingehalten werden. Wird die Abluft ganz oder teilweise erneut als Zuluft (Umluft) verwendet, muss sie entsprechend der Vorgaben für Zuluft aufbereitet werden (256).

Aus Sicht der Energieeffizienz ist eine bedarfsgerechte Dimensionierung der Luftfilter besonders wichtig, da mit höheren Abscheidegraden durch feinere Filterung die Druckverluste und somit der Strombedarf des Luftleitsystems ansteigen. Weiterhin sind die durch die Schadstoffrückhaltung in den Luftfiltern tendenziell ansteigenden Druckverluste zu überwachen und durch geeignete Maßnahmen (regelmäßige Abreinigung oder Austausch) zu begrenzen (siehe Kapitel 3.10.3.6) (256).

Je nach gegebenen Ein- bzw. gewünschten Ausgangsparametern ergibt sich ein erforderlicher Abscheidegrad, der durch einen oder mehrere Filterstufen erreicht werden kann.

Tabelle 3.10-6: Mindestabscheidegrad basierend auf der Außenluftqualität (Feinstaub)

Außenluftqualität	Zuluftqualität					
	SUP 1		SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA (P) 1	88 %[a]	80 %[a]	80 %[a]	80 %[a]	nicht angegeben	
ODA (P) 2	96 %[a]	88 %[a]	88 %[a]	80 %[a]	60 %	
ODA (P) 3	99 %[a]	96 %[a]	92 %[a]	80 %[a]	80 %	
a) Kombinierter mittlerer Abscheidegrad für eine Filterstufe oder für mehrere Filterstufen entsprechend dem in EN 779 festgelegten mittleren Abscheidegrad						

Quelle: (256)

In den Normen EN ISO 16890-1 (259) bis 4 wird ein System für die Klassifizierung der Effizienz von Luftfiltern formuliert.

Luftaufbereitung durch Be- und Entfeuchtung

Die Be- und Entfeuchtung von Luft ist auf Grund der großen spezifischen Verdampfungs- bzw. Kondensationsenthalpie von Wasser/Wasserdampf ein energieintensiver Teilprozess. Daher ist bei der Festlegung von zulässigen Grenzwerten der Raumluftfeuchte der tatsächliche Regelungsbedarf sorgfältig zu prüfen und ggf. anhand von Betriebserfahrungen (Monitoring) anzupassen.

Außerdem sind hygienische Vorschriften zu beachten (u. a. Gefahr von Legionellenbildung), insbesondere für die Beschaffenheit des Wasser zur Befeuchtung.

3.10.3.5 Steuerung, Regelung und Energiedatencontrolling von Lüftungssystemen

Beschreibung

Eine wichtige Voraussetzung für den energieeffizienten Betrieb von HVAC-Anlagen besteht in der Auswahl des richtigen Regelungsverfahrens.

Die Regelung einer HVAC-Anlage ist grundsätzlich dann effizient, wenn mit der Regelstrategie erreicht wird, dass die Anlage bei minimalem Energieaufwand die gewünschten bzw. vorgeschriebenen Raumklimaparameter erreicht.

Betriebsdaten

Auf System-Ebene unterscheidet man zwischen raumbezogenen und zentralisierten Regelkonzepten. Raumbezogene Regelungen regeln die Lüftung/Klimatisierung eines Raumes. Zentrale Systeme regeln die Funktion des ganzen Systems (mehrere Räume oder Gebäudezonen) (256).

Auf funktionaler Ebene unterscheidet die europäische Norm DIN EN 16798-3 (256) zwischen sechs Kategorien für die Reglung des Luftstroms von HVAC-Anlagen.

- Konstant laufende Anlagen (IDA-C1),
- manuell regelbare Anlagen (IDA-C2),
- selbstregelnde Anlagen mit vorgegebenem Zeitplan (IDA-C3),
- belegungsabhängig geregelte Anlagen mit Auslöser (z. B. Lichtschalter, Infrarotsensor) (IDA-C4),
- bedarfsabhängig geregelte Anlagen (Abstufung nach Personenaufkommen) (IDA-C5),
- sensorisch erfasste bedarfsabhängig geregelte Anlagen (z. B. CO2-, Mischgas-, Luftfeuchtesensoren) (IDA-C6).

Je nach Aufgabenbereich und Anlage kann jede dieser Regelungsarten zu einem effizienten Anlagenbetrieb führen. Tendenziell steigt die Energieeffizienz von Lüftungsanlagen mit zunehmendem Automatisierungsgrad. Wechselwirkungen mit den technischen Systemen der Produktionsanlagen sind, soweit möglich, zu berücksichtigen. (256).

Für die konkrete Umsetzung eines regelbaren Volumenstroms bestehen die folgenden Möglichkeiten, die Drehzahl der Ventilatoren zu regeln (aufgelistet nach abnehmender Regelbarkeit (256)):

- Variable Drehzahlregelung (z. B. Frequenzumrichter),
- Drehzahlstufen (z. B. Motor mit mehreren festen Drehzahleinstellungen, Transformator) und
- Zweipunktregelung.

Durch eine erhöhte Regelbarkeit lassen sich meist energieeffizientere Resultate erzielen.

3.10.3.6 Instandhaltung und Monitoring von HVAC-Anlagen

Beschreibung

Siehe Kapitel 3.10.1.7

Betriebsdaten

Instandhaltung

Wartung von HVAC-Anlagen

Die Zielsetzung der Wartung von HVAC-Anlagen ist es, den Sollzustand der Anlage zu bewahren (260). Man unterscheidet zwischen periodisch durchzuführenden und bedarfsabhängigen Wartungsleistungen.

Periodisch durchzuführende Wartungsleistungen bei HVAC-Anlagen bestehen im Wesentlichen im Prüfen und Messen der einzelnen Komponenten.

Beispiele für periodisch durchzuführende Wartungsleistungen:

- Verschmutzung, Beschädigung, Korrosion und Befestigung prüfen (gilt für beinahe alle Komponenten),
- Laufrad auf Unwucht prüfen (Ventilator),
- Vor- und Rücklauf auf Funktion prüfen (Lufterhitzer),
- Differenzdruck messen (Trockenschichtfilter).

Bedarfsabhängige Wartungsleistungen bei HVAC-Anlagen bestehen im Reinigen, Auswechseln, Nachfüllen, Nachstellen, Dokumentieren etc. von Komponenten, Betriebsmitteln und Zuständen.

Beispiele für bedarfsabhängige Wartungsleistungen:

- Funktionserhaltendes Reinigen (Gilt für fast alle Komponenten),
- Messflüssigkeit nachfüllen (Rollbandfilter),
- Ionisationsdrähte auswechseln (Elektrofilter),
- Reguliereinrichtung für Wasserstand nachstellen (Umlaufsprüh- und Verdunstungsbefeuchter).

Der genaue Ablauf der Wartungsarbeiten von HVAC-Anlagen wird in Normen und Richtlinien, wie dem VDMA-Einheitsblatt 24186-1 (261) oder der europäischen Norm DIN EN 15780 (262) beschrieben.

Energetische Inspektion von HVAC-Anlagen

Durch die Artikel 15 und 16 der EPBD wird eine regelmäßige energetische Inspektion von Klimaanlagen ab einer Nennkälteleistung von 12 kW vorgeschrieben. Die Inspektionsintervalle werden hierbei von den Mitgliedsstaaten festgelegt. In Deutschland werden diese Vorgaben durch § 12 der Energieeinsparverordnung umgesetzt. Eine energetische Inspektion ist demnach mindestens alle zehn Jahre verpflichtend durchzuführen (241) (245).

Eine genaue Beschreibung des Ablaufes einer energetischen Inspektion ist innerhalb der Norm DIN SPEC 15240 (257) zu finden. Das in der Norm beschrieben Vorgehen kann sowohl für Klima- als auch für Lüftungsanlagen in Nichtwohngebäuden angewandt werden.

Die Durchführung der energetischen Inspektion gliedert sich in drei Teile:

1. Feststellung der Parameter für die Auslegung und die Betriebsweise:
   - Gebäude-/Zonenparameter,
   - Klima- und Behaglichkeitsparameter,
   - Betriebszeiten und Regelung;

2. Feststellung der Effizienz der wesentlichen Komponenten:
   - Inspektion RLT-Gerät,
   - Luftleitungsnetz,
   - Kälteerzeuger und Rückkühler (nur bei Klimaanlagen),
   - Kaltwasser- und Kühlwasserverteilung (nur bei Klimaanlagen),
   - Effizienzkennwert für Kälteerzeugungssystem (nur bei Klimaanlagen),
   - Endgerät;

3. Beurteilung des Systems:
   - Beurteilung Klimakonzept,
   - Vergleichskennwerte,
   - Beurteilung Gesamtsystem.

Als Ergebnis stellt der Inspekteur einen Inspektionsbericht aus. Der Inspektionsbericht wendet sich an den Auftraggeber. Er soll zum Nachweis der geforderten energetischen Inspektion nach EnEV bzw. EPBD dienen. Er beinhaltet eine verständliche Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, gibt Handlungsempfehlungen und zeigt Verbesserungspotenziale auf (257).

Neben der beschriebenen Norm gibt es weitere Dokumente, welche das Vorgehen bei einer energetischen Inspektion beschreiben bzw. den Inspekteur bei der Durchführung der Inspektion unterstützen können. In Deutschland kann hierbei auf das VDMA-Einheitsblatt 24197-1 (263) verwiesen werden.

Instandsetzung von HVAC-Anlagen

Umsetzung der im Inspektionsbericht aufgelisteten Handlungsempfehlungen, um den Sollzustand der RLT-Anlage wieder herzustellen.

Verbesserung von HVAC-Anlagen

Umsetzung von Maßnahmen, die Behaglichkeit, Energie- oder Kosteneffizienz weiter zu verbessern.

Monitoring

Siehe Kapitel 3.10.1.7

3.10.4 Erreichter Umweltnutzen, Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung und Beispiele

Erreichter Umweltnutzen

Durch fachgerechte Planung und Betrieb sowie Instandhaltung gebäudetechnischer Anlagen zur Konditionierung des Raumklimas können erhebliche Mengen an Energie und Treibhausgasemissionen eingespart werden.

Durch die Vermeidung unsauberer Verbrennung (3.10.1.6) und die fachgerechte Installation von Abgasreinigungs- und Fortluftfiltrationsanlagen (3.10.3.4) können gas- und partikelförmige Schadstoffemissionen vermieden bzw. eingegrenzt werden.

Medienübergreifende Wirkungen

Neben den Einsparungen von Energie und Treibhausgasemissionen tragen die beschrieben Maßnahmen zum Erhalt eines geeigneten Innenraumklimas bei. Das Innenraumklima beeinflusst maßgeblich die Gesundheit, Produktivität und Behaglichkeit der Nutzer (264).

Anwendbarkeit

Grundsätzlich ist das beschriebene Vorgehen für Planung, Betrieb und Instandhaltung von Heiz-, Kühl- und Lüftungsanlagen für jedes Gebäude anwendbar und sinnvoll.

Ob eine bestimmte Technologie für ein Gebäude in Frage kommt, ist abhängig von den Rahmenbedingungen des Gebäudes und des restlichen Systems.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die in diesem Kapitel beschriebenen Maßnahmen zielen darauf ab, Heizungs-, Kühlungs- und Lüftungsanlagen so zu planen und zu betreiben, dass ein gewünschtes Raumklima möglichst

energieeffizient erreicht wird. Im Vergleich zu weniger effizienten Anlagen erreicht man somit eine Einsparung von Energie und damit Betriebskosten.

In Bezug auf Heiztechnik ist die Höhe der eingesparten Kosten abhängig vom genutzten Brennstoff (Brennstoffkosten) und der angewandten Technik (Nutzungsgrad des Systems, siehe Kapitel 3.10.1.5). Die Einsparpotenziale in diesem Bereich sind somit situationsabhängig zu bewerten.

Kompressions-Kältemaschine/Wärmepumpen und Lüftungsanlagen werden elektrisch betrieben. Zudem fällt für Hilfsenergie elektrische Energie an. Die Einsparpotenziale sind somit abhängig von den Stromkosten am jeweiligen Standort.

Triebkraft für die Umsetzung

Die Verbesserung der Energieeffizienz in Kombination mit kurzen Amortisationszeiten sowie erhöhter Mitarbeiterzufriedenheit und Produktivität stellt die entsprechende Motivation für die Umsetzung der beschriebenen Techniken (normale Marktkräfte) dar.

Beispiele

Heiztechnik

Im Jahr 2008 führte die GRUNDFOS Pumpenfabrik GmbH eine Energieanalyse am Fertigungsstandort Wahlstedt durch. Die Analyse kam zu dem Ergebnis, dass durch die Modernisierung der Heizzentrale große Einsparpotenziale bei Energieverbrauch und -kosten erzielt werden können.

Energieeffizienzmaßnahmen:

- Reduzierung der überdimensionierten Wärmeversorgungsgesamtleistung von 8,5 MW (drei Kessel) auf zwei Kessel mit 0,9 MW und 1,95 MW (Niedertemperaturkessel mit Abgaswärmetauscher und kompletter Abgasanlage),
- Einbau von zwei neuen Brennern inkl. Drehzahl- und O_2-Regelung,
- Installation einer Mehrkesselregelung (Integration in vorhandene Gebäudetechnik),
- Anpassung der gesamten Hydraulik inklusive Entkopplung der Heiz- und Verbraucherkreise und Einsatz drehzahlgeregelter Pumpen sowie Steuerung durch Messung des Volumenstroms.

Erreichter Nutzen:

- Senkung Brennstoffverbrauch: 1.806.000 kWh/Jahr,
- Senkung Stromverbrauch: 160.000 kWh/Jahr,
- Prozentuale Energieeinsparung im Jahr: 22 %,
- CO_2-Reduzierung: 2 479 t/Jahr,
- Investition: 265.000 €,
- Kostensenkung: 66.500 €/Jahr (ca. 58.700 €/Jahr Wärme und 7.800 €/Jahr Strom),
- Kapitalrendite: 25 %.

(265)

Kältetechnik

Die Gourmet Fleischerei und Feinkost GmbH beschäftigt am Standort Herzberg in Brandenburg 80 Mitarbeiter und verarbeitet 3.600 Tonnen Schweine- und Rindfleisch pro Jahr. In 24 Kühlräumen mit einer Fläche von 4.500 m^2 findet die Zerteilung, Reinigung, Weiterverarbeitung und Lagerung der Produkte statt.

Die Kältemaschinen waren überdimensioniert. Zur Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen wurde der Energie- und Leistungsbedarf der Kälteanlagen ermittelt. Im Rahmen der daraufhin entwickelten Optimierungsmaßnahmen wurden die einzelnen Kältemaschinen durch mehrere Verbundsysteme ersetzt, die durch Frequenzumrichter bedarfsgerecht geregelt werden können. Die Kälteleistungszahl

konnte um 34 Prozent erhöht werden. Die Abwärme des Verbundsystems wird für die Warmwasserbereitung im Betrieb genutzt.

Es wurden folgende Ergebnisse erreicht:

- Absolute Endenergieeinsparung pro Jahr: 560.000 kWh/a,
- prozentuale Endenergieeinsparung pro Jahr: 55 %,
- Kosteneinsparung pro Jahr: 67.000 €/Jahr,
- Investition: 200.000 €,
- CO_2-Reduktion pro Jahr: 354 t.

(266)

Der Instandhaltungs-Information Nr. 22 der Arbeitsgemeinschaft Instandhaltung Gebäudetechnik (AIG) des Verbandes Deutscher Maschinen und Anlagenbau (VDMA) ist eine Vielzahl von Instandhaltungsmaßnahmen bewertet (267)

3.11 Beleuchtung

3.11.1 Grundlagen

3.11.1.1 Einleitung

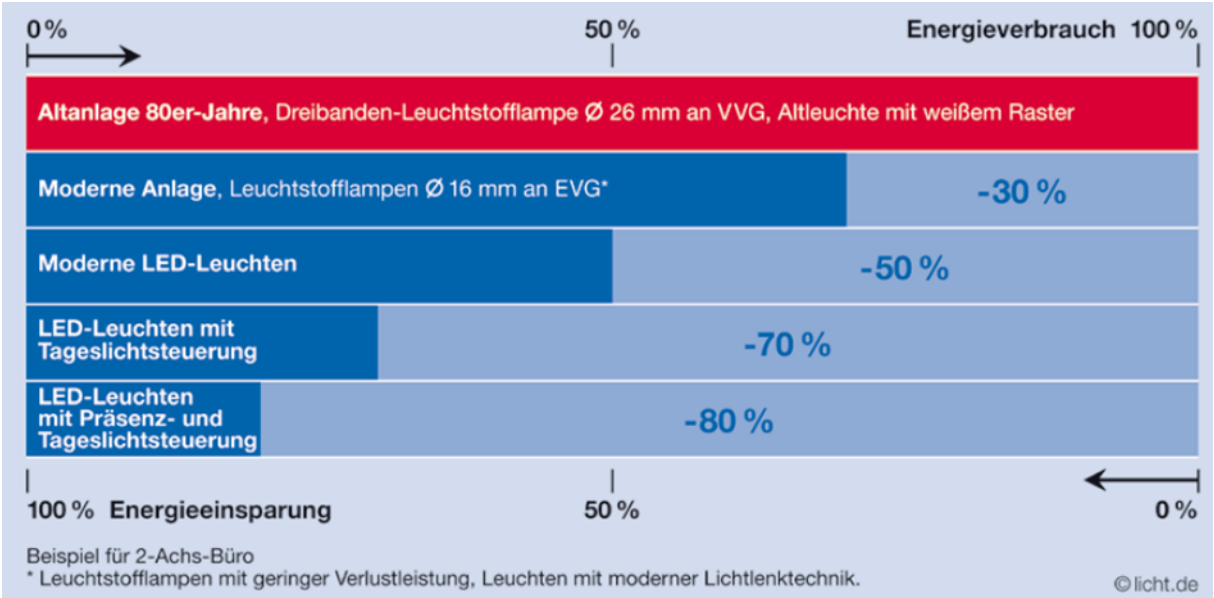
Künstliche Beleuchtung verursacht einen bedeutenden Teil des gesamten weltweit verbrauchten Stroms. Nach Angaben der Internationalen Energieagentur/United Nations Environment Programme (IEA/UNEP, 2014) beträgt der Anteil der Beleuchtung am weltweiten Stromverbrauch 15 Prozent. (268) Davon entfallen rund 80 Prozent auf die Bereiche Industrie, Handwerk und Gewerbe sowie Verkehr. Die übrigen 20 Prozent des Stroms für die Beleuchtung werden in privaten Haushalten verbraucht (268).

Beleuchtungsanlagen finden dabei in den verschiedensten Anwendungsbereichen, wie Produktionshallen, Büroräumen, Lagerhallen oder Außenbereiche ihren Einsatz. Unter der Berücksichtigung nachfolgender Faktoren können durch den Einsatz moderner, energieeffizienter Lichtsysteme die Energiekosten um bis zu 80 Prozent gesenkt werden (269).

- Nutzung von Tageslicht,
- sinnvolle Steuerung der Beleuchtung,
- Verwenden von Anwesenheitssensoren,
- intelligenter Einbezug der Nutzungszeiten sowie
- energieeffiziente Lampen (270).

Die Höhe des Einsparpotentials hängt dabei maßgeblich vom Ist-Zustand der bestehenden Beleuchtungsanlage ab (siehe Abbildung 3.11-1).

Abbildung 3.11-1: Einsparpotentiale bei Innenbeleuchtung



Quelle: (268)

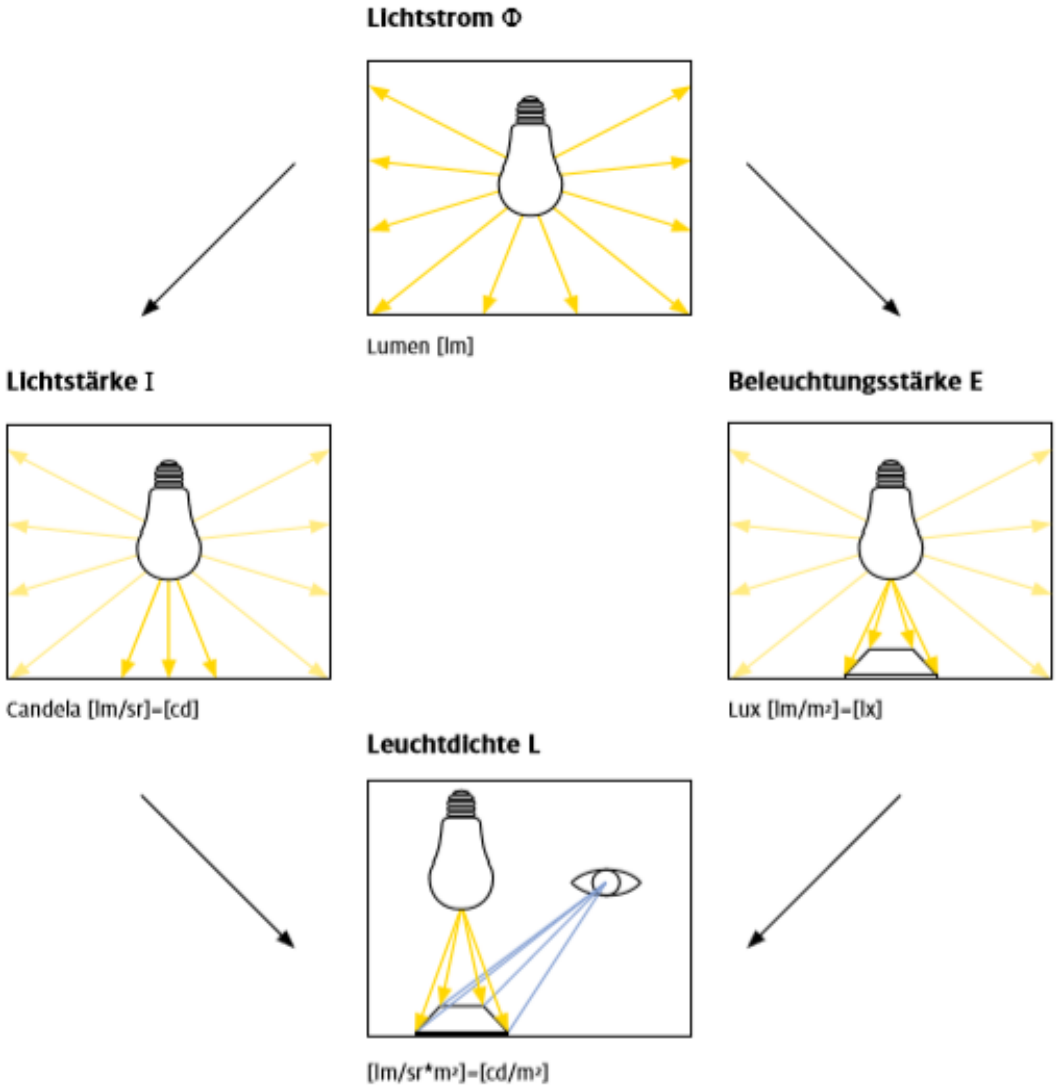
Trotz der hohen Energieeinsparpotenziale im Bereich der Beleuchtung darf eine Modernisierung von Beleuchtungsanlagen keinesfalls auf Kosten der Lichtqualität erfolgen. Energieeffizienz ist ein zentrales Qualitätskriterium. Andere Kriterien, wie die Sehaufgabe bzw. der Sehkomfort sind mindestens gleichrangig zu behandeln und dürfen daher nicht vernachlässigt werden. Die Beleuchtung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Motivation, Leistungsfähigkeit, das Wohlbefinden und die Gesundheit von Menschen sowie die Fehlervermeidung und die Arbeitssicherheit an Arbeitsplätzen. In diesem Zusammenhang soll auch auf den Einfluss künstlicher Beleuchtung in Form von Lichtverschmutzung hingewiesen werden, welche aufgrund der künstlichen Aufhellung des Nachthimmels den Tag-Nacht-Zyklus der Lebewesen auf der Erde stört. Dies kann zum Beispiel beim Menschen zur Schwächung des Immunsystems oder am Beispiel von Zugvögeln zu einer negativen Beeinträchtigung der nächtlichen Orientierung führen (271).

Eine Beleuchtungsanlage ist demnach so auszulegen, dass sie einerseits energieeffizient und wirtschaftlich arbeitet und andererseits die Anforderungen an die Lichtqualität erfüllt.

3.11.1.2 Lichttechnische Größen

Die Bewertung von Leuchten und die Planung von Beleuchtungsanlagen erfolgt mittels unterschiedlicher lichttechnischer Größen. Abbildung 3.11-2 veranschaulicht die Definitionen dieser Größen.

Abbildung 3.11-2: Veranschaulichung der Definitionen lichttechnischer Größen



Quelle: (270)

Lichtstrom

Der Lichtstrom ist das Maß für die abgegebene Lichtmenge (auch „Lichtleistung“), die eine Lichtquelle in den gesamten Raum abstrahlt und wird in der Maßeinheit Lumen (lm) gemessen. Ein großer Teil der von einem Leuchtmittel aufgenommenen elektrischen Leistung wird in Wärme umgesetzt. Dabei unterscheidet sich der abgegebene Lichtstrom je nach Anschlussleistung für die verschiedenen Lampenarten. Glühlampen geben etwa nur 5 Prozent, Leuchtstofflampen zwischen 20 und 40 Prozent ihrer elektrischen Leistung als Licht ab (272). LEDs hingegen erreichen heutzutage Wirkungsgrade von 40 bis 50 Prozent (273).

Lichtausbeute

Die Lichtausbeute beschreibt das Verhältnis von Lichtstrom (Lumen) zu aufgewendeter Leistung (Watt). Der theoretisch erreichbare Maximalwert bei monochromatischer Strahlung beträgt 683 lm/W (272). Die tatsächlich erreichbaren Lichtausbeuten variieren je nach Leuchtmittel, bleiben jedoch stets weit unter diesem Idealwert (274).

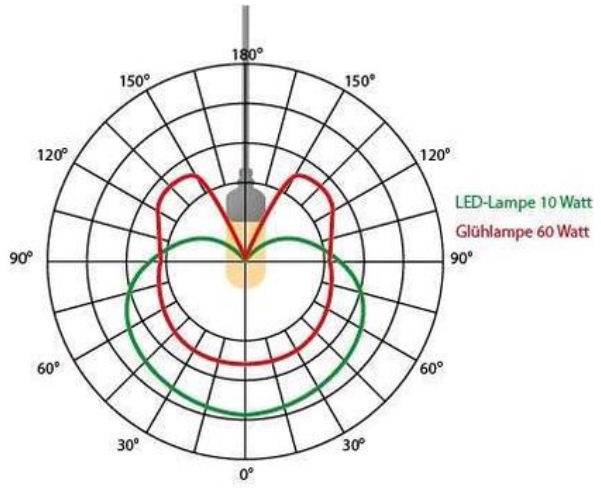
Lichtstärke

Eine ideale, punktförmige Lichtquelle strahlt ihren Lichtstrom gleichmäßig in alle Richtungen des Raumes ab. Dabei ist ihre Lichtstärke in allen Richtungen gleich. In der Praxis ergibt sich jedoch stets eine ungleichmäßige räumliche Verteilung des Lichtstroms, die einerseits durch den Aufbau der

Leuchtmittel bedingt ist und andererseits durch bewusste Lenkung des Lichts bewirkt wird. Es ist daher sinnvoll, ein Maß für die räumliche Verteilung des Lichtstroms, d. h., die Lichtstärke des Lichts anzugeben. Die Lichtstärke besitzt die Maßeinheit Candela (cd), welche sich aus dem Verhältnis des Lichtstroms und dem Raumwinkel ermittelt. Mit zunehmendem Abstrahlwinkel vergrößert sich die ausgestrahlte Fläche, die sich aufgrund der Bauart der verschiedenen Leuchtmittel unterscheidet.

Die räumliche Verteilung der Lichtstärke einer Leuchte wird als Lichtstärkeverteilungskörper bezeichnet. Schnitte durch dessen senkrechte Achse stellen Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) in sogenannten C-Ebenen dar, die in der Regel in Polarkoordinaten dokumentiert werden. Darin sind die Werte der Lichtstärke bei genormten Betriebsbedingungen der Lichtquelle (z. B. Gebrauchslage, Umgebungstemperatur 25 °C) dargestellt. Sie sind auf 1.000 Lumen bezogen und in der Einheit cd/klm (Candela pro Kilolumen) als normierte LVK angegeben (275).

Abbildung 3.11-3: Lichtstärkeverteilungskurve einer LED-Lampe mit 10 Watt und Glühlampe mit 60 Watt



Quelle: (276)

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke wird in der Maßeinheit Lux (lx) angegeben und beschreibt die Menge des Lichtstroms, die auf eine Fläche trifft. Diese nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle ab, das heißt, bei doppelter Entfernung zur Leuchte wird nur noch ein Viertel der Beleuchtungsstärke erreicht.

Die Beleuchtungsstärke lässt sich in jeder virtuellen Ebene im Raum berechnen oder einfach mit einem Luxmeter messen. So gibt die horizontale Beleuchtungsstärke Eh das Beleuchtungsniveau auf einer waagerechten Nutzebene an, während sich die vertikale Beleuchtungsstärke Ev auf senkrechte Ebenen bezieht. Für gutes Erkennen vertikaler Flächen und Gegenstände im Raum wird die zylindrische Beleuchtungsstärke Ez verwendet (277). Sie ist der über alle Richtungen um einen Punkt gebildete Mittelwert der vertikalen Beleuchtungsstärken. Durch den Vergleich von zylindrischer und horizontaler Beleuchtungsstärke kann die Schattigkeit beurteilt werden. Eine gute Schattenwirkung wird erreicht, wenn in einer Höhe von 1,20 m über dem Boden das Verhältnis von Ez zu Eh im Bereich von 0,3 und 0,6 liegt (278).

Die Beleuchtungsstärke ist einer der wichtigsten beleuchtungstechnischen Planungswerte und muss auf die jeweilige Arbeitsaufgabe abgestimmt sein. Für betriebliche und öffentliche Stätten gelten genaue Vorgaben, die im Interesse von Arbeitsschutz und Personensicherheit unbedingt eingehalten werden müssen. Die erforderliche Beleuchtungsstärke für Arbeitsplätze hängt dabei stark von der Art

der Sehaufgaben ab (siehe Tabelle 3.11-1) und wird in der DIN EN 12464 Teil 1 und Teil 2 sowie in der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR) A3.4 vorgeschrieben (279).

Tabelle 3.11-1: Beleuchtungsstärken-Tabelle laut Arbeitsstättenrichtlinie

Ansprüche an die Sehaufgabe	Nennbeleuchtungs-stärke in [Lux]	Beispiel
sehr gering	50	Abstellräume, Lagerräume
gering	100	Pausenräume, Verkehrszonen
gering	150	Verkehrszonen mit Fahrzeugen, Ladebereiche
mäßig	200 - 300	grobe Arbeiten (Arbeiten an den Werkzeugmaschinen)
mittel	500	Büro
hoch	750 - 1000	Techn. Zeichnen, Feinmechanik, Druckerei
sehr hoch	1500	Uhrmacherwerkstatt, Elektronikwerkstatt
außergewöhnlich	2000	Gravieren, Kunststopfen

Quelle: (280)

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte ist die einzige lichttechnische Grundgröße die vom Auge wahrgenommen wird und hat daher von allen photometrischen Größen den unmittelbarsten Bezug zur optischen Sinneswahrnehmung. Sie bildet somit die Grundlage der wahrgenommenen Helligkeit. Der tatsächliche Helligkeitseindruck wird jedoch weiterführend noch vom Adaptationszustand des Auges, den umgebenden Kontrastverhältnissen und dem Informationsgehalt der gesehenen Fläche beeinflusst (270). Sie ist definiert als das Verhältnis der Lichtstärke und der auf die Ebene senkrecht zur Betrachtungsrichtung projizierten Fläche (cd/m^2). Das Licht kann aber auch von der Fläche reflektiert oder transmittiert werden. Für gestreut reflektierende (matte) und für gestreut transmittierende (trübe) Materialien wird die Leuchtdichte aus der Beleuchtungsstärke und dem Reflexions- bzw. Transmissionsgrad berechnet.

Die Kenntnis der (ortaufgelösten) Leuchtdichte und somit die Leuchtdichtenverteilung ist für die Beurteilung von Lichtquellen in zweierlei Hinsicht von Bedeutung:

- zum einen ist bei flächigen Leuchten die Homogenität der Leuchtdichte ein wichtiges Qualitätskriterium (hier kommt es vor allem auf eine gleichmäßige Helligkeit an),
- zum anderen sollte bei Leuchten zur Vermeidung von Blendung eine zu hohe lokale Leuchtdichte vermieden werden (281).

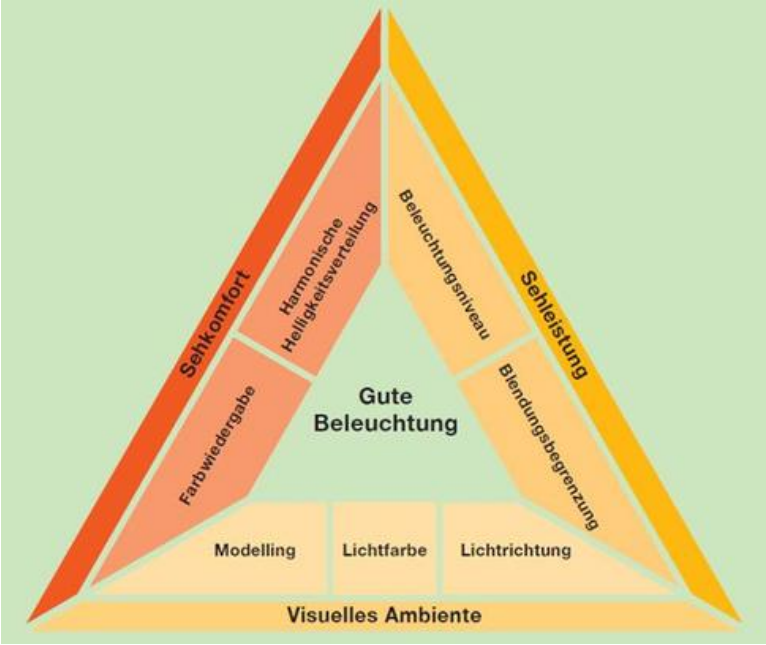
3.11.1.3 Gütemerkmale

Die Beleuchtungsqualität wird in der Lichttechnik in Form von unterschiedlichen Gütemerkmalen beschrieben. Die Qualität des künstlichen Lichts dient nicht nur dem Sehen, sondern beeinflusst auch Wohlbefinden und Stimmung. Insofern genügt es nicht, eine Beleuchtungsanlage nach einem einzigen Merkmal – zum Beispiel der Beleuchtungsstärke – auszurichten.

Dabei werden je nach Nutzung und Erscheinungsbild eines Raumes die Gütemerkmale unterschiedlich gewichtet, um beste Beleuchtungsqualität sicherzustellen. Dabei gilt:

- Die Sehleistung wird durch das Beleuchtungsniveau und die Begrenzung von Direkt- und Reflexblendung beeinflusst.
- Der Sehkomfort wird gewährleistet durch gute Farbwiedergabe und harmonische Helligkeitsverteilung im Raum.
- Das visuelle Ambiente wird bestimmt durch Lichtfarbe, Lichtrichtung und Modelling (282).

Abbildung 3.11-4: Gütekriterien guter Beleuchtung



Quelle: (282)

Um eine gute Beleuchtungsqualität zu erzielen, sind bei einer Beleuchtungsplanung die in Abbildung 3.11-4 dargestellten Gütemerkmale zu berücksichtigen. Dabei sind nach der Norm EN 12464 (283) sowie in der ASR 3.4 (280) - je nach Art des Raumes, der Aufgabe oder Tätigkeit - die verschiedenen Anforderungen an die Beleuchtung und deren Gütemerkmale zwingend einzuhalten (siehe auch Tabelle 3.11-3):

- Wartungswert nach Beleuchtungsstärke E_m,
- Blendung: oberer Grenzwert der Direktblendung UGR,
- Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke U_o,
- untere Grenze für den Farbwiedergabeindex R_a.

Wartungswert nach Beleuchtungsstärke E_m

Um sicherzustellen, dass die - sich aus der jeweiligen Sehaufgabe - einzuhaltenden Mindestwerte der Beleuchtungsstärke auch unter Betriebsbedingungen der Beleuchtungsanlage vorhanden sind, werden die Beleuchtungsstärkewerte in der Norm EN 12464 als Wartungswerte E_m definiert. Der Wartungswert der Beleuchtungsstärke entspricht dabei dem örtlichen und Mittelwert, der zu keiner Zeit unterschritten werden darf, unabhängig vom Alter und Zustand der Beleuchtungsanlage (279).

Aufgrund der Alterung einer Beleuchtungsanlage ist es notwendig, einen höheren Neuwert zu installieren, um die geforderten Mindestwerte der Beleuchtungsanlage über den gesamten Betrachtungszeitraum einzuhalten. Der Neuwert wird dabei mit dem Wartungsfaktor MF (engl.: Maintenance Factor) bestimmt.

$$Neuwert = \frac{Wartungswert}{Wartungsfaktor}$$

Der Wartungsfaktor ist abhängig von der Art der eingesetzten Lichtquellen und Leuchten, von Staub- und Schmutzbelastung des Raumes bzw. der Umgebung sowie von Wartungsmethode und Wartungsintervall und muss gemäß DIN EN 12464-1, Kapitel 4.10 (284) in einem Wartungsplan dokumentiert werden. Je höher der Wartungsfaktor für eine Beleuchtungsanlage angesetzt werden kann, desto niedriger ist deren Energiebedarf.

Als Richtwert können folgende Wartungsfaktoren angenommen werden:

- 0,80 für sehr saubere Räume (Reinräume) oder niedrige Nutzungszeit,
- 0,67 für saubere Räume, 3-jähriger Wartungszyklus (normales Büro),
- 0,57 für Außenbeleuchtungsanlagen,
- 0,50 für Beleuchtung mit starker Verschmutzung (285).

In der Praxis hat sich gezeigt, dass ein pauschaler Wartungsfaktor die Anlage überdimensionieren kann. Es kann sich wirtschaftlich durchaus lohnen, einen raumindividuellen Wartungsfaktor zu ermitteln (285). Der Wartungsfaktor für die Innenbeleuchtung setzt sich aus einzelnen Teilwartungsfaktoren zusammen und kann mit folgender Formel bestimmt werden (286):

Formel 3.11-1

$$MF = (LLMF * LSF) * LMF * RMF$$

Legende

MF	Wartungsfaktor
LLMF	Lampenlichtstrom-Wartungsfaktor
LSF	Lampenlebensdauerfaktor LSF (Lamp Survival Factor)
LMF	Leuchtenwartungsfaktor
RMF	Raumwartungsfaktor

Die enthaltenen Teilwartungsfaktoren für die Wartung der Leuchten (LMF) und Räume (RMF) können, abhängig von der Leuchtenart bzw. von den Umgebungsbedingungen und der Raumgeometrie, entsprechend den Tabellen der CIE-Publikation 97 entnommen werden (287). Die Bestimmung der Teilwartungsfaktoren für den Lampenlichtstrom (LLMF) und die Lampenlebensdauer (LSF) müssen wiederum über produktspezifische Angaben des Herstellers einbezogen und an den Lebenszyklus der Beleuchtungsanlage – inklusive ggf. abweichender Umgebungsbedingungen – angepasst werden (288).

Die empfohlene Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe ist in Innenräumen gemäß den in der DIN EN 12464-1(14) angegebenen Wartungswerten zu wählen und darf unabhängig vom Alter und dem Zustand der Beleuchtungsanlage zu keinem Zeitpunkt unterschritten werden. Für Arbeitsstätten im Freien gelten die Werte der DIN EN 12464-2 (15). Die Beleuchtungsstärke von Umgebungsbereichen muss in Beziehung zu der Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe stehen und sollte eine ausgewogene Leuchtdichtenverteilung im Gesichtsfeld schaffen.

Die Bestimmung der Leuchtdichte, die für die Straßenbeleuchtung das Maß des erforderlichen Beleuchtungsniveaus ist, ist mit einem höheren Planungs- und Messaufwand verbunden. Sie ist abhängig vom Lichtstrom der eingesetzten Lichtquellen, von der Lichtstärkeverteilung der Leuchten, der Geometrie der Beleuchtungsanlage sowie den Reflexionseigenschaften des Straßenbelages.

Blendung: Obere Grenze der Direktblendung

Blendung kann entweder durch Direktblendung oder durch Reflexblendung verursacht werden:

- Direktblendung entsteht durch zu hohe Leuchtdichten, z. B. durch ungeeignete oder falsch angebrachte Leuchten, freistrahlende Lichtquellen oder auch Sonneneinstrahlung durch Fenster.

- Reflexblendung entsteht durch Spiegelung auf glänzenden Oberflächen, z. B. auf Bildschirmen, Kunstdruckpapier oder auch auf nassen Straßen (289).

Die Wirkung von Direkt- und Reflexblendung ist dabei ähnlich. Sie beeinträchtigen vor allem die Wahrnehmung von Kontrasten, die zum störungsfreien Sehen notwendig sind. Jede Art der Blendung vermindert den Sehkomfort, beeinträchtigt das Wohlbefinden (psychologische Blendung) und setzt zudem die Sehleistung (physiologische Blendung) herab. Sie sollte daher unbedingt vermieden werden (289).

Direktblendung durch künstliche Lichtquellen oder das Sonnenlicht lässt sich vermeiden, wenn Lichtquellen durch Raster und spezielle Reflektoren ausreichend abgeschirmt und Fenster abgedunkelt werden. Vor Reflexblendung schützen

- die richtige Anordnung der Leuchten im Raum,
- die Leuchtdichtebegrenzung der Leuchten sowie
- die Verwendung matter Oberflächen.

Für eine effiziente Beleuchtung sollte grundsätzlich, unter Einhaltung der Anforderungen der Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke U_o nach DIN EN 12464 (siehe auch Folgeabschnitt), eine raum- bzw. arbeitsplatzbezogene Anordnung der Leuchten vorgenommen werden sowie Leuchten gewählt werden, deren Leuchtdichte zu keinen störenden Lichtreflexen auf dem Sehobjekt führt (290).

Die Bewertung der Blendung kann für alle Leuchten, die regelmäßig im Raum angeordnet werden, mit dem von der Internationalen Beleuchtungskommission CIE (Commission International de l'Eclairage) entwickelten Verfahren des „Unified Glare Rating” (UGR) ermittelt werden. Dabei wird die Blendung der gesamten Beleuchtungsanlage für eine definierte Beobachterposition berechnet (291); (292); (293).

Je niedriger der UGR-Wert, desto geringer ist die Blendung. Im Außenbereich wird der Blendwert R_G wiederum nach der EN 12646-2 angewendet.

Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke U_o

Die Gleichmäßigkeit U_o wird sowohl in der DIN EN 12464 als auch in der ASR A3.4 als das Verhältnis der minimalen Beleuchtungsstärke (entspricht dem Wartungswert der Beleuchtungsstärke) E_{min} im Mess- oder Bewertungs-Raster und der mittleren Beleuchtungsstärke E definiert, der zu keiner Zeit unterschritten werden darf.

Für den Bereich der Sehaufgabe, den Bereich der Tätigkeit oder den Innenraumbereich ist in der DIN EN 12464-1 die jeweils geforderte Gleichmäßigkeit angegeben. Darin wird diese für den unmittelbaren Umgebungsbereich mit 0,40 und für den Hintergrundbereich mit 0,10 festgelegt. In der ASR A3.4 wird für den Bereich des Arbeitsplatzes eine Gleichmäßigkeit von 0,6 gefordert, wobei der Minimalwert der Beleuchtungsstärke nicht im Bereich der Hauptsehaufgabe liegen darf. Für den Umgebungsbereich wird wiederum ein Wert von 0,5 für die Gleichmäßigkeit vorgeschrieben. Damit liegen die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit im Umgebungsbereich immer und im Bereich des Arbeitsplatzes manchmal höher als in den korrespondierenden Bereichen der DIN EN 12464-1. Bei der Beleuchtungsplanung für Arbeitsplätze sind die Gleichmäßigkeits-Anforderungen der ASR A3.4 heranzuziehen (294).

Sollte die durch Alterung bzw. durch vorzeitigen Ausfall einzelner Lichtquellen bedingte Abnahme der minimalen Beleuchtungsstärke stärker fortschreiten als die Abnahme der mittleren Beleuchtungsstärke, muss die Wartung bzw. Reinigung der Anlage bereits bei Erreichen des Mindestwertes der Gleichmäßigkeit erfolgen (295).

Untere Grenze für den Farbwiedergabeindex R_a

Die Farbqualität einer Lampe mit annähernd weißem Licht wird durch zwei Eigenschaften gekennzeichnet:

- die Lichtfarbe der Lampe selbst und
- die Farbwiedergabe, welche das farbige Aussehen von Gegenständen und Personen beeinflusst, die von dieser Lampe beleuchtet werden.

Die Lichtfarbe einer Lampe bezieht sich auf die wahrgenommene Farbe des abgestrahlten Lichtes. Das von Lichtquellen abgestrahlte Licht besitzt eine Eigenfarbe, die sogenannte Lichtfarbe. Sie wird durch ihre ähnliche Farbtemperatur (Tcp) beschrieben (284). Je höher die Temperatur, desto kühlweißer die Lichtfarbe. Die Auswahl der Lichtfarbe ist eine Frage der Psychologie, der Ästhetik und dessen, was als natürlich angesehen wird.

Dagegen verbessert eine gute Farbwiedergabe die Sehleistung, die Behaglichkeit und das Wohlbefinden. Farben der Umgebung und von Objekten sowie die Farbe der menschlichen Haut müssen korrekt und - wo in vernünftiger Weise realisierbar - natürlich wiedergegeben werden. Letzteres erlaubt einige Kompromisse bei Arbeitsplätzen im Freien.

Zur objektiven Kennzeichnung der Farbwiedergabe-Eigenschaften einer Lichtquelle wird im einfachsten Falle der Allgemeine Farbwiedergabe-Index R_a verwendet. In der nachfolgenden Tabelle 3.11-2 wird der Farbwiedergabeindex für verschiedene Leuchtmittel dargestellt, wobei der Maximalwert 100 entspricht.

Tabelle 3.11-2: Farbwiedergabe-Index R_a verschiedener Leuchtmittel

Farbwiedergabe-Index R_a	Leuchtmittel
95 – 100	Halogenlampen, Glühlampen, (hochwertige) LEDs
90 - 94	LEDs
80 - 89	Kompakt-Leuchtstofflampen, Leuchtstofflampen, Energiesparlampen mit EVG, Entladungslampen, (ältere) LEDs
60 - 79	Leuchtstofflampen, Quecksilberdampf-Hochdrucklampen
40 - 59	Quecksilberdampf-Hochdrucklampen
0 - 39	Natriumdampf-Hochdruck- und Niederdrucklampen

Quelle: (296)

Die einzuhaltenden Mindestwerte des Farbwiedergabe-Indexes für die jeweiligen Innenbereiche werden in der DIN EN 12464-1, Tabelle 5.1 ff. (284) angegeben und betragen bei ständig besetzten Arbeitsplätzen einen R_a von mindestens 80. Für spezifische Notwendigkeiten der Farbunterscheidungen ist ein R_a von 90 und mehr vorgesehen. Für Bereiche im Freien gelten wiederum die Vorschriften gemäß DIN EN 12464-2, Tabelle 5.1 ff. (297).

3.11.1.4 Anforderungen an Innen- und Außenbeleuchtung

Beleuchtungsanlagen in Gebäuden sowie im Freien haben grundsätzlich dieselbe Aufgabe. Es sind in beiden Fällen Bereiche dort mit künstlichem Licht zu versorgen, wo das Tageslicht nicht ausreicht. Jedoch unterscheiden sich deren Anforderungen in Punkto Lichtqualität. Wird in Innenbereichen eine

hohe Farbwiedergabe und Beleuchtungsstärke gefordert, ist im Freien die Leuchtdichte eines der wesentlichen lichttechnischen Kriterien. Außerdem soll neben der Sehleistung die künstliche Beleuchtung auf Straßen und Wegen zum Schutz der Passanten beitragen. Dagegen nimmt bei der Innenbeleuchtung bedarfsgerechtes Licht, visuelle Ergonomie und Wohlbefinden einen wesentlichen Stellenwert ein. Lichtplaner, Architekten und Installateure müssen sich diesen Anforderungen bei der Planung einer Beleuchtungsanlage stellen und daneben zahlreiche Richtlinien, Gesetze, Vorschriften und Normen beachten. Letztere bilden in Deutschland und in den übrigen CEN-Mitgliedsländern einheitliche Standards, welche grundlegend für alle Beleuchtungsanlagen in Innenräumen und im Freien gelten (298):

Grundlegende Normen zur Beleuchtung

- ✓ DIN EN 1838 „Angewandte Lichttechnik – Notbeleuchtung“
- ✓ DIN EN 12665 „Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung“
- ✓ DIN EN 13032-2 „Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten“
    - Teil 2: „Darstellung von Daten für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien“
    - Teil 3: „Darstellung von Daten für die Notbeleuchtung von Arbeitsstätten“
    - Teil 4: „LED-Lampen, -Module und -Leuchten“
- ✓ DIN EN 60529 „Schutzarten durch Gehäuse“
- ✓ DIN EN 60598-1 „Leuchten – Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen“
- ✓ DIN VDE 0100 „Bestimmungen für das Errichten von Niederspannungsanlagen“
- ✓ DIN EN ISO 7010 „Graphische Symbole - Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen - Registrierte Sicherheitszeichen“

Weiter werden in den Regelwerken Anforderungen definiert, die sich im Einzelnen den Anforderungen der Innenbeleuchtung als auch der Außenbeleuchtung widmen. Diese sind mit den zuvor genannten Vorschriften einzuhalten und werden im Nachfolgenden näher betrachtet.

Häufig müssen in Deutschland parallel zur Anwendung der DIN EN 12464 (Teil 1 und 2) die Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4 „Beleuchtung“ umgesetzt werden (294). Im Unterschied zu der europäischen Norm EN 12464 (Teil 1 und Teil 2) bezieht sich die ASR A3.4 nicht auf die Erfordernisse der Erledigung der Sehaufgabe, sondern: „Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten wieder.“ (299).

In der Formulierung der Zielsetzung der ASR A3.4 ist der folgende Hinweis gegeben:

„Die Anforderungen dieser ASR weichen in Einzelfällen von Normen, insbesondere von DIN EN 12464-1:2011 Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen sowie DIN EN 12464-2:2007 - Teil 2: Beleuchtung im Freien ab. Die DIN EN 12464 Teil 1 und 2 legen Planungsgrundlagen für Beleuchtungsanlagen fest, berücksichtigen aber nicht die Anforderungen, die an Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit zu stellen sind.” (299).

Nach dem Arbeitsschutzrecht muss der Arbeitgeber bei Maßnahmen des Arbeitsschutzes, also auch bei der künstlichen Beleuchtung in seiner Arbeitsstätte, vom aktuell anerkannten Stand der Technik und Arbeitsmedizin ausgehen. Daraus folgt, dass dazu die Festlegungen der derzeit gültigen ASR anzuwenden sind.

Die technischen Vorgaben der genannten Normen müssen neben den Vorschriften der ASR A3.4 dennoch zwingend eingehalten werden.

<u>Zusätzliche spezielle Normen für den Innenbereich für Industriebetriebe</u>

- ✓ DIN 5034 „Tageslicht in Innenräumen“
- ✓ DIN 5035 „Beleuchtung mit künstlichem Licht“
- ✓ DIN EN 12464-1 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“
- ✓ DIN EN 15193 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Energetische Anforderungen an die Beleuchtung“
- ✓ DIN SPEC 67600 „Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen"

Normen spezielle Normen für den Außenbereich für Industriebetriebe

- ✓ DIN EN 12464-2 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 2: Arbeitsplätze im Freien“
- ✓ DIN EN 13201 „Straßenbeleuchtung“

3.11.1.5 Leuchtmittelarten

Die Umwandlung der elektrischen Energie in sichtbare Strahlung (Lichterzeugung) erfolgt in Leuchtmitteln (Lichtquellen). Die Leuchte ist dabei die gesamte Konstruktion um die Lichtquelle herum. Diese besteht aus mehreren Komponenten wie Halterung, Fassung, Reflektor, Schirm oder Glasabdeckung. In der Leuchte befindet sich die eigentliche Lichtquelle, welche als Leuchtmittel bezeichnet wird. Dies sind Lampen oder Module.

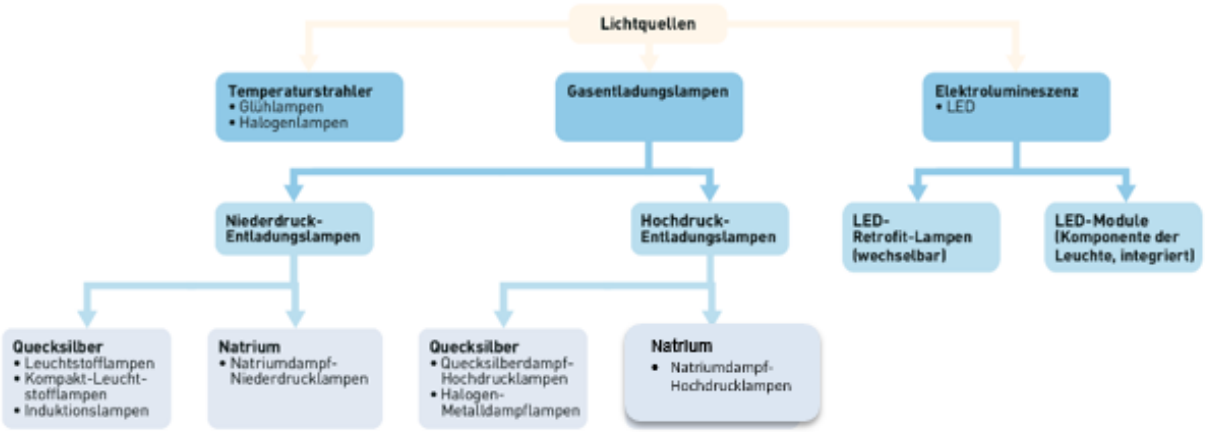
Prinzipiell werden drei Arten solcher Energieumwandlung unterschieden, nämlich die Lichterzeugung durch

- ► Temperaturerhöhung (Temperaturstrahler),
- ► Gasentladung (Entladungslampen) und
- ► elektronische Vorgänge in Festkörpern, Elektrolumineszenz (LED).

Marktübliche Temperaturstrahler und Entladungslampen sind stets mit Sockeln für den austauschbaren Betrieb in Leuchten ausgerüstet. Für LED-Leuchtmittel gilt dies überwiegend nicht mehr. In vielen Anwendungen werden heute bevorzugt Leuchten mit fest integrierten LED-Leuchtmitteln eingesetzt. Damit beschränken sich die Betriebskosten im Falle eines Defektes nicht auf den einfachen Austausch des Leuchtmittels, sondern schließen die Installation einer neuen Leuchte ein (300).

Eine Übersicht über die verbreitetsten Lichtquellen für die Beleuchtung zeigt die Abbildung 3.11-5.

Abbildung 3.11-5: Übersicht über die gebräuchlichsten Lichtquellen



Quelle: (300)

Nachfolgend werden die Lampenarten und deren typische Anwendungsfälle näher erläutert. Über diese Lampenarten hinaus gibt es noch spezielle Lichtquellen für medizinische, therapeutische, wissenschaftliche und andere Zwecke sowie für die Projektortechnik und die Fototechnik.

Temperaturstrahler

Glühlampen (Allgebrauchslampen) wurden bevorzugt in der Wohnraum- oder der repräsentativen Beleuchtung eingesetzt. Mit einer max. Lichtausbeute von 20 lm/W und einer mittleren Lebensdauer von 1.000 Stunden waren diese für kommerzielle und industrielle Anlagen in vielen Fällen wenig geeignet, z. B. kamen sie jedoch dort zum Einsatz, wo eine erschütterungsfreie Lichtquelle benötigt wurde. Halogen-Glühlampen fanden in der Vergangenheit wegen ihrer sofortigen Lichtstromabgabe auch zur Überwachung von Objekten, z. B. in Verbindung mit Bewegungsmeldern, Anwendung.

Temperaturstrahler sind aufgrund der Anforderungen nach der Verordnung (EG) Nr. 244/2009 (301) – bis auf wenige Ausnahmen – nicht mehr auf dem Markt verfügbar. Diese werden zunehmend von LED-Leuchten ersetzt (300).

Gasentladungslampen: Hochdruck-Entladungslampen

Hochdruck-Entladungslampen sind entweder Quecksilberdampf-Hochdrucklampen, Halogen-Metalldampflampen oder Natriumdampf-Hochdrucklampen.

Quecksilberdampf-Hochdrucklampen sind aufgrund der Verordnung (EG) Nr. 245/2009 (302) seit 2015 nicht mehr erlaubt (siehe Kapitel 3.11.2). Sie sind durch die leistungsfähigeren Halogen-Metalldampflampen nahezu vollständig ersetzt worden. Die breite Typenreihe der Halogen-Metalldampflampen erlaubt die Wahl von Lampen entweder mit sehr guten Farbwiedergabe-Eigenschaften, z. B. für die Beleuchtung von Verkaufsräumen und Schaufenstern, oder mit hoher Lichtausbeute für die wirtschaftliche Industriebeleuchtung. Deren Lichtausbeute liegt zwischen 65 lm/W und 120 lm/W bei einer Lebensdauer von rund 10.000 Betriebsstunden.

Natriumdampf-Hochdrucklampen zeichnen sich durch eine sehr hohe Lichtausbeute bis 150 lm/W aus. Sie werden daher traditionell in der Außenbeleuchtung und in hohen Hallen, z. B. der Stahlindustrie, verwendet, wo ihre weniger gute Farbwiedergabe toleriert werden kann.

Gasentladungslampen: Niederdruck-Entladungslampen

Leuchtstofflampen sind Quecksilberdampf-Niederdrucklampen. Grundsätzlich sind – von Sonderfällen abgesehen – stabförmige und Kompakt-Leuchtstofflampen höherer Leistung in der technischen Innenraumbeleuchtung im Einsatz. Aufgrund der Zusammensetzung des Leuchtstoffes wird in Dreibanden- und den früheren Standard-Leuchtstofflampen unterschieden. Letztere sind aufgrund der Öko-Design-Richtlinie basierend auf der Verordnung (EG) Nr. 245/2009 (302) bereits nicht mehr auf dem Markt erhältlich (siehe auch Punkt 3.11.2).

Deutlich verbessert im Hinblick auf der erzielten Lichtausbeute sind die Dreibanden-Leuchtstofflampen. Diese erreichen am elektronischen Vorschaltgerät (EVG) eine bis zu 57 Prozent höhere Lichtausbeute (rund 100 lm/W (272)) gegenüber den früheren Standardlampen. Darüber hinaus besitzen sie eine deutlich verbesserte Farbwiedergabe und eine Lebensdauer von bis zu 60.000 h (300); (303).

Kompakt-Leuchtstofflampen sind Dreibanden-Leuchtstofflampen kleiner Bauform. Sie erreichen eine max. Leuchtausbeute von ca. 90 lm/W. Kompakt-Leuchtstofflampen höherer Leistungsstufen werden anstelle stabförmiger Leuchtstofflampen in kompakten, runden, quadratischen oder rechteckigen Leuchten betrieben, die durch ihre Formgebung zusätzliche Möglichkeiten der architektonischen Gestaltung der Beleuchtungsanlage bieten. Einige Bauformen erreichen dabei bis zu 20.000 Betriebsstunden.

Natrium-Niederdrucklampen erzeugen hohe Lichtausbeuten von rund 180 lm/W (304). Aufgrund ihres geringen Farbwiedergabe-Index sind sie jedoch nach EN 12464-1 in der Innenraumbeleuchtung

nicht zulässig und finden stattdessen bei der Beleuchtung von Schleusen, Hafenanlagen und beim Objektschutz Einsatz, wo es auf eine Farberkennung nicht ankommt (300).

Elektrolumineszenz: Light Emitting Diodes (LED)

In der LED (Light Emitting Diode) findet die Lichterzeugung in einem räumlich sehr kleinen Bereich des p-n-Übergang des kristallinen, halbleitenden Materials statt, wo ein Teil der frei werdenden Energie in monochromatische Strahlung (einfarbiges Licht) umgesetzt wird. Je nach Halbleitermaterial wird eine bestimmte Farbe, Gelb, Orange, Rot, Grün, Blau oder Violett erzeugt. Ein Reflektor und eine Linse mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften verbessern die Lichtabstrahlung. Weißes Licht entsteht entweder durch

- Mischung des Lichtes von roten, grünen und blauen LED (RGB-Mischung) oder
- die Beschichtung einer blauen LED mit einem Leuchtstoff, der das blaue Licht der LED teilweise in Licht des grünen und roten Spektralbereichs umwandelt (300).

Die RGB-Mischung spielt heute in Anwendungen der Allgemeinbeleuchtung praktisch keine Rolle. Die RGB-Farbmischung findet jedoch im Bereich dekorativer und das Wohlbefinden fördernder Anwendungen, der Signaltechnik und als Wegleitungssysteme (in Gebäuden oder im Außenraum) ein breites Einsatzspektrum.

Die Konversion blauen LED-Lichts mittels einer Leuchtstoffbeschichtung ist hingegen ein Verfahren, das überall dort Anwendung findet, wo qualitativ hochwertiges weißes Licht in großer Menge benötigt wird. So zum Beispiel der Arbeitsstättenbeleuchtung und der Straßenbeleuchtung. Hohe Farbstabilität, gute bis sehr gute Farbwiedergabeeigenschaften sowie sehr hohe Lichtausbeuten weisen dieses Verfahren aus (300).

Weitere Entwicklungen im Bereich der Nutzung der Elektrolumineszenz betreffen die organischen LED, die so genannten OLED, bei denen die Lichterzeugung in einer organischen Substanz erfolgt. Für die Beleuchtung können OLEDs künftig viele Vorteile bieten, denn:

- Wie LEDs auch bringen diese sofort volle Leistung, lassen sich stufenlos über den Betriebsstrom dimmen und sind extrem flexibel in der Farbsteuerung.
- Sie geben gleichmäßiges, weitgehend blendfreies Licht mit hoher Farbwiedergabe.
- Sie sind flexibel einsetzbar: Tagsüber können sie transparent oder diffus sein und leuchten abends taghell.
- Sie können nahe an empfindliche Materialien gebracht und ohne Verbrennungsgefahr berührt werden (300).

Aufgrund der unterschiedlichen Variationen der LED-Leuchten werden Lichtausbeuten von 20 lm/W bis 180 lm/W erzielt und stellen somit sehr effiziente Leuchtmittel für die Innenbeleuchtung dar. Anzumerken gilt, dass bestimmte Bauformen von Niederdruck-Entladungslampen im Punkte der Effizienz von LED-Leuchten überlegen sind, diese jedoch aufgrund des niedrigen Farbwiedergabe-Index nicht für die Beleuchtung von Innenräumen gelistet werden (272).

Neben der Effizienz ist die Lebensdauer der Leuchtmittel ein wesentlicher Indikator für die Wirtschaftlichkeit. Mit einer Lebensdauer von beispielsweise 50.000 Betriebsstunden ist die LED den meisten anderen Lichtquellen weit überlegen. Beeinflusst wird die Lebensdauer einer LED insbesondere von der Produktqualität (Produktgestaltung, Qualität der verwendeten Bauteile sowie der Verarbeitung), der Umgebungstemperatur und der Anzahl der Schaltzyklen.

3.11.2 Effiziente Leuchtmittel

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Beleuchtung werden in Kapitel 3.11.5 dargestellt.)

In der Europäischen Gemeinschaft gilt die EU-Richtlinie 2009/125/EG. Sie definiert den Rahmen für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von energierelevanten Produkten (Energy related Products – ErP). Die wichtigste Änderung besteht darin, dass der Geltungsbereich von energiebetriebenen Produkten (z. B. Leuchten) auf energieverbrauchsrelevante Produkte ausgeweitet wurde. Diese werden in verschiedenen Verordnungen umgesetzt, die sich mit der Effizienz von Leuchtmitteln befassen (305), (301).

- ✓ Ökodesign-Richtlinie – Verordnung (EU) Nr. 244/2009

Darunter werden zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG die Anforderungen an Lampen mit ungebündeltem Licht vorgeschrieben. Sie ist in insgesamt sechs Stufen eingeteilt, welche mittlerweile alle in Kraft getreten sind.

Als Folge der Verschärfung durch die 6. Stufe der Verordnung erfüllen ab dem 01. September 2018 u. a. Hochvolt-Halogenlampen mit ungebündeltem Licht nicht mehr die Anforderungen der genannten Verordnung. Sie dürfen ab diesem Zeitpunkt nicht mehr in Verkehr gebracht werden, wohingegen Restbestände indes weiterhin verkauft und verwendet werden dürfen. Hochvolt-Halogenlampen werden mit einer Netzspannung von 230 Volt betrieben und haben in der Regel die Sockeltypen E27 und E14. Ausgenommen von dieser Verschärfung sind klare Halogenlampen mit den Sockeln R7s und G9 in Effizienzklasse C. Ab dem 01. September 2018 müssen darüber hinaus auch Niedervolt-Halogenlampen mit ungerichtetem Licht mindestens die Effizienzklasse B aufweisen (306) (200).

- ✓ Ökodesign-Richtlinie – Verordnung (EU) Nr. 1194/2012

Des Weiteren werden zur Durchführung der Verordnung 2012/1194/EG die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lampen mit gebündeltem Licht festgelegt. Zum 01. September 2016 trat die dritte und letzte Stufe dieser Verordnung in Kraft. Für alle Lampen mit gebündeltem Licht gelten seit diesem Stichtag die Vorgaben hinsichtlich Energieeffizienz und Betriebseigenschaften. Der maximale Energie-Effizienz-Index (EEI) wird anhand des Bemessungswertes der korrigierten Leistungsannahme in Relation zur Referenzleistungsaufnahme ermittelt. Neben der zu erreichenden Energieeffizienz werden für die jeweiligen Leuchtmittel Betriebseigenschaften wie die Lebensdauer, Frühausfallrate sowie der Lichtstromerhalt der Lampen vorgeschrieben (307), (302).

- ✓ Ökodesign-Richtlinie - Verordnung EG Nr. 245/2009 mit EG Nr. 347/2010

Darin werden die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorschaltgerät, Hochdruckentladungslampen sowie Vorschaltgeräte und Leuchten zu ihrem Betrieb vorgeschrieben. Diese Produkte werden hauptsächlich in der Büro-, Industrie- und Straßenbeleuchtung eingesetzt.

Ob eine Lampe letztendlich aus dem Verkehr gezogen wird, hängt von der Erfüllung folgender Leistungskriterien ab, die in den jeweilig zuvor genannten Verordnungen verankert sind (308):

- ► Farbwiedergabe,
- ► Lichtausbeute,
- ► Lampenlichtstromwartungsfaktor,
- ► Lampenüberlebensfaktor.

Um eine Transparenz der vorliegenden Verordnungen für die Käufer zu schaffen, wurde mit der Verordnung 874/2012/EU die Energieverbrauchskennzeichnung von elektrischen Lampen und

Leuchten erlassen (309). Darin werden die jeweiligen Energieeffizienzklassen nach dem Energie-Effizienz-Index (EEI) für ungebündeltes sowie gebündeltes Licht definiert (siehe Abbildung 3.11-6). Das Verfahren zur Ermittlung des EEI von Lampen wird in der Richtlinie 874/2012/EU, Anhang VII „Methode zur Berechnung des Energieeffizienzindex und des Energieverbrauchs“ beschrieben und wird wie folgt berechnet (310):

$$EEI = \frac{P_{cor}}{P_{rel}}$$

Legende

P_{cor} ist bei Modellen ohne externe Betriebsgeräte der Bemessungswert der Leistungsaufnahme (P_{rated}) und bei Modellen mit externen Betriebsgeräten der Bemessungswert der Leistungsaufnahme (P_{rated}), der nach der Richtlinie 874/2012/EU, Tabelle 2 korrigiert wird.

P_{rel} ist die Referenzleistungsaufnahme, die sich ausgehend von dem Nutzlichtstrom des Modells anhand der Formeln nach der Richtlinie 874/2012/EU, Anhang VII ermitteln lässt (310).

Abbildung 3.11-6: Energieeffizienzklassen für Lampen

Energieeffizienzklasse	Energieeffizienzindex (EEI) für Lampen mit ungebündeltem Licht	Energieeffizienzindex (EEI) für Lampen mit gebündeltem Licht
A++ (höchste Effizienz)	EEI ≤ 0,11	EEI ≤ 0,13
A+	0,11 < EEI ≤ 0,17	0,13 < EEI ≤ 0,18
A	0,17 < EEI ≤ 0,24	0,18 < EEI ≤ 0,40
B	0,24 < EEI ≤ 0,60	0,40 < EEI ≤ 0,95
C	0,60 < EEI ≤ 0,80	0,95 < EEI ≤ 1,20
D	0,80 < EEI ≤ 0,95	1,20 < EEI ≤ 1,75
E (geringste Effizienz)	EEI > 0,95	EEI > 1,75

Quelle: (310)

Für alle Arten von Lampen gilt ferner auch die Stoffverbotsrichtlinie 2011/65/EU (RoHS) (311). Danach dürfen seit dem 01. Juli 2006 in Lampen bestimmte Gewichtsprozente gefährlicher Stoffe, wie Blei, Quecksilber, sechswertiges Chrom usw. nicht mehr enthalten sein. Die RoHS-Richtlinie wird durch das ElektroG in das deutsche Recht umgesetzt (312).

Aufgrund der Anforderungen an die Effizienz der Lampen und Leuchten dürfen die Temperaturstrahler (Glüh- und Halogenlampen) größtenteils nicht mehr auf dem Markt angeboten werden. Neben wenigen Ausnahmen sind, z. B. LEDs besonders effiziente Leuchtmittel auf dem Markt.

3.11.3 Beleuchtungsplanung

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Beleuchtung werden in Kapitel 3.11.5 dargestellt.)

Bei der Beleuchtungsplanung gilt es, zwischen der Modernisierung bzw. Sanierung einer bestehenden Anlage und der Planung einer Neuanlage zu unterscheiden.

3.11.3.1 Beleuchtungsanlage messen und überprüfen

Bei einer geplanten Sanierung einer bestehenden Anlage, sollte diese unter den allgemeinen Anforderungen nach DIN EN 60598-1 (313) messtechnisch überprüft werden. Dabei stehen

Lichtplanern verschiedene Verfahren zur Verfügung. Häufigste Anwendung in der Praxis sind u. a. Messungen der relevanten lichttechnischen Größen, um

- die Qualität neuer Beleuchtungsprodukte zu überprüfen,
- den Ist-Zustand bestehender Beleuchtungsanlagen zu untersuchen, um Hinweise auf Wartungs- oder Instandsetzungsbedarf zu erhalten,
- verschiedene Beleuchtungsanlagen zu vergleichen (314).

Als wichtigste Messgrößen dienen dabei die Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte sowie der Reflexionsgrad oder die Netzspannung. Für Messungen der Beleuchtungsstärke sind Messgeräte erforderlich, die an den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad V(λ) des menschlichen Auges angepasst sind.

Vor jeder Messung muss Folgendes festgestellt werden (315):

- geometrische Maße der Beleuchtungsanlage,
- Art des Raumes und der Tätigkeit,
- zu messende Größen und Lage der Messpunkte,

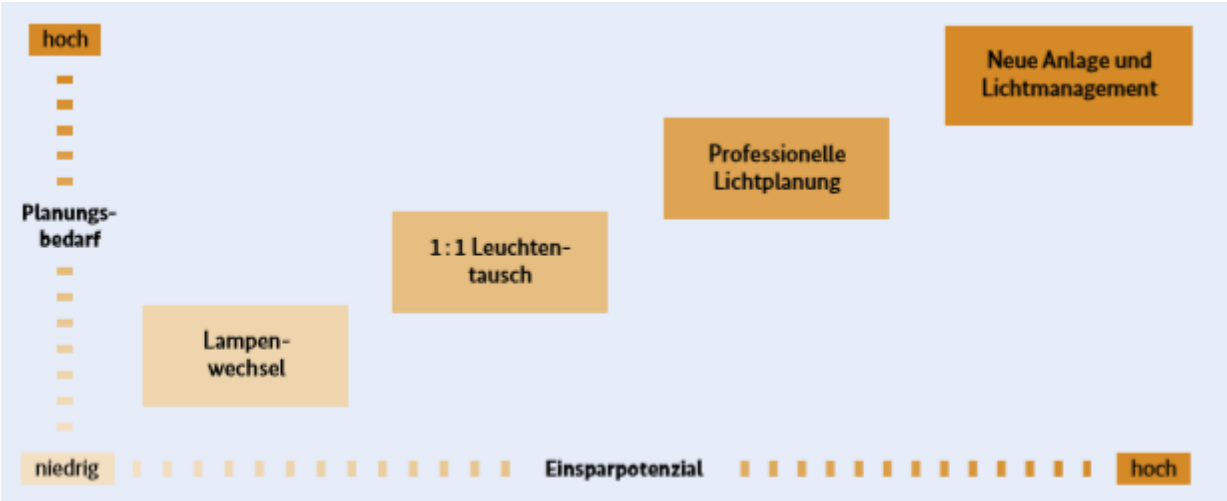
allgemeiner Zustand der Anlage (zum Beispiel Alter, Zeitpunkt der letzten Reinigung, letzter Leuchtmittelwechsel, Grad der Verschmutzung).

Zudem sind Netzspannung und Umgebungstemperatur zu prüfen. Auch sollen Einflüsse durch Fremdlicht ausgeschlossen und störende Einflüsse durch Hindernisse oder Abschattungen vermieden werden. Zur Messung der Beleuchtungsstärken wird die Grundfläche der Anlage, die beurteilt werden soll, aufgeteilt. Gleich große, möglichst quadratische Teilmessflächen dienen als Messraster, welche nach DIN EN 12464 (283) und DIN EN 12193 (316) vorgegeben werden. Für jede Untersuchung gilt es, nach DIN EN 60598-1 (313), ein Messprotokoll zu erstellen. Es enthält neben den Messwerten auch Angaben zum Umfeld, zu Lichtquellen, Leuchten und Geometrie der Beleuchtungsanlage (315).

Im Rahmen der Untersuchung des Ist-Zustandes der Beleuchtungsanlage ist darüber hinaus der Energiebedarf der Anlage zu ermitteln. Dies kann z. B. durch Aufnahme der elektrischen Anschlussleistung und der Betriebszeiten oder auf Basis einer messtechnischen Erfassung des Stromverbrauchs erfolgen.

Aus den ermittelten Daten können im Anschluss die jeweiligen Effizienzmaßnahmen abgeleitet werden. Grundsätzlich sollte bei allen Vorhaben eine entsprechende Kosten-Nutzen-Analyse vorgenommen werden, um zu bestimmen, welche Sanierungsoption bei gegebenem Planungsaufwand das höchste Einsparpotential aufweist (siehe Abbildung 3.11-7).

Abbildung 3.11-7: Sanierungsoptionen und Einsparpotential



Quelle: (317)

3.11.3.2 Planung einer Neuanlage

Bei der Planung neuer Beleuchtungsanlagen sind - wie bei der Überprüfung - Anforderungen und Gegebenheiten des zu planenden Raumes festzustellen. Es handelt sich insbesondere um (318):

- Art der Raumnutzung und der Sehaufgabe,
- Bereich oder Bereiche der Sehaufgabe,
- Abmessungen,
- Reflexionsgrade der Raumbegrenzungsflächen,
- Hauptlichtrichtung,
- Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Verschmutzung (z. B. Staubbelastung).

Die Beleuchtungsplanung sollte auf der Basis einer verbindlichen Einrichtungsplanung erfolgen. Dabei sollten mögliche Maßnahmen zur verbesserten Nutzung des Tageslichts wie z. B. die Änderungen in der Gebäudenutzung oder der Dachkonstruktion berücksichtigt werden. Denn nur so sind optimale Lösungen möglich.

Dabei muss die Planung europäischen und nationalen Normen und Richtlinien entsprechen, zahlreiche lichttechnische Parameter (siehe Kapitel 3.11.1.2.) müssen berücksichtigt werden. Auf Grundlage dieser Anforderungen erfolgt die Beleuchtungsplanung in sechs Schritten (315).

1. Definition eines Lichtkonzepts und Wahl der Beleuchtungsarten,
2. Definition der notwendigen lichttechnischen Güte,
3. Definition des Lichtmanagements,
4. Definition der Komponenten (Art, Anzahl und Anordnung von Leuchten sowie Betriebsgeräte) nach Wirkungsgradverfahren,
5. Definition des Wartungsplanes,
6. Berechnung.

Definition eines Lichtkonzepts und Wahl der Beleuchtungsarten

In Abhängigkeit von der Lichtstromverteilung der Leuchten unterscheidet man bei den Beleuchtungsarten in:

- Direkt-Beleuchtung,
- Indirekt-Beleuchtung und
- Indirekt- und Direkt-Beleuchtung.

Bei der Direktbeleuchtung wird der Lichtstrom unmittelbar auf die Arbeitsflächen gerichtet, wodurch deutlich geringere Reflexionsverluste an der Decke entstehen und insgesamt ein höherer Beleuchtungswirkungsgrad erzielt wird. Zu beachten gilt, dass bei flachem Winkel eine Entblendung erforderlich ist und die Arbeitsplatzanordnung keine Schatten zulässt (270).

Bei der Indirektbeleuchtung wird der Lichtstrom der Leuchten unmittelbar an Decke, Wände oder andere Reflexionsflächen gelenkt und von dort in den Raum sowie auf die relevanten Arbeitsflächen reflektiert. Auf Kosten der Energieeffizienz gewinnt der Raum dadurch an Höhe, es entsteht keine Blendung durch das Licht und die Arbeitsplätze können frei angeordnet werden (270).

Bei Einsatz einer Direkt-/Indirektbeleuchtung wird durch die Aufhellung des Deckenbereichs der Eindruck eines Raumes verbessert. Im Allgemeinen ist ein Verhältnis von direktem zu indirektem Anteil von etwa 4:1 ausreichend und wirtschaftlich vertretbar. Höhere Indirektanteile erhöhen den Energieverbrauch der Beleuchtungsanlage dagegen beträchtlich (318).

Bei den Beleuchtungskonzepten unterschiedet man Grundsätzlich in:

- Raumbezogene Beleuchtung: Homogene Beleuchtung durch gleichmäßige Verteilung der Leuchten (z. B. durch Lichtbänder oder Einzelleuchten),
- Arbeitsbereichsbezogene Beleuchtung: Optimierung der Beleuchtung durch Anordnung der Beleuchtungskörper hinsichtlich der Lage des Arbeitsbereichs oder innerhalb des Raumes bei mehreren Arbeitsbereichen und
- Teilflächenbezogene Beleuchtung: Individuelle Beleuchtung der einzelnen Zonen innerhalb des Arbeitsbereichs (318).

Zu berücksichtigen gilt dabei, den Bereich der Sehaufgabe festzulegen. Dieser wird in der DIN EN 12464 sowie ASR A3.4 für die jeweiligen Beleuchtungskonzepte vorgeschrieben. Darüber hinaus sind im Rahmen der Beleuchtungsplanung zwingend die Vorgaben an die Beleuchtungsanlagen nach der EU-Verordnung 245/2009 zu berücksichtigen und einzuhalten. Die formulierten Anforderungen beziehen sich dabei nicht nur auf die Effizienz von Leuchtmitteln, sondern auch auf die Gesamteffizienz des Beleuchtungssystems. Bei neuen Systemen werden daher auch für Leuchtkörper und Vorschaltgeräte Mindesteffizienzanforderungen formuliert (319).

Definition der notwendigen lichttechnischen Güte

Im nächsten Planungsschritt sind die lichttechnischen Gütemerkmale, die sich aus der Art der Raumnutzung ergeben, zu ermitteln (siehe auch Kapitel 3.11.1.2 f.). Diese sind je nach Anwendungsbereich für die Innen- und Außenbeleuchtung in der folgenden Tabelle 3.11-3 gelistet.

Tabelle 3.11-3: Gesetzliche Vorgaben der lichttechnischen Güte für die Beleuchtung im Innenbereich und Freien

Lichttechnische Güte	DIN EN 12464 "Beleuchtung an Arbeitsstätten"	
	Innenbeleuchtung	Außenbeleuchtung
Beleuchtungsstärke	DIN EN 12464-1, Pkt. 4.3	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.3
im Bereich der Sehaufgabe	DIN EN 12464-1, Pkt. 4.3.3	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.3.2
in unmittelbarer Umgebung	DIN EN 12464-1, Pkt. 4.3.4	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.3.3
Leuchtdichteverteilung	DIN EN 12464-1, Pkt. 4.2	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.2
Blendungsbegrenzung	DIN EN 12464-1, Pkt. 4.5	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.4
Direktblendung	DIN EN 12464-1, Pkt. 4.5.2	
Reflexblendung	DIN EN 12464-1, Pkt. 4.5.4	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.4.3

Lichtfarbe	DIN EN 12464-1, Pkt 4.7.2	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.7.2
Farbwiedergabe	DIN EN 12464-1, Pkt 4.7.3	DIN EN 12464-2, Pkt. 4.7.3

Quelle: (318)

Die Bestimmung der lichttechnischen Güte bildet die Grundlage für die anschließende Bewertung des Lichtmanagements sowie die zu treffende Auswahl der Systemkomponenten.

Definition des Lichtmanagements

Wo immer konventionelle Raumbeleuchtung an ihre Grenzen stößt und die Anforderungen an bedarfsgerechtes Licht, visuelle Ergonomie, Nutzerorientierung, Sicherheit und Wohlbefinden nicht erfüllen kann, ist intelligentes Lichtmanagement erforderlich. Die DIN EN 12464-1 weist mehrfach darauf hin, dass die Beleuchtung entweder steuerbar oder regelbar ausgelegt sein soll (siehe Kapitel 3.11.4).

Definition der Komponenten (Art, Anzahl und Anordnung von Leuchten sowie Betriebsgeräten) nach Wirkungsgradverfahren

Im nächsten Schritt sind entsprechend den ermittelten Vorgaben die zweckmäßigsten Leuchten auszuwählen. Dabei ist die voraussichtliche Anzahl der notwendigen Leuchten festzulegen. Dies kann z. B. mit Hilfe des Wirkungsgradverfahrens erfolgen. Die Anordnung der Leuchten richtet sich nach dem gewählten Beleuchtungskonzept. Dabei soll die Gestaltung des Arbeitsplatzes so erfolgen, dass störende Blendwirkungen, Reflexionen oder Spiegelungen vermieden werden. Die Leuchten sollen parallel zur Hauptblickrichtung und somit parallel zur Hauptfensterfront angeordnet werden. Zur Vermeidung der Reflexblendung auf den Schreibflächen sind im Allgemeinen keine Leuchten direkt über den Arbeitsplätzen anzuordnen. Zusätzlich werden für ein modernes Lichtmanagement elektronische Betriebsgeräte, wie Vorschaltgeräte oder Sensoren für Steuerung und Regelung der Beleuchtung, benötigt (318).

Alle Wirkungsgradverfahren unterliegen gewissen Einschränkungen in ihrer Genauigkeit gegenüber der sogenannten photometrischen Planung. Sie werden heute hauptsächlich für die überschlägige Schnellermittlung der Anzahl der Leuchten im Raum innerhalb von Berechnungsprogrammen verwendet. Das Verfahren dient in erster Linie der Orientierung und der Kostenveranschlagung (320). Häufig ist für den erfahrenen Lichtplaner absehbar, dass die nach dem Wirkungsgradverfahren ermittelte Leuchtenanzahl höher ist, als die mit einer optimierten, photometrischen Planung. Somit kann angenommen werden, dass der überschlägig mit dem Wirkungsgradverfahren gesteckte Investitionsrahmen (siehe auch 3.11.5) eingehalten wird (321).

Folgende Formel dient als Grundlage der Berechnung für die erforderliche Anzahl von Leuchten: (320)

Formel 3.11-2

$$n = \frac{E*A}{z*\Phi*\eta_{LB}*\eta_R*MF}$$

Legende

n	Leuchtenanzahl
E	Beleuchtungsstärke
A	Fläche oder Teilfläche
z	Anzahl der Lampen je Leuchte
Φ	Lichtstrom einer Lampe
η_{LB}	Leuchten-Betriebswirkungsgrad
η_R	Raumwirkungsgrad
MF	Wartungsfaktor

Der Leitfaden „Projektierung von Beleuchtungsanlagen nach dem Wirkungsgradverfahren“ (322) der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) e.V. beschreibt die Lichtplanung nach diesem Verfahren. Darin sind die Raumwirkungsgrade vieler Standard-Leuchten tabelliert (320).

Definition des Wartungsplans

Das Beleuchtungsniveau einer Beleuchtungsanlage nimmt während der Lebensdauer ab, und zwar infolge von

- Alterung der Lampen und Leuchten,
- Verschmutzung von Lampen und Leuchten,
- Alterung der Raumoberflächen und
- Ausfallrate der Lampen.

Um ein angestrebtes Beleuchtungsniveau (Wartungswert der Beleuchtungsstärke) über einen geeigneten Zeitraum sicher nicht zu unterschreiten, muss die Lichtstromabnahme bei der Planung einer Beleuchtungsanlage durch Berücksichtigung eines angemessenen Wartungsfaktors (zur Bestimmung des Neuwertes) einbezogen werden. Eine detaillierte Beschreibung und rechnerische Ermittlung des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke erfolgt in Kapitel 3.11.1.3.

Außerdem ist es notwendig, die Wartungsintervalle bei der Planung festzulegen, damit die Planungsvorgaben eingehalten werden. Daher wird vorausgesetzt, dass Lampenwechsel und Reinigungsintervall einen Teil der Beleuchtungsplanung bilden (323). Diese müssen unbedingt eingehalten werden und sind in den folgenden Regelwerken definiert:

- ✓ Die erforderlichen Wartungswerte der Beleuchtungsstärke werden für Arbeitsstätten in Innenräumen für verschiedene Räume, Aufgaben oder Tätigkeiten in DIN EN 12464-1 sowie für Arbeitsplätze im Freien von DIN EN 12464-2 vorgeschrieben.
- ✓ Gemäß ASR A3.4 müssen beim Betrieb einer Beleuchtungsanlage Mängel, wie der Ausfall von Lampen oder die Verringerung der Beleuchtungsstärke, z. B. aufgrund einer Verschmutzung oder Alterung von Leuchten, unverzüglich beseitigt werden. Dementsprechend muss die Instandhaltung der Beleuchtungsanlage gewährleistet sein (280).
- ✓ In der DIN EN 12464-1, Punkt 6.6 wird festgelegt, dass für Beleuchtungsanlagen ein Wartungsplan erstellt werden muss. Das Erstellen eines Wartungsplans für die Beleuchtungsanlage ist Bestandteil der Planung. Anzugeben sind die Intervalle (318):

  - für den Lampenwechsel (soweit möglich bzw. notwendig),
  - für die Reinigung der Leuchten,
  - für die Reinigung des Raumes,
  - gegebenenfalls die Reinigungsmethoden.

Berechnung

Die Einhaltung der lichttechnischen Gütemerkmale wird, in Abhängigkeit von den ausgewählten Leuchten, deren Anzahl und Anordnung, mit Hilfe eines softwarebasierenden Berechnungsprogrammes überprüft (318). Für die Berechnung der Beleuchtungsstärkeverteilung sind in der DIN EN 12464-1 Kapitel 4.4 Mindestanforderungen an ein Beleuchtungsstärke-Raster vorgegeben (284).

3.11.4 Lichtmanagement

Beschreibung und Betriebsdaten

(Die Informationen über erreichten Umweltnutzen, medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit, betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkraft für die Umsetzung, Beispiele und verweisende Informationen für ENE-Techniken für Beleuchtung werden in Kapitel 3.11.5 dargestellt.)

Moderne Beleuchtungstechnik sorgt dafür, dass das richtige Licht zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge zur Verfügung steht und das Tageslicht optimal ausgenutzt werden kann. Wo immer konventionelle Raumbeleuchtung an ihre Grenzen stößt und die Anforderungen an bedarfsgerechtes Licht, visuelle Ergonomie, Nutzerorientierung, Sicherheit und Wohlbefinden nicht erfüllen kann, ist intelligentes Lichtmanagement erforderlich. Daneben übernimmt das Lichtmanagement Aufgaben zur

- Energieeinsparung,
- Gesundheitsförderung,
- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit (324).

Dabei finden diverse elektronische Betriebsgeräte Anwendung. Komponenten wie Vorschaltgeräte oder Sensoren übernehmen Steuerung und Regelung der Beleuchtung und sorgen für bedarfsgerechtes Licht im Innen- und Außenbereich. Diese können in unterschiedlichen Ausbaustufen und auch kombiniert eingesetzt werden (324):

- Regelung nach Tageslicht,
- Regelung nach Anwesenheit,
- Human Centric Lighting.

Ein Lichtmanagementsystem kann außerdem ermöglichen, dass einzelne Leuchten oder Leuchtengruppen zum Beispiel über Lichtsensoren an Arbeitsplatzleuchten oder im Raum sowie über Außenlichtsensoren separat angesprochen werden können.

Um jedoch die jeweils geforderten Ziele zu erreichen, ist es wichtig, sich für die richtigen Funktionalitäten zu entscheiden. Diese wiederum hängen in hohem Maße von den eingesetzten Technologien ab. Insofern ist es für die Entscheidungsfindung unerlässlich, sich sowohl mit dem Rahmen der anwendungsbezogenen Bedürfnisse der Nutzer zu befassen, wie auch mit den technischen Details der elektronischen Komponenten (325).

3.11.4.1 Regelung nach Tageslicht

Bei einem „intelligenten“ Lichtmanagement wird das einfallende Tageslicht genutzt. Die künstliche Beleuchtung wird nur dann zugeschaltet oder langsam stufenlos hinzugeregelt, wenn das Tageslicht nicht ausreicht. Ist genügend Tageslicht vorhanden, kann die Beleuchtung auch komplett abgeschaltet werden. Damit wird auch in der Raumtiefe ein konstantes Beleuchtungsniveau sichergestellt. Regelungen dieser Art werden fachsprachlich auch als sogenannte Konstantlichtregelung bezeichnet und bieten entsprechend großes Energieeinsparpotenzial. Zu den Komponenten einer Konstantlichtregelung gehören dimmbare, elektronische Vorschaltgeräte und Signalverstärker mit Lichtsensoren, denen Leuchten oder Leuchtengruppen (bezogen auf Raumzonen) zugeordnet werden. Ein oder mehrere Lichtsensoren erfassen die aktuelle Lichtmenge im Raum oder die Beleuchtungsstärke und regeln das Licht automatisch auf das vorab eingestellte Beleuchtungsniveau (326).

Die Normenreihe DIN 5034 „Tageslicht in Innenräumen“ legt grundsätzliche Anforderungen und Definitionen für die Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht fest. Sie gibt Hinweise zu Planung, lichttechnischen Berechnungen und Messverfahren (327).

3.11.4.2 Regelung nach Anwesenheit

Oft ist das Licht auch dann eingeschaltet, wenn sich für längere Zeit niemand im Raum aufhält. Passiv-Infrarot-Wächter schaffen in unterschiedlichster Weise Abhilfe. Sie sorgen dafür, dass das künstliche Licht nur dann eingeschalten wird, wenn sich tatsächlich Personen in der entsprechenden Zone befinden. Bei Passiv-Infrarot-Wächtern unterscheidet man zwischen den folgenden Produktfamilien (328):

- Bewegungsmelder (auch Wächter genannt),
- Präsenzmelder.

Beide Gerätekonzepte haben gemeinsam, dass bei Erfassung von Bewegungen Licht helligkeitsabhängig eingeschaltet wird. Die Unterschiede der beiden Konzepte ergeben sich aus dem typischen Einsatzort und dem geforderten Ausschaltverhalten (329).

Bewegungsmelder regeln die Beleuchtung im eingestellten Sensorbereich abhängig von der Anwesenheit (Präsenzkontrolle). Sie schalten nach zuvor definierter „bewegungsloser” Zeit das Licht aus und erst dann wieder ein, wenn eine Person den Raum betritt (330). Eingesetzt werden Bewegungsmelder bei der Überwachung von Fluren, Zuwegen, Einfahrten etc.. Die dort zu erkennenden Bewegungen sind deutlich und energiereich und können deshalb einfach erkannt werden.

Präsenzmelder dagegen werden vorwiegend für den Deckeneinbau im Bürobereich eingesetzt und schalten die Beleuchtung dann aus, wenn sie nicht mehr benötigt wird – das heißt, es ist entweder zu hell oder niemand mehr anwesend. Während der Einschaltphase wird weiterhin die Helligkeit gemessen und bewertet. Ein Präsenzmelder muss auch kleine Bewegungen, die für die Büroarbeit typisch sind, erkennen und benötigt hierzu ein hochauflösendes Erfassungsfeld und eine empfindliche Sensorik.

Der primäre Zweck eines Bewegungsmelders ist also das Einschalten eines Verbrauchers bei Bewegungserkennung, z. B. zur Verkehrsweg-Sicherung. Im Gegensatz dazu schaltet ein Präsenzmelder zusätzlich die Beleuchtung aus und erschließt somit höhere Einsparpotentiale (328).

In der DIN V 18599-4 werden Nachweisverfahren zur Ermittlung des Endenergiebedarfs für Beleuchtungszwecke in Nichtwohngebäuden festgelegt. Diese berücksichtigen u. a. den Einfluss von entsprechenden Präsenzmeldesystemen.

3.11.4.3 Human Centric Lighting

Unter der Bezeichnung "Human Centric Lighting” versteht man heute solche Anwendungen der Beleuchtung, bei denen in besonderer Weise der Mensch und sein Wohlbefinden in den Mittelpunkt des Interesses gestellt werden. Neben der Schaffung guter Sehbedingungen und der räumlichen Wirkung des Lichtes ist in der Planung und Ausführung das künstliche Licht stets am natürlichen Licht zu orientieren und dieses gezielt in den Tagesverlauf zu integrieren. Der wesentliche Aspekt ist dabei die biologische Wirkung des Lichts auf die innere Uhr des Menschen.

Ein Baustein im Hinblick auf das Lichtmanagement ist die elektronische Lichtsteuerung. Verschiedene Beleuchtungsszenen werden vorab gespeichert und können dann auf Tastendruck abgerufen werden. Die Bereitstellung von voreingestellten Lichtszenen erhöht dabei den Bedienkomfort, indem die Lichtquellen nicht einzeln geschaltet und gedimmt werden müssen. Die Steuerung nach Beleuchtungsszenen dient heute vorwiegend zur Individualisierung und zur Unterstützung wechselnder Sehaufgaben. Die Individualisierung des Lichts ermöglicht einerseits die Beleuchtungssituation an persönliche Bedürfnisse und Erfordernisse anzupassen. Andererseits kann die Lichtsteuerung z. B. bei absehbaren Änderungen in der Produktion, wie der Neuplatzierung von Arbeitsplätzen, eine vereinfachte Anpassung der Beleuchtung ermöglichen, deren Effizienz steigern und folglich höhere Investitionskosten rechtfertigen (z. B. Wandelbare Fabrik). Dabei sind die Überblendzeiten zwischen einer Sekunde und 15 Minuten frei wählbar. Die meisten Lichtsteuersysteme bieten die Option, Fensterverdunklung und Sonnenschutz in die Programmierung einzubeziehen (331).

Human Centric Lighting grenzt sich also überall dort von der rein technischen Beleuchtung ab, wo Licht eine psychologische, physiologische oder psychobiologische Wirkung auf den Menschen haben soll (332). Unter Beachtung der Vorgaben der DIN EN 12464-1, DIN 5035-7 sowie ASR 3.4 werden

nach DIN SPEC 67600 Kapitel 5.3 weitere Empfehlungen zum Thema „Human Centric Lighting“ gegeben (333):

- Zwischen 8 und 10 Uhr Aktivierung: vertikale Beleuchtungsstärke am Auge von 250 Lux und eine Farbtemperatur von 8.000 Kelvin,
- belebendes Licht zwischen 13 und 14 Uhr: etwa 1.000 Lux am Auge und über 5.300 Kelvin (334),
- zwischen 18 und 20 Uhr Entspannung: etwa 200 Lux am Auge und maximal 3.000 Kelvin.

3.11.5 Erzielter Umweltnutzen, Medienübergreifende Effekte, Anwendbarkeit, Betriebswirtschaftliche Aspekte, Triebkräfte

Erreichter Umweltnutzen

Beleuchtungsanlagen verursachen in vielen Unternehmen einen hohen Anteil am Energieverbrauch. Die Anwendung der besten verfügbaren Techniken im Bereich der Beleuchtung bietet im Vergleich zum tatsächlichen technischen Stand vieler Beleuchtungsanlagen ein hohes Energieeinsparpotential. So können beispielsweise im Bestand, allein durch Erneuerungsmaßnahmen in Form des Austauschs von alten ineffizienten Lampen (Glühlampen, Halogenlampen) durch effiziente Leuchtmittel bzw. Leuchten, wie z. B. der LED-Technologie, sehr hohe Energieeinsparungen von bis zu 80 % realisiert werden (335). Durch Einsatz einer Tageslichtsteuerung sowie einer Anwendungssteuerung ist es möglich, den Energieverbrauch von Beleuchtungsanlagen weiter nennenswert zu reduzieren.

Darüber hinaus sind die modernen LED-Technologien im Vergleich zu den bisherigen konventionellen Leuchtmitteln als deutlich umweltfreundlicher zu bewerten, da sie weder Quecksilber noch andere Giftstoffe enthalten und zudem recycelbar sind.

Dementsprechend sollte bei der Neuauslegung von Beleuchtungsanlagen dieses Einsparpotential von vornherein durch eine qualifizierte Beleuchtungsplanung realisiert werden.

Medienübergreifende Wirkungen

Gewisse Leuchtmittelarten, z. B. Quecksilberdampf-, Leuchtstofflampen, enthalten giftige Chemikalien, wie zum Beispiel Quecksilber oder Blei. Am Ende ihrer Nutzungsdauer müssen die Lampen sachgemäß entsorgt werden.

Anwendbarkeit

Die Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (IE-R), engl. Industrial Emissions Directive (kurz IED), ist eine EU-Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union mit Regelungen zur Genehmigung, zum Betrieb, zur Überwachung und zur Stilllegung von Industrieanlagen in der Europäischen Union. Diese beinhalten u. a. die verbindliche Anwendung der BVT-Schlussfolgerungen.

Die Durchführung einer Beleuchtungsplanung, die Auswahl effizienter Leuchten in Übereinstimmung mit den Anforderungen an den beabsichtigten Einsatzbereich entsprechend dem technischen Regelwerk, die Beleuchtungsorganisation und der Einsatz eines Lichtmanagementsystems sind für alle IED-Anlagen anwendbar.

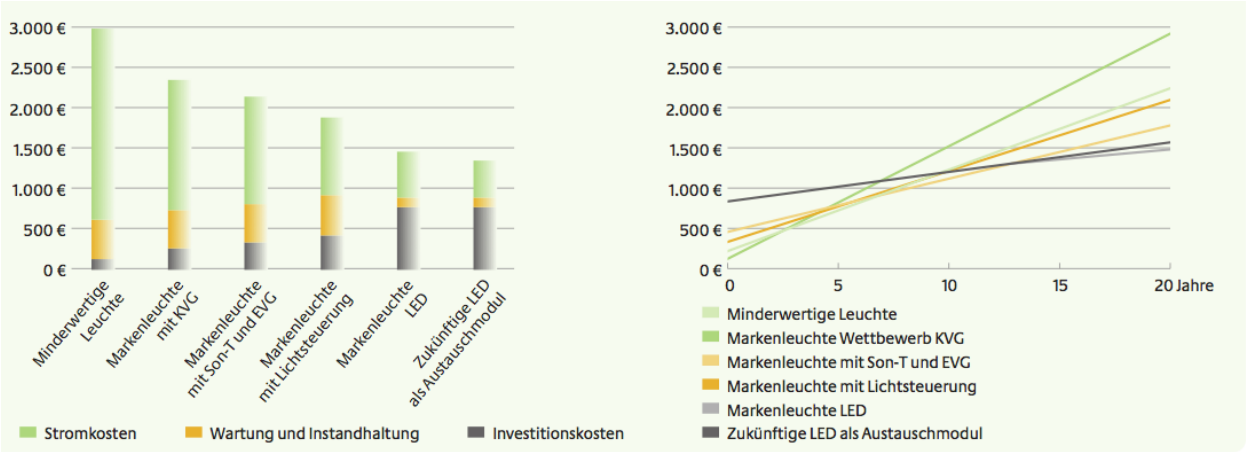
Die Anwendbarkeit der Maßnahmen und das Ausmaß der Kosteneinsparungen sind abhängig von der Größe und dem Anwendungsbereich der Beleuchtungsanlage. Nur eine Auswertung auf Basis einer fachgemäßen Beleuchtungsplanung kann feststellen, welche Maßnahmen das korrekte Kosten-Nutzen-Verhältnis bieten. Diese kann durch einen qualifizierten Fachplaner durchgeführt werden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

Als Grundlage zur Bewertung von Optimierungsmaßnahmen sollte eine Analyse der Lebenszykluskosten herangezogen werden. Im Gegensatz zu einer reinen Bewertung der Investitionskosten berücksichtigen die Lebenszykluskosten alle während der Lebenszeit einer

Beleuchtungsanlage anfallenden Kosten wie Energie-, Wartungs-, Reinigungs- und Entsorgungskosten. Der Ansatz erlaubt daher eine aussagekräftige Bewertung der Wirtschaftlichkeit (336).

Abbildung 3.11-8: Lebenszykluskosten über 20 Jahre verschiedener Leuchten



Quelle: (336)

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Systeme ist der Betrachtungszeitraum als einer der wesentlichen Faktoren zu berücksichtigen. Beispielsweise sind hochwertige LED-Leuchten und ein Lichtmanagementsystem mit höheren Investitionskosten verbunden, erreichen aber aufgrund ihrer hohen Effizienz, geringeren Wartungskosten und einer höheren Lichtqualität über einen längeren Betrachtungszeitraum oft die geringsten Lebenszykluskosten (337).

Insbesondere beim Vergleich mehrerer zur Auswahl stehender Maßnahmenpakete oder Beleuchtungssysteme bietet sich eine Wirtschaftlichkeitsrechnung auf Basis von Lebenszykluskosten (LZK) an. Nur so kann gewährleistet werden, dass nicht das im Einkauf günstigste System, sondern das wirtschaftlichste System gewählt wird. Die wirtschaftliche Attraktivität einer Maßnahme ergibt sich aus dem Vergleich der Lebenszykluskosten der neuen mit der alten Anlage bzw. verschiedener neuer Anlagen untereinander (336).

Formel 3.11-3

$$Lebenszykluskosten = Investition + Energie + Wartung + Entsorgung$$

Die Lebenszykluskosten und die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Systeme werden stark von der Anzahl der Betriebsstunden der Beleuchtungsanlage und dem angesetzten Betrachtungszeitraum beeinflusst. Im Betrachtungszeitraum zu erwartende notwendige Ersatzinvestitionen, z. B. von Leuchtmitteln mit kurzen Lebensdauern, sind mit zu berücksichtigen.

Triebkraft für die Umsetzung

Einsparungen von Energie und Kosten.

Beispiele

Beispiel 1:

Die ThyssenKrupp System Engineering GmbH ist ein international tätiger Hersteller verschiedener Komponenten der Prozessketten Karosserie und Antriebsstrang der Automobilindustrie. Der Konzern beschäftigt ca. 4.500 Mitarbeiter und hat einen Umsatz von rund 1,1 Mrd. EUR (Jahr 2017) (338).

Im Rahmen einer Modernisierung der Beleuchtungsanlage wurde im Frühjahr 2017 am Standort Hohenstein-Ernstthal der ThyssenKrupp System Engineering GmbH in 7 Fertigungs- und Montagehallen die bestehenden Metalldampflampen durch hocheffiziente LED-Hallentiefstrahler ausgetauscht.

Bei der Bewertung der bestehenden Anlage wurde bei den 367 installierten Metalldampflampen mit einer Leistung von 400 W ein jährlicher Gesamtstromverbrauch von 530.000 kWh ermittelt. Über einen Betrachtungszeitraum von 5 Jahren ergaben sich – bei einem Strompreis von 19 Cent pro Kilowattstunde – für die Beleuchtung, zzgl. des Austausches der Leuchtmittel, jährliche Gesamtkosten von mehr als 115.000 Euro. Durch die Umrüstung auf LEDs konnte der Energieverbrauch und die damit verbundenen Beleuchtungskosten auf 34 Prozent reduziert werden. Zudem entfallen aufgrund der hohen Lebensdauer der LEDs die Tauschkosten über den betrachteten Zeitraum. Bei einer Investition von insgesamt 130.000 Euro und jährlichen Einsparungen von rund 81.000 Euro wird eine Amortisation nach knapp 1,6 Jahren erzielt.

Beispiel 2: SRH Zentralklinikum Suhl, Umrüstung auf LED-Technologie (339)

Das SRH Zentralklinikum Suhl ist mit 22 eigenständigen Fach- und Teilgebieten der Medizin und 603 Betten das größte Krankenhaus in Südthüringen.

Im Rahmen der Initiative EnergieEffizienz der Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) wurde mit dem Projekt: „Energieeffiziente LED-Beleuchtung“ ein Konzept zur Modernisierung und Optimierung der betriebsnotwendigen Anlagen erarbeitet. Aufbauend auf diesem Konzept wurden Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs umgesetzt. Ein Schwerpunkt dieser Maßnahmen war die Optimierung der Beleuchtungsanlagen, welche durch einen Austausch von über 900 alten Leuchtstoffröhren durch effiziente LED-Röhren (Lampen mit LED-Technik in Röhrenform) erreicht wurde.

Die vorhandenen konventionellen Leuchtmittel (Leuchtstoffröhren) waren mit verschiedenen Vorschaltgeräten (EVG, VVG bzw. KVG) ausgestattet, die je nach Größe und Art des Vorschaltgerätes ein Leistungsspektrum von 18 bis 71 Watt hatten. Die neu installierten LED-Röhren zeichneten sich demgegenüber durch eine wesentlich geringere Leistungsaufnahme von 10, 18 bzw. 23 Watt aus. Dieser Austausch der Beleuchtungsmittel führte zu einer Reduktion des jährlichen Stromverbrauchs von mehr als 50 Prozent und ca. 150.000 kWh bei den Beleuchtungsanlagen. Damit lassen sich jährliche Kosteneinsparungen von knapp 21.000 € realisieren. Bei einer Investition von ca. 60.000 € konnte eine Amortisationszeit von unter 3 Jahren realisiert werden.

Beispiel 3: Airbus-Tochter Premium AEROTEC, Smart Licht & Full-Service ((340)

Die Airbus-Tochter Premium AEROTEC zählt mit mehr als 10.000 Mitarbeitern und 2 Milliarden Euro Jahresumsatz zu den weltweit führenden Zulieferern im Flugzeugbau.

An den Produktionsstandorten in Augsburg, Nordenham und Varel war Premium AEROTEC mit der Energieeffizienz in puncto Beleuchtung nicht mehr einverstanden. Dabei standen für Premium AEROTEC drei Aspekte im Fokus:

- Effizientere Beleuchtung, um Geld zu sparen und die Umwelt zu schonen,
- Optimierung der Produktion durch bessere Lichtqualität,
- Durchführung der Modernisierung bei laufender Produktion.

Die bestehenden Beleuchtungsanlagen in den Produktionshallen umfassten 4.100 Leuchtstofflampen mit einer Leistung von jeweils 58 W. Bei 7.660 Betriebsstunden pro Jahr betrug der jährliche Energiebedarf ca. 2.000 MWh.

Da in den Hallen der Premium AEROTEC zum größten Teil ein bedeutender Tageslichteinfall gegeben war, wurde bei der Modernisierung eine Tageslichtsteuerung integriert. Für jede Werkshalle mit Oberlichtern kann nun ein Helligkeitswert festgelegt werden, den es stets zu erreichen gilt. Dadurch konnte die Umrüstung auf LED-Lichtbandsysteme mit nur ca. 700 Leuchten realisiert werden. Mit dem neuen Lichtkonzept sinkt die bisher verbrauchte Energie für Licht um knapp 70 % auf deutlich unter 1000 MWh pro Jahr. Die Modernisierung an allen drei Standorten konnte ohne Produktions-beeinträchtigung in weniger als zwei Monaten umgesetzt werden. Premium AEROTEC wählte zudem

ein „Full-Service“ Contracting-Modell und muss sich nun fünf Jahre lang, wie gewünscht, nicht um Betrieb, Wartung oder Instandhaltung kümmern.

Beispiel 4: Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB), Cleveres Licht für Betriebshöfe (341)

Die Leipziger Verkehrsbetriebe beschäftigen als Unternehmensverbund rund 2.400 Mitarbeiter.

Im Betriebshof Leipzig-Paunsdorf werden Straßenbahnen gewartet. Dabei sind hohe Beleuchtungsstärken erforderlich. Werden die Hallen aber nicht oder nur partiell genutzt, soll das Licht eine geringere Intensität haben.

Neben der Modernisierung der Beleuchtungsanlage durch hocheffiziente LED-Leuchten kann mit einer intelligenten Lichtsteuerung die Beleuchtung bedarfsgerecht eingesetzt und wirtschaftlich optimal an die Bedürfnisse am Arbeitsplatz angepasst werden. Damit wird bei DIN-gerechter Ausleuchtung ein großer Beitrag zum Umweltschutz erbracht.

Das Ergebnis der Maßnahmen: Die Umrüstung auf neue, intelligente LED-Hängeleuchten sorgt für optimale Bedingungen am Arbeitsplatz. Dadurch können Energieeinsparungen von rund 60 % gegenüber der alten Leuchten-Technik realisiert werden. Zusätzlich können durch die bewegungsabhängige Steuerung der Stromverbrauch nochmals um bis zu 65 % des Energiebedarfs reduziert werden. Neben der Energieeinsparung steht auch die Flexibilität bei der Einrichtung, Anpassung und Auslesung der Energiedaten der gesamten Anlage mit Hilfe spezieller Software im Vordergrund. Die höheren Investitionskosten einer Lichtsteuerung werden durch einen flexiblen Einsatz, der auch auf veränderte Arbeitsaufgaben und räumliche Änderungen reagieren kann, sehr schnell refinanziert. Damit gelingt es der LVB eine bedarfsgerechte Beleuchtung mit einer optimalen Amortisationszeit wirtschaftlich zu betreiben.

3.12 Trocknungsprozesse

Einführung

Unter Trocknung wird allgemein die Abtrennung von Flüssigkeit aus Gütern (Gewebe, Haufwerke, Filme etc.) verstanden (342 S. 321); (343 S. 459).

Trocknung ist somit eine Spezialform der Trennverfahren, die der Verringerung des Anteils der gebundenen Flüssigkeit am Produkt zum Zwecke der Veränderung von dessen Eigenschaften dient. Die abgetrennte Substanz (z. B. Wasser) ist nicht Produkt.

„So gut wie jedes Produkt heutiger Industrie durchläuft während des Produktionsprozesses einem/mehrere Trocknungsvorgänge“ (344 S. 18).

Trocknungsverfahren können einen erheblichen Anteil des Energiebedarfs von Produktionsprozessen verursachen und müssen deshalb aufmerksam betrachtet werden, wenn es um das Identifizieren von Energieeinsparpotenzialen geht.

Da durch Nutzung von Energie mit dem Flüssigkeitsgehalt eine stoffliche Eigenschaft geändert wird, haben Trocknungsverfahren auch das Potenzial, fluktuierende Energieeinträge oder -bedarfe in begrenztem zeitlichem Rahmen zu kompensieren. Trocknungsinputstoffe und Trocknungsprodukte können somit zum Teil eines sekundären Speichersystems werden, elektrisch betriebene Trocknungsverfahren können in manchen Fällen als regelbare Verbraucher dienen.

Wegen der Bedeutung für die Produktqualität werden Trocknungsvorgänge in BREFs oft im Zusammenhang mit den Produktionstechnologien beschrieben, in denen sie angeordnet sind (Tabelle 3.12-1). Es ist empfehlenswert, im konkreten Fall darauf zurückzugreifen.

Tabelle 3.12-1: Erwähnung spezifisch bedeutsamer Trocknungsverfahren in technologiespezifischen BREF‘s (Auszug, exemplarisch)

(05.2018)

Bezeichnung	CODE	BREF	Kapitel mit Bezug auf Trocknung	Inhalte
Energy Efficiency	ENE	(02.2009)	3.11 Drying, separation and concentration processes 4.3.11 Drying, separation and concentration processes	Vorstellung der Trocknungstechniken, besonderes Augenmerk auf Energieeffizienz
Ceramic Manufacturing Industry	CER	(08.2007)	2.2.2.1 Pre-drying: 2.2.2.7 Spray drying: 2.2.5 Drying of ceramic product	Vorstellung der eingesetzten Trocknertypen
Food, Drink and Milk Industries	FDM	(08.2006)	2.1.6.2 Drying (liquid to solid) (F.2) 2.1.7.3 Freeze-drying/lyophilisation (G.3) 3.2.44 Drying (liquid to solid) (F.2) 4.x ---Trocknung versch. Lebensmittel	Vorstellung der Prozesse und Techniken (Kapitel 2), Darstellung von Energieverbräuchen (Kapitel 3 und 4)
Intensive Rearing of Poultry or Pigs	IRPP	BATC (07.2017)	4 TECHNIQUES TO CONSIDER IN THE DETERMINATION OF BAT	Vorstellung verschiedener Techniken zum Trocknen von Mist/Dung
Large Combustion Plants	LCP	(07.2017)	3.2.3.18 Fuel preheating/drying 9.1.3.2 Drying 11.4 COMBUSTION OF SOLID FUELS	Verweis auf verschiedene Trocknungsverfahren, Hinweise auf Wirkung auf Verbrennungsverfahren (hinsichtlich Effizienz)
Large Volume Inorganic Chemicals – Solids and Others Industry	LVIC-S	(08.2007)	5.2.2.3.3 Production process – silica gel - drying 7.1.2.2.3 Aluminium fluoride - Drying 7.13.2.5 Sodium Chlorate - Drying 7.16.2.2.3 Centrifuging, drying and packaging	Vorstellung der verwendeten Trocknungstechniken
Smitheries and Foundries Industry	SF	(05.2005)	4.3.3.6 Microwave drying for water-based coatings	Mikrowellentrocknung wird erklärt und vorgestellt
Tanning of Hides and Skins	TAN	(02.2013)	3.9.5.7 Post-tanning operations - Drying 4.7 Post-tanning operations - Drying 4.12.3 Energy - Improved drying techniques	Darstellung von Nachbräunungstechniken und Eingehen auf energieeffiziente, neue Technologien
Textiles Industry	TXT	(07.2003)	2.13 Drying	Vorstellung von Trocknungstechniken von Garn und Fasern
Waste Incineration	WI	(08.2006)	2.2.3.2.2 Drying	Vorstellung versch. Trocknerarten
Waste Treatment	WT	(08.2006)	2.3.3.7 Physico-chemical treatments of waste - High temperature drying 4.5.3.2 Techniques to consider for the preparation of waste to be used as fuel - Drying the solid waste fuel	Vorstellung von Trocknungstechniken

Bezeichnung	CODE	BREF	Kapitel mit Bezug auf Trocknung	Inhalte
Wood-based Panels Production	WBP	(11.2015)	2.2 DRYING OF WOOD PARTICLES AND FIBRES …	Vorstellung von Trocknungstechniken und Trocknerarten von Holzfasern

Quelle: eigene Darstellung, Hochschule Zittau-Görlitz/GICON, 2018

Die Trocknung kann durch mechanische, thermische oder chemische Verfahren erfolgen. Auf Grund der physikalischen Zusammenhänge ist die Abtrennung von Flüssigkeit umso energieintensiver, je niedriger der angestrebte Flüssigkeitsgehalt ist. Relativ hohe Flüssigkeitsgehalte können noch durch mechanische Trennverfahren (unter Nutzung von Trägheitskräften und Dichteunterschieden) erzielt werden, während niedrige Flüssigkeitsgehalte nur durch thermische Verfahren, also das Verdampfen, erreicht werden können. Diese sind energetisch aufwändiger. Deshalb ist es sinnvoll, die Verfahren zu kombinieren. Es werden häufig weniger energieintensive mechanische Verfahren wie Sedimentation, Filtration, Pressen oder Zentrifugieren den thermischen Verfahren vorgeschaltet.

Thermische Trocknungsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass das Produkt auf solche Temperaturen gebracht wird, dass die Verdampfungstemperatur der Flüssigkeit überschritten wird und damit der Übergang flüssig-gasförmig in Gang gesetzt wird. Dazu ist Energiezufuhr erforderlich, die einzeln oder in Kombination durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Konvektion oder Induktion erfolgen kann.

Der Begriff der Verdunstung wird hier nicht verwendet, da er als Spezialfall des Verdampfens anzusehen ist. Verdunsten erfolgt bei einem Partialdruck der verdampften Flüssigkeit im Gas. Als Beispiel ist zu benennen, dass das Trocknen von Wäsche an der Umgebungsluft bei Temperaturen weit unterhalb von 100 °C erfolgt, weil nicht die Verdampfungstemperatur bei Gesamtdruck (100 °C bei ca. 1 bar), sondern die Verdampfungstemperatur beim Wasserdampfpartialdruck in der Luft (weniger als 20 °C bei weniger als 0,02 bar) maßgeblich ist.

Die Einteilung von Trocknertypen erfolgt nach den unterschiedlichen Trocknungsbedingungen (343 S. 478):

- Art der Wärmezufuhr (z. B. Konvektions- oder Strahlungstrockner),
- Betriebsdruck (Normaldruck- oder Vakuumtrockner),
- Aggregatszustand (Gefrier-, Flüssigkeits- oder Feststofftrockner),
- Strömungsführung (Gleich-, Gegen- oder Kreuzstromtrockner),
- Trocknungsdauer (Kurzzeit-, Mittelzeit- oder Langzeittrockner),
- Betriebsweise (Chargen- oder Durchlauftrockner),
- äußerer Form des Guts (z. B. Stückgut- oder Pastentrockner),
- Formgebung bei der Trocknung (z. B. Granulier- oder Mahltrockner).

Nachfolgend werden aus der großen Fülle möglicher Konstruktionsformen und Betriebsweisen einige Trocknertypen exemplarisch näher vorgestellt.

Konvektionstrockner

Das Trocknungsgut wird mit einem heißen Gas (Luft, Verbrennungsgase oder Dampf) über- oder durchströmt. Das Gas ist aufnahmefähig für die abzutrennende Substanz (meistens Wasser) in ihrem gasförmigen Zustand. Die Temperaturerhöhung des Gutes geschieht durch Heranführung immer neuen warmen oder heißen Gases (Konvektion) an die Oberflächen des Trocknungsproduktes und Übergang der Wärme zum Ort der Verdampfung durch Wärmeleitung. Dadurch handelt es sich bezüglich des Gases um eine **direkte Trocknung**. Die Konvektionstrocknung kann, setzt man Hauptförderrichtung des Trocknungsproduktes und der Gasströmung in Relation zueinander, im Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom erfolgen.

Konvektionstrocknung im Gleichstrom wird eingesetzt (343 S. 478)

- bei Empfindlichkeit des trockenen Gutes gegenüber hohen Temperaturen,
- bei Empfindlichkeit des angetrockneten Gutes gegenüber hoher Trocknungsgeschwindigkeit,
- wenn eine gleichmäßige Gutsfeuchte erzielt werden soll.

Konvektionstrocknung im Gegenstrom wird eingesetzt (343 S. 478f.)

- zum Erreichen besonders niedriger Flüssigkeitsgehalte,
- bei hygroskopischen Trocknungsgütern,
- bei Empfindlichkeit des feuchten Gutes gegenüber hoher Trocknungsgeschwindigkeit,
- bei Trocknungsgütern, die unempfindlich gegenüber hohen Endtemperaturen sind.

Konvektionstrocknung im Kreuzstrom wird eingesetzt (343 S. 479)

- wenn das Trocknungsgut sowohl im feuchten als auch im trockenen Zustand unempfindlich gegenüber hoher Trocknungsgeschwindigkeit ist,
- bei Unempfindlichkeit des Gutes im trockenen Zustand gegenüber Wärme,
- bei hohen erforderlichen Trocknungsgeschwindigkeiten.

Typische Konvektionstrockner sind (343 S. 479 ff.):

- Kammertrockner für stückige, körnige, pastöse oder flüssige Güter in kleinen Mengen,
- Tellertrockner für kontinuierlich anfallende, rieselfähige Güter,
- Bandtrockner für stückige, teigige und körnige Güter,
- Trommeltrockner für kontinuierlich anfallende, große Mengen rieselfähiger Güter,
- Wirbelschichttrockner für körnige, nicht klebende Güter (kontinuierlich oder diskontinuierlich),
- Sprühtrockner für schnell trocknende sowie hitzeempfindliche flüssige bis pastöse Güter.

Kontakttrockner

Bei der Kontakttrocknung wird das Trocknungsgut durch Wärmeleitung bei direktem Kontakt mit einer beheizten Oberfläche erwärmt. Erfolgt die Beheizung der Kontaktflächen rückseitig durch ein heißes Gas, handelt es sich bezüglich dieses Gases durch die Anordnung einer trennenden Wand um **indirekte Trocknung**. Zur Beschleunigung der Verdampfung mittels Absenkung der Verdampfungstemperatur geschieht dies häufig unter Unterdruckbedingungen („Vakuum“), wobei durch Druckpulsation der Trocknungsprozess noch beschleunigt werden kann (343 S. 483). Auch hier erfolgt der Abtransport der abzutrennenden Substanz (meistens Wasser) im gasförmigen Zustand, angetrieben durch die Unterdruckförderung („Vakuumpumpe“).

Typische Kontakttrockner sind (343 S. 483 ff.):

- Kammertrockner und Tellertrockner mit Beheizung der Horden und Teller, meist im Vakuum,
- Walzentrockner für dickflüssige, hitzeunempfindliche Güter,
- Schaufeltrockner für dickflüssige und pastöse Trocknungsgüter (z. B. Filterkuchen, Dickschlamm),
- Trommeltrockner für kontinuierlich anfallende, große Mengen rieselfähiger Güter,
- Doppelkonustrockner für rieselfähige Trocknungsgüter.

Gefriertrockner

Die beiden Haupttypen der Konvektionstrockner und Kontakttrockner können noch modifiziert werden durch die Anwendung als Gefriertrockner. Dem Trocknungsvorgang wird dabei eine deutliche Temperaturabsenkung des Trocknungsproduktes vorgeschaltet, um die Wärmezufuhr bei geeignet niedrigen Tieftemperaturen und bei geeignetem Unterdruck stattfinden zu lassen. Es findet dann Sublimation statt.

Die Gefriertrocknung wird hauptsächlich für temperaturempfindliche, hochwertige Trocknungsgüter (z. B. Pharmazeutika, Nahrungsmittel) eingesetzt. Zum Einsatz kommen bspw. Kammertrockner (diskontinuierlich) und Tellertrockner (kontinuierlich), die mit Vakuumpumpe, Dampfkondensator und Kälteaggregat ausgerüstet sind (343 S. 486). Dabei wird der physikalische Effekt der Sublimation, also des direkten Übergangs von festem in gasförmigem Zustand ausgenutzt.

Energieeffizienz bei der Trocknung mit heißem Abgas

Die Verwendung der Energie von Abgasen aus thermischen Prozessen für die Trocknung bildet ein sehr großes Potenzial zur Erhöhung der Energieeffizienz.

Abgase aus thermischen Prozessen stehen als mehr oder weniger mit schädlichen Bestandteilen belastete Gasgemische mit Temperaturen zwischen 200 °C und über 800 °C zur Verfügung. Deren Verwendung für die Trocknung von Gütern erfordert, den Energietransport als Wärmestrom zum Ort der Verdampfung hin zu gestalten. Je nach Anforderung kann dies mittels einer Trennwand (Rohrwand, Platte o. ä.) (indirekte Trocknung) oder durch unmittelbare Beaufschlagung des Trocknungsproduktes durch das energiereiche Gas (direkte Trocknung) erfolgen.

Indirekte Trocknung vermeidet jeden – auch partiellen – Stoffübergang, zwischen Trocknungsprodukt und energiereichem Gas. Das Verfahren kann sehr effizient gestaltet werden. Verdampfte Flüssigkeit muss als separater Gasstrom vom Trocknungsprodukt abgezogen werden. Das verwendete energiereiche Abgas wird nicht mit verdampfender Flüssigkeit beaufschlagt. Außerdem kommen – evtl. schädliche - Bestandteile des energiereichen Gases nicht in Kontakt mit dem Trocknungsprodukt und können von diesem nicht aufgenommen werden.

Die stoffliche Trennung bei indirekter Trocknung erfordert jedoch den Einsatz von Wärmeübertragern und damit einen höheren Investitionsaufwand. Sie ist durch die notwendige Überwindung des Wärmewiderstandes der Trennwand zudem mit gewissen Effizienzeinbußen verbunden. Dies äußert sich so, dass die Temperatur des Abgases durch die Wärmerückgewinnung nicht so weit abgesenkt werden kann, wie dies aus energetischer Sicht wünschenswert ist.

Direkte Trocknung ist somit preiswerter und energieeffizienter als indirekte Trocknung, erfordert aber große Aufmerksamkeit bezüglich des Stoffüberganges. Dies beinhaltet

- die Berücksichtigung von Wirkungen auf die Umwelt (z. B. Geruchsemissionen), die durch den Stoffübergang vom Trocknungsprodukt zum energieliefernden Gas, der mit dem eigentlichen Trocknungsvorgang einhergeht, entstehen sowie
- die Qualitätsminderung des Produktes, die aus den schädlichen Bestandteilen des Abgases, z. B. Staub, resultieren.

Grundsätzlich muss zusammenfassend festgehalten werden, dass direkte Trocknung energieeffizienter ist als indirekte Trocknung, aber mit Auswirkungen auf Produktqualität und Emissionen verbunden sein kann.

3.12.1 Prozess der Auswahl von Trocknungsverfahren/Trocknungstechniken

Aufgrund der Vielfalt der Trocknungsgüter und deren Eigenschaften ist die Auswahl eines geeigneten Trockners ein komplexer Prozess.

Zu den Eigenschaften der Trocknungsprodukte gehören (345 S. 509):

- mechanische Eigenschaften (Teilchengröße und -verteilung, fördertechnische Eigenschaften, Haltbarkeit/Verformbarkeit),
- strömungstechnische Eigenschaften (Strömungswiderstand, Schwebegeschwindigkeit),
- wärmetechnische Eigenschaften (Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit),

- Eigenschaften des Stofftransports (Diffusivität),
- grundlegende und spezielle trocknungsphysikalische Eigenschaften (Sorptionsisothermen, Anfangs- und Endwassergehalt, zulässige Guttemperatur, Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit).

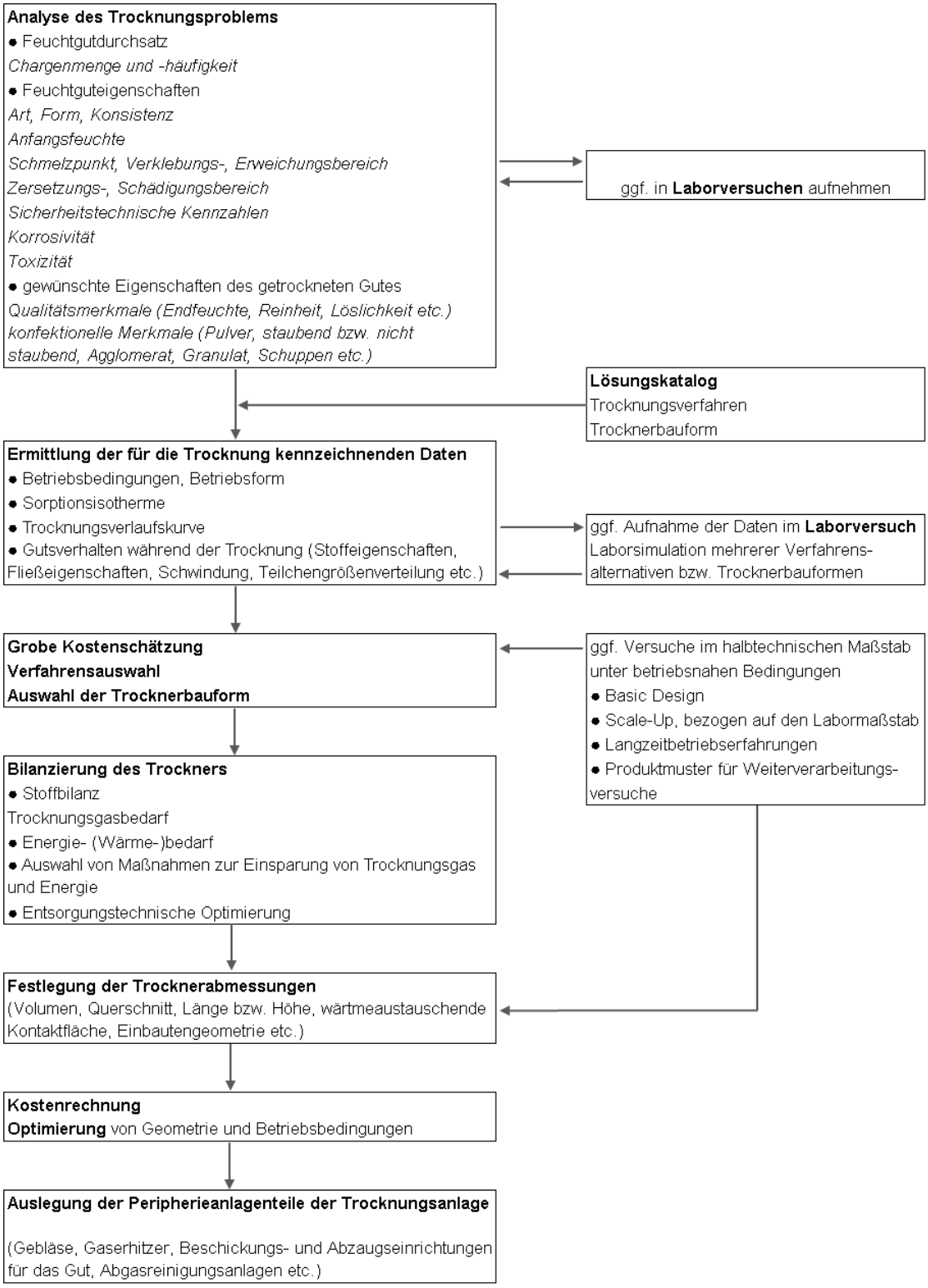
Folgende Fragen müssen als Orientierungshilfe beantwortet werden (343 S. 487):

- Wie ist die Feuchte an das Gut gebunden? Ist das Gut hygroskopisch?
- Wie groß ist die Dampfdurchlässigkeit des Guts (Porenstruktur)?
- Wie hoch ist die Wärmeleitfähigkeit des Guts?
- Ist das Gut empfindlich auf Wärme oder Oxidation?
- Ist es staubend, elektrostatisch aufladbar, feuergefährlich, toxisch?
- Bildet die Gutsflüssigkeit brennbare Dämpfe?
- Welche Mengen müssen getrocknet werden?
- Fällt das Gut sporadisch oder kontinuierlich an?
- Wie ist die Gutsform (stückig, folienartig, flockig, körnig, pulvrig, breiig, klebrig, flüssig)?
- Schrumpft das Gut? Zerbröckelt es? Gibt es Schwindrisse?
- Muss der Trockner einfach und sauber zu reinigen sein (Nahrungsmittel, Pharmazeutika)?
- Wie groß ist die gegebene Anfangsfeuchte und wie groß die geforderte Endfeuchte des Guts?
- Muss Lösungsmittel zurückgewonnen werden?
- Welche Heizmedien stehen zur Verfügung?
- Gibt es Besonderheiten am Einsatzort?

Abbildung 3.12-1 zeigt die Herangehensweise bei der Auswahl eines geeigneten Trockners. Im ersten Schritt erfolgt die Analyse des Trocknungsproblems mit Hilfe von Laborversuchen. Mit Hilfe eines Lösungskataloges können geeignete Trocknungsverfahren sowie Trocknerbauformen vorausgewählt werden. Einen möglichen Lösungskatalog zeigt Abbildung 3.12-2, eine Zuordnung von Trocknungsgütern zu geeigneten Trocknern ist in Abbildung 3.12-1 angegeben. Generell eignen sich z. B. Vakuumtrockner für wärme- oder oxidationsempfindliche Güter, Kontakttrockner für staubende Güter und Gegenstrom-Konvektionstrockner für hygroskopische Güter (343 S. 488).

Für die Auslegung von Trocknern sind vor allem die Sorptionsisothermen sowie die Trocknungsverlaufskurven von entscheidender Bedeutung. Diese können mit Hilfe von Trocknungsversuchen in Labor- oder Pilottrocknern ermittelt werden (343 S. 488). Sind mehrere geeignete Verfahren bzw. Trocknerbauarten identifiziert, folgt eine grobe Kostenabschätzung für die Varianten. Anschließend erfolgt die stoffliche und energetische Verfahrensauslegung des Trockners. In diesem Schritt sind durch Stoff- und Energiebilanzierung Energieverluste abzuschätzen. Es folgen die Festlegung der Trocknerabmessungen und die Kostenrechnung sowie die Verringerung der zu erwartenden Energieverluste durch schrittweise Verfahrensoptimierung unter Berücksichtigung der Kosten. Zuletzt werden die Peripherieanlagenteile (z. B. Ventilatoren, Pumpen, Stelleinrichtungen, Stückgutfördereinrichtungen) des Trockners ausgelegt und separat einer Energieverbrauchsoptimierung nach den dafür jeweils aktuell gültigen Regeln zugeführt (344).

Abbildung 3.12-1: Vorgehensweise bei der Auswahl von Trocknungsverfahren, Trocknerbauform und Trocknerauslegung



Quelle: (342 S. 367)

Abbildung 3.12-2: Möglicher Aufbau eines Lösungskataloges zur Auswahl von Trocknungsverfahren und Trocknerbauform

Auswahl- bzw. Bewertungskriterium	**Trocknungsverfahren bzw. Trocknerbauform (Beispiele)**						
	Konvektionstrockner				**Kontakttrockner**		
	BT	TT	WST	ST	SCT	TET	DVT
Erscheinungsform des Feuchtgutes							
rieselfähig	+	+	+	+	+	+	-
stückig, flächig	+	+	-	-	-	-	-
pastös	+	-	+*	-	+-	-	+-
flüssig (Lösung, Suspension)	-	-	-	-	+-	-	+
korrosiv (chemisch und abtragend)	+	+	+	+	-	-	-
lösungsmittelfeucht	-	-	-	-	+	+	+
Beeinflussung der Gutsform während der Trocknung							
formerhaltend	+	+	+	+	+	+	-
granulierend	-	+	+	-	-	-	-
zerkleinernd	-	-	-	-	-	-	+
Betriebsform							
kontinuierlich	+	+	+	+	-	+	+
diskontinuierlich	-	-	+	-	+	+	-
Trocknungsdauer							
Kurzzeittrocknung	+	+	+	+	-	-	+
Mittelzeittrocknung	+	+	+	-	-	-	-
Langzeittrocknung	+	-	+	-	+	+	-
Gasführung							
Gleichstrom	+	+	-	+			
Kreuzstrom	+	-	+	-			
Gegenstrom	+	+	-	-			
Raumbedarf							
Aufstellungsfläche	-	-	-	+	-	+	+
Aufstellungshöhe	+	+	-	-	+	-	-
Investitionskosten	-	-	-	+	-	-	-
Betriebskosten	+	-	+	+	+	+	+
Spez.Verdampfungsleistung	+	+	+	+	+	+	+
Aufsichtsaufwand	+	-	+	+	+	+	+
Wartungsaufwand	-	+	+	+	+	+	+
Reinigungsaufwand	+	-	+	+	-	-	-
Flexibilität	+	+	+	+	-	+	+

* mit Fluidisierungshilfe

Quelle: (342 S. 366)

Abbildung 3.12-3: Auswahl von Trocknern nach Eigenschaften des Trocknungsgutes

Trocknertyp	Guteigenschaften														Beispiele
			pumpfähig				schüttfähig				bahnen-förmig		stückig		
	Chargentrockner	Durchlauftrockner	dünnflüssig	dickflüssig	breiförmig	pastenförmig	staubförmig	körnig	brockig	faserig/blattförmig	flächig (Papier)	gewebt (Textilien)	lackierte Oberfl.	Formstücke	
Konvektionstrockner															
auf Unterlage ruhendes Gut															
Kammertrockner	+								3	3	3	3	1	1	Tabak, Leder, Teigw., Keramik
Rosttrockner	+							2	1	1					Holz-, Heil- und Gewürzpflanzen
Einbandtrockner		+						2	1	1					Wolle, Getreide
Tunneltrockner		+											1	1	Keramik, Porzellan
überwiegend mechanisch bewegtes Gut															
mechanisiertes Darren		+						3	2	1					Grünfutter, Hackfruchtschnitzel
Mehrbandtrockner		+						2	2	1					Hopfen, Wolle, Seifenschnitzel
Trommeltrockner		+						1	2	1					Salz, Mineraldünger, Grünfutter
Rieselschachttrockner		+						1							Getreide
Düsentrockner		+									1	1			Gewebe, Papier
Hängebahntrockner		+										1			Gewebe
überwiegend pneumatisch bewegtes Gut															
Fließbetttrockner	+	+				2	2	1							Salz, Getreide, Kunststoffe, Kohle
Stromtrockner		+					1	2		2					Stärke, Kunststoffe
Zerstäubungstrockner		+	1	1	2	2									Lebensmittel, Farben
Kontakttrockner															
überwiegend auf Unterlage ruhendes Gut															
Walzentrockner		+	1	1	1	1									Milch, Kartoffeln
Zylindertrockner		+									1	1			Papier, Pappen, Gewebe
mechanisch bewegtes Gut															
Tellertrockner	+	+		2	2	2									Blut, Erzkonzentrate
Röhren-Trommeltrockner		+					2	1	2						Braunkohle
Strahlungstrockner	+	+													Lackschichten
Wechselfeldtrockner	+	+													Lackschichten, Schaumgummi
Vakuumtrockner															
Normalvakuum															
Vakuum-Kammertrockner	+		3	3	2	1	1	1	2	2	3	3	2	3	Arznei, Lebensmittel
Vakuum-Schaufeltrockner	+	+			2	1	1	2		3					Farbstoffe
Vakuum-Taumeltrockner	+							1	3						Kunststoffgranulat
Vakuum-Schachttrockner		+						2							Getreide
Vakuum-Drehtrommeltrockner								1	3						Kunststoffgranulat
erhöhtes Vakuum															
Gefriertrockner	+		1	1	2	2	2	2	2	2					Arznei und Lebensmittel, Blutplasma

1 - gut einsetzbar, 2 - einsetzbar, 3 - bedingt einsetzbar

Quelle: (346 S. 511)

3.12.2 Berechnung des Energiebedarfs und der Energieeffizienz

Die theoretisch minimal benötigte Energie zur thermischen Trocknung hängt überwiegend von der zu verdampfenden Flüssigkeitsmasse und deren spezifischer (also massebezogener) Verdampfungsenthalpie ab. Da zum Erreichen der benötigten Temperatur der gesamte Feststoff erwärmt werden muss, geht genau genommen auch der Energiegehalt des Feststoffes an sich und der Energiegehalt der enthaltenen Flüssigkeit – noch vor der Verdampfung – ein. Dies ist nicht immer vernachlässigbar und kann im Bedarfsfall mit überschaubarer thermodynamischer Methodik geleistet

werden. Zum Zwecke der Praxistauglichkeit wird als Referenz hier jedoch allein die Verdampfung an sich angesetzt.

Formel 3.12-1

$$Q_{th} = \Delta m_S \Delta H_{v,S}$$

Q_{th}	theoretisch minimal notwendige Energie zur Trocknung [kJ]
$\Delta H_{v,S}$	spezifische Verdampfungsenthalpie der abzutrennenden Substanz (z. B. S…Wasser) [kJ/kg]
Δm_S	Masse verdampfter Flüssigkeit [kg]

Bei Wasser beträgt die spezifische (massebezogene) Verdampfungsenthalpie $\Delta H_v = 2440 \frac{kJ}{kg}$. Durch Einheitenumrechnung ergibt sich daraus der minimale spezifische Energiebedarf $q_{th} = \frac{Q_{th}}{\Delta m_s} = 0{,}68 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ (siehe auch Formel 3.12-4).

Bei der Angabe dieses minimalen Wärmebedarfs wird angenommen, dass die verdampfte Flüssigkeit mit dem transportierenden Gasstrom (Abluft, Abgas) in die Atmosphäre entlassen und die aufgebrachte Verdampfungsenthalpie damit der Umwelt zugeführt wird. Stand der Technik ist die Rückkühlung von Abgasen bis unterhalb der Taupunkttemperatur. Diese kann direkt aus der Siededruckkurve und dem tatsächlichen Partialdruck der Flüssigkeit ermittelt werden. Bei Temperatursenkung unter die Taupunkttemperatur, ggf. bis nahe der Umgebungstemperatur, setzt partielle Kondensation ein. Dabei kann ein Teil der vorher zugeführten Verdampfungsenthalpie für Nutzenergiezwecke zurückgewonnen werden. Die dafür notwendige Anlagentechnik ist somit energetisch interessant. Sie ist aber aufwändig. Sie ist zudem nur dann sinnvoll einsetzbar und wie gewünscht wirksam, wenn Niedertemperatur-Nutzwärmebedarf (Wärmebedarf bei 20 °C bis 30 °C) besteht. Ökologischer Nutzen einer solchen Wärmerückgewinnung existiert nur dann, wenn der so gedeckte Wärmebedarf im Referenzfall durch herkömmliche Verbrennung von fossilen Brennstoffen oder durch Einsatz elektrischer Energie aus fossilen Brennstoffen gedeckt würde.

Die vorgenannte Technik ist sehr gut mit der sogenannten Brennwerttechnik vergleichbar. Bei dieser wird durch partielle Kondensation von Wasserdampf im Abgas Verdampfungsenthalpie zurückgewonnen, die bei Abgastemperaturen über 80 °C an die Umgebung abgegeben würde und die den Unterschied zwischen Brennwert und Heizwert ausmacht.

Der theoretische Mindestwert für die Verdampfungsenergie ist ein Orientierungswert. Der tatsächliche Wärmebedarf eines industriellen thermischen Trockners liegt in der Regel höher als der theoretische Mindestwert, bezogen auf die nach erfolgter mechanischer Trennung noch zu entfernende (zu verdampfender) Flüssigkeit. Grund für den Mehrbedarf sind Abstrahlungs- und Konvektionsverluste, Abgasverluste, Abluftverluste, zusätzliche Bindungsenthalpie der Feuchte im niedrigen Feuchtegehaltsbereich, der Wärmebedarf für die Anwärmung des Gutes mitsamt der enthaltenen Flüssigkeit und der Luft auf Abluftemperaturniveau (sinngemäß nach (347 S. 23).

Insbesondere wirkt effizienzmindernd, dass bei Mängeln der Anlagengestaltung das Abgas bzw. die Abluft nicht so viel Flüssigkeit pro Kubikmeter abtransportiert, wie sie dies theoretisch nach thermodynamischen Gesetzen könnte (Sättigungsgehalt wird unter Umständen nicht erreicht). Deshalb sei auf die Notwendigkeit einer hohen Intensität des Wärme- und Stoffüberganges verwiesen und auf die Notwendigkeit einer Regelung, die den Trocknungsgasstrom an die erreichbare Trocknungsintensität anpasst. Hintergrund des Letzteren ist, dass der Transport der Flüssigkeit im Trocknungsprodukt zur Oberfläche im Trocknungsverlauf zunehmend hohen Transportwiderständen unterworfen ist (Modell der Trocknungsabschnitte).

Als Energieverlust kommt die Energieabgabe des Trockners über das Gehäuse durch Konvektion und Strahlung an die Umgebungsluft und die umgebenden Flächen hinzu sowie der Energieverlust durch Leckagen, die nicht im Hauptgasstrom erfasst sind.

Formel 3.12-2

$$Q_{Trockner} = Q_{th} + Q_{pd} + Q_{Leer}$$

$Q_{Trockner}$	tatsächlicher Energiebedarf des Trockners [kJ]
Q_{th}	theoretisch minimal notwendige Energie zur Trocknung [kJ]
Q_{pd}	Energiebedarf zum Erwärmen des Trocknungsgases (thermische Verluste des Abgases) [kJ]
Q_{Leer}	Energiebedarf für entleerten Trockner (entspricht Abstrahlungs- und Konvektionsverlusten [kJ]

Der tatsächliche Wärmebedarf kann aber auch deutlich reduziert werden, indem sonst ungenutzte Abgasenergie zur Energiezufuhr genutzt wird und/oder dem Abgas noch Energie entzogen wird (Nutzung der Verdampfungsenthalpie (analog Brennwerttechnik)).

Im Falle der Nutzung hochtemperierter Abgase (über 150 °C) aus anderen Prozessen, für die keine andere energetische Nutzung möglich ist und die ansonsten in die Umgebung entlassen würden, ist damit die höchstmögliche erreichbare Energieeffizienz erzielt. Es bleibt dann nur die Berücksichtigung (Gegenrechnung) des Anlagenaufwandes und des elektrischen Energieaufwandes für Druckerhöhungen (Ventilatoren).

Bei Bereitstellung der Energie des Trocknungsgases aus einer wärmeerzeugenden Verbrennungsanlage hingegen wird die Effizienz der Trocknung durch den o. g. Wärmebedarf sowie zusätzlich noch durch die Verluste der Wärmeerzeugung beeinflusst. Diese kann mit dem Wirkungsgrad der Wärmeerzeugungsanlage („Heizung“) beschrieben werden.

Formel 3.12-3

$$Q_{Gesamt} = \frac{Q_{Trockner}}{\eta_{Heizung}}$$

Q_{Gesamt}	Gesamtenergiebedarf [kJ]
$\eta_{Heizung}$	Wirkungsgrad der Heizung/Feuerung [-]

Der spezifische thermische Energiebedarf q der Trocknung ist das Verhältnis von Gesamtenergiebedarf zur abgetrennten Masse Wasser:

Formel 3.12-4

$$q = \frac{Q}{\Delta m_{H_2O}}$$

Hierbei kann je nach Vereinbarung für den Vergleich des Energiebedarfs

- zwischen verschiedenen Effizienzvarianten oder
- einer betrachteten Anlage zu einer Referenzanlage

entweder

- der eigentliche Wärmebedarf des Trockners oder
- der Gesamtenergiebedarf, ggf. sogar der Primärenergiebedarf

berücksichtigt werden. Dies muss durch entsprechende Indizes kenntlich gemacht werden. Einheitliche Regelungen kann es wegen der Vielfalt technischer Aufgabenstellungen und Konstellationen dazu nicht geben.

Eine weitere Effizienzkennziffer von Trocknungsprozessen stellt der Nutzungsgrad dar (348 S. 1079). Dabei wird die zur Trocknung des Gutes minimal benötigte Energie der tatsächlich benötigten Energie gegenübergestellt. Mit dieser Methode ist es möglich, Aussagen über die Effizienz des gesamten Trocknungsprozesses inklusive An- und Abfahrvorgängen bzw. Veränderungen der Betriebsparameter zu treffen. Der Nutzungsgrad kann folgendermaßen berechnet werden:

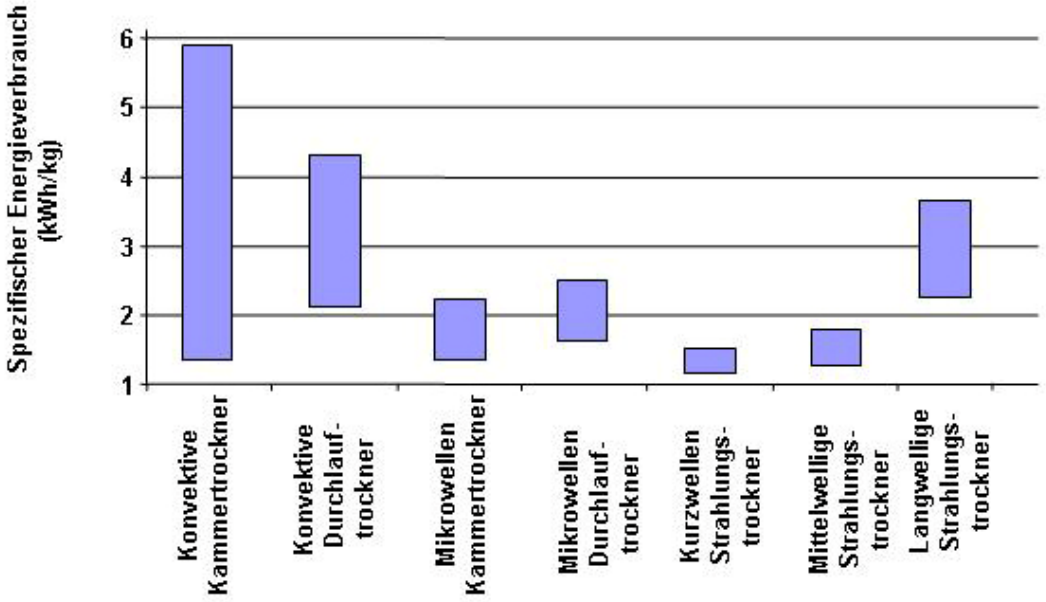
Formel 3.12-5

$$\mu = \frac{Q_{th}}{Q_{Trockner}} \cdot 100\%$$

3.12.3 Stand der Technik bezüglich Energiebedarf

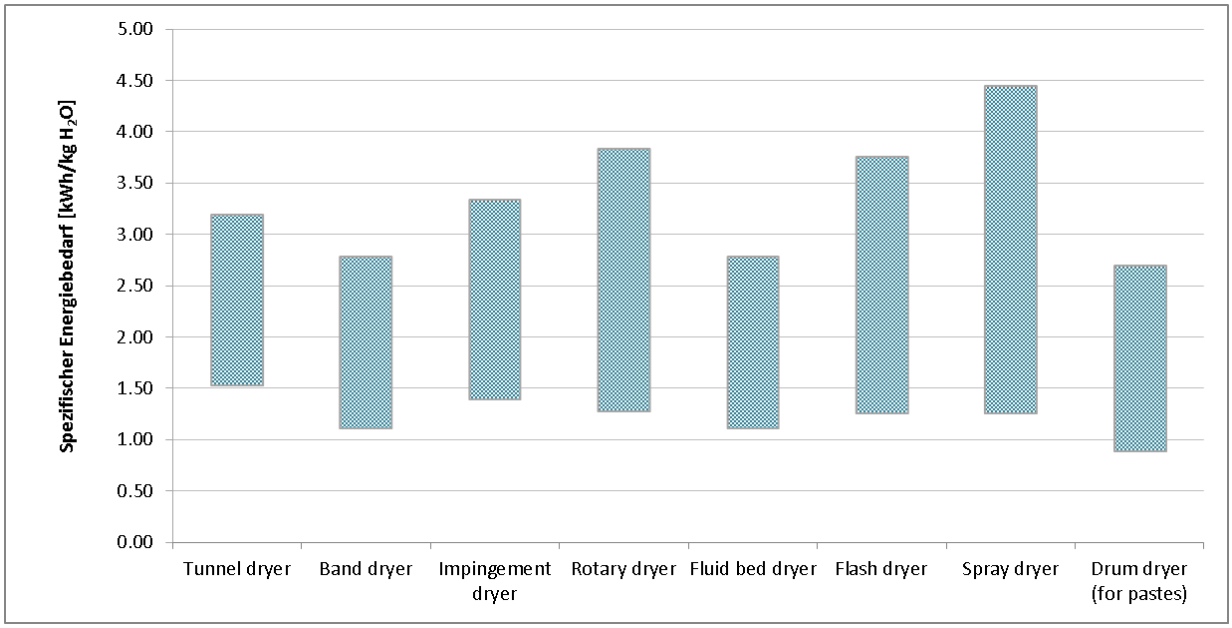
In Abbildung 3.12-4 werden spezifische Energiebedarfe von konvektiven Trocknern mit denen von Strahlungstrocknern verglichen. Den Vergleich der Bandbreiten spezifischer Energiebedarfe bei unterschiedlichen Typen von Konvektionstrocknern zeigt Abbildung 3.12-5.

Abbildung 3.12-4: Bandbreiten für den spezifischen Energieverbrauch verschiedener Typen von Trocknern während der Verdampfung von Wasser (zum Vergleich $q_{th} = 0{,}68 \frac{kWh}{kg}$)



Quelle: (1 S. 256)

Abbildung 3.12-5: Bandbreiten für den spezifischen Energiebedarf verschiedener Typen von Konvektionstrocknern



Quelle: Daten nach (349 S. 23)

3.12.4 Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

3.12.4.1 Reduzierung der notwendigen Verdampfungsleistung

Wie bereits betont wurde, kann durch Einbinden mechanischer Trennverfahren der Flüssigkeitsgehalt vor Beginn des thermischen Trocknungsverfahrens und damit der thermische Energiebedarf deutlich gesenkt werden.

Abbildung 3.12-6 ordnet die Trocknung bezüglich der Größe der beteiligten Partikel des Trocknungsgutes („Arten“) und bezüglich des volumenbezogenen Energiebedarfs in die Trennverfahren ein. Im Schema ist mit Trocknung die thermische Trocknung gemeint. Verschiedene mechanische Verfahren zur Abtrennung von Flüssigkeit sind separat aufgeführt. Um den Energiebedarf des Trocknungsprozesses als Ganzes zu reduzieren, können daher mechanische Verfahren den thermischen vorgeschaltet werden.

Die insgesamt benötigte Energie kann reduziert werden, indem eine optimale Menge der Flüssigkeit durch die weniger energiebedürftigen mechanischen Verfahren entfernt wird. Dadurch muss zum Erreichen des Zielflüssigkeitsgehaltes weniger Flüssigkeit durch das energieaufwändige Verdampfen entfernt werden.

Ebenso kann die Anpassung der Produktspezifikationen hin zu einem höheren Zielflüssigkeitsgehalt zu einer Reduktion des Energiebedarfs führen. Dies hat aber Auswirkungen auf Anforderungen an nachfolgende Prozesse oder auf den Wert des Produktes und muss in einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden.

3.12.4.1.1 Mechanische Entwässerung

Der spezifische Energiebedarf mechanischer Entwässerung kann im Vergleich zu thermischen Trocknungsprozessen um mehrere Größenordnungen geringer sein, da kein Phasenwechsel der zu entfernenden Flüssigkeit notwendig ist.

Zu den mechanischen Verfahren zählen das Sedimentieren, Filtrieren, Zentrifugieren und Abpressen (343 S. 459).

Beim Sedimentieren erfolgt die Trennung durch die Wirkung der Schwerkraft, d. h. durch die Dichteunterschiede zwischen Teilchen und des umgebenden Fluides (343 S. 333). Die erreichbaren Trockensubstanzgehalte sind lediglich gering (z. B. 20 %) (343 S. 347).

Bei der Filtration erfolgt die Trennung von Feststoffteilchen aus einem Fluid durch Siebwirkung, Trägheitseffekte, Diffusionseffekte und elektrostatische Effekte an einem porösen Filtermittel. Triebkraft ist die Druckdifferenz zwischen Trübe (dem Fest-Flüssig-Gemisch vor Filtration) und dem Filtrat (gewünschtes Produkt) (Christen 2010; S. 343 ff.). Mit der Filtration ist die Entwässerung auf z. B. bis zu 60 % Trockensubstanzgehalt möglich (343 S. 348). Filterapparate lassen sich unterscheiden nach (343 S. 353):

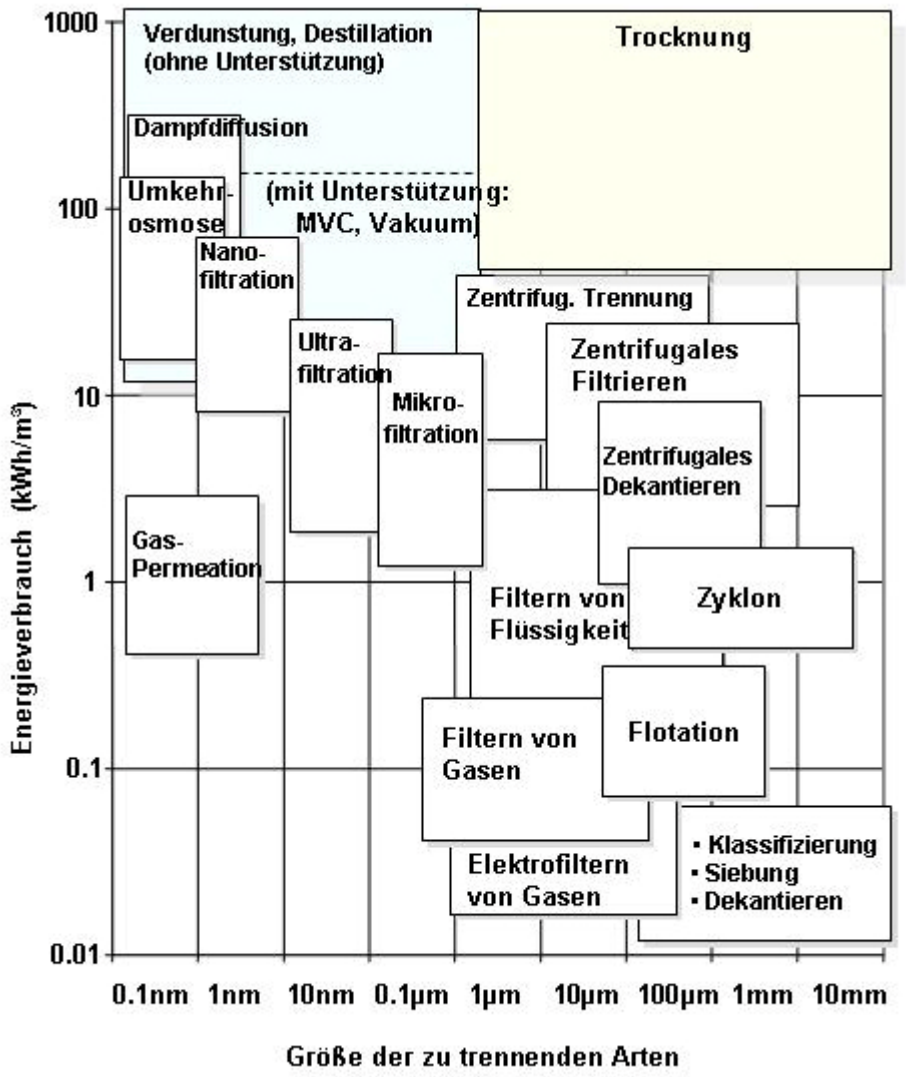
- Betriebsweise (Kontinuierlich oder diskontinuierlich),
- treibendem Druckgefälle (Gravitation, Pumpendruck, Vakuum),
- Produkt (Klär-, Rückstands- oder Trennfiltration),
- Feinheit der Teilchen (Grob-, Fein- oder Mikrofiltration),
- Filtermittel (Schüttschicht, Sinterkörper, Sieb, Gewebe, Vlies).

Diskontinuierlich arbeitende Filterapparate sind bspw. Sandfilter, Tellerfilter, Filterpressen oder Filterzentrifugen. Kontinuierlich arbeitende Filterapparate sind z. B. Trommelfilter, Bandfilter oder Scheibenfilter (343 S. 354).

Die Auswahl eines Filterapparates erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Filtratmenge pro Zeit,
- gewünschtes Produkt (Rückstand oder Filtrat),
- Teilchengröße und Teilchenverteilung,
- Eigenschaften der Teilchen (klebrig, geleeartig, quellend, abrasiv, oxidationsempfindlich etc.)
- Eigenschaften des Filterkuchens (kompressibel, porös, verdichtend),
- Eigenschaften des Lösemittels (brennbar, explosiv, toxisch, korrosiv),
- Temperatur und Druck der Trübe,
- erlaubter Filtrationsdruck (Kompressibilität der Filterschichten),
- Waschbarkeit und Wascherfordernis des Filterkuchens,
- gewünschte Restfeuchte des Filterkuchens,
- regulatorische Auflagen.

Abbildung 3.12-6: Vergleich des Energiebedarfs zwischen mechanischer und thermischer Trennung (Trocknung), Bezugsvolumen ist jeweils das Volumen des Ausgangs-Stoffgemisches



Quelle: (1 S. 253)

Weitere Verfahren, die weniger energieaufwändig als die verdampfende thermische Trocknung sein können, sind

- Osmotische Entwässerung,
- Reduzierung des Wassergehaltes mit Hilfe adsorbierender Substanzen (z. B. Zeolithen).

3.12.4.2 Verringerung von Verlusten des thermischen Trocknungsvorganges

Die Energiezufuhr zu einem thermischen Trockner geschieht durch einen Stoffstrom hoher Temperatur (z. B. Abgas) oder durch elektrische Energie. In Tabelle 3.12-2 ist zusammengestellt, auf welchen Weg diese zugeführte Energie die Anlage als Energieverlust und damit effizienzmindernd wieder verlässt.

Tabelle 3.12-2: Grundsätzliche Einflussmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz

Abfuhr ungenutzter Energie und dadurch Effizienzverlust durch	Verringerung der Energieabfuhr durch Maßnahme
In der verdampften Flüssigkeit gespeicherte Energie	Wärmerückgewinnung und möglichst Kondensation
Übriger Energiestrom des energieversorgenden Stoffstroms (Hauptstrom Output)	Senkung der Temperatur durch Intensivierung des Stoff- und Wärmetransportes (interne Wärmerückgewinnung), Interne und externe Masse- und Stofftransporte möglichst effektiv gestalten (341 S. 1079), Senkung der Temperatur durch interne oder externe Wärmerückgewinnung durch Wärmeübertragung an energiezuführende Medien
Austritt des energieversorgenden Energiestroms aus Leckagen	Vermeidung von Leckagen durch Konstruktion, Entfernung von Leckagen, die im Betrieb durch Alterung und Auflösung von Verbindungen entstehen Wartung der Anlagen
Wärmedurchgang durch Gehäuse des Trockners	Wärmedämmung: Die Art der Wärmedämmung und deren erforderliche Dicke sind von der Betriebstemperatur des Systems abhängig. Die Wärmedämmung muss gewartet werden, da sie im Lauf der Zeit unter Versprödung, mechanischen Schäden, Wasser- und Dampfleckstellen oder dem Kontakt mit Chemikalien leiden kann. Beschädigte Isolierung kann durch regelmäßige visuelle Inspektion oder Infrarot-Scannen erkannt werden.
Energieverluste von unterstützenden Einrichtungen (Ventilatoren, Förderantriebe)	Verbesserung der Auslegung, effizientere elektrische Antriebe (siehe Kap. 3.6, 3.9)

Quelle: eigene Darstellung, Hochschule Zittau-Görlitz, 2018

Die Verringerung der Energieabfuhr bei gleichem Flüssigkeitsentzug senkt den Bedarf der Energiezufuhr und damit die Energieeffizienz der Trocknung.

Exemplarisch werden wichtige Punkte näher erläutert:

Um z. B. interne Stofftransporte intensiver zu gestalten, können folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- fortwährendes Umschichten, evtl. Fluidisieren des feuchten Gutes zum Zwecke der fortwährenden Freilegung anderer Oberflächen für den Stoffübergang,
- Rückführung von trockenem Gut (verhindert auch Verkleben des Trockners) (343 S. 460).

Interne Transportvorgänge (innerhalb des Trocknungsgutes) können folgendermaßen intensiviert werden:

- Veränderungen in der Struktur des Trocknungsgutes vor oder während der Trocknung (sofern technologisch umsetzbar),
- Einsatz von oberflächenaktiven/grenzflächenaktiven/kapillaraktiven Substanzen [„surface-active substances“, z. B. Tenside], um Feuchte aus dem Gutsinneren zu verdrängen oder um die Transportprozesse zu beschleunigen,
- Steuerung der Temperatur, des Feuchtegehaltes und der Druckverteilung im Trocknungsgut durch z. B. die zeitliche Variation der Energieübertragung,
- Mischung des Materials während der Trocknung.

Eine weitere Einflussmöglichkeit beinhaltet die Variation der Trocknungstemperatur. Der Anstieg der Trocknungstemperatur von 140 °C auf 180 °C in einem Trockner in der Textilindustrie ergab in einem

dokumentierten Beispiel (348 S. 1079) eine Reduktion des Energiebedarfs um 25 %. Die Vorteile höherer Temperaturdifferenzen bezüglich der Kinetik der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge und damit bezüglich der Intensität, der verringerten Verweilzeit und der verringerten Baugröße sowie der schließlich verringerten Verluste kommt nur zur Geltung, wenn umfassende Wärmerückgewinnung stattfindet.

Eine interessante Variante der direkten Trocknung bzw. Konvektionstrocknung ist die Heißdampf-trocknung mit einer Atmosphäre aus überhitztem und deshalb noch ungesättigtem, also aufnahmefähigem Dampf (Wasserdampf oberhalb der Sättigungstemperatur). Wichtig ist hierbei die Kreislaufführung des Wasserdampfes und die Ausschleusung von Flüssigkeit aus dem Prozess durch partielle Rückkondensation.

Wichtiges Betätigungsfeld bei der optimalen Gestaltung des Zusammentreffens von Trocknungsgut und Gas ist die Strömungsführung und die Bewegung der Partikel. Eine wichtige Gestaltungsform ist die Wirbelschichttrocknung (WST). Dabei wird eine Schüttung von unten durchströmt. Im Zusammenwirken von nach oben gerichteten Strömungskräften auf die Partikel und der Schwerkraft entstehen intensive Durchmischungen und lokale Konvektionswirkungen.

Wirbelschichttrockner (WST) werden umfangreich in einer Vielzahl von Industriebranchen zur Trocknung von feuchten partikelförmigen („particulate“) und körnigen Materialien sowie Schlämmen, Pasten und Suspensionen, wenn sich diese in einem Bett aus inertem Feststoff fluidisieren lassen, eingesetzt. Bei der Trocknung von Pulvern können die WST mit eher traditionellen Trocknertypen erfolgreich konkurrieren (Tabelle 3.12-3) (349 S. 162).

Tabelle 3.12-3: Vergleich von Wirbelschichttrocknern (konventionell und modifiziert) mit anderen, konkurrierenden Trocknern für partikelförmige Feststoffe

Kriterium	Drehrohr-/ Trommel-trockner	Stromtrockner[a]	Band--trockner	WST konventionell	WST modifiziert
Partikelgröße	Großer Bereich	Feine Partikel	500 µm – 10 mm	100 – 2.000 µm	10 µm – 10 mm
Partikelgrößen-verteilung	flexibel	begrenzte Größenverteilung	flexibel	begrenzte Größenverteilung	weite Verteilung
Trocknungszeit	bis zu 60 min	10 – 30 s	bis zu 120 min	bis zu 60 min	bis zu 60 min
Aufstellfläche [„floor area“]	groß	große Länge	groß	klein	klein
Arbeitsbereich/ Betriebsbereich[b] [„turndown ratio“]	groß	klein	klein	klein	klein
Abrieb [„Attrition“]	hoch	hoch	niedrig	hoch	hoch
Energiebedarf (Leistungsauf-nahme) [„power consumption“]	hoch	niedrig	niedrig	mittel	mittel
Wartungsauf-wand	hoch	mittel	mittel	mittel	mittel
Energieeffizienz	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Bedienbarkeit [„ease of control“]	niedrig	mittel	hoch	hoch	hoch
Kapazität	hoch	mittel	mittel	mittel	Hoch

[a] Stromtrockner werden nur zur Entfernung von Oberflächenfeuchtigkeit bei kleineren Partikeln mit relativ kurzen Trocknungszeiten von 10-30 s eingesetzt.
[b] Turndown Ratio = maximum flow / minimum flow, https://www.massflow-online.com/faqs/turndown_ratio/

Quelle: (349 S. 162)

Die Weiterentwicklung von Trocknern betrifft vor allem die Suche nach Wegen, Energie möglichst direkt zum verdampfenden Flüssigkeitsmolekül im Trocknungsprodukt zu transportieren und die bei herkömmlichen Trocknern auftretenden Verluste dadurch zu vermeiden. Dies betrifft vor allem Anwendungen, bei denen Abwärmequellen nicht zur Verfügung stehen und deshalb der Einsatz an Brennstoff oder Elektroenergie minimiert werden oder die Handhabung und Qualität verbessert werden soll.

Als Innovationen, die unter bestimmten Verhältnissen interessant sein können, seien Induktionstrocknung, Pulse Combustion Drying (Trocknung mit pulsierender Verbrennung) und Einsatz elektromagnetischer Strahlung genannt.

3.12.4.2.1 Peripherie, insbesondere Effizienz von Arbeitsvorrichtungen

Bei den meisten Trocknungsprozessen werden Gase befördert. Das Fördern von Gasen ist an sich ein energieaufwändiger Prozess. Strömungswiderstände in Rohrleitungen, Verbindungsstücken und Armaturen, die entlang der Strömungsrichtung Druckverluste bewirken, müssen durch Aufprägung von Druckerhöhungen überwunden werden. Dies ist bei Gasen wegen deren Kompressibilität aufwändiger als bei Flüssigkeiten. Es ist deshalb auf die Auswahl von Ventilatoren, Kompressoren und Vakuumpumpen als Komponenten zur Druckerhöhung zu achten, die so ausgelegt sind, dass sie im

Arbeitsbereich ihre beste Effizienz haben (siehe Kap. 3.9 des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“). Aber auch Pumpen und ihre Antriebe müssen effizient ausgelegt werden (siehe Kap. 3.8 des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“).

Ebenso ist auf die Effizienz der elektrischen Antriebsmotoren für die Druckerhöhungsanlagen zu achten (siehe dazu Kap. 3.6 des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“).

3.12.4.2.2 Wärmerückgewinnung (intern) im Zusammenhang mit Wärmezufuhr

Die gängigen Methoden der technischen Thermodynamik sind geeignet, um nach Effizienzgewinnen durch Wärmerückgewinnung zu suchen. Dabei geht es immer darum, Abwärme verwendbarer Temperatur mit Wärmeübertragern in den Prozess einzubinden und dabei Wärmebedarfe jeweils niedrigerer Temperatur zu decken. Bei komplexen Anlagen ist hierzu die sogenannte Pinch-Methodik wegweisend. Teilweise kann es gesamtenergetisch – was durch Energiebilanzierung nachzuprüfen und nachzuweisen ist – der Einsatz von mechanischer bzw. elektrischer Energie sinnvoll sein, um Abwärme oder Umweltwärme zu nutzen und trotzdem geeignete Temperaturniveaus zu erreichen (Wärmepumpentrockner, mechanische Dampfkompression).

3.12.4.3 Verbesserung des Versorgungssystems

3.12.4.3.1 Wärmerückgewinnung (extern)

Die Effizienz einer Gesamtanlage, die einen Trocknungsprozess enthält, kann durch gute thermische Integration des Trocknungsprozesses in den Gesamtprozess erhöht werden. Als Beispiel sei die Nutzung von Energie des Trocknungsabgases für die Niedertemperatur-Raumwärmebereitstellung genannt werden. Dies ist immer dann sinnvoll, wenn der entsprechende Wärmebedarf ohne Anwendung der Effizienzmaßnahme aus fossilen Energieträgern gedeckt würde.

Im Sinne der Reduzierung des fossilen Energiebedarfs ist es zielführend, z. B. niederwertige Wärme („low-grade heat“) oder erneuerbare Energie (einschließlich alternative Brennstoffe, Biobrennstoffe und Abfall, direkte Solarstrahlung) einzusetzen. In jedem Fall muss der Bilanzrahmen des Effizienzvergleiches ausreichend groß gezogen werden um Sekundäreffekte, z. B. durch die Emissionsminderung bei Verwendung von Biomasse und Abfällen, zu berücksichtigen.

3.12.4.3.2 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Es kann gesamtenergetisch sinnvoll und auch wirtschaftlich sein, die Wärmebereitstellung durch eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK) zu gewährleisten. Die zusätzliche Stromerzeugung weist dann eine sehr hohe Effizienz auf. Die energetische Effizienzwirkung der Anlage als Ganzes kann dadurch gesteigert werden, auch wenn zur Bemessung dieser Wirkungen wiederum Bilanzkreiserweiterungen auf das elektrische Versorgungssystem erforderlich sind.

Für Systeme zur Wärmeversorgung bzw. zur Kraft-Wärme-Kopplung wird auf die entsprechenden Kapitel dieses BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“ verwiesen (Kap. 3.10 bzw. 3.4).

4 Beste verfügbare Techniken

4.1 Einführung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2 Beste verfügbare Techniken zum Erreichen der Energieeffizienz auf Anlagenebene

4.2.1 Energiemanagement

Wesentliche Anforderungen an ein Energiemanagementsystem werden als BVT festgelegt. Der Ansatz (z. B. standardisiert oder ohne Normbezug) und der Umfang (z. B. die Regelungstiefe zu energetischen Themen) des Energiemanagementsystems (EnMS) hängen maßgeblich von der Art, der Branche und der Komplexität der Anlage, ebenso wie dem Energiebedarf der einzelnen, dazugehörigen Prozesse und Systeme ab (siehe Kapitel 2.1). Die Anwendbarkeit ist grundsätzlich für alle Branchen und Anlagen gegeben.

BVT ist es, ein EnMS einzuführen und aufrechtzuerhalten, das den jeweiligen Umständen entsprechend alle folgenden Merkmale integriert (siehe Kapitel 2.1). Die unten aufgeführten Buchstaben (a), (b) etc. entsprechen denen in Kapitel 2.1:

a. Verpflichtung des Top-Managements (Die Verpflichtung der Unternehmensleitung wird als Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung des Energiemanagements angesehen).
b. Definition einer Energiepolitik für die Anlage bzw. den Standort oder das Unternehmen durch das Top-Management.
c. Festlegung von Zielen und Planung von Maßnahmen zur Verbesserung des EnMS und der energiebezogenen Leistung.
d. Umsetzung und Betrieb von Verfahren mit besonderer Beachtung von:
    i. Organisationsstruktur und Zuständigkeiten,
    ii. Ausbildung, Bewusstsein und Kompetenz,
    iii. Kommunikation,
    iv. Beteiligung der Mitarbeiter,
    v. Dokumentation,
    vi. wirkungsvolle Steuerung der Prozesse ,
    vii. Instandhaltung,
    viii. Vorbereitung und Reaktion auf Notfälle,
    ix. Auslegung von Energieverbrauchseinrichtungen und Beschaffung von energierelevanten Leistungen,
    x. Sicherstellen der Übereinstimmung mit gesetzlichen und behördlichen Anforderungen sowie freiwilligen Verpflichtungen im Hinblick auf die Energieeffizienz .
e. Benchmarking ist die Definition und Bewertung von Indikatoren der Energieeffizienz über die Anlagenlaufzeit und der systematische und regelmäßige Vergleich mit internen und externen Energieeffizienzkennzahlen, wenn validierte Daten verfügbar sind (siehe Kapitel 2.1(e), 2.16).
f. Überprüfung des EnMS und der energiebezogenen Leistung mit besonderer Beachtung von:
    i. Überwachung und Messung,
    ii. korrigierenden und vorbeugenden Maßnahmen,
    iii. Aufzeichnungspflichten,
    iv. unabhängiger interner Prüfung (wo praktikabel), um festzustellen, ob das EnMS mit den geplanten Vorgaben übereinstimmt und ordnungsgemäß umgesetzt und betrieben wird.
g. Überprüfung des EnMS und seiner fortlaufenden Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit durch das Top-Management.

Mit (h) und (i), siehe unten, bestehen weitere Merkmale eines EnMS, die anlagen- und branchenspezifisch zweckmäßig sein können.

h. Bei der Auslegung einer neuen Anlage sind die Auswirkungen auf die Umwelt aus der letztendlichen Außerbetriebnahme der Anlage zu berücksichtigen.

i. Entwicklung von energieeffizienten Technologien und Verfolgung von Entwicklungen in energieeffizienten Techniken.

Ein EnMS ist vollumfänglich verwirklicht, wenn diese Elemente Teil der bestehenden Managementsysteme (wie zum Beispiel einem UMS) sind oder im Rahmen eines losgelösten EnMS eingeführt werden.

Drei weitere Elemente werden als unterstützende Maßnahmen angesehen. Obwohl sie Vorteile haben, können Systeme ohne deren Umsetzung diese BVT sein. Diese drei zusätzlichen Schritte sind:

- (siehe Kapitel 2.1(h)) - Erstellung und Veröffentlichung (und möglicherweise externe Bestätigung) einer regelmäßigen Erklärung zur Energieeffizienz, die alle bedeutenden Umweltaspekte der Anlage beschreibt und einen jährlichen Vergleich gegenüber den umweltbezogenen Zielen und, soweit angebracht, mit externen Benchmarks ermöglicht.
- (siehe Kapitel 2.1(i)) - Prüfung und Bestätigung des Managementsystems durch eine akkreditierte Zertifikationsorganisation oder durch einen externen EnMS-Prüfer.
- (siehe Kapitel 2.1, Anwendbarkeit, 2) - Umsetzung einer national oder international akzeptierten, freiwilligen Norm, wie zum Beispiel:

  - ISO 50001,
  - wenn man das EnMS in ein UMS integriert: EMAS und EN ISO 14001. Dieser freiwillige Schritt könnte dem EnMS größere Glaubwürdigkeit verleihen. Nicht standardisierte Systeme können jedoch unter der Voraussetzung, dass sie ordnungsgemäß ausgelegt und umgesetzt werden, gleichermaßen wirksam sein.

4.2.2 Planung und Feststellung von Zielen und Plansoll

Ein wichtiger Aspekt eines Umweltmanagementsystems ist die kontinuierliche Umweltverbesserung. Hierfür ist es erforderlich, ein Gleichgewicht zwischen Energie-, Rohstoff- und Wasserverbrauch und den Emissionen aufrechtzuerhalten (siehe Kapitel 1.1.6 und 2.2.1). Eine geplante kontinuierliche Verbesserung erreicht die besten Kostenvorteile für das Erreichen von Energieeinsparungen (und sonstigen Umweltnutzen).

BVT ist es, kontinuierlich die Umweltauswirkung einer Anlage durch die Planung von Aktionen und Investitionen auf einer integrierten Grundlage kurz-, mittel- und langfristig zu minimieren und hierbei Kostenvorteile und die medienübergreifenden Wirkungen zu berücksichtigen.

Anwendbarkeit: Alle Anlagen.

'Kontinuierlich' bezieht sich auf Aktionen, die im Lauf der Zeit wiederholt werden, z. B. alle Planungs- und Investitionsentscheidungen sollten das gesamte langfristige Ziel berücksichtigen, die Auswirkungen des Betriebs auf die Umwelt zu reduzieren. Dies kann bedeuten, dass man kurzfristige Aktionen vermeidet, um verfügbare Investitionen besser über einen längeren Zeitraum einzusetzen, z. B. Änderungen am Kernprozess können mehr Investitionen erfordern und die Umsetzung kann länger dauern, sie können jedoch größere Reduzierungen im Energieverbrauch und bei den Emissionen bewirken (siehe Beispiele in Kapitel 2.2.1).

Der Umweltnutzen kann möglicherweise nicht linear sein, z. B. 2 % Energieeinsparungen jedes Jahr über 10 Jahre. Er kann stufenweise auftreten und die Investition in ENE-Projekte etc. widerspiegeln (siehe Kapitel 2.2.1). Ebenso kann es medienübergreifende Wirkungen geben: So kann es zum Beispiel erforderlich werden, den Energieverbrauch zu steigern, um einen Luftschadstoff zu senken.

Umweltauswirkungen können nie auf null reduziert werden und es wird Zeitpunkte geben, an denen wenig oder kein Kosten-Nutzen für weitere Aktionen besteht. Jedoch kann sich über einen längeren

Zeitraum mit einer sich ändernden Technologie und Kosten (z. B. Energiepreise) die Realisierbarkeit auch ändern.

4.2.2.1 Erkennen der Energieeffizienzaspekte einer Anlage und der Möglichkeiten zur Einsparung von Energie

Um die Energieeffizienz zu optimieren, müssen die Aspekte einer Anlage, die die Energieeffizienz beeinflussen, erkannt und quantifiziert werden (siehe Kapitel 2.11). Dann können Energieeinsparungen erkannt, bewertet, mit Vorrang versehen und umgesetzt werden (siehe Kapitel 2.1(c)).

BVT ist es, durch ein Energieaudit die Aspekte einer Anlage zu erkennen, die die Energieeffizienz beeinflussen. Es ist wichtig, dass eine Prüfung kohärent mit einem Systemansatz ist.

Anwendbarkeit: Alle bestehenden Anlagen und vor der Planung von Erweiterungen oder Umbauten. Eine Prüfung kann intern oder extern stattfinden.

Umfang und Art eines Energieaudits (z. B. Detailtiefe, Anwendungsbereich, Zeit zwischen den Prüfungen usw.) sind abhängig von der Art, dem Ausmaß und der Komplexität der Anlage und vom Energieverbrauch der einzelnen dazugehörigen Prozesse und Systeme (siehe Kapitel 2.8).

Die erste Energieprüfung für eine Anlage wird üblicherweise als Energiediagnose bezeichnet.

BVT ist es, beim Durchführen eines Audits sicherzustellen, dass das Audit die folgenden Aspekte erkennt (siehe Kapitel 2.11):

a. Eingesetzte Energieträger und Höhe des Energieverbrauchs in der Anlage und in ihren Systemen und Prozessen,
b. Energie verbrauchende Ausrüstung und die Art und Menge der in der Anlage verbrauchten Energie,
c. Möglichkeiten zur Minimierung des Energieverbrauchs, wie zum Beispiel:
    - Steuerung/Reduzierung der Betriebszeiten, z. B. abschalten, wenn nicht im Einsatz (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, 3.7, 3.8, 3.9, 3.11),
    - Prüfung der Dämmung von Rohrleitungen (siehe u. a. Kapitel 3.2.10, 3.10.1.4, 3.10.2.4),
    - Optimierung der Versorgungseinrichtungen, der verbundenen Systeme, Prozesse und der Ausrüstung (siehe Kapitel 3).
d. Möglichkeiten zur Verwendung alternativer Quellen oder Verwendung von Energie, die effizienter ist, besonders Energieüberschuss von anderen Prozessen und/oder Systemen, siehe Kapitel 3.3,
e. Möglichkeiten zur Nutzung von Energieüberschüssen anderer Prozesse und/oder Systemen (siehe Kapitel 3.3),
f. Möglichkeiten, die Wärmequalität zu verbessern (siehe Kapitel 3.3.2).

Anwendbarkeit: Alle Anlagen. Umfang und Art (z. B. Stand der Details) der Anwendung eines Energieaudits sind abhängig von der Art, der Größenordnung und der Komplexität der Anlage und dem Energiebedarf der einzelnen, dazugehörigen Prozesse und Systeme.

Beispiele einiger Techniken zur Optimierung von Systemen und Prozessen sind in den entsprechenden Abschnitten in Kapitel 3 aufgeführt.

Das restliche Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.2.2 Ein Systemansatz für Energie-Management

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.2.3 Ein System-Ansatz für Energiemanagement

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.2.4 Ziele und Indikatoren der Energieeffizienz feststellen und überprüfen

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.2.5 Benchmarking

Benchmarking ist ein starkes Werkzeug für die Einschätzung einer Anlage und der Wirksamkeit der Maßnahmen für die Energieeffizienz ebenso wie für die Überwindung der Blindheit gegenüber Paradigmen. Blindheit gegenüber Paradigmen (umgangssprachlich oft auch „Betriebsblindheit“ benannt) ist ein Begriff, der zum Beschreiben des Phänomens benutzt wird, wenn das dominante Paradigma verhindert, dass man durchsetzbare Alternativen sieht, z. B. "die Art und Weise, wie wir es tun, ist die beste, weil wir es immer auf diese Art und Weise getan haben."

Daten können in den Sektor-BREF‘s gefunden werden, ebenso wie Informationen von Fachverbänden, nationale Anleitungsunterlagen, theoretische Berechnungen für Prozesse etc.. Daten sollten vergleichbar sein und müssen möglicherweise korrigiert werden, z. B. für den Typ des Einsatzmaterials. Die Vertraulichkeit der Daten kann wichtig sein, dort wo zum Beispiel der Energieverbrauch ein bedeutender Teil der Produktionskosten ist, obwohl es möglich sein kann, die Daten zu schützen (siehe Kapitel 2.16). Siehe auch die Errichtung von Energieindikatoren.

Benchmarking kann auch auf Prozesse und Arbeitsmethoden angewendet werden (siehe Kapitele 2.5 und 2.16).

BVT ist es, systematische und aussagekräftige Vergleiche mit geeigneten Energieeffizienz-Benchmarks dort durchzuführen, wo verifizierte Daten zur Verfügung stehen.

4.2.3 Energieeffizientes Design (EED)

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.4 Erhöhte Prozessintegration

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.5 Die treibende Kraft der Initiativen zur Energieeffizienz in energieverbrauchenden Systemen, Prozessen, Tätigkeiten oder Ausrüstungen

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.6 Fachwissen aufrechterhalten

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.7 Effektive Prozess-Steuerung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.8 Instandhaltung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.2.9 Überwachung und Messung

Überwachung und Messung sind ein unbedingt erforderlicher Teil des Prüfens in einem „planen-umsetzen-prüfen-handeln“-System (siehe Kapitel 2.1). Zudem ist es auch Teil der wirksamen Steuerung von Prozessen.

BVT ist es, auf einer regelmäßigen Grundlage dokumentierte Verfahren zur Überwachung und Messung der wichtigsten Merkmale der Betriebe und Tätigkeiten zu erstellen, die eine bedeutende Auswirkung auf die Energieeffizienz haben können. Es sind mindestens 90 Prozent des gesamten Energieverbrauchs zu erfassen und auf konkrete Verbrauchertypen aufzuschlüsseln. Einige geeignete Techniken werden in Kapitel 2.10 aufgeführt.

Anwendbarkeit: Alle Anlagen. Der Umfang und die Art (z. B. Stand der Details) der Anwendung dieser Techniken sind abhängig vom Bereich, der Art, der Größenordnung und der Komplexität der Anlage und dem Energiebedarf der einzelnen, dazugehörigen Prozesse und Systeme.

4.3 Beste verfügbare Techniken zum Erreichen der Energieeffizienz in energieverbrauchenden Systemen, Prozessen, Tätigkeiten oder Ausrüstungen

4.3.1 Feuerungsanlagen

Feuerungsanlagen werden eingesetzt, um Wärme durch die chemische Umwandlung von festen, gasförmigen und flüssigen Brennstoffen bereitzustellen. Die Nutzung der Wärme kann direkt (z. B. Thermoprozessanlagen) oder indirekt (z. B. Dampferzeugung, Heißwassererzeugung) erfolgen. Energieeffizienzmaßnahmen für bestimmte Branchen werden daher in den entsprechenden Sektoren-BREF behandelt. Da Anlagen mit einer thermischen Gesamtleistung >50 MW aus mehreren Anlagen geringerer Leistung bestehen können, sind die Maßnahmen aus dem LCP-BREF zu beachten.

BVT ist es, die Energieeffizienz von Feuerungsanlagen unter Verwendung von Kombinationen geeigneter Maßnahmen zu optimieren, wie zum Beispiel:

- Effizienzmaßnahmen in den vertikalen BREF‘s,
- Effizienzmaßnahmen des LCP-BREF,
- Effizienzmaßnahmen in Tabelle 4.3-1.

Tabelle 4.3-1: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen

Kapitel	Technik/Maßnahme	Beschreibung	Anwendbarkeit
3.1		Dimensionierung der Feuerungsanlage für maximale Last unter Einbezug eines sorgfältig bestimmten Sicherheitsfaktors für Überlast	Alle Feuerungsanlagen
		Effizienz der Wärmeauskopplung durch regelmäßige Reinigung der Wärmeübertragerflächen oder Optimierung der Wärmeübertragergeometrie, Erhöhung des Wärmeübergangs-koeffizienten durch Turbulatoren	Bei indirekter Wärmenutzung mittels Wärmeübertrager (Heizkessel)
		Erhöhung des Wärmeübergangs auf das Gut durch Optimierung der Strömungsführung und geeignete Brennerwahl	Thermoprozessanlagen (siehe auch 3.1.1)
		Wärmerückgewinnung zur Luftvorwärmung (intern und extern)	Alle Feuerungsanlagen (siehe auch 3.1.1)
		Wärmerückgewinnung zur Speisewasservorwärmung	Dampferzeugung und Heizwasserbereitstellung
		Wärmerückgewinnung aus dem Abgas zur Trocknung oder Erwärmung von Brenn-, Roh- und Hilfsstoffen	Alle Feuerungsanlagen
		Wärmerückgewinnung zur betriebsinternen Nutzung oder externen Wärmenutzung	Alle Feuerungsanlagen

Kapitel	Technik/Maßnahme	Beschreibung	Anwendbarkeit
		Brennwerttechnik	Brennstoffabhängig, Vorhandensein von Niedertemperatur-Wärmesenke notwendig
3.1.1	Energetische Optimierung von Brennern für Industrieöfen	In den Brenner integrierte Luftvorwärmung (regenerative und rekuperative Brenner) sowie Sauerstoffbrenner (Oxyfuel)	Thermoprozessanlagen, typisch für Prozesse mit hohen erforderlichen Temperaturen
3.1.2	Optimierung des Luftüberschusses	Minimierung des Luftüberschusses (Reduktion von Abgasverlusten)	Alle Feuerungsanlagen, notwendiger Luftüberschuss abhängig von Brennstoff und Prozessführung
		Drehzahlgeregeltes Brennergebläse	Bei Feuerungsanlagen mit Gebläsebrennern
3.1.3	Wahl des Brennstoffes	Energieeffizienz der Verbrennung (minimal notwendiger Luftüberschuss), Eignung für Brennwertnutzung	Abhängig von Standort und Prozess
3.1.4	Reduzierung der Wärmeverluste durch Wärmedämmung	Minimierung der Wärmeverluste an die Umgebung durch Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung	Alle Feuerungsanlagen
3.1.5	Reduzierung der Verluste durch die Öffnungen von Industrieöfen	Minimierung der Verluste durch Be- und Entladen, Schauöffnungen etc.	Thermoprozessanlagen

4.3.2 Dampfsysteme

Wasserdampf ist aufgrund seiner Eigenschaften ein weithin eingesetztes Arbeitsmittel bei der Prozesswärmebereitstellung und bei der Umwandlung von thermischer in mechanische Energie. Für die Effizienz von Dampfsystemen in bestimmten Branchen sind Maßnahmen aus den vertikalen BREF‘s zu beachten. Dampfsysteme werden weiterhin ausführlich im LCP-BREF beschrieben. Fallen Anlagen aufgrund ihrer gesamten thermischen Leistung in den Geltungsbereich des LCP-BREF, sind auch die dort beschriebenen Maßnahmen zu beachten.

BVT für Dampfsysteme ist es, die Energieeffizienz unter Verwendung von Kombinationen geeigneter Maßnahmen zu optimieren, wie zum Beispiel:

- Effizienzmaßnahmen in den vertikalen BREF‘s,
- Effizienzmaßnahmen des LCP-BREF (Tabelle 3.2-2),
- Effizienzmaßnahmen in Tabelle 4.3-2.

Tabelle 4.3-2: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Dampfsystemen

Kapitel	Technik/Maßnahme	Beschreibung	Anwendbarkeit
Auslegung			
2.3	Energieeffizientes Design	Energieeffiziente Auslegung des Dampfsystems	Alle Dampfsysteme
3.2.2	Drosselgeräte und der Einsatz von Gegendruckturbinen	Anstelle von Drosselventilen Einsatz von Gegendrucktur-binen zur Bereitstellung mechanischer bzw. elektrischer Energie	Bei Neuanlagen oder umfassender Modernisierung
Erzeugung			

Kapitel	Technik/Maßnahme	Beschreibung	Anwendbarkeit
3.2.3	Betriebs- und Steuerungstechniken	Verbesserung der Betriebsverfahren und Kesselsteuerung	Alle Dampfkessel/-systeme
		Einsatz von Kesselablaufsteuerungen	Bei Standorten mit mehreren Kesseln
		Installation von Rauchgasabsperrklappen	Bei Standorten mit mehreren Kesseln an einem gemeinsamen Abgassystem
3.2.4	Speisewasservorwärmung	Einsatz von Economisern	Hauptsächlich für Großwasserraumkessel
		Nutzung von Prozessabwärme	Abhängig von Prozessführung
		Vorwärmung mittels Brüdenkondensator	Abhängig von Prozessführung
		Verwendung von Entspannungsdampf	Abhängig von Prozessführung
		Rauchgaskondensation (Brennwerttechnik)	Bei Neuanlagen. Abhängig von Brennstoff. Bei hohem Anteil von rückgeführtem Kondensat ist ein Niedertemperaturkreislauf notwendig
3.2.5	Vermeidung und Entfernung von Kesselsteinablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen	Externe Wasseraufbereitung (z. B. Ionenaustauscher, Umkehrosmose) sowie interne Wasseraufbereitung (Konditionierung mit Chemikalien)	Abhängig von Chemie des Rohwassers und Kesseltyp. Die notwendige Wasserqualität wird von Hersteller des Kessels bzw. aus Regelwerk vorgegeben (DIN EN 12952 bzw. 12953)
		Entfernung bereits gebildeter Beläge	Alle Kesseltypen
3.2.6	Minimierung der Verluste durch Absalzung und Abschlämmung	Sammlung und Rückführung von Kondensat zum Speisewasserbehälter	Abhängig von der Anwendung (z. B. bei Verwendung als Prozessdampf nicht möglich). Absalzung hauptsächlich für Großwasserraumkessel. Abschlämmung für alle Trommelkessel
		Erhöhung der Qualität der Wasseraufbereitung	Für alle Kessel möglich
		Installation einer automatischen Absalzregelung	Für alle Kessel möglich
		Möglichst kurze Öffnungszeit des Abschlammventils	Abschlämmung für alle Trommelkessel. Abhängig von Chemie des Rohwassers und Qualität der Wasseraufbereitung
		Wärmerückgewinnung aus Absalzung/Abschlämmung	Vor allem bei niedriger Kondensatrückführrate
3.2.7	Energetische Optimierung der Entgasungsanlage	Möglichst geringe Öffnungszeiten des Ventils des Entgasers, evtl.	Alle Standorte mit Entgasungsanlagen

Kapitel	Technik/Maßnahme	Beschreibung	Anwendbarkeit
		geregelt über die Sauerstoffkonzentration im Speisewasserbehälter	
		Wärmerückgewinnung mittels Brüdenkondensator	Alle Standorte mit Entgasungsanlagen
3.2.8	Minimierung der Verluste des Betriebskessels durch kurze Zykluszeiten	Kesseltyp, Dimensionierung, Anzahl der Kessel und Auslastung, Modulierende Brenner, Kesselsteuerung und Regelung, Dampfspeicher, Isolierung	Für alle Kessel möglich in Abhängigkeit des Prozesses
Verteilung			
3.2.9	Energetische Optimierung der Dampfverteilungssysteme	Sorgfältige Dimensionierung und Wartung des Dampf- und Kondensatsystems	Alle Dampfsysteme
3.2.10	Wärmedämmung von Dampfrohrleitungen und Kondensat-Rücklaufrohren	Umfassende Installation und Wartung von Wärmedämmung aller wärmeführenden Komponenten des Dampf- und Kondensatsystems	Alle Dampfsysteme
3.2.11	Umsetzung eines Steuerungs- und Reparaturprogramms für Kondensatableiter	Prüfung und Überwachung von Kondensatableitern, um Energieverluste und/oder Schädigungen am Dampfsystem zu vermeiden	Alle Dampfsysteme
Rückgewinnung			
3.2.12	Sammeln und Rückführung von Kondensat an den Kessel zur Wiederverwendung	Sammlung und Rückführung der größtmöglichen Menge an Kondensat. Sicherstellen der ordnungsgemäßen Funktion von Kondensatleitungen, Kondensatableitern und Wärmedämmung. Trennung in saubere und möglicherweise kontaminierte Kondensatströme. Evtl. automatische Überwachung von möglicherweise kontaminierten Kondensatströmen.	Nicht anwendbar bei Verwendung von Prozessdampf
3.2.13	Wiederverwendung von Entspannungsdampf	Einsatz eines Kondensatentspanners, Anwendung für Speisewasseraufbereitung, Niederdruckwärmeübertrager, Luftvorwärmung oder Kombination mit Thermoverdichter	Aus Kondensat und Absalzung/Abschlämmung. Ohne Thermoverdichter Niederdrucknetz und ausreichend Verbraucher notwendig

4.3.3 Wärmerückgewinnung

Die Hauptkomponenten zur Wärmerückgewinnung werden nach einer Systematisierung der Abwärmenutzungsmethoden und einigen grundlegenden Schritten zur Auswahl geeigneter Methoden im Kapitel 3.3beschrieben:

- Wärmeübertrager (siehe Kapitel 3.3.1),

- Wärmespeicher (siehe Kapitel 3.3.2)
- Wärmepumpen und Kältemaschinen (siehe Kapitel 3.3.3).

Prinzipiell ist eine Wärmerückgewinnung nur dort möglich, wo ein passender Wärmeverbraucher mit einem entsprechenden Lastprofil verfügbar ist oder Wärmespeicher zum Ausgleich asynchroner Lastprofile zwischen Abwärmebereitstellung und Nutzwärmebedarf eingesetzt werden.

Wärmeübertrager sind in den unterschiedlichsten Ausführungen und Leistungsklassen für variable Medien (ein-/zweiphasig) sowie Druck- und Temperaturverhältnissen verfügbar und seit Jahrzehnten Stand der Technik. Wärmeübertrager werden in den unterschiedlichsten Bereichen – nicht nur zur Wärmerückgewinnung – erfolgreich eingesetzt. Die Effizienz eines Wärmeübertragers muss durch regelmäßige Wartung (Reinigung) aufrechterhalten werden.

Wärmespeicher sind vor allem als sensible Wärmespeicher mit dem Speichermedium Wasser verfügbar und werden in den unterschiedlichsten Energiesystemen erfolgreich eingesetzt. Von den anderen Speichertechnologien stehen die Latentwärmespeicher (PCM-Speicher) vor dem Marktdurchbruch, sorptive Wärmespeicher befinden sich noch im Stadium der Entwicklung und prototypischen Erprobung.

Wärmepumpen und Absorptions-Kältemaschinen werden in den letzten Jahren verstärkt eingesetzt, Absorptions-Kältemaschinen speziell im Zusammenhang mit Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKK … Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung). Die im Vergleich zu Wärmeübertragern deutlich höheren Invest- und Betriebskosten führen zu signifikant längeren Amortisationszeiten.

BVT ist es, Abwärmepotenziale zu analysieren und ggf. Maßnahmen zur Abwärmenutzung zu implementieren. Dazu wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

a) Vermeidung von Abwärme bzw. deren Reintegration in den Prozess;
b) direkte Nutzung der Abwärme über Wärmeübertrager oder
c) indirekte Nutzung der Abwärme zur Bereitstellung von Wärme auf einem höheren Temperaturniveau (Wärmepumpe) oder zur Erzeugung von Nutzkälte oder Elektroenergie, z. B. mittels ORC-Prozessen oder anderen thermodynamischen Prozessen;
d) zum Ausgleich zeitlicher Diskrepanzen zwischen Wärmebereitstellung und Wärmebedarf können Wärmespeicher eingesetzt werden;
e) Abwärme, die nicht im Unternehmen genutzt werden kann, sollte leitungsgebunden oder mittels mobiler Wärmespeicher externen Wärmeverbrauchern zugänglich gemacht werden;
f) unvermeidbare, nicht nutzbare Abwärme muss in umweltverträglicher Art und Weise an die Umgebung abgegeben werden.

4.3.4 Kraft-Wärme-Kopplung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.3.5 Elektrische Energieversorgung

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

4.3.6 Elektromotorische Antriebe

In der Industrie werden zu einem großen Teil Elektromotoren eingesetzt. Der Austausch durch hocheffiziente Motoren und Frequenzumrichter (FU) ist eine der leichtesten Maßnahmen für eine energieeffiziente Optimierung. Dies sollte jedoch nur im Zusammenhang mit der Betrachtung des gesamten Systems, in dem sich der Motor befindet, durchgeführt werden, sonst besteht das Risiko, dass man:

- systemrelevante Parameter missachtet und so Anforderungen an das System nicht einhält,

- höheren Energieverlust erzeugt, falls ein FU im falschen Zusammenhang angewendet wird.

Die hauptsächlichen Systeme, die Elektromotoren einsetzen, sind:

- Pumpen (siehe Kapitel 3.8„Pumpensysteme“),
- Ventilatoren (siehe Kapitel 3.9 „Industrielle Lufttechnik“ und 3.10 „Heizungs-, Belüftungs- und Klimaanlagen-Systeme“),
- Kompressoren (siehe Kapitel 3.7 „Druckluftsysteme“),
- Mechanischer Transport.

BVT ist es, Elektromotoren in folgender Reihenfolge zu optimieren (siehe Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**):**

1. Das gesamte System um den Motor/die Motoren herum optimieren (z. B. Kühlsystem, siehe Kapitel 1.5.1),

danach den Motor/die Motoren im System gemäß den neu festgelegten Lastanforderungen mit einer oder mehreren Maßnahmen in

2. Tabelle 4.3-3 je nach deren Anwendbarkeit optimieren.

Tabelle 4.3-3: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz bei von Elektromotoren angetriebenen Systemen

Energiesparmaßnahmen für angetriebene Systeme	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument[1]
INSTALLATION oder RENOVIERUNG DES SYSTEMS		
Einsatz hocheffizienter Motoren	Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	3.6.1
Richtige Bemessung des Motors	Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	3.6.2
Regelantriebe installieren (VSD – variable speed-drive) (FU – Frequenzumrichter)	Der Einsatz von Frequenzumrichtern kann durch Anforderungen an die Sicherheit begrenzt sein. FU ist entsprechend der Last anzuwenden. Hinweis: In Systemen mit mehreren Maschinen mit variierenden Lastzuständen (z. B. Druckluftsystem) kann es optimal sein, nur einen VSD-Motor einzusetzen.	3.6.3
Rückspeisung von Bremsenergie	Anwendung bei starken oder vielen Bremsvorgängen.	3.6.4
Verwendung: direkte Kupplung, wenn möglich Zahnriemen, Keilzahnriemen oder Flachriemen anstelle von Keilriemen Schrägzahnradantrieb anstelle von Schneckenradantrieb	Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	3.6.5
Energieeffiziente Motorreparatur oder Austausch mit einem Hocheffizienzmotor	Zum Zeitpunkt der Instandsetzung.	3.6.6
Steuerung der Energiequalität	Kosten-Nutzen-Verhältnis über die Lebensdauer.	3.5
BETRIEB und INSTANDHALTUNG DES SYSTEMS		
Schmierung, Einstellungen, Abstimmung	Alle Fälle	2.9
Hinweis[1]: Medienübergreifende Wirkungen, Anwendbarkeit und wirtschaftliche Überlegungen werden aufgeführt in Kapitel 3.6.7 .		

3. Wenn die Energie verbrauchenden Systeme optimiert worden sind, optimiert man dann die restlichen (nicht optimierten) Motoren gemäß Tabelle 4.3-4 und nach folgenden Kriterien:
   i. Die restlichen Motoren, die mehr als 2000 Stunden pro Jahr laufen, genießen Priorität für den Austausch mit Hocheffizienzmotoren.
   ii. Elektromotoren, die unter variabler Last mit weniger als 50 % ihrer Nennleistung in mehr als 20 % ihrer Betriebszeit laufen und mehr als 2000 Stunden pro Jahr in Betrieb sind, sollten für die Ausrüstung mit Regelantrieben in Betracht gezogen werden.

4.3.7 Druckluftsysteme

Druckluft wird weithin entweder als Teil eines Prozesses verwendet oder, um mechanische Arbeit zu verrichten. Sie eignet sich speziell zur Verwendung in Bereichen, in denen es ein erhöhtes Risiko der Explosion, Entzündung etc. gibt. In vielen Fällen wird sie als integraler Teil des Prozesses verwendet (wie zum Beispiel zum Blasen, Formen oder Mischen), und es ist schwierig, ihre mechanische Effizienz einzuschätzen. In einigen Fällen, z. B. beim Antrieb kleiner Turbinen (Schraubwerkzeuge), hat sie eine

geringe Gesamteffizienz und, wo keine Einschränkungen im Hinblick auf Gesundheit und Sicherheit bestehen, kann der Austausch mit anderen Antrieben in Betracht gezogen werden (siehe Kapitel 3.7).

Anwendungsvoraussetzung der BVT vor deren Umsetzung ist in der Regel eine individuelle, systemabhängige Analyse und Planung. Nicht alle Maßnahmen sind immer ökologisch und ökonomisch sinnvoll.

Tabelle 4.3-4: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Druckluftsystemen

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
AUSLEGUNG			
Optimierung des Druckniveaus im System	Prüfung in allen Fällen, bei uneinheitlichen Betriebsdruckanforderungen der Verbraucher und ggf. Systemtrennungen in Betracht ziehen und/oder Alternativen im Verbraucherbereich prüfen.	3.7.1.2 3.7.1.3	
Korrekte Kompressorauslegung	Für neue Kompressoren: In allen Fällen Für bestehende Drucklufterzeugungen: Kosten-Nutzen über die Lebensdauer betrachten.	3.7.4.3.1	
Nutzung der anfallenden Wärme durch Wärmerückgewinnung	Wenn in anderen Betriebsbereichen Wärmebedarf, außer bei sehr kleinen Kompressorleistungen sowie bei geringem und unregelmäßigem Kompressorbetrieb.	3.7.4.3.2	
Energieoptimierung der Druckluftaufbereitung (Filter, Trockner,…)	In allen Fällen	3.7.4.2	
STEUERUNG und INSTANDHALTUNG			
Interne Kompressorregelung	In allen Fällen	3.7.3.1	
Übergeordnete Regelung	In Systemen mit mehreren Kompressoren	3.7.3.2	
Bildung der Mitarbeiter in Anlehnung an ein EnMS	In allen Fällen	3.7.6	
Behebung von Druckluftleckagen im Netz und bei den Endanwendungen	In allen Fällen	3.7.1.4	
Regelmäßig Wartung der einzelnen Systemkomponenten (z. B. Filter, Trockner, Speicher, Kompressoren,…)	In allen Fällen	3.7.5	
VERTEILUNGSSYSTEM			
Minimierung der Strömungsverluste	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	3.7.2.1	

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
Einsatz von Druckluftspeichern	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	3.7.2.2	
Gezieltes Ab- und Zuschalten von Drucklufttteilsystemen	Vorrangig bei verzweigten, komplexeren Systemen. Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	3.7.2.3	

4.3.8 Pumpensysteme

Die Beste Verfügbare Technik im Bereich von Pumpensystemen besteht darin, das in Kapitel 3.8 beschriebene Vorgehen umzusetzen. Die Konsultation eines Fachplaners kann hierbei von großem Nutzen sein.

Tabelle 4.3-5: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Pumpensystemen

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
AUSLEGUNG			
Bei der Auswahl von Pumpen Überdimensionierung vermeiden und überdimensionierte Pumpen austauschen.	Für neue Pumpen: In allen Fällen Für bestehende Pumpen: Kosten-Nutzen über die Lebensdauer betrachten.	3.8.3 3.8.4	Wichtigste Ursache für die Verschwendung von Pumpenenergie
Auswahl der Pumpe entsprechend der Förderaufgabe, anschließend Auswahl des Motors mit der passenden Antriebsleistung.	Für neue Pumpen: In allen Fällen Für bestehende Pumpen: Kosten-Nutzen über die Lebensdauer betrachten.	3.8.4 3.8.5	3.6.1
Auslegung des Rohr-leitungssystems (siehe Verteilungssystem, unten). Fachspezifische Software zur Druckverlustberechnung und Systemoptimierung nutzen		3.8.2	
STEUERUNG und INSTANDHALTUNG			
Steuerungs- und Regelungssystem	In allen Fällen von variablen Volumenströmen. Drehzahlgeregelte Pumpen mit Regler und Sensoren zur Messung von Systemparametern einsetzen sowie Regelung von Mehrpumpensystemen durchführen.	3.8.6	
Abschalten nicht benötigter Pumpenleistung	In allen Fällen	3.8.3	
Einsatz von Regelantrieben	Kosten-Nutzen über die Lebensdauer betrachten. Nicht anwendbar, wo die Durchflüsse konstant sind.	3.8.6	Siehe auch 3.6.3

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
Einsatz von mehreren Pumpen (gestufte Einschaltung, Kaskadenschaltung)	Wenn der dauerhafte Pumpendurchfluss weniger als die Hälfte der maximal benötigten Förderleistung beträgt.	3.8.6	
Regelmäßige Instandhaltung vornehmen. Wenn ungeplante Instandhaltungen überhand nehmen, sollte das System auf Kavitationsbildung Abnutzung falscher Pumpentyp geprüft werden.	In allen Fällen, wenn eine Instandsetzung oder ein Austausch erforderlich ist.	3.8.7	
VERTEILUNGSSYSTEM			
Die Verwendung zu vieler Biegungen (besonders enge Biegungen), Armaturen und Ventile vermeiden.	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	3.8.2	
Sicherstellen, dass der Durchmesser der Rohr-leitung nicht zu klein ist (korrekter Durchmesser der Rohrleitung).	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	3.8.2	
Nach der Optimierung des Verteilungssystems hydraulischen Abgleich vornehmen.	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	3.8.2	

Lufttechnische Anlagen

Die Beste Verfügbare Technik im Bereich der Lufttechnik besteht darin, das in Kapitel 3.9 beschriebene Vorgehen umzusetzen. Die Konsultation eines Fachplaners ist dabei zwingend erforderlich.

Tabelle 4.3-6: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Lufttechnik

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
AUSLEGUNG			
Sachgerechte Formulierung der Aufgabenstellung für das Lüftungssystem	In allen Fällen	3.9.1 3.9.2	
Prüfung von Alternativen für die Lösung einer prozesslufttechnischen Aufgabe	Vor allem bei Absaugungen von Emissionen, z. B. durch emissionsvermeidende Prozessgestaltung, und bei Förderaufgaben für feste Stoffe.	3.9.1 3.9.2	
Auswahl von Ventilatoren: Überdimensionierung vermeiden und überdimensionierte Ventilatoren austauschen.	Für neue Ventilatoren: in allen Fällen Für bestehende Ventilatoren: Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	3.9.2 3.9.6	
Auswahl des Ventilators entsprechend der Förderaufgabe, anschließend Auswahl des Motors mit der passenden Antriebsleistung.	Für neue Ventilatoren: in allen Fällen Für bestehende Ventilatoren: Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	3.9.2 3.9.6	siehe auch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**
Auslegung des Kanalleitungssystems mit Anforderungen zur Luftdichtheit.	In allen Fällen, vorzugsweise unter Anwendung professioneller Software	0 3.9.4	
STEUERUNG und INSTANDHALTUNG			
Steuerungs- und Regelungsystem	In allen Fällen.	3.9.8	
Regelmäßig geplante Instandhaltung vornehmen.		3.9.9	
Monitoring/messtechnische Überwachung des Energieverbrauchs der Ventilatorantriebe sowie von Druckverlusten im System	In allen Fällen, insbesondere bei großen Antriebsleistungen	3.9.5	2.1 2.15
VERTEILUNGSSYSTEM			
Die Verwendung zu vieler Kanalknicke und Einbauten vermeiden.	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung in Verbindung mit Einsatz professioneller Spezialsoftware erforderlich sein.	0 3.9.4	
Sicherstellen, dass der Durchmesser der Luftleitung nicht zu klein ist.	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	0	
Nach der Änderung des Kanalsystems pneumatischen Abgleich vornehmen.	In allen Fällen bei der Auslegung und Installation (einschließlich Änderungen). Es kann qualifizierte technische Beratung erforderlich sein.	0	

4.3.9 Heizungs-, Belüftungs- und Klimaanlagen-Systeme <Heating, Ventilation and Air Conditioning systems> (HVAC)

Tabelle 4.3-7: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz bei HVAC-Systemen

Energieeinsparmaßnahme	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument
Heiz- und Kühlsysteme		
Ermittlung des Wärme- und Kühlbedarfs in getrennter Betrachtung Zonierung Bestimmung des Nutzwärmebedarfs/Kühlbedarfs (zeitabhängige Betrachtung je Zone) Auslegung der benötigten Heizlast/Kühllast Beachtung von Möglichkeiten der Bauteilaktivierung	Vor dem Neubau oder Modernisierung der Heiz- und/oder Kühltechnik in jedem Fall zu bestimmen. Die zu installierende Heizleistung kann insbesondere mit Techniken der Bauteilaktivierung (z. B. Betonkernaktivierung der Decken) erheblich reduziert werden.	3.10.1.2 3.10.2.2
An den Standort angepasste Auswahl geeigneter Technik für Wärmeeintrag bzw. Wärmeentzug (Kühlung) in die Nutzungsbereiche	Neubau oder umfassende Modernisierung. Bei Umbau Kosten-Nutzen-Verhältnis über die Lebensdauer in Betracht ziehen.	3.10.1.3 3.10.2.3
Bedarf an Heizung/Kühlung reduzieren durch bauliche Maßnahmen: Wärmedämmung Gebäude Wärmedämmende Verglasung, ggf. in Verbindung mit Verschattung konstruktive Verschattung, z. B. mit einem je nach Standort individuell zu bestimmenden Dachüberstand im Heizfall: innere Wärmequellen zur Raumheizung nutzen im Kühlfall: innere Wärmequellen vermeiden, ggf. dämmen und Wärme nach außen abführen, z. B. mit natürlicher Lüftung	Neubau oder umfassende Modernisierung. Bei Umbau Kosten-Nutzen-Verhältnis über die Lebensdauer in Betracht ziehen.	3.10.1.2 3.10.2.2
Bedarf an Heizung/Kühlung reduzieren durch technisch-organisatorische Maßnahmen: Reduzierung /Vermeidung unkontrollierter Luftzutritte automatisches Schließen von Türen Auflösung von temperaturbedingter Luftschichtung in hohen Räumen Absenken des Sollwerts der Temperatur während Zeiten ohne Produktion (programmierbare Regelung) Reduzierung des Sollwerts für Heizung und Erhöhung für die Kühlung Einsatz dezentraler effizienter strahlungsbasierter Heiztechnik in selten genutzten Gebäudebereichen in Verbindung mit abgesenkten Temperaturen	In allen Fällen anwendbar, bei Sollwerteinstellungen rechtliche und technische Vorgaben sowie Wechselwirkung mit Behaglichkeitsempfinden/ Mitarbeitermotivation beachten	
Installation eines bezüglich Druck- und Wärmeverlusten (bzw. unkontrollierter Wärmeeinträge) optimierten Verteilsystems für Heiz- bzw. Kühlmedien: Verwendung effizienter Pumpen Effiziente Pumpenregelung Planung der Rohre (ausreichender Durchmesser, geringe Rohrrauigkeit) und sonstiger Bauteile für benötigte Fluidströme	Neubau oder umfassende Modernisierung. Bei Umbau Kosten-Nutzen-Verhältnis über die Lebensdauer in Betracht ziehen.	3.10.1.4 3.10.2.4 3.8

Energieeinsparmaßnahme	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument
hydraulischer Abgleich optimale Rohrdämmung		
Auswahl der Wärmeerzeugung unter Einbezug des Wirkungsgrads des Gesamtsystems sowie des Primärenergiefaktors und des spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionswertes des eingesetzten Brennstoffs. Prioritätsreihenfolge: Nutzung von Abwärme- und Wärmerückgewinnungspotenzialen Nutzung erneuerbarer Energien (besonders vorteilhaft in Kombination mit bauteilaktivierten Betondecken) Kraft-Wärme-Kopplung Brennwerttechnik	Neubau oder umfassende Modernisierung. Bei Umbau Kosten-Nutzen-Verhältnis über die Lebensdauer in Betracht ziehen.	3.10.1.5
Implementierung eines an die Nutzung des Gebäudes angepassten Regelkonzeptes in Verbindung mit automatisierter Gebäudeleittechnik	In allen Fällen in Betracht ziehen und gemäß des Kosten-Nutzens umsetzen.	3.10.1.6
Kühltechnik – spezielle Aspekte		
Auswahl eines möglichst energieeffizienten Weges zur Kälteerzeugung Prioritätsreihenfolge: Freie Kühlung Nutzung von Abwärmepotenzialen zum Betrieb von Absorptions-Kältemaschinen Hocheffiziente Kompressor-Kältemaschinen	Neu oder bedeutende Aufrüstung. Für Umbau auf der Basis des Kosten-Nutzens über die Lebensdauer in Betracht ziehen.	3.10.2.5
Optimierung der internen Regelung der Kältemaschinen	Unter gewissen Umständen anwendbar.	3.10.2.6
Optimierung des Zusammenspiels der Komponenten der Kälteanlage	Unter gewissen Umständen anwendbar.	3.10.2.6
Einbindung der Kälteanlage in das gebäudetechnische Gesamtkonzept; ggf. Nutzung von Speichern und Sektorkopplung	Unter gewissen Umständen anwendbar.	3.10.2.6
Sektorkopplung		
Nutzung von Abwärmepotenzialen zum Betrieb von Absorptions-Kältemaschinen Nutzung der Abwärme von Kältemaschinen für Heizzwecke Temperatur-Splitting durch Einsatz von Wärmepumpen zur gleichzeitigen Deckung von Heiz- und Kühlbedarfen	Unter gewissen Umständen anwendbar.	3.10.2.6
Lüftungssysteme		
Fachgerechte Ermittlung des Lüftungsbedarfs	Vor dem Neubau oder der Überarbeitung der Raumlüftungstechnik in jedem Fall zu bestimmen.	3.10.3.2
Fachgerechter Aufbau von Lüftungssystemen: Hohe Effizienz der einzelnen Systemkomponenten insbesondere Elektromotoren und Ventilatoren Auslegung der Ventilatoren für Betrieb im optimalen Leistungsbereich	Neu oder bedeutende Aufrüstung. Für Umbau auf der Basis des Kosten-Nutzens über die Lebensdauer in Betracht ziehen.	3.10.3.3

Energieeinsparmaßnahme	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument
effizientes Zusammenspiel der Komponenten im System Druckverluste Minimieren durch Vermeidung/ Minimierung von Kanaleinbauten, -verengungen, Bögen, unnötigen Längen ausreichende Querschnittsfläche von Luftkanälen, runde Form bevorzugen		
Einsatz von an Zu- und Abluftbedingungen angepassten Luftfiltern	In allen Fällen durchzuführen	3.10.3.4
Einsatz von Wärmeübertragern zwischen Fort- und Zuluft zur Rückgewinnung von nutzbarer Energie	In allen Fällen durchzuführen	3.10.3.4
Verwendung bedarfsgerecht gemessener Parameter (z. B. CO_2, Feuchte, Trübung) zur Regelung des Luftvolumenstroms in Verbindung mit effizienter Regelungstechnologie; Integration in automatisierte Gebäudeleittechnik	In allen Fällen in Betracht ziehen und gemäß des Kosten-Nutzens umsetzen.	3.10.3.5
Wartung und Instandhaltung (bezieht sich auf alle Komponenten)		3.10.1.7 3.10.2.7 3.10.3.6
Regelmäßige Durchführung einer fachgerechten Wartung, Instandhaltung.	In allen Fällen durchzuführen	3.10.3.6
Bei Filtern kontinuierliche/regelmäßige Druckverlustüberwachung in Verbindung mit zustandsorientierter Abreinigung bzw. Tausch des Filtermediums.	In allen Fällen anwendbar	3.10.3.4 auch 3.9.5
Regelmäßige Durchführung einer energetischen Inspektion.	In allen Fällen durchzuführen	3.10.3.6
Regelmäßiges bis kontinuierliches Monitoring der Energieverbrauchsdaten.	In allen Fällen durchzuführen	3.10.3.6

4.3.10 Beleuchtung

Bei der Planung eines energieeffizienten Beleuchtungssystems sind die an die Gesundheit, die Arbeitssicherheit sowie an die jeweilige Sehaufgabe gestellten Anforderungen jederzeit einzuhalten. Wie in Kapitel 3.10 dargestellt, besteht dabei ein großes Energieeinsparpotential.

Die Beste Verfügbare Technik im Bereich von künstlichen Beleuchtungssystemen besteht darin, die in Kapitel 3.11**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebene Maßnahmen und das beschriebene Vorgehen umzusetzen. Die nachfolgende Tabelle 4.3-8 fasst die Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Beleuchtungssystemen zusammen:

Tabelle 4.3-8: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Beleuchtungssystemen

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
BELEUCHTUNGSPLANUNG			

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
Beleuchtungsplanung bei einer Neuanlage oder Sanierung einer Bestandsanlage durchführen	In allen Fällen, um die Anforderungen an die Beleuchtung im Hinblick auf die Lichtqualität, nach deren Lichtleistung, Lichtkomfort und visuellem Ambiente einzu-halten, die für die beabsichtigen Aufgaben erforderlich sind.	3.11.3	
NEUANLAGEN			
Einsatz von effizienten Leuchtmitteln bzw. Leuchten, wie z. B. LED-Technologie	In allen Fällen	3.11.2	
MODERNISIERUNG VON BESTANDSANLAGEN			
Erneuerung von alten ineffizienten Lampen (Glühlampen, Halogenlampen) durch effiziente Leuchtmittel bzw. Leuchten, wie z. B. LED-Technologie	In allen Fällen	3.11.2	Einspar-potential: 60 - 80 % (328)
Reduzierung der Lichtabsorption, z. B. durch Weißstreichen von Wänden und Decken	Bei Renovierung, wenn aus visuellen Gesichtspunkten keine speziellen Vorgaben bestehen.	3.11.1.3	Einspar-potential: ≤ 50 % (343)
Lichtlenkung verbessern: Reflektoren nachrüsten	In allen Fällen, wenn zu große Abstrahlwinkel vorhanden sind und aus diesem Grund die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke nicht erreicht werden können.	3.11.1.2	Einspar-potential: 30 - 50 % (328)
Reduzierung der Leuchtenhöhe	In allen Fällen, in denen ein zu hoher Abstrahlwinkel vorherrscht; Blendung durch die Absenkung vermeiden.	3.11.1.2	Einspar-potential: ≥ 20 % (343)
Nachrüsten von elektronischen Vorschaltgeräten (EVG)	U. a. bei Bestandsanlagen, welche derzeit mit konventionellen Vorschaltgeräten betrieben werden.	3.11.2	Einspar-potential: 20 - 25 % (328)
LICHTMANAGEMENT			
Einsatz von Bewegungsmeldern in wenig frequentierten Räumen	In Abhängigkeit der Raumnutzung	3.11.4	Einspar-potential: 20 - 80 % (343)
Art der Raumnutzung festlegen, um die Verwendung von natürlichem Licht durch Tageslichtsteuerung zu optimieren.	In Abhängigkeit von Raum- und Fenstergröße	3.11.4.1	Einspar-potential: 10 - 30 % (343)
Einsatz von Zeitschaltuhren (abhängig von der Raum-nutzung)	In Abhängigkeit des Benutzerverhaltens	3.11.4	Einspar-potential: 20 - 80 % (343)

4.3.11 Trocknungssysteme

Die beste verfügbare Technik ist geeignet dafür zu sorgen, dass Trocknungsprozesse die theoretisch minimal notwendige Energie zur Trocknung benötigen. Diese ist in Kapitel 1.2, Formel 1-1 dieses Dokuments definiert.

Sinnvolle Abweichungen davon nach unten und oben ergeben sich folgendermaßen.

Abweichungen nach unten:

- Es ist möglich, mit der besten verfügbaren Technik Abwärme aus anderen Prozessen so zu nutzen, dass nur minimal thermische Energie von extern zugeführt werden muss und nur mechanische bzw. elektrische Energie in ebenfalls deutlich geringerem Umfang benötigt wird.
- Es ist möglich, mit der besten verfügbaren Technik Abwärme des Trocknungsprozesses intern so zu nutzen, dass nur ein geringer Teil der theoretisch erforderlichen thermischen Energie von extern zugeführt werden muss. Das beinhaltet auch die Nutzung der Verdampfungsenthalpie.

Die Nutzung dieser besten verfügbaren Techniken setzt voraus, dass im Prozess sehr große Reserven bezüglich Zeit - unter Beachtung der Dynamik der auf Produktqualität angestimmten Prozesse und Raum-Aufstellfläche für Anlagentechnik - verfügbar sind. In der Gesamtbetrachtung ergibt sich somit ein wirtschaftliches und ökologisches Optimierungsproblem.

Abweichungen nach oben

- Verluste durch Konvektion über Oberflächen der Apparate lassen sich nicht komplett verhindern und müssen deshalb durch zusätzliche Energiezufuhr kompensiert werden. Sie liegen aber ca. eine Zehnerpotenz unter der theoretisch minimal notwendigen Energie.
- Aufwendungen elektrischer Energie für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Stellantriebe sowie Regelungs- und Automatisierungstechnik lassen sich verringern (siehe einschlägige Bestimmungen), aber nicht vermeiden. Sie liegen bezüglich des Energiegehalts ca. eine Zehnerpotenz unter der thermischen Energie.
- Für Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge sind immer örtliche Mindesttemperaturdifferenzen und Mindestkonzentrationsdifferenzen zu schaffen, deren Aufrechterhaltung Energie kostet.
- Das Trocknungsprodukt transportiert mit seiner inneren Energie einen Energiestrom nach außen.

Die erforderliche Technik trägt individuell zugeschnittenen Systemcharakter und erfordert zielorientierte Auswahl aus den im Dokument angegebenen Techniken nach den ebenfalls im Dokument beschriebenen Entscheidungswegen, wobei je nach Situation jede der Techniken ihre Berechtigung haben kann. Hohes Planungswissen ist erforderlich. Die Konsultation eines Fachplaners kann hierbei von großem Nutzen sein.

Insbesondere kommt der Auslegung und Auswahl sowie Anordnung von Wärmeübertragern Gas-Gas und Flüssig-Gas hohe Bedeutung zu. In Tabelle 4.3-9 werden Einzelmaßnahmen thematisiert.

Tabelle 4.3-9: Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Trocknungssystemen

Techniken	Anwendbarkeit	Kapitel im Dokument	Zusätzliche Informationen
AUSLEGUNG			
Bei der Auswahl von Wärmeübertragern Unterdimensionierungen vermeiden, insbesondere angesichts zu erwartender Degradation	Trocknungssystem: In allen Fällen Für bestehende Trocknungssysteme: Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	11.4.2	
Bei der Auswahl von Kompressoren und anderen Fördereinrichtungen Übergrößen vermeiden und übergroße Apparate austauschen.	Für neue Pumpen: In allen Fällen Für bestehende Pumpen: Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	11.4.2	
Auswahl von Elektromotoren der höchsten Effizienzklasse	Für neue Systeme: In allen Fällen Für bestehende Systeme Kosten-Nutzen über die Lebensdauer.	11.4.2	
Rückkühlung der Trocknungsabgase bis nahe auf Umgebungstemperatur einsetzen, Wärme im Trocknungsprozess oder extern nutzen	In Neuauslegung möglich	11.2	Wirkung des Kondensats auf Anlagentechnik und Umwelt technisch, wirtschaftlich sowie bezüglich Konformität mit Gesetzen und Regelungen
Abwärme aus anderen Prozessen nutzen	In Neuauslegung möglich	11.4.2	
STEUERUNG und INSTANDHALTUNG			
Steuerungs- und Regelungssystem	In allen Fällen drehzahlgeregelte Fördereinrichtungen mit Regler und Sensoren zur Messung von Systemparametern einsetzen sowie Regelung in vermaschten Systemen durchführen.		3.6.3
Abschalten - auch zeitweise - unnötiger Fördereinrichtungen für Trocknungsgut und Trocknungsgase	In allen Fällen		3.9.2 3.9.8
Regelmäßige Instandhaltung vornehmen, insbesondere von Wärmeübertragern, um Leckagen und Verschmutzungen zu beseitigen.	In allen Fällen, wenn eine Instandsetzung oder Austausch erforderlich ist. Verschmutzungen erhöhen die Abgastemperaturen und senken die Effizienz.		3.9.9 3.3.1c)

5 Neu entstehende Techniken für die Energieeffizienz

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

6 Abschließende Bemerkungen

Das Kapitel ist nicht Bestandteil der Überarbeitung.

7 Literaturverzeichnis

1. **EIPPCB.** *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. Sevilla.* s.l. : European IPPC Bureau, 2009.

2. ***http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ene_summary_in_bref_series.pdf.*** **[Online]**

3. Oy, Motiva. Benchmarking and Energy Mangement Schemes in SMEs, Draft. 2005.

4. 14001:2015, ISO. „Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung“. 2015.

5. Union, Europäische. Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 über die Freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001 .... 2009. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009R1221&from=DE.

6. DIN EN ISO 50001:2018. Energiemanagementsysteme. 2018.

7. KG, CWS-Lackfabrik GmbH & Co. "Umwelterklärung 2016". 2016. http://cws-powder.de/file_download/246/Umwelterkl%C3%A4rung_2016.pdf.

8. mbH, HUMAN Gesellschaft für Biochemica und Diagnostica. "Umwelterklärung 2015". 2015. http://www.human.de/fileadmin/content/01_About_HUMAN/Document/2015_Umwelterklaerung_Logo_de.pdf.

9. Ökotec. "Entwicklung einer Methodik zur Aufstellung von Energiekennzahlen zur Steigerung der Energieeffizienz in Unternehmen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 2014. http://www.oecotec.de/de/kennzahlen/.

10. Sitny, P., Dobes, V. "Monitoring and targeting". *"Überwachung und Zielsetzung".* 2006.

11. Akkreditierungsstelle, DakkS Deutsche. "Ergänzende Regeln für Testierungen im Bereich SpaEfv, 71SD 046, Revision: 1.0". 2014.

12. Ausfuhrkontrolle, Bundesamt für Wirtschaft und. "Merkblatt für Energieaudits nach den gesetzlichen Bestimmungen der §§ 8 ff. EDL-G". 2015.

13. SAENA. *Technologien der Abwärmenutzung.* Dresden : s.n., 2016.

14. Bovankovich. "Energy management: what you need to know", personal communication. "Energiemanagement: Was Sie wissen müssen", persönliche Mitteilung. 2007.

15. TWG. "Comments to Draft 2 ENE BREF", "Kommentare zum Entwurf 2 ENE BREF".

16. Stijns, P. H. "Energy management system - Atrium Hospital, Heerlen. NL", "Energiemanagementsystem - Atrium Hospital, Heerlen. NL". s.l. : Euro Heat and Power, 2005.

17. 16247-1:2012:10, DIN EN. "Energieaudits - Teil 1: Allgemeine Anforderungen". 2012.

18. 50002:2014-07, ISO. "Energy audits - Requirements with guidance for use". 2014.

19. GmbH, GICON Großmann Ingenieur Consult. "GICONcret I/2015". 2015. https://spi.gicon.de/Presse/GICONcret/GICONcret%202015-1.pdf.

20. 16231, DIN EN. Energieeffizienz-Benchmarking-Methodik. 2012.

21. Lässig, J., Schütte, T., Riesner, W.(Hrsg.). "Energieeffizienz-Benchmark Industrie - Energiekennzahlen für kleinere und mittlere Unternehmen. 2016. www.energieeffizienz-benchmark.de.

22. KMU-Initiative. "Auswertung und Ergebnisse der KMU-Scheck-Beratungen für sechs ausgewählte Branchen. Fleischer, Bäcker, Drucker, Metallverarbeiter, Tischler, Kfz-Betriebe.

Studie im Auftrag der Österreichischen Energieagentur. 2011. www.klimaaktiv.at/dam/jcr.0884946a-44c6-44f5-8183-d8b6001138cd/KMU Scheckauswertung%20produzierende%20Betriebe.pdf.

23. ISI, Fraunhofer. "Industriebenchmarking - Modul Energieeffizienz. www.industriebenchmarking.eu/energie.

24. Kommission, Europäische. "Verordnung (EU) 2015/1095 der Kommission. 2015. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_2015.177.01.0019.01.DEU.

25. (FfE), Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse - Zielsetzung, Durchführung, Methodik, Kennzahlen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. 1999.

26. Chemnitz, TU. "Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche. Studie im Auftrag der Sächsischen Energieagentur. 2011. www.saena.de/download/Unternehmen/11_01_31_Endbericht.pdf.

27. VDMA. *Leitfaden Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen.* Frankfurt am Main : VDMA Thermoprozesstechnik, 2011.

28. Irretier, O. Energieeffizienz in Industriofenbau und Wärmebehandlung - Maßnahmen und Potentiale. *elektrowärme international.* Heft 1/2010.

29. ERA. *Sustainable Industrial Policy – Building on the Eco-design Directive – Energy-Using Products Group Analysis / 2. Lot 4: Industrial and Laboratory Furnaces and Ovens – Tasks 1 – 7. Final Report.* 2012.

30. EIPPCB. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants.* s.l. : European IPPC Bureau, 2017.

31. DIN EN 1295215:2003. *Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 15: Abnahmeversuche.* 2003.

32. DIN EN 12953-11:2003. *Großwasserraumkessel - Teil 11: Abnahmeversuche.* 2003.

33. Europäische Kommission. *Ecodesign. Preparatory Study on Steam Boilers (ENTR Lot 7).* Rom, Athen, Karlsruhe : s.n., 2014.

34. 13579-1:2013, ISO. Industrial furnaces and associated processing equipment -- Method of measuring energy balance and calculating efficiency -- Part 1: General methodology. 2013.

35. ISO 13579-2:2013. *Industrial furnaces and associated processing equipment - Method of measuring energy balance and calculating efficiency -- Part 2: Reheating furnaces for steel.* 2013.

36. ISO 13579-3:2013. *Industrial furnaces and associated processing equipment - Method of measuring energy balance and calculating efficiency -- Part 3: Batch-type aluminium melting furnaces.* 2013.

37. ISO 13579-4:2013. *Industrial furnaces and associated processing equipment - Method of measuring energy balance and calculating efficiency -- Part 4: Furnaces with protective or reactive atmosphere.* 2013.

38. Viessmann Werke, Allendorf (Eder). *Planungshandbuch Dampfkessel.* Allendorf (Eder) : s.n., 2011.

39. Berger, H. *Energieeffiziente Technologien und effizienzsteigernde Maßnahmen. Praxiserprobte Anwendungen und Innovationen.* Wien : Umweltbundesamt GmbH, 2005.

40. BImSchG. ***Erste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV).*** **26.01.2010.**

41. P. Wilbring, S. Schroers, R. Steinhagen. ***Überarbeitung und Aktualisierung des Leitfadens zur Emissionsüberwachung nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen im Sinne der 1. BImSchV.*** **Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2017.**

42. H. Pfeifer, B. Nacke, F. Beneke (Hrsg.). ***Praxishandbuch Thermoprozesstechnik. Band I: Grundlage - Prozessse - Verfahren. 2. Auflage.*** **Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2010. ISBN 978-3-8027-2947-8.**

43. Dena. ***Energetische Modernisierung industrieller Wärmeversorgungssysteme. Möglichkeiten der Effizienzsteigerung und der Energieeinsparung an großen feuerungstechnischen Anlagen.*** **Berlin : s.n., 2011. www.industrie-energieeffizienz.de.**

44. VDMA 24206:2002-03. ***Abnahme und Bestellung von Thermoprozessanlagen für die Stahl-, Eisen- und NE-Metallindustrie.*** **2002.**

45. Österreichische Energieagentur. ***Leitfaden für Energieaudits in Dampfsystemen.*** **Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015.**

46. Effenberger, Helmut. ***Dampferzeugung.*** **Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2000.**

47. P. Neuenschwander, J. Good, T. Nussbaumer. ***Grundlagen der Abgaskondensation bei Holzfeuerungen.*** **Zürich : Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 1998.**

48. U.S. Department of Energy. ***Steam Tip Sheet #26A: Consider Installing a Condensing Economizer.*** **Washington, DC : s.n., 2012.**

49. Buderus Heiztechnik GmbH. ***Handbuch der Heizungstechnik.*** **s.l. : Beuth Verlag, 1994.**

50. Österreichische Energieagentur. ***Leitfaden für Energieaudits für betriebliche Abwärmenutzung.*** **Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015.**

51. Genath, B. Mit Brennwert tun sich Pellets schwer. ***HLH Bd. 60 (2009) Nr. 6 – Juni.*** **http://docplayer.org/7593834-Bundesverband-des-schornsteinfegerhandwerks-zentralinnungsverband-ziv-mit-brennwert-tun-sich-pellets-schwer.html.**

52. Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH. ***Technologien der Abwärmenutzung.*** **Dresden : s.n., 2012.**

53. J. G. Wünning, A. Milani (Hrsg.). ***Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen. Grundlagen - Brennertechniken - Anwendungen. 2. Auflage.*** **Essen : Vulkan- Verlag GmbH, 2011. ISBN 978-3-8027-2960-7.**

54. W. Stephan, K. Zitzmann, G. Pröbstle, J. Kapischke. ***Effiziente Energieverwendung in der Industrie – Teilprojekt „Metallschmelzbetriebe“. Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben.*** **Augsburg : Bayer. Landesamt für Umweltschutz, 2005.**

55. Rein, Carsten, Buchwald und Marion. ***Entwicklung und Erprobung eines kompakten, hocheffizienten Regenerators für den wirtschaftlichen Einsatz an Industrieöfen (OptiReg).*** **Düsseldorf : VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Studie im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 2015.**

56. WS Wärmeprozesstechnik GmbH. www.flox.com. [Online] 2017. [Zitat vom: 08. 11 2017.] http://www.flox.com/de/prod/REKUMAT.html.

57. Bloom Engineering. www. bloomeng.de / Regenerative Burners. [Online] 2017. [Zitat vom: 08. 11 2017.] http://www.bloomeng.de/wp-content/uploads/2013/05/bloom_regenerativ_en_n.pdf.

58. Giese, A. GlasFLOX - Erfolgreiche Umsetzung der FLOX- Technologie an einer Glasschmelzwanne. Essen : Gaswärme - Institut e.V. Essen, 2009. Bde. Vortrag Brennerkolloquium 17. -18.11.2008.

59. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes–Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft).* 2002.

60. WS Wärmeprozesstechnik GmbH. www.flox.com / REGEMAT. [Online] 2017. [Zitat vom: 08. 11 2017.] http://www.flox.com/de/prod/REGEMAT.html.

61. Wiedemann Industriebrenner GmbH. Wiedemann Gas- Rekuperatorbrenner. [Online] 2017. [Zitat vom: 08. 11 2017.] http://www.wiedemann-industriebrenner.com/fileadmin/documents/WIEDEMANN_Gas-Rekuperatorbrenner_TB0035_d.pdf.

62. AIR LIQUIDE AUSTRIA GmbH. AIR LIQUIDE / ALBATCH-Brenner. [Online] 2017. [Zitat vom: 08. 11 2017.] https://www.airliquide.at/loesungen/business/metall/equipment/brenner.html.

63. AIR LIQUIDE Austria GmbH. AIR LIQUIDE / ALGLASS. [Online] 2017. [Zitat vom: 08. 11 2017.] https://airliquide.at/loesungen/business/glas/equipment/brennersysteme/alglass.html.

64. S. Hirzel, B. Sontag, C. Rohde. *Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie.* Karlsruhe : Fraunhofer- Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013.

65. Hammer, F. Überwachung und Steuerung von Verbrennungsprozessen. *gaswärme international.* 4-2015, S. 45-48.

66. Sternberg, Jost, et al. Kennzahlen zur Betriebsoptimierung von Kesselanlagen. *Band 8. , Energie aus Abfall.* Neuruppin : s.n., 2011.

67. Kaltschmitt, Martin, Hartmann, Hans und Hofbauer, Hermann (Hrsg.). *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage.* Berlin, Heidelberg : Springer- Verlag. , 2016.

68. Wünsch, Christoph, Hoffmann, Gaston und Bilitewski, Bernd (Hrsg.). *Effizienzsteigerungsmaßnahmen bei der Müllverbrennung – Kosten und Nutzen. In: Thermische Abfallbehandlung. Band 14. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik .* s.l. : Universität Kassel, 2009.

69. European Commission. *WORKING DOCUMENT FOR THE ECODESIGN CONSULTATION FORUM ON INDUSTRIAL AND LABORATORY FURNACES AND OVENS (ENTR LOT 4).* Brüssel : s.n., 16 May 2014.

70. H. Krause, M. Werschy, S. Franke, A. Giese, J. Benthin, H. Dörr. *Untersuchungen der Auswirkung von Gasbeschaffenheitsänderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen.* Bonn : DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2014.

71. Lubenau, U. *Auswirkungen der veränderten Gasbeschaffenheitsanforderungen auf Gasversorger.* Freiberg : DBI Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg, 2016.

72. DIN EN 16726:2016-04. *Gasinfrastruktur – Beschaffenheit von Gas – Gruppe H.* 2016.

73. 10. BImSchV. ***Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes- Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen).*** **08.12.2010.**

74. E. Salati, W. Borghols, A. Casola, Q. Degroote, J. Dehaeseleer, F. Humhal, H. Kaesler, U. Klaas, A. Louvat, B. Metz, J. Pardinas, H. Vinck. ***Odorisation in Europe: the MARCOGAZ overview.*** **s.l. : Marcogaz Technical Association of the European Natural Gas Industry, 2016. http://www.marcogaz.org/.**

75. DIN EN ISO 13732-1:2008-12. ***Ergonomie der thermischen Umgebung - Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen - Teil 1: Heiße Oberflächen.*** **2008.**

76. Sonnenschein, G. ***EINSATZ VON HOCHTEMPERATURWOLLE IM MODERNEN INDUSTRIEOFENBAU.*** **Düsseldorf : The European Trade Association for High Temperature Insulation Wool (ECFIA), 2011.**

77. European Commission. ***Verordnung (EU) 2017/999 der Kommission zur Änderung von Anhang XIV der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH).*** **2017.**

78. VDI 2055 Blatt 1. ***Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung. Berechnungsgrundlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 08 / 2008. ICS 27.220, 91.140.01.**

79. The United States Department of Energy, Advanced Manufacturing Office. ***Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry.*** **Washington, DC : s.n., 2012.**

80. DIN EN 12952-12:2003. ***Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 12: Anforderungen an die Speisewasser- und Kesselwasserqualität.*** **2003.**

81. Kalkkuhl, T. ***Strömungssimulation einer teilbeaufschlagten Dampfturbine.*** **Bochum : Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2014.**

82. U.S. Department of Energy. ***Steam Tip Sheet #22: Consider Installing High-Pressure Boilers with Backpressure Turbine-Generators.*** **Washington, DC : s.n., 2012.**

83. Loos. Wirtschaftlicher und emissionsarmer Betrieb von Dampfkesselanlagen. s.l. : H. Schröder, 2010. p31726.typo3server.info/fileadmin/redakteure/energie_arena/Vortraege/Loos_Deutschland_GmbH_Wirtschaftlicher_und_emissionsarmer_Betrieb_.ppt.

84. U.S. Departement of Energy. ***Steam Tip Sheet #3: Use Feedwater Economizers for Waste Heat Recovery.*** **Washington, DC : s.n., 2012.**

85. Bosch Industriekessel GmbH. ***Betriebskosten senken. Modernisierung von Kesselanlagen.*** **Gunzenhausen : s.n., 2016.**

86. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. ***VDI-Wärmeatlas. 11., bearbeitete und erweiterte Auflage.*** **Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-3-642-19980-6.**

87. SPIRAX SARCO GmbH. ***Grundlagen des Einsatzes von Wärmetauschern in Dampfanlagen.*** **Konstanz : s.n., 2009.**

88. U.S. Department of Energy. ***Steam Tip Sheet #7: Clean Firetube Boiler Waterside Heat Transfer Surfaces.*** **Washington, DC : s.n., 2012.**

89. Trust, Carbon. ***Steam and high temperature hot water boilers. Introducing energy saving opportunities for business.*** **London : The Carbon Trust, 2012.**

90. Tuffner, M. *Moderne Wasseraufbereitung und Wasseranalytik.* s.l. : Bosch Industriekessel GmbH, 2012.

91. Heizkraftwerk Pforzheim GmbH. https://www.heizkraftwerk-pforzheim.de. [Online] 25. 07 2012. [Zitat vom: 23. 11 2017.] https://www.heizkraftwerk-pforzheim.de/de/1556.php#ID_1561.

92. DIN EN 12953-10:2003. *Großwasserraumkessel - Teil 10: Anforderungen an die Speisewasser- und Kesselwasserqualität.* 2003.

93. GESTRA AG. *Betriebsanleitung 808565-02. Abschlamm-Schnellschlussventile PA 46, PA 47, MPA 46, MPA 47.* Bremen : s.n., 2016.

94. U.S. Department of Energy. *Steam Tip Sheet #10: Recover Heat from Boiler Blowdown.* Washington, DC : s.n., 2012.

95. Berlin, Karsten. Handbuch für Dampf- und Kondensatanlagen (Entlüften / Entgasen). [Online] Karsten Berlin, 2009. [Zitat vom: 09. 03 2017.] http://www.dampfundkondensat.de/entlueften-dampf-kondensatsystem.html.

96. U.S. Department of Energy. *Steam Tip Sheet #18: Deaerators in Industrial Steam Systems.* Washington, DC : s.n., 2012.

97. SPIRAX SARCO GmbH. *Grundlagen Wartung und Betrieb von Dampfanlagen.* Konstanz : s.n., 2011.

98. E. Franz, M. Tuffner. *Großwasserraumkessel und Wasserrohrkessel im Vergleich.* s.l. : Bosch Industriekessel GmbH, 2012.

99. U.S. Department of Energy. *Steam Tip Sheet #16: Minimize Boiler Short Cycling Losses.* Washington, DC : s.n., 2012.

100. SPIRAX SARCO GmbH. *Grundlagen der Dampf- und Kondensattechnologie.* Konstanz : s.n., 2014.

101. —. *Leitfaden für die Gestaltung von Dampf- und Kondensatnetzen, die Auswahl und den Einbau von Kondensatableitern, die Fehlersuche in Dampf- und Kondensatnetzen, den Betrieb von Dampf- und Kondensatanlagen.* Konstanz : s.n., 2012.

102. —. *Arbeitsblätter für die Dampftechnologie, Kondensatwirtschaft, Fluidtechnik, Regelungstechnik.* Konstanz : s.n., 2012.

103. The United States Department of Energy. *Steam Tp Sheet #1: Inspect and Repair Steam Traps.* Washington, DC : s.n., 2012.

104. Twachtmann, H. Energieeinsparungen in Dampf- und Kondensatsystemen. *CHEMIETECHNIK.* September 2013.

105. Franz Gysi AG. *Dampf- und Kondensathandbuch. Nachschlagewerk für Planer und Betreiber von Dampfanlagen.* Suhr : s.n., 2011.

106. Berlin, Karsten. Handbuch für Dampf- und Kondensatanlagen (Verdichter). [Online] 2009. [Zitat vom: 22. 03 2017.] http://www.dampfundkondensat.de/pdf/Verdichter.pdf.

107. LfU Bayern. www.umweltpakt.bayern.de. [Online] 2018. [Zitat vom: 22. 08. 2018.] https.//www.izu.bayern.de/abwaermerechner/einstieg.html (deutsch); https://www.umweltpakt.bayern.de/abwaermerechner/index.php (englisch).

108. SAENA - Hr. Presser. 23. 11. 2016.

109. dena. dena.de. [Online] 2010. [Zitat vom: 10. 12. 2018.] https://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/referenzprojekte-best-practice/dena-referenzprojekte/?tx_referenzdb_referenzdbitem[project]=130&tx_referenzdb_referenzdbitem[action]=show&tx_referenzdb_referenzdbitem[controller]=Project.

110. ecoliving. ecolivinguk.com. [Online] 2017. www.ecolivinguk.com/case-studys/heat-recovery.

111. dena. dena.de. [Online] 2011. [Zitat vom: 10. 12. 2018.] https://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/referenzprojekte-best-practice/dena-referenzprojekte/?tx_referenzdb_referenzdbitem[project]=74&tx_referenzdb_referenzdbitem[action]=show&tx_referenzdb_referenzdbitem[controller]=Project.

112. Sterner, Michael. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration.* Berlin : s.n., 2014.

113. Goldstern, Walter. *Dampfspeichertechnologien.* Berlin/Göttingen/Heidelberg : s.n., 1963.

114. eins. eins.de. [Online] 1994. [Zitat vom: 10. 12. 2018.] https://www.eins.de/%C3%BCber-eins/infrastruktur/konventionelle-energieerzeugung/fernheizwerk-bad-elster/.

115. N-ERGIE. n-ergie.de. [Online] 2014. [Zitat vom: 10. 12. 2018.] https://www.n-ergie.de/n-ergie/unternehmen/unsere-energie/kraftwerksstandort/!ut/p/z1/nZFNC4JAEIZ_jVdn8qulm4aJRViBaHsJpW0VzA3d8u9ndEmQVZrbDM87H-8AhRRonb1KnslS1FnV52fqXPbhGhdehPsIAwPd5eZIbJ8YfmhBogICYgOdo8dBuOidDM9EDCLjH_1vp3l6BUDV7ROgqhFOvFQDwc6aACJnAviYP.

116. ZAE. forschung-engeriespeicher.info. [Online] 2018. [Zitat vom: 10. 12. 2018.] https://forschung-energiespeicher.info/waerme-speichern/projektliste/projekt-einzelansicht/108/Giesserei_nutzt_Abwaerme_des_Schmelzofens/.

117. BMWi und BMU. Referentenentwurf für das Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden. 2017.

118. Wolf, S, et al. *Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland.* s.l. : Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, 2014.

119. VDE, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und. DIN EN 61800-9-2:2018-01 Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe. *Teil 9-2: Ökodesign für Antriebssystem Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Einrichtungen - Indikatoren für die Energieeffizienz.* Berlin / Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, 2018.

120. DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee. *IEC 60034-30-1:2014 (DIN EN 60034-30-1:2014-12 Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014.

121. ZVEI . *Motoren und geregelte Antriebe; Normen und gesetzliche Anforderungen an die Energieeffizienz von Niederspannungs-Drehstrommotoren.* Frankfurt am Main : ZVEI-Zentralverband Elektrotechnik und Elektroindustrie e.V., 2010.

122. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DI und VDE. *DIN EN 61800-9-2 (VDE 0160-0190-2):2018-01 Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe - Teil 9-2: Ökodesign für Antriebssystem, Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Einrichtungen - Indikatoren für die Energieeffizienz ...* Berlin/ Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.

123. Danfoss Power Electronics A/S. Handbuch VLT®-Frequenzumrichter - Wissenswertes über Frequenzumrichter. *www.danfoss.com.* [Online] 01. 11 2015. [Zitat vom: 24. 05 2019.] http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/DE/FWK/?ref=17179944578&page=180.

124. Gotemann, Daniel. etz.de. [Online] 2012. [Zitat vom: 11. 10 2016.] http://www.etz.de/2891-0-Motoren+fuer+die+Energiewende.html.

125. REEL S.r.l A Socio Unico. REEL SuPremE® - Der effizienteste magnetfreie Antrieb der Welt. *www.guetzold.com.* [Online] 2013. [Zitat vom: 28. 05 2019.] https://www.guetzold.com/produkte/linkFile/Downloads/Service/reel-motoren/Brochure_REEL_SuPremE_de.pdf.

126. Wortmann, Detlef (WEG Germany GmbH). www.etz.de. *etz - Elektrotechnik + Automation.* [Online] 01. 12 2014. [Zitat vom: 25. 05 2019.] https://www.etz.de/files/etz_ausgabe12-2014_energieeffiziente_motortechnologien_im_vergleich.pdf.

127. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE. *DIN VDE 0530-30-2:2019-02 (VDE 0530-30-2:2019-02): Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-2: Wirkungsgrad-Klassifizierung von Wechselstrommotoren mit variabler Drehzahl (IE-Code).* Berlin/ Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.

128. Brecher, Christian, et al. Maschinenelemente und Baugruppen. [Buchverf.] Reimund Neugebauer. *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion.* s.l. : Carl Hanser Verlag München Wien, 2014, S. 830.

129. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE. *DIN CLC/TS 60034-31:2011-08 (VDE V 0530-31:2011-08): Drehende elektrische Maschinen - Teil 31: Auswahl von Energiesparmotoren einschließlich Drehzahlstellantrieben - Anwendungsleitfaden.* Berlin/ Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.

130. Mau, Dipl.-Ing. Gunthart. all-electronics. [Online] 28. 01 2014. [Zitat vom: 16. 01 2017.] http://www.all-electronics.de/bremsenergie-eines-antriebs-abbauen-und-wiederverwerten-update/.

131. Siemens. siemens. [Online] 2009. [Zitat vom: 17. 01 2017.] https://w3.siemens.com/mcms/water-industry/de/Documents/Energieeffiziente_Antriebe.pdf.

132. Liebemann, Chris. elektronikpraxis.vogel.de. [Online] 2011. [Zitat vom: 17. 01 2017.] http://www.elektronikpraxis.vogel.de/leistungselektronik/articles/334727/.

133. Huber, Heinrich. *Transmission am Beispiel der Luftförderung.* Muttenz, Schweiz : s.n., 25. 11 2013.

134. Meyer, Jörg. *Elektrische Motoren und Antriebe - Grundlagen, Einsatz und Einsparpotentiale.* IHK Aachen : Siemens, 2015.

135. BDEW. *Energie - Info Industriestrompreise.* Berlin : Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V., 2015.

136. Almeida, Anibal T. de. *EUP Lot 11 Motors.* Coimbra : ISR-University of Coimbra, 2008.

137. *So helfen Synchronreluktanzmotor und Frequenzumrichter mehr als 50 % Energie zu sparen.* Kunze, Sariana. 2016, Elektrotechnik, S. 2.

138. Waide, Paul und Brunner, Conrad U. *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motoer-Driven Systems.* s.l. : Internatinal Energy Agency, 2011.

139. EnergieAgentur.NRW. ***Elektrische Antriebe - Potential zur Energieeinsparung.*** **Düsseldorf : EnergieAgentur.NRW, 2010.**

140. Volz, Dipl.-Ing.Günther. ***Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe: Energieeffizienz und Ökodesign Richtlinie.*** **Berlin : dena, 2010.**

141. hsu-hh. ***Reluktanzmotoren Grundlagen.*** **Hamburg, Hamburg, Deutschland : s.n.**

142. ***DIN EN ISO 11011:2015-08: Druckluft - Energieeffizienz - Bewertung (ISO 11011:2013); Deutsche Fassung EN ISO 11011:2015 .*** **2015.**

143. VDMA. ***15390-1 Teil 1: Typische anwendungsspezifische Reinheitsklassen gemäß ISO 8573-1:2010 und Anleitung zur Erzeugung und Überprüfung von entsprechenden Druckluftreinheiten für industrielle Anwendungen.*** **2014.**

144. Hirzel, Dipl. Wirtsch. -Ing. Simon. ***Analyse und Bewertung industrieller Energieeffizienzmaßnahmen.*** **Düsseldorf : VDI Verlag, 2015.**

145. ISI, Frauenhofer. ***Compressed Air Systems in the European Union.*** **Stuttgart : LOG_X Verlag GmbH, 2001. ISBN 3-932298-16-0.**

146. EnEffAH. ***Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik.*** **2012.**

147. VDMA. ***4370; Energieeffiziente Druckluftanlagen – Leitfaden zur Erkennung und Bewertung vorhandener Schwachstellen und korrekter Erfassung des Energieeinsparpotentials und korrektrer Erfassung des Energieeinsparpotentials.*** **2012.**

148. Hirzel, Simon und Bradke, Harald. Effizienter Einsatz von Druckluft. [Buchverf.] Reinmund Neugebauer. ***Handbuch Ressourchenorientierte Produktion.*** **München; Wien : Hanser Verlag, 2014.**

149. Eurostat. eurostat.eu. [Online] 16. 01 2017. [Zitat vom: 06. 02 2017.] http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do.

150. Elburg, Martijn van. ***Ecodesign - Electric motor systems / Compressors DG ENER Lot 31.*** **Brüssel : s.n., 2014.**

151. Energieagentur, Österreichische. klimaaktiv.at - Leitfaden Druckluft. [Online] April 2015. [Zitat vom: 31. 01 2017.] http://www.klimaaktiv.at/energiesparen/betriebe_prozesse/technologieschwerpunkte/druckluft.html.

152. Atlas Copco. ***Handbuch der Drucklufttechnik.*** **Essen : s.n., 2003.**

153. Kaeser, Kompressoren. ***Druckluftseminar Handbuch.*** **Coburg : s.n., 2016.**

154. ***ISO 8573-1:2010: Druckluft - Teil 1: Verunreinigungen und Reinheitsklassen .*** **2010.**

155. VDMA. ***15390-2. Druckluftreinheit – Teil 2: Typische anwendungsspezifische Reinheitsklassen gemäß ISO 8573-1:2010 und Anleitung zur Erzeugung und Überprüfung von entsprechenden Druckluftreinheiten für Anwendungen in der Lebensmittel- oder Pharmaindustrie.*** **Entwurf 2016.**

156. —. ***15390-3: Druckluftreinheit – Teil 3: Typische anwendungsspezifische Reinheitsklassen gemäß ISO 8573-1:2010 und Anleitung zur Erzeugung und Überprüfung von entsprechenden Druckluftreinheiten für Anwendungen im Bereich Lackiertechnik.*** **Entwurf 2016.**

157. statista. statista. [Online] 2017. [Zitat vom: 16. 01 2017.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/.

158. Klimaaktiv. klimaaktiv.at. [Online] 09. 12 2015. [Zitat vom: 31. 01 2017.] http://www.klimaaktiv.at/energiesparen/betriebe_prozesse/vorzeigebetriebe/druckluftsystemopt.html.

159. Dena, (Deutsche Energie-Agentur GmbH). *Initiative Energieeffizienz - Druckluftsysteme in der Industrie un Gewerbe.* Berlin : Dena (Deutsche Energie-Agentur GmbH), 2012.

160. IHK Nürnberg für Mittelfranken. *Druckluft effizient nutzen - Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung.* April 2012.

161. Lämmer, Petra. *Druckluft effizient nutzen.* Nürnberg : IHK Nürnberg für Mittelfranken, 2012.

162. ADEME. *Compressed Air.* 2007.

163. VDMA (eds). *Druckluft effizient, Druckluft Abschlussbericht.* Berlin, Karlsruhe, Frankfurt : s.n., 2005.

164. VDMA. Ecolexicon Drucklufterzeugung. [Online] http://kdv.vdma.org/ecolexikon_dlt_drucklufterzeugung.

165. BAFA. *Einzelmaßnahmen, Merkblatt für Anträge nach 3.11 der Richtlinie für Investitionszuschüsse zum Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien.* Eschborn : Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2016.

166. Festo AG & Co. KG, et al. EnEffAH-Abschlussbericht. *Förderkennzeichen BMWi 0327484A-E - Verbund-Nr. 01064392.* Esslingen [u. a.] : Technische Infomationsbibliothek und Universitätsbibliothek, 2012.

167. EnergieAgentur.NRW. *Drucklufttechnik Potentiale zur Energieeinsparung.* Düsseldorf : Energieagentur.NRW, 2010.

168. Meevissen, Matthias. Die Pumpenförderung - Die nationale Klimaschutzinitiative. [Online] 2017. http://www.btga.de/files/Diverses/180124_BTGA_WILO_FFM.pdf.

169. *Energieeffizienz - Wo sind noch Potentiale.* Bradke, Harald. Karlsruhe : s.n., 2011.

170. DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee. *DIN EN ISO 17769-1 (2012-11-00) Flüssigkeitspumpen und -installation - Allgemeine Begriffe, Definitionen, Größen, Formelzeichen und Einheiten - Teil 1: Flüssigkeitspumpen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.

171. —. *DIN EN ISO 17769-2 (2012-11-00) Flüssigkeitspumpen und -installation - Allgemeine Begriffe, Definitionen, Größen, Formelzeichen und Einheiten - Teil 2: Pumpensysteme.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.

172. —. *DIN EN ISO 14414 (2017-07-00) Energetische Bewertung von Pumpensystemen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.

173. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. *VDMA 24262 (2011-03-00) Energieeffiziente Pumpensysteme - Leitfaden zur Erkennung und Bewertung vorhandener Schwachstellen und korrekter Erfassung des Energieeinsparpotentials.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.

174. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Pumpensysteme - Ratgeber. [Online] https://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/energieeffiziente-technologien/pumpensysteme/ratgeber/.

175. Cornelia Lang, Nikolai Stache. Hydraulik von Rohrsystemen. [Online] 2010. http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/lehre/rohrhydraulik/Skripten/Vorlesung/neu/Skript-Rohrhydraulik_Stand_April2010.pdf.

176. klimaaktiv Management - Österreichische Energieagentur. Energieeffizienz in Pumpensystemen. [Online] www.ztk.at/dl/Energieeffizienz_Pumpsysteme_klima_aktiv.pdf.

177. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Leuchttürme - energieeffizienter Pumpensysteme in Industrie und Gewerbe. [Online] 2011. https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/1372_FS_Leuchtturmprojekt_Pumpen.pdf.

178. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. *VDMA 24199 (2005-05-00) Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Kälte-, Trinkwasser- und Raumlufttechnischen Anlagen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2005.

179. DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS), Heating and Ventilation Technology Standards Committee. *DIN EN 14336 (2005-01-00) Heizungsanlagen un Gebäuden - Installation und Abnahme der Warmwasser-Heizungsanlagen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2005.

180. DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS), Heating und Ventilation Technology Standards Committee. *DIN V 4701-10 (2003-08-00) Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003.

181. DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN Standards Committee Building and Civil Energeering. *DIN 18380 (2016-09-00) VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Heizanlagen und zentrale Wassererwärmungsanlagen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016.

182. Deutsche Energie-Agentur (dena). Ratgeber „Pumpen und Pumpensysteme für Industrie und Gewerbe". [Online] https://vdocuments.site/ratgeber-pumpen-industrie-und-gewerbe.html.

183. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Ratgeber „Pumpen und Pumpensysteme für Industrie und Gewerbe". [Online] 2010. 1372_FS_Leuchtturmprojekt_Pumpen.pdf.

184. Wilo Schweiz AG. Pumpenfibel - Grundlagen der Pumpentechnik. [Online] 2016. http://www.wilo.ch/fileadmin/ch/Pumpenfibel_DE_LR.pdf.

185. Kameler, Schönwald, Heinze. *Klassifizierung von Pumpen.* Düsseldorf : Fachhochschule Düsseldorf, 2013.

186. Wolfgang Ernhof, Matthias Back. Was sind Kreiselpumpen und für welche Anwendungen werden sie verwendet? [Online] 2018. https://www.process.vogel.de/was-sind-kreiselpumpen-und-fuer-welche-anwendungen-werden-sie-verwendet-a-681185/.

187. DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee. *DIN EN 733 (1995-08-00) Kreiselpumpen mit axialem Eintritt PN 10 mit Lagerträger - Nennleistung, Hauptmaße, Bezeichnungssystem.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1995.

188. DIN-Normenausschuss-Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee. *DIN EN ISO 2858 (2011-12-00) Kreiselpumpen mit axialem Eintritt (PN 16) - Bezeichnung, Nennleistung und Abmessungen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.

189. KSB SE & Co. KGaA. Kreiselpumpenlexikon - Verdrängerpumpen. [Online] https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/verdraengerpumpe/186552/.

190. DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee. *DIN EN ISO 14847 (1999-08-00) Rotierende Verdrängerpumpen - Technische Anforderungen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1999.

191. —. *DIN EN 14343 (2006-11-00) Rotierende Verdrängerpumpen - Peistungsprüfung zur Abnahme.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2006.

192. Herold & Co. GmbH. Vorteile/nachteile gebräuchlicher Pumpentypen. [Online] http://www.herold-gefrees.de/de/drehkolbenpumpe/vorteilenachteile.

193. GRUNDFOS GmbH. Pumpenhandbuch. [Online] 2012. http://machining.grundfos.de/media/60727/grundfos_pumpenhandbuch.pdf.

194. DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee. *DIN EN ISO 9906 (2013-03-00) Kreiselpumpen - Hydraulische Abnahmeprüfungen - Klasse 1, 2 und 3.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013.

195. —. *DIN EN 16480 (2017-07-00) Pumpen - Geforderte Mindesteffizienz bei Kreiselpumpen für Wasser.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.

196. Europäische Parlament, Rat der Europäischen Union. *Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte .* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.

197. Europäische Kommission. *Verordnung (EU) Nr. 547/2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Wasserpumpen.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Kommission, 2012.

198. —. *Verordnung (EU) Nr. 622/2012 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integr.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Kommission, 2012.

199. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaft. *Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.

200. Europäische Kommission. *Verordnung (EU) Nr. 4/2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltg.* s.l. : Amtsblatt der Europäaischen Union, 2014.

201. Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e.V. *BTGA-ALMANACH 2017.* Arnsberg : STROBEL VERLAG GmbH & Co. KG, 2017.

202. Erich Meyer, Thomas Kasper. Instandhaltung und Energieeffizienz von Pumpensystemen. [Online] verlag moderne industrie GmbH. https://www.instandhaltung.de/instandhaltung-und-energieeffizienz-von-pumpensystemen/.

203. KSB SE & Co. KGaA. Bedarfsgerechter Betrieb mit einer Pumpensteuerung von KSB. [Online] KSB SE & Co. KGaA. https://www.ksb.com/ksb-de/Produkte_Leistungen/Produktbauarten/Pumpensteuerung/.

204. DIN-Normausschuss Dienstleistung (NADL), Services Standards Committee. *DIN 31051 (2012-09-00) Grundlagen der Instandhaltung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.

205. —. *DIN EN 13306 (2018-02-00) Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018.

206. Protec-24 facility service NORD GmbH. Instandhaltung. [Online] Protec-24 facility service NORD GmbH. https://www.protec-24.com/fileadmin/user_upload/Normen_Vorschriften/Infoflyer_DIN_31051.pdf.

207. DIN-Normenausschuss Dienstleistungen (NADL), Services Standards Committe. *DIN 31051 (2012-09-00) Grundlagen der Instandhaltung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.

208. DIN-Normenausschuss Dienstleistungen (NADL), Services Standards Committee. *DIN EN 13306 (2018-02-00) Instandhaltung - Begriffe der instandhaltung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018.

209. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen. [Online] https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/strom/1419_Broschuere_Energieeffizienz-in-KMU_2015.pdf.

210. —. *Lebenszykluskosten von Pumpen und Pumpensystemen.*

211. KSB SE & Co. KGaA. Kreiselpumpenlexikon - Lebenszykluskosten. [Online] https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/lebenszykluskosten/187332/.

212. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, VDI Society Production and Logistics. *VDI 2885 (2003-12-00) Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten - Daten und Dateermittlung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003.

213. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. *VDMA 34160 (2006-06-00) Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2006.

214. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Daimler AG: Energetische Optimierung bei einem Automobilhersteller. [Online] https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/1372_Datenblatt_Daimler.pdf.

215. —. Neue Torgauer Brauhaus GmbH: Pumpenoptimierung in einem KMU. [Online] https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/1372_Datenblatt_Brauerei_Torgau.pdf.

216. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. *VDMA 24199 (2005-05-00) Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Kälte-, Trinkwasser- und Raumlufttechnischen Anlagen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2005.

217. International Energy Agency. Air conditioning use emerges as one of the key drivers of global electricity-demand growth. [Online] 15. 05 2018. https://www.iea.org/newsroom/news/2018/may/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-dema.html.

218. VDMA. VDMA Einheitsblatt 24199: Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik ... 2005.

219. Heinze GmbH. *Geräte- und Anlagenauslegung.* Celle : s.n., 2010.

220. VDMA. Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Ventilatoren und Lüftungssystemen. 2017.

221. DIN-Normenausschuss. *DIN EN 16798-3:2017-11 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an*

Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4). **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.**

222. —. ***DIN EN 1507:2006-07 Lüftung von Gebäuden - Rechteckige Luftleitungen aus Blech - Anforderungen an Festigkeit und Dichtheit.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2006.**

223. —. ***DIN EN 12237:2003-07 Lüftung von Gebäuden - Luftleitungen - Festigkeit und Dichtheit von Luftleitungen mit rundem Querschnitt aus Blech.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003.**

224. —. ***DIN EN 12599:2013-01 Lüftung von Gebäuden - Prüf- und Messverfahren für die Übergabe raumlufttechnischer Anlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013.**

225. Luft, Jürgen. Dichtheitsprüfung von Luftleitungen in der Praxis. ***FACH.JOURNAL.*** **2008.**

226. VDMA, Arbeisgemeinschaft Instandhaltung Gebäudetechnik. Instandhaltungs-Information Nr. 22: . ***Beitrag der Instandhaltung zum effizienten Anlagenbetrieb und zu den Betriebskosten/Lebenszykluskosten.*** **2016.**

227. Aerotechnik E. Siegwart GmbH. ***Leitfaden zur Auslegung von lufttechnischen Anlagen.*** **Friedrichsthal : s.n.**

228. Schweizer, Anton. www.schweizer-fn.de. [Online] 06. 11 2017. https://www.schweizer-fn.de/lueftung/ventilator/ventilator.php.

229. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). ***Ratgeber "Lufttechnik für Industrie und Gewerbe".*** **Berlin : s.n., 2010.**

230. Europäische Kommission. ***Verordnung (EU) Nr. 327/2011 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Ventilatoren, die durch Motoren mit einer elektrischen.*** **s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2011.**

231. —. ***Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte.*** **s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.**

232. —. ***Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren .*** **s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.**

233. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). ***Einführung in die Berechnung von Lebenszykluskosten und deren Nutzung im Beschaffungsprozess.*** **Dessau-Roßlau : s.n., 2012.**

234. Gemeinschaftsarbeitsausschuss NABau/FNL/NHRS. ***DIN V 18599-1:2016-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung .*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016.**

235. —. ***DIN V 18599-10:2016-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016.**

236. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Ausschuss für Arbeitsstätten. ***Technische Regeln für Arbeitsstätten - Raumtemperatur - ASR A3.5.*** **Dortmund : Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2010.**

237. Gemeinschaftsarbeitsausschuss NABau/FNL/NHRS. ***DIN V 18599-2:2016-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung,***

Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen. **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016.**

238. Technisches Komitee CEN/TC 228. ***DIN EN 12831-1: 2017-09 Enegetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.**

239. Oschatz, Bert, Rosenkranz, Jens und Weber, Konrad. ***Leitfaden zur Planung neuer Hallengebäude nach Energieeinsparverordnung EnEV 2014 und Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz 2011.*** **Köln : figawa, 2015.**

240. Technisches Komitee CEN/TC 228. ***DIN EN 12828: 2012+A1: 2014 Heizungsanlagen in Gebäuden - Plaung von Wasser-Heizungsanlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014.**

241. Bundesregierung. ***Energieeinsparverordnung EnEV.*** **Bonn : Bundesanzeiger Verlag, 2013.**

242. Wissenschaftliche Dienste - Deutscher Bundestag. ***Sachstand Primärenergiefaktoren Aktenzeichen WD 5 - 3000 - 103/16.*** **s.l. : WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung, Landwirtschaft und, 2017.**

243. Normausschuss Technische Grundlagen (NATG) in DIN. ***DIN 31051: 2012-09 Grundlagen der Instandhaltung.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.**

244. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA). ***VDMA 24186-2: 2002-09 Leistungsprogramm für Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden - Teil 2: Heiztechnische Geräte und Anlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2002.**

245. Europäisches Parlament; Europäischer Rat. ***2010/31/EU: Richtlinie über die Gesamteffizienz von Gebäuden.*** **s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2010.**

246. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA). ***VDMA 24197-2: 2012-07 Energetische Inspektion von Komponenten gebäudetechnischer Anlagen - Teil 2: Heiztechnische Geräte und Anlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.**

247. Technisches Komitee CEN/TC 228. ***DIN EN 15378-1: 2017-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Heizungsanlagen und Trinkwassererwärmung in Gebäuden - Teil 1: Inspektion von Kesseln, Heizungsanlagen und Trinkwassererwärmung, Module M3-11, M8-11.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.**

248. Vdz. ***Leitfaden um Heizungs-Check nach DIN EN 15378.*** **Bonn : Vdz - Vereinigung der deutschen Zentralheizungswirtschaft e.V., 2009.**

249. Schiller, Heiko und Mai, Ronny. ***Abschlussbericht - Berechnungs-Algorithmen für Freie und Regenerative Kühltechnologien in Nichtwohngebäuden .*** **Dresden : Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, 2011.**

250. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA). ***VDMA 24247-2: 2018-02 Energieeffizienz von Kälteanlagen - Teil 2: Anforderungen an das Anlagenkonzept und die Komponenten.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018.**

251. —. ***VDMA 24247-6: 2018-02 Energieeffizienz von Kälteanlagen - Teil 6: Klimakälte.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018.**

252. Gemeinschaftsarbeitsausschuss NABau/FNL/NHR. ***DIN V 18599-7:2016-10 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung der Nutz-, End- und Primärenergeibedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakätesystemen für den Nichtw.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016.**

253. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA). ***VDMA 24247-7: 2011-04 Energieeffizienz von Kälteanlagen - Teil 7: Regelung, Energiemanagement und effiziente Betriebsführung.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.**

254. —. ***VDMA 24186-3: 2002-09 Leistungsprogramm für die Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden - Teil 3: Kältetechnische Geräte und Anlagen zu Kühl- und Heizzwecken.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2002.**

255. —. ***VDMA 24197-3: 2012-07 Energetische Inspektion von Komponenten gebäudetechnischer Anlagen - Teil 3: Kältetechnische Geräte und Anlagen zu Kühl- und Heizzwecken .*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.**

256. Technischen Komitee CEN/TC 156. ***DIN EN 16798-3: 2017-11 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme (Modul M5-1, M5-4).*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.**

257. Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS) im DIN. ***DIN SPEC 15240: 2013-10 Lüftung von Gebäuden - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Energetische Inspektion von Klimaanlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013.**

258. VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung. ***VDI 2087 Luftleitungssysteme Bemessungsgrundlage.*** **Düsseldorf : VereinDeutscher Ingenieure e.V. VDI, 2006.**

259. Technisches Komitee ISO/TC 142. ***DIN EN ISO 16890-1: 2017-08 Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik - Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM).*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.**

260. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA). ***VDMA 24186-0: 2007-01 Leistungsprogramm für die Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden - Teil 0; Übersicht und Gliederung, Nummernsystem, Allgemeine Anwendungshinweise.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2007.**

261. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA). ***VDMA 24186-1: 2002-09 Leistungsprogramm für die Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden - Teil 1: Lufttechnische Geräte und Anlagen .*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2002.**

262. Technisches Komitee CEN/TC 156. ***DIN EN 15780: 2012-01 Lüftung von Gebäuden - Luftleitungen - Sauberkeit von Lüftungsanlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.**

263. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA). ***VDMA 24197-1 : 2012-07 Energetische Inspektion von Komponenten gebäudetechnischer Anlagen - Teil 1: Klima- und lüftungstechnische Geräte unad Anlagen.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.**

264. Technischen Komitee CEN/TC 156. ***DIN EN 15251:2012-12 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.*** **Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.**

265. Initiative Energieeffizienz. ***Energieeffizienz bei Wärmeversorgungssystemen in Industrie und Gewerbe.*** **Berlin : Deutsch Energie-Agentur GmbH (dena), 2011.**

266. —. industrie-energieeffizienz.de. [Online] Deutsche Energie-agentur (dena), 2017. [Zitat vom: 8. März 2018.] http://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/referenzprojekte-best-practice/dena-referenzprojekte/?tx_referenzdb_referenzdbitem[project]=67&tx_referenzdb_referenzdbitem[action]=show&tx_referenzdb_referenzdbitem[controller]=Project.

267. Arbeitsgemeinschaft Instandhaltung Gebäudetechnik (AIG). *Beitrag der Instandhaltung zum effizienten Anlagenbetrieb und zu den Betriebskosten/Lebenszykluskosten.* Frankfurt am Main : Verband Deutscher Maschienen- und Anlagenbau e.V (VDMA), 2016.

268. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. Die Lichtbranche - Digitalisierung und Ledifikation. Frankfurt am Main : s.n., 2018.

269. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen. [Online] 12 2015. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/strom/1419_Broschuere_Energieeffizienz-in-KMU_2015.pdf.

270. Zumtobel Lighting GmbH. Licht - Handbuch für den Praktiker. [Online] 09 2016. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/DE/Lichthandbuch.pdf.

271. Pfiffinger, Gerald. Lichtverschmutzung und die Vogelwelt. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.zobodat.at/pdf/VOSCHOE_026_0024-0025.pdf.

272. TRILUX AG. Lichtausbeute - Lichtausbeute von Lampen. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/leuchtmittel/leuchtmittel-eigenschaften/lichtausbeute/.

273. DIAL GmbH, Dipl.-Ing. Dieter Polle. DIAL - Effizienz von LEDs. [Online] 05. 06 2016. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.dial.de/de/article/effizienz-von-ledsdie-hoechste-lichtausbeute-einer-weissen-led/.

274. Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V. Zur Bestimmung der Effizienz in der Lichttechnik. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/anwendung/licht.html.

275. TRILUX AG. Lichtstärkeverteilungskurven. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/leuchten/lichttechnische-klassifizierung/lichtstaerkeverteilungskurven/.

276. LongLife LED GmbH by HK, Vertreten durch die Geschäftsführer Henning Altena, Klaus Egbers. Abstrahlwinkel LED. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.longlife-led.de/abstrahlwinkel.html.

277. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Gütemerkmal Beleuchtungsstärke. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/beleuchtungsqualitaet/beleuchtungsstaerke/.

278. TRILUX GmbH & Co. KG. https://www.trilux.com - "Räumliche Beleuchtung, Lichtrichtung, Modelling". [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/guetemerkmale-der-beleuchtung/raeumliche-beleuchtung-lichtrichtung-modelling/.

279. TRILUX AG. Beleuchtungsstärke. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/guetemerkmale-der-beleuchtung/beleuchtungsstaerke/.

280. Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA). *ASR A 3.4 (2011-04-29) - Technische Regeln für Arbeitstätten - Beleuchtung.* s.l. : Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt (GMBI), 2011.

281. Fraunhofer-Anwendungszentrum für Anorganische Leuchtstoffe. Messung der Leuchtdichteverteilung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.awz-

soest.fraunhofer.de/de/anwendungszentrum/kompetenzen/zuverlaessigkeit-von-leuchtstoffen/leuchtdichte.html.

282. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Gütemerkmale der Beleuchtung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/beleuchtungsqualitaet/guetemerkmale/.

283. DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL). *DIN EN 12464 (2011-08-00); Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.

284. DIN-Normenauschuss Lichttechnik (FNL). *DIN EN 12464-1 (2011-08-00); Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2011.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.

285. Prediger. prediger, Lichtberater - Wartungsfaktor. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://prediger.de/lichtberatung/lexikon/wartungsfaktor.html.

286. TRILUX AG. LED GUIDE 2016. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/fileadmin/Downloads/Brochures/LED_Guide/2016/16_19-LED-Guide-2016-CH-de.pdf.

287. CIE/Devision 3 Innenraum und Beleichtunsentwurf, CIE/Division 3 Interior Environment and Lighting Desing, CIE/Devision Environnement interieur et etude de l'eclairage. *CIE 97 - Leitfaden zur Wartung von elektrischen Beleuchtungsanlagen im Innenraum.* 2005.

288. TRILUX GmbH & Co. KG. RILUX Lifetime-Rechner für LED-Beleuchtung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux-akademie.com/de/lichtwissen/detail/article/1611/trilux-lifetime-rechner-fuer-led-beleuchtung/.

289. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Gütemerkmal Blendungsbegrenzung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/beleuchtungsqualitaet/blendungsbegrenzung/.

290. TRILUX GmbH & Co. KG. Reflexblendung auf horizontalen Sehaufgaben. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/guetemerkmale-der-beleuchtung/begrenzung-der-blendung/reflexblendung-auf-horizontalen-sehaufgaben/.

291. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. UGR. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/wissen-kompakt/lichtlexikon/details-lichtlexikon/ugr/.

292. CIE/Devision 5 Innenraum und Beleuchtungsentwurf. *CIE 117 - Psychologische Blendung in der Innenbeleuchtung.* Berlin : Beuth Verlag GmbH.

293. TRILUX GmbH & Co. KG. UGR-Tabellenmethode. [Online] 2018. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/guetemerkmale-der-beleuchtung/begrenzung-der-blendung/ugr-tabellenmethode/.

294. Fördergemeinschaft Gutes Licht. Leitfaden zur DIN EN 12464-1. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/130307_Leitfaden_DIN_2_Web.pdf.

295. TRILUX GmbH & Co. KG. Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/guetemerkmale-der-beleuchtung/beleuchtungsstaerke/gleichmaessigkeit-der-beleuchtungsstaerke/.

296. light11.de GmbH. Farbwiedergabe & Farbwiedergabeindex. [Online] 08 2015. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.light11.de/lightmag/farbwiedergabe/.

297. DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL). *DIN EN 12464-2 (2014-05-00); Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 2: Arbeitsplätze im Freien; Deutsche Fassung EN 12464-2:2014.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014.

298. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Normen. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/normen-und-vorschriften/normen/.

299. TRILUX GmbH & Co. KG. Technische Regeln für Arbeitsstätten. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/allgemeine-anforderungen/licht-und-arbeitsschutz/technische-regeln-fuer-arbeitsstaetten/.

300. —. Leuchtmittelarten. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/leuchtmittel/leuchtmittelarten/.

301. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Verordnung (EG) Nr. 244/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht. [Online] 16. 06 2014. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/verordnung_244_2009_eg_haushaltslampen_mit_ungebuendeltem_licht_0.pdf.

302. Die Kommission der Europäischen Gemenischaften. Verordnung (EG) Nr. 245/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorschaltgerät, Hoch. [Online] 24. 03 2009. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32009R0245.

303. *Produkt: Aura T8 Universal Long Life.* [Online] [Zitat vom: 1. März 2019.] http://www.auralight.de/product/aura-universal-long-life/.

304. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Natriumdampflampen: hohe Lichtausbeute. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/beleuchtungstechnik/lichtquellen/lichtquellentypen/natriumdampflampen/.

305. light11.de GmbH. Das Glühlampenverbot – Eine Übersicht. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.light11.de/lightmag/gluehlampenverbot/.

306. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Abschied von den Halogenlampen. [Online] 17. 01 2018. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/service-info/aktuelles/news/abschied-von-den-halogenlampen/.

307. licht.de GmbH. *Leitfaden zur DIN EN 12464-1: Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.* s.l. : E&B engelhardt und bauer Druck und Verlag.

308. CELMA / ELC. Leitfaden der europäischen Beleuchtungsindustrie (CELMA&ELC) zur Anwendung der Verordnung (EG) Nr. 245/2009 der Kommission, geändert durch die Verordnung Nr. 347/2010 zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Beleuchtungsproduk. [Online] 12 2010. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/CELMA-GUIDE_D_2010_index.pdf.

309. TRILUX GmbH & Co. KG. Effiziente Leuchtmittel. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/allgemeine-anforderungen/licht-und-umwelt/effiziente-leuchtmittel/.

310. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Verordnung 244/2009/EG zu Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht. [Online] Ergänzungen des Umweltbundesamtes (Vers. 4, 16. 6. 2014), 16. 06 2014. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/verordnung_244_2009_eg_haushaltslampen_mit_ungebuendeltem_licht_0.pdf.

311. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. [Online] 01. 07 2011. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://news.wko.at/news/oesterreich/RoHS-110701-ABL-L-174-88-RL-2011-65.pdf.

312. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV). *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG).* 2015.

313. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik un DIN und VDE. *DIN EN 60598-1, VDE 0711-1; Leuchten - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen (IEC 60598-1:2014, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60598-1:2015.* Oktober : Beuth Verlag GmbH, 2015.

314. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Beleuchtungsanlagen messen und überprüfen. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/planung-in-der-praxis/anlagen-messen/.

315. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Lichtplanung in der Praxis. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/planung-in-der-praxis/.

316. DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL). *DIN EN 12193 Licht und Beleuchtung - Sportstättenbeleuchtung; Deutsche Fassung EN.* 08 : Beuth Verlag GmbH, 2008.

317. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Klimaschutz in neuem Licht Die LED-Leitmarktinitiative: Innovation für Kommunen und Wirtschaft. [Online] 09 2016. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/publication/file/nki_klimaschutz_in_neuem_licht_bf.pdf.

318. Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV). Beleuchtung 2016 - Hinweise für Beleuchtung öffentlicher Gebäude. [Online] 02 2017. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Planen/Elektrotechnik/Beleuchtung%202016/Beleuchtung-2016_Stand_2017.pdf.

319. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Lotse Innenbeleuchtung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/energieeffiziente-technologien/beleuchtung/quickcheck/innenbeleuchtung-oeffentliche-hand-kaemmerer/planung/richtlinien-und-normen/.

320. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Lichtplanung: Wirkungsgradverfahren. [Online] [Zitat vom: 13. 06

2018.] https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/planung-in-der-praxis/wirkungsgradverfahren/.

321. TRILUX GmbH & Co. KG. Überschlägige Planung mit dem Wirkungsgradverfahren. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/allgemeine-anforderungen/beleuchtungsplanung/ueberschlaegige-planung-mit-dem-wirkungsgradverfahren/.

322. Lichttechnische Gesellschaft (LiTG) e.V. Fachausschuss "Beleuchtungsberechnung". *Projektierung von Beleuchtungsanlagen nach dem Wirkungsgradverfahren (LiTG-Publikationen).* Januar : Deutsche Lichttechnische Gesellschaft; Auflage: 5 (1. Januar 1988), 1988.

323. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Lichtplanung: Wartungswert und Wartungsfaktor. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/planung-in-der-praxis/wartungswert/.

324. —. Lichtmanagement: effizient und komfortabel. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/lichtmanagement/.

325. TRILUX GmbH & Co. KG. Anwendung und Funktion von Lichtmanagement. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/lichtmanagement/anwendung-und-funktion-von-lichtmanagement/.

326. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Energie sparen: Regelung nach Tageslicht. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/lichtmanagement/regelung-nach-tageslicht/.

327. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. DIN 5034 „Tageslicht in Innenräumen“. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/normen-und-vorschriften/normen/details/din-5034-tageslicht-in-innenraeumen/.

328. © Copyright by Gira, Giersiepen GmbH & Co. KG. Worin besteht der Unterschied zwischen Präsenzmelder und Bewegungsmelder? [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.gira.de/service/faq/antwort.html?id=1156.

329. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Lichtsensoren: Regelung nach Helligkeit. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/lichtmanagement/regelung-nach-helligkeit/.

330. —. Regelung nach Anwesenheit. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/lichtmanagement/regelung-nach-anwesenheit/.

331. —. Beleuchtungsszenen: Licht auf Abruf. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/lichtmanagement/beleuchtungsszenen/.

332. TRILUX GmbH & Co. KG. Human Centric Lighting (HCL). [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/allgemeine-anforderungen/licht-und-nicht-visuelle-wirkungen/human-centric-lighting-hcl/.

333. DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL). *DIN SPEC 67600 Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013.

334. Öko-Institut e.V. Stromsparberatung - Begriffe in der Beleuchtungstechnik. [Online] 09 2009. [Zitat vom: 13. 06 2018.] http://e-learning-stromsparberater.de/index.php?id=75.

335. EnergieAgentur.NRW GmbH. Inrofmation - Beleuchtung in Hallen. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.energieagentur.nrw/energieeffizienz/beleuchtung.

336. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Lotse Straßenbeleuchtung - Maßnahmenbewertung nach Lebenszykluskosten. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/energieeffiziente-technologien/beleuchtung/quickcheck/planungsschritte-strassenbeleuchtung/planung-finanzierung/massnahmenbewertung-nach-lebenszykluskosten/.

337. licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Beleuchtungskosten über den Lebenszyklus. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/beleuchtungskosten/.

338. thyssenkrupp System Engineering GmbH. Unternehmen - Systempartner für die Automobil-, Aerospace- und Batterieindustrie. [Online] 2017. [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://www.thyssenkrupp-system-engineering.com/de/unternehmen/.

339. Deutsche Energie-Agentur (dena). Initiative EnergieEffizienz - Projekt: Energieeffiziente LED-Beleuchtung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] https://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/referenzprojekte-best-practice/dena-referenzprojekte/?tx_referenzdb_referenzdbitem[project]=275&tx_referenzdb_referenzdbitem[action]=show&tx_referenzdb_referenzdbitem[controller]=Project.

340. EWE VERTRIEB GmbH - Hardy Gelfort. *Smartes Licht & Full-Service: erfolgreiches Millionenprojekt - Premium AEROTEC und EWE setzen Pilotprojekt um.* Oldenburg : s.n.

341. Leipziger Leuchten GmbH - Heiko Reichel. *Cleveres Licht in den Leipziger Betriebshöfen der LVB .* 2018.

342. Sattler, Klaus. Thermische Trennverfahren, Grundlagen, Auslegung, Apparate. s.l. : VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weih´nheim, 1988.

343. Christen, Daniel S. Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik. *Handbuch für Chemiker und Verfahrensingenieure.* s.l. : Springer Verlag, 2010.

344. Mujumdar, Arun S. Principles, Classification and Selection of Dryers. *Handbook of industrial drying. 4th ed.* Boca Raton : CRC Press, 2010. 4th ed.

345. Weiß, Siegfried. Thermisches Trennen, Ausrüstungen und ihre Berechnung. s.l. : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1996. 2. Auflage.

346. Maltry, Werner. Auswahl von Trocknern. *in: Weiß, Siegfried: Thermisches Trennen, Ausrüstungen und ihre Berechnung.* s.l. : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1996. 2. Auflage.

347. Heindl, Albert. Grundlagen, Anwendung, Berechnung. *Praxisbuch Bandtrocknung. Grundlagen, Anwendung, Berechnung.* Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2016.

348. Strumitto, Czeslaw, Jones, Peter L. und Romuald, Zytta. *Energy Aspects in Drying. In: Mujumdar, Arun S.: Handbook of Industrial Drying (Hrsg.) 2015.* Boca Raton : CRC Press, 2015.

349. Law, Chung Lim, Mujumdar, Arun S. Fluidized Bed Dryers, In: Mujumdar, Arun S. (Hrsg.) 2015: Handbook of Industrial Drying. Boca Raton : CRC Press, 2015. 4th ed.

350. energieeffizienz-im-betrieb.net wird betrieben von der vPRESS. GmbH. Energiesparen bei Gewerbe-Beleuchtung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] www.energieeffizienz-im-betrieb.net/energiesparen-unternehmen/beleuchtung-gewerbe-industrie.html.

8 Anhänge

Die Anhänge zum bisherigen BVT-Merkblatt in der Fassung des Jahres 2008 sind nicht Bestandteil der Überarbeitung.

9 Zusätzlicher Anhang

Beitrag für eine Vollzugshilfe zur Berücksichtigung des Themenbereichs Energieeffizienz von Querschnittstechnologien bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren

Für eine schnellere und zielgerichtete Anwendbarkeit der Informationen dieses BVT-Merkblattes insbesondere bei der praktischen Durchführung von Genehmigungsverfahren wurde im Rahmen des Projektes zu dessen Aktualisierung in den Jahren 2016 – 2019 zusätzlich ein Dokument „Beitrag für eine Vollzugshilfe zur Berücksichtigung des Themenbereichs Energieeffizienz von Querschnittstechnologien bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren“ erarbeitet. Der Beitrag steht im Zusammenhang mit der konkreteren Ausformung des Energieeffizienzgebotes gemäß § 5 des Bundesimmissionsschutzgesetzes und der diesbezüglichen Konkretisierung bei der im Jahr 2019 geplanten Novelle der TA Luft.

Inhaltlicher Kern dieses Dokumentes sind Auszüge aus dem Kapitel 3 des BVT-Merkblattes in verdichteter Form. Für alle von der Überarbeitung umfassten Kapitel zu einzelnen Querschnittstechnologien wurde ein gesondertes Kapitel als Beitrag für eine Vollzugshilfe entwickelt. Die Gliederung der jeweiligen Kapitel orientiert sich methodisch an einem themenbezogenen Prüfvorgang in Genehmigungsverfahren.

Dieser Beitrag für kann als Anhang zum Forschungsbericht „Aktualisierung der Daten des BVT-Merkblattes „Energy Efficiency“ betrachtet werden.

Wegen einer möglichen späteren Nutzung als Einzeldokument wurde dieser Anhang redaktionstechnisch als gesondertes Dokument erstellt.