FACHBROSCHÜRE

Klimafreundliche Gebäudeklimatisierung

Ein Ratgeber für Architekten, Bauherren und Planer

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Fachgebiet III 1.4
Postfach 14 06
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Autoren:
Myrea Richter, Dr. Mathias Safarik, Carsten Heinrich
Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH

Redaktion:
Dr. Daniel de Graaf

Gestaltung:
Bernd Kreuscher / Umweltbundesamt

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimafreundliche-gebaeudeklimatisierung

Bildquellen:
Titelbild: VW Sachsen GmbH, DIE GLÄSERNE MANUFAKTUR

Stand: Juli 2014

ISSN 2363-8311

Inhalt

1 Einleitung

Was Architekten, Bauherren und Betreiber bei der Planung der Gebäudeklimatisierung und von Kälteanlagen berücksichtigen sollten

Betriebskosten und Umweltrelevanz der Kältetechnik werden oft unterschätzt. Dabei verbrauchen Kälte- und Klimaanlagen allein 14 % der Elektroenergie in Deutschland.

Die vorliegende Broschüre gibt einen Überbick zum Thema „Nachhaltige Kälteversorgung“ und liefert wichtige Informationen und Entscheidungshilfen zur frühzeitigen Einbeziehung in die Bauplanung sowie zur Abstimmung mit Fachplanern.

Neben den Umweltaspekten sprechen weitere Gründe dafür, sich als Architekt, Bauherr oder Betreiber intensiver mit den Themengebieten der Klimatisierung und Kälteerzeugung zu befassen:

Zukünftige Forderung von Gesetzesseite

Sich weiter entwickelnde gesetzliche Anforderungen auf nationaler und europäischer Ebene sollten frühzeitig in der Planungsphase einbezogen werden, um einen späteren kostenintensiven Nachbesserungsaufwand zu vermeiden. Insbesondere sind folgende aktuelle und in naher Zukunft zu erwartende Regelungen zu beachten:

- die EU-Gebäuderichtlinie sowie deren Umsetzung in nationales Recht durch die Energieeinsparverordnung (EnEV),
- energiebezogene Produktrichtlinien auf europäischer Ebene (Ökodesign) sowie
- die EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase (F-Gase).

Kostenfallen

Steigende Energie- und Lohnkosten führen bei ineffizienten oder wartungsintensiven Systemen zu steigenden Betriebskosten.

Die für die EU festgelegte künstliche Verknappung von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) sowie erweiterte Betreiberpflichten werden zu zusätzlichen Wartungskosten für Kompressionskälteanlagen mit HFKW-Kältemitteln führen.

Werteverschiebung in der Gesellschaft und beim Entscheidungsprozess

Neben den gesetzlichen und wirtschaftlichen Aspekten rückt das Thema ökologische Nachhaltigkeit gesellschaftlich immer mehr in den Vordergrund und stellt für Käufer und Betreiber ein zunehmend wichtiges Entscheidungskriterium bei der Auswahl der Kälte- bzw. Klimaanlage dar.

1 Infobox: EU-Gebäuderichtlinie (EPBD) und Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die EU-Gebäuderichtlinie schreibt Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden sowie Verfahren zu deren Berechnung vor. Die Energieeinsparverordnung setzt die Inhalte der EU-Richtlinie in nationales Recht um.

Die novellierte Gebäuderichtlinie 2010 fordert für Neubauten ab 2020 und für öffentliche Gebäude bereits ab 2019 die Umsetzung als Niedrigstenergiegebäude (Artikel 9). Der nur noch äußerst geringe Energiebedarf soll vorwiegend mit erneuerbarer Energie gedeckt werden, die am oder nahe dem Gebäudestandort umgewandelt wird.

Mit der Novellierung der Energieeinsparverordnung EnEV 2014, die am 01. Mai 2014 in Kraft trat, wird der maximal zulässige Primärenergiebedarf für Neubauten ab dem Jahr 2016 um 25 % gegenüber der EnEV 2009 verringert. Zur Einhaltung der Forderungen aus der EU-Gebäuderichtlinie sind in den Folgejahren weitere Verschärfungen notwendig.

2 Infobox: Ökodesign – EU-Richtlinien für energieverbrauchsrelevante Produkte und deren Anwendung auf die Kälte- und Klimatechnik

Die europäische Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG regelt die umweltgerechten Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte in der Europäischen Union. Die Umsetzung in nationales Recht erfolgt über das Energiebetriebene-Produkte-Gesetz EBPG aus dem Jahr 2008.

Für den Kälte- und Klimabereich sind u.a. folgende Abschnitte von Bedeutung:

- ENTR Lot 1: Kühl- und Gefriergeräte inkl. Kühlaggregate für industrielle Prozesse, Zentralkühlsysteme, Kühlräume, Kühlzellen, Schockkühler und -froster, Verflüssigungssätze
- ENTR Lot 6: Klima- und Lüftungsanlagen
- ENER Lot 10: Raumklimageräte bis zu 12 Kilowatt Leistung und Komfortventilatoren
- ENER Lot 11: Pumpen, Ventilatoren, Elektromotoren
- ENER Lot 12: Gewerbliche Kühl- und Tiefkühlgeräte
- ENER Lot 13: Kühl- und Tiefkühlgeräte im Haushalt

Die Verordnungen für Raumklimageräte und Komfortventilatoren (Verordnung (EG) Nr. 206/2012), für Umlaufpumpen (Verordnung (EG) Nr. 641/2009), für Elektromotoren (Verordnung (EG) Nr. 640/2009) sowie für Ventilatoren (Verordnung (EG) Nr. 327/2011) sind bereits in Kraft getreten. Alle weiteren Verordnungen befinden sich noch in der Entwurfsphase.

Allen gemein sind Mindestanforderungen zur Energieeffizienz, die in den kommenden Jahren kontinuierlich verschärft werden. Für Kälte- und Klimaanlagen werden Mindestwerte für die saisonale Arbeitszahl SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) vorgeschrieben. Neben der Energieeffizienz sind weitere Forderungen, z.B. zu notwendigen Teillastregelverfahren, Bestandteil dieser Verordnungen.

3 Infobox: Verordnung über fluorierte Treibhausgase (F-Gase-Verordnung)

Im Mai 2014 wurde die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 veröffentlicht. Sie gilt ab dem 1.01.2015 und ersetzt die bis dahin gültige Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Ziel der Verordnung ist eine deutliche Reduzierung der F-Gas-Emissionen, die seit dem Verbot der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und später der teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW) stetig zugenommen haben. Sichergestellt wird dieses Ziel langfristig u.a. durch folgende Regelungen:

- Einführung zulässiger Höchstmengen für das Inverkehrbringen von HFKW, wobei die zulässigen Mengen bis zum Jahr 2030 schrittweise reduziert werden
- Anwendungsspezifische Verbote, beispielsweise Verbot des Inverkehrbringens stationärer Kälteanlagen mit HFKW-Kältemitteln mit einem GWP (Global Warming Potential) von 2500 oder mehr
- Serviceverbote an Kälteanlagen mit Kältemitteln mit einem GWP von 2500 oder mehr
- Verschärfung der Auflagen zu Dichtheitskontrollen an Kälteanlagen

Detaillierte Informationen zu Auswirkungen der neuen Verordnung finden sich im Abschnitt Wirtschaftlichkeit.

2 Verfahren zur Kälteerzeugung und Optimierungspotenziale

Die grundlegenden Verfahren der Kältetechnik wie Kompressions- und Absorptionskühlung wurden schon im 18. Jahrhundert entwickelt. Trotz einer Vielzahl von technischen Neuerungen zur Effizienzsteigerung und Leistungsanpassung beruhen die Verfahren bis heute auf den gleichen Grundprinzipien. In einer Kälteanlage wird ein Kältemittel im Kreislauf geführt. In einem bzw. mehreren Verdampfern verdampft das Kältemittel bei einer tiefen Temperatur (T_0) und niedrigem Druck (p_0) und nimmt dadurch Wärme auf. Dieser Dampf wird dann durch mechanische oder thermische Verdichtung (Kompression bzw. Absorption) auf einen höheren Druck gebracht, wodurch zugleich eine Erwärmung des Dampfes erfolgt. Auf dem höheren Temperatur- und Druckniveau (T_K, p_K) strömt der Dampf in einen Kondensator und wird dort verflüssigt. Die zuvor aufgenommene Wärme wird bei der Verflüssigung wieder abgegeben. Anschließend wird mithilfe einer Drosseleinrichtung der Druck im flüssigen Kältemittel gesenkt, zum Beispiel mit einem Expansionsventil oder einem Kapillarrohr, und das Kältemittel zurück zum Verdampfer geleitet.

Physikalisch betrachtet bedeutet „Kälte erzeugen“, dass einem System Wärme entzogen wird und entgegen dem Temperaturgradienten bei einem höheren Temperaturniveau wieder abgegeben wird. Wie bei einer Pumpe, die Wasser in ein höher gelegenes Becken fördert, muss für die Wärmeabfuhr immer Energie aufgewendet werden.

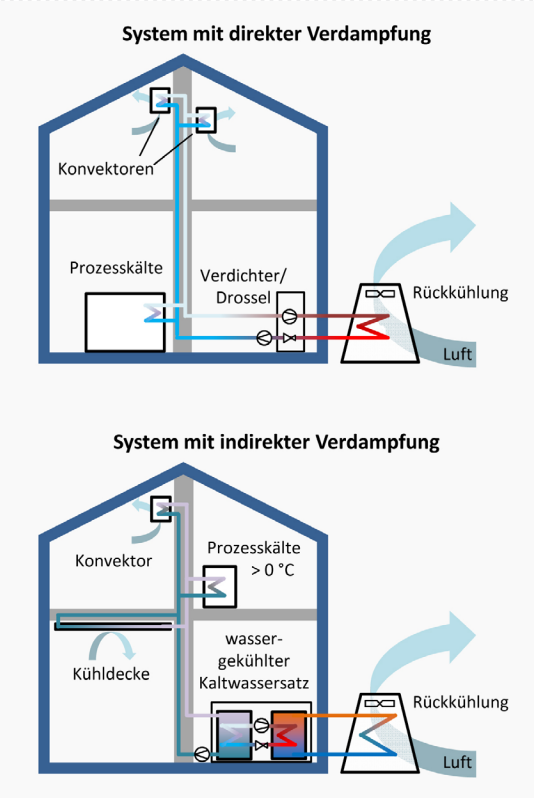
Direktverdampfung oder Kaltwassernetz

Grundsätzlich lassen sich Systeme für die Kälteerzeugung in solche mit direkter oder indirekter Verdampfung aufteilen. Bei den direkten Systemen sind Kältemittel und Kälteträger identisch, während bei indirekten Systemen ein zusätzliches Medium als Kälteträger dient (Abbildung 1).

Abbildung 1

Direkte und indirekte Kälteerzeugung

Schema eines direktverdampfenden Systems und eines Kaltwassersatzes

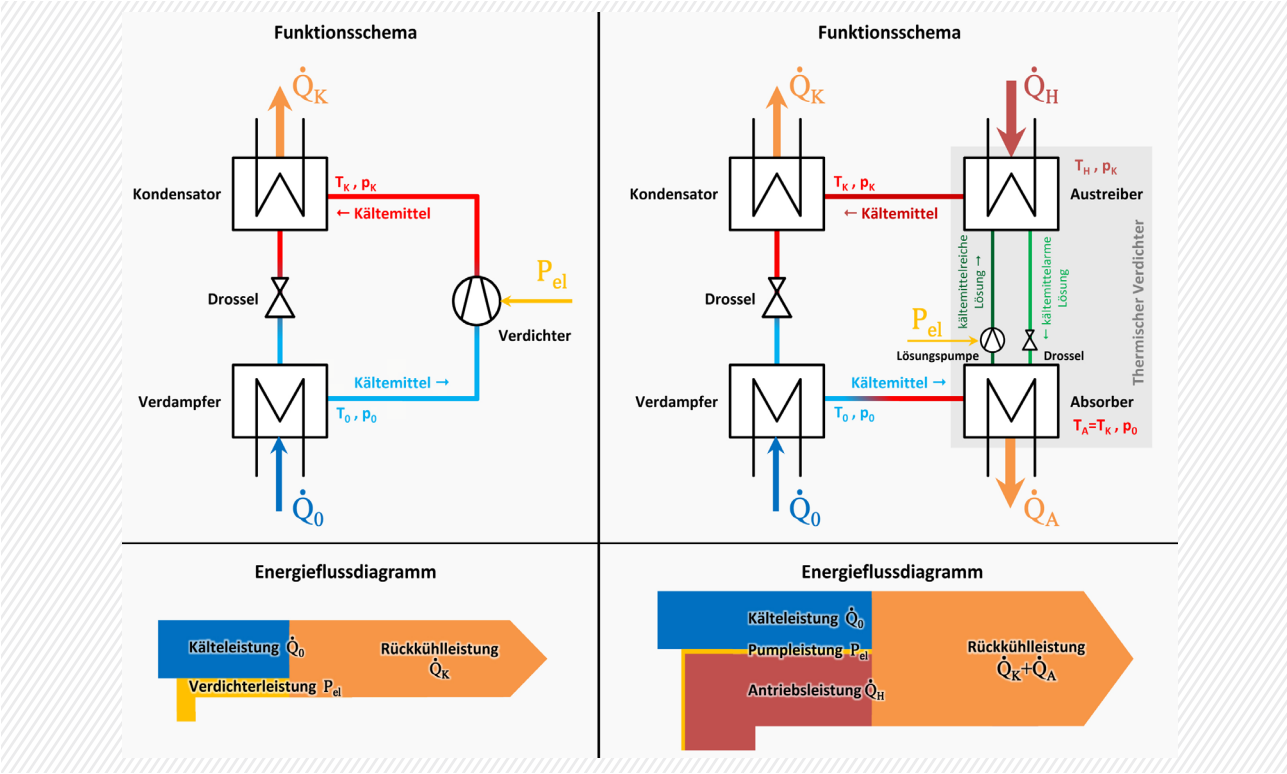


Quelle: ILK Dresden

Abbildung 2

Vergleich von Kompressions- und Absorptionskälteanlagen

Prinzipieller Aufbau und Energiefluss von KKA (links) und AKA (rechts) Kaltwassersatzes



Quelle: ILK Dresden

Zur Versorgung eines Gebäudes mit einem zentralen direktverdampfenden System sind allerings sehr lange Kältemittelleitungen und große Kältemittelmengen nötig.

Bei den indirekten Systemen wird die Wärme der zu kühlenden Räume oder Produkte auf einen Kälteträger übertragen und so abgeführt. Üblicherweise werden als Kälteträger Wasser, Sole oder Luft eingesetzt. Der apparative Aufwand ist bei den indirekten Systemen zwar höher, dafür werden aber geringere Mengen Kältemittel benötigt. Zudem sind die Anforderungen an Kältemittelleitungen im Vergleich zu Leitungen eines Kaltwassernetzes grundlegend verschieden und auch anspruchsvoller.

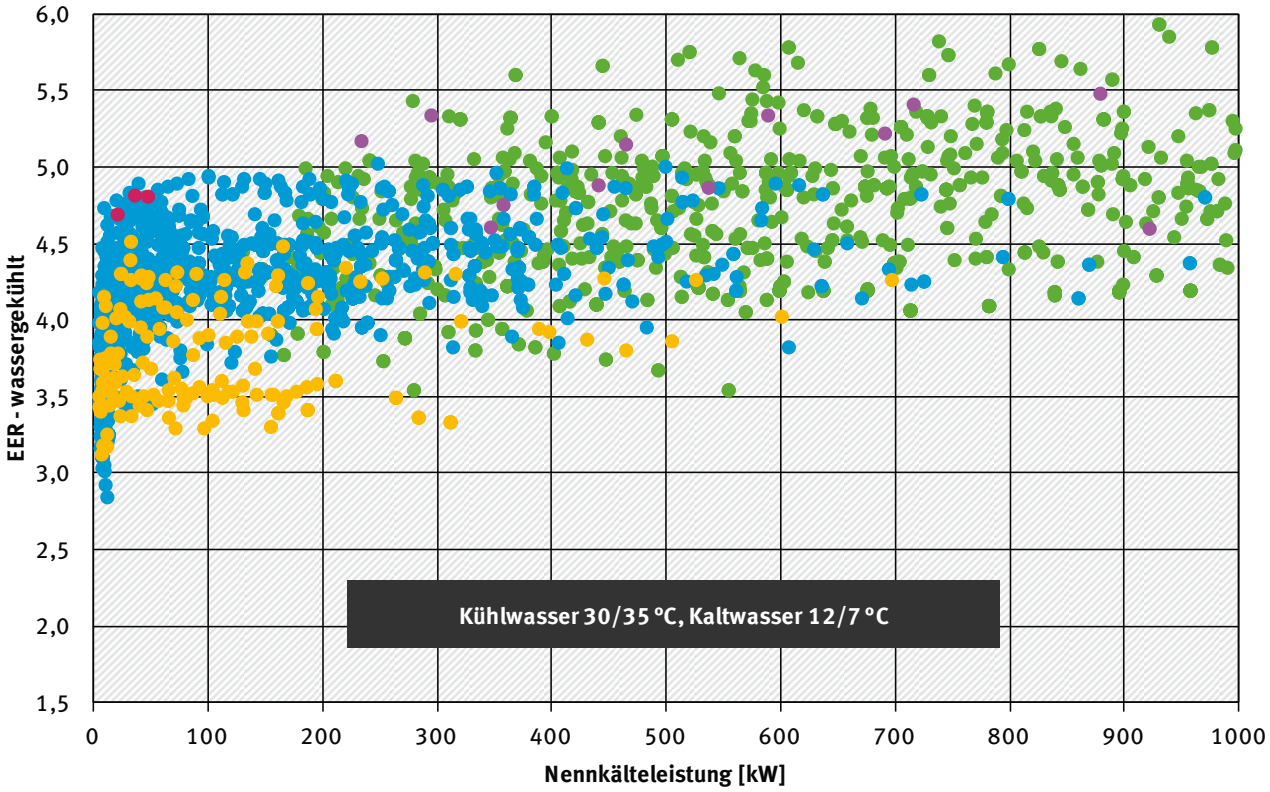
Kompressions- und Absorptionskältemaschine

Eine Kompressionskältemaschine (KKM) beinhaltet die in Abbildung 2 dargestellten vier Hauptbestandteile: mechanischer Verdichter, Kondensator, Drosseleinrichtung und Verdampfer. Zwischen diesen vier Komponenten wird ein leichtsiedendes Kältemittel im Kreislauf geführt. Wird der mechanische Verdichter angeschaltet, bildet sich auf dessen Saugseite ein Unterdruck und das Kältemittel im Verdampfer wird gasförmig. Die hierzu benötigte Wärmeenergie wird dem zu kühlenden Medium, das den Verdampfer umströmt, entzogen. Durch Verdampfen und Verdichtung nimmt das Kältemittel Wärme auf ($\dot{Q}_O + P_{el} = \Theta_K$), die im Kondensator bei der Kältemittelverflüssigung wieder an die Umgebung abgegeben wird. Mit einer Drosseleinrichtung wird das flüssige Kältemittel auf den Verdampferdruck entspannt, wodurch ein Teil des Kältemittels verdampft und das Flüssigkeits-Dampf-Gemisch abkühlt.

Die Effizienz einer KKM wird mit der Leistungszahl angegeben. In der Praxis verwendete Symbole sind ε, EER (Energy Efficiency Ratio) bzw. COP (Coefficient of Perfomance), wobei aktuelle Normen EER für die Kälteerzeugung und COP für die Wärmeerzeugung verwenden. Es ist darauf zu achten, dass bei der Angabe der Antriebsleistung neben dem Verdichter alle weiteren Verbraucher, wie Ventilatoren, Pumpen und Regelungstechnik einbezogen werden. Zur Leistungszahl gehört die Angabe der Betriebsbedingungen, unter denen sie ermittelt wurde. Die benötigte Antriebsleistung des Verdichters verändert sich mit

Abbildung 3

Leistungszahlen KWS wassergekühlt



*Daten für Kaltwasser 12/6, da keine anderen Daten verfügbar

Quelle: Eurovent Certification (Website: www.eurovent-certification.com); Futron: Übersichtstabelle Kompakt-Chiller Baureihe FXP, Kältemittel R290, ChillPAC2008, 2012; Johnson Controls: JohnsonControls ChillPAC packaged ammonia chillers, 2008

dem Druckunterschied zwischen Verdampfung und Kondensation und bei Teillastbetrieb der Anlage.

Während sich die Leistungszahl auf einen Betriebspunkt bezieht, gibt die Jahresarbeitszahl (SEER - Seasonal Energy Efficient Ratio) das Verhältnis der über das Jahr abgeführten Wärmemenge zur aufgenommenen elektrischen Energie an. Die Jahresarbeitszahl erfasst die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur- und Lastbedingungen. Beispiele für Leistungszahlen von wassergekühlten Kaltwassersätzen sind in Abbildung 3 dargestellt.

Thermische Verdichtung statt Kompressor in Absorptionskälteanlagen

Das grundlegende Funktionsprinzip einer Absorptionskältemaschine (AKM) ähnelt dem der Kompressionskälteanlage (siehe Abbildung 2). Anstelle eines mechanischen Verdichters wird der Kaltdampf des Kältemittels im Absorber von einer Lösung, auch Sorptionsmittel genannt, bei niedrigem Druck und Kondensationstemperatur (T_A=T_K) absorbiert und auf einem höheren Temperatur- und Druckniveau (T_H, p_K) wieder aus dem Sorptionsmittel ausgetrieben. Dampf lässt sich verdichten, die kältemittelbeladene Lösung dagegen nicht. Für die mechanische Verdichtung des Dampfes wird bei gleicher Kälteleistung daher deutlich mehr elektrische Leistung benötigt als für die Druckerhöhung der Lösung mit einer Pumpe. Das Austreiben des Kältemittels aus der Lösung erfolgt durch Zufuhr der Antriebswärme ($\dot{Q}_H$). Die kältemittelarme, erwärmte Lösung fließt zurück in den Absorber, wo sie gekühlt und erneut mit Kältemittel beladen wird. Wie in der Kompressionskälteanlage muss die in das System eingebrachte Wärme wieder abgeführt werden. Zusätzlich zur Kondensationswärme des Kältemittels und der durch die elektrische Pumpleistung entstehenden Wärme muss die Antriebswärme abgeführt werden. Deshalb brauchen Absorptionskälteanlagen bei gleicher Kälteleistung größere Rückkühlapparaturen als Kompressionskälteanlagen.

Bis zu 2/3 Elektroenergieeinsparung im Gesamtsystem bereits durch den Einsatz von einstufigen Absorptionskälteanlagen

Betrachtet man den elektrischen Energiebedarf des Gesamtsystems inklusive der Hilfsenergien für Rückkühlung und Medienverteilung können mit einstufigen Absorptionskälteanlagen bis zu 65% der elektrischen Endenergie gegenüber Kompressionskälteanlagen eingespart werden [Quelle: Heinrich, C. et. al: Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie, ILK Dresden im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2014]. Demgegenüber steht der hohe Bedarf an Wärmeenergie bei Antriebstemperaturen über 75 °C. Die Effizienz einer AKM wird über das Wärmeverhältnis ζ angegeben, bei der die bereitgestellte Kälte ins Verhältnis zur dafür aufgewendeten Wärme (Antriebsenergie) gesetzt wird. Die elektrisch angetriebenen Komponenten der Anlage (Rückkühlwerk, Lösemittelpumpe) sind hierbei nicht berücksichtigt. Das Wärmeverhältnis ist keine Konstante, sondern hängt von den Betriebsbedingungen ab, es kann sich im Teillastbetrieb sowie abhängig von der Temperatur der Antriebswärme, der Rückkühlung und der Verdampfung stark ändern. Übliche Wärmeverhältnisse einstufiger Anlagen liegen zwischen 0,6 und 0,75. Ist Abwärme auf hohem Temperaturniveau (>120 °C) verfügbar, kann das Wärmeverhältnis durch zwei- oder dreistufige Anlagen auf bis zu 1,4 bzw. 1,8 gesteigert werden.

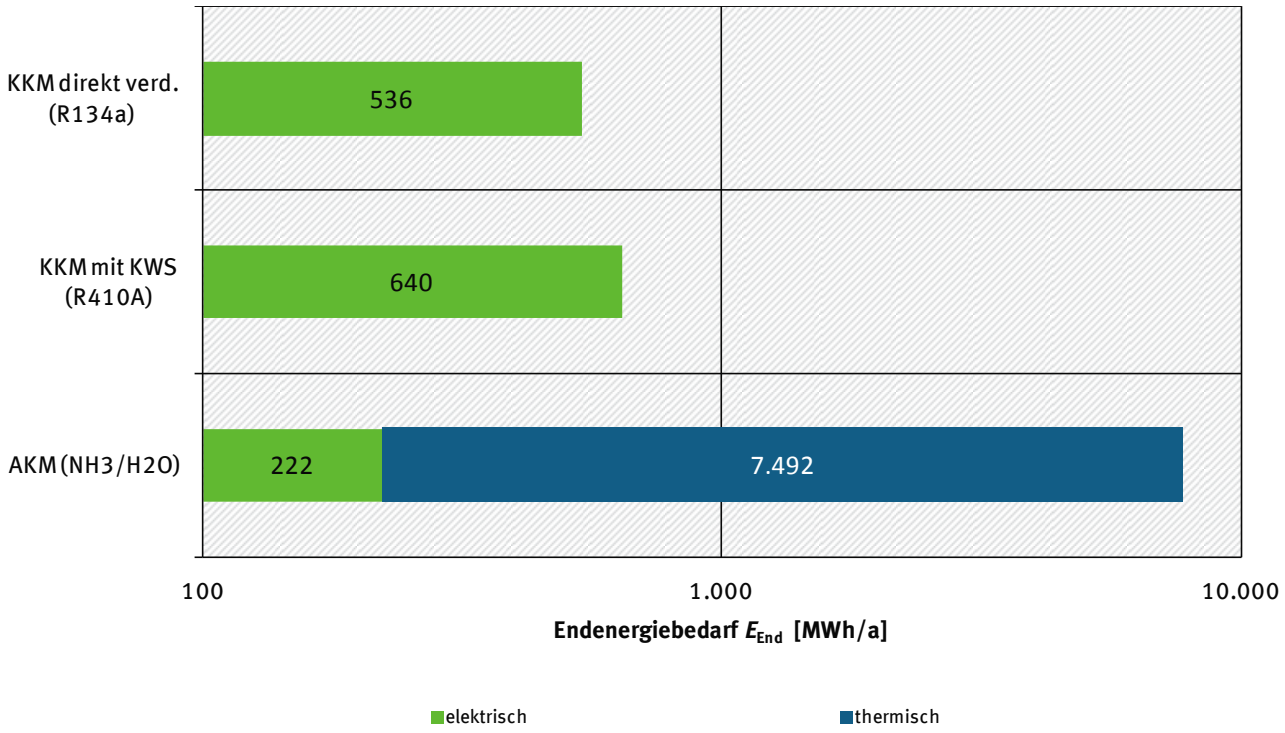
Einsatz von Absorptionskälteanlagen nur bei vorhanden Abwärmequellen sinnvoll

Der Einsatz von Absorptionskälteanlagen in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung (Einsatz von BHKW oder GuD-Kraftwerken) oder der Nutzung industrieller Abwärme stellt sich in der Regel als ökonomisch und ökologisch nachhaltig dar.

Die Nutzung von solarthermischer Energie als Antriebswärme ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die Solaranlage auch zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung genutzt wird. In der Regel stehen dann im Sommer hohe Überschusswärmeerträge zur Verfügung. Für Pumpen und Rückkühlung sollte

Abbildung 4

Jährlicher Endernergiebedarf untersuchter Systeme für Prozesskälteerzeugung



Der Vergleich beinhaltet die drei Systeme:
- direktverdampfendes Kompressionskältesystem mit dem Kältemittel R134a, Verdampfungstemperatur 1 °C (KKM direkt verd. R134a);
- Kompressionskälteanlage ausgeführt als Kaltwassersatz mit dem Kältemittel R410A, Verdampfungstemperatur -2 °C (KKM mit KWS R410A);
- Absorptionskälteanlage mit dem Stoffpaar Ammoniak/Wasser, Verdampfungstemperatur -2 °C (AKM NH_3/H_2O)

Quelle: Heinrich, C. & Wittig, S. et. al: Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie, ILK Dresden im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2014

nur ein minimaler elektrischer Zusatzenergiebedarf erforderlich sein. Bei Neuanlagen muss die elektrische Alternative bestehend aus Photovoltaik- und Kompressionskälteanlagen mit der solarthermischen Variante hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Gesichtspunkte verglichen werden.

Weitere Verfahren

Neben den hier erläuterten Verfahren und Anlagen zur Kälteerzeugung gibt es noch Adsorptions-, Kaltgas- und Dampfstrahlkälteanlagen.

Adsorptionskälteanlagen für kleine Kälteleistungen und niedrige Antriebstemperaturen

Adsorptionskälteanlagen sind wie Absorptionskälteanlagen ebenfalls thermisch angetrieben. Statt eines flüssigen Sorptionsmittels kommen hochporöse Feststoffe wie Silikagele oder Zeolithe zum Einsatz, die in zwei baugleichen Wärmeübertragern eingebettet sind (Abbildung 5). In den einen Wärmeübertrager wird der Kältemitteldampf eingeleitet und bis zur vollständigen Beladung des Feststoffes adsorbiert. Zeitgleich wird im zweiten Wärmeübertrager durch Einkoppeln der Antriebswärme das Kältemittel auf einem höheren Druckniveau wieder ausgetrieben. Nach vollständiger Be- bzw. Entladung des Feststoffes wird die Funktion der Kammern gewechselt. Für die reine Kälteerzeugung werden keine bewegten Teile und nur ein Minimum an Strom für das Umschalten der Kammern benötigt. Dadurch sind Adsorptionskältemaschinen sehr robust und wartungsarm. Adsorptionskälteanlagen stehen vorwiegend im kleinen Leistungsbereich zur Verfügung (siehe auch Abbildung 20).

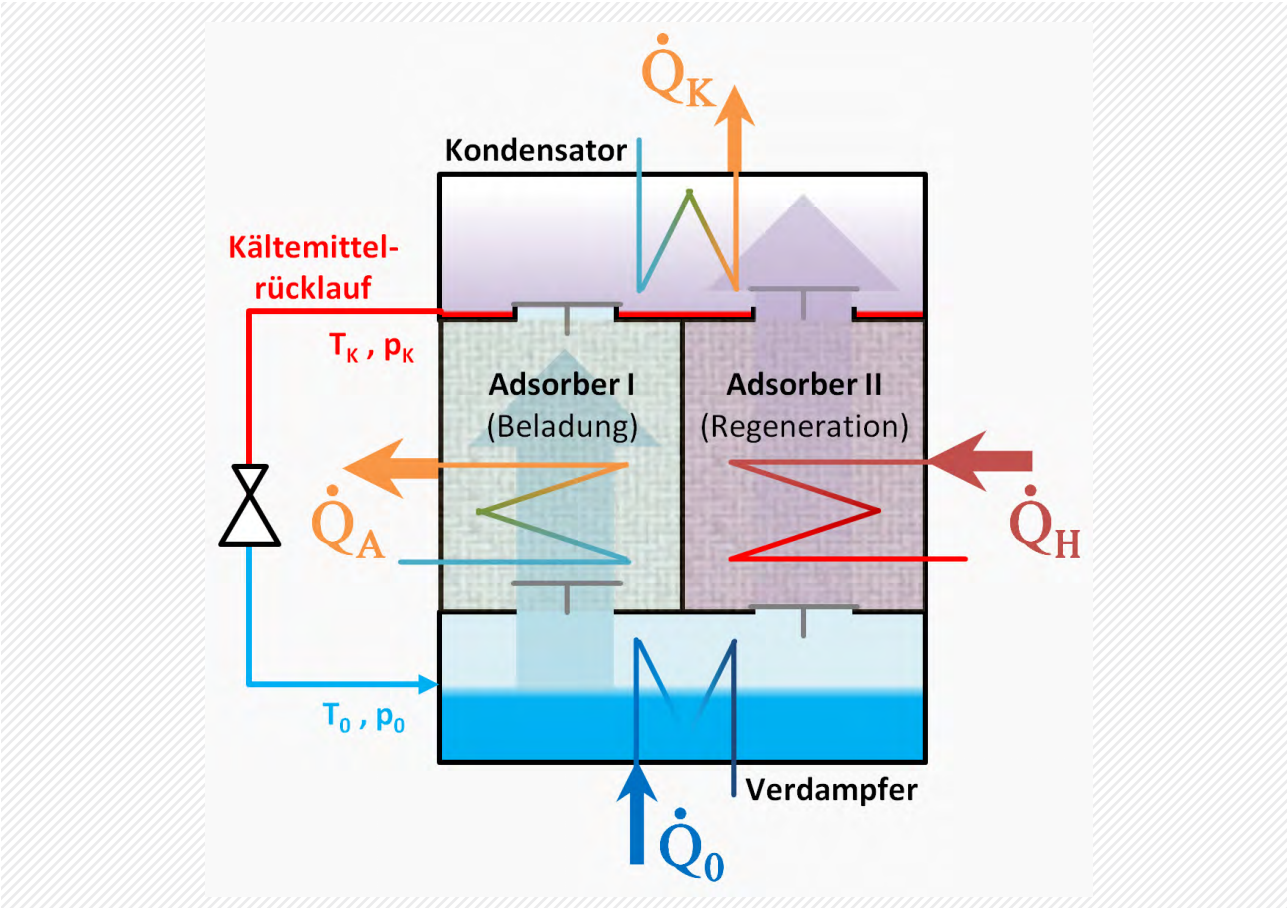
Dampfstrahlkältemaschinen noch im Entwicklungsstadium

In Dampfstrahlkälteanlagen werden Dampfstrahlverdichter für die Druckerhöhung eingesetzt. Die Anlagen kommen vor allem zur Erzeugung von Prozesskälte zur Anwendung, wo ein kontinuierlicher Kältebedarf besteht. In der Klimatechnik befindet sich der Einsatz

Abbildung 5

Adsorptionskälteanlage

Prinzipieller Aufbau



Quelle: ILK Dresden

von Dampfstrahlkälteanlagen noch in der Probephase und beschränkt sich auf wenige Einzelanlagen.

Es gibt noch weitere kältetechnische Verfahren wie zum Beispiel das bereits erwähnte Kaltgas-Prinzip (Joule-Prozess), die hier nicht im Einzelnen erläutert werden.

3 Kältemittel

In Kompressionskältemaschinen (KKM) kann prinzipiell jeder Stoff als Kältemittel eingesetzt werden, der bei ausreichend tiefen Temperaturen verdampft und bei einem technisch handhabbaren Druck wieder kondensiert. Neben dieser Grundvoraussetzung sollten idealerweise folgende Eigenschaften erfüllt sein:

- hohe Verdampfungsenthalpie
- hohe volumetrische Kälteleistung
- nicht brennbar und nicht explosiv
- chemisch beständig (kein Zerfall, keine Polymerisation)
- gute Werkstoffverträglichkeit
- umweltverträglich (kein Ozonzerstörungspotenzial, keine Treibhauspotenzial, rückstandslos entsorgbar)
- nicht toxisch
- preiswert verfügbar bzw. leicht herstellbar

In Tabelle 1 ist eine Auswahl von Kältemitteln mit einigen grundlegenden Eigenschaften aufgeführt. Die Verdampfungs- und die Kondensationstemperatur in den Kälteanlagen bestimmen über thermodynamische Zusammenhänge den Druckbereich, für den sämtliche Leitungen, Pumpen und Aggregate ausgelegt werden müssen. Das Druckverhältnis zwischen Kondensations- und Verdampfungsdruck ist für die Auswahl des Verdichtungsprinzips und die erreichbare Effizienz von Bedeutung. Je kleiner der Unterschied zwischen Verdampfungs- und Kondensationstemperatur des Kältemittels (Temperaturhub), desto höher die Effizienz der Kälteanlage.

Abhängig von der Anwendung und der Konzeption des Kältesystems stehen unterschiedliche Eigenschaften der Kältemittel im Vordergrund. So sind z.B. Kältemittel mit hohen Verdampfungsdrücken für direktverdampfende Kältesysteme mit langen Kältemittelleitungen vorteilhaft, da Rohrleitungen mit kleineren Dimensionen verwendet werden können. Brennbare Kältemittel sind wegen der großen Füllmenge in solchen Systemen hingegen ungeeignet.

Der Austausch des Kältemittels gegen ein anderes Kältemittel in bestehenden Anlagen ist in der Regel nicht möglich

Die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Kältemittel führen dazu, dass eine Kälteanlage neben den jeweiligen Betriebsbedingungen/Anforderungen auch speziell für ein bestimmtes Kältemittel ausgelegt ist. Ein einfacher Austausch eines Kältemittels durch ein anderes ist in einer bestehenden Anlage in der Regel nicht möglich.

„Sicherheitskältemittel“ – Sicherheit zum Nachteil der Umwelt

In den 1930er Jahren wurden die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) eingeführt und verdrängten die bis dahin üblichen natürlichen Kältemittel wie z.B. Kohlendioxid und Kohlenwasserstoffe vom Markt. Da es sich bei den FCKW um ungiftige, nicht brennbare und chemisch sehr stabile Stoffe handelt, wurden sie auch als „Sicherheitskältemittel“ bezeichnet. Die negativen Auswirkungen der FCKW auf die Ozonschicht sind seit den 1970er Jahren bekannt. Im Montrealer Protokoll von 1987 wurde schließlich der schrittweise Ausstieg aus der Produktion und Verwendung von FCKW festgelegt. Später wurde beschlossen, dass auch teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW) nur als Übergangslösung zugelassen sind.

Als Ersatzstoffe für FCKW und HFCKW werden überwiegend teilfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) eingesetzt. Diese synthetischen Kältemittel enthalten weder Brom noch Chlor und haben daher kein Ozon-Zerstörungspotenzial. Als Standard-Kältemittel werden derzeit vor allem die HFKW-Kältemittel R32, R125, R134a und R143a sowie deren Mischungen verwendet. Der Nachteil der gängigen HFKW besteht vor allem im hohen Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP). Die kürzlich in Kraft getretene Verordnung (EU) 519/2014 (F-Gase-Verordnung) schränkt das Inverkehrbringen und die Verwendung von HFKW ein und verhängt GWP-abhängige Anwen-

Tabelle 1

Übersicht über häufig eingesetzte Kältemittel und wichtige Eigenschaften

Kältemittel	Zusammensetzung	Typ	GWP_{100}	Sicherheitsgruppe nach DIN EN378-1	Brennbarkeit	Toxizität	Siededruck bei -10 bis +50°C [bar]	Δh_V [kJ/kg]	q_{ov} [kJ/m³]
R 22	Chlordifluormethan	HFCKW	1.810	A1	nicht brennbar, nicht explosiv	AGW** = 1000 ml/m³	3,5 - 19	ca. 213 (bei -10°C)	ca. 3247 (bei -10°C)
R 32	Difluormethan	HFKW	675		brennbar, explosiv UEG* = 12,7%	AGW** = 1000 ml/m³; schwach gewässergefährdend	5,8 - 31		
R 134a	1,1,1,2-Tetrafluorethan	HFKW	1.430	A1	nicht brennbar, nicht explosiv	AGW** = 1000 ml/m³	2,0 - 13	ca. 206 (bei -10°C)	ca. 2061 (bei -10°C)
R 290	Propan	KW / nat. KM	3	A3	brennbar, explosiv UEG* = 1,7%	AGW** = 1000 ml/m³	3,5 - 17	ca. 386 (bei -10°C)	ca. 2950 (bei -10°C)
R 404A	Gemisch aus 44% R125, 4% R134a und 52% R143a	HFKW-Gemisch	3.922	A1	nicht brennbar, nicht explosiv	AGW** = 1000 ml/m³	4,4 - 23	ca. 174 (bei -10°C)	ca. 3814 (bei -10°C)
R 407C	Gemisch aus 23% R32, 25% R125 und 52% R134a	HFKW-Blend	1.774	A1	nicht brennbar, nicht explosiv	AGW** = 1000 ml/m³	4,1 - 22	ca. 218 (bei -10°C)	ca. 3001 (bei -10°C)
R 410A	Gemisch aus 50% R32 und 50% R125	HFKW-Blend	2.088	A1	nicht brennbar, nicht explosiv	AGW** = 1000 ml/m³	5,7 - 31	ca. 232 (bei -10°C)	ca. 5067 (bei -10°C)
R 600a	Isobutan	KW / nat. KM	4	A3	brennbar, explosiv UEG* = 1,5%	AGW** = 1000 ml/m³	1,1 - 7	ca. 366 (bei -10°C)	ca. 1091 (bei -10°C)
R 717	Ammoniak	nat. KM	0	B2	brennbar, UEG* = 15,4%	AGW** = 20 ml/m³; akut gesundheitsgefährdend; gewässergefährdend	2,9 - 20	ca. 1295 (bei -10°C)	ca. 3091 (bei -10°C)
R 718	Wasser	nat. KM	0	A1	nicht brennbar, nicht explosiv	nicht toxisch	0 - 0,12	ca. 2505 (bei 2°C)	ca. 14 (bei 2°C)
R 723	Gemisch aus 40% Dimethylether und 60% Ammoniak	nat. KM	8	B3***	brennbar, UEG* = 6,0%	AGW** = 20 ml/m³; akut gesundheitsgefährdend; gewässergefährdend	3,3 - 21	ca. 937 (bei -10°C)	ca. 3316 (bei -10°C)
R 744	Kohlendioxid	nat. KM	1	A1	nicht brennbar, nicht explosiv	AGW** = 5000 ml/m³; bei Konzentrationen › 10% Bewusstseinsverlust	26,5 - 74	ca. 259 (bei -10°C)	ca. 18252 (bei -10°C)
R 1234yf	2,3,3,3,Tetrafluorprop-1-en	HFKW	4	A2	schwer entflammbar, UEG* = 6,2%	AGW** = 400 ml/m³; schwach gewässergefährdend	2,2 - 13	ca. 169 (bei -10°C)	ca. 2122 (bei -10°C)
R 1234ze	t-1,3,3,3-Tetrafluorprop-1-en	HFKW	6	A2	brennbar	AGW** = 800 ml/m³	1,5 - 10	ca. 189 (bei -10°C)	ca. 1549 (bei -10°C)
R 1270	Propen (/Propylen)	KW / nat. KM	2	A3	brennbar, explosiv (UEG* = 1,8%)	AGW** = 1000 ml/m³; bei Konzentrationen › 24% Bewusstseinsverlust	4,3 - 21	ca. 393 (bei -10°C)	ca. 3568 (bei -10°C)

* UEG: Untere Explosionsgrenze

** AGW: Arbeitsplatzgrenzwert (Nach Neufassung der Gefahrenstoffverordnung 2005 ersetzten diese Wert den MAK-Wert, siehe auch TRGS 900 "Arbeitsplatzgrenzwerte")

*** eine endgültige Klassifizierung bezüglich der Sicherheitsgruppe von R723 steht noch aus, B3 bezieht sich jeweils auf die kritischsten Werte der Einzelkomponenten (R717: B2, RE170: A3)

Quelle: Forster, P. & Ramaswamy, V. 4th Assessment Report - Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing IPCC (Intergovernmental panel of climate change), 2007

DIN EN 378-1 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1, 2011

Reflib - Stoffdatenprogramme für Windows-Applikationen, ILK Dresden 2011

dungsverbote. Dies bedeutet für die Kältebranche einen ähnlich gravierenden Einschnitt wie der Ausstieg aus den FCKW durch das Montrealer Protokoll.

Renaissance der natürlichen Kältemittel aus Gründen der Nachhaltigkeit

Als Alternative zu HFKW, vor allem aus ökologischer Sicht, erleben natürliche Kältemittel seit etlichen Jahren eine Renaissance (siehe Infobox 4 Natürliche Kältemittel). Parallel dazu wird derzeit an synthetischen Kältemitteln mit einem niedrigen GWP geforscht. Die ersten marktverfügbaren Kältemittel sind R1234yf (Ersatz für R134a) und R1234ze. Allerdings sind beide vor allem aus Sicherheitsgründen aufgrund ihrer Entzündbarkeit und den giftigen Verbrennungsprodukten umstritten.

Arbeitsstoffpaare in Absorptionskältemaschinen

Neben den genannten Eigenschaften für Kältemittel zum Einsatz in Kompressionskältemaschinen (KKM), besteht bei Absorptionskältemaschinen (AKM) zusätzlich die Anforderung, dass sich bei Verdampfungsdruck große Mengen Kältemittel im Sorptionsmittel lösen und bei Kondensationsdruck mit nicht zu hohen Temperaturen wieder austreiben lassen. Das Sorptionsmittel sollte bei Betriebsdruck keinen bzw. einen möglichst geringen eigenen Dampfdruck aufweisen. Bis heute werden für die Anwendung in AKM fast ausschließlich zwei Arbeitsstoffpaare eingesetzt: Wasser/Lithiumbromid-Lösung (H_2O/LiBr) und Ammoniak/Wasser (NH_3/H_2O). Als Sorptionsmittel könnten zukünftig auch ionische Flüssigkeiten in Frage kommen, bis zur endgültigen Marktreife besteht allerdings noch weiterer Forschungsbedarf.

H_2O/LiBr für die Klimakälte, NH_3/H_2O für tiefe Temperaturen

Wasser/Lithiumbromid (H_2O/LiBr) ist ein sehr hygroskopisches Stoffpaar (es bindet Feuchtigkeit aus der Umgebung) und ist weder toxisch noch entflammbar. Gegenüber Ammoniak/Wasser lassen sich mit dem Stoffpaar Wasser/Lithiumbromid höhere Wärmeverhältnisse erreichen. Bei der Rückführung der wasserarmen LiBr-Lösung in den Absorber kann es zur Kristallisation von LiBr kommen. Das Risiko ist mit einer geeigneten Anlagenregelung aber beherrschbar. Besonderheiten ergeben sich aus der Verwendung von Wasser als Kältemittel. Hierzu zählt der niedrige Druck (Anlagenbetrieb im Unterdruckbereich), die daraus resultierenden großen Dampfvolumenströme sowie die Begrenzung der Kälteerzeugungstemperatur auf über 0 °C. H_2O/LiBr-Absorptionskältemaschinen sind bereits ab sehr kleinen Leistungen (ab 5 kW) verfügbar und eignen sich ideal für Klimaanwendungen.

Das System Ammoniak/Wasser (NH_3/H_2O) wurde bereits 1850 in einer AKM eingesetzt. Die thermophysikalischen Eigenschaften des Stoffpaars ermöglichen im Vergleich zur Wasser/Lithiumbromid-Maschine kleinere Aggregate. Wasser als Lösungsmittel hat den Nachteil, dass es auch bei hohem Druck eine gewisse Flüchtigkeit aufweist und dadurch in den Kältemittelkreislauf gelangen kann (eine Kondensationstemperatur von 35 °C geht bei Ammoniak mit einem Kondensationsdruck von etwa 14 bar einher). Mit Ammoniak als Kältemittel kann Kälte mit sehr tiefen Temperaturen bereitgestellt werden.

4 Infobox: Natürliche Kältemittel

Wasser (H_2O) zeichnet sich durch seine Umweltverträglichkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit und seinen günstigen Preis aus. Die physikalischen Eigenschaften von Wasser beschränken allerdings den Anwendungsbereich. So sind nur Verdampfungstemperaturen oberhalb von 0 °C bei einem sehr niedrigen Druck nahe dem Vakuum realisierbar. Bei den für Kälteanwendungen gewählten Betriebsbedingungen steht der hohen Verdampfungsenthalpie eine sehr geringe Dichte gegenüber, so dass die volumetrische Kälteleistung von Wasser sehr gering ist. Das hat sehr große Dampfvolumenströme und im Verhältnis zu anderen Kältemitteln größere Anlagen zur Folge. In Kompressionskältemaschinen müssen für Wasser als Kältemittel Turboverdichter eingesetzt werden, so dass der Einsatz von Wasser als Kältemittel bisher erst in wenigen Pilotanwendungen mittlerer und großer Kälteleistung umgesetzt wurde. Die technische

Herausforderung besteht sowohl bei Kompressions- als auch bei Absorptionskältemaschinen vor allem in der Dichtheit der Anlagen.

Ammoniak (NH_3) ist ein preiswertes und chemisch beständiges Kältemittel. Aufgrund seiner Toxizität und Entflammbarkeit bestehen bei der Anwendung erhöhte Anforderungen an die Sicherheit. Der stechende Geruch von NH_3 wird jedoch schon bei einer Konzentration von 1-5 ml in einem Kubikmeter Luft wahrgenommen, gesundheitsgefährdend ist NH_3 aber erst ab Konzentrationen über 1000 ml/m³. Aufgrund seiner hohen volumetrischen Kälteleistung muss verhältnismäßig wenig Kältemittel im Kreislauf geführt werden, so dass bei einer geeigneten Anlagenausführung (z.B. eine zentrale Kälteanlage mit Kaltwassersatz) die Gesamtmenge an NH_3 klein gehalten werden kann. Bei entsprechender Ablufteinrichtung der Kältezentrale kann auch bei vollständigem Kältemittelverlust ein Überschreiten der Explosionsgrenze verhindert werden. NH_3 kommt sowohl in Kompressions- als auch in Absorptionskältemaschinen für die Klimatisierung sowie zur Bereitstellung von Prozesskälte zum Einsatz.

Kohlendioxid (CO_2) ist ein chemisch beständiges, farb- und geruchsloses Gas, das zudem preisgünstig, gut verfügbar, nicht brennbar und erst bei hohen Konzentrationen gesundheitsgefährdend ist. CO_2 hat eine sehr hohe volumetrische Kälteleistung und eignet sich vor allem zur Erzeugung von Prozesskälte im Temperaturbereich von -10 bis -55 °C. Darüber hinaus wird es zunehmend auch für die Normalkühlung (z.B. in der +4 °C-Kühlung in Supermärkten) eingesetzt.

Kohlenwasserstoffe (KW) können aufgrund der großen Vielfältigkeit und ihrer guten thermodynamischen Eigenschaften sowohl als Reinstoff als auch in Gemischen ein breites Anwendungsspektrum abdecken. Das größte Hemmnis für den flächendeckenden Einsatz ist die Brennbarkeit und Explosionsgefährlichkeit. Deswegen werden KW vor allem in kleineren Anlagen mit kleiner Kältemittelfüllmenge verwendet. So kommt das Kältemittel Isobutan bereits seit ca. 20 Jahren in fast allen Kühl- und Gefrierschränken in Europa zum Einsatz. In Chemieanlagen werden auch große Kälteanlagen mit KW eingesetzt, da dort die allgemeinen Sicherheitsvorkehrungen in der Regel ohnehin getroffen wurden und sich daher kein zusätzlicher Kostenfaktor ergibt.

5 Infobox: Kältemittel und der Treibhauseffekt

Als Maß für die Klimawirkung von Kältemitteln wird das Treibhauspotenzial GWP (Global Warming Potential) herangezogen, für die Klimawirkung der Kälte- bzw. Klimaanlage der TEWI (Total Equivalent Warming Impact).

Der GWP gibt an, um welchen Faktor ein in die Atmosphäre emittiertes Gas, beispielsweise ein freigesetztes Kältemittel, den natürlichen Treibhauseffekt im Vergleich zur gleichen Masse CO_2 verstärkt (Abbildung 6). Neben der Wärmeabsorption der in die Atmosphäre gelangten Gase wird hierbei auch die Verweilzeit in der Atmosphäre berücksichtigt. Üblicherweise wird der GWP auf einen Zeitraum von 100 Jahren bezogen.

Der TEWI wird zur Berechnung der Treibhausgasemissionen einer Kälteanlage herangezogen. Er berücksichtigt sowohl die direkten Emissionen durch das freigesetzte Kältemittel (Leckage und Entsorgung) als auch die indirekten Emissionen, die durch die Umwandlung der für den Betrieb der Kälteanlage benötigten Energie während der gesamten Lebensdauer verursacht werden.

$$TEWI = TEWI_{dir} + TEWI_{ind}$$

6 Infobox: DIN EN 378 – Kälteanlagen und Wärmepumpen: Sicherheitstechnische

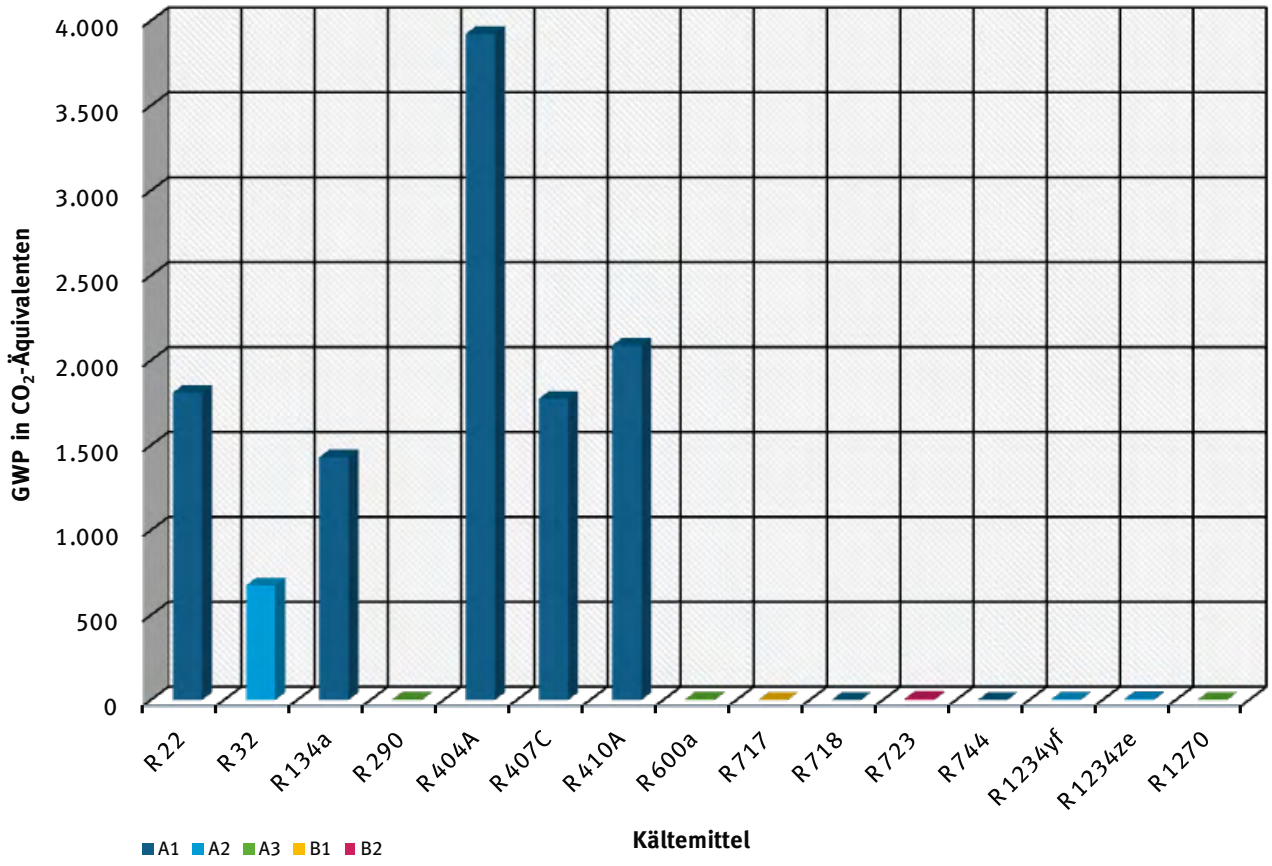
Die Norm enthält die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der jeweiligen Kältemittel, Angaben zu Aufstellungsbedingungen, maximale Füllmengen sowie die notwendigen sicherheitstechnischen Anforderungen.
Die Kältemittel sind in Sicherheitsgruppen anhand ihrer Toxizität (A, B) und Brennbarkeit (1 bis 3) eingeteilt (siehe hierzu auch Abbildung 6).

Die Anlagensysteme werden als direkte und indirekte Systeme klassifiziert. Entscheidungskriterium ist hierbei, ob der Verdampfer im direkten Kontakt mit der zu kühlenden Luft bzw. dem Kühlgut steht oder einen zusätzlichen Wärmeträger (z.B. eine Sole) kühlt.

Die Aufstellungsbedingungen werden grob in die Klassen A bis C eingeteilt. Klasse A umfasst allgemeine Aufstellbereiche, an welchen alle Personen Zutritt haben bzw. Personen schlafen dürfen, Klasse B umfasst überwachte Aufstellungsbereiche, bei denen nur eine begrenzte Personenanzahl Zutritt hat sowie mindestens eine Person mit den allg. Sicherheitsvorkehrungen betraut ist. Büros werden explizit als ein Beispiel für Klasse B benannt. Als Klasse C gelten Aufstellbereiche, an denen nur befugte Personen Zutritt haben.

Abbildung 6

GWP-Werte und Sicherheitsgruppen häufig eingesetzter Kältemittel

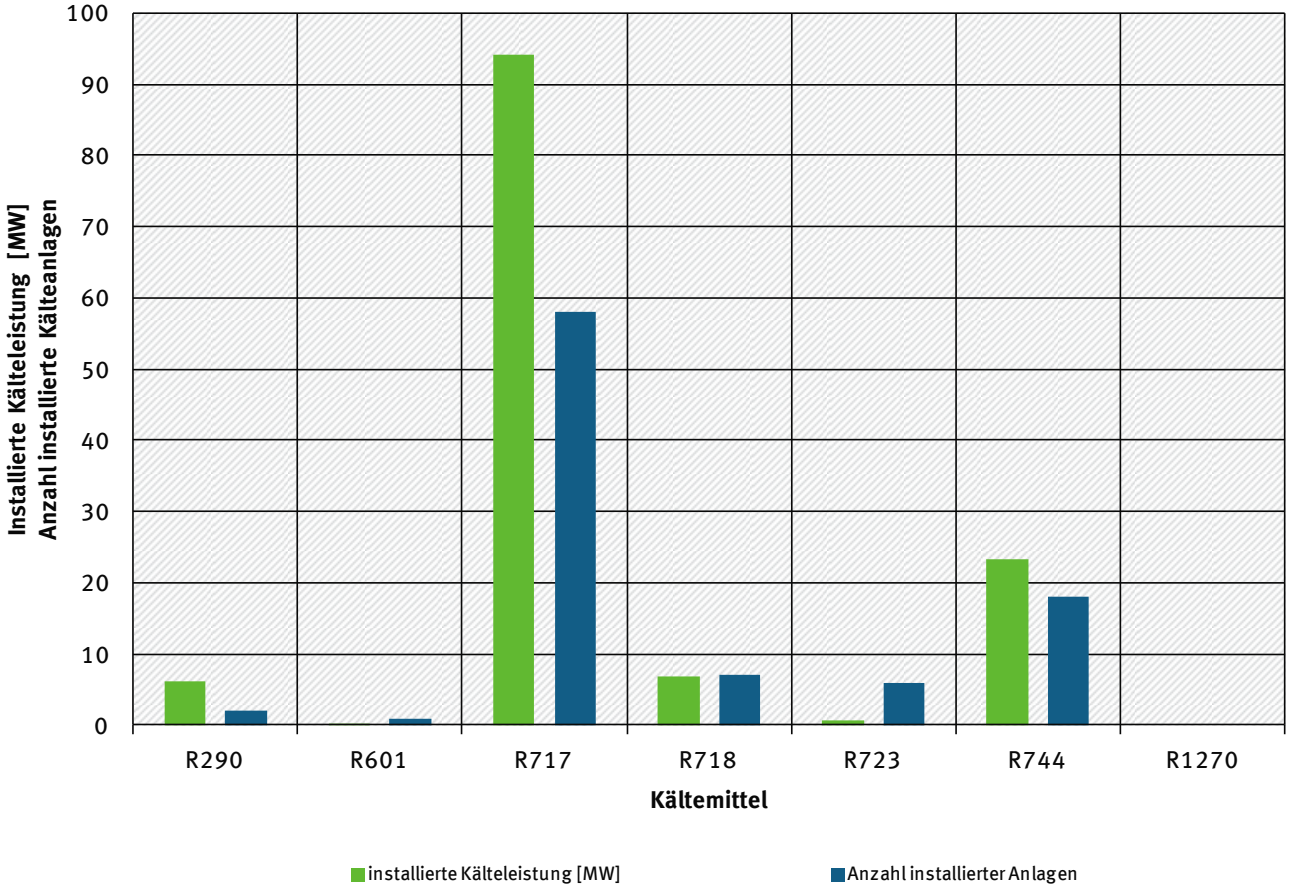


Quelle: Forster, P. & Ramaswamy, V. 4th Assessment Report - Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing IPCC (Intergovernmental panel on climate change), 2007;
DIN EN 378-1 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1, 2011

Abbildung 7

Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln

Recherchierte, zwischen 1998 und 2010 installierte Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln - Anzahl und installierte Kälteleistung



*Es sind überwiegend Anlagen vor Inkrafttreten des Impulsprogramms für gewerbliche Kälteanlagen enthalten.
Seit Inkrafttreten ist zusätzlich ein deutlicher Anstieg der Anzahl von Anlagen mit den Kältemitteln R290 und R744 zu erkennen.

Quelle: Website Eurammon, Fachzeitschriften: KK Die Kälte; KI Luft- und Kältetechnik; KKA Kälte Klima Aktuell; CCI

4 Ansatzpunkte für eine klimafreundlichere Kälteerzeugung

Mithilfe des TEWI werden die Treibhausgasemissionen einer Kälteanlage über den gesamten Lebenszyklus bewertet (siehe Infobox 5 Kältemittel und der Treibhauseffekt auf Seite 14). Im direkten Anteil wird vor allem der Einfluss durch das eingesetzte Kältemittel betrachtet, das durch Leckagen, Austausch und Entsorgung in die Umwelt gelangt. Der indirekte Anteil berücksichtigt den gesamten Energiebedarf der Kälteanlage. Eine kompakte und sehr dichte Ausführung sowie eine energieeffiziente Regelung einer Kälteanlage haben daher einen niedrigen TEWI zur Folge. Der TEWI kann als Maß für die Klimafreundlichkeit einer Kälteanlage herangezogen werden.

In dieser Hinsicht entsprechen viele der heutigen Neuanlagen für die Kälteerzeugung, vor allem in der Gebäudeklimatisierung, nicht dem aktuellen Stand der Technik. Oft werden standardisierte Systeme eingebaut und praktische Argumente wie z.B. die einfache Nachrüstbarkeit in den Vordergrund gestellt. Lokale Gegebenheiten und Einschränkungen bleiben unberücksichtigt. Im Folgenden werden Ansatzpunkte für die Optimierung von Anlagen hinsichtlich der Klimaverträglichkeit und der Energieeinsparung dargestellt, durch die die Betriebskosten einer Kälteanlage langfristig gesenkt werden können.

Bei Klimakälteanwendungen sind die direkten Emissionen durch Leckagen besonders relevant

Aufgrund der klimatischen Verhältnisse werden in unseren Breiten Kälteanlagen für die Gebäudeklimatisierung (Komfortklimatisierung) fast ausschließlich in den Sommermonaten und überwiegend tagsüber betrieben. Aus einer undichten Kältemittelleitung entweicht das Kältemittel aber unabhängig von der Betriebsstundenzahl. Das führt dazu, dass bei Klimaanlagen der direkte Anteil am TEWI durch die Kältemittelfreisetzung im Verhältnis zum Energiebedarf sehr groß ist und in der Minderung der Kältemittelfreisetzung ein hohes Potenzial für mehr Klimafreundlichkeit liegt.

Im Bereich der Industrie- und Prozesskälte steht die Energieeffizienz im Vordergrund

Bei einem saisonal und tageszeitlich konstanten Kältebedarf, wie er bei industriellen Prozessen, in der Nahrungsmittelindustrie oder auch für die Kühlung von Serverräumen besteht, kann der TEWI neben der Anlagendichtheit vor allem durch die Erhöhung der Energieeffizienz des Gesamtsystems verringert werden.

Weniger Umweltbelastung durch natürliche Kältemittel

Die größte Verringerung der Klimawirksamkeit wird erreicht, indem anstelle der konventionellen HFKW-Kältemittel natürliche Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotential eingesetzt werden. Hinsichtlich des Treibhauspotenzials kämen auch synthetische Kältemittel mit einem sehr niedrigen GWP in Frage, wobei hier neben Sicherheitsaspekten und giftigen Verbrennungsprodukten auch weitere Nachhaltigkeitskriterien, die im TEWI nicht enthalten sind, wie der Produktionsaufwand, die biologische Abbaubarkeit und der Entsorgungsaufwand berücksichtigt werden sollten. Unabhängig von der Art des Kältemittels sollte die Leckrate der Kälteanlage minimiert werden. Bei vielen Kälteanlagen muss häufig Kältemittel nachgefüllt werden. Bei bestimmten Kältemitteln (vor allem HFKW) sind Dichtheitsprüfungen durch die F-Gase-Verordnung gesetzlich vorgeschrieben und es besteht für den Betreiber eine Dokumentations- und Nachweispflicht. Mechanische Verbindungsstellen sind die Hauptquelle für Kältemittelleckagen. Lange Kältemittelleitungssysteme, die am Aufstellungsort verlegt werden und besonders viele solcher Verbindungsstellen aufweisen, sind daher besonders anfällig für Leckagen.

Anlagendichtheit durch fest verlötete oder verschweißte Komponenten

Während rund um den Verdichter, die Drosseleinrichtung und meist auch das Rückkühlwerk mit integriertem Kondensator die Leitungen dicht verlötet oder verschweißt sind, werden vor allem bei direktverdampfenden Systemen die Bauteile zur Kälteübergabe in den zu kühlenden Räumen mit Schraubverbindungen angeschlossen (siehe Infobox 7 Multi-Split-Klimageräte). Durch den Überdruck im System kann hier ein Entweichen des Kältemittels in die Umgebung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Insgesamt gilt, je länger die Kältemittelleitungen geführt werden müssen und je mehr Verzweigungen integriert sind, desto größer ist das Risiko undichter Stellen. Diese werden meist nur durch die schwindende Kältemittelmenge bemerkt und sind schwer aufzufinden. In direkten Systemen sind große Kältemittelmengen enthalten, die langfristig auch entsorgt werden müssen. Grundsätzlich können kompakte Kälteanlagen mit einem angeschlossenen Kälteträgernetz, in dem bei nur geringem Überdruck eine Flüssigkeit zirkuliert, geringere Leckraten erreichen. Außerdem müssen erheblich kleinere Kältemittelmengen entsorgt werden.

Stellschrauben zum Senken des Energiebedarfs

Kompakte, ausreichend dimensionierte Kältemittelleitungen

Druckverluste im Kältemittelkreislauf müssen durch den Verdichter unter Verschlechterung der Gesamteffizienz kompensiert werden. Besonders kritisch ist hierbei die dampfführende Saugleitung. Der Druckverlust steigt mit der Länge und der Strömungsgeschwindigkeit der Leitung an. Eine ausreichende Dimensionierung unter Vermeidung unnötiger Leitungslängen und Rohrbögen steigert die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Anlagen.

Mit steigenden Leitungslängen und Rohrdurchmessern, insbesondere der flüssigkeitsführenden Leitungen, steigt die notwendige Kältemittelfüllmenge, die entscheidend für den möglichen Kältemittelverlust bei Leckagen ist.

Daher haben kompakt ausgeführte Kälteanlagen mit kurzen Leitungslängen und kleinen Kältemittelfüllmengen geringere direkte und indirekte TEWI-Werte und sind damit effizienter und wirtschaftlicher.

Vermeidung von Überdimensionierung – Spitzenlastausgleich durch Kältespeicherintegration

Klimaanlagen werden in der Regel für den Fall maximaler Außentemperaturen und zusätzlich meist mit einer Kälteleistungsreserve ausgelegt. Aufgrund der klimatisch bedingten saisonalen Schwankungen werden die Anlagen in der überwiegenden Zeit in Teillast betrieben. In Deutschland erreichen Kälteanlagen für die reine Gebäudeklimatisierung nur selten mehr als 500 Volllaststunden im Jahr. Die Energieeffizienz von Kompressionskälteanlagen ist bei Nennleistung und im oberen Teillastbereich meist optimal und sinkt im unteren Teillastbereich oft deutlich ab. Wird die maximal erforderliche Kälteleistung gesenkt, kann die Kältemaschine insgesamt kleiner dimensioniert werden, was zu einer Erhöhung der Volllaststunden und damit der Energieeffizienz führt. Bei der Gebäudeklimatisierung bieten sich zur Senkung der Kühllast eine Reihe gebäudeintegrierter Maßnahmen an (siehe Abschnitt Klimafreundliche Klimatisierung von Gebäuden ab Seite 25). Darüber hinaus besteht bei indirekten Systemen mit einem Kälteträger die Möglichkeit, einen Kältespeicher in das System zu integrieren (siehe Infobox 8 Kältespeicher). Der Kältespeicher wird nachts durch die Kälteanlage geladen und tagsüber zur Unterstützung der Kälteanlage wieder entladen. Der nächtliche Anlagenbetrieb ermöglicht die weniger energieaufwendige Kondensation bzw. Rückkühlung bei niedrigeren Umgebungstemperaturen als tagsüber und es kann der günstigere Nachtstromtarif genutzt werden. Durch eine verringerte Temperaturspreizung zwischen Verdampfung und Kondensation des Kältemittels (Temperaturhub) muss mit dem Verdichter ein geringerer Druckhub erreicht werden, so dass insgesamt weniger elektrische Energie gebraucht wird. Mit einer zusätzlichen Verdunstungskühlung im Rückkühlsystem, auch adiabatische Kühlung genannt, kann die Kondensationstemperatur ebenfalls abgesenkt werden.

Anhebung der Vorlauf- und Verdampfungstemperaturen

Ein kleinerer Druckhub kann auch mit der Erhöhung der Verdampfungstemperatur erzielt werden. Üblicherweise wird zur Klimatisierung auf 6 °C gekühltes Wasser in ein Kaltwassernetz eingespeist und in den Verbrauchern auf etwa 12 °C erwärmt. In vielen Anwendungsfällen wäre ohne Komforteinbußen auch eine höhere Kaltwassertemperatur als 6 °C möglich. Bei der Bauteilaktivierung bzw. dem Einsatz von Kühldecken sollte eine Temperatur von 16 °C nicht unterschritten werden, da sich ansonsten Kondenswasser daran niederschlägt und von der Decke tropfen kann.

Effiziente Regelung und Leistungsanpassung

Ein weiteres Energieeinsparpotenzial besteht in einer effizienten Regelung des Kältesystems. Mit drehzahlgeregelten Ventilatoren und Verdichtern kann der Energiebedarf im Teillastbetrieb abgesenkt werden. Durch den Einsatz moderner Sensorik ist es möglich, mit verhältnismäßig kurzer Verzögerungszeit einem Raum oder einem Prozess genau die Wärme zu entziehen, die darin erzeugt wird und so die Temperatur konstant zu halten.

Während bei der Prozesskälte die Regelung meist vollautomatisiert erfolgt und auf den Prozess abgestimmt ist, spielt bei der Klimatisierung auch die Sensibilisierung der Personen im Gebäude eine Rolle. So gibt es z.B. die Möglichkeit, dass beim Öffnen des Fensters der Konvektor in einem Raum automatisch abgeschaltet wird. Diese Variante ist vor allem bei Systemen sinnvoll, bei denen einem Raum konditionierte Luft zugeführt wird. Darüber hinaus kann der aktuelle Energieverbrauch für die Klimatisierung angezeigt werden, so dass größere Wärmequellen erkannt und gegebenenfalls reduziert werden können.

Individuelle Konzepte zur Kälteerzeugung zahlen sich aus

Insbesondere für die Klimatisierung größerer Gebäude und in industriellen Betrieben lohnt es sich, ein individuelles Konzept für ein Kältesystem bzw. eine kombinierte Wärme- und Kälteversorgung erstellen zu lassen, in dem die lokalen Anforderungen und Begebenheiten berücksichtigt werden. Die Erstellung und Umsetzung derartiger Konzepte wird von spezialisierten Ingenieurbüros angeboten. Kältesysteme, die speziell für einen Anwendungsfall ausgelegt und optimiert werden, sind zwar durch die Planung und in den Anschaffungskosten teurer als Standardsysteme, zahlen sich jedoch langfristig durch einen gesenkten Energiebedarf und die Nutzung von Synergieeffekten aus. Auf den folgenden Seiten sind einige Möglichkeiten einer solchen Prozessintegration beschrieben.

7 Infobox Multi-Split-Klimageräte

Bei einem Multi-Split-Klimagerät handelt es sich um eine direktverdampfende Kompressionskälteanlage, die sich aus einer Außeneinheit mit Verdichter und luftgekühltem Kondensator, einem Kältemittelleitungssystem und aus im Gebäude installierten Verdampfer-Konvektoren zusammensetzt. Die Kälteleistung kann über einen drehzahlgeregelten Verdichter und den hierdurch variablen Volumenstrom des Kältemittels eingestellt werden. Dieser Anlagentyp wird daher auch als VRF-System (Variable Refrigerant Flow) bezeichnet. Wird an ein Außengerät nur ein Verdampfer-Konvektor gekoppelt, handelt es sich um ein Mono-Split-Gerät. Durch Umkehr der Kondensations- und Verdampfungsfunktion können Mono- und Multi-Split-Systeme auch zum Heizen der Räume verwendet werden.

VRF-Systeme sind vor allem deshalb weit verbreitet, weil der nachträgliche Einbau bzw. eine Erweiterung in Bestandsgebäuden im Vergleich zu anderen Systemen einfach umzusetzen ist und die Investitionskosten verhältnismäßig gering ausfallen. Ein weiterer Vorteil ist die flexible Regelbarkeit bei einem 3-Rohr-Kältemittelleitersystem, das zusätzlich zur Hochdruck-Flüssigkeits- und Niederdruck-Sauggasleitung eine Hochdruck-Gasleitung beinhaltet. Bei dieser Ausführung können direkt nebeneinander liegende Konvektoren individuell zum Heizen oder zum Kühlen verwendet werden. Neben dem Komfortgewinn wird eine Steigerung der Leistungszahl erreicht, da im günstigsten Fall der Ventilator der Außeneinheit außer Betrieb ist.

Hinsichtlich der Klimawirksamkeit bringen Multi-Split-Systeme in der jetzigen Form und Installationsart einige Nachteile mit sich. Durch die langen und verzweigten Kältemittelleitungen und die mit Schraubverbindungen angeschlossenen Konvektoren haben installierte Systeme eine relativ hohe Leckrate. Eine Reduzierung der Leckraten kann durch ein vollständig verlötetes Kältemittelrohrsystem (inkl. Anbindung der Inneneinheiten) erreicht werden. Alternativ kann durch den Einsatz des natürlichen Kältemittels Kohlendioxid das Treibhauspotenzial gesenkt werden. Andere natürliche Kältemittel scheiden aus technischen bzw. Sicherheitsgründen aus. Lediglich in Mono-Split-Klimageräten mit sehr geringen Kältemittelmengen wird Propan eingesetzt.

Die Jahresgesamtkosten für indirekte Systeme mit einem Kälteträgernetzwerk und VRF-Systeme liegen in der gleichen Größenordnung.

8 Infobox Kältespeicher

Die Entkopplung von Kälteerzeugung und Kälteverbrauch durch Einbindung eines Kältespeichers führt bei schwankendem Kältebedarf zu niedrigeren Lastspitzen und hat zudem den Vorteil, dass innerhalb kurzer Zeit eine große Kälteleistung zur Verfügung gestellt werden kann. Darüber hinaus kann mit einem Kältespeicher beim Ausfall der Kältemaschine für eine gewisse Zeit der Kältebedarf weiterhin gedeckt werden.

In der Kälte- und Klimatechnik werden hauptsächlich thermische Speicher mit den Speichermedien Wasser, Sole oder Wasser/Eis eingesetzt. Zunehmend werden Geothermiesonden zur Nutzung des Erdreiches als Kältespeicher herangezogen.

Der Vorteil der latenten Kältespeicherung im Eis liegt darin, dass auf relativ kleinem Raum eine große Kältemenge gespeichert werden kann. Im Vergleich zu einem sensiblen Wasserspeicher ergibt sich bei gleicher Kältemenge ein ca. 13-fach reduziertes Volumen. Die Eiserzeugung erfolgt nach diversen Methoden und auf unterschiedliche Weise, vom gleichmäßigen Zufrieren des gesamten Speichers in einen Eisblock bis hin zu einem fließfähigen Wasser-Eis-Gemisch (Slurry-Eis). Dieses wiederum kann auch direkt als Kälteträger im Verteilungsnetz eingesetzt werden.

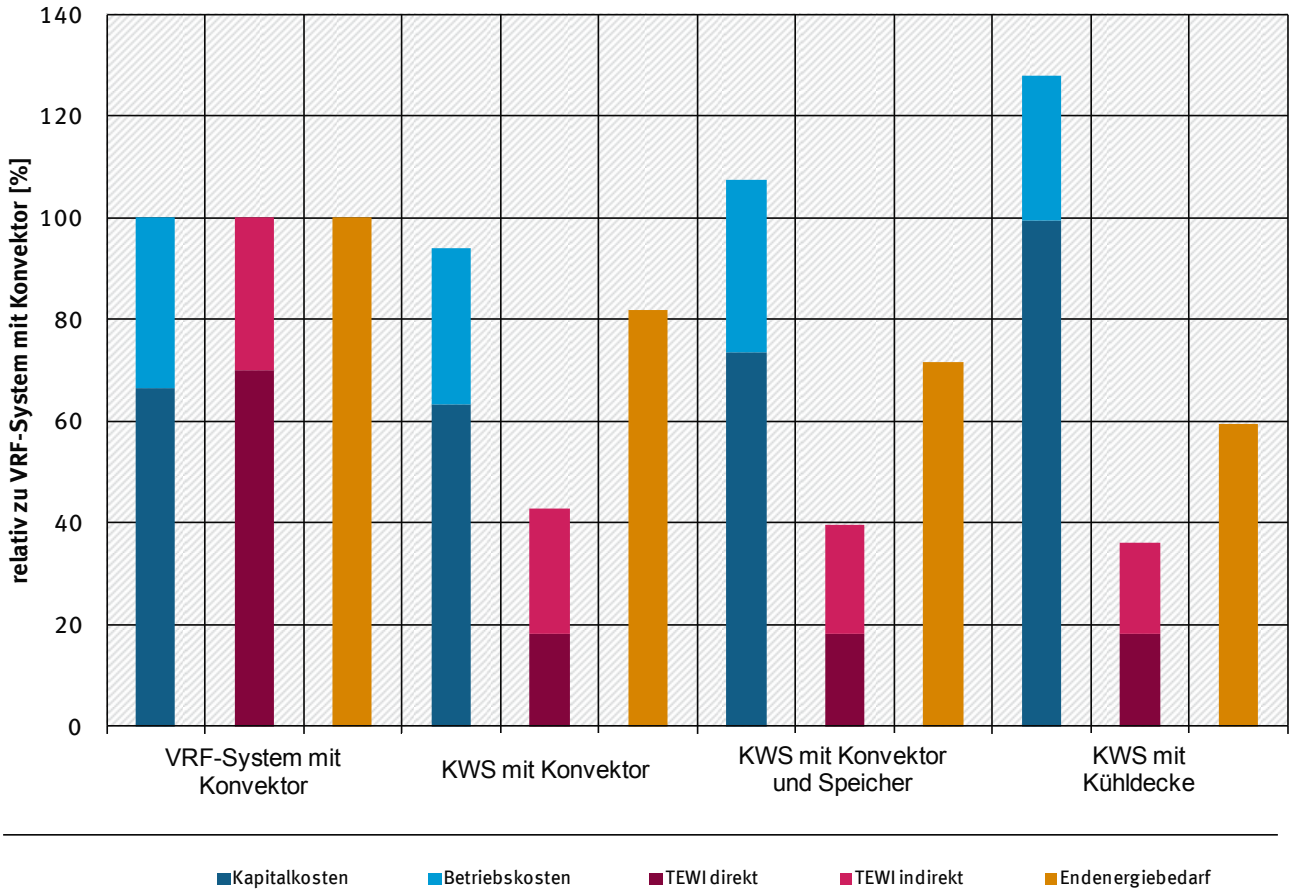
Durch die Zugabe von Salz bzw. organischen Substanzen kann der Gefrierpunkt des Eises im begrenzten Maß unter 0°C abgesenkt werden. Für Tieftemperaturanwendungen muss auf wasserfreie Solen bzw. Stickstoff zurückgegriffen werden.

Die Kühlung des Speichers bzw. die Beladung mit Eis erfolgt zu Zeiten einer schwachen Auslastung des Kältesystems. Üblicherweise liegen diese in der Nacht, so dass für den Betrieb der Kältemaschine günstige Nachtstromtarife genutzt werden können. Aufgrund einer Rückkühlung bei niedrigeren Außentemperaturen erfolgt die Kälteerzeugung energieeffizienter.

Abbildung 8

Vergleich von Kosten, TEWI und el. Endenergiebedarf

für ein klimatisiertes Bürogebäude - Datenbasis: Simulation am Standort Frankfurt (mittleres Jahr)

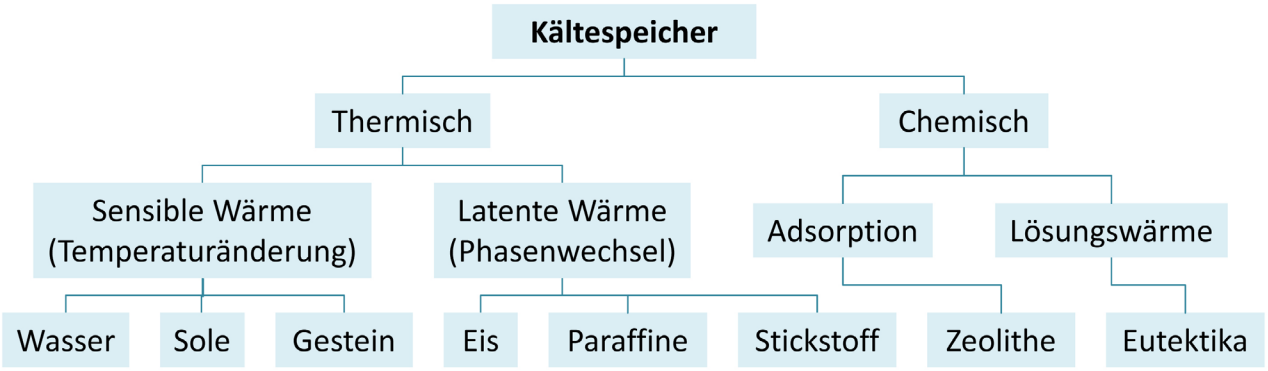


Quelle: Heinrich, C. & Wittig, S. et. al: Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie, ILK Dresden im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2014

Abbildung 9

Kältespeicher

Verschiedene Funktionsprinzipien



Quelle: ILK Dresden

Abbildung 10

Vakuumeisspeicher

Kältespeichersystem mit Slurry-Eis-Erzeugung im Direktverdampfungsprozess

Quelle: ILK Dresden

5 Energieeffizienz durch Prozessintegration und Auswahl geeigneter Verfahren

Wird am Standort Elektroenergie erzeugt, beispielsweise durch ein BHKW, kann die entstehende Abwärme im Winter zur Beheizung der Gebäude dienen. Im Sommer kann diese Abwärme zur Klimakälteerzeugung durch eine Absorptionskältemaschine genutzt werden.

Neben diesem klassischen Beispiel kommen in der Praxis zahlreiche weitere Möglichkeiten in Betracht, Synergieeffekte anfallender Energieströme zu nutzen.

Energie- und Kosteneinsparung durch geschickte Kopplung der Prozesse

Das Ziel der Prozessintegration ist eine Energie- und damit Kosteneinsparung durch geschickte Kopplung einzelner, ohnehin anfallender Energieströme aus den gleichen bzw. anderen Prozessen. Hier lautet die prinzipielle Frage: *Wann fällt wo Energie in welcher Form (Strom, Wärme) an? Kann man diese Energie nutzen?*

Zudem muss ein Abgleich mit dem Bedarf erfolgen. *Wann wird wo Energie in welcher Form benötigt?* Gibt es Überschneidungen hinsichtlich Energiemenge und zeitlichem Auftreten? Können zeitliche Differenzen durch wirtschaftlich akzeptable Speicherlösungen ausgeglichen werden?

Einsatz wärmegetriebener Kälteerzeugung

Ab- und Adsorptionskältemaschinen sind technisch sinnvoll mit Heizwassertemperaturen über 75 °C zu betreiben.

Abwärme aus KWK-Anlagen unter wirtschaftlichen und nachhaltigen Kriterien sinnvoll

Auch Fernwärme aus Kraftwerken kann als Antriebswärme zur Kälteerzeugung genutzt werden. Hier sollten aus ökologischen Gründen nur Kraftwerke ausgewählt werden, die bereits mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) arbeiten. Für die Bereitstellung von Abwärme aus Kraftwerken zur Kälteerzeugung außerhalb der Heizperiode können besondere Konditionen ausgehandelt werden, da die Netzbetreiber an einer kontinuierlichen Wärmeabnahme über das Jahr hinweg interessiert sind. Da der KWK-Strom in der Regel Strom aus kohlebeheizten Kondensationskraftwerken verdrängt, werden in der Summe meist CO_2-Emissionen eingespart.

Bei vorhandener oder geplanter Integration eines BHKWs am Standort kann die Wirtschaftlichkeit durch Erhöhung der Vollbenutzungsstundenzahl durch die sommerliche Abwärmenutzung zur Kälteerzeugung (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) gesteigert werden.

Solare Kälteerzeugung nur bei ganzjähriger Wärmenutzung und sinnvollen Backup-Lösungen wirtschaftlich vertretbar

Solare Kälteerzeugungssysteme erfordern hohe Investitionskosten. Wirtschaftlich sind sie nur bei ganzjähriger Nutzung der solarthermischen Anlage wie z.B. zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung sinnvoll.

Bei zwingend zu deckendem Kältebedarf sind bei Nutzung von Solarwärme sog. Backup-Systeme zur Absicherung der Kälteleistung notwendig. Als Backup-Systeme kommen Kompressionskälteanlagen oder eine alternative Wärmeversorgung in Betracht. Die Backup-Wärmeerzeugung auf der Basis fossiler Brennstoffe ist in aller Regel ökonomisch wie ökologisch nicht sinnvoll.

Wärmerückgewinnung

Bei der Kälteerzeugung fällt Wärme auf einem Temperaturniveau oberhalb der Umgebungstemperatur an. In Kompressionskälteanlagen treten dabei abhängig vom Kältemittel und der Anlagengestaltung Druckgastemperaturen nach Verdichteraustritt von bis zu 100 °C auf.

Abwärme von Kompressionskälteanlagen zur Brauchwassererwärmung - Investitionsförderung

Durch Einbringen eines Enthitzers oder eines Wärmerückgewinnungs-Kondensators kann Wärme ausgekoppelt und z.B. zur Brauchwasser- oder Lufterwärmung genutzt werden. Das Investitionsförderprogramm für gewerbliche Kälteanlagen unterstützt die Installation von Wärmerückgewinnungskonzepten

mit einem zusätzlichen Bonus von 10 % (weitere Information im Abschnitt zur Wirtschaftlichkeit).

Kombination von Kompressions- und Absorptionskälteanlagen

In vielen Fällen stellt die Kombination von Kompressions- und Absorptionskältemaschinen eine klimaschonende und wirtschaftliche Variante dar. Gründe, die hierfür sprechen, sind z.B.:

- Absorptionskälteanlagen zeigen bei abnehmendem Temperaturhub einen nur minimalen Anstieg des Wärmeverhältnisses, weisen jedoch ein sehr gutes Teillastverhalten bei konstantem Temperaturhub auf.
- Die Effizienz von Kompressionskälteanlagen steigt unter Berücksichtigung technischer Voraussetzungen (z.B. elektronische Expansionsventile) mit abnehmendem Temperaturhub deutlich an.
- Abwärme ist nicht dauerhaft bzw. nicht dauerhaft kostengünstig verfügbar.
- Unter bestimmten Bedingungen ist keine effiziente Kältebereitstellung durch Absorptionskältemaschinen möglich (z.B. sehr großer Temperaturhub).
- Nur ein Teil der Kälte muss auf einem sehr tiefen Temperaturniveau bereitgestellt werden.

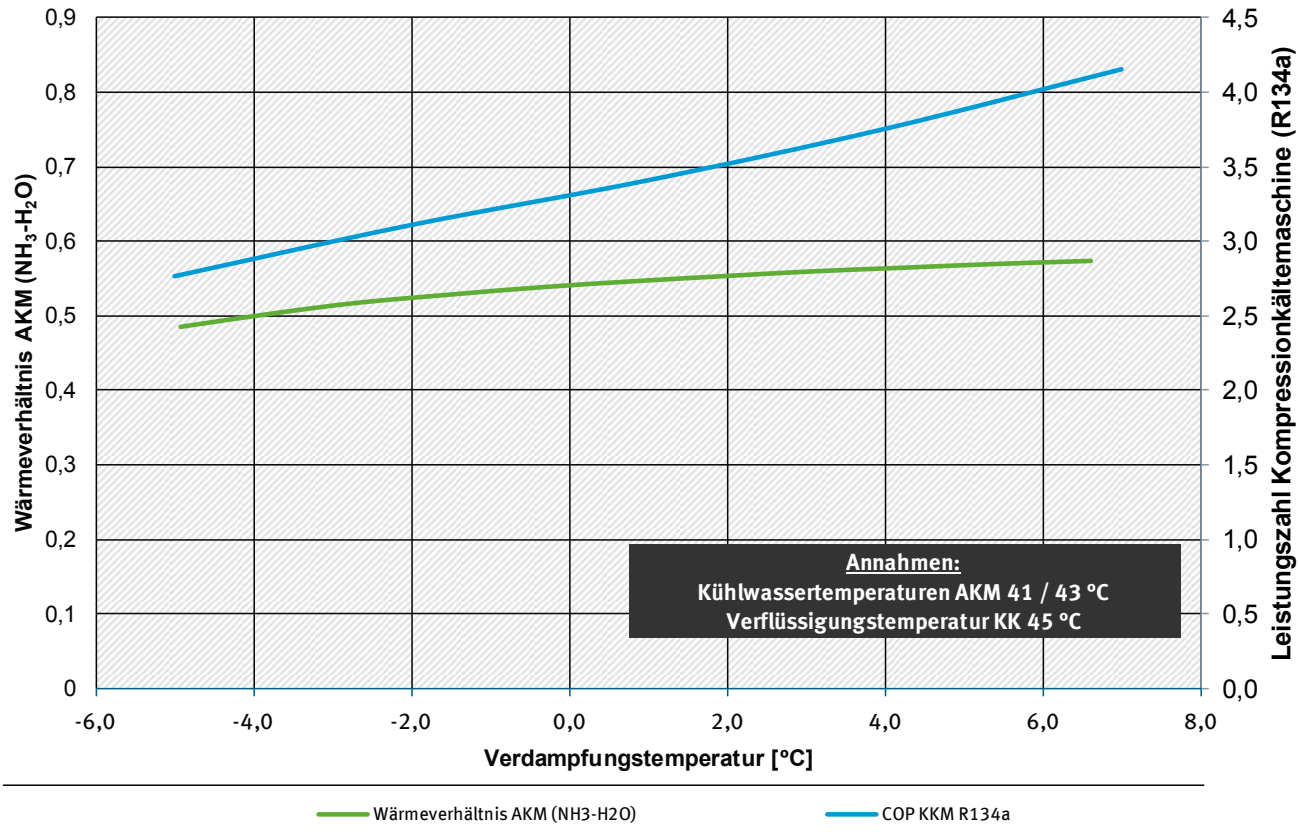
Technisch sind zahlreiche Kombinationen von Absorptions- und Kompressionkälteanlagen möglich. Hierzu zählen z.B. die Kaskadenschaltungen oder der Parallelbetrieb von einzelnen oder mehreren Anlagen. Ein gutes Beispiel stellt hierbei das in Abbildung 12 dargestellte Energieversorgungskonzept am Standort eines großen Halbleiterherstellers dar. Ein optimiertes Kältekonzept ist in Abhängigkeit der individuellen Randbedingungen zu erarbeiten. Hierbei sind folgende Punkte zu beachten:

- Deckung der Grundlast durch Absorptionskälteanlagen, Deckung der Spitzenlast durch Kompressionskälteanlagen.

Abbildung 11

Vergleich der temperaturabhängigen Kälteerzeugungseffizienz

von Kompressions- und Absorptionskälteanlagen

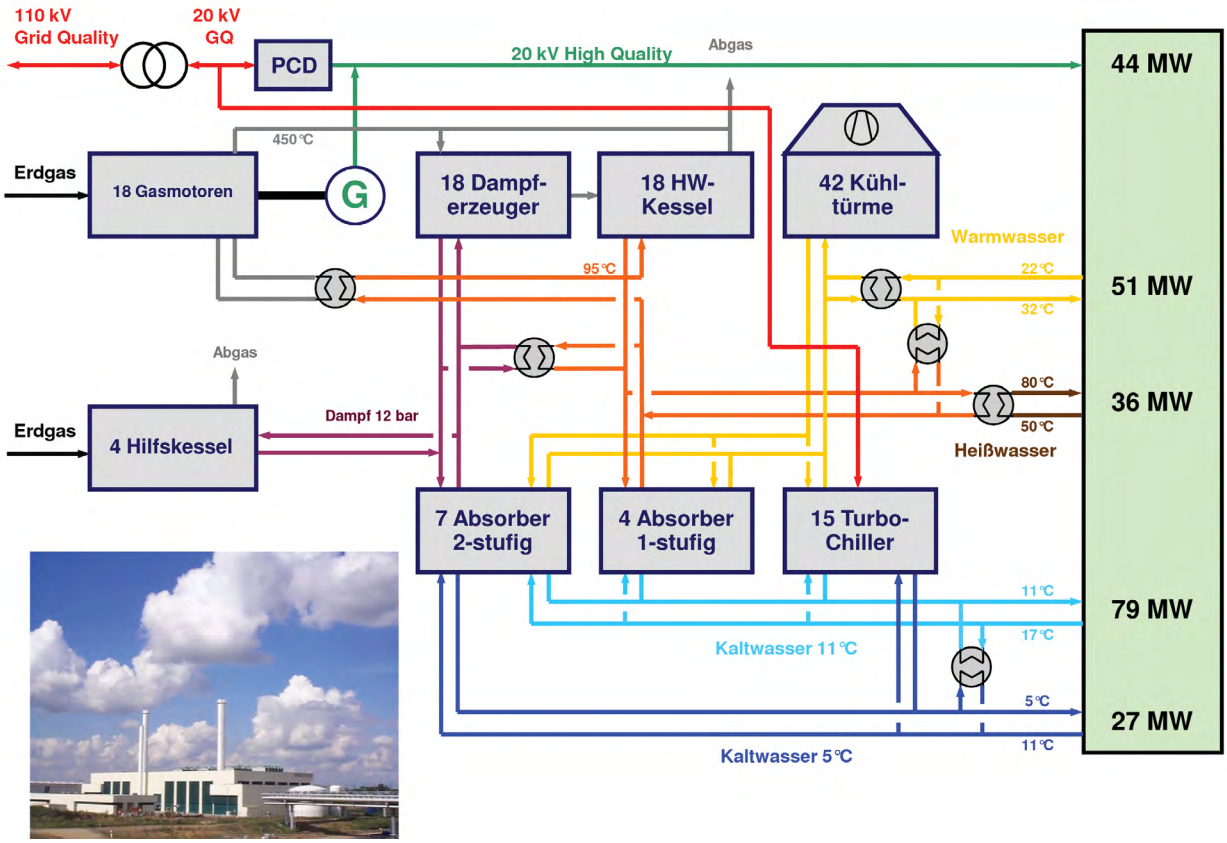


Quelle: ILK Dresden

Abbildung 12

Energieversorgungskonzept eines großen Halbleiterwerks

Einsatz von 7 zweistufigen, 4 einstufigen Absorptionskälteanlagen sowie 15 Kompressionskälteanlagen



Quelle: Brinckmann, K., 2008. Einsatz von Absorptionskälteanlagen in industriellen Energieversorgungssystemen der Halbleiterindustrie - 10 Jahre Betriebserfahrungen mit Höhen und Tiefen. Chillventa - ILK Kolloquium.

- Betrieb der Absorptionskälteanlagen möglichst mit konstantem Temperaturhub, zusätzlich notwendigen Temperaturhub durch Kompressionskälteanlagen in Form einer Kaskade realisieren.
- Bei niedrigen Temperaturhüben (z.B. bei niedrigen Außentemperaturen) Effizienzvorteile von Kompressionskälteanlagen nutzen.

Zentralisierung der Erzeugung

In wenigen Regionen gibt es Fernkälte-Netze in Form eines Kaltwassernetzes. Hier werden mehrere Verbraucher gekoppelt, was höhere Investitionskosten für komplexe Kälteerzeugungssysteme zulässt und wodurch die Vorteile von wärmegetriebener Kälteerzeugung, Kompressionskältesystemen und Kältespeicherung genutzt werden können. Solche Netze sind in einigen Städten (z.B. Chemnitz) oder in kleinerer Ausführung auch in einigen Industriegebieten verfügbar.

Bislang wird die Prozessintegration nicht konsequent durchgeführt

Der Energiebedarf für Kälteerzeugung sowie die erzeugte Kälte selbst wird nur in seltenen Fällen durch separate Strom- und Kältemengenzähler bilanziert. Dadurch können die anfallenden Kosten nicht erfasst bzw. nicht gezielt zugeordnet und Optimierungspotenziale zur Effizienzverbesserung und Kostensenkung nicht erkannt werden.

Wird nur auf Basis der Investitionskosten entschieden, sind die dargestellten klimafreundlichen Lösungen wirtschaftlich unterlegen. Berücksichtigt man jedoch, dass insbesondere bei Prozess- und Industriekälte die Betriebskosten im Vergleich zu den Investitionskosten einen wesentlich größeren Anteil an den Lebenszykluskosten ausmachen, lässt sich die Wirtschaftlichkeit klimafreundlicher Lösungen meist darstellen.

Für eine erfolgreiche Prozessintegration ist es zwingend notwendig, dass die technischen Möglichkeiten demjenigen bekannt sind, der für die Ausschreibung und Auswahl der Kälteanlagen verantwortlich ist. Dies trifft jedoch oft weder auf den Betreiber, noch auf die den Betreiber beratende Firma zu.

6 Klimafreundliche Klimatisierung von Gebäuden

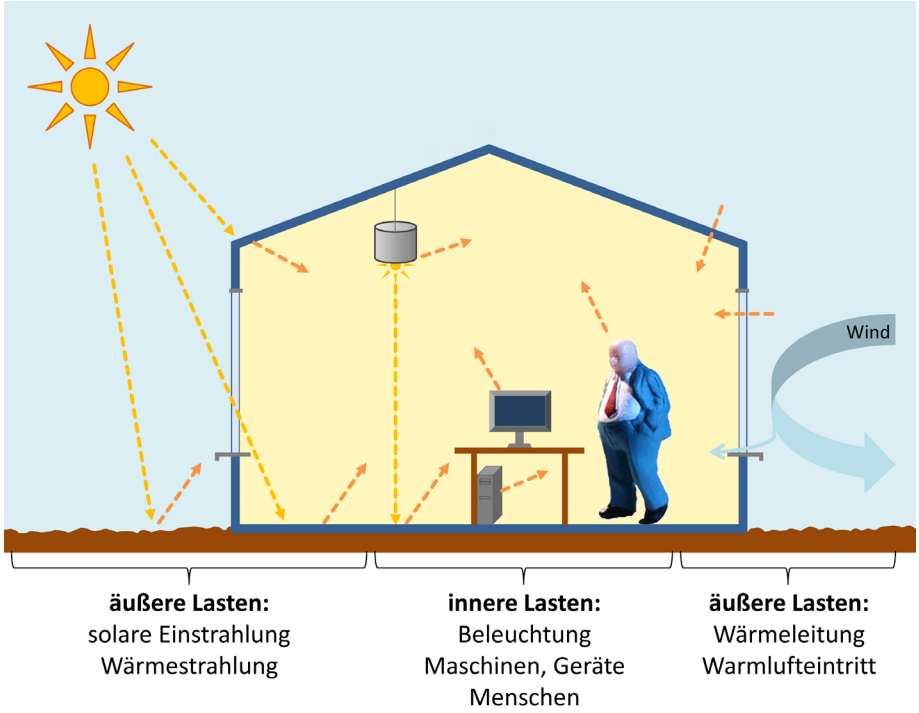
Das mitteleuropäische Klima ist geprägt von jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Temperatur, des Niederschlages und der solaren Einstrahlung. Folglich variiert der Kältebedarf eines Gebäudes über das Jahr. Im Winter muss der Raumluft vorwiegend Wärme und Feuchtigkeit zugeführt werden. Dagegen erfordert die erhöhte Außentemperatur und Sonneneinstrahlung im Sommer eine Senkung der Raumtemperatur (sensible Last) und gegebenenfalls zusätzlich eine Entfeuchtung der Luft (latente Last). Das Raumklima, das sich sowohl auf das Wohlbefinden als auch auf das Leistungsvermögen der sich im Raum aufhaltenden Personen auswirkt, wird nach bestimmten Behaglichkeitskriterien (EN ISO 7730; DIN 4108-2; DIN EN 15251) beurteilt.

Behaglichkeit als Summe der Lufttemperatur und der Temperatur der umgebenden Wände

Die gefühlte Temperatur, auch operative Temperatur genannt, hängt von der Raumlufttemperatur, der Strahlungstemperatur der umgebenden Flächen und der Luftfeuchte ab. Der Einfluss der Luftfeuchte auf die gefühlte Temperatur ist eher gering. In der EN ISO 7730 sind in Abhängigkeit verschiedener Parameter Maximalwerte für die operative Temperatur festgelegt. So sollte zum Beispiel bei durchschnittlichen Bedingungen in einem Büro (Luftgeschwindigkeit unter 0,2 m/s, 40-60% relative Luftfeuchte und geringer körperlicher Tätigkeit) im Sommer bei normalen Anforderungen eine operative Temperatur von 26 °C nicht überschritten werden.

Abbildung 13

Kühllast eines Gebäudes Bei der Gebäudeklimatisierung zu berücksichtigende Lasten



Quelle: IHK Dresden

Klimafreundliche Klimatisierung beginnt bei der Gebäudeplanung

Der Kühlenergiebedarf wird bestimmt durch die äußeren und inneren Lasten eines Gebäudes (siehe Abbildung 13). Die äußeren Lasten umfassen die solare Einstrahlung, die Wärmeleitung durch die Gebäudehülle und das Eindringen warmer Außenluft in das Gebäude. Mit einer zunehmend verbesserten Wärmedämmung wird vor allem den letzteren beiden Aspekten effizient begegnet. Jedoch führt der nach wie vor bestehende Trend zu Glasfassaden und hellen lichtdurchfluteten Räumen nahezu unabhängig von der gewählten Dämmung zu einem massiven Eintrag von Strahlungswärme in das Gebäude.

Die inneren Lasten werden durch Wärmequellen im Gebäude erzeugt. Hierzu zählen vor allem Maschinen, elektrische Geräte (in Bürogebäuden insbesondere die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)), Beleuchtung und sich im Gebäude aufhaltende Menschen.

Maßnahmen zur Reduzierung der Kühllasten

Zur Senkung der inneren Lasten spielt die Wahl der elektrischen Ausstattung eine bedeutende Rolle. Eine moderne IKT und der Einsatz von LED-Systemen und Energiesparlampen reduzieren neben dem elektrischen Energiebedarf auch die Kühllast eines Gebäudes.

Bei den äußeren Lasten müssen neben einer effizienten Wärmedämmung auch Maßnahmen gegen die Wärmestrahlung getroffen werden. Da alle transparenten Flächen von Wärmestrahlen durchdrungen werden, ist eine Lochfassade bei der Klimatisierung gegenüber einer Glasfassade immer im Vorteil. Weiterhin gibt es viele Möglichkeiten zur Verschattung des Gebäudes zur Minderung des Solareintrags. Dabei sind außen angebrachte Module innenliegenden Jalousien immer vorzuziehen, da so die Strahlung gar nicht erst ins Gebäudeinnere eindringen kann. Außenliegende Module, mit denen meist auch Bestandsgebäude nachgerüstet werden können, sind in zahlreichen Varianten, z.B. in Form von Sonnensegeln oder massiven Fensterläden, verfügbar. Es gibt fixe und bewegliche Systeme, die wiederum manuell bedient oder je nach Sonnenstand automatisiert der Sonne nachgeführt werden. Bei Neubauten kann durch geeignete Fassadenkonstruktionen (z.B. Lamellenfenster mit Ausrichtung nach Norden oder Osten) und Gebäudeintegrierte Belüftungssysteme (z.B. Nachtauskühlung) die Kühllast eines Gebäudes gering gehalten werden. Zudem steht mit der thermischen Bauteilaktivierung eine effiziente Methode zur Verfügung, bei der die Gebäudemasse für die Temperaturregulierung genutzt wird (siehe Infobox 9 Thermische Bauteilaktivierung).

Neben der Verschattung besteht auch die Möglichkeit den Effekt der Verdunstung auszunutzen. Bodenversiegelung und dichte Bebauung führen in Städten oft zur Bildung von Hitzeinseln. Durch Begrünung der Flächen zwischen Gebäuden oder gar der Gebäude selbst wird sowohl eine zusätzliche Verschattung als auch ein positives Mikroklima erreicht.

Vermeidung von Kälteanlagen durch passive Kühlkonzepte

Werden Maßnahmen zur Reduzierung der Kühllasten konsequent verfolgt und passive Kühlkonzepte wie z.B. die Nachlüftung oder Fassadenbegrünung intelligent umgesetzt, kann im Idealfall der Einsatz einer Kältemaschine entfallen. Hierdurch wird neben einer erheblichen Kosteneinsparung auch eine hohe Einsparung an Treibhausgasemissionen erreicht, da kein Kältemittel eingesetzt wird und die verbrauchsbedingten CO_2-Emissionen gering sind. Ein behagliches Raumklima kann zwar nicht über den gesamten Jahreszeitraum garantiert werden, praktische Erfahrungen zeigen jedoch bei gut ausgeführten Konzepten eine vertretbare Anzahl von Stunden einer Überschreitung der zulässigen Raumtemperaturen. Auch bei herkömmlichen Klimaanlagen mit Kühlung über Konvektoren können Behaglichkeitskriterien nicht immer eingehalten werden. Ursache ist die fehlende Feuchteregulierung, die insbesondere bei tiefen Verdampfungs- bzw. Vorlauftemperaturen zu zu niedrigen Luftfeuchtewerten jenseits der Behaglichkeitsgrenze führt.

Kälteanlagen hauptsächlich nur für Sommermonate

Auch bei vorhandener Klimaanlage ist die Umsetzung passiver Maßnahmen zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs wichtig. Den erhöhten Kapitalkosten durch die passiven Maßnahmen stehen deutlich geringere Betriebskosten für die Klimatisierung gegenüber.

Auf sinnvolle Dimensionierung der Kälteanlage achten

In Deutschland weisen Klimaanlagen in aller Regel nur 200-500 Volllaststunden pro Jahr auf, was einem Vollbenutzungsgrad von unter 6 % entspricht. Neben den klimatischen Bedingungen liegt ein weiterer Grund für die geringe Auslastung von Klimaanlagen in der Anlagenauslegung, die neben Sicherheitsfaktoren auch zukünftige Pläne der Betreiber, wie z.B. Gebäudeerweiterungen, berücksichtigt. Dadurch werden Gebäudeklimaanlagen häufig überdimensioniert. Problematisch ist hierbei, dass die überwiegend eingesetzten Kompressionskälteanlagen im niedrigen Teillastbereich (< 50% der Nennlast) eine sehr niedrige Energieeffizienz aufweisen. Das bedeutet, dass diese für die Bereitstellung kleinerer Kälteleistungen im Verhältnis eine hohe elektrische Leistungsaufnahme benötigen und somit die Leistungszahlen im realen Betrieb deutlich tiefer liegen (oft < 3) als in der Anlagenspezifikation angegeben.

Zur besseren Auslastung der Anlagen bieten sich Systeme an, die sich sowohl für das Beheizen als auch für die Kühlung von Räumen eignen. Solche Lösungen sind insbesondere für indirekte Systeme (z.B. reversible Wärmepumpen in Verbindung mit Bauteilaktivierung) sowie für direktverdampfende Systeme (z.B. Split-Geräte) möglich.
Eine weitere innovative Alternative bzw. Ergänzung zur klassischen Klimaanlage mit einer Kompressionskälteanlage stellt eine raumlufttechnische Anlage (RLT) mit einem offenen, sorptionsgestützten Klimasystem dar (siehe Infobox 11 Offene, sorptionsgestützte Klimasysteme).

Klimatisierung als fester Bestandteil eines Gebäudekonzeptes

Eine umweltfreundliche Gebäudeklimatisierung ist mitunter Voraussetzung für eine erfolgreiche Vermarktung moderner Immobilien. Bei Neubauten sollten energieeffiziente, klimafreundliche Kühlsysteme bereits bei der Erstellung des Gebäudekonzeptes berücksichtigt werden. Hierzu müssen sich Architekten, Haustechniker, Gebäudebetreiber und Handwerker bereits frühzeitig abstimmen. Durch eine geeignete Gebäudegestaltung kann der Kälteenergiebedarf mit passiven Maßnahmen deutlich reduziert werden. Eine für die lokalen Bedingungen optimal ausgelegte Kälteanlage kann unter Umständen zwar höhere Kapitalkosten verursachen, diese werden jedoch langfristig durch einen geringeren Energieverbrauch wieder ausgeglichen.

9 Infobox: Thermische Bauteilaktivierung

Die thermische Bauteilaktivierung nutzt für die Regulierung der Raumtemperatur im Gebäude vorhandene Massivbauteile. Hierfür werden in Betondecken, gelegentlich auch in Wänden, Rohrleitungen oder Kapillarrohrmatten aus Kunststoff verlegt, die mit temperiertem Wasser durchströmt werden und so eine gleichmäßige Heizung/Kühlung des Gebäudes bewirken. Der Wärmetransport zur Raumkonditionierung erfolgt gleichzeitig durch Strahlung und Konvektion, die parallel ablaufen. Dabei wird die Wärme zu großen Teilen über Strahlung (etwa 90 Prozent beim Heizen bzw. 60 Prozent beim Kühlen) und entsprechend anteilig über Konvektion dem Raum zugeführt bzw. entzogen. Die Geschossdecken werden passiv ohne direkte Einflussmöglichkeiten des Raumnutzers entladen. Wegen der großen Systemträgheit kann die Raumtemperatur nicht individuell und schnell geregelt werden. Die Kombination von Bauteilkühlung mit weiteren RLT-Anlagen ist problemlos möglich.

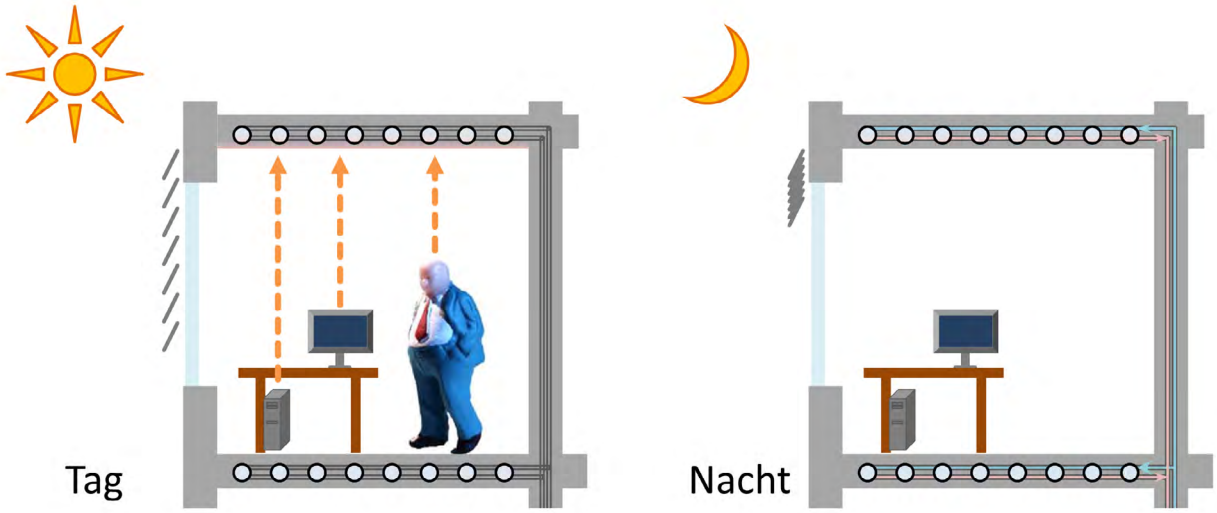
Niedrige Investitionskosten
Thermisch aktivierte Bauteile überzeugen durch niedrige Investitions- und Betriebskosten. In der Ortbetonausführung werden werkseitig vorgefertigte Rohrregister an die bauseitige obere Bewehrung der Betondecke gehängt. In Spannbeton-Fertigdecken werden die Rohrregister bereits in den unteren Plattenspiegel der Fertigdecke integriert und anschlussfertig geliefert. Dies ermöglicht einen zügigen Baufortschritt.

Effizient – Anbindung unterschiedlicher Kälte- und Wärmequellen möglich
Kühlkonzepte mit thermischer Bauteilaktivierung werden den Forderungen nach hoher Energieeffizienz und den bestehenden Nutzungspflichten für erneuerbare Energien nach dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) gerecht. Damit an den kühlen Flächen eine Kondensatbildung vermieden wird, werden die Systeme mit raumnahen Temperaturen, beispielsweise von 16 °C im Vorlauf und 20 °C im Rücklauf versorgt. Als Kältequellen bieten sich regenerativen Energiequellen wie z.B. Erdsonden, Grundwasser und Nachtluft an. Dabei wird lediglich Energie für die Verteilung der Kälte aufgewendet und nicht für die Erzeugung mithilfe von Kompressionskältemaschinen. Für die energieeffiziente Gebäudeheizung kann die Bauteilaktivierung beispielsweise zur Deckung von Grundlasten in Kombination mit Wärmepumpen eingesetzt werden.

Lastspitzenglättung und zeitliche Entkopplung von Kühlbedarf und Deckung
Die thermische Bauteilaktivierung reduziert Lastspitzen, verschiebt Kühllasten auf Schwachlastzeiten und ermöglicht kleiner dimensionierte Wärme- und Kälteerzeuger.
Beim Kühlen wird die in den Massivbauteilen gespeicherte Wärmeenergie meistens über Nacht abgeführt, so dass am folgenden Tag wieder behagliche Raumtemperaturen eingehalten werden können.

Abbildung 14

Thermische Bauteilaktivierung
zyklische Funktionsweise: Aufnahme der Raumwärme am Tag, Kühlung der Betonkörper in der Nacht



Quelle: ILK Dresden

10 Infobox: Fassadenbegrünung

In nicht-urbanen Gebieten bewirkt ein Großteil der Strahlungsenergie der Sonne Verdunstung (latente Wärme) und nur ein kleiner Teil eine fühlbare Erwärmung (sensible Wärme). In Städten verschiebt sich dagegen dieses Verhältnis sehr stark hin zum sensiblen Wärmeanteil. Im ungünstigen Fall (z.B. Bitumendach) wird der latente Wärmeanteil sehr klein. Dies führt zu einer starken Erwärmung der Oberflächen sowie der Luftmassen (Urban Heat Island Effekt). Durch eine Dach-/Fassadenbegrünung kann auch im urbanen Bereich ein größerer Anteil der eingestrahlten Wärme zur Verdunstung genutzt und die Gebäudeoberflächentemperatur abgesenkt werden. In Abhängigkeit der verdunsteten Wassermenge wird eine Reduzierung der äußeren Lasten bis hin zu einem Kühleffekt durch die Gebäudehülle erreicht.

Das abfließende Regenwasser kann aufgefangen und zur Erzeugung adiabater Verdunstungskälte in RLT-Anlagen oder gebäudeintegrierter Anlagen (z.B. Teich mit Wasserverrieselung im Innenhof eines Gebäudes) genutzt werden.
Weitere Information sind u.a. auf der Internetseite des Berliner Senats für Stadtentwicklung und Umwelt zu finden:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/de/informationen/publikationen.

11 Infobox: Offene, sorptionsgestütze Klimasysteme

Bei offenen Verfahren erfolgt die Kühlung der Luft direkt und ohne separaten, geschlossenen Kältemittel- bzw. Kaltwasserkreislauf. Diese Verfahren werden bei der Gebäudeklimatisierung in Lüftungsanlagen zur Konditionierung der Zuluft eingesetzt. Das Verfahren wird häufig auch als Desiccative and Evaporative Cooling (DEC) bezeichnet. In einem ersten Schritt wird die Zuluft mit einem Sorptionsmittel entfeuchtet. Zum Einsatz kommen hierfür feste Adsorbentien wie Silikagele oder flüssige Absorptionsmittel wie Lithiumchlorid. Anschließend erfolgt eine adiabate Kühlung der Zuluft durch Einsprühen und Verdunsten von Wasser. Die Regeneration des Sorptionsmittels erfolgt unter Wärmezufuhr über die Abluft. Daher ist für die Wirtschaftlichkeit des Systems die Verfügbarkeit von günstiger Abwärme von Bedeutung. Häufig wird die Wärme auch solar bereit gestellt.

Gezielte Ent- und Befeuchtung möglich
Vorteilhaft bei offenen sorptionsgestützten Kühlsystemen ist vor allem, dass neben der Temperatur auch die Luftfeuchte eingestellt werden kann. Es kommen keine klimaschädlichen HFKW-Kältemittel zum Einsatz. Die Kühlleistung kann über die Luftaustauschrate im Raum und begrenzt über die Zulufttempe-

Abbildung 15

Fassadenbegrünung Physikgebäude in Berlin-Adlershof

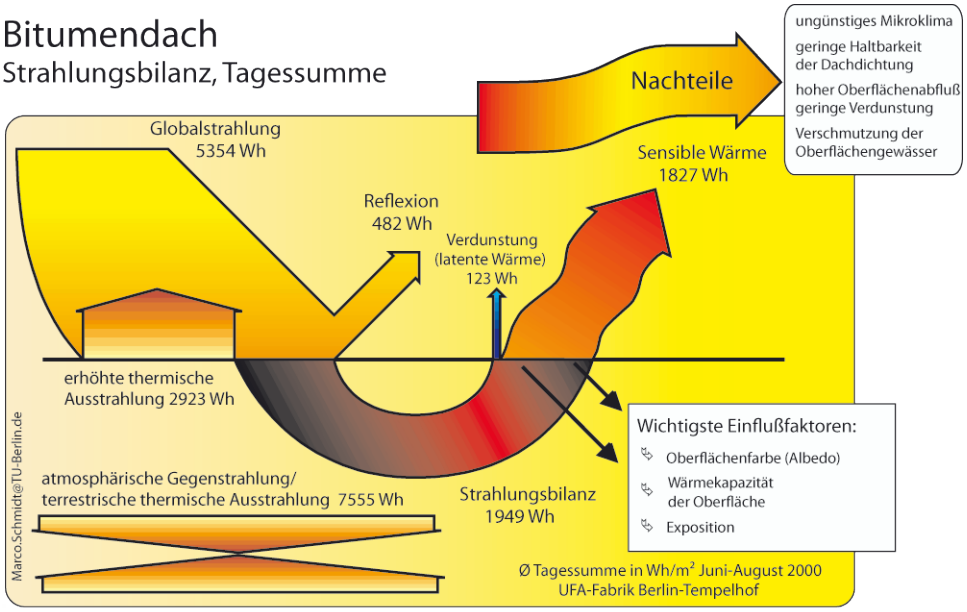
Quelle: TU Berlin

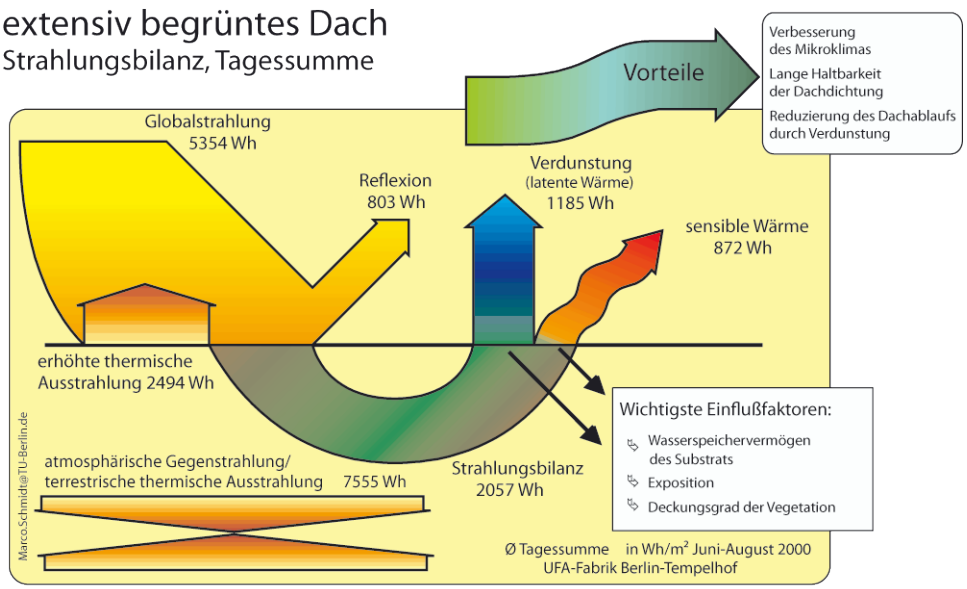
ratur beeinflusst werden, wobei sich ein zu großer Luftstrom negativ auf das Zugempfinden und damit auf die Behaglichkeit auswirkt. Problematisch sind die benötigten großen Belüftungskanäle zur Verteilung der konditionierten Luft und Rückführung der Abluft, die neben dem Platzbedarf zu einem recht hohen elektrischen Energiebedarf des Systems führen können. Das System ist vor allem geeignet für Gebäude, in denen nur kurze Luftkanäle zu realisieren sind und eine definierte Luftfeuchte benötigt wird, bzw. große Feuchtelasten zu erwarten sind. Die DEC-Anlage ist als alleiniges System für schwankende Kühllasten meist energetisch nicht effizient. In der Kombination von DEC-Anlagen mit thermischer Bauteilaktivierung zur Senkung der Spitzenlasten kann allerdings eine sehr effektive und umweltschonende Klimatisierung erreicht werden.

Abbildung 16

Strahlungsbilanz eines Daches

Vergleich der Strahlungsbilanzen an einem Bitumen- sowie an einem extensiv begrünten Dach





Quelle: TU Berlin

7 Wirtschaftlichkeit und Marktverfügbarkeit

Fördermöglichkeiten klimafreundlicher Kältesysteme

Ob sorptionsgestützte Klimatisierung, ein Kaltwassersatz mit natürlichen Kältemitteln oder eine andere klimaschonende Lösung: hinsichtlich der Investitionskosten stellen an der Klimafreundlichkeit orientierte Systeme oft nicht die günstigste Variante dar. Die Wirtschaftlichkeit von Anlagen wird aber oft entscheidend von den Verbrauchs- und Wartungskosten mitbestimmt. Mit einer Investitionskostenförderung durch das Impulsprogramm zur Förderung von Maßnahmen an Kälte- und Klimaanlagen in Unternehmen können die Mehrkosten klimafreundlicher Systeme in vielen Fällen vollständig gedeckt werden (siehe Infobox 12 Impulsprogramm).

Steigende Kosten für HFKW-Kältemittel durch Novellierung der F-Gase-Verordnung

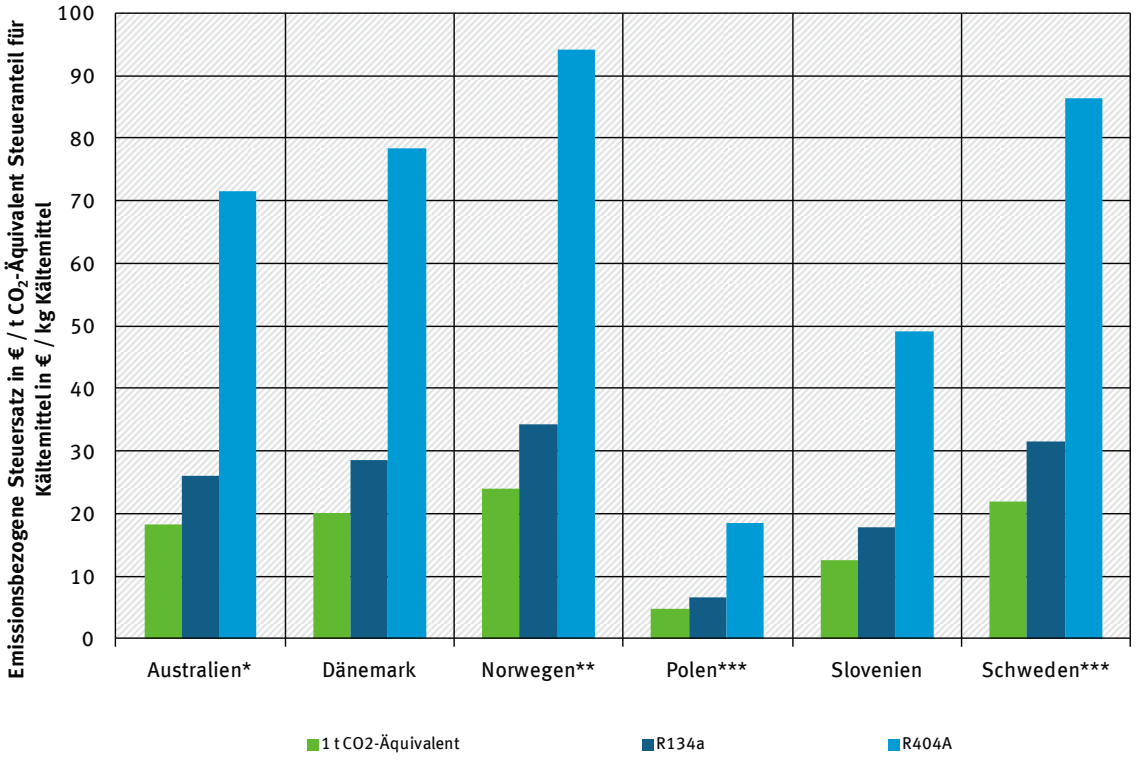
Durch die neue F-Gase-Verordnung (Verordnung (EU) Nr. 517/2014), die für die EU eine künstliche Verknappung von HFKW vorsieht, sowie der Einführung einer vom Treibhauspotenzial abhängigen Allokationsgebühr ist mit steigenden Betriebskosten für Kompressionskälteanlagen mit HFKW-Kältemitteln zu rechnen. Neben den reinen Kältemittelkosten werden für Anlagen mit herkömmlichen HFKW-Kältemitteln auch durch die geplante Verschärfung der Häufigkeit der geforderten Dichtheitskontrollen höhere Wartungskosten entstehen.

Als Anreiz zur Minimierung der direkten Emissionen von HFKW-Kältemitteln haben Dänemark, Norwegen und Australien eine auf die Treibhauswirkung

Abbildung 17

Besteuerung von HFKW-Kältemitteln

Steuersätze bezogen auf CO_2-Äquivalent bzw. auf die Kältemittel R134a und R404A im inner- und außereuropäischen Raum



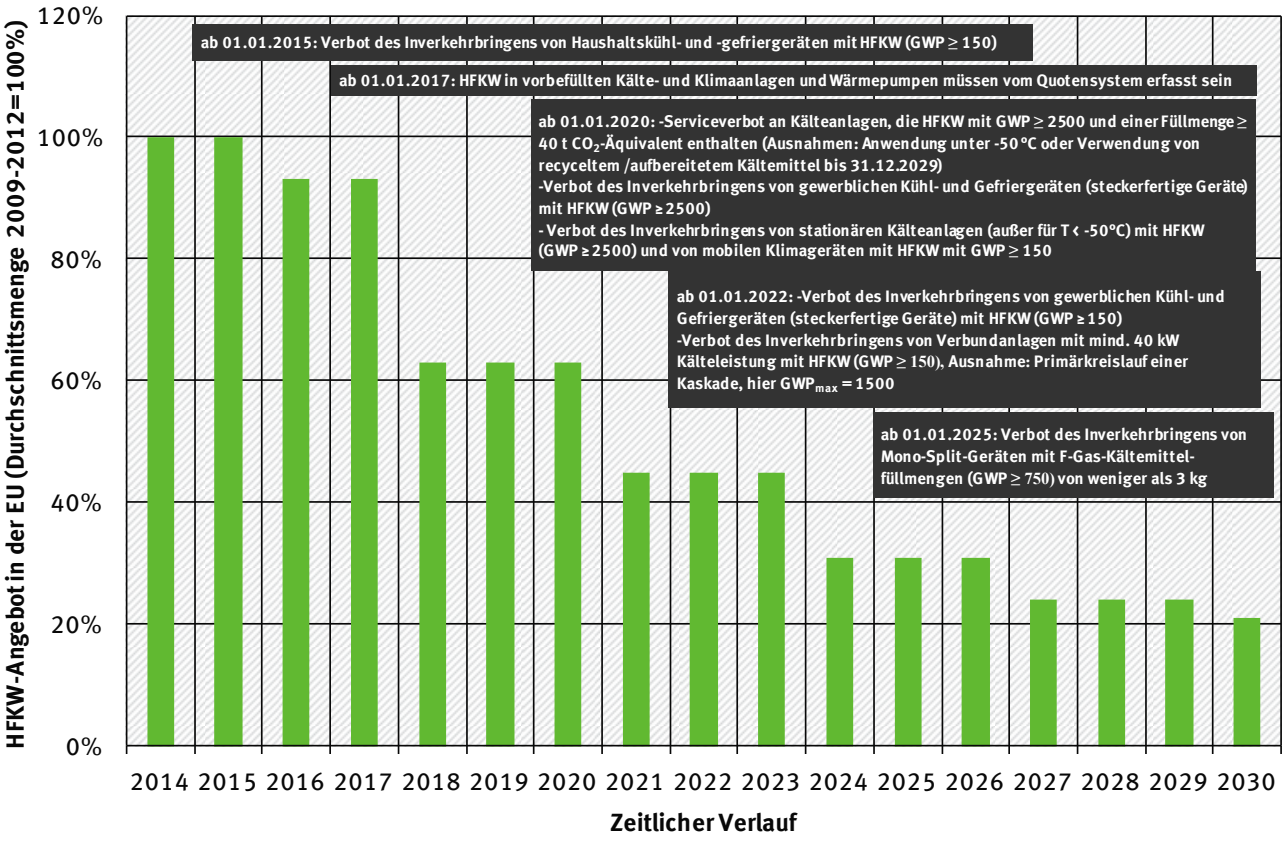
* jährliche Steuer-Steigerungsraten von 5% sind gesetzlich fixiert
** Ausführung als Pfand -> Anreiz zur sachgerechten Entsorgung
*** Gesetzesentwürfe, entgültige Entscheidung im Parlament steht noch aus

Quelle: Honeywell: Präsentation „Carbon taxes on HFCs“, 2012
Rhiemeier, J.-M.; Harnisch, J.; Ters, C.; Kauffeld, M. & Leisewitz, A. Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und –geräten für den Supermarkt Ecofys GmbH, Hochschule Karlsruhe, Ökorechereche GmbH i.A. Umweltbundesamt, 2008

Abbildung 18

Mengenbegrenzung der HFKW-Verkaufsmengen gemäß Vorschlag für eine EU-F-Gase-Verordnung

Zeitlicher Verlauf sowie Zeitpunkte des Inkrafttretens von im Vorschlag enthaltenen Verboten



Zulässige in Verkehr zubringende HFKW Menge gemessen am CO_2-Äquivalent, bezogen auf den Mittelwert von 2009 bis 2012

Quelle: ILK Dresden, Umweltbundesamt

bezogene Besteuerung von Kältemitteln eingeführt. In weiteren Ländern, wie z.B. Polen, Schweden und Slowenien liegen Gesetzentwürfe vor. Abbildung 17 veranschaulicht die Steuerhöhe bezogen auf 1 t CO_2-Äquivalent sowie für die beiden gängigen HFKW-Kältemittel R134a und R404A. Insbesondere für Anlagen mit großen Füllmengen (hierzu zählen im Allgemeinen direktverdampfende Systeme wie z.B. Multi-Split-Geräte) entstehen bei Leckagen erhebliche Kosten für das Nachfüllen des Kältemittels.

Gemäß der neuen EU-F-Gase-Verordnung wird die verfügbare Menge an HFKW stufenweise abgesenkt. Der zeitliche Verlauf der stufenweisen Absenkung ist in Abbildung 18 dargestellt. Ausschlaggebend ist dabei nicht die Masse der Stoffe in metrischen Tonnen, sondern deren Gewichtung nach CO_2-Äquivalenten. Der Preis für ungesättigte HFKW-Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial, wie z.B. R1234yf, liegt bei etwa dem 10 bis 15-fachen des Preises für herkömmliche HFKW-Kältemittel.

Bezieht man diese zukünftigen Entwicklungen in die Lebenszykluskosten mit ein, können vermeintlich preiswerte Systeme zu höheren Gesamtkosten führen.

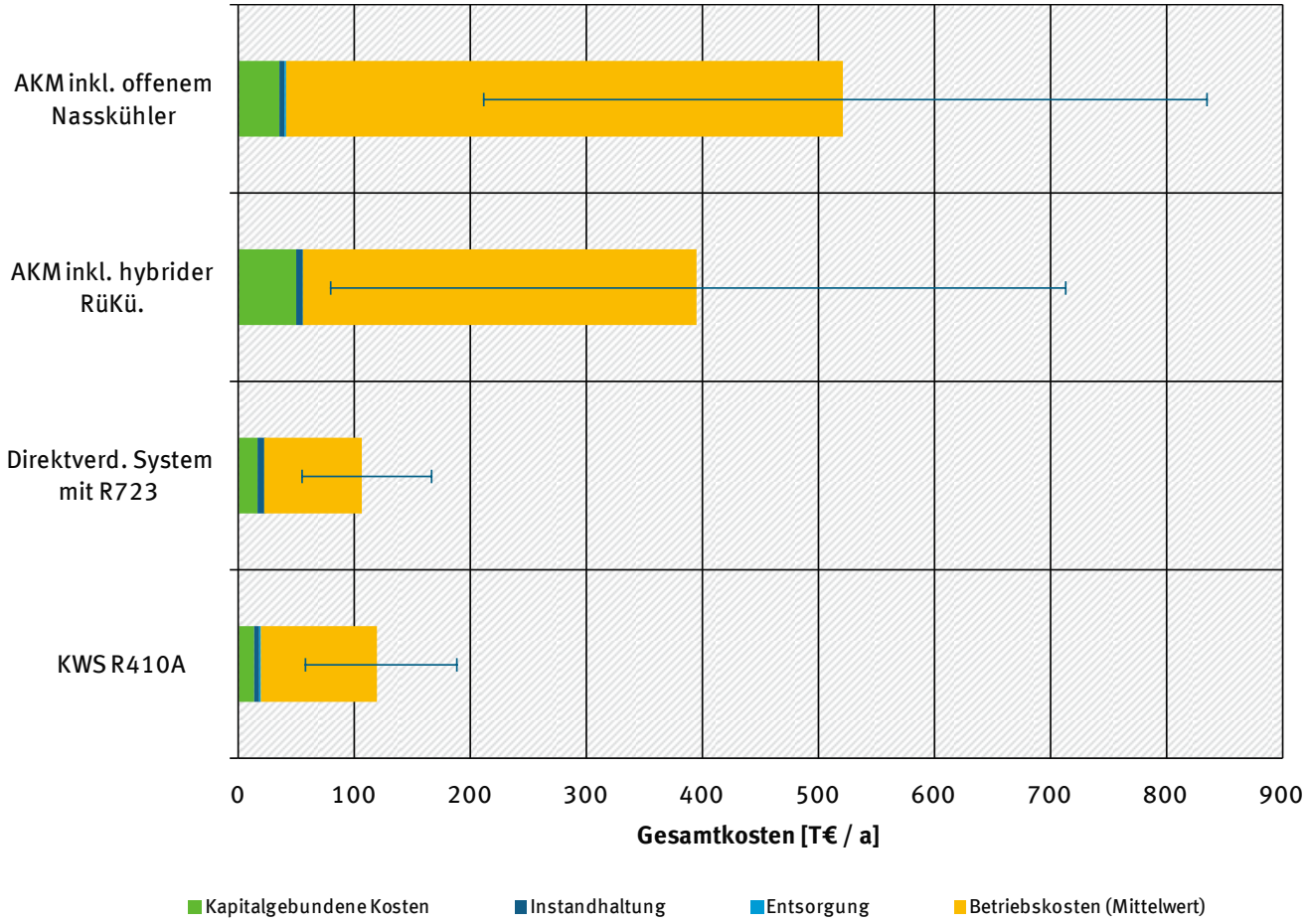
Auf Elektroenergiebedarf bei Sorptionskälteanlagen achten

Die Wirtschaftlichkeit von Sorptionskälteanlagen ist erheblich von den Randbedingungen abhängig. Wichtig sind insbesondere niedrige bzw. keine Wärmebereitstellungskosten, eine gute Planung und Ausführung der Anlagen mit hohem elektrischen EER-Wert (Elektroenergiebedarf für Pumpen und MSR-Technik zur Kältebereitstellung – gute Anlagen liegen bei Werten zwischen 15 und 25) und eine hohe Vollbenutzungsstundenzahl.

Abbildung 19

Jahresgesamtkosten untersuchter Kältesysteme für den Bereich Industriekälte

Annahmen: Kühlbedarf konstant 500 kW, Kälteträgertemperatur 1 °C, Klimabedingungen: Frankfurt (Main) durschnittliches Jahr



Der Vergleich beinhaltet die drei Systeme:
- direktverdampfendes Kompressionskältesystem mit dem Kältemittel R134a, Verdampfungstemperatur 1 °C (KKM direkt verd. R134a);
- Kompressionskälteanlage ausgeführt als Kaltwassersatz mit dem Kältemittel R410A, Verdampfungstemperatur -2 °C (KKM mit KWS R410A);
- Absorptionskälteanlage mit dem Stoffpaar Ammoniak/Wasser, Verdampfungstemperatur -2 °C (AKM NH_3/H_2O)

Das Spektrum der Betriebskosten – verursacht durch die Betrachtung verschiedener Kostenszenarien – wird durch die Fehlerbalken ersichtlich.

Quelle: Heinrich, C. & Wittig, S. et. al: Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industriekälte, ILK Dresden im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2014

In Abbildung 19 sind die Kostenszenarien für Industriekälteanlagen mit über das Jahr konstantem Kältebedarf dargestellt. Hierbei ist die hohe Spanne in den Gesamtkosten (Fehlerbalken) durch die mögliche Spanne der Wärme- und Wasserbereitstellungskosten bedingt. Deutlich günstigere Bedingungen für Sorptionskälteanlagen werden bei näherungsweise konstantem Temperaturhub der Kälteerzeugung erreicht. Ursache ist die von den externen Bedingungen im Vergleich zu Kompressionskälteanlagen unabhängige Leistungszahl. Die gewünschten Bedingungen können beispielsweise über eine Absorptions-Kompressions-Kaskade erreicht werden. Hierbei sind weit höhere Betriebskosteneinsparungen möglich.

Bei fehlendem Kapital…

Zunehmend interessante Möglichkeiten ergeben sich auch durch den direkten Einkauf von Kälte (→ Energie-Contracting) oder der direkten Finanzierung von Technologien zur Effizienzverbesserung durch Finanzdienstleister (Energieeinspar-Contracting), die die Energieeinsparungen als Geschäftsmodell verstehen. Beispiele hierzu finden sich z.B. auf der Plattform Energy Efficiency in Industrial Processes (→ www.ee-ip.org).

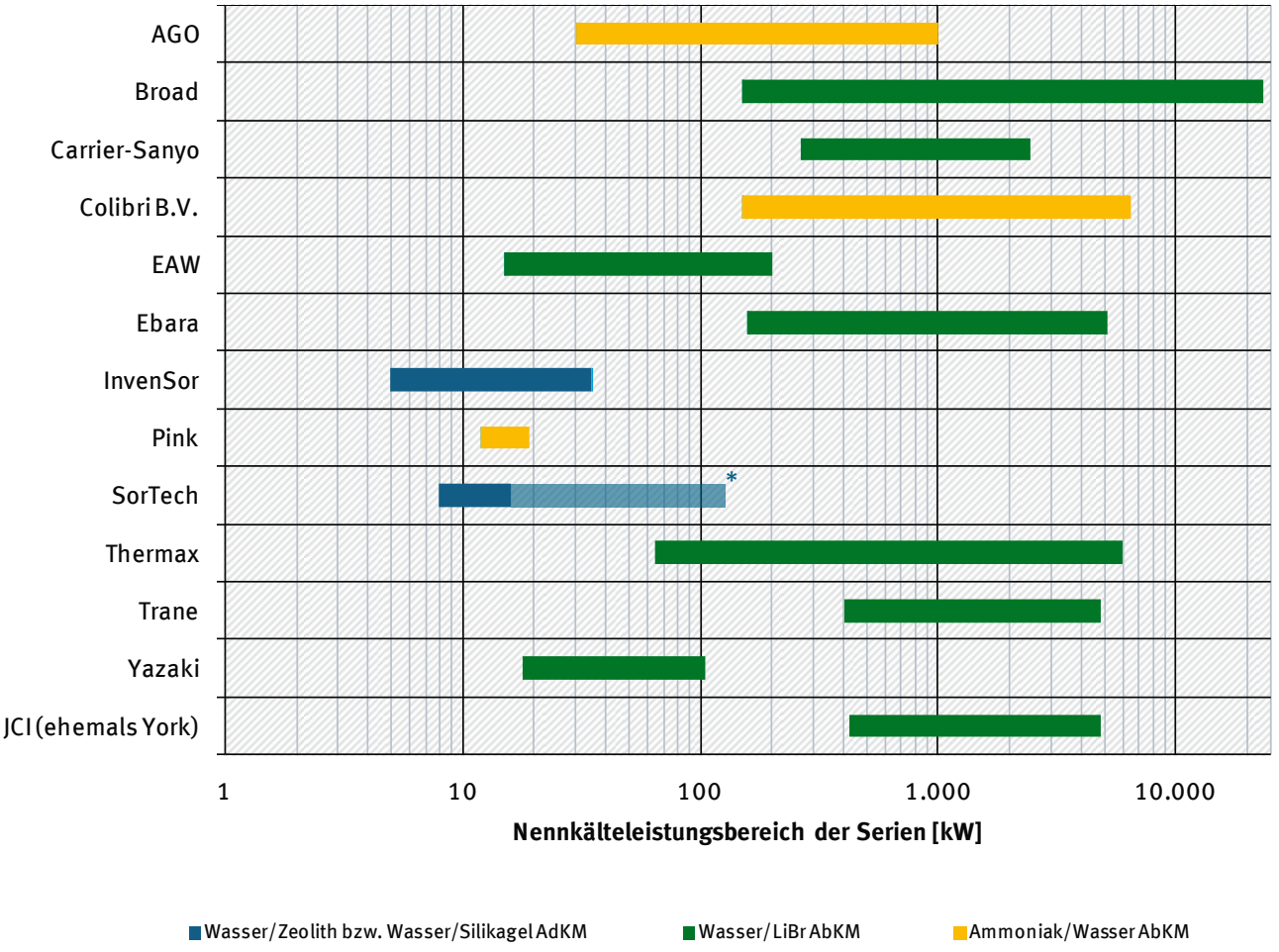
Marktverfügbarkeit

Der Bedarf an klimafreundlicher Kältetechnik ist vorhanden. Was bietet der Markt? Die nachstehenden Abbildungen geben einen kurzen Überblick über verfügbare Serienprodukte bei Kaltwassersätzen mit natürlichen Kältemitteln sowie bei ein- und zweistufigen Ab- und Adsorptionskälteanlagen. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Insbesondere bei den Kaltwassersätzen bieten viele Hersteller anstatt Serienprodukte individuelle Lösungen an, die zusätzlich am Markt verfügbar sind.

Neben Kaltwassersätzen gibt es auch bei Mono- und Multi-Split-Klimageräten Entwicklungen mit natürlichen Kältemitteln. Hierzu zählen z.B. ein VRF-Multi-Split-System mit dem Kältemittel CO_2 sowie Mono-Split-Klimageräte mit dem Kältemittel Propan von indischen und chinesischen Herstellern.

Abbildung 20

Marktübersicht einstufiger Ad- und Absorptionskälteanlagen

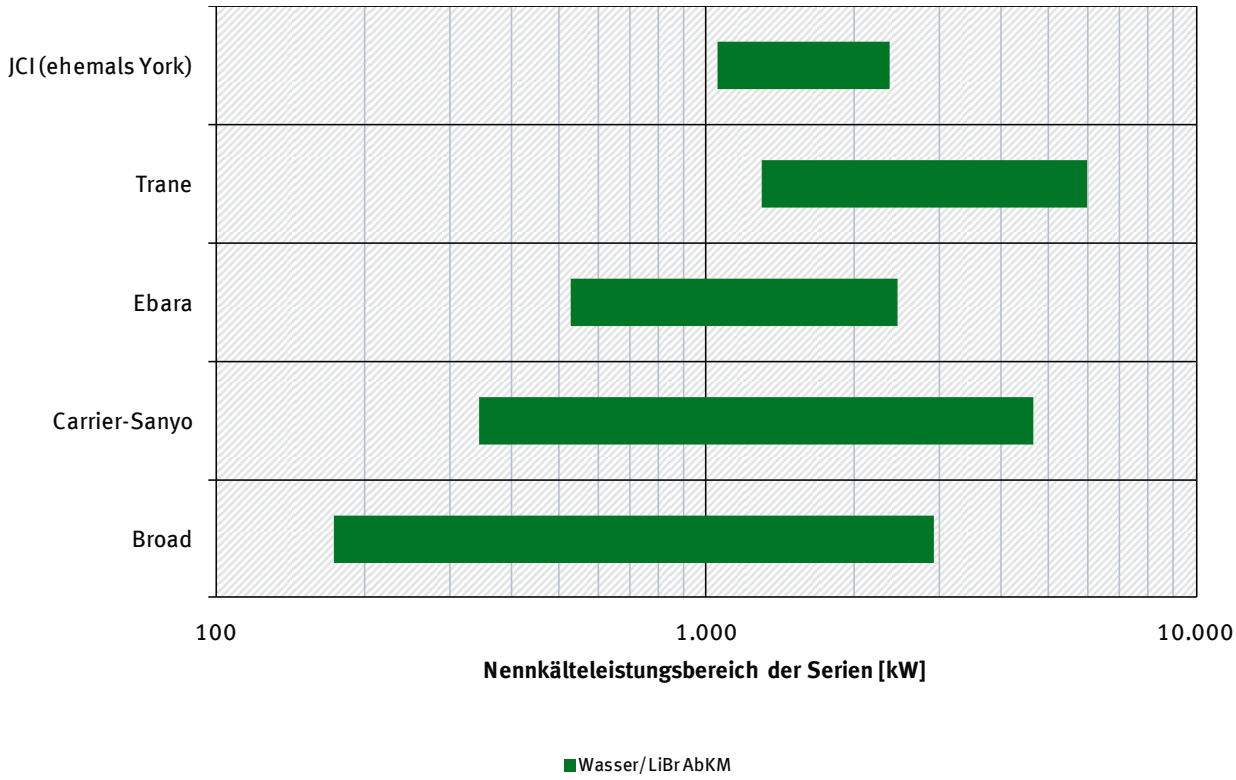


* über Kaskadierungs-Pakete eCoo 2.0

Quelle: ILK Dresden

Abbildung 21

Marktübersicht zweistufiger Absorptionskälteanlagen

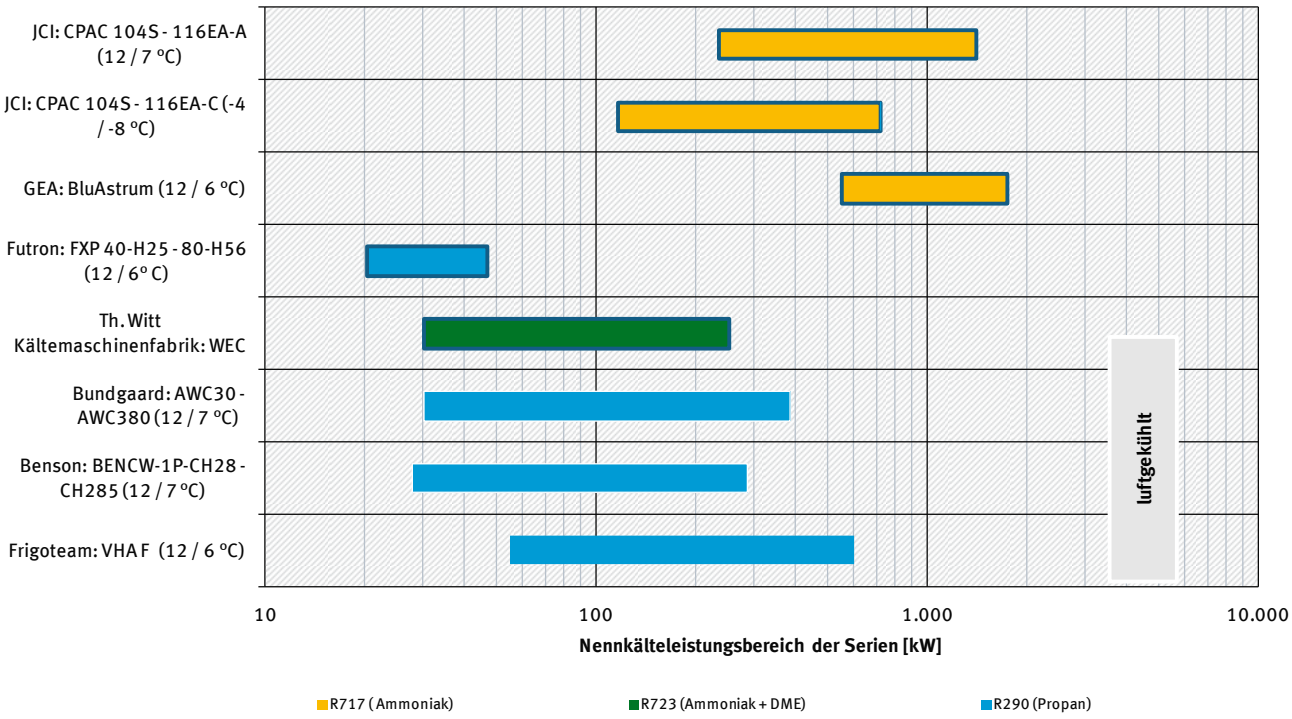


Quelle: ILK Dresden

Abbildung 22

Diagramm KWS natürlich KM

Seriengeräte



Quelle: ILK Dresden

12 Infobox: Impulsprogramm „Gewerbliche Kälteanlagen“ – novellierte Richtlinie

Fördergegenstand:

- Kompressions*kälte*anlagen mit einer elektrischen Antriebsleistung der oder des Verdichter(s) zwischen 5 und 150 kW
- Kompressions*klima*anlagen mit einer elektrischen Antriebsleistung der oder des Verdichter(s) zwischen 10 und 150 kW
- Sorptionskälte- und Klimaanlagen mit einer Kälteleistung zwischen 5 und 500 kW
- Maßnahmen zur Nutzung von Abwärme aus Produktionsprozessen und Kälteanlagen

Förderhöhe und Umfang

Beratungsmaßnahmen - Bestandaufnahme zu IST- und PLAN-Zustand der Energieeffizienz bestehender Kälte- oder Klimaanlagen:

- 80% der in Rechnung gestellten Kosten, jedoch maximal 1000,- €

Maßnahmen zur Sanierung von Bestandsanlagen:

- 15 % der Nettoinvestitionskosten unter Voraussetzung der Verwendung eines Kältemittels mit einem GWP < 2500 sowie einem Energieeffizienz-Status von mindestens 85% der Maximalpunktzahl.
- 20 % der Nettoinvestitionskosten unter Voraussetzung der Verwendung eines halogenfreien Kältemittels sowie eines Energieeffizienz-Status von mindestens 85% der Maximalpunktzahl.

Neuanlagen:

- 20 % der Nettoinvestitionskosten unter Voraussetzung der Verwendung eines halogenfreien Kältemittels sowie eines Energieeffizienz-Status von mindestens 95% der Maximalpunktzahl.
- 25 % der Nettoinvestitionskosten bei Verwendung von Sorptionskälteanlagen.

Bonusförderung:
Die Bonusförderung betrifft Maßnahmen zur Nutzung der Abwärme aus Produktionsprozessen bzw. der Kälteanlage zur Bereitstellung von Heiz- oder Prozesswärme (auch durch zusätzliche Wärmepumpe). Die Bonusförderung kann nur nach Bewilligung der Basisförderung beantragt werden. Förderfähig sind:

- 15 % der Nettoinvestitionskosten für Wärmeübertrager
- 20 % der Nettoinvestitionskosten für Wärmepumpen, wenn ein Kältemittel mit einem GWP < 2500 verwendet wird
- 25 % der Nettoinvestitionskosten für Wärmepumpen, wenn ein halogenfreies Kältemittel verwendet wird

weitere Informationen gibt es unter http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kaelteanlagen/index.html

8 Fazit

Eine klimafreundliche und wirtschaftliche Klimatisierung beginnt bei der Gebäudekonzeption. Vermiedene thermische Lasten und die Nutzung von passiven Kühlsystemen können in vielen Fällen zusätzliche Anlagentechnik zur Klimatisierung überflüssig machen.

Zur Deckung eines vorhandenen Kühlbedarfs liegt eine Vielzahl technischer Lösungen vor. Abhängig von der Kältebedarfscharakteristik stehen unterschiedliche Faktoren zur Verbesserung der Klimabilanz der Anlagen im Vordergrund. Diesbezüglich sind die energetische Optimierung der Anlagen und ein dem Standort, Gebäude und Nutzung angepasstes Gesamtkonzept sowie die Verminderung der Kältemittelfreisetzung wichtige Maßnahmen.

Mit Betriebskonzepten zur Nutzung von Abwärmequellen durch Ad- und Absorptionskälteanlagen und der Kälteanlagenabwärme, z.B. zur Brauchwassererwärmung, können Primärenergieeinsparungen erreicht werden.
Klimafreundliche Kühltechniken sind am Markt bereits in großer Zahl verfügbar. Zur Deckung möglicher höherer Investitionskosten gibt es von Seiten des Bundesumweltministeriums das Impulsprogramm „Förderung von Maßnahmen an Kälte- und Klimaanlagen in Unternehmen“ zur gezielten Investitionsförderung klimafreundlicher Kältesysteme.
Maßnahmen zur Minimierung der thermischen Lasten und der Einsatz Klimafreundlicher Kältesysteme bringen nicht nur aus ökologischer Sicht Vorteile, sondern senken auch langfristig Kosten für Kühlung und Klimatisierung.
Die Auseinandersetzung mit diesen Themen erfordert Zeit - eine Investition, die sich nicht zuletzt aufgrund der erzielbaren Kostensenkung auszahlt.