

TEXTE

27/2022

Abschlussbericht

Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien in effizienten Gebäuden und Quartieren

von:

Dr. Tilman Hesse, Daniel Bleher, Dr. Sibylle Braungardt, Jürgen Sutter, Christian Winger
Öko-Institut e.V., Freiburg

Benjamin Köhler, Dr. Noha Saad, Luis Julius Lang, Nicolas Fuchs, Dr. Jessica Thomsen
Fraunhofer ISE, Freiburg

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 27/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3717 43 103 0
FB000694

Abschlussbericht

Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien in effizienten Gebäuden und Quartieren

von

Dr. Tilman Hesse, Daniel Bleher, Dr. Sibylle Braungardt, Jürgen Sutter, Christian
Winger, Öko-Institut e.V., Freiburg

Benjamin Köhler, Dr. Noha Saad, Luis Julius Lang, Nicolas Fuchs, Dr. Jessica Thomsen,
Fraunhofer ISE, Freiburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Merzhauser Str. 173
79100 Freiburg

Abschlussdatum:

November 2021

Redaktion:

Fachgebiet V 1.3 Erneuerbare Energien
Werner Niederle

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2022

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

Kurzbeschreibung

Die Studie betrachtet die energetische Transformation von Gebäuden und Quartieren mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2050. Dafür werden beispielhafte Transformationspfade für vier Quartiere entwickelt und bewertet. Die Transformationspfade unterscheiden sich hinsichtlich der Sanierungsrate und -tiefe der Gebäude, des Einsatzes erneuerbarer Energieträger, der Verwendung unterschiedlicher Dämmstoff- und Baumaterialien sowie hinsichtlich der Wärmeversorgung einzelner Gebäude gegenüber der Quartiersversorgung über ein Wärmenetz. Neben dem Hauptindikator Treibhausgasemissionen werden der Endenergieverbrauch in der Nutzungsphase und der Energieaufwand sowie weitere Umweltwirkungen der Herstellungsphase der im Quartier und den Einzelgebäuden verbauten Materialien und Anlagentechnik berücksichtigt. Zusätzlich wurde eine Abschätzung der Investitionen sowie der laufenden Kosten durchgeführt. Abhängig von den jeweils gesetzten Maßnahmen erreichen die Quartiere die Treibhausgasneutralität zu leicht unterschiedlichen Kosten und mit unterschiedlichen Auswirkungen auf das übergeordnete Energiesystem. Als Grundlage für die Transformationsszenarien und auf Basis ihrer Ergebnisse werden Herausforderungen bei der Quartiersdefinition und den Bilanzierungsgrenzen im Quartier detailliert diskutiert und Lösungsansätze entwickelt. Zudem wird der Nutzen von Energiemanagementsystemen im Quartier untersucht. Hierbei geht es um die Identifizierung von Potenzialen und Synergien im Quartier im Gegensatz zur Einzelgebäudebetrachtung, um die Energieversorgung möglichst ressourcen-, emissions- und kostenarm zu gestalten.

Abstract

The study considers the energy transformation of buildings and districts with the goal of greenhouse gas neutrality by 2050. For this purpose, we develop and evaluate different transformation pathways for four districts. The transformation pathways differ in terms of the renovation rate and renovation depth of the buildings, the use of renewable energy sources, the use of different insulation and building materials, and in terms of whether heat is generated at the level of individual buildings or at a district level via a district heating network. In addition to the main indicator of greenhouse gas emissions, we consider the final energy consumption in the utilisation phase of the buildings/districts. Furthermore, the production phase is taken into account by looking at the energy expenditure as well as other environmental impacts during the production of the materials and technologies used. In addition, we estimate and compare the investments and running costs. Depending on the measures taken, the districts achieve greenhouse gas neutrality at slightly different costs and with different impacts on the overarching energy system. Based on the transformation scenarios as well as their results, we discuss in detail challenges in the definition of the term “district” and its boundary conditions and develop solution approaches. Additionally, we investigate the benefits of energy management systems in districts. The aim is to identify potentials and synergies within the district (in contrast to the individual building approach) in order to make the energy supply as resource-, emissions- and cost-efficient as possible.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	17
Abkürzungsverzeichnis	20
Zusammenfassung	22
Summary	35
1 Hintergrund, Ziele des Vorhabens, grundlegende Vorgehensweise	49
1.1 Hintergrund	49
1.2 Zielsetzungen des Vorhabens	50
1.3 Grundlegende Vorgehensweise	51
2 Quartiere und Energiemanagementsysteme	52
2.1 Definition, Abgrenzung und Bedeutung nachhaltiger Quartiere	52
2.1.1 Definitionen des Begriffs Quartier	52
2.1.2 Definition nachhaltiger Quartiere	53
2.1.3 Messbarkeit von Nachhaltigkeit im Quartier	54
2.1.4 Funktion von Gebäuden und Quartieren als Teil des Energiesystems	56
2.1.5 Definition des Begriffs für das vorliegende Forschungsvorhaben	58
2.2 Innovative Ansätze auf Quartiersebene	58
2.3 Energiemanagementsysteme im Quartier	60
2.3.1 Definition, Art und Klassen von Energiemanagementsystemen	61
2.3.2 Geschäftsmodelle für Energiemanagementsysteme	62
2.3.3 Smart-Home-Systeme/dezentral gesteuert	62
2.3.4 Quartierslösungen/zentral gesteuert	63
2.3.5 Herausforderungen und Barrieren	65
3 Umweltziele und -kennzahlen	67
3.1 Umweltziele	67
3.1.1 Energie- und Klimaschutzziele	67
3.1.2 Ressourcen- und Flächenziele sowie weitere Aspekte nachhaltiger Stadt- und Quartiersentwicklung	71
3.2 Umweltkennzahlen für Einzelgebäude und Quartiere	81

3.2.1	Aggregationsebene und Bilanzgrenzen.....	81
3.2.2	Energie- und Klimakennzahlen.....	82
3.2.3	Ressourcen- und Flächenkennzahlen.....	88
3.3	Maßnahmen zur Zielerreichung	91
3.3.1	Maßnahmen zur Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele im Gebäudebereich	91
3.3.2	Maßnahmen Ressourcen- und Flächenziele	94
3.4	Sensitivitätsbetrachtungen.....	95
4	Quartiers-Berechnungen	97
4.1	Allgemeines Vorgehen.....	97
4.2	Beschreibung des Öko-Quartiersberechnungs-Tools	98
4.2.1	Inputdaten.....	99
4.2.2	Tool-Einstellparameter	105
4.2.3	Tool-Ausgabeparameter	107
4.3	Freiburg – Haslach	108
4.3.1	Ausgangslage/Quartiersbeschreibung.....	108
4.3.2	Transformationspfade.....	111
4.4	Freiburg – Weingarten-West	129
4.4.1	Ausgangslage/Quartiersbeschreibung.....	129
4.4.2	Transformationspfade.....	132
4.5	Darmstadt – Ludwigshöhviertel.....	147
4.5.1	Ausgangslage/Quartiersbeschreibung.....	147
4.5.2	Transformationspfade.....	149
4.6	Siedlungsgebiet „Linkenheim-Hochstetten“	161
4.6.1	Ausgangslage/Quartiersbeschreibung.....	161
4.6.2	Transformationspfade.....	163
5	Beitrag von Energiemanagementsystemen	176
5.1	Beschreibung verwendeter Modelle	176
5.2	System Definition und Annahmen.....	179
5.2.1	Ausgangslage/Quartiersbeschreibung.....	179
5.2.2	Vergleichsmethodik	182
5.2.3	Szenarien, Systemkonfigurationen und Annahmen	183

5.3	Effekte von Energiemanagementsystemen im Modell	192
5.3.1	Vergleich zentral und dezentral 2035 mit EnMS und Ohne EnMS	192
5.3.2	Szenario mit Batterien im System.....	198
5.3.3	Szenario mit einer zentralen Wärmepumpe.....	200
5.4	Diskussion von Energiemanagementsystemen	204
5.4.1	Zusammenfassung und Diskussion der Szenarienanalyse	204
5.4.2	Grenzen der Untersuchung.....	205
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	210
6.1	Wie können die Umweltziele erreicht werden?	210
6.1.1	Quartiersbilanz.....	210
6.1.2	Querauswertung	211
6.1.3	Planung und kritische Entscheidungszeitpunkte zur Zielerreichung	212
6.1.4	Bewertungskriterien für die Zielerreichung.....	214
6.1.5	Bewertung von Gebäude-Techniken und Infrastrukturen im Quartier	215
6.2	Definitionen und Bilanzierungsmethoden.....	218
6.2.1	Bilanzierung von THG-Emissionen durch die Nutzung von Energie im Quartier ..	218
6.2.2	Berücksichtigung von Vorketten und grauer Energie	221
6.2.3	Indirekte Emissionen.....	222
6.2.4	Kompensation	223
6.3	Anreize.....	223
6.4	Ausblick.....	225
7	Quellenverzeichnis	227
	Anhang	233
	A1: Innovative Modellquartiere	233
	A2: Bewertungssysteme.....	248
	A3: Verwendete Annahmen / Datenquellen / Zeitreihen.....	277
	A3.1: Überblick über die Kostenentwicklung der in Gebäuden und Quartieren eingesetzten Techniken.....	277
	A3.2: Preisannahmen	280
	A3.3: Emissionsfaktoren	280
	A4: Anhang zu Annahmen bei der EnMS Betrachtung.....	282
	A4.1: Weitere Parameter.....	282

A4.2: Technikparameter	283
A4.3: EnMS Auswertung Zusatz.....	284

Abbildungsverzeichnis

Abbildung I:	Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Haslach pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m ² a)) dargestellt für die verschiedenen Energieträger (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad)	25
Abbildung II:	THG-Emissionen pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad).....	26
Abbildung III:	Treibhauspotenzial in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten	27
Abbildung IV:	Über 5-Jahres-Schritte kumulierte THG-Emissionen in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten)	28
Abbildung V:	Treibhauspotenzial in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise.....	29
Abbildung VI:	Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche im Ludwigshöh-Viertel (links: Massivbauweise, rechts: Holztafelbauweise).....	30
Abbildung VII:	Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Linkenheim-Hochstetten pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m ² a)) (links: zentral, rechts dezentral).....	31
Abbildung VIII:	THG-Emissionen in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (links zentral; rechts dezentral)	31
Figure I:	Final energy consumption of the heat supply in Haslach per residential or usable floor area (in kWh/(m ² a)) shown for the different energy sources (left: efficiency path, right: renewable energy path)	38
Figure II :	GWP per square metre of gross floor area (left: efficiency path, right: renewable energy path)	39
Figure III:	GHG-emissions in kg CO ₂ -eq per square metre of living or usable floor area; left EPS, centre mineral fibre, right wood-fibre.....	40
Figure IV:	GHG emissions accumulated over 5-year steps in kg CO ₂ -eq per square metre of gross floor area (left EPS, centre mineral fibre, right wood fibre)	41
Figure V:	Global warming potential in kg CO ₂ -eq per square metre of living or usable floor area; solid construction on the left; wood panel construction on the right.	42
Figure VI:	Annuities of investment costs as well as running costs in EUR per square metre of living or usable floor area in the Ludwigshöh district (left: solid construction, right: wood panel construction).	43
Figure VII:	Final energy consumption of the heat supply in Linkenheim-Hochstetten per residential or usable floor area (in kWh/(m ² a)) (left: centralised, right decentralised)	44

Figure VIII:	GHG emissions in kg CO ₂ -eq per square metre of living or usable floor area (left centralised; right decentralised).....	45
Abbildung 2-1:	Änderung des Energiesystems von einem zentralen, unidirektionalen (links) hin zu einem dezentralen, bidirektionalen System (rechts)	57
Abbildung 3-1:	Entwicklung der Rohstoffproduktivität in Deutschland zwischen 1994 und 2015	74
Abbildung 3-2:	Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland zwischen 2000 und 2014	75
Abbildung 3-3:	Entnahme abiotischer Rohstoffe und abiotischer Güter (Vergleich der Jahresmenge 1994 und 2015).	76
Abbildung 3-4:	Anzahl fertig gestellter Wohnungen und Gebäude im zeitlichen Verlauf.....	76
Abbildung 3-5:	Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche in ha pro Tag	78
Abbildung 3-6:	Funktion zur dichteabhängigen Bemessung des Verkehrserschließungsaufwandes	79
Abbildung 3-7:	Entwicklung der Luftschadstoffemissionen in Deutschland zwischen 1995 und 2016.....	81
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung der Vorgehensweise in Kapitel 4 und 5	97
Abbildung 4-2:	Lage und Gliederung des Stadtteils Haslach in Freiburg; rot umrandet die Lage des Neubaugebiets Gutleutmatten.....	109
Abbildung 4-3:	Nichtwohngebäude in Freiburg Haslach sowie deren prozentuale Anteile am gesamten Nichtwohngebäudebestand entsprechend der in dem Projekt "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050" entwickelten Typologie.....	110
Abbildung 4-4:	Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für Haslach im IST Zustand.....	111
Abbildung 4-5:	Entwicklung der Sanierungszustände je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude	112
Abbildung 4-6:	Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Haslach pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m ² a) dargestellt für die verschiedenen Energieträger.....	113
Abbildung 4-7:	Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch in Haslach in %.....	114
Abbildung 4-8:	Stromverbrauch bzw. Stromerzeugung durch PV je Haushalt in Haslach.....	115
Abbildung 4-9:	Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf in Haslach in % (Effizienz-Pfad grün; EE-Pfad blau)	116
Abbildung 4-10:	CO ₂ e-Emissionen des Quartiers pro Fläche (kg /(a*m ²) für Effizienz- und Erneuerbare-Energien-Pfad.....	117
Abbildung 4-11:	Verlauf der CO ₂ e-Emissionen prozentual gegenüber dem Startjahr für den Effizienz- und Erneuerbare-Energien-Pfad	117

Abbildung 4-12:	Mittlerer Emissionsfaktor des gesamten Endenergieverbrauchs in Haslach für den Effizienz- und Erneuerbare-Energien-Pfad	118
Abbildung 4-13:	Mittlerer Emissionsfaktor des Stromverbrauchs in Haslach	119
Abbildung 4-14:	GWP & PE pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben GWP; unten PE	120
Abbildung 4-15:	POCP in g Ethen-Äq & AP in g SO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben POCP; unten AP	121
Abbildung 4-16:	EP in g PO ₄ -Äq & ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben EP; unten ADPE	122
Abbildung 4-17:	GWP in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	123
Abbildung 4-18:	Primärenergie (PE) in MJ pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	124
Abbildung 4-19:	POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	124
Abbildung 4-20:	AP in g SO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	125
Abbildung 4-21:	EP in g PO ₄ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben inkl. PV; unten exkl. PV	126
Abbildung 4-22:	ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben inkl. PV; unten exkl. PV	127
Abbildung 4-23:	Kumulierte Investitionskosten in EUR Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad)	128
Abbildung 4-24:	Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad)	129
Abbildung 4-25:	Lage des Stadtteils Weingarten-West	130
Abbildung 4-26:	Wohngebäude im Gebiet Weingarten-West in Freiburg sowie deren Einteilung entsprechend der in dem Projekt "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050" entwickelten Typologie; rechts Verteilung nach Anzahl der Gebäude, links nach Wohnfläche	131
Abbildung 4-27:	Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für Weingarten-West im IST Zustand	132
Abbildung 4-28:	Entwicklung der Sanierungszustände je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude in Weingarten-West	134
Abbildung 4-29:	Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Weingarten-West pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m ² a))	134
Abbildung 4-30:	Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch in Weingarten-West in %	135

Abbildung 4-31:	Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf in Weingarten-West in %	136
Abbildung 4-32:	CO ₂ e-Emissionen in Weingarten-West pro Fläche (kg / (a*m ²)	137
Abbildung 4-33:	Mittlerer Emissionsfaktor des gesamten Endenergieverbrauchs (Wärme + Strom) bzw. des Stromverbrauchs in Weingarten-West (g/kWh)	137
Abbildung 4-34:	GWP in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten.....	140
Abbildung 4-35:	Über 5-Jahres-Schritte kumuliertes GWP in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten) ..	141
Abbildung 4-36:	Verbrauch an Primärenergie (Summe aus PERE und PENRE) in MJ pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten)	142
Abbildung 4-37:	POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	143
Abbildung 4-38:	AP in g SO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	143
Abbildung 4-39:	EP in g PO ₄ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	144
Abbildung 4-40:	ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten).....	145
Abbildung 4-41:	Kumulierte Investitionskosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Weingarten-West (links: EPS bzw. Mineralfaser, rechts: Holzfaserplatten)	146
Abbildung 4-42:	Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Weingarten-West.....	146
Abbildung 4-43:	Lage der alten Cambrai-Fritsch-Kaserne und Jefferson-Siedlung: die Konversionsfläche wird zum neuen Ludwigshöviertel umgebaut	148
Abbildung 4-44:	Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für das Ludwigshöviertel im IST Zustand	149
Abbildung 4-45:	Entwicklung der Sanierungszustände je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude im Ludwigshöviertel	150
Abbildung 4-46:	Endenergieverbrauch der Wärmeenergieversorgung im Ludwigshöviertel in kWh/(m ² a)	151
Abbildung 4-47:	Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch im Ludwigshöviertel in % (blaue Linie bei 100%).....	152
Abbildung 4-48:	Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf im Ludwigshöviertel in %.....	152
Abbildung 4-49:	CO ₂ e-Emissionen im Ludwigshöviertel pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (kg / (a*m ²)	153

Abbildung 4-50:	Mittlerer Emissionsfaktor des gesamten Endenergieverbrauchs (gelb/orange) bzw. des Stromverbrauchs (hellblau/blau) im Ludwigshöhlviertel	154
Abbildung 4-51:	GWP in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise.....	155
Abbildung 4-52:	GWP in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise	156
Abbildung 4-53:	PE in MJ pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise	156
Abbildung 4-54:	POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise	157
Abbildung 4-55:	AP in g SO ₂ -Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise	158
Abbildung 4-56:	EP in g PO ₄ -Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise	158
Abbildung 4-57:	ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise	159
Abbildung 4-58:	Kumulierte Investitionskosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche im Ludwigshöhl-Viertel (links: Massivbauweise, rechts: Holztafelbauweise).....	160
Abbildung 4-59:	Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche im Ludwigshöhl-Viertel (links: Massivbauweise, rechts: Holztafelbauweise).....	161
Abbildung 4-60:	Lage des Stadtteils Linkenheim-Hochstetten	162
Abbildung 4-61:	Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für Linkenheim-Hochstetten im IST Zustand.....	162
Abbildung 4-62:	Entwicklung des Sanierungszustands je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude für beide Transformationspfade in Linkenheim-Hochstetten.....	164
Abbildung 4-63:	Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Linkenheim-Hochstetten pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m ² a) (links: zentral, rechts dezentral).....	165
Abbildung 4-64:	Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch in Linkenheim-Hochstetten in %	165
Abbildung 4-65:	Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf in Linkenheim-Hochstetten in %	166
Abbildung 4-66:	CO ₂ e-Emissionen in Linkenheim-Hochstetten pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (kg /(a*m ²) im zentralen und dezentral Transformationspfad	167
Abbildung 4-67:	Verlauf der CO ₂ e-Emissionen in Linkenheim-Hochstetten prozentual gegenüber dem Startjahr.....	168

Abbildung 4-68:	Mittlerer Emissionsfaktor in g CO ₂ /kWh des gesamten Endenergieverbrauchs in Linkenheim-Hochstetten	168
Abbildung 4-69:	Mittlerer Emissionsfaktor des Stromverbrauchs in g CO ₂ /kWh in Linkenheim-Hochstetten	169
Abbildung 4-70:	GWP in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche	170
Abbildung 4-71:	GWP in kg CO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	170
Abbildung 4-72:	PERE/PENRE in MJ pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	171
Abbildung 4-73:	POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	172
Abbildung 4-74:	AP in g SO ₂ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	172
Abbildung 4-75:	EP in g PO ₄ -Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	173
Abbildung 4-76:	ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche	174
Abbildung 4-77:	Kumulierte Investitionskosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Linkenheim-Hochstetten	174
Abbildung 4-78:	Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Linkenheim-Hochstetten	175
Abbildung 5-1:	Schema des DISTRICT Modells.....	178
Abbildung 5-2:	Wärmenetz zwischen den aggregierten Gebäudecluster der Region Weingarten	181
Abbildung 5-3:	Stromnetz zwischen den aggregierten Gebäudecluster der Region Weingarten	182
Abbildung 5-4:	EnMS Vergleichsmethodik.....	183
Abbildung 5-5:	Fernwärmenetzverbindungen (rot) und Sanierungsstruktur der Gebäudecluster (grün/Weiß) im Jahr 2035 der zentralen Szenarien	185
Abbildung 5-6:	Sanierungsstruktur der Gebäudecluster in 2035 im dezentralen Szenario.....	185
Abbildung 5-7:	Vergleich der Summen der installierten Leistung in den Szenarien REF und Dezentral	188
Abbildung 5-8:	Vergleich der installierten Leistung aller Techniken je Gebäudecluster in den Szenarien REF und Dezentral.....	189
Abbildung 5-9:	Gesamtkostenvergleich der Szenarien REF (links) und Dezentral (rechts) je mit Quartiers-EnMS und Einzelgebäude-EnMS	193
Abbildung 5-10:	Einwöchiger Betriebsausschnitt aus der stündlichen Wärme- und Strombilanz des Referenzszenarios REF.....	195
Abbildung 5-11:	Einwöchiger Betriebsausschnitt aus der stündlichen Wärme- und Strombilanz des Referenzszenarios Dezentral	197
Abbildung 5-12:	Vergleich der CO ₂ -Emissionen in den Szenarien REF (links) und Dezentral (rechts) jeweils mit Quartiers-EnMS und ohne Quartiers-EnMS	198

Abbildung 5-13:	Vergleich der Gesamtkosten im Szenario „Zentral mit Batterien“ zwischen Quartiers- EnMS und ohne Einzelgebäudecluster-EnMS	199
Abbildung 5-14:	Vergleich der Gesamtkosten der Szenarien mit zentraler Wärmepumpenversorgung mit und ohne Quartiers-EnMS.....	201
Abbildung 5-15:	Vergleich der CO ₂ - Emissionen im Szenario mit Zentraler WP mit und ohne Quartiers-EnMS	202
Abbildung 5-16:	Einwöchiger Betriebsausschnitt der stündlichen Wärme- und Strombilanz im Szenario mit zentraler Wärmepumpe	203
Abbildung 6-1:	Übersicht verschiedener Bilanzierungsmethoden für die Anrechnung von erneuerbaren Energien im Quartier	219
Abbildung 6-2:	Beispielhafte Darstellung der bereitgestellten Informationen auf der ECW- webseite	225
Abbildung A4-1:	Leistungsdiagramm Wärmepumpen	283
Abbildung A4-2:	CO ₂ Emissionen Szenario Zent Batt	284
Abbildung A4-3:	Gesamtkosten Szenario Zent_Batt50 mit EnMS und ohne EnMS.....	285
Abbildung A4-4:	CO ₂ -Emissionen Szenario Zent_Batt50 mit EnMS und ohne EnMS.....	285

Tabellenverzeichnis

Tabelle I:	Quartiers-Transformationspfade.....	24
Table I:	District transformation paths	37
Tabelle 2-1:	Übersicht zentraler Bewertungs- und Zertifizierungsinstrumente für nachhaltige Quartiere und Kommunen	54
Tabelle 2-2:	Übersicht innovativer Ansätze zur Reduktion der CO ₂ -Emissionen und zur Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen in Quartieren	59
Tabelle 3-1:	Energie- und Klimaschutzziele auf EU- und Bundesebene (Stand: Dezember 2018)	67
Tabelle 3-2:	Einordnung und Bewertung der bisherigen Zielerreichung für Energie- und Klimaschutzziele der Bundesregierung (Stand: Dezember 2018)	70
Tabelle 3-3:	Ressourcenbezogene Umweltziele (Rohstoffe und Fläche, Stand: Dezember 2018)	72
Tabelle 3-4:	Immissionsgrenzwerte Luftschadstoffe (zum Schutz der menschlichen Gesundheit, Stand: Dezember 2018)	80
Tabelle 3-5:	Annahmen zu Energie- und Klimakennzahlen.....	83
Tabelle 3-6:	Beispielhafte Darstellung der Kennzahlen mit Bezug Endenergieverbrauch für zwei Einzelgebäudetypen	84
Tabelle 3-7:	Beispielhafte Darstellung der Kennzahlen mit Bezug CO ₂ e-Emissionen für zwei Einzelgebäudetypen	85
Tabelle 3-8:	Weitere Energie- und Klimakennzahlen für Einzelgebäude und Quartiere	87
Tabelle 3-9:	Entwicklung bundesweiter Emissionen nach dem Klimaschutzzszenario KS95 (Repenning et al. 2015)	88
Tabelle 3-10:	Ressourcen- und Flächenkennzahlen für Einzelgebäude, Quartiere und die gesamtstädtische Ebene.....	89
Tabelle 3-11:	Übersicht der ausgewerteten Studien für die Szenarioanalyse. Quelle: (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) et al. 2018).....	92
Tabelle 3-12:	Maßnahmen zur Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele im Gebäudebereich und Rolle des Quartiers bei deren Umsetzung.....	93
Tabelle 4-1:	Überblick der betrachteten Quartiere sowie der jeweils gewählten Merkmale der Transformationspfade	98
Tabelle 4-2:	Beschreibung der Wohngebäudetypen.....	99
Tabelle 4-3:	Jahresarbeitszahlen der eingesetzten Wärmepumpen in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Sanierungszustand.....	101
Tabelle 4-4:	Beschreibung der Wirkungskategorien zur Bewertung der Umweltwirkungen ..	102

Tabelle 4-5:	Inputdaten für die Berechnung der Umweltwirkungen	104
Tabelle 4-6:	Kosten und Preisannahmen im Berechnungs-Tool	105
Tabelle 4-7:	Transformationspfade für Haslach	112
Tabelle 4-8:	Transformationspfade für Weingarten-West.....	133
Tabelle 4-9:	Ausgewählte Umweltwirkungen der Wärmedämmung für die Transformationspfade für Weingarten-West.....	138
Tabelle 4-10:	Ausgewählte Umweltwirkungen (Herstellung) der verschiedenen Dämmstoffe für die Transformationspfade für Weingarten-West (jeweils in t CO ₂ e pro m ² Wohnfläche)	139
Tabelle 4-11:	Transformationspfade für das Ludwigshöh-Quartier	150
Tabelle 4-12:	Transformationspfade für Linkenheim-Hochstetten.....	163
Tabelle 5-1:	Übersicht der DISTRICT Szenarien mit Quartiers-EnMS (links) sowie Einzelgebäude- EnMS (rechts) für 2035.....	184
Tabelle 5-2:	Übersicht der Summen der installierten Leistungen 2035 je Szenario	187
Tabelle 5-3:	Preisannahmen.....	190
Tabelle 5-4:	Auflistung der Kostenannahmen Fix, Variabel, sowie Primäreffizienz und Spezifikationen weiterer wichtiger Parameter.....	191
Tabelle 6-1:	Bewertung von Gebäude-Techniken	216
Tabelle 6-2:	Bewertung von Versorgungsinfrastrukturen im Quartier	217
Tabelle 6-3:	Übersicht der Vor- und Nachteile der Ansätze zur Anrechnung von erneuerbaren Energien.....	220
Tabelle 6-4:	Übersicht der Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze zur Bilanzierung mit/ohne Vorketten und grauer Energie.....	222
Tabelle 6-5:	Übersicht der Vor- und Nachteile der Bilanzierung von Emissionen.	223
Tabelle A1-1:	Innovative Modellquartiere (abgeschlossen und laufend)	233
Tabelle A2-1:	LEED – Energie- und Klimaaspekte	248
Tabelle A2-2:	LEED – Ressourcen und Flächen	250
Tabelle A2-3:	BREEAM – Energie- und Klimaaspekte	254
Tabelle A2-4:	BREEAM – Ressourcen und Flächen	260
Tabelle A2-5:	DGNB – Energie- und Klimaaspekte	261
Tabelle A2-6:	DGNB – Ressourcen und Flächen	267
Tabelle A2-7:	2000-Watt-Areal – Energie- und Klimaaspekte	270
Tabelle A2-8:	Energie + – Energie- und Klimaaspekte	274

Tabelle A3-1:	Kosten (Investition, sowie Betrieb und Wartung (O&M; Operation and Maintenance)) und Spezifikationen wichtiger Techniken in Gebäuden	277
Tabelle A3-2:	Kosten (Investition, O&M) und Spezifikationen weiterer wichtiger Techniken in Quartieren und für die Energiewende	278
Tabelle A3-3:	Energiepreisentwicklung	280
Tabelle A3-4:	Einspeisevergütung und Marktwert PV.....	280
Tabelle A3-5:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung in Deutschland nach dem Klimaschutz-szenario -95%.....	280
Tabelle A3-6:	Emissionsfaktoren der Fernwärmeerzeugung in den Quartieren Haslach und Weingarten nach dem Klimaschutzszenario -95% und eigenen Annahmen für 2040 und 2050.....	281
Tabelle A3-7:	Emissionsfaktoren für Erdgas	281

Abkürzungsverzeichnis

ADP	Verbrauch abiotischer Ressourcen mineralischen Typs (Abiotic depletion potential)
ADPE	Verbrauch elementarer abiotischer Ressourcen mineralischen Typs (Abiotic depletion potential elementary)
AP	Säurebildungspotenzial (Acidification potential)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BWK	Brennwertkessel
CO₂e	CO ₂ -Äquivalente bzw. Treibhausgasemissionen
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnMS	Energiemanagementsystem
EP	Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential)
EPS	Expandiertes Polystyrol (Dämmstoff)
ESG	Energieeffizienzstrategie Gebäude
EZFH	Ein- und Zweifamilienhaus
FW	Fernwärme
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GFZ	Geschossflächenzahl
GMH	Großes Mehrfamilienhaus
GRZ	Grundflächenzahl
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
iSFP	Individueller Sanierungsfahrplan
JAZ	Jahresarbeitszahl
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KMH	Kleines Mehrfamilienhaus
MFH	Mehrfamilienhaus
MMH	Mittleres Mehrfamilienhaus
NWG	Nichtwohngebäude
ODP	Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (Ozone Depletion Potential)

PE	Primärenergiebedarf (Primary energy demand)
PENRE	Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (Primary energy non-renewable, energy resources)
PERE	Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (Primary energy renewable, energy resources)
POCP	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential)
PtG	Power-to-Gas
RH	Reihenhaus
SDGs	Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals)
ST	Solarthermie
SuV	Siedlungs- und Verkehrsfläche
THG	Treibhausgas(e)
WDVS	Wärmedämm-Verbundsystem
WE	Wohneinheit(en)
WG	Wohngebäude
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung

Zusammenfassung

Hintergrund

Ein zentrales Strategieelement zum Gelingen der Energiewende besteht in der sukzessiven Dekarbonisierung des Gebäudesektors. In der im Jahr 2021 beschlossenen Neufassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes wird für den Gebäudesektor eine Reduktion der jährlichen Treibhausgasemissionen auf 67 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr 2030 festgelegt. Für das Jahr 2045 ist im Bundes-Klimaschutzgesetz das Ziel der Treibhausgasneutralität gesetzlich verankert.

Bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im Gebäudebereich rückt zunehmend das Quartier als Verbindungsebene zwischen Einzelgebäude und Gesamtstadt in den Fokus. Auf Quartiersebene lassen sich Synergien, beispielsweise bei der Umstellung auf Fernwärme oder der seriellen Sanierung, herstellen, die auf Einzelgebäudeebene schwer erreichbar wären.

Gleichzeitig gerät die Herstellungsphase mit ihrer „grauen Energie“ und den „grauen Emissionen“ immer stärker in die Diskussion. Dies bezeichnet die Energie- bzw. Emissionsmengen, die für Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung aufgewendet wird. Unterschiedliche Klimaschutzmaßnahmen im Gebäudebereich bringen unterschiedliche „graue“ Rucksäcke mit sich, die berücksichtigt werden müssen und die sich einer vergleichenden Betrachtung nicht entziehen dürfen.

Vor diesem Hintergrund betrachtet das Vorhaben die Auswirkungen verschiedener Klimaschutzmaßnahmen auf die Transformation von Quartieren. Dafür wurde ein integriertes Modell entwickelt, in dem verschiedene Transformationspfade in Hinblick auf ihre Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) und weitere Umweltwirkungen vertieft betrachtet werden können.

Schwerpunkte der Quartiersbetrachtung

Im Fokus der Betrachtung der vorliegenden Arbeiten steht die Entwicklung von treibhausgasneutralen Quartieren, unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Dekarbonisierung auf weitere Umwelt- und Ressourcen-relevante Größen.

Während der Quartiersbegriff in unterschiedlichen Kontexten verschieden verwendet wird, legen die vorliegenden Arbeiten ein besonderes Augenmerk auf die technische und räumliche Komponente, indem verschiedene Zielpfade der Entwicklung von Energieeffizienz-Fortschritten, des Ausbaus erneuerbarer Energien im Quartier sowie der Systemintegration von Quartieren in ein zukünftiges Energiesystem betrachtet werden. Die jeweiligen Vorketten werden ebenfalls in die Betrachtung einbezogen. Die prozessuale sowie die soziale Komponente, der für die eigentliche Gestaltung der notwendigen Transformationsprozesse eine zentrale Rolle eingeräumt wird, steht nicht im Fokus des Forschungsvorhabens. In Bezug auf den Begriff der Nachhaltigkeit steht die ökologische Komponente im Vordergrund.

Die Auswahl der hier betrachteten Quartiere berücksichtigt schwerpunktmäßig bauliche und energieverbrauchsrelevante Eigenschaften (z.B. Alter des Gebäudebestands, dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung, Bebauungsdichte, Eignung für die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen, etc.).

Umweltziele und -kennzahlen

In Kap. 3 werden die verschiedenen Umweltziele auf EU und Bundesebene diskutiert und eine Bewertung des Erreichungsgrads durchgeführt. Im Ergebnis ist zu sehen, dass Deutschland zwar einige der Ziele bis 2020 erreicht hat (z.B. im Bereich der Erneuerbaren Energien), dass gleichzeitig aber ein großer Handlungsbedarf mit Blick auf 2030 und darüber hinaus besteht. Defizite bei der Zielerreichung sind insbesondere im Gebäudesektor zu finden. Der Gebäudesektor hat als einziger Sektor das Ziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes im Jahr 2020 verfehlt. Im Bereich der Energieeffizienz im Gebäudebereich ist in den letzten 10 Jahren zu wenig passiert: das 2020er Ziel von -20% beim Wärmebedarf der Gebäude (bezogen auf 2008) ist klar verfehlt worden. Das vorgesehene verbleibende THG-Budget des Gebäudesektors für 2030 wird bei einer Trendfortschreibung deutlich verfehlt.

Um bei der Quartiersbetrachtung geeignete Kennzahlen für eine vergleichende Bewertung nutzen zu können, werden in Kap. 3 eine Reihe an Umweltkennzahlen für Gebäude und Quartiere entwickelt und diskutiert. Dies umfasst in erster Linie eine Betrachtung des Endenergieverbrauchs sowie der THG-Emissionen – sowohl auf Bewohner als auch auf die genutzte Wohnfläche bezogen. Zudem werden Kennzahlen zu verschiedenen Anteilen erneuerbarer Energien aufgegriffen und auf Quartiersebene angesetzt. Die Kennzahlen orientieren sich an den Umweltzielen und sind mit relativ geringem Aufwand bestimmbar. Dadurch eignen sie sich gut für Ziel-Monitoring und vergleichende Betrachtungen (Benchmarking).

Quartiers-Berechnungen

Im Rahmen der Arbeiten wurden Modell-gestützte Berechnungen für Transformationspfade in Quartieren durchgeführt. Die Quartiersberechnung hat zum Ziel, verschiedene Entwicklungspfade hin zu treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Quartieren zu untersuchen. Wir betrachten dabei vier Beispielquartiere, für die jeweils zwei Entwicklungspfade berechnet und verglichen werden. Die Treibhausgas-Neutralität im Jahr 2050 ist das übergeordnete zu erreichende Umweltziel, bezogen auf die Nutzungsphase der Quartiere.

Für die Berechnung der Transformationspfade kommen zwei Tools bzw. Modelle zum Einsatz: Ein vom Öko-Institut entwickeltes Quartierstool sowie das Modell DISTRICT des Fraunhofer ISE. Die Kombination der beiden Berechnungsmodelle ermöglicht es, einerseits in der Breite die möglichen Transformationspfade unter Berücksichtigung der Charakteristika verschiedenartiger Quartierstypen zu untersuchen und andererseits im Detail die Chancen und Möglichkeiten von Energiemanagementsystemen im Quartier zu beleuchten (s.u.).

Die in dieser Studie untersuchten Quartiere Freiburg Haslach, Freiburg Weingarten-West, Darmstadt Ludwigshöhviertel sowie ein Teil der Gemeinde Linkenheim-Hochstetten wurden in erster Linie ausgewählt, um eine gewisse Breite an unterschiedlichen Quartierstypen darzustellen (z.B. Bestand und Neubau, gemischtes Quartier mit Gewerbe und reines Wohnquartier, vorhandenes oder nicht vorhandenes Wärmenetz, großes Quartier auf Stadtteilgröße und kleineres Quartier, geschlossene und offene Bebauung etc.). Tabelle I zeigt die wesentlichen Merkmale der untersuchten Transformationspfade je Quartier.

Tabelle I: Quartiers-Transformationspfade

Quartier	Quartierstyp	Transformationspfade: untersuchte Merkmale
Freiburg-Haslach	Gemischt, Wohn- und Nichtwohnbauung	Fokus Verringerung der Wärmenachfrage durch Energieeffizienz Fokus Vorrang auf den Ausbau erneuerbarer Energien
Freiburg-Weingarten-West	Homogenes, verdichtetes Wohngebiet	Dämmung mit Polystyrol (EPS) Dämmung mit Mineralfasern Dämmung mit nachwachsenden Rohstoffen
Darmstadt-Ludwigshöhviertel	Neubau, überwiegend Wohngebäude	Konventionelle Massivbauweise Holztafelbauweise
Linkenheim-Hochstetten	Ländlich geprägt, überwiegend Wohngebäude	Umbau zu zentraler Wärmeversorgung mit Großwärmepumpe Umbau zu dezentraler Wärmeversorgung mit Wärmepumpen

Die wesentlichen Stellschrauben bei der Berechnung der Quartiers-Transformationspfade sind die Sanierungsrate und -tiefe und die gewählte Ziel-Energieträgerverteilung der Wärmeversorgung. Hinzu kommen Auswahlmöglichkeiten bezüglich des verwendeten Dämmmaterials und – im Fall des Ludwigshöh-Viertels – der verwendeten Bauweise im Neubau.

Die Ergebnisse der Quartiersberechnungen gliedern sich in die Kategorien Endenergieverbrauch und -erzeugung (vor allem Wärme, aber auch Strom), CO₂-Emissionen, Kosten für Herstellung und Betrieb (inkl. Wartung und Instandhaltung), sowie eine Reihe an Umweltwirkungen über die Herstellungs- und Nutzungsphase. Zu letzteren zählen neben dem Treibhauspotenzial (GWP) und dem Primärenergieeinsatz (PE) auch der Verbrauch an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs (ADPE), das Eutrophierungspotenzial (EP), das Versauerungspotenzial (AP) und das photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP).

Für die betrachteten Transformationspfade in den Beispiel-Quartieren lassen sich zusammenfassend folgende Ergebnisse festhalten:

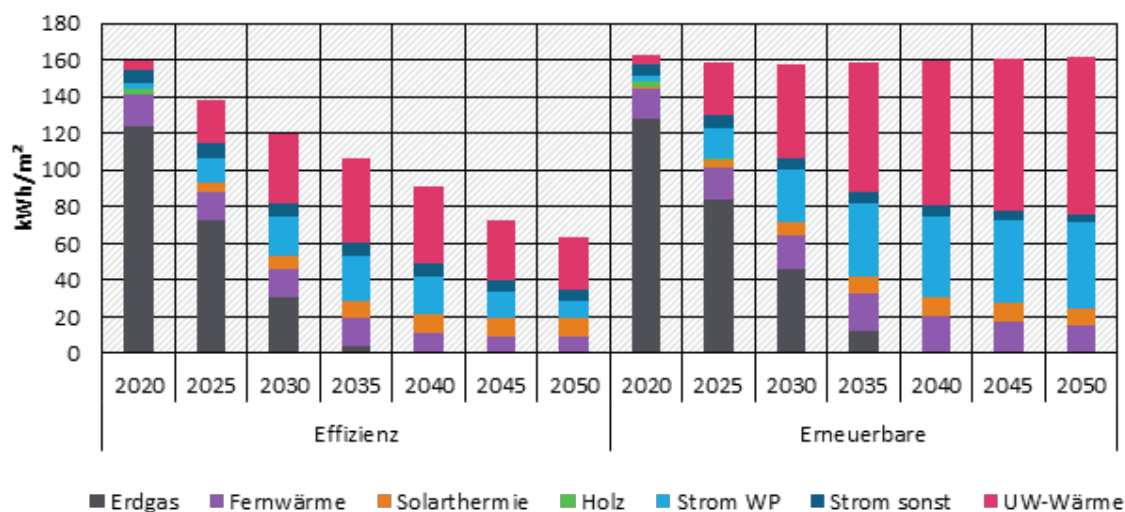
Vorrang Energieeffizienz (Effizienz-Pfad) oder Vorrang erneuerbare Energien (EE-Pfad)

am Beispiel Freiburg Haslach: der Energiebedarf des Quartiers bleibt im EE-Pfad nahezu konstant, wohingegen er im Effizienz-Pfad um knapp 60% sinkt. Die Umweltziele werden im EE-Pfad zu insgesamt leicht niedrigeren Kosten erreicht. Die weiteren Umweltwirkungskategorien aus der Herstellung der Bauteile/Gebäudetechnik schlagen im Effizienz-Pfad stärker zu Buche als im EE-Pfad. Dies wird allerdings in den Jahren bis 2035 durch die Verbrennung von Erdgas in der Nutzungsphase mehr als aufgehoben: bis 2035 schneidet der EE-Pfad deshalb in der kombinierten Betrachtung der Umweltwirkungen von Herstellungs- und Nutzungsphase schlechter ab, langfristig gleichen sich die Pfade allerdings an. Anders ist dies nur beim photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP), wo sich die Herstellung der EPS-Dämmung zu heutigen Ökobilanzdaten nachteilig niederschlägt. Im Effizienz-Pfad wird infolge des geringeren Bedarfs an Wärmepumpenstrom mehr Strom ins übergeordnete Netz eingespeist. Aus Gesamtsystemperspektive bietet der Effizienzpfad mehr Freiheitsgrade:

einerseits hinsichtlich des Stromverbrauchs bzw. der Stromeinspeisung, und andererseits hinsichtlich des geringeren Wärmebedarfs an sonstigen erneuerbaren Energien.

Abbildung I zeigt den Endenergieverbrauch (EEV) für die Wärmeversorgung pro Quadratmeter und Jahr im Vergleich zwischen dem Effizienz- und dem EE-Pfad. Es ist deutlich zu sehen, dass der EEV im Effizienz-Pfad infolge größerer Sanierungsanstrengungen stark zurück geht. Im EE-Pfad steigt der EEV hingegen sogar leicht an. Dies liegt (1) an der hinterlegten Effizienzsteigerung stromverbrauchenden Geräte im Gebäude, welche einen höheren Heizwärmebedarf der Gebäude bis 2050 verursacht (vgl. dazu auch Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017)), und (2) an der Tatsache, dass Wärmepumpen hier in zahlreichen unsanierten Gebäuden zum Einsatz kommen, wo sie weniger effizient arbeiten. Aufgrund der Voreinstellung zur Energieträgerverteilung dominieren über die Zeit in beiden Transformationspfaden Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger, mit Unterstützung durch Solarthermie. Aufgrund der gewählten Austauschrate für die Heizungstechnik sind bis 2040 alle Heizungsanlagen des Quartiers ausgetauscht worden. Klar erkennbar ist auch der Fernwärmesockel, welcher das Sub-Quartier „Gartenstadt“ in beiden Pfaden mit Wärme versorgt.

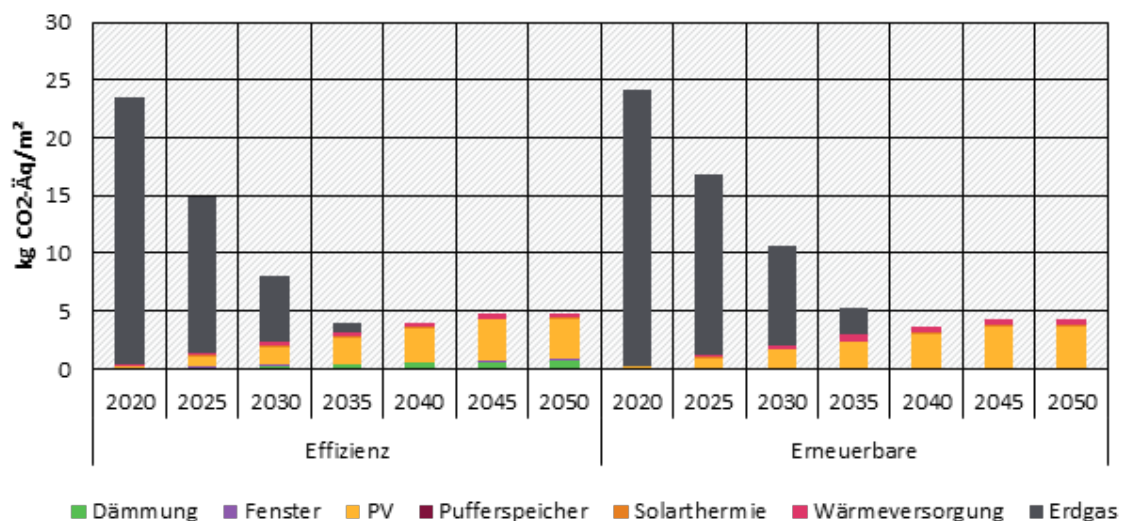
Abbildung I: Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Haslach pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m²a)) dargestellt für die verschiedenen Energieträger (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad)



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung II zeigt die Ergebnisse der Umweltwirkungsabschätzung aus der Nutzungs- und der Herstellungsphase für das Treibhauspotenzial. Die Umweltwirkungen der Herstellungsphase werden über die jeweilige Nutzungsdauer des Bauteils gleichmäßig verteilt („annuisiert“) und können damit in Relation zur Nutzungsphase gesetzt werden. Aufgrund der Wärmeversorgung mit Erdgas werden die Ergebnisse in den Anfangsjahren stark dominiert von der Nutzungsphase, im Lauf der Jahre geht der Anteil der Nutzungsphase dann aber sehr deutlich zurück.

Abbildung II: THG-Emissionen pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad)

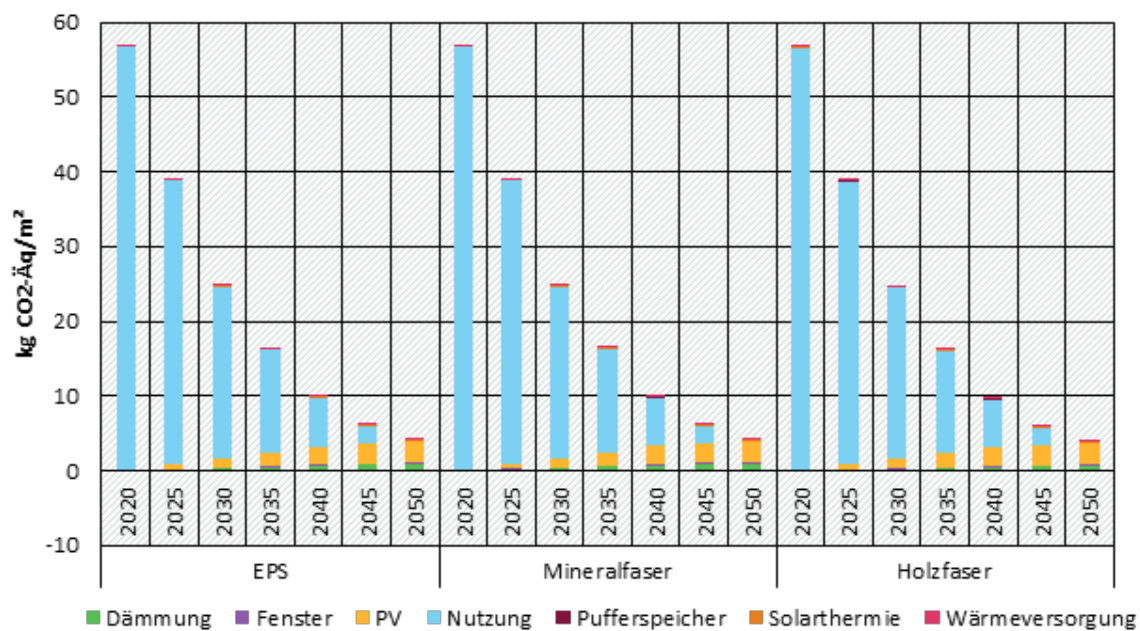


Quelle: Eigene Berechnungen

Konventionelle Dämmung gegenüber Dämmung aus nachwachsenden Rohstoffen am Beispiel Weingarten-West: Die Holzfaserplattendämmung verursacht nur ca. zwei Drittel der Treibhausgase in der Herstellung im Vergleich zur EPS- oder Mineralfaser-Dämmung. Gleichzeitig liegen die Kosten bei Holzfaserplatten-Dämmung merklich höher als bei der EPS- oder Mineralfaser-Dämmung. Bei den weiteren Umweltwirkungskategorien schneiden die unterschiedlichen Dämmstoffe unterschiedlich gut ab – allerdings führen Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Großen und Ganzen zu niedrigeren Umweltwirkungen (vgl. Kapitel 4.4). Im Verhältnis zu den Umweltwirkungen der PV-Anlagen machen diejenigen der Dämmstoffe jedoch nur einen Bruchteil aus.

Abbildung III zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen aus Nutzungs- und Herstellungsphase (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). Vor allem in den Anfangsjahren werden die Ergebnisse stark dominiert von der Nutzungsphase, im Lauf der Jahre geht ihr Anteil aber sehr stark zurück.

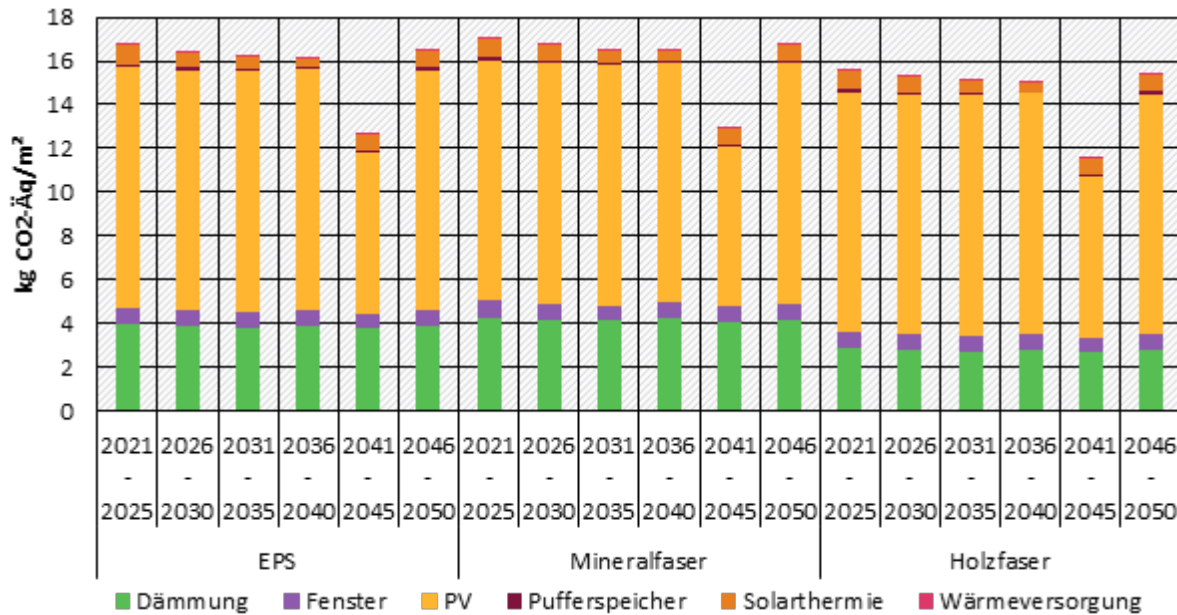
Abbildung III: Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung IV zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche während der Herstellungsphase. In allen drei Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (jeweils ca. 65-67 %), der jeweils identisch angesetzt ist. An zweiter Stelle steht in allen drei Szenarien die Dämmung (jeweils ca. 20-25 %). Beim Vergleich der Dämmungen weisen die Mineralfaserdämmplatten das höchste Treibhauspotenzial auf, während die Nutzung von Holzfaserdämmplatten den niedrigsten Wert zeigt.

Abbildung IV: Über 5-Jahres-Schritte kumulierte THG-Emissionen in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten)

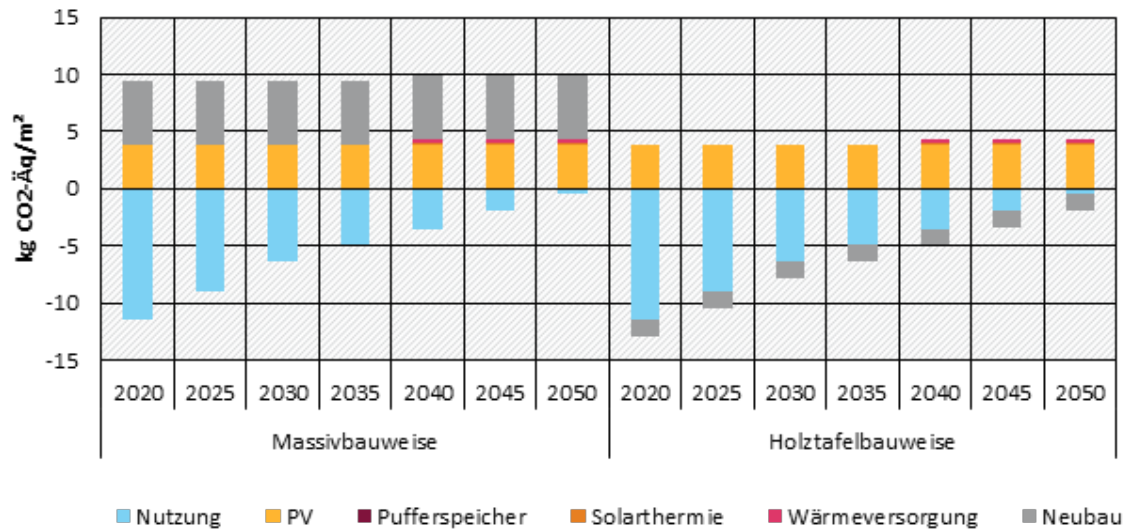


Quelle: Eigene Berechnungen

Konventioneller Neubau (Massivbau) gegenüber Neubau aus Holztafelbauweise am Beispiel Ludwigshöh-Viertel: Der sehr hohe energetische Gebäudestandard in Verbindung mit dem Einsatz erneuerbarer Energien erfüllt die Umweltziele von Anfang an. Die Holztafelbauweise schneidet in den Umweltwirkungskategorien (einschließlich Treibhauspotenzial) deutlich besser ab im Vergleich zum Massivbau auf Kalksandstein-Basis. Gleichzeitig ist die Holztafelbauweise leicht teurer. Der insgesamt geringe Energieverbrauch des Quartiers sowohl bei Wärme (mittels Wärmepumpen) als auch bei Strom führt zu hohen PV-Einspeisemengen.

Abbildung V zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen aus Nutzungs- und annuisierter Herstellungsphase. Vor allem in den Anfangsjahren zeigt die Nutzungsphase einen relevanten Anteil an den Gesamtsummen, im Lauf der Jahre geht der Anteil der Nutzungsphase dann aber stark zurück. Die Holztafelbauweise weist negative THG-Emissionen aufgrund der Bindung des atmosphärischen Kohlenstoffs im Holz auf (grau dargestellt).

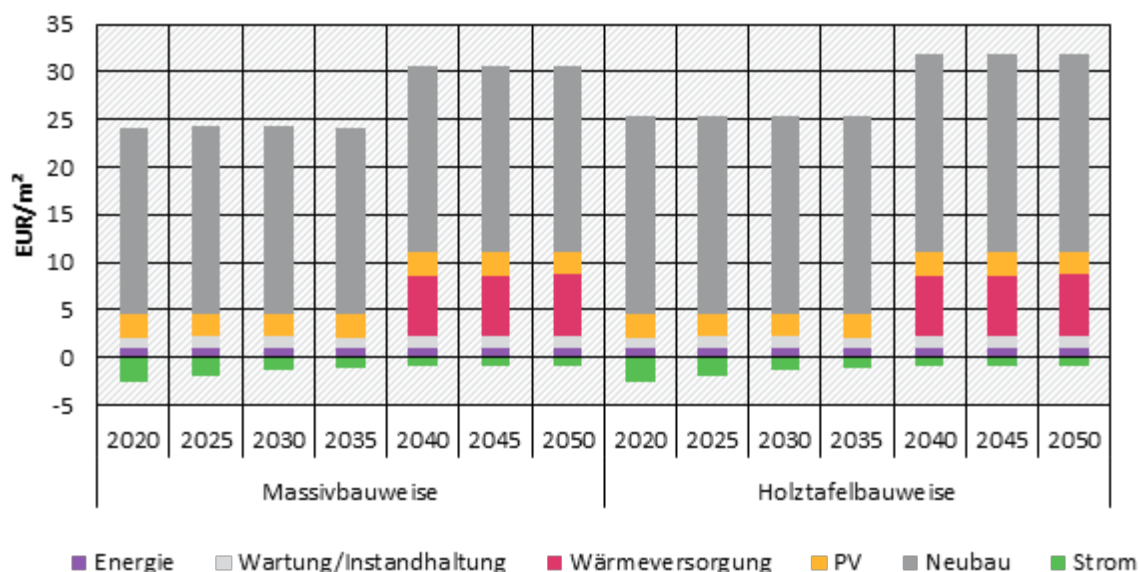
Abbildung V: Treibhauspotenzial in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung VI zeigt die Annuitäten der Investitionskosten und die jährlichen laufenden Kosten für Wärmeenergie, Strom sowie Wartung/Instandhaltung. Unterschiede zwischen der konventionellen Massivbauweise und der Holztafelbauweise liegen lediglich in den Neubau-Investitionskosten. Die laufenden Kosten liegen deutlich niedriger als die annuisierten Investitionskosten. Dies ist auf den von Anfang an sehr hohen energetischen Standard der Gebäude zurückzuführen. Da auch die PV-Anlagen von Anfang an installiert sind, wird mehr Strom im Quartier erzeugt, als verbraucht wird. Der Überschussstrom wird entsprechend aus dem Quartier „exportiert“ und mit sinkenden Sätzen vergütet.

Abbildung VI: Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche im Ludwigshöh-Viertel (links: Massivbauweise, rechts: Holztafelbauweise)

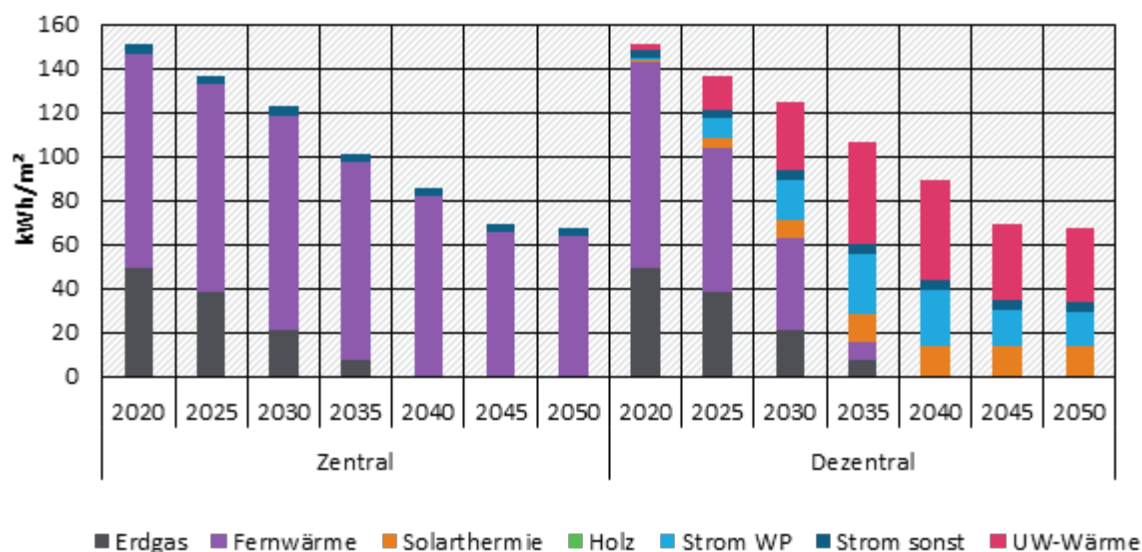


Quelle: Eigene Berechnungen

Zentrale gegenüber dezentraler Wärmeversorgung am Beispiel Linkenheim-Hochstetten: Die Umstellung der Fernwärme auf erneuerbare Energieträger führt zu einer deutlichen Senkung der THG-Emissionen. Die PV-Einspeisemengen liegen beim zentralen Wärmeversorgungspfad höher, da die angenommene Groß-Wärmepumpe insgesamt effizienter als die dezentralen Wärmepumpen arbeitet. Schlussfolgerungen zu den Umweltwirkungskategorien sind nur begrenzt aussagefähig, da für Groß-Wärmepumpen in den einschlägigen Datenbanken bisher keine Umweltwirkungsdaten vorliegen. Die dezentrale Wärmeversorgung mit ihrer Kombination aus Wärmepumpen und Solarthermie weist höhere Kosten auf als die Groß-Wärmepumpe inkl. Netzausbau und der Installation weiterer Wärmenetz-Übergabestationen in den Gebäuden. Allerdings sind die Unsicherheiten bei den angenommenen Investitionskosten hoch.

Abbildung VII zeigt den Verlauf des Endenergiebedarfs nach Art der Wärmebereitstellung. Während im ersten Zielpfad der gesamte Wärmebedarf durch Fernwärme (+ Strom als Hilfsenergie) gedeckt wird, stellen die dezentralen Wärmepumpen im zweiten Zielpfad die dominierende Technik dar.

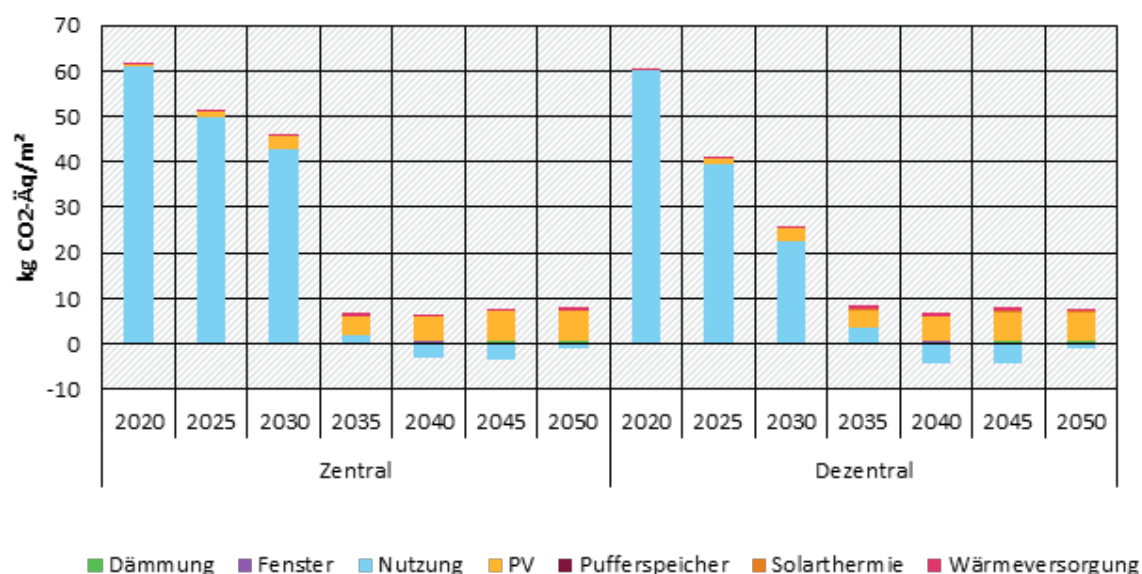
Abbildung VII: Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Linkenheim-Hochstetten pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m²a)) (links: zentral, rechts dezentral)



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung VIII zeigt die Ergebnisse für die Emissionen von Treibhausgasen aus Nutzungs- und Herstellungsphase (links zentral, rechts dezentral). Vor allem in den Anfangsjahren werden die Ergebnisse stark dominiert von der Nutzungsphase, im Lauf der Jahre geht der Anteil der Nutzungsphase dann aber stark zurück.

Abbildung VIII: THG-Emissionen in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (links zentral; rechts dezentral)



Quelle: Eigene Berechnungen

Querauswertung

Quartiers-übergreifend lassen sich trotz der Größenunterschiede und weiterer sich unterscheidender Quartierscharakteristika folgende Aspekte festhalten:

1. Hohe Sanierungsraten bei gleichzeitiger Tiefensanierung führen zu einer deutlichen Energieverbrauchsreduktion, welche den Druck auf die erneuerbaren Energien, die den Restbedarf decken müssen, reduziert. Das kommt auch dem Gesamt-Energiesystem zugute, da mehr Freiheitsgrade bei der Verteilung der verschiedenen, in ihrer Verfügbarkeit vor allem durch die Flächenknappheit begrenzten Energieträger geschaffen werden.
2. Die hohen PV-Zubauraten ermöglichen jedem der betrachteten Quartiere die jahresbilanzielle Überversorgung mit im Quartier erzeugtem Strom. Dies ist sogar für das Quartier Haslach und den auf wenig Effizienz setzenden Erneuerbare-Energien-Pfad der Fall. Einschränkung ist allerdings zu beachten, dass der Stromverbrauch infolge einer verstärkten Elektromobilität, Strom für die Straßenbeleuchtung oder Gewerbe- und Industriestrom in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden.
3. Der Verlauf der CO₂-Emissionsreduktion der Quartiere erfolgt zumeist steiler in der ersten Dekade und flacht dann ab. Dies ist zum einen auf die Annahmen zurückzuführen, dass zunächst die Gebäude mit dem schlechtesten energetischen Zustand saniert werden und somit größere Reduktionspotenziale erschlossen werden. Zum anderen liegt es an der anfangs höheren Wirkung des im Quartier mittels PV erzeugten Stroms, da dieser zu Beginn des Transformationspfades Quartiers-externen Strom verdrängt, dessen CO₂-Rucksack anfangs noch CO₂-intensiver ist.
4. Die hohen PV-Zubauraten führen zu hohen Effekten bei allen Umweltwirkungskategorien. Am Beispiel des Neubau-Quartiers Ludwigshöhe wird deutlich, dass die Umweltwirkungen der PV-Module sogar in der gleichen Größenordnung liegen wie die der Neubauten selbst (bezogen auf die Bruttogeschossfläche der Gebäude). Hier ist es wichtig hervorzuheben, dass die Höhe der grauen Emissionen der PV-Modulherstellung in Zukunft deutlich sinken werden, wenn auch der Strom zur Herstellung der Module stärker auf Basis erneuerbarer Energien produziert wird. Derzeit werden die meisten PV-Module in China und unter Nutzung von hohen Anteilen an Steinkohlestrom hergestellt. Darüber hinaus vermeidet der erzeugte PV-Strom die Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen in Deutschland.
5. In der Nutzungsphase der Wärmepumpen geht ein Teil der Kältemittel verloren. Die meisten derzeit verwendeten Kältemittel tragen in relevanter Weise zum GWP bei. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft weniger treibhauswirksame Kältemittel eingesetzt werden, so dass die direkten Treibhausgasemissionen aus der Nutzung von Wärmepumpen langfristig sinken werden.
6. In den Anfangsjahren des Betrachtungszeitraums dominiert in den meisten Umweltwirkungskategorien die Nutzungsphase (hier insbesondere die Nutzung von Erdgas, aber auch die Stromerzeugung und die Fernwärme), im Lauf der Zeit gehen die Umweltwirkungen aus der Nutzungsphase deutlich zurück. Gleichzeitig werden die Umweltwirkungen aus der Herstellungsphase (insbesondere aus der Produktion der Photovoltaikanlagen) relevanter. Dies verdeutlicht, wie wichtig umweltfreundliche Herstellungsverfahren sind.

7. Einfamilienhaus-Siedlung gegenüber MFH-Siedlungsgebiet: Die Querauswertung der Transformationspfade zeigt, dass die pro-Kopf-THG-Emissionen stark von der Siedlungsstruktur abhängen: Aufgrund des großen Anteils an MFH wird beispielsweise in Weingarten-West bei gleicher Sanierungsrate ein etwas niedrigerer Energieverbrauch pro m² erreicht als in Linkenheim-Hochstetten, der pro-Kopf-Energieverbrauch beträgt dagegen nur rund die Hälfte.

Energiemanagementsysteme (ENMS)

In einem der gewählten Quartiere wird der Einsatz von Energiemanagementsystemen (EnMS) im Quartier im Detail untersucht (vgl. Kapitel 5). Energiemanagementsysteme bieten die Möglichkeit, Nachfrage- und Versorgungsstrukturen zu messen und steuern. Als EnMS wird dabei die Kombinationen aus Messsystem, Software zur Datenerfassung und Strukturierung sowie die Nutzerschnittstelle bezeichnet, was EnMS dazu befähigt, Funktionen der Betriebsführung und Optimierung zu übernehmen. Besonders auf Quartiersebene steigt die Komplexität des Gebäudebedarfs- und Versorgungsmanagements im Vergleich zum Einzelgebäude. Dabei stellt sich die Frage, inwiefern ein EnMS auf Quartiersebene, im Gegensatz zur Gebäudeebene, zusätzliche Potenziale heben und Synergien schaffen kann, um die Energieversorgung möglichst ressourcen-, emissions- und kostenarm zu gestalten.

Der Einfluss von Quartiers-EnMS auf die nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien wird daher anhand eines Kosten-, Emissions- und Betriebsvergleichs von Quartiers- und Gebäude-EnMS quantifiziert. Dazu erfolgt eine Modellierung des Beispiel-Quartiers Freiburg-Weingarten West mit dem Optimierungsmodell DISTRICT (Saad Hussein und Hübner 2017; Saad Hussein et al. 2015; Saad Hussein 2017).

Zur modellbasierten Darstellung wird eine Optimierung des Quartiers als Ganzes mit einer Optimierung der Einzelgebäude, die anschließend wieder zu einem Quartier zusammengesetzt werden, verglichen. Die Ergebnisse sind dabei auf die Wirkungen des Einsatzes von technischen EnMS (Bauknecht et al. 2017) und insbesondere auf Energie- und CO₂-Einsparungen hin zu untersuchen und zu bewerten. Auf Basis der Transformationspfade für das Beispiel-Quartier aus Kapitel 4 werden EnMS in Quartieren mit unterschiedlicher Energieversorgungsstruktur in Szenarien analysiert. Dazu wird im Modell das Energiesystem des Quartiers für das Jahr 2035 als Referenzszenario abgebildet. Das Referenzszenario zeichnet sich durch eine zentrale Fernwärmeversorgung aus. Auf Basis des Referenzszenarios werden in weiteren Szenarien zum Einsatz von Batteriespeichern und zentralen Wärmepumpen systemische Veränderungen und Sensitivitäten untersucht. Das Referenzszenario wird mit einem dezentralen Wärmeversorgungsszenario verglichen.

Das Beispiel-Quartier Freiburg-Weingarten West ist auf Basis der bestehenden Struktur modelliert. Aus den Transformationspfaden ergeben sich die notwendigen Sanierungszustände von „unsaniert“ bis „vollsanert plus“ für 19 Wohngebäudecluster aufgeteilt im Weingarten-West Quartier bestehend aus 25 Mehrfamilienhäusern, 9 Einfamilienhäusern, 16 Große Mehrfamilienhäuser, sowie 5 Nichtwohngebäuden, die im Modell zu 31 typgleichen Gebäudeclustern aggregiert sind. Des Weiteren wird die bestehende Strom- und Fernwärmenetzstruktur in das Modell integriert. Auf Basis der bestehenden erneuerbaren Potenziale und Freiflächen ergibt sich in den Transformationspfaden aus Kapitel 4 die Struktur

und Größe der installierten Strom-, Wärme und Kälteversorgungsanlagen, die sich im Modell für die verschiedenen Szenarien in den installierten Leistung der Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen, Gaskessel, Absorptionskältemaschine und Batteriespeicher wiederfinden. Zusätzlich ist eine Anbindung aller Gebäudecluster an das Stromnetz und in allen zentralen Szenarien an das Fernwärmenetz gegeben. Es ergibt sich ein positiver Effekt durch den Einsatz von Quartiers-EnMS auf die Gesamtkosten sowie CO₂-Emissionen nach Szenario im einstelligen Prozentbereich.

Im Vergleich von zentralen und dezentralen Quartiers-Szenarien ergeben sich stärkere positive Gesamtkosteneffekte von Quartiers-EnMS in den zentralen Szenarien mit einer Anbindung ans Fernwärmenetz, aufgrund der besseren Ausnutzung der Flexibilitätspotenziale beim Einsatz der Photovoltaik-Überschüsse und der kostengünstigeren Wärmeversorgung. Die CO₂-Emissionen der dezentralen Szenarien sind jedoch mit der Wärmepumpen- und Gaskesselversorgung geringer als im zentralen Referenzszenario mit Fernwärme aus Gaskraftwerken. Die Analyse zeigt sowohl im zentralen und dezentralen Szenario deutlich niedrigere CO₂-Emission und Kosten im Einsatz von Quartiers-EnMS als durch Einzelgebäude-EnMS. Durch die vermehrte Eigenstromnutzung im Quartier kann das Quartiers-EnMS die zusätzlichen, mit dem Stromeinkauf verknüpften Emissionen vermeiden und damit bessere Zielwerte erzielen.

Weiterhin wird in einem Szenario der Einsatz von Batteriespeichern und ihr zusätzlicher Nutzen für EnMS untersucht. Durch bereits genutzte Flexibilitätsoptionen in Quartiers-EnMS tragen Batteriespeicher nur geringfügig zur Verbesserung dar. Im Vergleich können bereits Einzelgebäude-EnMS Batteriespeicher zur Kostenreduktion und Optimierung des Selbstverbrauchs nutzen, sodass in diesem Fall zentrale Quartiers-EnMS kaum messbaren Mehrwert bieten, da in der vorliegenden Untersuchung die größten Kosteneinsparungen durch die Vermeidung von Netzbezug erreicht werden.

Bei der Betrachtung einer zentralen, CO₂-neutralen Fernwärmeversorgung durch eine Hochtemperaturwärmepumpe (kombiniert mit einem zentralen Wärmespeicher) wird in einem weiteren Szenario der mögliche Betrieb und Einsatz analysiert. Die Modellergebnisse zeigen zusätzliche Kostenreduktion (7,8 %) und CO₂-Emissionsreduktionen von 9,2 % im Szenario durch den Einsatz eines Quartiers-EnMS.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass EnMS einen positiven Beitrag zu nachhaltigen Quartieren bringen können. Die Effekte von EnMS sind dabei stark von der Systemkonfiguration und den vorhandenen Flexibilitäten abhängig. Da die Hard- und Software-Investitionskosten für die EnMS in diese Betrachtung aufgrund ihrer großen Spannweite nicht berücksichtigt wurden, ist im Einzelfall abzuwägen, ob die möglichen Effizienzgewinne diese rechtfertigen. Die Ergebnisse können als Fallstudie zur Diskussion des Einsatzes von EnMS im Quartier zur Kosten- und Emissionsreduktion beitragen.

Summary

Background

A central strategy element for the success of the energy transition is the gradual decarbonisation of the building sector. In the new version of the Federal Climate Protection Act adopted in 2021, a reduction of annual greenhouse gas emissions to 67 million tonnes of CO₂ in 2030 is specified for the building sector. For the year 2045, the goal of greenhouse gas neutrality is legally anchored in the Federal Climate Protection Act.

When implementing climate protection measures in the building sector, the focus is increasingly on the district as the connecting level between individual buildings and the city as a whole. At the district level, synergies can be created, for example in the conversion to district heating or serial renovation, which would be difficult to achieve at the individual building level.

At the same time, the production phase with its "grey energy" and "grey emissions" is increasingly being discussed. This refers to the amounts of energy or emissions used for production, transport, storage and disposal. Different climate protection measures in the building sector entail different "grey" rucksacks, which must be taken into account and which must not escape comparative consideration.

Against this background, the project looks at the effects of different climate protection measures on the transformation of districts. For this purpose, an integrated model was developed in which different transformation paths can be looked at in details with regard to their greenhouse gas emissions (GHG emissions) and other environmental impacts.

Focal points of the district assessment

The focus of the present work is on the development of greenhouse gas neutral districts, taking into account the effects of decarbonisation on other environmental and resource-relevant variables.

While the term "district" is used differently in different contexts, the present work focuses on the technical and spatial components. It does so by considering different target paths for the development of energy efficiency progress, the expansion of renewable energies in districts and the system integration of districts into a future energy system. The respective upstream chains are also included in the analysis. The processual as well as the social component, which is given a central role for the actual design of the necessary transformation processes, is not the focus of this research project. With regard to the concept of sustainability, the ecological component is predominantly addressed.

The selection of the districts considered focuses on structural and energy consumption-relevant characteristics (e.g. age of the building stock, decentralised vs. centralised heat supply, building density, suitability for the generation of electricity from renewable sources, etc.).

Environmental goals and indicators

Chapter 3 discusses the various environmental targets at EU and federal level and assesses the degree of achievement. The result shows that Germany has achieved some of the targets by 2020 (e.g. for renewable energies), but that at the same time there is a great need for action with a view to 2030 and beyond. Deficits in achieving the targets can in particular be found in the building sector. The building sector is the only sector that has failed to meet the target of the Federal Climate Protection Act in 2020. In the area of energy efficiency in the building sector, too little has happened in the last 10 years: the 2020 target of -20% in the heat demand of buildings (relative to 2008) has been clearly missed. The envisaged remaining GHG budget of the building sector for 2030 is clearly missed in a trend projection.

In order to be able to use suitable indicators for a comparative assessment in the district analysis, a series of environmental indicators for buildings and districts are developed and discussed in Chapter 3. This primarily includes a consideration of final energy consumption and GHG emissions - both in relation to residents and to the living area used. In addition, key figures on various shares of renewable energies are taken up and applied at district level. The indicators are based on the environmental goals and can be determined with relatively easily. This makes them well suited for target monitoring and comparative observations (benchmarking).

District calculations

As part of the work, model-based calculations were carried out for transformation paths in districts. The district calculations aim at investigating different development paths towards greenhouse gas-neutral and resource-saving districts. As case studies, we consider four districts, for each of which two development paths are calculated and compared. Greenhouse gas neutrality in 2050 is the overarching environmental goal (this relates to the use phase of the districts only).

Two tools/models are used to calculate the transformation paths: a district tool developed by the Öko-Institut and the DISTRICT model from Fraunhofer ISE. The combination of the two calculation models makes it possible, on the one hand, to broadly examine the possible transformation paths, taking into account the characteristics of different types of districts, and, on the other hand, to examine in detail the opportunities and possibilities of energy management systems within the district (see below).

The four investigated neighbourhoods in this study are Freiburg Haslach, Freiburg Weingarten-West, Darmstadt Ludwigshöhviertel and part of the municipality Linkenheim-Hochstetten. They were primarily chosen in order to represent a certain breadth of different district types (e.g. existing and new buildings, mixed district with commercial and purely residential district, existing or non-existing district heating network, large district on a district scale and smaller district, closed and open development structures, etc.). Table I shows each district with its transformation pathways' main characteristics.

Table I: District transformation paths

District	Type of district	Transformation pathways: characteristics studied
Freiburg-Haslach	Mixed, residential and non-residential development	Focus on reducing heat demand through energy efficiency Focus on the expansion of renewable energies
Freiburg-Weingarten-West	Homogeneous, dense residential area	Insulation with polystyrene (EPS) Insulation with mineral fibre Insulation with renewable raw materials
Darmstadt-Ludwigshöhviertel	New construction, predominantly residential	Conventional solid construction Wood panel construction
Linkenheim-Hochstetten	Rural, predominantly residential	Conversion to central heat supply with large heat pump Conversion to decentralised heat supply with heat pumps

The main parameters in the calculation of the district transformation paths are the renovation rate and depth and the selected target energy carrier distribution of the heat supply. In addition, there are options regarding the insulation material used and – in the case of the Ludwigshöh district – the construction method used for new building.

The results of the district calculations are divided into several categories: final energy consumption and generation (primarily heat, but also electricity), CO₂ emissions, costs for production and operation (incl. maintenance and repair), and a number of environmental impacts during the production and use phase. In addition to the global warming potential (GWP) and the primary energy input (PE), these environmental impacts also include the consumption of abiotic depletion potential elementary (ADPE), the eutrophication potential (EP), the acidification potential (AP) and the Photochemical Ozone Creation Potential (POCP).

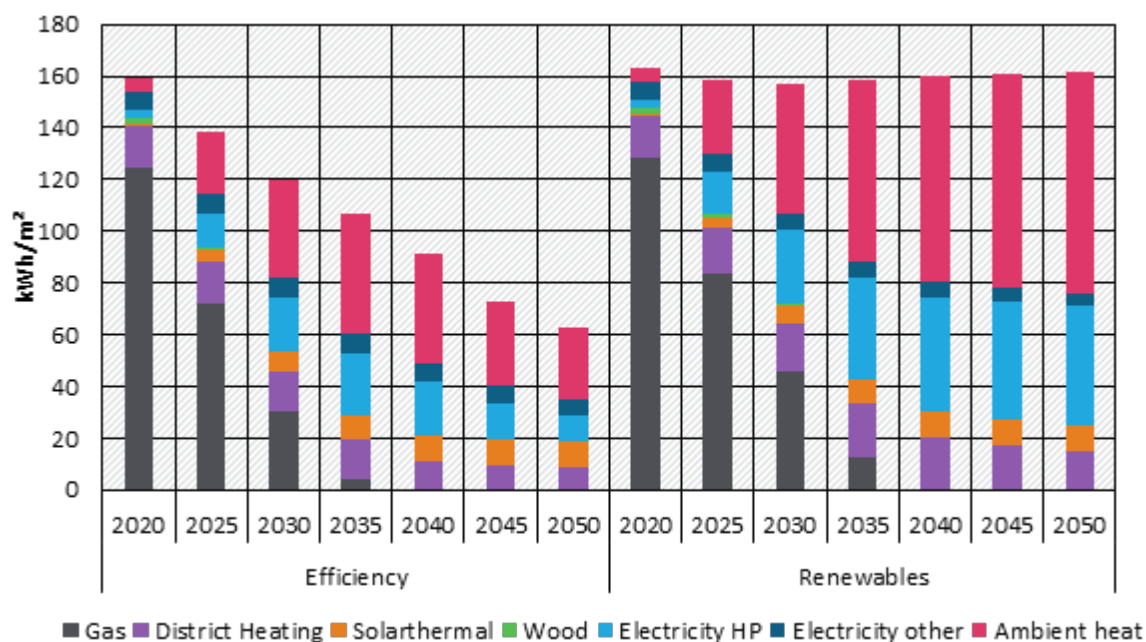
The following results can be summarised for the considered transformation pathways in the sample districts:

Priority of energy efficiency (efficiency path) or priority of renewable energies (RE path) in the example of Freiburg Haslach: the energy demand of the district remains almost constant in the RE path, whereas it decreases by almost 60% in the efficiency path. The environmental goals are achieved in the RE path at slightly lower costs overall. The other environmental impact categories from the production of components/building technology have a greater impact in the efficiency path than in the RE path. However, this is more than offset in the years up until 2035 by the combustion of natural gas in the use phase: up until 2035, the RE path therefore performs worse in the combined analysis of the environmental impacts of the production and use phases, but in the long term the paths converge. This is only different in the case of the photochemical oxidant formation potential (POCP), where the production of EPS insulation has a negative impact on today's LCA data. In the efficiency path, more electricity is fed into the higher-level grid due to the lower demand for heat pump electricity. From an overall system perspective, the efficiency path offers more degrees of freedom: on the one hand with

regard to electricity consumption or electricity feed-in, and on the other hand with regard to the lower heat demand for other renewable energies.

Figure I shows the final energy consumption (FEC) for heat supply per square metre and year for both paths. It can be clearly seen that the FEC in the efficiency path decreases strongly as a result of greater renovation efforts. In the RE path, on the other hand, the FEC actually increases slightly. This is due to (1) the underlying increase in efficiency of electricity-consuming appliances within buildings, which causes a higher heating demand of the buildings by 2050 (cf. also Öko-Institut e.V. and Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE) (2017)), and (2) the fact that heat pumps are used here in numerous unrefurbished buildings, where they operate less efficiently. Due to the default setting for the energy carrier distribution, heat pumps dominate as the main heating system over time in both transformation paths, with some support from solar thermal. Due to the selected replacement rate for the heating technology, all heating systems in the district have been replaced by 2040. District heating, which supplies the sub-district "Gartenstadt" with heat in both paths, is also clearly visible.

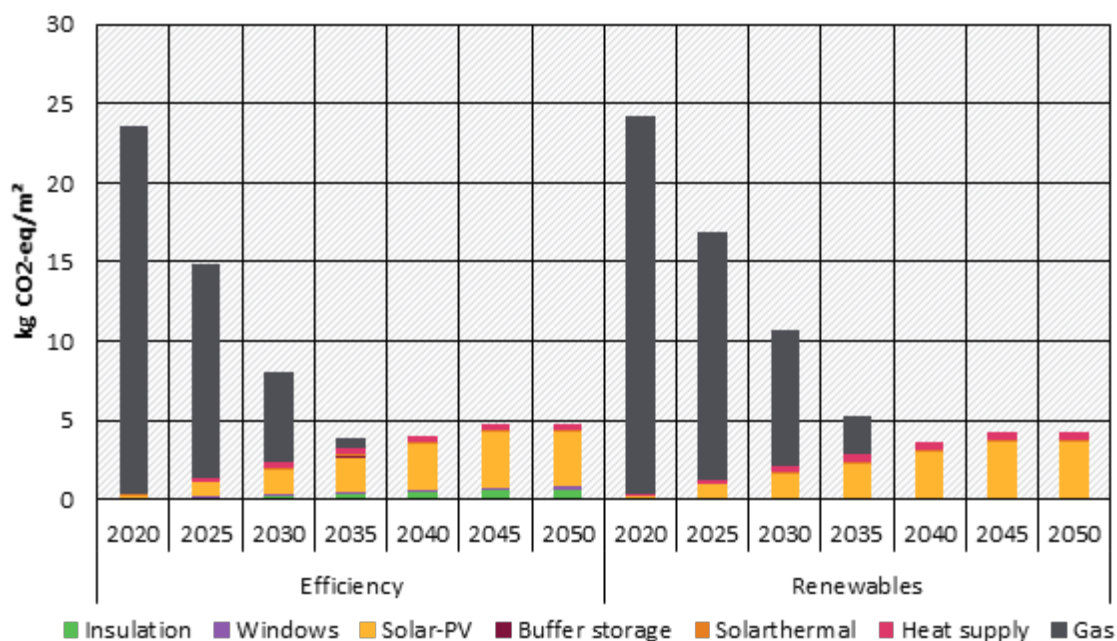
Figure I: Final energy consumption of the heat supply in Haslach per residential or usable floor area (in kWh/(m²a)) shown for the different energy sources (left: efficiency path, right: renewable energy path)



Source: Own calculations

Figure II shows the results of the environmental impact assessment from the use and production phases for the global warming potential. The environmental impacts of the production phase are evenly distributed ("annuated") over the respective useful life of the building component and can thus be placed in relation to the use phase. Due to the heat supply with natural gas, the results are strongly dominated by the use phase in the early years, but over time the share of the use phase decreases dramatically.

Figure II : GWP per square metre of gross floor area (left: efficiency path, right: renewable energy path)

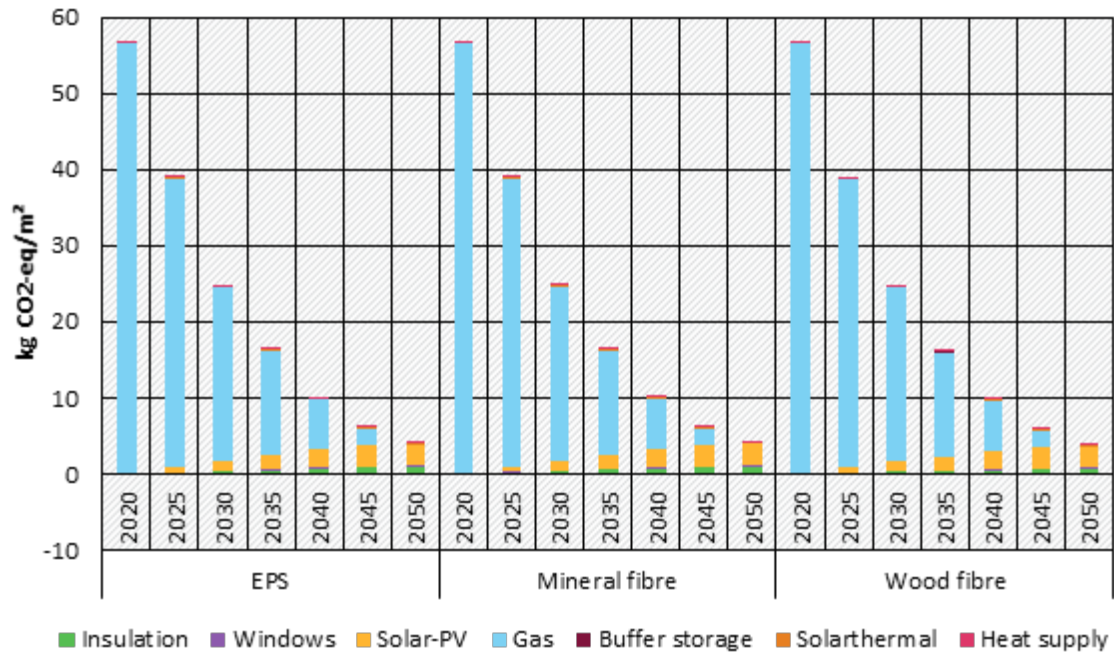


Source: Own calculations

Conventional insulation versus insulation made from renewable raw materials using the example of Weingarten-West: Wood fibre insulation only causes about two thirds of the greenhouse gases in the production phase compared to EPS or mineral fibre insulation. At the same time, the costs for wood fibre insulation are noticeably higher than for EPS or mineral fibre insulation. In the other environmental impact categories, the different insulation materials perform differently –however, insulation materials based on renewable raw materials generally lead to lower environmental impacts (cf. Chapter 4.4). When compared to the impacts of the solar-PV systems, however, those of the insulation materials only account for a fraction.

Figure III shows the results for GHG emissions from the use and production phases (left EPS, centre mineral fibre, right wood fibre). Especially in the early years, the results are strongly dominated by the use phase, but over time its share decreases significantly.

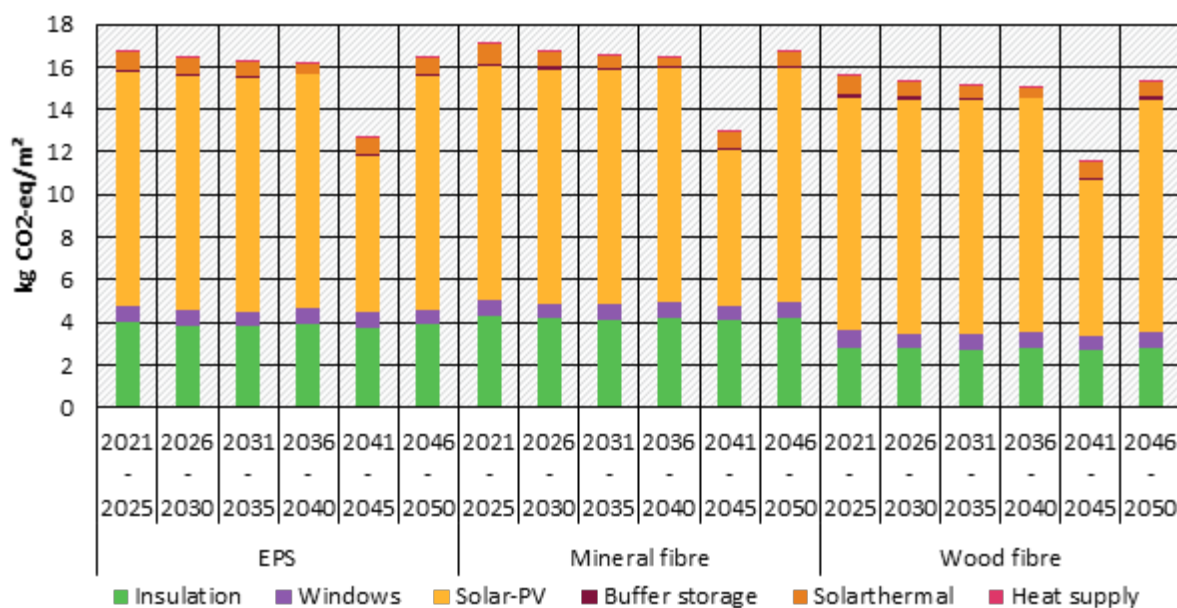
Figure III: GHG-emissions in kg CO₂-eq per square metre of living or usable floor area; left EPS, centre mineral fibre, right wood-fibre.



Source: Own calculations

Figure IV shows the results for GHG emissions during the construction phase. In all three scenarios, GHG emissions are dominated by the identically set roll-out of solar-PV systems (approx. 65-67 % in each case). In second place in all three scenarios is insulation (approx. 20-25 % in each case). Comparing different types of insulation, mineral fibre insulation has the highest global warming potential, while the use of wood fibre insulation has the lowest value.

Figure IV: GHG emissions accumulated over 5-year steps in kg CO₂-eq per square metre of gross floor area (left EPS, centre mineral fibre, right wood fibre)



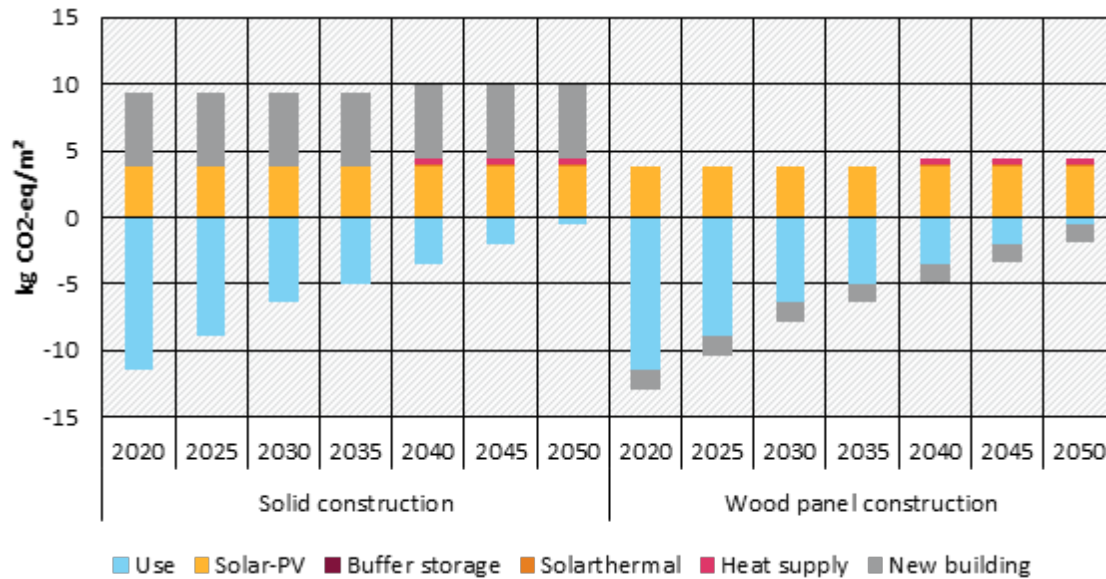
Source: Own calculations

Conventional new construction (solid construction) versus new construction using wood panel construction in the example of the Ludwigshöh district:

The very high energy standard of the buildings in combination with the use of renewable energies meets the environmental goals for 2050 from the very beginning. The wood panel construction performs significantly better in the environmental impact categories (including global warming potential) compared to the solid construction based on sand-lime bricks. At the same time, wood panel construction is slightly more expensive. The overall low energy consumption of the district, both for heat (by means of heat pumps) and for electricity, leads to high solar-PV feed-in quantities.

Figure V shows the results for the emission of greenhouse gases from the use and assumed production phase. Especially in the early years, the use phase has a relevant share of the total, but over time its share decreases strongly. The wood panel construction has negative GHG emissions due to the binding of atmospheric carbon within the wood (shown in grey).

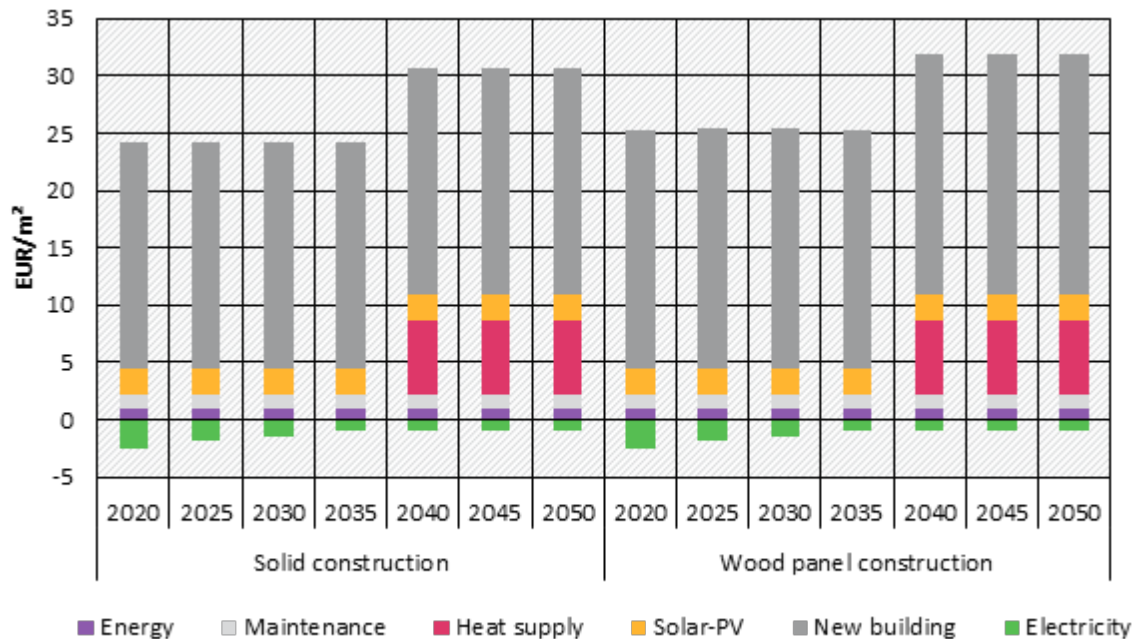
Figure V: Global warming potential in kg CO₂-eq per square metre of living or usable floor area; solid construction on the left; wood panel construction on the right.



Source: Own calculations

Figure VI shows the annuities of the investment costs and the annual running costs for thermal energy, electricity and maintenance. Differences between conventional solid construction and wood panel construction are only seen in the investment costs of the construction used. The running costs are significantly lower than the annuated investment costs. This is due to the very high energy standard of the buildings from the very beginning. Since solar-PV systems have also been installed from the beginning, more electricity is generated in the district than is consumed. The surplus electricity is "exported" from the district and remunerated at decreasing rates.

Figure VI: Annuities of investment costs as well as running costs in EUR per square metre of living or usable floor area in the Ludwigshöh district (left: solid construction, right: wood panel construction).



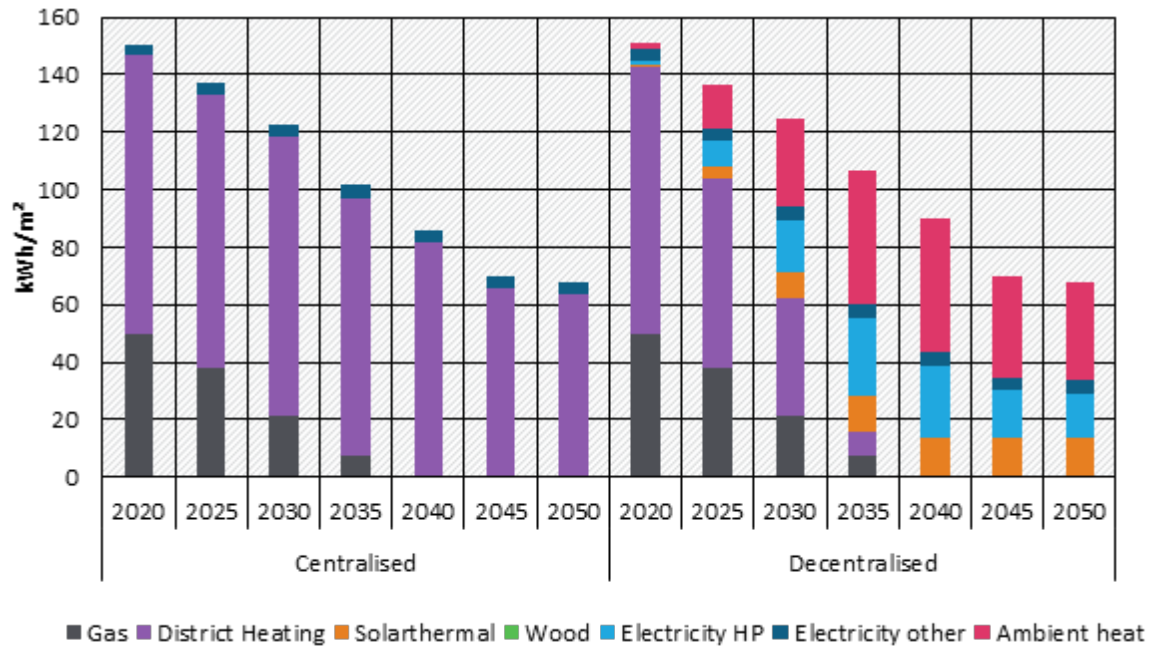
Source: Own calculations

Centralised versus decentralised heat supply using the example of Linkenheim-Hochstetten:

The conversion of the sourcing of the district heating system to renewable energies leads to a significant reduction in GHG emissions. The solar-PV feed-in quantities are higher for the centralised heat supply path, as the assumed large-scale heat pump works more efficiently than the decentralised heat pumps. Conclusions on the environmental impact categories are hardly meaningful, since no environmental impact data is yet available for large heat pumps in the relevant databases. The decentralised heat supply path with its combination of heat pumps and solar thermal energy has higher costs than the large-scale heat pump including grid expansion and the installation of additional heat grid transfer stations in the buildings. However, the uncertainties in the assumed investment costs are high.

Figure VII shows the evolution of the final energy consumption by energy carrier. While in the centralised path the entire heat demand is covered by district heating (+ electricity as auxiliary energy), decentralised heat pumps dominate in the decentralized path.

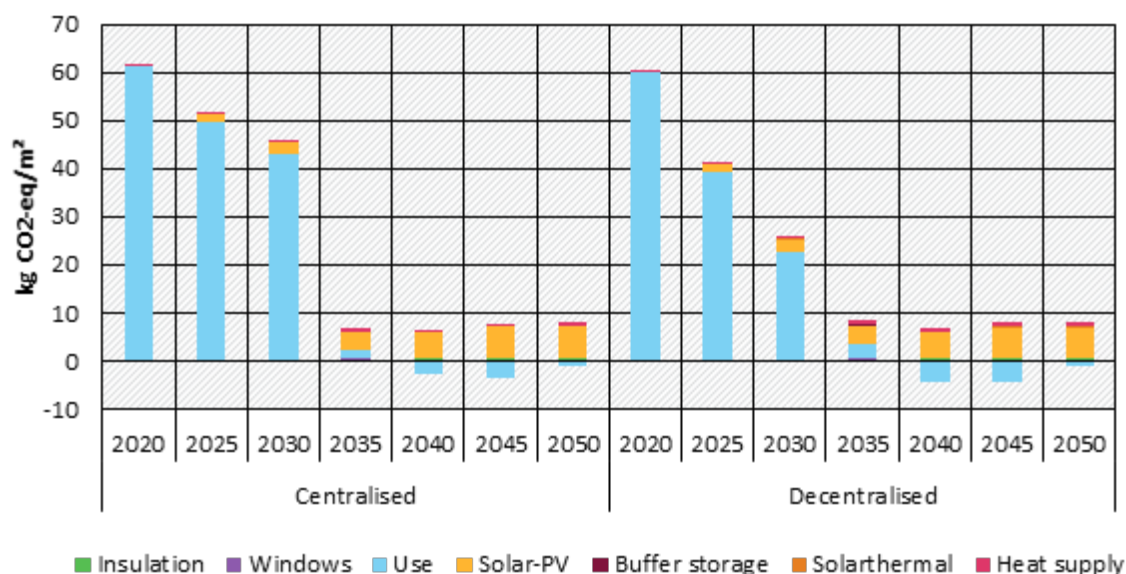
Figure VII: Final energy consumption of the heat supply in Linkenheim-Hochstetten per residential or usable floor area (in kWh/(m²a)) (left: centralised, right decentralised)



Source: Own calculations

Figure VIII shows the results for the emissions of greenhouse gases from the use and production phases (left centralised, right decentralised). Especially in the early years, the results are strongly dominated by the use phase, but over time the share of the use phase decreases significantly.

Figure VIII: GHG emissions in kg CO₂-eq per square metre of living or usable floor area (left centralised; right decentralised)



Source: Own calculations

Cross-evaluation

Despite differences in size and other characteristics of the districts, the following common conclusions can be drawn for all districts:

1. High renovation rates with simultaneous deep renovation lead to a significant reduction in energy consumption, which reduces the pressure on renewable energies covering the remaining energy demand. This also benefits the overall energy system, as more degrees of freedom are created in the distribution of the various energy sources, which are limited in their availability.
2. The high solar-PV addition rates enable each of the districts to have an annual energy balance surplus supply of electricity generated within the district. This is even the case for the Haslach district and the low-efficiency renewable energy path. It should be noted, however, that electricity consumption as a result of increased e-mobility, electricity for street lighting or commercial and industrial electricity were not taken into account in the calculations.
3. The course of the CO₂ emission reduction of the districts is mostly steeper in the first decade and then flattens out. On the one hand, this is due to the assumption that the buildings with the worst energy status are renovated first and thus greater reduction potentials are tapped in the beginning. On the other hand, it is due to the initially higher effect of the electricity generated within the district by means of solar-PV, since at the beginning of the transformation path this displaces district-external electricity, whose CO₂ backpack is initially even more CO₂-intensive.
4. The high solar-PV addition rates lead to high effects in all environmental impact categories. The example of the newly-built district Ludwigshöhe shows that the environmental impacts

of the PV modules are even in the same order of magnitude as those of the new buildings themselves (in relation to the gross floor area of the buildings). It is important to emphasise here that the level of grey emissions from solar-PV module production will decrease significantly in the future if the electricity used to manufacture the modules is also produced more on the basis of renewable energies. Currently, most solar-PV modules are produced in China using high shares of coal-based electricity. In addition, the solar-PV electricity generated avoids the environmental impacts of electricity generation from fossil fuels in Germany.

5. Part of the refrigerants are lost in the use phase of the heat pumps. Most refrigerants currently used contribute in a relevant way to the GWP. It can be assumed that fewer refrigerants with a greenhouse effect will be used in the future, so that the direct greenhouse gas emissions from the use of heat pumps will decrease in the long term.
6. In the early years of the period under consideration, the use phase dominates in most environmental impact categories (in particular the use of natural gas, but also electricity generation and district heating); over time, the environmental impacts from the use phase decline significantly. At the same time, the environmental impacts from the manufacturing phase (especially from the production of the solar-PV systems) become more relevant. This illustrates the importance of environmentally friendly manufacturing processes.
7. Single-family house settlement versus multi-family house settlement areas: The cross-evaluation of the transformation paths shows that the per-capita GHG emissions depend strongly on the settlement structure: Due to the large share of multi-family houses, for example, a slightly lower energy consumption per m² is achieved in Weingarten-West than in Linkenheim-Hochstetten, while the per capita energy consumption is only about half, given the same renovation rate.

Energy management systems (EnMS)

In one of the selected districts, the use of energy management systems (EnMS) in the district is examined in detail (cf. chapter 5). Energy management systems offer the possibility to measure and control demand and supply structures. The term EnMS is used to describe the combination of measuring system, software for data acquisition and structuring, and the user interface, which enables EnMS to take over functions of operational management and optimisation. At district level, the complexity of the combined building demand and supply management increases in comparison to individual buildings. This raises the question of the extent to which an EnMS at the district level, in contrast to the building level, can leverage additional potential and create synergies in order to make the energy supply as resource-, emission- and cost-efficient as possible.

The influence of district EnMS on the sustainable use of renewable energies is therefore quantified by means of a cost, emission and operational comparison of district and building EnMS. For this purpose, the example district Freiburg-Weingarten West is modelled with the optimisation model DISTRICT (Saad Hussein and Hübner 2017; Saad Hussein et al. 2015; Saad Hussein 2017).

For model-based representation, an optimisation of the district as a whole is compared with an optimisation of the individual buildings, which are subsequently reassembled to form a district. The results are to be examined and evaluated for the effects of the use of technical EnMS

(Bauknecht et al. 2017) and in particular for energy and CO₂ savings. Based on the transformation paths for the example district from Chapter 4, EnMS are analysed in scenarios in districts with different energy supply structures. For this purpose, the district's energy system for the year 2035 is mapped in the model as a reference scenario. The reference scenario is characterised by a central district heating supply. Based on the reference scenario, systemic changes and sensitivities are investigated in additional scenarios on the use of battery storage and central heat pumps. The reference scenario is compared with a decentralised heat supply scenario.

The example district Freiburg-Weingarten West is modelled based on the existing structure. The transformation paths result in the necessary refurbishment states from "unrefurbished" to "fully refurbished plus" for 19 residential building clusters divided in the Weingarten-West district consisting of 25 multi-family houses, 9 single-family houses, 16 large multi-family houses, as well as 5 non-residential buildings, which are aggregated in the model to 31 building clusters of the same type. Furthermore, the existing electricity and district heating grid structure is integrated into the model. Based on the existing renewable potentials and open spaces, the transformation paths from chapter 4 result in the structure and size of the installed electricity, heating and cooling supply systems, which are reflected in the model for the different scenarios in the installed capacity of photovoltaics, solar thermal, heat pumps, gas boilers, absorption chillers and battery storage. In addition, all building clusters are connected to the electricity grid and in all central scenarios to the district heating grid. The use of district EnMS has a positive effect on the total costs and CO₂ emissions by scenario in the single-digit percentage range.

In the comparison of centralised and decentralised district scenarios, stronger positive overall cost effects of district EnMS result in the centralised scenarios with a connection to the district heating grid, due to the better utilisation of the flexibility potentials when using the photovoltaic surpluses and the more cost-effective heat supply. However, the CO₂ emissions of the decentralised scenarios with the heat pump and gas boiler supply are lower than in the central reference scenario with district heating from gas power plants. The analysis shows significantly lower CO₂ emissions and costs in both the centralised and decentralised scenarios in the use of district EnMS than through single-building EnMS. Due to the increased use of within-district generated electricity, the district EnMS can avoid the additional emissions associated with the purchase of electricity from outside and thus achieve better target values.

Furthermore, the use of battery storage and its additional benefit for EnMS is investigated in one scenario. Due to the flexibility options already used in district EnMS, battery storage contributes only slightly to the improvement. In comparison, single-building EnMS can already use battery storage to reduce costs and optimise self-consumption, so that in this case central district EnMS hardly offer any measurable added value, since the greatest cost savings are achieved by avoiding grid purchases.

When considering a central, CO₂-neutral district heating supply through a high-temperature heat pump (combined with a central heat storage), the possible operation and use is analysed in a further scenario. The model results show additional cost reductions (7.8 %) and CO₂ emission reductions of 9.2 % in the scenario when using a district EnMS.

In summary, the analysis shows that EnMS can make a positive contribution to sustainable districts. The effects of EnMS are strongly dependent on the system configuration and the available flexibilities. Since the hardware and software investment costs for the EnMS were not taken into account in this analysis due to their large range, it must be weighed up in each individual case whether the possible efficiency gains justify the increased costs. The results can contribute as a case study to the discussion of the use of EnMS in districts for cost and emission reduction.

1 Hintergrund, Ziele des Vorhabens, grundlegende Vorgehensweise

1.1 Hintergrund

Ein zentrales Strategieelement zum Gelingen der Energiewende besteht in der sukzessiven Dekarbonisierung des Gebäudesektors. Im 2020 überarbeiteten Klimaschutzgesetz wird für den Gebäudesektor eine Reduktion der jährlichen Treibhausgasemissionen auf 67 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 festgelegt. Im Zuge der Ambitionssteigerung der Energie- und Klimaziele für das Jahr 2030 sind potenziell weitere Minderungsbeiträge im Gebäudesektor erforderlich. Für das Jahr 2045 ist im Klimaschutzgesetz das Ziel der Treibhausgasneutralität gesetzlich verankert. Bereits im Rahmen des Energiekonzepts 2010 (Deutsche Bundesregierung 2010) wurden ehrgeizige Transformationsziele für den Gebäudebereich festgelegt und in einem Eckpunktepapier Energieeffizienz weiter konkretisiert (Deutsche Bundesregierung 2011). Bereits zu diesem Zeitpunkt wurde als zentrales Ziel die Transformation des Gebäudesektors in Richtung eines nahezu klimaneutralen Zustands im Jahr 2050 festgelegt. *„Klimaneutral heißt, dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf [...] zum überwiegenden Teil durch erneuerbare Energien gedeckt wird“* (Deutsche Bundesregierung 2011).

Mit den im Klimaschutzprogramm bestehenden Maßnahmen wird das Sektorziel für den Gebäudesektor voraussichtlich deutlich verfehlt (Öko-Institut et al. 2020; Prognos et al. 2020a). Die Studie Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) 2017) und das Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude der Bundesregierung (Thamling et al. 2015) zeigen, dass eine Zielerreichung nur über den Zweiklang Steigerung der Energieeffizienz sowie Ausbau der Versorgung durch erneuerbare Energien zu erreichen ist. Ergebnis der beiden Studien ist allerdings auch, dass sowohl bei der Effizienz als auch beim Ausbau der erneuerbaren Energien gehörige Anstrengungen nötig sind. Keine der beiden Kategorien kann für sich die Ziele im Gebäudebereich erreichen, da beide Extrema in ihren Potenzialen beschränkt sind (vgl. Jochum und Mellwig (2014) und Jochum et al. (2017)).

Gegenüber Einzelgebäuden ist es innerhalb von Quartieren möglich, weitere Klimaschutzpotenziale zu heben, die auf Einzelgebäudeebene nicht oder nur schwer zu erreichen sind. Dazu gehören z. B. die effizientere Nutzung der vorhandenen Infrastruktur (ggf. Nahwärmenetze, Verkehrswege, Mobilitätsangebote), die Möglichkeit, überschüssige Energie im Quartier zu nutzen (z.B. Abwärme) und die Entlastung des Stromnetzes durch die Nutzung von Flexibilitätpotenzialen im Quartier. In diesem Zusammenhang werden auch Energiemanagementsysteme als potenzielle Optimierer eines im Quartier vernetzten Energiesystems betrachtet. Neben der baulich-physischen Komponente spielt bei der Betrachtung des Quartiers auch die Akteurs- und Umsetzungsebene eine zentrale Rolle.

Auch der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung (vgl. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016a)) hebt die Bedeutung von Wärmenetzen in Quartieren ausdrücklich hervor, gerade in Bezug auf die Einbindung erneuerbarer Wärmequellen sowie von (industrieller) Abwärme.

Regulatorische Anforderungen an das energetische Niveau von Neubauten bzw. Sanierungsmaßnahmen beschränken sich bisher in erster Linie auf den Energieverbrauch während der Nutzung der Gebäude (Nutzungsphase). Gleiches gilt für die Förderprogramme (insbesondere der KfW). Steigen jedoch die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz sowie die Anlagentechnik, führt dies in aller Regel auch zu einer Erhöhung des energetischen Aufwands während der Bauphase sowie ggf. auch der am Ende eines Gebäudelebens anfallende Aufwand für den Abriss, die Verwertung bzw. Entsorgung. Während also mit ambitionierteren Energiestandards der Energiebedarf während der Nutzungsphase sinkt, steigt der Energieaufwand für die Errichtung/Sanierung bzw. den Rückbau/die Entsorgung. Damit gewinnt die Frage an Relevanz, ob bzw. ab welchen energetischen Anforderungen es gerechtfertigt ist, die Anforderungen (und ggf. die Förderprogramme) hinsichtlich des Bilanzierungsrahmens über die Nutzungsphase hinaus auszuweiten. Ansätze, der Ressourcenperspektive mehr Gewicht zu verleihen, wurden und werden in den letzten Jahren schon verstärkt aufgegriffen, so beispielsweise beim UBA Vorhaben „Ressourcenschonendes und Treibhausgasneutrales Deutschland“ oder dem Projekt „Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft“ des Öko-Instituts.

Der Untersuchungsrahmen der vorliegenden Studie beschränkt sich somit nicht allein auf die energetische Betrachtung der Gebäude und Quartiere während der Nutzungsphase, sondern beinhaltet auch weitere Umwelteffekte und Vorketten.

1.2 Zielsetzungen des Vorhabens

Die Ziele des Vorhabens sind:

- ▶ Definitionen treibhausgasneutraler und nachhaltiger Quartiere entwickeln.
- ▶ Auftretende Zielkonflikte zwischen den Umweltzielen identifizieren und Lösungsansätze aufzeigen.
- ▶ Eine Abwägung zwischen Sanierung einerseits und Nutzung erneuerbarer Energien andererseits aus Sicht einer Lebenszyklusbetrachtung der entsprechenden Techniken ermöglichen.
- ▶ Den möglichen Nutzen von Energiemanagementsystemen im Gebäude bzw. Quartier sowie deren Anforderungen darstellen.

Grundsätzlich liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf Quartieren. Für die Einzelgebäudeebene sei hier auch auf (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) 2017) verwiesen.

1.3 Grundlegende Vorgehensweise

In Kapitel 2 erfolgt eine Aufbereitung bestehender Arbeiten zu treibhausgasneutralen und nachhaltigen Gebäuden und Quartieren. Dabei werden zunächst die verschiedenen in der Literatur verwendeten Definitionen nachhaltiger Quartiere gegenübergestellt und es wird ein Verständnis der Begrifflichkeiten für die vorliegende Studie herausgearbeitet. Darüber hinaus wird das Thema Messbarkeit von Nachhaltigkeit im Quartier adressiert. Zudem wird der derzeitige Stand sowie die Chancen und Herausforderungen im Zusammenhang mit der Nutzung von Energiemanagementsystemen im Quartier beschrieben. Zuletzt folgt eine Analyse innovativer Ansätze, die in bestehenden nachhaltigen Quartieren zum Einsatz kommen

In Kapitel 3 werden Umweltziele und Kennzahlen betrachtet, die auf unterschiedlichen Ebenen (EU, national, kommunal, Quartier, Einzelgebäude) zur Anwendung kommen, um eine Quantifizierung und Messbarkeit verschiedener umweltrelevante Einflüsse zu ermöglichen. Neben einer Darstellung der bestehenden Ziele und Kennzahlen sowie der Analyse der Defizite bezüglich der Zielerreichung werden weitere Kennzahlen auf Quartiersebene vorgestellt und diskutiert.

In Kapitel 4 werden vier Beispiel-Quartiere identifiziert und analysiert. Es werden möglichst unterschiedliche Quartiertypen ausgewählt, um eine Bandbreite an Aussagen treffen zu können. Darauf folgend werden Entwicklungspfade für die Erreichung der Umweltziele entwickelt. Es werden unterschiedliche Szenarien gerechnet, um beispielsweise die umfangreichere Nutzung erneuerbarer Energien oder stärkere Steigerung der Energieeffizienz zu bewerten. Neben der Betrachtung der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) in der Nutzungsphase werden Lebenszyklusanalysen durchgeführt, die es ermöglichen, die Ressourceninanspruchnahme außerhalb der reinen Nutzungsphase zu ermitteln.

Im Anschluss wird in Kapitel 5 anhand von Modellrechnungen der mögliche Beitrag eines Energiemanagementsystems evaluiert. Hierfür wird eins der vier Quartiere im Detail untersucht.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete aufgegriffen und zusammengeführt. Es werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen entwickelt.

2 Quartiere und Energiemanagementsysteme

2.1 Definition, Abgrenzung und Bedeutung nachhaltiger Quartiere

2.1.1 Definitionen des Begriffs Quartier

In der Literatur besteht eine Vielzahl von Definitionen des Begriffs „Quartier“, wobei häufig entweder eine gesellschaftlich-handlungsorientierte Dimension, eine baulich-physische Dimension oder eine Verknüpfung der beiden im Vordergrund steht. Das Quartier kann dabei als Gebiets-, Akteurs- und Umsetzungsebene betrachtet werden. Auf der Ebene der sozialen Stadtentwicklung bezeichnet das Quartier „einen sozialen Raum, der kleiner als ein (administrativ abgegrenzter) Stadtteil, aber durchaus vielfältiger sein kann als ein Wohngebiet, das planungsrechtlich nur dem Wohnzweck dient“ (Alisch 2002). Auch in Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2013) wird die prozessuale Ebene hervorgehoben, indem das Stadtquartier als Sozial- und Interaktionsraum verstanden wird, in dem es prinzipiell für alle möglich ist, miteinander zu kommunizieren sowie unmittelbare Meinungsäußerung und spontane Willensbildung zuzulassen. In seinen Arbeiten zur Quartiersforschung schlägt Schnur (2014) folgende Definition vor: „Ein Quartier ist ein kontextuell eingebetteter, durch externe und interne Handlungen sozial konstruierter, jedoch unscharf konturierter Mittelpunkt-Ort alltäglicher Lebenswelten und individueller sozialer Sphären, deren Schnittmengen sich im räumlich-identifikatorischen Zusammenhang eines überschaubaren Wohnumfelds abbilden.“

Folgende Definitionen fokussieren auf funktional-räumliche Beziehungen zur Beschreibung von Quartieren:

„Im Allgemeinen versteht man darunter eine räumliche Einheit, welche mit der Stadt vernetzt ist, sich aber durch ihren eigenen Charakter von anderen Gebieten abgrenzt.“ (Anders 2016)

„In einem generellen Sinne ist ein Stadtquartier so klein wie möglich, um darin sinnfällige Orientierung zu finden und unkompliziert soziale Beziehungen pflegen zu können. Zugleich ist es so groß wie nötig, um allen Alters- und Sozialgruppen im Nahbereich alltagsnotwendige Erwerbs-, Versorgungs- und Regenerationsmöglichkeiten zu bieten.“ (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) 2013)

(Galster 2001)¹, konkretisiert den Quartiersbegriff als „komplexes Gut“, welches aus vielen einfacheren Einzelgütern besteht und nennt hier zehn raumbezogene Attribute, mit denen das Quartier beschreibbar ist:

1. Bauliche Charakteristika (Bautypen, Modernisierungsgrad, Baudichte etc.)
2. Infrastrukturen (Straßen etc.)
3. Demographische Faktoren
4. Sozialer Status der Bevölkerung
5. Lokale Dienstleistungen (Quantität, Qualität)
6. Umweltfaktoren (Topographie, Emissionen etc.)
7. Erreichbarkeit (Topologie, Transportwesen etc.)
8. Politische Faktoren (politische Netzwerke, Partizipation etc.)

1 Zitiert in Schnur 2014.

- 9. Soziale Interaktivität (soziale Netzwerke, Normen etc.)
- 10. Gefühlte Attribute (Ortsbindung, Quartiershistorie etc.)

Versucht man das Quartier auf räumlicher Ebene zu definieren und greifbar zu machen, führt beispielsweise (Frick 2011), eine Definition an: „Ein Quartier ist eine soziale und baulich-räumliche Gebietseinheit mittlerer Maßstabebene, die sich innerhalb der gebauten städtischen Gebiete von außen und innen her abgrenzen lässt, sich von den umgebenden Siedlungsteilen unterscheidet und eine spezifische Qualität und Identität aufweist.“

In Hinblick auf die Vergleichbarkeit verschiedener Quartiere stellt die Vielzahl an Definitionen und die oft nicht klar definierte Abgrenzung eine Herausforderung dar. Laut (Mayer et al. 2011) ist das Problem aus solch unscharfen Definitionen, dass sich Quartiere nur bedingt maßstabsunabhängig vergleichen und in ihrer Entwicklung beschreiben lassen.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Definitionen bezeichnet der Begriff „Quartier“ im neuen Gebäudeenergiegesetz (GEG) zwei oder mehr „in räumlichem Zusammenhang stehende Gebäude“ und fokussiert somit ausschließlich auf den räumlichen Charakter.

2.1.2 Definition nachhaltiger Quartiere

Neben dem Quartiersbegriff ist auch der Begriff der Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit der Entwicklung von Quartieren nicht scharf definiert. Hier lassen sich Definitionen ableiten aus den langjährigen Prozessen der nachhaltigen Entwicklung, die auf städtischer Ebene bereits seit vielen Jahren von großer Bedeutung sind.

Bereits im Zusammenhang mit der 1992 auf der Konferenz in Rio de Janeiro verabschiedeten *Agenda 21*² als weltweites Aktionsprogramm für eine nachhaltige Entwicklung erfolgte der Auftrag an die Länder, Regionen und Kommunen, zusammen mit ihren Bürgern passende Konzepte und Maßnahmen für die Situationen vor Ort zu entwickeln – die *Lokale Agenda 21*.

In den 1990er Jahren wurde hinsichtlich weltweit zunehmender ökologischer und sozialer Probleme das Konzept der nachhaltigen Entwicklung stärker auf die Städte übertragen. Städte wurden immer mehr als ideale Umsetzungsebene für eine nachhaltige Entwicklung erkannt und so entstanden auf europäischer Ebene 1994 die *Charta von Aalborg*³ (Charta der Europäischen Städte und Gemeinden auf dem Weg zur Zukunftsbeständigkeit) sowie auf globaler Ebene auf der zweiten Wertsiedlungskonferenz (Habitat II) 1996 die *Habitat-Agenda*. Das Ziel der dritten Habitat-Konferenz (Habitat III), 2016 war es, die politische Verpflichtung zu einer nachhaltigen urbanen Entwicklung zu erneuern.

Auf dem UN-Gipfel 2015 wurde die *Agenda 2030* für Nachhaltige Entwicklung⁴ verabschiedet. Die 17 SDGs (Sustainable Development Goals, Ziele für nachhaltige Entwicklung) der Agenda umreißen die wichtigsten Politikfelder für eine zukünftige globale Entwicklungspartnerschaft, wobei sich das Ziel SDG 11: „Städte und Siedlungen inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig gestalten“ ausdrücklich auf das Thema Stadtentwicklung bezieht.

2 http://www.un.org/depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf

3 http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/aalborg_charta_1994_554.htm

4 <http://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf>

Die nachhaltige Quartiersentwicklung besitzt spezifisch räumliche, soziale und prozessuale Ausprägungen (Hopfner und Zakrzewski 2012). Die Autoren beschreiben, angelehnt an die Inhaltsdimension der nachhaltigen Stadtentwicklung, die Entwicklung eines Quartiers dann als nachhaltig, wenn:

- ▶ ökologische, ökonomische und soziale Belange gleichermaßen berücksichtigt werden,
- ▶ der institutionelle Wandel in Richtung Nachhaltigkeit gestärkt wird
- ▶ die (städte-) bauliche Qualität des Gebiets steigt,
- ▶ der Umsetzungsprozess kommunikativ, partizipativ und reflexiv abläuft,
- ▶ nicht nur die Bedürfnisse der aktuellen, sondern auch der künftigen Bewohner berücksichtigt werden,
- ▶ die Entwicklung nicht auf Kosten von anderen Quartieren/Städten der Welt stattfindet.

2.1.3 Messbarkeit von Nachhaltigkeit im Quartier

Während für Einzelgebäude bereits seit vielen Jahren verschiedene Bewertungs- und Zertifizierungssysteme zur Messung von Nachhaltigkeit in Gebäuden bestehen, sind Bewertungssysteme für Quartiere deutlich weniger verbreitet.

Die verschiedenen hier untersuchten Bewertungs- und Zertifizierungssysteme unterscheiden sich in Bezug auf die Kriterien, die zur Definition von Nachhaltigkeit herangezogen werden. Die Diversität der Kriterien ist nicht zuletzt auf die in Abschnitt 2.1.1 und 2.1.2 dargestellten unterschiedlichen Schwerpunkte bei der Definition und Betrachtungsweise von nachhaltigen Quartieren zurückzuführen. Tabelle 2-1 beschreibt die am weitesten verbreiteten Bewertungs- und Zertifizierungssysteme für nachhaltige Quartiere und vergleicht die jeweiligen Bewertungskriterien im Hinblick auf die Ziele des Projektes: Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben liegt der Fokus dieser Studie auf der ökologischen Nachhaltigkeit der Quartiersentwicklung im Hinblick auf Bautechnik und Energieversorgung sowie den entsprechenden Ressourcenbedarf. Eine ausführliche Beschreibung der Bewertungssysteme befindet sich im Anhang.

Tabelle 2-1: Übersicht zentraler Bewertungs- und Zertifizierungsinstrumente für nachhaltige Quartiere und Kommunen

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Kriterien	Bezug zum vorliegenden Forschungsvorhaben
Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)-Neighbourhood development (ND) ⁵	LEED-ND ist ein internationales Zertifizierungssystem für Quartiere, das in den USA durch den U.S. Green Building Council (USGBC) entwickelt wurde. Die Kriterien fokussieren auf eine integrierte Quartiersentwicklung und umfassen neben Umweltaspekten insbesondere auch soziale	Standort (Smart Location and Linkage), Quartierstruktur und Gestaltung (Neighbourhood Pattern and Design), Grüne Infrastruktur und Gebäude (Green Infrastructure and Buildings), Innovation, Regionale Priorität (Regional Priority)	Die Kriterien des Bewertungssystems decken ein breiteres Spektrum ab als die Herangehensweise im vorliegenden Projekt. Das Kriterium „Green Infrastructure and Buildings“ ist für das vorliegende Forschungsvorhaben von Bedeutung.

5 <https://www.usgbc.org/resources/leed-v4-neighborhood-development-current-version>

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Kriterien	Bezug zum vorliegenden Forschungsvorhaben
	Aspekte. Darüber hinaus wird die Problematik der Zersiedelung adressiert.		
Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) ⁶	Wie beim Bewertungssystem für Gebäude wird auch bei Quartieren eine Ökobilanz durchgeführt. Die Bewertung fokussiert auf die öffentlich zugänglichen Räume zwischen den Gebäuden im Quartier (beispielsweise Verkehrswege, Plätze und Grünflächen). Dazu werden übergeordnete Konzepte u. a. für den Umgang mit Energie, Wasser und Abfall betrachtet. Die Gebäude selbst werden nur mit ihren Basiswerten einbezogen und müssen für eine Quartierszertifizierung nicht nach DGNB ausgezeichnet sein.	Ökologische Qualität, Ökonomische Qualität, Soziokulturelle und funktionale Qualität, Technische Qualität und Prozessqualität.	Die Kriterien des Bewertungssystems decken ein breiteres Spektrum ab als die Herangehensweise im vorliegenden Projekt. Das Kriterium „Ökologische Qualität“ ist für das vorliegende Forschungsvorhaben von Bedeutung.
BREEAM Communities ⁷	BREEAM Communities wurde von dem britischen Building Research Establishment (BRE) entwickelt und adressiert die Planungsphase von neuen Quartiersprojekten. Das System beinhaltet Zielbenchmarks die ökologische, soziale und wirtschaftliche Aspekte der Entwicklung berücksichtigen.	Governance, Landnutzung und Ökologie (land use and ecology), Rohstoffe und Energie (resources and energy), sozialer und wirtschaftlicher Wohlstand (social and economic well-being), Verkehr und Mobilität (transport and movement), Innovation	Die Kriterien des Bewertungssystems decken ein breiteres Spektrum ab als die Herangehensweise im vorliegenden Projekt. Das Kriterium „Rohstoffe und Energie“ ist für das vorliegende Forschungsvorhaben von Bedeutung.
European Energy Award (eea) ⁸	Der European Energy Award basiert auf dem schweizerischen Programm „Energistadt“ und ist ein internationales Qualitätsmanagement- und Zertifizierungsinstrument für kommunalen Klimaschutz. Die Bewertung basiert auf einem Punktesystem für	Entwicklungsplanung/Raumordnung, kommunale Gebäude und Anlagen, Versorgung und Entsorgung, Mobilität, interne Organisation (in Bezug auf Energiethema), Kommunikation und Kooperation	Die Handlungsbereiche des eea decken neben den für das vorliegende Forschungsvorhaben relevanten Aspekten (Entwicklungsplanung/Raumordnung, Kommunale Gebäude und Anlagen, Versorgung und Entsorgung, Mobilität) prozessorientierte Komponenten

6 <https://www.dgnb-system.de/de/nutzungsprofile/alle-nutzungsprofile/quartiere.php>

7 <https://www.breeam.com/discover/technical-standards/communities/>

8 <https://www.european-energy-award.de/european-energy-award/instrumente/>

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Kriterien	Bezug zum vorliegenden Forschungsvorhaben
	verschiedene Handlungsbereiche (siehe Spalte „Kriterien“)		(Kommunikation und Kooperation) ab.
2000-Watt-Areal ⁹	Das 2000-Watt-Areal ist ein Zertifizierungssystem, das basierend auf dem Konzept der 2000-Watt-Gesellschaft die integrierte Quartiersplanung berücksichtigt.	Managementsystem, Kooperation/ Kommunikation/Partizipation, Arealnutzung und Städtebau, Ver- und Entsorgung, Gebäude	Die Kriterien im Bereich „Energie“ beinhalten die Ausschöpfung des Potenzials zur Erzeugung von Strom und Wärme im Areal sowie die ökologische Qualität der extern bezogenen Energie.
Energie⊕ (Stockinger 2016)	Das Energie⊕-Konzept erlaubt eine Einstufung von Siedlungen und Quartieren in Effizienzklassen.	Energieströme, elektrischer Eigendeckungsgrad, elektrischer Eigennutzungsgrad, graue Energie	Die Bilanzierung von Energieströmen im Quartier, die Betrachtung des Quartiers als Prosumer sowie die Bewertung des elektrischen Deckungsgrades sowie Eigenverbrauchs und die Betrachtung grauer Energie sind Kernelemente des vorliegenden Forschungsvorhabens.

Tabelle 2-1 zeigt, dass in nahezu allen dargestellten Zertifizierungssystemen die prozessualen Komponenten der Quartiersentwicklung (z. B. Kooperation, Kommunikation, Partizipation, interne Organisation, Governance) eine wichtige Rolle spielen. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens werden insbesondere die in der letzten Spalte identifizierten Kriterien näher betrachtet in Hinblick auf die Definition von Zielen und Indikatoren (siehe Kapitel 3).

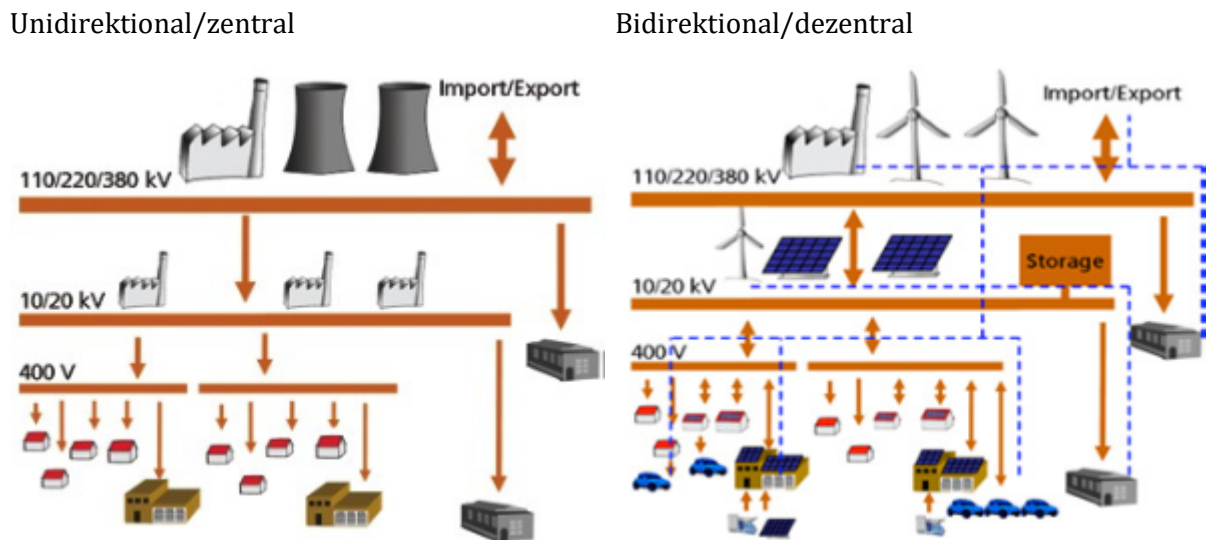
2.1.4 Funktion von Gebäuden und Quartieren als Teil des Energiesystems

Gebäude und damit auch Quartiere wandeln sich durch die verstärkte Nutzung dezentraler erneuerbarer Energien von reinen Energieverbrauchern immer mehr zu Verbrauchern und Erzeugern („Prosumer“). Dies betrifft zum einen die dezentrale Erzeugung von Strom z. B. aus PV-Anlagen und die Einspeisung von überschüssigem Strom in die lokalen Verteilnetze (was auch Auswirkungen auf übergeordnete Netze hat), zum anderen aber auch die verstärkte Kopplung des Strom- und Wärmesektors durch den Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) und Wärmepumpen (WP) in Gebäuden und Quartieren. Sie werden dadurch zu einem integralen Bestandteil des Gesamtenergiesystems – verbunden mit verschiedenen Chancen (z. B. dezentrale EE-Erzeugung und damit Dekarbonisierung des Stromsystems, Flexibilität für die Regelung des Stromnetzes durch flexible Erzeuger und dezentrale Wärme- und/oder Stromspeicher) und Risiken (z. B. zusätzliche Stromnachfrage durch WP, hohe Peaks, wenn WP allein aufgrund der Wärmenachfrage der Gebäude/ Quartiere betrieben werden und Anforderungen der Netze in der Regelung nicht berücksichtigt werden).

9 https://www.2000watt.swiss/dam/jcr:fe4fc124-4a15-4a13-8533-4fac2fa7270e/Kriterienkatalog_DE.pdf

Durch die Zunehmende Sektorkopplung v. a. im Bereich Strom und Wärme sind die integrale Betrachtung und die Berücksichtigung der Anforderungen übergeordneter Energiesysteme essentiell. Schnittstelle zum Energiesystem ist dabei die Gebäude- (Hausanschluss), bzw. Quartiersgrenze (vgl. Kapitel 2.1). Energetische Indikatoren bzw. Parameter, die für die Optimierung der Gebäude und Quartiere, sowie deren Interaktionsmöglichkeiten mit dem Energiesystem von besonderer Relevanz sind, sind u.a. die stündlichen, monatlichen und jährlichen Energiebedarfe der Gebäude bzw. Quartiere (Strom, Wärme, Kälte, weitere), die entsprechenden Leistungen (Stichwort Leistungsspeaks), sowie die Verschiebbarkeit von Energie-/ Leistungsbezug und -erzeugung u.a. durch thermische und elektrische Speicher (bezüglich der Speicher sind insbesondere die Speicherkapazitäten und Lade-/ Entladeleistungen relevant). (Netz-) Signale aus übergeordneten Netzen, die für die Regelung der Gebäude und Quartiere besonders relevant sind, sind neben den Strom-/EEX-Preise auch ökologische Werte wie beispielsweise der stündliche Primärenergiefaktor oder der spezifische CO₂-Emissionswert des erzeugten Stroms. Die beschriebenen Entwicklungen führen zu einer grundlegenden Veränderung des Energiesystems von einem unidirektionalen zu einem bidirektionalen System, in dem Strom sowohl von zentralen, großen Erzeugern zu den Verbrauchern transportiert wird, als auch Strom von dezentralen Erzeugern in übergeordnete Netze eingespeist und an die Endverbraucher verteilt wird (s. Abbildung 2-1). Für das Funktionieren sind Speicher und eine entsprechende Informations- und Kommunikationsinfrastruktur unerlässlich.

Abbildung 2-1: Änderung des Energiesystems von einem zentralen, unidirektionalen (links) hin zu einem dezentralen, bidirektionalen System (rechts)



Quelle: Fraunhofer ISE

Die Bedeutung der Gebäude im Gesamtenergiesystem ist u. a. in der Studie „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) 2017) sowie in den Studien des Fraunhofer ISE „Energiesystem Deutschland

2050“ (Henning und Palzer 2013) und „Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems 2050“ (Henning und Palzer 2015) analysiert und dargestellt.

2.1.5 Definition des Begriffs für das vorliegende Forschungsvorhaben

Im Fokus der Betrachtung der vorliegenden Arbeiten steht die Entwicklung von treibhausgasneutralen Quartieren, unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Dekarbonisierung auf weitere Umwelt- und Ressourcen-relevante Größen.

Im Hinblick auf die Definition des Begriffs *nachhaltiges Quartier* wird im vorliegenden Forschungsvorhaben ein besonderes Augenmerk auf die räumliche und technische Komponente gelegt, in dem verschiedene Zielpfade der Entwicklung von Energieeffizienz-Fortschritten, dem Ausbau erneuerbarer Energien im Quartier sowie der Systemintegration von Quartieren in ein zukünftiges Energiesystem betrachtet werden. Die jeweiligen Vorketten werden ebenfalls in die Betrachtung einbezogen. Die prozessuale sowie die soziale Komponente, der für die eigentliche Gestaltung der notwendigen Transformationsprozesse eine zentrale Rolle eingeräumt wird, steht nicht im Fokus des Forschungsvorhabens. In Bezug auf den Begriff der Nachhaltigkeit steht die ökologische Komponente im Vordergrund.

Die Auswahl der zu betrachtenden Quartiere berücksichtigt schwerpunktmäßig bauliche und energieverbrauchsrelevante Eigenschaften (z. B. Alter des Gebäudebestands, dezentrale vs. Zentrale Wärmeversorgung, Bebauungsdichte, Eignung für die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen, etc.).

2.2 Innovative Ansätze auf Quartiersebene

In diesem Kapitel werden innovative Quartiersansätze zusammengefasst und beispielhaft aufgelistet. Für die Recherche hierzu wurden insbesondere das Programm „Energiewende Bauen – Forschung für energieoptimierte Gebäude und Quartiere“ (www.energiewendebauen.de) sowie die Quartiersprojekt-Datenbank des PtJ „EnArgus“ (www.enargus.de) herangezogen. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Es soll lediglich gezeigt werden, welche durchaus unterschiedlichen innovativen Ansätze in den letzten Jahren entwickelt, geplant bzw. schon umgesetzt wurden.

Tabelle A1-1 im Anhang enthält eine detaillierte Liste über laufende und schon abgeschlossene Projekte zu innovativen Quartieren. Neben Projekten, die einen Fokus auf den Quartiersansatz aus Perspektive der effizienteren Wärmeversorgung (inkl. Wärmespeicherung) legen, gibt es in den letzten Jahren verstärkt Modellprojekte, die auch die Stromerzeugung, –nutzung und –speicherung im Quartier sowie die Verknüpfung der Strom- und Wärmeversorgung adressieren. Das Thema Netzdienlichkeit bzw. Systemdienlichkeit wird inzwischen von vielen Modellvorhaben aufgegriffen. Vielfach gibt es Projekte, die auf die reine wirtschaftliche Betriebsoptimierung mit Energiemanagementsystemen fokussieren. Das Thema Sektorkopplung mittels Power-to-Gas Anwendungen wird in wenigen kürzlich gestarteten Quartiersprojekten vertieft untersucht. Wiederum andere Vorhaben beschäftigen sich gezielt mit denkmalgeschützten Quartieren und den dort erschwerten Möglichkeiten der klimafreundlichen Modernisierung. Eine Zusammenstellung der verschiedenen in den Projekten umgesetzten Ansätze ist in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Übersicht innovativer Ansätze zur Reduktion der CO₂-Emissionen und zur Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen in Quartieren

Innovative Ansätze zur Reduktion der CO ₂ -Emissionen und zur Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen in Quartieren	Praxisbeispiele
Fokus auf Sanierung (z.B. Kommunale Sanierungsfahrpläne zur Steigerung der Sanierungstätigkeit; teilweise Fokus auf denkmalgeschützte Gebäude/ Quartiere)	EnEff Stadt: Reallabor Pfaff-Areal Kaiserslautern Solares Bauen: MAGGIE Regensburg Drei Prozent Projekt EnEff Stadt: SWIVT Siedlungsbausteine für bestehende Wohnquartiere EnEff Stadt: Ludwigsburg, Hartenecker Höhe/Schlösslesfeld EnEff Stadt: Altes Zöllnerviertel Weimar EnEff Stadt: Weingarten 2020 Freiburg Energetische Stadtsanierung (diverse Vorhaben)
Fokus auf die Nutzung von erneuerbaren Energien (z.B. zentrale solarthermische Wärmeversorgung durch Umstellung von bestehenden Wärmenetzen auf Basis fossiler Wärmeerzeugung; Einsatz von saisonalen Wärmespeichern)	EnEff Stadt: Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen EnEff Stadt: Reallabor Pfaff-Areal Kaiserslautern EnEff Stadt: QUARREE100, Rüsdorfer Kamp, Heide EnEff Stadt: Zwickauer Energiewende demonstrieren EnEff Stadt: Neue Weststadt Esslingen Stadt als Speicher Vorwärts-Quartier Schwerin EnEff Stadt: SWIVT Siedlungsbausteine für bestehende Wohnquartiere EnEff Stadt: Hochschul Campus Berlin Charlottenburg EnEff Stadt: Ludwigsburg, Hartenecker Höhe/Schlösslesfeld EnEff Stadt: Altes Zöllnerviertel Weimar Energetische Stadtsanierung (diverse Vorhaben)
Nutzung ökologischer Baustoffe sowie Einsatz von Recyclingmaterialien	Vorwärts-Quartier Schwerin
Energiemanagement innerhalb des Quartiers/ mit Schnittstelle zum übergeordneten Energiesystem	EnEff Stadt: Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg

Innovative Ansätze zur Reduktion der CO ₂ -Emissionen und zur Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen in Quartieren	Praxisbeispiele
	EnEff Stadt: QUARREE100, Rüsdorfer Kamp, Heide EnEff Stadt: Zwickauer Energiewende demonstrieren EnEff Stadt: Neue Weststadt Esslingen Solares Bauen: MAGGIE Regensburg Stadt als Speicher EnEff Stadt: CleanTechCampus Garching EnEff Stadt: Energienetz Berlin Adlershof EnEff Stadt: Vernetzte Quartiere Wolfsburg EnEff Stadt: Weingarten 2020 Freiburg
Online-Visualisierung der Energieverbräuche	Energieoptimiertes Bauen: Plusenergiesiedlung Landshut

Die Auflistung der verschiedenen innovativen Ansätze, die in den diversen abgeschlossenen und noch laufenden Projekten umgesetzt wurden bzw. werden (sollen), dient im Rahmen dieser Studie als Ideenspeicher und Realitätsabgleich für die Betrachtung der Beispielquartiere in Kapitel 4. Insbesondere Aspekte der weitestgehend auf erneuerbaren Energien beruhenden Wärmeversorgung, der ambitionierten energetischen Sanierung der Gebäudehüllflächen, des Einsatzes von Energiemanagementsystemen sowie Aspekte der Systemdienlichkeit des Quartiers werden hierbei aufgegriffen.

2.3 Energiemanagementsysteme im Quartier

Ein optimiertes, intelligentes Energiemanagement bildet einen zentralen Baustein bei der Reduzierung des Endenergiebedarfs, sowohl auf Gebäude- als auch auf Quartiersebene. So zeigen erste Ergebnisse des Projektes ProSHAPE, dass ein intelligentes Energiemanagement im Quartier rund 20 % der Wärmekosten einsparen kann (Borderstep Institut 2016). Mit steigender Nutzung lokal erzeugten PV-Stroms und der Umsetzung von Quartiersversorgungskonzepten wurden in den letzten Jahren vielfältige Konzepte für die intelligente Regelung der Strom- und Wärmeversorgung in Wohngebäuden und -quartieren entwickelt und erprobt.

Im Rahmen der Energiewende sind in Deutschland mehr als 1,5 Millionen dezentrale Kraftwerke, insbesondere im Bereich der erneuerbaren Energien, entstanden, Tendenz weiter steigend. Durch die fortschreitende Digitalisierung der Energiebranche werden diese dezentralen Anlagen immer häufiger mit intelligenten Regelungssystemen ausgestattet, die

sowohl die Funktionsfähigkeit sicherstellen als auch Regelungsaufgaben im Systemumfeld der Kraftwerke übernehmen. Durch solche Energiemanagementsysteme (EnMS) kann der Einsatz von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern nach verschiedenen Zielfunktionen, wie z. B. hoher Eigenverbrauch selbst erzeugter Energie, geringe Energiekosten oder Netzdienlichkeit, optimiert werden. EnMS bilden zudem einen wichtigen Baustein bei der Reduktion des Endenergiebedarfs und somit zur Erreichung der Energieeffizienzziele der Bundesregierung und bieten darüber hinaus das Potenzial zur Erschließung von Flexibilitäten für den Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch im Stromsystem. In den letzten Jahren haben sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Arten von EnMS und damit einhergehend unterschiedliche Geschäftsmodelle entwickelt. Zunächst wird daher ein Überblick über die verschiedenen Arten von EnMS gegeben, wie diese klassifiziert werden können und anschließend eine Auswahl von EnMS genauer vorgestellt sowie deren Geschäftsmodell erläutert. Besonderes Augenmerk gilt dabei EnMS und Projekten auf Gebäude-(Smart Home) sowie Quartiersebene. Abschließend werden die Herausforderungen und Barrieren bei der Verbreitung der EnMS betrachtet.

2.3.1 Definition, Art und Klassen von Energiemanagementsystemen

Laut VDI handelt es sich beim Energiemanagement um „die vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen“ (VDI 4602 Blatt 1). Der Begriff Energiemanagementsystem ist nicht eindeutig definiert und wird demnach für verschiedene Systeme verwendet, die im Energiemanagement eine Rolle spielen. Einerseits werden mit dem Begriff Energiemanagementsystem betriebliche Organisationsstrukturen und Methoden bezeichnet, die zur Umsetzung eines Energiemanagements in Betrieben dienen, wie sie beispielsweise durch die DIN EN ISO 50001 beschrieben werden (Kahlenborn et al. 2012). Andererseits werden auch Soft- und Hardwaresysteme, die bei den einzelnen Schritten und Maßnahmen des Energiemanagements unterstützen oder diese gänzlich übernehmen als EnMS bezeichnet, wie z. B. Systeme, die Energieströme messen und visualisieren und den automatisierten und optimierten Betrieb energietechnischer Anlagen übernehmen können. Analog zur Studie „Bestandsaufnahme und orientierende Bewertung dezentraler Energiemanagementsysteme“ (Bauknecht et al. 2017) beziehen sich die hier betrachteten Energiemanagementsysteme auf technische Anlagen, die dezentrale Erzeuger, Verbraucher und Speicher intelligent vernetzten und automatisiert regeln.

Die hier vorgestellten Energiemanagementsysteme unterscheiden sich dabei im Grad ihrer Dezentralität. So kann sich ein EnMS nur auf einzelne oder auf eine Kombination mehrerer Erzeuger und Verbraucher auf Gebäudeebene (Smart-Home-Systeme) – in Einfamilienhäusern wie auch Mehrfamilienhäusern – und Betriebsebene oder auf ganze Quartiere und Gewerbegebiete beziehen. Dementsprechend werden die hier vorgestellten EnMS in Smart-Home-Systeme und Quartierslösungen unterteilt. Zusätzlich lassen sich die vorgestellten EnMS nach ihrer Zielfunktion/ ihrem Hauptfokus weiter klassifizieren: So können EnMS der Optimierung des Eigenstromverbrauchs, der Minimierung der Betriebskosten (v.a. bei Smart-Home-Systemen) oder die Bereitstellung von Regelernergie dienen. Des Weiteren gibt es EnMS, die nur die Sektoren Elektrizität oder Wärme abdecken, und Systeme, die die Kopplung der beiden Sektoren ermöglichen, auf die im Folgenden besonders eingegangen wird.

2.3.2 Geschäftsmodelle für Energiemanagementsysteme

Die Grundlage der Geschäftsmodelle für EnMS bieten zum einen die erzielbaren Energieeinsparungen, die beim Heizwärmeverbrauch zwischen 20 % und 30 % und beim Stromverbrauch in der Größenordnung von 10 % bei Wohngebäuden und 20 % bei Gewerbebetrieben liegen können (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2014; Beucker et al. 2012; Bauknecht et al. 2017). Da es sich bei EnMS um eine niedriginvestive Maßnahme handelt, die ein Investitionsvolumen von unter 30 €/m² Nutzfläche aufweist, können hier insbesondere die Endverbraucher und Akteure der Wohnungswirtschaft durch geringere Strom- und Heizkosten profitieren. Zudem ermöglichen EnMS über die gezielte Steuerung von Stromverbrauchern den Stromverbrauch in Niedriglastzeiten oder Zeiten hoher Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu verschieben. Netzbetreibern ergibt sich durch netzdienliches Demand-Side-Management ein Vorteil in Form von vermiedenen Netzausbaukosten sowie einer geringeren Netzauslastung. Energieversorger können durch intelligentes Lastmanagement Kosten für Investitionen und Betrieb von Spitzenlastkraftwerken einsparen, eine höhere Auslastung ihres Kraftwerkparks erreichen und den Anteil an günstiger erneuerbarer Energie an der Energieversorgung erhöhen. Um beim Endkunden dementsprechende Anreize für ein Lastmanagement zu schaffen, könnten in Zukunft variable Stromtarife genutzt werden, welche für den Endkunden zu finanziellen Einsparungen führen. Zudem können sich für Endverbraucher durch das Demand-Side-Management in Verbindung mit einer eigenen Stromerzeugungsanlage in Form eines gesteigerten Eigenstromverbrauchs finanzielle Vorteile ergeben. Die Möglichkeit mithilfe der EnMS das Verlagerungs- und Speicherpotenzial mehrerer Kunden zu bündeln und am Regelleistungsmarkt teilzunehmen, für den eine Mindestleistung von 5 MW erforderlich ist, ergibt für große gewerbliche Vermieter oder Industriebetriebe einen weiteren finanziellen Anreiz für den Einsatz eines EnMS. Für das Lastverlagerungspotenzial wird dabei für Haushalte von 5 bis 10 % des Stromverbrauchs ausgegangen, für Gewerbebetriebe mit Anschlussleistungen von 50kW aufwärts liegen die Lastverschiebepotenziale mit 20 % und mehr deutlich höher, insbesondere bei Betrieben mit thermischen Speichern (z.B. Kühlhäuser) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2014).

2.3.3 Smart-Home-Systeme/dezentral gesteuert

Die hier vorgestellten EnMS basieren auf einer kombinierten Hard- und Softwarelösung sowie reinen Softwarelösungen. Die Hardware bildet die Schnittstelle zu den Erzeugern und den steuerbaren Lasten und stellt die Internetverbindung her; sie dient damit als Interface zur Steuerung und Kommunikation. Die Software dient zur Darstellung, Steuerung und Optimierung.

Kiwigrid

Die Kiwigrid-Plattform ist eine Software, die die Integration und Steuerung von dezentralen Energieerzeugern, -speichern und -verbrauchern aller Art ermöglicht, indem sie die Energiedaten von Sensoren sammelt, aggregiert und analysiert und die Anlagen dementsprechend steuert. Für die automatische Steuerung der Anlagen sind zusätzliche Hardwarekomponenten erforderlich. Des Weiteren ermöglicht sie die Überwachung und Planung der Erzeugung aus erneuerbaren Energien, deren Aggregation und den Handel mit

Überschüssen. Kiwigrd ist dabei für alle Akteure des Energiemarktes anwendbar (Kiwigrd GmbH 2019).

Sonnen GmbH und Beegy

Sonnen GmbH und Beegy verfolgen ein ähnliches Konzept beim Energiemanagement im Eigenheim. Über die Verbindung von PV-Anlagen, Batteriespeichern und Ladesäulen für Elektroautos soll ein möglichst hoher Autarkiegrad erreicht werden. Bei Beegy kommen noch Wärmetechniken wie Nachtspeicherheizung und Wärmepumpen zum Portfolio hinzu. Beide Anbieter bieten die Möglichkeit an Strom mit einer Energycommunity zu handeln. Überschussstrom bei eigener Erzeugung wird dabei in die Community übertragen. Reicht die Eigenerzeugung nicht aus, wird Strom aus der Community bezogen. Somit lässt sich eine komplette Unabhängigkeit von anderen Stromversorgern erreichen, solange in der Community immer genügend Strom vorhanden ist, d. h. genügend Speicherkapazität, um Überangebote aufzunehmen und die Nachfrage bei Verbrauchpeaks zu decken. Dieser Service wird je nach Art des Kunden mit unterschiedlichen Tarifen, die jedoch alle eine Grundgebühr enthalten, entgolten. Mit dem Tarif „sonnenFlat“ in Kombination mit der Sonnenbatterie aggregiert Sonnen GmbH Speicherkapazitäten, um damit am Regelleistungsmarkt teilzunehmen (beegy 2019; Sonnen GmbH 2019).

EnKey und tado

Bei EnKey und tado handelt es sich um reine Heizungsmanager. Zentral ist dabei ein steuerbares Heizkörper-Thermostat, welches die Heizung je nach Anwesenheit der Bewohner steuert. Die Steuerung übernimmt bei EnKey ein Raumsensor, der erkennt, ob ein Raum genutzt wird oder nicht. Bei tado wird diese Rolle von einer App übernommen. EnKey verspricht eine Reduktion des Heizenergieverbrauchs um 20 %, tado eine Reduktion der Heizkosten um 31 % (tado GmbH 2019; enkey 2018).

Powerpeers

Powerpeers ist eine Softwarelösung, die über die Blockchain-Technologie einen Marktplatz zur direkten, digitalen Vermarktung von selbsterzeugter erneuerbarer Energie bietet. Die Nutzer treffen die Handelsentscheidungen selbst, also von wem sie wie viel Energie kaufen bzw. an wen sie verkaufen (powerpeers 2019).

Bidgely

Bidgely ist eine Software, die aus den Daten eines Smart-Meters die Stromverbräuche einzelner Geräte herausfiltert, auf Ineffizienzen hinweist und dementsprechende Handlungsempfehlungen gibt. Das Konzept ist auch ohne Smart-Meter anwendbar, wobei in diesem Fall auf eine Big-Data-Analyse vergleichbarer Nutzer zurückgegriffen wird (Bidgely 2019).

2.3.4 Quartierslösungen/zentral gesteuert

Die hier vorgestellten EnMS basieren auf einer kombinierten Hard- und Softwarelösung. Da alle Systeme Teil von Forschungsprojekten waren, wird auf die EnMS mit dem jeweiligen

Projektnamen verwiesen. Diese Art der EnMS stellen interessante Lösungen besonders für große Wohnungsbaugesellschaften, Stadtwerke, Netzbetreiber oder Energieversorger dar, da diese damit neue Geschäftsmodelle erschließen oder ihre Position im Energiemarkt optimieren können.

ProShape (Riedel Systemtechnik)

Im Rahmen des Projektes ProShape wurden sechs Gebäude mit 224 Wohnungen der Wohnungsbaugenossenschaft Zentrum eG in Berlin Prenzlauer Berg, die nach einer Sanierung über ein zentrales Blockheizkraftwerk (BHKW) und ein Nahwärmenetz beheizt wurden, mit einem dreistufigen EnMS der Firma Riedel ausgestattet. Auf der Wohnungsebene kamen Wohnungsmanager zum Einsatz, welche über die Verbindung zu Sensoren und Aktoren die von den Bewohnern gewünschte Solltemperatur einstellten. Die Wohnungsmanager sind mit den Gebäudemanagern verbunden, die deren Daten aggregieren und unter Einbindung von Wetterprognosen und Gebäudedaten die Wärmeübergabestationen steuern. Als übergeordnete Ebene zur Optimierung des Quartiers wurde der Quartiersmanager implementiert, der die Steuerung des BHKWs übernimmt und dabei den netzdienlichen Betrieb mit den Optimierungszielen im Quartier abgleicht. Ziel des Projektes war eine Reduktion des Energiebedarfs und somit die Senkung der Nebenkosten und einen möglichst hohen Anteil des verbrauchten Stroms mit dem BHKW abzudecken. Desweiteren sollte erprobt werden, inwieweit die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäude zu einer Flexibilisierung des Betriebs des BHKWs beitragen kann und ob sich somit eine stromgeführte Betriebsweise des BHKWs als wirtschaftlich erweist. Anstatt Smart-Meter zu installieren, wurden die bereits installierten Ferrariszähler („Standard“-Stromzähler) mit optischen Messwertwiederholern ausgestattet, die den Stromverbrauch über Bilderkennung vom Zähler ablesen und an die Wohnungsmanager weiterleiten.

Durch den Einsatz des EnMS wurde die Prognosegüte für den Strom- und Warmwasserbedarf erhöht, wodurch eine stromgeführte Betriebsweise des BHKWs ermöglicht wurde. Durch die thermische Speicherfähigkeit des Quartiers können bis zu 73 MWh/a (16 % des Gesamtwärmeverbrauchs des Quartiers) als verschiebbare Wärmemenge für einen flexiblen Einsatz des BHKWs genutzt werden. Demzufolge wäre es bei entsprechender Skalierung möglich, mit dem über das EnMS gesteuerten BHKW am Regelleistungsmarkt teilzunehmen. Hierfür müsste die verschiebbare Kapazität mindestens 5 MW betragen. Mit dem Energiemanagementsystem konnten 20% des Heizenergiebedarfs gespart und der CO₂-Ausstoß um 58,4 t/a verringert werden (Beucker und Hinterholzer 2017).

Modellstadt Mannheim

Ziel des Projektes war der Aufbau eines Smart Grids mit zellulärer Architektur zur größtmöglichen Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie zur Einbindung von Speichern. Erprobt wurde dabei der Einfluss eines dynamischen, variablen Stromtarifs auf den Stromverbrauch, der sich aus einer Optimierung aus Eigenverbrauch, Netzauslastung und Strombezug von der EEX errechnet (Duscha et al. 2013). Die verwendete zelluläre Systemarchitektur besteht aus drei selbstoptimierenden Zellebenen: die unterste Zellebene ist die Objektnetzzelle. Die Objektnetzzellen werden auf der Verteilnetzzellebene aggregiert. Als

übergeordnete Zellebene dient die Systemzelebene. Hierfür wurden in drei Feldtests 671 Teilnehmer mit Smart-Metern und einem Energiemanagementsystem der Firma Papendorf, dem sogenannten Energiebutler, ausgerüstet, der in der letzten Testphase die Erzeuger, Verbraucher und Speicher der Teilnehmenden automatisiert steuert und die Verbindung zu den anderen Zellen herstellt. Die wichtigste Größe bei der Steuerung ist der momentane Strompreis. In der letzten Stufe des Projektes wurde zudem eine App zur Visualisierung der Energieverbräuche verwendet, die zum manuellen Energiemanagement anregen sollte. Im Unterschied zum Projekt ProShape wird hier bereits auf Objektebene mit dem Energiebutler eine Optimierung betrieben. Auf der Verteilnetzzellebene werden die Objektzellen dann nach netzdienlichen Kriterien optimiert und auf der Systemzelebene finden der Handel mit Energie sowie die Netzsteuerung statt.

Der dynamische Tarif stieß bei den Kunden auf eine hohe Akzeptanz. Durchschnittlich reagierten sie auf eine 100-prozentige Preisänderung mit einer 11-prozentigen, zu besonderen Tageszeiten sogar 35-prozentigen Verbrauchsveränderung (MVV Energie 2013).

Brooklyn Microgrid

Im Zuge des Brooklyn Microgrid sollte ein gemeinschaftliches Microgrid geschaffen werden, welches sich vom Hauptnetz abkoppeln lässt und das Viertel somit autark versorgen kann. Innerhalb des Microgrids werden die Strommengen mittels Blockchain-Technologie gehandelt. Für das Projekt wurden die Haushalte mit Smart-Metern ausgestattet (Brooklyn Microgrid 2019a, 2019b).

2.3.5 Herausforderungen und Barrieren

Trotz der Vorteile, die EnMS sowohl für Prosumer, Verbraucher und Energiedienstleister, -versorger und Netzbetreiber haben, ist die Verbreitung von EnMS mit gewissen Herausforderungen verbunden. Auf Endkundenseite sind das insbesondere die unzureichende Bekanntheit der Systeme, die Sorge um den Datenschutz der von Smart-Metern erhobenen Lastgänge sowie, insbesondere bei älteren Personen, die Befürchtung mit der Bedienung eines intelligenten Hausautomationssystems überfordert zu sein (Picot et al. 2009). Mit der Einführung des Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende wurde der Sorge um den Datenschutz Rechnung getragen, indem technische Vorgaben für Smart-Meter zur Gewährleistung von Datenschutz und Datensicherheit beim Einsatz festgelegt wurden. Um auch ältere Bevölkerungsschichten anzusprechen, ist neben der Gewährleistung des Datenschutzes und der Datensicherheit eine möglichst intuitive und einfach zu bedienende Nutzerschnittstelle für die weitere Verbreitung von EnMS hilfreich. Außerdem sollte sichergestellt sein, dass durch den regelnden Eingriff des EnMS auf den Energieverbrauch kein Komfortverlust für die Endverbraucher entsteht, da dies ein wesentlicher Faktor für die Akzeptanz von EnMS darstellt (MVV Energie 2013).

Neben den Vorbehalten der Endkunden bilden auch die bisherigen regulatorischen Rahmenbedingungen Barrieren für die weitere Verbreitung von EnMS und der Wirtschaftlichkeit oder Realisierung einiger Geschäftsmodelle. So ergeben sich unter den starren Strompreisen inklusive seiner Bestandteile wie Steuern und Umlagen keine finanziellen Anreize für ein flexibles, netzdienliches Verhalten. Ein geeignetes Vergütungsmodell, z. B. über variable

Stromtarife wie im Projekt Modellstadt Mannheim, könnte hier Abhilfe schaffen. Wie aus den Ergebnissen des Projekts Modellstadt Mannheim hervorging, ist der Hauptanreiz weiter einen variablen Tarif zu nutzen, Geld einzusparen (Duscha et al. 2013). Da die Nutzung eines variablen Tarifs jedoch an intelligente Messsysteme gebunden ist, müssen wirtschaftliche Lösungen marktverfügbar sein, was wie zum Beispiel im Projekt „ProShape“ nicht der Fall war und somit eine weitere Barriere für die Verbreitung von EnMS darstellt.

Hinzu kommt, dass EnMS im Vergleich zu baulichen Energieeffizienzmaßnahmen weniger stark in Normen und Gesetzen verankert sind und auch im Förderprogramm für energetische Gebäudesanierung in Bezug auf Anzahl und Volumen unterrepräsentiert sind (Beucker und Hinterholzer 2017). So könnten analog zu den Normen für Gebäudeautomation (DIN V 18599, Teil 11 oder EN 15232:2012), die Planern die Berücksichtigung des Energiespareffekts von Regelungstechnik bei der Ermittlung des Energiebedarfs ermöglichen, Maßnahmen, die das netzdienliche Verhalten verbessern, als Beitrag zur Verringerung des Primärenergiebedarfs angerechnet werden. Des Weiteren könnte die Einführung von EnMS mit intelligenter Mess- und Regelungstechnik stärker von Anreiz-/ Förderprogrammen gefördert werden.

Im Bereich des vermieteten, mehrgeschossigen Wohnungsbaus ergibt sich zudem die Situation des klassischen Nutzer-Investor-Dilemmas. Dieses ergibt sich aus der Situation, dass die Investitionen in ein EnMS vom Vermieter getragen werden, den direkten Nutzen jedoch der Mieter hat.

3 Umweltziele und -kennzahlen

In diesem Kapitel werden zunächst die vorhandenen Umweltziele in den Bereichen Treibhausgas-Emissionen, Energieverbrauch, Anteil erneuerbarer Energien, Ressourcen etc. für den Gebäudebereich auf Bundes- und EU-Ebene bis 2050 zusammengeführt. Im zweiten Schritt werden im Abgleich mit dem ermittelten IST-Zustand des Gebäudebestands sowie seiner Energieversorgung bestehende Defizite hinsichtlich der Umweltziele ermittelt und diskutiert. Es werden Umweltkennzahlen für Gebäude und Quartiere entwickelt, welche sich an den Umweltzielen orientieren und mit geringem Aufwand bestimmbar sind. Darauf aufbauend werden diese Kennzahlen sowohl für den IST-Zustand als auch den Zielzustand im Jahr 2050 beispielhaft berechnet. Schließlich findet eine Diskussion über die möglichen Transformationspfade bei der Überführung des IST-Zustands in den Zielzustand 2050 statt. Zusätzlich werden Maßnahmen beschrieben, die diese Transformation bei Gebäuden und Quartieren unterstützen.

Das Kapitel ist so strukturiert, dass die Energie- und Klimaziele und ihre dazugehörigen Umweltkennzahlen getrennt von den Ressourcen-, Flächen- und weiteren Umweltzielen sowie deren Umweltkennzahlen betrachtet werden.

3.1 Umweltziele

3.1.1 Energie- und Klimaschutzziele

In Tabelle 3-1 werden die bisher beschlossenen Energie- und Klimaziele mit dem Zeithorizont bis 2050 auf EU- und Bundesebene dargestellt.

Tabelle 3-1: Energie- und Klimaschutzziele auf EU- und Bundesebene (Stand: Dezember 2018)

Kategorie	2020	2030	2040	2050
Europäische Union (EU)				
<i>Treibhausgas-Emissionen</i>				
Treibhausgas-Emissionen im Vgl. zu	- 20 %	- 55 % ¹⁰		- 80 bis 95 %
<i>Erneuerbare Energien</i>				
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	20 %	32 %		
Anteil im Verkehrsbereich	10 %			
<i>Reduktion des Energieverbrauchs und der Steigerung der Energieeffizienz</i>				
Primärenergieverbrauch (gemessen	- 20 %	- 32,5 %		
Bundesregierung				
<i>Treibhausgas-Emissionen</i>				
Treibhausgas-Emissionen ggü. 1990	mind. – 40 %	mind. – 55 %	mind. – 70 %	- 80 bis 95 %

10 Die EU-Kommission legte im September 2020 den Vorschlag zur Verschärfung des Ziels auf -55% vor.

Kategorie	2020	2030	2040	2050
Energiewirtschaft ^{11,12}		- 62 %		
Industrie ¹²		- 51 %		
Gebäude ¹²		- 67 %		
Verkehr ¹²		- 42 %		
<i>Erneuerbare Energien</i>				
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil am Bruttostromverbrauch	mind. 35 %	mind. 50 %	mind. 65 %	mind. 80 %
Anteil am Wärmeverbrauch	14 %			
<i>Reduktion des Energieverbrauchs und der Steigerung der Energieeffizienz</i>				
Primärenergieverbrauch ggü. 2008	- 20 %			- 50 %
Endenergieproduktivität (2008 bis	+ 2,1 % pro Jahr			
Bruttostromverbrauch ggü. 2008	- 10 %			- 25 %
Primärenergiebedarf Gebäude ggü.				- 80 %
Wärmebedarf Gebäude ggü. 2008	- 20 %			
Endenergieverbrauch Verkehr (ggü.	-10 %			

Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018), und Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016a)

Neben den Zielen auf EU-Ebene und nationaler Ebene haben zahlreiche Kommunen Klimaschutzkonzepte beschlossen und sich für bestimmte Stützjahre Zielgrößen für die THG-Emissionsminderung gesetzt (u.a. Berlin, München, Freiburg). Das Bundesumweltministerium fördert im Rahmen der „Masterplan-Richtlinie“ Kommunen, die bis 2050 ihre Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990 und den Endenergieverbrauch um 50 % senken wollen. Neben den ersten 19 Masterplan-Kommunen aus dem Jahr 2012 qualifizierten sich im Jahr 2016 weitere 22 Kommunen. In Bezug auf den Ausbau erneuerbarer Energien sind über 150 Landkreise, Gemeinden, Städte und Regionalverbände mit ambitionierten Zielen im Netzwerk „100 % Erneuerbare-Energien-Regionen“ erfasst (Universität Kassel, Fachgebiet VWL mit Schwerpunkt dezentrale Energiewirtschaft (Universität Kassel) 2019).

Auf Quartiersebene spielen Energie- und Klimaschutzziele im Zusammenhang mit der Erstellung eines Quartierskonzeptes eine zentrale Rolle. Die Ziele auf Quartiersebene werden spezifisch für das jeweilige Quartier basierend auf einer Erhebung des Ist-Zustandes sowie der abgeschätzten Potenziale definiert.

¹¹ Die Emissionen der Fernwärme- und Stromnachfrage der anderen Sektoren sind im Sektor Energiewirtschaft enthalten.

¹² Vgl. Bundestag 18.12.2019.

Ableitung von ökologischen Defiziten

Anhand eines Abgleichs zwischen dem recherchierten IST-Zustand der Zielindikatoren bzw. ihrer bisherigen Entwicklung mit den oben definierten Zielen auf Bundes- und EU-Ebene werden im Folgenden mögliche Defizite hinsichtlich der bisherigen Entwicklung der Zielindikatoren beschrieben. Für jedes Ziel wird dabei geprüft, ob die historische Entwicklung des jeweiligen Zielparameters und seine Fortschreibung eine Zielerreichung ermöglicht bzw. wo diese Ziele drohen, verfehlt zu werden. Wo nötig werden dazu (lineare) Projektionen zur Beurteilung der Zielerreichung herangezogen. Tabelle 3-2 zeigt die wichtigsten Gebäude- bzw. Quartiere betreffenden Ziele im Bereich Energie und Klima sowie den zum Zeitpunkt des Schreibens aktuellsten verfügbaren Zwischenwert. Dieser Zwischenwert wird eingeordnet und eine Bewertung hinsichtlich der Zielerreichung im Zieljahr gegeben. Daraus wiederum werden – wo vorhanden – Defizite abgeleitet.

Tabelle 3-2: Einordnung und Bewertung der bisherigen Zielerreichung für Energie- und Klimaschutzziele der Bundesregierung (Stand: Dezember 2018)

Ziel	IST-Wert	Bewertung
<i>Treibhausgas-Emissionen</i>		
Reduktion der gesamten THG-Emissionen um 40 % bis 2020 ggü. 1990	-27,3 % (2016)*	Seit 2009 verbleiben die THG-Emissionen annähernd auf gleichbleibendem Niveau (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2018)). Der aktuelle Klimaschutzbericht der Bundesregierung geht von einer Reduktion bis 2020 von 32 % aus, was einer 8 % Lücke bei der Zielerreichung entspricht (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2018).
Gebäude im Jahr 2030 (nach Klimaschutzplan 2050): - 67 % ggü. 1990	-34,7 % (2016)	Mit 34,7 % Reduktion im Jahr 2016 liegen die THG-Emissionen im Gebäudesektor (in der Logik des Klimaschutzplans 2050 beinhaltet dieser nur die direkten THG-Emissionen der Haushalte sowie des GHD Sektors) höher als ein linear verlaufender Reduktionspfad zwischen 1990 und 2030. Ein linearer Verlauf ergäbe für 2016 eine Reduktion von 42,9 %. Dies bedeutet, dass der Gebäudesektor für eine tatsächliche Zielerreichung im Jahr 2030 zukünftig deutlich größere Anstrengungen zu erbringen hat als dies in der Vergangenheit der Fall war.
<i>Erneuerbare Energien</i>		
18 % EE am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020	14,8 % (2016)	Der EE-Anteil am Bruttoendenergieverbrauch hat sich in der Vergangenheit vor allem aufgrund der stetig gestiegenen EE-Anteile bei der Stromerzeugung erhöht, wohingegen die Wärmeerzeugung und der EE-Anteil am Endenergieverbrauch im Verkehr stagnieren. Setzt sich dieser Trend so fort, sollte das 2020er Ziel geradeso erreicht werden (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018))
Mind. 35 % EE am Bruttostromverbrauch bis 2020	31,6 % (2016)	Der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch ist stetig gestiegen und das Ziel für 2020 wird mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht bzw. sogar übererfüllt werden.
14 % EE am Wärmeverbrauch bis 2020	12,9 % (2017)	Der Anteil der erneuerbaren Energien am Wärmeverbrauch ist nach einer deutlichen Anstiegsphase in den 2000er Jahren in den letzten Jahren nur mehr langsam gestiegen und zuletzt sogar leicht gesunken (vgl. Umweltbundesamt (UBA) (2018b)). Die Zielerreichung für 2020 sollte allerdings nicht gefährdet sein.

Reduktion des Energieverbrauchs und Steigerung der Energieeffizienz

Ziel	IST-Wert	Bewertung
Wärmebedarf Gebäude -20 % im Jahr 2020 ggü. 2008	-6,3 % (2016)	Auf Endenergieebene haben die Gebäude (Wohn- und Nichtwohngebäude) ihren Wärmeverbrauch im Jahr 2016 ggü. 2008 um 6,3 % gesenkt (temperaturbereinigt). Ein linearer Rückgang zwischen 2008 und 2020 ergäbe für das Jahr 2016 einen Reduktionswert von 13,3 %. Bisher ist also weniger als halb so viel passiert, wie für einen linearen Rückgang nötig gewesen wäre. Es ist mit einer Zielverfehlung im Jahr 2020 zu rechnen.
Primärenergiebedarf Gebäude – 80 % im Jahr 2050 ggü. 2008	-18,3 % (2016)	Eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 18,3 % in 8 Jahren ist sicherlich der Weg in die richtige Richtung. Ein linearer Rückgang bis 2050 läge im Jahr 2016 erst bei einer Reduktion um 15,2%. Allerdings ist eine seriöse Abschätzung der Entwicklung bis 2050 nur schwer darstellbar. Vermutlich wird ein gleichbleibender Rückgang des Primärenergiebedarfs von Jahr zu Jahr schwerer, da die leichter erschließbaren Potenziale in den ersten Jahren schon gehoben werden bzw. gehoben worden sind.
Primärenergieverbrauch insgesamt -20 % im Jahr 2020 ggü. 2008	-6,5 % (2016)	Der Primärenergiebedarf ist seit 2014 kontinuierlich gestiegen, eine Erreichung des Ziels für 2020 scheint in Anbetracht der aktuellen Entwicklung sowie des kurzen Zeitrahmens unwahrscheinlich.
Bruttostromverbrauch – 10 % im Jahr 2020 ggü. 2008	- 3,6 % (2016)	Der Bruttostromverbrauch ist von 2008 bis 2016 nur leicht gesunken und war in den letzten Jahren mehr oder weniger auf gleichem Niveau. Eine Zielerreichung für 2020 scheint deshalb unwahrscheinlich.

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen auf Basis Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2018), Umweltbundesamt (UBA) (2018b) und Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018)

* Vorläufiger Wert für 2016 (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018))

Im Bereich der Energie- und Klimaschutzziele sind, mit Ausnahme der Ziele für das Jahr 2020 für den Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung, des erneuerbaren Energien Anteils bei der Wärmeversorgung sowie des erneuerbaren Energien Anteils am Bruttoendenergieverbrauch deutliche Defizite erkennbar. Insbesondere die wesentlichen absoluten Umweltziele wie die Reduktion der THG-Emissionen insgesamt und die Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudesektor werden nach derzeitigem Stand klar verfehlt werden.

3.1.2 Ressourcen- und Flächenziele sowie weitere Aspekte nachhaltiger Stadt- und Quartiersentwicklung

Neben den Zielen zur Absenkung der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich existieren auch politische Ziele zum effizienten und sparsamen Umgang mit Ressourcen (Rohstoffe und

Flächen). Diese werden hier kurz vorgestellt und die aktuelle Zielerreichung mit Blick auf urbane Quartiere thematisiert.

Tabelle 3-3: Ressourcenbezogene Umweltziele (Rohstoffe und Fläche, Stand: Dezember 2018)

	Quelle	2020	2030	2040	2050
Rohstoffproduktivität	ProgRess I (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2012)	Verdopplung ggü. 1994			
Gesamtrohstoffproduktivität	ProgRess II (Deutsche Bundesregierung 2016)		Ø + 1,5 % p.a.		
Primärrohstoffanspruchnahme pro Kopf (Vorschlag)	(Günther und Golde 2015)		-40 % ggü. 2010		
Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV)	(Deutsche Bundesregierung 2016)	30 ha Neuinanspruchnahme von SuV pro Tag	< 30 ha Neuinanspruchnahme von SuV pro Tag		
Siedlungsdichte	(Deutsche Bundesregierung 2016)	Verringerung der Siedlungsdichte vermeiden			
Freiflächenbestand	(Deutsche Bundesregierung 2016)	Verminderung des Freiraumverlusts ¹³ pro Einwohner			

Quelle: Öko-Institut e.V.

In der Diskussion um eine nachhaltige Stadtentwicklung gilt es zudem, Umweltfaktoren wie Luftreinhaltung, Erreichbarkeit von Grünflächen und umweltfreundliche Mobilitätsangebote zu berücksichtigen. Zum Teil gibt es hierfür Umweltziele oder zumindest Indikatoren, die hier ebenfalls kurz vorgestellt werden.

Die Vereinten Nationen adressieren in den Sustainable Development Goals der Agenda 2030 ebenfalls Ziele für eine nachhaltige Siedlungsentwicklung (Vereinte Nationen 2015). Unter dem Ziel 11 „Städte und Siedlungen inklusiv¹⁴, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig gestalten“ werden anzustrebende Entwicklungen beschrieben, die aber nicht mit quantitativen Zielgrößen hinterlegt sind. Die durch Städte verursachte Ressourceninanspruchnahme von Baustoffen und

13 Als Freiraumflächen werden die Landwirtschafts-, Wald-, Abbau- und Haldenflächen sowie Wasserflächen in Form von fließenden und stehenden Gewässern bezeichnet, damit alle Flächen, die nicht zur Kategorie der Siedlungs- und Verkehrsflächen zählen. (Deutsche Bundesregierung 2016)

14 Der Begriff bezieht sich hier auf das Konzept der Inklusion und beschreibt eine Gesellschaft, in der jeder Mensch akzeptiert wird und gleichberechtigt und selbstbestimmt an dieser teilhaben kann – unabhängig von Geschlecht, Alter oder Herkunft, von Religionszugehörigkeit oder Bildung, von eventuellen Behinderungen oder sonstigen individuellen Merkmalen.

Fläche werden nicht explizit adressiert. Indirekt ergibt sich aber über verschiedene Teilziele ein Bezug zu den in diesem Vorhaben untersuchten Ressourcen:

SDG Teilziel 11.6: Bis 2030 die von den Städten ausgehende Umweltbelastung pro Kopf senken, unter anderem mit besonderer Aufmerksamkeit auf der Luftqualität und der kommunalen und sonstigen Abfallbehandlung.

SDG Teilziel 11.7: Bis 2030 den allgemeinen Zugang zu sicheren, inklusiven und zugänglichen Grünflächen und öffentlichen Räumen gewährleisten, insbesondere für Frauen und Kinder, ältere Menschen und Menschen mit Behinderungen

SDG Teilziel 11.3: Bis 2030 die Verstädterung inklusiver und nachhaltiger gestalten und die Kapazitäten für eine partizipatorische, integrierte und nachhaltige Siedlungsplanung und -steuerung in allen Ländern verstärken

Weitere SDG Ziele haben mittelbar einen Bezug zu Stadtentwicklungsprozessen. Dazu zählt insbesondere das Ziel 7: „Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern“ sowie Ziel 12: „Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen“.

Rohstoffproduktivität und Gesamtrohstoffproduktivität

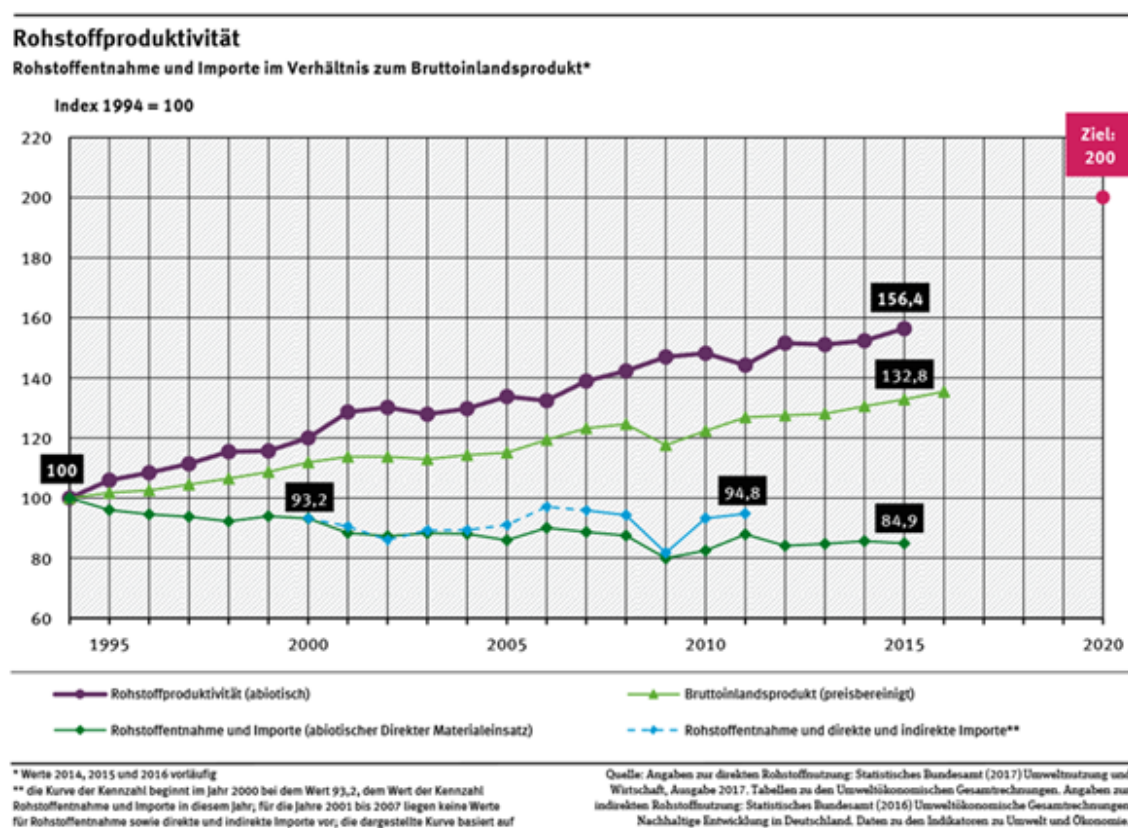
Ziel der Bundesregierung ist der sparsame und effiziente Umgang mit Rohstoffen. Im Ressourceneffizienzprogramm ProgRess I wurde der Indikator Rohstoffproduktivität zur Bewertung des effizienten Rohstoffeinsatzes vorgeschlagen und das Ziel einer Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 formuliert (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2012). Der Indikator „Rohstoffproduktivität drückt aus, wie effizient abiotische Primärmaterialien in Deutschland eingesetzt wurden, um das Bruttoinlandsprodukt (BIP) zu erwirtschaften“ (Umweltbundesamt (UBA) 2018a).

Rohstoffproduktivität = Bruttoinlandsprodukt [€] / abiotischer Direkter Materialeinsatz (DMI) [t]¹⁵

Von 1994 bis 2015 ist die Rohstoffproduktivität in Deutschland um 56 % gestiegen (vgl. Abbildung 3-1). Da sich die Rohstoffproduktivität zuletzt abgeschwächt hat, rechnet das Umweltbundesamt aktuell nicht damit, dass das Ziel einer Verdopplung bis 2020 erreicht wird.

15 DMI = Inländische verwertete Rohstoffentnahme und Importe aus ausländisch verwerteter Entnahme.

Abbildung 3-1: Entwicklung der Rohstoffproduktivität in Deutschland zwischen 1994 und 2015



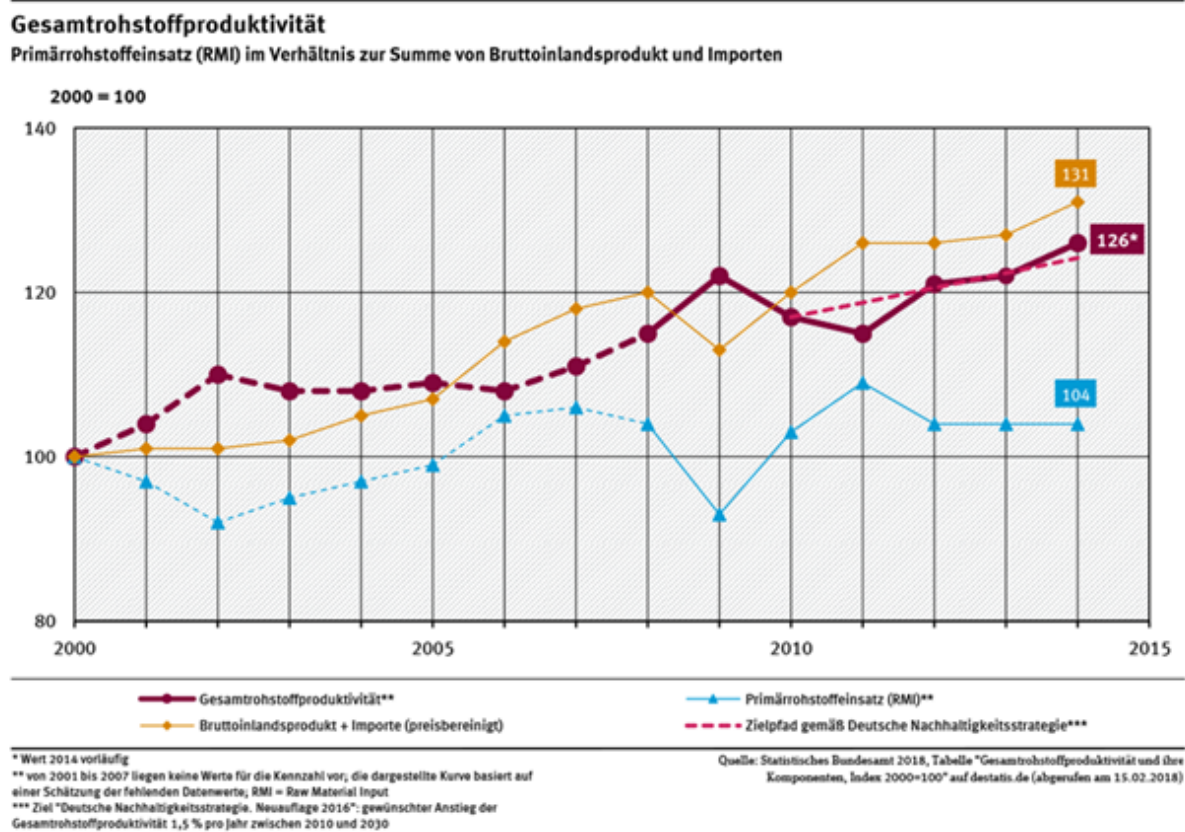
Quelle: (Umweltbundesamt (UBA) 2018a)

Um die Effekte einer Verlagerung der Rohstoffnutzung ins Ausland mitberücksichtigen zu können (z. B. Rohstoffeinsatz zur Herstellung von importierten Halbwaren und Produkte), wurde in ProgRes II der ergänzende Indikator „Gesamtrohstoffproduktivität“ eingeführt und das Ziel einer jährlichen Steigerung um durchschnittlich 1,5 % vorgeschlagen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2016b). Dieses Ziel wurde 2016 von der Bundesregierung in die Neuauflage der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie mit aufgenommen (Deutsche Bundesregierung 2016). Zwischen 2010 und 2014 lag das Wachstum bei insgesamt etwa 8 %. Dies entspricht einem Anstieg von durchschnittlich 1,9 % pro Jahr. (Umweltbundesamt (UBA) 2018a). Demnach befand sich Deutschland für die ersten vier Jahre nach Einführung des Umweltziels über dem gewünschten Zielerreichungspfad.

Gesamtrohstoffproduktivität = $(\text{Bruttoinlandsprodukt} + \text{Importe}) [\text{€}] / \text{Primärrohstoffeinsatz (RMI)} [\text{t}]^{16}$

16 RMI = Summe der inländischen Rohstoffentnahmen und der direkten wie auch indirekten Importe

Abbildung 3-2: Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland zwischen 2000 und 2014

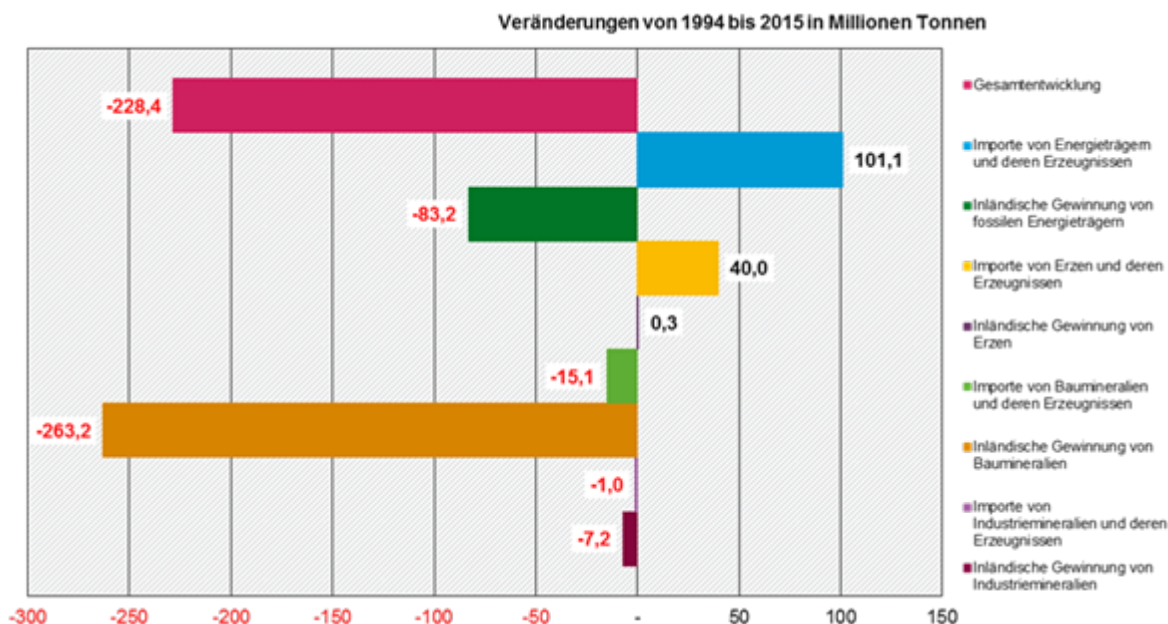


Quelle: (Umweltbundesamt (UBA) 2018a)

Der Bausektor ist sehr rohstoffintensiv, da große Massen an Baumaterial (insb. Mineralische Massenbaustoffe wie Kies und Sand) für Hoch- und Tiefbaumaßnahmen benötigt werden¹⁷. Da der Transport von Massenbaustoffen sehr kostenintensiv ist und Deutschland über ausreichende Lagerstätten verfügt, werden Baustoffe (mit Ausnahmen von metallischen Baustoffmaterialien wie z. B. Bewehrungsstahl) nur in geringem Umfang importiert. Daher kann für die Bewertung des Rohstoffeinsatzes im Bausektor hier vereinfacht der Indikator Rohstoffproduktivität angelegt werden. Für die inländische Gewinnung von Baumineralien zeigt sich gegenüber dem Ausgangsjahr 1994 mit 780 Millionen Tonnen ein deutlicher Rückgang um 263 Millionen Tonnen auf 517 Millionen Tonnen im Jahr 2015 (Umweltbundesamt (UBA) 2018a), siehe folgende Abbildung 3-3. Der Rückgang verlief dabei weitgehend linear. Aktuellere Zahlen, die die gestiegene Bautätigkeit der letzten Jahre abbilden, liegen noch nicht vor.

17 Gleichzeitig ist der Bausektor aufgrund von Aushub und Abbruchmaßnahmen für den größten Abfallstrom in Deutschland verantwortlich. Das Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen betrug 2016 222,8 Millionen Tonnen und damit rund 56 % des Gesamtabfallaufkommens Statistisches Bundesamt (Destatis) 2018a.

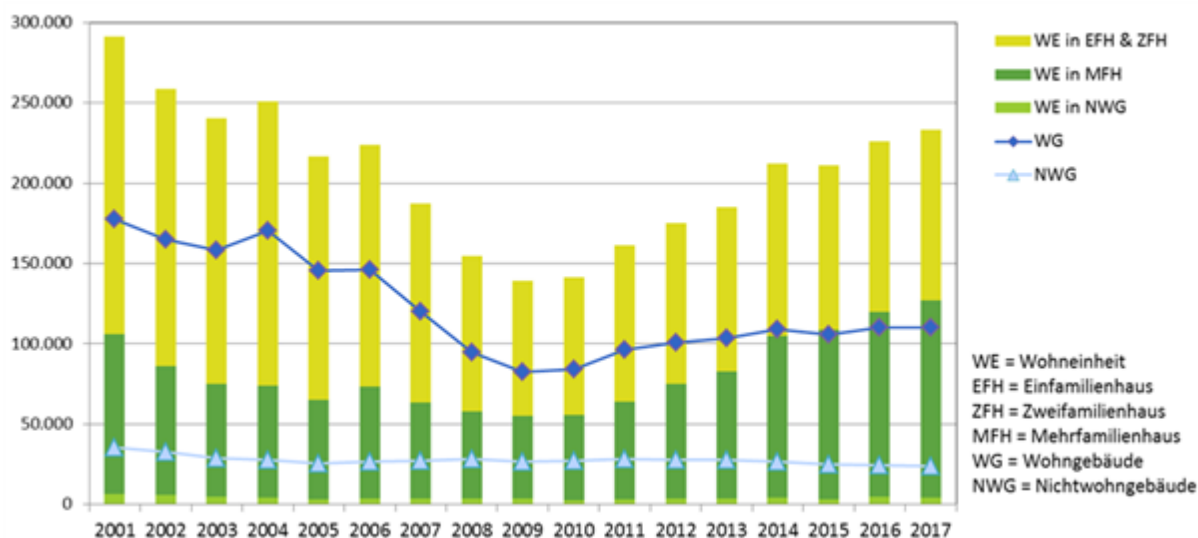
Abbildung 3-3: Entnahme abiotischer Rohstoffe und abiotischer Güter (Vergleich der Jahresmenge 1994 und 2015).



Quelle: (Umweltbundesamt (UBA) 2018a)

Treiber für den Rückgang der inländischen Baustoffgewinnung ist die deutlich geringere Bauaktivität im Wohngebäudebereich der späten 1990er und frühen 2000er Jahre (siehe Abbildung 3-4) sowie der Rückgang beim Neubau von Straßen und Verkehrsflächen (siehe Abschnitt Flächenverbrauch).

Abbildung 3-4: Anzahl fertig gestellter Wohnungen und Gebäude im zeitlichen Verlauf



Quelle: eigene Darstellung nach (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2018b)

Mit Blick auf den Anteil des Bauwesens auf den Indikator Rohstoffproduktivität lassen sich folgende Trends nennen. Aufgrund des aktuellen Baubooms in Deutschland dürfte die jährliche inländische Rohstoffentnahme wieder zunehmen. Hierbei geht die Rohstoffnachfrage aufgrund der demografischen Entwicklung insbesondere von den Wachstumsregionen in Deutschland aus. In einigen Regionen muss auf mittelfristige Sicht sogar mit einer Verknappung und Lieferengpässen gerechnet werden (Elsner 2018). Gleichzeitig steigt durch anziehende Bau- und Immobilienkosten auch der „Wert aller an die letzte Verwendung abgegebenen Güter“ und damit der Zähler in der Berechnung des Indikators.

Es bleibt festzuhalten, dass sich das bestehende politische Ressourcenziel auf die gesamte Volkswirtschaft bezieht und sich bislang nicht auf Städte, urbane Quartiere oder Einzelgebäude herunterbrechen lässt.

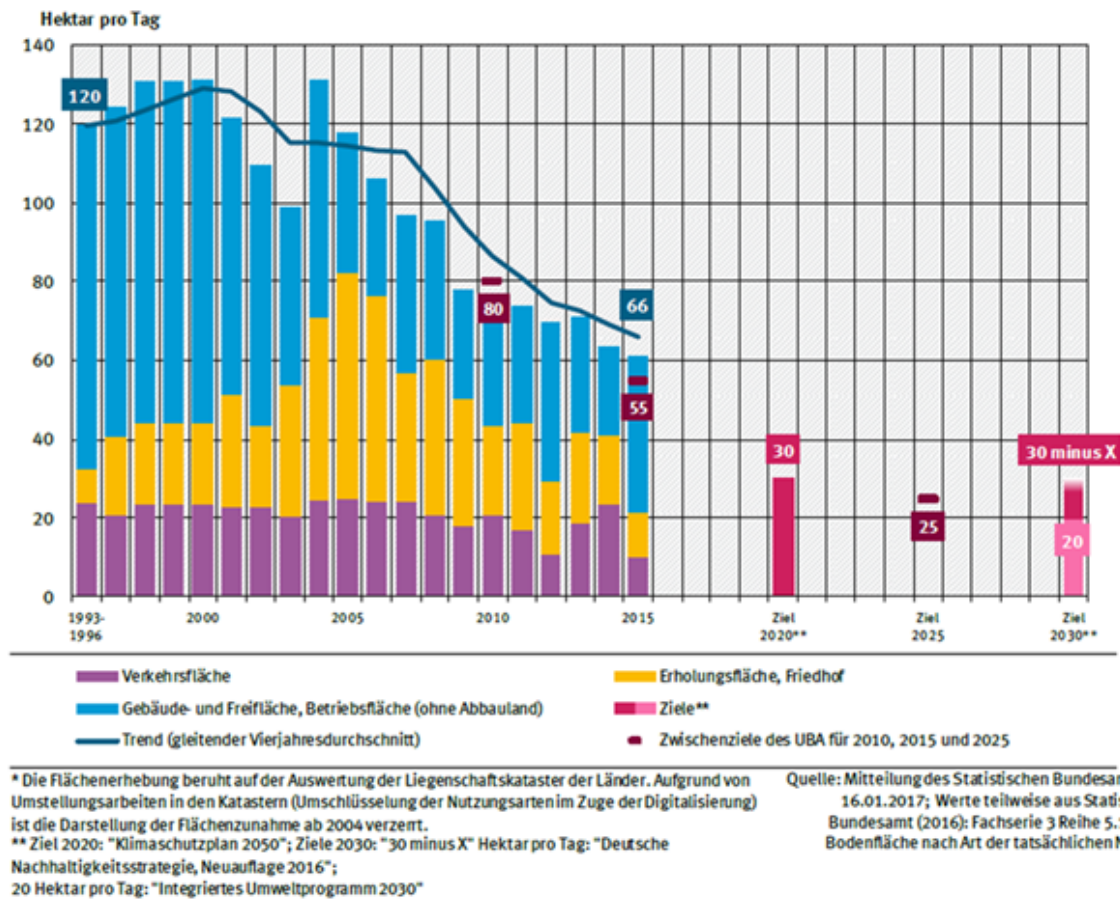
Flächeninanspruchnahme

Das übergeordnete Ziel der Bundesregierung eines sparsamen Umgangs mit Ressourcen betrifft auch die Art und Veränderung der Flächennutzung in Deutschland. Mit dem Ziel, die Zersiedelung und damit den Verlust an Boden und seiner natürlichen Bodenfunktionen (z. B. Rückhalt von Niederschlagswasser, Bodenfruchtbarkeit, Grundwasserneubildung) einzudämmen, benennt die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie die Reduktion der täglichen Flächeninanspruchnahme auf weniger als 30 Hektar pro Tag bis zum Jahr 2030 („Flächenziel“). Das Maß der täglichen Flächeninanspruchnahme beschreibt die Umwandlung von Flächennutzungen insb. durch Land- und Forstwirtschaft in Siedlungs- und Verkehrsfläche. Eine Umnutzung von Industrie-, Verkehrs- und Infrastrukturflächen (z. B. Brachflächenrevitalisierung für Wohnzwecke) sowie von militärisch genutzten Flächen zählt nicht zur Flächeninanspruchnahme, da die Vornutzung bereits in die Flächennutzungsart „Siedlungs- und Verkehrsfläche“ eingerechnet war.

Wie Abbildung 3-5 zeigt, hat sich die Rate der täglichen Flächeninanspruchnahme in den letzten zehn Jahren reduziert und liegt aktuell (2015) bei 66 Hektar. Der Rückgang geht zurück auf geringere Umwandlungsraten in allen Teilbereichen der Siedlungs- und Verkehrsflächen (Gebäude- und Freiflächen, Flächen für Erholung, Friedhöfe etc. und Verkehrsflächen). Die jährlichen Raten der einzelnen Nutzungsarten haben sich nicht kontinuierlich verringert, vielmehr gibt es immer wieder Jahre, in denen sich die Neuinanspruchnahme gegenüber dem Vorjahr erhöht. Alleine für die Erholungs- und Friedhofsflächen kann nach 2005 ein weitgehend kontinuierlicher Rückgang der jährlichen Neu-Inanspruchnahme festgestellt werden.

Die Einschätzungen, wie der aktuelle Stand bezüglich einer Zielerreichung zu bewerten ist, gehen auseinander. Während in Adrian et al. (2018) mit einer Verfehlung des „Flächen-Ziels“ gerechnet wird, attestieren die Verfasser der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie eine positive Entwicklung (Deutsche Bundesregierung 2016).

Abbildung 3-5: Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche in ha pro Tag



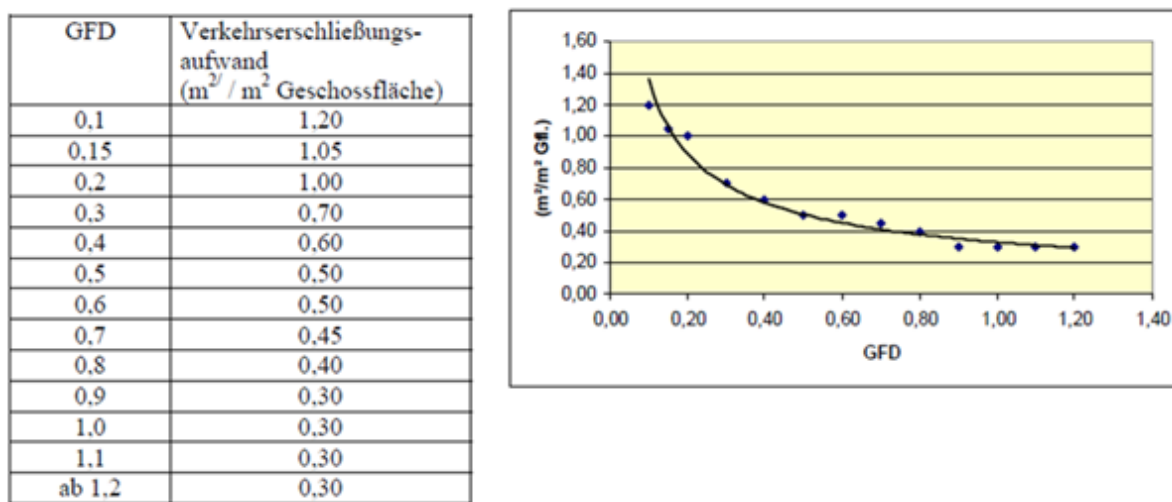
Quelle: (Adrian et al. 2018) nach (Umweltbundesamt 2017)

Der Indikator Flächeninanspruchnahme bezieht sich auf die Entwicklungen in Deutschland insgesamt und wird nicht auf Landes-, Stadt- oder Quartiersebene herunter gebrochen. Daher kann der Indikator zwar für Teilräume berechnet werden, es können damit aber keine Rückschlüsse auf den Beitrag zur Zielerreichung gezogen werden. Das „Flächensparen“ ist seit rund 10 Jahren das (politisch gewünschte) Planungsparadigma der meisten Städte. Daher entstehen die in Breuer und Schmell (2012) als „neue Stadtquartiere“ definierten Siedlungsbereiche häufig auf bereits vorgenutzten Flächen durch z. B. Brachflächenrevitalisierung oder Flächenrecycling. Diese Entwicklungen tragen entscheidend zum Erreichen des Flächenziels bei, werden aber in den amtlichen Statistiken zur Art der Flächennutzungen nicht separat ausgewiesen.

Aktuelle Entwicklungen im Bauwesen zeigen eine Zunahme des Geschosswohnungsbaus (Ausdruck von Siedlungsdruck in Wachstumsregionen, siehe Abbildung 3-4). Quartiere mit Geschosswohnungsbau kennzeichnet eine höhere bauliche Dichte (Geschossflächenzahlen (GFZ) zw. 0,5 – 1) und damit ein geringerer Pro-Kopf-Flächenbedarf (der Nutzungsart Gebäude- und Freiflächen) gegenüber von Einfamilienhaussiedlungen. Mit dem Grad der baulichen Dichte hängt auch der Anteil der Verkehrserschließungsflächen zusammen (siehe Abbildung 3-6).

Somit kann dem Trend einer Zunahme im Geschosswohnungsbau ein positiver Effekt auf das Flächenziel unterstellt werden, sofern nicht gleichzeitig der Verbrauch an Wohnfläche pro Kopf überproportional steigt. Auf der anderen Seite gilt zu berücksichtigen, dass eine Steigerung der Geschossflächenzahl Auswirkungen auf soziokulturelle Aspekte, wie Aufenthaltsqualität, Privatsphäre usw. hat und damit das Maß der städtebaulichen Dichte immer Ergebnis eines Aushandlungsprozesses auf lokaler Ebene darstellt.

Abbildung 3-6: Funktion zur dichteabhängigen Bemessung des Verkehrserschließungsaufwandes



Quelle: Buchert et al. (2004); Die Geschossflächendichte (GFD) bezeichnet das Verhältnis der Summe aller Geschossflächen zur Grundstücksfläche (Nettowohnbauland). Die Geschossflächendichte (GFD) entspricht der Geschossflächenzahl (GFZ), welche aber eine Planungsgröße repräsentiert.

Weitere Aspekte nachhaltiger Siedlungs- und Quartiersentwicklung

Luftschadstoffe

Die Diskussion um Luftschadstoffbelastungen urbaner Räume hat in der jüngsten Zeit stark zugenommen. Verantwortlich dafür sind juristische Auseinandersetzungen um die Einhaltung europäischer Grenzwerte und die Manipulation von Pkw-Abgaswerten.

Mit dem Göteborg-Protokoll wurde der weltweit erste Völkerrechtsvertrag zur Luftreinhaltung geschlossen, auf Basis dessen inzwischen mehrere Abkommen zur Konkretisierung und Umsetzung beschlossen wurden. Das Göteborg-Protokoll umfasst die Schadstoffe Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxide (NO_x), Ammoniak (NH₃) und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC). Ziel der Vereinbarung besteht darin, dass die unterzeichnenden Nationen die Freisetzung (Emission) der Schadstoffe auf ein bestimmtes Niveau begrenzen. In der europäischen Union wurde zu dessen Umsetzung die sogenannte NEC-Richtlinie (2001/81/EG) erlassen, in der die Höchstmengen und Reduktionsverpflichtungen der EU-Mitgliedsstaaten bestimmt werden. Deutschland hält die Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie

(2001/81/EG) im Jahr 2016 weitgehend ein. Nur die Ammoniakemissionen liegen noch über dem Höchstwert¹⁸.

Neben der Emissionsbetrachtung ist für die Luftqualität in Städten auch die Immissionsbetrachtung von Bedeutung. Grundsätzlich existieren hier auf Basis der „Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa“ einzuhaltende Immissionsgrenzwerte (siehe Tabelle 3-4). Zu unterscheiden ist zwischen den Schadstoffen Stickoxide und Luftpartikel, insbesondere Feinstaub (PM10).

Als wesentliche Treibergrößen für die Betrachtung von Städten sind die Sektoren Verkehr und Industrie anzusehen. Eine weitere Treibergröße insbesondere bezüglich der Feinstaubbelastung sind kleine Holzfeuerungsanlagen privater Haushalte. Um der steigenden Luftverschmutzung durch unsachgemäß betriebene oder technisch veraltete Einzelraumfeuerungsanlagen entgegenzuwirken, wurden von Seiten der Bundesregierung Maßnahmen ergriffen und in der Überarbeitung der 1. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (1.BimSchV) festgeschrieben.

- ▶ Für die Verbrennung ist nur ausreichend lang gelagertes, naturbelassenes Holz zulässig.
- ▶ Offene Kamine dürfen nur gelegentlich betrieben werden.

Tabelle 3-4: Immissionsgrenzwerte Luftschadstoffe (zum Schutz der menschlichen Gesundheit, Stand: Dezember 2018)

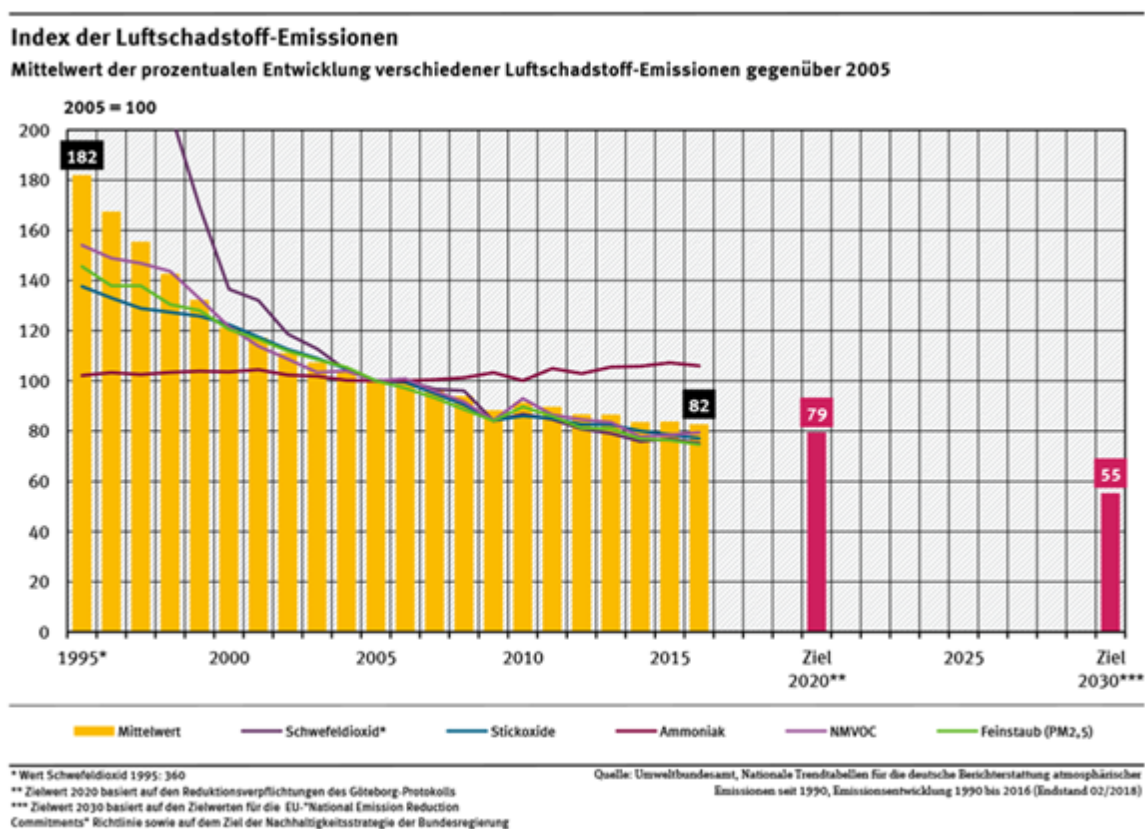
Ziele EU	seit 2010	2020
Grenzwert NO _x (Stundengrenzwert)	200 µg/m ³ NO ₂ (max. 18x p.a.)	
Grenzwert NO _x (Jahresgrenzwert)	40 µg/m ³ NO ₂	
Grenzwert CO	10 mg/m ³ (höchster 8h-Ø /Tag)	
Grenzwert Partikel (PM _{2,5})	25 µg/m ³ PM _{2,5}	abhängig von Ausgangswert bis >20 % Reduktion
Grenzwert Partikel (PM ₁₀) (Stundengrenzwert)	50 µg/m ³ PM ₁₀ (max. 35x p.a.)	
Grenzwert Partikel (PM ₁₀) (Jahresgrenzwert)	40 µg/m ³ PM ₁₀	

Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis Richtlinie 2008/50/EG

Abbildung 3-7 zeigt die Entwicklung der Luftschadstoffemissionen für Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak, NMVOC und Feinstaub in Deutschland zwischen 1994 und 2016 und Ziele für 2020 und 2030.

18 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/strategien-zur-emissionsminderung-von#textpart-2>

Abbildung 3-7: Entwicklung der Luftschadstoffemissionen in Deutschland zwischen 1995 und 2016



Quelle: (Umweltbundesamt (UBA) 2018a)

3.2 Umweltkennzahlen für Einzelgebäude und Quartiere

Energie- und Klimakennzahlen spielen eine wichtige Rolle für die Erfolgssicherung und das Monitoring von Energie- und Klimaschutzzielen sowie für eine vergleichende Betrachtung (Benchmarking). Die Kennzahlen dienen dazu, Fortschritte bezüglich der Zielerreichung messbar zu machen und einen quantitativen Vergleich zu ermöglichen.

In diesem Kapitel werden Umweltkennzahlen entwickelt, welche eine verständliche und leicht zu berechnende Orientierung für Einzelgebäude und Quartiere darstellen sollen. Verschiedene Kennzahlen werden sowohl für den IST-Zustand als auch den Zielzustand im Jahr 2050 (abgeleitet aus den oben dargestellten Zielen) berechnet. Auf dieser Basis werden Vor- und Nachteile der verschiedenen Kennzahlen diskutiert.

3.2.1 Aggregationsebene und Bilanzgrenzen

Kennzahlen können prinzipiell auf allen Ebenen (z.B. global, EU, national, kommunal, Quartier, Einzelgebäude, einzelne Techniken) eingesetzt werden, allerdings muss die Verfügbarkeit der jeweiligen Daten sichergestellt und die jeweiligen Bilanzgrenzen müssen definiert werden. So können Fortschritte in Bezug auf die Reduktion von THG-Emissionen nur dann messbar gemacht werden, wenn verlässliche Zahlen zu den Emissionen im jeweiligen Bilanzraum vorliegen.

Für die Energie- und Klimaschutzziele auf EU- und nationaler Ebene bestehen weitreichende Monitoring-Prozesse, in denen anhand von Kennzahlen und offiziellen statistischen Daten der Fortschritt bezüglich der Zielerreichung erhoben wird. Auf EU-Ebene erfolgt das Monitoring der 2020-Ziele über nationale Fortschrittsberichte. Für die 2030-Ziele werden diese durch die Bestimmungen der EU-Governance Richtlinie festgelegt. Auf nationaler Ebene werden die Fortschritte bezüglich der Zielerreichung in den jährlichen Monitoringberichten dargestellt (z.B. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2018)).

Auf kommunaler Ebene bestehen formalisierte Methoden zur Bereitstellung von Energie- und CO₂-Bilanzen, die als Grundlage für die Entwicklung von Kennzahlen dienen. Grundsätzlich kann bei der kommunalen Bilanzierung in Deutschland unterschieden werden zwischen dem Territorialprinzip und dem Inländerprinzip (Deutsches Institut für Urbanistik (difu) 2018).

Die Bilanzierung nach dem Territorialprinzip berücksichtigt den Endenergieverbrauch bzw. die THG-Emissionen, die innerhalb der Gemarkung der Kommune entstehen. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Quellenbilanz (Berücksichtigung aller Emissionsquellen innerhalb der Gemarkung) und der endenergiebasierten Territorialbilanz (Berücksichtigung aller Endenergieverbräuche innerhalb der Gemarkung). Nach dem Prinzip der Quellenbilanz würden beispielsweise alle Emissionen eines Kraftwerks, das sich auf der Gemarkung befindet, bilanziert werden, unabhängig davon, welcher Anteil des erzeugten Stroms innerhalb der Gemarkung verbraucht wird.

Als Basis für kommunale Klimaschutzkonzepte hat sich die endenergiebasierte Territorialbilanz als praktikabel erwiesen (Deutsches Institut für Urbanistik (difu) 2018).

Basierend auf den erhobenen CO₂- und Energiebilanzen können Kennzahlen auf kommunaler Ebene entwickelt werden. Viele Kommunen setzen ihre Ziele in Bezug auf die im Bilanzrahmen der Kommune anfallenden CO₂-Emissionen. Ein weiterer Ansatz, der beispielsweise in Freiburg als wachsender Kommune verfolgt wird, ist eine Zielsetzung in Form von pro-Kopf-Emissionen.

3.2.2 Energie- und Klimakennzahlen

In diesem Kapitel wird zunächst eine Auswahl an Kennzahlen behandelt, welche die Problematik bei der Entwicklung und Festlegung von Kennzahlen darstellen soll. Beispielhaft werden die Kennzahlen „Endenergieverbrauch pro Quadratmeter und Jahr“ (in der Einheit kWh/(m²a)), „Endenergieverbrauch pro Person und Jahr“ (in kWh/(Person*a)), „CO₂e-Emissionen pro Quadratmeter und Jahr“ (in der Einheit kg CO₂e/(m²a)) und „CO₂e-Emissionen pro Person und Jahr“ (in t CO₂e/(Person*a)) betrachtet. Anhand dieser Kennzahlen lassen sich verschiedene Vor- und Nachteile von Kennzahlen im Allgemeinen anschaulich beschreiben.

Neben der Bilanzierung auf kommunaler oder auf Quartiersebene spielen Kennzahlen auch auf Einzelgebäudeebene eine Rolle. Diese ermöglichen einen Vergleich mit anderen Gebäuden eines ähnlichen Typs und können einen Beitrag zur Bilanzierung auf Quartiersebene liefern. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass auf Quartiersebene weitere Konzepte zum Einsatz kommen können (siehe Kapitel 2.1), so dass eine Bilanz des Quartiers nicht notwendigerweise der Summe der Bilanzen aller Einzelgebäude des Quartiers entspricht.

Im Folgenden werden Kennzahlen auf Einzelgebäudeebene abgeleitet. Die Berechnungen basieren auf den in Tabelle 3-5 dargestellten IST-Zahlen (2016) und Szenarien-Ergebnissen für

2050 zum Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser, zu den CO₂-Emissionen, der Bevölkerung und der Wohnfläche. Im Sinne eines konsistenten Annahmen-Sets ist es nötig, Annahmen aus Studien zu nehmen, die gleiche Entwicklungen zugrunde legen. Die Endenergieverbrauchs- und CO₂e-Emissions-Zielwerte für 2050 stammen aus dem ambitioniertesten Zielszenario der 2. Runde der Klimaschutzszenarien 2050 des BMU (KSz 95, vgl. Repenning et al. (2015)).

Tabelle 3-5: Annahmen zu Energie- und Klimakennzahlen

Größe	Einheit	2016	2050
Endenergieverbrauch Raumwärme und Warmwasser in Privaten Haushalten	TWh	558 ^a	241 ^b
CO ₂ -Emissionen Private Haushalte	Mio. t CO ₂ e	90 ^a	11 ^b
Bevölkerung	Mio.	82,8 ^c	79,0 ^c
Wohnfläche	Mrd. m ²	3,8 ^d	4,1 ^d

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von a: Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018), b: Repenning et al. (2015), c: Statistisches Bundesamt (Destatis) (2017), d: Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017)

Auf Basis der Zahlen in Tabelle 3-5 lassen sich für den gesamtdeutschen Gebäudebestand Mittelwerte bilden. So liegt der durchschnittliche Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden mit Bezug auf die Wohnfläche im Jahr 2016 bei 147 kWh/(m²a) und entsprechend im Jahr 2050 bei 59 kWh/(m²a). Mit Bezug auf die Bevölkerung ergeben sich knapp 6.750 kWh/(Person*a) für 2016 und gut 3.000 kWh/(Person*a) für 2050. Bei den CO₂e-Emissionen liegen die entsprechenden Werte mit Wohnflächenbezug bei 23,7 kg CO₂e/(m²a) im Jahr 2016 und 2,7 kg CO₂e/(m²a) im Zieljahr 2050. Heruntergebrochen auf pro-Kopf Zahlen ergeben sich durchschnittliche Werte von 1,1 t CO₂e/(Person*a) für 2016 und 0,1 t CO₂e/(Person*a) für 2050.

Tabelle 3-6 zeigt die Kennzahlen mit Bezug Endenergieverbrauch für zwei verschiedene Gebäudetypen mit je drei energetischen Zuständen sowie der Annahme, dass das Einfamilienhaus 180 m² Wohnfläche hat und von zwei Personen bewohnt wird, wohingegen die Wohnung im Mehrfamilienhaus 90 m² Wohnfläche misst und von vier Personen bewohnt wird.

Tabelle 3-6: Beispielhafte Darstellung der Kennzahlen mit Bezug Endenergieverbrauch für zwei Einzelgebäudetypen

Gebäudetyp	Energetischer Standard	EEV RW + WW [kWh/m²a]	EEV RW + WW [kWh/Person*a]
Einfamilienhaus (EFH, 180 m², 2 Personen)	Altbau	250	22.500
	EnEV 2016	55	4.950
	Passivhaus	30	2.700
Wohnung im Mehrfamilienhaus (MFH, 90 m², 4 Personen)	Altbau	250	4.500
	EnEV 2016	55	1.238
	Passivhaus	30	675

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut e.V

Setzt man die Werte aus Tabelle 3-6 in Bezug zu den oben berechneten Durchschnittswerten aller Wohngebäude in Deutschland¹⁹, so fällt auf, dass der heutige Neubaustandard bezogen auf den EEV pro Quadratmeter und Jahr leicht besser ist als der gemittelte Zielwert für 2050 (59 kWh/(m²a)). Diese Tatsache sollte allerdings keineswegs darüber hinwegtäuschen, dass es für sehr viele Bestandsgebäude schwer sein wird, einen energetischen Standard entsprechend des heute geltenden Neubauniveaus zu erreichen. In der Betrachtung des EEV pro Person und Jahr fällt hingegen auf, dass bei den gewählten Gebäude- und Personenkonstellationen beim EFH nur der Passivhausstandard mit 2.700 kWh/(Person*a) unterhalb des Durchschnittswerts für 2050 von gut 3.000 liegt. Beim MFH liegen sowohl der heutige Neubaustandard als auch der Passivhausstandard darunter.

Die Kennzahlen für die gleichen Gebäude- und Personenkonstellationen und mit Bezug zu CO₂-Emissionen sind in Tabelle 3-7 aufgelistet. Zur Berechnung der CO₂e-Emissionen wurde vereinfacht angenommen, dass der komplette Endenergieverbrauch mit Erdgas gedeckt wird (CO₂e-Emissionsfaktor von Erdgas inkl. Vorketten gemäß GEMIS: 250 g CO₂e/kWh).

¹⁹ Nicht berücksichtigt sind in dieser Betrachtung die Wohnungen in Nichtwohngebäuden. Dort ist die Erfassung und die Beeinflussung der CO₂-Emissionen vermutlich schwerer (bei teilweise enormen Einsparpotenzialen).

Tabelle 3-7: Beispielhafte Darstellung der Kennzahlen mit Bezug CO₂e-Emissionen für zwei Einzelgebäudetypen

Gebäudetyp	Energetischer Standard	CO ₂ -Emissionen RW + WW [kg CO ₂ e/m ² a]	CO ₂ -Emissionen RW + WW [t CO ₂ e/Person*a]
Einfamilienhaus (EFH, 180 m ² , 2 Personen)	Altbau	62,5	5,6
	EnEV 2016	13,8	1,2
	Passivhaus	7,5	0,7
Wohnung im Mehrfamilienhaus (MFH, 90 m ² , 4 Personen)	Altbau	62,5	1,1
	EnEV 2016	13,8	0,3
	Passivhaus	7,5	0,2

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut e.V.

Setzt man die CO₂e-Emissionswerte aus Tabelle 3-7 in Bezug zu den oben berechneten Durchschnittswerten aller Wohngebäude in Deutschland, wird offensichtlich, dass keiner der betrachteten energetischen Gebäudestandards den durchschnittlichen Zielwert für 2050 (2,7 kg CO₂e/(m²a)) erreicht. Zugegebenermaßen wird in der Betrachtung auch von der Verbrennung von Erdgas ausgegangen, was im Jahr 2050 in keinem der Szenarien noch eine so dominante Rolle in der Energieversorgung spielt wie heute. Die Berechnungen veranschaulichen also u. a., dass ein Energieträgerwechsel hin zu Energieträgern mit niedrigeren CO₂e-Emissionsfaktoren nötig sein wird, um die Ziele zu erreichen. Bei der Betrachtung der CO₂e-Emissionen pro Person und Jahr erreicht nicht einmal der Passivhausstandard im MFH den Zielwert für 2050 von 0,1 t CO₂e/(Person*a).

Zwischenfazit

Personenspezifische Kennzahlen: Eine Kennzahl „CO₂e-Emissionen pro Kopf“ wäre aufgrund einer Gleichverteilung in der Gesellschaft in Hinblick auf die soziale Gerechtigkeit eine geeignete Größe – jede Person hat das gleiche Budget bzw. den gleichen Zielwert. Speziell bei den CO₂e-Emissionen ist möglicherweise der derzeitige pro-Kopf Wert sowie ein klimaverträglicher Zielwert für 2050 bekannter bzw. greifbarer als ein flächenspezifischer CO₂e-Emissionswert (z.B. können pro-Kopf Emissionen in vorhandenen Tools wie dem CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes berechnet werden²⁰). Allerdings besteht die große Hürde, dass ein und dieselbe Wohnung von unterschiedlich vielen Personen bewohnt werden kann. Da der energetische Zustand des Gebäudes maßgeblich für die anzunehmenden CO₂e-Emissionen der Wohnung ist, variiert also der pro-Kopf Wert stark. Des Weiteren haben die Nutzer auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Energieverbrauch bzw. die CO₂e-Emissionen. MFH mit vielen Wohneinheiten und geringen pro-Kopf Flächen könnten dann auch mehr verbrauchen (im Sinne von: jede Wohnung darf so viel verbrauchen, wie ihren Bewohnern zusteht),

20 Siehe <https://uba.co2-rechner.de>

wohingegen sich großflächige EFH mit z. B. nur zwei Bewohnern deutlich anstrengen müssten, um auf niedrige personenspezifische CO₂e-Emissionen zu kommen. Verschärft wird das Problem noch dadurch, dass MFH grundsätzlich leichter und kostengünstiger energetisch zu sanieren sind als EFH. Volkswirtschaftlich ergibt es also durchaus Sinn, MFH etwas stärker energetisch zu sanieren, da pro eingesetztem Euro eine höhere Energieeinsparung erreicht wird. Aus Perspektive der Einzelnutzer wäre hingegen das Gegenteil der Fall. Löst man sich von der Einzelgebäudeebene und schaut auf die Quartiersebene, könnten personenspezifische Kennzahlen aussagekräftiger sein, da hier über viele Gebäude und Personen gemittelt werden kann.

Flächenspezifische Kennzahlen: Aus Einzelgebäudeperspektive scheint ein flächenspezifischer Kennwert deutlich handhabbarer zu sein und auch eine höhere Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Gebäuden zu erlauben als ein personenspezifischer Kennwert. Im Unterschied zu einer personenspezifischen Kennzahl führt eine flächenspezifische Kennzahl allerdings dazu, dass der absolute CO₂e-Ausstoß bei ansteigenden Wohnflächen zunimmt.

Wohnfläche pro Kopf: Die Wohnfläche pro Kopf kann als ergänzende Kennzahl verwendet werden, um den oben beschriebenen Herausforderungen zu begegnen.

Einzelgebäudeebene: Sowohl EEV als auch CO₂e-Emissionen sind hier interessante Richtwerte – gerade aus Klimaschutzperspektive ist der Bezug eines Kennwerts zu den Klimaschutzzielen wichtig, um den Einzelgebäudebeitrag auf das Reduktionsziel festzustellen. Allerdings haben sowohl flächenspezifische Kennzahlen (X pro m²) als auch personenspezifische Kennzahlen (Y pro Person) ihre Vor- und Nachteile (s.o.). Insgesamt scheint auf Einzelgebäudeebene eine flächenspezifische Kennzahl jedoch zielführender. Wie oben angedeutet, haben es Neubauten vergleichsweise einfach die Ziel-Mittelwerte für den Gebäudebestand zu erreichen. Gleichzeitig werden sich Bestandsgebäude zum Teil sehr schwer tun, auch nur in die Nähe der Ziel-Mittelwerte zu kommen. Deshalb ist es unbedingt nötig, den Neubaubereich stärker in die Pflicht zu nehmen und hier strengere Zielwerte zu setzen. Im Gegenzug könnten heutige Bestandsgebäude, die auch 2050 noch den Großteil aller Gebäude stellen werden, etwas weniger ambitionierte Zielwerte erreichen müssen.

Quartiersebene: Grundsätzlich sind auf Quartiersebene Flächen und Einwohner relativ gut bestimmbar. Beim EEV und den CO₂e-Emissionen wird dies schon schwerer (je nach dem auf welche Daten die Kommune Zugriff hat; hier könnten die lokalen Versorgungsunternehmen stärker in die Pflicht genommen werden: Darstellung der Verbräuche und der genutzten Energieträger auf Block-Ebene o.ä., um datenschutzrechtliche Probleme zu vermeiden). Orientierungs-Kennzahlen je Quartiersfläche (z.B. CO₂e-Emissionen je Quadratmeter Quartiers-Wohnfläche) könnten auch für Einzelgebäudebesitzer hilfreich sein, um sein/ihr Gebäude im Quartier einzuordnen. Sehr gut umsetzbar sollten Kennzahlen vor allem in solchen Quartieren sein, die ausschließlich über ein Wärmenetz versorgt werden: hier sollte der Endenergieverbrauch genauso wie der/die verwendete/n Energieträger bekannt sein. Allerdings kann es auch hier Probleme geben, die tatsächlichen Verbräuche vom Energieversorgungsunternehmen bereit gestellt zu bekommen, weil dieses die Daten dazu u. U. nicht preisgeben möchte.

Tabelle 3-8: Weitere Energie- und Klimakennzahlen für Einzelgebäude und Quartiere

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude		
	THG-Emissionen in CO ₂ e/(m ² a)	CO ₂ e pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr
	Anteil Erneuerbare Energien an der Wärmeversorgung	Dieser Indikator sollte mit einem Energieverbrauchsindikator kombiniert werden, um die begrenzt zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien nicht zu verschwenden
	nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauch in kWh/(m ² a)	Kilowattstunden nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauch z.B. pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr
	Anteil Deckung Eigenbedarf Strom	
Quartiere		
	THG-Emissionen in CO ₂ e/(m ² a)	CO ₂ e pro Quadratmeter Quartiersfläche/Bruttogeschossfläche und Jahr (auf Basis aller Energieträger und dazugehöriger Emissionsfaktoren)
	Anteil Erneuerbare Energien an der Quartiers-Wärmeversorgung	Wichtig diesen Indikator mit einem Energieverbrauchsindikator zu kombinieren, um die begrenzt zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien nicht zu verschwenden
	nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauch in kWh/(m ² a)	Kilowattstunden nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauch z.B. pro Quadratmeter Quartiersfläche/Bruttogeschossfläche und Jahr
	Anteil Deckung Eigenbedarf übers Jahr (bilanziell)	z.B. >80% sehr gut, < 30% mäßig...
	Anteil Deckung Eigenbedarf in real-time	z.B. >80% sehr gut, < 30% mäßig...
	Bewertung Systemdienlichkeit des Quartiers	Bereitgestellte Speicherkapazität; Möglichkeiten des Lastmanagements; Anteil Power-to-Heat Wärmeleistung an Gesamtwärmeleistung (inkl. Wärmepumpen)

Quelle: Öko-Institut e.V.

2050er Zielwerte der Energie- und Klimakennzahlen

Gemäß des in Abschnitt 3.1.1 dargestellten Langfristziels der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2050 weitgehend treibhausgasneutral zu werden, haben sich auch einige Städte und Kommunen Deutschlands das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Zur Ableitung von Zielen auf kommunaler oder Quartiersebene können die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen betrachtet werden.

Eines der bisher ambitioniertesten Emissionsminderungsszenarien auf Bundesebene ist das Klimaschutzszenario KS95 (Repenning et al. 2015), welches eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um etwa 95 % gegenüber 1990 beschreibt. Danach werden in Deutschland im Jahr 2050 noch etwa 70 Mio. t CO₂e emittiert, womit die Treibhausgasneutralität

nahezu erreicht ist. Die verbleibenden Emissionen stammen zu zwei Dritteln aus nicht-energetischen Emissionen, vor allem der Landwirtschaft, zudem aus Industrieprozessen und Abfallwirtschaft. Etwa 33% der verbleibenden Emissionen im Jahr 2050 stammen aus der Verbrennung von Energieträgern (sogenannte energiebedingte Emissionen). Das Energiesystem wäre bei Erreichen der Klimaneutralität also nahezu vollständig dekarbonisiert.

Bezogen auf Pro-Kopf-Emissionen werden in Deutschland im Jahr 2050, bei einer angenommenen Bevölkerung von 74 Mio. Menschen und der Betrachtung von energiebedingten und nicht-energiebedingten (prozessbedingten) Emissionen noch 0,9 t/a CO₂e pro Einwohner*in emittiert. Demzugrunde liegt die Annahme, dass die noch „zulässigen“ (Rest-) Emissionen im Jahr 2050 jeder Person gleichermaßen zugeordnet werden, unabhängig von Wohnort oder sonstigen Kriterien.

Da prozessbedingte Emissionen auf kommunaler Ebene jedoch meist nicht betrachtet bzw. bilanziert werden, ist ein separater Zielwert in Hinblick auf die rein energiebedingten Emissionen sinnvoll. Gemäß den Ergebnissen des Klimaschutzszenarios KS95 (Repenning et al. 2015) betragen die energiebedingten Emissionen für Deutschland noch etwa 0,32 t/a CO₂e pro Einwohner*in (vgl. Tabelle 3-9).

Tabelle 3-9: Entwicklung bundesweiter Emissionen nach dem Klimaschutzszenario KS95 (Repenning et al. 2015)

		1990	2010	2020	2030	2040	2050
Bundesweite Emissionen nach KS95 – gesamt	Mio. t/a CO ₂ e	1.250	943	649	402	211	70
Bundesweite Emissionen nach KS95 – energiebedingt	Mio. t/a CO ₂ e	990	779	527	299	141	24
Bundesweite Emissionen nach KS95 – nicht-energiebedingt	Mio. t/a CO ₂ e	260	164	138	103	70	46
Bevölkerungsentwicklung nach KS95	Mio. Einwohner*innen	79,7	80,6	78,8	77,5	76,2	74,0
Pro-Kopf-Emissionen gesamt	t/a CO ₂ e	15,7	11,7	8,4	5,2	2,8	0,9
Pro-Kopf-Emissionen energiebedingt	t/a CO ₂ e	12,4	9,7	6,7	3,8	1,9	0,32

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Repenning et al. (2015)

3.2.3 Ressourcen- und Flächenkennzahlen

Wie in Kapitel 3.1.2 gezeigt, existieren zwar Umweltziele für die Rohstoffproduktivität sowie die Art der Flächennutzung, diese beziehen sich jedoch auf die gesamte Volkswirtschaft bzw. räumlich auf das Gebiet der Bundesrepublik. Eine Ausdifferenzierung auf Wirtschaftssektoren (z. B. Baugewerbe), administrative Teilgebiete (z. B. Kommunen) oder gar Einzelgebäude liegt bislang nicht vor. Bezogen auf die Bauwirtschaft und insbesondere den Wohnungsbau, erscheint eine reine Fokussierung auf den Indikator (Gesamt-)Rohstoffproduktivität nicht angemessen, da

a) eine Erhebung methodisch nicht abgesichert ist und b) starke Wechselwirkungen mit anderen Umweltzielen, insb. Bei Energie- und Klimaschutz bestehen. So haben die verwendeten Rohstoffe für Bauprodukte einen Einfluss auf die Nutzungsphase und damit auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen. Zudem fokussiert der in Kapitel 3.1.2 vorgestellte Kennwert (Gesamt-) Rohstoffproduktivität in erster Linie auf die bei der Rohstoffbereitstellung bewegten Massen und berücksichtigt nur indirekt die energetischen Aufwendungen beim Herstellungsprozess (z. B. Brennen von Lehmziegeln) über den monetären Wert.

Aufgrund der Wechselwirkung mit der Nutzungsphase und den methodischen Schwierigkeiten bei der Ermittlung, wird vorgeschlagen, sich bei der ressourcenseitigen Betrachtung auf die Treibhausgasemissionen der verwendeten Baustoffe zu beschränken. Hier ist die Datenlage für einen Vergleich verschiedener Bauprodukte (mit demselben Nutzen) dank verschiedener Ökobilanz-Datenbanken sehr gut.

In folgender Tabelle 3-10 sind weitere Indikatoren und Kenngrößen aufgelistet, die bezüglich des Ressourcenverbrauchs von Städten in Betracht gezogen werden können. Die dargestellten Kenngrößen sind aus Publikationen entnommen, stammen aus fachlichen Planungsgrundlagen oder sind Ergebnis eigener Überlegungen. Die Kenngrößen werden vorrangig zur Beschreibung der Ressourcennutzung im Bestand (z. B. Straßenlänge pro Einwohner, Versiegelungsgrad etc.) genutzt. Es liegen insgesamt zu wenig konsistente, räumlich aufgelöste Datenreihen vor, um daraus verlässliche Rückschlüsse über zukünftige Ressourcenflüsse durch urbane Räume und damit einen Einfluss auf die in Kapitel 3.1.2 genannten Umweltziele abzuleiten. Mit Tabelle 3-10 soll beispielhaft die Bandbreite bestehender Kenngrößen vermittelt werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3-10: Ressourcen- und Flächenkennzahlen für Einzelgebäude, Quartiere und die gesamtstädtische Ebene

	Kenngröße	Beschreibung/Anmerkung	betroffenes Ressourcenziel (implizit)
<i>Einzelgebäude / Quartiere / Gesamtstadt</i>			
	CO ₂ eingesetzter Bauprodukte pro Wohnfläche (CO ₂ e./m ²)	Summe der bei der Herstellung verwendeter Baumaterialien entstandenen Treibhausgasemissionen	Energieverbrauch
	Grundflächenzahl (GRZ)	klassisches Maß der baulichen Nutzung bzw. Dichte, gibt den Flächenanteil eines Baugrundstückes an, der überbaut werden darf	Flächeninanspruchnahme
	Geschossflächenzahl (GFZ)	klassisches Maß der baulichen Nutzung bzw. Dichte, gibt das Verhältnis der gesamten Geschossfläche aller Vollgeschosse der baulichen Anlagen auf einem Grundstück zu der Fläche des Baugrundstückes an	Flächeninanspruchnahme

	Kenngröße	Beschreibung/Anmerkung	betroffenes Ressourcenziel (implizit)
	Baumassenzahl (BMZ)	gemessen in Kubikmeter: klassisches Maß der baulichen Nutzung bzw. Dichte, gibt an, wie viel Kubikmeter Baumasse ²¹ je Quadratmeter Fläche eines Baugrundstücks zulässig oder vorhanden sind.	Rohstoffproduktivität, da Baustoffbedarf und umbautes Volumen zusammenhängen
	Gebäudedichte in Gebietsfläche (Geb./km ²)	Der Indikator beschreibt die Anzahl der Gebäude pro km ² Gebietsfläche und dient zur Beschreibung der baulichen Dichte einer Fläche. Der Indikator ist Teil des IÖR Raummonitors. Da der Indikator mittels Kataster- und Geodaten ermittelt wird, ist eine Differenzierung z.B. in Anzahl Wohneinheiten pro Gebietsfläche nicht möglich.	Rohstoffproduktivität, da geschlussfolgert werden kann, dass bei hoher Gebäudedichte eine höhere Bautätigkeit für Neubau und Sanierung anfällt als bei geringer Dichte
	Wohngebäude-Materiallager pro Wohn- und Mischnutzfläche	Der Indikator beschreibt die Masse an Baumaterialien, die in Wohngebäudebeständen auf der Flächenkategorie ‚Wohn- und Mischnutzfläche‘ enthalten ist. Er wird als spezifischer Wert angegeben (t/ha). Der Indikator ist Teil des IÖR Raummonitors ²² und liegt bis auf Gemeindeebene vor. Da der Indikator mittels Kataster- und Geodaten ermittelt wird, ist eine Differenzierung z.B. in Wohn- und Nicht-Wohngebäude nicht möglich.	Rohstoffproduktivität, da aus dem Materiallager nach deren Freisetzung (z. B. durch Gebäudeabriss) potenziell Sekundärressourcen (z. B. Recycling-Gesteinskörnungen) hergestellt werden können.
	Anteil versiegelter Fläche zu Gesamtfläche	In erster Linie relevant bzgl. Versickerung von Niederschlagswasser (Berechnung von Abwassergebühren)	Flächeninanspruchnahme, Rohstoffproduktivität
	Sekundärer Rohstoffanteil in Baumaterialien (Hochbau)	Verhältnis zwischen verwendeten Baustoffen aus sekundären Quellen (Recyclingbaustoffen) und Baustoffen aus primär geförderten Quellen. Zu unterscheiden zwischen Neubau und Sanierungsmaßnahme im Bestand	Rohstoffproduktivität, da Baustoffe aus sekundären Quellen Rohstoffproduktivität steigern
	Erneuerbarer Rohstoffanteil in Baumaterialien	Verhältnis zwischen verwendeten Baustoffen aus regenerativen Quellen (insb. Holz) und nicht-regenerativen, mineralischen Baustoffen. Zu unterscheiden zwischen Neubau und Sanierungsmaßnahme im Bestand	Rohstoffproduktivität, da Baustoffe aus regenerativen Quellen Rohstoffproduktivität steigern
	Vorhandensein Baustoffkataster	Für spätere Rückbaumaßnahmen und ein hochwertiges Recycling ist das Vorhandensein eines Baustoffkataster / Gebäudepass des jeweiligen Gebäudes von Vorteil	Rohstoffproduktivität, da Baustoffe aus Sekundärmaterialien Rohstoffproduktivität steigern

21 Baumasse (BM) ist die Gesamtheit des nach den Außenmaßen der Gebäude vom Fußboden des untersten Vollgeschosses bis zur Decke des obersten Vollgeschosses zu ermittelnden Volumens.

22 <https://www.ioer-monitor.de/>

	Kenngröße	Beschreibung/Anmerkung	betroffenes Ressourcenziel (implizit)
	Straßenlänge pro Einwohner	Von (DG Regio & UN Habitat 2016) vorgeschlagener Kennwert. Beschreibt die Länge der Straßeninfrastruktur pro Einwohner (in m/EW). Maß wie viele Rohstoffe in Infrastrukturen enthalten sind und Maß, der Intensität verkehrsbedingter Umweltbelastungen. In der Regel bezogen auf kommunale Gebietskörperschaft, kann mithilfe freier Geodaten aber auch Quartiersscharf erhoben werden.	Rohstoffproduktivität

Quelle: Öko-Institut e.V.

3.3 Maßnahmen zur Zielerreichung

Die Erreichung der in Kapitel 3.1 diskutierten Umweltziele ist in der Regel nur dann möglich, wenn entsprechende Maßnahmen zur Unterstützung der Zielerreichung durchgeführt werden. Insbesondere im Gebäudebereich, der sich durch lange Lebensdauern der Bauteile auszeichnet, ist eine frühzeitige Weichenstellung notwendig. Das vorliegende Forschungsvorhaben untersucht, welche Maßnahmen notwendig sind, um die Umweltziele zu erreichen und betrachtet insbesondere die Rolle von Quartieren bei der Umsetzung der identifizierten Maßnahmen.

3.3.1 Maßnahmen zur Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele im Gebäudebereich

Für den Bereich der Energie- und Klimaschutzziele wird zunächst untersucht, welche Maßnahmen notwendig sind um die nationalen Ziele zu erreichen. Anschließend wird der Beitrag von Quartieren bei der Umsetzung der jeweiligen Maßnahmen betrachtet.

Die Identifizierung von Maßnahmen zur Erreichung der nationalen Ziele basiert auf Ergebnissen der parallel mit mehr oder weniger dem gleichen Autorenteam erarbeiteten Studie „Systemische Herausforderung der Wärmewende“ (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) et al. 2018). Die Studie beinhaltet eine vergleichende Analyse verschiedener Klimaschutzszenarien für den Wärmesektor bzw. den integrierten Wärme- und Stromsektor, wobei zwischen zwei verschiedenen Zielbereichen unterschieden wird. Zum einen werden Szenarien analysiert, in denen das für den Gebäudesektor erstmals im Rahmen des Energiekonzepts festgelegte Ziel (Deutsche Bundesregierung 2010) eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 erreicht wird (Zielbereich 1). Dieses Ziel ist Grundlage der Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG) der Bundesregierung (vgl. Thamling et al. (2015)) und wird als 80 %-ige Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs des Gebäudesektors ggü. 2008 operationalisiert. Demgegenüber verfolgt Zielbereich 2 das auf EU-Ebene festgelegte Ziel, für das Gesamtsystem eine THG-Minderung von bis zu 95 % ggü. 1990 zu erreichen. Für das Energiesystem bedeutet dies allerdings eine Reduktion um 100 %, da prozessbedingte Emissionen die 2050 verbleibende THG-Restmenge schon aufbrauchen. Bei den Szenarien für Zielbereich 2 wird der Gebäudesektor im Kontext des und im Zusammenwirken mit dem gesamten Energiesystem untersucht. In diesen Szenarien wird in der Regel ein THG-Minderungsziel für das gesamte Energiesystem festgelegt und in der Folge untersucht, welche Sektoren welche Zielbeiträge hinsichtlich einer bestimmten Optimierungsgröße (z. B.

volkswirtschaftliche Gesamtkosten) leisten. Bei den betrachteten Studien sind auch „klassische“ -95 % Szenarien (bezogen auf das Energiesystem) miteingeschlossen.

Die im Rahmen der Analyse betrachteten Studien sind in Tabelle 3-11 dargestellt.

Tabelle 3-11: Übersicht der ausgewerteten Studien für die Szenarioanalyse. Quelle: (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) et al. 2018)

Studie	Szenario		
	Referenz	Zielbereich 1	Zielbereich 2
BCG/Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland (BDI-Studie)	BDI_KPf Referenz	80 % Klimapfad (BDI_KPf 80 %-Pfad)	95 % Klimapfad (BDI_KPf 95 %-Pfad)
EWI et al. (2017): Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor (dena Gebäudestudie)	dena_GS Referenz	dena_GS EL80, dena_GS TM80	dena_GS EL95, dena_GS TM95
ISI et al (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (LFS)	LFS Referenz	LFS Basisszenario	Szenario „95 %ige-Treibhausgasreduktion“ (Modul 10.a): LFS -95 %
Öko-Institut/ISE (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 (KliNeG)		KliNeG ZB-35 %/ KliNeG ZB-60 %	
IWES/IBP (2017): Wärmewende 2030 (Agora Studie)		WW_2030 Basis KK, WW_2030 Basis KK+Gas, WW_2030 Dämm(-)	Notwendige Entwicklungen bis 2030, um -95 %-Ziel 2050 erreichen zu können (WW_2013 -95 %)
Prognos et al. (2015): Wissenschaftliche Begleitforschung zur Erarbeitung einer Energieeffizienz-Strategie Gebäude (ESG)	ESG Referenz	ESG Ziel Eff, ESG Ziel NEE	
Öko-Institut/ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050 (2. Runde)	KSz AMS (Aktuelle Maßnahmen Szenario)	KSz KS80	KSz KS95
UBA (2014): THG-neutrales Deutschland			Ziel 2050 (THGND V1) Bedingt sanierbare Gebäude (THGND V3)
UBA (2017): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten	RTD Referenz		RTD GreenEe
(EWI et al. 2018): Leitstudie Integrierte Energiewende	dena_IE Referenz		dena_IE EL95 dena_IE TM95
Nitsch (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung	Nitsch Referenz		Nitsch KLIMA2050

Aus der Analyse der in Tabelle 3-11 dargestellten Studien werden in (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) et al. 2018) Maßnahmen abgeleitet, die für eine Erreichung der nationalen Ziele erforderlich sind. Dies betrifft sowohl Zielbereich 1 (80 %-ige Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs bis 2050 bezogen auf 2008) als auch Zielbereich 2 (95 %-ige Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 bezogen auf 1990).

Tabelle 3-12 stellt die identifizierten Maßnahmen dar und beleuchtet für die jeweiligen Maßnahmen Ansätze auf Quartiersebene, die zur Zielerreichung beitragen können.

Tabelle 3-12: Maßnahmen zur Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele im Gebäudebereich und Rolle des Quartiers bei deren Umsetzung

Schlüsselmaßnahmen auf nationaler Ebene	Kurzbeschreibung	Rolle des Quartiers bei der Umsetzung
Steigerung der Sanierungsrate	Steigerung der Sanierungsrate von derzeit unter 1 % auf 1,4 % bis zu ca. 3,1 % (Zielbereich 1), für Zielbereich 2 bis zu 3,9 %	In Bestandsquartieren können Quartierskonzepte und Sanierungsmanagement eine Steigerung der Sanierungsrate sowie der Sanierungstiefe und die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien unterstützen. Im Bereich der erneuerbaren Stromerzeugung und der Integration von strombasierten Wärmetechniken können durch Gebäude-übergreifende Konzepte netzdienliche Lösungen unterstützt werden.
Steigerung der Sanierungstiefe	Sanierung von ca. 10 bis 20 % des Gebäudebestands auf das Niveau heutiger KfW40-Häuser, sowie des restlichen Gebäudebestandes größtenteils mindestens nach Anforderungen der EnEV. Die teilweise sehr ambitionierte Sanierung der Gebäude dient auch dazu, geringere Energieeinsparmöglichkeiten z.B. in denkmalgeschützten Gebäuden auszugleichen.	
Steigerung des Anteils neu installierter Wärmetechniken auf Basis erneuerbarer Energien	Bis 2050 Steigerung auf 70 % (Zielbereich 1) bis zu 97 % (Zielbereich 2). Deutliche Zunahme im Bereich Solarthermie und insbesondere bei Wärmepumpen. Biomasseverfügbarkeit eingeschränkt durch Nutzungskonkurrenz bei vollständiger Dekarbonisierung des Energiesystems. Als notwendige Voraussetzung in der Regel Umstellung bestehender Heizsysteme auf Niedertemperaturverteilsysteme. Teilweise Nutzung von PtG/PtL-Techniken.	
Steigerung des energetischen Standards im Neubau	Im Bereich der Neubauten wird i.d.R. von einer weiteren Anhebung der energetischen Anforderungen ausgegangen, in einigen Studien bis hin zu KfW40/ „Passivhäusern“ als Standard für neue Gebäude.	

Schlüsselmaßnahmen auf nationaler Ebene	Kurzbeschreibung	Rolle des Quartiers bei der Umsetzung
Ausbau und Dekarbonisierung von Nah- und Fernwärme	Die Rolle der Fernwärme wird in den untersuchten Szenarien sehr unterschiedlich bewertet, in einigen Szenarien Rückgang des Anteils auf 7 % bis 8 %, in anderen Szenarien Steigerung auf über 20 % (unabhängig vom untersuchten Zielbereich). Einbindung von Großflächen-Solarthermie, Tiefengeothermie, Großwärmepumpen oder Industrieabwärmenutzung. Erdgasbetriebene KWK als Brückentechnik.	Für den Ausbau der leitungsgebundenen Wärmeversorgung auf Basis erneuerbarer Energien spielt der Quartiersansatz eine wichtige Rolle, da eine übergreifende Betrachtung der vorhandenen Wärmesenken und Wärmequellen notwendigerweise erforderlich ist. Im Rahmen einer kommunalen Wärmeplanung können Wärmequellen und -senken systematisch erhoben werden.
Flankierende Maßnahmen	• Aus- und Weiterbildung von Fachkräften zur Umsetzung der Maßnahmen • Weiterentwicklung von Energieeffizienztechniken sowie Techniken zur Bereitstellung erneuerbarer Wärme • Etablierung eines regelmäßigen Monitorings über die Sanierungsaktivität	• Sanierungsmanagement • Quartierskonzepte

3.3.2 Maßnahmen Ressourcen- und Flächenziele

Ressourcen

Ziel nach Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung ist es, grundsätzlich bei Bauvorhaben den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu betrachten. Mit zunehmend sinkendem Energieverbrauch eines Gebäudes wächst die Bedeutung des Primärenergieverbrauches der Baustoffe für die Energie- und Klimaschutzbilanz über den Lebenszyklus (Püschel et al. 2013).

Nach Klimaschutzplan 2050 sollen verstärkt Nachhaltigkeitsanforderungen neben der Planung und Baudurchführung auch bei Betrieb und Nutzung Berücksichtigung finden (z. B. Einsatz von Qualitätssicherungs- und Bewertungssystemen zum nachhaltigen Bauen).

Für den Bundesbau hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) mit dem Leitfadens Nachhaltiges Bauen – Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden im Jahr 2016 hierfür bereits einen Leitfaden zur Verminderung von Umwelt- und Gesundheitsbelastungen, Optimierung von gebäudebezogenen Lebenszykluskosten und die städtebauliche Integration erarbeitet (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2016c).

Die Bundesregierung sieht vor, Umsetzungshemmnisse bei der Steigerung der Rohstoffproduktivität durch baurechtliche Vorschriften oder materialtechnische Eigenschaften langfristig abzubauen. Ziel ist es, die rechtlichen Vorgaben im Baubereich an den Stand der Technik und an die wissenschaftlichen Erkenntnisse anzupassen. So sind die Rohstoffeffizienz (z. B. Holzleichtbau ohne Qualitätseinbuße), Abfallvermeidung und Schließung von Stoffkreisläufen (vor allem Wiederverwendung/Recycling von Altholzprodukten und Altpapier) sowie die energetische Verwertung von Holzprodukten möglichst erst am Ende der stofflichen Verwendung wichtige Herausforderungen für Forschung, Entwicklung und Innovation. Unter anderem bieten moderne Holz-Hybrid-Konzepte auch im Mehrgeschossbau ein großes Potential (Hafner et al. 2017).

Folgende Maßnahmen zur Steigerung der Rohstoffproduktivität im Gebäudebereich können festgehalten werden:

- ▶ Reduktion des absoluten Baustoffbedarfs durch Leichtbauweisen und andere Bauweisen (Kalksandstein, Porenbeton)
- ▶ Reduktion des absoluten Baustoffbedarfs durch effektives Baustellenmanagement und in situ Wiederverwendung von Bodenaushub.
- ▶ Wiederverwendung von Bauteilen, z.B. Bauteilbörsen, Wiederverwendung von Pflastersteinen
- ▶ Verstärkter Einsatz von Recycling-Materialien in Hoch- und Tiefbau

Flächennutzung

Unterscheidung in

- ▶ Potenzialflächen für Innenentwicklung (Baulücken, geringfügig genutzte Flächen, Brachflächen und Althofstellen)
- ▶ Innenentwicklungsmaßnahmen (Nachverdichtung durch Baulückenschluss, Nachverdichtung durch Grundstücksteilung, Aufstockung)

3.4 Sensitivitätsbetrachtungen

Das Erreichen der in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Umweltziele hängt in unterschiedlichem Maße von externen Treibern ab, deren zukünftige Entwicklung mit Unsicherheiten behaftet ist.

Bevölkerungsentwicklung: Die Bevölkerungsentwicklung hat einen deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch und die THG-Emissionen, so dass bei steigender Bevölkerung das Erreichen von absoluten Einsparzielen (z. B. Minderung THG-Emissionen, Endenergieverbrauch) erschwert wird. Dieser Effekt wird bei der Betrachtung von Einsparzielen in wachsenden bzw. in schrumpfenden Kommunen deutlich: Eine Reduzierung der absoluten THG-Emissionen ist in wachsende Kommunen mit größeren Anstrengungen verbunden als in schrumpfenden Kommunen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, definiert beispielsweise die Stadt Freiburg als wachsende Kommune ihre THG-Einsparziele als Pro-Kopf-Minderungsziel.

Entwicklung der Wertschöpfung: Die wirtschaftliche Tätigkeit innerhalb einer Volkswirtschaft, einer Kommune oder eines Quartiers hat einen deutlichen Einfluss auf den

Energieverbrauch und die THG-Emissionen. Bei Betrachtung von absoluten Einsparwerten können Veränderungen in der Wirtschaftsleistung im Quartier (beispielsweise durch Standortveränderungen von Industrieunternehmen) zu sprunghaften Veränderungen führen. Die Energieintensität (Energieverbrauch pro Wirtschaftsleistung) trägt dieser Tatsache Rechnung und kann als Alternative (oder ergänzend) zu absoluten Kennzahlen verwendet werden,

Technische und regulatorische Entwicklungen: Das Erreichen von Zielen hängt von den technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen ab. Diese sind beispielsweise ein wichtiger Treiber beim Ausbau der erneuerbaren Energien sowie bei der Netzintegration. Während beispielsweise die heutigen Bedingungen zu einer Maximierung des Eigenverbrauchs auf Einzelverbraucherebene führen, können geänderte technische und regulatorische Rahmenbedingungen (Netzendgelte, smart grids, flexible Tarife) zu Veränderungen führen und somit die Entwicklung der Kennzahlen Eigenverbrauchsanteil, Autarkiegrad etc. beeinflussen bzw. deren Sinnhaftigkeit in Frage stellen. Merkmale der „Systemdienlichkeit“, wie beispielsweise die Menge vorhandener Strom- und Wärmespeicher, sollten hingegen relativ zukunftssicher sein.

4 Quartiers-Berechnungen

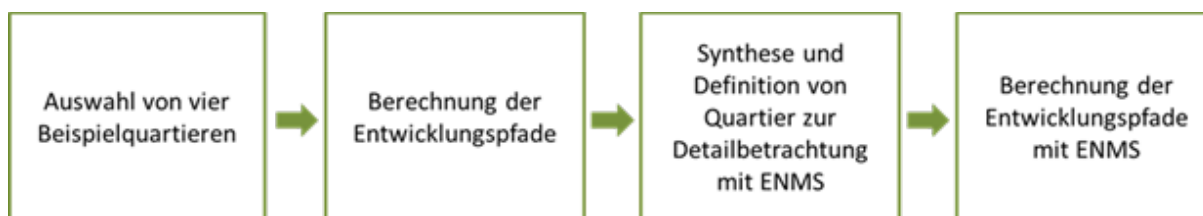
4.1 Allgemeines Vorgehen

Die Arbeiten in diesem Kapitel haben zum Ziel, anhand von Beispielquartieren verschiedene Entwicklungspfade hin zu treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Quartieren zu untersuchen. Insgesamt werden vier Beispielquartiere betrachtet, für die jeweils zwei Entwicklungspfade berechnet und verglichen werden. Dabei handelt es sich um vier real existierende Quartiere, die mit diversen Anpassungen erfasst und deren Gebäudebestand bis 2050 berechnet wurden. Eines dieser vier Quartiere wird darüber hinaus zusätzlich mit dem Einsatz eines Energiemanagement-Systems (EnMS) untersucht (siehe dazu Kapitel 5).

Für die Berechnungspfade kommen zwei Tools bzw. Modelle zum Einsatz: Ein vom Öko-Institut entwickeltes Quartierstool sowie das Modell DISTRICT des Fraunhofer ISE. Die Kombination der beiden Berechnungsmodelle ermöglicht es, einerseits in der Breite die möglichen Transformationspfade unter Berücksichtigung der Charakteristika verschiedenartiger Quartierstypen zu untersuchen und andererseits im Detail die Chancen und Möglichkeiten von Energiemanagementsystemen im Quartier zu beleuchten.

Die methodische Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 4-1 dargestellt.

Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise in Kapitel 4 und 5



Quelle: Öko-Institut & Fraunhofer ISE

Die gewählten Transformationspfade sind meist derart ausgestaltet, dass in den 30 Jahren von 2020 bis 2050 das jeweilige Quartier einmal komplett saniert wird. Dies spiegelt sich in der teilweise sehr hoch angenommenen Sanierungsrate von 3 % wider. Gleiches gilt für die PV-Zubaurate: auch diese ist so gesetzt, dass in den verschiedenen Quartieren bis 2050 alle für PV verfügbaren Dachflächen mit PV-Modulen belegt sind. Je nach spezifischer Quartiersgestaltung kann bei den Transformationspfaden auch davon abgewichen werden.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu Wärmenetzen bei rückläufigem Wärmeverbrauch wurden nicht gemacht.

Die in dieser Studie untersuchten Quartiere Freiburg Haslach, Freiburg Weingarten-West, Darmstadt Ludwigshöh-Viertel sowie ein Teil der Gemeinde Linkenheim-Hochstetten wurden in erster Linie ausgewählt, um eine gewisse Breite an unterschiedlichen Quartierstypen darzustellen (z. B. Bestand und Neubau, gemischtes Quartier mit Gewerbe und reines Wohnquartier, vorhandenes oder nicht vorhandenes Wärmenetz, großes Quartier auf Stadtteilgröße und kleineres Quartier, geschlossene und offene Bebauung etc.). Hinzu kam, dass die Bearbeiter zu diesen Quartieren schon vertiefte Kenntnisse besitzen bzw. Zugang zu genaueren Daten haben, beispielsweise zu Gebäuden und Flächen. Nichtsdestotrotz erhebt die

Studie keinen Anspruch darauf, diese Quartiere im Detail korrekt darzustellen. Vielmehr war eine Reihe an Vereinfachungen nötig, um die Quartiere für die Ziele dieser Studie sinnvoll nutzen bzw. berechnen und vergleichen zu können. Die Vereinfachungen betreffen beispielsweise die Gebäudetypologie, die Ziel-Wärmeversorgung oder gewisse Vereinfachungen bei der Transformationspfadberechnung (z. B. wird PV gleichmäßig über alle Gebäude verteilt zugebaut, wobei gleichzeitig die Dachausrichtung nicht berücksichtigt wird). Es lassen sich also keine detaillierten, konkreten Empfehlungen speziell für die hier herangezogenen Quartiere ableiten, sondern vielmehr geht es darum, den groben Rahmen möglicher Transformationspfade für Quartiere allgemein aufzuzeigen.

Auf Basis dieser Diskussion wurden die Transformationspfade entwickelt. Für die betrachteten Quartiere wurden verschiedene Merkmale ausgewählt, um ein breiteres Spektrum von Maßnahmen und deren Umwelteffekte abzubilden (vgl. Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Überblick der betrachteten Quartiere sowie der jeweils gewählten Merkmale der Transformationspfade

Quartier	Quartierstyp	Transformationspfade: untersuchte Merkmale
Haslach	Gemischt, Wohn- und Nichtwohnbebauung	Fokus Verringerung der Wärmenachfrage durch Energieeffizienz Fokus Vorrang auf den Ausbau erneuerbarer Energien
Weingarten-West	Homogenes, verdichtetes Wohngebiet	Dämmung mit Polystyrol (EPS) Dämmung mit Mineralfasern Dämmung mit nachwachsenden Rohstoffen
Ludwigshöhviertel	Neubau, überwiegend Wohngebäude	Konventionelle Massivbauweise Holztafelbauweise
Linkenheim-Hochstetten	Ländlich geprägt, überwiegend Wohngebäude	Umbau zu zentraler Wärmeversorgung mit Großwärmepumpe Umbau zu dezentraler Wärmeversorgung mit Wärmepumpen

Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Beschreibung des Öko-Quartiersberechnungs-Tools

Das Quartiersmodell des Öko-Instituts ist ein in Java Script programmiertes Tool, welches eine dynamische Modellierung verschiedener Entwicklungspfade eines Quartiers erlaubt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in html. Quartiers-spezifische Input-Daten müssen zunächst erfasst und aufbereitet werden und können dann in das Tool eingespeist werden. Im Tool sind verschiedenste Hintergrunddaten eingepflegt, auf deren Basis die Berechnungen der Transformationspfade erfolgen (siehe hierzu Abschnitt 4.2.1). Darüber hinaus gibt es vielfältige Einstellmöglichkeiten, die die Art und Weise des Transformationspfades beeinflussen (siehe dazu Abschnitt 4.2.2). Die Output-Daten (vgl. Abschnitt 4.2.3) sind unterteilt in verschiedene Themenfelder (Gebäude, Energie, CO₂-Emissionen, Kosten, Ressourcen) und werden mittels Grafiken oder Tabellen dargestellt.

4.2.1 Inputdaten

Im Folgenden werden die im Berechnungs-Tool verwendeten Inputdaten aufgelistet und beschrieben.

Gebäudetypologie und energetische Kennwerte

Zur Beschreibung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs wird die Gebäudetypologie des UBA-Vorhabens „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) 2017) aufgegriffen. Darin wird der Wohngebäudebestand vereinfacht in drei Gebäudetypen mit je drei Baualtersklassen (BAK) und drei Sanierungszuständen aufgeteilt. Die Gebäudetypen sind Ein-/Zweifamilienhäuser (EZFH), kleine und mittlere Mehrfamilienhäuser (MFH, mit drei bis zwölf Wohneinheiten) und große Mehrfamilienhäuser (GMH, mit mehr als zwölf Wohneinheiten). Die Baualtersklassen sind definiert als „bis 1948“, „1949 bis 1994“ und „ab 1995“. Die drei Sanierungszustände lauten „unsaniert“, „vollsanziert“ (EnEV 2009 Neubau, verschärft um 25 %) und „vollsanziert plus“ (Passivhaus-Standard)²³. Für eine detaillierte Beschreibung siehe Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017). In Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017) wurde der Nutz- und Endenergiebedarf bei Nichtwohngebäuden nach den Bilanzgrenzen der DIN V 18599:2011 und bei Wohngebäuden nach der DIN 4108-6:2003-06 bzw. DIN EN 832 in Verbindung mit DIN V 4701-10:2003-08 bilanziert. Der berechnete rechnerische Heizwärmebedarf wird hier übernommen und mithilfe der empirisch ermittelten Formel

$$\text{Verbrauch} = \left(-0,2 + \frac{1,3}{1 + \frac{\text{Bedarf} - 33}{550}} \right) * (\text{Bedarf} - 33) + 33$$

aus Loga et al. (2019) in einen typischen Heizwärmeverbrauch umgerechnet (vgl. Gleichungen 16 & 17 in Loga et al. (2019)). Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die verwendeten Wohngebäudetypen und deren Eigenschaften.

Tabelle 4-2: Beschreibung der Wohngebäudetypen

Ge- bäu- dety	Baualters- klasse	Sanierungszu- stand	Wohnfläche [m ²]	Rechnerischer Heiz- wärmebedarf [kWh/(m ² a)]	Typischer Heizwär- meverbrauch [kWh/(m ² a)]
EZFH	bis 1948	unsaniert	148,10	282,80	178,30
EZFH	bis 1948	vollsanziert	148,10	75,10	69,90
EZFH	bis 1948	vollsanziert plus	148,10	31,40	32,10

23 Teilsanierungen werden nur indirekt betrachtet mittels Mischung von unsanierten und sanierten Gebäuden.

Ge- bäu- detyp	Baualter- klasse	Sanierungszu- stand	Wohnfläche [m ²]	Rechnerischer Heiz- wärmebedarf [kWh/(m ² a)]	Typischer Heizwär- meverbrauch [kWh/(m ² a)]
EZFH	1949 – 1994	unsaniert	151,60	244,20	164,40
EZFH	1949 – 1994	vollsanziert	151,60	85,10	77,50
EZFH	1949 – 1994	vollsanziert plus	151,60	34,50	35,00
EZFH	ab 1995	unsaniert	151,70	147,60	118,60
EZFH	ab 1995	vollsanziert	151,70	84,00	76,70
EZFH	ab 1995	vollsanziert plus	151,70	33,20	33,80
MFH	bis 1948	unsaniert	357,10	271,70	174,50
MFH	bis 1948	vollsanziert	357,10	71,80	67,30
MFH	bis 1948	vollsanziert plus	357,10	32,10	32,70
MFH	1949 – 1994	unsaniert	403,90	224,10	156,30
MFH	1949 – 1994	vollsanziert	403,90	75,10	69,90
MFH	1949 – 1994	vollsanziert plus	403,90	33,10	33,70
MFH	ab 1995	unsaniert	403,90	126,50	105,90
MFH	ab 1995	vollsanziert	403,90	70,20	66,00
MFH	ab 1995	vollsanziert plus	403,90	30,00	30,70
GMH	bis 1948	unsaniert	1.367,50	143,20	116,10
GMH	bis 1948	vollsanziert	1.367,50	53,90	52,50
GMH	bis 1948	vollsanziert plus	1.367,50	24,30	25,30
GMH	1949 – 1994	unsaniert	1.825,30	159,30	125,20
GMH	1949 – 1994	vollsanziert	1.825,30	60,90	58,40
GMH	1949 – 1994	vollsanziert plus	1.825,30	26,10	27,00
GMH	ab 1995	unsaniert	2.250,30	123,90	104,30
GMH	ab 1995	vollsanziert	2.250,30	70,60	66,30
GMH	ab 1995	vollsanziert plus	2.250,30	29,00	29,80

Quelle: Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017) und eigene Berechnungen auf Basis von Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (2011) zum Heizwärmeverbrauch

Bei den Nichtwohngebäuden (NWG) spielt neben der Kubatur und den energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle auch die Nutzung der Gebäude eine entscheidende Rolle für den

Gebäudeenergieverbrauch. Es wird hierbei zwischen sechs Nutzungstypen unterschieden. Davon sind wiederum vier in jeweils zwei Baualtersklassen (bis 1983, ab 1984) unterteilt. Die sechs Nutzungstypen sind (I) Wohngebäude mit Mischnutzung, (II) Bildung, Büro und Verwaltung, (III) Gewerbe, Industrie, (IV) Handel-/ Dienstleistung, Praxisgebäude, (V) Beherbergung, Gastronomie, Kliniken, und (VI) Sonstige (Sport, Kultur). Auch bei den NWG werden drei unterschiedliche Wärmeschutzstandards unterschieden: „unsaniert“, „vollsanziert“ (angelehnt an das Neubauniveau der EnEV 2016) sowie „vollsanziert plus“ (Sanierung entsprechend den Anforderungen an ein Passivhaus).

Wärmeversorgung

Für die Wärmebereitstellung der Wohngebäude werden die folgenden vier Basis-Versorgungsvarianten betrachtet: Gas-Brennwertkessel (BWK), elektrische Wärmepumpen (WP), erdgasbetriebene KWK-Anlagen (BHKW) und Fernwärme (FW). Diese Versorgungsoptionen werden je nach Sanierungszustand mit einer Lüftungsanlage mit und ohne Wärmerückgewinnung (WRG) sowie als Variante mit und ohne Solarthermie (ST) -Nutzung kombiniert. Nur im unsanierten Zustand gibt es keine Lüftungsanlage. Die Solarthermie-Anlagen sind als reine Brauchwasseranlagen ausgelegt. Bei Gebäuden, die auf den Standard „vollsanziert plus“ saniert werden, wird immer eine Lüftungsanlage mit WRG eingesetzt.

Für die Nichtwohngebäude werden ebenfalls vier Basis-Versorgungsvarianten zur Wärmebereitstellung betrachtet: Gas-Brennwertkessel, elektrische, reversible Wärmepumpen, erdgasbetriebene KWK-Anlagen und Fernwärme. Da in Nichtwohngebäuden die Bereitstellung von Kälte, die Lüftung sowie die Beleuchtung ebenfalls bilanziert werden müssen, werden auch für diese Energieanwendungsbereiche Setzungen vorgenommen, für die Kälteproduktion z. B. Absorptionskältemaschinen.

Tabelle 4-3 listet die Jahresarbeitszahlen der eingesetzten Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Gebäudetyp und Sanierungszustand.

Tabelle 4-3: Jahresarbeitszahlen der eingesetzten Wärmepumpen in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Sanierungszustand

Gebäudetyp	Sanierungszustand	Wärmepumpentyp	Jahresarbeitszahl
EZFH	unsaniert	Luft-Wasser	2,2
EZFH	vollsanziert/vollsanziert plus	Luft-Wasser	2,7
MFH/GMH/NWG	unsaniert	Erdsonde-Wasser	2,75
MFH/GMH/NWG	vollsanziert/vollsanziert plus	Erdsonde-Wasser	4

Quelle: Eigene Darstellung

Die Umweltwirkungen **der eingesetzten Kältemittel werden in der Herstellungsphase mitbilanziert (vgl. auch Unterkapitel zu Umweltwirkungen weiter unten). Allerdings wird der Verlust an Kältemittel in der Nutzungsphase mangels Datenverfügbarkeit nicht in die Bilanzierung mit aufgenommen.**

CO₂-Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind alle im Anhang dargestellt in Tabelle A3-5 bis Tabelle A3-7. Die Zeitreihen stammen alle aus dem Klimaschutzszenario -95 % der BMU Klimaschutzszenarien 2050, 2. Modellierungsrunde. Dabei wurden die Fernwärme-Emissionsfaktoren für 2040 und 2050 angepasst, um im Jahr 2050 eine THG-neutrale Fernwärmeversorgung in den beiden Quartieren Haslach und Weingarten abzubilden.

Umweltwirkungen

Von den einzelnen Schritten der Energieversorgung und der Gebäudesanierung können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diese möglichen Auswirkungen sind bei der Schadstoffbewertung in der Wirkungsabschätzung zu berücksichtigen. Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltwirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen und damit zusätzliche Informationen zu liefern, die in die Bewertung einfließen.

Im Quartiersmodell werden die Umweltwirkungen dynamisch berechnet, d.h. für verschiedene zu untersuchende Entwicklungspfade werden die entsprechenden Umweltwirkungen direkt mitbilanziert. Dabei werden die folgenden Wirkungskategorien berücksichtigt (für eine detaillierte Beschreibung siehe Tabelle 4-4):

- ▶ Primärenergiebedarf (PE), Summe aus dem Einsatz erneuerbarer Primärenergie ohne die als Rohstoff verwendeten erneuerbaren Energieträger (PERE) und dem Einsatz nicht-erneuerbarer Primärenergie ohne die als Rohstoff verwendeten nicht-erneuerbaren Energieträger (PENRE)
- ▶ Verbrauch an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs (ADP, elementar)
- ▶ Treibhauspotenzial (GWP)
- ▶ Eutrophierungspotenzial (EP)
- ▶ Versauerungspotenzial (AP)
- ▶ Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP).

Tabelle 4-4: Beschreibung der Wirkungskategorien zur Bewertung der Umweltwirkungen

Wirkungskategorie	Beschreibung
Primärenergieeinsatz (Primary Energy, PE)	Der Verbrauch an energetischen Ressourcen kann über den Primärenergieeinsatz (Primary Energy, PE) abgebildet werden. Der Primärenergiebedarf weist generell alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte aus. In der vorliegenden Ökobilanz wird der Primärenergieeinsatz über die Summe aus dem Einsatz erneuerbarer Primärenergie ohne die als Rohstoff verwendeten erneuerbaren Energieträger (PERE) und dem Einsatz nicht-erneuerbarer Primärenergie ohne die als Rohstoff verwendeten nicht-erneuerbaren Energieträger (PENRE) abgebildet. Nicht eingerechnet sind Energieträger, die rohstofflich verwendet werden. Zur Berechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt.
ADP elementar (abiotic depletion)	Für den Verbrauch an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs wurde der Wirkungsparameter Verbrauch elementarer abiotischer Ressourcen mineralischen Typs (Abiotic Depletion Potential Elementary, ADPE) entwickelt. In der vorliegenden Studie wird die Definition des ADP _{elem.} Aus der

Wirkungskategorie	Beschreibung
potential elementary, ADPE.)	Basismethode des Dutch LCA Handbook (Guinée et al. 2001) mit den Charakterisierungsfaktoren nach (CML 2016) verwendet. Das ADP_{elem} berechnet sich dementsprechend als Quotient aus der Extraktionsrate einer Ressource und dem Quadrat der „ultimate reserve“ dieser Ressource ($ADP_{elem,ur}$). Bezogen wird auf Antimonäquivalente.
Treibhauspotenzial (GWP)	Die Berechnung des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential, GWP) in Form von CO ₂ -Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO ₂ -Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt; daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Ökobilanz verwendet werden soll. ISO TS 14067 [ISO 2013] legt die Modellierung auf der 100-Jahre-Basis fest. Die in den Berechnungen des Treibhauspotenzials berücksichtigten Substanzen werden mit ihren CO ₂ -Äquivalenzwerten nach [IPCC 2013] bewertet.
Eutrophierungspotenzial (EP)	Die Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Im vorliegenden Projektzusammenhang wird der Nährstoffeintrag über Luft und Wasser (bzw. Boden) betrachtet. Das Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential, EP) von Nährstoffemissionen wird hierbei durch die Aggregation von Phosphat-Äquivalenten nach [CML 2016] ermittelt.
Säurebildungspotenzial (AP)	Eine Versauerung kann ebenfalls sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Abgase. Die Berechnung erfolgt in Form von Säurebildungspotenzialen (Acidification Potential, AP) mit den Charakterisierungsfaktoren nach [CML 2016].
Photo-chemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	Die Wirkungskategorie Photo-chemisches Oxidantienbildungspotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) bildet die Entstehung von Sommersmog oder bodennahem Ozon ab. Ozon führt zu Wald- und Vegetationsschäden. In höheren Konzentrationen ist es humantoxisch (Reizung der Atmungsorgane, Asthma, Husten und Augenreizung) [Schmid 2006]. Die Ozonbildung ist ein komplexer Prozess, bei dem den Kohlenwasserstoffen ein Ozonbildungspotenzial zugewiesen werden kann. Genaue Potenziale gelten nur für eine definierte Umgebung mit einer bestimmten Lichtintensität, einer bestimmten NO _x -Konzentration und definierten meteorologischen Bedingungen. Die Berechnung erfolgt mit den Wirkfaktoren nach [CML 2016], die auf 1 kg Ethylen-Äquivalent bezogen werden.
Ozone Depletion Potential (ODP)	Das Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (Ozone Depletion Potential, ODP) beschreibt den Ozonabbau in der Stratosphäre durch Ozone Depleting Substances (ODS), wie z. B. Chlorfluorkohlenwasserstoffe. Die Produktion und der Einsatz von ODS sind im Montrealer Protokoll bzw. für Europa durch EC 2037/2000 beschränkt bzw. verboten. Die ODS-Emissionsdaten verändern sich deutlich über die Jahre. So haben sich z. B. die weltweiten Halon-Emissionen von 6174 t/a im Jahr 1990 auf 1931 t/a im Jahr 2005 und auf 1482 t/a im Jahr 2010 reduziert [HTOC 2010]. So fand allein von 2005 bis 2010 eine Reduktion um 23 % statt. Das ODP wird in kg CFC11-Äquivalenten berechnet.

Für die Berechnung der Umweltwirkungen werden für die relevanten Techniken als Inputdaten die spezifischen Wirkungen für die jeweiligen Wirkungskategorien benötigt. Tabelle 4-5 gibt eine Übersicht der verwendeten Datenquellen²⁴.

Tabelle 4-5: Inputdaten für die Berechnung der Umweltwirkungen

Technik/Bauteil	Datenquelle
Erdgasheizungen	ÖKOBAUDAT Version 2019-III
Sonnenkollektoren	ÖKOBAUDAT Version 2019-III
Photovoltaik	ecoinvent v 3.6 (2019)
Fernwärme	ecoinvent v 3.6 (2019)
Fenster	ÖKOBAUDAT Version 2019-III
Pelletkessel	ÖKOBAUDAT Version 2019-III
Wärmepumpen	ÖKOBAUDAT Version 2019-III
Dämmung Außenwand / WDVS	ÖKOBAUDAT Version 2019-III
Pufferspeicher	ecoinvent v 3.6 (2019)
Gebäude Massivbauweise	Nemry und Uihlein (2008)
Gebäude Holztafelbauweise	Achenbach und Rüter (2016)

Kosten

Tabelle 4-6 gibt einen Überblick zu den Kosten- und Preisannahmen. Die Investitionskosten beinhalten Kosten für die energetische Sanierung aufgeteilt in Ohnehinkosten und energetische Mehrkosten. Erstere stellen die Positionen dar, die bei einer ohnehin anstehenden Renovierung (z.B. der Putzerneuerung) anfallen würden, ohne dass zusätzlich eine Dämmung ergänzt wird. Alle Kostenpunkte, die der energetischen Ertüchtigung des Gebäudes dienen, fallen hingegen unter die energetischen Mehrkosten.

²⁴ Lüftungsanlagen der sanierten Gebäude sind in der Berechnung der Umweltwirkungen nicht enthalten.

Tabelle 4-6: Kosten und Preisannahmen im Berechnungs-Tool

Parameter	Datenquelle
Investitionskosten	Wohngebäude: Kostenfunktionen aus Hinz (2015) NWG: verschiedene Quellen, die schon im Projekt „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ verwendet wurden: Oschatz et al. (2014), Hinz (2012), Hinz (2015), Lucas et al. (2002) Zukünftige Entwicklung der spezifischen Investitionskosten: Verwendung technikspezifischer Lernkurven Investitionskostenansätze werden über den Baupreisindex des Statistischen Bundesamtes auf die Preisbasis 2016 normiert. Siehe Anhang: Tabelle A und Tabelle A
Wartung-/Instandhaltungskosten	Orientierung an den Ansätzen aus der VDI 2067, Blatt 1
Energiepreise	Übernahme der Energiepreisprojektion (Endverbraucherpreise) aus den Klimaschutzszenarien 2050, 3. Modellierungsrunde (vgl. Tabelle A3-3 im Anhang)
Einspeisevergütungssätze Strom	Angenommener EEG-Degressionsfaktor von 0,5 % pro Monat; Marktwert der Mittelfristprognose (Enervis 2019) bis 2024; danach lineare Extrapolation bis 60 % des Marktwertfaktors, welcher als unteres Band bis 2050 fortgeschrieben wird (vgl. Tabelle A im Anhang)

Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2 Tool-Einstellparameter

4.2.2.1 Sanierungsrate und -tiefe

Das Berechnungstool erlaubt die variable Einstellung der Sanierungstätigkeit – sowohl bezogen auf die Sanierungsrate als auch auf die Sanierungstiefe. Vom unsanierten Zustand der Gebäude können diese entweder in den Sanierungsstandard „vollsaniert“ oder „vollsaniert plus“ überführt werden. „Vollsaniert“ entspricht dabei dem energetischen Niveau des aktuellen Neubaustandards (EnEV 2016), „vollsaniert plus“ entspricht dem energetischen Niveau eines Passivhauses. Die Berechnungslogik innerhalb des Tools orientiert sich dabei in jedem Zeitschritt am spezifischen Energieverbrauch der Gebäude. D.h. dass immer dasjenige Gebäude zuerst saniert wird, welches unter den Bestandsgebäuden den höchsten spezifischen Energieverbrauch in kWh/(m²a) aufweist. Auf diese Weise werden zuerst die energetisch „schlechtesten“ Gebäude saniert. Weiterhin wird bei der Berechnung nach drei übergeordneten Gebäudekategorien unterschieden: kleine Wohngebäude (Ein-/Zweifamilienhäuser, kurz WGK), große Wohngebäude (sowohl Mehrfamilienhäuser als auch große Mehrfamilienhäuser, kurz WGG) und Nichtwohngebäude (NWG). Diese Unterteilung ist notwendig, da ansonsten zunächst nur kleine Wohngebäude aufgrund ihres höheren spezifischen Energieverbrauchs saniert würden. Die Sanierungsrate lässt sich dabei je Gebäudekategorie separat einstellen.

4.2.2.2 Wärmeversorgung

Die Wärmeversorgung der Gebäude wird zunächst im IST-Zustand erfasst und vereinfacht mittels der in Bürger et al. (2017) entwickelten Typologie dargestellt (vgl. Abschnitt 4.2.1). Im

Tool lassen sich verschiedene Extremszenarien der Wärmeversorgung darstellen, bei denen nahezu alle Quartiersgebäude über die Jahre zum gleichen Hauptenergieträger wechseln (z.B. Fernwärme oder Wärmepumpen). Für den Austausch der Wärmeversorgungstechniken wurde folgende Berechnungslogik im Tool umgesetzt: zunächst wird jeder Heizanlage unabhängig vom verwendeten Energieträger ein randomisiertes Alter zwischen 0 und 20 Jahren zugewiesen. Grundsätzlich gilt: wenn eine Heizungsanlage ihr Lebensende erreicht hat (hier mit 20 Jahren festgelegt), wird sie ausgetauscht. Dies erfolgt auf zwei Weisen. Erstens werden die Heizanlagen derjenigen Gebäude ausgetauscht, die eine energetische Sanierung der Gebäudehülle erhalten (vgl. Abschnitt 4.2.2.1 oben). Da die energetische Sanierungsrate der Gebäudehülle im Tool allerdings immer kleiner als die Heizungstechnik-Austauschrate ist (diese liegt infolge der maximalen Lebensdauer von 20 Jahren umgerechnet bei 5 % pro Jahr), müssen weitere Heizungsanlagen ausgetauscht werden (zweitens). Dies geschieht auf Basis des Alters der Heizungsanlage (s.o.). Für Gebäude, bei denen nur ein Heizungsanlagentausch erfolgt ist, werden energetische Sanierungen in den 10 Jahren nach erfolgtem Heizanlagentausch nicht zugelassen²⁵. Nach Ablauf der 10 Jahres-Sperrfrist sind energetische Sanierungen, bei denen dann auch die Heizanlage ausgetauscht wird, allerdings wieder erlaubt.

4.2.2.3 Stromerzeugung im Quartier

Im Berechnungstool lässt sich der Anteil der für PV genutzten Dachflächen zwischen 0 % und 80 %²⁶ der tatsächlichen Dachfläche anpassen. Wenn in den Gebäuden auch Solarthermie als Wärmeerzeuger vorgesehen wird, reduziert sich die maximal mit PV-Modulen belegbare Dachfläche auf 60 % der gesamten Dachfläche. Der durch PV erzeugte Strom liegt bei 150 kWh pro Quadratmeter PV-Modul und Jahr, die Kosten der Installation belaufen sich auf 200 EUR pro Quadratmeter. Im Quartier erzeugter PV-Strom wird direkt im Quartier verbraucht und mindert dadurch den Strombezug von außerhalb des Quartiers. Sobald jahresbilanziell mehr Strom im Quartier erzeugt wird als überhaupt verbraucht werden kann, wird dieser Überschussstrom in das übergeordnete Netz eingespeist. In der Quartiersbilanzierung führt dies zu einer CO₂-Gutschrift für das Quartier in Höhe der Strommenge multipliziert mit dem hinterlegten CO₂-Emissionsfaktor für den Bundesstrommix in dem jeweiligen Jahr. Zum anderen erfolgt eine monetäre Gutschrift in Höhe der fortgeschriebenen Einspeisevergütung bzw. des Marktwertes der PV (vgl. Tabelle A3-4 im Anhang).

4.2.2.4 Dämmmaterialien

Im Berechnungstool kann in der Benutzeroberfläche zwischen verschiedenen Dämmmaterialien ausgewählt werden. Für die verschiedenen Dämmmaterialien sind die spezifischen Umweltwirkungen im Tool hinterlegt. Die kumulierten Umweltwirkungen werden im Tool dynamisch in Abhängigkeit der gewählten Einstellungen zu Dämmstoffen, Sanierungsraten und Sanierungstiefen berechnet. Brandschutzaspekte werden bei der Betrachtung der Dämmstoffe

25 Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass Gebäudeeigentümer auch einen gewissen Planungshorizont haben und nach erfolgtem Heizungstausch nur in den seltensten Fällen in den Folgejahren eine energetische Gebäudesanierung planen.

26 Wegen technischer Beschränkungen wie Sicherheitsabstände, Geometrie ist nicht die gesamte Dachfläche nutzbar

nicht weiter beachtet, d.h. es werden auch bei größeren Gebäuden keine Brandriegel angenommen.

4.2.3 Tool-Ausgabeparameter

In diesem Unterkapitel wird kurz auf die verschiedenen Ausgabe-Parameter der Berechnungen eingegangen.

4.2.3.1 Gebäudebestand

Für den Gebäudebestand gibt das Berechnungs-Tool folgende Parameter aus:

- ▶ Den Sanierungszustand der Gebäude im Zeitverlauf bezogen auf die Anzahl und die Fläche der Gebäude (Wohnfläche in Wohngebäuden und Nutzfläche in Nichtwohngebäuden)
- ▶ Den Anteil der Dachflächen im Quartier, die mit PV-Modulen belegt sind

4.2.3.2 Endenergieverbrauch

Für den Endenergieverbrauch gibt das Berechnungs-Tool folgende Parameter aus:

- ▶ Den Endenergieverbrauch zur Wärmeversorgung je verwendetem Energieträger (Erdgas, Holz, Fernwärme, Hilfs-Strom, Wärmepumpen-Strom, Umweltwärme, Solarthermie) im Gesamtquartier und je Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche
- ▶ Den Anteil der im Quartier erzeugten erneuerbaren Energien am Wärme-Endenergieverbrauch
- ▶ Den Anteil des im Quartier erzeugten PV-Stroms am Endenergieverbrauch des Stroms im Quartier (hier sind Haushaltsstrom sowie Strom für die Gebäudekonditionierung enthalten)

4.2.3.3 CO₂-Emissionen

Für CO₂-Emissionen gibt das Berechnungs-Tool folgende Parameter im Zeitverlauf bis 2050 aus:

- ▶ CO₂-Emissionen des Quartiers ohne und mit Vorketten, jeweils pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche
- ▶ CO_{2e}-Emissionen (CO₂-Äquivalente) des Quartiers ohne und mit Vorketten, jeweils pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche
- ▶ Die prozentuale Reduktion der Emissionen gegenüber dem Startjahr
- ▶ Den Emissionsfaktor in g/kWh der im Quartier genutzten Endenergie (Wärme und Strom)
- ▶ Den Emissionsfaktor in g/kWh des im Quartier verbrauchten Stroms

4.2.3.4 Umweltwirkungen

Folgende Umweltwirkungsparameter gibt das Berechnungs-Tool aus, jeweils pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche aller Gebäude im Quartier (vgl. Tabelle 4-4):

- ▶ PE (Summe aus PERE und PENRE)
- ▶ GWP
- ▶ POCP

- ▶ AP
- ▶ EP
- ▶ ADPE

4.2.3.5 Kosten

Folgende Kostenpunkte gibt das Berechnungs-Tool für die Jahre 2020 bis 2050 aus (vgl. auch die Ergebnisdarstellung in den Folgekapiteln):

- ▶ Investitionskosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche des gesamten Quartiers; diese beinhalten die Investitionskosten für die Gebäudehüllflächen-Sanierung, aufgeteilt in Ohnehinkosten und energetische Mehrkosten²⁷, die Investitionskosten für neue Wärmeversorgungs-Techniken (Einzelgebäude und ggf. auf Quartiersebene, z.B. Großwärmepumpe und Wärmenetz) und die Investitionskosten für neue Photovoltaik-Anlagen.
- ▶ Laufende jährliche Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche des gesamten Quartiers; diese beinhalten die laufenden Kosten für den Strom- und Wärmeverbrauch sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten. Bei jahresbilanzieller Überdeckung des Stromverbrauchs im Quartier durch den mit PV erzeugten Strom, wird dem Quartier eine Gutschrift zugerechnet, welche effektiv die laufenden Kosten senkt (vgl. auch Tabelle A3-4 im Anhang).

4.3 Freiburg – Haslach

4.3.1 Ausgangslage/Quartiersbeschreibung

Der Stadtteil Haslach liegt südwestlich der Altstadt Freiburgs. Seit der Eingemeindung 1890 hat er sich schrittweise entwickelt. Seit 1914 ist Haslach in mehreren Phasen gewachsen. Dies lässt sich an teilweise sehr homogenen Gebäudestrukturen in einzelnen Bereichen und Straßenzügen im Stadtteil sehen. Besonders auffällig ist diese schrittweise Entwicklung in dem „Fächer“ der Gartenstadt, in dem nach Herkel et al. (2015) nahezu alle kleinen Reihenhäuser, die zwischen 1919 und 1948 errichtet wurden, konzentriert sind. Lage und Gliederung des Stadtteils sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Im Stadtteil Haslach leben circa 20.000 Einwohner (Stadt Freiburg (2019)). Neben den Wohngebieten befinden sich drei Gewerbegebiete in dem Stadtteil.

27 Ohnehinkosten und energetische Mehrkosten definiert wie in Hinz (2015): zu den Ohnehinkosten zählen die Kosten aller Arbeiten samt Material, die auch bei einer reinen Renovierung ohne gleichzeitige energetische Ertüchtigung anfallen würden; entsprechend beschränken sich die energetischen Mehrkosten nur auf die Kosten des Materials und des Arbeitsaufwands der direkt im Zusammenhang mit einer energetischen Ertüchtigung stehen.

Abbildung 4-2: Lage und Gliederung des Stadtteils Haslach in Freiburg; rot umrandet die Lage des Neubaugebiets Gutleutmatten



Quelle: Stadt Freiburg (2015)

Die Gebäude weisen eine gemischte Besitzerstruktur auf; sie befinden sich im Eigentum von Privatpersonen, öffentlichen und privaten Wohnungsunternehmen sowie der öffentlichen Hand (s. Herkel et al. (2015)). Ein Großteil der Gebäude ist vor 1948 sowie zwischen 1958 und 1978 errichtet worden und dementsprechend in einem sanierungsbedürftigen oder modernisierungswürdigen Zustand. Die meisten Gebäude sind in Haslach zwischen 1958 und 1978 entstanden. Teile des Stadtteils sind (oder werden) im Rahmen des Sanierungsprogramms „Soziale Stadt“ derzeit saniert (u.a. Haslach Südost²⁸). Die meisten Gebäude des Stadtteils verfügen über eigene Heizungen (Erdgas, Erdöl,...), wobei in einigen Bereichen von Egerten und in der Gartenstadt kleine Nahwärmenetze existieren.

Der Stadtteil ist in vielen Bereichen von Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Reihenhäusern geprägt, welche nach Herkel et al. (2015) einen Anteil am Gebäudebestand bezogen auf die Gebäudeanzahl von 46,4 % haben. Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH; 3 bis 6 Wohneinheiten)

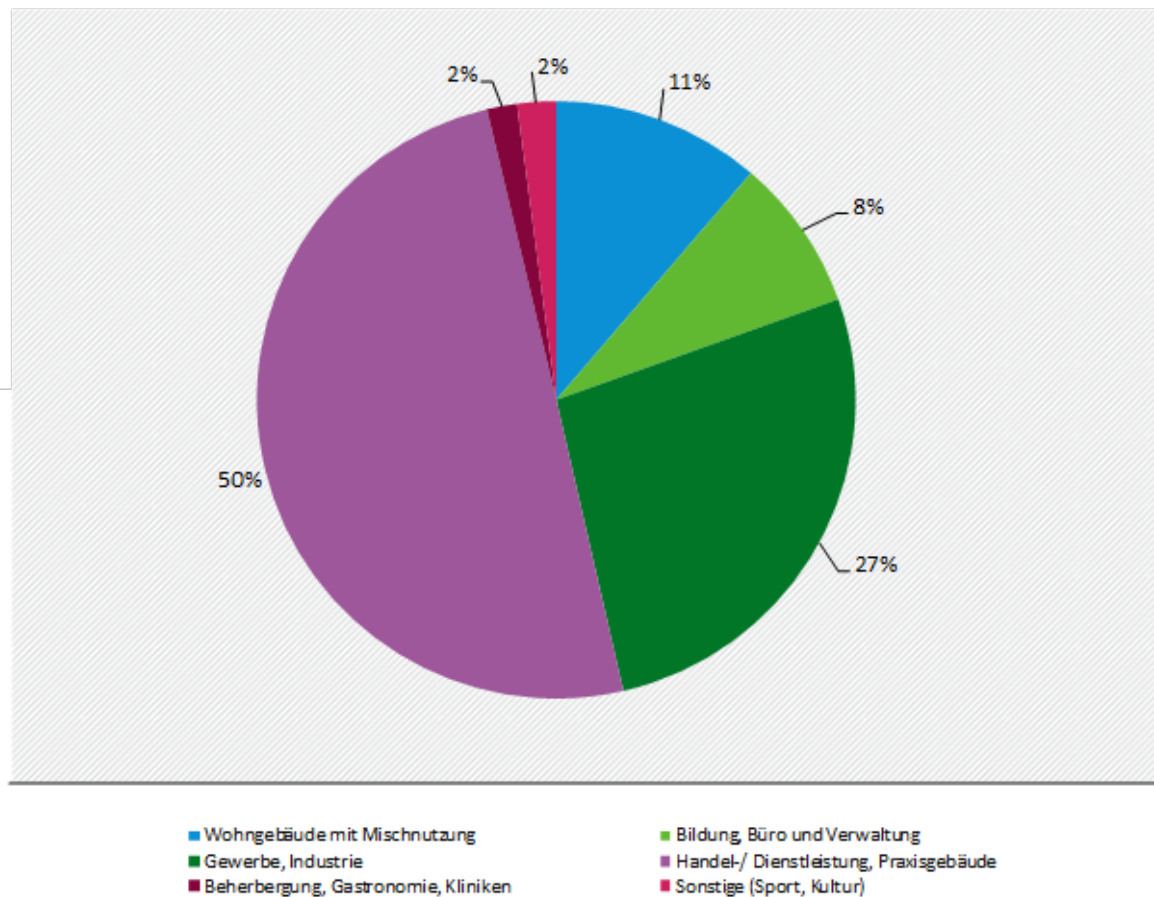
28 <https://www.freiburg.de/pb/site/Freiburg/node/344710?QUERYSTRING=haslach>

haben einen Anteil von 20,8 % und mittlere MFH von 9,1 %. Hochhäuser sind nur vereinzelt zu finden. Bezogen auf die Wohnfläche sind die Mehrfamilienhäuser dominant.

Nach Herkel et al. (2015) gibt es in dem Stadtteil 477 Nichtwohngebäude (NWG). Die Gebäude sind – soweit möglich – basierend auf der im Projekt „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ entwickelten Nichtwohngebäudetypologie klassifiziert worden (vgl. Kapitel 4.2.1 oben bzw. Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017)).

In Freiburg-Haslach sind circa die Hälfte der NWG Handels-/Dienstleistungsgebäude sowie Praxisgebäude (s. Abbildung 4-3). Des Weiteren haben Gewerbe- und Industriegebäude einen hohen Anteil (27 %). Wohngebäude mit Mischnutzung (11 %) sind insbesondere im Stadtteilzentrum zu finden.

Abbildung 4-3: Nichtwohngebäude in Freiburg Haslach sowie deren prozentuale Anteile am gesamten Nichtwohngebäudebestand entsprechend der in dem Projekt "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050" entwickelten Typologie

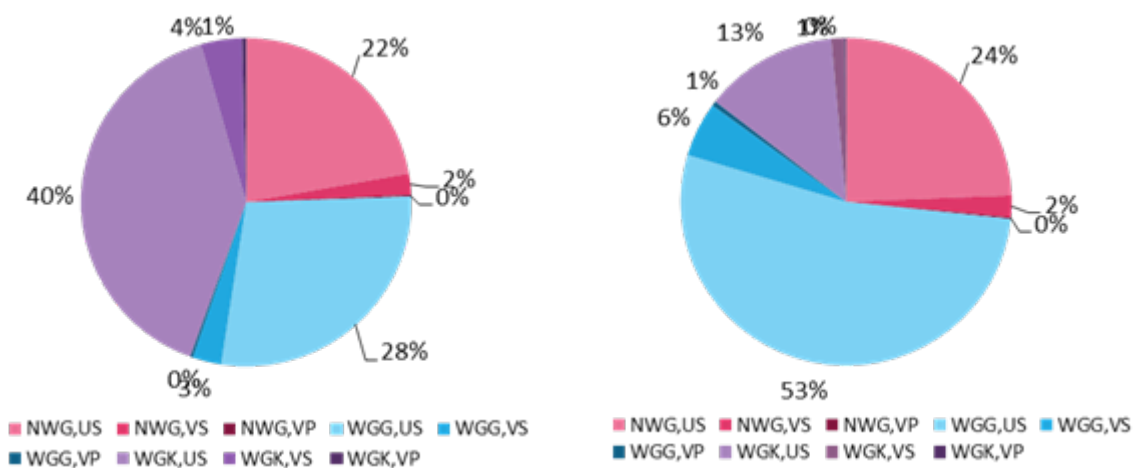


Quelle: Eigene Darstellung nach Herkel et al. (2015) und Bürger et al. (2017)

Für die Ausgangslage der Gebäudestruktur im Berechnungs-Tool ergibt sich die in Abbildung 4-4 gezeigte Verteilung der Gebäude samt ihrer Flächen aufgeteilt nach Gebäudekategorie und

Sanierungszustand. Die Verteilung auf die Sanierungszustände im Ausgangsjahr basiert dabei mangels quartierspezifischer Daten für Haslach auf dem auch in Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017) verwendeten deutschlandweiten Verteilschlüssel. Dabei sind 90 % der Gebäude unsaniert, 9 % im Zustand „vollsaniert“ und 1 % im Zustand „vollsaniert plus“. Die EZFH (WGK = kleine Wohngebäude) machen zahlenmäßig zwar knapp 45 % aller Gebäude aus, kommen flächenmäßig aber nur knapp auf 15 %. Für die MFH und GMH (WGG = große Wohngebäude) dreht sich das Bild entsprechend um.

Abbildung 4-4: Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für Haslach im IST Zustand



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; US = unsaniert; VS = „vollsaniert“; VP = „vollsaniert plus“)

4.3.2 Transformationspfade

Die zwei für das Quartier Haslach betrachteten Transformationspfade sind ein Energieeffizienz-Pfad einerseits und ein Erneuerbare-Energien-Pfad andererseits. Tabelle 4-7 gibt eine Übersicht über die im Berechnungs-Tool dafür gewählten Einstellungen.

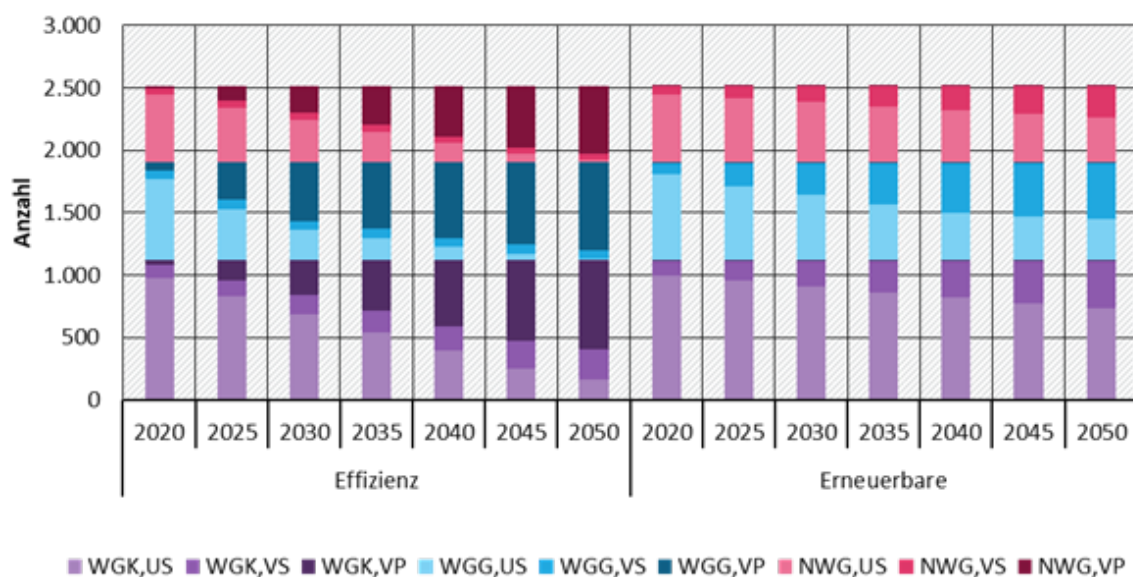
Tabelle 4-7: Transformationspfade für Haslach

	Energieeffizienz-Pfad	Erneuerbare-Energien-Pfad
Sanierungsrate	3 % pro Jahr	1 % pro Jahr
Sanierungstiefe	100% vollsaniert plus (Gartenstadt zu 50 % vollsaniert, Rest unsaniert)	100% vollsaniert (Gartenstadt zu 25 % vollsaniert, Rest unsaniert)
Wärmeversorgungsoption	Wärmepumpe + Solarthermie (Gartenstadt mit Fernwärmenetz)	Wärmepumpe + Solarthermie (Gartenstadt mit Fernwärmenetz)
PV-Zubaurate	3 % der für PV verfügbaren Dach- fläche pro Jahr	3 % der für PV verfügbaren Dach- fläche pro Jahr
Dämmmaterial	Konventionell (EPS)	Konventionell (EPS)

4.3.2.1 Entwicklung des Gebäudebestands

Die Entwicklung der Sanierungszustände der verschiedenen Gebäudekategorien ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass im Effizienzpfad die Gebäude zum einen mit höherer Rate saniert werden und zum anderen auch in den energetisch ambitionierteren Zustand „vollsaniert plus“ überführt werden. Im EE-Pfad wird hingegen sowohl weniger saniert als auch weniger ambitioniert saniert (auf Niveau „vollsaniert“).

Abbildung 4-5: Entwicklung der Sanierungszustände je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude

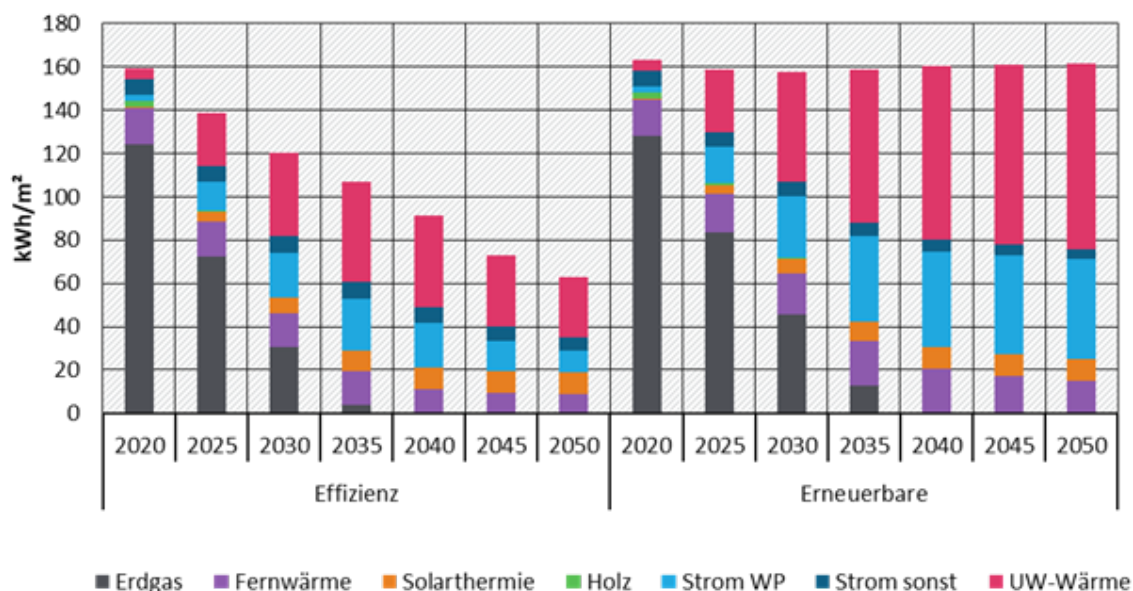


Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; US = unsaniert; VS = „vollsaniert“; VP = „vollsaniert plus“)

4.3.2.2 Endenergieverbrauch

Die folgende Abbildung 4-6 zeigt den Endenergieverbrauch (EEV) für die Wärmeversorgung pro Quadratmeter und Jahr im Vergleich zwischen dem Effizienz- und dem Erneuerbare-Energien-Pfad. Der sonstige Strom („Strom sonst“) enthält dabei auch den Stromverbrauch für Lüftung, Kühlung und Beleuchtung (Kühlung und Beleuchtung nur im Falle der Nichtwohngebäude). Haushaltsstrom, Gewerbestrom, Strom für Elektromobilität oder Straßenbeleuchtung sind in Abbildung 4-6 nicht enthalten. Es ist deutlich zu sehen, dass der EEV im Effizienz-Pfad infolge größerer Sanierungsanstrengungen stark zurück geht. Im EE-Pfad steigt der EEV hingegen sogar leicht an. Dies liegt (1) an der hinterlegten Effizienzsteigerung stromverbrauchenden Geräte im Gebäude, welche einen höheren Heizwärmebedarf der Gebäude bis 2050 verursacht (vgl. dazu auch Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017)), und (2) an der Tatsache, dass Wärmepumpen hier in zahlreichen unsanierten Gebäuden zum Einsatz kommen, wo sie weniger effizient arbeiten. Aufgrund der Voreinstellung zur Energieträgerverteilung (s.o.) dominiert über die Zeit in beiden Transformationspfaden die Wärmepumpe als Hauptenergieträger, mit Unterstützung durch Solarthermie. Aufgrund der gewählten Austauschrate für die Heizungstechnik (feste Lebensdauer von 20 Jahren, was einer Austauschrate von 5 % pro Jahr entspricht) sind bis 2040 alle Heizungsanlagen des Quartiers ausgetauscht worden. Klar erkennbar ist auch der Fernwärmesockel, welcher die Gartenstadt in beiden Pfaden mit Wärme versorgt.

Abbildung 4-6: Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Haslach pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m²a) dargestellt für die verschiedenen Energieträger

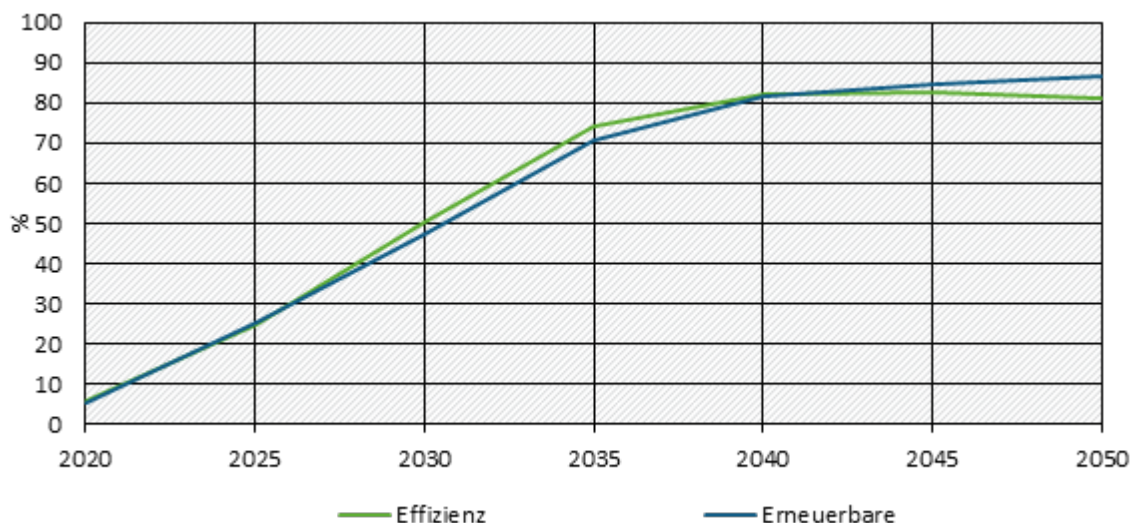


Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-7 zeigt den Anteil der im Quartier für die Wärmeversorgung bereitgestellten erneuerbaren Energien am gesamten Quartiers-Wärmeverbrauch. Dazu zählen die Umweltwärme und die Solarthermie. Der für den Betrieb der Wärmepumpen benötigte Strom

sowie der sonstige Stromverbrauch wird dabei nicht mitberücksichtigt. Da die Austauschrate der Heizungstechniken in beiden Transformationspfaden gleich ausgestaltet ist, ergeben sich hier keine großen Unterschiede zwischen den Pfaden. Ab 2040 ist der Anstieg weniger stark, da ab diesem Zeitpunkt keine fossilen Gaskessel mehr betrieben werden.

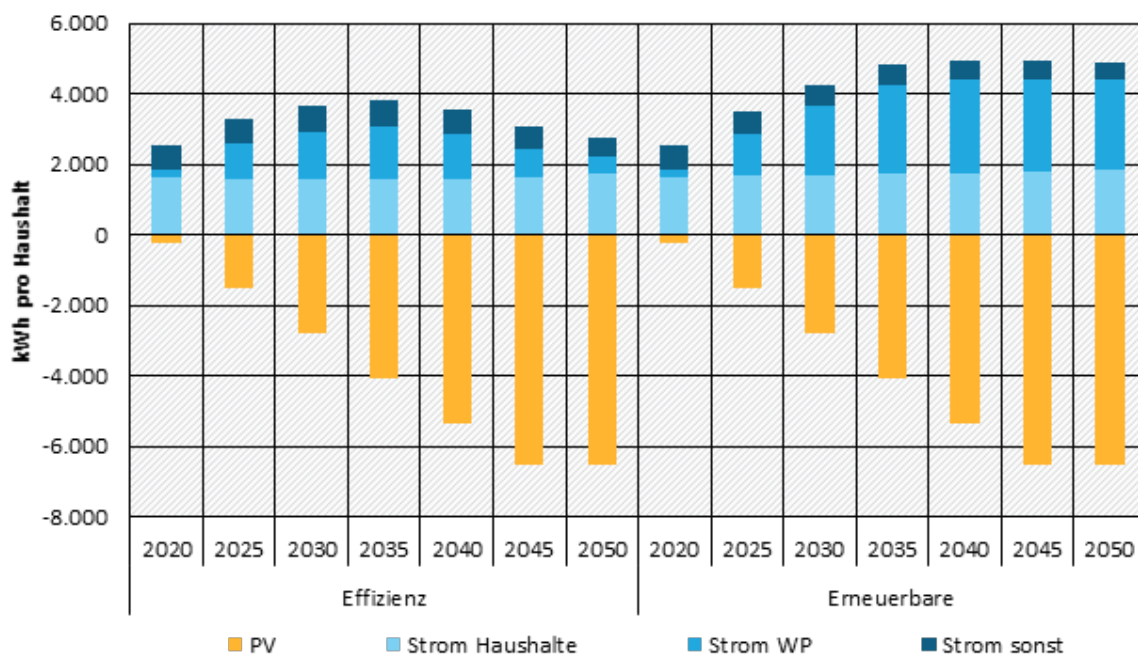
Abbildung 4-7: Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch in Haslach in %



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-8 zeigt den Verlauf des Stromverbrauchs bzw. der PV-Stromerzeugung je Haushalt bis 2050. Aufgrund der gleichen PV-Zubaurate ist der Verlauf der PV-Stromerzeugung in beiden Pfaden gleich. Deutliche Unterschiede gibt es hingegen beim Stromverbrauch. Im Effizienzpfad steigt dieser bis 2035 an und fällt danach merklich ab, so dass der Gesamtstromverbrauch pro Haushalt bei unter 3.000 kWh pro Jahr im Jahr 2050 liegt. Im EE-Pfad steigt er stärker und höher an bis ca. 2040 und bleibt danach auf hohem Niveau nahezu konstant bei knapp 5.000 kWh pro Jahr und Haushalt.

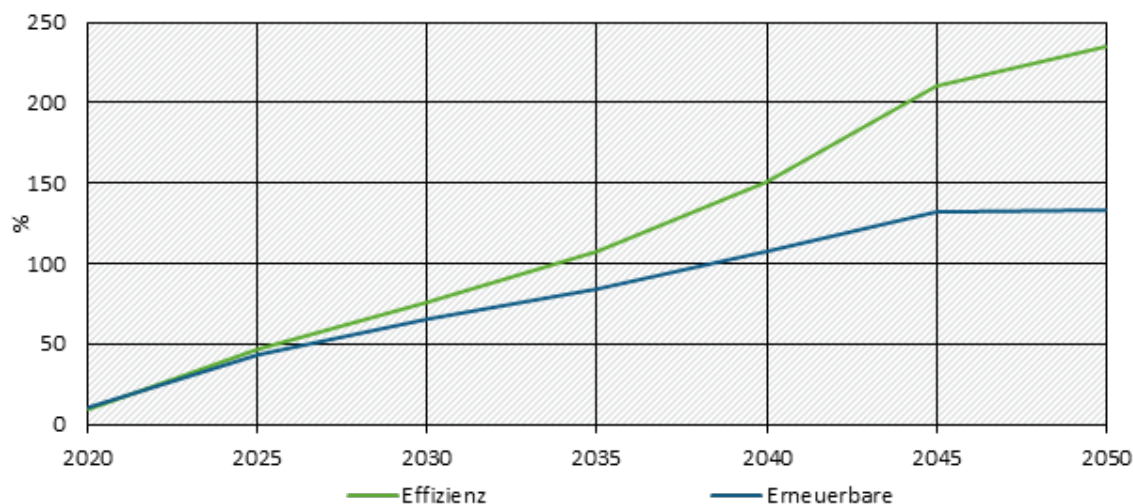
Abbildung 4-8: Stromverbrauch bzw. Stromerzeugung durch PV je Haushalt in Haslach



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Der Anteil des mit PV im Quartier bereitgestellten Stroms am Gesamtstromverbrauch von Haslach ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Der Gesamtstromverbrauch beinhaltet dabei den Haushaltsstrom sowie allen Strom, der mit der Gebäudekonditionierung in Verbindung steht. Im Effizienz-Pfad wird der Strombedarf des Quartiers ab der ersten Hälfte der 2030er Jahre zumindest bilanziell zu 100 % gedeckt und in der Folge vermehrt aus dem Quartier exportiert. Im EE-Pfad erfolgt die bilanzielle 100 %-Deckung erst am Ende der 2030er Jahre, was auf den erhöhten Stromverbrauch der Wärmepumpen in den weniger (gut) sanierten Gebäuden zurückzuführen ist.

Abbildung 4-9: Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf in Haslach in % (Effizienz-Pfad grün; EE-Pfad blau)

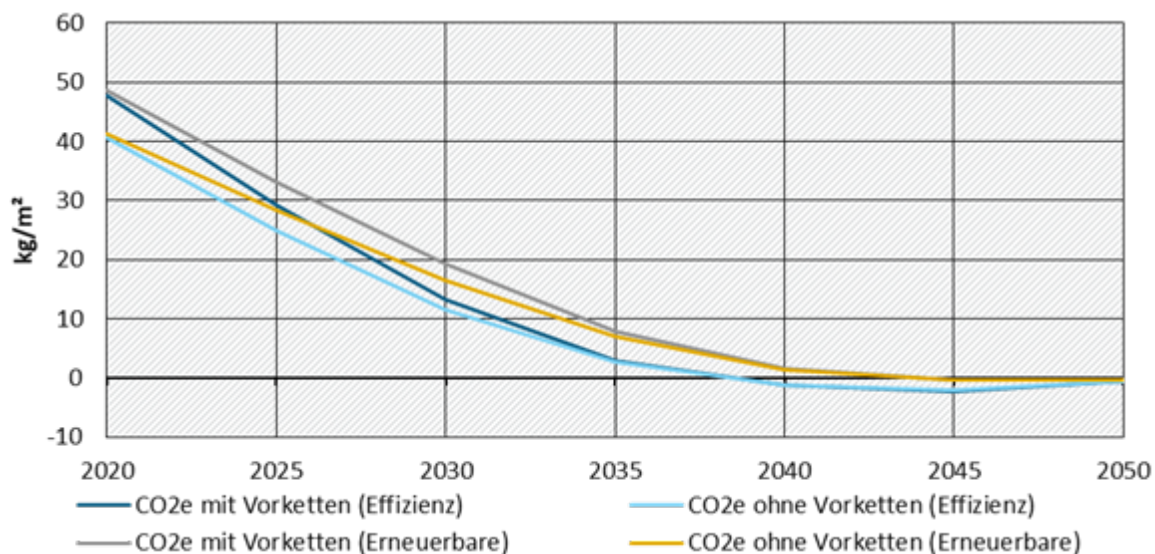


Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

4.3.2.3 CO₂-Emissionen (Nutzungsphase)

Die folgende Abbildung 4-10 zeigt die CO₂-Emissionen pro Quadratmeter und Jahr im Vergleich zwischen dem Effizienz- und dem Erneuerbare-Energien-Pfad. Im Effizienzpfad sinken die Emissionen zunächst stärker und gegen 2050 hin immer weniger. Dies ist auf die größeren Effizienzgewinne am Anfang des Transformationszeitraums zurückzuführen, da zunächst die Gebäude mit den höchsten spezifischen Energieverbräuchen saniert werden. Im EE-Pfad sinken die CO₂-Emissionen ebenfalls kontinuierlich ab, allerdings geschieht der stärkere Abfall im Gegensatz zum Effizienz-Pfad in der zweiten Dekade des Transformationspfads. Dies ist vor allem auf den dann stärker sinkenden CO₂-Emissionsfaktor für Strom zurückzuführen (Kohleausstieg, vgl. Tabelle A3-5 im Anhang). Auch sinken die Emissionen in der ersten Dekade nicht so stark, da im EE-Pfad weniger saniert wird und auch unsanierte Gebäude z.T. schon mit elektrischen Wärmepumpen beheizt werden. Beide Transformationspfade erreichen Nullemissionen im Jahr 2050, wobei der Effizienzpfad sogar leicht negative Emissionen erzeugt.

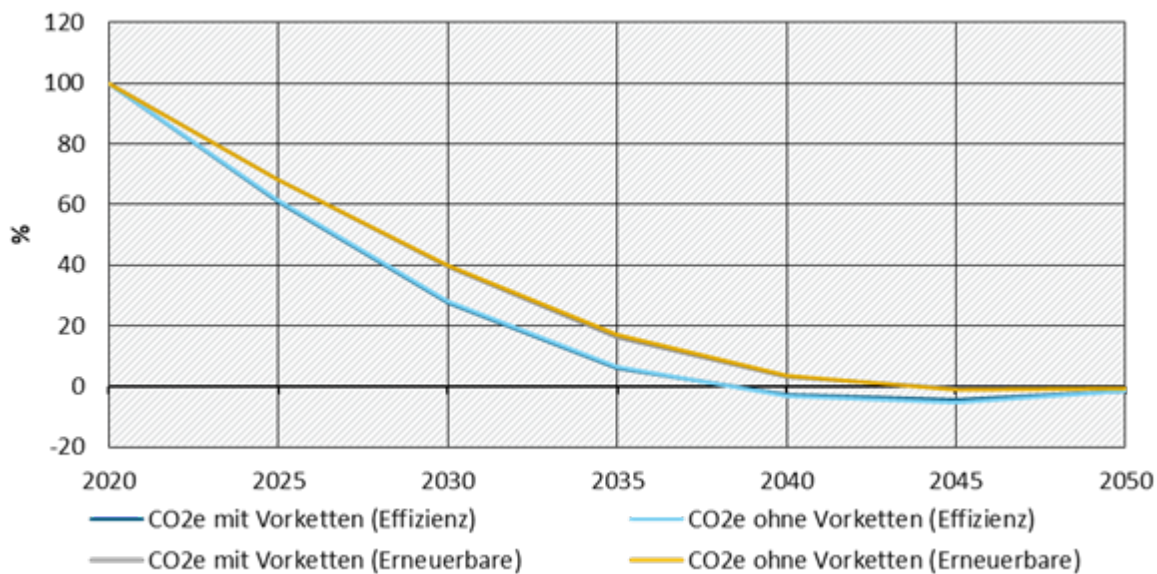
Abbildung 4-10: CO₂e-Emissionen des Quartiers pro Fläche (kg/(a*m²)) für Effizienz- und Erneuerbare-Energien-Pfad



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Der prozentuale Rückgang der CO₂e-Emissionen des Quartiers entlang der Transformationspfade ist in Abbildung 4-11 dargestellt. Beide Pfade erreichen im Jahr 2050 eine Reduktion um 100 % (EE) oder mehr (EFF) gegenüber dem Startjahr.

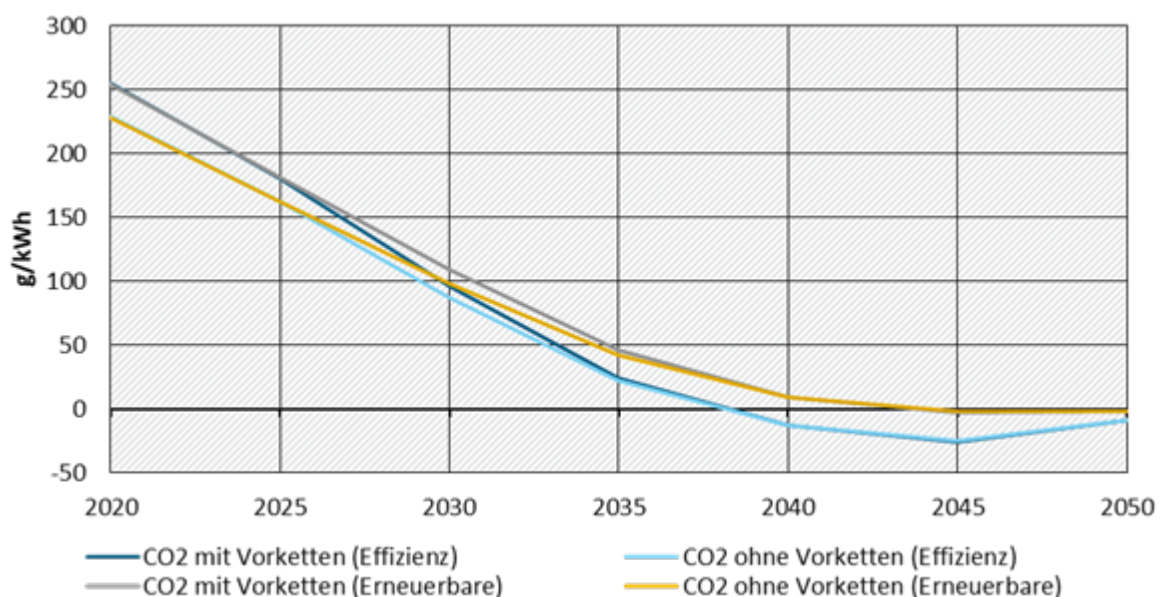
Abbildung 4-11: Verlauf der CO₂e-Emissionen prozentual gegenüber dem Startjahr für den Effizienz- und Erneuerbare-Energien-Pfad



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-12 zeigt den mittleren Emissionsfaktor des gesamten Quartiers für den kombinierten Wärme- und Stromverbrauch in g CO₂/kWh im Vergleich zwischen dem Effizienz- und dem Erneuerbare-Energien-Pfad (EE-Pfad). In beiden Pfaden geht der Emissionsfaktor über die Jahre zurück, bedingt durch die kontinuierliche Sanierungsaktivität sowie die Verbesserung des Emissionsfaktors für ins Quartier „importierten“ Strom (siehe Anhang Tabelle A3-5) und gleichzeitigem PV-Zubau innerhalb des Quartiers. Im EE-Pfad sinkt der mittlere Emissionsfaktor weniger stark ab als im Effizienzpfad, da hier ein höherer Wärmebedarf gedeckt werden muss. Da dies hauptsächlich mittels Wärmepumpen in weniger gut sanierten Gebäuden geschieht, wird auch weniger Überschussstrom aus dem Quartier ins Quartiers-externe Stromnetz eingespeist.

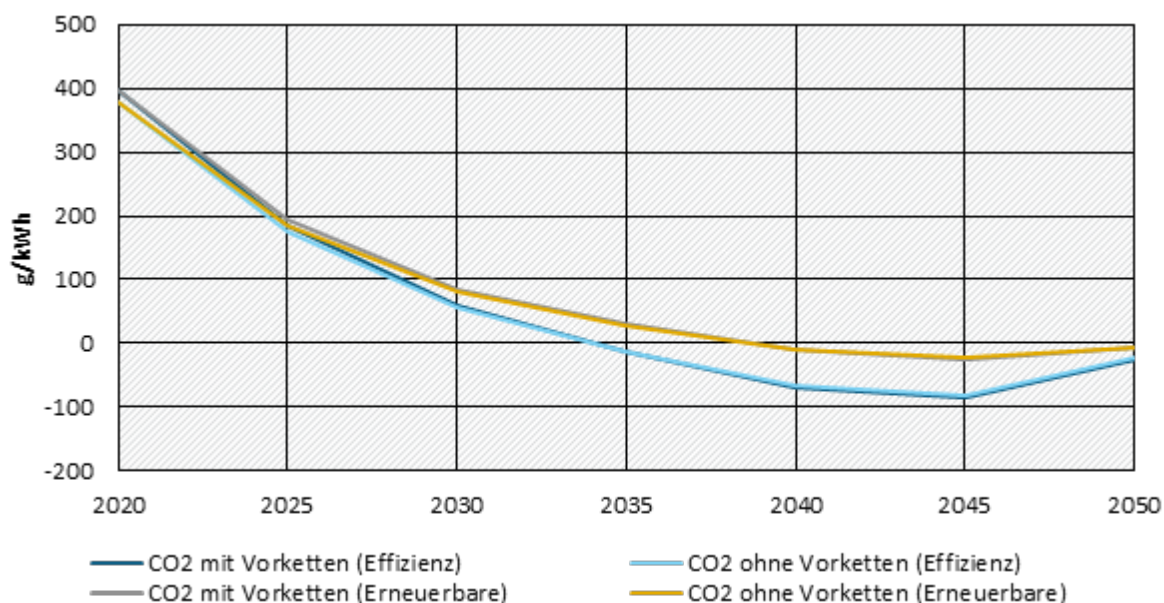
Abbildung 4-12: Mittlerer Emissionsfaktor des gesamten Endenergieverbrauchs in Haslach für den Effizienz- und Erneuerbare-Energien-Pfad



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

In Abbildung 4-13 ist schließlich der Emissionsfaktor des Stromverbrauchs in Haslach dargestellt. Dieser sinkt vor allem im Effizienz-Pfad deutlich und erreicht schon in der ersten Hälfte der 2030er Jahre Werte von unter null, wohingegen der EE-Pfad dies erst kurz vor 2040 schafft. Die hohen PV-Zubauraten bewirken in beiden Transformationspfaden eine bilanzielle Überdeckung des Strombedarfs im Quartier. Aufgrund des höheren Strombedarfs im EE-Pfad durch Wärmepumpen in weniger gut sanierten Gebäuden fällt im EE-Pfad die Überdeckung niedriger aus. Die Tatsache, dass der Emissionsfaktor zwischen 2045 und 2050 wieder leicht ansteigt, ist der weiteren Verbesserung des Quartiers-externen Stromemissionsfaktors geschuldet: eine im Quartier eingespeiste kWh Strom verdrängt dann nur noch Strom, der auch schon stark dekarbonisiert ist.

Abbildung 4-13: Mittlerer Emissionsfaktor des Stromverbrauchs in Haslach



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

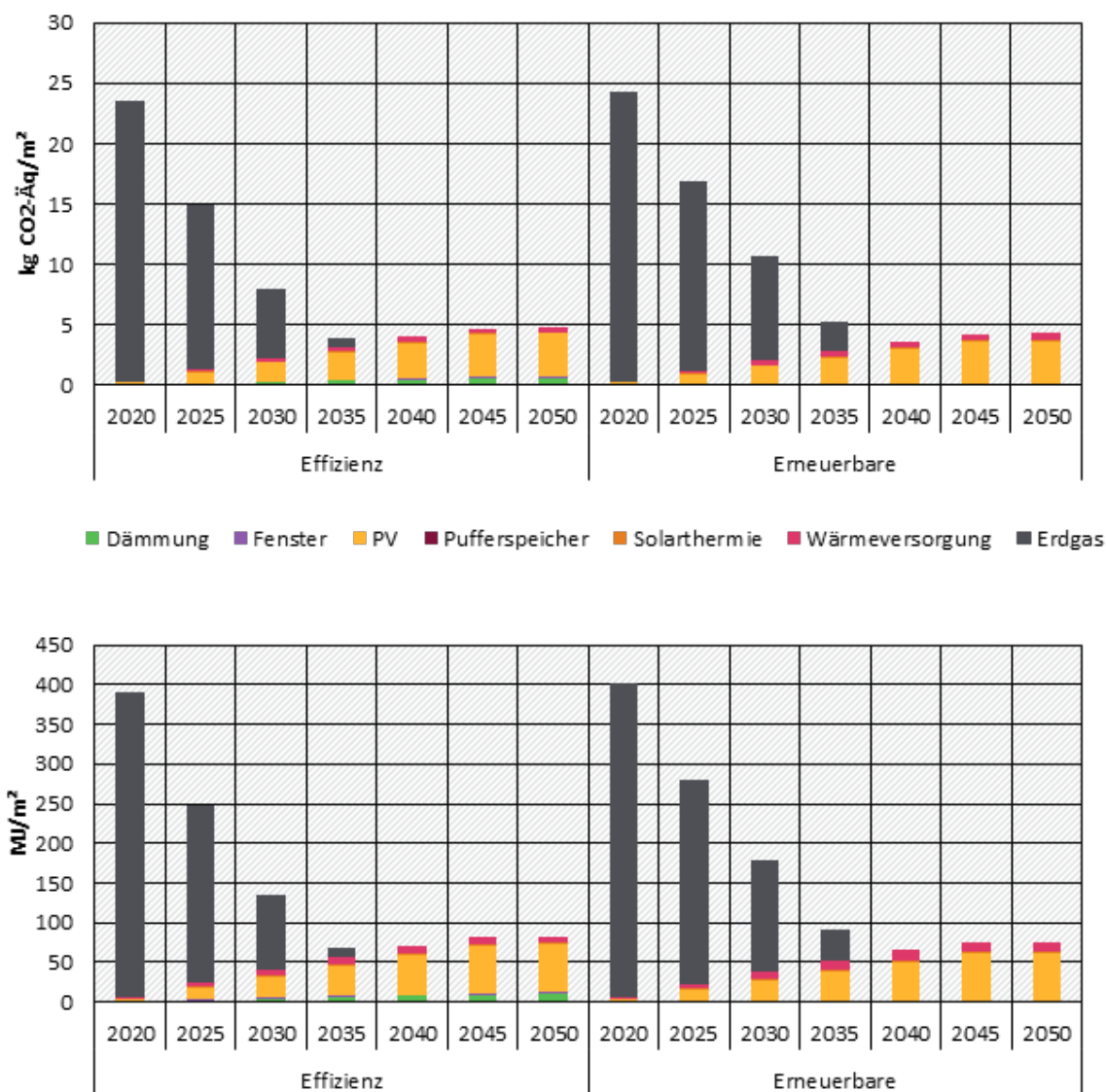
4.3.2.4 Umweltwirkungen

Abbildung 4-14 bis Abbildung 4-22 zeigen die Ergebnisse der Umweltwirkungsabschätzung (Environmental Impact Assessment) für die Transformationspfade im Quartier Haslach über den Betrachtungszeitraum. Während sich die Darstellung in Abbildung 4-14 bis Abbildung 4-16 auf Einzeljahre bezieht, sind die Werte in Abbildung 4-17 bis Abbildung 4-22 jeweils aufsummiert über fünf Jahre. Jeweils links sind die Werte für den Effizienzpfad (EFF), rechts die Werte für den Erneuerbare-Energien-Pfad (EE) aufgeführt. Aufgrund der Verschiebung in der Wärmeversorgung in Richtung Wärmepumpen, wie in Kapitel 4.3.2.2 beschrieben, sinken die Wirkungen aus der Wärmeversorgung in den ersten 20 Jahren und steigen dann ab 2040 sogar wieder leicht an.

Abbildung 4-14 bis Abbildung 4-16 zeigen die Ergebnisse der Umweltwirkungsabschätzung aus der Nutzungs- und der Herstellungsphase pro m² Bruttogeschossfläche (links EFF, rechts EE). Die Umweltwirkungen der Herstellungsphase werden über die jeweilige Nutzungsdauer des Bauteils gleichmäßig verteilt ("annuisiert") und können damit in Relation zur Nutzungsphase gesetzt werden. Aufgrund der Wärmeversorgung mit Erdgas werden die Ergebnisse vor allem beim GWP, PE und ADPE in den Anfangsjahren stark dominiert von der Nutzungsphase, im Lauf der Jahre geht der Anteil der Nutzungsphase dann aber sehr deutlich zurück. Auch macht sich die geringere Sanierungsrate im EE-Pfad bemerkbar: die Auswirkungen der Erdgasverbrennung sind bis 2035 in allen Wirkungskategorien höher als im Effizienz-Pfad. Beim POCP zeigt sich mit den Jahren ein starker Einfluss der EPS-Dämmung und bei den Kategorien AP und EP dominiert der Ausbau der PV-Anlagen schon recht früh über die Nutzungsphase. In den Grafiken wird nicht dargestellt, welchen Einfluss der im Quartier erzeugte PV-Strom in Form einer Gutschrift für das Quartier durch vermiedenen Bezug von Netzstrom auf die Wirkungskategorien hat. Hier kann

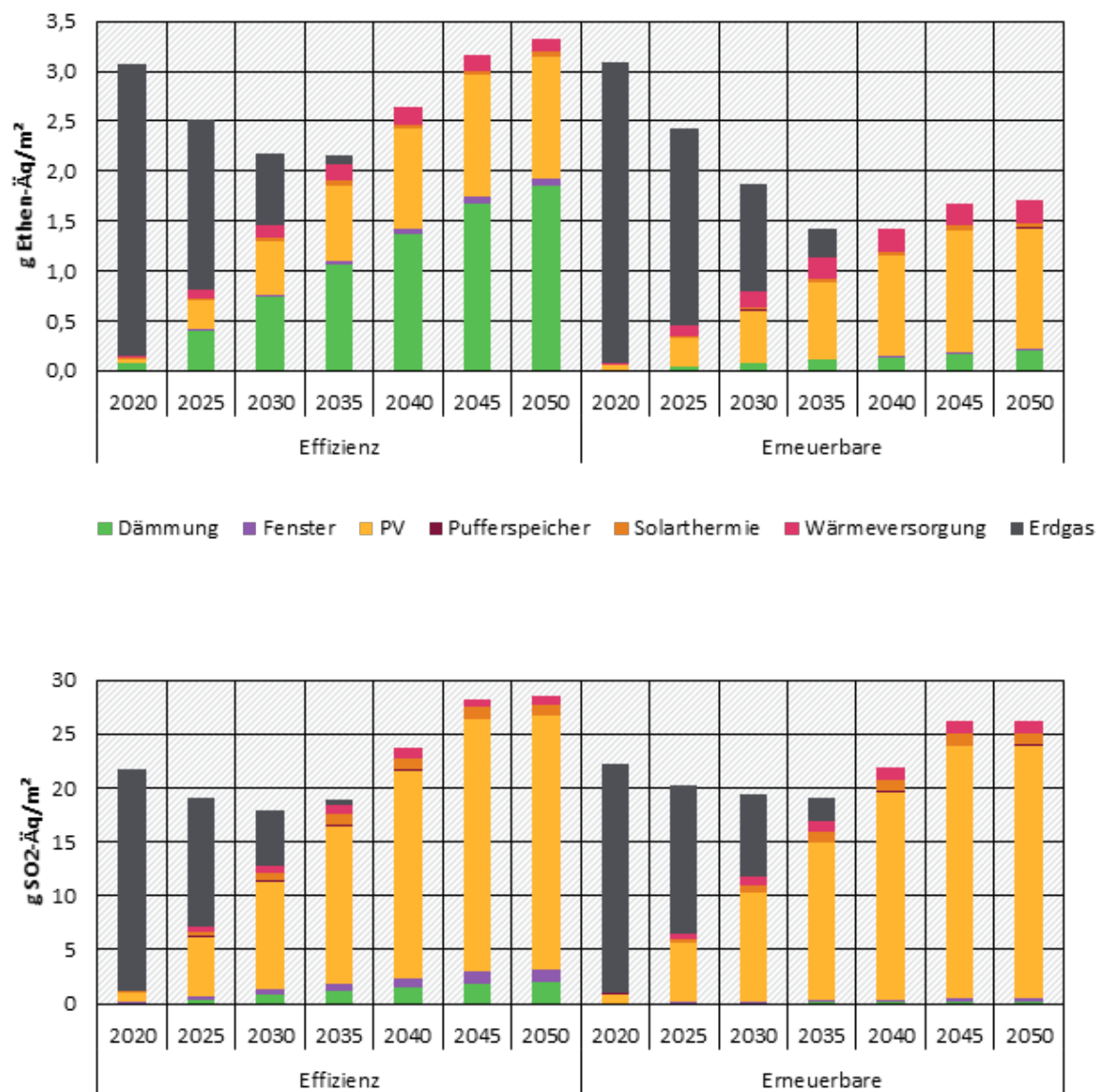
zumindest beim GWP überschlägig abgeschätzt werden, dass die Entlastung des GWP durch Erzeugung von PV-Strom im Quartier das GWP aus der Herstellungsphase der PV-Module um das Sechsfache übertrifft (bezogen auf die heute vorliegende GWP-Intensität der Modulherstellung und den heute verdrängten Strommix).

Abbildung 4-14: GWP & PE pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben GWP; unten PE



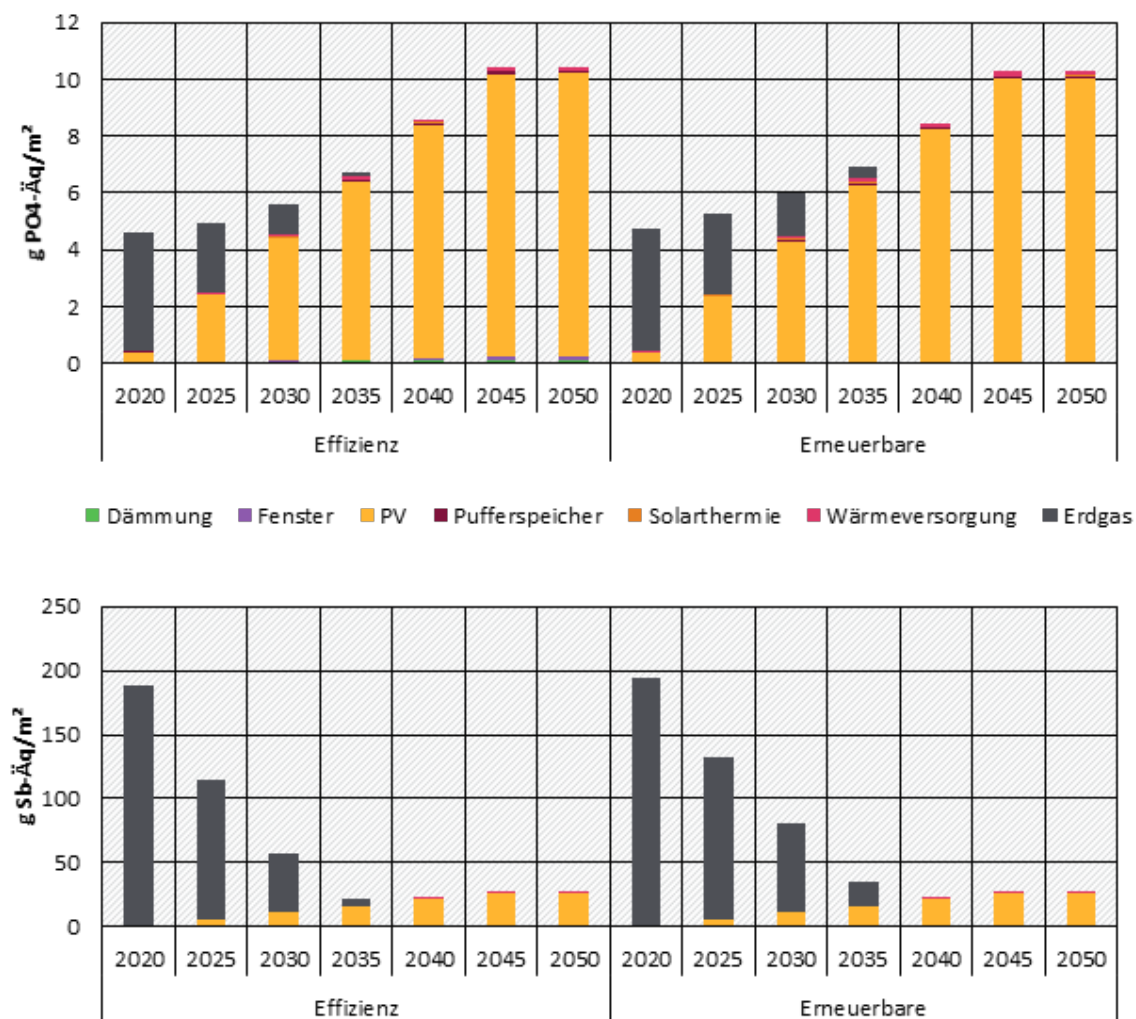
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-15: POCP in g Ethen-Äq & AP in g SO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben POCP; unten AP



Quelle: Eigene Berechnungen

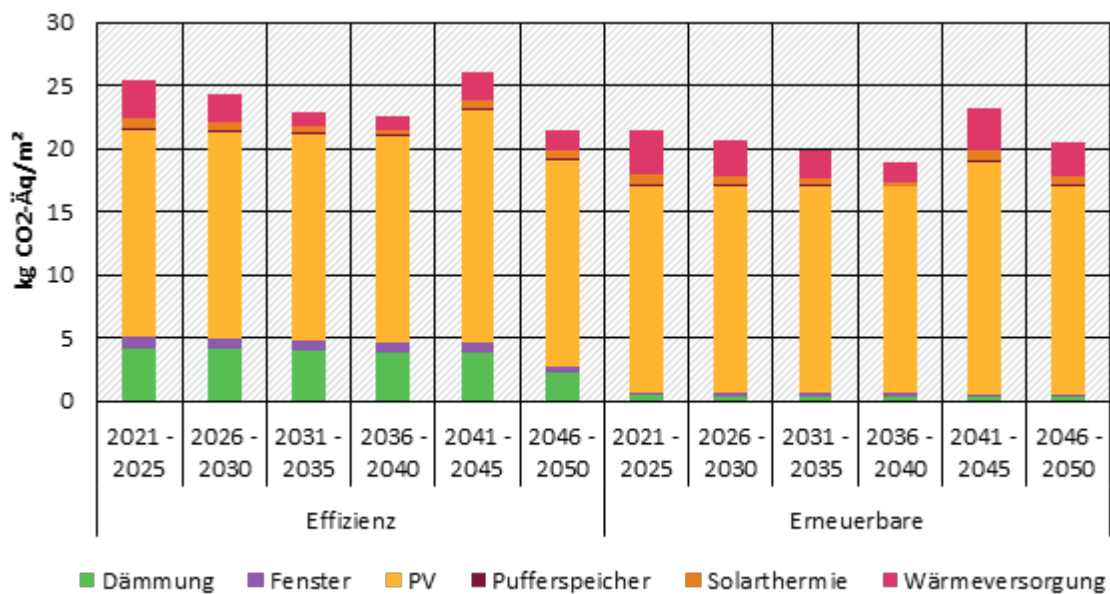
Abbildung 4-16: EP in g PO4-Äq & ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben EP; unten ADPE



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-17 bis Abbildung 4-22 zeigen die Ergebnisse der für die Transformationspfade im Quartier Haslach aus der Herstellungsphase im Jahr des Einbaus der Bauteile, aggregiert in 5-Jahres-Zeiträumen.

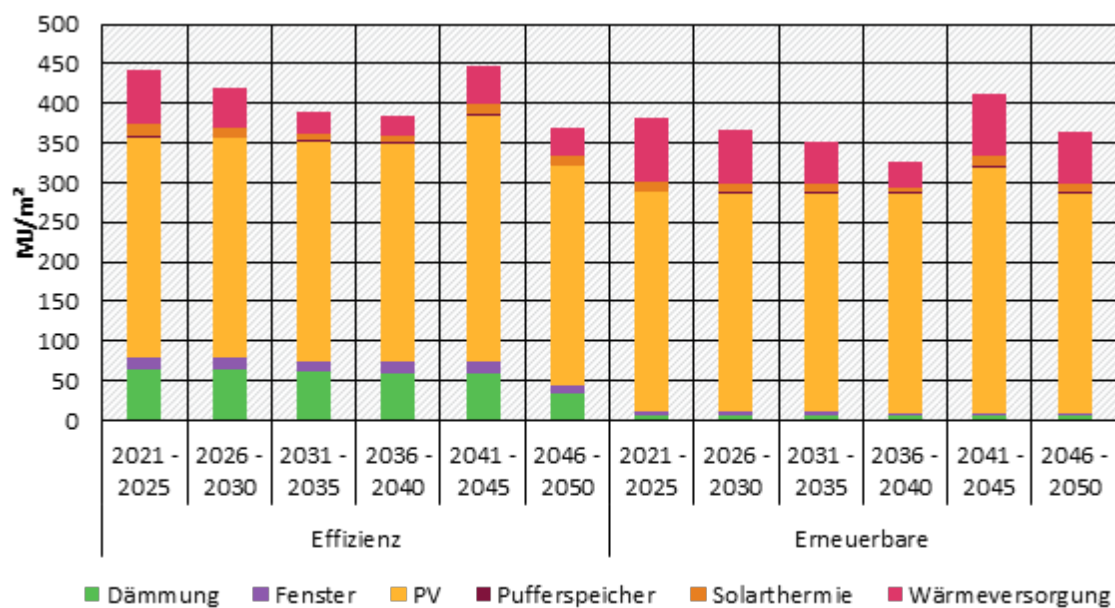
Abbildung 4-17 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EFF, rechts EE). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (ca. 80 %), der jeweils identisch angesetzt ist. An zweiter Stelle steht im EE-Pfad die Wärmetechnik (ca. 12 - 16 %), im EFF-Pfad die Dämmung (ca. 13 - 17 %). Auch die Treibhausgasemissionen sind in den Anfangsjahren im EFF-Pfad signifikant höher (19 % höher als im EE-Pfad), gleichen sich aber im Lauf der Zeit aneinander an.

Abbildung 4-17: GWP in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-18 zeigt die Ergebnisse für den Verbrauch an Primärenergie (Summe aus PERE und PENRE) in MJ pro m² Bruttogeschossfläche (links EFF, rechts EE). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (ca. 75 %), der jeweils identisch angesetzt ist. An zweiter Stelle steht im EE-Pfad die Wärmetechnik (ca. 15 – 20 %), im EFF-Pfad die Dämmung (ca. 10 – 15 %). In den Anfangsjahren weist der EFF-Pfad einen höheren Impact auf (16 % höher als der EE-Pfad), im Lauf der Zeit gleichen sich die Szenarien aneinander an.

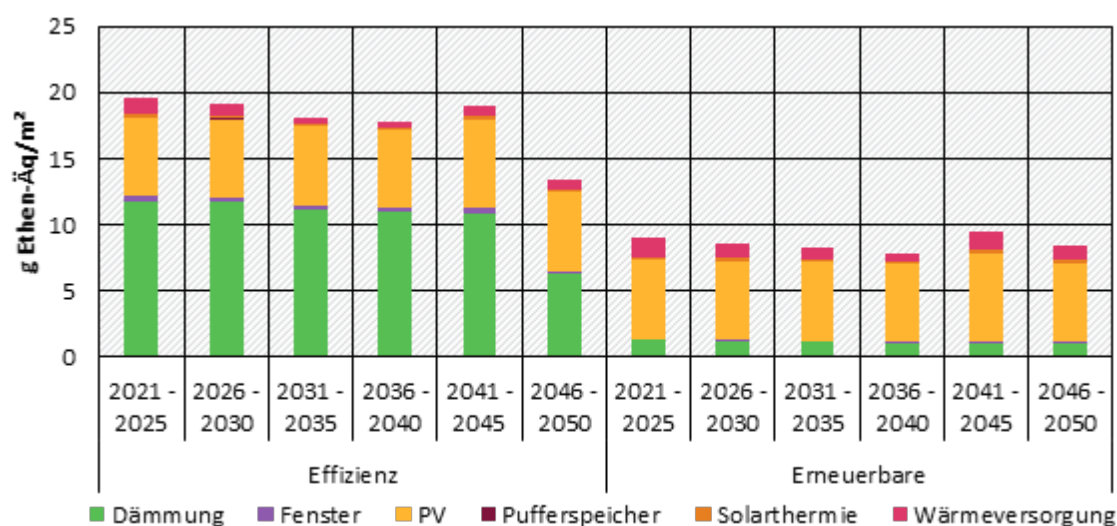
Abbildung 4-18: Primärenergie (PE) in MJ pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-19 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Photooxidantien in kg Ethen-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EFF, rechts EE). Während im EE-Pfad der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen dominiert (ca. 60 %), dominiert im EFF-Pfad die Dämmung (in den Anfangsjahren ca. 60 %). Die Differenz zwischen EFF- und EE-Pfad ist beim POCP wesentlich größer als bei den anderen Umweltwirkungen (POCP im EFF-Pfad bis 2040 mehr als doppelt so hoch wie im EE-Pfad, 2046 - 2050 noch ca. 50 % höher).

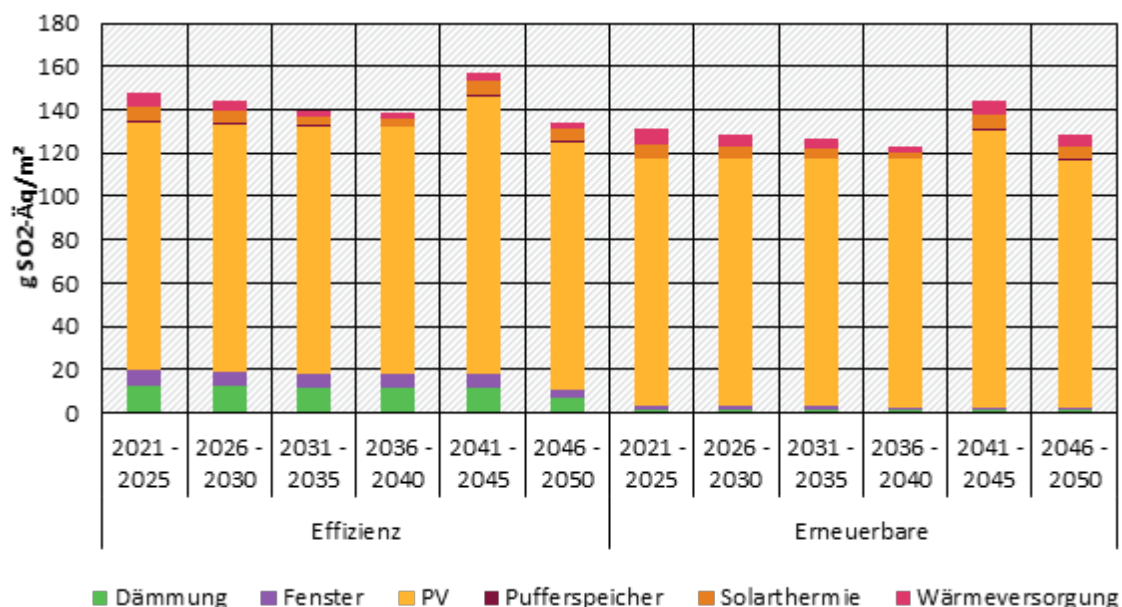
Abbildung 4-19: POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-20 zeigt die Ergebnisse für das Versauerungspotenzial in kg SO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EFF, rechts EE). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (ca. 80 – 90 %), der jeweils identisch angesetzt ist. In den Anfangsjahren weist der EFF-Pfad einen höheren Impact auf (13 % höher als der EE-Pfad), im Lauf der Zeit gleichen sich die Szenarien aneinander an.

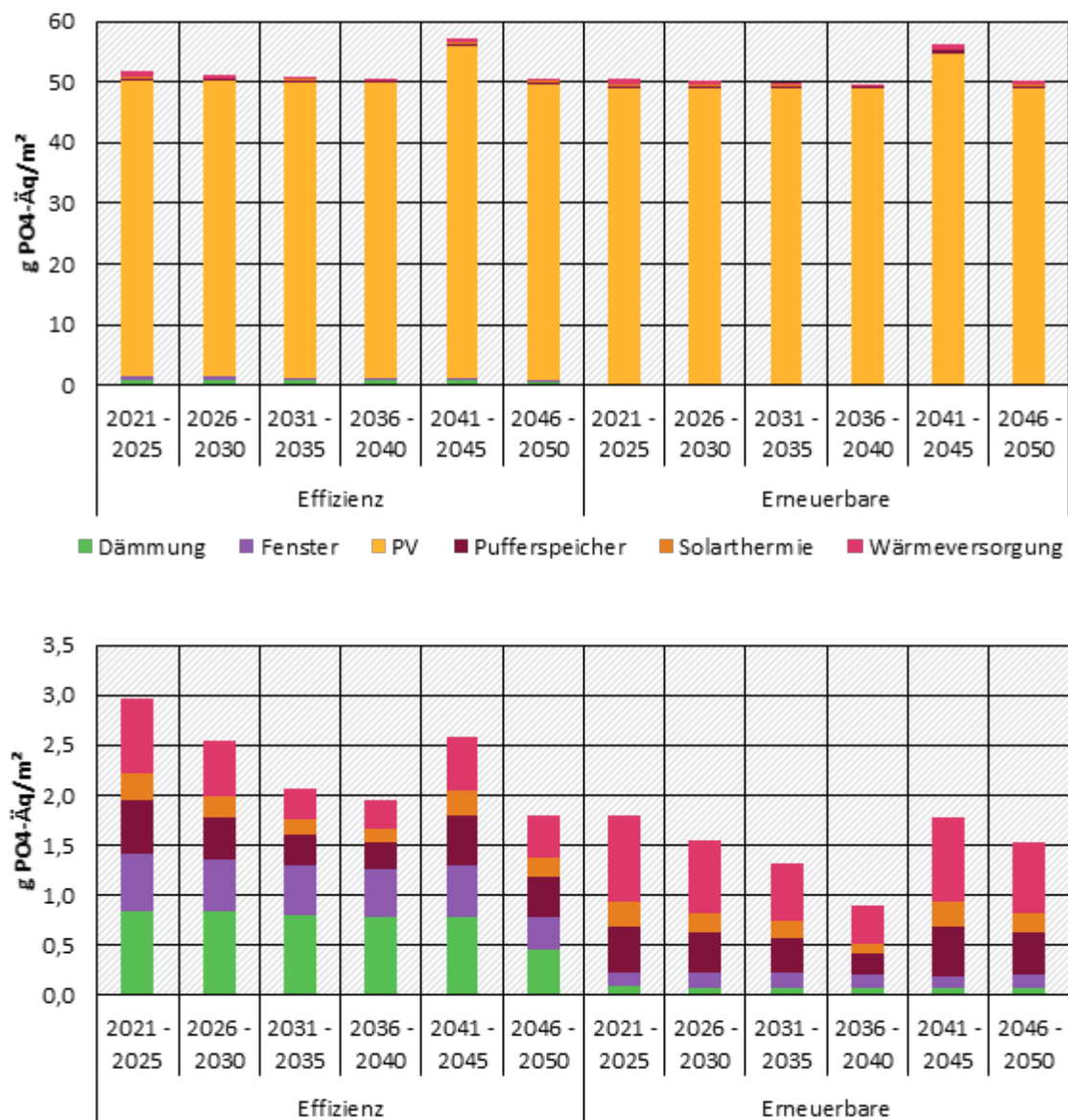
Abbildung 4-20: AP in g SO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-21 zeigt die Ergebnisse für das Eutrophierungspotenzial in kg PO₄-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EFF, rechts EE), die beiden oberen Grafiken zeigen die Ergebnisse inklusive Photovoltaik, die beiden unteren die Ergebnisse ohne die Photovoltaik. In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (ca. 94 – 98 %), der jeweils identisch angesetzt ist. Da die Photovoltaik die Ergebnisse sehr stark dominiert, sind zum Vergleich auch die Ergebnisse ohne PV aufgeführt, um zu zeigen, dass das EP im EFF-Pfad durch die Dämmung und die Fenster etwas höher liegen. Insgesamt (inkl. PV) unterscheiden sich jeweils die beiden Pfade beim Eutrophierungspotenzial über den Betrachtungszeitraum aber kaum.

Abbildung 4-21: EP in g PO4-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben inkl. PV; unten exkl. PV



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-22 zeigt die Ergebnisse für den Verbrauch abiotischer Ressourcen in kg Sb-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EFF, rechts EE), die beiden oberen Grafiken zeigen die Ergebnisse inklusive Photovoltaik, die beiden unteren die Ergebnisse ohne die Photovoltaik. Beim ADPE dominiert der Ausbau der PV-Anlagen noch stärker (ca. 99,9 %). Die beiden unteren Grafiken zeigen die Unterschiede der anderen Beiträge, die aber im

Gesamtergebnis keine Rolle spielen. Insgesamt unterscheiden sich jeweils die beiden Pfade beim ADPE über den Betrachtungszeitraum kaum.

Abbildung 4-22: ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche; links EFF; rechts EE; oben inkl. PV; unten exkl. PV



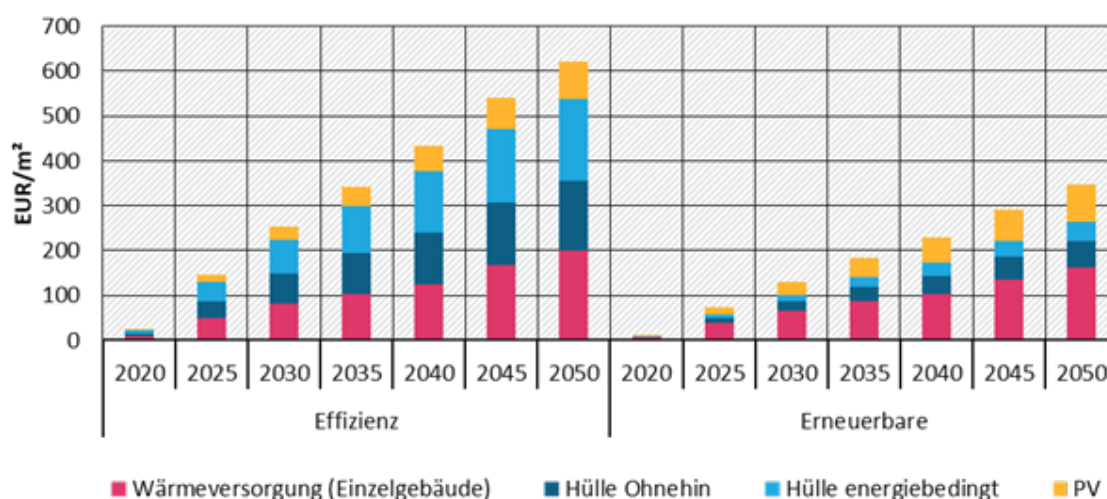
Quelle: Eigene Berechnungen

4.3.2.5 Kosten

Abbildung 4-23 zeigt die kumulierten Investitionskosten (in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche des Quartiers) in Fünf-Jahres-Schritten bis 2050. Sie sind aufgeteilt nach den Investitionskosten für die energetische Gebäudesanierung der Hülle (Ohnehinkosten und

energiebedingte Mehrkosten), Investitionskosten für den Austausch der Heizungstechnik sowie die zugebaute Dach-PV-Anlagen. Im Effizienzpfad steigen die kumulierten Investitionskosten insgesamt kontinuierlich an, insbesondere die Investitionskosten für die Sanierung der Gebäudehülle schlagen hier zu Buche. Im EE-Pfad steigen die kumulierten Investitionskosten hingegen nur um rund die Hälfte an – hier sind die Kosten für die Heizungstechniken der Haupttreiber.

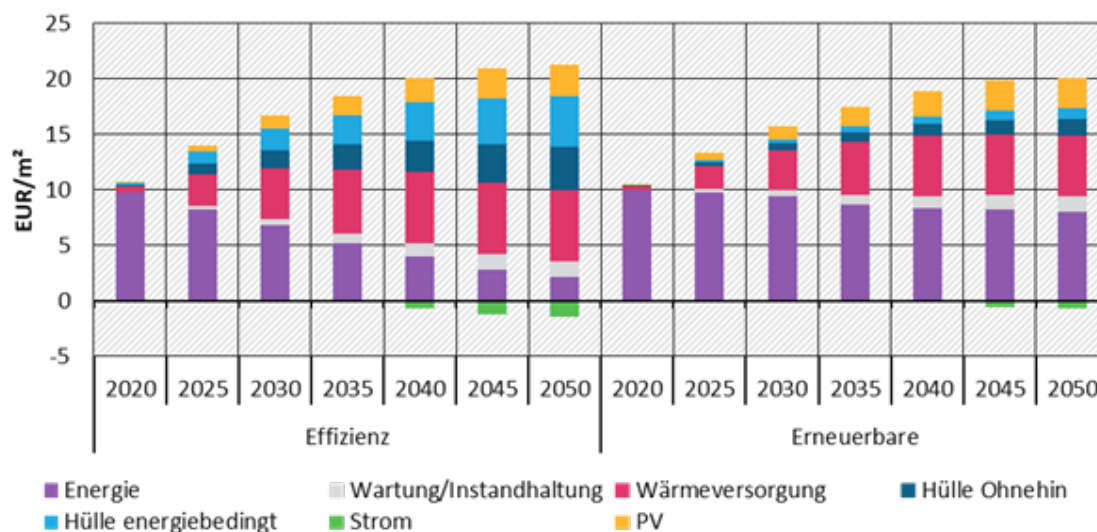
Abbildung 4-23: Kumulierte Investitionskosten in EUR Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad)



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-24 stellt die Annuitäten der Investitionskosten sowie die jährlichen laufenden Kosten für Wärmeenergie, Strom sowie Wartung/Instandhaltung (jeweils in EUR/m²) dar. Die laufenden (Wärme-) Energiekosten nehmen in beiden Pfaden ab, die Wartungs- und Instandhaltungskosten steigen dafür an. Im Effizienzpfad sind insbesondere die Wärmekosten stark rückläufig, was auf die höhere und tiefere Sanierungstätigkeit zurückzuführen ist. Betriebs- und annuisierte Investitionskosten zusammengekommen (inkl. der Vergütung durch PV-Einspeisung) liegen im Jahr 2035 im Effizienz-Pfad mit 16,5 EUR/m² im Jahr über denen des EE-Pfads mit 15,7 EUR/m². Im Jahr 2050 ist dieser Unterschied mit 17,5 EUR/m² (Effizienz-Pfad) bzw. 17,3 EUR/m² (EE-Pfad) nahezu verschwunden.

Abbildung 4-24: Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (links: Effizienzpfad, rechts Erneuerbare-Energien-Pfad)



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

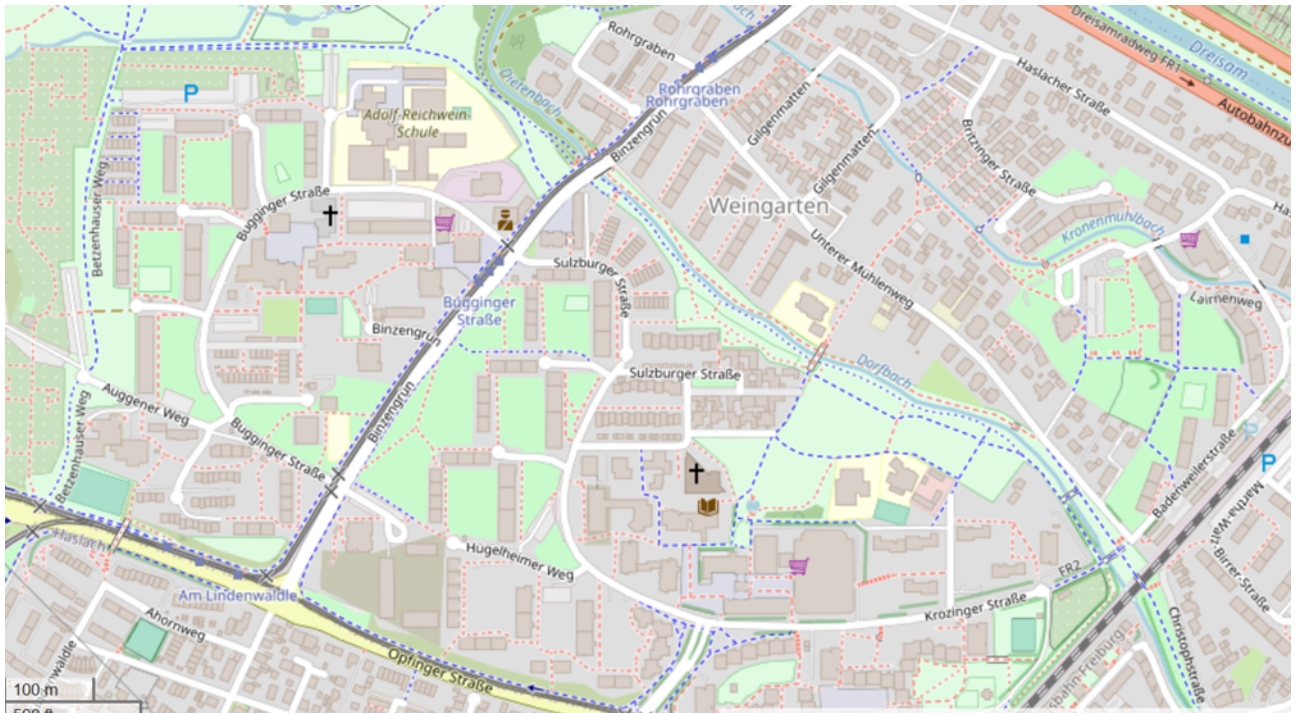
4.4 Freiburg – Weingarten-West

4.4.1 Ausgangslage/Quartiersbeschreibung

Das Gebiet Weingarten-West (Abbildung 4-25) befindet sich im Freiburger Stadtteil Weingarten und ist 2006 in das Programm Soziale Stadt aufgenommen worden. Der Stadtteil Weingarten entstand in den 1960er Jahren und weist eine sehr homogene Baustruktur auf. Er grenzt an die Stadtteile Haslach, St. Georgen (punktuell im Bereich des Gewerbegebiets Haid, das sich in den Stadtteilen Haslach und St. Georgen befindet), Rieselfeld, Betzenhausen und punktuell an den Stadtteil Stühlinger. Die Gesamtfläche des Sanierungsgebietes umfasst 184.000 m² (Wohn- und Nutzfläche; vgl. Bräu et al. (2014)²⁹ und die im Rahmen des Projektes erstellten Gebäudelisten). Nach Stadt Freiburg (2017) hat der Stadtteil einen hohen Anteil an Menschen mit Migrationshintergrund und Personen, die Transferleistungen empfangen. Das Gebiet Weingarten-West hat circa 5.000 Einwohnerinnen und Einwohner (s. Stadt Freiburg (2015)).

29 Das im Rahmen des Forschungsprojektes betrachtete Gebiet ist etwas größer als das von der Stadt Freiburg auf der städtischen Homepage dargestellte Sanierungsgebiet Weingarten-West. Für die Arbeiten im Rahmen dieses Projektes wurde das im Rahmen von Voruntersuchungen definierte Gebiet zu Grunde gelegt (s. Stadt Freiburg & Rüdiger Kunst - KommunalKonzept GmbH (2007)), weshalb die gesamte Wohn- und Nutzfläche niedriger ist als in Bräu et al. (2014) angegeben.

Abbildung 4-25: Lage des Stadtteils Weingarten-West



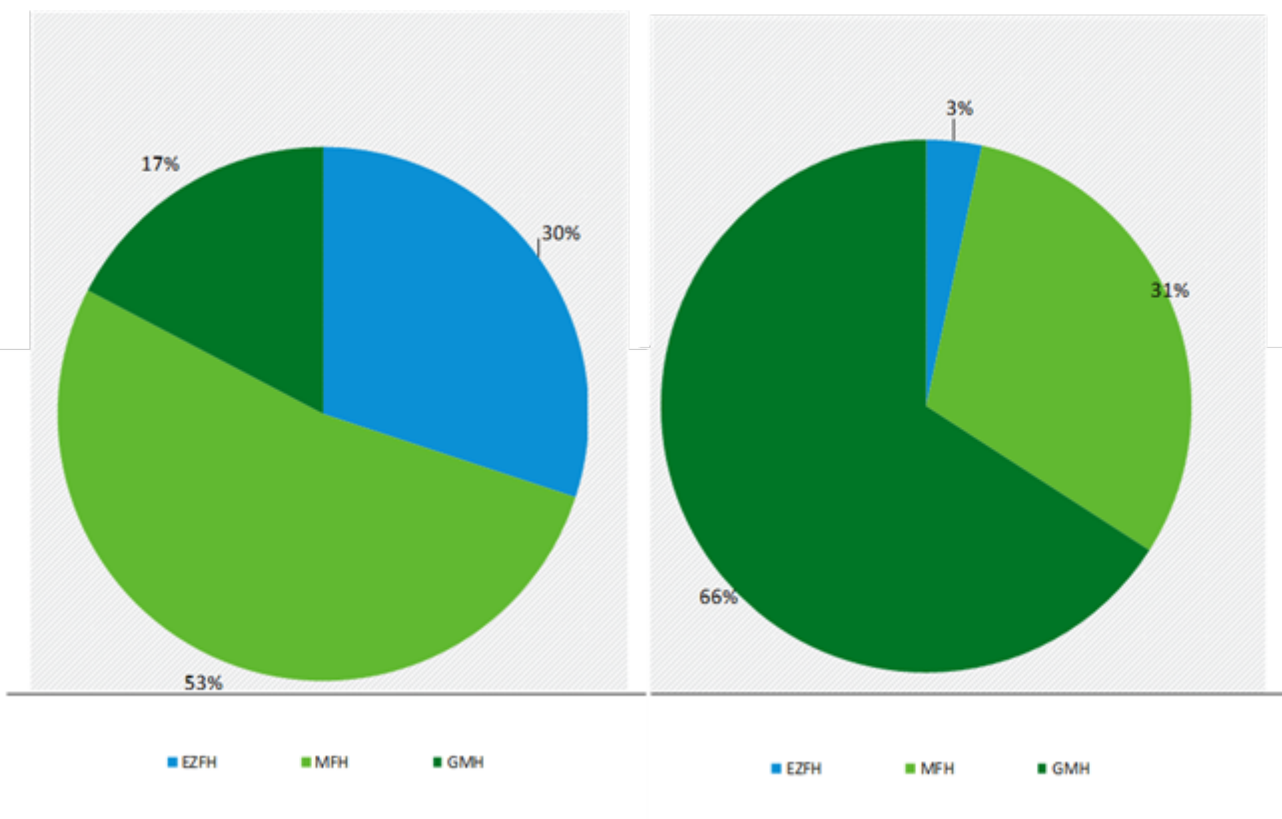
Quelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende (CC BY-SA 2.0)

Neben dem hohen Anteil an Wohngebäuden (v.a. große Mehrfamilienhäuser) befinden sich einige Nichtwohngebäude (insbesondere Handel, aber auch eine Hochschule sowie weitere Bildungseinrichtungen und Pflegeheime) in dem Gebiet. Die Wohngebäude befinden sich zu einem großen Teil im Besitz von Wohnungsunternehmen (privat, städtisch) und nur circa 5 % befinden sich in Privatbesitz (s. Stadt Freiburg (2015)).

Die Analyse des Gebäudebestands in dem Gebiet basiert auf den Ergebnissen des Projektes „Weingarten 2020 – Forschungs- und Demonstrationsvorhaben im Rahmen des Förderprogramms EnEff-Stadt des BMWi“ (Bräu et al. (2014)). Mehrfamilienhäuser und Große Mehrfamilienhäuser haben bezogen auf die Anzahl der Gebäude einen Anteil von 53 % respektive 17 % in dem Gebiet. Bezogen auf die Wohnfläche dominieren die großen Mehrfamiliengebäude (66 %) und Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) spielen mit 3 % nur eine untergeordnete Rolle (vgl. Abbildung 4-26). Die im Gebiet vorkommenden MFH-Typen sind 16-geschossige Hochhäuser sowie 4- und 8-geschossige Mehrfamilienhäuser:

- ▶ 4-geschossige MFH: 18 - 24 WE bzw. 2.015 – 2.325 m²; 3- bzw. 4-Spanner (3 bis 4 Eingänge/ Treppenaufgänge)
- ▶ 8-geschossige MFH: 120 WE bzw. 8.377 m²; i.d.R. 3-Spanner
- ▶ 16-geschossige MFH: 90 WE bzw. 7.308 m²

Abbildung 4-26: Wohngebäude im Gebiet Weingarten-West in Freiburg sowie deren Einteilung entsprechend der in dem Projekt "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050" entwickelten Typologie; rechts Verteilung nach Anzahl der Gebäude, links nach Wohnfläche



Quelle: Eigene Darstellung

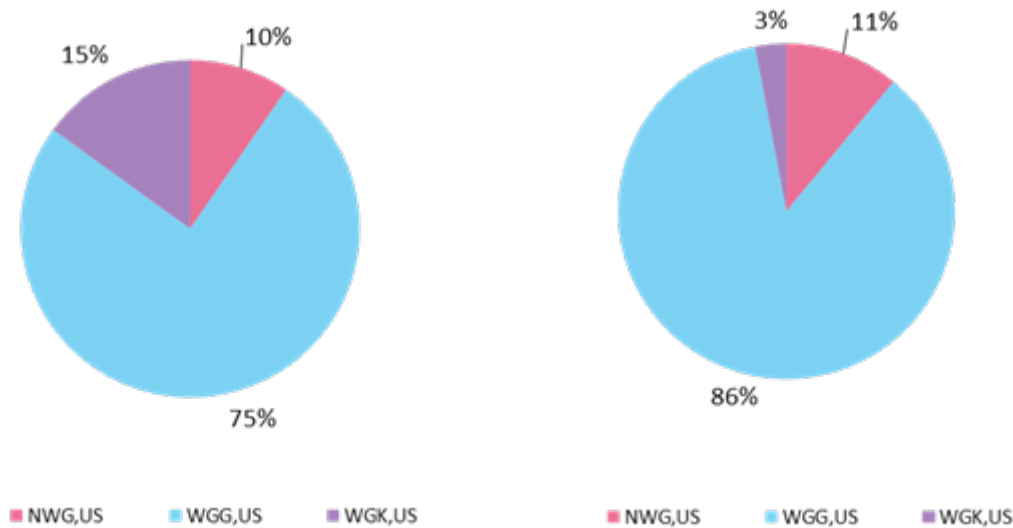
Die Gebäude haben in der Regel mehrere Treppenaufgänge. Um entsprechend der im Projekt „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ verwendeten Typologie klassifiziert werden zu können wird jeder Treppenaufgang/Eingang (entspricht auch den Hausnummern der Gebäude) als einzelnes MFH betrachtet.

In den vergangenen Jahren wurden in dem Gebiet schon einige Sanierungen und Nachverdichtungen umgesetzt und es gibt einen Rahmenplan für die weitere Entwicklung. Alle Gebäude in Weingarten-West sind an ein Fernwärmenetz angeschlossen.

Für die Ausgangslage der Gebäudestruktur von Weingarten-West im Berechnungs-Tool ergibt sich die in Abbildung 4-27 gezeigte Verteilung der Gebäude samt ihrer Flächen aufgeteilt nach Gebäudekategorie und Sanierungszustand. Um die Effekte der Sanierung stärker hervorzuheben, sind alle Gebäude im Ausgangszustand als unsaniert klassifiziert. Diese Festlegung begründet sich dadurch, dass die in den letzten Jahren durchgeführten (ambitionierten) Sanierungsmaßnahmen typischerweise in vergleichbaren Quartieren nicht erfolgt sind. Um eine bessere Übertragbarkeit auf weitere Stadtteile zu gewährleisten, wurden die Berechnungen somit mit einem unsanierten Ausgangszustand durchgeführt. Weingarten-West ist nicht nur

flächenmäßig, sondern auch anzahlmäßig klar von großen Wohngebäuden geprägt (MFH, GMH, hier als WGG = große Wohngebäude zusammengefasst).

Abbildung 4-27: Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für Weingarten-West im IST Zustand



Quelle: Eigene Darstellung (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; US = unsaniert)

4.4.2 Transformationspfade

Am Beispiel des Quartiers Weingarten-West wird exemplarisch aufgezeigt, wie sich die Auswahl der Materialien entlang der Transformationspfade auf die Umwelt auswirkt. Dazu werden drei Entwicklungspfade betrachtet, die sich ausschließlich in Hinblick auf die verwendeten Dämmmaterialien unterscheiden (Tabelle 4-8).

Da der Schwerpunkt der Betrachtung auf den Umweltwirkungen von Dämmmaterialien liegt, wird für die Sanierungsrate und -tiefe in allen drei Transformationspfaden eine sehr ambitionierte Ausgestaltung angenommen (Sanierungsrate von 3 %, Sanierungstiefe von 100 % „voll saniert plus“).

Tabelle 4-8: Transformationspfade für Weingarten-West

	Energieeffizienz-Pfad – WDVS mit EPS	Energieeffizienz-Pfad - WDVS mit Mineralfaser	Energieeffizienz-Pfad - Holzfaserplatten
Sanierungsrate	3 % pro Jahr	3 % pro Jahr	3 % pro Jahr
Sanierungstiefe	100 % vollsaniert plus	100 % vollsaniert plus	100 % vollsaniert plus
Wärmeversorgungsoption	Fernwärme + Solarthermie	Fernwärme + Solarthermie	Fernwärme + Solarthermie
PV-Zubaurate	3 % der für PV verfügbaren Dachfläche pro Jahr	3 % der für PV verfügbaren Dachfläche pro Jahr	3 % der für PV verfügbaren Dachfläche pro Jahr
Dämmmaterial	EPS	Mineralfaser	Holzfaser

Die Transformationspfade unterscheiden sich bezüglich der verwendeten Materialien für die Außenwanddämmung, wobei zwischen den folgenden drei Varianten unterschieden wird:

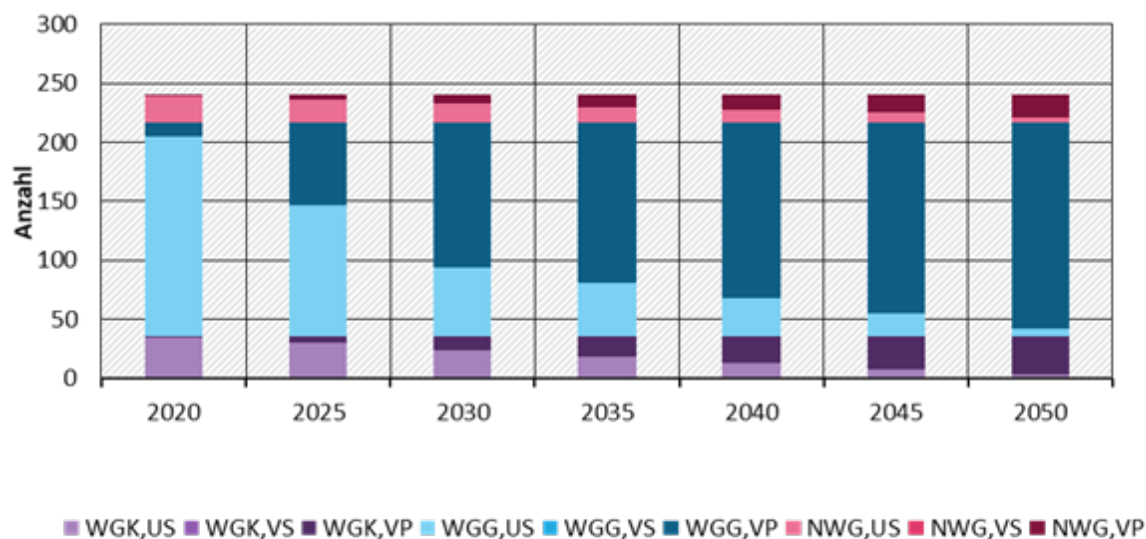
- ▶ WDVS EPS: Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) mit expandiertem Polystyrol (EPS) sind neben Produkten basierend auf Mineralfasern die in Deutschland am häufigsten verwendeten WDVS.
- ▶ WDVS aus Mineralfasern haben derzeit einen Anteil von ca. 50 % der in Deutschland verwendeten Dämmstoffe³⁰.
- ▶ WDVS mit Holzfaserplatten haben in Deutschland derzeit einen geringen Marktanteil bezogen auf die gesamte Wärmedämmung, sind aber im Bereich der ökologischen Dämmstoffe eine der wichtigsten Optionen. Um die benötigte Dämmwirkung für den Sanierungszustand „vollsaniert plus“ zu erreichen wird angenommen, dass die Dämmung durch eine Kombination aus Holzfaserplatten (24 cm dick) und EPS (ca. 5 cm dick) umgesetzt wird.

4.4.2.1 Entwicklung des Gebäudebestands

Die Entwicklung der Sanierungszustände der verschiedenen Gebäudekategorien ist in Abbildung 4-28 dargestellt. Vor dem Hintergrund der Auswahl eines sehr ambitionierten Effizienzpfades wird deutlich, dass in allen Gebäudekategorien ein fast vollständiger Übergang zum Zustand „vollsaniert plus“ erfolgt.

30 https://www.fiw-muenchen.de/media/pdf/metastudie_waermedaemmstoffe.pdf

Abbildung 4-28: Entwicklung der Sanierungszustände je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude in Weingarten-West

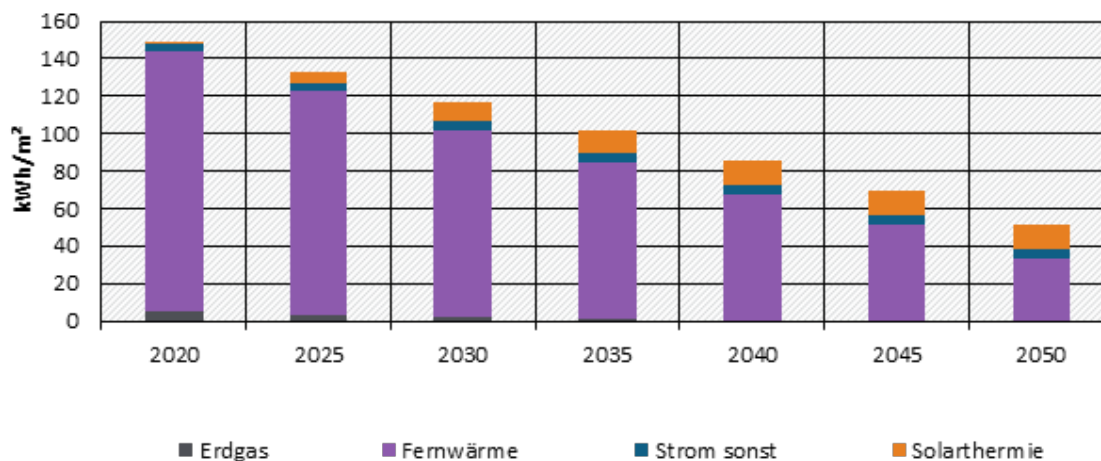


Quelle: Eigene Berechnungen (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; US = unsaniert; VS = „vollsanziert“; VP = „vollsanziert plus“)

4.4.2.2 Endenergieverbrauch

Abbildung 4-29 zeigt den Endenergieverbrauch (EEV) pro Quadratmeter und Jahr. Aufgrund des ambitionierten Sanierungspfades zeigt sich eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs um über 70 %. Die Wärmebereitstellung im Quartier erfolgt bereits zum jetzigen Zeitpunkt weitestgehend über Fernwärme, dieser kommt auch entlang des Transformationspfades eine wesentliche Rolle zu.

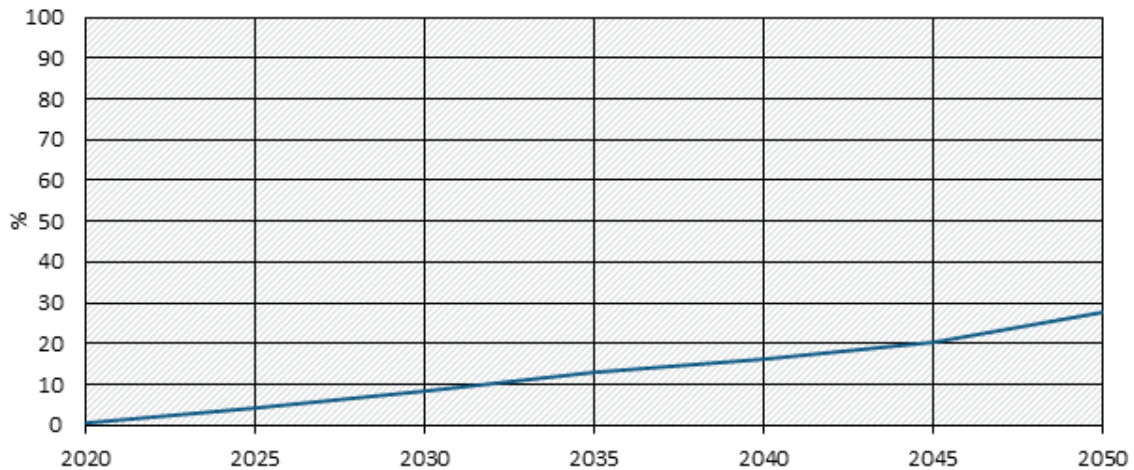
Abbildung 4-29: Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Weingarten-West pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m²a))



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-30 zeigt den Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Gesamtwärmeverbrauch. Dieser steigt bis 2050 auf knapp 30 %. (exklusive Fernwärme). Der relativ geringe Anteil liegt darin begründet, dass die Erzeugung der Fernwärme außerhalb des Quartiers erfolgt.

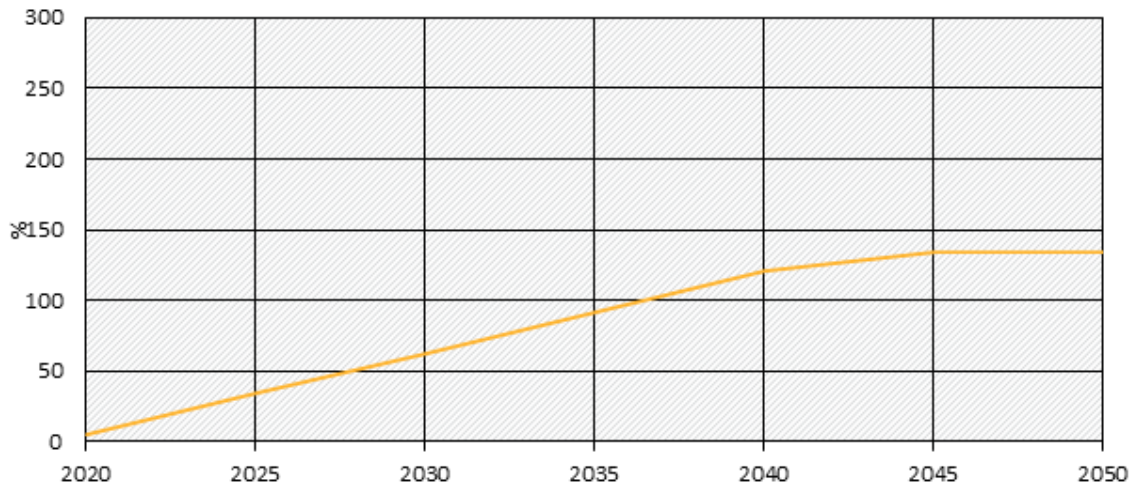
Abbildung 4-30: Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch in Weingarten-West in %



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 4-31 ist der Anteil des mit Dachflächen-PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf des Quartiers dargestellt (beinhaltet hier den Strom für die Gebäudekonditionierung und den Haushaltsstrom der privaten Haushalte). Dieser steigt infolge des stetigen PV-Zubaus immer weiter an, bis eine Sättigung auftritt, weil alle Dachflächen mit PV belegt sind. Zumindest bilanziell kann sich das Quartier ab 2036 selbst versorgen.

Abbildung 4-31: Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf in Weingarten-West in %

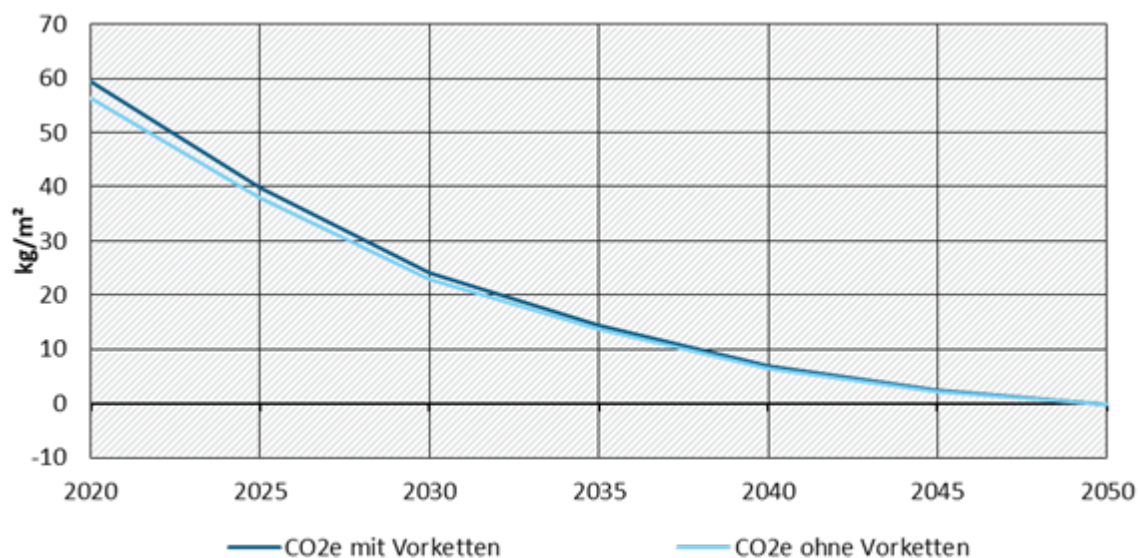


Quelle: Eigene Berechnungen

4.4.2.3 CO₂-Emissionen (Nutzungsphase)

Abbildung 4-32 zeigt die CO₂-Emissionen pro Quadratmeter und Jahr sowie den prozentualen Rückgang der CO₂-Emissionen des Quartiers entlang der Transformationspfade. Der deutliche Rückgang der CO₂-Emissionen um 93 % beruht einerseits auf dem Rückgang des Endenergieverbrauchs (siehe Abschnitt 4.4.2.2) und andererseits auf der schrittweisen Dekarbonisierung der Fernwärme sowie der zunehmenden Wärmebereitstellung durch Solarthermie. Die in Abbildung 4-32 gezeigten Emissionen beziehen sich ausschließlich auf die energiebedingten CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase, ein Vergleich mit den CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase erfolgt in Abschnitt 4.4.2.4.

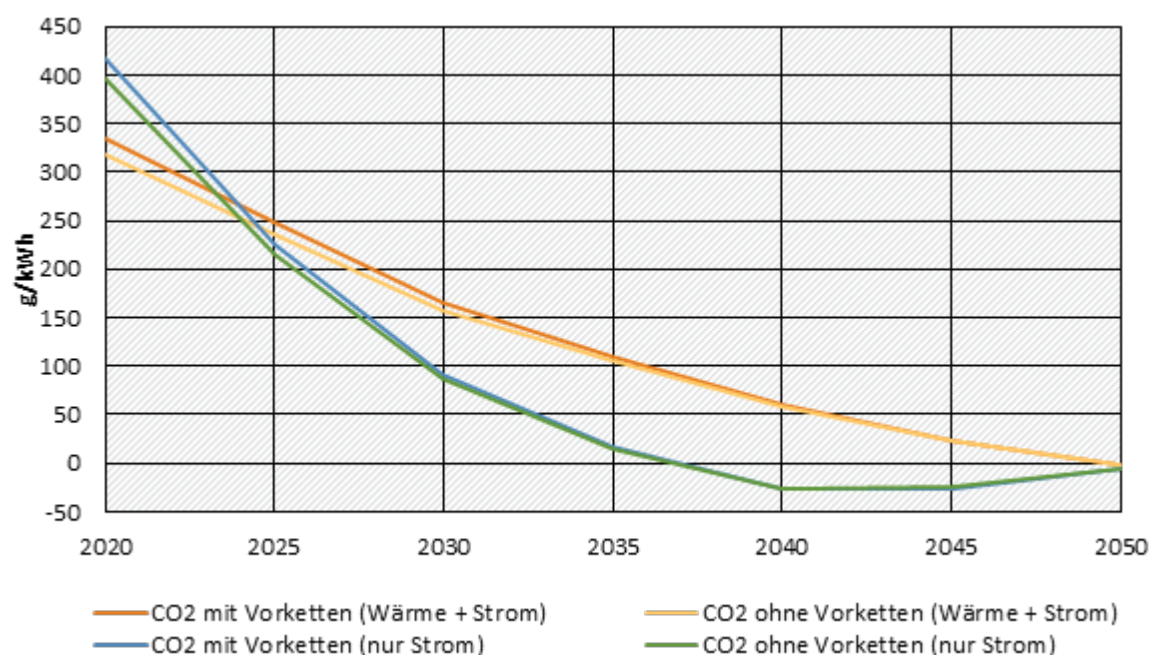
Abbildung 4-32: CO₂e-Emissionen in Weingarten-West pro Fläche (kg / (a*m²))



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-33 zeigt den mittleren Emissionsfaktor für den gesamten Endenergieverbrauch, sowie für den Stromverbrauch. Für den gesamten Endenergieverbrauch reduziert sich der Emissionsfaktor kontinuierlich bis 2050 auf einen Wert von 0 g/kWh, für den Strom wird ein negativer Wert erreicht.

Abbildung 4-33: Mittlerer Emissionsfaktor des gesamten Endenergieverbrauchs (Wärme + Strom) bzw. des Stromverbrauchs in Weingarten-West (g/kWh)



Quelle: Eigene Berechnungen

4.4.2.4 Umweltwirkungen

In den drei untersuchten Transformationspfaden werden die Umweltwirkungen exemplarisch dargestellt für den Bereich der Außenwanddämmung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der sehr ambitionierten Ausgestaltung der Transformationspfade in Hinblick auf die Sanierungsrate und Sanierungstiefe der Dämmung eine zentrale Rolle zukommt.

Tabelle 4-9 stellt die kumulierten Umweltwirkungen durch die Dämmstoffe in den drei Transformationspfaden für ausgewählte Wirkungskategorien dar. Die Dämmung mit Mineralfaser-Dämmplatten hat in fast allen untersuchten Wirkungskategorien die größte Wirkung. Dies liegt vor allem an dem sehr hohen Energieaufwand für die Herstellung der Mineralwolle. Da es bisher für Mineralfaserdämmplatten kein flächendeckendes Recycling gibt, muss die Mineralwolle überwiegend entsorgt werden.

Bei den EPS-Dämmplatten ist der Aufwand für die Produktion nicht ganz so hoch wie für die Mineralwolle. Auch das EPS wird nicht recycelt, hingegen wird hier von einer Verbrennung mit Nutzung der im Werkstoff enthaltenen Energie zur Strom- und Wärmeerzeugung ausgegangen.

Die Holzfaserdämmplatten haben die geringsten Impacts in den untersuchten Wirkungskategorien, da zum einen das Holz als nachwachsender Rohstoff relativ geringe Umweltlasten in der Produktion aufweist, zum anderen erhalten die Dämmplatten nach der Nutzungsphase eine Gutschrift über die Verbrennung in einem Biomassekraftwerk mit Energierückgewinnung. Nur beim Primärenergieaufwand weisen die Holzfaserdämmplatten den höchsten Impact auf, da hier auch die erneuerbare Energie im Holz miteingerechnet ist.

Tabelle 4-9: Ausgewählte Umweltwirkungen der Wärmedämmung für die Transformationspfade für Weingarten-West

	WDVS EPS	WDVS Mineralfaser	Holzfaserplatten
Summe erneuerbare Primärenergie (PERE) in GJ	4.120	12.042	110.247
Summe nicht erneuerbare Primärenergie (PENRE) in GJ	83.345	89.584	-43.928
Treibhauspotenzial (GWP) in t CO ₂ -Äq	5.593	6.160	-4.610
Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP) in mg CFC11-Äq	13.554	86.982	-572
Photo-chemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) in kg Ethen-Äq	15.725	2.111	844
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP) in kg SO ₂ -Äq	16.976	42.383	-1.516
Eutrophierungspotenzial (EP) in kg PO ₄ -Äq	1.127	5.666	533
Verbrauch elementarer abiotischer Ressourcen mineralischen Typs (ADPE) in g Sb-Äq	11.723	23.118	3.153

Zur Einordnung der Ergebnisse wird für die Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial (GWP)“ exemplarisch ein Vergleich mit den Umweltwirkungen in der Nutzungsphase angestellt (Tabelle 4-10). Der Vergleich zeigt, dass selbst bei den sehr ambitionierten Annahmen zur Sanierungsrate und -tiefe der Anteil der THG-Emissionen aus der Nutzungsphase die THG-Emissionen aus der Herstellungsphase um ein Vielfaches übersteigen.

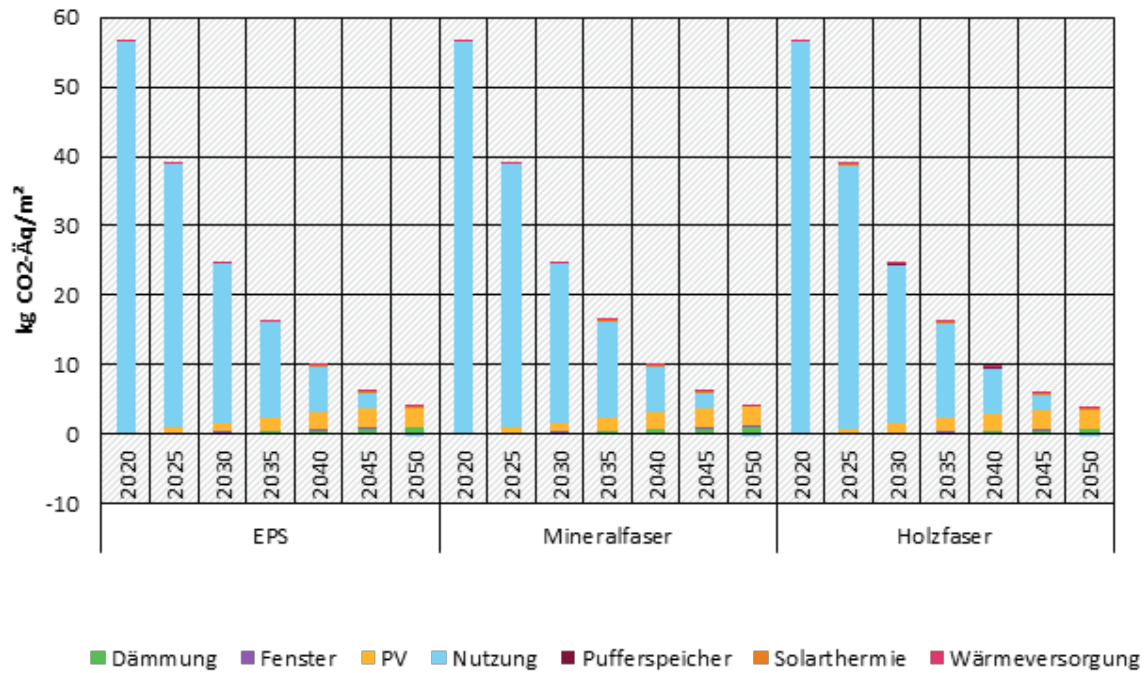
Tabelle 4-10: Ausgewählte Umweltwirkungen (Herstellung) der verschiedenen Dämmstoffe für die Transformationspfade für Weingarten-West (jeweils in t CO₂e pro m² Wohnfläche)

	WDVS EPS	WDVS Mineralfaser	Holzfaserplatten
Treibhauspotenzial (GWP) der Wärmedämmung kumuliert über Betrachtungszeitraum	0,03	0,03	-0,03
THG-Emissionen aus der Nutzungsphase kumuliert über den Betrachtungszeitraum	0,83	0,83	0,83

Abbildung 4-34 bis Abbildung 4-40 zeigen die Ergebnisse der Umweltwirkungsabschätzung (Environmental Impact Assessment) für die Transformationspfade im Quartier Weingarten über den Betrachtungszeitraum in Fünf-Jahres-Schritten. Während sich die Darstellung in Abbildung 4-34 auf Einzeljahre bezieht, sind die Werte in Abbildung 4-35 bis Abbildung 4-40 jeweils aufsummiert über die fünf Jahre. Jeweils links sind die Werte für die Dämmung mit EPS aufgeführt, in der Mitte die Dämmung mit Mineralfaserplatten und rechts mit Holzfaserplatten links. Da das Quartier mit Fernwärme versorgt wird und sich die Fernwärme-Erzeugungsanlage außerhalb des Quartiers befindet, fallen für die Wärmeversorgung bei den Umweltwirkungen nur die neu eingebauten/ersetzten Fernwärme-Übergabestationen an. Unterschiede fallen in den drei Szenarien nur bei der Dämmung an, die Umweltwirkungen aus Wärmeversorgung, Solarthermie, Fenstern und Pufferspeichern sind in den drei Szenarien jeweils gleich.

Abbildung 4-34 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen aus Nutzungs- und Herstellungsphase in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Wohn- bzw. Nutzfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). Vor allem in den Anfangsjahren werden die Ergebnisse stark dominiert von der Nutzungsphase, im Lauf der Jahre geht der Anteil der Nutzungsphase dann aber sehr stark zurück.

Abbildung 4-34: GWP in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten

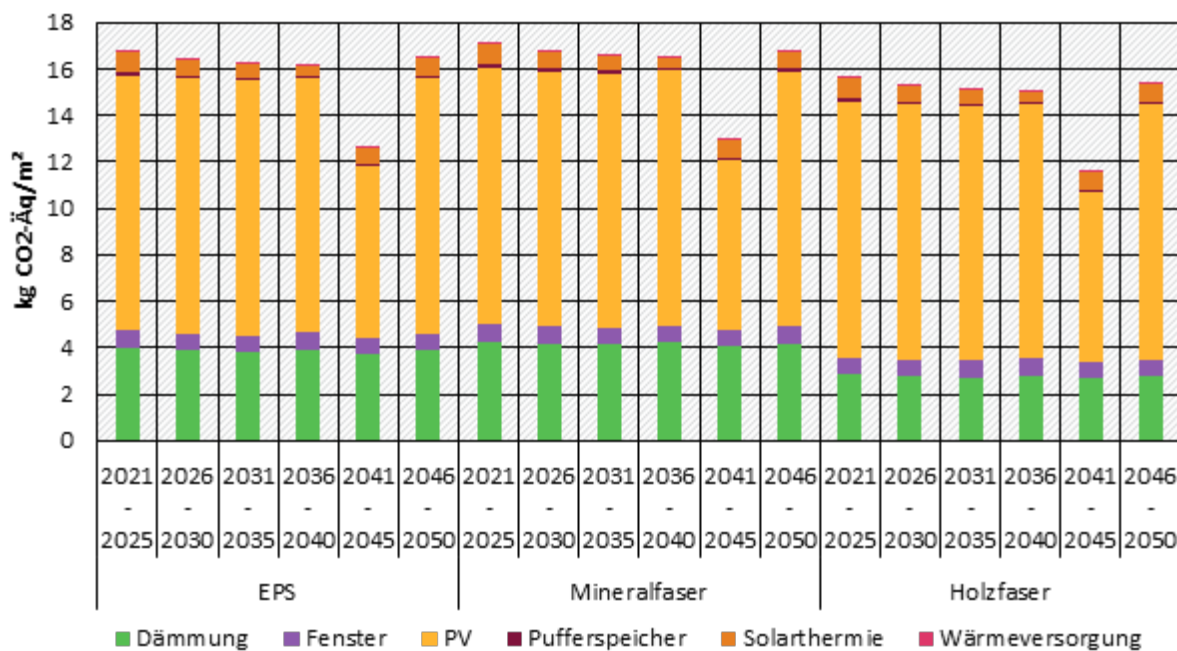


Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-35 bis Abbildung 4-40 zeigen die Ergebnisse der für die Transformationspfade im Quartier Weingarten aus der Herstellungsphase.

Abbildung 4-35 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). In allen drei Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (jeweils ca. 65 – 67 %), der jeweils identisch angesetzt ist. An zweiter Stelle steht in allen drei Szenarien die Dämmung (jeweils ca. 20 – 25 %). Beim Vergleich der Dämmungen weisen die Mineralfaserdämmplatten das höchste GWP auf, während die Nutzung von Holzfaserdämmplatten den niedrigsten Wert aufweist.

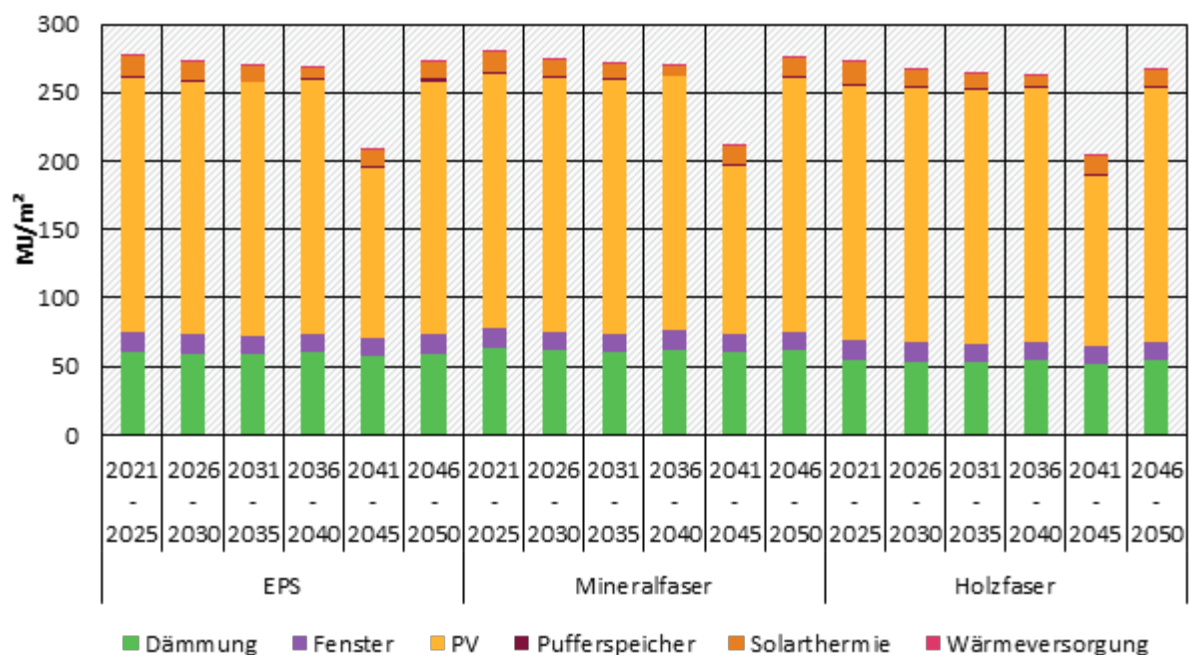
Abbildung 4-35: Über 5-Jahres-Schritte kumuliertes GWP in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten)



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-36 zeigt die Ergebnisse für den Verbrauch an Primärenergie (Summe aus PERE und PENRE) in MJ pro m² Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). In allen drei Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (jeweils ca. 66 – 68 %), der jeweils identisch angesetzt ist. An zweiter Stelle steht in allen drei Szenarien die Dämmung (jeweils ca. 20 – 22 %). Der Gesamtwert ist in allen drei Szenarien vergleichbar.

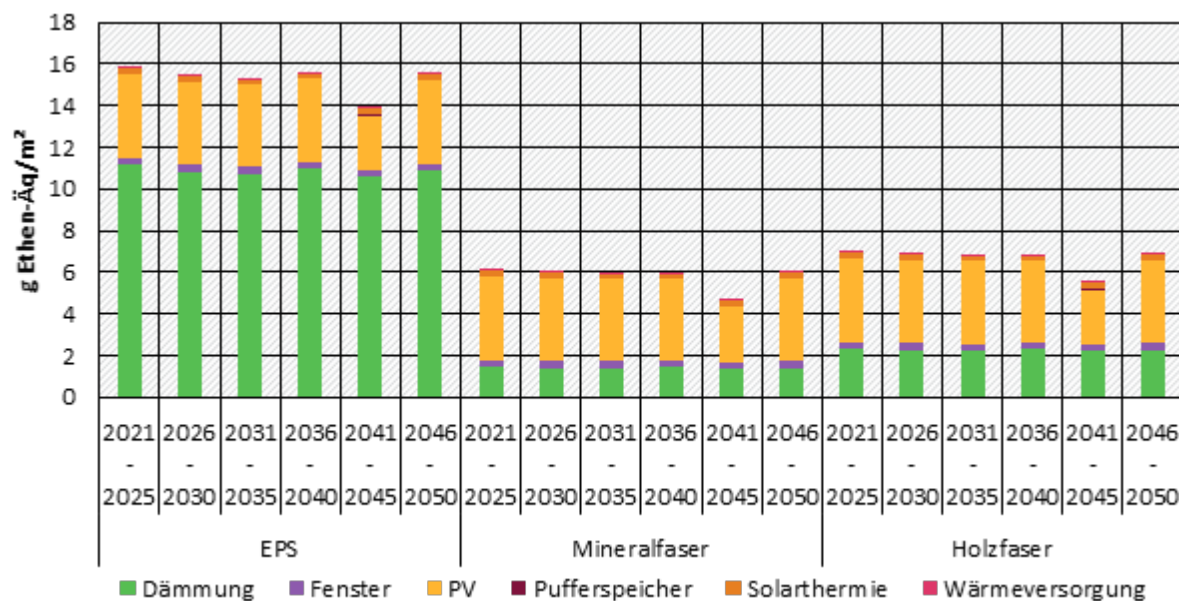
Abbildung 4-36: Verbrauch an Primärenergie (Summe aus PERE und PENRE) in MJ pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten)



Quelle: Eigene Berechnungen

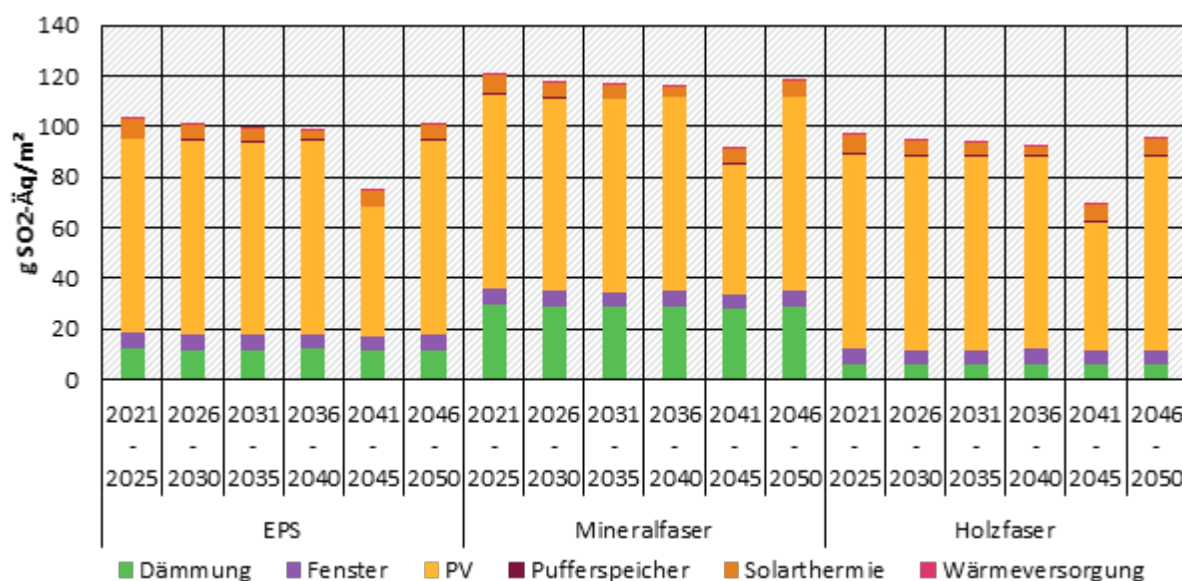
Abbildung 4-37 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Photooxidantien in kg Ethen-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). Während bei EPS die Dämmung dominiert (ca. 70 %), zeigt bei den anderen beiden Dämmungsszenarien jeweils der Photovoltaikausbau den höchsten Impact, allerdings weist die Dämmung mit EPS insgesamt ein deutlich höheres POCP auf als die anderen beiden Szenarien (jeweils ca. 2,5-fach so hoch), die Dämmung mit Mineralfaserdämmplatten zeigt das geringste POCP.

Abbildung 4-37: POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

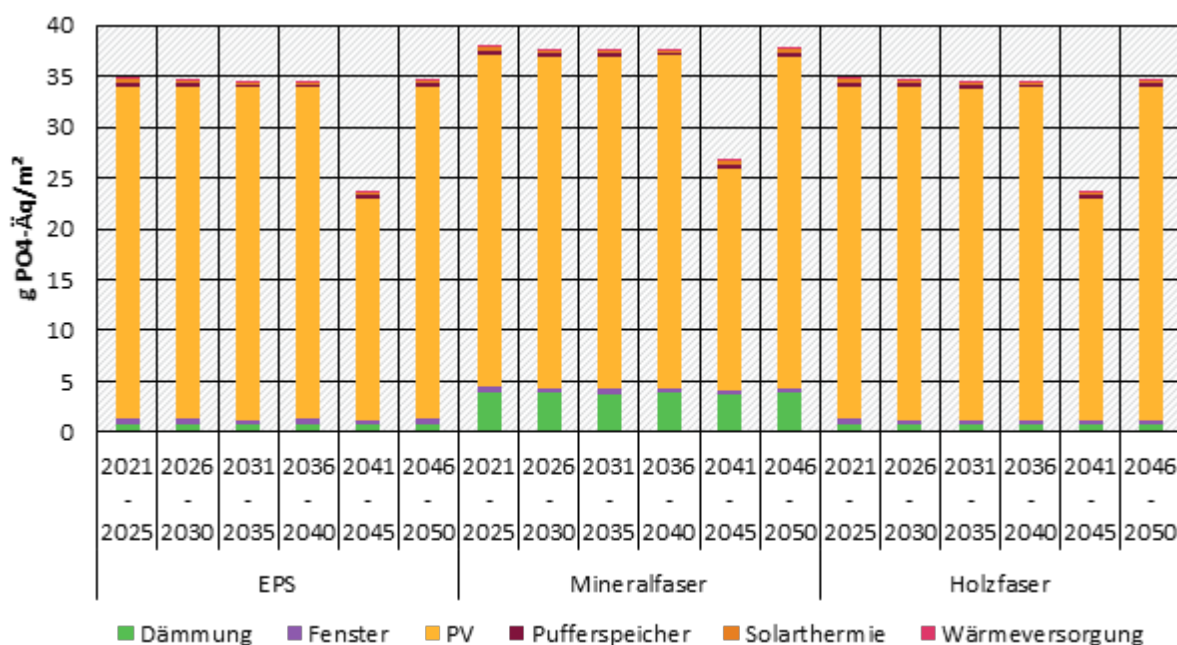
Abbildung 4-38 zeigt die Ergebnisse für das Versauerungspotenzial in kg SO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). In allen drei Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (jeweils ca. 66 – 80 %), der jeweils identisch angesetzt ist. Die Dämmung spielt vor allem im Szenario mit Mineralfaserdämmplatten eine größere Rolle (ca. 25 %), dieser Pfad zeigt auch insgesamt die höchsten Emissionen beim AP.

Abbildung 4-38: AP in g SO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-39 zeigt die Ergebnisse für das Eutrophierungspotenzial in kg PO₄-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). Auch beim EP dominiert die Dämmung im Mineralfaser-Szenario das EP deutlich, während die im EPS-Szenario und im Holzfaserplatten-Szenario eine geringere Rolle spielt. In allen drei Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (jeweils ca. 85 – 95 %), der jeweils identisch angesetzt ist. Die Dämmung spielt vor allem im Szenario mit Mineralfaserdämmplatten eine zusätzliche Rolle (ca. 10 %), dieser Pfad zeigt auch insgesamt die höchsten Emissionen beim EP.

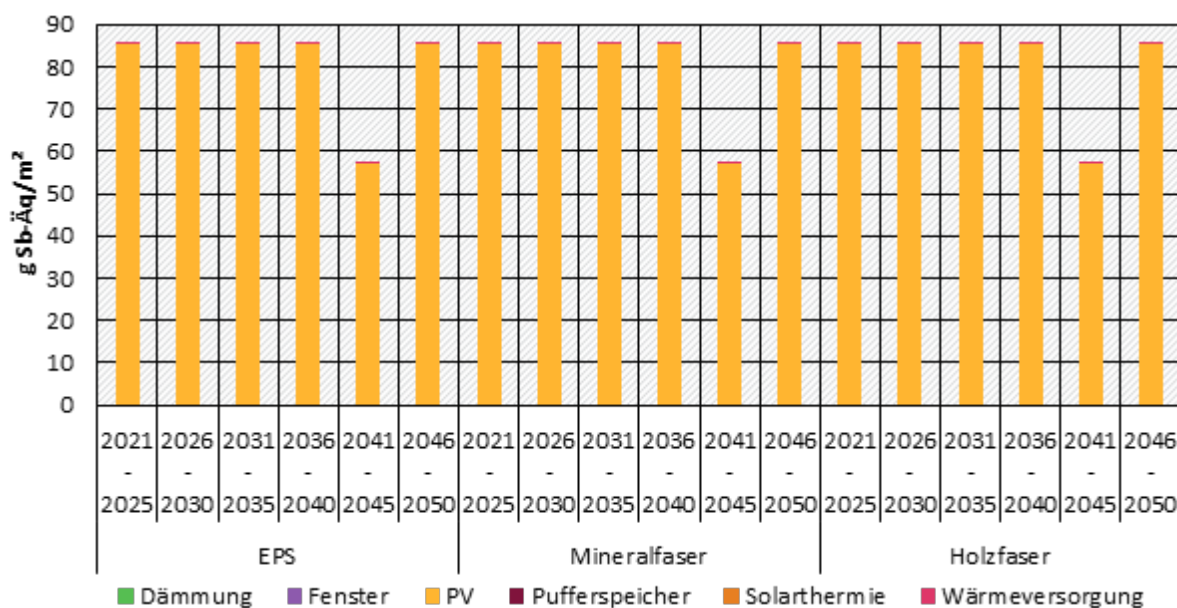
Abbildung 4-39: EP in g PO₄-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-40 zeigt die Ergebnisse für den Verbrauch abiotischer Ressourcen in kg Sb-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten). Beim ADPE dominiert der Ausbau der PV-Anlagen noch stärker (ca. 99,9 %). Insgesamt unterscheiden sich die drei Pfade beim ADPE jeweils über den Betrachtungszeitraum kaum.

Abbildung 4-40: ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche (links EPS, Mitte Mineralfaser, rechts Holzfaserplatten)

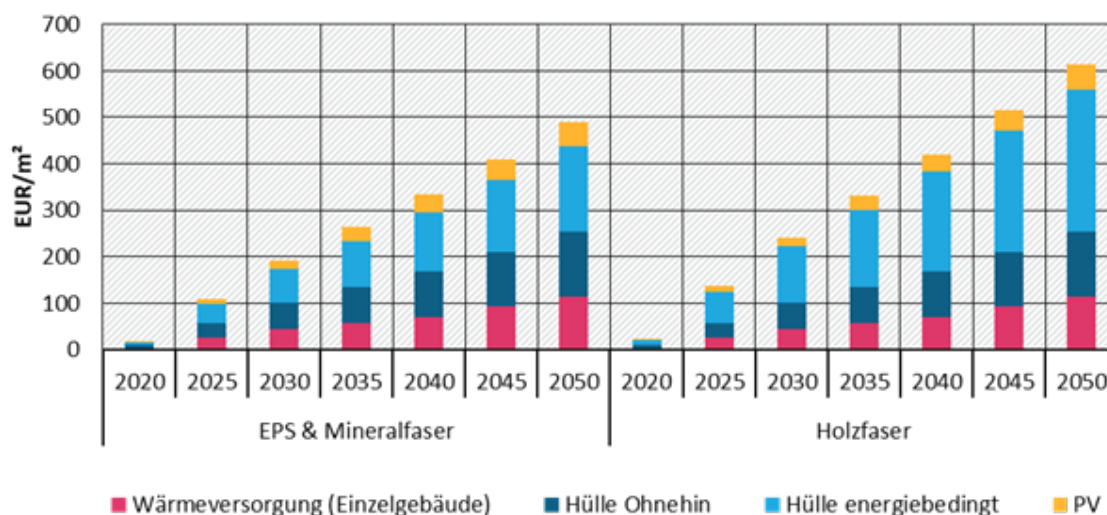


Quelle: Eigene Berechnungen

4.4.2.5 Kosten

Abbildung 4-41 zeigt die kumulierten Investitionskosten (in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche des Quartiers) in Fünf-Jahres-Schritten bis 2050. Sie sind aufgeteilt nach den Investitionskosten für die energetische Gebäudesanierung der Hülle (Ohnehinkosten und energiebedingte Mehrkosten), Investitionskosten für den Austausch der Heizungstechnik sowie die zugebaute Dach-PV-Anlagen. Die beiden Pfade unterscheiden sich durch die Kosten bei der energetischen Sanierung der Gebäudehülle, bei der die Dämmung mit Holzfaserplatten im Vergleich zur Dämmung mit EPS bzw. Mineralfaser deutlich höhere Kosten aufweist.

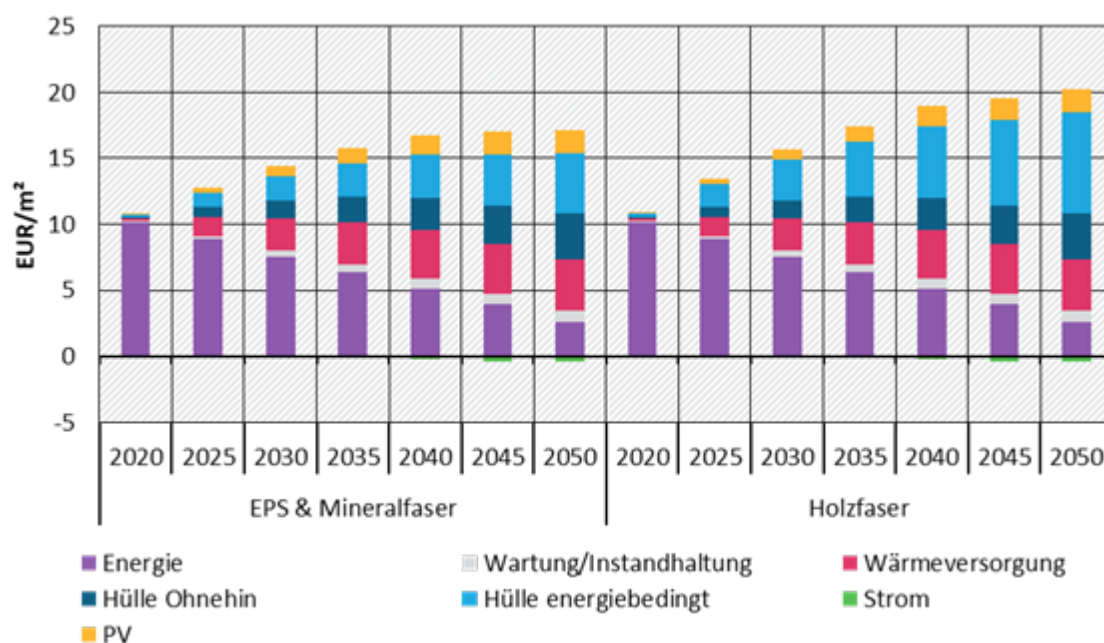
Abbildung 4-41: Kumulierte Investitionskosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Weingarten-West (links: EPS bzw. Mineralfaser, rechts: Holzfaserplatten)



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-42 stellt die Annuitäten der Investitionskosten (in EUR/m²) sowie die jährlichen laufenden Kosten dar. Im Pfad mit Dämmung aus Holzfaserplatten steigen die Investitionskosten insgesamt merklich höher an als im Pfad mit konventioneller Dämmung. Bezüglich der laufenden Kosten unterscheiden sich die beiden Pfade nicht, da angenommen wurde, dass der gleiche Dämmstandard erreicht wird.

Abbildung 4-42: Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Weingarten-West



Quelle: Eigene Berechnungen

4.5 Darmstadt – Ludwigshöhviertel

4.5.1 Ausgangslage/Quartiersbeschreibung

Das neu zu erbauende Ludwigshöhviertel in Darmstadt entsteht auf dem Gelände der ehemaligen Cambrai-Fritsch Kaserne (vgl. Abbildung 4-43) im Süden Darmstadts. Die Konversionsfläche grenzt im Norden an den Stadtteil Bessungen, im Süden an Eberstadt. Östlich des Quartiers befinden sich weitreichende Waldflächen. Westlich liegt die Bessunger Kiesgrube, welche das Ludwigshöhviertel von der ebenfalls auf einer Konversionsfläche entstandenen Lincoln-Siedlung abgrenzt. Auf dem Gelände sollen ca. 1.400 Wohneinheiten, überwiegend im Geschosswohnungsbau, entstehen mit Platz für 3.150 Bewohner. Weiterhin ist ein Bildungscampus mit Schule, Turnhalle und Kita geplant.

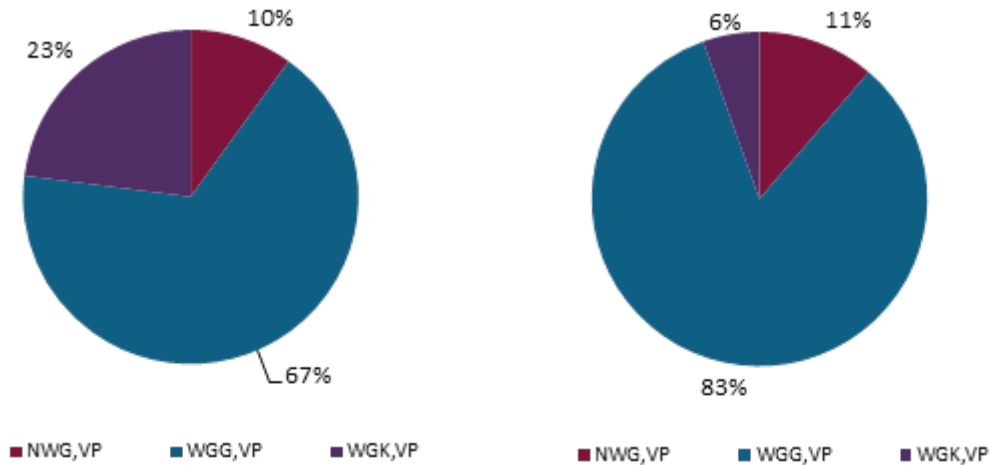
Abbildung 4-43: Lage der alten Cambrai-Fritsch-Kaserne und Jefferson-Siedlung: die Konversionsfläche wird zum neuen Ludwigshöhlviertel umgebaut



Quelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende (CC BY-SA 2.0)

Abbildung 4-44 zeigt die prozentuale Verteilung der Gebäude nach Anzahl (links) sowie Fläche (rechts). Die Mehrfamilienhäuser dominieren deutlich.

Abbildung 4-44: Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für das Ludwigshöviertel im IST Zustand



Quelle: Eigene Darstellung (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; VP = „vollsanziert plus“)

4.5.2 Transformationspfade

Für das Ludwigshöviertel ergibt sich aufgrund seines Neubaucharakters eine gesonderte Situation bezüglich der Transformationspfade. Die beiden hier gewählten Transformationspfade unterscheiden sich letztlich nur in der betrachteten Bauweise für die neu zu errichtenden Gebäude des Viertels: konventionelle Massivbauweise vs. Holztafelbauweise. Wie in Tabelle 4-11 ersichtlich, wird davon ausgegangen, dass die Gebäude im Zeitraum 2020 bis 2050 nicht mehr energetisch saniert werden müssen. Der hier gewählte Neubaustandard „vollsanziert plus“ ist schon zielkompatibel mit 2050. Lediglich die Wärmeversorgungstechnik muss nach 20 Jahren aufgrund ihrer eingeschränkten Lebensdauer ersetzt werden. Die PV-Module werden von Anfang an installiert sein und müssen bis 2050 nicht erneuert werden.

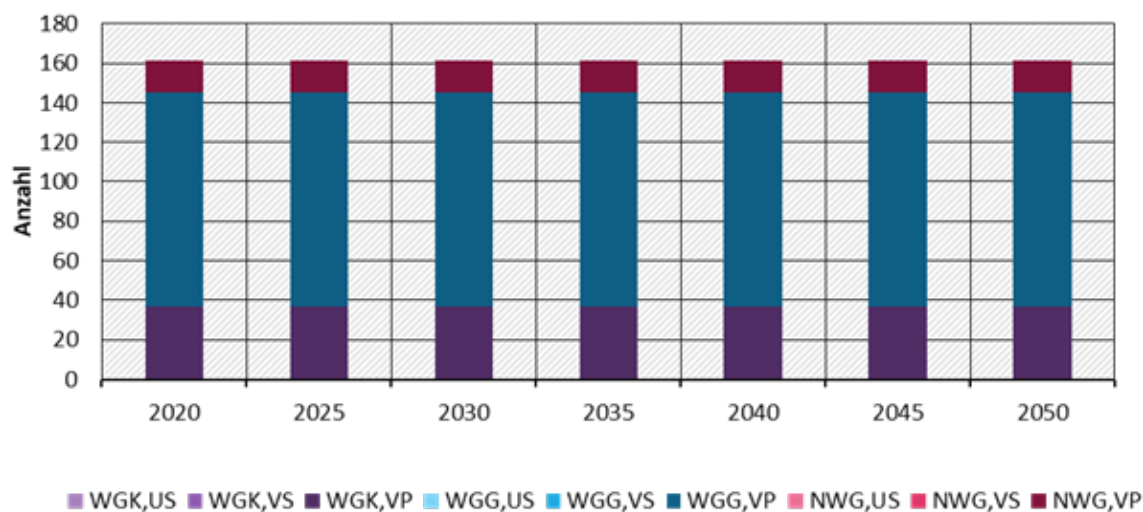
Tabelle 4-11: Transformationspfade für das Ludwigshöh-Quartier

	Neubau – konventionell	Neubau – Holzbauweise
Sanierungsrate	n/a	n/a
Neubaustandard	100 % vollsaniert plus	100 % vollsaniert plus
Wärmeversorgungsoption	Wärmepumpe + Solarthermie	Wärmepumpe + Solarthermie
PV-Dachflächenbelegung	80 % der für PV verfügbaren Dachfläche	80 % der für PV verfügbaren Dachfläche
Dämmmaterial	Konventionell (EPS)	Zellulose
Baumaterial	Konventionell (Massivbauweise: Kalksandstein)	Holztafelbauweise

4.5.2.1 Entwicklung des Gebäudebestands

Insgesamt entstehen auf dem Gelände 37 EZFH, 108 Mehrfamilienhäuser und große Mehrfamilienhäuser sowie 16 Nichtwohngebäude inkl. eines Bildungscampus. Es wird davon ausgegangen, dass sich dieser Gebäudebestand bis 2050 nicht verändern wird, auch energetische Sanierungen werden nicht durchgeführt werden. Der Vollständigkeit und Vergleichbarkeit halber zeigt Abbildung 4-45 den Gebäudebestand über die Zeit bis 2050.

Abbildung 4-45: Entwicklung der Sanierungszustände je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude im Ludwigshöhviertel

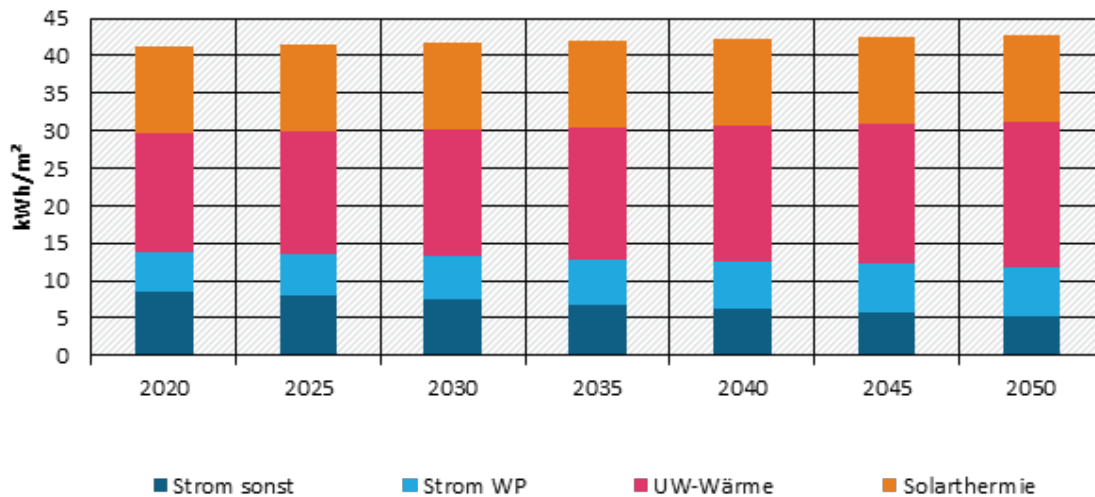


Quelle: Eigene Berechnungen (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; US = unsaniert; VS = „vollsaniert“; VP = „vollsaniert plus“)

4.5.2.2 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch wird in Abbildung 4-46 dargestellt. Da keine Sanierungsaktivitäten vorliegen, bleibt der Endenergieverbrauch (EEV) über die Zeit nahezu konstant. Es gibt allerdings eine leichte Verschiebung von einem geringer werdenden Hilfsstrom infolge der immer effizienter werdenden technischen Ausstattung (vgl. Kapitel 4.2.1). Dies führt zu geringeren internen Wärmegewinnen in den Gebäuden, welche in der Folge durch einen leicht ansteigenden EEV der Wärmepumpen kompensiert werden.

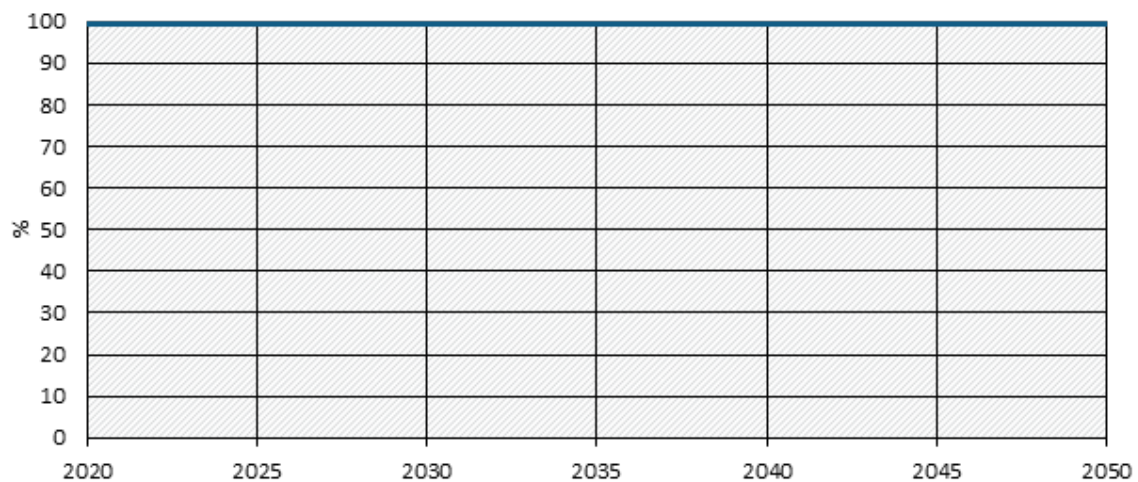
Abbildung 4-46: Endenergieverbrauch der Wärmeenergieversorgung im Ludwigshöfviertel in kWh/(m²a)



Quelle: Eigene Berechnungen

Der Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien an der Wärmeversorgung ist von Beginn an bei 100 % (vgl. Abbildung 4-47 ganz oben).

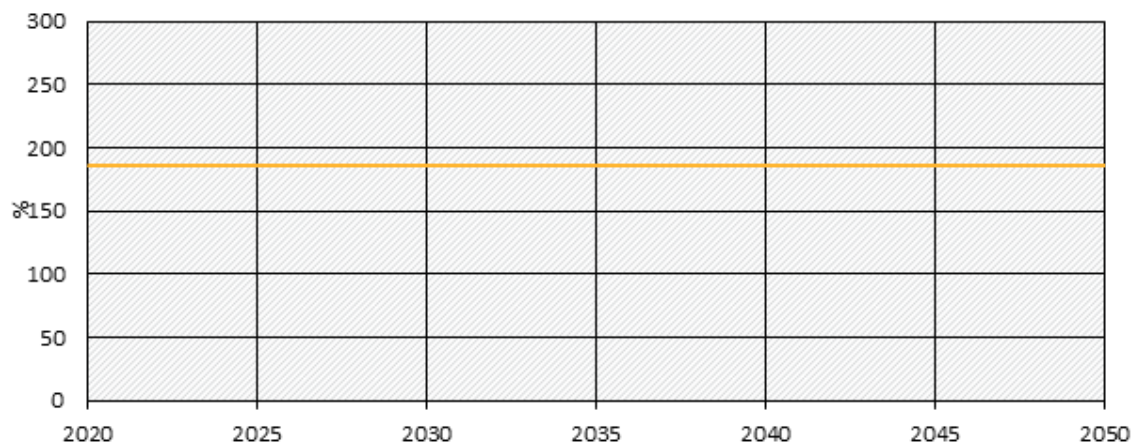
Abbildung 4-47: Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch im Ludwigshöviertel in % (blaue Linie bei 100%)



Quelle: Eigene Berechnungen

Der Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Strombedarf im Quartier (beinhaltet hier den Strom für die Gebäudekonditionierung und den Haushaltsstrom der privaten Haushalte) bleibt hingegen nahezu konstant (siehe Abbildung 4-48). Der leicht rückläufige benötigte Hilfsstrom wird durch den leicht zunehmenden Strombedarf für Wärmepumpen ausgeglichen.

Abbildung 4-48: Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf im Ludwigshöviertel in %

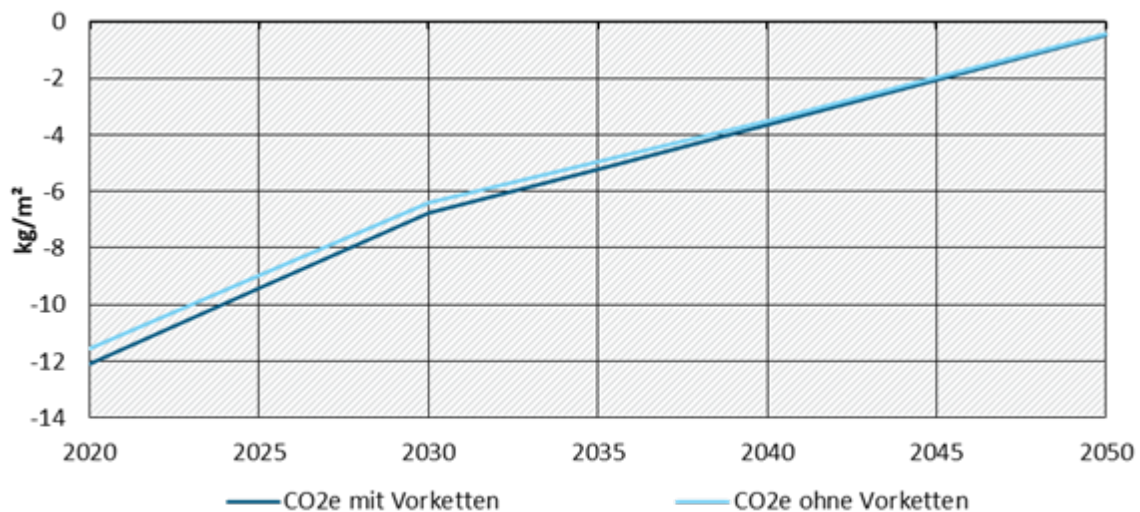


Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.2.3 CO₂-Emissionen (Nutzungsphase)

Abbildung 4-49 zeigt die CO₂-Emissionen pro Quadratmeter und Jahr von 2020 bis 2050. Da es sich um ein Neubauquartier handelt, welches von Anfang an komplett mit Dachflächen-PV ausgerüstet ist und welches einen geringen Energieverbrauch aufweist, sind die Emissionen der Nutzungsphase von Anfang an kleiner null. Dies wird durch den Überschuss-PV-Strom erreicht, welche gerade am Anfang des Betrachtungszeitraums noch Kohlestrom im Netz verdrängt. Dieser Effekt nimmt aber mit fortschreitender Zeit ab, da auch der bundesdeutsche Strommix immer dekarbonisierter wird.

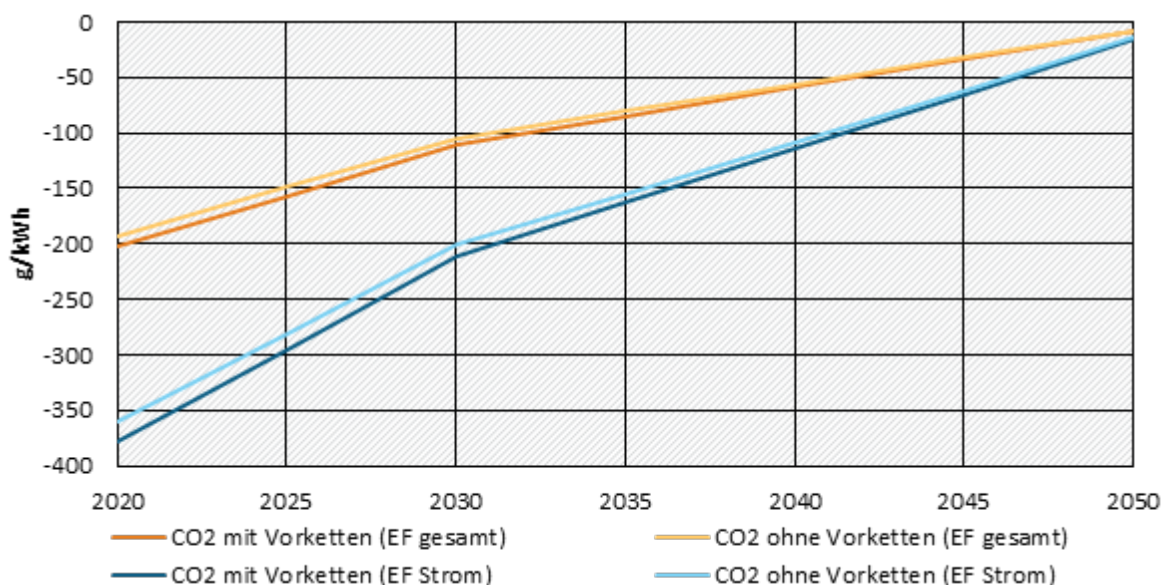
Abbildung 4-49: CO₂e-Emissionen im Ludwigshöviertel pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (kg/(a*m²))



Quelle: Eigene Berechnungen

Dieser Effekt spiegelt sich auch in Abbildung 4-50 wieder: im Jahr 2020 sind sowohl der Quartiers-Emissionsfaktor des gesamten Energieverbrauchs als auch der Quartiers-Emissionsfaktor des Stromverbrauchs stark negativ. Über die Zeit nähern sich beide einem Emissionsfaktor von null an.

Abbildung 4-50: Mittlerer Emissionsfaktor des gesamten Endenergieverbrauchs (gelb/orange) bzw. des Stromverbrauchs (hellblau/blau) im Ludwigshöviertel



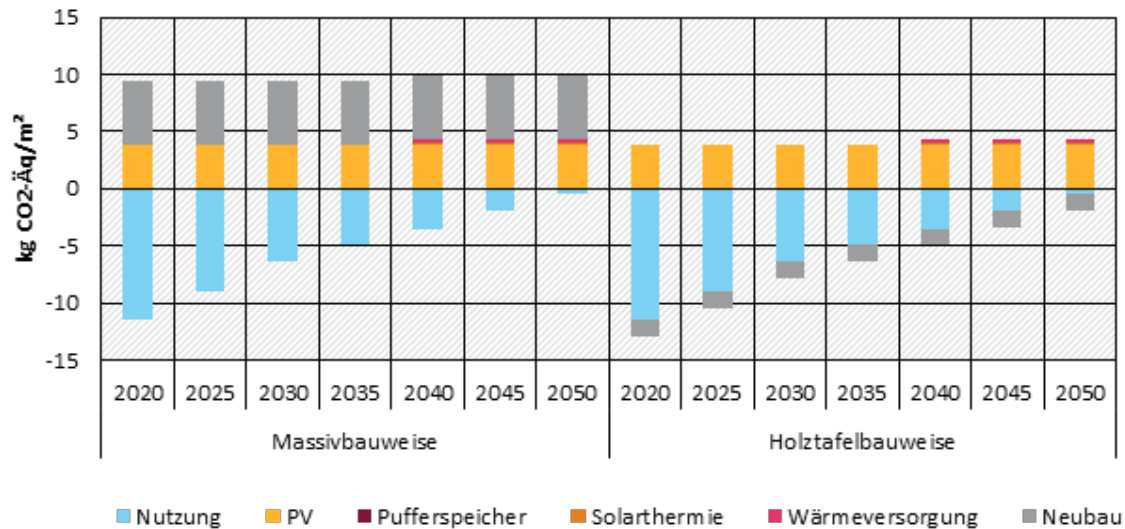
Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.2.4 Umweltwirkungen

Abbildung 4-51 bis Abbildung 4-57 zeigen die Ergebnisse der Umweltwirkungsabschätzung (Environmental Impact Assessment) für die Transformationspfade im Ludwigshöviertel. Um eine Vergleichbarkeit zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase zu gewährleisten, wurden die Umweltwirkungen der Herstellungsphase mittels der Lebensdauer der jeweiligen Bauteile bzw. Techniken auf Jahreswerte annuisiert. Dadurch können die jährlichen Umweltwirkungen der Nutzungsphase direkt mit denen der Herstellungsphase verglichen werden. Jeweils links sind die Werte für die konventionelle Massivbauweise aufgeführt, rechts die Werte für die Holztafelbauweise. Wärmeversorgung, Fenster, Solarthermie und Dämmung spielen hier im Vergleich nur eine sehr geringe Rolle. In allen untersuchten Wirkungskategorien liegen die Werte bei der konventionellen Massivbauweise signifikant höher als bei der Holztafelbauweise, beim GWP liegt das GWP aufgrund der gewählten Systemgrenze (nur Neubau, keine Entsorgung) im negativen Bereich aufgrund der Bindung des atmosphärischen Kohlenstoffs im Holz. Sobald das Gebäude abgerissen und das verbaute Holz entsorgt wird, z. B. über eine thermische Nutzung, wird der Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt. Dies liegt allerdings außerhalb des Betrachtungszeitraumes.

Abbildung 4-51 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen aus Nutzungs- und annuisierter Herstellungsphase in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Wohn- bzw. Nutzfläche (links Massivbauweise, rechts Holztafelbauweise). Vor allem in den Anfangsjahren zeigt die Nutzungsphase einen relevanten Anteil an den Ergebnissen, im Lauf der Jahre geht der Anteil der Nutzungsphase dann aber sehr stark zurück. Die Holztafelbauweise zeigt einen negativen Impact aufgrund der Bindung des atmosphärischen Kohlenstoffs im Holz.

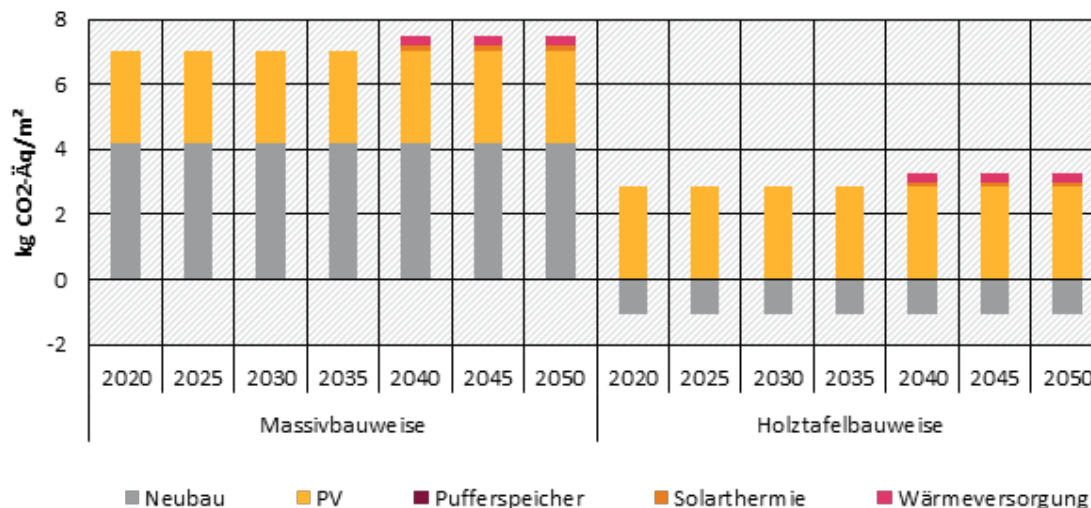
Abbildung 4-51: GWP in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-52 bis Abbildung 4-57 zeigen die Ergebnisse der für die Transformationspfade im Ludwigshöviertel aus der Herstellungsphase.

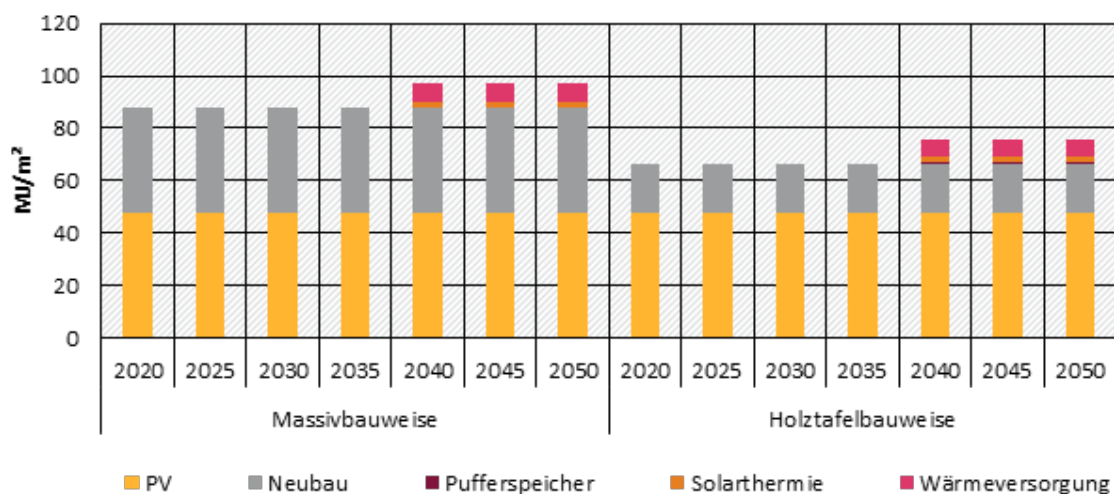
Abbildung 4-52 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links Massivbauweise, rechts Holztafelbauweise). In beiden Szenarien weist der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen, der jeweils identisch angesetzt ist, einen relevanten Anteil auf. Der Bau der Gebäude unterscheidet sich in den beiden Pfaden sehr stark. Während der Neubau im Szenario mit Massivbauweise ca. 60 % der Treibhausgasemission verursacht, zeigt das Szenario mit Holztafelbauweise hier eine Gutschrift aufgrund der Bindung des atmosphärischen Kohlenstoffs im Holz.

Abbildung 4-52: GWP in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-53 zeigt die annuierten Ergebnisse für den Verbrauch an Primärenergie (Summe aus PERE und PENRE) in MJ pro m² Bruttogeschossfläche (links Massivbauweise, rechts Holztafelbauweise). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (Massivbau ca. 50 %, Holzbau ca. 70 %). An zweiter Stelle steht der Neubau (Massivbau ca. 45 %, Holzbau ca. 28 %). Die Massivbauweise zeigt insgesamt einen signifikant höheren Primärenergieverbrauch. Die Wärmetechnik und die Solarthermie spielen erst in den späteren Jahren eine, wenn auch untergeordnete Rolle.

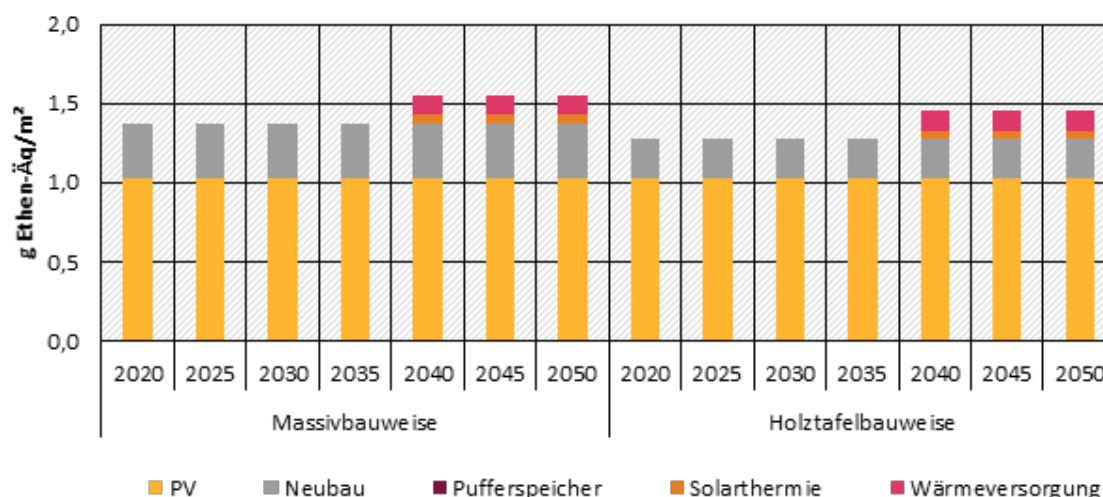
Abbildung 4-53: PE in MJ pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise



Quelle: Eigene Berechnungen

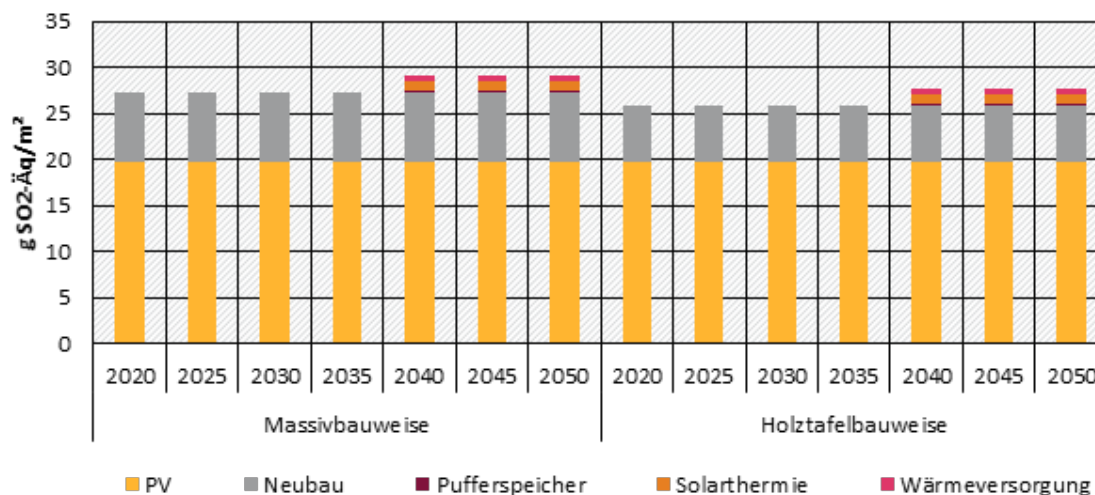
Abbildung 4-54 zeigt die annuisierten Ergebnisse für die Emission von Photooxidantien in kg Ethen-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links Massivbauweise, rechts Holztafelbauweise). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (Massivbau ca. 75 %, Holzbau ca. 80 %). Da die Massivbauweise beim Neubau zu etwas höheren Emissionen von Photooxidantien führt, weist diese Bauweise insgesamt einen etwas höheren Impact beim POCP auf (ca. 8 % höher als bei der Holzbauweise).

Abbildung 4-54: POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise



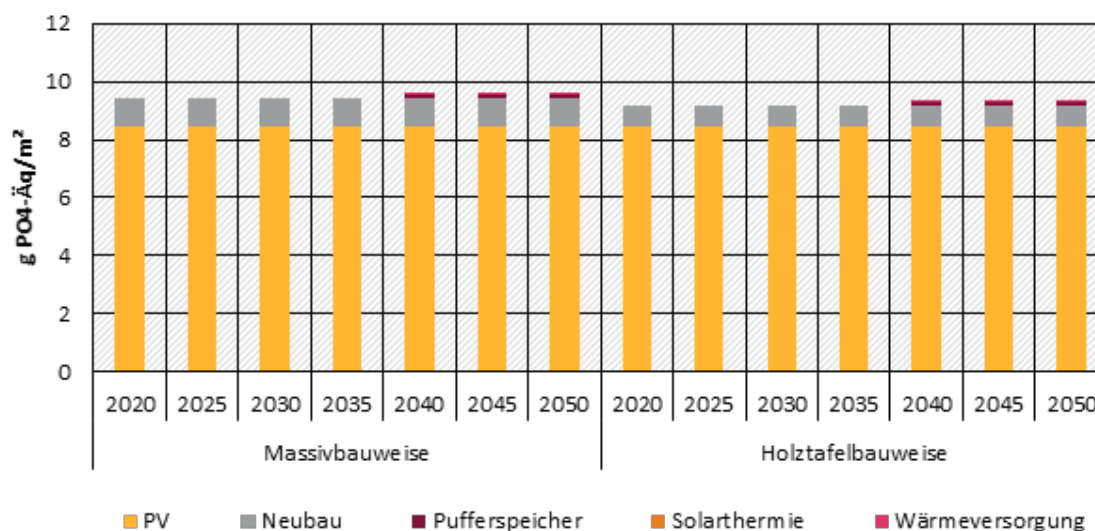
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-55 zeigt die annuisierten Ergebnisse für das Versauerungspotenzial in kg SO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links Massivbauweise, rechts Holztafelbauweise). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (Massivbau ca. 73 %, Holzbau ca. 76 %). Da die Massivbauweise beim Neubau zu etwas höheren Emissionen von Säurebildnern führt, weist diese Bauweise insgesamt einen etwas höheren Impact beim AP auf (ca. 5 % höher als bei der Holzbauweise).

Abbildung 4-55: AP in g SO₂-Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise

Quelle: Eigene Berechnungen

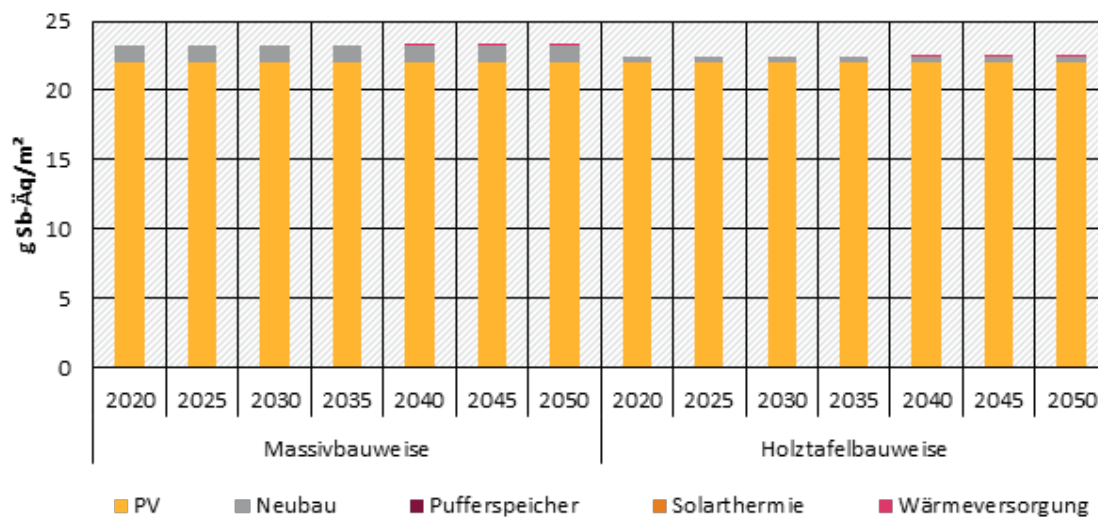
Abbildung 4-56 zeigt die annuisierten Ergebnisse für das Eutrophierungspotenzial in kg PO₄-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links Massivbauweise, rechts Holztafelbauweise). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen sehr stark (Massivbau ca. 89 %, Holzbau ca. 92 %). Da die Massivbauweise beim Neubau zu etwas höheren Emissionen beim Eutrophierungspotenzial führt, weist diese Bauweise insgesamt einen geringfügig höheren Impact beim AP auf (ca. 3 % höher als bei der Holzbauweise).

Abbildung 4-56: EP in g PO₄-Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-57 zeigt die annuierten Ergebnisse für den Verbrauch abiotischer Ressourcen in kg Sb-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links Massivbauweise, rechts Holztafelbauweise). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen sehr stark (Massivbau ca. 95 %, Holzbau ca. 98 %). Da die Massivbauweise beim Neubau zu etwas höheren Ressourcenverbräuchen führt, weist diese Bauweise insgesamt einen geringfügig höheren Impact beim ADPE auf (ca. 4 % höher als bei der Holzbauweise).

Abbildung 4-57: ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter BGF; links Massivbauweise; rechts Holztafelbauweise

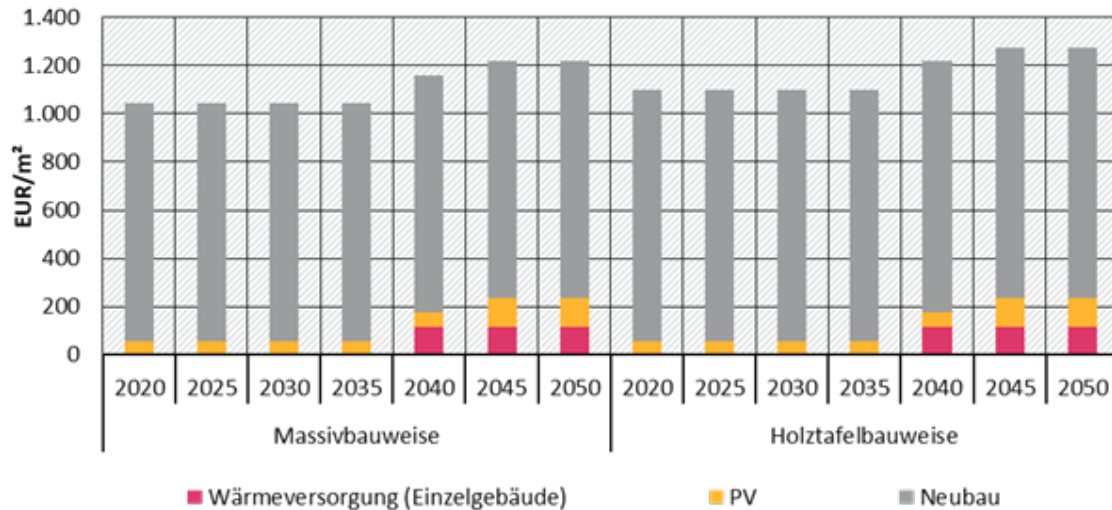


Quelle: Eigene Berechnungen

4.5.2.5 Kosten

Abbildung 4-58 zeigt die kumulierten Investitionskosten (in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche des Quartiers) in Fünf-Jahres-Schritten bis 2050 (links: Massivbauweise, rechts: Holztafelbauweise). Sie sind aufgeteilt in die Neubaukosten (darin enthalten sind die Kostengruppen 300 & 400, vgl. Baukosteninformationszentrum (BKI) (2018)), die Installationskosten der PV Anlagen sowie die im Jahr 2040 anfallenden Kosten für eine Erneuerung der Heizungsanlagen. Die Holztafelbauweise ist rund 5 % teurer als die konventionelle Massivbauweise.

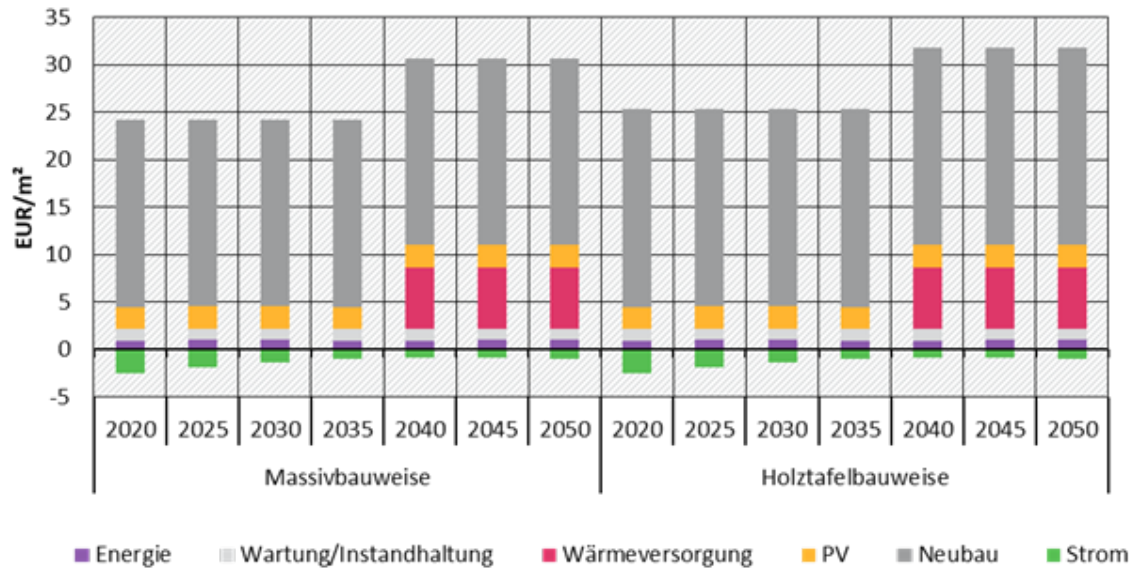
Abbildung 4-58: Kumulierte Investitionskosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche im Ludwigshöh-Viertel (links: Massivbauweise, rechts: Holztafelbauweise)



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-59 zeigt die Annuitäten der Investitionskosten (in EUR/m²) sowie die jährlichen laufenden Kosten für Wärmeenergie, Strom sowie Wartung/Instandhaltung. Unterschiede zwischen der konventionellen Massivbauweise (links) und der Holztafelbauweise (rechts) liegen lediglich in den schon in Abbildung 4-58 gezeigten Neubau-Investitionskosten. Die laufenden Kosten liegen deutlich niedriger als die annuisierten Investitionskosten. Dies ist auf den von Anfang an sehr hohen energetischen Standard der Gebäude zurückzuführen. Da die PV-Anlagen von Anfang an installiert sind, wird mehr Strom im Quartier erzeugt, als verbraucht wird (vgl. auch Abbildung 4-48). Der Überschussstrom wird entsprechend exportiert und mit sinkenden Sätzen vergütet (vgl. dazu auch Tabelle A3-5 im Anhang).

Abbildung 4-59: Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche im Ludwigshöh-Viertel (links: Massivbauweise, rechts: Holztafelbauweise)



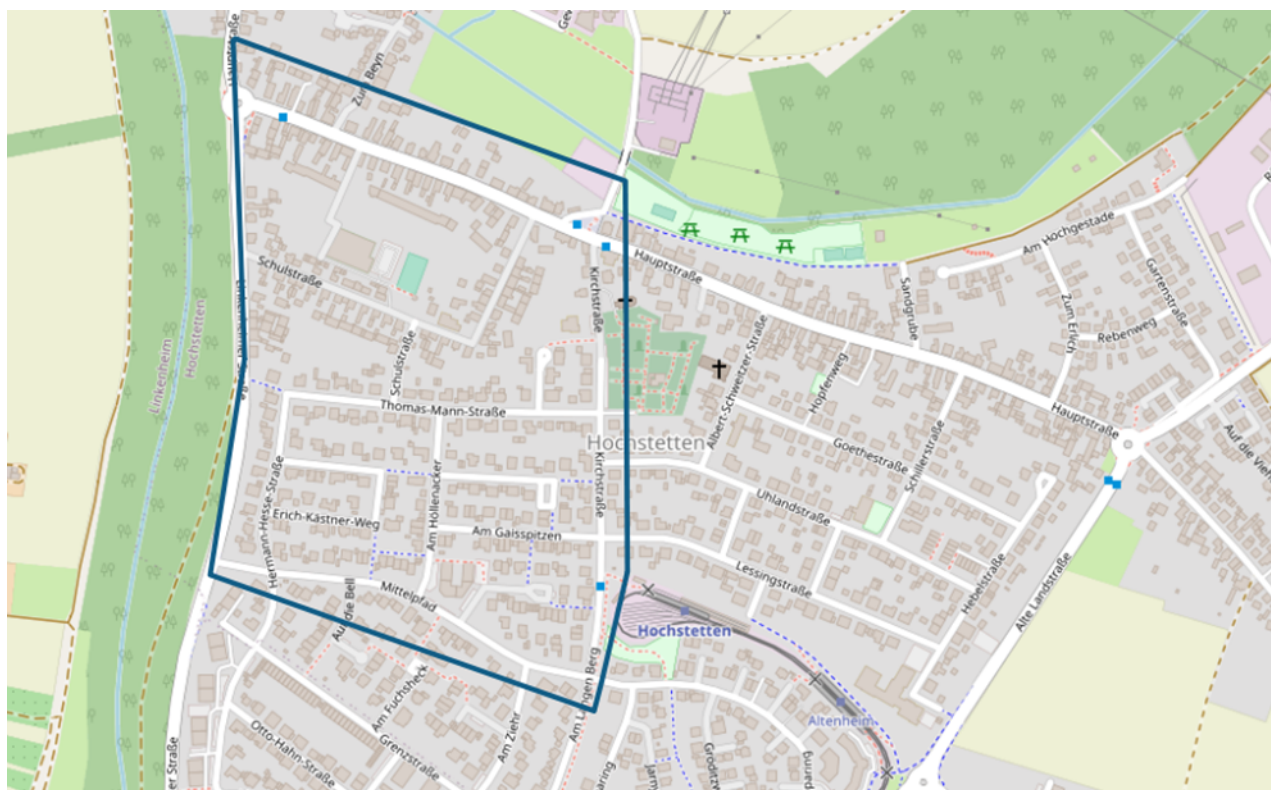
Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

4.6 Siedlungsgebiet „Linkenheim-Hochstetten“

4.6.1 Ausgangslage/Quartiersbeschreibung

Das untersuchte Gebiet ist Teil der Gemeinde Linkenheim-Hochstetten, die in Baden-Württemberg liegt und ca. 11.883 Einwohner zählt. In dem in der Modellierung betrachteten Ortsteil leben ca. 975 Personen. Das Gebiet umfasst einen älteren Ortsbereich mit Ein-, Zwei- und kleinen Mehrfamilienhäusern und einem Schulhaus sowie einen neueren Ortsteil, in dem überwiegend Einfamilienhäuser zu finden sind (Abbildung 4-60).

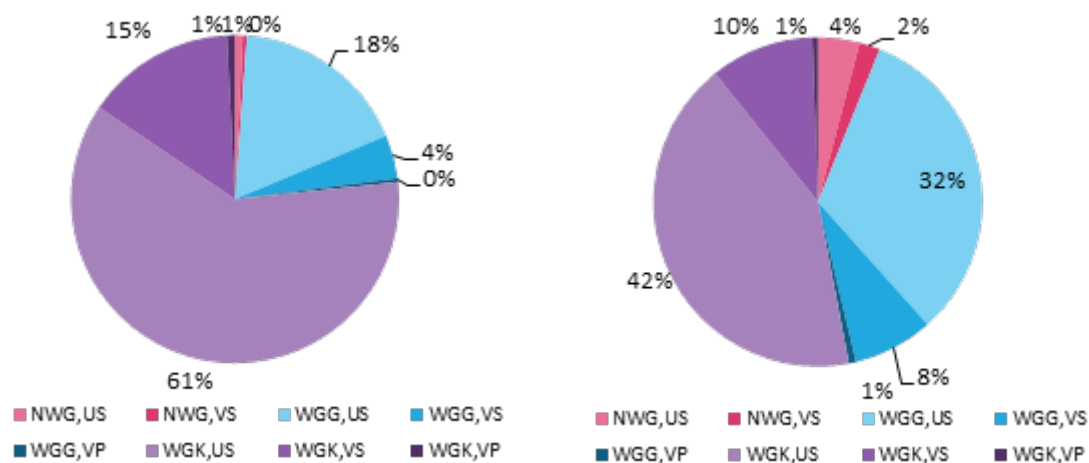
Abbildung 4-60: Lage des Stadtteils Linkenheim-Hochstetten



Quelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende (CC BY-SA 2.0)

Insgesamt befinden sich in dem Gebiet 197 Einfamilienhäuser, 57 Mehrfamilienhäuser, zwei Verwaltungsgebäude und ein Schulgebäude. Abbildung 4-61 stellt die Verteilung der Gebäude bzw. deren Flächen nach Größen sowie Sanierungsstand dar. In einem Teil des Quartiers besteht ein Fernwärmenetz, das mit Gas-BHKW versorgt wird und etwa die Hälfte der Gebäude versorgt.

Abbildung 4-61: Prozentuale Verteilung der Gebäudeanzahl (links) und -flächen (rechts) für Linkenheim-Hochstetten im IST Zustand



Quelle: Eigene Darstellung (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; US = unsaniert; VS = „vollsaniert“; VP = „vollsaniert plus“)

4.6.2 Transformationspfade

Die zwei für das Quartier Linkenheim-Hochstetten betrachteten Transformationspfade sind ein Pfad mit zentraler Quartierswärmeversorgung einerseits und ein Pfad mit dezentraler Einzelgebäudewärmeversorgung andererseits. Tabelle 4-12 gibt eine Übersicht über die im Berechnungs-Tool dafür gewählten Einstellungen.

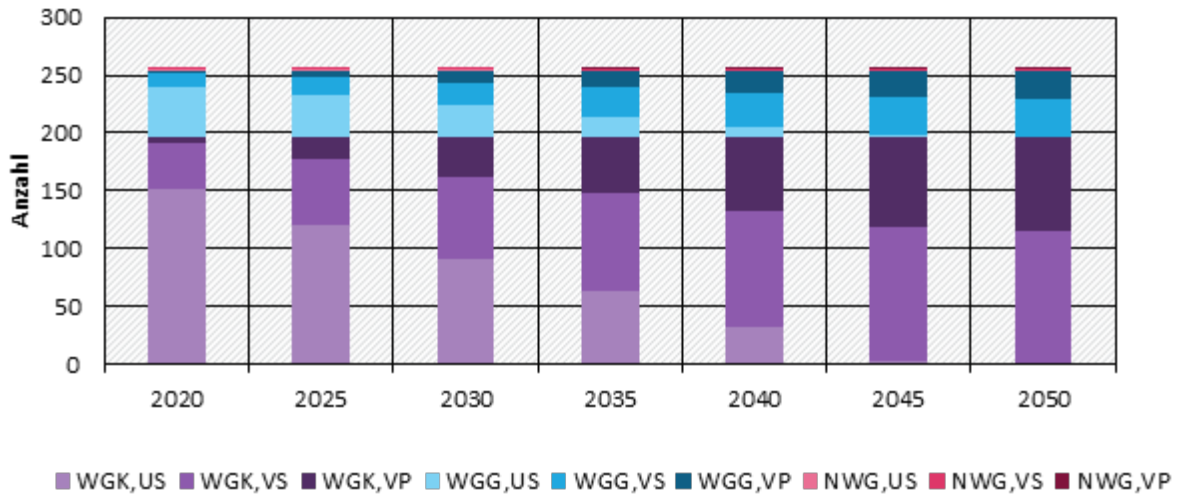
Tabelle 4-12: Transformationspfade für Linkenheim-Hochstetten

	Zentrale Wärmeversorgung	Dezentrale Wärmeversorgung
Sanierungsrate	3 % pro Jahr	3 % pro Jahr
Sanierungstiefe	50 % vollsaniert plus, 50 % vollsaniert	50 % vollsaniert plus, 50 % vollsaniert
Wärmeversorgungs-option	Ausweitung des Fernwärmenetzes (auf Basis Großwärmepumpe)	Dezentrale Wärmepumpen + Solarthermie, Rückbau des Fernwärmenetzes
PV-Zubaurate	3 % der für PV verfügbaren Dachfläche pro Jahr	3 % der für PV verfügbaren Dachfläche pro Jahr
Dämmmaterial	Konventionell (EPS)	Konventionell (EPS)

4.6.2.1 Entwicklung des Gebäudebestands

Abbildung 4-62 zeigt die Entwicklung des Gebäudebestands in dem untersuchten Gebiet in Linkenheim-Hochstetten. Mit der hinterlegten Sanierungsrate von 3 % erfolgt bis 2050 eine vollständige Sanierung des Gebäudebestands, wobei der Sanierungszustand sich etwa hälftig auf die Niveaus „vollsaniert“ bzw. „vollsaniert plus“ verteilt.

Abbildung 4-62: Entwicklung des Sanierungszustands je Gebäudekategorie bezogen auf die Anzahl der Gebäude für beide Transformationspfade in Linkenheim-Hochstetten

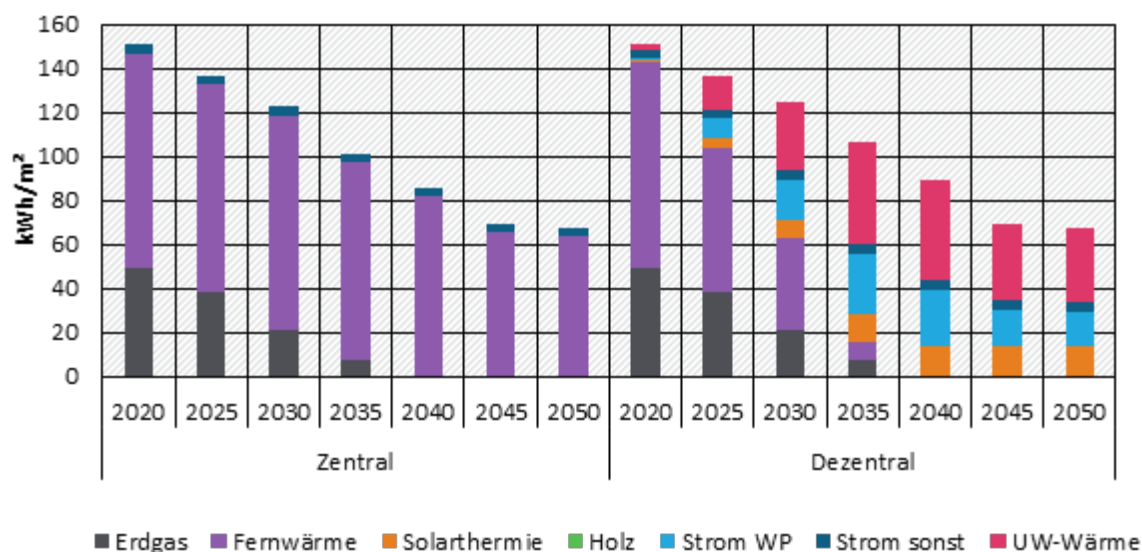


Quelle: Eigene Berechnungen (WGK = kleine Wohngebäude; WGG = große Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude; US = unsaniert; VS = „vollsanziert“; VP = „vollsanziert plus“)

4.6.2.2 Endenergieverbrauch

Abbildung 4-63 zeigt den Verlauf des Endenergiebedarfs nach Art der Wärmebereitstellung. Während im ersten Zielpfad der gesamte Wärmebedarf durch Fernwärme (+ Strom als Hilfsenergie) gedeckt wird, stellen die dezentralen Wärmepumpen sowie in geringerem Umfang die Solarthermie im zweiten Zielpfad die dominierenden Techniken dar.

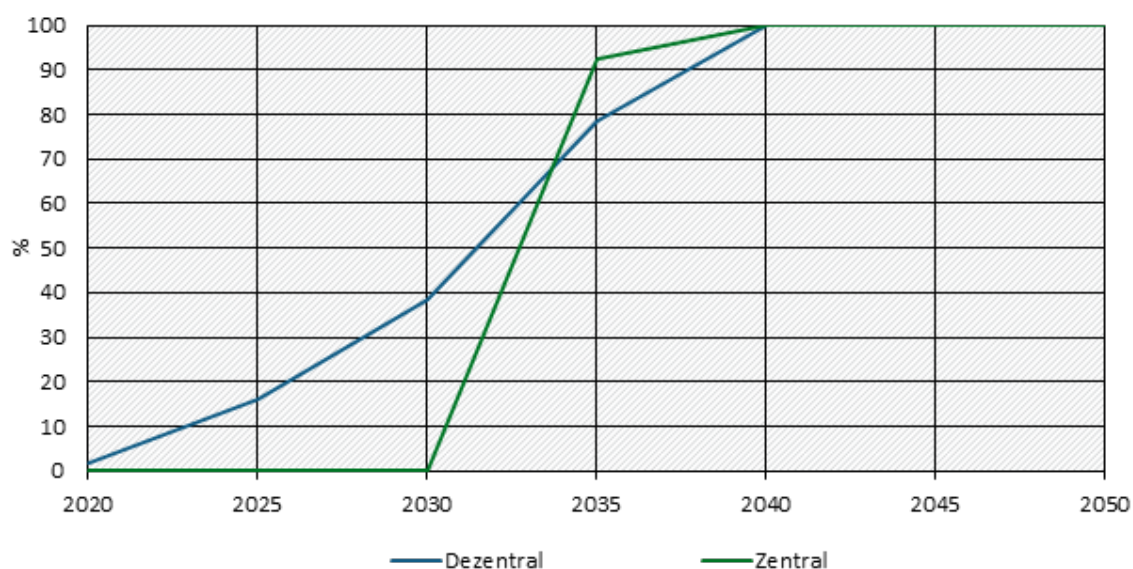
Abbildung 4-63: Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung in Linkenheim-Hochstetten pro Wohn- bzw. Nutzfläche (in kWh/(m²a)) (links: zentral, rechts dezentral)



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Da die Fernwärmeerzeugung in Linkenheim-Hochstetten innerhalb der Quartiersgrenzen erfolgt, spiegelt sich auch die Umstellung der Fernwärme-Versorgung im Jahr 2035 von Erdgas-BHKW auf elektrische Groß-Wärmepumpe wider. So zeigt Abbildung 4-64, wie der Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien 2035 sprunghaft steigt (links), wohingegen im dezentralen Transformationspfad dieser Anteil mit dem kontinuierlichen Einbau dezentraler Wärmepumpen langsamer ansteigt (rechts).

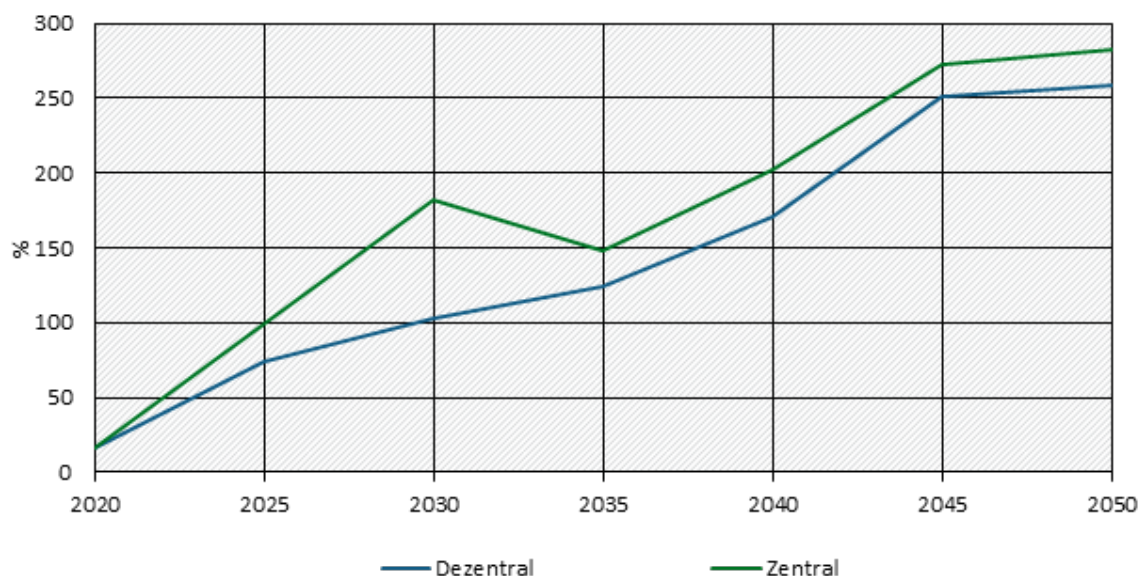
Abbildung 4-64: Anteil der im Quartier bereitgestellten erneuerbaren Energien am Quartiers-Wärmeverbrauch in Linkenheim-Hochstetten in %



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-65 zeigt den Anteil des mit PV erzeugten Stroms am Gesamtstrombedarf des Quartiers (beinhaltet hier Strom für die Gebäudekonditionierung und Haushaltsstrom der privaten Haushalte). In beiden Transformationspfaden übersteigt bereits ab dem Jahr 2025 die Menge an PV-Strom den jährlichen Stromverbrauch. Der hohe Anteil an PV-Strom hängt mit der Gebäudestruktur des Quartiers zusammen (deutlich höherer Anteil an Einfamilienhäusern im Vergleich zu den weiteren betrachteten Quartieren). Im Jahr 2050 wird im Transformationspfad mit zentraler Wärmeversorgung etwa dreimal so viel Strom erzeugt wie verbraucht, bei dem dezentralen Transformationspfad liegt der Wert etwa 10 % niedriger. Der Grund für die niedrigere Stromerzeugung durch PV im dezentralen Transformationspfad ist die Nutzungskonkurrenz der Dachflächen mit Solarthermieranlagen.

Abbildung 4-65: Anteil des mit PV bereitgestellten Stroms am Gesamtstrombedarf in Linkenheim-Hochstetten in %

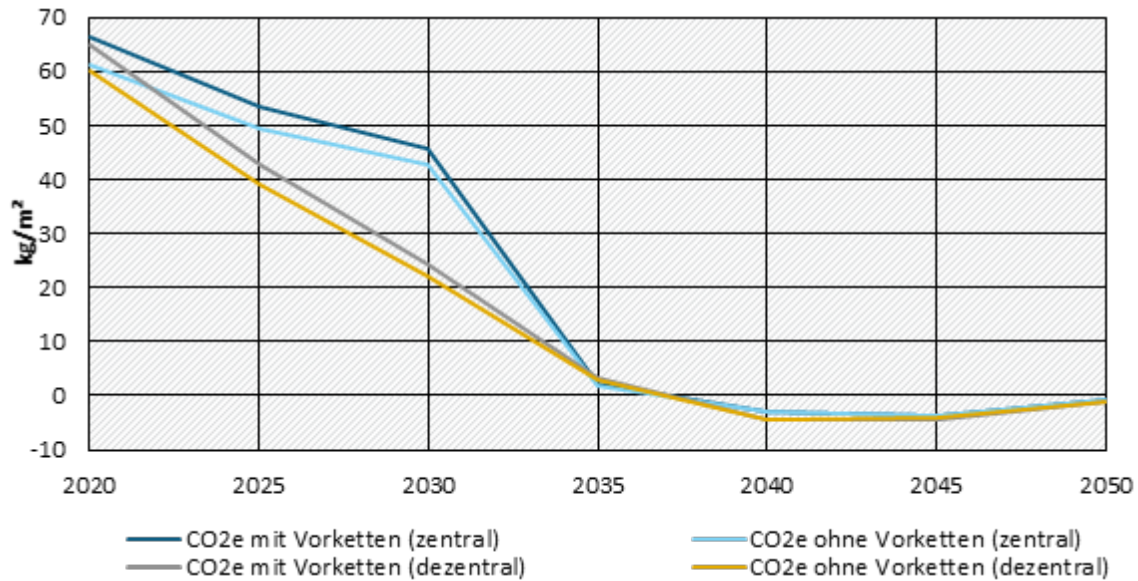


Quelle: Eigene Berechnungen

4.6.2.3 CO₂-Emissionen (Nutzungsphase)

Abbildung 4-66 zeigt die CO₂-Emissionen pro Quadratmeter und Jahr im Vergleich zwischen dem Pfad mit zentraler Wärmeversorgung sowie dem Pfad mit dezentraler Wärmeversorgung. Während die CO₂-Emissionen im Pfad mit dezentraler Wärmeversorgung kontinuierlich sinken, erfolgt im Pfad mit zentraler Wärmeversorgung ein sprunghafterer Abfall. Dies ist dadurch begründet, dass in letzterem größere Anteile der gesamten Wärmeversorgung im Zeitraum 2030 - 2035 zentral auf erneuerbare Energien umgestellt werden, während dies im dezentralen Pfad durch kontinuierliche Umstellung in den Einzelgebäuden erfolgt.

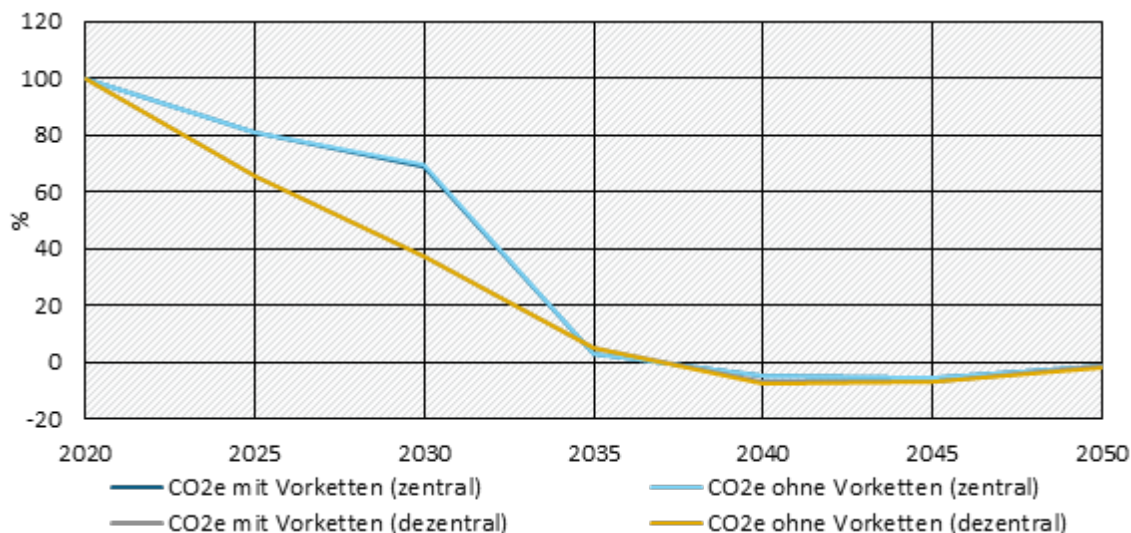
Abbildung 4-66: CO₂e-Emissionen in Linkenheim-Hochstetten pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche (kg/(a*m²)) im zentralen und dezentral Transformationspfad



Quelle: Eigene Berechnungen

Der prozentuale Rückgang der CO₂-Emissionen des Quartiers entlang der Transformationspfade ist in Abbildung 4-67 dargestellt. In beiden Fällen wird eine vollständige Dekarbonisierung erreicht, wobei diese im Pfad mit zentraler Wärmeversorgung etwas früher eintritt. Mit Blick auf die Gesamtemissionen im Zeitverlauf liegt allerdings der dezentrale Pfad niedriger als der zentrale Pfad. Dies liegt daran, dass der Emissionsfaktor der zentralen Wärmeversorgung vor der Umstellung auf die Groß-Wärmepumpe relativ hoch ist gegenüber dem Emissionsfaktor für die dezentralen Wärmepumpen, die im dezentralen Pfad kontinuierlich zugebaut werden.

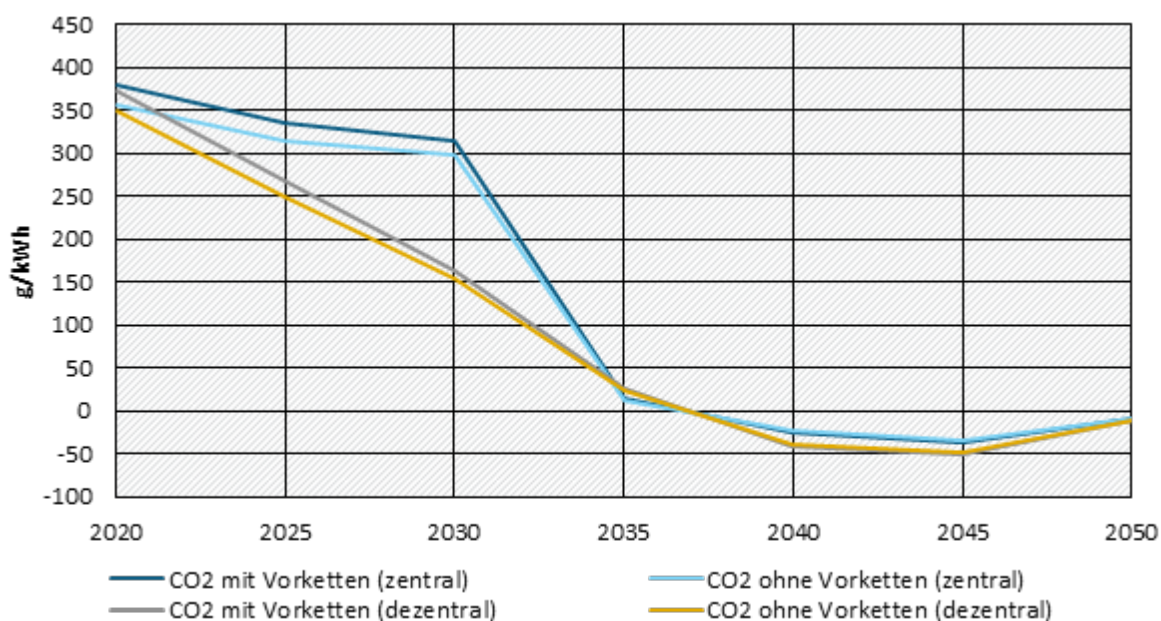
Abbildung 4-67: Verlauf der CO₂e-Emissionen in Linkenheim-Hochstetten prozentual gegenüber dem Startjahr



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-68 zeigt den mittleren Emissionsfaktor des gesamten Quartiers für den kombinierten Wärme- und Stromverbrauch in g CO₂/kWh (ohne Vorketten). Durch die hohe PV-Zubaurate sowie die ambitionierte Sanierungsrate wird in beiden Fällen ein negativer Emissionsfaktor erreicht.

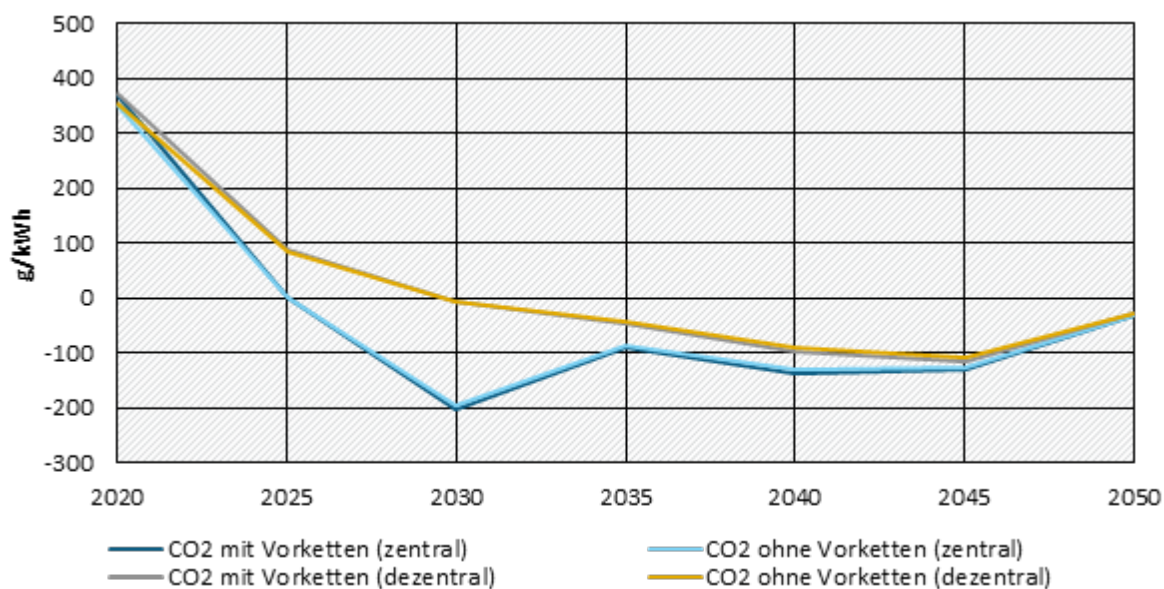
Abbildung 4-68: Mittlerer Emissionsfaktor in g CO₂/kWh des gesamten Endenergieverbrauchs in Linkenheim-Hochstetten



Quelle: Eigene Berechnungen

Für den Emissionsfaktor des Stromverbrauchs verstärkt sich dieser Trend und es werden negative Emissionsfaktoren von unter -200 g/kWh erreicht (Abbildung 4-69). Der Emissionsfaktor sinkt schon 2030 so stark, weil der PV-Ausbau kontinuierlich und mit hoher Rate erfolgt, so dass 2030 schon ca. 180 % der im Quartier verbrauchten Strommenge durch PV erzeugt werden (jahresbilanziell, vgl. Abbildung 4-65). Dies in Kombination mit der CO₂-Gutschrift für den ins übergeordnete Netz eingespeisten Strom, der zu diesem Zeitpunkt noch relativ dreckigen Systemstrom verdrängt, ergibt den stark negativen Emissionsfaktor.

Abbildung 4-69: Mittlerer Emissionsfaktor des Stromverbrauchs in g CO₂/kWh in Linkenheim-Hochstetten

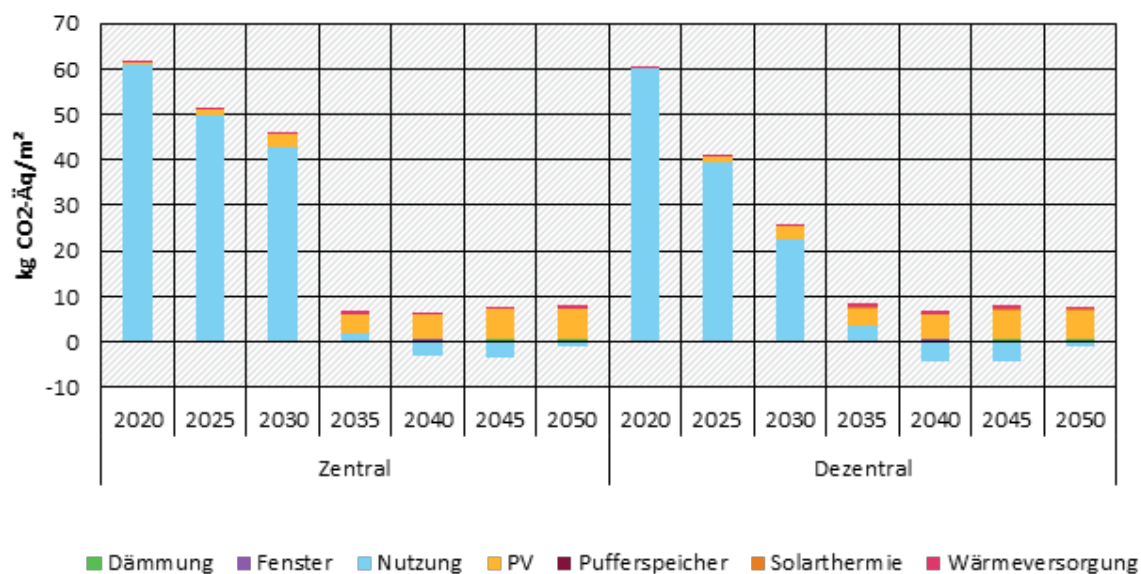


Quelle: Eigene Berechnungen

4.6.2.4 Umweltwirkungen

Abbildung 4-70 bis Abbildung 4-76 zeigen die Ergebnisse der Umweltwirkungsabschätzung (Environmental Impact Assessment) für die Transformationspfade im Siedlungsgebiet Linkenheim-Hochstetten über den Betrachtungszeitraum in Fünf-Jahres-Schritten. Während sich die Darstellung in Abbildung 4-70 auf Einzeljahre bezieht, sind die Werte in Abbildung 4-71 bis Abbildung 4-76 jeweils aufsummiert über die fünf Jahre. Jeweils links sind die Werte für die zentrale Wärmeversorgung, rechts die Werte für die dezentrale Wärmeversorgung aufgeführt.

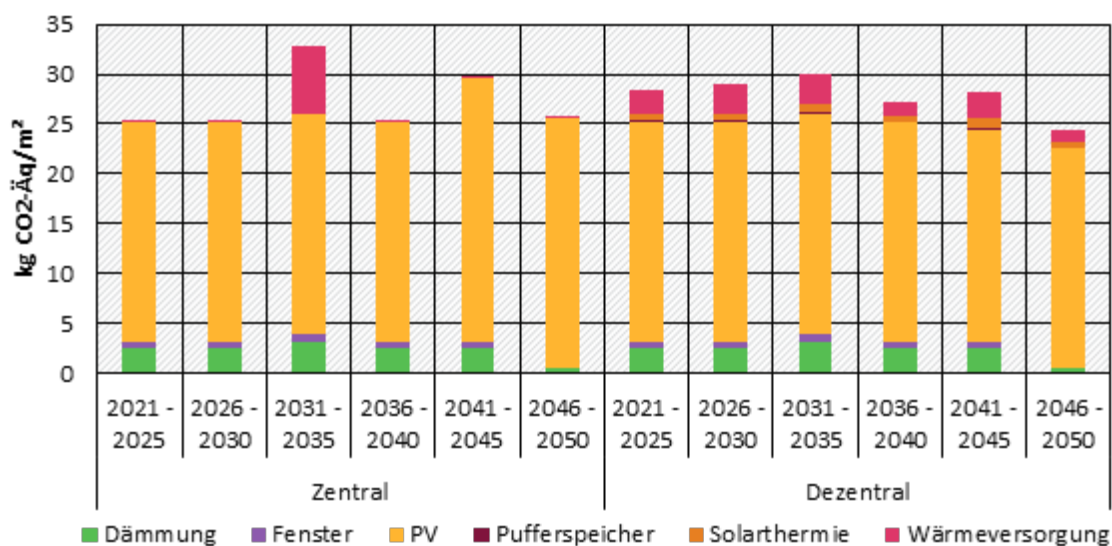
Abbildung 4-70 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen aus Nutzungs- und Herstellungsphase in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Wohn- bzw. Nutzfläche (links zentral, rechts dezentral). Vor allem in den Anfangsjahren werden die Ergebnisse stark dominiert von der Nutzungsphase, im Lauf der Jahre geht der Anteil der Nutzungsphase dann aber sehr stark zurück.

Abbildung 4-70: GWP in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-71 bis Abbildung 4-76 zeigen die Ergebnisse der für die Transformationspfade im Siedlungsgebiet Linkenheim-Hochstetten aus der Herstellungsphase.

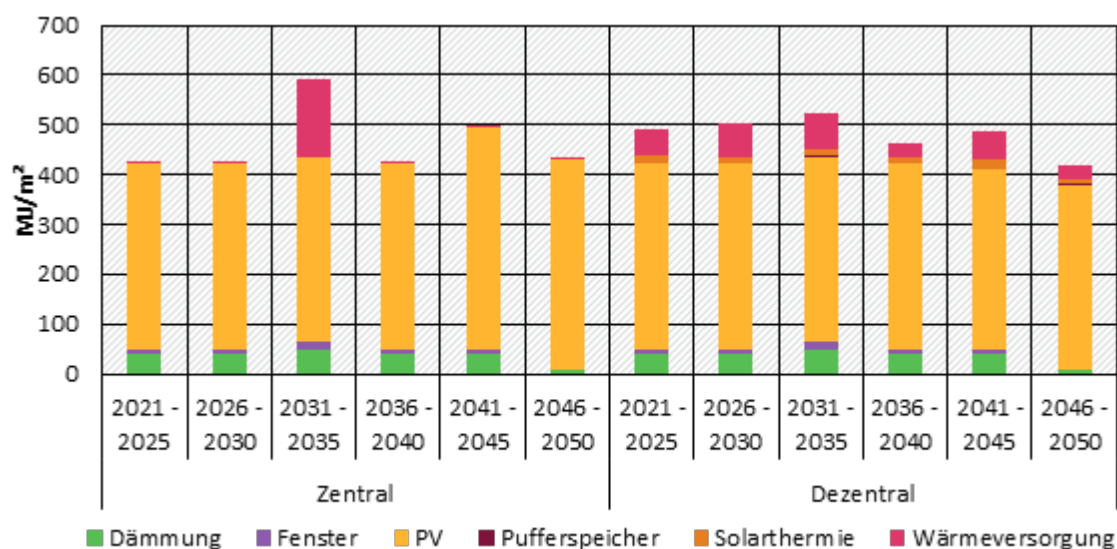
Abbildung 4-71 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Treibhausgasen in kg CO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links zentral, rechts dezentral). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (zentral ca. 90 %, dezentral ca. 80 %). Der Bau der Großwärmepumpe zeigt sich im relevanten Zeitraum 2031 - 2035, führt aber insgesamt zu niedrigeren Treibhausgasemissionen als die dezentrale Wärmeversorgung.

Abbildung 4-71: GWP in kg CO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-72 zeigt die Ergebnisse für den Verbrauch an Primärenergie (Summe aus PERE und PENRE) in MJ pro m² Bruttogeschossfläche (links zentral, rechts dezentral). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (zentral ca. 90 %, dezentral ca. 75 %). Der Bau der Großwärmepumpe zeigt sich im relevanten Zeitraum 2031 - 2035, führt aber insgesamt zu einem niedrigeren Primärenergieverbrauch als die dezentrale Wärmeversorgung.

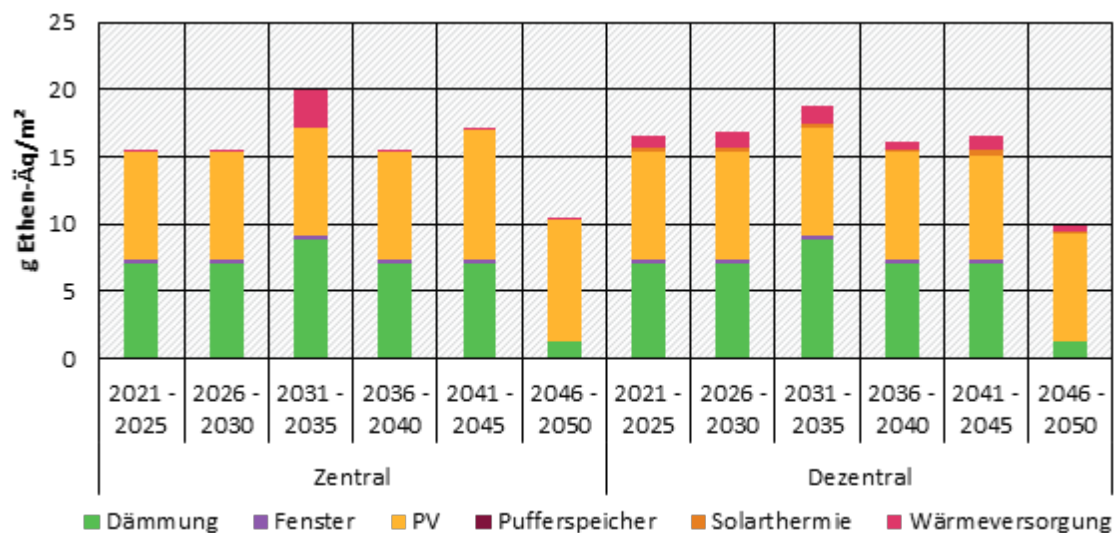
Abbildung 4-72: PERE/PENRE in MJ pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

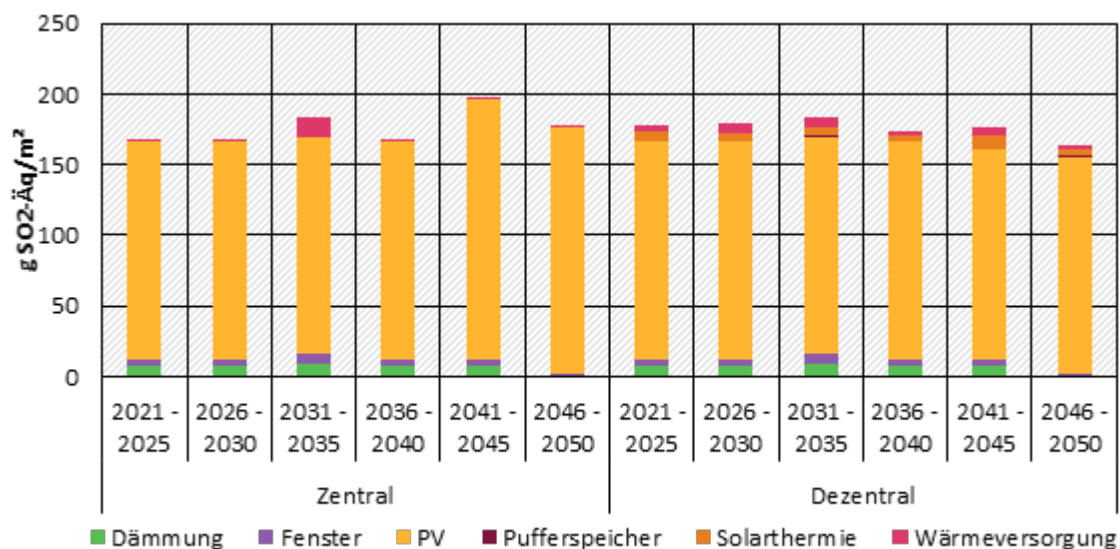
Abbildung 4-73 zeigt die Ergebnisse für die Emission von Photooxidantien in kg Ethen-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links zentral, rechts dezentral). In beiden Szenarien zeigen sich relevante Beiträge aus der Dämmung (ca. 45 %) und aus dem Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (ca. 50 %). Der Bau der Großwärmepumpe zeigt sich im relevanten Zeitraum 2031 - 2035, führt aber insgesamt zu niedrigeren Treibhausgasemissionen als die dezentrale Wärmeversorgung.

Abbildung 4-73: POCP in g Ethen-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-74 zeigt die Ergebnisse für das Versauerungspotenzial in kg SO₂-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links zentral, rechts dezentral). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (zentral ca. 92 %, dezentral ca. 87 %). Bei der Emission von Säurebildnern unterscheiden sich die beiden Szenarien aber insgesamt kaum.

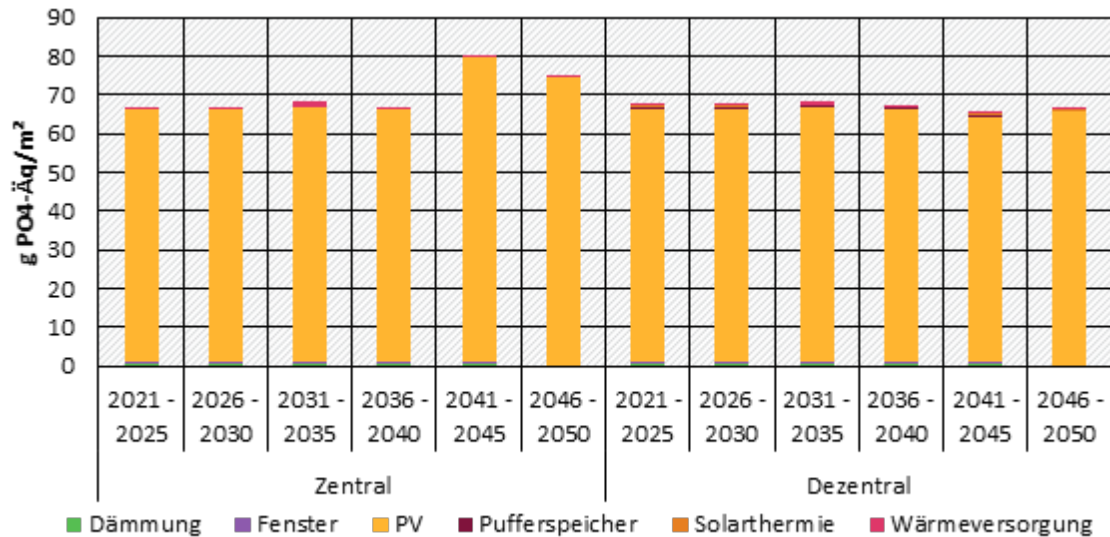
Abbildung 4-74: AP in g SO₂-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-75 zeigt die Ergebnisse für das Eutrophierungspotenzial in kg PO₄-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links zentral, rechts dezentral). In beiden Szenarien dominiert der

Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (zentral ca. 99 %, dezentral ca. 97 %). Die Gesamtemissionen sind beim EP im zentralen Szenario durch den höheren PV-Ausbau etwa höher als im dezentralen (um ca. 4 %).

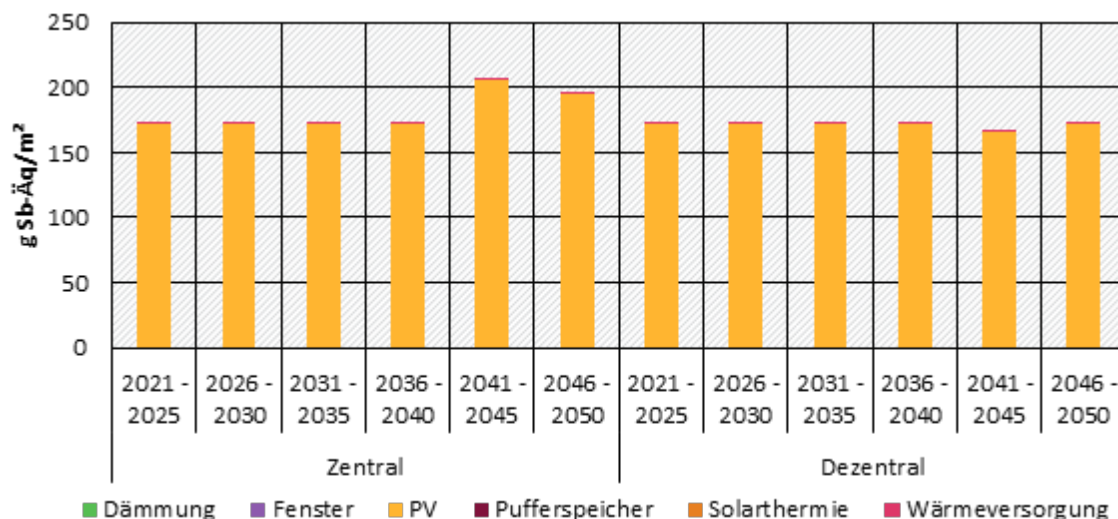
Abbildung 4-75: EP in g PO4-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-76 zeigt die Ergebnisse für den Verbrauch abiotischer Ressourcen in kg Sb-Äquivalenten pro m² Bruttogeschossfläche (links zentral, rechts dezentral). In beiden Szenarien dominiert der Ausbau der Photovoltaik-Anlagen (jeweils ca. 99,9 %). Der Gesamtverbrauch an abiotischen Ressourcen ist im zentralen Szenario durch den höheren PV-Ausbau etwa höher als im dezentralen (um ca. 6 %).

Abbildung 4-76: ADPE in g Sb-Äq pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche

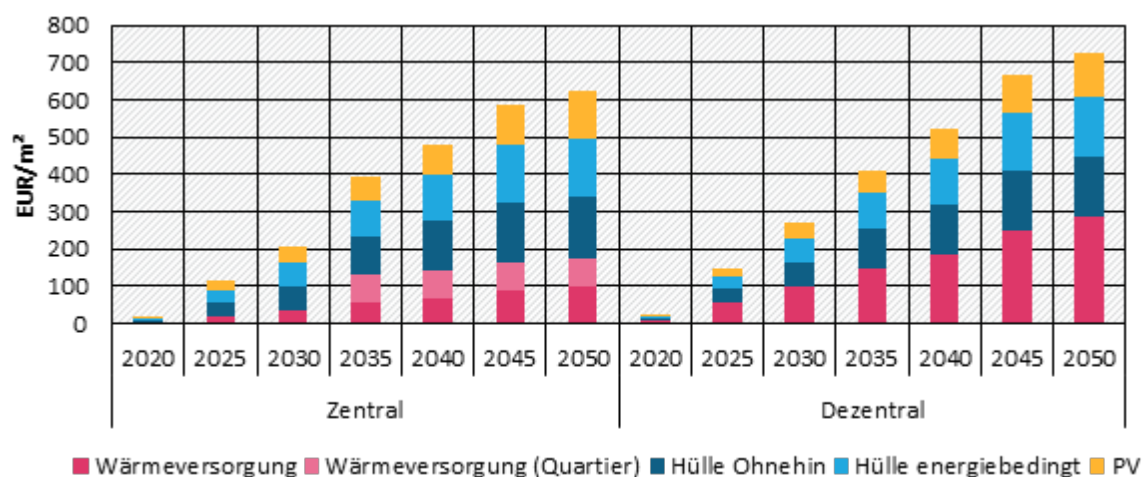


Quelle: Eigene Berechnungen

4.6.2.5 Kosten

Abbildung 4-77 zeigt die kumulierten Investitionskosten (in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche des Quartiers) in Fünf-Jahres-Schritten bis 2050. Sie sind aufgeteilt nach den Investitionskosten für die energetische Gebäudesanierung der Hülle (Ohnehinkosten und energiebedingte Mehrkosten), Investitionskosten für den Austausch der Heizungstechnik sowie die zugebaute Dach-PV-Anlagen. Aufgrund der identischen Annahmen zur Sanierungsrate sowie des PV-Ausbaus unterscheiden sich die beiden Pfade ausschließlich bezüglich der Kosten der Wärmeversorgung. Im Pfad mit zentraler Wärmeversorgung entstehen bei der Umstellung im Jahr 2035 zunächst höhere Kosten, im Verlauf bis 2050 unterscheiden sich die beiden Pfade allerdings nur geringfügig bezüglich der Kosten.

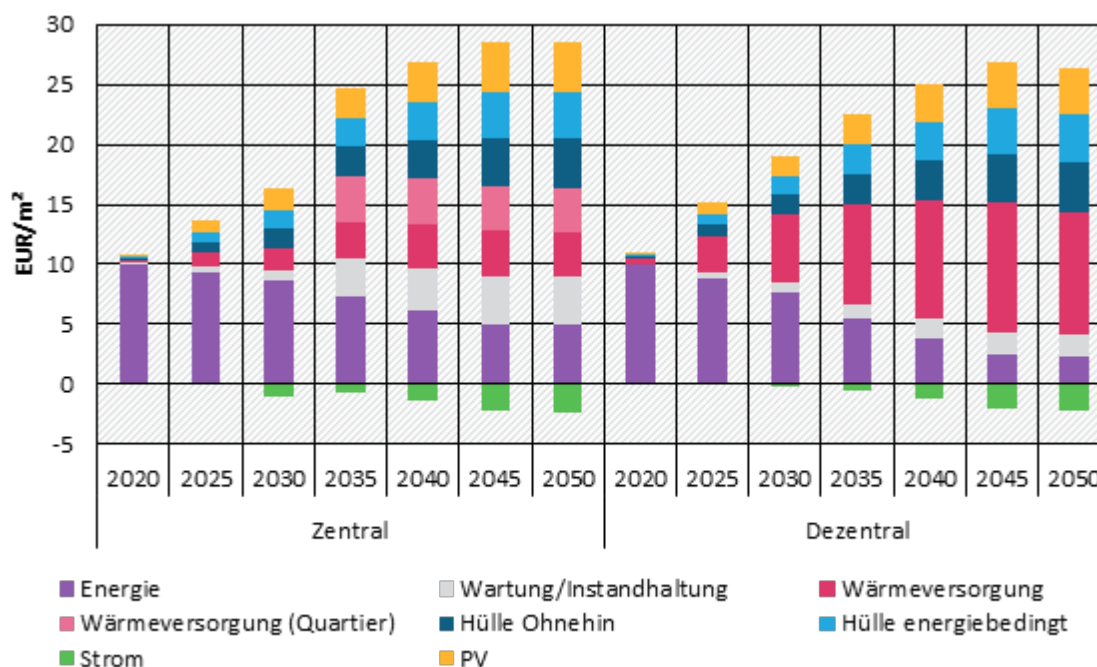
Abbildung 4-77: Kumulierte Investitionskosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Linkenheim-Hochstetten



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-78 zeigt die Annuitäten der Investitionskosten (in EUR/m²) sowie die jährlichen laufenden Kosten für Wärmeenergie, Strom sowie Wartung/Instandhaltung. Die (Wärme-) Energiekosten nehmen in beiden Pfaden spürbar ab, wohingegen die Wartungs- und Instandhaltungskosten leicht ansteigen.

Abbildung 4-78: Annuitäten der Investitionskosten sowie laufende Kosten in EUR pro Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche in Linkenheim-Hochstetten



Quelle: Eigene Berechnungen

5 Beitrag von Energiemanagementsystemen

Dieser Teil der Studie untersucht den Einsatz von Energiemanagementsystemen (EnMS) im Quartier. Dazu erfolgt eine Modellierung anhand des Beispiel-Quartiers Freiburg-Weingarten West. Die Modellierung in diesem Unterkapitel wird im Optimierungsmodell DISTRICT (Saad Hussein und Hübner 2017; Saad Hussein et al. 2015; Saad Hussein submitted 2017) abgebildet. Ziel der Analyse mit DISTRICT ist es, mit unterschiedlichen Szenarien die Wirkungen des Einsatzes von technischen EnMS (Bauknecht et al. 2017) vor allem auf Energie- und CO₂ Einsparungen zu untersuchen und zu bewerten. Die Analyse zeigt, welchen positiven Beitrag ein Quartiers-EnMS im Vergleich zu EnMS in Einzelgebäuden bringen kann. Dies wird in Relation zum Betrieb ohne Betriebsoptimierung und Informationsgewinn gesetzt, Grenzen der Betrachtung aufgezeigt sowie der Mehrwert eines EnMS diskutiert. Die Effekte von EnMS sind dabei stark von der Systemkonfiguration und den vorhandenen Flexibilitätten abhängig. Daher können die Ergebnisse dieses Kapitels als Fallstudie zur Diskussion beitragen, der Einsatz von EnMS im Quartier jedoch nicht abschließend allgemeingültig bewertet werden.

5.1 Beschreibung verwendeter Modelle

Die Hauptarbeit der Untersuchung ist im Optimierungsmodell DISTRICT umgesetzt, daher erfolgt zunächst eine Beschreibung des Modells. Danach wird das Lastprofilerzeugungsmodell synPRO sowie das eingesetzte Modell der Strompreisprofile beschrieben.

Die physikalisch-technischen und ökonomischen Gesetzmäßigkeiten und Bedingungen des Energiesystems auf Quartiersebene werden dabei durch lineare mathematische Gleichungen formuliert. Die zentrale Gleichung in einem Optimierungsmodell bildet die sogenannte Zielfunktion, deren Ergebnis optimiert, d.h. entweder minimiert oder maximiert, wird.

DISTRICT ist in der Programmiersprache GAMS formuliert. Unter der Bedingung der Deckung der Strom- sowie Wärmenachfrage zu jedem Zeitschritt werden die Gesamtkosten des abgebildeten Energiesystems minimiert, was dem realen Bestreben bei der Erstellung und Betrieb eines Energiesystems nahe kommt. Die Optimierung erfolgt durch den Solver CPLEX, dem das Simplex-Verfahren zu Grunde liegt. Der Simplex-Algorithmus nutzt die Eigenschaften linearer Optimierungsprobleme, dass der Lösungsraum konvex ist und die optimale Lösung in einer Ecke des Lösungsraums liegt und läuft von einer Ecke zur nächsten, bis der Zielfunktionswert nicht mehr verbessert werden kann (Kallrath 2013). Die Verwendung von Binärvariablen, mit denen z. B. Ja-Nein-Entscheidungen modelliert werden können, macht DISTRICT zu einem gemischt-ganzzahligen linearen Modell. Da für jede Kombination von Binärvariablen eine eigene Lösung existiert, spannt sich ein Kombinationsbaum mit 2^n möglichen Lösungen auf, bei denen n die Anzahl der Binärvariablen widerspiegelt. Im theoretischen „worst-case“ wächst der Zeitaufwand für die Lösung von gemischt-ganzzahligen Problemen exponentiell mit der Zahl der diskreten Variablen, weil sämtliche mögliche Kombinationen der Binärvariablen untersucht werden müssen.

Ein Energiesystem besteht in DISTRICT aus einer Anzahl von Knoten, die jeweils ein Gebäude oder Ort, wie z. B. eine Transformatorstation innerhalb des Energiesystems, repräsentieren. Für jedes Gebäude werden Jahreslastprofile in stündlicher Auflösung für die Wärme-, Kälte und Stromnachfrage hinterlegt, die aus zentraler oder dezentraler Erzeugung gedeckt werden muss.

Die Wärmeprofile sind zusätzlich abhängig vom Sanierungszustand des Gebäudes. Dabei kann die Sanierung einzelner Gebäude über die Wahl des Sanierungsstandards abgebildet werden. Abhängig vom Sanierungsstandard ändert sich die Vorlauftemperatur der jeweiligen Heizsysteme der Gebäude. Durch diese Integration unterschiedlicher Vorlauftemperaturen je nach Sanierungsstandard können Synergieeffekte zwischen dem Ausbau und Betrieb von Wärmepumpen und der Sanierungsstandards untersucht werden, da Wärmepumpen bei geringeren Vorlauftemperaturen höhere Wirkungsgrade erreichen können und somit ihre Wirtschaftlichkeit steigt.

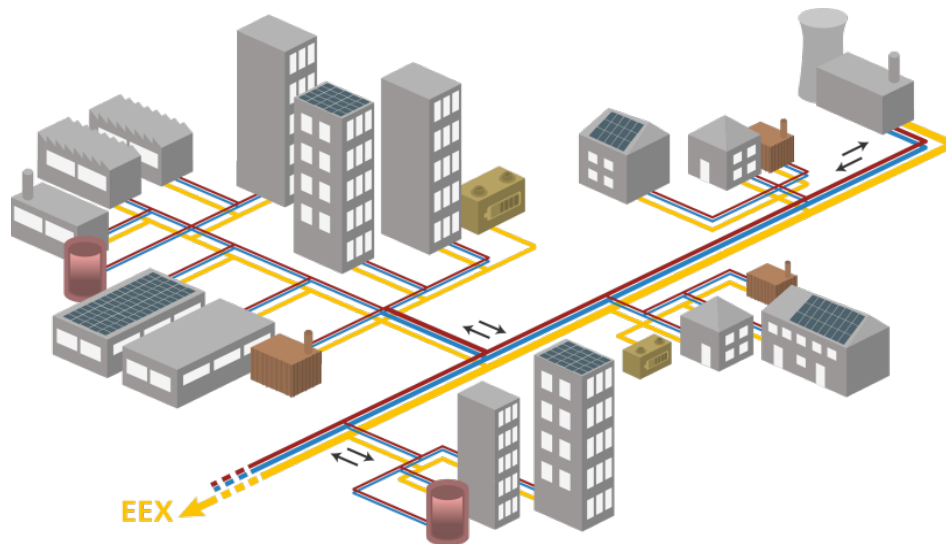
Der Vollständigkeit halber wird in diesem Abschnitt die Verwendung und der Zubau von neuen Techniken in DISTRICT erläutert. Die Erzeugung und Speicherung von Energie muss stets in den Grenzen der installierten Kapazität der betroffenen Technik stattfinden. Während der Optimierung können sowohl eine Auswahl über die eingesetzten Techniken getroffen werden, als bei Bedarf auch zusätzliche Techniken für Erzeugung, Speicherung und Verteilung installiert oder ausgebaut werden. Neue Techniken werden generell ausgebaut, wenn diese den Energiebedarf kostengünstiger decken können als die zu Beginn installierten Techniken, oder falls es zu Kapazitätsengpässen kommt und der Bedarf mit den bereits installierten Techniken nicht gedeckt werden kann. Zu Engpässen kann es zum Beispiel bei den Stromnetzen durch eine Elektrifizierung des Wärmesektors und einen damit einhergehenden steigenden Strombedarf kommen. Ein weiterer Grund für einen Neubau bzw. Technikaustausch können die Einhaltung wichtiger Zusatzbedingungen sein, wie z. B. das Unterschreiten eines bestimmten CO₂-Limits. Für jede Technik wird die erwartete Lebensdauer definiert. Bei Überschreitung dieser Lebensdauer wird die Technik im Modell abgebaut und das Modell muss entscheiden, wie die abgebaute Erzeugungskapazität ersetzt wird, um den Bedarf weiterhin decken zu können. Die Entscheidungskriterien sind analog zu einem Neubau einer Technik die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung weiterer Ziele, z. B. der Einhaltung von CO₂-Emissionszielen. Es wird entweder die gleiche Technik installiert oder es wird eine neue Technik gewählt, die den Energiebedarf günstiger decken kann und den definierten Zielen gerecht wird.

Die Option des Zubaus von weiteren Leistungen wurde in der Analyse des EnMS nicht angewandt. Stattdessen werden zur Abbildung von Energieerzeugungs- und Speichertechniken die Kapazitäten bereits installierter Techniken (Photovoltaik, Wärmepumpen, etc.) für jedes Gebäude hinterlegt. Dabei werden die optimalen Kapazitäten bereits im Voraus in Kapitel 4 bestimmt und ein Engpass sowie altersbedingter Austausch ist ausgeschlossen. Zur Berechnung der Kosten für Betrieb, Wartung und Instandhaltung der Techniken werden unterschiedliche fixe und variable Betriebskosten hinterlegt. Diese werden auf Grundlage der in AP1 erarbeiteten Daten festgelegt.

Zudem ist ein Versorgungsnetz mit einem Knotenbilanzmodell modelliert, das die verschiedenen Knoten über Leitungen bestimmter Länge und Kapazität miteinander verbindet und den Transport von Strom und Wärme ermöglicht. Ein Knoten bildet dabei den Netzanschlusspunkt eines Gebäudes ab. Die Knotenbilanz gewährleistet, dass die Energiebilanz aus Netzentnahme, Netzeinspeisung und Energietransfer zwischen den benachbarten Knoten im Versorgungsnetz ausgeglichen ist. Über die Länge der Leitung werden die Leitungsverluste bestimmt. Die Kapazität der Leitung begrenzt die maximal übertragbare Leistung eines Netzstranges. Analog zu den Erzeugern und Speichern können Potentiale für den Netzausbau hinterlegt werden. Eine

abstrahierte graphische Darstellung von DISTRIC ist in Abbildung 5-1 zu sehen, Abzweigungen in den abgebildeten Netzen können dabei als Netzknoten angesehen werden. Strom und Fernwärme können von außerhalb des Quartiers importiert werden. Der Stromimport erfolgt an einer Transformatorstation zum nächsthöheren Stromnetz und wird über eine eigene Variable modelliert, die in das Knotenbilanzmodell des Stromnetzes mit einfließt. Die importierten Strommengen können mit dem Börsenstrompreisprofil der European Energy Exchange (EEX) und möglichen weiteren Preisbestandteilen bepreist werden und gehen so in die Zielfunktion mit ein. Der Import der Fernwärme erfolgt analog am Ort, an dem das Wärmenetz an die Grenze des Bilanzraums stößt zu eigens definierten Preisen. Sowohl für den Betrieb der Energieerzeugungsanlagen als auch für den Energiebezug von außerhalb wird über einen CO₂-Emissionsfaktoren der CO₂-Ausstoß im modellierten Gebiet stundengenau errechnet.

Abbildung 5-1: Schema des DISTRIC Modells



Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer ISE

Mit diesen beschriebenen Eigenschaften des Modells lassen sich eine Vielzahl unterschiedlicher Situationen und Szenarien abbilden. Es lässt sich sowohl ein gesamtes Energiesystem mit den installierten Techniken und vorherrschenden Gebäudestandards als Status Quo definieren und der Betrieb optimieren. Durch die Vergabe von CO₂-Grenzen können Vorgaben zum maximalen CO₂-Ausstoß des modellierten Energiesystems getroffen und so der Lösungsraum weiter eingeschränkt werden.

Die elektrischen Lastprofile werden mit der Software synPRO erzeugt. Bei synPRO handelt es sich um ein stochastisches Bottom-Up-Modell zur Generierung von Lastprofilen. SynPRO ermittelt z. B. den Strombedarf ausgehend von statistischen Verteilungen des Nutzerverhaltens. Damit wird der Bedarf einzelner (Haushalts-) Geräte simuliert und anschließend auf Häuserebene aggregiert (Fischer et al. 2015). Der Heizwärmebedarf wird in ähnlicher Weise ebenfalls mit synPRO erzeugt. Die Berechnung basiert im Wesentlichen auf der DIN EN ISO 13790 und wird gleichermaßen durch statistische Einflüsse aus dem Nutzerverhalten ergänzt. Die Nachfrage nach Warmwasser wird ausschließlich basierend auf dem Nutzerverhalten

berechnet (Fischer et al. 2016). Als Eingabedaten für synPRO werden die Gebäudetypologie und die Bewohnerstruktur benötigt. Diese werden aus den Arbeiten aus AP1 und den Vorarbeiten des Öko-Instituts in AP3 abgeleitet.

Die viertelstündlichen Profile der zukünftigen Strom-Börsenpreise bis 2035 stammen aus einer Preissimulation des House of Energy Market Finance der Uni Duisburg-Essen, die für das Fraunhofer ISE angefertigt wurde³¹. Der Preissimulation wurde eine Prognose des zukünftigen Kraftwerksparks und den erwarteten Stromerzeugungskosten auf Basis der B Szenarios für 2025 und 2035 des Netzentwicklungsplans 2025 aus dem Jahr 2015 (Übertragungsnetzbetreiber 2014) zu Grunde gelegt, worauf über die fundamentalen Marktzusammenhänge (z. B. Merit-Order) die Preiszeitreihen simuliert werden. Für das Jahr 2035 wurden die Prognosen für den Kraftwerkspark im Vergleich zum Netzentwicklungsplan angepasst, siehe Tabelle A4-1 im Anhang. Die Kapazitäten erneuerbarer Energien wurde erhöht, während Stein- und Braunkohle reduziert wurden. Zudem wurde von einem Anstieg des CO₂-Preises auf 60 €/t CO₂ bis zum Jahr 2035 ausgegangen, im Jahr 2020 liegt dieser noch bei 8 €/t CO₂. Die Ergebnisse der Simulation sind als Zeitreihen in DISTRICT hinterlegt und enthalten auch die Information über den CO₂-Gehalt des Strommix bzw. auch den Anteil der erneuerbaren Energien im Gesamtsystem. Es ergeben sich für die betrachteten Stützjahre mittlere Strompreise von 27,2 €/MWh im Jahr 2020 und 69,5 €/MWh im Jahr 2035, die mittleren CO₂-Emissionen betragen dabei 0,499 t/MWh für 2020 und 0,24 t/MWh im Jahr 2035. Somit können unterschiedliche Ziele für das Quartier gesetzt werden, bei denen auch der Stromimport von außerhalb des Quartiers in die Bilanzierung eingeht.

5.2 System Definition und Annahmen

Im folgenden Unterkapitel wird die Fallstudie vorgestellt. Dazu werden vorgenommene Eingangsparameter und Annahmen vorgestellt. Die Szenarienauswahl wird aufgezeigt und die angewandte Vergleichslogik beschrieben.

5.2.1 Ausgangslage/Quartiersbeschreibung

Das Gebiet Weingarten-West befindet sich im Freiburger Stadtteil Weingarten und ist 2006 in das Programm Soziale Stadt aufgenommen worden. Das Gebiet ist in Kapitel 4.4 weiter beschrieben.

Für die Betrachtung in DISTRICT werden die Gebäudetypen aus der Studie „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ verwendet, in der 9 Wohngebäudetypen und 10 Nichtwohngebäudetypen mit jeweils 3 Sanierungszuständen definiert sind (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) 2017). Für jedes Gebäude werden die Bedarfsdaten anhand des Gebäudetyps und des Sanierungszustandes auf Grundlage der DIN 4108, bzw. 4701-10 berechnet (vgl. auch Kapitel 4.2.1).

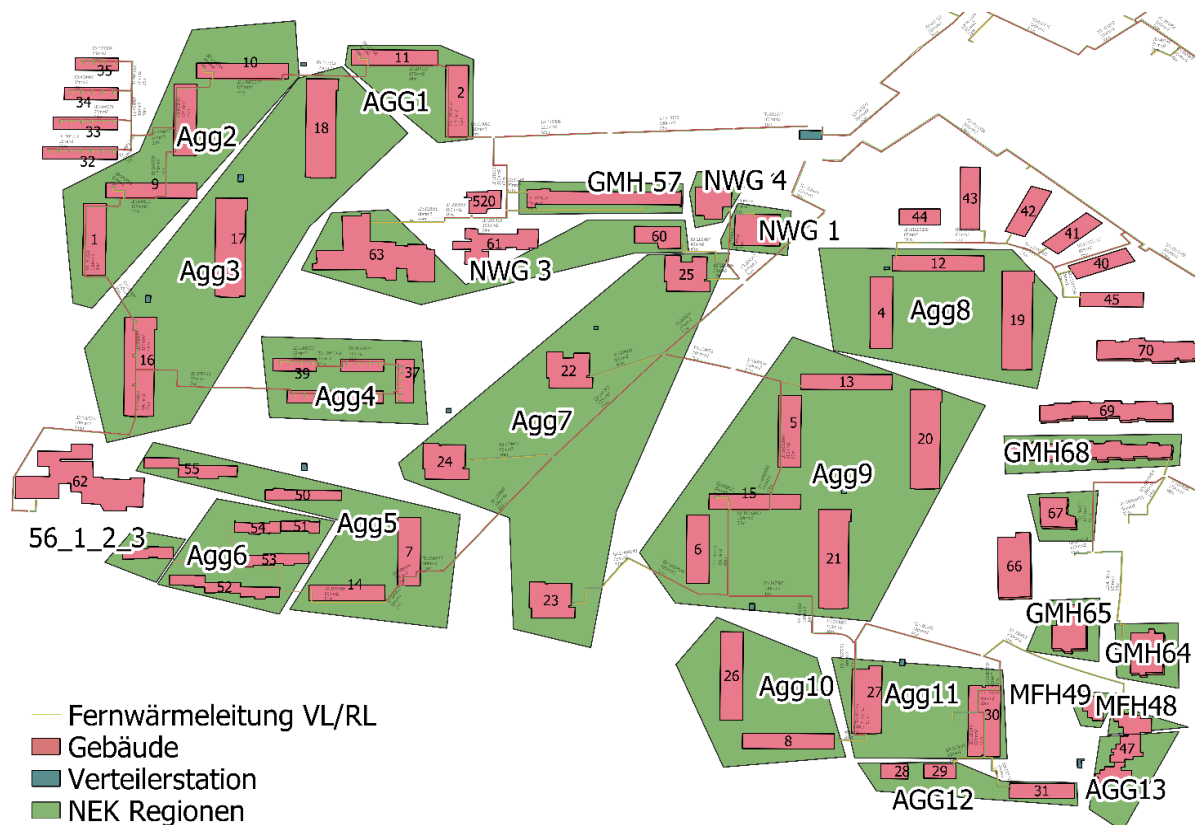
Aufgrund der hohen Anzahl an Gebäuden im betrachteten Gebiet und um einen netzdienlichen Betrieb zu gewährleisten, wurden mehrere Gebäude zu Gebäudeclustern aggregiert. Dies reduziert die Rechenzeiten der mathematischen Optimierung drastisch. Gleichzeitig wird durch die Aggregation typgleicher Gebäude sichergestellt, dass wenig bis keine Informationen verloren

31 Provided by HEMF, Essen, 2017

gehen (Jan von Appen 2014). Die aggregierten Gebäudecluster sind in Abbildung 5-2 dargestellt. So ist z. B. in Aggregationscluster 3 die Zusammenfassung von 3 Mehrfamilienhäusern sichtbar. Die Gebäudecluster basieren auf der KlineG-Typologie (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) 2017). Dabei werden typgleiche Gebäude mit ähnlichen Eigenschaften und Bedarfen zusammengeführt und die Nachfrageprofile der typgleichen Gebäude summiert. Die gesamten Energiebedarfe und Leistungsspitzen des Quartiers werden durch die Aggregation nicht verändert, sodass eine wirkungsgleiche Betrachtung ermöglicht wird. Das reale Strom- und Wärmenetz wird ebenfalls aggregiert, um den aggregierten Gebäudeclustern Rechnung zu tragen. Dabei werden die grundlegende Struktur sowie die Leitungskapazitäten der Netze übernommen (siehe Abbildung 5-2 für das Wärmenetz und Abbildung 5-3 für das Stromnetz). Im Stromnetz sind die vorhandenen Transformatoren und Mittelspannungsleitungen so großzügig dimensioniert, dass hier davon auszugehen ist, dass diese keine Engpässe verursachen. Daher wurde auf eine gesonderte Betrachtung der Transformatoren zugunsten der einfacheren Lösbarkeit der Optimierung verzichtet.

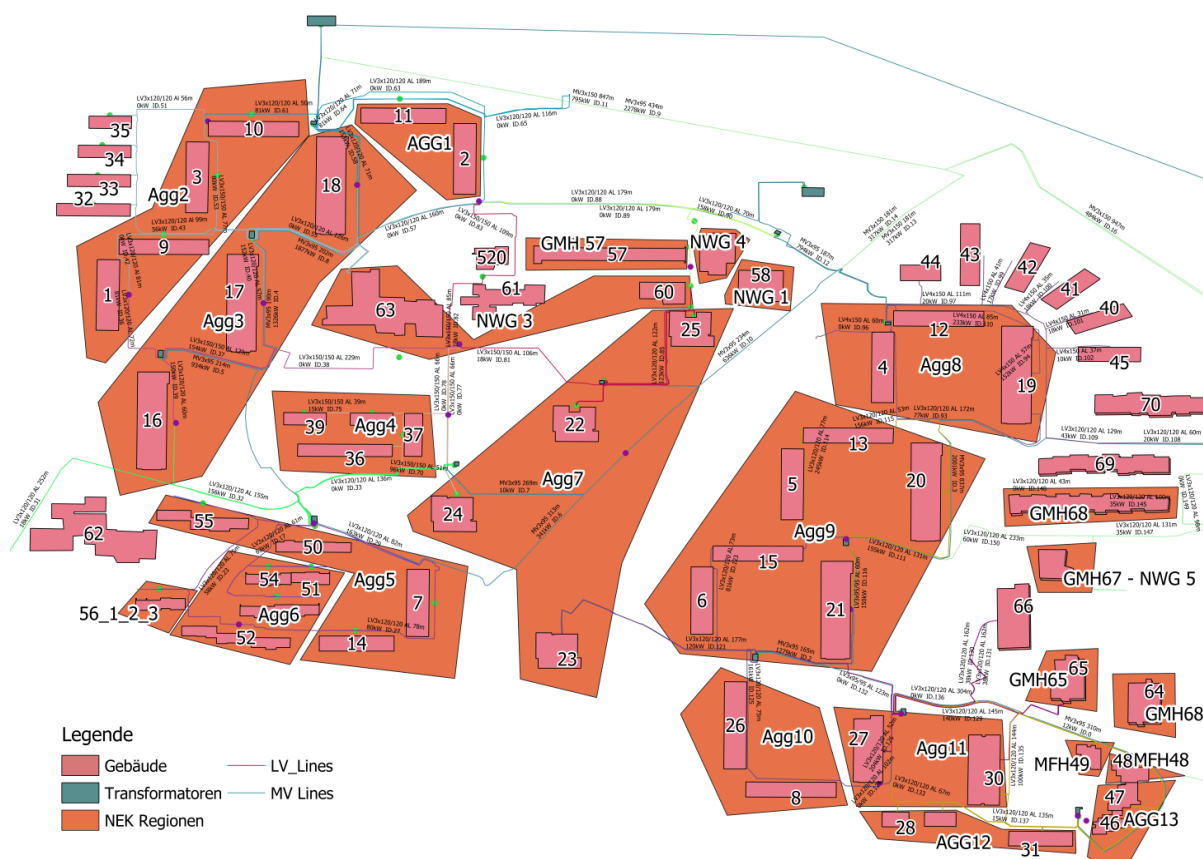
Zusammenfassend besteht das Quartier aus 25 MFH, 9 EZFH, 16 GMH, sowie 5 NWG die zu 31 Gebäudeclustern aggregiert sind. Das Stromnetz hat Ausmaße von 16 km Länge der Niederspannungsleitungen, während im Fernwärmenetz Hauptleitungen von 3,4 km Länge verlegt sind.

Abbildung 5-2: Wärmenetz zwischen den aggregierten Gebäudecluster der Region Weingarten



Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer ISE

Abbildung 5-3: Stromnetz zwischen den aggregierten Gebäudecluster der Region Weingarten



Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer ISE

5.2.2 Vergleichsmethodik

Zur Bewertung von EnMS als technischer Anlage der Betriebsoptimierung des Quartiersystems wird eine Vergleichsmethodik eingeführt. Dabei werden jeweils in jedem Szenario der Quartiers-EnMS-Fall „mit EnMS“ und ein Einzelgebäude-EnMS-Fall „ohne EnMS“ verglichen.

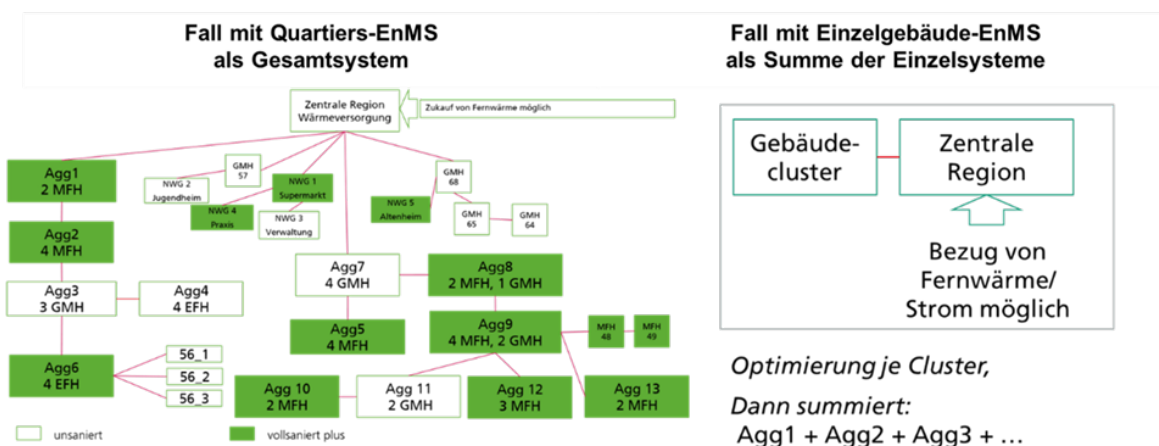
Im „mit EnMS“-Fall besitzt der DISTRICT Algorithmus alle Informationen gleichzeitig und optimiert das Quartier gesamtsystemisch. Dieser Fall repräsentiert ein Quartiers-EnMS. In der realen Anwendung werden eine Vielzahl an EnMS-Software Anwendungen mit Messsystemen verknüpft. Es gibt kein standardisiertes Quartiers-EnMS, generell gilt, dass durch die Quartiers-Betrachtungsebene ein Informations- und Kontrollgewinn erzielt wird.

Im Fall „Ohne Quartiers-EnMS“ berechnet der Algorithmus den kostenoptimalen Betrieb des Quartiers für jedes Gebäudecluster oder Gebäude separat. Damit wird keine Kommunikation und Gesamtsystem-übergeordnete Optimierung erlaubt. Die quartiersinternen Nutzungen von Erzeugungsüberschüssen sind im „Ohne EnMS“-Fall also nicht möglich, Überschüsse an Strom können nach EEG-Sätzen vergütet werden, Wärmeüberschüsse nicht. Anzumerken ist, dass eine Kostenoptimierung der Einzelsysteme auf Basis der Clusterinformationen eine Verbesserung zur realen Situation ohne Messung und Optimierung darstellt. Dennoch können durch die angewandte Methode Unterschiede des Quartiers-EnMS zum reinen Einzelgebäude-EnMS

dargestellt werden. Eine kritische Auseinandersetzung mit dieser Annahme und ihren Grenzen erfolgt im Unterkapitel 5.3.5.

Ein realer Fall „ohne EnMS“ ist in einem Optimierungssystem aufgrund der nicht erhobenen Informationen nicht darstellbar, daher wird auf die Summe von Einzelgebäude-EnMS zurückgegriffen. Zentrale Leitwarten erheben regulär nur begrenzt und lediglich jährliche zeitabhängige Strom- und Wärmenachfragen, obwohl sich dieser Trend mit der Ausbringung von Smart Metern ändert. Daher wird die vorgestellte Vergleichsmethodik in Abbildung 5-4 verwendet.

Abbildung 5-4: EnMS Vergleichsmethodik



Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer ISE

5.2.3 Szenarien, Systemkonfigurationen und Annahmen

Für die Analyse wird das Jahr 2035 als Referenzjahr betrachtet. Dieses Jahr wurde gewählt, um die fortschreitende technische Transformation des Quartiers bereits bewerten zu können, ohne jedoch zu weit von der real gegebenen Situation abzuweichen. Die analysierten Szenarien werden weiter untergliedert in ein dezentrales Szenario und vier zentrale Szenarien, in denen das Quartier über das Fernwärmenetz Wärme importieren kann. Im dezentralen Szenario gibt es kein Fernwärmenetz und Wärmeimport, stattdessen werden die Gebäude einzeln versorgt. Es dient als Vergleichsszenario, um den Effekt der zentralen Wärmebereitstellung zu quantifizieren und Mehrwerte des EnMS im Quartier mit Fernwärmenetz zu beurteilen. In allen Szenarien ist ein Strombezug aus dem übergeordneten Netz möglich.

Die Vergleichbarkeit der Szenarien untereinander hinsichtlich der Gesamtsystemkosten ist aufgrund der Betrachtung unterschiedlicher vorinstallierter Techniken nur bedingt gegeben. Ziel ist daher, mittels der einheitlichen, anwendungsneutralen Berechnungsmethode den Quartiersfall „mit EnMS“ und den Einzelgebäude-EnMS-Fall „ohne Quartiers-EnMS“ möglichst detailliert zu untersuchen, um die EnMS-Effekte mit unterschiedlichen eingesetzten Techniken zu analysieren. Diese 2 Fälle angewandt auf die fünf Grundszenarien ergeben insgesamt zehn Szenarien, die in Tabelle 5-1 zusammengefasst werden.

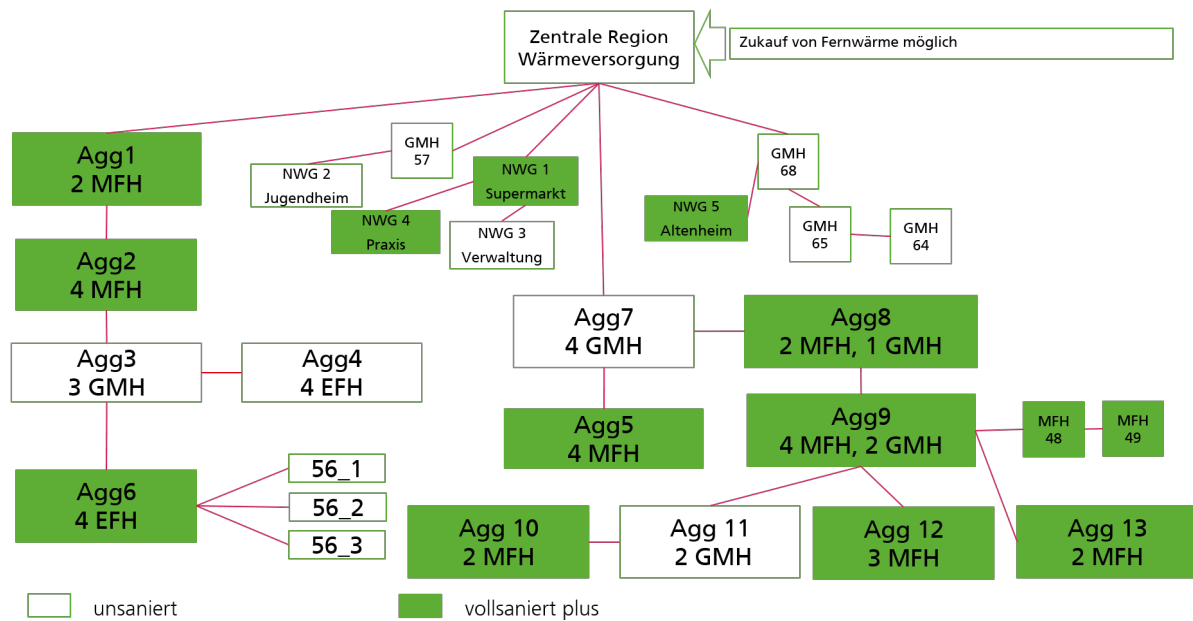
Tabelle 5-1: Übersicht der DISTRICT Szenarien mit Quartiers-EnMS (links) sowie Einzelgebäude-EnMS (rechts) für 2035

Szenario Kürzel	Szenariobeschreibung mit Quartiers-EnMs	Szenariobeschreibung mit Einzelgebäude-EnMS
REF	Referenzszenario: Zentrale Wärmeversorgung mit Fernwärme und pauschalen Fernwärmepreisen mit Quartiers-EnMs	Referenzszenario: Zentrale Wärmeversorgung mit Fernwärme und pauschalen Fernwärmepreisen mit Einzelgebäude-EnMs
Dezent	Dezentrales Szenario: Ohne Fernwärme – Dezentrale Wärmeerzeugung pro Gebäude mit Quartiers-EnMs	Dezentrales Szenario: Ohne Fernwärme – Dezentrale Wärmeerzeugung pro Gebäude mit Einzelgebäude-EnMs
Zent_Batt	Batteriespeicher Szenario: REF mit zusätzlichen Batteriespeichern in allen Gebäuden die eine PV Anlage besitzen mit Quartiers-EnMs	Batteriespeicher Szenario: REF mit zusätzlichen Batteriespeichern in allen Gebäuden die eine PV Anlage besitzen mit Einzelgebäude EnMs
Zent_Batt50	Batteriespeicher Sensitivität: REF mit zusätzlichen Batteriespeichern in 50% der Gebäude die eine PV Anlage besitzen mit Quartiers-EnMs	Batteriespeicher Sensitivität: REF mit zusätzlichen Batteriespeichern in 50% der Gebäude die eine PV Anlage besitzen mit Einzelgebäude-EnMs
Zent_WP	Zentrale Wärmepumpen Szenario: REF ohne pauschale Fernwärmepreise – Wärmeversorgung durch eine zentrale Wärmepumpe mit Quartiers-EnMs	Zentrale Wärmepumpen Szenario: REF ohne pauschale Fernwärmepreise – Wärmeversorgung durch eine zentrale Wärmepumpe mit Einzelgebäude-EnMs

Der technische Ausgangszustand entspricht dem der Vorarbeiten des Öko-Instituts (vgl. Kapitel 4.4). D.h. der Sanierungszustand der Gebäude, die installierten Erzeugungstechniken jedes Gebäudes und deren Kosten entsprechen den Vorarbeiten zum Gebäudebestand, Endenergieverbrauch und den eingesetzten Techniken. Zudem soll gegenüber 2020 im Jahr 2035 der CO₂-Ausstoß des Quartiers halbiert werden. Aus den Transformationspfaden ergibt sich im Jahr 2035 ein hoher Anteil an sanierten Gebäuden. Insgesamt ergeben sich in den Szenarien die in Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 gezeigten Strukturen. Hier sind die Sanierungszustände der Gebäudecluster mit Färbung weiß für „unsaniert“ und grün für „vollsaniert plus“ sowie die Verbindungen des Fernwärmenetzes in rot dargestellt. Die Gebäudecluster sind jeweils mit Namen clusterinterner Gebäudeaufschlüsselung (z. B. 2 Mehrfamilienhäuser) beschriftet. Zu erkennen sind die leicht unterschiedlichen Sanierungsverteilungen (für die Gebäudecluster Agg10, GMH 64+65), die sich aus den Sanierungstransformationspfaden für die zentrale und dezentrale Wärmeversorgungsstruktur ergeben. Die Strom- und Wärmeversorgungsstrukturen sind nach dem jeweiligen Sanierungszustand des Gebäudes ausgelegt, so haben unsanierte Gebäude einen Gaskessel installiert. Vollsanierte Gebäude besitzen eine Wärmepumpe, Pufferspeicher und eine Solarthermie Anlage. Die Dimensionierung der Anlageleistungen ergibt sich aus dem Transformationspfad und ist generell gut auf die Gebäudenachfrage zugeschnitten. Aufgrund der

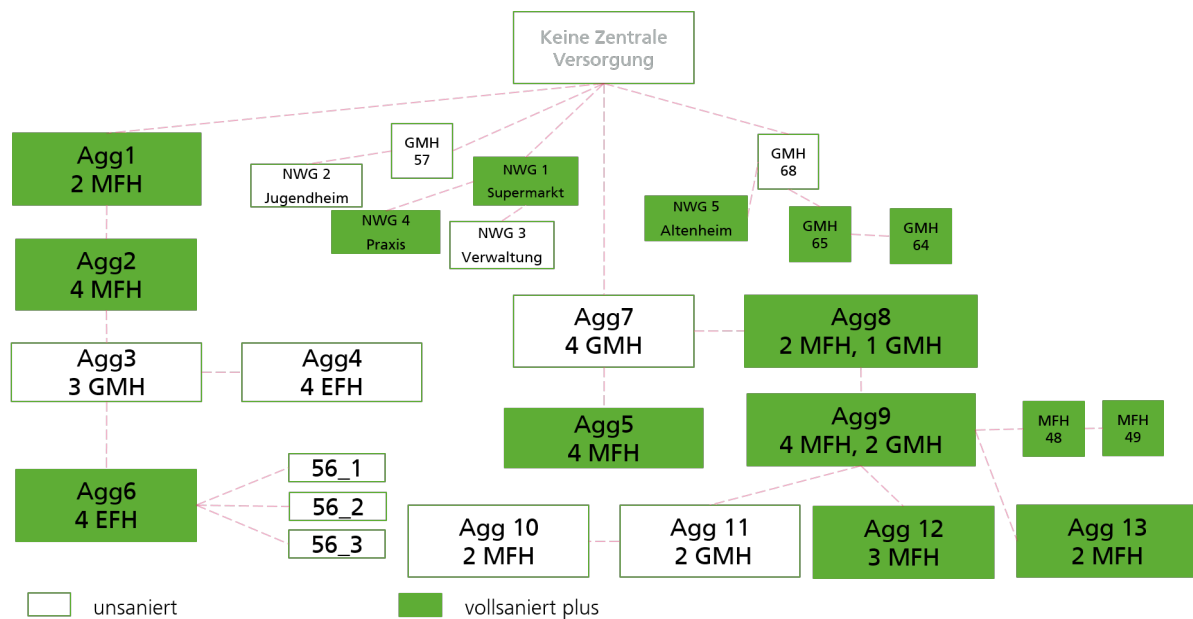
jährlichen bilanziellen Technologiebewertung der Transformationspfade weichen die installierten Leistungen für den stündlichen Einsatz in DISTRICT leicht ab. Eine typische Überdimensionierung oder Redundanzanlagen gibt es nicht.

Abbildung 5-5: Fernwärmenetzverbindungen (rot) und Sanierungsstruktur der Gebäudecluster (grün/Weiß) im Jahr 2035 der zentralen Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer ISE

Abbildung 5-6: Sanierungsstruktur der Gebäudecluster in 2035 im dezentralen Szenario



Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer ISE

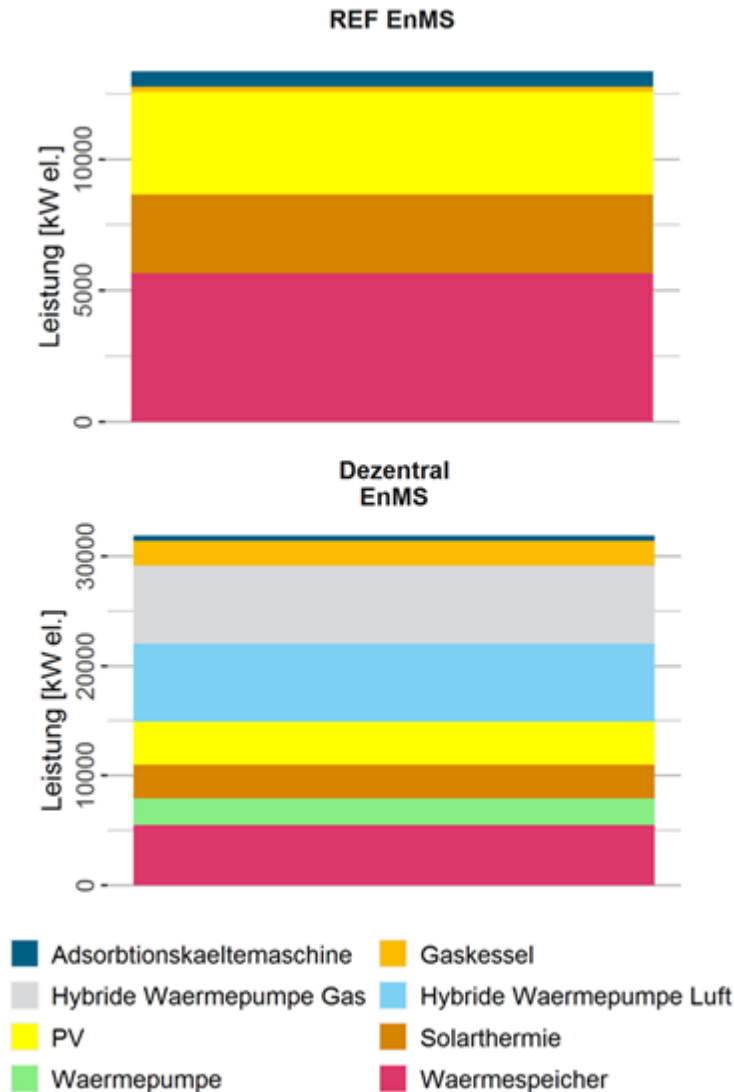
Die installierte Leistung jeder Technik jedes Gebäudes ergibt sich, wie bereits erwähnt, aus den Transformationspfaden des Quartiers aus Kapitel 4.4.2. Die Transformationspfade enthalten die notwendigen Größenordnungen der Techniken zur Deckung der Strom- Kälte und Wärmeversorgung für emissionsneutrale Quartiere im Jahr 2050. Aufgelistet sind in Tabelle 5-2 die Summen dieser installierten Leistungen. Das Referenz-Szenario wird mit den Basiswerten im oberen Teil abgebildet und ist ergänzt durch die jeweilige Abweichung vom Referenzszenario für die restlichen Szenarien. Z. B. entspricht im Szenario „Wärmepumpe Zentral“ die installierte Leistung aller Gebäude dem Referenzszenario, ergänzt durch eine zentrale Wärmepumpe und einen Speicher. In den zentralen Szenarien gilt, dass die Verteilung der installierten Leistungen aus PV und Solarthermie auf die Einzelgebäude und damit die Gebäudecluster eine große Rolle spielt, da sie sich direkt auf die möglichen Eigenverbräuche und Überschusskapazitäten auswirkt. Es wird daher angenommen, dass sich die gesamte installierte Leistung der PV- und Solarthermie-Anlagen im Jahr 2035 auf 50 % aller Gebäude verteilt. Die installierten Leistungen im Dezentralen Szenario in Tabelle 5-2 im unteren Teil sind aus den Vorarbeiten in Kapitel 4.4 übernommen worden und sind unabhängig vom REF Szenario.

Tabelle 5-2: Übersicht der Summen der installierten Leistungen 2035 je Szenario

Szenarioabkürzung	Technik	Summe der installierten Leistung je Technik [kW]
REF	Absorptionskältemaschine	579
REF	Gaskessel	206
REF	PV	3902
REF	Solarthermie	2995
REF	Wärmespeicher Pufferspeicher	5665
Zusätzlich zu REF im Szenario:		
Zent WP	Wärmepumpe Zentral	15000
Zent WP	Wärmespeicher Pufferspeicher Zentral	2104
Zent Batt50	Batterie Lithium	261
Zent Batt	Batterie Lithium	521
Dezentral EnMS:		
Dezentral	Absorptionskältemaschine	579
Dezentral	Gaskessel	2217
Dezentral	PV	3902
Dezentral	Solarthermie	3101
Dezentral	Wärmepumpe	2399
Dezentral	Wärmespeicher Pufferspeicher	5489
Dezentral	Hybride Wärmepumpe	7135

Die Summe der installierten Leistungen der Szenarien REF und Dezentral ist in Abbildung 5-7 grafisch zum Vergleich aufgeführt. Im Vergleich der summierten installierten Leistungen der Szenarien wird der zusätzliche Bedarf an Versorgungsleitung im dezentralen Fall deutlich. Insgesamt müssen zur dezentralen Versorgung eine zusätzliche Wärmepumpenleistung (vom Typ Luft sowie Hybride Gas-Luft) von über 10 MW installiert werden.

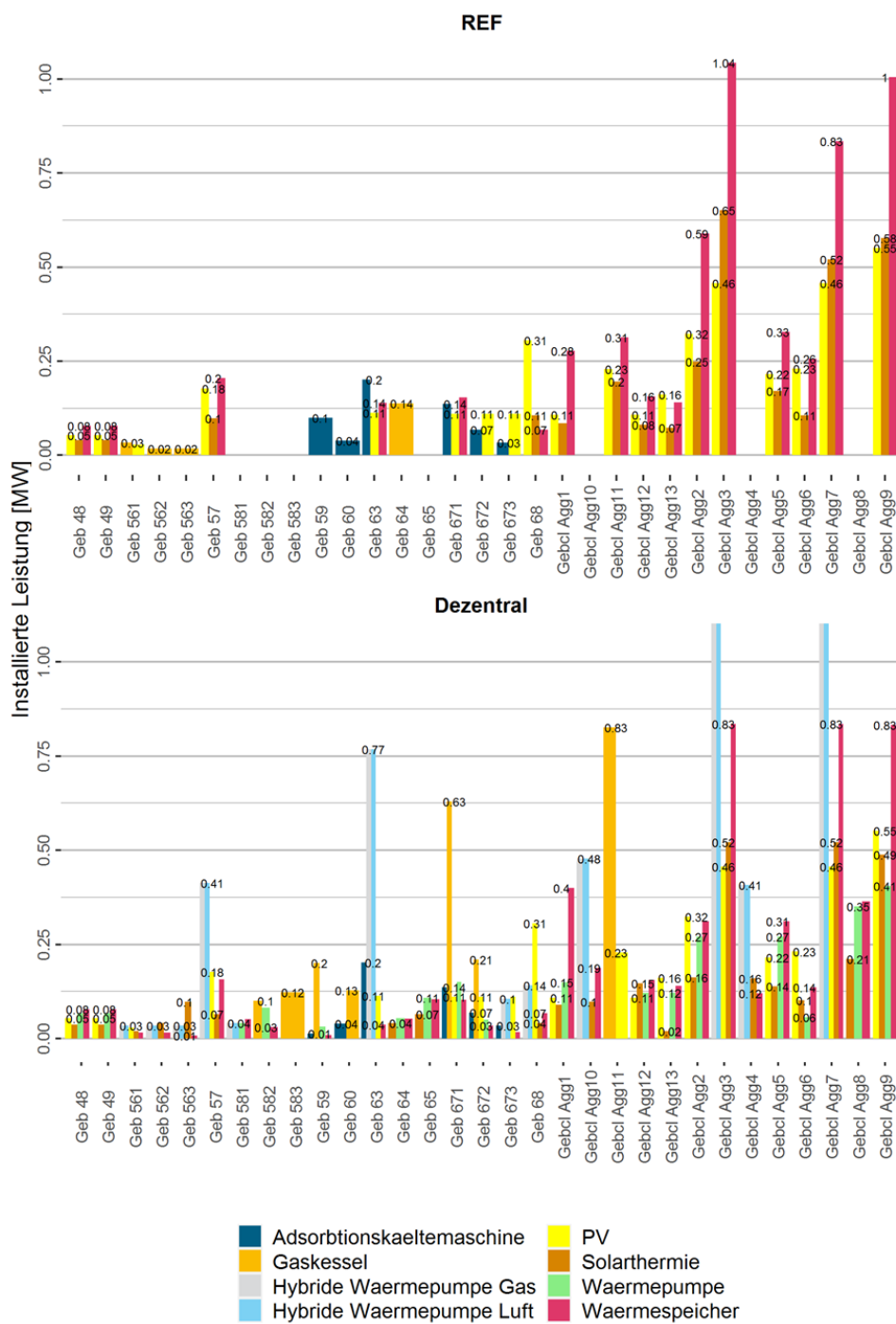
Abbildung 5-7: Vergleich der Summen der installierten Leistung in den Szenarien REF und Dezentral



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

Abbildung 5-8 zeigt die Verteilung der installierten Leistung in MW auf die Gebäude und Gebäudecluster für alle Erzeugungstechniken in den Referenz-Szenarien „REF“ (oben) sowie „Dezentral“ (unten). Die Summe der installierten Leistungen der Solarthermieranlagen des dezentralen Szenarios ändert sich zur Referenz leicht (+3,5 %) aufgrund der veränderten Sanierungsstruktur. Aus der Abbildung geht hervor, dass durch die Fernwärmeversorgung im Referenz Szenario einige Gebäudecluster keine eigenen Versorgungsanlagen besitzen. Die installierte Leistung der Photovoltaik, Solarthermie und Wärmespeicher ist gebündelt meist zusammen. Es gibt nur wenige Gebäude mit Adsorptionskälteanlagen.

Abbildung 5-8: Vergleich der installierten Leistung aller Techniken je Gebäudecluster in den Szenarien REF und Dezentral



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

Insgesamt ergibt sich für das Quartier Weingarten West ein Gesamtenergiebedarf aus den Nachfragelastzeitreihen von 24,8 GWh. Die Gesamterzeugung beträgt 28,1 GWh, die Differenz zur Nachfrage liegt in Verlusten und Überschussverkäufen.

Aus den Nachfrageprofilen ergibt sich eine kumulierte Stromnachfrage in Höhe von 6,2 GWh im Jahr 2035, wovon 88 % auf die Wohngebäude und 12 % auf die Industrie/GHD entfällt.

Leitungsverluste und zeitliche Verschiebung der PV-Verwendung zur Erzeugung erhöhen den gesamten Energieverbrauch, so beträgt er 8,66 GWh im Szenario REF. Die jährliche PV-Erzeugung im Quartier beträgt 4,5 GWh. Je nach Szenario und Fall variieren die verkauften PV-Überschüsse. Im REF-Szenario mit Quartiers-EnMS liegen sie bei 2,17 GWh, ohne bei 2,5 GWh.

Die Wärme- und Kältenachfrage beträgt für das REF Szenario 18,6 GWh mit einer Abweichung von 0,1 GWh für das dezentrale Szenario aufgrund der leicht unterschiedlichen Sanierungsstruktur der Transformationspfade (siehe in Abbildung 91 und 92 die Änderung der Sanierungsstruktur der Gebäude 64, 65 und Gebäudecluster 10). Mit Verlusten erhöht sich die Wärme und Kälte auf 19,4 GWh. Die Solarthermieanlagen erzeugen 2,9 GWh Wärme, der Rest der Wärmeerzeugung ist szenarioabhängig. Im REF-Fall werden 1,59 GWh Fernwärme bezogen und 0,3 GWh aus Gaskesseln erzeugt, der Kältebedarf beträgt 0,27 GWh. Durch die Fragestellung und den Fokus der Analyse, den Effekt der EnMS zu analysieren, spielen variable Strompreise als Flexibilitätsanreiz eine große Rolle. Hierfür werden Preise aus der Preissimulation der Uni-Duisburg-Essen, Szenario Kraftwerkspark, verwendet.³² Auf die reinen Börsenstrompreise werden Steuern und Abgaben addiert, um auf das Niveau der Endverbraucherpreise zu kommen. Für die Brennstoffkosten und Kosten des Fernwärmeimports handelt es sich ebenfalls um Endverbraucherpreise. Um die Vergleichbarkeit zu den anderen Kapiteln zu gewährleisten, sind diese Preiszeitreihen an die Durchschnittspreise in Kapitel 4 angepasst. Es wird ein pauschaler Fernwärmepreis und ein CO₂-Emissionsfaktor angenommen. Alle Preisannahmen sind in Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Preisannahmen

	2035
Durchschnittlicher Strompreis - Preis-Prognose Öko-Institut netto	26,29
Fernwärmepreis ct/kWh	7,57
Fernwärmepreis ct/kWh (2016er €-Ct/kWh)	8,97
CO ₂ -Faktor g CO ₂ /kWh	228,5

Weitere wichtige Kostenannahmen und technische Parameter befinden sich in Tabelle 5-4. Gelistet sind die jährlichen Fixkosten in €/kW installierter Leistung sowie variablen Kosten in €/kWh, die nicht in den internen Berechnungen über Brennstoffkosten enthalten sind. Zusätzlich sind die angenommenen Primäreffizienzen bzw. die Übertragungsverluste angegeben. Für die Wärmepumpen Berechnungen wird über die COP und maximalen Leistungsdiagramme

³² Provided by HEMF, Essen, 2017

in Abhängigkeit der Temperaturniveaus von Quelle und Vorlauf gesondert eine linearisierte Effizienzrechnung vorgenommen. Die Effizienzangabe der Lithium-Batterie ist eine Verallgemeinerung und wird im Modell über prozentuale stündliche Selbstentladung berechnet. Die Investitionskosten der Anlagen werden nicht aufgezeigt, da der Ausbau nicht betrachtet wird.

Tabelle 5-4: Auflistung der Kostenannahmen Fix, Variabel, sowie Primäreffizienz und Spezifikationen weiterer wichtiger Parameter

Technik	Fixkosten [€/kW*a]	Variable Kosten [€/kWh]	Effizienz [%]
Adsorptionskältemaschine	6	*	0,7
Batterie Lithium	*	*	0,99 °
Biomassekessel	16,63	0,0559	0,78
Stromnetz	*	*	Übertragungsverluste 2,5 [%/km]
Gaskessel	4,38	*	0,91
Hackschnitzel	26,1	0,06	0,92
Wärmepumpe Hybrid Komponente Gas	4,38	*	0,91
Wärmepumpe Hybrid Komponente Luft	29,88	*	**
PV	0	*	0
Solarthermie	10	*	0,676
Transformator	`	*	0,99
Wärmenetz	4,31	*	Übertragungsverluste 0,35 [W/m*K]
Wärmepumpe	29,88	**	**
Wärmespeicher Pufferspeicher	2	*	0,98

Quelle: Fraunhofer ISE - Eigene Darstellung nach (Palzer et al. 2018a)^a, Herkel (2017)^b, Palzer et al. (2018c)^c, Hinz (2015)^d, Bürger et al. (2017b)^e, VDI 2067 Blatt 1^f

* Wird im Modell basierend auf dem Betrieb berechnet

** mit gesonderter Berechnungslogik siehe Wärmepumpen Leistungsdiagramm

° über Selbstentladung 0,1%/h mit DOD 0,85

°° über Selbstentladung 2%/h mit DOD 1

` nicht betrachtet.

5.3 Effekte von Energiemanagementsystemen im Modell

Durch den Vergleich der Szenario Fälle „mit“ und „ohne“ Quartiers-EnMS kann der Einfluss eines EnMS auf die Energieverteilung, Kostenstruktur und resultierende CO₂Emissionen im Quartier betrachtet werden. Über Sensitivitätsrechnungen kann Aufschluss darüber gewonnen werden, welchen Einfluss Energiespeicher auf Quartiersenergiemanagementsysteme haben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Szenario-Analysen vorgestellt und die gesamtsystemischen Effekte erläutert.

5.3.1 Vergleich zentral und dezentral 2035 mit EnMS und Ohne EnMS

Die Gesamtkosten aller Szenarien lassen sich aus der Summe der variablen und fixen Kosten sowie Handelskosten für den Bezug und die Einspeisung von Strom und Wärme in das übergeordnete Netz berechnen. Die Stromhandelskosten sind die Differenz aus den Ausgaben durch den Stromeinkauf und den Einnahmen durch den Stromverkauf. Die Wärmehandelskosten sind in den vorliegenden Szenarien nur die Wärme-Einkaufskosten aus dem übergeordneten Fernwärmenetz, da keine Wärmeeinspeisung möglich ist. Die Optimierung des Betriebs nach ökonomischen Faktoren hat ausschließlich Einfluss auf den Einsatz der vorgegebenen Versorgungstechniken sowie die Wahl des Strom- und Wärmeeinkaufs bzw. -verkaufs. Alle variablen und Fixkosten der Techniken entstehen im Quartier und externe Kosten werden in den Handelskosten durch den Wärme- bzw. Strompreis verursacht.

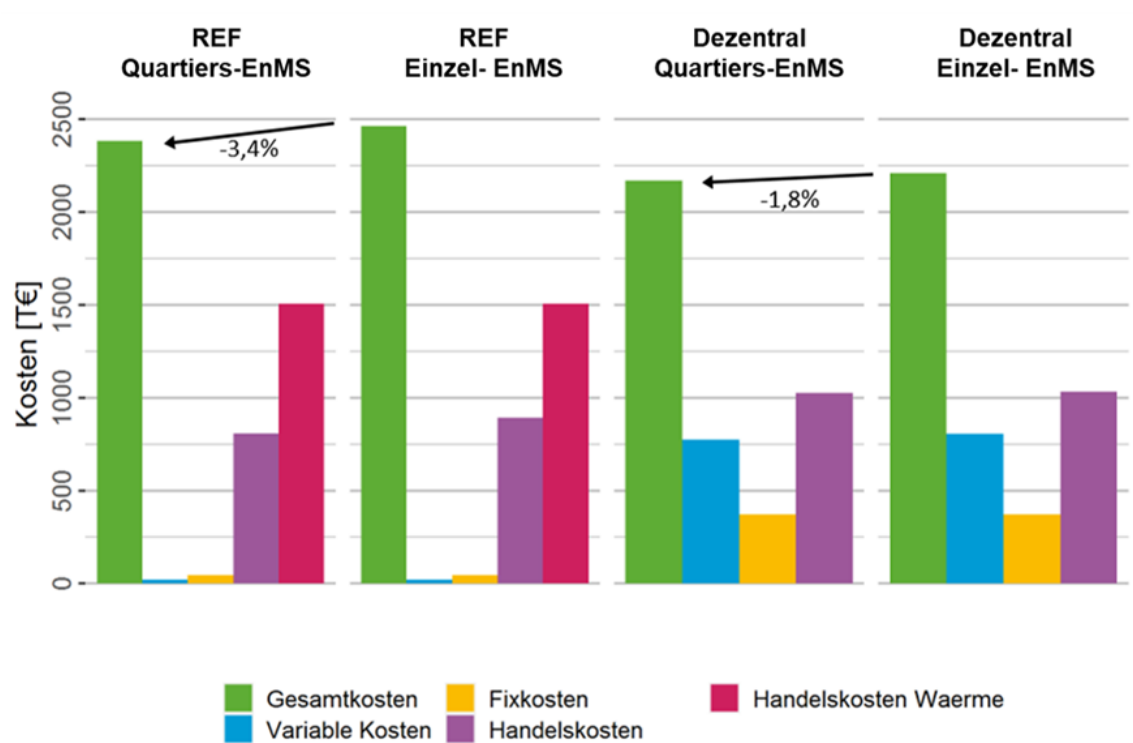
Abbildung 5-9 zeigt die absolute Verteilung der Kosten nach Kategorie für das Referenz- (links) und das dezentrale Szenario (rechts) jeweils mit und ohne Quartiers-EnMS. Im REF-Szenario wird der größte Anteil der Gesamtkosten mit 63 % durch die Wärmehandelskosten verursacht, während weitere 34 % durch die Stromhandelskosten entstehen. Da im REF-System aus den Ergebnissen der Transformationspfade eine Unterkapazität an quartierseigener Versorgungsleistung installiert ist (entspricht einem regulären Quartier mit zentraler Strom- und Wärmeversorgung), importiert das Quartier Energie über das Fernwärme- und Stromnetz. Damit sind die variablen und fixen Kosten im REF-Szenario gering. Die Gesamtkosten des Quartiers-EnMS liegen 3,4 % unter dem Einsatz ohne Quartiers-EnMS. Die Kostenreduktion ist auf die geringeren Stromkosten durch den optimierten Betrieb des Quartiers-EnMS zurückzuführen.

Zum Vergleich ist im dezentralen Szenario aus den Transformationspfaden bereits im Jahr 2035 ausreichend Wärmeanlagenleistung installiert, die durch den optimierten Betrieb und die notwendige Instandhaltung variable und fixe Kosten verursachen (53 % der Gesamtkosten des dezentralen Szenarios). Die restlichen Kosten im dezentralen Szenario werden mit 47 % durch den Stromhandel verursacht, der einerseits den Strombedarf im Quartier und den zusätzlichen Bedarf durch Betrieb der Wärmepumpen abdeckt. Die Gesamtkosten des Quartiers-EnMS im dezentralen Szenario liegen mit 1,8 % nur gering unter dem Einsatz ohne Quartiers-EnMS. Die Kostenreduktion ergibt sich durch die leicht verringerten variablen Kosten des optimalen Quartier-Betriebs.

Im Vergleich der Szenarienergebnisse sind damit die reinen Strom-Handelskosten (violett) im dezentralen Szenario höher. Die unterschiedliche Stromnachfrage ergibt sich durch die verschiedenen Wärmeversorgungstechniken beider Szenarien, so entsteht durch den Einsatz der Wärmepumpen im dezentralen Szenario eine höhere Stromnachfrage. Dieser Stromanstieg

kann nicht vollständig durch die überschüssige PV-Erzeugung im Quartier aufgefangen werden, sodass mehr Strombezug aus dem übergeordneten Netz notwendig ist. Dies führt zu höheren Strom-Einkaufskosten.

Abbildung 5-9: Gesamtkostenvergleich der Szenarien REF (links) und Dezentral (rechts) je mit Quartiers-EnMS und Einzelgebäude-EnMS



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

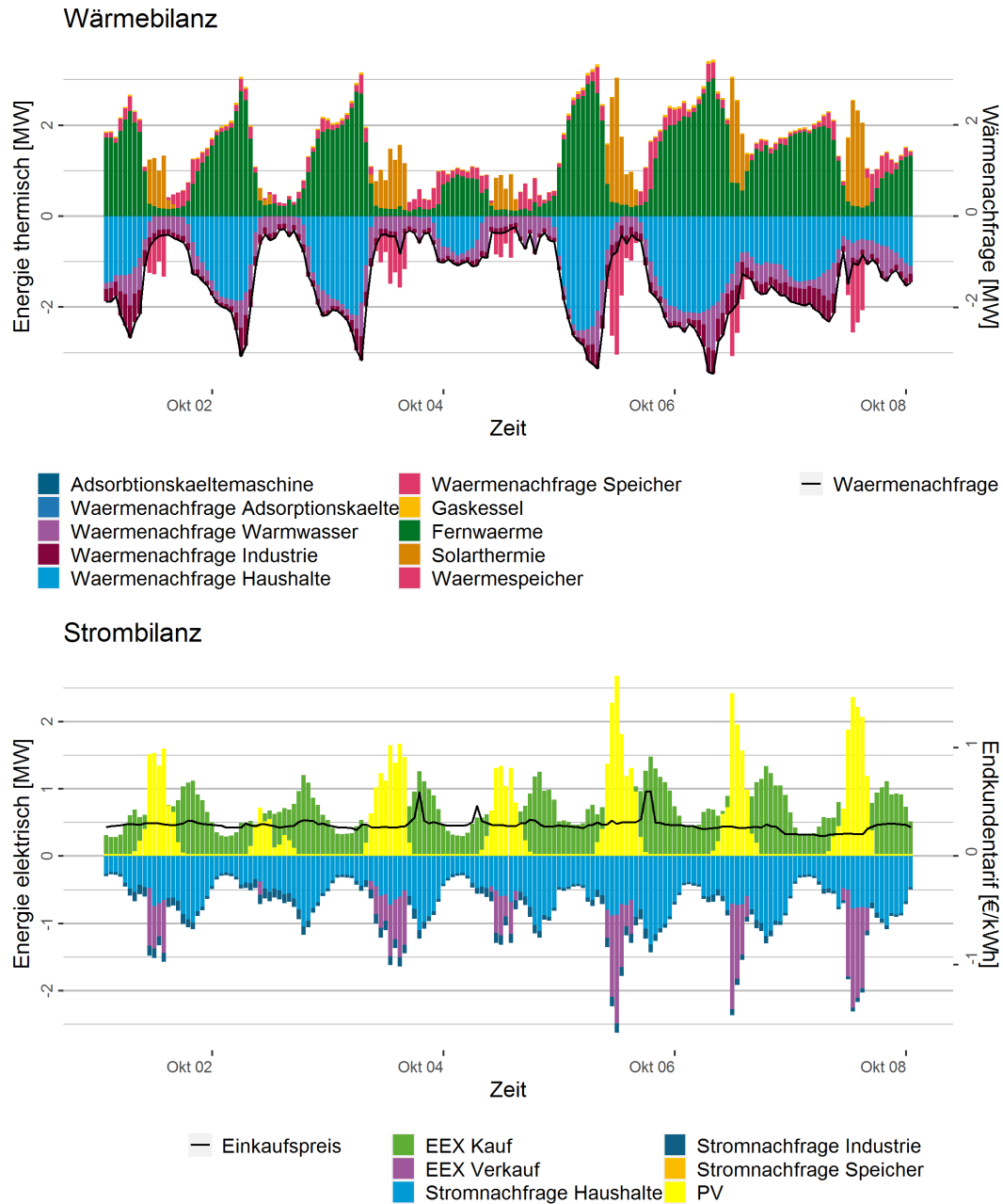
In beiden Szenarien sind die Kosten des Systems mit Quartiers-EnMS geringer als ohne Quartiers-EnMS. Der Unterschied liegt ausschließlich am optimierten Betrieb. Maßgeblich sind die geringeren Strom-Handelskosten der Fälle mit Quartiers-EnMS. Der PV-Überschussstrom einiger Gebäude wird im Quartier durch das EnMS kontrolliert verteilt und die Eigenstromnutzung innerhalb des Quartiers dadurch gesteigert. Dadurch sind zwar die Einnahmen aus Überschussverkäufen des Systems geringer, aber auch die Ausgaben für den Stromeinkauf sinken. Da der Preis für den Einkauf denjenigen für den Verkauf deutlich übersteigt, kann das Quartier mehr Kosten sparen als es durch den Verkauf an Einnahmen bekäme.

Der Betrieb des Gesamtsystems im Fall mit Quartiers-EnMS wird in Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 als Energiebilanz über die Summe der technikspezifischen Bereitstellung und Nachfrage von Strom und Wärme dargestellt.

Abbildung 5-10 zeigt das REF Szenario für einen einwöchigen stündlichen Beispielausschnitt aus dem berechneten Jahresverlauf. Auf dem oberen Teil der Abbildung ist die Wärmebilanz, unterhalb die Strombilanz aufgezeigt. Beim Betrieb der Solarthermie-Anlagen (hier in orange in der Wärmebilanz) erzeugt bei hoher Einstrahlung die Solarthermie-Anlage mehr Wärme als im

Quartier benötigt wird. Die überschüssige Wärme wird in Pufferspeichern eingespeist und zu späteren Zeitpunkten ausgespeichert und genutzt. Dominiert wird die Wärmeversorgung im REF-Szenario durch die Fernwärme (in grün), unterstützt durch die täglich fluktuierende Solarthermie (orange). In der Strombilanz ist sichtbar, dass in den Zeiten mit hoher PV-Erzeugung der Überschussstrom verkauft wird (in violett). Damit können im Quartier Einnahmen erzielt werden. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn die Summe der Stromerzeugung durch die PV-Anlagen über das ganze Quartier höher ist als die Gesamtnachfrage. An Tagen mit einer geringeren Erzeugung wird der PV-Strom nur im Quartier verbraucht. Durch solche systemischen Effekte kann ein EnMS die Gesamtkosten des Quartiers senken.

Abbildung 5-10: Einwöchiger Betriebsausschnitt aus der stündlichen Wärme- und Strombilanz des Referenzszenarios REF

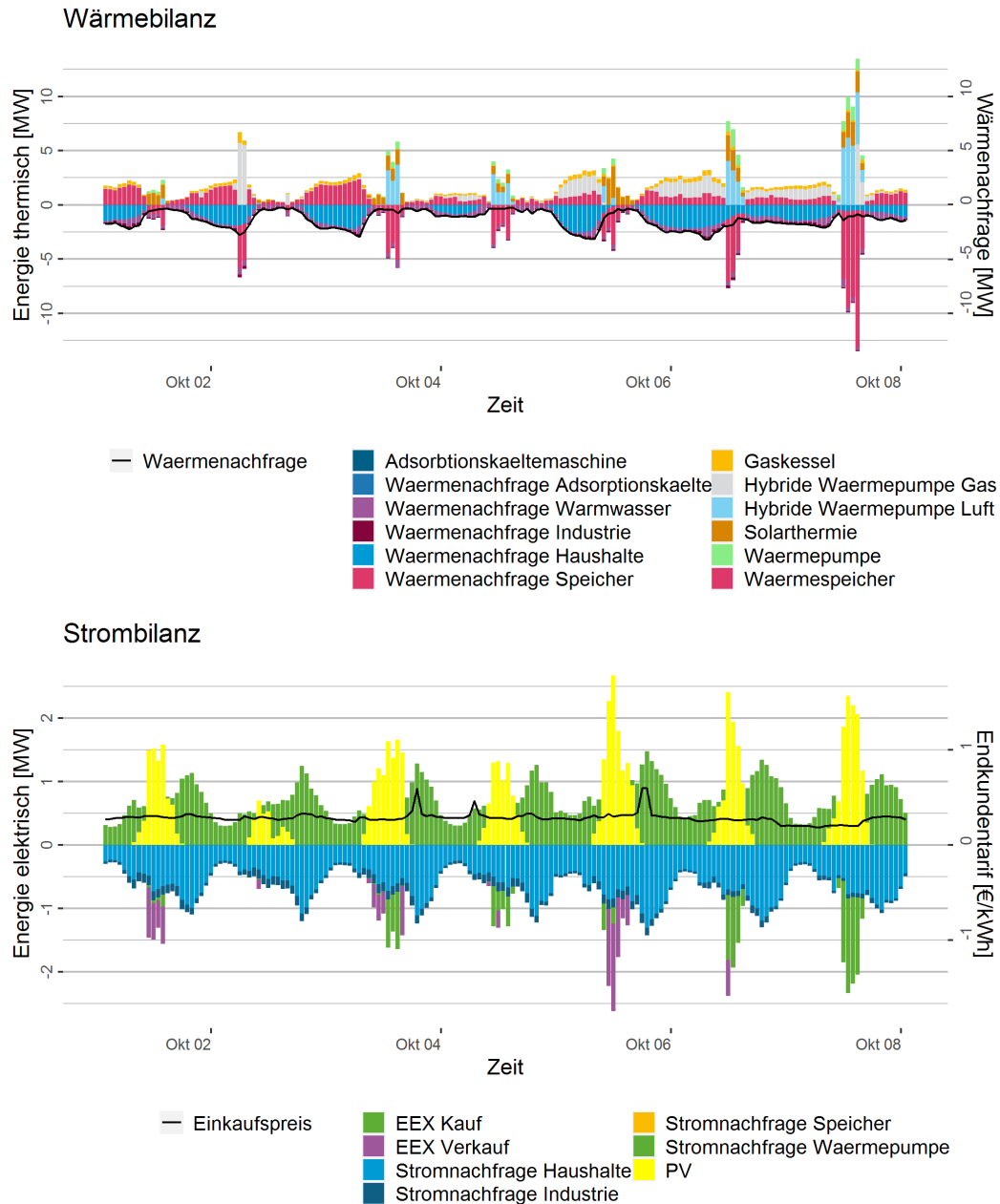


Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

Der Betrieb im dezentralen Szenario in Abbildung 5-11 ist aufgrund der unterschiedlichen Versorgungsstruktur nicht direkt mit dem REF-Szenario vergleichbar. Jedoch sind die grundlegenden Aussagen bezüglich der Eigenstromnutzung gleich. Durch die gestiegene Stromnachfrage der Wärmepumpen ist jedoch im dezentralen Szenario der Überschuss an PV-Erzeugung geringer, und weniger Strom wird verkauft. Die erzeugte Wärme der Luft- und

hybriden Wärmepumpen übernimmt die Wärmeversorgung, unterstützt durch solarthermisch erzeugte Wärme. Im dezentralen Szenario werden verstärkt Wärmespeicher eingesetzt, die durch Wärmepumpen beladen werden. Die Wärmepumpen werden sowohl mit PV-Überschussstrom als auch in Zeiten niedriger Strompreise betrieben. In Nachtstunden werden die hybriden Wärmepumpen hauptsächlich gasgeführt betrieben. Da im Fall mit Quartiers-EnMS die Stromüberschüsse auch im Quartier verteilt werden können und dadurch weniger importiert werden muss, kann das System CO₂-Emissionen einsparen. Auch können dadurch die Wärmepumpen im Quartier vermehrt durch PV-Strom betrieben werden und es wird die Nutzung von Gas reduziert. Das führt zu einer Reduktion von Primärenergieverbräuchen im dezentralen Fall mit Quartiers-EnMS um 2,4 %.

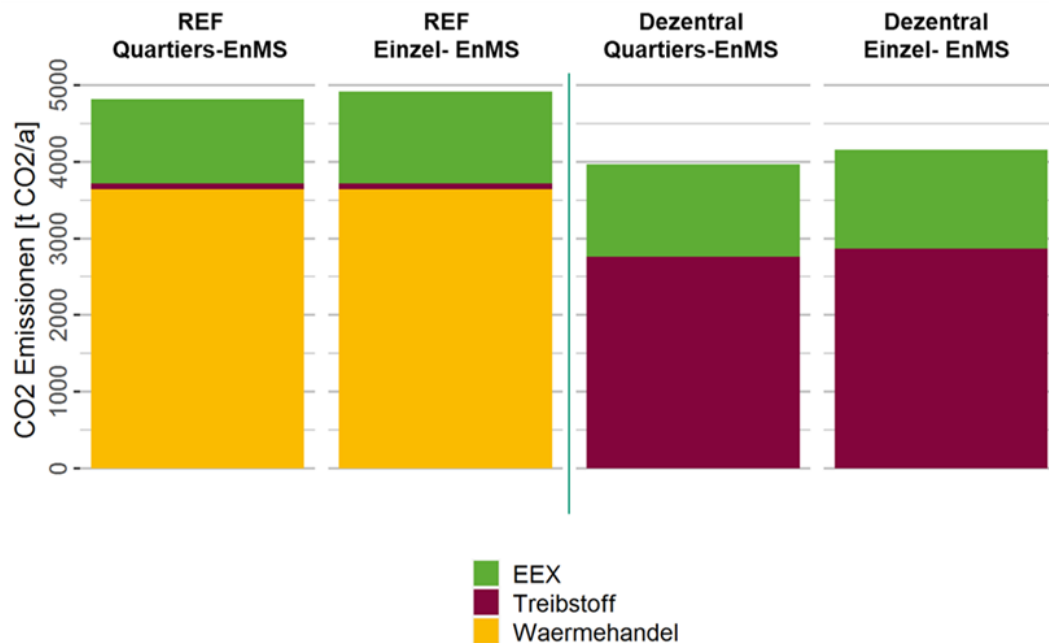
Abbildung 5-11: Einwöchiger Betriebsausschnitt aus der stündlichen Wärme- und Strombilanz des Referenzszenarios Dezentral



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

Der optimierte Betrieb hat auch einen direkten Einfluss auf die CO₂-Emissionen. Abbildung 5-12 zeigt die absoluten CO₂-Emissionen für das Referenzszenario (links) und das Dezentral-Szenario (rechts) je mit Quartiers-EnMS sowie ohne Quartiers-EnMS (als Einzelgebäude-EnMS).

Abbildung 5-12: Vergleich der CO₂-Emissionen in den Szenarien REF (links) und Dezentral (rechts) jeweils mit Quartiers-EnMS und ohne Quartiers-EnMS



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

Die CO₂-Emissionen im Dezentral-Szenario sind deutlich geringer als im REF-Szenario. Wie bei den Gesamtkosten beschrieben, liegt das am Wärmeversorgungskonzept. Durch die Nutzung der Fernwärme und dem dazugehörigen CO₂-Emissionsfaktor von 228 g/kWh sind die Gesamtemissionen höher als im Dezentral-Szenario mit einer Versorgung aus Wärmepumpen und wenigen Gaskesseln bei einem Emissionsfaktor von 202 g/kWh (BAFA 2019).

Zusätzlich zeigt die Abbildung die geringeren CO₂-Emissionen in den Fällen mit Quartiers-EnMS. In beiden Szenarien ist eine Reduktion der Gesamtemissionen erkennbar. Durch die vermehrte Eigenstromnutzung im Quartier in den Fällen mit Quartiers-EnMS kann das EnMS die zusätzlichen, mit dem Stromeinkauf verknüpften Emissionen vermeiden und damit bessere Zielwerte erzielen. Dieser Effekt würde sich verstärken, würden CO₂-Preise integriert werden.

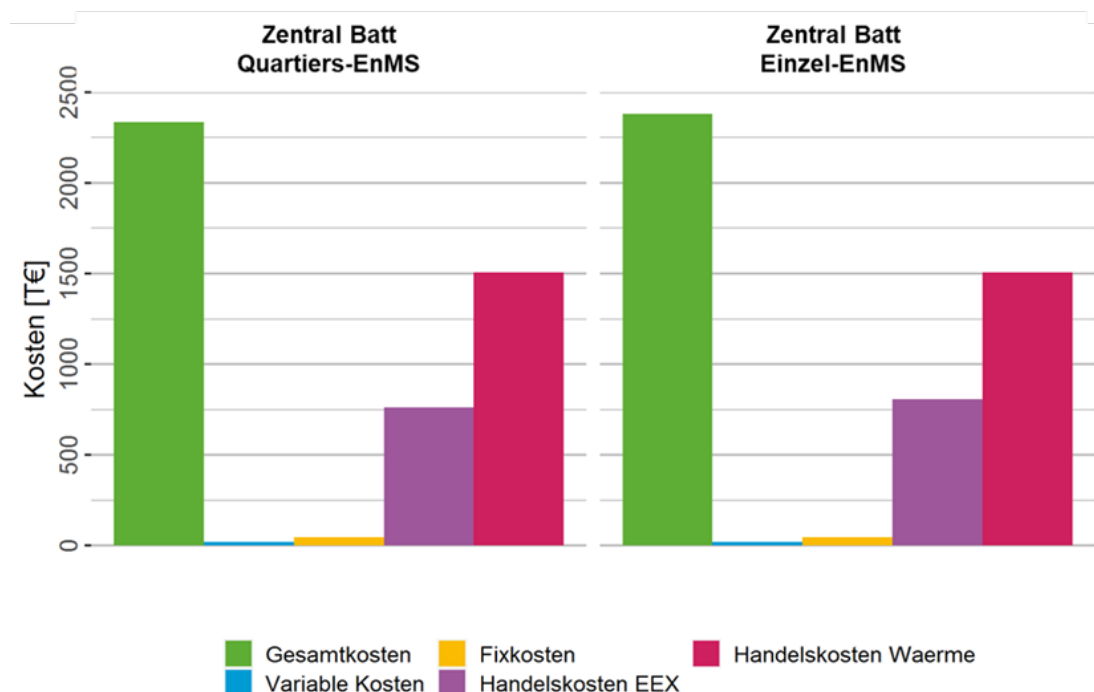
5.3.2 Szenario mit Batterien im System

Das Batterieszenario (Zent_Batt) hat die gleiche Struktur und installierten Leistungen wie das REF-Szenario, erweitert um einen elektrischen Batterie-Lithium Speicher in jedem Gebäudecluster mit installierter PV-Leistung (siehe Tabelle 5-2). Ziel der Untersuchung ist es, die Effekte von zusätzlicher Flexibilität in Form von Batterien in der Stromversorgung zu verdeutlichen.

Im Batterieszenario (Zent_Batt) sind die Strom-Handelskosten mit Quartiers-EnMS 6 % niedriger als ohne Quartiers-EnMS. Die Wärme-Handelskosten bleiben gleich, da keine Änderungen oder zusätzliche Flexibilitäten vorhanden sind. Der Anteil der Wärme-Handelskosten beträgt ca. 64 % der Gesamtkosten. Die fixen und variablen Kostenanteile sind

weiterhin gering im Vergleich zu den Handelskosten. Insgesamt zeigt sich in Abbildung 5-13, dass durch den Einsatz von Batteriespeichern eine Gesamtkostenreduktion von 2 % mit Quartier-EnMS zum Fall ohne Quartiers-EnMS erreicht werden kann. Diese Reduktion ist geringer als der Unterschied im REF Fall und wird daher weitergehend beleuchtet.

Abbildung 5-13: Vergleich der Gesamtkosten im Szenario „Zentral mit Batterien“ zwischen Quartiers- EnMS und ohne Einzelgebäudecluster-EnMS



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

Es verringern sich im Vergleich zum REF Szenario die Gesamtkosten mit Quartiers-EnMS um ca. 3 %, ohne EnMS um 3,5 %, wobei die Kostenreduktion ausschließlich durch verringerte Handelskosten zu Stande kommt. Das heißt, im Vergleich zum REF-Szenario können durch Einsatz von Batteriespeichern die Stromhandelskosten im Szenario „Zent Batt“ mit Quartiers-EnMS Fall um 6 % verringert werden, im Ohne-EnMS-Fall um 10 %. Die geringere Kostenreduktion der Fälle mit Quartiers-EnMS von 6 % lässt sich durch die bereits genutzten Flexibilitätspotenziale des QuartiersEnMS im REF Szenario erklären. Der zusätzliche Einsatz von Batteriespeichern verringert zwar die Kosten, aber nicht so stark wie der Einsatz von Batteriespeichern in dem Fall, dass keine zentrale Quartiersoptimierung vorhanden ist. Im Fall ohne Quartiers-EnMS werden dezentral in jedem Gebäude durch die Batterien Flexibilitäten geschaffen und genutzt, sodass sich die Überschüsse reduzieren. Da es auch mit einem Quartiers-EnMS am günstigsten ist, den Strom dezentral zu verbrauchen, sind die entstehenden Überschüsse, die das Quartiers-EnMS optimal im Quartier nutzen kann, geringer als in den Szenarien ohne Batterien. Dadurch sind dann entsprechend auch die möglichen Kosteneinsparungen geringer.

Generell zeigt der Einsatz von Batteriespeichern im Modell eine weitere Kosteneinsparung auf, jedoch ist der Gesamtkostenunterschied im Szenario ohne Batterien zwischen dem Fall mit und ohne Quartiers-EnMS größer.

Die CO₂-Emissionen sinken für das Batterieszenario in den Strom-Handelsemissionen um je 3,5 % zum REF-Szenario. Sie erreichen Gesamtemissionen von 4774 t CO₂eq im Quartiers-EnMS Fall sowie 4871 t CO₂eq im Fall ohne Quartiers-EnMS. Das bedeutet eine zusätzliche Reduktion von 2 % der CO₂-Emissionen im Fall mit einem EnMS. Die Summe der über das Jahr gespeicherten elektrischen Energie in allen Batteriespeichern beläuft sich auf ca. 0,75 GWh. Dies entspricht 12 % des Gesamtstrombedarfs. Die Nutzungsdauer der Batteriespeicher als Maß der Stunden mit Batteriespeichereinsatz beträgt 3059 h. Die Darstellung dieser Ergebnisse erfolgt im Anhang in A4.3.

In der Sensitivitätsanalyse mit verringerter installierter Leistung der Batteriespeicher auf 50 % verringert sich die Summe der elektrischen Energiebereitstellung auf 0,4 GWh, während die Nutzungsdauer der Batteriespeicher auf 2745 h fällt. Die Gesamtkosten des Szenarios (Zent_Batt50) mit EnMS sind 1,9 % niedriger als ohne EnMS, zeigen also eine ähnliche Reduktion bei halbierten Batterieleistung, siehe Abbildung A4-3. Der Differenz der Stromhandelskosten zwischen den Fällen mit und ohne Quartiers-EnMS ist mit 5,5 % leicht niedriger als im Batterie-Szenario (6 %). Diese Beobachtung legt nahe, dass es eine nicht tiefer untersuchte positive Relation zwischen der Kostenreduktion und dem Einsatz von Batteriespeichern mit EnMs gibt. Das hieße, der Einsatz von Batteriespeichern wirkt sich als Flexibilität im System allgemein positiv auf die Betriebsweise und die Kosten im Quartier aus. Der Effekt erreicht aber mit steigender Größe einen Trade-Off-Punkt und wird zunehmend geringer (siehe in Abbildung A4-3 und Abbildung A4-4, die Gesamtkosten verändern sich unmerklich im Vergleich). Wenn alle PV-Überschüsse in jedem Gebäude selbst verbraucht werden, bringen zusätzliche Batteriekapazitäten nur bezogen auf die Einspeicherung des Netzstroms Nutzen.

Zur Bewertung von Quartiers-EnMS kann festgestellt werden, dass durch Batteriespeicher zusätzliches Flexibilitätspotential bereitgestellt wird. Dieses verringert die Kosten und CO₂-Emissionen, der Effekt auf Quartiersebene ist jedoch stark vom Verhältnis der Speicherleistung zu lokalen Erzeugungskapazitäten und Nachfrage abhängig.

5.3.3 Szenario mit einer zentralen Wärmepumpe

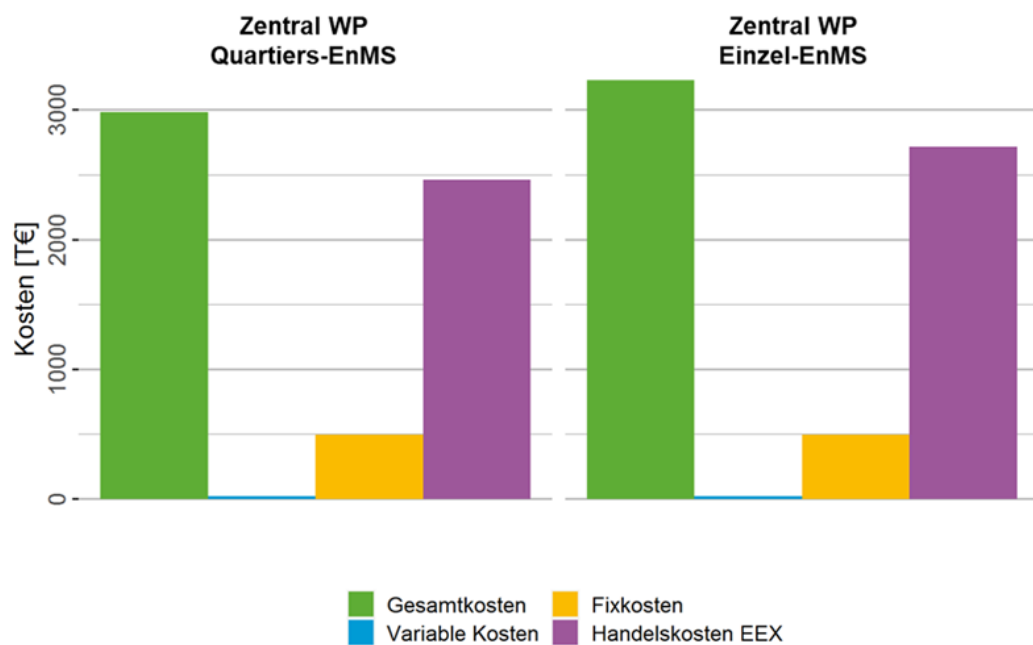
Im Szenario Wärmepumpe ist die zentrale Fernwärmeversorgung durch eine zentrale Hochtemperaturwärmepumpe in Kombination mit einem entsprechend dimensionierten Wärmespeicher ausgelegt. Das heißt, die zentrale Wärmepumpe wird im vollen Betrieb mit ihren variablen und fixen Kosten modelliert. Dies steht in der Betrachtung im Gegensatz zum REF Szenario, in dem die Fernwärme aus dem übergeordneten Netz gespeist wird und ein fixer Wärmepreis angenommen wird. Die Wärme der Gebäudecluster wird also wie im REF-Szenario weiterhin vom Wärmenetz bezogen, aber mit einer Wärmepumpe innerhalb des Quartiers erzeugt, sofern die Nachfrage nicht über Solarthermie gedeckt wird. Ziel dieser Implementierung ist die Untersuchung des Effektes der eigenen Wärmeerzeugung für das Quartiersnetz, deren Kosten und Emissionen wiederum vom Strombezug aus dem übergeordneten Stromnetz abhängig sind.

Durch die Betrachtung der Wärmeerzeugung innerhalb der Systemgrenzen werden die Wärmeerzeugungskosten mit optimiert. Da die Wärmekosten des Quartiers von der zentralen Wärmepumpe abhängig sind, genauer von Stromeinkaufspreisen zum Zeitpunkt des Betriebs der Wärmepumpe, ergeben sich variable Wärmegestehungskosten. Dies ist im REF-Szenario nicht der Fall.

Im Ergebnis zeigt sich, dass im Vergleich der Fälle mit und ohne Quartiers-EnMS die Gesamtkosten um 7,8 % sinken, wie in Abbildung 5-14 zu sehen ist. Der Anteil der Stromhandelskosten beträgt 82 % der Gesamtkosten, während sich der Anteil der Fixkosten aufgrund der zentralen Wärmepumpe auf ca. 15 % beläuft.

Die Gesamtkosten für das betrachtete Wärmepumpenszenario erhöhen sich durch die Verlagerung der Energieeinkaufspreise von Fernwärme auf Strom (mit einem Mehrkostenfaktor für Strom von 3,25) erwartungsgemäß um 30 % zum REF Fall und dadurch steigen die Stromhandelskosten.

Abbildung 5-14: Vergleich der Gesamtkosten der Szenarien mit zentraler Wärmepumpenversorgung mit und ohne Quartiers-EnMS

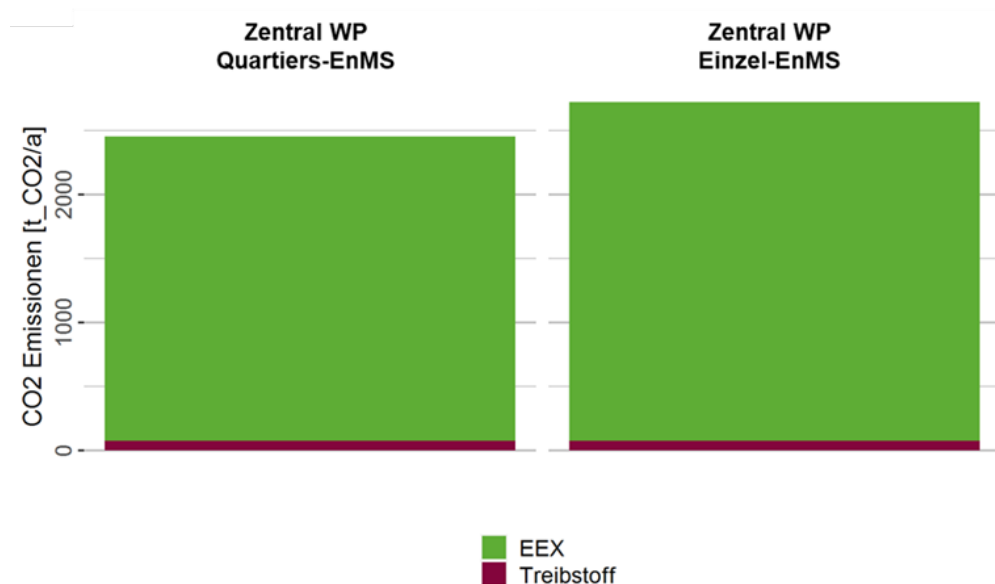


Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

Im Szenario mit Quartiers-EnMS reduzieren sich die CO₂-Emissionen um 9,8 %. In Abbildung 5-15 wird deutlich sichtbar, dass die CO₂-Emissionen fast ausschließlich aus dem Strombezug stammen. Die Treibstoffemissionen entstehen durch die Gaskessel in den unsanierten Gebäuden ohne Fernwärmeanschluss. Die absoluten CO₂-Emissionen sind im Szenario mit zentraler Wärmepumpe die niedrigsten aller Szenarien im Vergleich. Mit 2.454 t CO₂eq im Fall mit Quartiers-EnMS im Vergleich zu 2.722 t CO₂eq ohne Quartiers-EnMS liegen die CO₂-Emissionen ca. 50 % unter denen des REF-Szenarios.

Auch der Primärenergieverbrauch sinkt im Wärmepumpenszenario mit Quartiers-EnMS um 5,0 % im Vergleich zum Fall ohne Quartiers-EnMS, da der Wärmepumpenbetrieb optimiert wird.

Abbildung 5-15: Vergleich der CO₂-Emissionen im Szenario mit Zentraler WP mit und ohne Quartiers-EnMS



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

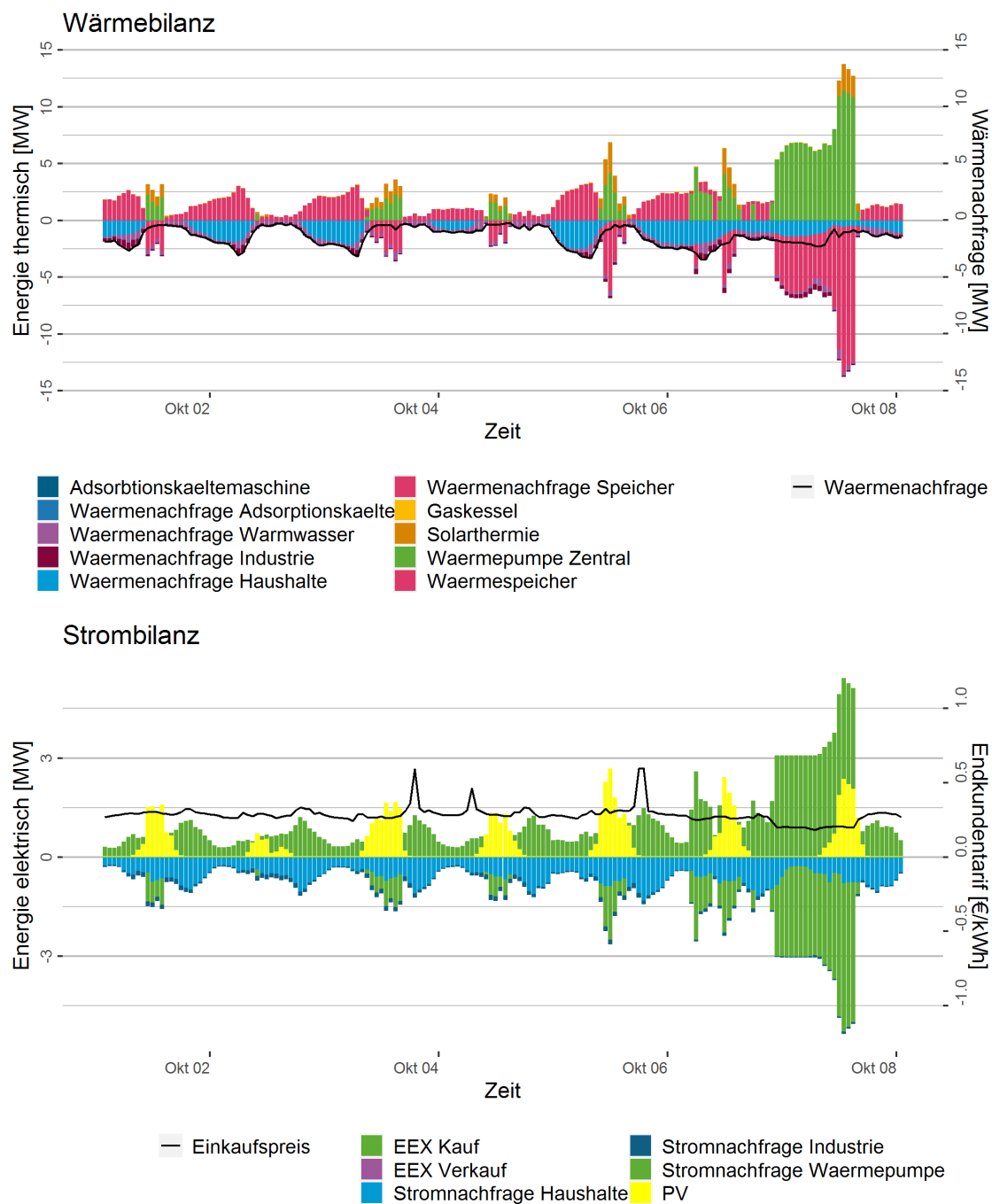
In den Energiebilanzen ist ein Ausschnitt des Betriebs des Wärmepumpen Szenarios in Abbildung 5-16 zu sehen. Dabei ist die Wärmeversorgung mit dem Einsatz der zentralen Wärmepumpe (grün) zusätzlich gedeckt durch das Ausspeichern von Wärme durch den zentralen Wärmespeicher (pink thermisch positiv). Der Wärmespeicher in der Einspeicherung (pink thermisch negativ) wird durch die Wärmepumpe und Solarthermieanlagen (orange) befüllt. Die schwarze Linie zeigt die Wärmenachfrage aus den Gebäuden, sodass deutlich wird, zu welchen Zeiten die Wärmespeicher befüllt werden. Deutlich ist auch zu sehen, dass die Wärmeversorgung vor allem nachts durch die Speicher unterstützt wird.

In der Strombilanz im unteren Teil der Abbildung ist der Einfluss der zentralen Wärmepumpe im Quartier auch zu sehen. In Zeiten mit niedrigem Strompreis oder PV-Überschüssen bezieht die Wärmepumpe Strom, um sowohl die aktuelle Wärmenachfrage zu decken als auch den zentralen Wärmespeicher zu füllen.

Zusammenfassend kann das Szenario mit zentraler Wärmepumpe und Wärmespeicher einen guten Einblick in die mögliche Verwendung zentraler CO₂-neutraler Wärmeerzeugung in einem Quartier mit und ohne Quartiers-EnMS geben. Bei steigenden Wärmekosten (z. T. durch die CO₂-Bepreisung von gasbetriebenen Fernwärmeanlagen) kann der Betrieb von zentralen Wärmepumpen im Quartier eine ökologisch sinnvolle Maßnahme darstellen. Dadurch wird allerdings, sofern die Wärmepumpe nicht vollständig durch regenerative Stromquellen im Quartier betrieben wird, eine Abhängigkeit von quartiersexternen Strompreisen entstehen. Diese kann mitunter zu einer Erhöhung der Gesamtkosten führen, wie es hier im Modell dargestellt ist. Der Nutzen einer zentralen Wärmepumpe im Kontext der Transformationspfade

ist die Erreichung einer starken Reduktion der CO₂-Emissionen. Damit kann ein Quartier bei gleichzeitigem Bezug von emissionsfreiem Strom bilanziell CO₂-neutraler werden.

Abbildung 5-16: Einwöchiger Betriebsausschnitt der stündlichen Wärme- und Strombilanz im Szenario mit zentraler Wärmepumpe



Quelle: Eigene Berechnung Fraunhofer ISE

5.4 Diskussion von Energiemanagementsystemen

5.4.1 Zusammenfassung und Diskussion der Szenarienanalyse

Alle Szenarien zeigen oder deuten darauf hin, dass ein Quartier mit Quartiers-EnMS Einsparungen durch einen optimierten, effizienteren Betrieb erzielen kann. Die möglichen Kosten- und CO₂-Einsparungen sind abhängig vom technischen System, der Quartiersstruktur und dem ökonomischen Anreizsignal, in diesem Falle dem Strompreis. Das technische System und die Quartiersstruktur umfassen dabei Faktoren wie den Sanierungsstand der Gebäude, genutzte Versorgungstechniken und die vorhandene Infrastruktur, welche den Effekt auf den Beitrag des Energiemanagementsystems beeinflussen. In den durchgeführten Szenario Rechnungen konnten Kosteneinsparungen durch den reinen technisch optimierten Betrieb von 1,8 bis 8 % erzielt werden. In Fällen, in denen beispielsweise ein Wärmenetz vorhanden ist, hat ein Quartiers-EnMS mehr Möglichkeiten, die Wärmeherzeugung auf der Quartiersebene zu optimieren und beschränkt sich nicht nur auf die Optimierung des Eigenstromverbrauchs und des Stromverbrauchs z. B. für Wärmepumpen innerhalb eines Gebäudes. Des Weiteren ist der Sanierungsgrad insofern relevant, als dass dieser die Wärmenachfrage und damit die gewählten Versorgungstechniken stark beeinflusst. Sanierte Gebäude werden (analog zu den nationalen Transformationspfaden) in den präsentierten Szenarien mit Wärmepumpen auf Niedrigtemperaturniveau versorgt, die hier mit Photovoltaikstrom betrieben werden und Lufttemperaturquellen nutzen. Damit erzeugen die Wärmepumpen keine CO₂ Emissionen im Betrieb. Aber auch Wärmepumpen, die mit dem aktuellen Strommix arbeiten, haben geringe CO₂ Emissionen aufgrund ihres Leistungskoeffizienten von üblich 3 und mehr, d. h. für 3 kWh Nutzwärme werden 2 kWh Umgebungswärme und nur 1 kWh Strom benötigt, während Gaskessel die gesamten 3 kWh der entsprechenden Gasmenge verbrennen müssen und damit höhere CO₂ Emissionen erreichen. Anzumerken ist, dass nur Betriebsemissionen betrachtet wurden und keine Lebenszyklusanalyse durchgeführt wurde. Durch Bezug erneuerbaren Stroms kann die Wärmepumpe im Betrieb emissionsfrei Wärme bereitstellen. Da die Wärmegestehungskosten einer Wärmepumpe vom Strompreis abhängig sind, bietet diese Struktur einem EnMS mehr Anreize zur Betriebsoptimierung, da der Strompreis fluktuiert, während der Gaspreis nahezu konstant ist. Dieser Effekt konnte im Szenario (ausgeführt in Kapitel 5.3.3) mit einer zentralen Wärmepumpe deutlich stärker beobachtet werden als bei der dezentralen Versorgung einzelner Gebäude. Dabei ermöglicht ein Quartier-EnMS die verbesserte Nutzung von Eigenstromkapazitäten im Quartiersbetrieb. In Szenarien mit auf Quartiersebene zentral gesteuerter Wärmeherzeugung kann das Quartiers-EnMS die Verteilung und Speicherung der Wärme über das ganze System betrachten und somit sicherstellen, dass diese möglichst kosteneffizient erfolgt.

Jedoch ist ein Quartiers-EnMS nicht in allen Fällen vorteilhaft. Rechnungen für ein Quartier ohne ausreichendes Flexibilitätspotenzial zeigen, dass dieses Quartier ohne und mit Quartiers-EnMS annähernd gleich betrieben wird. Dies ist der Fall, wenn nur eine Versorgungstechnik installiert ist oder die räumliche Auslegung der PV Anlagen so verteilt ist, dass keine Überschüsse erzeugt werden z. B. bei einer gleichmäßigen Verteilung auf allen Dächern. Auch nicht vorhandene Speicher (um Leistungsverschiebung zu betreiben), können Einschränkungen für einen Beitrag des EnMS sein. Weiterhin muss ein ökonomischer Anreiz gegeben sein, vorhandene Flexibilitätspotenziale zu nutzen. Sind im betrachteten Fall die Strombezugskosten konstant, so

besteht für das EnMS kein ökonomischer Anreiz, Lasten zu verschieben oder eine andere Verteilung von Erzeugung und Nachfrage anzustreben. Ein ökonomisches Anreizsignal muss daher zwingend gegeben sein, damit das EnMS zu Vorteilen führt. Dieses Signal kann, muss aber nicht, der Strompreis sein, wie in der vorliegenden Untersuchung. Die Ausgestaltung des Strompreises ist von einer Vielzahl von Faktoren und Zielen abhängig, die nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind. Andere Anreize zur lokalen Nutzung von Flexibilität können niedrige Einspeisevergütungen sein, die zur Steigerung des Eigenverbrauchs und der Speicherinstallation führen. Allerdings erfolgt auch hier der Anreiz gegenüber dem gängigen Strompreis. Eine andere Möglichkeit könnten PowerPurchasingAgreements (PPA) der Anlagenbetreiber zu Verbrauchern innerhalb des Quartiers mit niedrigeren Preisen als den Marktpreisen sein. Gesamtsystemisch betrachtet liegt hier ein ökonomisches Signal immer darin, durch Änderung des Betriebs die Kosten oder Emissionsziele zu verbessern.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Quartiere und die Bewertung des Beitrags von Energiemanagementsystemen zu stärken, sind die Betrachtung weiterer Fälle und anderer Szenarien empfehlenswert. Zum Beispiel können Ausbaumöglichkeiten oder ein Austausch der Techniken im Quartier den Beitrag des Quartiers-EnMS erhöhen. Dieser Fall wäre zum Beispiel für Neubaugebiete sehr interessant. Weiter können Klimaschutzziele und Marktbedingungen wie CO₂-Reduktionsziele oder CO₂-Preise integriert werden. Solche Beschränkungen fördern einen veränderten Betrieb, da gleichzeitig Emissionen und Kosten eingespart werden können, und dürften im Falle eines EnMS auf Quartiersebene zukünftig von größerer Relevanz als die reine Betriebsoptimierung sein. Auch der Daten und Kommunikationsaustausch mehrerer Quartiers-EnMS verschiedener Quartierstypen auf einer gemeinsamen kommunalen Ebene könnte über Synergieeffekte einen Mehrnutzen bieten und sollte untersucht werden.

Insgesamt zeigt die vorliegende Untersuchung, dass ein ökonomischer Anreiz wie z. B. variable Strompreise eine notwendige Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz von Quartiers-EnMS ist. Diese bieten den notwendigen ökonomischen Anreiz, damit ein EnMS Vorteile erzielen kann. Weiter kann ein netzdienlicher Betrieb der Quartiere beispielsweise durch ein EnMS gefördert werden. Durch Netzsignale kann der Bedarf zu einem netzdienlichen Betrieb dem EnMS mitgeteilt werden, der dann das Quartier dementsprechend betreiben kann. Das EnMS muss aber Handlungsspielraum in Form flexibler Lasten oder Erzeuger haben, um das Energiesystem zu optimieren. Zusammenfassend ergibt sich, dass, je höher der ökonomische Anreiz und die dem EnMS zur Verfügung stehenden Flexibilitätspotenziale im Quartier sind, desto größer die möglichen Effekte und Einsparungen des EnMS sind, sowohl an Kosten als auch an CO₂-Emissionen. Im Quartier Weingarten-West würde der Einsatz eines Quartiers-EnMS wirtschaftliche und ökologische Vorteile bringen.

5.4.2 Grenzen der Untersuchung

Um die Effekte des Einsatzes von Energiemanagementsystemen im Quartier einordnen zu können, wurde die Betriebsoptimierung des Quartiers mit dem Betrieb einzelner Gebäude verglichen, was dem Vergleich zwischen einem Quartiers-EnMS und einem Gebäude-EnMS entspricht. Um dies mit dem Betrieb ohne ENMS vergleichbar zu machen, werden die Kosten anhand durchschnittlicher Preise geschätzt. Im Anschluss werden die weiteren Grenzen der Untersuchung diskutiert.

Generell sind beide Fälle der Untersuchung, sowohl die Quartiers- als auch Einzelgebäude-Betrachtungen, betriebsoptimiert. Eine Betrachtung ohne jegliches EnMS ist durch den Mangel an Informationen im Modell nur begrenzt darstellbar, daher werden die Kosten des Quartiers anhand einer groben Abschätzung ohne Betriebsoptimierung gerechnet. Aus Abbildung 5-9 belaufen sich die Gesamtkosten für das Quartiers-EnMS auf 2,38 Mio. Euro, mit Einzelgebäude-EnMS auf 2,46 Mio. Euro. Die Kosten für den Strombedarf ohne Optimierung als Produkt aus der gesamten Gebäudestromnachfrage und einem fixen Strompreis von 26,29 ct/kWh (Mittelwert des variablen Strompreises in der Optimierung angenommenen Preises) belaufen sich auf 1,63 Mio. Euro. Mehreinnahmen aus dem gesamten Verkauf der PV-Leistung ohne Eigennutzung mit 4,5 GWh und einer angenommen fixen EEG-Vergütung von 8,48 ct/kWh belaufen sich auf 38.100 Euro. Dazu kommen Wärmekosten aus der Fernwärmeversorgung von 1,19 Mio. Euro für 15,7 GWh (subtrahiert der im Quartier erzeugten Menge an Solarthermie) mit 7,57 ct/kWh. Insgesamt ergeben sich in der Summe aus $1,63 + 1,19 - 0,038$ Mio. Euro Schätzungen von 2,78 Mio. Euro für die Gesamtkosten ohne Optimierung. Diese Kostenschätzung für ein Quartier ohne Optimierung enthält dabei jedoch keine fixen und variablen Kostenanteile (z. B. aus dem Betrieb der Anlagen), sowie Netzverlustabschätzungen. Im Weingarten-West-Modell haben die Vergleichsfälle mit Quartiers-EnMS bzw. mit Einzelgebäude-EnMS in dieser Kostenabschätzung ca. 15 % bzw. 12% niedrigere Gesamtkosten als ohne Betriebsoptimierung. Die wesentliche Kostenersparnis entsteht dabei durch den Einsatz eines EnMS, die Einsparung auf Quartiersebene im Vergleich zum Einzelgebäude ist im Referenzszenario eher gering.

Energiemanagementsysteme in Quartieren sind aus den Definitionen des Kapitels 2 für die Untersuchung auf den technischen Betrieb und Regelung der vorhandenen Versorgungsstruktur begrenzt. Dieser Teil kann einen Beitrag zur Zielerreichung leisten, mag aber nicht der Hauptanschaffungsgrund eines Entscheiders für ein EnMS sein.

Die Ermittlung der vorhandenen Energie-Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit von Messsystemen sind notwendige Schritte für Betreiber, um die Beschaffung von EnMS und daraus identifizierbare Einsparpotenziale bewerten zu können. Moderne EnMS haben zudem ein weitergefasstes Spektrum an Maßnahmen und Unterstützung der Planungsaufgaben, die nicht Teil der vorliegenden Untersuchung sind. Dazu zählen die Bewertung von Investitionsmaßnahmen, Standortbewertung oder Ressourcen- und Produktionseinsatzplanung. Daraus entstehende positive Effekte sind z. B. weitere Energieeinsparungen, Austausch von ineffizienten Altanlagen und transparente Steuerungsmöglichkeiten. Je nach den Anforderungen und der Größe des Quartiers können sehr unterschiedliche Installations- und Betriebskosten für Messsysteme und EnMS-Software anfallen. Diese schwanken in Abhängigkeit der Voraussetzungen, in Form und Grad der Digitalisierung, Bussystemen, Datenlogging, Modbussen und Zählertypen sowie den Preisen der Messpunkte stark. Schätzungen liegen je nach Komplexität und Anforderung zwischen 15 Euro bis 700 Euro pro Messpunkt (CCC Industriesoftware 2018). Die Einrichtung, Lizenzen sowie Schulungen und Workshops zum Einarbeiten der Messsystemtechniker von EnMS liegen zusätzlich zurzeit noch bei mehreren tausend Euro für mittelständische Betriebe. Quartiers-EnMS Software Preise liegen in vergleichbarer Größenordnung. Allerdings ist bei Quartiers-EnMS davon auszugehen, dass weniger Mitarbeiter geschult werden müssen, da solch ein Betrieb vornehmlich bei lokalen Energieversorgern liegen dürfte, die mehrere Quartiere versorgen und damit eine gewisse Expertise für Quartiere bilden dürften. Aufgrund der notwendigen Investitionen werden

Quartiers-EnMS primär dort wirtschaftlich einsetzbar sein, wo aufgrund systemimmanenter Flexibilitäten oder einer sehr heterogenen Verteilung von Erzeugung und Nachfrage ein großes lokales Optimierungspotenzial besteht, und bei solchen Energieversorgern, die durch die Verfügbarkeit mehrere solcher Quartiere Skaleneffekte nutzen können.

Auf der anderen Seite gibt es monetäre und nicht-monetäre Vorteile aus dem Betrieb eines EnMS, die in der Untersuchung nicht eingehend betrachtet wurden und daher hier weiter beleuchtet werden. Durch die Installation und den Einsatz eines EnMS können Effizienzpotentiale häufig erstmals identifiziert werden. Die Potenziale können vielfältiger Art sein und durch eine Bedarfsreduktion oder einen Wechsel der Versorgungstechnik erreicht werden, was dann zu einem kostengünstigeren und emissionsärmeren System führt. Diese Effekte sind im vorliegenden Vergleich nicht betrachtet, da sie nicht durch das EnMS selbst veranlasst werden, sondern durch dahinterstehende Planer oder Verbraucher, die dafür die mit dem EnMS ermittelten Daten nutzen.

Weitere nicht monetäre Vorteile liegen im Informationsgewinn des Betreibers. So ist die Erfassung von Systembedingungen oft unerlässlich, um Maßnahmen und Planungen überhaupt vornehmen zu können. Grenzen der Untersuchung der Effekte von Energiemanagementsystemen in der Studie liegen somit auch in den positiven zusätzlichen Effekten durch Systeminformationen. Das Modell trifft perfekte Entscheidungen ohne Unsicherheiten, die sich aus den Annahmen und der Systemdefinition ergeben. In der Realität gibt es keine perfekte Voraussicht, Datenfehler und Plausibilisierungsprozesse erschweren den Nutzen von EnMS in der Anfangsphase. Jedoch steigert sich der Nutzen von EnMS mit Lernkurveneffekten nach Durchlaufen mehrere Prozesse.

In der vorliegenden Untersuchung ist als größter Unsicherheitsfaktor des Informationssystems die Betrachtung des Einzelgebäude-EnMS Fall zu sehen. In Quartieren ohne EnMS gibt es weit verbreitet auf der Gebäudeseite im Wärmesektor keine oder veraltete analoge Messsysteme, die die Messdaten des Wärmeverbrauchs z.B. nur monatlich oder jährlich ablesen. Im Stromsektor ist eine Verbesserung durch den Smart-Meter-Rollout zu erwarten, viele Systeme sind bis dahin jedoch nicht in der Lage, ein Einzelgebäude-EnMS zu verwenden. Dieser Informationsunterschied zwischen nicht verfügbarer und vollständiger Systeminformation bildet in der Realität ein hohes Maß an Optimierungsspielraum für ein EnMS. Weitere Kommunikationseffekte aus Datenfehlern und Datenplausibilisierungsprozessen führen regulär zu imperfekten Systeminformationen, sodass EnMS ihren Nutzen durch Fehlerbehebung und Prognosen (hier nicht betrachtet) verbessern können. Weitere positive Effekte von EnMS liegen in der möglichen Verbesserung des Softwareeinsatzes durch künstliche Intelligenz.

Auf der Nutzerseite wurde in der Untersuchung weiterhin nicht zwischen verschiedenen Besitzern von Gebäude und Techniken unterschieden und somit keine Einzelnutzen und Kostenbewertung vorgenommen. Die Nutzenverteilung in einem Quartiers-EnMS kann nicht bewertet werden. Geht man von einer höheren Durchdringung von Quartiers-EnMS aus, so wären weiterhin Effekte im Zusammenspiel mit weiteren Quartieren und mit dem übergeordneten Stromnetz zu erwarten. So ist die gezielte Überschussverwendung eines Quartiers ins nächstgelegene durch verbundene Quartiers-EnMS in Richtung 2050 durchaus denkbar. Welcher Art diese Effekte sind, ist aus der vorliegenden Untersuchung nicht direkt abzuleiten und stark von ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen abhängig.

Für Handelskonzepte wie beispielsweise den Direkthandel zwischen Quartieren anstelle des Handels zwischen einzelnen Prosumern oder auch der lokale Ausgleich von Energieflüssen, wie bereits in einigen Forschungsprojekten angedacht (C-Sells und Zellnetz), würde von einem Quartiers-EnMS profitieren bzw. diese Konzepte erst ermöglichen. Auch das Bilanzkreismanagement dürfte durch eine verbesserte Informationsgrundlage und lokalen Ausgleich profitieren. Um die Effekte auf übergeordnete Netze einschätzen zu können, müssten weitergehende Analysen durchgeführt werden, die auch eine Variation der ökonomischen Signale beinhalten, da diese das Quartiersverhalten maßgeblich beeinflussen können (Thomsen und Weber 2019). Die Relevanz von EnMS im Gebäudesektor wird mit zunehmenden Steuerungsaspekten aufgrund der Digitalisierung und Vernetzung bei der Lastverteilung zunehmen. Die Minderungseffekte von EnMS bei den CO₂-Emissionen hingegen werden voraussichtlich durch den Einsatz von emissionsneutralen Versorgungstechniken abnehmen.

Weitere Grenzen der Untersuchung liegen in der Verallgemeinerung der eingesetzten Techniken und ihrer Wirkungsgrade für ein Quartier, die in realen EnMS zusätzliche Flexibilität durch den optimalen Einsatz der jeweiligen Technikprodukte unterschiedlicher Hersteller bieten. Als Beispiel wird die Verfügbarkeit von verschiedenen Wärmepumpen der Hersteller angebracht, die sich unterschiedlich auf die im Quartier herrschenden Gegebenheiten anpassen können, indem weitere Betriebsweisen und verbesserte Betriebsführungen implementiert werden. So könnten sich zusätzliche Flexibilitäten, aber auch Einschränkungen durch herstellersistenspezifische Charakteristika ergeben, die in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt werden konnten.

Auch liefert die Untersuchung keine Hinweise darüber, wie CO₂-Preise den Mehrwert eines Einsatzes von EnMS in Quartieren beeinflussen würde. Ausgehend von den vorgestellten Ergebnissen ist zu erwarten, dass der Einsatz fossiler Brennstoffe quartiersweit reduziert wird. Ob sich dies von der Reduktion in Einzelgebäuden unterscheidet, hängt stark von der vorliegenden Gebäude- und Anlagenkonfiguration ab. In Quartieren mit hohen Anteilen von Wärmepumpen dürfte kein Einfluss zu sehen sein, in Quartieren mit Nahwärmenetz dürfte die Quartiersoptimierung effizienter sein als die Einzelgebäudeoptimierung. Der größte Einfluss von CO₂-Preisen ist jedoch in der Anlagenplanung und dem Nutzerverhalten zu erwarten (nicht in der automatisierten Betriebsführung, die EnMS bieten), da diese einen deutlich größeren Hebel zur CO₂-Reduktion bieten. Die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf Quartiere mit anderen Strukturen, wie zum Beispiel Mischgebiete oder Industriegebiete, wäre zu prüfen. Die quantitativen Ergebnisse sind stark von der Verteilung der Nachfrage und Erzeugung, beides sowohl zeitlich als auch räumlich, abhängig. Eine größere Heterogenität führt wahrscheinlich zu größeren nutzbaren Potenzialen, dies wäre in Mischgebieten aus Wohn- und Nichtwohngebäuden oder gemischten Gebäudeeinheiten zu vermuten. Bei einem hohen Anteil industrieller Nachfrage wird der Nutzen einer Quartiersoptimierung davon abhängen, ob es überhaupt an einer Stelle im System eine Überschusserzeugung gibt oder ob die Nachfrage per se das vorhandene Erzeugungspotenzial übersteigt oder ob es bisher nicht genutzte Potenziale wie Abwärme gibt.

Zusammenfassend ist der Einsatz eines Quartiers-EnMS als positiv zu bewerten, sofern bestimmte Voraussetzungen gegeben sind. Eine genauere Analyse dieser notwendigen Voraussetzungen hinsichtlich der Quartiersstruktur, vorhandener Versorgungstechniken und

Infrastruktur erscheint sinnvoll, um den Einsatz möglichst effizient zu gestalten und die Quartiere mit dem höchsten Optimierungspotenzial auszuwählen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

6.1 Wie können die Umweltziele erreicht werden?

Wie der Titel des Kapitels schon sagt, ging es bei den Berechnungen der Beispiel-Quartiere nicht um das „Ob“, sondern nur um das „Wie“ des Erreichens der Umweltziele. Die Treibhausgas-Neutralität im Jahr 2050 ist das übergeordnete zu erreichende Umweltziel, und zwar bezogen auf die Nutzungsphase der Quartiere. In diesem Unterkapitel erfolgt zunächst eine Zusammenfassung der Ergebnisse je Beispielquartier, gefolgt von einer Querauswertung der Quartiere.

6.1.1 Quartiersbilanz

Zusammenfassend lassen sich für die betrachteten Transformationspfade in den Beispiel-Quartieren folgende Ergebnisse festhalten

1. Vorrang Energieeffizienz (Effizienz-Pfad) oder Vorrang erneuerbare Energien (EE-Pfad) am Beispiel Haslach: der Energiebedarf des Quartiers bleibt im EE-Pfad nahezu konstant, wohingegen er im Effizienz-Pfad um knapp 60 % sinkt. Die Umweltziele werden im EE-Pfad zu insgesamt leicht niedrigeren Kosten erreicht. Die weiteren Umweltwirkungskategorien aus der Herstellung der Bauteile/Gebäudetechnik schlagen im Effizienz-Pfad stärker zu Buche als im EE-Pfad. Dies wird allerdings in den Jahren bis 2035 durch die Verbrennung von Erdgas in der Nutzungsphase mehr als aufgehoben: bis 2035 schneidet der EE-Pfad deshalb in der kombinierten Betrachtung der Umweltwirkungen von Herstellungs- und Nutzphase schlechter ab, langfristig gleichen sich die Pfade an. Anders ist dies nur beim POCP, wo sich die Herstellung der EPS-Dämmung zu heutigen Ökobilanzdaten nachteilig niederschlägt. Im Effizienz-Pfad wird infolge des geringeren Bedarfs an Wärmepumpenstrom mehr Strom ins übergeordnete Netz eingespeist. Aus Gesamtsystemperspektive bietet der Effizienzpfad mehr Freiheitsgrade: einerseits hinsichtlich des Stromverbrauchs bzw. der Stromeinspeisung und andererseits hinsichtlich des geringeren Wärmebedarfs an sonstigen erneuerbaren Energien.
2. Konventionelle Dämmung gegenüber Dämmung aus nachwachsenden Rohstoffen am Beispiel Weingarten: Die Holzfaserplattendämmung verursacht nur ca. zwei Drittel der Treibhausgase in der Herstellung im Vergleich zur EPS- oder Mineralfaser-Dämmung. Die Kosten bei Holzfaserplatten-Dämmung liegen merklich höher als bei der EPS- oder Mineralfaser-Dämmung. Bei den weiteren Umweltwirkungskategorien schneiden die unterschiedlichen Dämmstoffe unterschiedlich gut ab – allerdings führen Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Großen und Ganzen zu niedrigeren Umweltwirkungen. Im Verhältnis zu den Umweltwirkungen der PV-Anlagen (so wie sie derzeit produziert werden³³) machen diejenigen der Dämmstoffe nur einen Bruchteil aus.
3. Konventioneller Neubau (Massivbau) gegenüber Neubau aus Holztafelbauweise am Beispiel Ludwigshöh-Viertel: Der sehr hohe energetische Gebäudestandard in Verbindung mit dem Einsatz erneuerbarer Energien erfüllt die Umweltziele von Anfang an. Die Holztafelbauweise schneidet in den Umweltwirkungskategorien (einschließlich GWP) deutlich besser ab im

³³ Auch die Herstellungsweise der PV-Module wird über die Zeit weniger CO₂-intensiv werden, was in den Berechnungen jedoch nicht ausgedrückt werden konnte, da keine Daten verfügbar sind.

Vergleich zum Massivbau (Kalksandstein). Gleichzeitig ist die Holztafelbauweise aber auch leicht teurer. Der insgesamt geringe Energieverbrauch des Quartiers (Wärme und Strom) führt zu hohen PV-Einspeisemengen.

4. Zentrale gegenüber dezentraler Wärmeversorgung am Beispiel Linkenheim-Hochstetten: Die Umstellung der Fernwärme auf erneuerbare Energieträger führt zu einer deutlichen Senkung der THG-Emissionen. Die PV-Einspeisemengen liegen beim zentralen Wärmeversorgungspfad höher, da die angenommene Groß-Wärmepumpe insgesamt effizienter als die dezentralen Wärmepumpen arbeitet. Schlussfolgerungen zu den Umweltwirkungskategorien sind nur begrenzt aussagefähig, da für Groß-Wärmepumpen in den einschlägigen Datenbanken bisher keine Umweltwirkungsdaten vorliegen. Die dezentrale Wärmeversorgung mit ihrer Kombination aus Wärmepumpen und Solarthermie weist höhere Kosten auf als die Groß-Wärmepumpe inkl. Netzausbau und der Installation weiterer Gebäude-Netzübergabestationen. Allerdings sind auch die Unsicherheiten bei den Investitionskosten hoch.

Unsicherheiten in der Betrachtung

- ▶ Grundsätzlich sind Vorhersagen/Prognosen bis 2050 aufgrund des langen Zeitraums schwierig. Das betrifft zum Beispiel die langfristige Entwicklung von Energie- und Investitionskosten.
- ▶ Energiepreispfade sind mit hohen Unsicherheiten, insbesondere in Bezug auf die zukünftige CO₂-Bepreisung, verbunden.
- ▶ Der bundesdeutsche Strommix und die Fernwärme-Mixe der Quartiere verändern sich über die Zeit. Bei beiden Entwicklungen handelt es sich um Annahmen; die tatsächliche Entwicklung kann langsamer oder schneller geschehen. Für die Emissionen aus der Herstellungsphase der Bauteile/Gebäudetechnik wurden keine Veränderungen im Laufe der Zeit angenommen; Ökobilanz-Datensätze enthalten dazu keine Informationen. Das spielt insbesondere bei der PV eine wichtige Rolle, in geringerem Maße bei der Herstellung von Dämmstoffen (EPS). Infolgedessen werden die gezeigten Umweltwirkungen, insbesondere der PV-Module, zukünftig wahrscheinlich anders ausfallen als in den Beispielquartieren dargestellt.
- ▶ Nicht alle Stromverbraucher im Quartier sind in die Bilanzierung mit aufgenommen: dies betrifft die E-Mobilität, Straßenbeleuchtung, sowie der Stromverbrauch von Haushalten (in einigen Fällen), Industrie und GHD, der nicht der Gebäudekonditionierung dient.

6.1.2 Querauswertung

Quartiers-übergreifend lassen sich trotz der Größenunterschiede und weiterer sich unterscheidender Quartierscharakteristika folgende Aspekte festhalten:

1. Hohe Sanierungsraten bei gleichzeitiger Tiefensanierung führen zu einer deutlichen Energieverbrauchsreduktion, welche den Druck auf die erneuerbaren Energien, die den Restbedarf decken müssen, reduziert. Das kommt auch dem Gesamt-Energiesystem zugute, da mehr Freiheitsgrade bei der Verteilung der verschiedenen, in ihrer Verfügbarkeit begrenzten Energieträger geschaffen werden.
2. Die hohen PV-Zubauraten ermöglichen jedem der betrachteten Quartiere die jahresbilanzielle Überversorgung mit im Quartier erzeugtem Strom. Dies ist sogar für das Quartier

Haslach und den auf wenig Effizienz setzenden Erneuerbare-Energien-Pfad der Fall. Einschränkung ist allerdings zu beachten, dass der Stromverbrauch infolge einer verstärkten Elektromobilität, Strom für die Straßenbeleuchtung oder Gewerbe- und Industriestrom in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden.

3. Der Verlauf der CO₂-Emissionsreduktion der Quartiere erfolgt zumeist steiler in der ersten Dekade und flacht dann ab. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass angenommen wird, dass zunächst die Gebäude mit dem schlechtesten energetischen Zustand saniert werden und somit größere Reduktionspotenziale erschlossen werden. Zum anderen liegt es an der anfangs höheren Wirkung des im Quartier mittels PV erzeugten Stroms, da dieser zu Beginn des Transformationspfades Quartiers-externen Strom verdrängt, dessen CO₂-Rucksack anfangs noch CO₂-intensiver ist.
4. Die hohen PV-Zubauraten führen zu hohen Effekten bei allen Umweltwirkungskategorien. Am Beispiel des Neubau-Quartiers Ludwigshöhe wird deutlich, dass die Umweltwirkungen der PV-Module sogar in der gleichen Größenordnung liegen wie die der Neubauten selbst (bezogen auf die Bruttogeschossfläche der Gebäude). Allerdings ist wichtig hervorzuheben, dass die Höhe der grauen Emissionen der PV-Modulherstellung in Zukunft deutlich sinken werden, wenn auch der Strom zur Herstellung der Module grüner wird. Derzeit werden die meisten PV-Module in China unter Nutzung von hohen Anteilen an Steinkohlestrom hergestellt. Darüber hinaus vermeidet der erzeugte PV-Strom die Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen in Deutschland.
5. In der Nutzungsphase der Wärmepumpen geht ein Teil der Kältemittel verloren. Die meisten derzeit verwendeten Kältemittel tragen in relevanter Weise zum GWP bei. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft weniger treibhauswirksame Kältemittel eingesetzt werden, so dass die direkten Treibhausgasemissionen aus der Nutzung von Wärmepumpen langfristig sinken werden.
6. In den Anfangsjahren des Betrachtungszeitraums dominiert in den meisten Umweltwirkungskategorien die Nutzungsphase (hier insbesondere die Nutzung von Erdgas, aber auch die Stromerzeugung und die Fernwärme), im Lauf der Zeit gehen die Umweltwirkungen aus der Nutzungsphase deutlich zurück. Gleichzeitig werden die Umweltwirkungen aus der Herstellungsphase (insbesondere aus der Produktion der Photovoltaikanlagen) relevanter. Dies verdeutlicht, wie wichtig umweltfreundliche Herstellungsverfahren sind.
7. Einfamilienhaus-Siedlung gegenüber MFH-Siedlungsgebiet: Die Querauswertung der Transformationspfade zeigt, dass die pro-Kopf-THG-Emissionen stark von der Siedlungsstruktur abhängen: Aufgrund des großen Anteils an MFH wird in Weingarten-West bei gleicher Sanierungsrate ein etwas niedrigerer Energieverbrauch pro m² erreicht als in Linkenheim-Hochstetten, der pro-Kopf-Energieverbrauch beträgt dagegen nur etwa die Hälfte.

6.1.3 Planung und kritische Entscheidungszeitpunkte zur Zielerreichung

Aus den Berechnungen der Beispiel-Quartiere lassen sich für die Planung der Quartiers-Transformation bis 2050 folgende Eckpunkte ableiten:

1. Die Quartiersplanung sollte zeitnah in Angriff genommen werden. Bis 2050 sind es noch knapp 30 Jahre und eine ansatzweise flächendeckende Sanierung der Bestandsgebäude ist nur mit einer deutlich angehobenen Sanierungsrate möglich. Das Beispiel Haslach zeigt anhand des EE-Pfads: Bleibt es bei einer Sanierungsrate von ca. 1 % (was in etwa der

Sanierungsrate der letzten Jahre entspricht) auf ein energetisches Niveau heutiger Neubauten, verbleibt auch 2050 noch ein beträchtlicher Wärmebedarf³⁴. Die THG-Neutralität ist dennoch erreichbar, allerdings mit einem hohen Bedarf an erneuerbarer Wärme. Im EE-Pfad wird diese Wärme hauptsächlich über Wärmepumpen und die durch diese nutzbar gemachte Umweltwärme gedeckt. Allerdings arbeiten Wärmepumpen in unsanierten Gebäuden weniger effizient, und die Stromnachfrage des Gesamtsystems steigt gerade im Winter merklich an. Zudem wirft das Beispiel Haslach die Frage auf, ob Wärmepumpen in Vierteln mit hoher Bebauungsdichte genügend Umweltwärme verfügbar machen können (vgl. Erdsondendichte bei hoher Bebauungsdichte in Jochum et al. (2017)). Der Effizienzpfad mit seinen hohen Sanierungsraten erlaubt hingegen an anderer Stelle im System mehr Freiheitsgrade: weniger Strombedarf und weniger (oder mitunter: ausreichend viele) Erdsonden für Wärmepumpen.

2. Bei den verschiedenen Netz-Infrastrukturen handelt es sich wie beim Gebäudebestand um träge Systeme. Auch hier ist es für alle beteiligten Akteure unerlässlich zu wissen, wie sie planen können bzw. müssen.
 - a) Wenn eine zentrale Wärmeversorgung angestrebt werden soll (z. B. im Pfad Zentral in Linkenheim-Hochstetten), dann ist eine detaillierte Planung sowohl für die Wärmenetzbetreiber als auch die Eigentümer der anzuschließenden Gebäude wichtig. So muss der Netzbetreiber wissen, mit welchen Absatzmengen an Wärme er rechnen kann. Dies ist auch vor dem Hintergrund der infolge energetischer Sanierungen zurückgehenden Wärmebedarfe eine Herausforderung. Gleichzeitig müssen die Eigentümer der anzuschließenden Gebäude eingebunden werden und zum gegebenen Zeitpunkt ihre alte Versorgungstechnik durch einen Wärmenetzanschluss ersetzen. Bis 2050 müssen auch Wärmenetze komplett mit erneuerbaren Energien gespeist werden. Hier ist in der Planung der Netze zu berücksichtigen, dass ein Absenken der Netztemperatur von Vorteil für die Integration der erneuerbaren Energien ist. Entsprechend sollten auch in angeschlossenen Gebäuden (oder bei sonstigen Abnehmern) die Wärmebedarfe auf ein niedrigeres Temperaturniveau abgesenkt werden. Wärmenetze sind vor allem in denjenigen Quartieren eine sinnvolle Lösung, in denen mit anderen erneuerbaren Energien nicht genügend Wärme bereitgestellt werden kann. Dies betrifft vor allem Quartiere mit hohen Bebauungsdichten und solche mit großen Hürden bei der energetischen Sanierung (z. B. wegen Denkmalschutz oder anderer Restriktionen, siehe auch Jochum et al. (2012)).
 - b) Eine weitere infrastrukturelle Herausforderung stellt die notwendige Ertüchtigung der Stromnetze dar, zumindest in den Quartieren, die verstärkt auf Wärmepumpen zur Wärmeversorgung setzen (vgl. die Pfade in Haslach oder im Transformationspfad Dezentral in Linkenheim-Hochstetten). Auch hier gilt: je höher der Wärmebedarf im Quartier, desto mehr elektrische Leistung wird am Ende in Extremfällen wie kalten Wintertagen abgerufen werden. Deshalb reduziert auch an dieser Stelle eine hohe energetische Sanierungsrate der Gebäude den Druck auf die Netze (siehe

³⁴ Dies liegt u.a. an den geringeren Gebäude-internen Wärmegewinnen infolge einer Effizienzsteigerung der IKT-Geräte im Haushalt, die in der Folge weniger Wärme abgeben. Konsequenterweise muss dann mehr geheizt werden.

Effizienzpfad in Haslach). Darüber hinaus müssen die Stromverteilnetze in die Lage gebracht werden, den weiteren Anstieg des auf/an Gebäuden produzierten PV-Stroms aufzunehmen. Hinzu kommt im Falle der Stromnetze noch der prognostizierte Hochlauf der Elektro-Mobilität und die damit einhergehenden zusätzlich abgerufenen elektrischen Leistungen im Quartier.

- c) Bei den Gasverteilnetzen stellt sich im Gegensatz dazu die Frage, wie mit dem Rückgang des Erdgas-Verbrauchs umzugehen ist. In den hier berechneten Transformationspfaden spielt Erdgas nach 2040 keine Rolle mehr. Entsprechend ist für die betroffenen Akteure eine verlässliche Planung wichtig: einerseits müssen Eigentümer mit Gas-Kesseln bis zum Zeitpunkt des Wärmetechnikwechsels weiterhin mit Erdgas versorgt werden, andererseits muss der Gas-Verteilnetzbetreiber seine Planungen anpassen. Dies betrifft neben technischen Herausforderungen des geringeren Gasdurchsatzes im Netz auch eine mögliche Anpassung der Netzentgelte (hier ist der Regulator gefragt) sowie möglicherweise einen Rückbau nach Abschalten der Netzstränge.
3. Um die oben genannten Punkte in der Planung der Quartiere aufzugreifen, existieren bereits eine Auswahl an politischen Instrumenten. Auf Einzelgebäudeebene dient beispielsweise der individuelle Sanierungsfahrplan (iSFP) einer ersten Orientierung bzw. Planung von Maßnahmen an und im Gebäude³⁵. Auf Ebene der Quartiere gibt es kein vergleichbares Instrument, vielmehr wird in Förderprogrammen (z.B. Energetische Stadtsanierung³⁶) der Quartiersansatz bzw. die Quartiersplanung angesprochen. In Zukunft wird auf kommunaler Ebene die kommunale Wärmeplanung eine immer größere Rolle spielen. Dieses Instrument dient der integrierten Betrachtung der Wärmebedarfe und möglicher zukünftiger Wärmeversorgungsvarianten. In Dänemark wurde die kommunale Wärmeplanung seit den 1970er Jahren konsequent eingeführt und erfolgreich umgesetzt, in Deutschland beginnt diese Entwicklung erst jetzt. So hat Baden-Württemberg kürzlich alle Kommunen mit 20.000 oder mehr Einwohnern zu einer kommunalen Wärmeplanung verpflichtet (vgl. Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg).
 4. Grundsätzlich müssen bei der Wärmeversorgung aufgrund der ca. 20-jährigen Lebensdauer der Wärmeversorgungstechniken im Gebäude die Weichen, wohin es im Quartier gehen soll, bis spätestens 2030 gestellt sein. Jeder Austausch einer Versorgungstechnik auf Einzelgebäudeebene muss ab 2030 zielkompatibel mit 2050 sein. Je nach Altersverteilung der Versorgungstechniken müsste im Quartier bzw. in einzelnen Straßen ggf. die Ziel-Infrastruktur (z.B. ein Wärmenetz) auch schon ab 2030 verfügbar sein. Dies bedingt ggf. den entsprechenden Vorlauf in der Planung seitens der Netzbetreiber.

6.1.4 Bewertungskriterien für die Zielerreichung

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass das Ziel der THG-Neutralität im Jahr 2050 entlang verschiedener Pfade erreichbar ist. Grundsätzlich erfolgt die Zielerreichung durch den

³⁵ https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/sanierungsfahrplan-muster.pdf?__blob=publicationFile&v=10

³⁶ <https://www.energetische-stadtsanierung.info/>

Zweiklang aus (1) Reduktion des Energiebedarfs und (2) Deckung des verbleibenden Energiebedarfs mittels erneuerbarer Energien.

Am Beispiel von Haslach zeigt sich in diesem Zusammenhang, dass zwar der Erneuerbare-Energien-Pfad insgesamt leicht kostengünstiger ist als der Effizienz-Pfad, dass er aber gleichzeitig eine Quartiersversorgung mit weiterhin hohen Wärmebedarfen kreiert, und somit die vor allem aufgrund der Flächenknappheit nur endlich zur Verfügung stehenden erneuerbaren Ressourcen des Gesamtsystems stark in Anspruch nimmt. Hinzu kommt die Frage, ob es nicht zu Problemen bei der Stromversorgung insgesamt kommt, wenn viele Quartiere deutschlandweit vor allem auf wenig Sanierung bei gleichzeitig vielen Wärmepumpen setzen. Auch ist fraglich, ob im gewählten EE-Pfad in einem Quartier mit hoher Bebauungsdichte eine Versorgung durch überwiegend Erdsonden-Wärmepumpen realistisch ist (Jochum et al. 2017). In dieser Gemengelage erscheint das Prinzip „efficiency first“ mit der erhöhten Sanierungsaktivität der robustere Pfad auf dem Weg zum Ziel THG-Neutralität im Jahr 2050 zu sein.

Aus dem Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP) zwischen der Nutzungs- und der Herstellungsphase ergibt sich, dass die Nutzungsphase gerade am Anfang der verschiedenen Transformationspfade klar dominiert. Deshalb gilt es zunächst die Emissionen aus der Nutzung zu reduzieren. Darüber hinaus ist es dennoch wichtig, die Herstellungsphase und das damit einhergehende Treibhauspotenzial und weitere Umweltwirkungen zu adressieren. Hier besteht offensichtlich noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der sich über die Zeit ändernden Emissionen aus der Herstellung der Bauteile, PV-Module etc. Derzeit werden in den einschlägigen Datenbanken nur Werte für die heutige Herstellung von Produkten zur Verfügung gestellt. Für den heutigen THG-Beitrag der Herstellung lässt sich im Neubau festhalten, dass es sehr wohl merkbare Unterschiede beim verwendeten Baumaterial gibt, wie am Beispiel des Ludwigshöh-Viertels gezeigt. So schneidet die Holztafelbauweise ökologisch deutlich günstiger ab als die Massivbauweise mit Kalksandstein. Betrachtet man hingegen nur unterschiedliche Materialien für die Dämmung der Gebäude, sind die Unterschiede der Herstellungs-THG-Emissionen eher gering. Die Ergebnisse für das Quartier Weingarten zeigen allerdings, dass Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe in der Gesamtschau über alle hier betrachteten Umweltwirkungskategorien am vorteilhaftesten abschneiden. Dass sich das „efficiency first“-Prinzip auch bei den Umweltwirkungen der Herstellungsphase bemerkbar macht, zeigt sich am Vergleich des Effizienz-Pfades mit dem Erneuerbaren-Pfad am Beispiel von Haslach: infolge der höheren Sanierungsrate des Effizienzpfades werden in den Gebäuden Wärmeerzeuger mit geringerer Leistung eingebaut als im Erneuerbaren-Pfad, was geringere Umweltwirkungen mit sich bringt.

6.1.5 Bewertung von Gebäude-Techniken und Infrastrukturen im Quartier

In der nachfolgenden Tabelle 6-1 werden die verschiedenen Gebäude-Techniken im Hinblick auf ihre Umwelteigenschaften bewertet. Darüber hinaus erfolgt eine Einschätzung zum Einsatz der jeweiligen Technik in unsanierten bzw. sanierten Gebäude.

Tabelle 6-1: Bewertung von Gebäude-Techniken

	Umwelteigenschaften	Unsaniertes Gebäude	Saniertes Gebäude
Erdgas-BWK	Stark negativ, bei Erdgasverbrennung hohe Umweltwirkungseffekte; als Brückentechnik für H ₂ in der Gebäudewärme eher unwahrscheinlich ³⁷	Einsatz kurzfristig noch sinnvoll (im Gegensatz zu Öl), aber Sanierung des Gebäudes samt Niedertemperaturheizung ist anzustreben, um dann auf andere, erneuerbare Technik umzusteigen	Einsatz sollte mittelfristig enden
Wärmepumpe	Eher positiv, wird immer positiver werden, Schlüsseltechnik der Energiewende; da der Einsatz klimaschädlicher Kältemittel (und deren potenzielles Austreten über die Zeit) absehbar zurückgehen wird, werden die Umwelteigenschaften sich weiter verbessern	Bedingt sinnvoll, da eher ineffizient und Strom-Emissionsfaktor noch zu schlecht; allerdings: selbst bei einer Jahresarbeitszahl von nur 2 kombiniert mit einem Strom-CO ₂ -Emissionsfaktor von 400 g/kWh vergleichbar mit Erdgas-Kessel ³⁸ , In Kombination mit Boiler zur Spitztemperatur Deckung möglich.	Sinnvoll, da effizienter Einsatz mit hohen Jahresarbeitszahlen möglich
Solarthermie	Positiv, Schlüsseltechnik der Energiewende im Wärmebereich	Zur Wärmebereitstellung insbesondere für TWW auch im unsanierten Gebäude sinnvoll	Einsatz sinnvoll, u.U. auch zur Heizungsunterstützung, gerade an den „Schultern“ der Heizperiode
PV	Positiv, Schlüsseltechnik der Energiewende, die die Emissionen der Stromerzeugung senkt; die derzeit hohen Umweltwirkungen der Herstellung sollten sich über die Jahre verbessern	Einsatz unabhängig vom Sanierungszustand des Gebäudes sinnvoll	Einsatz unabhängig vom Sanierungszustand des Gebäudes sinnvoll

³⁷ Diverse Studien verweisen darauf, dass Wasserstoff auch in Zukunft ein knappes Gut sein wird, welches in erster Linie in denjenigen Sektoren eingesetzt werden sollte, in denen keine anderen Optionen der Dekarbonisierung bestehen. Dies ist für die Gebäudewärme nicht der Fall (vgl. Gerhardt et al. 2020).

³⁸ Für 2019 werden als CO₂-Emissionsfaktor des bundesdeutschen Strommixes 401 g CO₂/kWh angegeben: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>

	Umwelteigenschaften	Unsaniertes Gebäude	Saniertes Gebäude
Fernwärme	Auf fossiler Basis negativ; Auf Basis erneuerbarer Energien positiv; nur in letzterem Fall zur Erreichung der Umweltziele sinnvoll	Auf Basis erneuerbarer Energien bedingt sinnvoll; zunächst Verbrauchsreduktion durch energetische Sanierung anstreben, damit begrenzt verfügbare erneuerbare Energien nicht überstrapaziert werden; grundsätzlich vorteilhaft: Umstellung auf erneuerbare Wärme kann zentral erfolgen	Auf Basis erneuerbarer Energien uneingeschränkt sinnvoll; grundsätzlich vorteilhaft: Umstellung auf erneuerbare Wärme kann zentral erfolgen

Analog zu Tabelle 6-1 oben erfolgt in Tabelle 6-2 eine Bewertung der Quartiers-Infrastrukturen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Erreichen der Umweltziele. Wichtiger Hinweis: In dieser Studie wurden die zusätzlichen Umweltwirkungen einer Ertüchtigung oder Neuverlegung der Netz-Infrastrukturen nicht beleuchtet. Entsprechend wird in Tabelle 6-2 lediglich die Rolle der jeweiligen Infrastruktur bei der Erreichung der Umweltziele aufgegriffen und eingeordnet.

Tabelle 6-2: Bewertung von Versorgungsinfrastrukturen im Quartier

	Umwelteigenschaften/ Erreichung Umweltziele	Quartier unsaniert	Quartier saniert
Erdgas-Verteilnetze	Eher negativ; als Brückentechnik für H ₂ im Wärmebereich eher unwahrscheinlich	Erdgas-Infrastruktur sollte mittelfristig ersetzt werden;	Erdgas-Infrastruktur sollte mittelfristig ersetzt werden;
Strom-Verteilnetze	Wichtige Basis-Infrastruktur, die Sektorkopplung und den Einsatz effizienter Techniken ermöglicht (Wärmepumpe, PV-Einspeisung, Elektromobilität)	Ertüchtigung des Verteilnetzes für den Leistungsbedarf neuer Verbraucher (Wärmepumpen, Elektromobilität) vermutlich notwendig	Ertüchtigung des Verteilnetzes vermutlich notwendig, um Stromnetz fit für neue Verbraucher (Wärmepumpen, Elektromobilität) zu machen

	Umwelteigenschaften/ Erreichung Umweltziele	Quartier unsaniert	Quartier saniert
Wärmenetze	Wenn fossil gespeist negativ; wenn erneuerbar gespeist positiv	Auf Basis erneuerbarer Energien bedingt sinnvoll; zunächst Verbrauchsreduktion durch energetische Sanierung anstreben, damit begrenzt verfügbare erneuerbare Energien nicht überstrapaziert werden; grundsätzlich vorteilhaft: Umstellung auf erneuerbare Wärme kann zentral erfolgen	Auf Basis erneuerbarer Energien sinnvoll; grundsätzlich vorteilhaft: Umstellung auf erneuerbare Wärme kann zentral erfolgen
Energiemanagement- systeme	Positiv, da Betrieb optimiert und Energieeffizienz verbessert wird, Einsatz ermöglicht genauere Bestimmung der Emissionen	Einsatz unabhängig vom Sanierungszustand des Quartiers sinnvoll, bei Einsatz fluktuierender erneuerbarer Energien sehr sinnvoll	Einsatz unabhängig vom Sanierungszustand des Quartiers sinnvoll, bei Einsatz fluktuierender erneuerbarer Energien sehr sinnvoll

6.2 Definitionen und Bilanzierungsmethoden

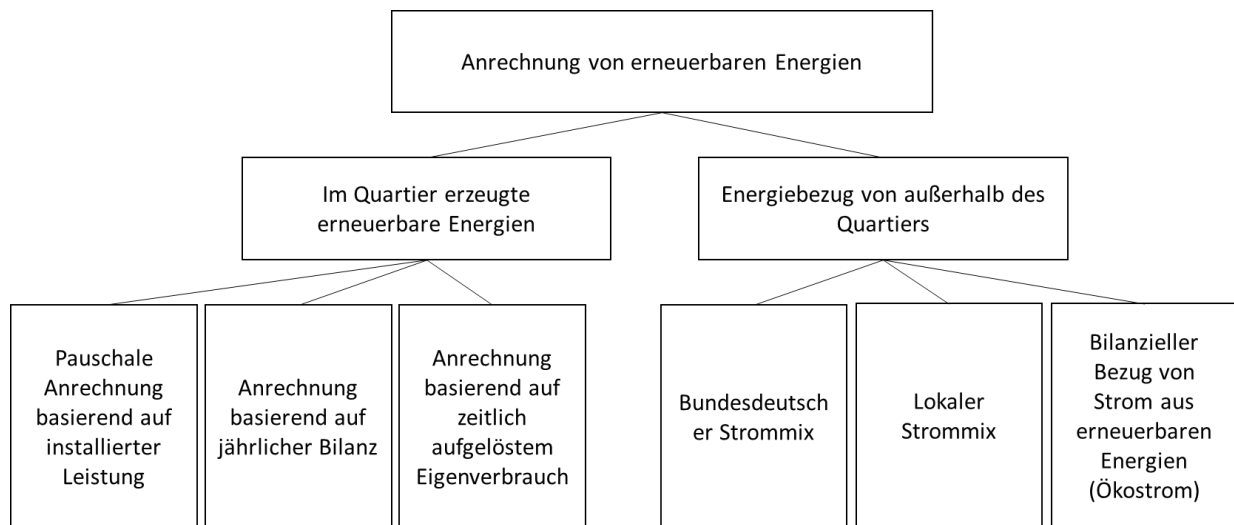
Es besteht keine allgemeingültige Festlegung, was „Treibhausgasneutralität“ im Quartier bedeutet. Die verschiedenen Auffassungen des Begriffs unterscheiden sich in Bezug auf den Bilanzierungsrahmen, der Methodik zur Anrechnung von Emissionen aus externem Energiebezug sowie dem Einbezug von Kompensationsmaßnahmen. Für die Bilanzierung können je nach Zielsetzung unterschiedliche Bilanzierungsansätze gewählt werden: Wird z.B. ein Vergleich der Treibhausgasemissionen verschiedener Quartiere angestrebt, ist die Anwendung eines harmonisierten Ansatzes von Bedeutung. Fließen die Emissionsbilanzen in die Berechnung von Inventaren auf übergeordneter Ebene ein, so müssen Doppelzählungen von Emissionen vermieden werden.

Ein zentrales Element zur Bewertung der Treibhausgasneutralität im Quartier ist die Methodik zur Zuordnung von Treibhausgasemissionen auf das Quartier. Für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen kann im Quartier wie auch auf kommunaler Ebene die endenergiebasierte Territorialbilanz zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 3.2.1). In den folgenden Abschnitten werden zentrale Ansätze und Optionen für die Bilanzierung auf Quartiersebene beschrieben und bewertet.

6.2.1 Bilanzierung von THG-Emissionen durch die Nutzung von Energie im Quartier

Für die Anrechnung von erneuerbaren Energien können verschiedene Ansätze zur Bilanzierung zum Einsatz kommen. Abbildung 6-1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Ansätze, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

Abbildung 6-1: Übersicht verschiedener Bilanzierungsmethoden für die Anrechnung von erneuerbaren Energien im Quartier



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Anrechnung von im Quartier erzeugten erneuerbaren Energien

Die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Quellen im Quartier kann in die Bilanzierung aufgenommen werden (prinzipiell gilt die Fragestellung ebenso für eingespeisten Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung oder die Einspeisung überschüssiger Wärme in ein Wärmenetz.). Dies bietet den Vorteil, dass ein Anreiz für den Ausbau von erneuerbaren Energien im Quartier besteht. Als Alternative dazu kann die im Quartier erzeugte erneuerbare Energie separat angegeben werden, aber nicht in die Bilanzierung einbezogen werden. Für die Anrechnung von im Quartier erzeugten erneuerbaren Energien bestehen die folgenden Ansätze:

- ▶ Gutschrift basierend auf installierter Leistung: Ein Ansatz besteht darin, angelehnt an § 23 (2) GEG, die Anrechnung in Abhängigkeit der installierten Leistung festzulegen, wobei die Anrechenbarkeit auf einen festen Anteil der im Quartier erzeugten Energie begrenzt wird.
- ▶ Gutschrift basierend auf Jahresverbrauch/-erzeugung: Ein weiterer Ansatz besteht darin, den gesamten im Quartier erzeugten Strom als Gutschrift zu berechnen, d.h. es werden für die gesamte Menge an im Quartier erzeugtem Strom THG-Emissionen entsprechend des festgelegten Emissionsfaktors gutgeschrieben.
- ▶ Gutschrift basierend auf zeitlich aufgelöster Einspeisung: Prinzipiell kann auch der im Quartier erzeugte und selbst verbrauchte Strom angerechnet werden. Die zeitliche Auflösung kann von Monaten bis Stunden reichen. Dieser Ansatz ist allerdings in der Praxis weniger praktikabel, da die Daten bei kleinsten Auflösungen i.d.R. nicht vorliegen.

Energiebezug von außerhalb des Quartiers

Die im Quartier verbrauchte Endenergie, die nicht im Quartier selbst erzeugt wird und von außerhalb importiert wird, muss zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen mit einem

Emissionsfaktor hinterlegt werden. Für die Auswahl des Emissionsfaktors bestehen verschiedene Ansätze, die im folgenden Text am Beispiel von importiertem Strom diskutiert werden:

- ▶ Bundesdeutscher Strommix: Ein verbreiteter Ansatz, der auch in der Basisbilanz nach BSKO-Standard verwendet wird, ist die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des gesamten Stromverbrauchs im Quartier mit dem Emissionsfaktor des bundesdeutschen Strommix.
- ▶ Lokaler Strommix: Ein weiterer Ansatz besteht darin, den lokalen Strommix des Energieversorgers zu verwenden. So werden lokale Bemühungen honoriert, wenn z. B. der lokale Energieversorger Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien betreibt (z. B. Windkraftanlagen außerhalb des Quartiers).
- ▶ Bilanzieller Bezug von EE-Strom: Ein weiterer Ansatz besteht darin, auch Strom aus erneuerbaren Energien anzurechnen, der nicht im räumlichen Zusammenhang mit dem Quartier oder dessen Umgebung steht, indem der Bezug von EE-Strom angerechnet werden kann.

Bewertung der Ansätze

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Ansätze werden in Tabelle 6-3 zusammenfassend bewertet.

Tabelle 6-3: Übersicht der Vor- und Nachteile der Ansätze zur Anrechnung von erneuerbaren Energien

Anrechnung von im Quartier erzeugten Energien

Einspeisung nur angeben	Einspeisung mit Energienutzung verrechnen
✓ Schafft Transparenz und Vergleichbarkeit	✓ Hoher Anreiz für PV-Ausbau
✓ Erhöht Gewicht der Energieeffizienz	✓ Übereinstimmung mit GEG und Förderprogrammen
✓ Übereinstimmung mit Ökobilanzmethoden	✓ Bilanzieller „Ausgleich“ von THG-Emissionen möglich
✗ Nullenergiebilanz nahezu unmöglich	✗ Verwischen von Energieeffizienz und EE-Erzeugung
✗ Geringe Anreizwirkung für erneuerbare Energien im Quartier	✗ Frage der zutreffenden Referenz für die Gutschrift

Vergleich von Bilanzierungsansätzen zur Anrechnung erneuerbarer Energien im Quartier

Pauschale Anrechnung basierend auf installierter Leistung (mit Begrenzung der Anrechenbarkeit)	Anrechnung basierend auf jährlicher Bilanz	Anrechnung basierend auf zeitlich aufgelöstem Verbrauch

✓ Anreiz für die Installation von EE-Anlagen ✓ Einfache Berechnung ohne Einbezug von ggf. fehlenden Verbrauchsdaten ✓ Vergleichbarkeit mit GEG ✗ Kein Anreiz zu netzdienlichem Betrieb	✓ Hoher Anreiz für die Installation von EE-Anlagen ✓ Relativ einfache Berechnung ✓ Null- bzw. Plusenergiebilanz kann relativ einfach erreicht werden ✗ Wenig Anreiz für Energieeffizienz ✗ Kein Anreiz zu netzdienlichem Betrieb	✓ Hoher Anreiz für die Installation von EE-Anlagen ✓ Anreiz für die Maximierung von Eigenverbrauch und damit perspektivisch zu netzdienlichem Betrieb ✗ Aufwändige Berechnung, v. a. bei hoher zeitlicher Auflösung
---	--	---

Energiebezug von außerhalb des Quartiers

Bundesdeutscher Strommix	Lokaler Strommix	Bilanzieller Bezug von EE-Strom
✓ Vergleichbarkeit und Transparenz ✓ Einfache Berechnung ✗ Keine Berücksichtigung von lokalen Klimaschutzmaßnahmen	✓ Berücksichtigung von lokalen Klimaschutzmaßnahmen ✗ Herausforderung der Definition des Bilanzrahmens und Datenverfügbarkeit	✓ Berücksichtigung von Engagement der Bewohner*innen ✗ Datenverfügbarkeit

6.2.2 Berücksichtigung von Vorketten und grauer Energie

Bei der Bilanzierung von Treibhausgasemissionen können optional vorgelagerte Emissionen, z.B. durch den Abbau und Transport von Energieträgern, berücksichtigt werden (Vorketten). Die Berücksichtigung von Vorketten wird in verschiedenen Bilanzierungssystemen unterschiedlich gehandhabt (Gugel et al. 2020).

Neben der Bilanzierung der Vorketten werden in einem weniger verbreiteten Ansatz bei der Bilanzierung von Treibhausgasemissionen im Quartier auch die THG-Emissionen aus der Herstellungs- und/oder Entsorgungsphase einbezogen. Wie die Berechnungen in Kapitel 4 zeigen, spielen diese insbesondere bei Neubauquartieren eine wichtige Rolle, da in Neubauquartieren die THG-Emissionen in der Nutzungsphase im Vergleich zum Bestand deutlich niedriger sind bzw. eine negative Emissionsbilanz erreicht wird. Bei der Berücksichtigung von grauer Energie spielen insbesondere die Baumaterialien eine wichtige Rolle (siehe Abbildung 4-51).

Tabelle 6-4 fasst die Vor- und Nachteile der Ansätze zur Bilanzierung von Vorketten und grauer Energie zusammen.

Tabelle 6-4: Übersicht der Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze zur Bilanzierung mit/ohne Vorketten und grauer Energie

ohne Vorketten für Energieträger	mit Vorketten für Energieträger	Lebenszyklus (inkl. Herstellung von Materialien = graue Energie),
✓ Einfache Berechnung ✓ geringste Unsicherheit ✗ Unvollständige Abbildung der Klimawirkung der Energieträger	✓ höhere Aussagekraft ✓ Vorketten auch bei der Bilanzierung von erneuerbaren Energien relevant ✗ gewisse Unsicherheit bei Datenherkunft	✓ Umfassendste Aussagekraft ✓ Zunehmende Relevanz bei sinkenden THG-Emissionen in der Nutzungsphase ✗ Höherer Rechenaufwand ✗ Vermengen vieler Einflüsse (sofern keine Teilangaben)

6.2.3 Indirekte Emissionen

Prinzipiell können in der Bilanzierung der THG-Emissionen im Quartier nicht nur die direkt im Quartier entstehenden Emissionen aus der Nutzung von Energieträgern, sondern auch indirekte Emissionen durch die Energienachfrage einbezogen werden oder auch Emissionen, die bei der Herstellung von im Quartier genutzten Konsumgütern entstehen. Der letztgenannte Ansatz findet sich in vielen Berechnungstools für „persönliche“ THG-Emissionen (z.B. UBA-Rechner), ist aber auf Quartiersebene wenig verbreitet und nur eingeschränkt praktikabel.

Tabelle 6-5 fasst die Vor- und Nachteile der Bilanzierung von (THG-) Emissionen auf Quartiersebene zusammen.

Tabelle 6-5: Übersicht der Vor- und Nachteile der Bilanzierung von Emissionen.

Quellenbilanz: nur direkte Emissionen	Verursacherbilanz: mit indirekten Emissionen	Persönliche Bilanz
✓ Kompatibel mit Klimaschutzgesetz	✓ Vollständige Erfassung von Gebäuden und Quartieren	✓ Umfassendster Anreiz zur Vermeidung von THG-Emissionen
✓ Relativ einfache Berechnung und gute Datenverfügbarkeit	✓ Anreiz zur Vermeidung indirekter Emissionen	✗ Unzureichende Verfügbarkeit von Daten zu Konsumgütern
✗ Unzulässige Verkürzung auf direkt genutzte fossile Energieträger	✗ Kaum Handlungsspielraum auf ins Quartier eingeführte Energieträger (Strommix, Fernwärme)	✗ Begrenzter Einfluss der Kommune auf Konsumententscheidungen
✗ Fehlanreiz durch Verlagerung von Emissionen in nicht bilanzierte Sektoren (v.a. Strom, Fernwärme)		
✗ Kein Anreiz für die Vermeidung indirekter Emissionen		

6.2.4 Kompensation

Kompensation bedeutet, dass „unvermeidliche“ Treibhausgasemissionen durch die Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen an einem anderen Ort ausgeglichen werden. Auf der Quartiersebene bedeutet dies, dass für die im Quartier verbleibenden Emissionen an anderen Orten Klimaschutzmaßnahmen mit der entsprechenden THG-Minderungswirkung durchgeführt werden. Auf Quartiersebene ist allerdings zu hinterfragen, ob „unvermeidliche“ THG-Emissionen bestehen bleiben. Während auf nationaler Ebene v.a. Emissionen aus dem Bereich der Landwirtschaft als unvermeidlich gesehen werden, sind diese i. d. R. ohnehin nicht Teil der Klimabilanz im Quartier. Zudem ist das Ziel von Klimabilanzen und Klimaschutzpolitik auf Quartiersebene, Klimaschutzmaßnahmen vor Ort umzusetzen. Der Einbezug von Kompensation in die Klimabilanz auf Quartiersebene wird somit nicht empfohlen. Wenn dennoch eine Kompensation erfolgt, ist die Beachtung von Qualitätskriterien und Kontrollmechanismen von Bedeutung, und der Anteil der durch Kompensation erreichten Minderungen sollte restriktiv begrenzt werden. Weiterhin ist eine transparente Ausweisung der Kompensationen in der Klimabilanz geboten.

6.3 Anreize

Das Quartier spielt derzeit im Förder- und Ordnungsrahmen in Deutschland eine untergeordnete Rolle. Im Vergleich dazu wurde beispielsweise in den Niederlanden ein Ansatz

zur Dekarbonisierung der Gebäudewärme eingeführt, der auf einem Quartiersansatz beruht (siehe Exkurs in Textbox).

Während in Deutschland ein vergleichsweise guter Förderrahmen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Gebäuden besteht, wird das Quartier als Handlungsebene nur begrenzt adressiert. Dies zeigt sich beispielsweise durch den Vergleich der Förderzahlen und Fördermittel in den verschiedenen durch die KfW-Bank geförderten Programmen: Während im Jahr 2019 in den Programmen Energieeffizient Bauen und Sanieren für Einzelgebäude insgesamt 42.738 Förderanträge verzeichnet wurden und ein Fördermittelabfluss von 2.124 Mio EUR erfolgte, gingen im Programm IKK/IKU - Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung nur 37 Anträge mit einem Mittelabfluss von 170 EUR ein³⁹.

Neben dem Förderrahmen kann die kommunale Wärmeplanung eine wichtige Rolle spielen für die Verbreitung von Ansätzen zur Dekarbonisierung auf Quartiersebene (siehe Exkurs in Textbox). In Deutschland ist die kommunale Wärmeplanung bisher nur in Baden-Württemberg verpflichtend, wo mit Inkrafttreten des neuen Klimaschutzgesetzes Kommunen ab 20.000 Einwohner*innen zur Erstellung von Wärmeplänen verpflichtet werden.

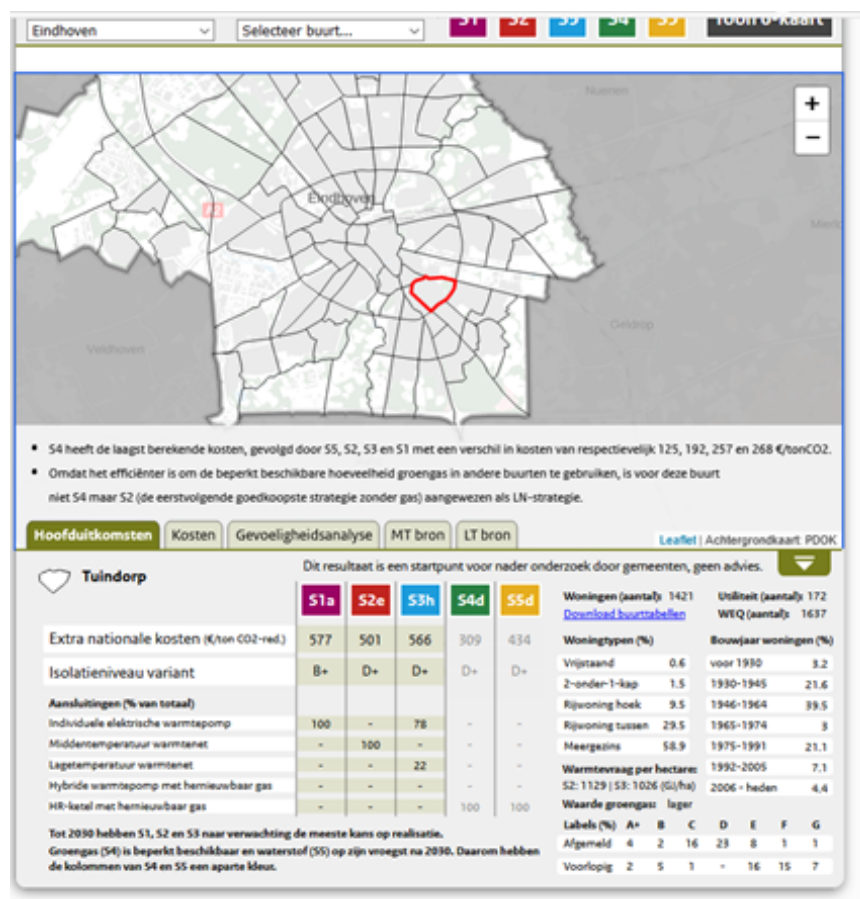
Im Niederländischen Klimaabkommen (Klimaatakkoord) aus dem Jahr 2019 bilden Quartiere die zentrale Handlungsebene für die Transformation der Wärmeversorgung.

Die Kommunen sind aufgefordert, in einer Wärmeplanung (heat vision) auf Quartiersebene konkrete Transformationspfade hin zu gasfreien Quartieren (gas-free districts) zu skizzieren. Zur Unterstützung der Kommunen wurde ein Wärmekompetenzzentrum (ECW) eingerichtet. Zudem wurde ein aus zwei Teilen bestehender Leitfaden entwickelt, der öffentlich zugänglich ist: Die Erstanalyse, die von der niederländischen Agentur für Umweltbewertung (PBL) erstellt wurde, und der Leitfaden für die lokale Analyse, der vom Kompetenzzentrum für Wärme (ECW) erstellt wurde. In der Erstanalyse berechnet PBL die Kosten für fünf Dekarbonisierungsstrategien, wobei für jede Strategie zwei verschiedene Optionen zur Effizienzsteigerung von Gebäuden in Betracht gezogen werden. Bei den fünf Strategien handelt es sich um 1) elektrische Wärmepumpen, 2) Fernwärme mit mittlerem bis hohem Temperaturniveau, 3) Niedertemperatur-Fernwärme, 4) grünes Gas, 5) Wasserstoff.

Die Website enthält einen Viewer, der die Ergebnisse der Anfangsanalyse in Form von Karten anzeigt. Darüber hinaus werden auf Anfrage detaillierte Angaben für einzelne Distrikte zur Verfügung gestellt.

³⁹ KfW-Förderreport: <https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Newsroom/Pressematerial/F%C3%B6rderreport/>

Abbildung 6-2: Beispielhafte Darstellung der bereitgestellten Informationen auf der ECW-webseite



Quelle: ECW Webseite

Derzeit besteht in den Niederlanden zudem ein Förderprogramm, in dem Quartiere bei der Transformation hin zu einer gasfreien Wärmeversorgung unterstützt werden.

6.4 Ausblick

Modellgestützte integrierte Betrachtungen von Transformationspfaden in Quartieren können in der Praxis dazu dienen geeignete Lösungsansätze auf dem Weg zur Klimaneutralität zu identifizieren. Davon profitieren sowohl die Stadtverwaltungen als auch Quartiersmanager*innen sowie letztendlich auch die Quartiersbewohner*innen, denen die unterschiedlichen Transformationspfade transparent aufgezeigt werden.

Infolge unserer Berechnungen und der erarbeiteten Ergebnisse konnten wir weitere Forschungsbedarfe identifizieren. Im Bereich der Ressourcen bzw. der Herstellungsphase hat sich gezeigt, dass Zeitreihen für die Umweltwirkungskategorien, insbesondere bei PV-Anlagen erarbeitet werden sollten, um die Vergleichbarkeit der Nutzungsphase mit der Herstellungsphase zu erhöhen. Es ist offensichtlich, dass auch PV-Module über die Zeit Verschiebungen von nicht-erneuerbaren hin zu erneuerbaren Energieträgern in den

Produktionsvorketten erfahren werden. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse zur Gebäude-Bauweise, dass Konzepte zur Reduktion der prozessbedingten Treibhausgasemissionen aus der Zementproduktion (Kalkbrennen) untersucht und bewertet werden sollten, da die Emissionen aus der Zementproduktion für einen wesentlichen Teil der Grauen Emissionen im Gebäudebereich verantwortlich sind.

Im Bereich der Energiemanagementsysteme haben wir folgende Bedarfe identifiziert. Hier sollte vor allem auf die Erarbeitung einer Klassifizierung und Standardisierung unterschiedlicher Energiemanagementsysteme fokussiert werden. Es sind klare Eingrenzungen und Gütesiegel nötig, da es bisher keine EnMS Standards gibt. Darüber hinaus sollte eine Bestimmung des Leistungsspektrums und der Mess- und Betriebsart für eine einheitliche GEG Bewertung erarbeitet werden. Hinzu ist es wünschenswert die möglichen und nötigen Schnittstellen eines EnMS zu den Verteilnetzbetreibern Strom und (Fern-) Wärme genauer zu untersuchen. Hiermit geht die Frage einher, welche Einflussnahme zur Lastreduktion in Zukunft möglich sein können oder ob das Prosumerverhalten durch EnMS messbar sein sollte. Wünschenswert wäre zudem langfristige Erhebungen von Daten und Nachfragezeitreihen >5 Jahre zu ermöglichen, auch um Wissenslücken der mittel- und langfristigen Effekte bei Systemveränderungen im Quartier zu schließen. Weitere grundsätzliche Fragestellungen für Quartiers-ENMS adressieren die Rollen, Pflichten und Rechte der Akteure vor Ort im Quartier: Wer betreibt es? Welche Pflichten sind damit verbunden? Welche Rechte? Welche Schnittstellen zu anderen Akteuren gibt es und wie sehen diese aus? Welche technischen Schnittstellen und Lösungen sind dafür notwendig?

7 Quellenverzeichnis

- Achenbach, Hermann; Rüter, Sebastian (2016): Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise.
- Adrian, L.; Bock, S.; Bunzel, A.; Preuß, T.; Rakel, M. (2018): Instrumente zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme. Aktionsplan Flächensparen. Hg. v. Umweltbundesamt. Deutsches Institut für Urbanistik (difu) (Texte, 38/2018).
- Alisch, Monika (2002): Soziale Stadtentwicklung — Politik mit neuer Qualität? In: Uwe-Jens Walther (Hg.): Soziale Stadt — Zwischenbilanzen: Ein Programm auf dem Weg zur Sozialen Stadt? Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 57–70.
- Anders, Stephan (2016): Stadt als System. Methode zur ganzheitlichen Analyse von Planungskonzepten: Rohn.
- BAFA, KfW (2019): Merkblatt zu den CO₂- Faktoren. Unter Mitarbeit von Tim Chmella. Hg. v. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, zuletzt geprüft am 19.09.2020.
- Bauknecht, Dierk; Bürger, Veit; Ritter, David; Vogel, Moritz; Langniß, Ole; Brenner, Thomas et al. (2017): Bestandsaufnahme und orientierende Bewertung dezentraler Energiemanagementsysteme. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; Dr. Langniß Energie&Analyse. Dessau-Roßlau (UBA Climate Change, 16/2017). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-30_climate-change_16-2017_dezentrale-ems.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2018.
- Baukosteninformationszentrum (BKI) (2018): BKI Baukosten 2018 Neubau. Statistische Kostenkennwerte für Gebäude.
- beegy (2019). Online verfügbar unter <https://www.beegy.com/>, zuletzt geprüft am 18.03.2019.
- Beucker, S.; Hinterholzer, S. (2017): Finanzierungs- und Geschäftsmodelle für das Dezentrale Energiemanagement in Quartieren (Bericht D 4.1). Hg. v. Borderstep Institut. Berlin.
- Beucker, Severin; Bergset, Linda; Beek, Hauke; Boganova, Tetyana; Bormann, Frank; Riedel, Manfred; Bierter, Willy (2012): Geschäftsmodelle für den Zukunftsmarkt des dezentralen Energiemanagements in Privathaushalten. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Connected Energy – SHAPE. Unter Mitarbeit von Christian Gambardella. Hg. v. Borderstep Institut.
- Bidgely (2019). Online verfügbar unter <http://www.bidgely.com/>, zuletzt geprüft am 18.03.2019.
- Borderstep Institut (2016): Digitalisierung in der Wohnungswirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.borderstep.de/digitalisierung-in-der-wohnungswirtschaft>.
- Breuer, Bernd; Schmell, Robert (2012): Neue Stadtquartiere. Bestand und städtebauliche Bedeutung. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (BBSR-Analysen KOMPAKT, 08/2012).
- Brooklyn Microgrid (2019a). Online verfügbar unter <https://www.brooklyn.energy/>, zuletzt geprüft am 18.03.2019.
- Brooklyn Microgrid (2019b). Online verfügbar unter <https://thenewstack.io/brooklyn-microgrid-blockchain-based-platform-locally-traded-electricity/>, zuletzt geprüft am 18.03.2019.
- Buchert, Matthias; Fritsche, Uwe; Jenseit, Wolfgang; Rausch, Lothar; Deilmann, Clemens; Schiller, Georg et al. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland. Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche Infrastruktur“. Hg. v. Umweltbundesamt. Berlin.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hg.) (2013): Ziele nachhaltiger Stadtquartiersentwicklung. Querauswertung städtebaulicher Forschungsfelder für die Ableitung übergreifender Ziele nachhaltiger Stadtquartiere (BBSR-Analysen KOMPAKT, 09/2013).

Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2018): Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung.

Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hg.) (2016a): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2018): Klimaschutzbericht 2017. Zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung. Berlin, zuletzt geprüft am 16.06.2018.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hg.) (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, zuletzt geprüft am 07.06.2018.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hg.) (2016b): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, zuletzt geprüft am 02.11.2017.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hg.) (2016c): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden, zuletzt geprüft am 18.03.2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2014): Smart Energy made in Germany. Erkenntnisse zum Aufbau und zur Nutzung intelligenter Energiesysteme im Rahmen der Energiewende.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2018): Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende. Berichtsjahr 2016, zuletzt geprüft am 07.12.2018.

Bundestag (18.12.2019): Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften. KSG, vom 12.12.2019. Fundstelle: Bundesgesetzblatt 2019 (48), S. 2513–2521. Online verfügbar unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*\[@attr_id=%27bgbl119s2513.pdf%27\]#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl119s2513.pdf%27%5D__1597743255864](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*[@attr_id=%27bgbl119s2513.pdf%27]#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl119s2513.pdf%27%5D__1597743255864), zuletzt geprüft am 18.08.2020.

CCC Industriesoftware (2018): Was kostet eine Energiemanagementsoftware? Hg. v. Industrie Digital. Online verfügbar unter <https://blog.ccc-industriesoftware.de/was-kostet-eine-energiemanagementsoftware/>, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

Deutsche Bundesregierung (Hg.) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.

Deutsche Bundesregierung (Hg.) (2011): Eckpunkte Energieeffizienz.

Deutsche Bundesregierung (Hg.) (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/Content/Infomaterial/BPA/Bestellservice/Deutsche_Nachhaltigkeitsstrategie_Neuauflage_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 19.03.2018.

Deutsches Institut für Urbanistik (difu) (Hg.) (2018): Klimaschutz in Kommunen. Praxisleitfaden. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Deutsches Institut für Urbanistik (difu); Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu); Klima-Bündnis. Berlin, zuletzt geprüft am 09.12.2018.

DG Regio & UN Habitat (2016): The State of European Cities 2016. Cities leading the way to a better future. Hg. v. European Union und UN-Habitat. Directorate-General for Regional and Urban Policy. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/policy/themes/cities-report/state_eu_cities2016_en.pdf, zuletzt geprüft am 15.06.2018.

Duscha, Markus; Brischke, Lars-Arvid; Korenke, Ruben; Schmitt, Corinna (2013): Modellstadt Mannheim. Evaluation der Feldtests und Simulationen. Endbericht. MVV Energie; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

(Fraunhofer IWES); PPC; IBM; UDE; Papendorf Software Engineering; Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu); Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES); DREWAG.

Elsner, H. (2018): Sand - auch in Deutschland bald knapp? Commodity TopNews 56. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/56_sand.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 08.06.2018.

VDI 4602 Blatt 1, 2018-04: Energiemanagement - Definition, Begriffe".

Enervis (2019): Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus EEG-geförderten Kraftwerken für die Kalenderjahre 2020 bis 2024, zuletzt geprüft am 22.09.2020.

enkey (2018). Online verfügbar unter <https://www.enkey.de/>, zuletzt geprüft am 20.03.2018.

Fischer, David; Härtl, Andreas; Wille-Haussmann, Bernhard (2015): Model for electric load profiles with high time resolution for German households. In: *Energy and Buildings* 92, S. 170–179. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.01.058.

Fischer, David; Wolf, Tobias; Scherer, Johannes; Wille-Haussmann, Bernhard (2016): A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households. In: *Energy and Buildings* 124, S. 120–128. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.069.

Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE); Öko-Institut; Hamburg Institut (2018): Systemische Herausforderung der Wärmewende. In: *Zweiter Zwischenbericht (nicht veröffentlicht)*.

Frick, D. (2011): Theorie des Städtebaus: zur baulich-räumlichen Organisation von Stadt: Wasmuth.

Galster, George (2001): On the Nature of Neighbourhood. In: *Urban Studies* 38 (12), S. 2111–2124. DOI: 10.1080/00420980120087072.

Gerhardt, Norman; Bard, Jochen; Schmitz, Richard; Beil, Michael; Pfennig, Maximilian; Kneiske, Tanja (2020): Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme. Studie zum Einsatz von H₂ im zukünftigen Energiesystem mit dem besonderen Fokus auf die Gebäudewärmeversorgung. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE).

Günther, Jens; Golde, Michael (2015): Gesamtwirtschaftliche Ziele und Indikatoren zur Rohstoffinanspruchnahme. Unter Mitarbeit von Kora Kristof, Matthias Koller, Andreas Burger und Sylvia Schwermer. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).

Gugel, Benjamin; Hertle, Hans; Dünnebeil, Frank; Herhoffer, Vanessa (2020): Weiterentwicklung des kommunalen Bilanzierungsstandards für THG-Emissionen. Bilanzierungssystematik kommunal - BSKO. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) (Climate Change, 19/2020), zuletzt geprüft am 13.07.2021.

Hafner et al. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden. Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren THG-Holzbau. Zusammenfassung. Hg. v. Ruhr-Universität Bochum, zuletzt geprüft am 12.12.2018.

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2013): Energiesystem Deutschland 2050. Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE). Freiburg im Breisgau.

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE). Freiburg.

Herkel, Sebastian (2017): Technologiebericht TF 3.2 Wärmetransport und -verteilung. innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme. Freiburg.

Hinz, Eberhard (2012): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Institut für Wohnen und Umwelt (IWU). Berlin (BMVBS-Online-Publikation, 07/2012). Online verfügbar unter http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/DL_ON072012.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

Hinz, Eberhard (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt.

Hopfner, Karin; Zakrzewski, Philipp (2012): Nachhaltige Quartiersentwicklung im Bestand. In: Matthias Drilling und Olaf Schnur (Hg.): Nachhaltige Quartiersentwicklung: Positionen, Praxisbeispiele und Perspektiven. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 45–67.

Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (Hg.) (2011): Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Darmstadt, zuletzt geprüft am 20.01.2015.

Jan von Appen (2014): Erzeugung zeitlich hochaufgelöster Stromlastprofile für verschiedene Haushaltstypen. In: *PESS*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/273775902_Erzeugung_zeitlich_hochaufgeloster_Stromlastprofile_fur_verschiedene_Haushaltstypen.

Jochum, Patrick; Bülbül, Funda; Jarling, Mathias; Kelavic, Mario; Mellwig, Peter; Pehnt, Martin; Brischke, Lars (2012): Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Jochum, Patrick; Lempik, Julia; Böttcher, Saskia; Stelter, Dennis; Krenz, Tobias; Mellwig, Peter et al. (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Anlagenpotenzial. Beuth Hochschule für Technik; Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Berlin Heidelberg, zuletzt geprüft am 07.07.2017.

Jochum, Patrick; Mellwig, Peter (2014): Grenzen der Dämmung opaker Bauteile. In: *Bauphysik* 36 (6), S. 289–297. DOI: 10.1002/bapi.201410042.

Kahlenborn, Walter; Kabisch, Sibylle; Klein, Johanna; Richter, Ina (2012): Energiemanagementsysteme in der Praxis. ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen. 1.Auflage. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3959.pdf>, zuletzt geprüft am 20.03.2018.

Kallrath, Josef (2013): Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis ; mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik. 2., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer.

Kiwigrind GmbH (2019). Online verfügbar unter <https://www.kiwigrind.com/>, zuletzt geprüft am 20.03.2018.

Loga, Tobias; Stein, Britta; Hacke, Ulrike; Müller, André; Großklos, Marc; Born, Rolf et al. (2019): Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Bonn (BBR-Online-Publikation, 04/2019), zuletzt geprüft am 25.06.2020.

Lucas, Klaus; Gebhardt, M.; Kohl, H.; Steinrötter, Th. (2002): Preisatlas. Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung. Institut für Energie und Umwelttechnik e.V. (IUTA). Duisburg-Rheinhausen, zuletzt geprüft am 21.10.2014.

Mayer, A. T.; Schwehr, P.; Bürgin, M. (2011): Nachhaltige Quartiersentwicklung: Im Fokus flexibler Strukturen: vdf Hochschulverl. (Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur (CCTP): Competence Center Typologie & Planung in Architektur).

MVV Energie (2013): Modellstadt Mannheim - Ein Energieorganismus zur intelligenten Verteilung dezentral erzeugter Energie. Thomann, Robert.

Nemry, Françoise; Uihlein, Andreas (2008): Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building). Hg. v. European Commission, Joint Research Centre und Institute for Prospective Technological Studies. Online verfügbar unter <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/85dcd023-6800-400a-bb6f-cbbdb3826f9b/language-en>, zuletzt geprüft am 08.08.2019.

Öko-Institut e.V.; Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Endbericht. Unter Mitarbeit von Veit Bürger, Tilman Hesse, Andreas Palzer, Benjamin Köhler, Sebastian Herkel und Peter Engelmann. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE). Dessau-Roßlau (Climate Change, 11/2017).

Oliva, A.; Bockelmann, F.; Kellner, R.; Bestenlehner, D. (2018): SolSys - Analyse und Optimierung solarer Energieversorgungssysteme (Wärme/Strom) für Gebäude. Technologiemarkt (Stand November 2018). intern zur Auswertung zur Verfügung gestellt.

Oschatz, Bert; Rosenkranz, Jens; Arzt, Steffen; Steuerlein, Andreas (2014): Kosten energierelevanter Bau- und technischer Anlagenanteile bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/Bundesliegenschaften. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden GmbH (ITG). Bonn (BBSR-Online-Publikation, 06/2014), zuletzt geprüft am 21.10.2014.

Palzer, A.; Henning, H.-M.; Kost, C.; Erlach, B.; Stephanos, C. (2018a): Optimierungsmodell REMod-D – Materialien zur Analyse „Sektorkopplung“. Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Hg. v. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. Freiburg, München, zuletzt geprüft am 13.06.2018.

Palzer, A.; Henning, H.-M.; Kost, C.; Erlach, B. & Stephanos, C. (2018b): Optimierungsmodell REMod-D – Materialien zur Analyse „Sektorkopplung“. Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Hg. v. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. Freiburg, München.

Palzer, A.; Kost, C.; Sterchele, P. (2018c): Detaillierte Modellergebnisse REMod-Trans (Excel-Tabelle) der Studie Integriertes Energiekonzept 2050 - Strom Wärme Verkehr Industrie - Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 20150 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen. voraussichtliche Veröffentlichung 1. HJ 2019; intern zur Verfügung gestellt. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE).

Picot, Arnold; Kranz, Johann; Bilecki, Simon (2009): Studie zur Akzeptanz von Smart Metern bei Endverbrauchern. Hg. v. Ludwigs-Maximilians-Universität München. Institut für Information, Organisation und Management.

powerpeers (2019). Online verfügbar unter <https://www.powerpeers.nl/>, zuletzt geprüft am 18.03.2019.

Püschel, Danny; Teller, Matthias; Abramjuk, Michael (Hg.) (2013): Umweltgerechte Baustoffe. Graue Energie und Nachhaltigkeit von Gebäuden. Deutscher Naturwerkstein-Verband. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.

Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth; Dehoust, Günter; Förster, Hannah; Greiner, Benjamin et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Öko-Institut; Fraunhofer ISI.

Saad Hussein, Noha (submitted 2017): Evaluation of building retrofitting effects on a decentral system by a sector coupling operation and expansion model. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

- Saad Hussein, Noha; Hübner, Fanny (2017): Model based analysis of building retrofitting effects on a decentralized energy system. Hg. v. IEWT. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, ISE. Online verfügbar unter https://eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt2017/html/files/fullpapers/79_Saad_Hussein_fullpaper_2017-01-31_09-39.pdf, zuletzt geprüft am 16.08.2017.
- Saad Hussein, Noha; Rinn, Lars Manuel; Krüger, Christine; Janßen, Tomke; Biener, Wolfgang; Senkpiel, Charlotte (2015): Possible actions to maximize the usage of flexibility usage in a decentral energy system for the eating and electricity sector.
- Schnur, O. (2014): Quartiersforschung: Zwischen Theorie und Praxis: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=5OQIBAAAQBAJ>.
- Sonnen GmbH (2019). Online verfügbar unter <https://sonnen.de>, zuletzt geprüft am 18.03.2019.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2017): Bevölkerungsentwicklung bis 2060. Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Aktualisierte Rechnung auf Basis 2015.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2018a): Abfallwirtschaft - aktuelle Zahlen 2016. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallwirtschaft.html>, zuletzt geprüft am 07.06.2018.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2018b): Ausgewählte Zahlen für die Bauwirtschaft. Januar 2018, zuletzt geprüft am 30.04.2018.
- Stockinger, Volker (2016): Energie⊕-Siedlungen und -Quartiere. Definition, Planung, Betrieb, Nutzung, Bilanzierung und Bewertung: Fraunhofer IRB Verlag.
- tado GmbH (2019). Online verfügbar unter <https://www.tado.com/de/>, zuletzt geprüft am 18.03.2019.
- Thamling, Nils; Pehnt, Martin; Kirchner, Joachim (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Erstellt im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Hintergrundpapier. Prognos; IWU; Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Berlin, Heidelberg, Darmstadt.
- Thomsen, Jessica; Weber, Christoph (2019): How the Design of Retail Prices, Network Charges, and Levies Affects Profitability and Operation of Small-Scale PV-Battery Storage Systems.
- Übertragungsnetzbetreiber (2014): NEP 2014: Netzentwicklungsplan Strom. Online verfügbar unter <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/netzentwicklungsplaene>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018a): Rohstoffproduktivität. Online-Themenseite. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/rohstoffproduktivitaet#textpart-1>, zuletzt geprüft am 07.06.2018.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2018b): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2017. Hintergrund. Dessau.
- Universität Kassel, Fachgebiet VWL mit Schwerpunkt dezentrale Energiewirtschaft (Universität Kassel) (2019): 100% Erneuerbare-Energie-Regionen. Kassel. Online verfügbar unter <http://www.100-ee.de/>, zuletzt geprüft am 08.06.2018.
- Vereinte Nationen (2015): Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Online verfügbar unter <http://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf>, zuletzt geprüft am 02.12.2018.

Anhang

A1: Innovative Modellquartiere

Die folgende Tabelle enthält eine Übersicht zu laufenden und schon abgeschlossenen Projekten zu innovativen Quartieren. Die aufgeführten Texte in der Spalte „Beschreibung“ sind oftmals direkt von den Projekt-Webseiten übernommen.

Tabelle A1-1: Innovative Modellquartiere (abgeschlossen und laufend)

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt EnQM: Energieeffiziente Wohnsiedlungen durch zukunftsfähige Konzepte für den denkmalgeschützten Bestand 'Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen (EnQM) https://projektinfos.energie-wende-bauen.de/projekt/quartierskonzept-ermoeglicht-energieeffizienz-im-denkmalgeschuetzten-bestand/ http://www.iwb.uni-stuttgart.de/forschung/Forschung_Werkstoffe/ENQM.html	10/2016 – 09/2020	BMW i	Die unter Denkmalschutz stehende Siedlung Margarethenhöhe in Essen ist ein historisches Wohnquartier. Viele Gebäude sind seit der Bauzeit nahezu unverändert. Es wird untersucht, wie sich die energetische Effizienz der Siedlung über die bisher erfolgten Maßnahmen hinaus – Austausch der Fenster und Dachdämmung – denkmalverträglich deutlich steigern lässt. Dazu entwickeln sie modulare Konzepte, die den Energieverbrauch auf Quartiersebene reduzieren und erneuerbare Energien in das Energiesystem im Quartier einbinden.	Niedrig-Exergie-Gebäudetechnik, elektrisch und thermisch aktivierte Dachsteine, Strom- und Wärmespeicher sowie Smarthome- und Smartmeter-Konzepte sollen für eine optimierte Energieversorgung im denkmalgeschützten Gebäudebestand sorgen

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff Stadt: Pfaff: Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern ' Integrierte Konzepte, innovative Technologien und sozialwissenschaftliche Forschung im Leuchtturm für klimaneutrale Quartiere	10/2017 – 09/2022	BMBF	Die Stadt Kaiserslautern plant auf dem ehemaligen Werksgelände der Nähmaschinenfabrik Pfaff ein klimaneutrales Wohn-, Gewerbe- und Technologiequartier zu errichten. Es werden Konzepte für eine zielgerichtete Entwicklung des Quartiers bis zum klimaneutralen Endausbau im Jahr 2029 erforscht und geschaffen. Während der Projektlaufzeit erfolgt dazu die Erforschung, Entwicklung und Demonstration innovativer Planungswerkzeuge und Techniken in den Sektoren Energie, Gebäude, Elektromobilität und IKT als wichtige Bausteine von integrierten Lösungskonzepten für klimaneutrale Quartiere mit hoher Lebens- und Aufenthaltsqualität.	Ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung eines klimaneutralen denkmalgeschützten ehemaligen Gewerbeareals
EnEff Stadt: ENaQ: Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg https://www.enaq-fliegerhorst.de/	01/2018 – 12/2022	BMWi/BMBF	Auf dem ehemaligen Fliegerhorst in Oldenburg entsteht ein neues Wohnquartier. Neben Neubauten sollen einige der alten Kasernengebäude erhalten bleiben und zu Wohnhäusern umgebaut werden. Geplant ist ein neues Infrastrukturkonzept, das die Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Elektromobilität koppelt und in ein sektorenübergreifendes Versorgungsnetz integriert. Ergänzend entwickeln die Projektpartner eine digitale Service-Plattform für ein intelligentes Last- und Beschaffungsmanagement auf Ebene des Quartiers.	
EnEff:Stadt: QUARREE100: Resiliente, integrierte und systemdienliche Energieversorgungssysteme im städtischen Bestandsquartier unter vollständiger Integration erneuerbarer Energien	11/2017 – 10/2022	BMWi/BMBF	Für das Stadtquartier „Rüsdorfer Kamp“ in Heide soll eine nachhaltige Energieversorgung entwickelt werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts QUARREE100 wird untersucht, wie das Quartier möglichst vollständig mit erneuerbaren Energien vor Ort oder aus der Region versorgt werden kann. Ein Ziel ist, den regional erzeugten Windstrom wirtschaftlich und systemdienlich in das regionale Energiesystem einzubinden.	Systemdienlicher Quartiersansatz; hoher Anteil erneuerbarer Energien

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
https://projektinfos.energiewendebauen.de/forschung-im-dialog/neuigkeiten-aus-der-forschung/detailansicht/lokal-erzeugten-windstrom-im-quartier-nutzen/				
EnEff Stadt: Zwickauer Energiewende Demonstrieren (ZED): Demonstration einer energieeffizienten und sozialgerechten Quartiersentwicklung auf Basis elektrisch-thermischer Verbundsysteme	01/2018 – 12/2022	BMWi/BMBF	Das Projekt 'Zwickauer Energiewende Demonstrieren' (ZED) ist ein von der Stadt Zwickau initiiertes Verbundvorhaben von wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Partnern. Oberstes Ziel ist es, Techniken und Methoden für die lokale Energiewende und insbesondere die Wärmewende vor Ort zu entwickeln und in einem geeigneten Quartier als Reallabor zu demonstrieren. Dabei bildet die Konzeption und Implementierung elektrisch-thermischer Verbundsysteme die Grundlage für eine energetische Quartiersentwicklung zur Realisierung von Null-Emissions-Quartieren. Hierfür sind hocheffiziente Speichertechniken und die Kombination elektrischer und thermischer Gesamtkonzepte erforderlich. Dies ermöglicht eine Steigerung des Anteils regenerativer Energiequellen wie Photovoltaik sowie insbesondere Solar- und Geothermie in Wohnquartieren. Das Ziel dabei ist, ein mögliches Optimum bei der elektrischen Energieversorgung in Wohnquartieren zu finden.	Ziel des Null-Emissionsquartiers, Einsatz elektrisch-thermischer Verbundsysteme und hocheffizienter Speichertechniken

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt: Esslingen: Smart Energy City Neue Weststadt Esslingen Nutzung erneuerbarer Energien im Smart Grid https://projektinfos.energiwende-bauen.de/projekt/co2-neutrales-quartier-fuers-wohnen-arbeiten-und-studieren/	10/2015 – 10/2017	BMWi	In der Stadt Esslingen entsteht bis 2025 auf 120.000 m ² BGF ein neues innerstädtisches Quartier aus Wohn- und Gewerbeflächen sowie einem Hochschulneubau. Die Umsetzung soll als „CO ₂ -neutrales Stadtquartier“ mit optimaler Integration von erneuerbaren Energien realisiert werden. Grundlage bilden energieeffiziente Gebäude sowie ein flexibles System von Stromerzeugern, Stromverbrauchern und Energiespeichern auf Gebäude- und Quartiersebene. Das notwendige Energiemanagementsystem soll als "Smart Grid" agieren, einem übergreifenden digitalen Informations- und Kommunikationsnetz, das die dezentralen Energieversorgungssysteme und Verbraucher optimal vernetzt.	Ganzheitlicher Energieeffizienz-Ansatz zur Reduzierung des Energiebedarfs, Energiebedarfsdeckung im Quartier zu 100% aus Erneuerbaren Energiequellen, Berücksichtigung von Speichertechniken für Wärme und Strom einschließlich der Sektorkopplung.

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermittelgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt: Es_West_P2G2P: "Klimaneutrales Stadtquartier" Neue Weststadt Esslingen (Folgeprojekt) https://www.esslingen.de/_Lde/start/es_t_hemen/eswestp2g2p.html	11/2017 – 12/2022	BMW/BMBF	In der 'Neuen Weststadt' von Esslingen soll das energie- und klimapolitische Ziel der Bundesregierung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands bis 2050 beispielhaft umgesetzt und erprobt werden. Das Konzept basiert auf einer kostenoptimalen Reduzierung des Strom-, Wärme- und Kältebedarfs der Gebäude (Mischung aus Wohnen, Gewerbe, Dienstleistung, Hochschule) unter weitgehender Nutzung erneuerbarer Energien. In der 'Neuen Weststadt' soll in einem Reallabor der Einsatz und die Möglichkeiten eines Elektrolyseurs im urbanen Umfeld erprobt werden. Der verwendete Strom soll aus lokaler Erzeugung (PV) und überregionalen fluktuierenden erneuerbaren Energien stammen. Dabei wird besonderes Augenmerk auf den netzdienlichen Betrieb gelegt. Die entstehende Abwärme wird für Heizzwecke oder die Trinkwarmwasserbereitung im Quartier genutzt, wodurch eine hohe Gesamteffizienz erreicht wird. Der hauptsächlich aus erneuerbarem Stromüberschuss gewonnene Wasserstoff soll lokal vermarktet und zur zeitlich und sektoral entkoppelten Nutzung in den Bereichen Wärme, Strom und Mobilität zum Einsatz kommen.	Systemdienlicher Einsatz innovativer Technologien: Stromspeicher, Elektrolyseur, bivalente BHKW's, Brennstoffzellen und Elektrobusse

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermittelgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt: Stadtquartier 2050 - Herausforderungen gemeinsam lösen: Beispielgebende Sanierung und Nachverdichtung von Stadtquartieren zu klimaneutralen Wohnsiedlungen mit Leuchtturmanwendungen in Stuttgart und Überlingen	03/2018 – 02/2023	BMW/BMBF	Im Projekt - STADTQUARTIER 2050 wird beispielhaft für zwei Quartiere in zwei Städten das jeweils vorhandene ambitionierte städtische Energiekonzept konkret in bewusst unterschiedlichen Wohnquartieren unter dem besonderen Aspekt der sozialverträglichen Mietpreisentwicklung umgesetzt. Es werden in den zwei Quartieren über 960 Wohneinheiten entstehen mit einer Gesamtinvestitionssumme von ca. 190 Mio. Euro. Im Einzelnen handelt es sich um ein Konversionsgebiet mit Umnutzung, Sanierung und teilweise Abriss und Neubebauung eines ehemaligen Krankenhausareals in Stuttgart und eine Randgebietssanierung mit Baufelderweiterung in Überlingen.	
SolaresBauen: MAGGIE Regensburg https://projektinfos.energie-wendebauen.de/projekt/energetisch-modernisieren-mit-solaraktiven-baustoffen-und-hybridem-heizsystem/	10/2017 – 09/2020	BMW/BMBF	Das historische Wohnquartier Margaretenau in Regensburg wird energetisch modernisiert. An einem Mehrfamilienhaus des Ensembles aus den 1930er Jahren werden neue Technologien erprobt. Ein solaraktives und solaradaptives Außenputzsystem soll solare Gewinne steigern und die thermische Behaglichkeit im Gebäudeinneren verbessern. Parallel wird ein effizientes hybrides Heizsystem aus Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmepumpentechnologie entwickelt. Die Kombination von Umweltwärme und Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung, Photovoltaik oder aus dem Netz nutzt erneuerbare Energien optimal und verleiht dem Gebäudeensemble zudem netzdienlichen Charakter.	Ein zu entwickelnder solaraktiver Außenputz soll solare Gewinne und die thermische Behaglichkeit steigern – anstatt eines WDVS. Ein hybrides Heizsystem mit Wärmepumpe, BHKW sowie dynamischer, vorausschauender Anlagensteuerung soll das Gebäude versorgen.
Stadt als Speicher http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelsicht/95/Die Stadt als Speicher/	12/2013 – 11/2017	BMW/BMBF	Im Projekt „Stadt als Speicher“ wird ein Managementsystem, das KWK-Anlagen, Wärmepumpen, Nachtspeicherheizungen, PV-Batterien und weitere Anlagen bündelt, entwickelt.	Einsatz eines zentralen Energiemanagementsystems zur wirtschaftlichen Optimierung der gekoppelten Strom- und Wärmeversorgung

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
			Im dem Verbundvorhaben werden in städtischen Gebieten vorhandene Flexibilitätspotentiale erschlossen und nutzbar gemacht. Dies erfolgt durch Bündelung von KWK-Anlagen, Wärmepumpen, Nachtspeicherheizungen, PV-Batterien und weiterer flexibler Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen in einem zentralen Managementsystem. Unter Berücksichtigung der individuellen Randbedingungen der Anlagen, des lokalen Netzzustandes sowie den Anreizen der Elektrizitätsmärkte wird das Betriebsverhalten der Anlagen wirtschaftlich optimiert. Die hierzu entwickelte IKT-Infrastruktur wird anschließend in den Modellregionen Herten und Wunsiedel demonstriert und so für die beteiligten Stadtwerke verfügbar gemacht.	
Drei Prozent Projekt - energieeffizienter Sanierungsfahrplan für kommunale Quartiere 2050 https://www.deutscher- verband.org/aktivitaeten/projekte/abgeschlossene-projekte/abgeschlossene-projekte/3-prozent-projekt.html https://www.energiewendebauen.de/fors- chung-im-dialog/neuigkeiten-aus-der- forschung/detailansicht/sanierungsfahrpla- ene-fuer-stadtquartiere/	08/2015 – 12/2018	BMWi	Im Rahmen des „Drei-Prozent-Projekts“ werden kommunale Sanierungsfahrpläne modellhaft erarbeitet. Damit soll es gelingen, Energieeffizienzpotentiale in Quartieren zu heben und so die energetische Sanierungsrate im Gebäudebestand zu erhöhen.	Kommunale Sanierungsfahrpläne zur Steigerung der Sanierungstätigkeit

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
Vorwärts-Quartier Schwerin (Gewinner Ideenwettbewerb EnEff Stadt 2017)			Der Großteil der vorhandenen Gebäude auf der städtischen Konversionsfläche im Schweriner Quartier hat Denkmalstatus. Das Konzept berücksichtigt die vorhandenen Strukturen und schafft durch Ergänzungsbauten einen neuen Rahmen. Die Realisierung in Systembauweise und die Nutzung regionaler Baustoffe sollen eine kostengünstige Bauweise bewirken. Die bauliche Umsetzung soll klimaneutral erfolgen, d.h. durch Recycling, Verwendung ökologischer Baustoffe und Schaffung energieautarker Gebäude. Die vorhandenen Sheddächer und neuen Dachflächen im Quartier eignen sich aufgrund ihrer Orientierung nach Süden und Westen für großflächige Photovoltaikanlagen. Um den erzeugten Solarstrom speichern zu können, werden die Gebäude mit einem neuartigen Biokatalyse-System ausgerüstet, mit dem sich aus Strom Methanol herstellen lässt.	Biokatalyse-System zur Methanol Herstellung aus PV-Strom; klimaneutrale bauliche Umsetzung durch Verwendung von Recyclingmaterialien und ökologischen Baustoffen
EnEff: Stadt SWIVT Siedlungsbausteine für bestehende Wohnquartiere ' Impulse zur Vernetzung energieeffizienter Technologien	12/2014 – 03/2018	BMWi	Am Beispiel der Postsiedlung in Darmstadt wird eine Sanierungsstrategie entwickelt, die den Einsatz energieeffizienter Techniken vernetzt sowie regenerative Erzeugungs- und Speicherkonzepte einbindet. Die neue Strategie ist im Idealfall modular, um auf ähnliche Siedlungsstrukturen übertragbar zu sein. Mit einem neu entwickelten sogenannten Plusenergiebaustein ist für die im Forschungsprojekt betrachteten vier Bestandsgebäude der Darmstädter Siedlung eine Nachverdichtung vorgesehen.	Entwicklung einer Sanierungsstrategie, kombiniert mit vernetzten regenerativen Erzeugungs- und Speicherkonzepten

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermittelgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt, CleanTechCampus Garching - Entwicklung ganzheitlich optimierter, nachhaltiger und übertragbarer Energiekonzepte für komplexe Mischgebiete am Beispiel der TUM Campus Garching https://projektinfos.energiwende-bauen.de/projekt/methodik-fuer-optimierte-energieversorgung-von-mischgebieten/	05/2016 – 04/2019	BMWi	Mit Analysen der historischen Verbräuche und Simulationen von Großverbrauchern werden Strom-, Wärme- und Kältebedarfsszenarien für die künftige Entwicklung des Campus Garching der TU München erstellt und spartenübergreifend optimiert. Als Ergebnis der Forschungsarbeiten soll eine Methodik zur Bewertung und Optimierung komplexer Energiesysteme entstehen, die auf heterogene Mischgebiete übertragbar ist. Sie wird als Open Source Tool veröffentlicht werden.	Optimierung von Gebäuden und Netzen in Bestand und Neubau; Entwicklung eines Energienetz- und Versorgungsausbauplans sowie eines Open Source Modells.
Energieoptimiertes Bauen: Plusenergiesiedlung Landshut https://projektinfos.energiwende-bauen.de/projekt/dezentral-erzeugten-strom-im-quartier-nutzen/	08/2010 – 12/2014	BMWi	Auf einer Industriebrache entstand die Plusenergiesiedlung „Ludmilla-Wohnpark Landshut“. Ein intensives Monitoring und die anschließende Optimierung des Gebäudebetriebs konnten den Energieverbrauch deutlich senken. Zunächst führten unsachgemäßes Verhalten der Bewohner und Fehler in der Betriebsführung zu Verbräuchen, die deutlich über der Planung lagen. Eine neue Online-Visualisierung der Energieverbräuche ermöglicht es jedem Bewohner den eigenen Verbrauch in direktem Vergleich zum Siedlungsdurchschnitt zu betrachten.	Plusenergiesiedlung mit Online-Visualisierung der Energieverbräuche
'EnEff:Stadt Energienetz Berlin Adlershof', Teilvorhaben: Vernetzung von Energieströmen'; im Cluster 'Energiesstrategie Berlin Adlershof 2020' https://projektinfos.energiwende-bauen.de/projekt/energiesstrategie-fuer-vorzeigequartier-vernetzt-waerme-kaelte-und-strom/	12/2014 – 05/2018	BMWi	Dieses Projekt ist ein wesentlicher Baustein im Rahmen des Clusterprojekts „Energiesstrategie Berlin-Adlershof 2020“. Damit soll eine Senkung des Primärenergiebedarfs um mindestens 30 Prozent am Wissenschafts- und Technologiestandort Adlershof bis 2020 erreicht werden. Einige in einem vorausgehenden Forschungsprojekt entwickelte energietechnische Konzepte und Maßnahmen werden pilothaft realisiert.	Energieleitplanung als neue Planungsgrundlage für die Quartiers-Energieversorgung, Vernetzung von Energieströmen, Erprobung eines Sektor übergreifenden Smart Grids

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt, EnEff:HCBC HochschulCampus Berlin ' ' Charlottenburg Demonstration eines innovativen Wärmeenergiemanagement für ein Bestandsquartier https://projektinfos.energiewendebauen.de/projekt/innovatives-waermemanagement-fuer-den-hochschulcampus/	04/2016 – 08/2018	BMWi	Im Zentrum Berlins entsteht der energieeffiziente Hochschulcampus Charlottenburg. Ein energetischer Masterplan soll ein innovatives Wärmemanagement über ein Energieverbundnetz etablieren. Ziel ist ein energetisches und ökonomisches Optimum aus Energieeinsparung, lokaler Gewinnung erneuerbarer Energien und Energiespeicherung. Der Campus soll Vorbild für Quartierssanierungen werden und als Lern- und Testlabor die nationalen Klimaschutzziele bereits bis 2025 erreichen.	Kombination erprobter Technologien auf dem Campus mit dem Ziel, ein Optimum aus Energieeinsparung durch energetische Gebäudesanierung, lokaler Gewinnung von erneuerbarer Energie, Einsatz von Speichertechnologien sowie einem Energieverbundnetz zu finden.
EnEff:Stadt: Wolfsburg Vernetzte Quartiere für den Zukunftsraum Wolfsburg https://projektinfos.energiewendebauen.de/projekt/vernetzte-quartiere-fuer-den-zukunftsraum-wolfsburg/	08/2015 – 07/2019	BMWi	In diesem Projekt wird die Umsetzung energetischer Quartierskonzepte in systemisch vernetzten Quartieren am Beispiel dreier Neubausiedlungen der Wolfsburger Stadterweiterung erforscht. Dazu bewerten die Forscher technische Komponenten und Schnittstellen für ein künftiges Smart Grid auf den Ebenen des Gebäudes, des Baublocks und des Quartiers. Die Umsetzung der Einzelkonzepte soll, integriert in laufende Stadtplanungsprozesse, zusammen mit den lokalen Akteuren erfolgen. Neben den projektbegleitenden Monitoring-Konzepten wird ein Werkzeug für das Energie- und Qualitätsmanagement im Betrieb entwickelt.	Vernetzte energetische Quartierskonzepte, Konversion städtischer und technischer Infrastrukturen mit Akteurseinbindung, Analyse technischer Komponenten und Schnittstellen eines Smart Grids für Gebäude und Quartiere

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt Ludwigsburg - Hartenecker Höhe/Schlösslesfeld - Integriertes Energie- Quartierskonzept für ein Neubaugebiet und eine Nachkriegssiedlung	11/2010 – 09/2013	BMWi	Mit einem Quartiers-Energiekonzept wurden in Ludwigsburg die Vorteile ambitionierter Gebäudekonzepte und Sanierungsmaßnahmen mit einer energieeffizienten Wärmeversorgung kombiniert. Die Wärmeerzeugung des Neubaugebiets Sonnenberg erfolgt im Winter mittels Sole-/Wasserwärmepumpe in Kombination mit einem Blockheizkraftwerk. Das Nahwärmenetz und seine Erweiterung in das angrenzende Bestandsquartier Grünbühl verschaffen der sanierungsbedürftigen Nachkriegssiedlung neben höherem Wohnkomfort energetische Vorteile und Kosteneinsparungen. Das zentrale Wärmenetz in Sonnenberg wurde inzwischen verlegt und durch die Stadtwerke in Betrieb genommen.	

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermittelgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnEff:Stadt - Modellhaftes innerstädtisches Gebiet 'Altes Zöllnerviertel' Weimar	07/2010 – 06/2013	BMWi	Das von der Forschungsinitiative EnEff:Stadt geförderte Modellprojekt Altes Zöllnerviertel in Weimar verfolgte das Ziel, die wirtschaftliche und technische Machbarkeit einer effizienten energetischen Sanierung von Altbauten in einem innerstädtischen Bereich mit Mischstruktur aufzuzeigen. Außerdem sollte eine dezentrale, möglichst autarke Versorgung mit einem großen Anteil an erneuerbaren Energien erreicht werden. Die Basis des Projektes stellte ein integrales Energiekonzept für das Alte Zöllnerviertel dar, welches eine energieeffiziente und niedrig-exergetische Versorgung des Gebietes auf der Grundlage erneuerbarer Energien, Kraft-Wärme-Kopplung, dem Aufbau eines Nahwärmenetzes sowie einer effektiven Steuer- und Regelungstechnik ermöglichen sollte. Die Energieeinsparungen führen neben einer CO ₂ -Minderung auch zu einer Abnahme der Betriebskosten, was eine nachhaltige Steigerung von unter anderem der Wohnattraktivität der Siedlung möglich macht.	Integriertes Energiekonzept mit niedrig-exergetischer Versorgung auf Basis erneuerbarer Energien mit effektiver Steuer- und Regelungstechnik
Newton-Projekt Berlin-Adlershof	09/2016 – 02/2020	BMWi	Monitoring und Betriebsoptimierung einer solaren Wärme- und Stromversorgung von Plusenergiegebäuden mit rücklaufseitiger Fernwärmeanbindung	Bilanziell komplett solaraktive Versorgung eines Neubau-Quartiers im Passivhausstandard - gemeinsam mit bidirektionaler solarer Netzanbindung
EnEff:Stadt – Weingarten 2020 – Phase I: Konzept und Planung	01/2009 – 08/2013	BMWi	Ziel des Vorhabens war die Planung, Umsetzung und messtechnische Analyse der energetischen Sanierung der Gebäude und der Energieversorgung des Freiburger Stadtteils Weingarten-West. Der Primärenergieverbrauch aller Energiedienstleistungen sollte um 30 % reduziert werden.	Ambitionierte Sanierung von Wohngebäuden, Dezentrale Wärmespeicher für Fernwärmenetze, Betriebsoptimierung von BHKW-gespeisten Fernwärmenetzen bei sinkender Wärmenachfrage durch energetische Gebäudesanierungen

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
			In dem Projekt wurden Sanierungskonzepte für typische Gebäude aus den 1960er Jahren entwickelt und die daraus resultierende Veränderung der Wärmeversorgungsstruktur untersucht. Der Heizwärmebedarf des Stadtteiles sinkt aufgrund der verbesserten baulichen Standards der Gebäude. Dies wirkt sich insbesondere auf die Fernwärmeversorgung mit BHKW aus. Wie der Betrieb der Fernwärme an die Veränderung angepasst werden kann, wurde im Rahmen dieser Untersuchung analysiert.	
EnEff:Stadt - Weingarten 2020: Monitoring und Optimierung/IEA Mitarbeit im Annex 63 (Folgeprojekt) https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/140?op=enargus.eps2&id=2808975&q=Weingarten%202020&v=10	07/2015 – 06/2018	BMWi	Das Projekt baut auf dem vorher genannten Projekt „EnEFF:Stadt - - Weingarten 2020 – Phase I: Konzept und Planung“ auf. Im Rahmen des Vorhabens werden die im Projekt Weingarten 2020 bei der Gebäudesanierung und bei der Modernisierung der Heizzentrale umgesetzten Maßnahmen im Monitoring analysiert. Zielstellung ist, die Funktion und Effizienz der Maßnahmen zu evaluieren und Optimierungspotenzial zu identifizieren. Zudem sollen durch einen Abgleich mit den derzeitigen und künftigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (elektrisches Energiesystem) neue Betriebsweisen entwickelt werden, die eine weitere Effizienzsteigerung ermöglichen. Auf den Ebenen Nutzer - Gebäude - Fernwärme - Energiesystem sollen dabei die Wechselwirkungen berücksichtigt werden.	Analyse der Wechselwirkungen zwischen Energiesystem, Gebäude und Nutzer

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermittelgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
EnWiSol – Solarthermie in der städtischen Energieversorgung (Freiburg Gutleutmatten) https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/enwisol.html	06/2013 – 04/2018	BMW i	Im Rahmen des Vorhabens wird die dezentrale Einbindung von solarthermischen Anlagen in ein auf einem BHKW basierendes Wärmeversorgungskonzept untersucht. Der Betrieb des BHKW wird dabei hinsichtlich bestmöglicher Interaktion mit dem Stromnetz und der Betrieb des Nahwärmenetzes hinsichtlich einer Minimierung der Verteilverluste optimiert. Zentraler Inhalt des Vorhabens ist es, Konzept und Betriebsführung in dem Demonstrationsvorhaben Freiburg-Gutleutmatten zu implementieren, zu überprüfen und daraus allgemeingültige Regeln für die langfristige Nutzung von Solarthermie in vergleichbaren Wohnquartieren, insbesondere vor dem Hintergrund einer sich massiv ändernden Energieversorgungsstruktur, abzuleiten.	
Green Industry Park, Freiburg https://www.greencity-cluster.de/fileadmin/user_upload/Dateien/2015-03_GIP_Bericht_Endfassung.pdf			Für die Erreichung der Klimaschutzziele der Stadt Freiburg wurde ein Klimaschutzteilkonzept für das größte und älteste Industriegebiet der Stadt erstellt. Daraus hervorgegangen ist die Initiative „Green Industry Park“. Ziel der Initiative ist es, das Industriegebiet zu einem zukunftsweisenden Industriegebiet weiter zu entwickeln. Erreicht werden soll das Ziel durch eine Vernetzung von engagierten Unternehmen und die Umsetzung einzelbetrieblicher Lösungen, die gemeinsame Entwicklung neuer, innovativer Projekte und Modellvorhaben sowie das Aufzeigen und die Nutzung von Einsparpotenzialen und Kooperationsmöglichkeiten. Dabei soll für die Beteiligten ein wirtschaftlicher Mehrwert generiert werden.	

Quartiersprojekt	Laufzeit	Fördermit- telgeber	Beschreibung	Innovative Elemente
Vorhaben der Energetischen Stadtsanierung in diversen Pilotprojekten, z.B. in Celle – Heese Nord, Chemnitz – Brühl, Fellbach – Schmiden, Markt Zapfendorf, München – Neuaubing, Pforzheim – Weststadt, Potsdam – Drewitz, Prenzlau	abgeschlo ssen und laufend	BMI, BBSR, KfW	Diverse Pilotprojekte mit Fokus auf Wärmeversorgung oder integrierte Ansätze, sehr breit gestreut: kleine Gemeinden bis Großstädte, schrumpfende bis wachsende Regionen. Fokus häufig auf Bestandsgebäude, Fernwärmenetzerweiterungen und Energieerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien	

Quelle: Öko-Institut, Fraunhofer ISE auf Basis von EnArgus und www.energiewendenbauen.de und www.energetische-stadtsanierung.info/pilotprojekte

A2: Bewertungssysteme

LEED

Zertifizierungssystem mit vier Level, die erreicht werden können: „Zertifiziert“, „Silber“, „Gold“, „Platin“.

Tabelle A2-1: LEED – Energie- und Klimaaspekte

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude		
	Reduktion von Hitzeinseln	Fläche der Maßnahmen ohne Dachfläche* / 0,5 + Fläche der hoch reflektierenden Dachfläche / 0,75 + Fläche des begrünten Daches / 0,75 $\geq$ Gesamte gepflasterte Fläche am Standort + Gesamte Dachfläche (*Maßnahmen ohne Dachfläche: Bepflanzung (kein Kunstrasen), Beschattung (anhand von Bauten, die mit Systemen zur Energieerzeugung ausgestattet sind), Installation schattenspendender Bauten und Anlagen mit einem SR (solares Reflexionsvermögen) von mindestens 0,28, Begrünung, Verwendung von Pflastermaterial mit mindestens SR 0,28, Verwendung von versickerungsfähigem Pflastersystem
	Solarer Reflexionsindex zur Reduktion von Hitzeinseln	Das Dachmaterial soll mindestens folgendem SRI entsprechen: Dach mit geringer Neigung: $\leq 2:12$; anfänglicher SRI 82, SRI nach 3 Jahren 64 Steildach $> 2:12$; anfänglicher SRI 39, SRI nach 3 Jahren 32
	Mindestenergieleistung	Energieeffizienz des Gebäudes gegen dem Referenzgebäude muss um 5% (Neubauten), 3% (umfassende Renovierungen) oder 2% (Kern und Gebäudehülle) verbessert werden Einhaltung der verbindlichen und normativen Vorschriften, die in „ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90,1-2010“ samt Errata enthalten sind
	Energiemessung auf Gebäudeebene	Installation von Stromzählern, um den Gesamtenergieverbrauch zu ermitteln (Elektrizität, Erdgas, Kühlwasser, Dampf, Heizöl, Propan, Biomasse etc.); nach der Annahme der LEED-Zertifizierung müssen die erfassten Informationen fünf Jahre an den USGBC weitergegeben werden; der Energieverbrauch muss mindestens monatlich gecheckt werden
	Kältemittel	In neuen HLKK-Anlagen (Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Kältetechnik) dürfen keine Kältemittel mit FCKW verwendet werden

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	kW pro m ² pro Jahr des Primärenergieverbrauchs und prozentuale Verbesserung der Energieleistung	Im Abschluss der Entwurfsplanung soll eine Zielvorgabe für die Energieleistung festgelegt werden Verbesserung der Energieleistung: volle LEED-Punktzahl (18) für Neubauten ab einer 50% Verbesserung, für umfassende Renovierungen ab einer 48% Verbesserung und für Kern und Gebäudehülle ab einer Verbesserung von 47%.
	Verbesserte Energiemessung	Fortschrittliche Energiezähler sollen an allen Energiequellen des Gesamtgebäudes, die von Gebäude genutzt werden und an alle individuellen Endverwertungen von Energie, die mindestens mit 10% zum jährlichen Gesamtenergieverbrauch des Gebäudes beitragen, angebracht werden Daten müssen per Fernzugriff zugänglich sein Alle Zähler müssen in der Lage sein, den stündlichen, täglichen, monatlichen und jährlichen Energieverbrauch anzuzeigen
	Steuerung des Strombedarfs (Demand Response-DR)	Teilnahme an bestehenden Programmen für die Strombedarfssteuerung
	Prozentualer Anteil erneuerbarer Energien	% regenerative Energien = entsprechende Kosten der nutzbaren Energie, die mit dem regenerativen Energiesystem erzeugt wird / jährliche Gesamtenergiekosten des Gebäudes Punkte (außer Kern und Gebäudehülle): 1 für 1%, 2 für 5%, 3 für 10% Punkte (Kern und Gebäudehülle): 1 für 1%, 2 für 3%, 3 für 5%
	Verbessertes Kältemittelmanagement	Ausschließlich Kältemittel mit Ozonabbaupotenzial 0 und Treibhauspotenzial unter 50 verwenden Alle neuen oder vorhandenen HLKK-Anlagen müssen folgenden Formeln entsprechen: IP-Einheiten: $LCGWP + LCODP * 10^5 \leq 100$ und SI-Einheiten: $LCGWP + LCODP * 10^5 \leq 13$
	Prozentualer Anteil an Ökostrom und Kohlenstoffausgleich	Mindestens 50% (1 Punkt) oder 100% (2 Punkte) des Energiebedarfs müssen mit Ökostrom, Kohlenstoffausgleich (CO ₂ -Zertifikate: diese müssen über eine „Green-e Energy“-Zertifikat oder ein gleichwertiges Zertifikat verfügen) oder Zertifikaten für regenerative Energie abgedeckt werden
	Regenerative Energie und Kohlenstoffausgleich	Einer oder beide Faktoren müssen für mindestens einen Teil des Gesamtenergieverbrauchs des Gebäudes erbracht werden: Der gesamte Energieverbrauch wird direkt anhand regenerativer Energiesysteme gedeckt Es gibt einen Vertrag über den Bezug eigener Ressourcen, die mindestens jährlich bereitgestellt werden (Laufzeit des Vertrags muss mindestens zwei Jahre betragen und regelmäßig erneuert werden)
	L70 bei LED-Quellen	Lebensdauer von mindestens 24 000 Stunden und Beleuchtungsqualität muss für mindestens 75% der angeschlossenen Beleuchtungslast der Fall sein

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Quartiere		
	Bevorzugte Parkplätze für umweltfreundliche Fahrzeuge	5% aller Parkplätze
	Vergünstigte Parkgebühren	Wenn kein bevorzugter Parkplatz für umweltfreundliche Fahrzeuge vorhanden ist, sollen diese 20% ermäßigte Parkgebühren erhalten
	Fahrzeugbewertung	Umweltfreundliche Fahrzeuge müssen in der Fahrzeugbewertung des „American Council for an Energy Efficient Economy“ einen Mindestwert von 45 erreichen
	Ladestationen für Elektrofahrzeuge	Ladekapazität muss mindestens 208 bis 240 Volt betragen; regionale und lokale Standards für elektrische Anschlüsse müssen eingehalten werden (bsp. SAE J1772); Ladestationen müssen vernetzt und internetfähig sein, Time-of-use Pricing
	Reduktion des Außenenergieverbrauchs	Auswählen von Außenbeleuchtung und sonstigen Anschaffungen, die zur Energiereduktion beitragen 30%: 2 Pkt. 60%: 3 Pkt. 90%: 4 Pkt.

Quellen:

<https://www.german-gba.org/helpful-leed-weblinks>https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED-v4-BDC_07.01.15_German.pdfhttps://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED-v4-EBOM_10.01.14_German.pdf<https://www.usgbc.org/resources/sites-rating-system-and-scorecard>

Tabelle A2-2: LEED – Ressourcen und Flächen

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude / Quartiere / Gesamtstadt		
	Durchschnittliche Bebauungsdichte im Umkreis von 400 m	Wohndichte 17,5 WE/Hektar und Gewerbedichte 0,5 GFZ (Geschossflächenzahl) oder Wohndichte 13 WE/Hektar und Gewerbedichte 0,8 GFZ

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Parkflächen	Sollen prozentual unter den Werten aus „Transportation Planning Handbook“ liegen (variiert je nach Art des Gebäudes) https://www.usgbc.org/sites/default/files/ITE_Trans_Planning_3rdEd.pdf
	Offene Fläche	Der Außenbereich muss mindestens 30% der Gesamtfläche des Standort (einschließlich der Grünfläche des Gebäudes) betragen; 25% dieser Außenbereiche müssen begrünt sein, wobei Rasenflächen nicht als Vegetation gelten) oder mit einer begrünter Überdachung versehen sein
	Reduzierung der Abfallmenge, die transportiert und entsorgt werden muss	Sammlung und Lagerung von Wertstoffen aus dem gesamten Gebäude
	Reduzierung der Bau- und Abrissabfälle	Wiederverwendung und Recycling von Wertstoffen Mindestens fünf Materialien sollen für die Abfalltrennung ermittelt werden und Beschreibung der Strategien für die Mülltrennung
	Prozentualer Anteil für die Wiederverwendung von Baumaterialien	Renovierung eines verlassenen oder beschädigten Gebäudes: mindestens 50% der bestehenden Bausubstanz, Gebäudehülle müssen erhalten bleiben Wiederverwertung von Gebäude und Materialien: Prozentualer Anteil der wiederverwendeten Grundfläche nach Abschluss des Projekts 25% (2 Punkte), 50% (3 Punkte), 75% (4 Punkte)
	Ökobilanz auf Ebene des Gesamtgebäudes	Es muss nachgewiesen werden, dass gegenüber einem Referenzgebäude in mindestens drei der folgenden sechs Wirkungsgrade (bei einer muss es sich um das Treibhausgaspotenzial handeln) um mindestens 10% reduziert werden: Treibhauspotenzial in CO ₂ -Äquivalent Abbau der stratosphärischen Ozonschicht in Kg CFC-11 Versauerung von Böden und Wasservorkommen, in Mol h ⁺ oder kg SO ₂ Überdüngung von Gewässern, in kg Stickstoff oder kg Phosphat Bildung von troposphärischem Ozon in kg NO _x , kg O ₃ -Äquivalent oder kg Äthylen Erschöpfung nicht erneuerbarer Energiequellen in MJ
	Beschaffung und Gewinnung von Rohmaterial	Mindestens 20 unterschiedliche und dauerhaft installierte Produkte, die von mindestens fünf unterschiedlichen Herstellern bezogen werden. In Berichten dazu muss hervorgehen, dass sich die Rohstofflieferanten für eine ökologisch verantwortliche Landnutzung und die Senkung der Umweltbelastung einsetzen Mindestens 25% (bezogen auf die Kosten) des Gesamtwerts müssen Kriterien für eine verantwortungsbewusste Förderung erfüllen

Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung																					
Emissionsarme Materialien	Tabelle 1. Schwellenwerte für die Einhaltung von Emissionsstandards in 7 Materialkategorien <table><tr><th>Kategorie</th><th>Schwellenwert</th><th>Anforderungen an Emissionen und Inhaltsstoffe</th></tr><tr><td>Vor Ort angebrachte Innenfarben und -beschichtungen</td><td>Mindestens 90 %, nach Volumen, bei Emissionen; 100 % beim VOC-Gehalt</td><td> - Allgemeine Beurteilung von Emissionen (General Emissions Evaluation) im Hinblick auf Farben und Beschichtungen, die auf Wände, Böden und Decken angebracht werden. - Anforderungen hinsichtlich des VOC-Gehalts von Produkten, die nass aufzutragen sind. </td></tr><tr><td>Kleber und Dichtungsmassen, die vor Ort im Innenbereich angebracht werden (einschließlich Bodenkleber)</td><td>Mindestens 90 %, nach Volumen, bei Emissionen; 100 % beim VOC-Gehalt</td><td> - Allgemeine Beurteilung von Emissionen - Anforderungen hinsichtlich des VOC-Gehalts von Produkten, die nass aufzutragen sind. </td></tr><tr><td>Fußbodenbelag</td><td>100 %</td><td>Allgemeine Beurteilung von Emissionen</td></tr><tr><td>Holzwerkstoffe</td><td>100 % nicht von anderen</td><td>Beurteilung von Holzwerkstoffen</td></tr><tr><td>Decken, Wände, Wärme- und Schalldämmung</td><td>100 %</td><td> - Allgemeine Beurteilung von Emissionen nur Gesundheitswesen, Schulen Zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Dämmung </td></tr><tr><td>Möbel (Berechnungen aufnehmen, wenn im Leistungsumfang inbegriffen)</td><td>Mindestens 90 %, nach Kosten gerechnet</td><td>Beurteilung von Möbeln</td></tr></table>	Kategorie	Schwellenwert	Anforderungen an Emissionen und Inhaltsstoffe	Vor Ort angebrachte Innenfarben und -beschichtungen	Mindestens 90 %, nach Volumen, bei Emissionen; 100 % beim VOC-Gehalt	- Allgemeine Beurteilung von Emissionen (General Emissions Evaluation) im Hinblick auf Farben und Beschichtungen, die auf Wände, Böden und Decken angebracht werden. - Anforderungen hinsichtlich des VOC-Gehalts von Produkten, die nass aufzutragen sind.	Kleber und Dichtungsmassen, die vor Ort im Innenbereich angebracht werden (einschließlich Bodenkleber)	Mindestens 90 %, nach Volumen, bei Emissionen; 100 % beim VOC-Gehalt	- Allgemeine Beurteilung von Emissionen - Anforderungen hinsichtlich des VOC-Gehalts von Produkten, die nass aufzutragen sind.	Fußbodenbelag	100 %	Allgemeine Beurteilung von Emissionen	Holzwerkstoffe	100 % nicht von anderen	Beurteilung von Holzwerkstoffen	Decken, Wände, Wärme- und Schalldämmung	100 %	- Allgemeine Beurteilung von Emissionen nur Gesundheitswesen, Schulen Zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Dämmung	Möbel (Berechnungen aufnehmen, wenn im Leistungsumfang inbegriffen)	Mindestens 90 %, nach Kosten gerechnet	Beurteilung von Möbeln
Kategorie	Schwellenwert	Anforderungen an Emissionen und Inhaltsstoffe																				
Vor Ort angebrachte Innenfarben und -beschichtungen	Mindestens 90 %, nach Volumen, bei Emissionen; 100 % beim VOC-Gehalt	- Allgemeine Beurteilung von Emissionen (General Emissions Evaluation) im Hinblick auf Farben und Beschichtungen, die auf Wände, Böden und Decken angebracht werden. - Anforderungen hinsichtlich des VOC-Gehalts von Produkten, die nass aufzutragen sind.																				
Kleber und Dichtungsmassen, die vor Ort im Innenbereich angebracht werden (einschließlich Bodenkleber)	Mindestens 90 %, nach Volumen, bei Emissionen; 100 % beim VOC-Gehalt	- Allgemeine Beurteilung von Emissionen - Anforderungen hinsichtlich des VOC-Gehalts von Produkten, die nass aufzutragen sind.																				
Fußbodenbelag	100 %	Allgemeine Beurteilung von Emissionen																				
Holzwerkstoffe	100 % nicht von anderen	Beurteilung von Holzwerkstoffen																				
Decken, Wände, Wärme- und Schalldämmung	100 %	- Allgemeine Beurteilung von Emissionen nur Gesundheitswesen, Schulen Zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Dämmung																				
Möbel (Berechnungen aufnehmen, wenn im Leistungsumfang inbegriffen)	Mindestens 90 %, nach Kosten gerechnet	Beurteilung von Möbeln																				
Nutzung von bereits erschlossener oder brachliegender Fläche	Wiederverwertung von bereits bestehender Infrastruktur und Materialien																					
Neubau in Gebieten mit bereits entwickelter Infrastruktur	Innerhalb eines 500 feet (152,4 m) Radius von bereits bestehender Wasser- und Abwasserinfrastruktur Nähe zu Orten der Grundversorgung. So soll der Eingang maximal 0,8 km von mindestens sieben öffentlich zugänglichen Grundversorgungseinrichtungen sein																					
Verwendung von Material mit recyceltem Anteil	Bestimmung des Werts des recycelten Material durch abwägen (<i>The recycled fraction of the assembly is then multiplied by the cost of assembly to determine the recycled content value.</i>) 20 % der gesamten Materialkosten (ohne Pflanzen und Boden): 3 Pkt. 40% der gesamten Materialkosten (ohne Pflanzen und Boden): 4Pkt.																					
Verwendung von regionalen Materialien	Prozentuale Berechnung erfolgt auf Basis der Anschaffungskosten: 30% der gesamten Materialkosten: 3 Pkt. 60% der gesamten Materialkosten: 4 Pkt. 90% der gesamten Materialkosten: 5 Pkt. Böden, Kompost und Mulch: aus Radius von max. 80,47 km																					

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
		Felsbrocken, Felsen, Mineralien: aus Radius von max. 80,47 km Pflanzen: aus Radius von max. 402,34 km Andere Materialien: aus Radius von max. 804,67 km
	Förderung nachhaltiger Materialherstellung	1 Pkt.: Verfassen eines Briefs für die Material herstellenden Firmen in dem diese um nachhaltige Produktion gebeten werden 3 Pkt.: 25% der verwendeten Materialkosten stammen von Firmen, die eins der folgenden Kriterien erfüllen: Jährlicher Bericht über die Umweltleistung im Rahmen der Global Reporting Initiative (oder gleichwertige) Durchführung und Veröffentlichung einer begutachteten Lebenszyklusanalyse oder Umweltproduktdeklaration Veröffentlichung von konkreten Zielen für die Verbesserung um 25% in den Bereichen Verbrauch von Energie, Wasser und Giftstoffe, Schadstoffe in Luft und Wasser und Entsorgung von Abfällen 5 Pkt.: 25% der gesamten anwendbaren Materialkosten stammen von Unternehmen, die mindestens drei der folgenden Leistungen erfüllen: In 2 von 3 der Kategorien müssen mindestens 50% in den letzten 10 Jahren reduziert worden sein: Emission gefährlicher Luftschadstoffe, Emission von toxischen Wasserschadstoffen, Erzeugung von Abfällen, Das Unternehmen weist nach, dass die drei niedrigsten Jahre der CO₂-Emissionen in den letzten 10 Jahren mindestens 25% besser sind als der entsprechende 10 Jahres Durchschnitt oder das Unternehmen für 25% seiner CO₂-Emissionen Kompensationen kauft Das Unternehmen kann nachweisen, dass es pro Produkteinheit 25% weniger Energie verbraucht als der Branchendurchschnitt Das Unternehmen deckt 10% der Energienachfrage aus Erneuerbaren Energiequellen vor Ort oder kann einen mindestens 4-Jahres Vertrag über den Bezug von 20% des Stroms aus erneuerbaren Energien vorweisen Das Unternehmen nutzt weniger als 25% von Trinkwasser für die Herstellung des Produkts; 75% werden aus nicht trinkbaren Quellen bezogen

Quellen:

<https://www.german-gba.org/helpful-leed-weblinks>

https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED-v4-BDC_07.01.15_German.pdf

https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED-v4-EBOM_10.01.14_German.pdf

<https://www.usgbc.org/resources/sites-rating-system-and-scorecard>

BREEAM

Community Rating Benchmarks – Vergabe von Credits

- Outstanding: $\geq 85\%$
 - Excellent: $\geq 70\%$
 - Very good: $\geq 55\%$
 - Good: $\geq 45\%$
 - Pass: $\geq 30\%$
- Erklärung: für das Erreichen von z.B. 11 Credits müssen die Kriterien für 1-10 Credits ebenfalls eingehalten werden

Tabelle A2-3: BREEAM – Energie- und Klimaaspekte

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude		
	Nachhaltige Gebäude	1C.: in einem oder mehr der folgenden Bereiche wird Nachhaltigkeit umgesetzt: Energie, Wasser, Abfall, Material, Gesundheit und Wohlbefinden der Bevölkerung 2C.: in allen der folgenden Bereiche wird Nachhaltigkeit umgesetzt: Energie, Wasser, Abfall, Material, Gesundheit und Wohlbefinden der Bevölkerung 3-5C.: Bewertung des Nachhaltigkeitsdesigns (3.: Top 50%-->Good, 4C.: Top 25%-->very good, 5C.: Top 10%-->excellent, 6C.: Top 1%-->outstanding)
	Energy Performance Ratio for International New Construction (EPR _{INC})	Kennzahl, die durch das BREEAM Ene01 mithilfe der Energiekalkulationssoftware berechnet wird: Folgende drei Kennzahlen werden eingerechnet: Energieverbrauch von Heizung und Kühlung des Gebäudes (MJ/m²) Primärenergiekonsum des Gebäudes (kWh/m²) Die gesamten CO₂-Emissionen (kg CO₂/m²)

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Reduktion des Energieverbrauchs und der CO ₂ -Emissionen	Berechnung des EPR _{INC} (s.o.) und je nach Ergebnis werden Credits vergeben: 1-5C.: 0,06-0,3 EPR _{INC} , 6-10C.: 0,35-0,54 EPR _{INC} --> Excellent, 10-15C.: 0,6-0,9 EPR _{INC} --> Outstanding
	Energieüberwachung	1C.: Über ein Display wird der Strom- oder Primärenergieverbrauch angezeigt 2C.: Über ein Display wird der Strom- und Primärenergieverbrauch angezeigt
	Energiekonsum in kWh	Wichtig für Energieüberwachung s.o.
	Kohlenstoffarme Bauweise	Passivhausdesign (bis zu 2C.) Gestaltungsmaßnahmen, die den Energieverbrauch, Primärenergieverbrauch und CO ₂ -Emissionen um mindestens 5% reduzieren Allgemeine Analyse und Kontrolle des Passivhauses Analyse, inwiefern „Free cooling“ genutzt werden kann Natürliche Belüftung Technologien mit niedrigem und keinem Kohlenstoffgehalt (1C.) Durchführung einer „Machbarkeitsstudie zur Einführung einer niedrig oder null Energiequelle“, die dem Ort am meisten entspricht Eine passende Technologie wird gemeinsam mit einer Empfehlung angegeben
	Machbarkeitsstudie zur Einführung einer niedrig oder null Energiequelle (LZC (Low/Zero Carbon) feasibility study)	Die Studie sollte folgendes mindestens decken: - Energie die durch LZC Quellen jährlich erzeugt werden - CO₂-Einsparungen durch LZC Quellen im Jahr - Berechnung der Lebenszykluskosten - Lokale Planungskriterien - Realisierbarkeit von Wärme- oder Stromexporten aus dem System - Verfügbare Fördermittel - Gründe für den Ausschluss anderer Technologien
Quartiere		
	Energiestrategie	Obligatorisch: Erstellung einer Energiestrategie durch einen Energiespezialisten, die folgendes enthält:

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
		- Vorhersage des grundlegenden Energiebedarfs: Aufschlüsselung des Wärme-, Kälte- und Strombedarfs, Emissionen für den Energieverbrauch, Emissionen die durch Straßenlicht und anderen beleuchteten Straßenelementen erzeugt wurden - Empfehlungen für die Reduktion des Energieverbrauchs und Emissionen inklusive der Umsetzung energieeffizienter Maßnahmen in folgenden Bereichen: Standortgestaltung, Nutzung der Topographie, Schatten, Sonnenausrichtung, Nutzung von Tageslicht, Windmanagement, Nutzung von natürlicher Blüftung - Weitere Reduktion der Emissionen durch die Nutzung dezentralisierter Energie inklusive Anschluss an bestehende oder zukünftige Wärmeverteilnetze, Installation von einem quartiersweitem Wärme- und Kühlungsnetzwerk, Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplungssystemen (mit der Möglichkeit dieses zu erweitern), Gründe für die Einbeziehung anderer Technologien - Möglichkeit die Emissionen weiter zu reduzieren durch die Installation von niedrig oder null CO₂ Energiequellen inklusive Information über Energiegewinnung aus niedrig oder null CO₂ Energiequellen, Rückzahlung, Landnutzung, Lokale Planungskriterien, Lärm, Umsetzbarkeit von Wärme- oder Stromexporte aus dem System, Lebenszykluskosten, alle standortbezogenen Technologien und Energiebedarf der Entwicklung, wie die Integration von den niedrig oder null CO₂ Energiequellen erfolgen soll, Gründe für das Ausschließen anderer Technologien - Zusammenfassung der CO₂-Einsparungen durch Energieeffizienzmaßnahmen, der Nutzung von dezentraler Energie und der Installation von niedrig und null CO₂-Energiequellen 1-10 Credits werden für die Umsetzung der Energiestrategie vergeben, also für die Reduktion der CO₂-Emissionen: 1C. für 3,6% Reduktion, 2C für 9,9%, 3C. für 17,7%, 4C. für 26,7%, 5C für 36,9%, 6C für 47,9%, 7C für 59,8%, 8C für 72,5%, 9C für 85,9% und 10C für 100%, 11 Credits: der Bauherr verpflichtet sich dazu die Empfehlungen der Energiestrategie umzusetzen, die zu einer CO₂-negativen Entwicklung führen
	Geprüfte Gebäudeenergiekalkulationssoftware	Software, die zum Nachweis der Einhaltung der Energieeffizienz und der CO ₂ -Emissionsanforderung von Bauvorschriften zugelassen ist
	Grundbedarf an Energie	Der prognostizierte Energiebedarf soll den folgenden Energieverbrauch berücksichtigen: Vorgabe des Energiebedarf der durch Gebäudevorschriften oder der EU besteht (z.B. Warmwasser, Heizung) , nicht regulierter Energieverbrauch von Gebäuden (z.B. Kochen, Computer), Quartierweiter Energieverbrauch (z.B. Straßenbeleuchtung),

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Erneuerbare und kohlenstoffarme Anlagen	Installation kann verwendet werden um Emissionen, die durch den Grundbedarf entstehen, kompensieren
	Externe und zertifizierte erneuerbare Energien	Schaffung neu installierter Erzeugungskapazität je Bedarf des entstehenden Quartiers
	Anerkannte lokale niedrig und null CO ₂ Energiequelle	Muss durch die Richtlinien des Europäischen Parlament 2009/28/EC und des Europäischen Rats vom 23. April 2009 einhalten. Außerdem müssen die Energiequellen zusätzlich folgende Richtlinien erfüllen: - Es muss eine private Leitungsanlage für die Versorgung des zu bewertenden Gebäudes geben - Wenn vorhanden, muss das nationale Zertifizierungssystem eingehalten werden - Wo es keine unabhängigen Akkreditierungssysteme gibt muss das Entwicklungsteam (des Quartiers) sicherstellen, dass der Installateur kompetent ist die niedrig und null CO₂ Energiequellen zu installieren
	Abwärme aus gebäudebezogenen Betriebsprozessen	Diese Abwärme kann als Niedrig-CO ₂ eingestuft werden
	Müllverbrennung	Wärme der Müllverbrennungsanlage kann nur unter folgenden Umständen als Niedrig-CO ₂ eingestuft werden: - Alle anderen niedrig und null CO₂ Energiequellen wurden berücksichtigt und bewertet und entweder erfüllt die Behörde, in der sich die Verbrennungsanlage befindet nachweislich ihre jährlichen Ziele für die Wiederverwertung und das Recycling von Abfällen oder es wird an der Entwicklung gearbeitet wie wiederverwendbare und recycelbare Materialien entfernt werden können, um diese nicht zu verbrennen
	Berücksichtigung des „Kohlenstoffgehalts“* in bestehenden Gebäuden und Infrastrukturen *“Embodied carbon“ = the amount of carbon released from material extraction processing, transport, manufacturing, and related activities; from cradle to grave.“	Obligatorisch: Bewertung von Gebäude/Infrastruktur zur Feststellung was wiederbenutzt/recycelt/renoviert werden kann und Entscheidung wird getroffen, inwiefern Bestandsgebäude und -infrastruktur genutzt oder abgerissen werden kann 1 C.: Verpflichtung der Wiederverwendung oder Recycling von Gebäude- oder Infrastrukturmaterial 2 C.: Verpflichtung alle Gebäude und Infrastrukturen, die renoviert werden können, auch zu renovieren; Verpflichtung alle Gebäude und Infrastrukturen zu renovieren, die von besonderem Wert für die Gemeinde ist oder aus Gründen der Nachhaltigkeit Zusatz: Wenn die Wiederverwendung von Material auf dem Gelände nicht möglich ist, können Credits durch die Wiederverwendung von Materialien aus einem 30km Radius um das Gelände verwendet werden

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Mikroklima	1C.: Studie oder Simulation des Mikroklimas soll den Effekt von urbaner Struktur zeigen (in den Bereichen: Temperatur und Wärmekomfort, Sonnenausrichtung, Windrichtung, -geschwindigkeit und -bewegung, Staub und Schadstoffbelastung, Lärm und Schnee und Eis) 2C.: Die Entwicklung will ungünstige Bedingungen für das Mikroklima minimieren 3C.: Bedingungen für ein vorteilhaftes Mikroklima werden entwickelt und geschaffen; die Entstehung von öffentlichem Raum optimiert zusätzlich die Mikroklimabedingungen; der Bau von Fußgänger- und Fahrradwegen berücksichtigt die Bedingungen des Mikroklimas
	Anpassung an den Klimawandel	Verständnis für die Auswirkungen des Klimawandels auf das Gelände wird geschaffen; Credits je nach Masterplan (inwiefern dieser die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt) (steigende Temperatur und Hitzeinseleffekt, Überflutungsgefahr, steigende Wetterschwankungen, Auswirkungen auf Wasser, Änderung der Bodenverhältnisse (Vegetation, Erosion, ...), Schnee- und Eisbildung) 1C.: Aufzeigen, wie mit Risiken umgegangen wird 2C.: Aufzeigen, wie mit Risiken umgegangen wird und wie diese reduziert werden 3C.: Aufzeigen, wie mit Risiken umgegangen wird und wie diese reduziert werden durch den Einsatz von win-win-Maßnahmen* (Reduktion von mehr als einer Auswirkung, Reduktion der Ursachen, Förderung einer nachhaltigen Entwicklung im allgemeinen (Bsp. Nutzung von Entwässerungsanlagen, die auch Biodiversität oder Wasserqualität steigern) <i>*diese bieten neben der Anpassung auch Vorteile</i>
	Nähe zu ÖPNV-Haltestellen	Abstandsmessung nicht Luftlinie, sondern nach sicheren Fußgängerwegen 1C.: ≤650 m (städtischer Raum), ≤1300m (ländlich) 2C.: ≤550 m (städtisch), ≤1100m (ländliche) 3C.: ≤450m, ≤900m 4C.: ≤350m, ≤700m
	Reduktion der CO ₂ -Emissionen durch Transport	1C.: Entwicklung alternativer Transportmöglichkeiten (Sharing- und Ausleihmöglichkeiten von Autos und Fahrrädern, Mitfahrgelegenheiten, Elektrofahrzeuge, Arbeitsbereich im Quartier um das Pendeln zu vermeiden); mindestens eine alternative Transportmöglichkeit wurde umgesetzt; der nachhaltige Transport wird beworben, damit Bewohner erfahren was es für Möglichkeiten gibt; es gibt Pläne um die Nutzung zu überwachen
	Energieeffizientes Transportsystem	Aufzüge, Rolltreppen, Personenbeförderungsband

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
		- Analyse des Energieverbrauchs und Klassifikation; die Nutzung eines regenerativen Antriebs soll in Betracht gezogen werden; schließlich wird das Transportsystem mit dem geringsten Energieverbrauch bestimmt - Lift: während Zeiten des geringen Gebrauchs operiert der Lift im Stand-By-Modus; die Beleuchtung in der Kabine hat eine Leistung von >55 Lumen pro Watt; Antriebssteuerung ist fähig verschiedene Geschwindigkeiten, Spannung und Frequenz einzustellen - Rolltreppe und Personenbeförderungsband: Ausgestattet mit einem Lastmessgerät, dass mit dem Motor verbunden ist und dieser daher die Geschwindigkeit variieren kann ODER während Zeiten des geringen Gebrauchs operieren Rolltreppe und Förderband im Stand-By-Modus
	Energieeffiziente Ausstattung	Identifikation des jährlichen Energieverbrauchs durch Gebäude; Identifikation des Systems, das einen großen Anteil des jährlichen Energieverbrauchs konsumiert; Einführung von energiereduzierenden Maßnahmen im Bereich der Ausstattung: Maßnahmen für Wohngebiete mit Haushaltsgeräten (nach dem EU Energy Efficiency Labelling Scheme): - Kühlschränke und Gefriertruhen : A+ - Waschmaschinen: A++ - Spülmaschinen: A+ - Wäschetrockner: A - Klimaanlage: B
	Alternative Verkehrsmöglichkeiten	Ladestationen für Elektrofahrzeuge betragen mindestens 3% der gesamten Anzahl an Parkplätzen Carsharingfahrzeuge haben Vorrang: mindestens 5% der gesamten Anzahl an Parkplätzen ist für Carsharingfahrzeuge vorgesehen

Quellen:

https://www.breeam.com/communitiesmanual/#resources/otherformats/output/10_pdf/20_a4_pdf_screen/sd202_breeam_communities_1.2_screen.pdf

https://www.breeam.com/BREEAMInt2016SchemeDocument/content/resources/output/10_pdf/a4_pdf/nc_pdf_printing/sd233_nc_int_2016_print.pdf

Tabelle A2-4: BREEAM – Ressourcen und Flächen

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude / Quartiere / Gesamtstadt		
	Nutzung von bereits entwickeltem oder belastetem Land	Obligatorisch: Ermittlung durch mögliche Probleme durch Kontamination durch einen Spezialisten; werden Probleme ermittelt, soll der Spezialist einordnen, inwieweit diese das Gelände beeinflussen und Empfehlungen für eventuelle Sanierungsmaßnahmen 1C.: Wo eine Sanierung notwendig ist, soll der Standort untersucht werden und bezüglich Risiken beurteilt werden 1C.: Mindestens 75% der Fläche ist bereits entwickelt/benutzt und wird nicht neu erschlossen 2C.: Sanierungsstrategie wurde durch Spezialisten durchgeführt
	Schonende und nachhaltige Materialien	1-3C.: Umweltmanagement (Z.B. EMAS/ISO 14001) wird verwendet, um Nachhaltigkeit sicherzustellen; Credits je nach Prozentzahl an Material, das A+ bis B Bewertung im „Green Guide“ (http://www.thegreenguide.org.uk/) erhält: 1 C.: 40-60% (Volumen oder Gewicht) erreicht eine A+ bis B Bewertung, 2C.: mehr als 60%, 3C.: mehr als 80%
	Recycling	<i>At least 25% of the high grade aggregate uses (within the development) are provided by secondary or recycled aggregate. This percentage can be measured either weight or recycled aggregate.</i>

Quellen:

https://www.breeam.com/communitiesmanual/#resources/otherformats/output/10_pdf/20_a4_pdf_screen/sd202_breeam_communities_1.2_screen.pdf
https://www.breeam.com/BREEAMint2016SchemeDocument/content/resources/output/10_pdf/a4_pdf/nc_pdf_printing/sd233_nc_int_2016_print.pdf

DGNB

Tabelle A2-5: DGNB – Energie- und Klimaaspekte

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude		
	Ökobilanz / Umweltwirkungspotenzial (UWP)	Die Ökobilanz ermittelt die CO₂-Äquivalente für die Phasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung und fasst diese zusammen. Die CO₂-Äquivalente des betrachteten Gebäudes werden mit denen eines definierten Referenzgebäudes verglichen, um die relative Verbesserung ermitteln zu können. Die prozentuale Verbesserung wird mit Punkten bewertet. $UWP_G = UWP_K + UWP_N$ UWP_G = Gesamtes entstehendes Umweltwirkungspotenzial für Konstruktion (K) und Nutzung (N) des Gebäudes (in kg Umweltwirkungs-Äquivalent/(m²_{NGFa}*a)) UWP_K = bei Herstellung, Instandhaltung Rückbau- und Entsorgung des Bauwerks als jährlicher Durchschnittswert⁶ über den für die Zertifizierung angesetzten Betrachtungszeitraum t_d entstehendes Umweltwirkungspotenzial (in kg Umweltwirkungs-Äquivalent/(m²_{NGFa}*a)) UWP_N = prognostiziertes jährliches Umweltwirkungspotenzial für den Betrieb des realisierten Gebäudes, abgeleitet aus dem Endenergiebedarf nach EnEV zzgl. Umweltwirkungspotenzial für die Nutzerausstattung während des Gebäudebetriebs, abgeleitet aus dem Endenergiebedarf der definierten Ausstattung (in kg Umweltwirkungs-Äquivalent/(m²_{NGFa}*a)) Für genaueres: DGNB\Kriterien_Gebäude Neubau_Kleine Wohngebäude_V13\NKW13.2_ENV1.1_160324.pdf S. 15 ff.
	Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf PE_{ne}	$PE_{ne} = X * PE_{ne,ref}$ $PE_{ne,ref}$ = Referenzwert für den Primärenergiebedarf nicht erneuerbar Je kleiner der Wert X, desto höher die Punkte, die man erhält (X=1,4 --> 10 Teilpunkte (TP), X=0,7 --> 100 TP) Für genaueres: DGNB\Kriterien_Gebäude Neubau_Kleine Wohngebäude_V13\NKW13.2_ENV2.1_161208.pdf
	Gesamtprimärenergiebedarf PE_{ges}	$PE_{ges} = X * PE_{ges,ref}$ $PE_{ges,ref}$ = Referenzwert für den Gesamtprimärenergiebedarf Je kleiner der Wert X, desto höher die Punkte, die man erhält (X=1,4 --> 5 TP, X=0,4 --> 100) Für genaueres: s.o.
	Anteil erneuerbarer Primärenergie	$PE_e/PE_{ges} = X$ (in %) Je höher X, desto höher die Punkte (X=2% --> 5 TP, X=20% --> 50 TP)

Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Für genaueres: s.o.
	Berechnung der CLP (Checklistenpunkte für das Kriterium: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf, Gesamtprimärenergiebedarf und Anteil Erneuerbarer Primärenergie) $CLP = TP_{P_{Ene}} * G_{P_{Ene}} + TP_{P_{EGes}} * G_{P_{EGes}} + TP_{P_{EE}/P_{EGes}} * G_{P_{EE}/P_{EGes}}$ Gewichtungsschlüssel der Indikatoren $G_{P_{Ene}}$ 60% $G_{P_{EGes}}$ 40% $G_{P_{EE}/P_{EGes}}$ 20% 10 CLP --> 1 BWP 50 CLP --> 5 BWP 100 CLP --> 10 BWP
Quartiere	
Mit der Methode der Ökobilanz werde folgende 5 Indikatoren bewertet	Die Ökobilanz ermittelt die CO₂-Äquivalente für die Phasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung und fasst diese zusammen. Die CO₂-Äquivalente des betrachteten Gebäudes werden mit denen eines definierten Referenzgebäudes verglichen, um die relative Verbesserung ermitteln zu können. Die prozentuale Verbesserung wird mit Punkten bewertet. Ökobilanz-Indikatoren sind gemäß DIN EN 15897 zu berechnen Folgendes muss in die Berechnung der Quartiersökobilanz eingerechnet werden: - Betrachtungszeitraum (50 Jahre) - Gebäude: Emissionen aus Herstellung, Nutzung (Energie und Wasser) und Instandsetzung des Gebäudes - Versiegelte Fläche/ Verkehrsfläche: wie Gebäude (Energie=Beleuchtung) - Gestaltete Fläche/ Grünfläche: Bodenarbeit, Trinkwasserbedarf der Bewässerung - Infrastruktur/ Medienschließung: wie Gebäude nur ohne Energie und Wasser - Verkehr: Verwehr wird nicht bewertet Gesamt-Istwert Projektgebiet: $LCA_{Q, ges} = LCA_{G, ges} + LCA_{VF, ges} + LCA_{GF, ges} + LCA_{M, ges} / A_{BGF, ges}$ $LCA_{Q, ges}$: Spezifischer Öko.Bilanz-Istwert für das gesamte Projektgebiet (z.B. kg CO₂-Äquivalent) $LCA_{G, ges}$: Spezifischer Ökobilanz-Istwert für Gebäude $LCA_{GF, ges}$: Spezifischer Ökobilanz-Istwert für die versiegelte Fläche/Verkehrsfläche

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
		$LCA_{M, ges}$: Spezifischer Ökobilanz-Istwert für die Infrastruktur/Medienerschließung $A_{BGF, ges}$: Bruttogeschossfläche aller Gebäude (in m ²) (weitere Infos dazu: DGNB\Kriterien Quartiere Stadtquartiere V16\01 SQ-GQ16 ENV1.1 LCA-Emiss 24.3.2016.pdf)
1)	Global Warming Potential, GWP	LCA = Life Cycle Assessment (Ökobilanz) $LCA_{Q, ges} = X * LCA_{Q, REF}$ $LCA_{Q, REF}$ = Referenz zu Ist-Treibhauspotenzial X=1,4 --> 4 Bewertungspunkte (BWP) X=1,0 --> 20 BWP X=0,7 --> 40 BWP
2)	Ozonschichtabbaupotenzial (ODP)	$LCA_{Q, ges} = X * LCA_{Q, REF}$ X=1,4 --> 1,5 BWP X=1,0 --> 7,5 BWP X=0,7 --> 15 BWP
3)	Ozonbildungspotenzial (POCP)	$LCA_{Q, ges} = X * LCA_{Q, REF}$ X=1,4 --> 1,5 BWP X=1,0 --> 7,5 BWP X=0,7 --> 15 BWP
4)	Versauerungspotenzial (AP)	$LCA_{Q, ges} = X * LCA_{Q, REF}$ X=1,4 --> 1,5 BWP X=1,0 --> 7,5 BWP X=0,7 --> 15 BWP
5)	Überdüngungspotenzial	$LCA_{Q, ges} = X * LCA_{Q, REF}$ X=1,4 --> 1,5 BWP X=1,0 --> 7,5 BWP X=0,7 --> 15 BWP

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Stadtklimaindex der Quartiersoberflächen	Thermische Eigenschaften aller Freiflächen, Grünflächen im Endzustand und klimatisch positiv wirkenden Gebäudeoberflächen (z.B. Gründächer) werden je nach klimatischer Bewertung ein Wert zwischen 0 und 2 zugeordnet (Wald = 2 (max. Temperatursenkungsvermögen), Rasen = 1,9, Verkehrsfläche = 0 (kein Temperatursenkungsvermögen)) $SKI_{GES} = ((B_{A1} * SKI_1) + (B_n + SKI_n)) + ((E_1 * SKI_1) + (E_n * SKI_n)) + ((F_n * SKI_n)) / BBL$ SKI = Stadtklimaindex der Quartiersoberflächen B = Basisfläche (alle horizontalen Oberflächen (Frei- und Gebäudedachflächen)) E = Ergänzungsfläche F = Fassadenfläche BBL = Bruttobauland (Basisflächen bilden in der Summe das Bruttobauland) $SKI_{GES} < 0,6 \rightarrow 0$ BWP $SKI_{GES} \geq 1,2 \rightarrow 50$ BWP
	Beeinträchtigung von Kaltluftschneisen	Bewertung von Kaltluftproduktionsflächen und Luftaustauschbeziehungen 0 BWP: Starke Reduktion der Kaltluftproduktionsfläche (z.B. Bebauung von Waldgebieten, Wiesen,... , die im Einzugsbereich von Tälern und Hangeinschnitten, die zur Siedlung führen) 5 BWP: Geringe Reduktion der Kaltluftproduktionsfläche (z.B. Bebauung von Waldgebieten, Wiesen,..., die nicht direkt im Einzugsbereich von zur Siedlung führenden Tälern und Hangeinschnitten liegen) 10 BWP: Keine Reduktion der Kaltluftproduktionsfläche
	Beeinträchtigung von Frischluftschneisen	0 BWP: starke Beeinträchtigung einer Frischluftschneise (z.B. ein Quartier mit hoher Bebauungsdichte (GFZ < 2) und ungünstiger Gebäudeorientierung, das sich in einer natürlichen Frischluftschneise befindet) 5 BWP: geringe Beeinträchtigung einer Frischluftschneise (z.B. ein Quartier mit mäßiger Bebauungsdichte (GFZ= 1,0-2,5), das durch die Orientierung der Gebäude die natürlichen Frischluftbahnen nur gering beeinträchtigt) 10 BWP: keine Beeinträchtigung einer Frischluftschneisen
	Beeinträchtigung der regionalen Durchlüftung	0 BWP: starke Beeinträchtigung 5 BWP: geringe Beeinträchtigung 10 BWP: keine Beeinträchtigung
	Gesamtenergieverbrauch (Pe_{Ges})	Ökobilanz der eingesetzten Materialien und Bauteile wird herangezogen, um die ökologischen Auswirkungen von Konstruktion und Anlagentechnik zu bestimmen

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Anteil erneuerbarer Primärenergie (Anteil Pe_{Ern})	Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtprimärenergiebedarf wird bewertet. Dafür wird der durchschnittliche Anteil der erneuerbaren Primärenergie am Gesamtprimärenergiebedarf des betrachteten Gebäudes mit Werten eines Referenzgebäudes nach EnEV verglichen. Anteil $Pe_{Ern} = Pe_{Ern} / Pe_{Ges}$ (in %) Pe_{Ern} = erneuerbare Primärenergie Pe_{Ges} = Gesamtprimärenergiebedarf
	Integrales Energiekonzept	7 BWP: Energiekonzept ist vorhanden 7 BWP: darin werden vorhandene Potenziale und mögliche Vernetzungen analysiert 6 BWP: Energiebilanzen für Wärme, Kälte und Strom werden erstellt 7 BWP: es werden mindestens drei dezentrale und/oder zentrale Wärmeversorgungsvarianten gegenübergestellt und ökologisch bewertet (Emissionen) 6 BWP: es werden Empfehlungen für die weitere städtebauliche Planung und Festlegung von energetischen Standards gemacht 7 BWP: es werden unterschiedliche Wärmeversorgungsvarianten wirtschaftlich bewertet Bewertungspunkte können addiert werden
	Nutzung von Synergien	Es wird geprüft, ob eine Nutzung von Synergieeffekten in der Energieversorgung des Quartiers möglich ist. Synergieeffekte können z.B. genutzt werden durch Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Nutzung von Abwärme aus Wärmequellen innerhalb oder außerhalb des Quartiers, kombinierte Solarenergienutzung für Warmwasserbereitung und Heizung sowie solare Kühlung 5 BWP: Synergien wurden im Energiekonzept geprüft, es sind aber keine Synergien möglich 20 BWP: Synergien wurden im Energiekonzept geprüft und umgesetzt. Die beschriebenen Maßnahmen machen mindestens 10% des Gesamtbedarfs für Heizung, Brauchwarmwasserbereitung und gegebenenfalls Kühlung aus.
	Modal Split	Hoher Anteil an ÖPNV, Fuß und Rad am Modal Split Anteil an ÖPNV, Fuß, Rad: < 70% --> 5 BWP; > 70% --> 10 BWP
	Innovative Mobilitätselemente	Jeweils 5 BWP für: öffentliche Stromtankstellen, quartiersbezogenes Mobilitätsmanagement, betriebliches Mobilitätsmanagement für mindestens 50% der Betriebe, Shared Space, Autofreie Quartiere (Maximal 15 BWP)
	Car-Sharing	2 BWP --> Car-Sharing-Angebot im Quartier oder direkten Umfeld (150m) vorhanden 3 BWP --> es stehen Elektrofahrzeuge im Quartier oder direkten Umfeld vorhanden BWP können addiert werden

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	ÖPNV-Erschließungsqualität / prozentualer Anteil der Gebäude, die innerhalb von 350 m Luftlinie eine ÖPNV-Haltestelle erreichen können	50-90% --> 6 BWP >90% --> 10 BWP Gleiches gilt für die Erreichbarkeit einer Intermodalen Plattform
	Zugang zum nächstgelegenen Bahnhof mit ÖPNV, zu Fuß oder mit dem Rad	≤ 30 min --> 1 BWP ≤ 20 min --> 2 BWP ≤ 10 min --> 3 BWP Bahnhof/ S-Bahn-Haltepunkt im Quartier --> 5 BWP
	Anzahl der Bus- und Bahnlinien im Quartier bzw. auf den direkt das Quartier begrenzenden Verkehrsflächen	1 --> 2 BWP 2 --> 3 BWP 3 --> 4 BWP ≥ 4 --> 5 BWP
	Takt des ÖPNV	15 bis max. 30 min --> 2 BWP 10 bis max. 15 min --> 5 BWP 6 bis max. 10 BWP --> 8 BWP Max. 5 min --> 10 BWP
	Besondere Maßnahmen zur Förderung des ÖPNV	1 BWP --> Bus überwiegend auf eigener Busspur 3 BWP --> Straßenbahn, Stadtbahn mit besonderem Bahnkörper 5 BWP --> Straßenbahn, Stadtbahn mit unabhängigem Bahnkörper oder Schienenschnellverkehr (S-Bahn) 5 BWP --> für jede weitere Maßnahme BWP können addiert werden (max. 10 BWP)
	Innovative Mobilitätselemente für Rad- und Fußgängerverkehr	5 BWP --> Fahrradverleihsystem 5 BWP --> weiteres innovatives Mobilitätselement BWP können addiert werden
	Radverkehrsinfrastruktur	6 BWP --> Radschnellwege 5 BWP --> Radstationen 4 BWP --> jedes weitere innovative Mobilitätselement für den Radverkehr

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Qualität der Abstellanlagen für Fahrräder	3 BWP für je folgende Maßnahmen: Diebstahl- und Vandalismussicherheit der Stellanlagen, Wetterschutz für mehr als 50% der Stellplätze, Beleuchtung für min. 80% der Stellplätze, Rahmen abschließbar, Stromanschluss für Pedelecs bei mehr als 50% der Abstellanlagen, weitere Maßnahmen BWP können addiert werden
	Fußwegenetz	4 BWP --> das Fußwegenetz deckt maximal 50% der Wegmöglichkeiten ab 8 BWP --> mehr als 80 % der Wegmöglichkeiten 15 BWP --> alle Wegmöglichkeiten Zwischenwerte können interpoliert werden
	kWh/m²a	- Energiebedarf (Gebäudebetrieb), differenziert nach Heizen, Kühlen, Lüftung, Warmwasser, Beleuchtung - Primärenergiebedarf (Gebäudebetrieb), unterteilt in Gesamt-Primärenergiebedarf, Primärenergiebedarf nicht erneuerbar, Primärenergiebedarf erneuerbar differenziert nach Heizen, Kühlung, Lüftung, Warmwasser, Beleuchtung - Exportierte Energie
	Kg CO ₂ -e/m²a	CO ₂ -Emissionen (Gebäudebetrieb) mit Bezugsgrößen Flächen (NRF) und Jahr
	Kg CO ₂ -e/Person*a	CO ₂ -Emissionen (Gebäudebetrieb) mit Bezugsgrößen Gebäudenutzer und Jahr
	Kg CO ₂ -e/m²*a	- CO₂-Emissionen (Konstruktion/eingebundenes CO₂) mit Bezugsgrößen Flächen und Jahr - CO₂-Emissionen (Lebenszyklus) mit Bezugsgrößen Fläche (NRF) und Jahr

Quelle: https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_services/kriterienanforderung/Geheimhaltungserklärung_Kriterien_150112_de.pdf

Tabelle A2-6: DGNB – Ressourcen und Flächen

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude / Quartiere / Gesamtstadt		
	Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP = abiotic depletion potential)	ADP erfasst den Verbrauch und die Knappheit von nicht erneuerbaren Ressourcen (=mineralische Ressourcen bestehend aus ADP _{fossil fuels} = fossile Rohstoffe und ADP _{elements} = restliche Mineralien)

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
		Berechnung von $ADP_{elements}$: da bisher noch keine Referenzwerte existieren sind lediglich die Werte des Ist-Quartiers zu ermitteln. Die Berechnung der Werte folgt derselben Methodik wie der für die anderen Indikatoren (GWP, AP, ODP (s.o.))
	Brachflächenanteil	Je höher der prozentuale Brachflächenanteil am Bruttobaulandes, desto besser ist die Bewertung (Brachfläche = Fläche, die baulich oder verkehrlich genutzt wurde) 0% Brachflächenanteil --> 0 BWP 100% Brachflächenanteil --> 40 BWP Lineare Interpolation ist möglich
	Flächeneinbindung	Prozentualer Anteil der Abgrenzung des Quartiers, der in die bestehende Siedlungsfläche angebunden ist. Grenzt ein Teil des Quartiers an eine natürlich bzw. land- und forstwirtschaftlich genutzte Fläche, gilt dieser Teil der Abgrenzung des Quartiers als nicht eingebunden. Dies gilt auch, wenn das Quartier durch eine Straße, Bahntrasse oder Vergleichbares von einer solchen Fläche getrennt ist. 0% Flächeneinbindung --> 0 BWP 100% Flächeneinbindung --> 40 BWP Lineare Interpolation möglich
	Erschließungseffizienzzahl	Verhältnis des Nettobaulands zum Bruttobauland. Es wird einen Aussage über die grundsätzliche Effizienz der Quartierserschließung unabhängig von der Grundstücksbebauung getroffen $EeZ = NBL \text{ (in m}^2\text{)} / BBL \text{ (in m}^2\text{)}$ EeZ = Erschließungseffizienzzahl NBL = Nettobauland BBL = Bruttobauland $EeZ = 0,3 \rightarrow 5 \text{ BWP}$ $EeZ \geq 0,75 \rightarrow 40 \text{ BWP}$ Lineare Interpolation ist möglich
	Baudichte	Die Baudichte wird neben der Grundflächenzahl (GRZ) vor allem durch die Geschossflächenzahl (GFZ) ausgedrückt. $GFZ = BGF_{DGNB} \text{ (in m}^2\text{)} / NBL \text{ (in m}^2\text{)}$ BGF_{DGNB} = Bruttogeschossfläche nach DGNB NBL = Nettobauland

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
		GFZ = 0,8 --> 5 BWP GFZ ≥ 3,0 --> 60 BWP Lineare Interpolation möglich
	Ressource: Holz	Qualitätsstufe 1 --> 8 CLP: Verwendung von europäischem Holz unterliegt keinen Beschränkungen. Tropische, subtropische und boreale Hölzer aus nicht zertifizierter Herkunft dürfen nicht verwendet werden. Qualitätsstufe 2 --> 15 CLP: mindestens 50% alles verbauten Holzes stammt aus nachhaltiger Forstwirtschaft. Für europäische Hölzer: PEFC oder FSC-Zertifizierung Qualitätsstufe 3 --> 25 CLP: wie Stufe 2 nur mindestens 80% BWP gilt für Mehrfamilienhäuser mit bis zu 6 Wohneinheiten Einfamilienhäuser/Doppelhaushälften: Q. 1: 10, Q. 2: 25, Q. 3: 45 20 CLP --> 1 BWP 55 CLP --> 5 BWP 100 CLP --> 10 BWP
	Flächeninanspruchnahme	10 CLP (=Checklistenpunkte) --> für die bauliche Nutzung werden Flächen verwendet, die statistisch bereits der Verkehr- und Siedlungsfläche zugeordnet, jedoch bisher unbebaut waren („Nachverdichtung“) 50 CLP --> für die bauliche Nutzung werden Flächen innerhalb einer vorhandenen Siedlungsstruktur verwendet, die bereits der Kategorie „Gebäudefläche“, „Betriebsfläche“ oder „Verkehrsfläche“ zugeordnet waren 75 CLP --> die baulich zu nutzende Fläche wird überwiegend auf dem Weg des „Flächenrecyclings“ gewonnen, insbesondere durch die (Wieder-) Nutzbarmachung von schwach belasteten Flächen 100 CLP --> die baulich zu nutzende Fläche wird überwiegend auf dem Weg des „Flächenrecyclings“ gewonnen, insbesondere durch die (Wieder-) Nutzbarmachung von hoch belasteten Flächen 10 CLP --> 1 BWP 50 CLP --> 5 BWP 100 CLP --> 10 BWP

Quelle: https://static.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_services/kriterienanforderung/Geheimhaltungserklärung_Kriterien_150112_de.pdf

2000-Watt-Areal

Es werden Siedlungsgebiete ausgezeichnet, die einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und Emissionen für die Erstellung und den Betrieb der Gebäude sowie die standortabhängige Alltagsmobilität nachweisen können

- ▶ Ausprägung „Entwicklung“: wird vergeben, solange nicht mehr als 50% der Gebäudeflächen erstellt und der bestimmungsgemäßen Nutzung übergeben sind
- ▶ Ausprägung „Betrieb“: wird vergeben, wenn bereits mehr als 50% der Gebäudeflächen erstellt und der bestimmungsmässigen Nutzung übergeben sind

Das Zertifikat ist befristet und muss alle zwei (Entwicklung) bzw. vier Jahre (Betrieb) erneuert werden. Ziel: Reduktion der durchschnittlichen Leistung auf 2000 Watt pro Einwohner (17 500 kWh pro Person pro Jahr (8760 Stunden)) und auf 1 t CO₂ pro Einwohner und Jahr.

SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) – Effizienzpfad Energie: bis 2050 soll die Bevölkerung der Schweiz 2/3 weniger Energie verbrauchen als heute, die Emissionen aus Treibhausgasen sollen auf ¼ gesenkt werden. Das Merkblatt „SIA-Effizienzpfad Energie (SIA 2040)“ bilden die Basis für die Umsetzung dieses Etappenziels der 2000-Watt-Gesellschaft im Gebäudebereich. (Dokument nicht kostenfrei zugänglich).

Tabelle A2-7: 2000-Watt-Areal – Energie- und Klimaaspekte

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Gebäude/ Quartiere		
	Lokal oder vor Ort gewonnene Endenergie (Wärme und Elektrizität)	20 von 40 Punkten: Das Potenzial der lokal oder vor Ort gewonnenen erneuerbaren Wärme und selbst genutzten Elektrizität zur Deckung des gesamten Energiebedarfes des Areals wird ausgeschöpft
	Qualität der verwendeten Endenergie	20 von 40 Punkten: Die verwendete Endenergie soll eine hohe ökologische Qualität haben. Die vor Ort gewonnene erneuerbare Energie gilt generell als Endenergie mit hoher ökologischer Qualität. Für zusätzliche in das Areal gelieferte Endenergie ist ein Nachweis der ökologischen Qualität erforderlich. 100% erneuerbar, davon 50% Ökostrom naturemade star oder gleichwertig
	Energie, Klimaschutz und Nachhaltiges Bauen (Gebäude)	35 von 35 Punkte: Im Areal werden Gebäude mit höchsten Gebäudestandards geplant, realisiert und betrieben. Dies betrifft die Gesamtenergieanforderung für die Bereiche Erstellung, Betriebsenergie und Mobilität sowie die weiteren Aspekte des Nachhaltigen Bauens und Betriebens. In der Arealphase Betrieb werden systematisch Betriebsoptimierungen durchgeführt.

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Verkehrswirksame Preisgestaltung	5 von 90 Punkten: Die Preise für die Nutzung der Abstellplätze werden verkehrswirksam im Hinblick auf eine Minimierung der MIV(motorisierter Individualverkehr)-Nutzung ausgestaltet.
	Pkm	Personenkilometer nach Art des Verkehrsmittels
	kWh	Endenergie nach Art des Energieträgers
	Durchschnittliche Leistung der gesamten Primärenergie pro Person in Watt	
	Durchschnittliche Leistung der Primärenergie nicht erneuerbar pro Person in Watt	
	Treibhausgasemissionen in Tonnen pro Person und Jahr	
	Produzierte Endenergie	Dazu gehören Solarwärme, Solarstrom, Wind und Umweltwärme
	Primärenergiefaktor (PEF)	Verhältnis der Primärenergiemenge, die erforderlich ist, um einem Gebäude eine bestimmte Endenergie zuzuführen, zu dieser Endenergiemenge
	Treibhausgasemissions-Koeffizient (THGEK)	Menge der durch den Verbrauch einer bestimmten Menge an Endenergie emittierten Treibhausgasen dividiert durch diese Energiemenge
	Minergie-Standards (www.minergie.ch)	Minergie: - Hauptanforderung Neubau 55kWh/(m²*a) - Zusatzanforderung Heizwärmebedarf nur für Neubau (Gebäudehülle) identisch mit MuKE 2014 (Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich) - Zusatzanforderung Endenergiebedarf ohne PV: 35 kWh/(m²*a) für Neubau und 60 kWh/(m²*a) für Sanierungen - Eigenstromproduktion mindestens gemäß MuKE 2014 (10 W/m² EBF (=Energiebezugsfläche)) - Kontrollierte Lüfterneuerung und Sommerlicher Wärmeschutz - Neubauten ohne fossile Brennstoffe - Luftdichtheitskonzept erforderlich, ohne Messung

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
		- Energie-Monitoring für Gebäude grösser 2000 m² EBF erforderlich Minergie-P (Niedrigstenergie-Bauten) - Hauptanforderung Neubau 50kWh/(m²+a) - Zusatzanforderung Heizwärmebedarf (Gebäudehülle): 70% MuKEn 2014 im Neubau, 90% bei Erneuerungen - Zusatzanforderung Endenergiebedarf ohne PV: 35 kWh/(m²*a) im Neubau und 60 kWh/(m²*a) für Sanierungen - Eigenstromproduktion mindestens gemäß MuKEn 2014 (10 W/m² EBF (=Energiebezugsfläche)) - Kontrollierte Lüfterneuerung und Sommerlicher Wärmeschutz - Neubauten ohne fossile Brennstoffe - Luftdichtheit-Messkonzept und Messungen erforderlich - Energie-Monitoring für Gebäude grösser 2000 m² EBF erforderlich Minergie-A (hohe energetische Unabhängigkeit durch Eigenproduktion (PV)) - Hauptanforderung Neubau 35kWh/(m²+a) - Jahresertrag der PV-Anlage muss den Energiebedarf für den Betrieb des Gebäudes abdecken - Zusatzanforderung Heizwärmebedarf Neubau (Gebäudehülle) identisch mit MuKEn 2014 - Zusatzanforderung Endenergiebedarf ohne PV: 35 kWh/(m²*a) für Neubau und 60 kWh/(m²*a) für Sanierungen - Eigenstromproduktion mindestens gemäß MuKEn 2014 (10 W/m² EBF (=Energiebezugsfläche)) - Kontrollierte Lüfterneuerung und Sommerlicher Wärmeschutz - Neubauten ohne fossile Brennstoffe - Luftdichtheits-Messkonzept und Messungen erforderlich - Energie-Monitoring bei allen Gebäudegrößen erforderlich
	Flächenbedarf pro Person	Für Wohnen, Büro, Schule

Quellen:

<https://www.local-energy.swiss/dam/jcr:0961b858-3f14-4d86-a8a8-020664ce9935/2000-Watt-Gesellschaft-Synthesepapier.pdf>

Kurzfassung Kriterienkatalog: https://www.2000watt.swiss/dam/jcr:fe4fc124-4a15-4a13-8533-4fac2fa7270e/Kriterienkatalog_DE.pdf

INFO: ausführlicher Kriterienkatalog (umfasst Bewertungshilfen mit detaillierten Vorgaben für die Bewertung aller Aspekte) sollte (laut Handbuch

https://www.2000watt.swiss/dam/jcr:01ddd541-ce14-48a6-ac40-01479958e950/2000WA_Handbuch.pdf) hier zu finden sein <https://www.local-energy.swiss/programme/2000-watt-gesellschaft/#/>, was allerdings nicht der Fall ist.

https://www.2000watt.swiss/dam/jcr:bbf933ce-dd9d-4631-bd29-2578321aa15b/Monitoring_Standard_2017_V1_0_170701.pdf

https://www.2000watt.swiss/dam/jcr:dcdcfbcf-c9e2-46dd-894a-2fe66087fbd8/Bilanzierungskonzept_2000-Watt-Gesellschaft.pdf

Energie +

- Bewertung der Gebäude als Einzelnes, wenn diese weder thermisch noch elektronisch miteinander verbunden sind; Bilanzgrenze ist Grundstücksgrenze
- Bewertung von Gebäude als Verbund, wenn diese über eine gemeinsame Wärme- und Elektroversorgung verfügen; Bilanzgrenze ist Siedlungsgrenze

Tabelle A2-8: Energie + – Energie- und Klimaaspekte

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
Einzelgebäude		
Quartiere		
	Energie + - Effizienzklasse A	<50 kWh/(m²a) Endenergie und <50 kWh/(m²a) Primärenergie
	Energie + - Effizienzklasse B	<75 kWh/(m²a) Endenergie und <75 kWh/(m²a) Primärenergie
	Energie + - Effizienzklasse C	<100 kWh/(m²a) Endenergie und <100 kWh/(m²a) Primärenergie
	Energie + - Effizienzklasse D	<125 kWh/(m²a) Endenergie und <125 kWh/(m²a) Primärenergie
	Energie + - Effizienzklasse E	<150 kWh/(m²a) Endenergie und <150 kWh/(m²a) Primärenergie
	Energie + - Effizienzklasse F	<175 kWh/(m²a) Endenergie und <175 kWh/(m²a) Primärenergie
	Energie + - Effizienzklasse G	<200 kWh/(m²a) Endenergie und <200 kWh/(m²a) Primärenergie
	Energie + - Effizienzklasse H	≥ 200 kWh/(m²a) Endenergie und ≥ 200 kWh/(m²a) Primärenergie
	Primärenergiefaktor e_p	Verhältnis von Endenergie zu Primärenergie $e_p > 1$ --> elektrische Energie aus dem öffentlichen Versorgernetz und fossile Brennstoffe $e_p < 1$ --> erneuerbare Energieträger

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Energie+ - Effizienzhaus A ⁺	< 0 kWh/(m²a) Endenergie und <0 kWh/(m²a) Primärenergie Nullenergiehäuser stellen die Grenze zwischen A und A ⁺ Plusenergiehaus muss endenergetisch A ⁺
	Energie+ - Effizienzhaus A ⁺⁺	< -50 kWh/(m²a) Endenergie und <-50 kWh/(m²a) Primärenergie Als A ⁺⁺ eingestuft, wenn die eingespeisten Energieüberschüsse über den Energiebezug für den Gebäudebetrieb hinaus noch zusätzlich die Graue Energie des Gebäudes ausgleicht
	Bilanzierung und Bewertung Gebäudebetrieb A-H	Bilanzieller Überschuss nicht möglich, weil elektrische und thermische Energieabgabe (die selbst genutzt wird oder in öffentliche Netze eingespeist wird) nicht berücksichtigt wird
	KfW-Effizienzhaus	Bsp. Effizienzhaus 70 darf rechnerisch maximal 70% des Primärenergiebedarfs eines Neubaus nach Referenzgebäudevorgabe (nach EnEV) benötigen
	Effizienzhaus +	= Energieabgabe/Energiebezug Als Referenzwert gilt nicht das Referenzgebäude nach EnEV, sondern der gemessene Energiebezug für den Gebäudebetrieb Plusenergiehäuser müssen einen Wert >100 erreichen
	Elektrischer Eigendeckungsgrad	= (Elektrische Erzeugung – Elektrische Energieabgabe - Elektromobilität) / Elektrischer Energiebedarf Gebäudebetrieb Der Eigendeckungsgrad gibt an, welcher Anteil des elektrischen Energiebedarfs für den Gebäudebetrieb von der elektrischen Eigenerzeugung gedeckt wird. Je höher der Wert desto besser!
	Elektrischer Eigennutzungsgrad	= (Elektrische Erzeugung – Elektrische Energieabgabe) / Elektrische Erzeugung Der Eigennutzungsgrad gibt an, wie viel Prozent der eigenerzeugten elektrischen Energie innerhalb des Konzeptes verbraucht wurde Je höher der Wert desto besser!
	Anteil regenerative Energie an der Energiebereitstellung	
	Emissionsgrad	

	Kennzahl	Beschreibung/Anmerkung
	Elektrischer Autarkiegrad	Wie viel Zeit innerhalb eines Jahres kommt ein Energie+ - Konzept ohne elektrische Fremdversorgung aus dem öffentlichen Versorgungsnetz aus? (Bsp. 3 Monate im Jahr entsprechen einem elektrischen Autarkiegrad von 25%) Allerdings hoher messtechnischer Aufwand für die Erfassung
	Netzbeeinflussungsgrad	Wie sehr wird das öffentliche Netz durch Einspeise- und Bezugsspitzen des Energie+ - Versorgungskonzeptes beeinflusst?

Quelle: Stockinger (2016)

A3: Verwendete Annahmen / Datenquellen / Zeitreihen

A3.1: Überblick über die Kostenentwicklung der in Gebäuden und Quartieren eingesetzten Techniken

Die im Folgenden dargestellten Kosten basieren zu einem großen Teil auf Palzer et al. (2018c). Sie sind Grundlage des am Fraunhofer ISE entwickelten Energiesystemmodells REMod-D. Sofern weitere Kosten genutzt wurden ist dies explizit angegeben. Die Kosten beziehen sich auf das Jahr 2016. Diese sind aus Palzer et al. (2018b) und Palzer et al. (2018c) direkt entnommen, für die anderen verwendeten Quellen mit den Baupreisindizes des statistischen Bundesamtes (jeweils bezogen auf das erste Quartal eines Jahres) auf 2016 normiert. Darüber hinaus sind die nach Palzer et al. (2018b) und Palzer et al. (2018c) erwarteten Kosten im Jahr 2050 ausgewiesen. In Tabelle A sind Techniken für/ in Gebäuden und in Tabelle A Techniken für das Energiesystem an sich und Quartiere angegeben. Es ist wichtig zu beachten, dass die dargestellten Kosten Mittelwerte darstellen. Die Bandbreite an Kosten in tatsächlich realisierten Projekten ist zum Teil sehr groß (z.B. Faktor 2 bei Fernwärmenetzen). Auch führen Regionalfaktoren und unterschiedliche lokale Gegebenheiten zu einer Streuung der tatsächlichen Kosten.

Tabelle A3-1: Kosten (Investition, sowie Betrieb und Wartung (O&M; Operation and Maintenance)) und Spezifikationen wichtiger Techniken in Gebäuden

Technik	Kosten	Anmerkungen/ weitere wichtige Parameter
Wärmeschutz Außenwand (energiebedingte Mehrkosten Wärmedämmverbundsystem) ^d	Invest (brutto) [€/m ² _{Bauteil}]: $C = 20,09 \text{ €} + 2,85 \text{ €/cm}_{\text{Dämmstoff}}$	
Wärmeschutz Dach (energiebedingte Mehrkosten Steildach ohne Dachgauben) ^d	Invest (brutto) [€/m ² _{Bauteil}]: $C = 11,49 \text{ €} + 2,41 \text{ €/cm}_{\text{Dämmstoff}}$	
Wärmeschutz Dach (energiebedingte Mehrkosten Flachdach) ^d	Invest (brutto) [€/m ² _{Bauteil}]: $C = 13,16 \text{ €} + 2,95 \text{ €/cm}_{\text{Dämmstoff}}$	
Wärmeschutz Fußboden/ Kellerdecke (energiebedingte Mehrkosten unterseitige Dämmung ohne Bekleidung) ^d	Invest (brutto) [€/m ² _{Bauteil}]: $C = 31,24 \text{ €} + 1,27 \text{ €/cm}_{\text{Dämmstoff}}$	
Fenster (energiebedingte Mehrkosten gegenüber 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung(2-WSV)) ^d	Invest (brutto) [€/m ² _{Bauteil}]* [*] : Passivhaustaugliche Fenster: $C = 249,22 \text{ €/m}^2_{\text{Bauteil}} \cdot x^{-0,304}$ m ² /Stück 3-WSV: $C = 59,78 \text{ €/m}^2_{\text{Bauteil}} \cdot x^{-0,163}$ m ² /Stück	
Absenkung VL-Temperatur in Bestandsgebäuden (z.B. durch Fußbodenheizung) ^c	Invest [€/m ² _{WFL}]: 2016: 60 2050: 60	Lebensdauer: 50 a O&M: 1,5% _{Invest} /a
Wärmepumpe Erdreich ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 1.511 2050: 1.232	Lebensdauer: 20 a O&M: 3,5 % _{Invest} /a
Wärmepumpe Luft ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 1.172 2050: 956	Lebensdauer: 20 a O&M: 4 % _{Invest} /a

Technik	Kosten	Anmerkungen/ weitere wichtige Parameter
Wärmepumpe Hybrid (el. Luft-WP + Gaskessel) ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 1.258 2050: 1.020	Lebensdauer: 20 a O&M: 3 % _{Invest} /a
Solarthermie ^c	Invest [€/m ²]: 2016: 1.176 2050: 400	Lebensdauer: 30 a O&M: 1,3 % _{Invest} /a
Biomassekessel (Pellets) ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 776 2050: 631	Lebensdauer: 20 a O&M: 3 % _{Invest} /a
Gaskessel ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 155 2050: 155	Lebensdauer: 20 a O&M: 2 % _{Invest} /a
Gaswärmepumpe ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 1.881 2050: 800	Lebensdauer: 20 a O&M: 2 % _{Invest} /a
BHKW (<100 kW _{el})	Invest [€/kW _{el}]: 2016: 1.700 2050: 1.424	Lebensdauer: 20 a O&M: 3 % _{Invest} /a
Fernwärme-Hausanschluss ^d	Invest (brutto) [€/2016/m ² _{WFL}]: $C = 567,68 \cdot A_{WFL}^{-0,614}$	Lebensdauer ^f : 30 a O&M ^e : 3 % _{Invest} /a

Quelle: (Palzer et al. 2018a)a, Herkel (2017)b, Palzer et al. (2018c)c, Hinz (2015)d, Bürger et al. (2017b)e, VDI 2067 Blatt 1f

** : Die Kostenfunktionen beschreiben die Kosten eines Fensters in Abhängigkeit der Fenstergröße (in m²). In den Funktionen wird der Tatsache Rechnung getragen, dass kleiner werdende Fenster bezogen auf ihre Fläche teurer sind, als großflächige Fenster.

Tabelle A3-2: Kosten (Investition, O&M) und Spezifikationen weiterer wichtiger Techniken in Quartieren und für die Energiewende

Technik	Kosten	Anmerkungen/ weitere wichtige Parameter
Energiemanagementsystem	EZFH ^g : Ca. 3.300 € MFH/ große Geb. und Quartiere: 1 – 2 % der Gesamtinvestitionen (Gebäude) ^g	stark abhängig von Umfang der erfassten Energieflüsse und damit der Anzahl der Sensoren Gesamtlösung für Gebäude- und Quartiersautomation
Wärmenetz ^b	Invest [€/m]: 450-900 €/m Nur Rohre (gedämmt) und Verlegung: DN20: 180-300 €/m DN140: 400-650 €/m	Lebensdauer ^c : 40 a O&M ^c : 1 % _{Invest}
Wärmespeicher Wärmenetze ^{a,c}	Invest [€/m ³]: 2016: 163	Lebensdauer: 40 a O&M: 1 % _{Invest}

Technik	Kosten	Anmerkungen/ weitere wichtige Parameter
	2050: 120	
Gasnetz ^c	Invest [€/kW]: 2016: 28 2050: 28	Lebensdauer: 30 a O&M: 3 % _{Invest}
Groß-WP (el. Wasser/Wasser) ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 736 2050: 625	Lebensdauer: 20 a O&M: 3,5 % _{Invest}
Solarthermie-Kollektorfeld ^{a,c}	Invest [€/m ²]: 2016: 669 2050: 290	Lebensdauer: 30 a O&M: 1,4 % _{Invest}
Hackschnitzel-HW (Biomassekessel Industrie) ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 280 2050: 280	Lebensdauer: 20 a O&M: 3 % _{Invest}
KWK zentral (Fernwärme) ^{a,c}	Invest [€/kW _{el}]: 2016: 816 2050: 736	Lebensdauer: 22 a Leistung: 125 MW _{el} El. Wirkungsgrad: 37% Th. Wirkungsgrad: 47% O&M: 3 % _{Invest}
Tiefe Geothermie (Fernwärme) ^c	Invest [€/kW _{th}]: 2016: 3.664 2050: 3.146	Lebensdauer: 22 a O&M: 3,7 % _{Invest}
Onshore Windenergieanlage ^c	Invest [€/kW _{el}]: 2016: 1.295 2050: 1.035	Lebensdauer: 23,2 – 26,4 a Volllaststunden: 2.000-2.500 O&M: 3 % _{Invest}
PV ^c	Invest [€/kW _{el}]: 2016: 1.124 2050: 571	Lebensdauer: 25 a Volllaststunden: 915-1.100 O&M: 2 % _{Invest}
Stationäre Batterie ^c	Invest [€/kWh _{el}]: 2016: 1.055 2050: 200	Lebensdauer: 15 a Wirkungsgrad: 85% O&M: 1 % _{Invest}
Ladeinfrastruktur Batteriefahrzeuge (PKW) ^c	Invest [€/Ladesäule]: 2016: 1.440 2050: 1.005	Lebensdauer: 30 a O&M: 1,6 % _{Invest}

Quelle: (Palzer et al. 2018a)^a, Herkel (2017)^b, Palzer et al. (2018b)^c, Hinz (2015)^d, Bürger et al. (2017b)^e, VDI 2067 Blatt 1^f, (Oliva et al. 2018,, ,)^g

A3.2: Preisannahmen

Tabelle A3-3: Energiepreisentwicklung

Energie	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Erdgas	6,35	6,51	6,70	6,85	6,92	6,99	7,06
Fernwärme	7,11	7,26	7,43	7,57	7,63	7,69	7,76
Holz	4,68	4,98	5,22	5,33	5,43	5,52	5,62
Strom sonst	28,82	29,69	28,88	26,29	25,63	25,13	24,82
Strom WP	17,29	17,82	17,33	15,77	15,38	15,08	14,89

Quelle: Öko-Institut und Fraunhofer ISI (unveröffentlicht)

Tabelle A3-4: Einspeisevergütung und Marktwert PV

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Marktwert [ct/kWh]*	3,97	3,99	3,82	3,59	3,32	3,44	3,60
Einspeisevergütung Anlagen bis 10 kW _{peak} [ct/kWh]*	9,40	6,96	5,15	3,81	2,82	2,09	1,55
Für Rechnungen genutzte Vergütung [ct/kWh]	9,40	6,96	5,15	3,81	3,32	3,44	3,60

Berechnungen basierend auf Enervis (2019) sowie eigenen Annahmen

A3.3: Emissionsfaktoren

Tabelle A3-5: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung in Deutschland nach dem Klimaschutz-szenario - 95%

	2020	2030	2040	2050
CO ₂ [g CO ₂ /kWh]	421,34	234,78	127,80	16,78
CO ₂ inkl. Vorkette [g CO ₂ /kWh]	442,41	246,52	134,19	17,62
CO _{2e} [g CO _{2e} /kWh]	425,56	237,13	129,08	16,95
CO _{2e} inkl. Vorkette [g CO _{2e} /kWh]	446,83	248,99	135,53	17,80

Quelle: Repenning et al. (2015)

Tabelle A3-6: Emissionsfaktoren der Fernwärmeerzeugung in den Quartieren Haslach und Weingartennach dem Klimaschutzszenario -95% und eigenen Annahmen für 2040 und 2050

	2020	2030	2040	2050
CO ₂ [g CO ₂ /kWh]	294	170	85	0
CO ₂ inkl. Vorkette [g CO ₂ /kWh]	309	178	89	0
CO ₂ e [g CO ₂ e/kWh]	297	172	86	0
CO ₂ e inkl. Vorkette [g CO ₂ e/kWh]	312	180	90	0

Quelle: Repenning et al. (2015), GEMIS 4.95, eigene Annahmen für 2040 und 2050

Tabelle A3-7: Emissionsfaktoren für Erdgas

	Alle Jahre
CO ₂ [g CO ₂ /kWh]	198
CO ₂ inkl. Vorkette [g CO ₂ /kWh]	228
CO ₂ e [g CO ₂ e/kWh]	200
CO ₂ e inkl. Vorkette [g CO ₂ e/kWh]	250

Quelle: GEMIS 4.95; UBA/DEHST (Emissionsfaktoren und Kohlenstoffgehalte)

A4: Anhang zu Annahmen bei der EnMS Betrachtung

A4.1: Weitere Parameter

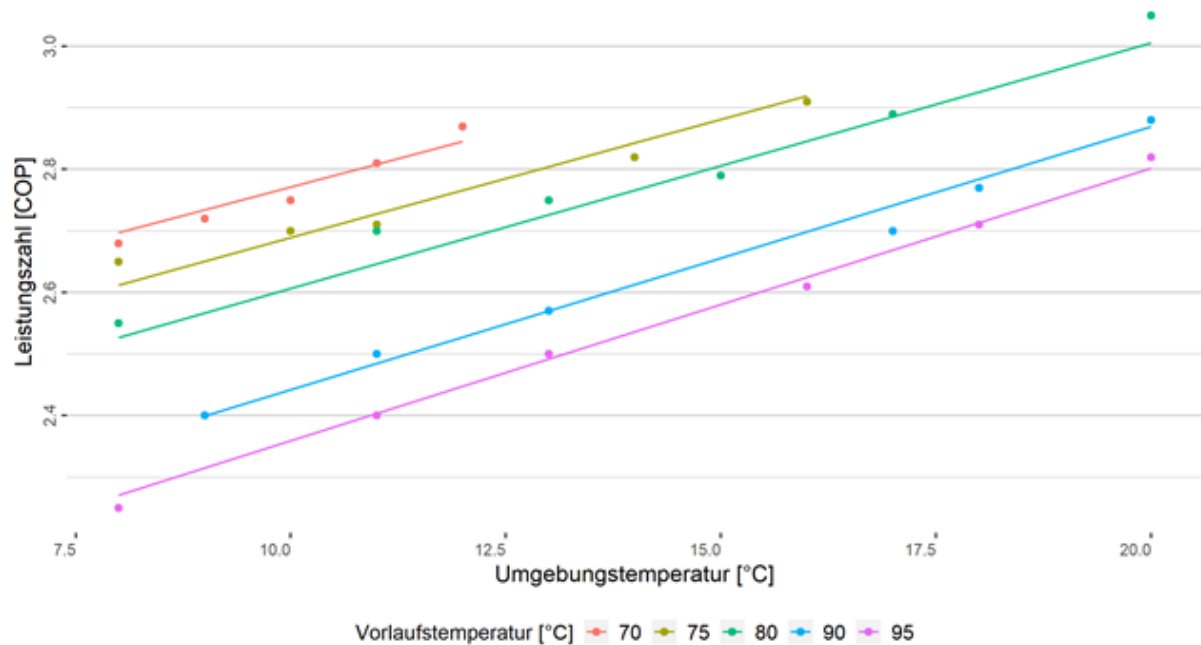
Tabelle A4-1: Installierte konventionelle Erzeugungsleistung aus dem NEP 2025, Grundlage für die Preissimulation der Strombörsenpreise, 2035 wurde angepasst

Konventionelle Erzeugungstypen	Installierte Kapazität 2020 (GW)	Installierte Kapazität 2035 (GW)
Kernenergie	0	0
Braunkohle	12,6	8,85
Steinkohle	21,8	5,12
Erdgas	29,9	42,5
Öl	1,1	0,8
Pumpspeicher	8,6	12,7
Sonstige	3,2	3,1

A4.2: Technikparameter

Abbildung A4-1 zeigt die Abhängigkeit der Leistungszahl (Coefficient of Performance (COP)) von der Vorlauf- und Umgebungstemperatur für eine standardisierte Wärmepumpe.

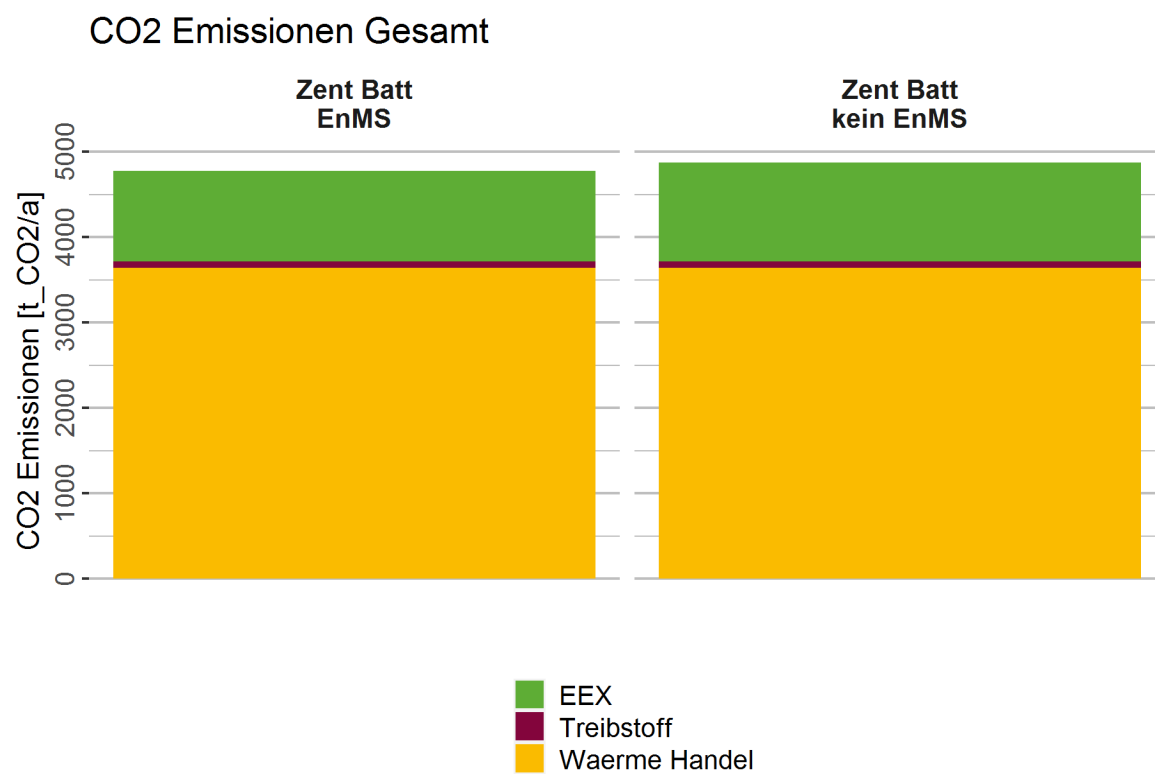
Abbildung A4-1: Leistungsdiagramm Wärmepumpen



Quelle: FHG ISE - Eigene Darstellung

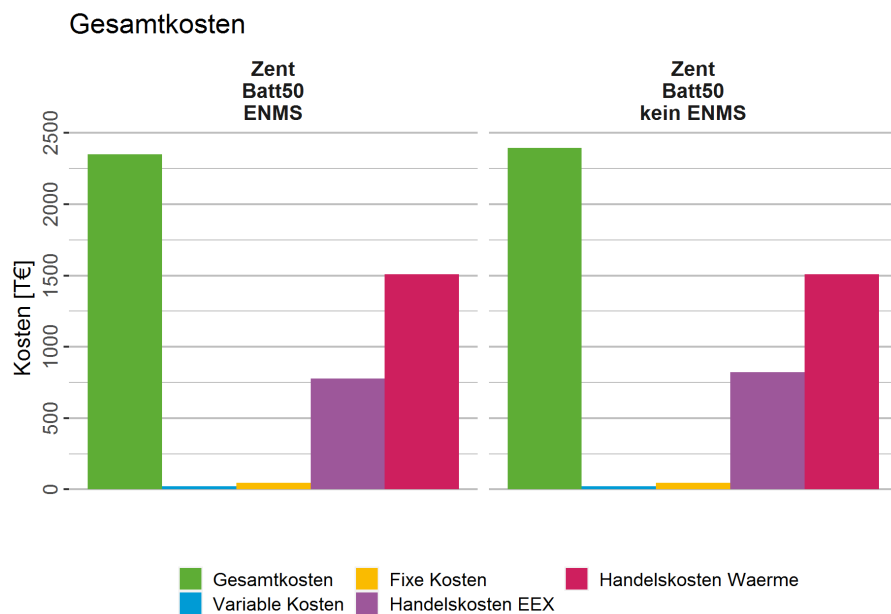
A4.3: EnMS Auswertung Zusatz

Abbildung A4-2: CO2 Emissionen Szenario Zent Batt



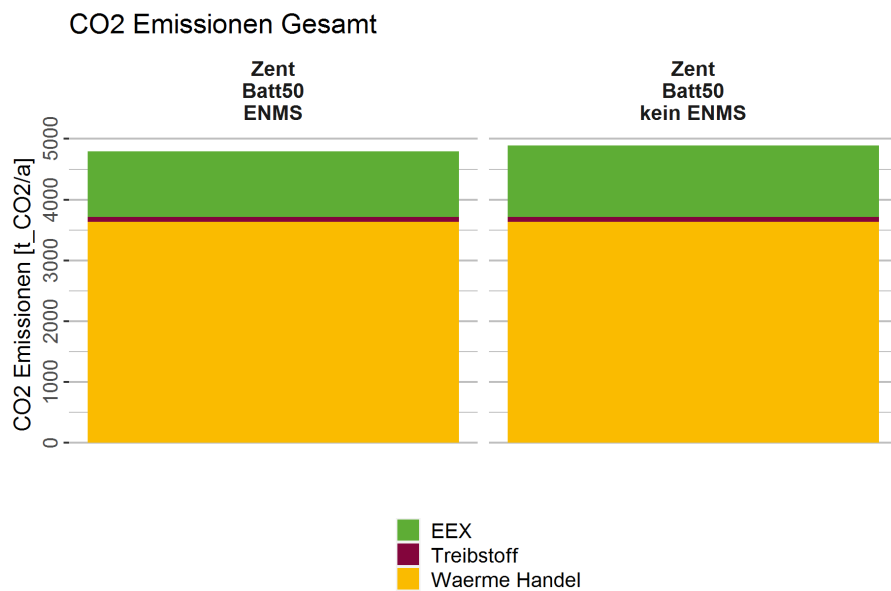
Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung A4-3: Gesamtkosten Szenario Zent_Batt50 mit EnMS und ohne EnMS



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung A4-4: CO2-Emissionen Szenario Zent_Batt50 mit EnMS und ohne EnMS



Quelle: Eigene Berechnung