

CLIMATE CHANGE

06/2016

Klimaneutraler Gebäudebestand 2050

CLIMATE CHANGE 06/2016

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 49 101
UBA-FB 002280

Klimaneutraler Gebäudebestand 2050

von

Dr. Veit Bürger, Dr. Tilman Hesse, Dietlinde Quack
Öko-Institut, Freiburg

Andreas Palzer, Benjamin Köhler, Sebastian Herkel, Dr. Peter Engelmann
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V., Institut für angewandte Ökologie
Merzhauser Str. 173
79100 Freiburg

Abschlussdatum:

November 2015

Redaktion:

Fachgebiet I 2.4 Energieeffizienz
Jens Schuberth

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaneutraler-gebaeudebestand-2050>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Februar 2016

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3713 49 101 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Die Studie untersucht, wie der deutsche Gebäudebestand langfristig bis zum Jahr 2050 in einen nahezu klimaneutralen Zustand überführt werden kann. Auf der Ebene des Einzelgebäudes werden Konzepte aufgezeigt, mit welchen Techniken bis 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden kann und welche Kosten sich mit den verschiedenen Optionen der energetischen Modernisierung aus der einzelwirtschaftlichen Perspektive verbinden. Auf der Ebene des gesamten Gebäudebestands werden verschiedene Zielbilder entwickelt, die darstellen, wie ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand im Jahr 2050 aussehen könnte.

Alle entwickelten Zielbilder erreichen dabei das übergeordnete Ziel, den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf bis zum Jahr 2050 bezogen auf das Ausgangsjahr 2008 um mindestens 80% zu reduzieren. Um einen möglichst breiten Zielkorridor aufzuspannen, unterscheiden sich die Zielbilder jedoch in den beiden zentralen Zieldimensionen, der Reduktion des Endenergiebedarfs sowie der Zusammensetzung des Endenergie trägermixes (v.a. der darin enthaltene EE-Anteil).

Es werden Transformationspfade abgeleitet, die den heutigen Gebäudebestand (Ist-Zustand) in die jeweiligen Zielbilder im Jahr 2050 überführen. Zudem wird untersucht, wie der durch die verschiedenen Zielbilder charakterisierte Gebäudebereich mit dem gesamten Energiesystem interagiert.

Abstract

The study investigates how the German building stock can be transformed into a nearly climate-neutral state by 2050. On the level of the individual building, concepts are developed, that show with which technologies a nearly climate-neutral building stock can be realized and what costs are associated with the different options of energetic renovations from the microeconomic perspective. On the level of the entire building stock, target states are developed, that demonstrate what a nearly climate-neutral building stock could look like.

All developed target states achieve the overall goal of reducing the non-renewable primary energy demand in 2050 by at least 80% with respect to 2008. In order to span a broad target corridor, the target states differ in the two central target dimensions: reduction in final energy demand, and composition of the final energy supply mix (especially the herein contained share of renewable energies).

Transformation pathways are derived, that transform the current building stock (present-day) into the respective target states in 2050. Additionally, the interaction of the building stock, as defined by the different target states, with the energy system as a whole is investigated.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis.....	14
Abkürzungsverzeichnis.....	18
Zusammenfassung	21
Summary	36
1 Einleitung und Ziele des Vorhabens.....	52
2 Definition Klimaneutralität des Gebäudebestands	53
2.1 Bilanzierung.....	53
2.2 Festlegungen im Rahmen der Studie	56
3 Technikentwicklung	60
3.1 Reduktion des Nutzenergiebedarfs	60
3.1.1 Heizwärme	60
3.1.1.1 Wärmedämmung	61
3.1.1.2 Fenster	70
3.1.2 Beleuchtung.....	74
3.1.2.1 Tageslichtnutzung	74
3.1.2.2 Künstliche Beleuchtung	75
3.1.3 Lüftung.....	77
3.2 Verteilung, Speicherung und Übergabe	78
3.2.1 Wärmespeicher	78
3.2.1.1 Dezentrale Wärmespeicher	78
3.2.1.2 Zentrale Wärmespeicher	80
3.2.1.3 Latentwärmespeicher	81
3.2.1.4 Eisspeicher	84
3.2.2 Kältespeicher	84
3.2.3 Übergabesysteme Heizwärme und Kälte.....	84
3.2.4 Trinkwassererwärmung.....	85
3.2.5 Elektrische Speicher	85
3.2.5.1 Blei-Säure-Batterie	85
3.2.5.2 Lithium-Ionen	86
3.2.5.3 Redox-Flow- und Natrium-Schwefel-Batterie	86
3.2.6 Power to Gas (PtG).....	87
3.3 Energiewandlung.....	88

3.3.1	Brennertechniken	88
3.3.1.1	Fossile Energieträger	88
3.3.1.2	Biomassekessel	89
3.3.2	KWK-Techniken	90
3.3.2.1	Biomasse	95
3.3.3	Wärmepumpen	97
3.3.3.1	Wärmepumpen in Wohngebäuden	97
3.3.3.2	Großwärmepumpen	98
3.3.3.3	Gaswärmepumpen	98
3.3.4	Kältebereitstellung und Klimatisierung	99
3.3.4.1	Kompressionskältemaschinen	100
3.3.4.2	Ad- und Absorptionskältemaschinen	101
3.3.4.3	Kontrollierte natürliche Lüftung	102
3.3.5	Umweltwärme	103
3.3.5.1	Solarthermie	103
3.3.5.2	Wärmerückgewinnung/ Abwärmenutzung	104
3.3.6	Regenerative Stromerzeugung	105
3.3.6.1	Photovoltaik	105
3.3.6.2	Kleinwindenergieanlagen	107
4	Entwicklung einer repräsentativen Gebäudetypologie	109
4.1	Wohngebäude	109
4.1.1	Flächen- und Volumenermittlung der betrachteten Gebäudetypen	113
4.2	Nichtwohngebäude	114
4.3	Aufbau der Gebäudetypologie	120
4.3.1	Auswahl der Typgebäude	120
4.3.2	Auswahl der Wärmeschutzstandards	125
4.3.3	Auswahl der Versorgungstechniken	126
4.3.4	Beschreibung der verwendeten Rechentools	129
4.4	Ergebnisse der Berechnung	129
4.4.1	Wohngebäude	129
4.4.2	Nichtwohngebäude	132
4.5	Siedlungs- und Quartiersstrukturen	135
5	Kostenbetrachtungen aus der einzelwirtschaftlichen Perspektive	137
5.1	Methodik und Ergebnisdarstellung	137
5.2	Rahmenparameter	138

5.2.1	Kalkulatorischer Zinssatz	138
5.2.2	Laufzeit.....	139
5.2.3	Soziale Transfers	139
5.2.4	Kostendaten.....	139
5.2.4.1	Investitionskosten	139
5.2.4.2	Wartung/Instandhaltung der Wärmeerzeugungs- und sonstiger Versorgungsanlagen	143
5.2.5	Energiekosten und Energiepreisentwicklung	144
5.3	Ergebnisse der Kostenbetrachtung	147
5.3.1	Wohngebäude	147
5.3.2	Nichtwohngebäude.....	152
6	Entwicklung verschiedener Zielbilder für das Jahr 2050 sowie Ableitung von Transformationspfaden	156
6.1	Herangehensweise	156
6.1.1	Zielsetzung	156
6.1.2	Methodik	156
6.1.3	Darstellung des IST-Zustands	157
6.1.3.1	Wohngebäude	157
6.1.3.2	Nichtwohngebäude	158
6.2	Darstellung der Zielbilder und Transformationspfade	159
6.2.1	Wohngebäude	161
6.2.1.1	Zielbild -70 %	161
6.2.1.2	Zielbild -55%	163
6.2.1.3	Zielbild -40 %	164
6.2.2	Nichtwohngebäude.....	166
6.2.2.1	Zielbild -45 %	166
6.2.2.2	Zielbild -35 %	167
6.2.2.3	Zielbild -25 %	168
6.2.3	Vergleich der Zielbilder und Transformationspfade	169
6.2.3.1	Wohngebäude	169
6.2.3.2	Nichtwohngebäude	178
6.2.3.3	Gesamter Gebäudebereich	184
6.3	Wechselwirkung der Zielbilder 2050 mit dem gesamten Energiesystem.....	188
6.3.1	Das Regenerative Energien Modell Deutschland (REMod-D).....	188
6.3.2	Annahmen und Rahmenparameter	192

6.3.3	Ergebnisse der Gesamtsystemoptimierung.....	194
6.3.3.1	Sanierungsstandards	194
6.3.3.2	Heizungstechniken und Wärmebereitstellung	194
6.3.3.3	Stromerzeugung	197
6.3.3.4	Stromwandlung und Speicherung	200
6.3.3.5	Kostenanalyse	201
6.4	Zusammenfassung der Zielbilder.....	204
7	Politischer Handlungsbedarf.....	208
8	Quellenverzeichnis.....	210
9	Anhang	219
9.1	Energetische Kennwerte Wohngebäude.....	219
9.2	Energetische Kennwerte Nichtwohngebäude	228
9.3	Technische und ökonomische Parameter für die Gesamtsystemmodellierung	248

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bilanzräume gemäß DIN 18599	55
Abbildung 2:	Bilanzgrenze Gebäude.....	55
Abbildung 3:	Schematisches Energieflussbild.....	56
Abbildung 4:	Spezifische Kosten von Warmwasserspeichern in Abhängigkeit von deren Volumen 2011 und 2050	80
Abbildung 5:	Spezifische Kosten von Kombispeichern in Abhängigkeit von deren Volumen 2011 und 2050	80
Abbildung 6:	Spezifische Kosten von Wärmespeichern mit einem Volumen bis 20 m ³ Wasseräquivalent	83
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Zusammenführung und Aufbereitung der Gebäudedaten.....	112
Abbildung 8:	Anpassung des Sanierungsstands 2009 an die Daten des Zensus 2011 unter Berücksichtigung der Sanierungsraten der Jahre 2005 bis 2009.....	113
Abbildung 9:	Anzahl der Wohngebäude mit Mischnutzung und der Nichtwohngebäude in Deutschland	123
Abbildung 10:	Flächenverteilung der Wohngebäude mit Mischnutzung und Nichtwohngebäude in Deutschland (Mio. m ²)	123
Abbildung 11:	Gebäudeanzahl und -flächen in Deutschland*)	125
Abbildung 12:	Endenergiebedarf Heizwärme und TWW mit Brennwertkessel als Versorgungstechnik; bei den Wärmeschutzstandards „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“ jeweils mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, ohne solarthermische Unterstützung	130
Abbildung 13:	Exemplarische Darstellung des spezifischen Primärenergiebedarfs verschiedener Versorgungstechniken für die Sanierungsstufe „unsaniert“, jeweils ohne solarthermische Unterstützung.....	131
Abbildung 14:	Entwicklung des Transmissionswärmeverlusts H_T^t (linke Achse) und Kompaktheit der Gebäudeklassen (rechte Achse) in Abhängigkeit von Baualter und Wärmeschutzstandard	132
Abbildung 15:	Entwicklung der Endverbraucherpreise (netto ohne MWSt) für die wichtigsten Endenergieträger für die thermische Wärmeversorgung in Wohn- und Nichtwohngebäuden	147
Abbildung 16:	Kapitalwerte für ein EZFH in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt	149
Abbildung 17:	Kapitalwerte für ein KMH/MMH in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt	150
Abbildung 18:	Kapitalwerte für ein GMH in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt	151

Abbildung 19:	Kapitalwerte für ein Nichtwohngebäude mit Mischnutzung in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt.....	153
Abbildung 20:	Kapitalwerte für Bildungs-, Büro- und Verwaltungsgebäude in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt.....	154
Abbildung 21:	Kapitalwerte für Gewerbe- und Industriegebäude in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt.....	155
Abbildung 22:	Prozentuale Verteilung der Wohnfläche in 2050 auf die verschiedenen Sanierungsstandards EZFH.....	170
Abbildung 23:	Prozentuale Verteilung der Wohnfläche in 2050 auf die verschiedenen Sanierungsstandards MFH.....	170
Abbildung 24:	Verteilung der Wohnfläche auf die verschiedenen Sanierungsstandards	171
Abbildung 25:	Spezifischer Endenergiebedarf bzw. -verbrauch, bezogen auf A_N , in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude	172
Abbildung 26:	Jährliche Sanierungsraten in den drei Zielbildern der Wohngebäude.....	173
Abbildung 27:	Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude.....	174
Abbildung 28:	Prozentuale Verteilung des Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude	174
Abbildung 29:	Energieträgermix des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude.....	175
Abbildung 30:	Transformationspfade Wohngebäude – Energetische Kennwerte ³⁾	176
Abbildung 31:	Transformationspfade Wohngebäude - Jahreskosten	177
Abbildung 32:	Verteilung der Nettogeschossfläche auf die verschiedenen Sanierungsstandards	178
Abbildung 33:	Spezifischer Endenergiebedarf bzw. -verbrauch, bezogen auf die Nettogeschossfläche in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude	179
Abbildung 34:	Jährliche Sanierungsraten in den drei Zielbildern der Nichtwohngebäude	180
Abbildung 35:	Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude	181

Abbildung 36:	Prozentuale Verteilung des Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude.....	181
Abbildung 37:	Energieträgermix des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude	182
Abbildung 38:	Transformationspfade Nichtwohngebäude – Energetische Kennwerte*).....	183
Abbildung 39:	Transformationspfade Nichtwohngebäude - Jahreskosten	184
Abbildung 40:	Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den drei verschiedenen Zielbildern für den gesamten Gebäudebereich	185
Abbildung 41:	Energieträgermix des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in den drei verschiedenen Zielbildern für den gesamten Gebäudebereich	186
Abbildung 42:	Transformationspfade für den gesamten Gebäudebereich – Energetische Kennwerte*).....	186
Abbildung 43:	Transformationspfade für den gesamten Gebäudebereich – Jahreskosten.....	187
Abbildung 44:	Schema des Energiesystems im Modell REMod-D	190
Abbildung 45:	Schema der exogenen Vorgaben, der Optimierung und der Ergebnisse des Modells REMod-D.....	191
Abbildung 46:	Prozentuale Verteilung der Wärmebereitstellung im Jahr 2050 (bezogen auf den Endenergieverbrauch) im Gebäudesektor in den verschiedenen Szenarien	195
Abbildung 47:	Stromerzeugung im Gesamtenergiesystem in den verschiedenen Szenarien im Jahr 2050	200
Abbildung 48:	Jährliche Kosten des Gebäudesektors bezogen auf das Jahr 2050 unterteilt nach Sanierungskosten und Technikkosten in den verschiedenen Szenarien.....	203
Abbildung 49:	Jährliche Kosten des Gesamtsystems unterteilt nach Kosten des Gebäudesektors und Kosten des restlichen Energiesystems in den verschiedenen Szenarien	204

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Reduktion des nicht-erneuerbaren Anteils der Primärenergie bis 2050 als Funktion der Reduktion des Nutzenergiebedarfs und des Anteils der erneuerbaren Energien am Endenergiebedarf	58
Tabelle 2:	Notwendiger Ausbau von erneuerbaren Energien, um die in Tabelle 1 hinterlegten Reduktionsziele für PE_{NE} zu erreichen.....	59
Tabelle 3:	Technikportfolio 2050	60
Tabelle 4:	Vergleich der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmmaterialien.....	61
Tabelle 5:	Ökobilanzdaten „cradle to gate“ der untersuchten Wärmedämmverbundsysteme und hinterlüfteten Vorhangfassaden.....	69
Tabelle 6:	Vergleich verschiedener Beleuchtungstechniken.....	76
Tabelle 7:	Vor- und Nachteile verschiedener Speicherkonzepte für Solaraktivhäuser.....	79
Tabelle 8:	Vergleich der Speicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit verschiedener Wärme-Speichertypen und -materialien	83
Tabelle 9:	Effizienz von elektrischen und chemischen Speichertechniken (bei Batterien inkl. Umrichter)	87
Tabelle 10:	Spezifische Investitionskosten von Gas-/ Öl-Brennwert- und Biomassekesseln für Wohn- und Nicht-Wohngebäude in Abhängigkeit von der Kesselleistung	89
Tabelle 11:	Thermische Wirkungsgrade (Verhältnis Nutzenergie zu Heizwert) von Brennwertkesseln	89
Tabelle 12:	Überblick über derzeit gängige und nach derzeitigem Stand des Wissens zukünftig relevante KWK-Anlagentypen*)	90
Tabelle 13:	Effizienz und spezifische Investitionskosten von KWK-Techniken in kleinen Wohngebäuden 2050.....	92
Tabelle 14:	Effizienz und spezifische Investitionskosten von KWK-Techniken in Mehrfamilienhäusern 2050	92
Tabelle 15:	Erwartete Effizienz und spezifische Investitionskosten von KWK-Techniken in Nicht-Wohngebäuden 2050	94
Tabelle 16:	Erwartete spezifische Investitionskosten von netzgebundenen KWK-Techniken 2050	95
Tabelle 17:	Effizienz und spezifische Investitionskosten von Biogas- und Pflanzenöl-KWK-Techniken, sowie der Biogaseinspeisung 2050.....	97
Tabelle 18:	Erwartete zukünftige Effizienz verschiedener Wärmepumpen-Techniken zur Nutzung von Umweltwärme	99
Tabelle 19:	Effizienzpotenziale bei der Kältebereitstellung.....	100

Tabelle 20:	Effizienz und Energieeinsparpotenziale von Kältebereitstellungs- und Klimatisierungstechniken und -Strategien	102
Tabelle 21:	Stand der Technik und Entwicklungsziele verschiedener Techniken zur photovoltaischen Stromerzeugung.....	106
Tabelle 22:	Spezifische Investitionskosten erneuerbarer Energien	108
Tabelle 23:	Datengrundlage für die Analyse des Wohngebäudebestands in Deutschland	111
Tabelle 24:	Struktur des Wohngebäudebestands in Deutschland	112
Tabelle 25:	Flächenbestand des GHD-Sektors im Jahr 2008 nach Branchengruppen und Untergruppen.....	115
Tabelle 26:	Anzahl der Gebäude des GHD-Sektors im Jahr 2008 nach Branchengruppen und Untergruppen.....	116
Tabelle 27:	Nichtwohngebäude-Typologie: Einteilung in Nutzungsklassen erster und zweiter Ordnung, Gebäudeanzahl und Flächen	118
Tabelle 28:	Betrachtete Wohngebäude, deren jeweilige Anzahl und zentrale geometrische Eigenschaften*).....	121
Tabelle 29:	U- und g-Werte der Gebäude-Hüllfläche bei den betrachteten Typgebäuden in deren Erbauungszustand*)	122
Tabelle 30:	Zonen und Anteil der Zonen an der gesamten NGF der aggregierten Gebäudetypen.....	124
Tabelle 31:	U- und g-Werte der Hüllflächenelemente bei einer Sanierung nach den Anforderungen der EnEV 2009-25% und in Anlehnung an die Kriterien des Passivhausinstituts (Feist 2013)	126
Tabelle 32:	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Sanierungsgrad	127
Tabelle 33:	Vorauswahl an Heiztechniken für Wohngebäude	127
Tabelle 34:	Vorauswahl Heizungstechniken und weiterer technischer Parameter für NWG.....	128
Tabelle 35:	Bezeichnung/ Nummerierung der Technikkombinationen für die Wärme-, Kälte und on-site Stromerzeugung in Nichtwohngebäuden	128
Tabelle 36:	Bildung, Büro und Verwaltung bis 1983 (NWG2)	134
Tabelle 37:	Raumtypen des einfachen Raumstruktur-Modells	135
Tabelle 38:	Siedlungstypenmodell.....	135
Tabelle 39:	Aggregierte Siedlungstypen.....	136
Tabelle 40:	Siedlungstypen und deren Flächen nach Esch et al. (2011), sowie Gebäudetypen und -anzahlen, angepasst an die Ergebnisse des Zensus 2011.....	136
Tabelle 41:	Technische Lebensdauern verschiedener Bauteile.....	139
Tabelle 42:	Spezifische Investitionskosten.....	141

Tabelle 43:	Lernraten.....	143
Tabelle 44:	Jährlicher Aufwand für Wartung und Instandhaltung	144
Tabelle 45:	Entwicklung der Endverbraucherpreise (netto ohne MWSt) für die wichtigsten Endenergeträger für die thermische Wärmeversorgung in Wohn- und Nichtwohngebäuden (Preisbasis 2012)	146
Tabelle 46:	Referenzgrößen zur Kalibrierung des Ist-Zustands bei Wohngebäuden.....	158
Tabelle 47:	Referenzgrößen zur Kalibrierung des Ist-Zustands bei Nichtwohngebäuden	159
Tabelle 48:	Zentrale Annahmen für die Zielbilder	160
Tabelle 49:	Sockel unsanierbarer Gebäude (bezogen auf die Wohn- bzw. Nutzfläche der unsanierten Gebäude im jeweiligen Ist-Zustand)	161
Tabelle 50:	Verteilung der Wohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -70 % (Bezugsgröße Wohnfläche)	162
Tabelle 51:	Versorgungstechnikmix Wohngebäude im Zielbild -70 %	162
Tabelle 52:	Anteil von Wohngebäuden mit Solarthermie im Zielbild -70 %	163
Tabelle 53:	Verteilung der Wohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -55 % (Bezugsgröße Wohnfläche)	163
Tabelle 54:	Versorgungstechnikmix Wohngebäude im Zielbild -55 %	164
Tabelle 55:	Anteil von Wohngebäuden mit Solarthermie im Zielbild -55 %	164
Tabelle 56:	Verteilung der Wohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -40 % (Bezugsgröße Wohnfläche)	165
Tabelle 57:	Versorgungstechnikmix Wohngebäude im Zielbild -40 %	166
Tabelle 58:	Anteil von Wohngebäuden mit Solarthermie im Zielbild -40 %	166
Tabelle 59:	Verteilung der Nichtwohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -45 % (Bezugsgröße: Nettogeschossfläche).....	167
Tabelle 60:	Versorgungstechnikmix Nichtwohngebäude im Zielbild -45 %.....	167
Tabelle 61:	Verteilung der Nichtwohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -35 % (Bezugsgröße: Nettogeschossfläche).....	168
Tabelle 62:	Versorgungstechnikmix Nichtwohngebäude im Zielbild -35 %.....	168
Tabelle 63:	Verteilung der Nichtwohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -25 % (Bezugsgröße: Nettogeschossfläche).....	169
Tabelle 64:	Versorgungstechnikmix Nichtwohngebäude im Zielbild -25 %.....	169

Tabelle 65:	Reduktion des Endenergiebedarfs bzw. -verbrauchs im Zielbild - 70% der Wohngebäude bezogen auf unterschiedliche Definitionen.....	172
Tabelle 66:	Reduktion des Endenergiebedarfs bzw. -verbrauchs im Zielbild - 45 % der Nichtwohngebäude bezogen auf unterschiedliche Definitionen.....	179
Tabelle 67:	Potenziale Erneuerbarer Energien.....	192
Tabelle 68:	Anteil der jeweiligen Antriebskonzepte am PKW- und LKW- Bestand im Jahr 2050	193
Tabelle 69:	Wesentliche Merkmale der untersuchten Varianten*)	193
Tabelle 70:	Erzeugte regenerative Gasmenge und dafür benötigter Stromeinsatz in Abhängigkeit von Endenergiebedarfsreduktion und eingesetzten Heizungstechniken	201
Tabelle 71:	Technische und wirtschaftliche Annahmen für den Gebäudesektor	248
Tabelle 72:	Weitere technische und wirtschaftliche Annahmen für die Gesamtsystemmodellierung	249

Abkürzungsverzeichnis

AKA	Absorptionskälteanlage
A _N	Gebäudenutzfläche
BAK	Baualtersklasse
BGF	Bruttogrundfläche
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIPV	Gebäudeintegrierte Photovoltaik
BW	Brennwert
BWK	Brennwertkessel
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Coefficient of Performance
CPV	konzentrierende Photovoltaik
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPS	expandiertes Polystyrol
EVG	Elektronisches Vorschaltgerät
EZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
fEE	Fluktuierende erneuerbare Energien
FW	Fernwärme
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GMH	Großes Mehrfamilienhaus
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
GWh	Gigawattstunde
H, h	Stunde
HBCD	Hexabromcyclododecan
Heizöl EL	Heizöl Extra Leicht
H _r '	Transmissionswärmeverlust
JAZ	Jahresarbeitszahl
K	Kelvin
Kg	Kilogramm
klm	Kilolumen
KMH	Kleines Mehrfamilienhaus

kW	Kilowatt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kW _{el}	Kilowatt elektrisch
kW _{th}	Kilowatt thermisch
kWh	Kilowattstunde
KWEA	Kleinwindenergieanlage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
Lm	Lumen
M, m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
MEG	Monoethylenglykol
MFH	Mehrfamilienhaus
MJ	Megajoule
MMH	Mittleres Mehrfamilienhaus
η	Wirkungsgrad
η _{el}	Wirkungsgrad elektrisch
η _{th}	Wirkungsgrad thermisch
NEH	Niedrigenergiehaus
NGF	Nettogrundfläche
NWG	Nichtwohngebäude
OPV	Organische Photovoltaik
P	Leistung
PCE	Photo-Conversion Efficiency
PCM	Phase Change Material
PE	Primärenergie
PEEE	Primärenergie, erneuerbarer Anteil
PENE	Primärenergie, nicht-erneuerbarer Anteil
PEF	Primärenergiefaktor
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
PJ	Petajoule
PtG	Power to Gas
PtH	Power to Heat
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik

PVC	Polyvinylchlorid
REMod-D	Regeneratives Energien Modell – Deutschland
RH	Reihenhaus
RLT	Raumlufttechnische Anlage
SMR	Steuerungs- Mess- und Regeltechnik
SO ₂	Schwefeldioxid
ST	Solarthermie
THG	Treibhausgase
TWD	Transparente Wärmedämmung
TWh	Terrawattstunde
TWW	Trinkwasser warm
UE	Umweltenergie
U _f	U-Wert des Fensters
U _g	U-Wert der Verglasung
V	Volt
VIP	Vakuumisolationspaneelle
VHF	Vorhangfassade
VOC	Volatile Organic Compounds
VPI	Verbraucherpreisindex
W	Watt
WDVS	Wärmedämmverbundsysteme
WE	Wohneinheit
Wfl.	Wohnfläche
WG	Wohngebäude
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
XPS	extrudiertes Polystyrol
ZFH	Zweifamilienhaus

Zusammenfassung

Hinsichtlich der Energiewendeziele kommt dem Gebäudebereich eine wichtige Rolle zu. Entsprechend verfolgt die Bundesregierung das Ziel, bis zum Jahr 2050 einen „nahezu klimaneutralen“ Gebäudebereich zu erreichen. Es wird angestrebt, „*dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt wird*“. Die technische Machbarkeit klimaneutraler Sanierungen und Neubauten wurde im Rahmen zahlreicher Demonstrationsprojekte hinreichend belegt. Es fehlt jedoch an konkreten Visionen, wie der gesamte Bestand an Wohn- und Nichtwohngebäuden im Jahr 2050 energetisch beschaffen sein müsste, um das sektorbezogene Transformationsziel zu erreichen. Dabei geht es u.a. um Fragen nach dem notwendigen Wärmeschutzniveau der Gebäudehülle, dem Energieträger- und Technikmix, über den die thermische Konditionierung der Gebäude erfolgt, sowie die damit einhergehenden Kosten. Ferner geht es um die Frage, wie der Gebäudesektor in seiner Rolle als Energieverbraucher und -erzeuger langfristig mit dem gesamten Energiesystem interagiert.

Das vorliegende Forschungsvorhaben verfolgt das übergeordnete Ziel aufzuzeigen, wie der Gebäudebestand langfristig bis 2050 in einen nahezu klimaneutralen Zustand überführt werden kann. Dazu werden in dem Vorhaben zwei verschiedene Perspektiven eingenommen:

- Auf der Ebene des Einzelgebäudes werden Konzepte entwickelt, mit welchen Techniken bis 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden kann und welche Kosten sich mit den verschiedenen Optionen der energetischen Modernisierung aus der einzelwirtschaftlichen Perspektive verbinden.
- Auf der Ebene des gesamten Gebäudebestands werden verschiedene Zielbilder entwickelt, die darstellen, wie ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand im Jahr 2050 aussehen und wie der heutige Gebäudebestand in die jeweiligen Zielbilder überführt werden könnte (Transformationspfade). Und es wird eine Vorstellung darüber entwickelt, wie die verschiedenen (sektorbezogenen) Zielbilder mit dem gesamten (transformierten) Energiesystem, das die Energiewendeziele erfüllt, interagieren.

Definition Klimaneutralität des Gebäudebestands und Bilanzgrenzen

Die Definition des Begriffes „nahezu klimaneutraler“ Gebäudebestand bietet einigen Spielraum für Interpretationen, die für eine methodisch konsistente Bearbeitung eindeutig definiert werden müssen. Beispielsweise klärt der Begriff „sehr geringer Energiebedarf“ nicht, ob hier der Nutzenergiebedarf, der Endenergiebedarf oder der Primärenergiebedarf des Gebäudes gemeint ist. Auch wird nicht quantifiziert, was unter „gering“ zu verstehen ist.

Im Rahmen dieser Studie liegt ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand dann vor,

- wenn der nicht erneuerbare Anteil des Primärenergiebedarfs (PE_{NE}) für die Raumkonditionierung um 80 % gegenüber dem Referenzjahr 2008 reduziert und
- der verbleibende, sehr geringe Endenergiebedarf überwiegend, also zu mehr als 50 % aus erneuerbaren Quellen gedeckt wird.

Bezugsgröße ist jeweils der gesamte Gebäudebestand in den Sektoren Privathaushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie im Jahr 2050.

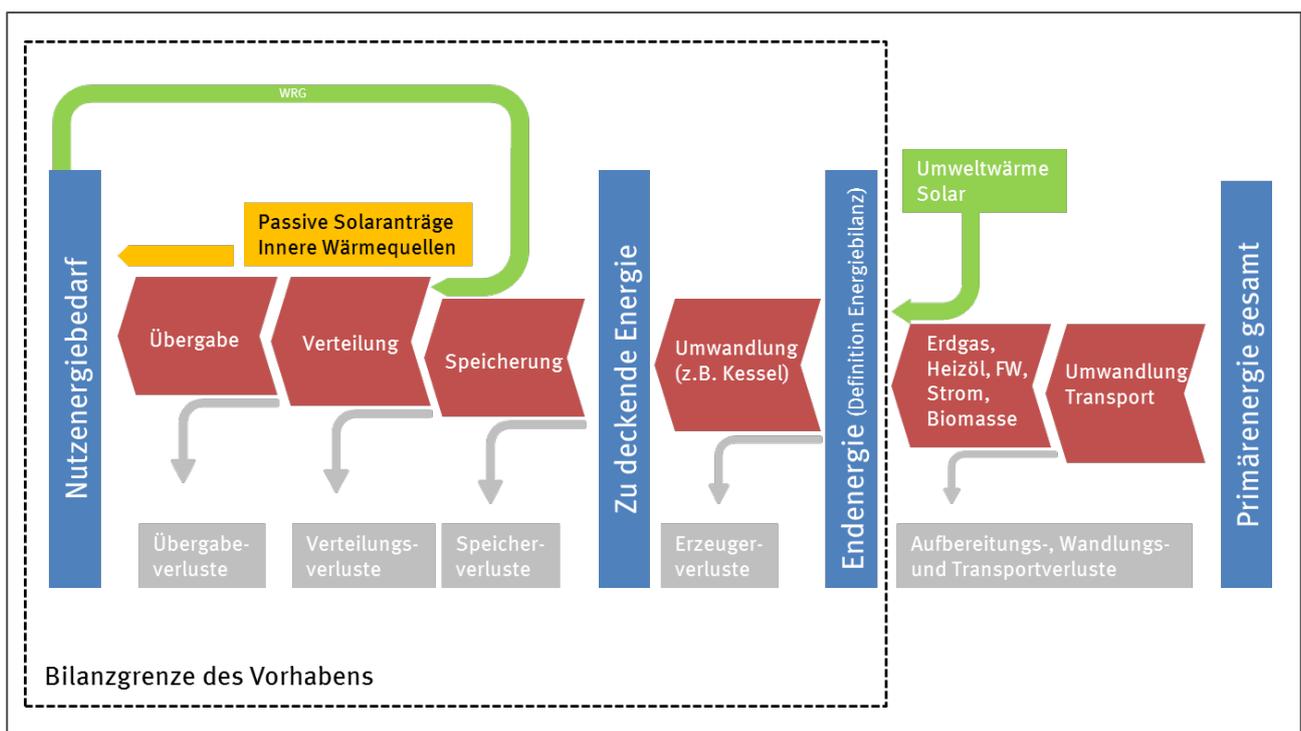
Im Rahmen der Bilanzierung werden alle Primärenergieflüsse, die zur Raumkonditionierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Bereich der Privathaushalte und des GHD- und Industriesektors verwendet werden, erfasst. Dies umfasst für beide Gebäudesegmente den Primärenergieaufwand, der zur Deckung der Nutzenergie für Wärme, Kälte, Be- und Entfeuchtung, Luftförderung und Hilfsener-

gie für die Wärmebereitstellung notwendig ist. Für Nichtwohngebäude wird zusätzlich die Beleuchtung bilanziert. Die Berechnung des Primärenergiebedarfs erfolgt damit analog dem Vorgehen nach der Energieeinsparverordnung (EnEV). Der Nutz- und Endenergiebedarf wird bei Nichtwohngebäuden entsprechend der Bilanzgrenzen der DIN V 18599:2011 und bei Wohngebäuden der DIN 4108-6:2003-06, bzw. DIN EN 832 in Verbindung mit DIN V 4701-10:2003-08 bilanziert.

Der Endenergiebedarf kann anhand zwei verschiedener Definitionen, nämlich nach den Regeln der Energiebilanz (Energiestatistik) oder nach der EnEV berechnet werden. Wird der Endenergiebedarf nach den Vorgaben der EnEV ermittelt, werden die Umweltenergien (im Wesentlichen solare Strahlungsenergie, Umgebungswärme), die in einem unmittelbaren räumlichen Zusammenhang zum Gebäude gewonnen werden, gleich null gesetzt. Sie wirken damit wie eine Effizienzmaßnahme, die den Endenergiebedarf reduziert. Demgegenüber bilanziert die Energiebilanz die gesamte dem Gebäude zugeführte Energie. Solarthermische Wärme sowie Umgebungswärme, die mittels einer Wärmepumpe nutzbar gemacht wird, werden demnach auf den Endenergiebedarf angerechnet. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wird die Endenergie nach den Regeln der Energiebilanz berechnet. Ausnahme bilden Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG), die wie eine Effizienztechnik, die den Endenergiebedarf reduziert, behandelt werden.

Abbildung I zeigt das schematische Energieflussbild, das der Bilanzierung zugrunde liegt.

Abbildung I: Schematisches Energieflussbild



Quelle: Eigene Darstellung

Entwicklung einer repräsentativen Gebäudetypologie

Im Rahmen des Projekts werden 19 den gesamten Gebäudebestand repräsentierende Gebäudetypen – neun Wohn- und zehn Nichtwohngebäude – betrachtet.

- Die Wohngebäude werden nach drei Größen und drei Baualtersklassen, in denen sich die energetischen Eigenschaften der Gebäude im Erbauungszustand besonders stark unterscheiden, unterteilt. Die neun Gebäudetypen sind dabei Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH), klei-

ne und mittlere Mehrfamilienhäuser (KMH/MMH) sowie große Mehrfamilienhäuser (GMH), jeweils in den Baualtersklassen „bis 1948“, „1949 – 1994“ und „ab 1995“.

- Bei den Nichtwohngebäuden (NWG) hat neben der Kubatur und den energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle auch die Gebäudenutzung entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch der Gebäude. Unterschieden werden sechs Nutzungstypen, wovon vier in jeweils zwei Baualtersklassen (bis 1983, ab 1984) unterteilt sind. Die sechs Nutzungstypen sind (I) Wohngebäude mit Mischnutzung, (II) Bildung, Büro und Verwaltung, (III) Gewerbe, Industrie, (IV) Handel-/ Dienstleistung, Praxisgebäude, (V) Beherbergung, Gastronomie, Kliniken, (VI) Sonstige (Sport, Kultur).

Für die Beschreibung des zukünftig zu erwartenden Wärmebedarfs des Gebäudebestands werden drei Wärmeschutzstandards betrachtet:

1. unsanierte Gebäude
2. Sanierung nach den Standards der EnEV 2009 für Neubauten, allerdings verschärft um 25 % (EnEV₂₀₀₉ -25%) (vollsaniert)
3. Sanierung entsprechend den Anforderungen an ein Passivhaus (vollsaniert plus).

Die energetischen Standards von Neubauten werden dabei analog zu den Sanierungsstandards betrachtet. Die Beschränkung auf nur drei Gebäudestandards ist mit der Begrenzung der zu betrachtenden Varianten begründet. Selbst bei der Beschränkung auf drei Wärmeschutzstandards ergeben sich mit den nachfolgend beschriebenen Versorgungstechniken alleine bei den Wohngebäuden über 300 zu betrachtende Varianten.

Für die zukünftige Wärmebereitstellung in Wohngebäuden werden fünf Basis-Versorgungsvarianten betrachtet. Dies sind

1. Gas-Brennwertkessel (BWK)
2. Holz-/ Biomasse-BWK
3. elektrische Wärmepumpen (WP)
4. erdgasbetriebene Kraft-Wärmekopplungsanlagen (BHKW)
5. Fernwärme

Alle Versorgungsoptionen werden in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit und ohne Wärmerückgewinnung (WRG) sowie als Variante mit und ohne Solarthermie (ST) -Nutzung betrachtet. Die solarthermischen Anlagen werden als reine Brauchwasseranlagen ausgelegt. Gebäude, die mit einem BHKW versorgt werden, werden ausschließlich ohne eine zusätzliche Solarthermieanlage betrachtet. Bei Gebäuden, die auf den Standard „vollsaniert plus“ saniert werden, wird immer eine Wärmerückgewinnung eingesetzt.

In Nichtwohngebäuden werden vier Techniken zur Wärmebereitstellung betrachtet:

1. Gas-Brennwertkessel
2. elektrische, reversible Wärmepumpe
3. erdgasbetriebene Kraft-Wärmekopplungsanlage (KWK-Anlagen)
4. Fernwärme

In den Nichtwohngebäuden werden alle betrachteten Technikvarianten mit und ohne eine Photovoltaikanlage zur Eigenstromerzeugung betrachtet. Da gemäß der DIN V 18599 in der aktuell gültigen Fassung bei Nichtwohngebäuden neben der Wärmebereitstellung auch die Bereitstellung von Kälte, die Lüftung sowie die Beleuchtung bilanziert werden müssen, werden für die Energieanwendungsbereiche ebenfalls Setzungen vorgenommen, für die Kälteproduktion z.B. Absorptionskältemaschinen.

Kostenbetrachtungen aus der einzelwirtschaftlichen Perspektive

Für die Abschätzung der Kosteneffizienz verschiedener energetischer Standards bzw. technischer Versorgungsoptionen werden für die verschiedenen Typgebäude für verschiedene Ausgestaltungsvarianten im Rahmen einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung die jeweiligen Gesamtkosten ermittelt. Diese erfassen vor allem die mit dem jeweiligen Zustand verbundenen Investitionskosten (z.B. die Kosten einer energetischen Modernisierung) sowie die vom jeweiligen Wärmeschutzstandard sowie der gewählten Versorgungsoption abhängigen bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten (insbesondere Energiekosten, Kosten für Wartung und Instandhaltung). Bei den Investitionskosten für die Gebäudehülle wird zwischen den Ohnehin-Kosten sowie den energetischen Mehrkosten unterschieden. Dargestellt werden die Vollkosten. Die Kostenrechnung erfolgt auf der Preisbasis 2012.

Die Kostenberechnung erfolgt aus der Perspektive eines Gebäudeeigentümers, also in erster Linie aus einzelwirtschaftlicher Perspektive. Einige Parameter (z.B. zu den ökonomischen Wirkungen von Förderprogrammen) werden jedoch so gewählt, dass sie von einer rein betriebswirtschaftlichen Sichtweise abweichen. Beispielsweise bleibt bei energetischen Modernisierungsmaßnahmen, für die prinzipiell eine Förderung beansprucht werden könnte, bei der Kostenrechnung die Förderung unberücksichtigt, obgleich sie aus der Perspektive des betroffenen Hauseigentümers eine maßgebliche Größe zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist.

Berechnet werden Kapitalwerte in Abhängigkeit von

- der gewählten Kombination aus Wärmeschutzstandard und Versorgungstechnik,
- dem Zeitpunkt, zu dem das Typgebäude in den betrachteten Zustand versetzt wird und
- für drei verschiedene Energiepreisszenarien.

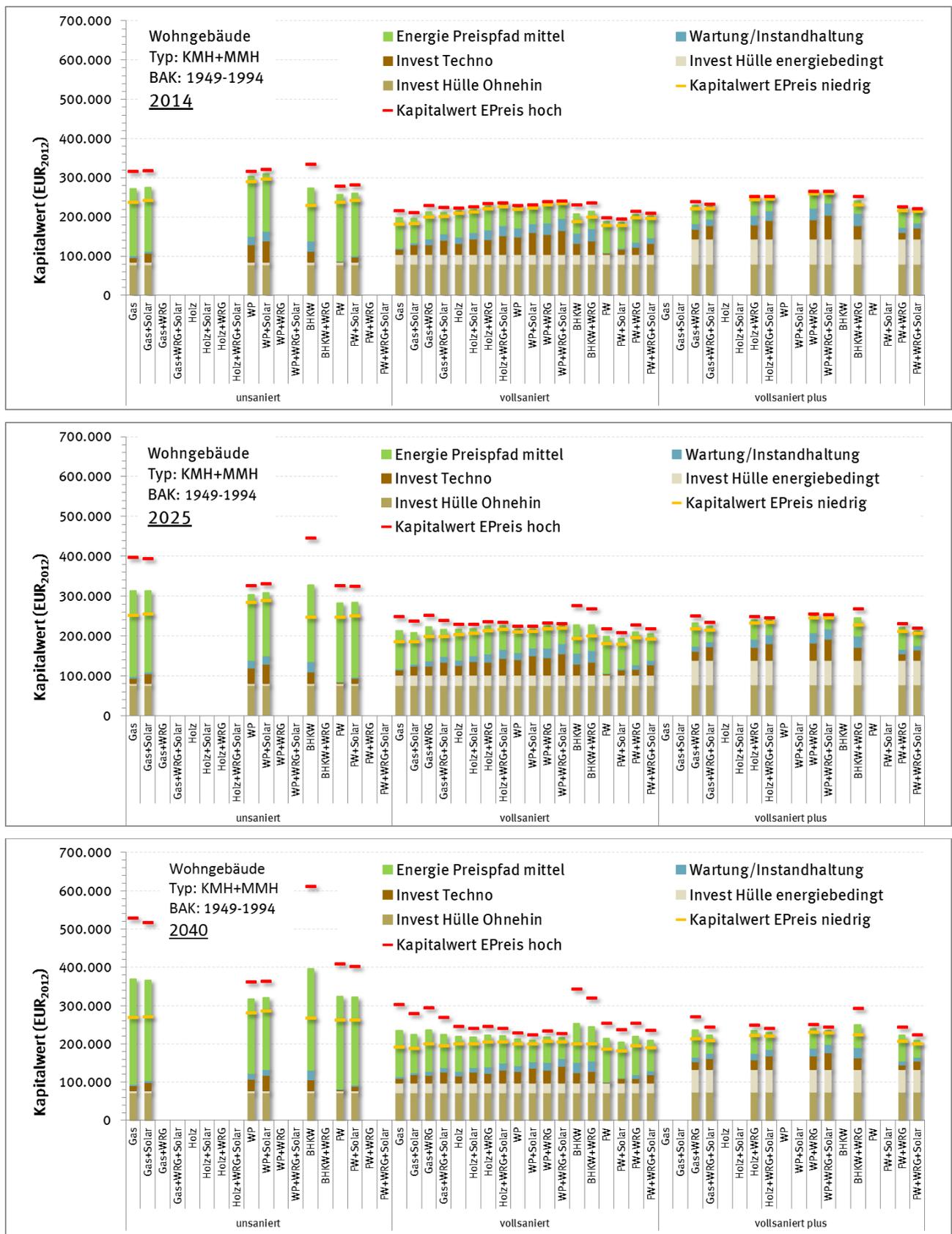
Die Aussagekraft des Kapitalwerts besteht in einer Abschätzung, wie sich verschiedene Maßnahmen (z.B. energetische Modernisierungsmaßnahmen auf verschiedenen anspruchsvollen energetischen Standards) aus der ökonomischen Perspektive unterscheiden. Der Kapitalwert wird dabei in Anlehnung an die technische Lebensdauer der Außenwanddämmung für einen Zeitraum von 40 Jahren berechnet.

Abbildung II zeigt exemplarisch die Kapitalwerte für ein KMH/MMH der Baualtersklasse 1949-1994 für die 18 Versorgungstechnikooptionen der Wohngebäude in Abhängigkeit der drei verschiedenen Wärmeschutzstandards. Jede der drei Grafiken stellt die Situation zu einem anderen Investitionszeitpunkt dar (2014, 2025 und 2040). Da nicht jede Technikooption für jeden Gebäudetyp bzw. Wärmeschutzstandard betrachtet wurde, bleiben einige Werte leer.

Für alle drei Wohngebäudetypen stellt der unsanierte Zustand den Zustand mit dem höchsten Kapitalwert dar. Dies ist unabhängig vom Zeitpunkt der energetischen Sanierung (Zustände „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“) bzw. der reinen Renovierung (Zustand „unsaniert“). Die Kapitalwerte der beiden Sanierungszustände „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“ unterscheiden sich dabei nur unwesentlich. Aufgrund der Lernkurveneffekte bei den Investitionskosten sowie den unterstellten Energiepreissteigerungen konvergiert der Kapitalwert des Zustands „vollsaniert plus“ bei fortschreitendem Investitionszeitpunkt sukzessive gegen den Zustand „vollsaniert“.

Die Kosten einer Solarthermieanlage refinanzieren sich nicht in allen Wohngebäudetyp/Wärmeschutz-Kombinationen. Beispielsweise liegen bei EZFH die Kapitalwerte der Technikvarianten mit Solarthermieanlage nur in Kombination mit einem Gaskessel, beschränkt auf die beiden Sanierungszustände und erst ab einem Investitionszeitpunkt in 2025 oder später systematisch unter den Kapitalwerten der entsprechenden Varianten ohne Solarthermieanlage. Die Installation einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung führt bei EZFH und KMH/MMH hinsichtlich der gewählten Kostensätze tendenziell zu deutlich höheren Kapitalwerten als die Ausgangstechnik (z.B. Wärmepumpe).

Abbildung II: Kapitalwerte für ein KMH/MMH in Abhängigkeit von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt



Quelle: Eigene Berechnung des Öko-Instituts

Entwicklung verschiedener Zielbilder für das Jahr 2050 sowie Ableitung von Transformationspfaden

Das übergeordnete, auf den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf (PE_{NE}) bezogene Reduktionsziel, lässt sich in Form verschiedener Sektorausgestaltungen (Zielbilder) darstellen. Die beiden miteinander verbundenen zentralen Zieldimensionen sind dabei die Reduktion des Endenergiebedarfs („Effizienz der umbauten Technik“) sowie die Zusammensetzung des Endenergieträgermixes (v.a. der darin enthaltene Anteil an Erneuerbaren Energien (EE)). Die drei Zielbilder werden so parametrisiert, dass – bezogen auf die beiden zentralen Zieldimensionen – ein möglichst breiter Zukunftskorridor aufgespannt wird. Es werden sogenannte Transformationspfade abgeleitet, die den heutigen Gebäudebestand (Ist-Zustand) in die jeweiligen Zielbilder im Jahr 2050 überführen. Und es wird untersucht, wie der durch die verschiedenen Zielbilder charakterisierte Gebäudebereich mit dem gesamten Energiesystem interagiert.

Alle drei Zielbilder erreichen das Primärenergiereduktionsziel (PE_{NE} minus 80 %), unterscheiden sich jedoch in den genannten Zieldimensionen. Aus Mangel an einer eindeutigen Definition bleibt dabei unklar, inwieweit alle drei Zielbilder mit den Vorstellungen konform sind, wie ein „nahezu klimaneutraler“ Gebäudebestand aussehen sollte/könnte. Dies bezieht sich insbesondere auf die qualitative Forderung, „dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen“. Hingegen wird – wie qualitativ gefordert – in allen drei Zielbildern der „verbleibende Energiebedarf zum überwiegenden Teil durch erneuerbare Energien gedeckt“, sofern die EE-Anteile an der Strom- und Fernwärmeversorgung mit einberechnet werden.

Grundlage für die Zielbildentwicklung ist die Nachbildung des heutigen Gebäudebestandes (Wohn- und Nichtwohngebäude) anhand der entwickelten Gebäudetypologie. Dabei wird der Ist-Zustand in der jeweiligen Gebäudekategorie über die Verteilung der Typgebäude auf die drei definierten Wärmeschutzstandards sowie die verschiedenen Technikoptionen kalibriert. Auch die Zielbilder entstehen unter Rückgriff auf die entwickelte Gebäudetypologie, allerdings unter Berücksichtigung der unterstellten Flächennachfrage in 2050 sowie einer Neuverteilung der Typgebäude auf die drei verschiedenen Wärmeschutzstandards und Technikoptionen. Folgende Zielbilder werden entwickelt (s. Tabelle I)

Tabelle I: Zentrale Annahmen der Zielbilder

	Wohngebäude			Nichtwohngebäude		
Neubaurate	absinkend von 0,85% in 2015 auf 0,2% in 2050			konstant 1,35% pro Jahr		
Abgangrate	konstant 0,3% pro Jahr			konstant 1,35% pro Jahr		
Flächenentwicklung bis 2050	+ 7%			+/- 0%		
Zielbilder	Zielbild -70	Zielbild -55	Zielbild -40	Zielbild -45	Zielbild -35	Zielbild -25
Reduktion Endenergieverbrauch bis 2050	-70%	-55%	-40%	-45%	-35%	-25%
Reduktion nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf PE _{NE} bis 2050	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%

Quelle: Eigene Darstellung

- Für die Zielbilder der Wohngebäude wird der Endenergieverbrauch um 40 % (WG Zielbild -40 %), 55 % (WG Zielbild -55 %) bzw. 70 % (WG Zielbild -70 %) reduziert. Das WG Zielbild -70 % setzt also vorwiegend auf Effizienz. Im WG Zielbild -40 % wird hingegen der Endenergieverbrauch wesentlich weniger reduziert, entsprechend werden höhere EE-Anteile notwendig, um das übergeordnete Ziel PE_{NE}-80% zu erreichen.

- Die Beschaffenheit der Nichtwohngebäude lässt keine so starke Reduktion des Endenergieverbrauchs zu. Die Zielbilder orientieren sich auch hier an der maximal erreichbaren Endenergieeinsparung. Der Zielkorridor reicht von einer Endenergieeinsparung von 25 % (NWG Zielbild -25 %), über 35 % (NWG Zielbild -35 %) bis hin zu 45 % (NWG Zielbild -45 %). Eine P_{ENE}-Reduktion von 80 % wird auch hier in allen Zielbildern erreicht.

Die energetische Modernisierung von Gebäuden unterliegt einer Vielzahl verschiedener Restriktionen. Dämmrestriktionen finden sich z.B. an der Hüllfläche von nahezu allen Gebäuden. Die Dämmrestriktionen resultieren u.a. aus schützenswerten Fassaden (u.a. Denkmalschutz), geometrischen Einschränkungen bei der Überdämmung des Gehweges oder der Dämmung von Hofdurchfahrten oder zu niedrigen Kellerdecken. Die Dämmrestriktionen führen dazu, dass nicht alle Gebäude auf den höchstmöglichen Wärmeschutzstandard saniert werden können. Im Rahmen der Zielbilder wird diesem Effekt Rechnung getragen, indem für das Zieljahr 2050 ein Sockel unsanierter Gebäude unterstellt wird. Diese repräsentieren sowohl die aufgrund von Restriktionen gar nicht sanierbaren, aber auch die nur teilweise sanierbaren Gebäude (im Sinne einer „Voll-Nichtsaniierungsrate“). Die Sockelwerte differenzieren nach Gebäudetyp und Baualtersklasse (vgl. Tabelle II). Der verhältnismäßig hohe Sockelwert bei den Mehrfamilienhäusern der Baualtersklasse bis 1948 reflektiert z.B. die Gründerzeitbauten, die aufgrund ihrer Sichtfassaden nur eingeschränkt sanierbar sind.

Tabelle II: Sockel unsanierbarer Gebäude (bezogen auf die Wohn- bzw. Nutzfläche der unsanierten Gebäude im jeweiligen Ist-Zustand)

Baualtersklasse	EZFH	KMH/MMH/GMH	NWG
bis 1948	10%	20%	2,5-10%
1949-1994	5%	5%	(abhängig von der Nutzungsart des Gebäudes)
ab 1994	0%	0%	

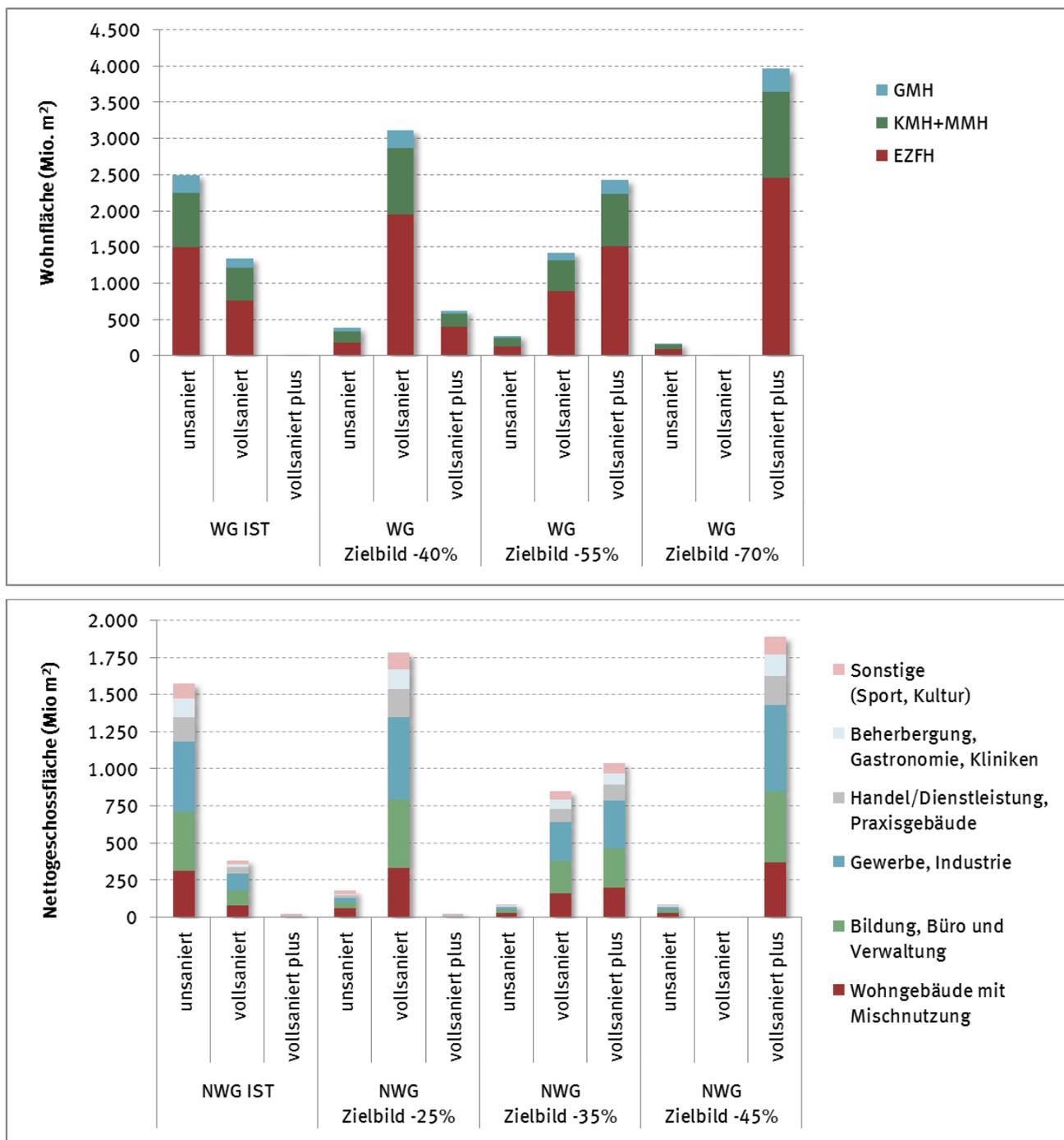
Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Eine weitere Restriktion besteht beim Einsatz von Holz in der zukünftigen Wärmeversorgung der Gebäude. Nach UBA (2014) ist das Potenzial nachhaltiger holzartiger Reststoffe in 2050 auf rund 85 TWh/a beschränkt (inkl. Industrierestholz und Altholz). Zur thermischen Versorgung der Wohngebäude steht also nur diese Energiemenge zur Verfügung (die gewählte Typologie sieht im Bereich der Nichtwohngebäude keinen Einsatz von Holz vor).

In Hinblick auf die zukünftige Verteilung der Versorgungstechniken wurde angenommen, dass der Anschlussgrad von Gebäuden an das Fernwärmenetz bezogen auf den Ist-Zustand weitgehend konstant bleibt, d.h. kein nennenswerter Ausbau der Fernwärme erfolgt. Bei den Wohngebäuden wird der Anteil an Pelletheizungen durch das maximal zu Verfügung stehende Potenzial an Holz begrenzt. Der Ausbau gasbetriebener BHKW erfolgt moderat. Damit verbleiben als wesentliche Stellschrauben bezogen auf die Versorgungstechniken die Anteile an Gaskesseln sowie Wärmepumpen.

Abbildung III zeigt die prozentuale Verteilung der Wohnfläche (Wohngebäude) bzw. Nutzfläche (Nichtwohngebäude) in 2050 auf die verschiedenen Sanierungsstandards. Deutlich zu erkennen ist die Zunahme der Wohn- bzw. Nutzfläche im Sanierungszustand „vollsanier plus“, je stärker der Endenergieverbrauch reduziert wird. In den Zielbildern WG-70 % bzw. NWG-45 % werden alle prinzipiell sanierbaren Gebäude, also alle Wohn- und Nichtwohngebäude jenseits des unsanierbaren Sockels, in den Zustand „vollsanier plus“ überführt.

Abbildung III: Verteilung der Wohn- bzw. Nutzfläche auf die verschiedenen Sanierungsstandards



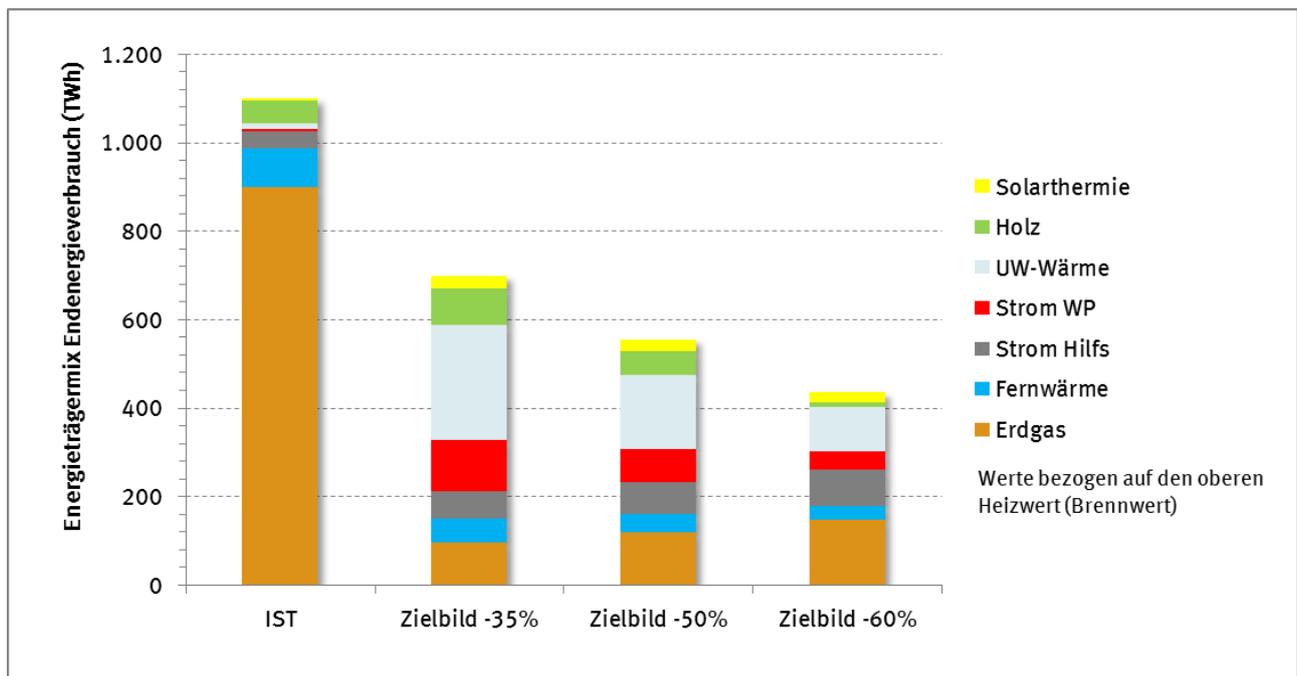
Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Die Zielbilder für den gesamten Gebäudebereich ergeben sich über die Aufsummierung der beiden Teilbereiche Wohn- und Nichtwohngebäude. Bezogen auf die Endenergieeinsparung ergeben die beiden Zielbilder mit der stärksten Endenergieminderung (WG Zielbild -70 % und NWG Zielbild -45 %) zusammen eine Endenergieeinsparung in Höhe von 60 % (s. Abbildung IV). Konkret bedeutet dies, dass sich der Endenergieverbrauch in der gewählten definitorischen Abgrenzung (Endenergie- definition im Sinne der Energiebilanz) um maximal 60 % bezogen auf den heutigen Ausgangszu- stand absenken lässt. Dazu müssten alle Gebäude, die im Rahmen der gewählten Methodik als prin- zipiell sanierbar eingestuft werden, auf den Sanierungszustand „vollsaniiert plus“ gebracht werden. Die Zusammenführung des „mittleren“ Zielbilds bei den Wohngebäuden (WG Zielbild -55 %) mit dem

entsprechenden Zielbild der Nichtwohngebäude (NWG Zielbild -35 %) ergibt in Summe eine Endenergieminderung von rund 50 %. Die beiden Zielbilder mit den geringsten Ambitionen hinsichtlich der Endenergiereduktion (WG Zielbild -40 % und NWG Zielbild -25 %) führen zusammen zu einer Endenergieeinsparung von etwa 35 %. Somit lässt sich das langfristige Transformationsziel für den Gebäudesektor durch einen Zielkorridor eingrenzen, der durch Endenergieeinsparungen zwischen 35 % und 60 % aufgespannt wird.

Neben der Endenergieeinsparung unterscheiden sich die beiden Eckpunkte des Zielkorridors natürlich auch in ihrem Endenergieträgermix (s. Abbildung IV). Infolge der hohen Wärmeschutzanforderungen können im Zielbild -60 % knapp 55 TWh mehr Erdgas eingesetzt werden als im Zielbild -35 %. Im Gegensatz dazu wird im Zielbild -35 % eine um fast einen Faktor drei größere Endenergiemenge aus erneuerbaren Energien benötigt, um das Ziel PE_{NE} -80 % zu erreichen. Dabei ist der EE-Anteil am Strombedarf noch gar nicht eingeschlossen, d.h. der Mehrbedarf erfasst nur Holz, Umweltwärme und Solarthermie. Das Zielbild mit den geringsten Effizienzanstrengungen (Zielbild -35 %) geht zudem mit einem wesentlich höheren Strombedarf einher. Die beiden Zielbilder -35 % und -60 % unterscheiden sich im Strombedarf um etwa 55 TWh, d.h. im Zielbild -35% ist die Stromnachfrage etwa 55 TWh höher als im Zielbild -60 %.¹ Der im Rahmen der Modellierung verwendete Primärenergiefaktor für Strom impliziert einen hohen EE-Anteil im Strommix. Dies führt dazu, dass der höhere Strombedarf im Zielbild -35 % zu einem zusätzlichen Ausbaudruck auf die EE-Stromkapazitäten führt.

Abbildung IV: Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den drei verschiedenen Zielbildern für den gesamten Gebäudebereich



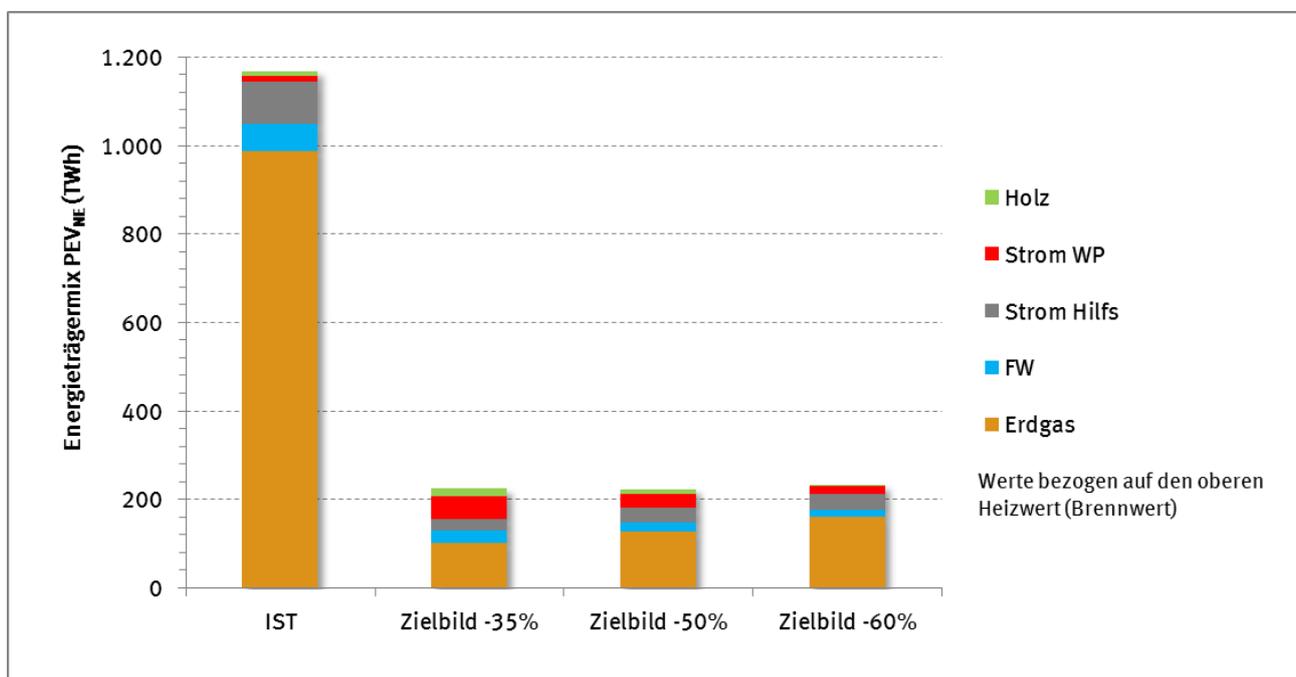
Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung V zeigt die Zusammensetzung des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs PE_{NE} in den verschiedenen Zielbildern. PE_{NE} sinkt in allen drei Zielbildern um 80 %. Die Beiträge von PE_{NE}

¹ Zum Vergleich: Im Jahr 2014 erzeugten Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energien rund 160 TWh Strom. Der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch lag damit bei rund 28%.

stammen aus den erdgasbetriebenen Heizsystemen, den nicht-erneuerbaren Primärenergieanteilen an der Strom- und Fernwärmeversorgung sowie aus den Holzheizungen.

Abbildung V: Energieträgermix des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in den drei verschiedenen Zielbildern für den gesamten Gebäudebereich

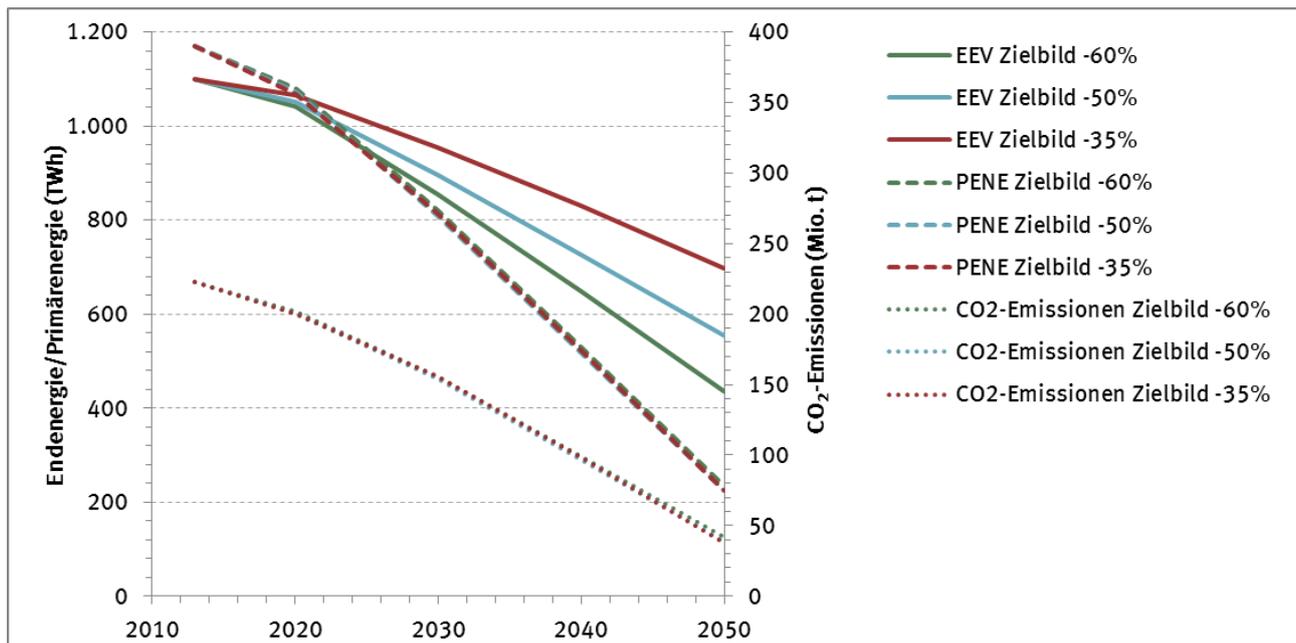


Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung VI zeigt die Entwicklung der energetischen Kennwerte für die drei Zielbilder für den gesamten Gebäudebereich. Deutliche Unterschiede zwischen den drei Transformationspfaden sind lediglich bezogen auf die Entwicklung des Endenergieverbrauchs erkennbar. Hinsichtlich PE_{NE} sowie CO_2 -Emissionen sind die drei Transformationspfade fast deckungsgleich. Die durch den Gebäudesektor verursachten CO_2 -Emissionen sinken im Zielbild -60 % bezogen auf das Ausgangsjahr um 81 %, in den anderen beiden Zielbildern liegt die Reduktion bei rund 83 %. Die CO_2 -Bilanzierung erfasst dabei auch die Emissionen, die mit der Erzeugung des Strombedarfs für die thermische Raumkonditionierung (z.B. Wärmepumpenstrom, Hilfsstrom) einhergehen und die i.d.R. im Umwandlungssektor bilanziert werden. Gleiches gilt für die Fernwärme.

Der Aufbau eines Sanierungsmarktes, der energetische Modernisierungen im erforderlichen Volumen und insbesondere der erforderlichen Tiefe leisten kann, benötigt einen gewissen zeitlichen Vorlauf. Es wurde deswegen angenommen, dass die Sanierungsraten zwischen 2014 und 2020 langsam ansteigen und erst ab 2021 in der Größenordnung von 2 % pro Jahr möglich sind. Der verhältnismäßig moderate Anstieg der Sanierungsraten bedingt, dass die Verläufe sowohl von End- als auch Primärenergie erst ab 2020 einen erkennbaren Knick nach unten aufweisen. Der im Vergleich zum Endenergieverlauf bis zum Jahr 2020 etwas stärkere Abfall bei der Primärenergie basiert darauf, dass in den kommenden Jahren der Umstieg auf CO_2 -ärmere Heizungstechniken etwas stärker voranschreitet als die Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle.

Abbildung VI: Transformationspfade für den gesamten Gebäudebereich – Energetische Kennwerte^{*)}



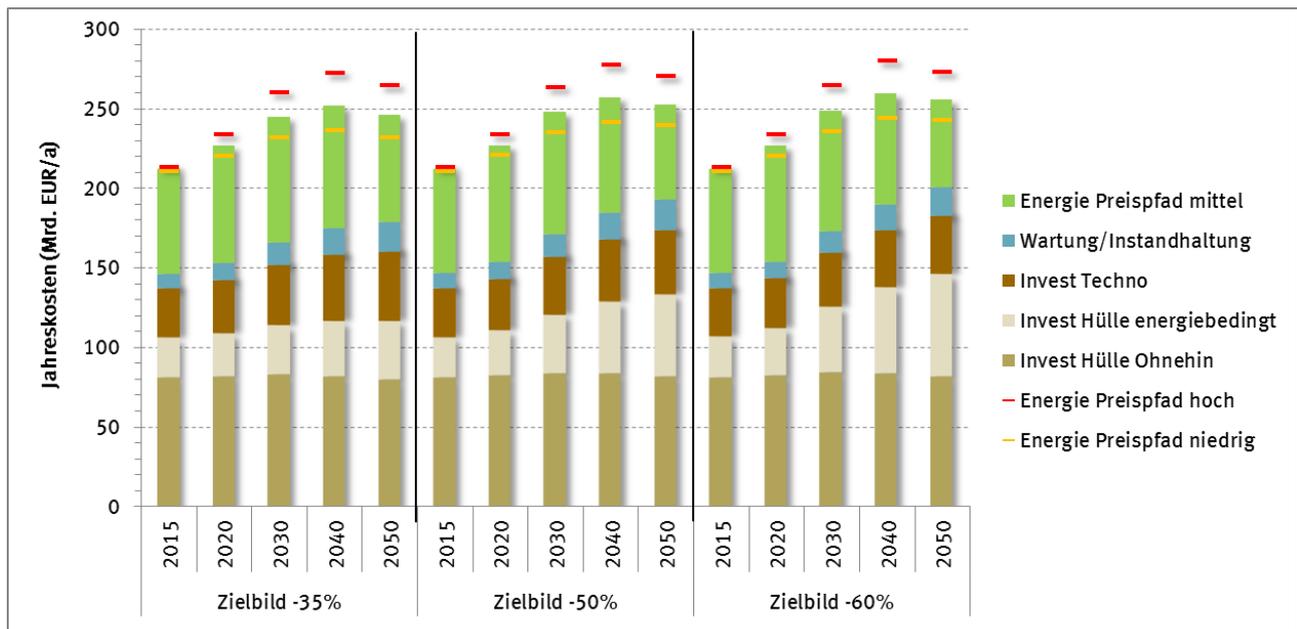
^{*)} End- und Primärenergie projiziert auf die linke Achse, CO₂-Emissionen projiziert auf die rechte Achse

Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung VII beschreibt die Entwicklung der Jahreskosten für die drei Zielbilder des gesamten Gebäudebereichs. Diese ergeben sich aus der Summe der Jahreskosten für die Wohn- und die Nichtwohngebäude. Die Jahreskosten steigen von rund 210 Mrd. EUR in 2015 auf einen Maximalwert von rund 260 Mrd. EUR in 2040 (Zielbild -60 % und Zielbild -50 %) bzw. 250 Mrd. EUR (Zielbild -35 %) und sinken dann bis 2050 wieder leicht um rund 2 %. Die Jahreskosten liegen dem zufolge in den beiden Zielbildern mit höheren Wärmeschutzanstrengungen etwas höher als in dem Zielbild mit den geringeren Wärmeschutzaktivitäten. Die Kostendifferenzen sind allerdings sehr gering.

Legt man bei den Wohngebäuden die Jahreskosten auf die gesamte Wohnfläche um, erhält man für den mittleren Energiepreispfad spezifische Kosten von etwa 29 EUR/m² in 2015 sowie 35 EUR/m² in 2050. Dies entspricht einem Anstieg um etwa 22 %. Beim niedrigen Energiepreispfad steigen die spezifischen Kosten von 29 EUR/m² in 2015 auf rund 33 EUR/m² in 2050, was einem Anstieg von rund 16 % entspricht. Beim hohen Energiepreispfad steigen die spezifischen Kosten auf maximal 37 EUR/m².

Abbildung VII: Transformationspfade für den gesamten Gebäudebereich – Jahreskosten



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Zusammenfassend unterscheiden sich die drei bottom-up entwickelten Zielbilder in folgenden Kernparametern:

- **Endenergieeinsparung:** In allen drei Zielbildern wird bis zum Jahr 2050 ein Großteil der Wohn- und Nichtwohngebäude energetisch auf ein Niveau saniert, das die Neubauanforderungen der EnEV 2009 unterschreitet. Im Zielbild -60 % werden alle prinzipiell sanierbaren Gebäude sogar mit Passivhauskomponenten saniert, alle Wohngebäude erhalten in diesem Zielbild zudem eine Lüftungsanlage mit WRG.
- **Endenergieträgermix:** Im Zielbild -60 % kann eine größere Menge an Erdgas eingesetzt werden als im Zielbild -35 %. Dies liegt daran, dass im Zielbild -60 % ein größerer Beitrag zur Erreichung des übergeordneten Primärenergieziels durch die ambitionierteren Maßnahmen zur Endenergieerzeugung erbracht wird. Im Endenergieträgermix weisen diese beiden Zielbilder ferner erhebliche Unterschiede im Einsatz von Holz und Umgebungswärme bzw. Strom auf.
- **CO₂-Emissionen:** Das übergeordnete PE-bezogene Einsparziel führt in allen drei Zielbildern zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen, die durch den Gebäudesektor verursacht werden, von 81-83 %.
- **Kosten:** Die Jahreskosten liegen in dem Zielbild mit den höchsten Wärmeschutzanstrengungen (Zielbild -60 %) etwas höher als in den anderen Zielbildern. Die Differenzen bezogen auf die Gesamtkosten wie auch die Kostenverläufe sind allerdings sehr gering. Angesichts der großen Unsicherheiten, denen eine Vielzahl der Annahmen unterliegt, die im Zuge der Berechnungen getroffen werden mussten, lassen sich daraus keine robusten Aussagen ableiten, welches der Zielbilder aus Perspektive der Kosten angesteuert werden sollte.

Da keines der Zielbilder aus Sicht der Jahreskosten zu einem eindeutig zu präferierenden Ergebnis führt, gewinnen andere Auswahlkriterien an Bedeutung. Diese wären unter anderem:

- die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber den verschiedenen Maßnahmen, die den jeweiligen Zielbildern zugrunde liegen. Insbesondere zu berücksichtigen sind dabei die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber dem Ausbau zusätzlicher EE-Kraftwerke (v.a. Wind und PV) sowie

der dafür notwendigen Infrastruktur (Stichwort Netzausbau) im Zielbild -35 % im Gegensatz zur Akzeptanz gegenüber den sehr tiefgreifenden Sanierungsaktivitäten – dies betrifft insbesondere den Wärmeschutz der Gebäudehülle – im Zielbild -60 %.

- die mit dem starken Ausbau von Wärmepumpen verbundenen Herausforderungen, die aus der Interaktion mit dem Stromsystem folgen; denn Wärmepumpen verbrauchen als Heizungs-technik gerade dann viel Strom, wenn die Stromnachfrage auch in den anderen Sektoren sehr hoch sowie die PV-Einspeisung eher niedrig sind, hinzu kommen die mit dem starken Ausbau von Luft/Wasser-Wärmepumpen verbundenen Lärmemissionen.
- die möglicherweise unterschiedliche Verteilung von Kosten und Nutzen. Leitfragen wären hier z.B. Welche Kostenblöcke führen zu Investitionen in Deutschland, welche zu einem Kapitalfluss ins Ausland? Wie verteilen sich die Kosten in den verschiedenen Zielbildern auf Eigentümer und Mieter?

In einem weiteren Arbeitsschritt wird untersucht, wie die drei sektorbezogenen Zielbilder mit dem gesamten Energiesystem interagieren bzw. sich mit den Energiewendezielen für das gesamte Energiesystem vertragen. Dazu wurden die drei Zielbilder parametrisiert und in das Gesamtenergiesystemmodell REMod-D „eingefügt“. Es wurden drei Szenariengruppen modelliert, nämlich

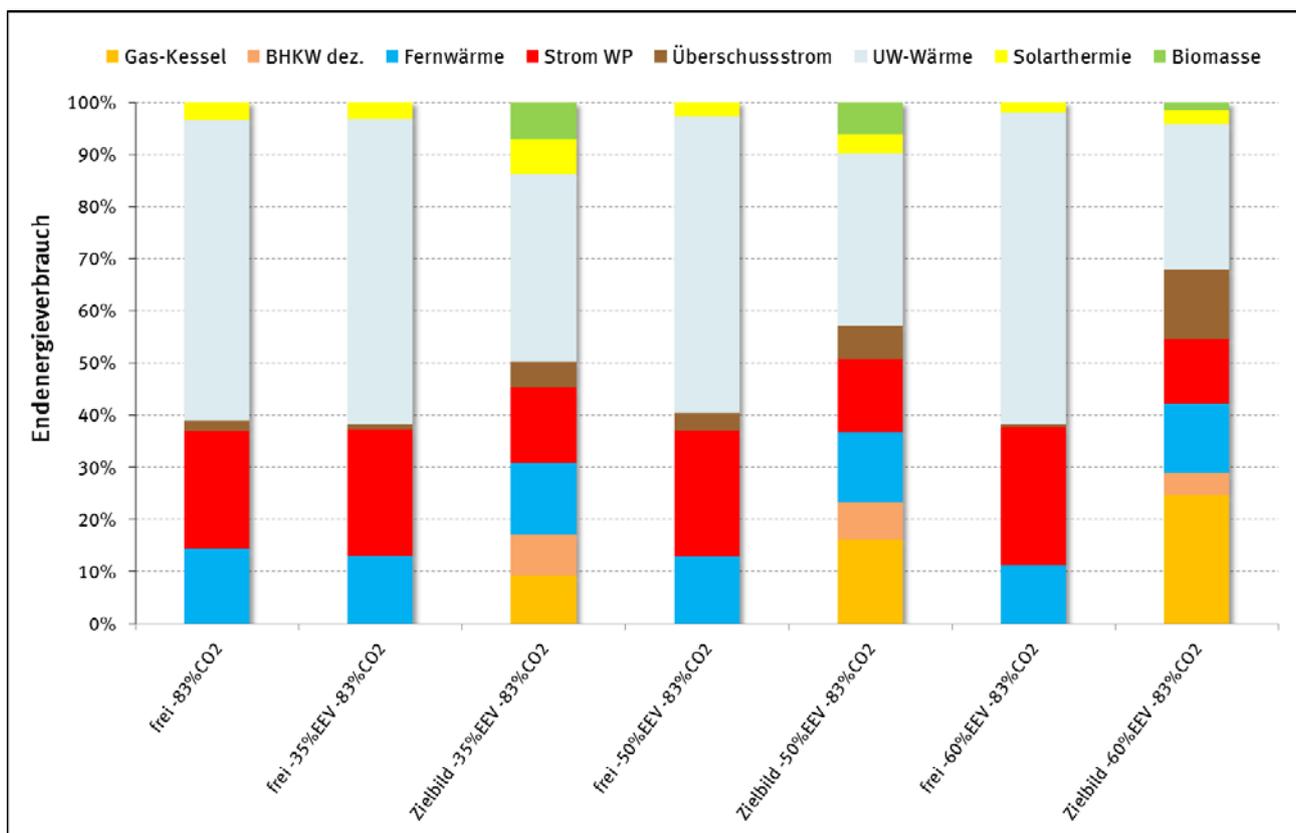
- a) die Verwendung der Zielbilder mit fixierter Endenergieeinsparung sowie Technikverteilung („starre Zielbilder“),
- b) die Verwendung der Zielbilder mit fixierter Endenergieeinsparung wohingegen die Technikverteilung über das Modell frei optimiert wird,
- c) eine komplett freie Optimierung, bei der sich sowohl das Reduktionsmaß bezogen auf den Endenergieverbrauch als auch die Technikverteilung aus der Optimierung ergeben.

Die komplett freie Optimierung führt zu einer Endenergiebedarfsreduktion von lediglich rund 20 % (im Gegensatz zu einer Reduktion von 60 %, 50 % sowie 35 % bei den starren Zielbildern). Dies folgt aus den höheren Kosten der Zielbilder mit ambitionierteren Sanierungsaktivitäten. Ferner führen die Szenarien, bei denen sich die Technikverteilung aus der Optimierung ergibt, zu anderen Technikmischen als in den „starren“ Zielbildern, die aus der isolierten Sektorperspektive entwickelt wurden (vgl. Abbildung VIII).

Bei der freien Optimierung kommen wesentlich mehr Wärmepumpen zum Einsatz und auch Fernwärmesysteme haben einen größeren Anteil. Die Verschiebung hin zu Wärmepumpen und Fernwärme resultiert aus der größeren Interaktionsfähigkeit dieser Techniken mit dem Stromsystem. Dezentrale Gaskessel, BHKWs oder Pelletkessel werden bei der freien Optimierung hingegen kaum „gezogen“. Denn Erdgas und Biomasse, die im Rahmen der „starren“ Zielbilder zum Einsatz kommen, werden in der freien Optimierung in anderen Sektoren eingesetzt, insbesondere im Industrie- und Verkehrssektor. Stehen sie diesen Sektoren nicht zur Verfügung, müssen sie dort durch alternative synthetische Brennstoffe ersetzt werden. Hierfür wären zusätzliche Wandler erforderlich. Die zusätzlichen Wandlungsschritte sind jedoch mit höheren Verlusten verbunden und verursachen damit einen insgesamt höheren Strombedarf im Energiesystem. Aus der Gesamtsystemperspektive ist es also günstiger, die Brennstoffe bevorzugt im Industrie- und Verkehrssektor einzusetzen und Niedertemperaturwärme im Gebäudesektor mittels Wärmepumpen zu erzeugen.

Unterschiedliche Technikverteilungen spiegeln aber auch die unterschiedlichen Perspektiven wider, vor deren Hintergrund die Zielbilder entwickelt wurden. Die Technikverteilung der „starren“ Zielbilder reflektiert die Entscheidungskalküle der Bauherren und Hauseigentümer. Hier spielen Kriterien wie Erzeugungsautarkie eine größere Rolle als eine mögliche Optimierung hinsichtlich des gesamten Energiesystems.

Abbildung VIII: Prozentuale Verteilung der Wärmebereitstellung im Jahr 2050 (bezogen auf den Endenergieverbrauch) in den verschiedenen Szenarien



Quelle: Eigene Berechnungen des Fraunhofer ISE

Wie oben wiederholt dargestellt, können aus dem Vergleich der Zielbilder nur dann robuste Aussagen abgeleitet werden, wenn sich die dabei zugrunde liegenden Indikatoren signifikant unterscheiden. Zur Einordnung der Ergebnisse sollen deswegen abschließend die wesentlichen Unsicherheiten zusammengefasst werden, denen die Entwicklung der Zielbilder unterlag. Aus einigen der Unsicherheiten lässt sich direkt weiterer Forschungsbedarf ableiten, andere Unsicherheiten resultieren aus Vereinfachungen, die notwendig waren, um den Gebäudesektor bzw. das gesamte Energiesystem modelltechnisch abzubilden:

- **Datenlage:** Insbesondere bei den Nichtwohngebäuden ist die Datenlage über den Ist-Zustand nach wie vor sehr schlecht. Dies umfasst z.B. die Flächen und Technikverteilung. Hinzu kommt sowohl für Wohn- als auch Nichtwohngebäude eine große Wissenslücke über die Sanierungsaktivitäten, die außerhalb der Förderung der KfW durchgeführt werden.
- **Aufgrund der großen Heterogenität innerhalb des Gebäudesektors** basieren eine Reihe funktionaler Zusammenhänge (z.B. Kostenfunktionen, Umrechnung von rechnerischen Endenergiebedarfs- auf -verbrauchswerte) auf Regressionsfunktionen, die ein verhältnismäßig niedriges Bestimmtheitsmaß aufweisen. Die Funktionen sind deswegen nur eingeschränkt geeignet.
- **Technologieentwicklung:** Es ist sehr schwierig, die Entwicklung des Technikportfolios für die kommenden 35 Jahre zu prognostizieren. Mit Blick auf den Gebäudesektor gilt dies z.B. für Prognosen über die zukünftige Bedeutung von Power to Gas (PtG), Power to Heat (PtH), Gas-Wärmepumpen oder Brennstoffzellen. Bei der Entwicklung der Zielbilder wurde deswegen eine konservative Herangehensweise gewählt, bei der nur auf heute schon bewährte Techniken zurückgegriffen wird.

- **EE-Importe:** Freiheitsgrade ergeben sich aus der Möglichkeit, zukünftig verstärkt EE-Strom, Biomasse sowie im Ausland über den Einsatz von EE erzeugte synthetische Gase nach Deutschland zu importieren und damit den inländischen EE-Ausbaudruck zu reduzieren. Aufgrund der Ungewissheit über mögliche Importmengen wurde auch hier ein konservativer Ansatz gewählt und auf EE-Importe gänzlich verzichtet.
- **Biomasse:** Es stellt sich die Frage, in welchen Sektoren die begrenzten Biomassepotenziale am sinnvollsten eingesetzt werden sollten. Je mehr Biomasse in den Gebäudesektor geht, desto kleiner sind die Anteile, die den anderen Sektoren zur Verfügung stehen. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch: Je geringer der Biomasseanteil für den Gebäudesektor, desto größer sind die Freiheitsgrade in den anderen Sektoren, dort die Klimaschutzziele zu erreichen.
- **Dynamik des Sanierungsmarktes:** Alle Zielbilder erfordern ein signifikantes Ausweiten des Sanierungsmarktes. Es geht dabei darum, dass ein wesentlich größeres Sanierungsvolumen in hinreichend guter Qualität ausgeführt wird. Gerade bei den ambitionierteren Sanierungsniveaus spielt die Sanierungsqualität eine bedeutende Rolle. Es stellt sich also die Frage, wie schnell die notwendigen Kapazitäten insbesondere im Bereich des Handwerks aufgebaut werden können. Bei der Entwicklung der Transformationspfade wurden verhältnismäßig vorsichtige Annahmen getroffen, entsprechend steigen die Sanierungsraten zunächst recht moderat an.
- **Klimaschutzbeitrag:** Das primärenergiebezogene Reduktionsziel (P_{ENE} minus 80 %) impliziert, dass der Gebäudesektor seine von ihm verursachten CO₂-Emissionen um etwa 80 % reduzieren muss. Es stellt sich die Frage ob dieser Beitrag angesichts der Reduktionsherausforderungen in anderen Sektoren (z.B. Verkehr, prozessbedingte Emissionen in der Industrie) ausreichend ist. Interessant wäre deswegen die Untersuchung, mit welchen Maßnahmen im Gebäudesektor ein noch größerer Reduktionsbeitrag erreicht werden könnte (z.B. hinsichtlich eines CO₂-Einsparziels von 95 %) bzw. wie ein komplett klimaneutraler Gebäudesektor ausgestaltet sein müsste (sowohl aus der isolierten Perspektive des Sektors wie auch aus der Gesamtsystemperspektive).

Summary

The building sector plays an important role for the goals of the German *Energiewende* (energy transition). Accordingly, the federal government aims at realizing a “nearly climate-neutral” building stock by 2050. The plan is “that buildings will only need very little energy and that the remaining energy needs will mainly be met by renewable energy sources”. The technical feasibility of both climate-neutral renovations and climate-neutral new buildings has been shown by various demonstration projects. What is lacking, however, is a vision of how the entire stock of residential and non-residential buildings should be constituted energetically in order to reach the sector-specific transformation goals. The relevant questions concern, amongst others, the required level of energetic renovations of buildings, the energy and technology mix for the thermal conditioning of the buildings, as well as how the building sector as both energy consumer and energy producer will interact with the entire energy system in the long run.

This study has the overall goal of showing how the building stock can be transformed into a nearly climate-neutral state by 2050. For doing so the study presents two different approaches:

- From the perspective of single buildings, concepts are introduced that show with what kind of technologies a (nearly) climate-neutral state can be realized by 2050, and what costs are associated with the various options for energetic renovations.
- From the perspective of the entire building stock, different target states are developed that show what a nearly climate-neutral building stock may look like in 2050, and how the current building stock may be transformed into the respective target states (transformation pathways). Furthermore, a concept is developed as to how the different (sector-specific) target states interact with the entire (transformed) energy system, which fulfils the goals of the *Energiewende*.

Definition of climate neutrality of the building stock and energy accounting frame

The definition of the term “nearly climate-neutral” building stock leaves room for interpretation. For a methodologically consistent study, it is important to clearly define this term. The term “very low energy demand”, for instance, does not clarify whether this refers to the useful energy demand, the final energy demand, or the primary energy demand. Additionally, the meaning of “low” is not explicitly quantified.

For the purpose of this study a nearly climate-neutral building stock is defined by

- a non-renewable primary energy demand (PE_{NR}) for the conditioning of a building that is 80% lower than that of the 2008 reference year, and
- a remaining, very low final energy demand, which is mainly supplied by renewable energy sources, i.e. by more than 50%.

The entire building stock in the sectors private households, commerce, trade and services as well as industry serves as the respective reference unit.

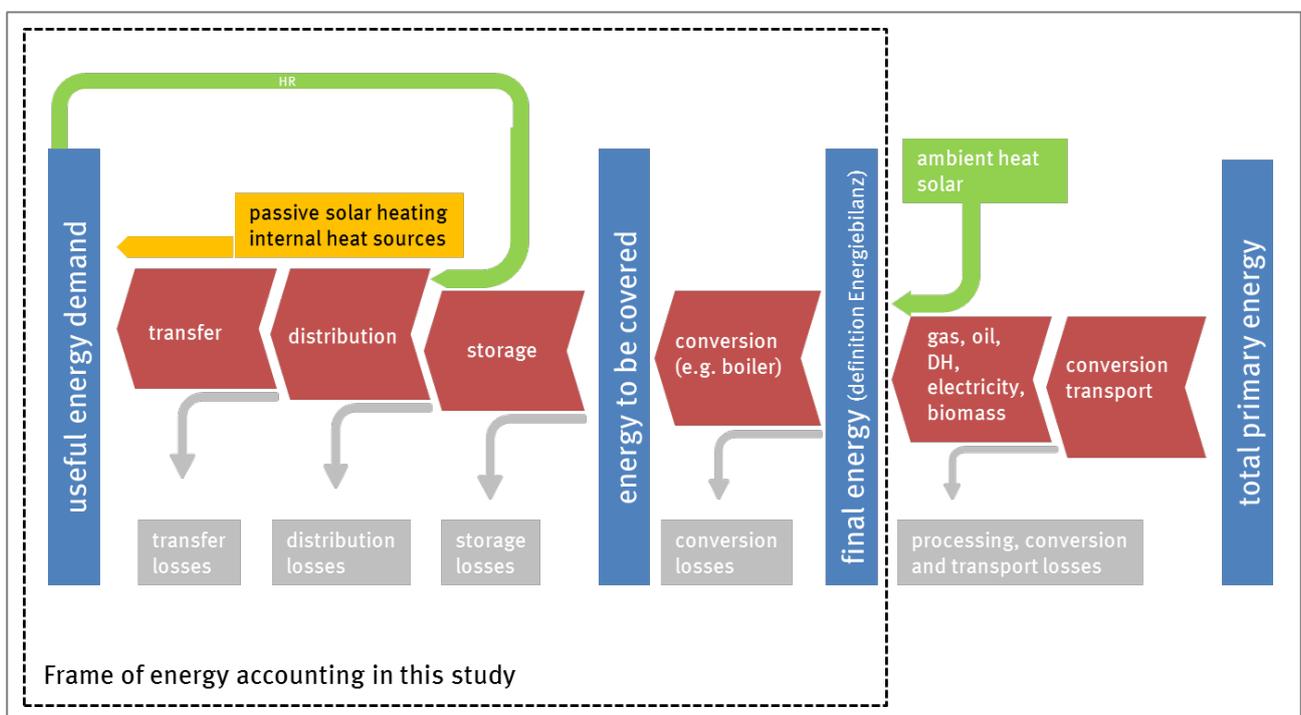
For the energy accounting all fluxes of primary energy are considered, that are used for conditioning a building (residential and non-residential) in the sectors private households, commerce, trade and services as well as industry. This includes the primary energy required for supplying the useful energy for heating, cooling, (de-) humidification, ventilation and supporting energies for heating. For non-residential buildings energy for lighting is also accounted for. Therefore, the primary energy demand is calculated analogously to the procedures in the German *Energieeinsparverordnung* (Energy Saving Ordinance), or *EnEV*. The useful as well as the final energy demand is calculated according

to the accounting rules of DIN V 18599:2011 (non-residential buildings) and DIN 4108-6:2003-06 as well as DIN EN 832 in connection with DIN V 4701-10:2003-08 (residential buildings).

The final energy demand can be calculated according to two different rules: following the *Energiebilanz* (energy balance for national energy statistics) or the *EnEV*. If it is calculated according to *EnEV*, ambient forms of energy (essentially solar thermal heat and ambient heat) which are produced/generated in close proximity to the building in question are set to zero. These forms of energy therefore act like an energy efficiency measure, which reduces the final energy demand. In contrast, according to the *Energiebilanz* all energy forms provided are accounted for. This includes solar thermal energy as well as ambient energy that is made available by means of a heat pump. In this study, final energy demand is calculated according to the rules of the *Energiebilanz*. The only exceptions are heat recovery (HR) units, which are treated like an energy efficiency measure that reduces the final energy demand.

Figure I shows the schematic energy flux diagram, which forms the basis auf the energy accounting.

Figure I: Schematic energy flux diagram



Source: Illustration by Öko-Institut

Developing a representative building typology

For the purpose of this study the entire building stock is represented by 19 building types – nine for residential buildings and ten for non-residential buildings.

- Residential buildings are subdivided into three size classes, each containing three age groups, whose energetic characteristics in their originally built state differ strongly. The three size classes are single- and double-family houses (SDFH), small and medium-sized multi-family houses (SMH/MMH), and large multi-family houses (LMH), each further subdivided into the age classes “until 1948”, “1949 – 1994” and “since 1995”.
- For non-residential buildings the shape, the energy characteristics of the building envelope and, in particular, the buildings usage all have an influence on the building’s energy consumption. There are six different usage types, of which four are subdivided into two age

classes (“up until 1983” and “since 1984”). The six different usage types are (I) residential buildings with mixed use, (II) education, office and administration buildings, (III) commerce and industry buildings, (IV) trade/service and surgery buildings, (V) hotels, restaurants and hospitals, and (VI) other (sports, cultural).

For describing the building stock’s expected future heating demand three standards of thermal insulation are considered:

1. Non-renovated buildings (“non-renovated”)
2. Renovations according to the *EnEV* in 2009 for newly built buildings with an increase in that standard by 25% (*EnEV*₂₀₀₉ -25%) (“fully renovated”)
3. Renovations according to the standard for passive houses (“fully renovated plus”)

The energetic standards of newly built buildings are treated in the same way as the renovation standards. Limiting the number of the considered building standards is necessary in order to reduce the number of possible permutations. Even though only three standards of thermal insulation are considered, the number of permutations amounts to more than 300 given the number of heating technologies described in the following.

Five basic heating technologies are considered in the case of residential buildings. These are:

1. Gas condensing boilers
2. Wood/pellet condensing boilers
3. Electric heat pumps
4. Gas combined heat and power units (CHP)
5. District heating

All heating technology options are considered in combination with ventilation systems with or without heat recovery (HR), as well as with or without usage of solar thermal (ST) energy. The solar thermal system is solely used for sanitary hot water. Buildings with CHP units do not simultaneously feature solar thermal installations. Buildings that are renovated according to the standard “fully renovated plus” always feature a heat recovery system.

For non-residential buildings four heating technologies are considered:

1. Gas condensing boilers
2. Electric, reversible heat pumps
3. Gas combined heat and power units (CHP)
4. District heating

All heating technology options in non-residential buildings are considered with or without photovoltaic panels (electricity self-consumption). Since the generation of cooling, ventilation as well as lighting all have to be accounted for in non-residential buildings according to DIN V 18599, parameters for these types of energy usage are introduced, e.g. for the generation of cooling through absorption cooling machines.

Cost considerations from a microeconomic perspective

For estimating the cost efficiency of different energetic standards and technological options, the overall costs for the various configurations of the different building types are determined by means of a dynamical calculation of profitability. This includes investment costs associated with the building’s energetic standard (e.g. costs for an energetic renovation) as well as operating costs (e.g. energy costs, costs for maintenance) that depend on the building’s technological configuration and its energetic standard. Investment costs for the building’s envelope are subdivided into incidental costs and

costs associated with renovating to a higher energetic standard (additional energetic costs). Cost calculations are based on 2012 prices.

Cost calculations are done from a building owner's perspective, i.e. a microeconomic perspective. Some parameters (e.g. the economic impact of a subsidy scheme) are chosen in such a way that they deviate from a strict microeconomic perspective. This means that, for instance in the case of an energetic renovation for which in principal there are subsidy schemes available, the subsidy scheme is not taken into account, even though it strongly affects the profitability of the renovation.

Net present values are calculated depending on

- The chosen combination of heating insulation standard and heating technology,
- The time at which the building type is transferred into the chosen state, and
- Three different energy price scenarios.

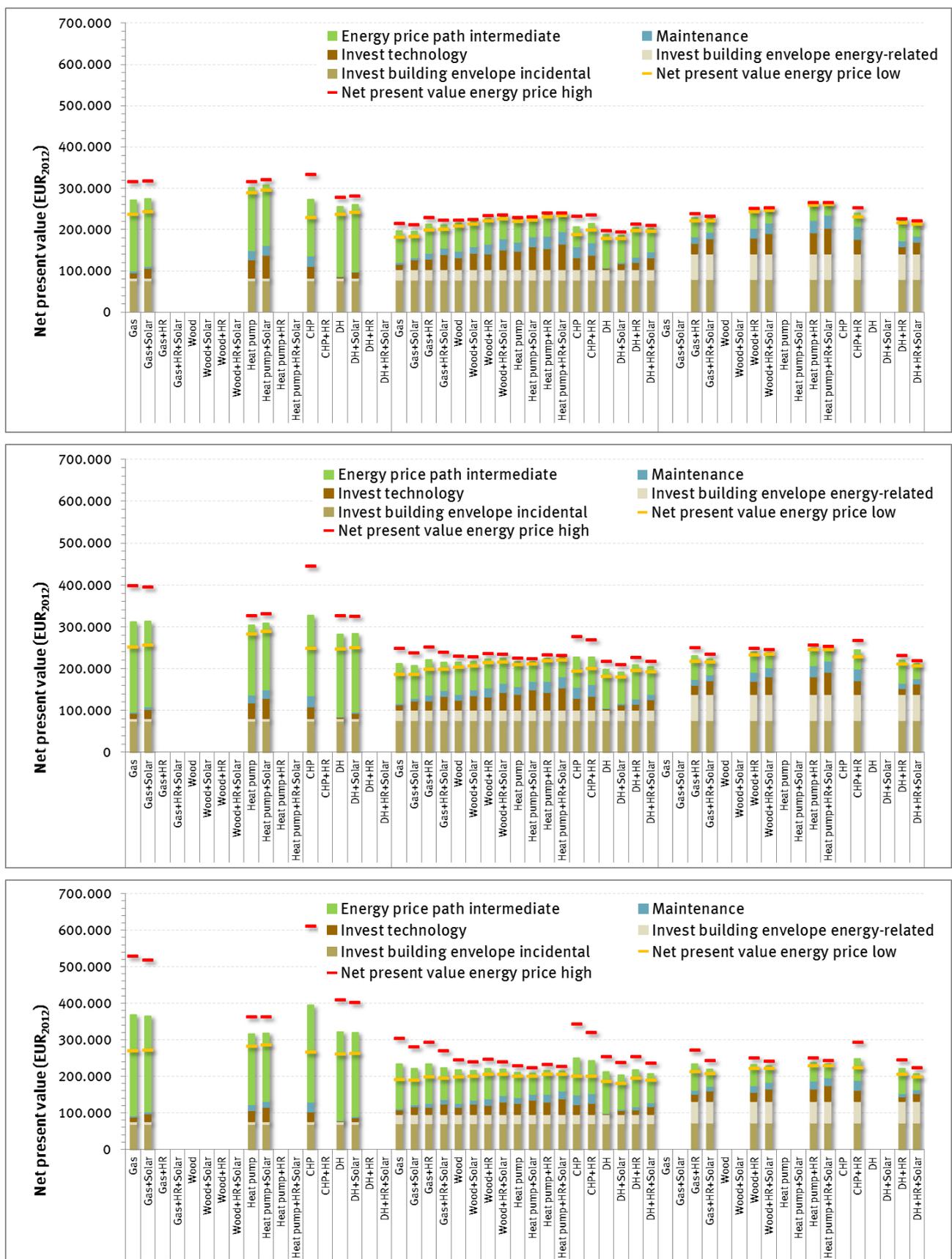
The net present value presents an estimation of how different measures (e.g. energetic renovations reaching differently ambitious energetic standards) differ from an economic point of view. The net present value is calculated based on the technical life time of an outer wall insulation of 40 years.

Figure II shows, as an example, the present net value for small and medium sized multi-family houses of the age class 1949-1994 for the 18 technology options in residential buildings depending on the three different heating insulation standards. Each of the three graphs presents the situation at a different time of investment (2014, 2025 and 2040). Some boxes remain empty, since not every technology option is considered for every heating insulation standard.

The non-renovated state presents the state with the highest net present value for all three residential building types. This holds true independently of the timing of the renovation. The net present value of the renovation standards "fully renovated" and "fully renovated plus" hardly differ. Based on the effects of the learning curves for the investment costs as well as the supposed increase in energy prices, the net present value of the "fully renovated plus" state gradually converges with that of the "fully renovated" state at later times of investment.

The costs of a solar thermal unit are not recaptured in all residential building type configurations. For instance, for SDFH the net present values of the technology options that combine solar thermal units with a condensing gas boiler are only lower than the respective option without a solar thermal unit starting from an investment time in 2025 or later. Installing a ventilation system with heat recovery in SDFH and SMH/MMH leads to markedly higher net present values compared to those without this technology add-on.

Figure II: Net capital values for a SMH/MMH depending on heating technology, insulation standard and time of investment



Source: Calculations by Öko-Institut

Development of different target states for 2050 and derivation of transformation pathways

The overall reduction goal, based on the non-renewable primary energy demand (PE_{NR}), can be illustrated by means of different sector configurations (target states). The two central and intertwined dimensions for those target states are the reduction in final energy demand (“efficiency of the building envelope”) and the composition of the sources of the final energy (the share of renewable energies in particular). The three target states are parameterized such that the broadest possible corridor of future states in terms of these two central dimensions is analyzed. We derive so-called transformation pathways, which show how the status quo building stock is transformed into the respective target states. Additionally, we analyze how the building stock in those different target states interacts with the energy system as a whole.

All three target states fulfil the primary energy reduction goal (PE_{NR} minus 80%), whilst differing in the before-mentioned dimensions. Due to a lack of an unambiguous definition, however, it is unclear to what degree the three target states are consistent with the vision of a nearly climate-neutral building stock. This holds true, in particular, for the qualitative requirement that “buildings have a very low energy demand”. By contrast, the requirement that “the remaining energy demand is predominantly covered by renewable energies” is met in all three target states, as long as the renewable energy fraction of electricity generation and district heating generation is included.

The basis for the progression towards the target states is the replication of the status quo building stock (residential and non-residential buildings) using the here developed building typology. In order to do so, we calibrate each building type according to their status quo distribution of heating insulation standards and technology options. The target states are also based on the developed building typology, but taking into account assumptions for the demand for floor area in 2050, the distribution of insulation standards as well as the technology options. The following target states are being developed (Table I):

Table I: Central assumptions of target states

	Residential buildings			Non-residential buildings		
Rate at which new buildings are being built	decreasing from 0,85% in 2015 to 0,2% in 2050			constant at 1,35% annually		
Rate at which buildings are taken out of use	constant at 0,3% annually			constant at 1,35% annually		
Floor area development until 2050	+ 7%			+/- 0%		
Target states	Target state -70	Target state -55	Target state -40	Target state -45	Target state -35	Target state -25
Reduction in final energy consumption until 2050	-70%	-55%	-40%	-45%	-35%	-25%
Reduction in non-renewable primary energy demand (PE _{NR}) until 2050	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%

Source: Illustration by Öko-Institut

- The final energy consumption of the residential buildings’ target states is reduced by 40% (RB target state -40%), 55% (RB target state -55%), and 70% (RB target state -70%) with respect to the status quo. The RB target state -70% therefore mainly emphasizes efficiency. For RB target state -40%, in contrast, the final energy consumption is reduced less, which leads to higher shares of renewable energies in order to achieve the superior goal of PE_{NR} of -80%.
- The non-residential buildings’ constitution does not allow for such a high reduction in final energy consumption. Therefore, their target states are guided by the maximum possible re-

duction in final energy consumption. The final energy savings range from 25% (NRB target state -25%) via 35% (NRB target state -35%) to 45% (NRB target state -45%).

There are many different restrictions when it comes to energetic renovations of buildings. Restrictions for installing heating insulation, for instance, can be found for nearly all buildings. These restrictions are typically derived from protection-worthy facades (e.g. heritage conservation), geometrical limitations due to walkways and passage ways, or cellar ceilings, that are too low. As a consequence, not all buildings can be renovated to the highest renovation standard. In order to take account of this effect, all 2050 target states have a base of non-renovatable buildings. These buildings represent both, buildings that cannot be renovated due to restrictions and buildings that can only be renovated partially. The non-renovatable base differs between different building types and age classes (Table II). The relatively high base value for multi-family houses of age class “until 1948”, for instance, reflects the share of *Gründerzeit* buildings, whose facades are insulation-restricted.

Table II: Base of non-renovatable buildings (regarding the floor area of non-renovatable buildings in their respective status quo)

Building's age class	SDFH	SMH/MMH/LMH	NRB
until 1948	10%	20%	2,5-10% (depending on the building's usage)
1949-1994	5%	5%	
from 1994	0%	0%	

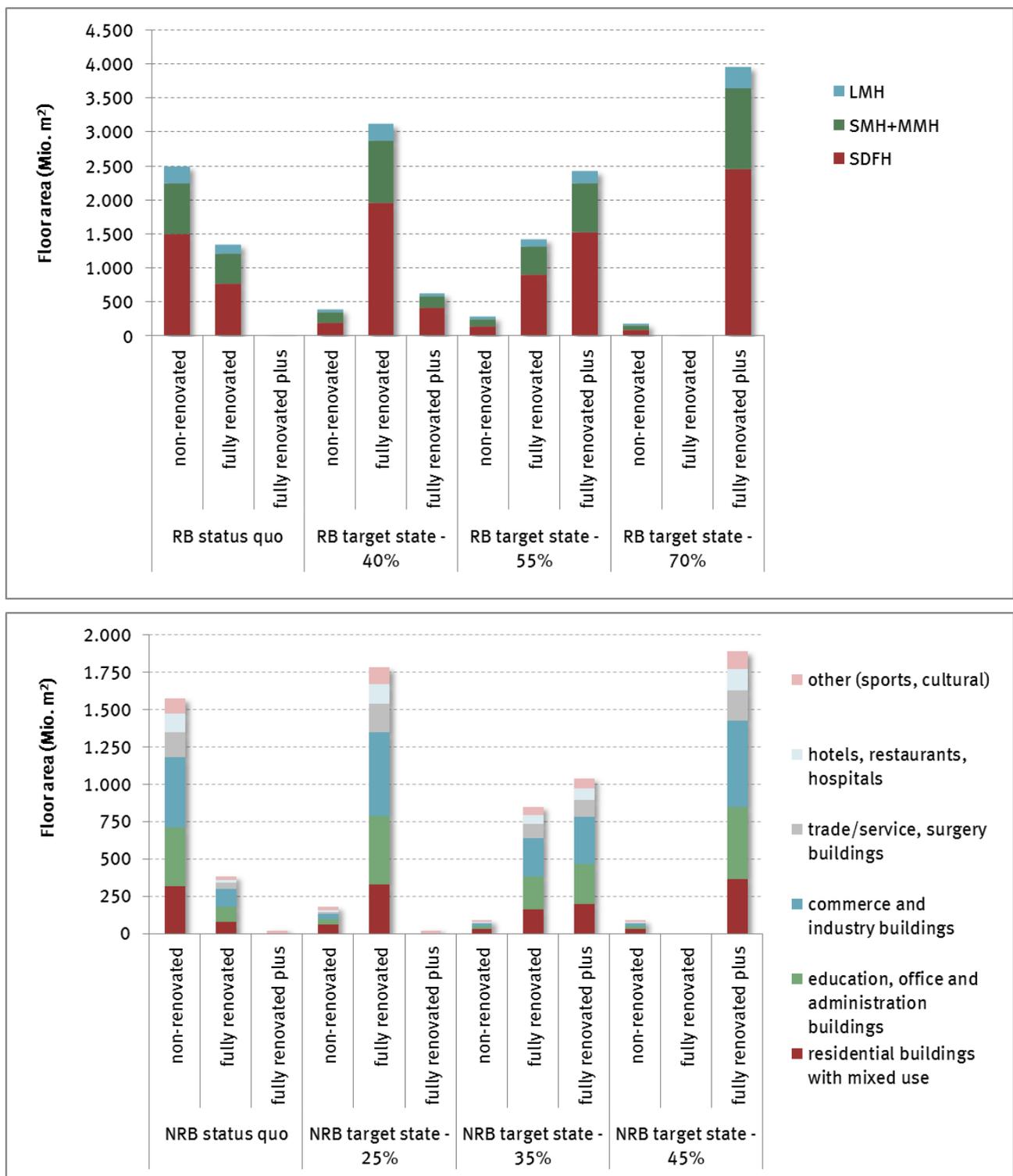
Source: Calculations by Öko-Institut

A further restriction is the use of wood for the future heating supply in buildings. According to UBA (2014), the potential of sustainably-sourced wood-like waste material (including from industry) in 2050 amounts to 85 TWh/a. This therefore presents the upper limit of energy from wood that can be used in residential buildings (for non-residential buildings, wood-based heating technologies are not included in our chosen typology).

Regarding the future distribution of heating supply technologies, we assume that the relative number of buildings connected to district heating (DH) networks remains fairly constant with respect to the status quo, i.e. district heating is not increasing in our scenarios. In residential buildings, the share of wood-pellet condensing boilers is limited by the maximum available potential of wood. The number of gas-driven CHP units increases moderately. Consequently, the essential levers to pull when it comes to heating technologies are the respective shares of gas condensing boilers and heat pumps.

Figure III shows the distribution of the floor area (residential and non-residential buildings) for each renovation standard in 2050. The higher the reduction in final energy consumption, the stronger is the increase in floor area for the renovation standard “fully renovated plus”. In the case of target states RB -70% and NRB -45%, all principally renovatable buildings are renovated to the “fully renovated plus” standard, with only the base of non-renovatable buildings remaining untouched.

Figure III: Floor area distribution of the different renovation standards



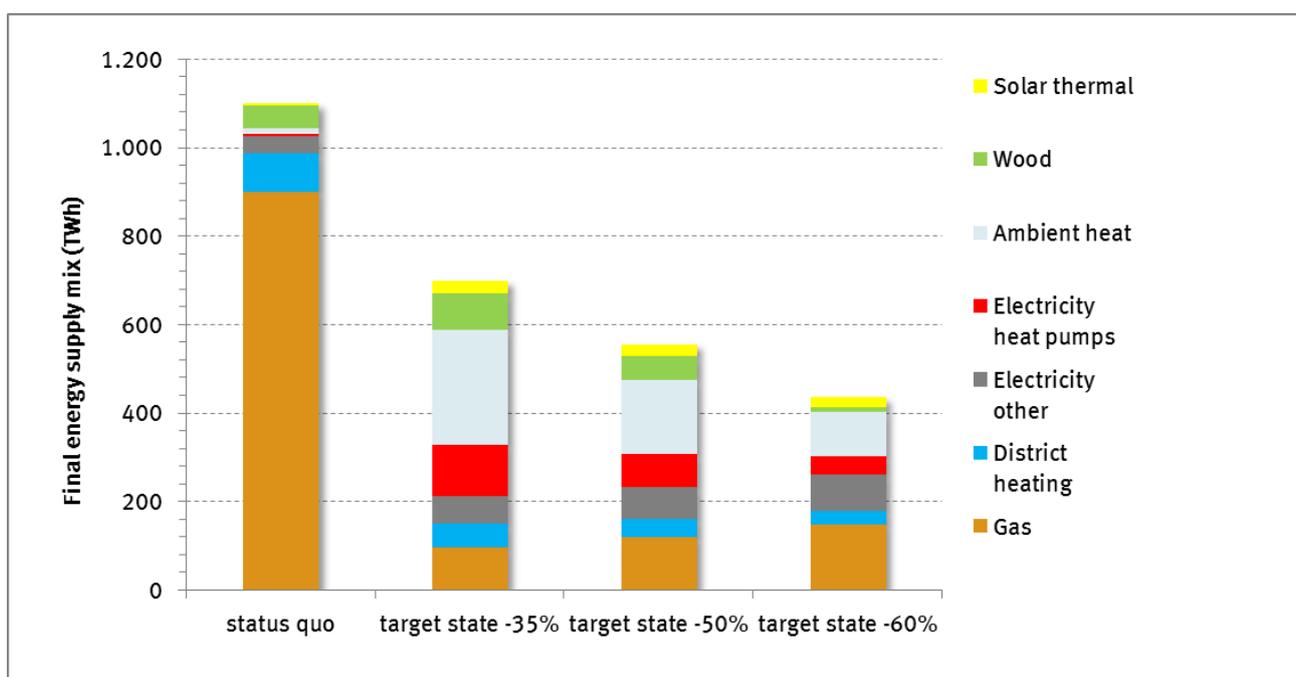
Source: Calculations by Öko-Institut

Target states for the building stock as a whole are derived from combining the respective target states of residential and non-residential buildings. The combined target state of RB target state -70% and NRB target state -45% achieves the highest combined reduction in final energy consumption of -60% (s. Figure IV). In other words, this means that the final energy consumption can at the most be reduced by 60%, given the definition of final energy according to the *Energiebilanz*. In order to achieve

this, all principally renovatable buildings must be transferred into the renovation standard “fully renovated plus”. Combining the two intermediate target states of residential and non-residential buildings (RB target state -55% and NRB target state -35%, respectively) results in a combined final energy reduction of -50%. Doing so for the two target states with the smallest reduction in final energy consumption (RB target state -40% and NRB target state -25%) yields a combined reduction of roughly 35%. Thus, the long term transformation goal for the entire building sector with respect to the reduction in final energy consumption is defined by a corridor, which ranges from a reduction of 35% to 60%.

Not only do the end members of the target corridor differ with respect to the final energy savings, but also with respect to the final energy supply mix (s. Figure IV). Due to the higher heating insulation requirements, 55 TWh more gas may be used in target state -60% in comparison to target state -35%. In contrast, target state -35% requires almost three times more final energy from renewable sources in order to reach the PE_{NR} -80% goal. This only refers to the extra renewable energy supplied by wood, ambient heat and solar thermal heat; it does not yet include the renewable share of the electricity demand. Additionally, target state -35% shows a strong increase in electricity demand. Target state -35% and target state -60% differ by around 55 TWh, i.e. the electricity demand of target state -35% is higher by 55 TWh compared to target state -60%². The primary energy factor for electricity used within this study implicitly assumes a high share of renewable energy sources. The higher demand for electricity in target state -35%, therefore leads to higher pressures on increasing the capacity for electricity sourced by renewable energies.

Figure IV: Final energy supply mix (according to the Energiebilanz) for the three target states of the entire building sector

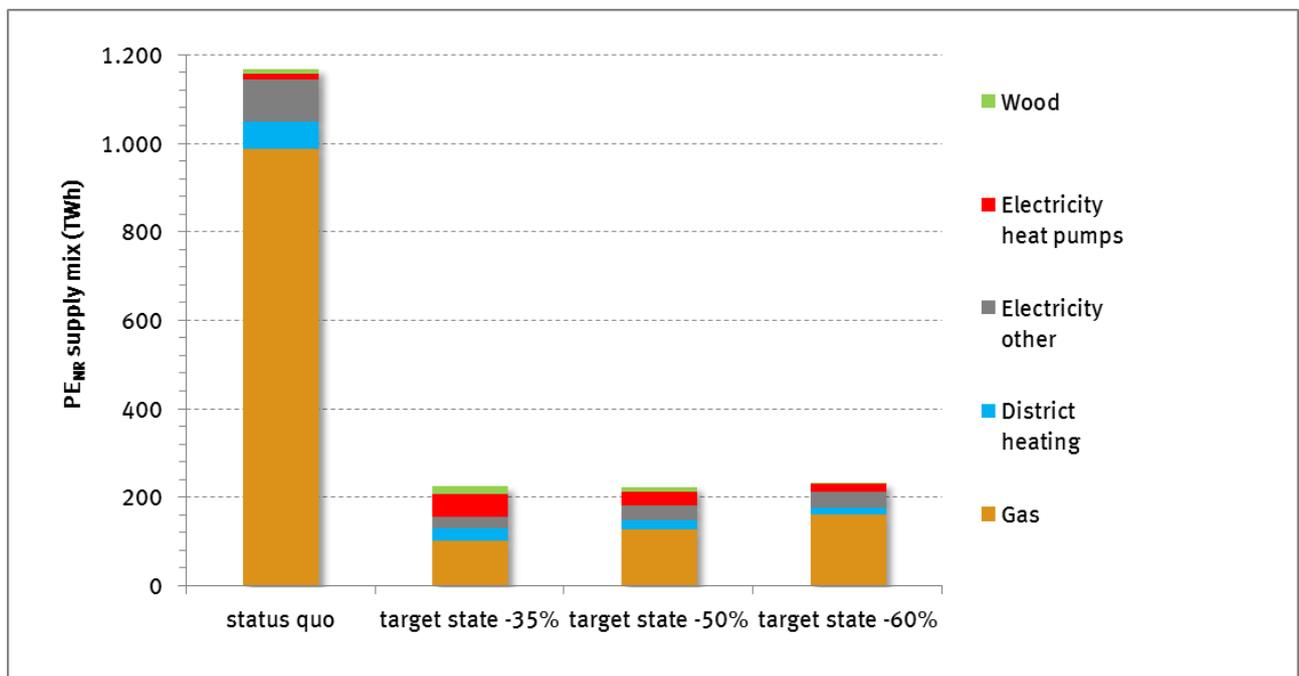


Source: Calculations by Öko-Institut

² For comparison: electricity produced from renewable energy sources amounted to 160 TWh in 2014. The renewable share of gross electricity consumption therefore equates to roughly 28%.

Figure V shows the distribution of the non-renewable primary energy consumption PE_{NR} for different target states. PE_{NR} is lowered by 80% in all target states. The remaining contributions to PE_{NR} are based on heating technologies fueled by fossil gas, the non-renewable primary energy shares of the electricity and district heat supplies, as well as from wood boilers.

Figure V: Non-renewable primary energy supply mix for the three target states of the entire building sector

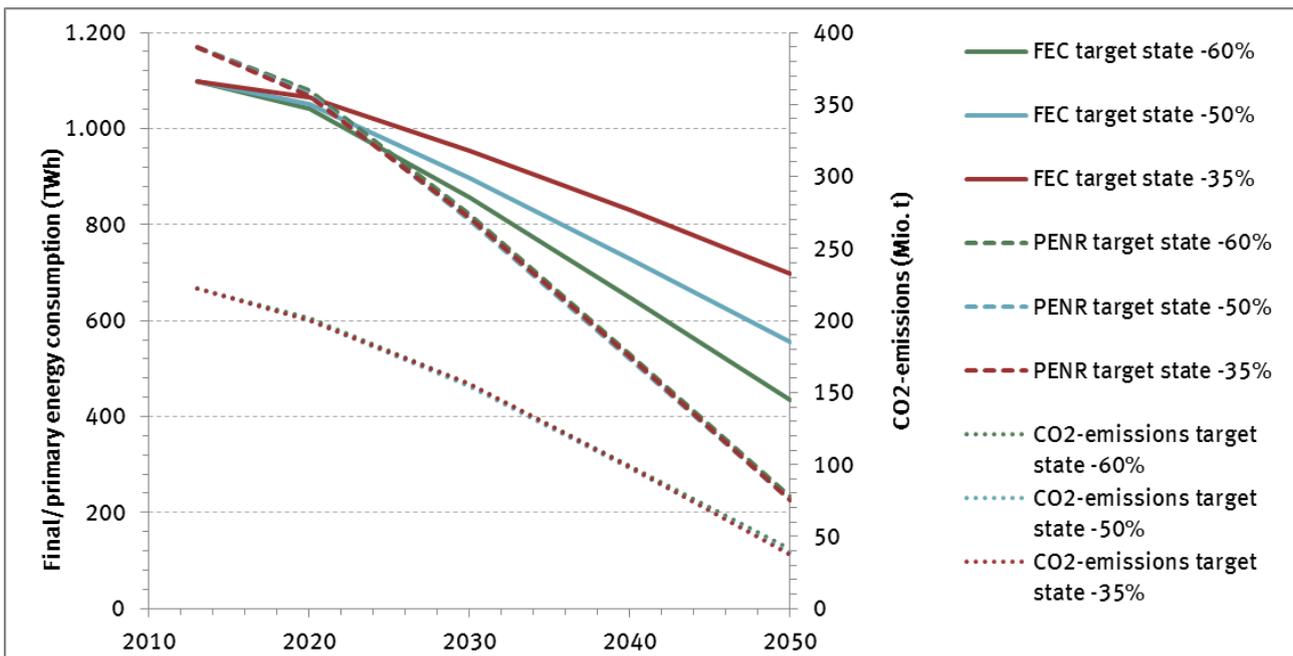


Source: Calculations by Öko-Institut

Figure VI shows the development of key energy-related parameters for the three target states of the building sector as a whole. The development of the final energy consumption is the only parameter showing strong differences between the three transformation pathways. Regarding PE_{NR} and CO_2 emissions, the three transformation pathways are almost identical. CO_2 emissions caused by the building sector decrease by 81% with respect to the status quo for target state -60%, and by around 83% for the other two target states. The CO_2 emissions accounting here includes emissions from electricity generation needed for the thermal conditioning of buildings (e.g. electricity for heat pumps, or ventilation systems) that are typically being accounted for in the conversion sector. The same is true for district heating.

The build-up of a market for renovations that is able to supply energetic renovations in the required volumes and depth, needs a certain time lead. Therefore, we assume that renovation rates increase slowly between 2014 and 2020, before reaching a magnitude of 2% per year from 2021 onwards. The relatively moderate increase in renovation rates leads to pathways of final and primary energy that only show a marked decrease after 2020. The stronger decrease in primary energy relative to the decrease in final energy until 2020 is based on the fact that the coming years will experience a stronger switch to CO_2 saving heating technologies compared to the increase in heating insulation measures.

Figure VI: Key energetic parameters of the transformation pathways for the entire building sector

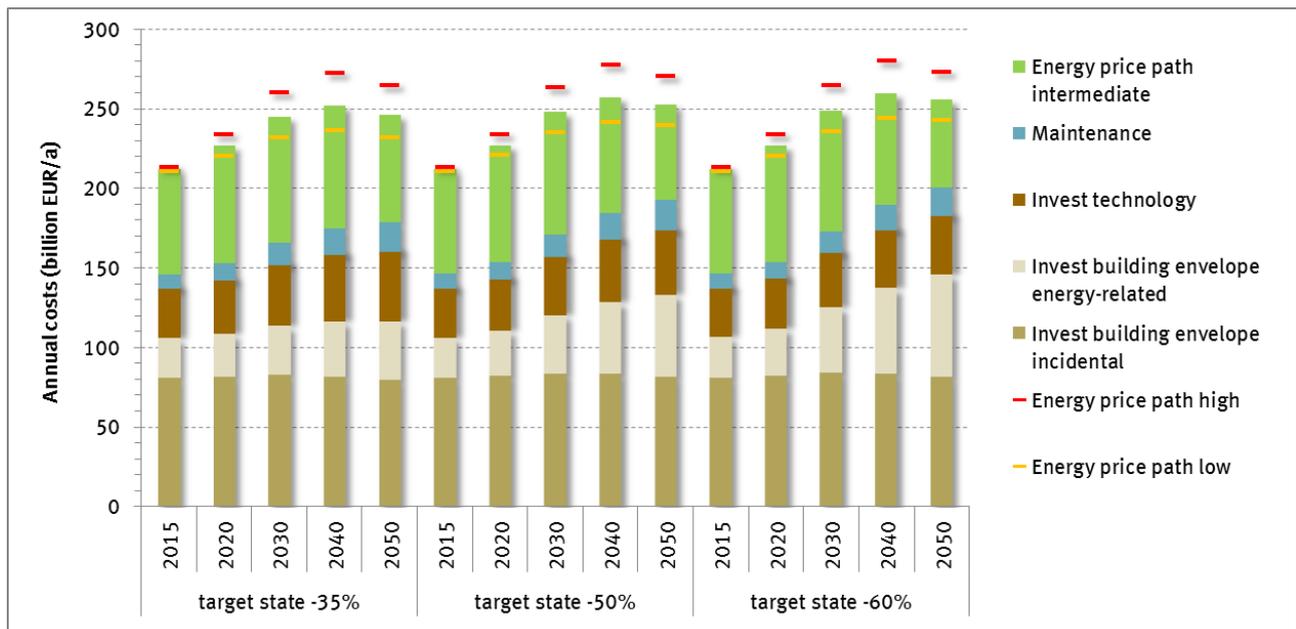


Source: Calculations by Öko-Institut

Figure VII shows the progression of annual costs for the three target states of the entire building sector. These are based on the sum of the annual costs for the residential and non-residential buildings. The annual costs increase from around €210 billion in 2015 to a maximum of €260 billion in 2040 (target states -60% and -50%), before decreasing again by 2% until 2050. The annual costs are slightly higher for the two target states with higher energy efficiency saving ambitions than for the one with lower ambitions (target state -35%). The difference in costs, however, is very small.

When dividing the residential buildings' total annual costs for the intermediate energy price path by the total floor area, we obtain specific costs of around €29/m² in 2015 and €35/m² in 2050. For the low energy price path the specific costs rise from €29/m² in 2015 to around €33/m² in 2050, which equals an increase by 16%. For the high energy price path the specific costs reach a maximum of €37/m².

Figure VII: Annual costs of the transformation pathways for the entire building sector



Source: Calculations by Öko-Institut

In conclusion, the three bottom-up developed target states differ with respect to the following key parameters:

- Final energy savings: for all three target states the majority of residential and non-residential buildings will in 2050 be energetically renovated to a standard that is higher than that for newly built buildings under *EnEV 2009*. For target state -60% all principally renovatable buildings are renovated with passive house components and include a heat-recovering ventilation system.
- Final energy supply mix: Target state -60% can afford to use a higher amount of (fossil) gas compared to target state -35%. This is caused by the fact that for target state -60% a higher proportion of realizing the overall primary energy goal is achieved by ambitious measures to reduce the final energy consumption. These two target states additionally show considerable differences in their use of wood, ambient heat and electricity.
- CO₂ emissions: the overall PE-related energy savings goal leads to a reduction of CO₂ emissions of 81-83% in all three target states.
- Costs: the annual costs for the target state with the highest heating insulation efforts (target state -60%) are slightly higher than for the other target states. Regarding the total costs as well as the cost progression over the years, these differences, however, are very small. Considering the great uncertainties, which many assumptions that had to be made during the calculations are based on, it is difficult to derive robust statements as to which target state should be given priority from a cost perspective.

Since no target state presents a clearly preferable result from a cost perspective, other criteria become more relevant. Amongst others, these are:

- The acceptance by society regarding the various measures on which the target states are founded. In particular, this concerns the societal acceptance for the roll-out auf new renewable energy plants (mostly wind and solar PV) as well as their required infrastructure (e.g. ex-

pansion of the electricity grid) for target state -35% in comparison to the very profound renovation activities for target state -60%, mostly relating to the heating insulation of buildings.

- The challenges that arise from the increased roll-out of heat pumps regarding the interaction with the electricity system: heat pumps as a heating technology mostly use electricity at times of high electricity demand in other sectors as well as when photovoltaics generate comparatively little electricity. An additional aspect is noise emissions connected with the increased roll-out of air-sourced heat pumps.
- The possibly diverging distribution of costs and benefits. Here, key questions would be: Which costs lead to investments within Germany, and which to investments in other countries? How are the costs of the different target states shared between landlords and tenants?

The interaction of the three sector-specific target states with the entire energy system and their compatibility with the overall *Energiewende* goals is analyzed in an additional work package. For doing so, the three target states are parameterized in order to be compatible with the REMod-D model, which integrates the entire energy system. Three groups of scenarios were analyzed, namely:

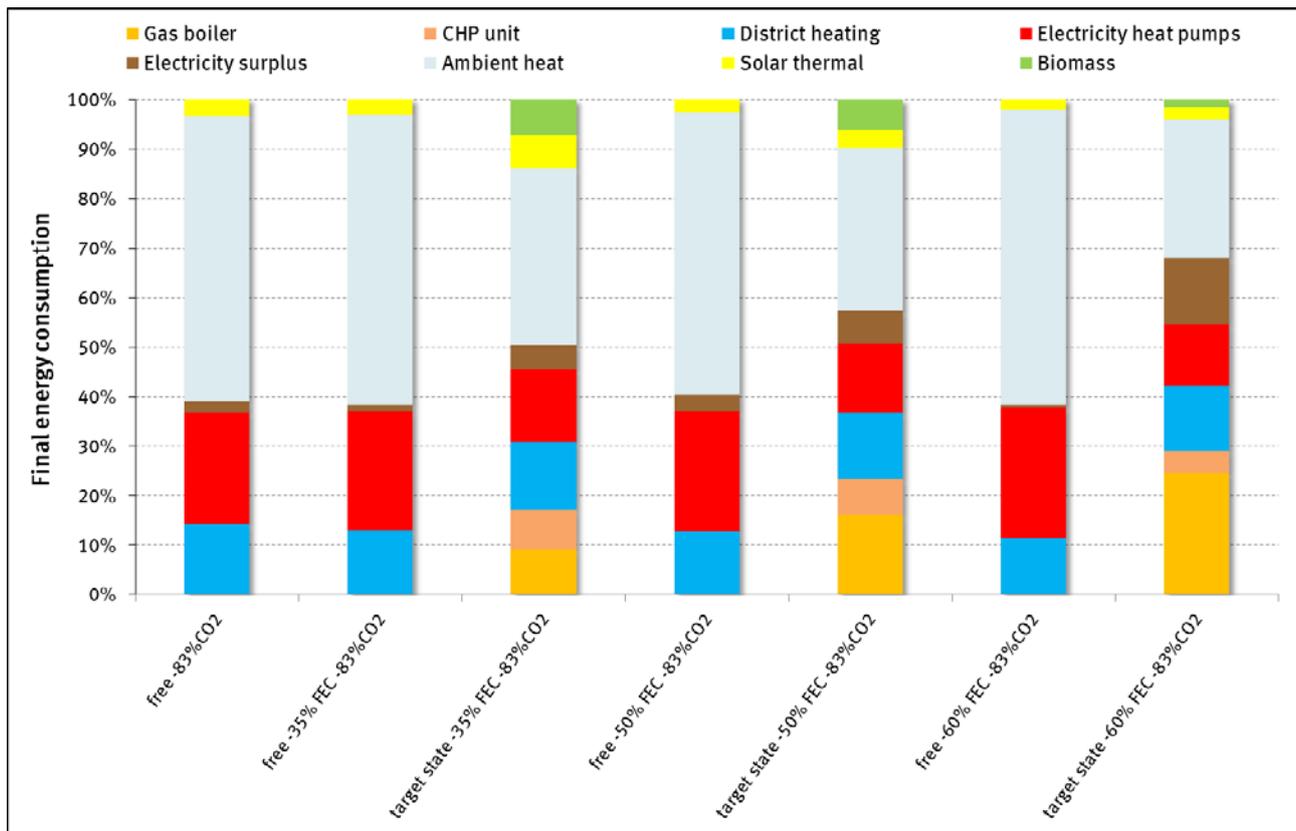
- a) Fixed target states with invariable final energy savings as well as an invariable distribution of technologies,
- b) Target states with fixed final energy savings, but a freely optimized technology distribution,
- c) An entirely free optimization, in which the reduction of the final energy consumption as well as the technology distribution is determined by the model.

The free optimization leads to a reduction in final energy demand by only around 20% (as opposed to reductions of 60%, 50% and 35% for the fixed target states). This is a consequence of the higher costs associated with the target states that show more ambitious renovation activities. The scenarios that allow for an optimization of the technology distribution arrive at different technology distributions compared with the fixed target states (s. Figure VIII).

In the free optimization scenario heat pumps clearly dominate the technology distribution, followed by district heating. This shift is a result of the greater capability of these technologies to interact with the electricity system. Decentralized gas boilers, CHP units or wood boilers are hardly present in the free optimization scenario. Their fuels are mostly used in the other sectors, in particular in industry and transport. If those fuels are not available for these sectors, they have to be replaced by synthesized fuels, for which an additional energy conversion is necessary. The extra conversion, however, leads to higher energy losses, and, overall, to a higher demand in electricity in the energy system as a whole. From a system's perspective, it is therefore cheaper to use those fuels in the industry and mobility sectors, and to generate low-temperature heat in buildings via heat pumps.

Different technology distributions also reflect different perspectives for the development of the target states. The technology distribution in the fixed target states, for instance, takes account of the considerations of landlords and building contractors. Here, criteria such as energy generation autarky play a bigger role than a possible optimization of the energy system as a whole.

Figure VIII: Distribution of final energy consumption sources for heating in 2050 for different scenarios



Source: Calculations by Fraunhofer ISE

As mentioned before, deriving robust statements from the comparison of the different target states is only possible, if the basic parameters differ significantly. In order to put our results into perspective, the main uncertainties underpinning the development of the target states are summarized below. Some of the uncertainties lead directly to further research needs; others result from simplifications, which were necessary in order to represent the building sector as well as the energy system:

- Data situation: especially for non-residential buildings the data situation for the status quo status is still very bad. This refers to e.g. areas and technology distributions. In addition, there is a big knowledge gap concerning the renovation activities that are taking place outside of the KfW subsidy schemes.
- Following the great heterogeneity within in the building sector, some of the functional relationships (e.g. cost functions, conversion of calculated energy demand to energy consumption values) are based on regression functions, which show a relatively low coefficient of determination. These functions are therefore only limited in use.
- Technological developments: it is very difficult to foresee the development of the technological portfolio for the coming 35 years. In the case of the building sector this holds true for predictions about the relevance of power-to-gas, power-to-heat, gas-driven heat pumps or fuel cells. The development of the target states is therefore based on a conservative approach, which only makes use of technologies that are already established today.
- Renewable energy imports: we gain additional degrees of freedom via the possibility of importing more electricity based on renewable energies, more biomass as well as more synthetic gases generated via renewable energies, and thereby reduce the pressure of rolling out more renewable energies within Germany. Because of uncertainties about the actual import quanti-

ties, we again opt for a conservative approach and leave renewable energy imports out altogether.

- **Biomass:** here the question arises in which sector biomass should preferentially be used, given its restricted availability. The more biomass is used in the building sector, the smaller are the shares available to other sectors. This, however, also implies: the smaller the share of biomass for the building sector, the greater are the degrees of freedom in the other sectors to reach their respective climate protection goals.
- **Dynamics of the renovation market:** all target states require a significant expansion of the renovation market. Relevant in this context is that a considerably greater volume of renovations is realized at a sufficiently high quality level. Especially for the ambitious levels of renovation, the quality of the renovation is paramount. The question therefore is how quickly the necessary capacities can be built up, in particular in the craftsmen trades. For the development of the transformation pathways, we make relatively cautious assumptions, which are reflected in the initially only slowly rising rates of renovation.
- **Climate protection contribution:** the reduction goal for primary energy (PE_{NR} minus 80%) implies that the building sector must reduce its CO₂ emissions by about 80%. Here the question arises, if this contribution is sufficient given the reduction challenges other sectors are confronted with (e.g. transport, industrial process-related emissions). It might therefore be interesting to investigate, with which measures an even greater reduction contribution could be realized in the building sector (e.g. for a CO₂ emissions reduction goal of 95%), or how a completely climate-neutral building sector should be designed (both, from a building-sector-only perspective, and from the system-as-a-whole perspective).

1 Einleitung und Ziele des Vorhabens

Hinsichtlich der Energiewendeziele kommt dem Gebäudebereich eine wichtige Rolle zu. Entsprechend verfolgt die Bundesregierung das Ziel, bis zum Jahr 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebereich zu erreichen. Es wird angestrebt, „*dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt wird*“ (BMW 2010). Die technische Machbarkeit klimaneutraler Sanierungen und Neubauten wurde im Rahmen zahlreicher Demonstrationsprojekte hinreichend belegt. Es fehlt jedoch an konkreten Visionen, wie der gesamte Bestand an Wohn- und Nichtwohngebäuden im Jahr 2050 energetisch beschaffen sein müsste, um das sektorbezogene Transformationsziel zu erreichen. Dabei geht es u.a. um Fragen nach dem notwendigen Wärmeschutzniveau der Gebäudehülle, dem Energieträger- und Technikmix, über den die thermische Konditionierung der Gebäude erfolgt, sowie die damit einhergehenden Kosten. Ferner geht es um die Frage, wie der Gebäudesektor in seiner Rolle als Energieverbraucher und -erzeuger langfristig mit dem gesamten Energiesystem interagiert.

Das vorliegende Forschungsvorhaben verfolgt das übergeordnete Ziel aufzuzeigen, wie der Gebäudebestand langfristig bis 2050 in einen nahezu klimaneutralen Zustand überführt werden kann. Dazu werden in dem Vorhaben zwei verschiedene Perspektiven eingenommen:

- Auf der Ebene des Einzelgebäudes sollen Konzepte aufgezeigt werden, mit welchen Techniken bis 2050 ein (nahezu) klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden kann und welche Kosten sich mit den verschiedenen Optionen der energetischen Modernisierung aus der einzelwirtschaftlichen Perspektive verbinden.
- Auf der Ebene des gesamten Gebäudebestands sollen verschiedene Zielbilder entwickelt werden, die darstellen, wie ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand im Jahr 2050 aussehen und wie der heutige Gebäudebestand in die jeweiligen Zielbilder überführt werden könnte (Transformationspfade). Und es soll eine Vorstellung darüber entwickelt werden, wie die verschiedenen (sektorbezogenen) Zielbilder mit dem gesamten (transformierten) Energiesystem interagieren, das die Energiewendeziele erfüllt.

Der Bericht beginnt mit einer Diskussion über die Definition des übergeordneten Ziels eines „nahezu klimaneutralen“ Gebäudebestands. Dabei werden auch die Bilanzierungsgrenzen festgelegt, denen alle weiteren Berechnungsschritte des Vorhabens unterliegen (Kapitel 2). Es folgt eine Übersicht über das Technikportfolio für Wärmeschutz und die thermischen Versorgungssysteme für Wohn- und Nichtwohngebäude unter Berücksichtigung künftiger absehbarer Technikentwicklungen (Kapitel 3). Kapitel 4 widmet sich der Entwicklung einer Gebäudetypologie, mit Hilfe derer der heutige Gebäudebestand abgebildet werden kann. Die Typologie erfasst die Wohngebäude sowie die Nichtwohngebäude des GHD- und Industriesektors. Für die verschiedenen Gebäudetypen führen die unterschiedlichen Wärmeschutzstandards, Technikoptionen, Sanierungszeitpunkte zu unterschiedlichen Kosten und Einsparungen. Für ausgewählte Beispielfälle werden die entsprechenden Kosten in Kapitel 5 dargestellt. Aufbauend auf der entwickelten Gebäudetypologie werden in Kapitel 6 verschiedene Visionen (Zielbilder) dargestellt, wie ein Gebäudebestand im Jahr 2050 aussehen könnte, der die Energiewendeziele (nahezu klimaneutraler Gebäudebestand) erfüllt. Die Überführung des Ist-Zustandes in die verschiedenen Zielbilder wird mit Hilfe sogenannter Transformationspfade beschrieben. Obendrein erfolgt eine Analyse, wie sich die verschiedenen Zielbilder mit den Energiewendeziele für das gesamte Energiesystem vertragen. Der Bericht schließt mit einer knappen Darstellung des politischen Anpassungsbedarfs, der sich aus den Erkenntnissen der Forschungsergebnisse ableiten lässt (Kapitel 7).

2 Definition Klimaneutralität des Gebäudebestands

Im Rahmen des Energiekonzepts fasste die Bundesregierung das Ziel, bis zur Mitte des Jahrhunderts einen „nahezu klimaneutralen“ Gebäudebestand zu haben (BMWi 2010). Im Kontext der vorliegenden Studie bedarf der im Rahmen der politischen Zielsetzung verwendete Begriff „nahezu klimaneutraler“ Gebäudebestand eine Präzisierung, die über die im Energiekonzept bzw. dem Eckpunktepapier Energieeffizienz (BMWi 2011) genannte Definition hinausgeht.

Im Eckpunktepapier Energieeffizienz wird folgende Definition verwendet: *„Bis 2050 wollen wir einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand realisieren. Klimaneutral heißt, dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf (Minderung des Primärenergiebedarfs um 80 % bis 2050) zum überwiegenden Teil durch erneuerbare Energien gedeckt wird.“*

Im Kontext dieses Vorhabens wird die gegebene Definition weiter konkretisiert. Die Definition des Begriffes klimaneutraler Gebäudebestand im Eckpunktepapier bietet an folgenden Stellen Spielraum für Interpretationen, die für eine methodisch konsistente Bearbeitung eindeutig definiert werden müssen:

- Der Begriff „sehr geringer Energiebedarf“ klärt nicht, ob hier der Nutzenergiebedarf, der Endenergiebedarf oder der Primärenergiebedarf des Gebäudes gemeint ist. Auch wird nicht quantifiziert, was unter „gering“ zu verstehen ist.
- Es werden drei quantitative Aussagen getroffen: Das Zieljahr ist definiert, der Primärenergiebedarf soll um 80 % sinken und der verbleibende Energiebedarf soll überwiegend, d.h. zu mindestens 50 % durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Aufgrund der fehlenden Klärung des Begriffs „Energiebedarf“ sind diese quantitativen Ziele allerdings nicht eindeutig definiert.

Ergänzend zu den Zielen im Gebäudesektor ist in BMWi (2010) bis 2050 eine Reduktion des gesamten Primärenergieverbrauchs um 50 %, eine Reduktion des Stromverbrauchs um 25 % und eine Reduktion des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor um 40 % festgeschrieben. Diese Ziele fließen in die Betrachtungen des gesamten Energiesystems ein (vgl. Kapitel 6.3).

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Bilanzierungsgrundsätze dargestellt, mögliche Interpretationen des Ziels diskutiert und im Anschluss die in dieser Studie vorgenommenen Setzungen beschrieben.

2.1 Bilanzierung

Es werden alle Primärenergieflüsse, die zur Raumkonditionierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Bereich der Privathaushalte und des GHD-Sektors verwendet werden, erfasst. Dies umfasst für beide Gebäudesegmente den Primärenergieaufwand, der zur Deckung der Nutzenergie für Wärme, Kälte, Be- und Entfeuchtung, Luftförderung und Hilfsenergie für die Wärmebereitstellung notwendig ist. Für Nichtwohngebäude wird zusätzlich die Beleuchtung bilanziert. Die Berechnung des Primärenergiebedarfs erfolgt damit analog dem Vorgehen nach der EnEV.

Der Nutz- und Endenergiebedarf wird bei Nichtwohngebäuden entsprechend der Bilanzgrenzen der DIN V 18599:2011³ und bei Wohngebäuden der DIN 4108-6:2003-06⁴, bzw. DIN EN 832⁵ in Verbindung mit DIN V 4701-10:2003-08⁶ bilanziert (vgl. Abbildung 1).

Die Deckung des Nutzenergiebedarfs erfolgt durch externen Endenergiebezug und lokal gewandelte Umweltenergien. Als Umweltenergie wird in diesem Kontext Solarwärme, Umweltwärme bzw. -kälte als Quelle für Wärmepumpen, Abwärme aus Wärmerückgewinnung sowie lokal generierter und eigener Strom bezeichnet (vgl. Abbildung 2).

Der Endenergiebedarf kann anhand zweier verschiedener Definitionen, nämlich nach den Regeln der Energiebilanz oder nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) berechnet werden. Wird der Endenergiebedarf nach den Vorgaben der EnEV ermittelt, werden die Umweltenergien (solare Strahlungsenergie, Umgebungswärme), die in einem unmittelbaren räumlichen Zusammenhang zum Gebäude gewonnen werden, gleich null gesetzt. Sie wirken damit wie eine Effizienzmaßnahme, die den Endenergiebedarf reduziert. Demgegenüber bilanziert die Energiebilanz die gesamte dem Gebäude zugeführte Energie. Solarthermische Wärme sowie Umgebungswärme, die mittels einer Wärmepumpe nutzbar gemacht wird, werden demnach auf den Endenergiebedarf angerechnet. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wird die Endenergie nach den Regeln der Energiebilanz berechnet. Ausnahme bilden Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG), die wie eine Effizienztechnik, die den Endenergiebedarf reduziert, behandelt werden.

Der Primärenergieaufwand setzt sich aus einem erneuerbaren Anteil (PE_{EE}) und einem nichterneuerbaren Anteil (P_{NE}) zusammen. Der erneuerbare Anteil PE_{EE} setzt sich zusammen aus der lokal am Gebäude gewandelten Umweltenergie (UE , $PE_{EE,lokal}$) und dem zentral gewandelten Anteil ($PE_{EE,zentral}$).

$$Primärenergie_{GES} = Primärenergie_{NE} + Primärenergie_{EE} = P_{NE} + PE_{EE,zentral} + PE_{EE,lokal} \quad Gl. (1)$$

Die gesamte Primärenergie ergibt sich aus folgender Gleichung⁷.

$$Primärenergie_{GES} = ((Nutzenergie \times Aufwandszahl) - UE) \times (PEF_{NE} + PEF_{EE,zentral}) + UE \times PEF_{EE,lokal} \quad Gl. (2)$$

Da bei der lokal am Gebäude gewandelten Umweltenergie (UE) Wandlungs- und Verteilverluste vernachlässigt werden können, kann Gl. (2) mit

$$PEF_{EE,lokal} = 1$$

folgendermaßen dargestellt werden:

$$Primärenergie_{GES} = ((Nutzenergie \times Aufwandszahl) - UE) \times (PEF_{NE} + PEF_{EE,zentral}) + UE \quad Gl. (3)$$

Als Aufwandszahl wird im Folgenden jeweils das Verhältnis von Energieaufwänden bezeichnet. Beispielsweise repräsentiert die endenergetische Aufwandszahl das Verhältnis aus dem Endenergieaufwand und dem Nutzenergiebedarf.

³ DIN V 18599:2011, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.

⁴ DIN 4108-6:2003-06, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.

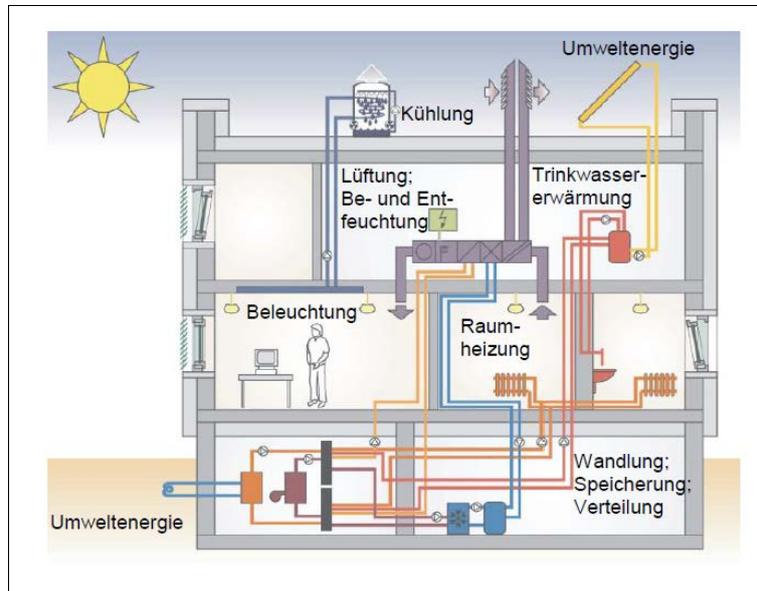
⁵ DIN EN ISO 832:2003-06: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs - Wohngebäude.

⁶ DIN V 4701-10:2003-08, Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung.

⁷ PEF_{NE} ; PEF_{EE} : Primärenergiefaktoren; nicht-erneuerbarer Anteil, erneuerbarer Anteil, UE : Umweltenergie.

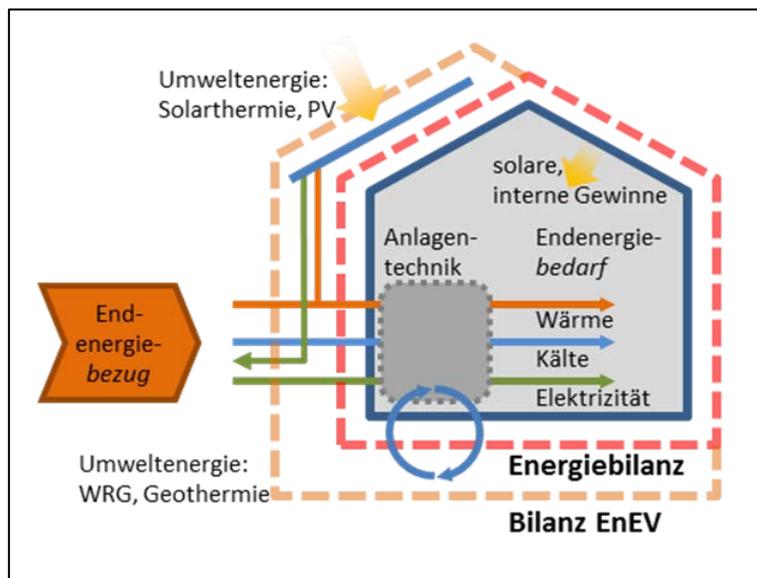
Im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass der nukleare Anteil der nichterneuerbaren Energieströme vernachlässigt wird.

Abbildung 1: Bilanzräume gemäß DIN 18599⁸



Quelle: DIN 18599

Abbildung 2: Bilanzgrenze Gebäude⁹



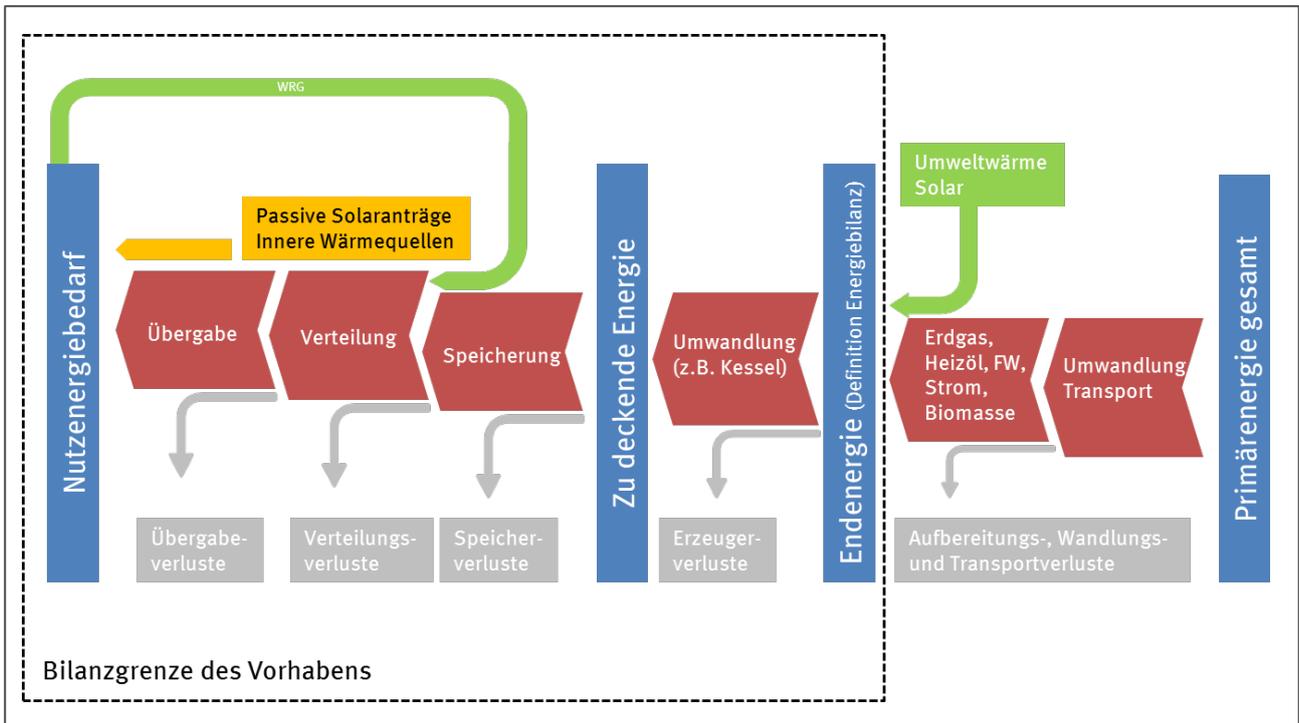
Quelle: Eigene Darstellung

⁸ Für Nichtwohngebäude erfolgt die Berechnung des Energiebedarfs entsprechend der DIN 18599, für Wohngebäude entsprechend der DIN 4108 bzw. EN 832, wobei einheitliche Begriffsdefinitionen nach aktueller EnEV bzw. DIN 18599 verwendet werden.

⁹ Der Endenergiebezug, der zur Konditionierung des Gebäudes benötigt wird (Heizen/Kühlen, Be- und Entlüften (ggf. inkl. Be- und Entfeuchten), Beleuchten, Hilfsenergie zum Betrieb haustechnischer Anlagen) wird primärenergetisch bewertet.

Zusammenfassend zeigt Abbildung 3 das schematische Energieflussbild, das der Bilanzierung zugrunde liegt.

Abbildung 3: Schematisches Energieflussbild



Quelle: Eigene Darstellung

2.2 Festlegungen im Rahmen der Studie

Im Rahmen dieser Studie werden folgende Definitionen verwendet:

Primärenergie und Anteil erneuerbarer Energien: Klimaneutralität ist prinzipiell dann erreicht, wenn der nicht-erneuerbare Anteil des Primärenergiebedarfs (PE_{NE}) für die Raumkonditionierung 0 % beträgt.

Von einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand im Sinne des Eckpunktepapiers Energieeffizienz (BMWi 2011) wird dann gesprochen,

- wenn der nicht erneuerbare Anteil des Primärenergiebedarfs (PE_{NE}) für die Raumkonditionierung um 80 % gegenüber dem Referenzjahr 2008 reduziert und
- der verbleibende, sehr geringe Endenergiebedarf überwiegend, also zu mehr als 50 % aus erneuerbaren Quellen gedeckt wird.

Bezugsgröße ist jeweils der gesamte Gebäudebestand in den Sektoren Privathaushalte und GHD im Jahr 2050.

Anforderungen an den spezifischen Endenergiebedarf: Das dem Gebäudesektor langfristig zur Verfügung stehende Potenzial erneuerbarer Primärenergiequellen ist begrenzt. Dies bedeutet, dass auch bei einer rein auf erneuerbaren Energien basierenden Primärenergiebereitstellung strenge Anforderungen an den spezifischen Endenergiebedarf der Gebäude gestellt werden müssen. Bei der Verwendung der Endenergiedefinition im Sinne der Energiebilanz (s.o.) erfordert dies strenge Vorga-

ben für den Wärmeschutz sowie die Effizienz der Versorgungstechnik. Diesem Sachverhalt wird durch die definitorische Einschränkung „sehr geringer Endenergiebedarf“ Rechnung getragen.

Die vorgenannten Setzungen hinsichtlich der Anforderungen implizieren, dass bezogen auf das Langfristziel eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands die Reduktion des nicht-erneuerbaren Anteils der Primärenergie die einzige quantifizierte Zielgröße ist. Mit den Festlegungen in Bezug auf Bilanzierungsmethodik und Bilanzgrenzen ergeben sich verschiedene Maßnahmen, die zum Erreichen eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes beitragen können:

1. Eine Reduktion des Endenergiebedarfs infolge der Reduktion des Nutzenergiebedarfs durch die
 - Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle (Reduktion der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste)
 - passive Nutzung erneuerbarer Energien („passive Solarenergienutzung“)
 - verstärkte Tageslichtnutzung bei Nicht-Wohngebäuden (NWG)
2. Eine Verringerung der Aufwandszahl der Versorgungstechnik
3. Eine verstärkte Nutzung lokaler erneuerbarer Energien
4. Änderungen an der Zusammensetzung des Energieträgermixes, dabei insbesondere die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger auf zentraler Ebene

Aus Gleichung (2) wird aber auch deutlich, dass die drei Größen

- i. Nicht-erneuerbarer Anteil Primärenergie (PE_{NE})
- ii. Anteil der erneuerbaren Energien an der Primärenergie (PE_{EE}/PE_{GES}) und
- iii. Nutz- bzw. Endenergiebedarf

in einem direkten Zusammenhang zueinander stehen. Den Zusammenhang zeigt Tabelle 1. Die dargestellten Werte zeigen die Reduktion des PE_{NE} als Funktion der Reduktion des Nutzenergiebedarfs und des Anteils erneuerbarer Energien zur Deckung des Endenergiebedarfs. Die grau hinterlegten Felder mit roter Schrift geben den Wertebereich an, für den das im Eckpunktepapier Energieeffizienz für den nahezu klimaneutralen Gebäudebestand formulierte Ziel erreicht ist (Reduktion PE_{NE} um 80 %). Die Zahlenwerte sind gültig für einen Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergiebedarf für die Raumkonditionierung im gesamten Gebäudebereich von indikativen 9 %.¹⁰ Rot umrandet sind Zielzustände, die bei einer Reduktion des Nutzenergiebedarfs zwischen 30 % (Referenz-/ Trendentwicklung) und 80 % (ambitioniert) zielkonform hinsichtlich der Reduktion des Anteils nicht-erneuerbarer Primärenergie sind. Würde beispielsweise der Nutzenergiebedarf um 60 % reduziert, müsste der Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Endenergiebedarf bei mindestens 55 % liegen, um für die Reduktion von PE_{NE} die Zielmarke von -80 % zu erreichen. Unterhalb der horizontalen grünen Linie ist der Anteil erneuerbaren Energien am Endenergiebedarf > 50 %.

¹⁰ Der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte lag im Referenzjahr 2008 bei rund 7,6 % (Bundesregierung 2012). Dieser Wert erfasst sowohl den EE-Einsatz für die thermische Konditionierung von Gebäuden wie auch den Einsatz als Prozessenergie. Nach AGE (2011) wurden in 2008 etwa 63 % des gesamten Endenergiebedarfs für die Wärmeversorgung für die thermische Gebäudekonditionierung aufgebracht. Da der EE-Anteil an den Prozessenergien niedriger liegen dürfte als im Bereich der Wärmeversorgung der Gebäude, erscheint der unterstellte EE-Anteil von 9 % als Referenzgröße plausibel.

Tabelle 1: Reduktion des nicht-erneuerbaren Anteils der Primärenergie bis 2050 als Funktion der Reduktion des Nutzenergiebedarfs und des Anteils der erneuerbaren Energien am Endenergiebedarf

		Reduktion des Nutzenergiebedarfs um x% bezogen auf das Ausgangsjahr 2008 -->																				
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
EE-Anteil zur Deckung des Endenergiebedarfs	0%	10%	4%	-1%	-7%	-12%	-18%	-23%	-29%	-34%	-40%	-45%	-51%	-56%	-62%	-67%	-73%	-78%	-84%	-89%	-95%	-100%
	5%	4%	-1%	-6%	-11%	-16%	-22%	-27%	-32%	-37%	-43%	-48%	-53%	-58%	-63%	-69%	-74%	-79%	-84%	-90%	-95%	-100%
	10%	-1%	-6%	-10%	-15%	-20%	-25%	-30%	-35%	-40%	-45%	-50%	-55%	-60%	-65%	-70%	-75%	-80%	-85%	-90%	-95%	-100%
	15%	-7%	-11%	-16%	-21%	-25%	-30%	-35%	-39%	-44%	-49%	-53%	-58%	-63%	-67%	-72%	-77%	-81%	-86%	-91%	-95%	-100%
	20%	-12%	-16%	-21%	-25%	-30%	-34%	-38%	-43%	-47%	-52%	-56%	-60%	-65%	-69%	-74%	-78%	-82%	-87%	-91%	-96%	-100%
	25%	-18%	-22%	-26%	-30%	-34%	-38%	-42%	-46%	-51%	-55%	-59%	-63%	-67%	-71%	-75%	-79%	-84%	-88%	-92%	-96%	-100%
	30%	-23%	-27%	-31%	-35%	-38%	-42%	-46%	-50%	-54%	-58%	-62%	-65%	-69%	-73%	-77%	-81%	-85%	-88%	-92%	-96%	-100%
	35%	-29%	-32%	-36%	-39%	-43%	-46%	-50%	-54%	-57%	-61%	-64%	-68%	-71%	-75%	-79%	-82%	-86%	-89%	-93%	-96%	-100%
	40%	-34%	-37%	-41%	-44%	-47%	-51%	-54%	-57%	-60%	-64%	-67%	-70%	-74%	-77%	-80%	-84%	-87%	-90%	-93%	-97%	-100%
	45%	-40%	-43%	-46%	-49%	-52%	-55%	-58%	-61%	-64%	-67%	-70%	-73%	-76%	-79%	-82%	-85%	-88%	-91%	-94%	-97%	-100%
	50%	-45%	-48%	-51%	-53%	-56%	-59%	-62%	-64%	-67%	-70%	-73%	-75%	-78%	-81%	-84%	-86%	-89%	-92%	-95%	-97%	-100%
55%	-51%	-53%	-55%	-58%	-60%	-63%	-65%	-68%	-70%	-73%	-75%	-78%	-80%	-83%	-85%	-88%	-90%	-93%	-95%	-98%	-100%	
60%	-56%	-58%	-60%	-63%	-65%	-67%	-69%	-71%	-74%	-76%	-78%	-80%	-82%	-85%	-87%	-89%	-91%	-93%	-96%	-98%	-100%	
65%	-62%	-63%	-65%	-67%	-69%	-71%	-73%	-75%	-77%	-79%	-81%	-83%	-85%	-87%	-88%	-90%	-92%	-94%	-96%	-98%	-100%	
70%	-67%	-69%	-70%	-72%	-74%	-75%	-77%	-79%	-80%	-82%	-84%	-85%	-87%	-88%	-90%	-92%	-93%	-95%	-97%	-98%	-100%	
75%	-73%	-74%	-75%	-77%	-78%	-79%	-81%	-82%	-84%	-85%	-86%	-88%	-89%	-90%	-92%	-93%	-95%	-96%	-97%	-99%	-100%	
80%	-78%	-79%	-80%	-81%	-82%	-84%	-85%	-86%	-87%	-88%	-89%	-90%	-91%	-92%	-93%	-95%	-96%	-97%	-98%	-99%	-100%	
85%	-84%	-84%	-85%	-86%	-87%	-88%	-88%	-89%	-90%	-91%	-92%	-93%	-93%	-94%	-95%	-96%	-97%	-98%	-98%	-99%	-100%	
90%	-89%	-90%	-90%	-91%	-91%	-92%	-92%	-93%	-93%	-94%	-95%	-95%	-96%	-96%	-97%	-97%	-98%	-98%	-99%	-99%	-100%	
95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-96%	-96%	-96%	-96%	-97%	-97%	-97%	-98%	-98%	-98%	-98%	-99%	-99%	-99%	-99%	-100%	-100%	
100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	

Quelle: Eigene Darstellung

Der dargestellte Zusammenhang zeigt, dass es konsistente Zielbilder mit sehr unterschiedlichen Zielen hinsichtlich Reduktion des Nutz-/Endenergiebedarfs und des Anteils erneuerbarer Energien gibt.

Wichtige Anhaltspunkte für die Festlegung der Zielwerte für den spezifischen Endenergiebedarf für Raumwärme ergeben sich aus der Bottom-up-Analyse des maximal erreichbaren Wärmeschutzstandards für den Gebäudebestand in 2050. Abschätzungen im Rahmen des BMU-Projektes „Integrierte Wärme- und Kältestrategie“ (Henning et al. 2013) kommen unter Berücksichtigung der bis 2050 zur Verfügung stehenden Techniken für den Nutzwärmebedarf der Wohngebäude auf ein maximal erreichbares Reduktionsniveau von rund 70 % bezogen auf den heutigen Stand. Für die Zielerreichung kommt der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung also eine zentrale Rolle zu.

Ein weiterer Aspekt ist der mögliche und notwendige Ausbau der erneuerbaren Energien. Biomaspotenziale – und damit die direkte Substitution fossiler Brennstoffe durch nachwachsende Rohstoffe (z.B. Holz, Biogas) - sind beschränkt und stehen zudem in Konkurrenz zur Nutzung im Verkehrssektor. Deshalb wird es vor allem um die Umstellung von fossilen Wärmeversorgungstechniken auf strombasierte Systeme gehen.

In Tabelle 2 ist der Zusammenhang zwischen dem notwendigen Ausbau der erneuerbaren Energien und den beiden Optionen Reduktion des Nutzenergiebedarfs und Anteil erneuerbarer Energien am Endenergiebedarf dargestellt. Wie in Tabelle 1 wird dabei im Referenzjahr 2008 von einem indikativen EE-Anteil von 9 % ausgegangen. Der Zielwert für die Reduktion PE_{NE} beträgt 80 %.

Tabelle 2: Notwendiger Ausbau von erneuerbaren Energien, um die in Tabelle 1 hinterlegten Reduktionsziele für PE_{NE} zu erreichen

		Reduktion des Nutzenergiebedarfs um x% bezogen auf das Ausgangsjahr 2008 -->																				
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
EE-Anteil zur Deckung des Endenergiebedarfs	0%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	5%	-44%	-47%	-50%	-53%	-56%	-58%	-61%	-64%	-67%	-69%	-72%	-75%	-78%	-81%	-83%	-86%	-89%	-92%	-94%	-97%	-100%
	10%	11%	6%	0%	-6%	-11%	-17%	-22%	-28%	-33%	-39%	-44%	-50%	-56%	-61%	-67%	-72%	-78%	-83%	-89%	-94%	-100%
	15%	67%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%	-8%	-17%	-25%	-33%	-42%	-50%	-58%	-67%	-75%	-83%	-92%	-100%
	20%	122%	111%	100%	89%	78%	67%	56%	44%	33%	22%	11%	0%	-11%	-22%	-33%	-44%	-56%	-67%	-78%	-89%	-100%
	25%	178%	164%	150%	136%	122%	108%	94%	81%	67%	53%	39%	25%	11%	-3%	-17%	-31%	-44%	-58%	-72%	-86%	-100%
	30%	233%	217%	200%	183%	167%	150%	133%	117%	100%	83%	67%	50%	33%	17%	0%	-17%	-33%	-50%	-67%	-83%	-100%
	35%	289%	269%	250%	231%	211%	192%	172%	153%	133%	114%	94%	75%	56%	36%	17%	-3%	-22%	-42%	-61%	-81%	-100%
	40%	344%	322%	300%	278%	256%	233%	211%	189%	167%	144%	122%	100%	78%	56%	33%	11%	-11%	-33%	-56%	-78%	-100%
	45%	400%	375%	350%	325%	300%	275%	250%	225%	200%	175%	150%	125%	100%	75%	50%	25%	0%	-25%	-50%	-75%	-100%
	50%	456%	428%	400%	372%	344%	317%	289%	261%	233%	206%	178%	150%	122%	94%	67%	39%	11%	-17%	-44%	-72%	-100%
	55%	511%	481%	450%	419%	389%	358%	328%	297%	267%	236%	206%	175%	144%	114%	83%	53%	22%	-8%	-39%	-69%	-100%
	60%	567%	533%	500%	467%	433%	400%	367%	333%	300%	267%	233%	200%	167%	133%	100%	67%	33%	0%	-33%	-67%	-100%
	65%	622%	586%	550%	514%	478%	442%	406%	369%	333%	297%	261%	225%	189%	153%	117%	81%	44%	8%	-28%	-64%	-100%
	70%	678%	639%	600%	561%	522%	483%	444%	406%	367%	328%	289%	250%	211%	172%	133%	94%	56%	17%	-22%	-61%	-100%
	75%	733%	692%	650%	608%	567%	525%	483%	442%	400%	358%	317%	275%	233%	192%	150%	108%	67%	25%	-17%	-58%	-100%
80%	789%	744%	700%	656%	611%	567%	522%	478%	433%	389%	344%	300%	256%	211%	167%	122%	78%	33%	-11%	-56%	-100%	
85%	844%	797%	750%	703%	656%	608%	561%	514%	467%	419%	372%	325%	278%	231%	183%	136%	89%	42%	-6%	-53%	-100%	
90%	900%	850%	800%	750%	700%	650%	600%	550%	500%	450%	400%	350%	300%	250%	200%	150%	100%	50%	0%	-50%	-100%	
95%	956%	903%	850%	797%	744%	692%	639%	586%	533%	481%	428%	375%	322%	269%	217%	164%	111%	58%	6%	-47%	-100%	
100%	1011%	956%	900%	844%	789%	733%	678%	622%	567%	511%	456%	400%	344%	289%	233%	178%	122%	67%	11%	-44%	-100%	

Quelle: Eigene Darstellung

Die grau markierten Felder geben wieder den Wertebereich an, für den das im Eckpunktepapier Energieeffizienz für den nahezu klimaneutralen Gebäudebestand formulierte Ziel erreicht ist (Reduktion PE_{NE} um 80 %). Eine Reduktion des Nutzenergiebedarfs um 40 % erfordert einen EE-Anteil am gesamten Endenergiebedarf für Gebäude von 70 %, um das Reduktionsziel für PE_{NE} zu erreichen. Bezogen auf die absolute EE-Menge im Referenzjahr 2008 erfordert dies einen Zuwachs um 367 %. Bei einer Reduktion des Nutzenergiebedarfs um 60 % wird ein EE-Anteil von 55 % benötigt entsprechend einer Ausweitung der absoluten EE-Wärmemenge von 144 % bezogen auf das Referenzjahr. Reduziert man den Nutzenergiebedarf des gesamten Gebäudebestandes um 80 %, benötigt man einen EE-Anteil an der „Restwärmeversorgung“ von 10 %. Um dies zu erreichen, kann die benötigte absolute EE-Menge bezogen auf das Referenzjahr um 78 % reduziert werden (es würde also eine wesentlich geringere absolute EE-Menge benötigt als im Referenzjahr schon eingesetzt wird). In den Bereichen mit grüner Schrift ist mindestens eine Verdopplung der absoluten EE-Menge bezogen auf das Referenzjahr 2008 notwendig.

Auf Grundlage dieser Überlegungen und um ein möglichst breites Spektrum möglicher zielkonformer Zukunftsbilder zu entwickeln, werden im Rahmen des Vorhabens verschiedene Zielzustände identifiziert, mit denen der oben genannte Zielwert von PE_{NE} minus 80 % in 2050 in Bezug auf das Ausgangsjahr 2008 erreicht wird.

3 Technikentwicklung

In diesem Kapitel wird die erwartete Entwicklung der Techniken, die zum einen den Wärmebedarf in Gebäuden reduzieren und zum anderen aus heutiger Sicht die Wärme für Gebäude bereitstellen werden, bis zum Jahr 2050 dargestellt. Techniken zur Bereitstellung von Prozesswärme und -kälte in den Sektoren GHD und Industrie werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet, da der Fokus dieser Studie ausschließlich auf der Gebäudekonditionierung liegt. Im Mittelpunkt stehen dabei Techniken, die für die Erreichung des Ziels eines klimaneutralen Gebäudebestands gemäß der Definition aus dem voranstehenden Kapitel von besonderer Bedeutung sind. Von besonderem Interesse sind die Entwicklung der Investitions- sowie Wärmegestehungskosten und die Entwicklung der Anlageneffizienz der Wärmebereitstellungstechniken.

Für die Abschätzung zukünftiger Technikentwicklung im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden werden nationale und internationale Studien und Szenarien analysiert und verglichen. Für das Jahr 2050 finden demnach voraussichtlich folgende Techniken eine breite Anwendung und werden im Folgenden näher betrachtet.

Tabelle 3: Technikportfolio 2050

Reduktion des Nutzenergiebedarfs	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmedämmung • Beleuchtung • Lüftung
Verteilung, Speicherung und Übergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilung und Hydraulik • Wärmespeicher • Kältespeicher • Übergabesysteme • Trinkwassererwärmung • Elektrische Speicher • Power to Gas
Energiewandlung	<ul style="list-style-type: none"> • Brennertechniken • Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) • Kältebereitstellung und Klimatisierung • Umweltwärme <ul style="list-style-type: none"> ○ Wärmepumpen ○ Solarthermie ○ Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung • Regenerative Stromerzeugung

Quelle: Eigene Darstellung

3.1 Reduktion des Nutzenergiebedarfs

3.1.1 Heizwärme

Die Reduktion des Wärmeverbrauchs durch die Sanierung der Gebäudehülle und der Fenster war und ist ein zentrales Ziel der Bundesregierung (vgl. z.B. Bundesregierung (2010), BMWi (2010), Schlesinger et al. 2010). In den nachfolgenden Abschnitten werden die technischen Möglichkeiten der energetischen Sanierung der opaken Bestandteile der Gebäudehülle differenziert nach den Bauteilen Außenwand, Dach und Kellerdecke betrachtet. Des Weiteren werden Entwicklungstrends bei Fenstern und Türen dargestellt.

3.1.1.1 Wärmedämmung

Dämmmaterialien

Die in Tabelle 4 hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften dargestellten Dämmmaterialien können bei den unten beschriebenen Verfahren der Hüllflächendämmung eingesetzt werden. Auf eine genauere Beschreibung heute üblicher Dämmmaterialien wird an dieser Stelle verzichtet und es werden im Folgenden nur neue, innovative Materialien genauer behandelt¹¹.

Tabelle 4: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmmaterialien

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	
	von	bis
Aerogele	0,012	0,016
Baumwolle	0,039	0,041
Blähglas	0,060	0,070
Blähton	0,080	0,160
Calostat ¹²	0,019	0,019
Flachs	0,040	0,045
Hanf	0,065	0,070
Holzfaser	0,040	0,050
Holzwolle	0,065	0,150
Kalziumsilikat	0,060	0,080
Kokosfaser	0,045	0,050
Perlite	0,040	0,055
Polyethylschaumstoff	0,035	0,050
Polystyrol, expandiert (EPS)	0,045	0,060
Polystyrol, extrudiert (XPS)	0,030	0,040
Polyurethan (PUR)	0,020	0,040
Schafwolle	0,040	0,045
Schaumglas	0,040	0,050
Schilfrohr	0,045	0,065
Vakuumdämmstoffe	0,002	0,008
Vermiculite	0,069	0,071
Zellulose	0,040	0,045

Quelle: Kleinhempel (2005), Wietschel et al. (2010), EnBauSa (2014)

- Aerogele

¹¹ Eine Übersicht über heute eingesetzte Dämmmaterialien liefert z.B. FIW München (2013).

¹² Calostat ist ein neu entwickelter Dämmstoff, der sich nach EnBauSa (2014) besonders gut für den sommerlichen Wärmeschutz eignet und sich durch seine geringe und konstante Wärmeleitfähigkeit und vergleichsweise hohe Dichte (165 kg/m³) auszeichnet. Er ist reaktionsneutral gegenüber anderen Verbundwerkstoffen und ist resistent gegen Schimmelbildung.

Aerogele sind vorwiegend aus Silikaten (SiO_2) hergestellte hochporöse Materialien geringer Dichte, die sich durch eine hohe Belastbarkeit und geringe Wärmeleitfähigkeit auszeichnen (Wietschel et al. 2010). Auf Aerogelen basierende Dämmstoffe erreichen eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,014 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ und haben gegenüber der Vakuumdämmung den Vorteil, dass sie unter atmosphärischen Bedingungen hergestellt werden können (Wietschel et al. 2010). Die Wärmeleitfähigkeit kann durch eine leichte Evakuierung weiter gesenkt werden. Eine Wärmeleitfähigkeit vergleichbar derer von Vakuumisulationspaneelen, ist bei Aerogelen nicht zu erwarten. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von Aerogelen bei der Gebäudedämmung sind Aerogel-Dämmputze, die derzeit eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,028 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ aufweisen.

Nach Wietschel et al. (2010) besteht bei den Herstellungsverfahren von Aerogelen ein erheblicher Kostensenkungsbedarf, damit diese in Zukunft auf dem Markt konkurrenzfähig werden.

- **Vakuumdämmung**

Vakuumisulationspaneele (VIP) bestehen im Wesentlichen aus einem druckfesten Material im Kern und einer möglichst gasundurchlässigen Umhüllung. Durch die Evakuierung des Kerns wird der Wärmetransport über das Gas weitgehend eliminiert und die Wärmeleitfähigkeit der gesamten VIPs stark reduziert (Heinemann et al. 2011). Als Kernmaterial kommen Polymerschäume oder Aerogele in Frage. Der Gasdruck innerhalb der Paneele beträgt je nach Füllmaterial zwischen 0,1 und 20 mbar (Heinemann et al. 2011). Vakuumisulationspaneele haben eine Wärmeleitfähigkeit zwischen $0,002$ und $0,008 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, wodurch wesentlich geringere Dämmstoffdicken benötigt werden, um einen einem Wärmedämmverbundsystem vergleichbaren Dämmstandard zu erreichen (Wietschel et al. 2010, Heinemann et al. 2011). Bei technischen Geräten wie Kühlschränken werden VIPs schon heute häufig eingesetzt, bei der Dämmung von Häusern aber bisher nur in einzelnen Projekten. Ein zentrales Problem ist derzeit noch, dass mit der Zeit Gase in die VIPs eindringen, wodurch die Wärmeleitfähigkeit steigt; nach Heinemann et al. (2011) in den ersten 25 Jahren auf $0,007$ bis $0,010 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$.

VIPs werden in Zukunft verstärkt in vorgefertigte Fassadenelemente integriert werden. Mit der Vorfertigung verbinden sich zum einen Kostensenkungspotenziale, zum anderen die Reduktion der Gefahr von Beschädigungen sowie des Problems der zunehmenden Relevanz von Wärmebrücken (Heinemann et al. 2011). Eine weitere Senkung der Wärmeleitfähigkeit unter einen Wert von $0,002 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ ist aus heutiger Sicht nicht wahrscheinlich. Allerdings ist eine Erhöhung der Nutzungsdauer (derzeit geht man von 25 Jahren aus) und eine Senkung der Kosten von derzeit 50 bis 100 EUR/m² für 2 cm starke VIP (ohne Zusatzaufwand für Planung, Einbau, Qualitätssicherung) durch den Einsatz neuer Hüllkonzepte und dichter Materialien zu erwarten (Heinemann et al. 2011, Platzer 2008). Bei der Sanierung von Bestandsgebäuden eröffnen VIPs die Möglichkeit, auch Gebäude auf einen hohen energetischen Stand zu sanieren, bei denen dies aufgrund örtlicher oder rechtlicher Gegebenheiten (z.B. kein Platz für eine dicke Dämmung wegen Überdämmung des Gehwegs) bisher nicht möglich ist.

Außenwand

Die gängigste Art der Außenwanddämmung ist die nachträgliche Dämmung mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS). Daneben bestehen die Möglichkeit einer Innendämmung oder das nachträgliche Anbringen einer Vorhangfassade. Zukünftig werden verstärkt auch neue Dämmmaterialien wie Aerogele, multifunktionale Fassaden und die Vakuumdämmung zum Einsatz kommen. Die heute am weitesten verbreiteten Dämmmaterialien basieren auf mineralischen und fossilen Rohstoffen, nur etwa 4-5 % der verwendeten Dämmung auf natürlichen und nachwachsenden Rohstoffen (PresseCompany GmbH 2012, Greiff 2009). Inwiefern sich eine Verteuerung fossiler Rohstoffe auf die verwendeten Dämmmaterialien auswirkt, ist derzeit nur schwer abschätzbar. Kommt es zu einer sol-

chen Verteuerung, könnte dies zukünftig aber definitiv zu einer Verschiebung der Nachfrage in Richtung natürlicher Dämmmaterialien führen. Ein gewisses Kostenreduktionspotenzial mag sich hingegen damit verbinden, dass zukünftig größere Dämmeinheiten im Werk vorgefertigt werden und der Personalaufwand beim Anbringen der Dämmmaterialien verringert wird (vgl. Ziesing et al. (2008), insbesondere *Teil 2: Techno-ökonomischer Fortschritt bei Energieeffizienztechnologien und Ausblick auf die makroökonomischen Wirkungen des Klimaschutzprogramms*).

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Dämmvarianten sowie deren thermische Eigenschaften erläutert.

- Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) stellen sowohl im Neubau, als auch bei der Sanierung die gängigste Art der Wärmedämmung dar. Ein WDVS besteht aus drei Schichten; dem Dämmstoff, welcher auf die vorhandene Konstruktion geklebt wird, einer Gewebeschicht, die auf die Dämmschicht aufgebracht wird, um Spannungen auszugleichen und einer Beschichtung, die die Konstruktion gegen Witterungseinflüsse schützt. Als Dämmstoff werden meist Polystyrol- oder Polyurethan-Platten verwendet. Es können aber auch andere Platten z.B. aus nachwachsenden Rohstoffen oder Vakuumisulationspaneelen eingesetzt werden. Ein Nachteil bei der Verwendung nachwachsender Rohstoffe ist, dass aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit zum Erreichen eines bestimmten Dämmwertes eine dickere Dämmschicht nötig ist, was nicht an jedem Gebäude möglich bzw. gewünscht ist. Außerdem sind Dämmplatten aus nachwachsenden Rohstoffen derzeit noch teurer als Dämmstoff auf Basis fossiler Rohstoffe. Der Kostenvorteil wird allerdings künftig durch steigende Preise fossiler Rohstoffe und Kostensenkungen bei nachwachsenden Rohstoffen, die infolge von Skaleneffekten in der Produktion zu erwarten sind, schrumpfen und sich ggf. sogar umkehren. Ist es aufgrund der Umgebung der Gebäude nicht möglich, eine dicke Dämmung anzubringen, kann die Verwendung von VIPs (s. oben) eine Alternative darstellen, wobei diese noch wesentlich teurer sind als gängige Dämmmaterialien. Tendenziell wird erwartet, dass sich Rationalisierungseffekte, steigende Rohstoffpreise und der mögliche verstärkte Einsatz nachwachsender Rohstoffe (sowie die damit verbundenen größeren Dämmstoffstärken) ausgleichen werden und die durchschnittlichen spezifischen Kosten der Dämmung tendenziell auf dem heutigen Niveau bleiben (Henning et al. 2013, Ziesing et al. 2008).

- Innendämmung

Wenn es die örtlichen Gegebenheiten nicht zulassen, ein Gebäude von außen zu dämmen oder die Fassade aus anderen Gründen (z.B. Denkmalschutz) nicht von außen gedämmt werden kann, können die betroffenen Gebäude auch von innen gedämmt werden. Das hat den Nachteil, dass die nutzbare Fläche im Gebäude kleiner wird. Weitere Nachteile der Innendämmung liegen in höheren Anforderungen an den Brandschutz bei der Verwendung brennbarer Materialien, ein geringerer sommerlicher Wärmeschutz, sowie einer höheren Gefahr von Wärmebrücken und Tauwasserbildung innerhalb der Fassade (Krus et al.). Um Wärmebrücken und die Tauwasserbildung zu vermeiden, ist auf eine qualitativ hochwertige Ausführung der Dämmung und die richtige Materialwahl zu achten. Gegenüber der Außendämmung hat die Innendämmung aber gerade bei nicht kontinuierlich genutzten Räumen den Vorteil, dass sich die Räume schneller erwärmen als Räume mit einer Außendämmung. Auch ist die Anbringung der Dämmung oftmals leichter (z.B. in der Regel kein Bedarf eines Fassadengerüsts), womit auch die spezifischen Kosten verglichen mit der Außendämmung geringer sind. Bei der Innendämmung können prinzipiell die gleichen Materialien eingesetzt werden wie bei der Außendämmung mit einem WDVS.

- Vorhangfassade

Vorhangfassaden sind nicht tragende Bauteile, die v.a. an Büro- und Verwaltungsbauten üblich sind. Dabei wird die Fassade durch eine Unterkonstruktion – bei Nichtwohngebäuden üblicher-

weise aus Aluminium oder Stahl – am Tragwerk eines Gebäudes aufgehängt. Die energetische Qualität solcher Konstruktionen hängt im Wesentlichen vom Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert), dem Energiedurchlassgrad (g-Wert) und dem Lichttransmissionsgrad der transparenten Bereiche der Fassade ab (Hempel et al. 2012). Ausgeführt werden Vorhangfassaden entweder in Pfosten-Riegelbauweise, als Elementfassade oder Doppelfassade (Neideck et al. 2013).

Im Wohnungsbau sind Vorhangfassaden lange Zeit hauptsächlich als Schutz vor der Witterung eingesetzt worden. Mittlerweile werden hinterlüftete Vorhangfassaden bei Wohngebäuden sowohl beim Neubau als auch bei der Sanierung aber auch in Kombination mit einer Dämmschicht eingesetzt.

- Multifunktionale Fassade

Im Gegensatz zu den ursprünglichen Fassadenfunktionen (äußerer Gebäudeabschluss, Dämmung, Witterungsschutz) beinhalten multifunktionale Fassaden Haustechnikbereiche wie z.B. Verschattungssysteme, Raumlufttechnische (RLT) Anlagen, Elektro- und IT-Infrastrukturen oder auch Photovoltaik-, bzw. Solarthermieanlagen (Streicher/Mueller 2009). Multifunktionale Fassaden bieten vor allem bei Neubauten viele Vorteile, da die Gestaltung des Innenraums weitestgehend unabhängig von der Gebäudetechnik erfolgen kann. Bei Sanierungen und Neubauten werden multifunktionale Fassaden in der Regel vorgefertigt, wodurch sich Baukosten und Bauzeiten verglichen mit der Montage vor Ort erheblich reduzieren. Allerdings sind die Wartungskosten durch die Technik innerhalb der Fassade höher als bei konventionellen Fassaden.

Multifunktionale Fassaden werden in Zukunft eine immer bedeutendere Rolle spielen. Dies liegt zum einen an der Möglichkeit, große Elemente vorzufertigen, was Kostensenkungen bei der Sanierung von Fassaden und kürzere Bauzeiten am Gebäude ermöglicht. Zu den Kostensenkungen tragen auch technische Entwicklungen z.B. in der Photovoltaik bei (s. auch Kapitel 3.3.6.1). Zum anderen führt die Integration von technischen Anlagen und Einheiten zur Energiebereitstellung zu größeren Gestaltungs- und Nutzungsfreiheiten im Gebäudeinneren. Hinzu kommt ein höherer Grad an Eigenversorgung mit Energie, was vor dem Hintergrund erwarteter Energiepreisteigerungen von zunehmender Relevanz ist.

Dach

Bei der Dämmung von Dächern und oberen Geschossdecken können prinzipiell die gleichen Materialien eingesetzt werden wie bei anderen opaken Bauteilen. Bei der Dämmung eines Steildachs können drei Varianten unterschieden werden. Bei der Zwischensparrendämmung wird das Dämmmaterial zwischen den Sparren angebracht. Um die gesetzlichen Wärmeschutzvorgaben zu erfüllen und eine ausreichende Dämmstoffstärke zu erreichen, kann eine Vergrößerung der Sparren notwendig sein. Ein Nachteil bei der Zwischensparrendämmung besteht darin, dass die Sparren Wärmebrücken darstellen. Bei der Aufsparrendämmung wird das Dämmmaterial von innen auf die Sparren montiert und der Raum zwischen den Sparren bleibt leer. Die Sparren liegen bei dieser Variante außerhalb der thermischen Hülle und stellen keine Wärmebrücken dar, allerdings „verliert“ man auch mehr nutzbares Volumen im Gebäude. Eine Kombination der Auf- und Zwischensparrendämmung verbessert die Schwachpunkte beider Varianten. Der Wärmebrückeneffekt wird eliminiert und es geht weniger nutzbares Gebäudevolumen verloren, da die Aufsparrendämmung kleiner ausfallen kann. Die Entwicklung der U-Werte und Kosten ist maßgeblich von der Entwicklung neuer Dämmmaterialien abhängig.

Flachdächer werden in der Regel von oben gedämmt. Unterschieden wird dabei zwischen dem Warmdach, bei dem die Dämmung direkt mit der Dachabdichtung verbunden ist und dem Kaltdach, bei dem die Dämmung zwischen dem eigentlichen Dach und der aufgeständerten Dachabdichtung liegt. Bei ausreichender Raumhöhe kann ein Flachdach auch von Innen gedämmt werden. Steige-

rungen der thermischen Eigenschaften sind im Rahmen der Entwicklung und Verwendung neuer Dämmmaterialien (s. Tabelle 4) zu erwarten.

Bei dauerhaft unbeheizten Dachböden kann die oberste Geschossdecke ober- oder unterseitig (je nach Raumhöhe im obersten noch beheizten Geschoss) gedämmt werden. Unterschiede in der Ausführung bei oberseitiger Dämmung ergeben sich aus dem verwendeten Dämmmaterial und den Anforderungen der Begehbarkeit (begehbar oder nicht begehbar). Die Dämmung der obersten Geschossdecke kann unabhängig von anderen Dämmmaßnahmen umgesetzt werden, allerdings ist der wärmebrückenfreie Anschluss an eine Außenwanddämmung praktisch nicht möglich (Loga et al. 2011).

Kellerdecke

Die nachträgliche Dämmung von Kellerdecken ist in der Praxis mit einigen limitierenden Faktoren verbunden. Ein Problem ist die oftmals niedrige Raumhöhe in Kellern, was die Dämmstoffdicke einschränken kann. Des Weiteren sind die Kellerdecken gerade in alten Häusern nicht zwangsläufig eben (Gewölbekeller), was die Dämmung zusätzlich erschweren kann. Auch laufen an der Kellerdecke oftmals Versorgungsleitungen (Heizung, Wasser), was zum einen die Dämmstoffdicke in einigen Kellerbereichen limitiert, zum anderen die Montage erschwert. Trotz der in Einzelfällen limitierenden Faktoren gilt die Dämmung der Kellerdecke in der Regel als kostengünstig und leicht umzusetzen. Durch die oftmals limitierte Dämmstoffstärke ist zu erwarten, dass im Kellerbereich bei Sanierungen verstärkt Dämmmaterialien mit sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeiten (z.B. Polyurethan, Aerogele, VIP) eingesetzt werden, da mit diesen Materialien auch mit geringen Dämmstoffstärken sehr niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten erreicht werden können.

Exkurs:

Ökobilanzielle Bewertung verschiedener Dämmsysteme

Hintergrund

Die wärmetechnische Sanierung von Gebäuden stellt eine große Herausforderung für die Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland dar. Wird sie im hierfür erforderlichen Umfang durchgeführt, dann müssen nach derzeitigem Stand auch weiterhin große Mengen an Dämmstoffen eingesetzt werden. Hinzu kommt der Einsatz weiterer Materialien wie Unterkonstruktionen, Putze etc., die für die Bereitstellung der Dämm Lösungen insgesamt erforderlich sind. Die Dämmsysteme müssen zunächst hergestellt und transportiert, angebracht, nach ihrer Nutzung aber auch wieder heruntergenommen und dann recycelt, thermisch verwertet, entsorgt etc. werden. Ihr Lebensweg ist verbunden mit unterschiedlichen Umweltauswirkungen, die die Bewertung hinsichtlich ihres Nutzens für die Erreichung der Klimaschutzziele einfließen sollten, um mögliche Zielkonflikte z.B. bezogen auf Schadstoffe von vorneherein zu identifizieren.

Der Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme spricht für das Jahr 2011 von insgesamt 42,5 Mio. m² angebrachten Wärmedämmverbundsystemen in Deutschland (Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme 2012). Zu den Anteilen der verschiedenen Dämmstoffe hat der Gesamtverband der Deutschen Dämmstoffindustrie für das Jahr 2009 folgende Daten veröffentlicht: Insgesamt umfasste der Dämmstoffmarkt 26,8 Mio. m³ Dämmstoffe, die sich auf 53,1 % Mineralwolle-Dämmstoffe, 33,3 % EPS-Hartschaum-Dämmstoffe, 7,5 % PUR-Hartschaum-Dämmstoffe, 5,8 % Polystyrol-Extruderschaum-Dämmstoffe (XPS) und weitere Dämmstoffe geringerer Bedeutung aufteilen (GDI 2010).

Vor dem Hintergrund der großen eingesetzten Mengen und z.T. bekannter problematischer Ein-

satzstoffe – beispielsweise Hexabromcyclododecan (HBCD), einem als persistent, bioakkumulativ und toxisch bewerteten Flammschutzmittel in EPS – erscheint es angeraten, Dämmsysteme einer umfangreicheren umweltorientierenden Bewertung zu unterziehen, die über die Bewertung der Treibhausgasemissionen und ihres Klimaschutzeffektes alleine hinausgeht. Eine wichtige Methode hierfür ist die Ökobilanz.

Methodische Vorteile der Ökobilanz

Die Anwendung der Methode der Ökobilanz für die vergleichende Bewertung verschiedener Dämmsysteme hat verschiedene Vorteile:

- Sie ist in der Lage unterschiedliche Wirkungskategorien einzubeziehen und auf der Basis von Wirkungsindikatoren zu quantifizieren, die ein großes Spektrum potenzieller Umweltauswirkungen abdecken. Damit wird eine integrierte Bewertung vor dem Hintergrund unterschiedlicher Schutzziele – über den Klimaschutz hinaus – möglich.
- Als Vergleichsbasis wird eine „funktionelle Einheit“ definiert, die sicherstellt, dass Dämmstoffe auf der Basis des gleichen Nutzens verglichen werden, d.h. z.B. der gleichen Dämmwirkung (normierte Wärmeleitfähigkeit) bzw. Energieeinsparung in der Nutzungsphase.
- Sie ist technikneutral, da sich vergleichende Aussagen immer auf eine funktionelle Einheit mit dem gleichen Nutzen beziehen. Damit lassen sich verschiedene Dämmstoffe und Dämm Lösungen (z.B. Wärmedämmverbundsystem versus Vorhangfassade) problemlos auf Basis einer gleichen Funktionserfüllung vergleichen.
- Sie ist vom Ansatz her lebenswegübergreifend, d.h. bezieht sowohl die Herstellung (inkl. Rohstoffgewinnung) als auch die Nutzung und den End-of-Life- inklusive weiterer notwendiger Verarbeitungs- und Transportprozesse ein. Damit wird der typischerweise enge Fokus bei der Betrachtung von Gebäudesanierungen, der in der Regel allein auf die Nutzungsphase und potenzielle Energieeinsparungen bzw. Reduktionen von Treibhausgasen abzielt, ausgeweitet. Allerdings muss angemerkt werden, dass die derzeit verfügbaren Ökobilanzdaten zu Dämmsystemen (s.u.) den methodisch ebenfalls möglichen cradle-to-gate Ansatz wählen, d.h. weder die Nutzungsphase noch End-of-Life einbeziehen.

Die zuletzt genannte Einschränkung bezüglich der derzeitigen Datenbasis muss vor dem Hintergrund der methodischen Schwierigkeit gesehen werden, dass Dämmsysteme aus Komponenten bestehen, die grundsätzlich in unterschiedlichen Anwendungsbereichen für unterschiedlichste Gebäude eingesetzt werden können und dort zu potenziell unterschiedlichen Energieeinsparungen beitragen, je nach Energiestandard, Geometrie etc. der vorgefundenen Bausubstanz. Der konkrete Nutzen „Energieeinsparung“ (inkl. reduzierter Umweltauswirkungen) in der Nutzungsphase lässt sich also nicht allein in Bezug auf einen Quadrat- oder Kubikmeter Dämmstoff quantifizieren, sondern muss anhand eines Systems (Gebäude) und eines bestimmten Energiestandards definiert werden. Ähnliches, wenn auch nicht im gleichen Umfang, gilt für den End-of-Life. Hier kommt noch die Schwierigkeit hinzu, dass Aussagen zur zukünftigen Handhabung von Dämmsystemen am Ende ihres Lebensweges schwer möglich sind.

Datenlage zu Ökobilanzen von Dämmstoffen

Ökobilanzdaten für Dämmstoffe, die den Lebensweg „cradle-to-gate“ umfassen, sind aus verschiedenen Quellen verfügbar. Die wichtigsten Quellen umfassen:

- oekobau.dat (<http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaudat/>),
- Umweltproduktdeklarationen (<http://bau-umwelt.de/hp545/Daemmstoffe.htm>)
- EcoInvent (<http://www.ecoinvent.org/database/>)

Zusätzlich dazu gibt es z.T. noch weitere Ökobilanzstudien, die meist von Herstellern oder Ver-

bänden veröffentlicht werden. Insgesamt sind damit „cradle-to-gate“-Ökobilanzdaten für ein breites Spektrum von am Markt verwendeten Dämmstoffen – von den konventionellen Dämmstoffen mit hohem Marktanteil bis teilweise hin zu den wenig verbreiteten Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe – verfügbar. Zu beachten ist allerdings, dass für einen Vergleich von verschiedenen Dämmstoffen z.B. auf Basis von Daten aus Umweltproduktdeklarationen eine Umrechnung auf die gleiche „funktionelle Einheit“ erforderlich sein kann.

Die Ökobilanzdaten, die unter den oben aufgeführten Quellen zu finden sind, enthalten in der Regel jedoch keine auf Toxizität bezogenen Wirkungskategorien. In den Umweltproduktdeklarationen wird die Zusammensetzung der Dämmstoffe erläutert, beispielsweise wird der prozentuale Gehalt an Grundstoffen / Zuschlägen und Hilfsstoffen / Zusatzmitteln angegeben. Darunter fallen auch potenziell schädliche Substanzen wie Flammschutzmittel. Ein Bezug zwischen dem Gehalt der Dämmstoffe an potenziell schädlichen Substanzen und einer potenziellen Wirkung wird aber nicht hergestellt.

Zur Schließung dieser Lücke hat das Öko-Institut eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe die Gefahrstoffe als Monoethylglykol-Äquivalente (MEG-Äquivalente) ausgewiesen und auf diese Weise quantifiziert und aufsummiert werden können (Bunke et al. 2003). Als Basis für die Berechnung dienen die für die jeweilige Substanz zutreffenden H-Sätze (Hazard Statements; bislang Risiko- bzw. abgekürzt R-Sätze) und die Zuordnung der Wirkfaktoren nach TRGS 440.¹³ H-Sätze dienen der Charakterisierung der Gefahrenmerkmale von Gefahrstoffen und der Einstufung eines gefährlichen Stoffes. Die Angabe der jeweiligen H-Sätze auf dem Sicherheitsdatenblatt ist vorgeschrieben.¹⁴

Nachfolgend wird beispielhaft eine Studie vorgestellt, in der eine vergleichende Analyse von Dämmsystemen unter Berücksichtigung des Wirkungsindikators MEG-Äquivalente durchgeführt wurde.

In diesem Zusammenhang soll auch darauf verwiesen werden, dass auf europäischer Ebene der Product Environmental Footprint (PEF) als methodischer Ansatz diskutiert wird. Eine Pilotstudie zur Entwicklung der Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) zu „Thermal insulation materials in buildings“ wird im Juni 2014 starten und hat drei Jahre Laufzeit. Die daran beteiligten Akteure vertreten allerdings eher weniger verbreitete Dämmstoffe aus dem Bereich der natürlichen Baustoffe.¹⁵

Beispielhafte Ergebnisse für den ökobilanziellen Vergleich verschiedener Dämmsysteme

Im Rahmen einer Untersuchung von Hochrein (2013) wurde für verschiedene Außenwand-Dämmösungen u.a. eine vergleichende Ökobilanz unter Berücksichtigung des Gefahrstoffpotenzials (in MEG-Äquivalenten) durchgeführt.

Ausgangspunkt der Untersuchung war ein freistehendes Einfamilienhaus der Baualtersklasse 1958-68, das eine der wohnflächenstärksten und energieintensivsten Gebäudeklassen in Deutschland repräsentiert. Zunächst wurden die Dämmmaßnahmen der Außenwand (Außen-, Innen- und

¹³ Technische Regel Gefahrstoffe 440: „Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen durch Gefahrstoffe am Arbeitsplatz: Ermitteln von Gefahrstoffen und Methoden zur Ersatzstoffprüfung“; aufgehoben.

¹⁴ Gesetzliche Grundlage für die Einstufung einzelner Gefahrstoffe und Zubereitungen ist die Verordnung (EG) Nr. 1272/2008, auch CLP-Verordnung genannt. Als Datengrundlage dienen Umweltproduktdeklarationen, Herstellerangaben sowie die Gefahrstoffdatenbank GESTIS (Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung).

¹⁵ Vgl. Meldung auf <http://www.capem.eu/capem/en/6942-news.html>

nachträgliche Kerndämmung) mit jeweils unterschiedlichen Materialien mit einer entsprechenden Energieberater-Software berechnet. Dabei wurden drei verschiedene Dämmstandards, EnEV 2009, Niedrigenergie- bzw. Passivhausstandard, betrachtet. Unter Dämmmaßnahme ist hier die Gesamtheit der Materialien zu verstehen, die für die jeweilige Dämmlösung erforderlich sind, inkl. Unterbaukonstruktionen, Putzen, Befestigungsmaterialien etc. Als wichtigste Alternativen, die auch am intensivsten untersucht wurden, sind an dieser Stelle Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) und hinterlüftete Vorhangfassaden (VHF) zu nennen. Als Dämmstoffe wurden beim WDVS EPS, Steinwolle, PF-Hartschaum, Holzfaser, Schilfrohr und Vakuumpaneele berücksichtigt. Bei der VHF wurden Steinwolle, Flachs, Hanf, Zellulose (Matte und Flocken) betrachtet. Nachfolgend wird nur auf das Gefahrstoffpotenzial (MEG-Äquivalente), den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial beim Sanierungsstandard Niedrigenergiehaus (NEH) eingegangen. Eine Gegenrechnung mit den Energieeinsparungen erfolgt nicht, diese fallen aber für alle Varianten gleich aus.

Wärmedämmverbundsysteme

Bei den untersuchten WDVS-Systemen hat das Putzsystem einen großen Anteil am Gefahrstoffpotenzial. Dies ist sowohl dem Kleber als auch dem Unterputz geschuldet, im Falle des Schilfrohres dem Unter- und dem Oberputz. Diesen Produkten sind die mineralischen Bindemittel Zement und Calciumhydroxid beigemischt, die ein Wirkpotenzial von 100 aufweisen. Da das Putzsystem jedoch auch bei einer reinen Renovierung (ohne begleitende energetische Modernisierung) auftritt, wird nachfolgend das Ergebnis beschränkt auf die Dämmstoffe dargestellt (vgl. Tabelle 5). Das größte Gefahrstoffpotenzial (in Tabelle 5 in Klammer jeweils die wichtigsten Beiträge) weist PF-Hartschaum auf, allerdings konnte dieses aufgrund fehlender Daten nur abgeschätzt werden, gefolgt von Vakuumpaneelen (Siliziumcarbid, Flammschutzmittel des EPS) und EPS (Flammschutzmittel). Demgegenüber weisen die übrigen betrachteten Dämmstoffe kein Gefahrstoffpotenzial auf. In Bezug auf EPS muss aber ergänzt werden, dass sein Wirkpotenzial aufgrund des verwendeten Flammschutzmittels HBCD statt mit 100 gemäß Artikel 57 REACH Verordnung eigentlich erheblich höher angesetzt werden müsste – Wirkpotenzial 50.000 –, da HBCD persistent, bioakkumulativ und toxisch ist.¹⁶ In diesem Fall würde EPS mit Abstand das höchste Gefahrstoffpotenzial unter den betrachteten Dämmstoffen aufweisen. Bezogen auf den Primärenergiebedarf hat der Holzfaser-Dämmstoff den höchsten Wert, gefolgt von PF-Hartschaum, Steinwolle, EPS, Schilfrohr und Vakuumpaneelen. Beim Treibhauspotenzial schneiden Schilfrohr und Holzfaser-Dämmstoff am besten ab, gefolgt von Vakuumpaneelen, EPS, Steinwolle und PF-Hartschaum.

Hinterlüftete Vorhangfassaden

Die Darstellung in Tabelle 5 beschränkt sich auch hier auf die Dämmstoffe. Das größte Gefahrstoffpotenzial weisen die Zellulosematten (Flammschutzmittel Borsäure) auf, während die übrigen betrachteten Dämmstoffe aufgrund der Verwendung anderer Flammschutzmittel wie Ammoniumphosphat oder Soda ein nur sehr niedriges Gefahrstoffpotenzial haben. Hinsichtlich des Primärenergiebedarfs weisen ebenfalls wieder die Zellulosematten den höchsten Wert auf, gefolgt von Hanf, Flachs, Steinwolle und Zelluloseflocken. Ergänzen muss man an dieser Stelle, dass die gesamte VHF mit Zelluloseflocken den mit Abstand höchsten Primärenergiebedarf aufweist, da eine aufwendige Bepankung mit einer mitteldichten Holzfaserplatte erforderlich ist. Bezogen auf das Treibhauspotenzial weist die Steinwolle den höchsten Wert auf, gefolgt von Zellulose-Matten, Flachs, Hanf und Zelluloseflocken.

¹⁶ Ein HBCD-Verbot ist derzeit in Vorbereitung (vgl. z.B. UBA 2015).

Tabelle 5: Ökobilanzdaten „cradle to gate“ der untersuchten Wärmedämmverbundsysteme und hinterlüfteten Vorhangfassaden

	Treibhaus- potenzial	Versauerungs- potenzial	Sommer- smog- potenzial	Ozon- abbau-	Über- dünnungs- potenzial	Abiotischer Ressourcen- verbrauch	Primär- energie- aufwand, gesamt	Wasser	Toxische Inhalts- stoffe
	kg CO ₂ e /m ²	kg SO ₂ - Äqv/m ²	kg Ethen- Äqv/m ²	kg R11- Äqv/m ²	kg PO4- Äqv/m ²	Sb-Äqv. /m ²	MJ/m ²	kg/m ²	kg MEG- Äqv.
WDVS - EPS (Dämmstoff)									
NEH	1,17E+01 (6,24E+00)	3,83E-02 (1,30E-02)	3,86E-02 (3,64E-02)	4,75E-07 (2,08E-07)	3,29E-03 (1,43E-03)	9,27E-02 (8,19E-02)	2,79E+02 (1,80E+02)	1,83E+02 (1,08E+01)	16,76 (0,055)
WDVS - Steinwolle									
NEH	2,09E+01	1,43E-01	8,62E-03	9,48E-07	1,50E-02	1,28E-02	3,67E+02	2,41E+02	19,27 (0)
WDVS - PF-Hartschaum (Dämmstoff)									
NEH	2,75E+01 (1,79E+01)	1,18E-01 (6,26E-02)					6,55E+02 (4,73E+02)		24,17 (1,026)
WDVS - Holzfaser (Dämmstoff)									
NEH	-1,94E+01 (-2,88E+01)	7,70E-02 (2,16E-02)	8,95E-03 (5,04E-03)	1,11E-06 (5,94E-07)	7,69E-03 (4,50E-03)	1,28E-02 (1,30E-05)	9,63E+02 (7,81E+02)	2,50E+02 (5,22E+01)	19,27 (0)
WDVS - Schilf									
NEH	-5,47E+01	6,84E-02	4,04E-03	2,24E-07	5,19E-03	1,22E-02	2,44E+02	1,55E+01	41,38 (0)
WDVS - Vakuumpaneel									
NEH	1,20E+01	6,45E-02	4,49E-03	1,00E-06	4,02E-03	1,04E-02	2,58E+02	2,31E+02	16,07
VHF - Steinwolle (Dämmstoff)									
NEH	-1,24E+01 (9,83E+00)	1,49E-01 (5,60E-02)	9,00E-03 (3,16E-03)	6,22E-07 (3,53E-07)	1,35E-02 (6,27E-03)	1,24E-01 (4,94E-02)	8,38E+02 (1,18E+02)	8,86E+03 (1,19E+01)	0 (0)
VHF - Flachs									
NEH	-2,01E+01	1,22E-01	1,17E-02	3,39E-07	1,47E-02	1,67E-01	1,06E+03	2,78E+04	0,34 (0)
VHF - Hanf (Dämmstoff)									
NEH	-1,98E+01 (3,43E+00)	1,20E-01 (2,45E-02)	1,15E-02 (4,67E-03)	2,35E-07 (6,17E-08)	9,98E-03 (3,47E-03)	1,68E-01 (8,57E-02)	1,08E+03 (2,87E+02)	2,61E+04 (1,34E+04)	0,14 (0)
VHF - Zellulose, Matten (Dämmstoff)									
NEH	-1,86E+01	1,49E-01	1,27E-02	2,36E-07	4,00E-02	1,83E-01	1,22E+03	3,43E+04	0 (0)
VHF - Zellulose, Flocken (Dämmstoff)									
NEH	-1,08E+02 (-5,06E+00)	3,12E-01 (8,99E-03)	5,79E-02 (6,23E-04)	9,29E-06 (2,71E-09)	7,94E-02 (1,24E-03)	7,10E-02 (1,31E-02)	3,96E+03 (3,41E+01)	1,04E+04 (1,51E+03)	0 (0)

In Klammern jeweils der Wert nur für den Dämmstoff.

Quelle: Hochrein (2013)

Fazit

Die Klimaschutzziele im Gebäudebereich erfordern die Aktivierung der immensen Einsparpotenziale, die aus den Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle resultieren. Hierzu ist eine erhebliche Ausweitung der verbauten Dämmstoffmengen notwendig. Bei der Bewertung der verschiedenen Dämmsysteme (d.h. inkl. Unterkonstruktion, Putz usw.) sollten die verschiedenen Wirkkategorien berücksichtigt werden, die Einfluss auf die Umwelt haben. Dies gilt insbesondere für die Toxizität der eingesetzten Materialien. Bei der Wahl eines Dämmsystems bzw. eines Wärmeschutzkonzepts sollten die positiven Effekte der Dämmung in Bezug auf die Klimaschutzwirkung gegen die anderen Umweltwirkkategorien sorgfältig abgewogen werden. Da aus der Klimaschutzperspektive der verstärkte Wärmeschutz weitgehend alternativlos ist, sollten gleichzeitig verstärkte Forschungsanstrengungen unternommen werden, etwaige negative Umweltwirkungen aus der Wärmedämmung zu minimieren.

3.1.1.2 Fenster

Glasflächen sind derzeit die wärmetechnischen Schwachstellen der Gebäudehülle, da sie eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen, als die opaken Fassadenbestandteile. Dreischeibenverglasungen haben z.B. einen ca. fünffach höheren Wärmedurchgangskoeffizienten als Fassaden im Passivhausstandard (Heinemann et al. 2011). Eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit von transparenten Bauteilen gewinnt daher zunehmend an Bedeutung, vor allem wenn die opaken Hüllflächen zunehmend besser gedämmt sind. Verschiedene Ansätze, den Wärmeschutz der Fenster zu verbessern, werden im Folgenden beschrieben. Des Weiteren liefert (Chow et al. 2010) eine Übersicht über derzeit eingesetzte Fenster- und Verglasungstypen, sowie neue Entwicklungen, wobei der Fokus auf Verglasungen für Regionen mit einem hohen Kühlbedarf liegt.

Fenstertypen

- Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung

Hochdämmende Dreischeibenverglasungen haben nach (Heinemann et al. 2011) einen Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen 0,5 und 0,7 W/(m²*K). Zum Vergleich: Fenster mit Einfachglas haben einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 4,7 W/(m²*K) und selbst Fenster mit Zweischeibenwärmedämmglas haben noch einen Wärmedurchgangskoeffizienten in Höhe von 1,5 W/(m²*K) (VFF/BF 2011). Durch den Austausch alter Fenster im Bestand können die Wärmeverluste substanziell reduziert werden. Betrachtet man die Marktentwicklung bei den Fenstern seit 1971 (VFF/BF 2011), so ist zu erwarten, dass bis 2050 ein Großteil der Fenster mindestens eine Zwei-, eher aber eine Dreischeibenwärmeschutzverglasung haben wird.

- Vakuumfenster

Wie bei den Vakuumisolierpaneelen für opake Gebäudeteile führt die Erzeugung eines Vakuums im Fensterzwischenraum zu einer fast vollständigen Unterbindung der Gaswärmeleitung (Heinemann et al. 2011). Dadurch können bei Vakuumisoliertgläsern mit Zweischeibenaufbau ähnliche Wärmedurchgangskoeffizienten der Glasfläche erreicht werden wie bei Dreischeibenwärmeschutzverglasungen, allerdings mit wesentlich geringerem Materialaufwand, Gewicht und kleineren Systemstärken (ca. 25 % der Dicke eines Dreischeibenwärmeschutzglases). Der Gasdruck im Scheibenzwischenraum muss dafür auf 10⁻³ mbar gesenkt werden (Heinemann et al. 2011). Zentrale Herausforderung ist dabei die Dichtheit des Randverbundes, um das Eindringen von Luft in den Scheibenzwischenraum über die Lebensdauer der Fenster zu unterbinden. Ferner werden thermisch, mechanisch und optisch geeignete Stützen benötigt, die verhindern, dass die Scheiben durch den Druck der Atmosphäre zusammengepresst werden, dabei jedoch die Sicht nicht negativ beeinflussen (Heinemann et al. 2011). Vakuumverglasungen werden teilweise schon versuchsweise gefertigt und ihre breite Markteinführung wird in naher Zukunft erfolgen. Durch Massenproduktion und die Optimierung der Produktionsverfahren wird ein Preis ähnlich dem herkömmlicher Dreischeibenverglasungen (ca. 100 EUR/m²) erwartet (Heinemann et al. 2011). Ferner wird nach (Heinemann et al. 2011) damit gerechnet, dass die Vakuumverglasung die Dreischeibenwärmeschutzverglasung mittelfristig ablösen wird.

Nach Morhart (2014) haben asiatische Hersteller angekündigt, im Jahr 2015 -Zweischeiben-Vakuumfenster auf den europäischen Markt zu bringen. Die sollen einen U-Wert der Verglasung von $U_g = 0,3 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$ haben und mit 110 EUR/m² relativ günstig sein.

- Rahmen

Herkömmliche Rahmen bestehen in der Regel aus Aluminium, PVC oder Holz. Allerdings ist das Optimierungspotenzial bezüglich des Wärmedurchgangskoeffizienten bei diesen Materialien begrenzt und U_F-Werte von 0,7 W/(m²*K) sind nur mit einem hohen Aufwand zu erzielen (u.a. ver-

stärkte Profile und Verschlüsse, große Bautiefen/ Profilbreiten der Fensterkonstruktion) (Heinemann et al. 2011). Neue Rahmenkonstruktionen setzen auf Polyurethan (PUR), wobei der däm-mende Kern aus aufgeschäumtem PUR besteht und die formstabile und wetterschützende Um-mantelung aus PUR-Vollmaterial. Damit können ähnliche U_f -Werte (derzeit $0,68 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) wie bei Passivhausfensterrahmen – bestehend aus Holz, Holz/ Alu, PVC-Profilen oder Polyurethan-Integralschaum mit einem U-Wert des Rahmens U_f zwischen $0,5$ und $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Fingerling et al. 2000) – erreicht werden, allerdings mit weniger Materialaufwand und geringeren Bautiefen. Die PUR-Rahmenkonstruktion ist auch für den Einsatz von Vakuumverglasungen geeignet. Ein Nachteil ist, dass das Material keine tragende Funktion übernehmen kann, weshalb die Verwen-dung in vorgefertigten Fassadensystemen über mehrere Geschosse nicht möglich ist. Die Rah-men können dagegen in thermisch optimierten Pfosten-Riegel-Konstruktionen mit Aluminium-trägern eingesetzt werden (Heinemann et al. 2011).

Passive Solarenergienutzung

Die passive Solarenergienutzung ist vor allem in der Übergangszeit und in den Wintermonaten ein wichtiger Baustein für die Reduktion des Heizenergiebedarfs. Essentiell für die passive Solarenergie-nutzung ist eine Orientierung des Gebäudes und eines Großteils der Fensterflächen und anderer transparenter Hüllflächenelemente Richtung Süden. Die durch die transparenten Bauteile ein-fallende Sonnenstrahlung wird dabei von den opaken Raumschließungsflächen absorbiert, wo-durch sich diese erwärmen. Nach Voss et al. (2005) kann dies in Wohngebäuden häufig umgesetzt werden, findet aber in Nichtwohngebäuden und hier v.a. in Büro- und Verwaltungsgebäuden selten Anwendung. In diesen Gebäuden befinden sich Verkehrsflächen und Nebenräume häufig in der Mitte des Gebäudes und die Büroräume am Rand, womit Fensterfläche nicht nur auf einer Gebäudeseite (Süden) konzentriert, sondern, je nach Umgebung des Gebäudes, gleichmäßig auf alle Gebäudeseiten verteilt sind. Dies erhöht im Winter die Möglichkeit der Nutzung der Sonneneinstrahlung für die Be-heizung des Gebäudes, birgt aber in den Sommermonaten die Gefahr einer Überhitzung, weshalb in den Sommermonaten Sonnenschutzeinrichtungen essentiell sind (s. unten) und/ oder Dachüber-stände und andere auskragende Fassadenelemente so konstruiert sind, dass sie die transparenten Elemente im Sommer verschatten.

Eine weitere Möglichkeit der passiven Solarenergienutzung sind Glas-Doppelfassaden, bei denen die Luft im Fassadenzwischenraum erwärmt wird, wodurch die Wärmeverluste im Winter reduziert wer-den. In Voss et al. (2005) wird allerdings darauf hingewiesen, dass dieser Effekt den erhöhten Auf-wand und die zusätzlichen Kosten für eine solche Fassadenkonstruktion oft nicht rechtfertigt. Darü-ber hinaus liegt der Sonnenschutz oft in dem Fassadenzwischenraum, wodurch eine Überhitzung in den Sommermonaten gefördert wird und Gebäude mit Glas-Doppelfassaden oft nicht ohne eine akti-ve Kühlung betrieben werden können.

Auch die transparente Wärmedämmung (TWD) kann die passive Solarenergienutzung erhöhen. Da-bei werden hochtransparente Dämmelemente auf der Fassade angebracht. Die dahinterliegende möglichst dunkle Fassade wird erwärmt. Die Wärme wird aufgrund guter Dämmeigenschaften der TWD über Wärmeleitung in der Wand an die dahinterliegenden Räume abgegeben (vgl. Voss et al. 2005). Vergleichbar mit einer 3-fach-Wärmeschutzverglasung besetzen TWD aufgrund ihrer hohen Kosten nach Voss et al. (2005) bisher nur einen Nischenmarkt.

Sonnenschutz

Um eine Überhitzung in den Sommermonaten zu vermeiden, welche eine Steigerung des Kühlener-gie- und Klimatisierungsenergiebedarfs verursachen, sind Sonnenschutzsysteme an den Fenstern mit Ausrichtung Osten, Süden und Westen nötig. Vor allem vor dem Hintergrund immer größerer Fens-

terflächen in Bürogebäuden und der oben beschriebenen Maßnahmen zur Steigerung der passiven Solarenergienutzung (u.a. Ausrichtung der Gebäude und Fenster Richtung Süden) gewinnt der aktive und passive Sonnenschutz zunehmend an Bedeutung. Gängige Systeme hierfür sind außenliegende Jalousien, Rollläden oder Markisen, die das direkt einfallende Sonnenlicht umlenken oder abschirmen und so zu einer Reduktion der direkten Einstrahlung in Fensternähe beitragen (Jakobiak 2005). Jalousien können entweder außen oder innen am Fenster angebracht werden, oder, wenn sie schmutzempfindliche Oberflächen haben, in den Scheibenzwischenräumen eingebaut werden. Durch optimierte Profile und Oberflächenstrukturen können Jalousien bezüglich der Anforderung eines optimalen Wärmeschutzes im Sommer bei gleichzeitiger ausreichender Helligkeit im Inneren von Gebäuden optimiert werden (vgl. u.a. Kuhn 2006). Neben den nicht direkt mit dem Fenster verbundenen Sonnenschutzsystemen gibt es auch Ansätze, bei denen Verschattungssysteme direkt mit der Verglasung verbunden sind. Dabei wird in der Regel der Energiedurchlassgrad der Verglasung verändert. Beispiele hierfür und die wesentlichen Eigenschaften der betrachteten Systeme sind im Folgenden beschrieben:

- **Gaschrome Schichten:** Die optischen und energetischen Eigenschaften der Verglasung werden in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Gases (oftmals der Wasserstoffgehalt) im Scheibenzwischenraum verändert. Der Wasserstoffgehalt wird dabei durch in die Fassade integrierte Elektrolyseure gesteuert. Der Schichtaufbau dieses Ansatzes ist relativ einfach, es ist allerdings eine aufwändige Anlagentechnik nötig (Wietschel et al. 2010). Nach Wagner et al. (2013) kann mit einem gaschromen System ein Schalthub bei Transmission von 0,76 auf 0,18 und beim g-Wert von 0,77 bis 0,36 erreicht werden. Allerdings sind nach Wagner et al. (2013) die Marktentwicklungen eingestellt worden, womit es derzeit nicht absehbar ist, ob Fenster mit gaschromen Schichten jemals in den Markt eingeführt werden.
- **Elektrochrome Schichten:** Dies sind direkt mit der Verglasung verbundene Schichten, die ihre optischen Eigenschaften in Abhängigkeit der angelegten (externen) Spannung verändern (Wietschel et al. 2010, Georg et al. 1998). Die Spannung kann dabei z.B. in Abhängigkeit der Außentemperatur und / oder der einfallenden Strahlung gesteuert werden. Damit können die Scheiben an heißen Tagen mit starker Sonneneinstrahlung verdunkelt werden, womit die solaren Wärmeeinträge minimiert werden. An kalten Tagen hingegen gelangt ein Großteil der Strahlung durch das Fenster in das Gebäude und beheizt dieses mit. Derzeit wird in erster Linie an der Verbesserung der Transmission und an der Reduktion der Produktionskosten gearbeitet. Elektrochrome Verglasungen sind nach Wagner et al. (2013) schon am Markt verfügbar.

Neuere Ansätze sind die Kombination elektrochromer Schichten mit Photovoltaik-Zellen um den benötigten Strom direkt im Fenster zu erzeugen (Photoelektrochrome Schichten), sowie die Entwicklung schaltbar absorbierender und / oder streuender Schichten, in denen Sonnen- und Sichtschutz kombiniert werden (u.a. auf Basis von Wolframoxid) (Wietschel et al. 2010). Photoelektrochrome Schichten sind auch in der Form denkbar, dass die Veränderung der Farbe und damit des Energiedurchlassgrades der elektrochromen Schicht direkt durch die einfallende Strahlung hervorgerufen wird ohne die vorherige Umwandlung in elektrische Energie, wodurch der Aufbau wesentlich einfacher wird (Wietschel et al. 2010). Im Labormaßstab erreichen solche Schichten eine Verringerung der solaren Transmission von 62 % auf 1,6 % (vgl. Wagner et al. 2013).

- **Thermotrope Schichten:** Diese Schichten schalten in Abhängigkeit der Temperatur selbstständig zwischen transparent und streuend hin und her. Sie basieren auf der thermoreversiblen Änderung von Strukturen und / oder der entsprechenden Änderung des Brechungsindex der eingesetzten Materialien (Wietschel et al. 2010). Es wird unterschieden zwischen phasenseparierenden Systemen (Mischen und Entmischen der Phasen, u.a. Polymerblends, Hydrogele) und Systemen mit festen Domänen, bei denen sich der Brechungsindex mit der Temperatur ändert (Wietschel et

al. 2010). Auf Polymeren basierende Systeme in Kombination mit einer Wärmeschutzverglasung (thermotrope Wärmeschutzverglasung) erreichen nach Wagner et al. (2013) einen Schaltheb des g-Werts von 0,53 auf 0,37. Systeme mit Hydrogelen weisen nach (Wagner et al. 2013) eine höhere Transparenz im ungeschalteten Zustand und einen höheren Schaltheb auf. Teilweise kommen thermochrome Schichten in Öfen zum Einsatz. Für die Anwendung an Gebäuden sind nach (Wietschel et al. 2010) derzeit nur kleine Mengen (Prototypen) in Japan verfügbar. Nach (Wagner et al. 2013) sind allerdings auch in Europa schon Systeme bis zur Marktreife entwickelt.

- **Saisonal wirksame (Mikro-) Strukturen:** Die Schichten mit Strukturen im Millimeter- bis Zentimeterbereich reflektieren oder lenken die direkte Sonneinstrahlung gezielt um (Wietschel et al. 2010). Die Strukturierung ist je nach Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung für diese durchlässig oder nicht. Die Strukturen werden in der Regel in die Verglasungen und Fassadenelemente integriert, um sie vor Umwelteinflüssen, Verschmutzung und UV-Strahlung zu schützen. Ein weiterer Ansatz ist nach Wietschel et al. (2010) die direkte Einbringung der Strukturen in als Fassadenelemente eingesetzte Polymerplatten, wobei bei diesem Ansatz die Erfahrung zur Langzeitstabilität fehlt. Teilweise werden die Elemente so strukturiert, dass sie zusätzlich zur Minimierung der direkten Einstrahlung das einfallende Licht im Raum streuen, wodurch der Kunstlichtbedarf reduziert wird und ungewünschte Nebeneffekte prismatischer Strukturen wie Blendung, Farbaufspaltungseffekte oder Nebenbilder minimiert werden (Wietschel et al. 2010). Derzeit stellen unter anderem die hohen Kosten und die Langlebigkeit und Güte der Strukturierung Hindernisse für die breite Markteinführung dar. Darüber hinaus bietet auch die Integration in Fassadenelemente noch Verbesserungspotenzial (Wietschel et al. 2010).
- **Richtungsselektive und lichtlenkende Verglasungen:** Hierunter sind statische und nachgeführte Ansätze zusammengefasst, die je nach Einstrahlungswinkel lichtdurchlässig sind oder nicht, bzw. je nach Winkel das einfallende Licht unterschiedlich im Rauminneren verteilen (Wagner et al. 2013). So werden z.B. hohe sommerliche Sonnenstände ausgeblendet und damit zu hohe solare Gewinne vermieden. G-Wert und Transmissionsgrad der Systeme haben i.d.R. eine starke Winkelabhängigkeit. Nach Wagner et al. (2013) werden prinzipiell fünf wesentliche Funktionalitäten unterschieden:
 - o Richtungsselektive Verschattung mit Diffuslichtdurchlass
 - o Diffuslichtlenkung
 - o Sonnenlichtlenkung
 - o Lichttransport
 - o Lichtstreuung

Nachteilig bei den Systemen ist, dass der Außenbezug eingeschränkt und oft nur für bestimmte Blickwinkel gegeben ist (Wagner et al. 2013). Dies trifft vor allem auf die heute schon am Markt verfügbaren Systeme mit makroskopischen Strukturen. Derzeit noch in der Entwicklung befinden sich mikro- und nanostrukturierte Oberflächen zur Lichtlenkung und für den Sonnenschutz, die gegenüber heutigen Systemen einige Vorteile aufweisen, wie nach Wagner et al. (2013) z.B.:

- o Einsparung an Material und damit an Gewicht
 - o vor allem bei Kunststoffen eine geringere Absorption im Material
 - o ein in der Fläche homogeneres Erscheinungsbild (das Menschliche Auge kann die Strukturen nicht mehr auflösen)
 - o leichtere Integration in die Verglasung
 - o geringere Produktionskosten (Mikroreplikation).
- **Fassadenbegrünung:** Die Begrünung von Fassaden, entweder bodengebunden, wandgebunden oder eine Kombination der genannten Varianten, kann den Wärmeeintrag in das Gebäude in den

Sommermonaten erheblich reduzieren. Werden dabei Pflanzen eingesetzt, die im Winter ihre Blätter verlieren, beeinträchtigt die Begrünung auch nicht die im Winter gewünschten solaren Wärmegewinne (vgl. Pfoser 2014). Fassadenbegrünungen sind nach Pfoser (2014) prinzipiell bei allen üblichen Fassadenbauweisen möglich. Durch sommergrüne Pflanzen können Sonnenschutzsysteme substituiert werden. Gerüstkletterpflanzen erreichen nach Pfoser (2014) einen mit Jalousien vergleichbaren Abminderungsfaktor F_c von 0,62 bis 0,3. Sie reflektieren und / oder absorbieren zwischen 40 und 80 % der einfallenden Strahlung. Weitere positive Effekte der Fassadenbegrünung sind die Staubfilterung und Luftbefeuchtung, sowie die unterstützende Wirkung bei der Nachtlüftung, die Absenkung der Zulufttemperatur bei Fensterlüftung und die Reduktion der Oberflächentemperatur der Außenwand um 2 bis 10 Kelvin. Eine Fassadenbegrünung kann i.d.R. auch mit Fassadenkonstruktionen wie fassadenintegrierten Luftkollektoren kombiniert werden und vermeidet dabei deren Überhitzung (Pfoser 2014).

- **Statischer Sonnenschutz:** Balkone, Dachüberstände und Auskragungen aus der Fassade können die direkte Sonneneinstrahlung in das Gebäudeinnere reduzieren. Ihre Wirkung entfalten sie in erster Linie an Südfassaden (Voss et al. 2005). Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht beweglich sind, also nicht an geänderte Strahlungsverhältnisse angepasst werden können. Durch die Verringerung der Einstrahlung wird allerdings auch das Beleuchtungsniveau im Inneren des Gebäudes verschlechtert. Statischer Sonnenschutz wird daher nach Voss et al. (2005) in erster Linie bei nicht permanent genutzten Räumen und Verkehrsflächen eingesetzt.

3.1.2 Beleuchtung

Der Anteil der elektrischen Energie für die Beleuchtung am Stromverbrauch (Endenergie) ist zwischen 1996 bis 2011 von 10,5 % auf 9 % zurückgegangen. Auch der absolute Stromverbrauch für die Beleuchtung in den Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr ist in diesem Zeitraum leicht von 175,8 PJ 1996 auf 169,5 PJ gesunken (BMWi 2013). Dies ist nach Wietschel et al. (2010) auf die Weiterentwicklungen bei Lichtquellen, den Vorschaltgeräten und Reflektormaterialien zurückzuführen. In Wietschel et al. (2010) wird davon ausgegangen, dass durch die bessere Tageslichtnutzung und den Einsatz effizienter Techniken der spezifische Energiebedarf für die Beleuchtung in Gebäuden bis 2050 um ca. 50 % reduziert werden kann. Nach licht.de (2008) ist es sogar möglich, mit Hilfe der Nutzung dimmbarer elektronischer Vorschaltgeräte, einer Tageslichtsteuerung und den Einsatz von Bewegungsmeldern zur Präsenzkontrolle bis zu 82 % der Energie für die Beleuchtung im Vergleich zu heutigen Leuchtstofflampen mit konventionellen Vorschaltgeräten einzusparen. In licht.de (2008) wird auch darauf hingewiesen, dass bei der Beleuchtung zukünftig die größten Energieeinsparungen durch eine bessere Tageslichtnutzung erzielt werden können. Eine bessere Steuerung der Beleuchtung (Präsenzsteuerung) kann ebenfalls dazu beitragen, den Energiebedarf der Beleuchtung zu senken.

3.1.2.1 Tageslichtnutzung

Mit einer verbesserten Tageslichtnutzung kann nach Wietschel et al. (2010) bis zu 60 % Energieeinsparung bei der künstlichen Beleuchtung erzielt werden. Allerdings ist eine verstärkte Tageslichtnutzung in Bestandsgebäuden schwer zu realisieren. Dies liegt unter anderem an den baulichen Verhältnissen, wie z.B. geringen Abständen zwischen Gebäuden, zu kleinen Fenstern oder zu großen Raumtiefen (vgl. Wietschel et al. 2010). Hingegen kann bei Neubauten durch die richtige Fensterdimensionierung und genügend große Abstände zwischen Gebäuden ein wesentlich verminderter Energiebedarf für die Beleuchtung realisiert werden.

Neben der Nutzung des Tageslichts durch die richtige Dimensionierung der Fenster kann Sonnenlicht auch mit optischen Systemen im Raum bzw. im Gebäude verteilt werden. Eine Variante sind dabei Sonnenschutzsysteme, die das direkt einfallende Sonnenlicht umlenken und so zu einer Reduktion der direkten Einstrahlung in Fensternähe beitragen und gleichzeitig den Anteil des natürli-

chen Lichts in der Raumtiefe erhöhen (Jakobiak 2005). Da die reflektierenden Oberflächen schmutzempfindlich sind, sollten diese in den Scheibenzwischenräumen eingebaut werden, um sie vor Verschmutzung zu schützen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit mittels Lichtlenkglas, Prismenplatten, Y-Glas oder verspiegelten Lamellen direkte Sonnenstrahlen abzulenken und im Raum bedarfsgerecht zu verteilen (Jakobiak 2005). Ein Vorteil der genannten Systeme ist, dass der Einfall direkter Sonnenstrahlen kontrolliert und teilweise reduziert werden kann, wodurch die Systeme neben besseren Lichtverhältnissen in der Raumtiefe auch zur Vermeidung einer Überhitzung im Sommer beitragen. Um fensterlose Gebäudebereiche mit Tageslicht zu versorgen, werden Lichtleitungssysteme eingesetzt, die im Außenbereich Licht „sammeln“, welches durch ein lichtleitendes Medium in das Gebäudeinnere geleitet und dort mit optischen Systemen verteilt wird (Jakobiak 2005). Neben den genannten Ansätzen finden in Passivhäusern auch Fensterläden Anwendung, die in erster Linie zur Minimierung der Wärmeverluste in der Nacht konstruiert sind, die aber durch eine verspiegelte Innenseite auch zur Lenkung des Lichts und damit zur Erhöhung der Tageslichtnutzung vor allem an Ost- und Westfassaden genutzt werden können (Fingerling et al. 2000).

Darüber hinaus kann der Bedarf an künstlicher Beleuchtung durch Verbesserungen beim Zusammenspiel zwischen Sonnenschutz und der Beleuchtungsregelung sowie neuen Materialien für den Sonnenschutz reduziert werden. Die Verwendung aktiver Verschattungselemente führt derzeit häufig dazu, dass Räume künstlich beleuchtet werden müssen, obwohl ausreichend Tageslicht verfügbar ist (Wietschel et al. 2010).

3.1.2.2 Künstliche Beleuchtung

Nach licht.de (2010) werden LEDs in den nächsten 10 Jahren das vorherrschende Leuchtmittel werden. LEDs sind im Vergleich mit anderen Leuchtmitteln sehr effizient (s. auch Tabelle 6) und erreichten 2010 eine durchschnittliche Lichtausbeute von 50 Lumen pro Watt [lm/W], High-Power LEDs erreichten bereits 90 lm/W und im Labor wurden teilweise bis zu 200 lm/W erzielt. Nach Thema et al. (2010) werden bis 2020 Nettolichtausbeuten (unter Berücksichtigung aller Verluste) von bis zu 219 lm/W bei LED-Chips (Kaltes Licht) erwartet. Warmlicht-LED-Lampen werden auch in Zukunft eine geringere Lichtausbeute haben als Kaltlichtlampen (2015 bis zu 78 lm/W, langfristig bis zu 150 lm/W) (Thema et al. 2010). Die Lichtausbeute von LEDs liegt damit weit über der von Glühlampen von 10 lm/w und Halogenlampen von 20 lm/W (licht.de 2010). Neben einer guten Lichtausbeute haben LEDs eine sehr lange Lebensdauer von teilweise schon heute über 50.000 Betriebsstunden (zum Vergleich: Glühlampe ca. 1.000 h, Leuchtstofflampe ca. 18.000 h; licht.de 2010, Thema et al. 2010), wobei diese Lebensdauer nur bei moderaten bis tiefen Temperaturen erreicht wird. In warmer Umgebung ist mit einer geringeren Lebensdauer zu rechnen. Einen Überblick über heute eingesetzte und in der Entwicklung befindliche Lampen gibt Tabelle 6. Die Farbskalierung in der Tabelle gibt die zukünftige Relevanz der Lampen wieder (grün: hohe Relevanz, rot: keine Relevanz, weiß: keine Daten über künftige Relevanz vorhanden).

Die Kosten für LEDs sind schon in den letzten Jahren stark gefallen und es wird erwartet, dass sie auch in Zukunft durch Effizienzsteigerungen und Massenproduktion weiter sinken werden. In Bardley et al. (2010) wird von 2010 bis 2015 von einer Kostensenkung von 13 auf 2 US\$/klm (LED-Preis kaltes Licht) und von 25 auf 3 US\$/klm (LED-Preis warmes Licht) ausgegangen. In Thema et al. (2010) wird ein Kostensenkungspotenzial von LEDs zwischen 2010 und 2020 von über 60 % angegeben. Ein ähnliches Kostensenkungspotenzial wird bei LED-Leuchten erwartet; von 101 US\$/klm 2010 auf 28 US\$/klm 2015 (Thema et al. 2010, Bardsley et al. 2010). Die Entwicklung der Kosten von LED-Lampen nach 2020 ist derzeit noch nicht abzuschätzen.

Tabelle 6: Vergleich verschiedener Beleuchtungstechniken

Lampentyp		Leistung [W]	Lichtausbeute [lm/W]	Lebensdauer [h]	Zuk. Relevanz ^{*)}
Stabförmige Dreiban- den-Leuchtstofflampen	T5; Ø 16 mm) mit hoher Lichtausbeute	14-35	89-104	bis 18.000	
	T5; Ø 16 mm) mit ho- hem Lichtstrom	24-80	77-88	bis 18.000	
	T8; Ø 26 mm	18-58	75-90	bis 18.000	
Kompaktleucht- stofflampen	2-, 4- und 6-Rohrlampe	5-120	50-75	bis 24.000	
	2-Rohrlampe	18-80	67-75	bis 24.000	
	4-Rohrlampe	18-36	61-78	bis 24.000	
	2D-Lampe	10-55	65-71	bis 24.000	
Induktionslampen	Ring-/ Kolbenform	55-165	65-90	Ø 60.000	
Halogenlampen (230 V)	Mit Hüllkolben	25-250	10-17	ca. 2.000	
	Miniformat	25-75	10-15	ca. 2.000	
	Mit Reflektor	40-100		ca. 2.000	
	Zweiseitig gesockelt	60-2.000	14-22	ca. 2.000	
Energiesparlampen	Glühlampenform	5-23	30-59	5.000-15.000	
	Standardform	5-23	48-65	5.000-15.000	
Niedervolt- Halogenlampen (12 V)	Mit Reflektor	20-50		ca. 2.000	
	Stiftsockellampen	5-100	12-23	ca. 2.000	
Halogen-Metall- dampflampen	Einseitig gesockelt	35-150	85-95	ca. 10.000	
	Zweiseitig gesockelt	70-400	77-92	ca. 10.000	
Natriumdampf- Hochdrucklampen	Röhrenform	35-1.000	51-150	ca. 16.000	
Natriumdampf- Niederdrucklampen	Röhrenform	18-180	100-178	ca. 16.000	
Leuchtdioden	LED	0,7-1,5	20-90 ^{**)}	15.000-50.000+	
Organische Leuchtdi- oden	OLED		25-65 (F&E)	- xxx	

^{*)} Farbskalierung: zukünftige Relevanz der Lampen; grün: hohe Relevanz, rot: keine Relevanz, weiß: keine Daten über zukünftige Relevanz vorhanden

^{**)} F&E bis zu 200 bei einzelnen Chips (nicht auf Platine und in Leuchte) im Labor

Quelle: licht.de (2005), licht.de (2010), Dena (2012), Öhlinger (2010), Fördergemeinschaft Gutes Licht (2005)

Steuerung

Bei der Steuerung und Regelung kommen vor allem die Tageslichtsteuerung (künstliche Beleuchtung in Abhängigkeit von der verfügbaren Menge natürlichen Lichts) und Präsenzkontrolle (künstliche Beleuchtung in Abhängigkeit von der Anwesenheit von Personen) sowie Kombinationen der beiden Strategien zum Einsatz (Öhlinger 2010). Bei der Tageslichtsteuerung wird ein gewünschtes Beleuchtungsniveau (Summe aus natürlicher und künstlicher Beleuchtung) definiert, welches von Sensoren überwacht wird. Die Anpassung der künstlichen Beleuchtung erfolgt durch dimmen oder Teilabschaltungen der Lampen im Raum.

Für die Steuerung der Beleuchtung kann auch die digitale Lichtsteuerung (DALI) eingesetzt werden. Diese ermöglicht ein intelligentes Lichtmanagement, die Einbindung in die übergeordnete Gebäudesystemtechnik über Schnittstellen und Bussysteme sowie die Definition von Beleuchtungsinszenierungen und das zentrale Ansteuern einzelner Lampen. Dadurch ist auch die Einbindung von z.B. Jalousien in die Lichtsteuerung möglich.

Vorschaltgeräte

Elektronische Vorschaltgeräte (EVG) erhöhen die Lebensdauer (bis zu 50 %) und Lichtausbeute von Lampen (Öhlinger 2010). Um den Energieverbrauch des Systems Vorschaltgerät / Lampe zu senken, wurden mit der Richtlinie 2000/55/EG¹⁷ (zuletzt geändert am 20.3.2008 durch die Richtlinie 2008/28/EG¹⁸) Effizienzanforderungen für Vorschaltgeräte von Leuchtstofflampen definiert und diese in Effizienzklassen eingeteilt (A – D, wobei Vorschaltgeräte der Klassen C und D nicht mehr zulässig sind). Bei EVGs werden drei Formen unterschieden

- Dimmbare elektronische Vorschaltgeräte (A1)
- Elektronische Vorschaltgeräte mit reduzierten Verlusten (A2)
- Elektronische Vorschaltgeräte (A3)

Der Einsatz von EVGs kann im Vergleich zu konventionellen Vorschaltgeräten ca. 20 % Strom einsparen (Öhlinger 2010).

Darüber hinaus ermöglichen dimmbare EVGs in Verbindung mit Sensoren das automatische Dimmen der Lampen und damit die automatische Anpassung der künstlichen Beleuchtung an die Lichtverhältnisse im Raum.

3.1.3 Lüftung

Bisher fanden kontrollierte Lüftungssysteme hauptsächlich in Nicht-Wohngebäuden und neuen, energieeffizienten Wohngebäuden (z.B. Passivhäusern) Anwendung. Die kontrollierte Lüftung von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden gewinnt aber mit zunehmender Luftdichtheit der Gebäude auch bei (sanierten) Bestandsgebäuden an Bedeutung. Dies betrifft zum einen die Gewährleistung eines hygienisch notwendigen Mindestluftwechsels, zum anderen die Minimierung der mit der Lüftung verbundenen Wärmeverluste. Der Luftvolumenstrom sollte sich dabei an dem tatsächlich vorhandenen Bedarf orientieren (bedarfsgeregelte Lüftung oder Bedarfslüftung) um unnötige Wärmeverluste und einen unnötig hohen Stromverbrauch der Ventilatoren und anderer technischer Komponenten zu vermeiden. Bei der Bedarfslüftung ist der Luftwechsel unter anderem abhängig von der Belegung der Räume, der Luftfeuchtigkeit (v.a. in Küchen und Sanitärräumen), der Schadstoffbelastung des Gebäudes und messbaren Bestandteilen der Luft (u.a. CO₂, VOC (Volatile Organic Compounds) (vgl. (Kabus 2009, Lange (ohne Datum)). Durch eine an den tatsächlichen Bedarf angepasste Lüftung kann der Lüftungsenergiebedarf nach Widmer (2005) um 20 bis 50 % reduziert werden. Die Minimierung der Lüftungswärmeverluste in der Heizperiode durch Wärmerückgewinnung wird in Kapitel 3.3.5.2 näher betrachtet. Die Möglichkeiten effizienter Lüftungsstrategien in der Kühlperiode durch natürliche Lüftung und Nachtlüftung werden in Kapitel 3.3.4.3 behandelt.

¹⁷ Richtlinie 2000/55/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. September 2000 über Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen

¹⁸ EU-Richtlinie 2008/28/EG vom 11. März 2008 zur Änderung der Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG im Hinblick auf die der Kommission übertragenen Durchführungsbefugnisse.

Neben der Qualität der Wärmerückgewinnung ist die Reduktion des Hilfsenergiebedarfs in Lüftungsanlagen ein wichtiger Parameter für die energieeffiziente Gewährleistung des hygienisch und bauphysikalisch notwendigen Mindestluftwechsels in Gebäuden. Der Einsatz energieeffizienter Ventilatoren, geeignete Regelstrategien – etwa die Anpassung des Luftvolumenstroms an den Bedarf – sowie eine regelmäßige Reinigung der Filter und Wartung der Gesamtanlage ist dabei unabdingbar (Sahin 2012). Der Einsatz effizienter Luftförderungstechniken hat nach Sahin (2012) entscheidenden Einfluss auf die Lebenszykluskosten einer Lüftungsanlage, da 40 bis 70 % der Betriebskosten auf die Ventilatoren entfallen. Durch den Einsatz effizienter Antriebe und Ventilatoren kann der Systemwirkungsgrad der Luftförderung erhöht werden (derzeit üblich sind Systemwirkungsgrade zwischen 30 und 72 % (Sahin 2012)). Nach Benke/Leutgöb (2008) kann allein durch den Einsatz ineffizienter Antriebe in Lüftungsanlagen der Energieverbrauch um den Faktor 4,5 über dem nötigen Verbrauch liegen. Durch den Einsatz effizienter Anlagen kann der spezifische Energieverbrauch der Lüftung nach Benke/Leutgöb (2008) in kWh/(m²a) um bis zu 70 % reduziert werden.

3.2 Verteilung, Speicherung und Übergabe

3.2.1 Wärmespeicher

Wärmespeicher gewinnen durch die verstärkte Verknüpfung des Strom- und Wärmesektors, durch den Zuwachs erneuerbarer Energien und den Ausbau von KWK-Anlagen an Bedeutung. Sie ermöglichen eine Entkopplung von Wärmeangebot und -nachfrage und damit beispielsweise KWK-Anlagen strom- und nicht wärmegeführt zu betreiben. Damit können diese zum Ausgleich der Fluktuation der Stromeinspeisung aus erneuerbare Energien Anlagen dienen. Darüber hinaus können Wärmeerträge aus fluktuierenden Quellen wie Solarkollektoren gespeichert werden. Hierfür sind zum einen dezentrale Wärmespeicher nötig, die die Wärmeversorgung über einen kurzen Zeitraum von wenigen Stunden bis zu mehreren Tagen sichern können, zum anderen aber auch große, in Wärmenetze integrierte Speicher, die Wärme auch saisonal speichern können.

3.2.1.1 Dezentrale Wärmespeicher

Dezentrale Wärmespeicher werden als Pufferspeicher für die Heizungsanlage oder als Kombispeicher für die Speicherung von Trinkwarmwasser und Warmwasser für das Heizungssystem schon heute weit verbreitet eingesetzt. Das Wärmespeichermedium ist dabei Wasser mit einer Speicherkapazität von 60 bis 80 kWh/m³ (AEE 2009). Da es sich um etablierte Techniken handelt, sind zukünftig keine nennenswerten Kostensenkungen und Effizienzsteigerungen zu erwarten. Allerdings kann die Entwicklung neuer Speicherkonzepte nach Morhart (2008) die Kosten von Wärmespeichern in Zukunft senken. So könnten die Preise von Wärmespeicher ab einem Volumen von 10 m³ in Zukunft auf 450 EUR/m³ sinken, was einer Senkung der Kosten um ca. 300 EUR/m³ (-40 %) gegenüber gängigen Warmwasserspeichern dieser Größe nach Lucas et al. (2002) entspricht. Die Kosten sind bei dezentralen Wärmespeichern stark vom Volumen abhängig. Dies liegt unter anderem daran, dass die Oberfläche bei kleinen Speichern im Vergleich zum Volumen größer ist, d.h. der Materialeinsatz pro Volumeneinheit steigt bei kleinen Speichern. Abbildung 4 zeigt die volumenabhängige Kostenfunktion für Warmwasserspeicher mit einem Druck von 3 bar nach Lucas et al. (2002). Die in Lucas et al. (2002) angegebenen Kosten beziehen sich auf die Jahre 2000 / 2001 und sind mit Hilfe der Verbraucherpreisindizes des Statistischen Bundesamtes an das Jahr 2011 angepasst (Destatis 2013b). Für Speicher mit höherem Druck werden die Kosten mit Faktoren angepasst ($f_{p,6\text{bar}} = 1,15$; $f_{p,10\text{bar}} = 1,35$; vgl. Lucas et al. (2002), S. VII.18). Die Kosten für das Jahr 2050 ergeben sich unter der Annahme, dass sich neue Speicherkonzepte mit einem Kostensenkungspotenzial verglichen mit gängigen Warmwasserspeichern von -40 % etablieren (s.o.). Die Kostenfunktion für 2050 ergibt sich bei einer Marktdurchdringung neuer Konzepte von 100 %, welche als nicht realistisch angesehen wird. Die

tatsächlichen durchschnittlichen Preise von Warmwasserspeichern werden voraussichtlich in dem Korridor zwischen den beiden in Abbildung 4 dargestellten Kostenfunktionen liegen.

Für Kombispeicher ergeben sich höhere spezifische Investitionskosten nach Lucas et al. (2002) (s. Abbildung 5). Die Faktoren zur Anpassung der Kosten an den Speicherdruck entsprechen denen der Warmwasserspeicher. Die Kostenfunktion für 2050 ergibt sich unter der Annahme, dass neue Speicherkonzepte zu ähnlichen Kostenreduktionen führen wie bei Warmwasserspeichern (-40 %). Auch bei den Kombispeichern werden die durchschnittlichen Kosten in dem Korridor zwischen den in Abbildung 5 dargestellten Funktionen liegen.

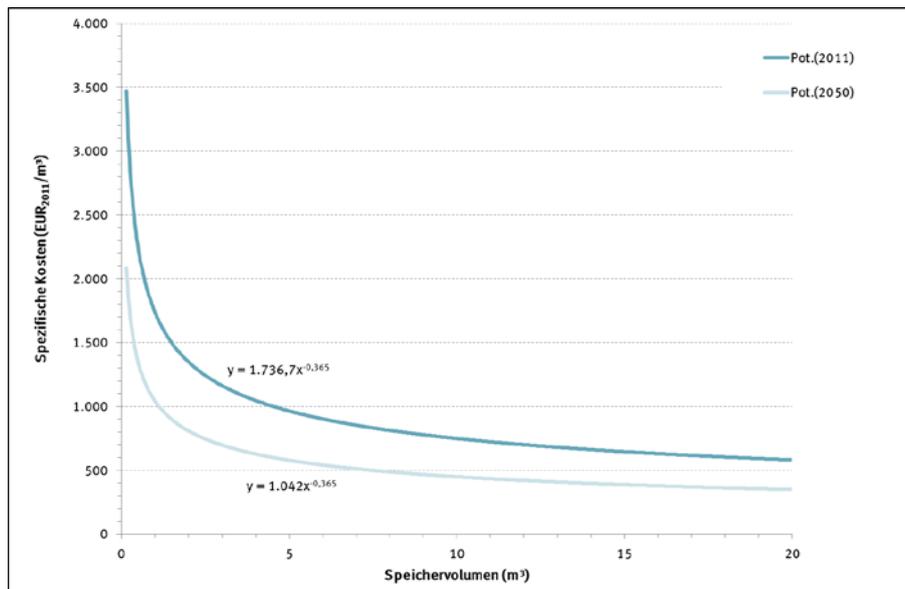
Im Vergleich zu gängigen Hauskonzepten sind die Wärmespeicher in Gebäuden mit einem hohen solaren Deckungsanteil von weit über 50 %, in einigen Fällen bis zu 100 % (sog. Solaraktivhäuser), wesentlich größer, um damit auch saisonale Schwankungen zwischen solarem Wärmeangebot und der Wärmenachfrage ausgleichen zu können (nach Drück (2012) zwischen 6 und 15 m³ in Einfamilienhäusern im Vergleich zu 0,3 bis 1,5 m³, wie sie normalerweise in EFHs eingesetzt werden). Um einen hohen solaren Deckungsanteil zu erreichen werden i.d.R. Speicherkaskaden, große zentrale Speicher, die entweder fertig geliefert oder vor Ort realisiert werden oder modulare Speicherkonzepte genutzt (vgl. Drück 2012). Die Vor- und Nachteile der genannten Konzepte sind in Tabelle 7 aufgelistet. Nach Drück (2012) bestehen vor allem in Hinblick auf die Wärmeverluste, die Temperaturschichtung und der Erhöhung der Energiedichte (v.a. durch den Einsatz von Latent-, Adsorptions- oder chemischen Speichern) Optimierungspotenziale.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile verschiedener Speicherkonzepte für Solaraktivhäuser

Speichertyp	Vorteile	Nachteile
Speicherkaskaden	Standardisierte Speicher Gute Temperaturschichtung Flexibilität	Großer Platzbedarf, hohe Wärmeverluste, Installation aufwändig, vergleichsweise teuer
Große, zentrale und vorgefertigte Speicher	i.d.R. großer Stahlbehälter, die vorgefertigt während der Bauphase in Neubau integriert oder in Bestandsgebäuden vor Ort geschweißt werden können Gutes A/V-Verhältnis → geringere Wärmeverluste	Integration, v.a. in Bestandsgebäuden schwierig → hoher Platzbedarf
Große, zentrale Speicher; Realisierung vor Ort	Kubische Speicherkonzepte → gute Raumausnutzung Aufbau vor Ort → Anpassung an örtliche Gegebenheiten möglich Druckloser Betrieb vieler Speicher; teilweise auch Druck-Speicher (i.d.R. glasfaserverstärkte Kunststoffe GFK)	Nicht alle Speicherkonzepte leicht an örtliche Gegebenheiten anpassbar (v.a. in Bestandsgebäuden relevant)
Modulare Speicher	Einzelelemente nach Bedarf kombinierbar Max. 35 % weniger Platzbedarf als Rundspeicher Max. 35 % weniger Material nötig als bei Speicherkaskaden Gemeinsame Außendämmung → geringere Wärmeverluste	Max. Volumen von 10 m ³

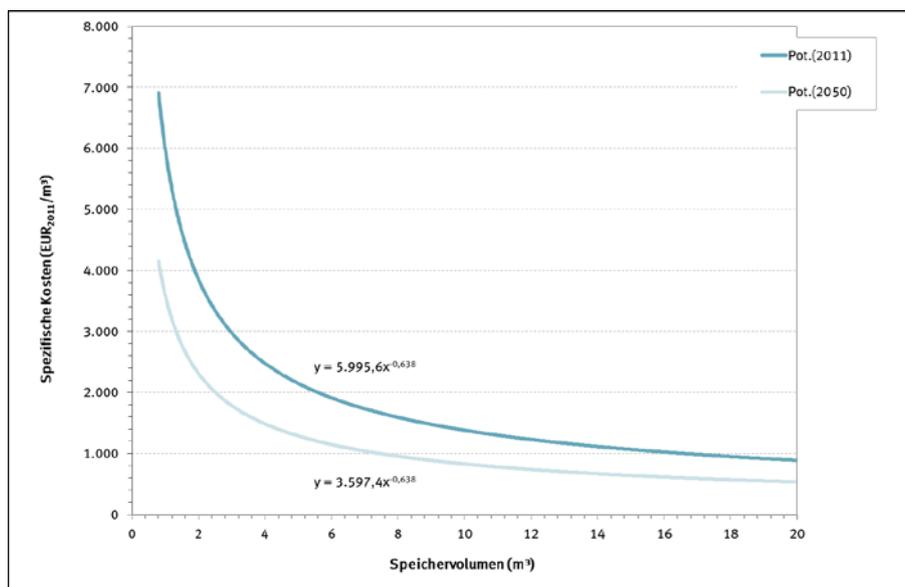
Quelle: Drück (2012)

Abbildung 4: Spezifische Kosten von Warmwasserspeichern in Abhängigkeit von deren Volumen 2011 und 2050



Quelle: Morhart (2008), Lucas et al. (2002)

Abbildung 5: Spezifische Kosten von Kombispeichern in Abhängigkeit von deren Volumen 2011 und 2050



Quelle: Morhart (2008), Lucas et al. (2002)

3.2.1.2 Zentrale Wärmespeicher

Zentrale Wärmespeicher in Wärmenetzen sind in Deutschland derzeit noch wenig verbreitet, werden aber u.a. in Dänemark schon seit längerer Zeit in (solaren) Nah- und Fernwärmenetzen zur saisonalen Wärmespeicherung eingesetzt, typischerweise als große, in die Erde eingelassene und einfach aufgebaute Kies/Wasser-Wärmespeicher (keine Dämmung gegen Erdreich, drucklos). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, große Druckspeicher in Wärmenetze zu integrieren. Dabei kommen serienmäßig hergestellte Behälter zum Einsatz. Durch den erhöhten Druck im Speicher kann Wasser bei höheren Temperaturen (>100 °C) gespeichert werden, was bei drucklosen Speichern nicht möglich

ist. Neben den genannten Speicherarten kommen folgende Wärmespeicherarten bei der saisonalen Wärmespeicherung zum Einsatz (Schmidt et al. 2005):

- Heißwasser-Wärmespeicher: Teilweise in das Erdreich eingelassene Behälter aus Stahlbeton; meist mit Wärmedämmung,
- Erdsonden-Wärmespeicher: Speicherung der Wärme im Erdreich/ Untergrundgestein; bis zu 100 Meter tief,
- Aquifer-Wärmespeicher: Wärmespeicherung in natürlichen unterirdischen Grundwasserreservoirs.

Kies/Wasser-Wärmespeicher und Druckspeicher werden schon heute genutzt und basieren im Wesentlichen auf etablierten Techniken. Daher werden in Zukunft kaum Effizienzsteigerungen bei heute schon etablierten Speichertechniken, die Wasser als Speichermedium nutzen, erwartet (vgl. Nitsch et al. 2010). Allerdings wird an neuen Speichermedien geforscht, die eine wesentlich höhere Energiedichte aufweisen als Wasserspeicher (Latentwärmespeicher, chemische Speicher). Auch werden die Reduktion von Wärmeverlusten durch ein optimiertes A/V-Verhältnis und eine verbesserte Dämmung (z.B. Vakuumdämmung) eine entscheidende Rolle bei der Effizienzsteigerung, bzw. der Verringerung von Wärmeverlusten von zentralen Wärmespeichern spielen (vgl. Wietschel et al. 2010).

Die Kosten von zentralen, saisonalen Wasserspeichern sind stark von der Ausführung abhängig. Die nach Schmidt et al. (2005) in Deutschland am weitesten verbreitete Art saisonaler Wärmespeicher sind Heißwasser-Wärmespeicher, wobei in der jüngsten Vergangenheit in Deutschland auch verstärkt Erdsonden, Erdbecken und Aquifere für die saisonale Wärmespeicherung eingesetzt wurden (vgl. Solites 2014a). Die spezifischen Investitionskosten in verschiedenen Pilotprojekten streuen dabei stark und lagen 2005 zwischen 110 und 450 EUR/m³ (Schmidt et al. 2005), in Einzelfällen auch darunter (teilweise unter 50 EUR/m³, vgl. Solites 2014b). Nach Bauer et al. (2009) ist bei diesen Speichern mit einer künftigen Kostenreduktion von ca. 30 % zu rechnen. Kies / Wasser-Wärmespeicher werden vor allem in solaren Nahwärmenetzen in Dänemark eingesetzt. Die spezifischen Investitionskosten belaufen sich nach Nielsen (2011) auf ca. 20 EUR/m³ und liegen damit deutlich unter den Kosten von Heißwasser-Wärmespeichern. Die Kosten von Aquifer-Wärmespeichern liegen nach Müller-Steinhagen (*ohne Jahresangabe*) zwischen 30 und 40 EUR/m³ Wasseräquivalent¹⁹. Über die spezifischen Kosten von Erdsonden-Wärmespeichern liegen wenige Daten vor. Nach Schneider (2013) lagen die Kosten bei einem Pilotprojekt in Crailsheim bei ca. 50 EUR/m³ Wasseräquivalent. Außer bei den Heißwasser-Wärmespeichern liegen keine Informationen über zukünftig erwartete Kostendegressionen vor.

3.2.1.3 Latentwärmespeicher

In Latentwärmespeichern (auch PCM-Speicher, PCM = Phase Change Material) wird die mit dem Phasenwechsel des eingesetzten Speichermaterials verbundene Wärme (Schmelzwärme, Lösungswärme oder Absorptionswärme) genutzt, die wesentlich größer ist als die Wärme, die aufgrund ihrer normalen spezifischen Wärmekapazität (ohne den Phasenumwandlungseffekt) bei gegebenem Temperaturniveau gespeichert werden könnte (Lucas et al. 2002). Wichtig für die Wahl des Materials sind nach Lucas et al. (2002) u.a. eine hohe Speicherkapazität pro m³, ein günstiger Schmelzpunkt, Korrosionsfreiheit und eine geringe Volumenänderung beim Phasenübergang. Derzeit werden in Latentwärmespeichern v.a. Salze (z.B. Glaubersalz, Natriumacetat) oder organische Verbindungen

¹⁹ Unter Wasseräquivalent versteht man „die Wärmekapazität eines Speichermediums, die der eines Kubikmeters Wasser im flüssigen Zustand bei Normaldruck entspricht“ (BAFA 2013).

(z.B. Paraffine, Fettsäuren) eingesetzt. Ein Vorteil gegenüber anderen Speichern (z.B. Warmwasserspeichern) ist, dass auch bei einer sehr geringen Temperaturdifferenz des Speichermediums große Wärmemengen pro Speichervolumen aufgenommen oder abgegeben werden können (vgl. Lucas et al. 2002). Des Weiteren kann die Wärme annähernd verlustfrei auch über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Ein Nachteil ist, dass jeder Latentwärmespeicher nur bei einer festgelegten Speichertemperatur arbeitet, weshalb die benötigten Temperaturen vor der Realisierung eines solchen Speichers genau definiert sein müssen (vgl. Lucas et al. 2002, Mehling et al. 2009).

Aufgrund der thermischen Eigenschaften und der geringen Volumenausdehnung bei Temperaturänderungen werden PCM-Speicher auch verstärkt in Bauteilen für Klimatisierung / Temperaturregelung in Gebäuden eingesetzt.

Über den thermischen Wirkungsgrad von Latentwärmespeichern liegen keine quantitativen Informationen vor. Es wird jedoch u.a. in Mehling et al. (2009) darauf hingewiesen, dass der Einsatz von Latentwärmespeichern aufgrund der thermischen Eigenschaften und relativ konstanten Temperaturen dazu beitragen kann, den Wirkungsgrad von Solarthermie-, KWK- und Klimaanlage zu erhöhen.

Latentwärmespeicher weisen im Vergleich zu Warmwasserspeichern noch hohe Investitionskosten auf, weshalb sie derzeit noch hauptsächlich für Spezialanwendungen genutzt werden (z.B. aufgrund einer begrenzten Raumverfügbarkeit oder aufgrund der Notwendigkeit eines Langzeitspeichers). Um die Kosten für Latentwärmespeicher mit Warmwasserspeichern vergleichen zu können, sind die Kosten in Lucas et al. (2002) auf das Volumen Wasseräquivalent bezogen. Für Speicher auf Basis von Natriumacetat ergeben sich folgende spezifische Funktionen der heutigen Kosten (Investitionskosten in EUR/m³Wasseräquivalent)

$$K_{40-80^{\circ}\text{C}} = 4264,6 * V_{\text{Wasseräquiv.}}^{-0,314}$$

$$K_{48,5-63,5^{\circ}\text{C}} = 4213,3 * V_{\text{Wasseräquiv.}}^{-0,612}$$

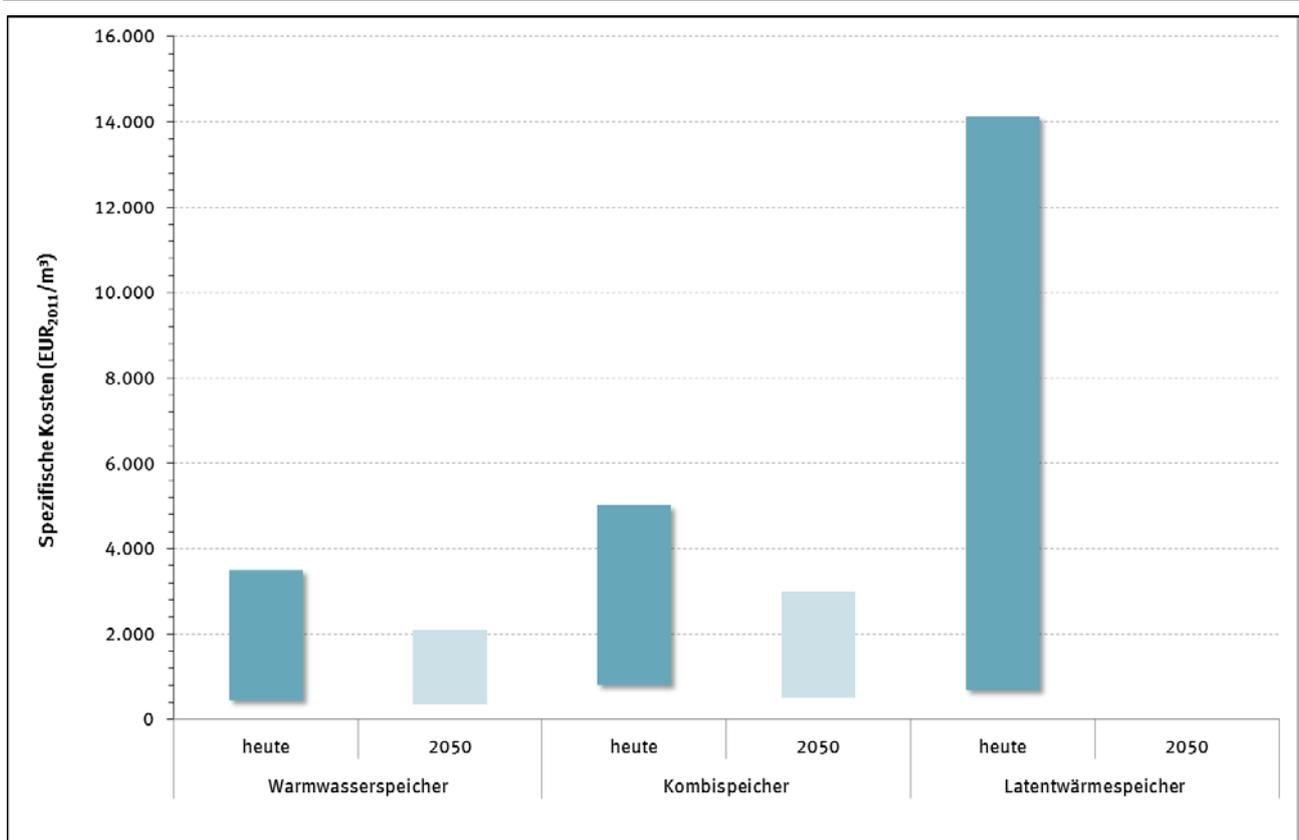
K_{40-80°C} gibt die Kosten für einen Latentwärmespeicher mit einem Temperaturbereich von 40 bis 80 °C an, K_{48,5-63,5°C} die Kosten für einen Speicher mit einem Temperaturbereich von 48,5 bis 63,5 °C. Über Kostensenkungspotenziale liegen keine belastbaren Informationen vor. Tabelle 8 stellt verschiedene Speicherkonzepte und Speichermedien sowie deren Speicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit gegenüber. In Abbildung 6 sind die derzeitigen und zukünftig erwarteten Kosten verschiedener Wärmespeichertechniken gegenübergestellt.

Tabelle 8: Vergleich der Speicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit verschiedener Wärmespeichertypen und -materialien

Speichertyp	Speichermedium	Speicherkapazität [kWh/m³]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Warm- und Heißwasserspeicher	Wasser	60-80	0,6
Druckspeicher	Wasser	>70	
Kies-Wasser-Wärmespeicher	Kies-Wasser-Gemisch	30-50	2,4
Feststoff-Wärmespeicher	Hochtemperatur-Beton	20-50	2,1
Aquifer-Wärmespeicher	Grundwasser, wassergesättigte Formation	30-40	0,6
Erdsonden-Wärmespeicher	Erdreich, Untergrund-Formationen	15-30	Boden: 2,5 Verfüllung: 0,8-2,5
Phasenwechselmaterialien (PCM)	Salzhydrate, Paraffine, Fettsäuren, Salze, Salz-Graphit-Verbund, Alkalisalze, Gashydrate	120-200	Paraffin: 0,2 Salzhydrat: 0,6 Im Verbund: 4-15

Quelle: AEE (2009), Wunsch et al. (2011)

Abbildung 6: Spezifische Kosten von Wärmespeichern mit einem Volumen bis 20 m³ Wasseräquivalent



Quelle: Morhart (2008), Lucas et al. (2002)

3.2.1.4 Eisspeicher

Eisspeicher sind Niedertemperatur-Wärmespeicher, die die Kristallisationswärme des Eises nutzen. Sie sind damit eine Form der Latentwärmespeicher (vgl. auch Wietschel et al. 2010). Eisspeicher können auch als Kältespeicher eingesetzt werden (s. Kapitel 3.2.2).

Eisspeicher werden zunehmend in Verbindung mit Solarthermie- und Wärmepumpenanlagen eingesetzt. Sie dienen in der Regel als Langzeitwärmespeicher oder saisonale Wärmespeicher und als Wärmequelle für Wärmepumpen. Als Wärmequellen für Wärmepumpen besitzen Eisspeicher den Vorteil, dass sie weniger Restriktionen bei der Nutzung oberflächennaher Geothermie (z.B. Wasserschutzgebiet) oder zu kleiner Grundstücksflächen ausgesetzt sind und Wärmepumpen durch sie auch in dichter bebauten Gebieten und Wasserschutzgebieten eingesetzt werden können. Durch das im Vergleich mit Warmwasserspeichern niedrige Temperaturniveau weisen sie über einen längeren Zeitraum betrachtet auch geringere Wärmeverluste bei der Wärmespeicherung auf und es kann aufgrund der Nutzung des Phasenübergangs von Wasser zu Eis (und umgekehrt) eine größere Wärmemenge pro Volumen gespeichert bzw. entnommen werden. Im Sommer können Eisspeicher als Kältequelle für die Kühlung von Gebäuden genutzt werden.

3.2.2 Kältespeicher

Kältespeicher sind vor allem in den Sektoren GHD und Industrie relevant. Sie werden nach Lucas et al. (2002) vor allem eingesetzt, um mögliche Ausfälle der Kältemaschinen zu überbrücken oder auch um die Lastspitzen zu reduzieren. Letzteres trägt zu einer Verringerung der Leistungspreise und damit der Energiekosten bei. Zukünftig können Kältespeicher auch zur Netzstabilisierung beitragen, indem sie zu Zeiten einer hohen Einspeisung erneuerbarer Energien beladen werden und zu Zeiten einer geringen Einspeisung und hohen Netzlast den Einsatz von Kältemaschinen vermeiden. Prinzipiell gibt es zwei Speichervarianten: Kaltwasserspeicher und Eisspeicher, wobei Eisspeicher aufgrund ihrer größeren volumenspezifischen Speicherkapazität häufiger zum Einsatz kommen (Lucas et al. 2002). Eisspeicher haben unter Berücksichtigung aller nötigen Anlagen innerhalb des Speichers eine Speicherkapazität von 40 bis 60 kWh/m³ (Lucas et al. 2002).

Für Eisspeicher ergeben sich nach Lucas et al. (2002) Kosten in Abhängigkeit von der Speicherkapazität Q_{Sp} in kWh in Höhe von

$$K_{Speicher} = 59,656 * Q_{Sp}^{-0,1051}$$

Über künftige Kostensenkungspotenziale bei Eisspeichern liegen keine Informationen vor. Die spezifischen Kosten für Kältespeicher könnten sich aber durch den Einsatz neuer Materialien (z.B. PCM, s.o.) in Zukunft noch reduzieren.

3.2.3 Übergabesysteme Heizwärme und Kälte

Die zur thermischen Konditionierung eines Raumes nötige Wärme oder Kälte wird nach Erzeugung, eventueller Speicherung und Verteilung über ein Übergabesystem an den Raum übergeben. Neben dem zu deckenden Wärme/Kältebedarf des Raums, der in erster Linie von der Qualität der Gebäudehülle, aber auch von der Nutzung abhängt, ist die Systemtemperatur ein wesentlicher Parameter: diese bestimmt Größe und Bauart des Übergabesystems. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Wärmeübergabe: diese erfolgt entweder primär über die Luft als konvektiver Wärmeübergang (Konvektoren), oder in Form von Strahlungswärme (Radiatoren) (Schramek et al. 2012).

Im Bereich Heizwärme dominieren freie Heizkörper (Flach- und Gliederradiatoren, Konvektoren). Die Wärmeübergabe erfolgt typischerweise bei einem Temperaturniveau von 60 °C im Heizungsvorlauf. Dem gegenüber stehen Flächenheizungssysteme (Fußboden- und Wandheizungen), die aufgrund der größeren Wärmeübertragungsfläche mit deutlich geringeren Temperaturen betrieben werden (Vorlauf max. 45°C). Dies ist insbesondere bei der Heizwärmeerzeugung durch Wärmepumpen oder solar

unterstützte Heizsysteme von großem Vorteil. Neuere Entwicklungen gehen auch bei Heizkörpern in Richtung Niedertemperatursysteme, etwa Niedertemperaturkonvektoren, die mit Hilfe von Ventilatoren eine Zwangskonvektion erzeugen und damit mit ähnlichen Systemtemperaturen betrieben werden können wie Flächenheizungssysteme. Diese befinden sich in der frühen Markteinführungsphase. Insgesamt ist mit einer Zunahme von Niedertemperatursystemen, bzw. mit einem Sinken des Temperaturniveaus im Wärmeübergabesystem zu rechnen.

3.2.4 Trinkwassererwärmung

Mit über 50 % (2816 PJ in 2010 und 2011) leistet der Endenergieverbrauch für Raumwärme den bedeutendsten Beitrag zum Endenergieverbrauch für Wärme. Auf die Warmwasserbereitung fielen im Jahr 2010 und 2011 insgesamt 471 PJ (9 % des Endenergieverbrauchs für Wärme) (AGEB 2013). 79 % davon werden in Haushalten verbraucht, 16 % im Sektor GHD und die verbleibenden 5 % in der Industrie (AGEB 2013). Im Unterscheid zur Heizwärme gibt es beim Wärmebedarf der Trinkwassererwärmung keine saisonale Abhängigkeit – der Wärmebedarf besteht ganzjährig.

Mit sinkendem Wärmebedarf für Raumwärme gewinnt die Trinkwassererwärmung an Bedeutung. Im Vergleich zu Systemen zur Bereitstellung von Heizwärme sind bei der Trinkwassererwärmung engere Grenzen bei den Systemtemperaturen gesetzt: Bei Trinkwarmwasserspeichern über 400 Litern und/oder langen Leitungslängen über 3 Meter sind (außer in Ein- und Zweifamilienhäusern) aus hygienischen Gründen eine Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers von mindestens 60°C und eine Zirkulation vorgeschrieben (DVGW 2004). Daraus ergeben sich Anforderungen an den Wärmeerzeuger (nötiges Temperaturniveau: >60°C) und die Einbindung erneuerbarer Wärmequellen (in erster Linie Solarthermie: mögliche Deckungsgrade). Der Reduzierung von Speicher- und Bereitstellungsverlusten sind durch die hygienischen Anforderungen Grenzen gesetzt, alternative Methoden zur Legionellenbekämpfung durch thermische Desinfektion, etwa durch UV Bestrahlung oder mit Hilfe von Filtern, werden bisher nur vereinzelt eingesetzt; eine breitere Anwendung dieser Techniken ist derzeit nicht absehbar. Einsparungspotenziale können sich durch die Umstellung von zentralen Trinkwarmwassersystemen auf dezentrale Anlagen mit einzelnen Wohnungsübergabestationen bzw. Durchlauferhitzern ergeben.

3.2.5 Elektrische Speicher

3.2.5.1 Blei-Säure-Batterie

Blei-Akkus (Blei-Säure-Batterien) sind seit Langem etabliert und werden im industriellen Maßstab gefertigt, wodurch die zukünftigen Kostensenkungs- und Effizienzpotenziale als gering eingestuft werden können. Sie können in Automobilen, als dezentrale stationäre Kleinspeicher (bis zu mehreren 100 kW) bis hin zu dezentralen Großspeichern (1-100 MW) eingesetzt werden. Ein Nachteil der Technik ist die derzeit noch geringe Zyklenfestigkeit (500-1000 Zyklen, Wietschel et al. 2010). Nach Bünger et al. (2009) erreichen Batterien guter Qualität eine Lebensdauer von bis zu 2.000 Zyklen (80 % Entladetiefe) und bei geringerer Entladetiefe teilweise einen äquivalenten Energieumsatz von bis zu 7.000 Zyklen. Nach Fuchs et al. (2012) werden Blei-Säure-Batterien im Jahr 2030 eine leicht höhere Lebensdauer als heute von 1.500 bis 5.000 Zyklen erreichen. Blei-Säure-Batterien haben eine Energiedichte von 70 bis 130 kWh/m³ und einen Systemwirkungsgrad von 75 bis 85 % (Wietschel et al. (2010), nach Bünger et al. (2009) bis zu 90 %). Wird der benötigte Umrichter mit in die Bewertung einbezogen reduziert sich der Gesamtwirkungsgrad auf 70 bis 75 % heute und 73 bis 78 % im Jahr 2030 (vgl. Fuchs et al. 2012). Hochwertige stationäre Industriebatterien haben nach Bünger et al. (2009) je nach Qualität und Lebensdauer Investitionskosten zwischen 100 und 300 EUR/kWh. Blei-Säure-Batterien für die Automobilindustrie kosten hingegen nur ca. 25 EUR/kWh. Die geringeren spezifischen Kosten reflektieren die Kostensenkungspotenziale durch die industrielle Großserienfertigung. Fuchs et al. (2012) erwartet bis 2030 Kosten zwischen 50 und 80 EUR/kWh für stationäre Blei-Säure-Batterien und nach Adamek et al. (2012) ca. 35 EUR/kWh im Jahr 2050.

3.2.5.2 Lithium-Ionen

Lithium-Ionen-Batterien sind bei mobilen Anwendungen (Laptop, Mobiltelefone,...) weit verbreitet und werden im Bereich mobiler Anwendungen auch in Zukunft eine hohe Relevanz haben, v.a. durch die weitere Verbreitung der Elektromobilität (z.B. Pedelecs) (Wietschel et al. 2010). Darüber hinaus können Lithium-Ionen-Batterien für die dezentrale Speicherung elektrischer Energie genutzt werden. Vorteile der Technik sind die hohe Energiedichte von 200 bis 400 kWh/m³ und der Systemwirkungsgrad von 90 bis 95 % (Wietschel et al. 2010) (unter Einbeziehung der Umrichter 80 bis 85 % heute und 85 bis 90 % 2030 nach Fuchs et al. 2012). Darüber hinaus können die Batterien bei beliebigem Ladezustand beladen werden, ohne die Kapazität der Batterie negativ zu beeinflussen. Lithium-Ionen-Batterien haben heute eine Lebensdauer von 1.000 bis 5.000 Zyklen und es wird erwartet, dass 3.000 bis 10.000 Zyklen bis zum Jahr 2030 realisiert werden können (vgl. Fuchs et al. 2012). Nach Bünger et al. (2009) werden im Labor schon heute 10.000 Zyklen erreicht. Bei einer geringen Entladetiefe sind auch äquivalente Ladungsumsätze von mehr als 30.000 Zyklen möglich (Bünger et al. 2009). Künftige Fortschritte bezüglich der Energiedichte, der Lebensdauer und Zyklenfestigkeit sind vor allem durch den Einsatz neuer Materialien zu erwarten. So geht man davon aus, dass Lithium-Titanat-Batterien eine wesentliche höhere Zyklenfestigkeit und Lebensdauer aufweisen als derzeitige Techniken (Wietschel et al. 2010). Lithium-Eisenphosphat-Batterien haben eine hohe Zyklenfestigkeit, aber ein schwaches Verhalten bei tiefen Temperaturen. Bei Lithium-Mangan-Batterien wird eine gute Hochstromfähigkeit erwartet, allerdings aber auch eine geringe Lebensdauer (Wietschel et al. 2010). Welche Energiedichten und Zyklenlebensdauer Lithium-Ionen-Akkus erreichen können, ist nach Bünger et al. (2009) noch nicht endgültig quantifizierbar.

Lithium-Ionen-Akkus kosten heute noch zwischen 500 und 2000 EUR/kWh. Bei der Fertigung großer Stückzahlen werden in Zukunft Kosten unter 300 EUR/kWh erwartet (Bünger et al. 2009). Nach Fuchs et al. (2012) sind 150 bis 300 EUR/kWh im Jahr 2030 realistisch (zum Vergleich: Adamek et al. 2012: 150 EUR/kWh im Jahr 2050).

3.2.5.3 Redox-Flow- und Natrium-Schwefel-Batterie

Redox-Flow- und Natrium-Schwefel-Batterien werden vor allem in dezentralen Großspeichern eingesetzt. Während Redox-Flow-Batterien derzeit erst in den Markt eingeführt werden, sind Natrium-Schwefel-Batterien v.a. in Japan schon etabliert und werden auch in Europa verstärkt zur dezentralen Pufferung von regenerativ erzeugtem Strom in Großbatteriespeichern eingesetzt (Wietschel et al. 2010).

Natrium-Schwefel-Batterien sind elektrochemische Speicher und arbeiten im Hochtemperaturbereich (270-350 °C). Sie eignen sich vor allem für Anlagen mit täglichen Zyklen, da sie bei langen Standzeiten beheizt werden müssen, während bei häufigen Lade- und Entladezyklen und entsprechender Dämmung die Betriebswärme durch die Verlustwärme aufrechterhalten werden kann. Natrium-Schwefel-Batterien erreichen derzeit nach Fuchs et al. (2012) einen Systemwirkungsgrad von 68-75 % (inkl. Umrichter) und haben eine Energiedichte von ca. 170 kWh/m³ (Wietschel et al. 2010). Die Zyklenfestigkeit liegt bei über 2.500 Zyklen (nach Fuchs et al. 2012) bei 5.000 – 10.000 Zyklen).

Ein Vorteil der Redox-Flow-Technik ist, dass Leistungsteil und Speichereinheit getrennt sind, wodurch diese beiden Komponenten unabhängig voneinander für die jeweiligen Anforderungen skaliert werden können und die Technik eine vergleichsweise lange Nutzungsdauer von ca. 13.000 Zyklen aufweist (Wietschel et al. 2010, Bünger et al. 2009). Der flüssige Elektrolyt (derzeit haupt-sächlich Vanadium), der als Speichermedium dient, wird dabei in externen Tanks gespeichert, wodurch die Kapazität (in kWh oder MWh) durch das Variieren der Tankgröße geändert werden kann (Wietschel et al. 2010). Der Systemwirkungsgrad liegt derzeit bei ca. 75 % und die Energie-dichte bei 200 bis 300 kWh/m³ (Wietschel et al. 2010, Bünger et al. 2009). Zukünftig können durch die Entwicklung neuer Elektrolyte und Membrane sowie geeigneter Zell- und Stackdesigns die Effizienz, sowie die

Energie- und Leistungsdichte erhöht und die Kosten gesenkt werden (Wietschel et al. 2010). Nach Fuchs et al. (2012) ist bis 2030 ein Gesamtwirkungsgrad von 75 bis 85 % erreichbar.

Die Kosten für Flow-Batterien werden nach Fuchs et al. (2012) von derzeit 300 bis 500 EUR/kWh auf 70 bis 150 EUR/kWh im Jahr 2030 sinken. Natrium-Schwefel-Batterien werden hingegen schon seit längerer Zeit vor allem in Japan eingesetzt. Nach Bünger et al. (2009) hat die Technik das Potenzial zu geringen Kosten, allerdings gibt es weltweit derzeit nur wenige Hersteller und damit keinen funktionierenden Markt. Nach Podewils (2010) kosten Natrium-Schwefel-Batterien derzeit zwischen 60 und 110 EUR/kWh (nach Fuchs et al. (2012) zwischen 500 und 700 EUR/kWh heute). Es wird erwartet, dass die Herstellungskosten bei unter 30 EUR/kWh liegen, woran das künftige Kostensenkungspotenzial im Falle eines funktionierenden Marktes zu sehen ist. Fuchs et al. (2012) erwartet für 2030 Kosten zwischen 80 und 150 EUR/kWh, Adamek et al. (2012) 100 EUR/kWh im Jahr 2050.

3.2.6 Power to Gas (PtG)

Die Erzeugung von synthetischem Methan oder Wasserstoff stellt künftig eine Option zur Herstellung von erneuerbaren Brennstoffen oder auch zur Langzeitspeicherung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien dar. Abhängig davon, ob Wasserstoff oder Methan erzeugt werden soll, besteht der Prozess vereinfacht aus ein oder zwei Stufen:

1. Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse
2. Methanisierung

Nach Sterner (2009) bzw. Auer (2012) wird derzeit bei der Elektrolyse ein Wirkungsgrad von 62 bis 82 % und bei der anschließenden Methanisierung von 75 bis 85 % erreicht. Nach Sterner (2009) wird bei der Methanisierung von reinem CO₂ ein Wirkungsgrad von bis zu 95 % erreicht. Für die komplette Umwandlungskette Strom -> Wasserstoff -> Methan ergeben sich derzeit Wirkungsgrade zwischen 46 und 75 % (im Mittel 63 %). Bei einer Nutzung von atmosphärischem CO₂ reduziert sich der Wirkungsgrad im Mittel um 15 auf 48 % (Sterner 2009). Durch Effizienzsteigerungen bei der Elektrolyse und Methanisierung ist zukünftig eine Effizienz der Wandlungskette Strom -> Methan von im Mittel 65 bis 68 % (je nach energetischem Aufwand für die CO₂-Bereitstellung) zu erwarten (Sterner 2009).

Tabelle 9: Effizienz von elektrischen und chemischen Speichertechniken (bei Batterien inkl. Umrichter)

	η_{ges} heute [%]		Energiedichte heute [kWh/m ³]		η_{ges} 2050 [%]		Energiedichte 2050 [kWh/m ³]	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Blei-Säure-Batterien	70	75	70	130	73	78	50	130
Lithium-Ionen-Akkus	80	85	200	350	85	90	250	550
Redox-Flow-Batterien	70	80	200	300	75	85	>300	
Natrium-Schwefel-Batterien (NaS)	68	75		170	78	83		
Power-to-Gas	46	75			48	78		

Quellen: Wietschel et al. (2010), Bünger et al. (2009), Sterner (2009), Auer (2012), Henning/Palzer (2013), Fuchs et al. (2012)

Die Kosten der Bereitstellung von synthetischem Gas werden nach Sterner (2009) künftig zwischen 1.000 und 2.000 EUR/kW liegen. In Gerbert et al. (2013) wird von höheren Kosten zwischen 2.300 und 2.600 EUR/kW ausgegangen. Da die Technik bisher nur im Rahmen von Demonstrationsvorhaben angewandt wird und es nicht absehbar ist, wie sich der Markt zukünftig entwickelt (installierte Leistung, Anzahl Marktteilnehmer / Systemlieferanten), sind exakte Aussagen über die Kostenentwicklung nicht möglich. Die spezifischen Investitionskosten werden aber wahrscheinlich im Bereich von 2.000 EUR/kW liegen.

3.3 Energiewandlung

In den folgenden Kapiteln werden Technikentwicklungen und Effizienzpotenziale verschiedener konventioneller und neuer, auf erneuerbaren Energien basierende Energiewandlungstechniken beschrieben.

3.3.1 Brennertechniken

3.3.1.1 Fossile Energieträger

Derzeit decken konventionelle Techniken und hier besonders Einzelfeuerungsanlagen auf Basis fossiler Energieträger wie Erdgas und Heizöl den Großteil des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs privater Haushalte und der Sektoren GHD und Industrie ab. Nach der Leitstudie 2011 (Nitsch et al. 2012) lag ihr Anteil 2010 bei ca. 69 %. In Nitsch et al. (2012) wird davon ausgegangen, dass der Anteil fossil befeuerter individueller Heizungen (Heizkessel, Brennwertkessel) sukzessive stark zurückgeht. Beispielsweise sinkt im Szenario 2011 A der fossile Primärenergiebedarf bis 2050 um ca. 86 % (vgl. Nitsch et al. (2012), S. 276). In 2050 würden dann verglichen mit 2010 nur noch 0,03 % der Wärme (Endenergie) durch fossile Einzelfeuerungsanlagen bereitgestellt.

Bei Gas- und Ölkesseln zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser wird davon ausgegangen, dass es nur noch minimale Kostensenkungs- und Effizienzpotenziale gibt, da die Techniken schon ausgereift und auf dem Markt etabliert sind. In der „Leitstudie 2010“ (Nitsch et al. 2010) wird von einer Reduktion der spezifischen Investitionskosten in realen Preisen von ca. 10 % bezogen auf 2010 bis 2050 und einer leichten Steigerung des Nutzungsgrades ausgegangen. Dies bedeutet für in Wohngebäuden eingesetzte Brennwertkessel mit einer Nennleistung von weniger als 25 kW_N eine Reduktion der spezifischen Investitionskosten bei Gas-Brennwertkesseln von 724 EUR/kW_N im Jahr 2010 auf 652 EUR/kW_N 2050 und bei Öl-Brennwertkesseln von 789 EUR/kW_N 2010 auf 710 EUR/kW_N 2050 (vgl. Nitsch et al. (2010), S. 33). Der thermische Wirkungsgrad von Gas-Brennwertkesseln steigt im gleichen Zeitraum von 90 % auf 92 % und bei Öl-Brennwertkesseln von 85 % auf 87 % (s. Nitsch et al. (2010), S. 33). Ähnliche Werte für Gas-Brennwertkessel mit einer thermischen Leistung P_{th} unter 50 kW_{th} werden in Henning et al. (2013) genannt. Hier wird bis 2050 von einem Wirkungsgrad von 92 %, bei einer Leistung von 50 bis 100 kW_{th} von 94 % und bei größeren Kesseln von 98 % ausgegangen.

Bei größeren Anlagen (100-500 kW_N) werden 2050 für Gas Investitionskosten von 103 EUR/kW_N und ein Wirkungsgrad von 98 % sowie bei Öl 103 EUR/kW_N und ein Wirkungsgrad von 89 % erwartet (Nitsch et al. 2010). Anlagen dieser Leistungsklassen werden hauptsächlich in Nicht-Wohngebäuden eingesetzt. Für Nicht-Wohngebäude wird aufgrund höherer thermischer Leistungen von geringeren spezifischen Investitionskosten ausgegangen (vgl. Hempel et al. (2012), S. 20/21). In Hempel et al. (2012) werden Kosten (Preisbasis 2009) unterschieden nach Leistungsklassen angegeben (s. Tabelle 10). Werden bis 2050 die Kostensenkungspotenziale von 10 % nach Nitsch et al. (2010) berücksichtigt, ergeben sich für 2050 die in Tabelle 10 nach Leistungsklasse gestaffelt dargestellten spezifischen Investitionskosten.

3.3.1.2 Biomassekessel

Heute ist die Nutzung fester Biomasse in Form von Brennholz, Hackschnitzeln und Pellets die wichtigste Quelle zur Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien. Nach Nitsch et al. (2012) hat die Biomasse einen Anteil von 92 % an der gesamten durch erneuerbare Energien bereitgestellten Wärme. Bei der reinen Wärmebereitstellung wird in erster Linie feste Biomasse eingesetzt. Flüssige und gasförmige Biomasse wird vorwiegend in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen genutzt (s. Kapitel 3.3.2).

In der Vergangenheit wurde hauptsächlich auf Scheitholz-Einzelöfen zur Wärmebereitstellung zurück gegriffen, wobei sich infolge der Verschärfung von Emissionsgrenzwerten und steigender Komfortansprüche verstärkt moderne Techniken wie Pellet-Kessel und Holzhackschnitzel-Kessel für die Heizung und Warmwasserbereitstellung durchsetzen (Müller et al. 2010). Bei diesen Kesseln kommt vermehrt die Brennwerttechnik zum Einsatz. Bei Pellet-Kesseln hat dies eine Erhöhung des Wirkungsgrades um bis zu 10 % verglichen zu Kesseln ohne Abgaskondensation zur Folge (Müller et al. 2010). Holzhackschnitzel-Kessel mit Abgaskondensation werden künftig leicht höhere Wirkungsgrade erreichen als Öl- und Gas-Brennwertkessel (nach Müller et al. 2010 bis zu ca. 98 %). Neben dem flächendeckenden Einsatz effizienter Brennwert-Biomassekessel sind nach Nitsch et al. (2010) aber zukünftig keine nennenswerten Wirkungsgradsteigerungen zu erwarten.

Nach Nitsch et al. (2012) haben Biomassefeuerungsanlagen zur alleinigen Wärmebereitstellung bis 2050 noch Kostensenkungspotenziale. Die spezifischen Investitionskosten für Einzelfeuerungsanlagen mit einer thermischen Leistung bis 500 kW liegen demnach heute zwischen 610 EUR/kW_{th} (50-500 kW_{th}) und 1.480 EUR/kW_{th} (bis 25 kW_{th}). Sie werden bis 2050 auf voraussichtlich 510 EUR/kW_{th} (50-500 kW_{th}) bis 1.280 EUR/kW_{th} (bis 25 kW_{th}) sinken (s. auch Tabelle 10).

Tabelle 10: Spezifische Investitionskosten von Gas-/ Öl-Brennwert- und Biomassekesseln für Wohn- und Nicht-Wohngebäude in Abhängigkeit von der Kesselleistung

Leistungsbereich	kW	Bis 25	50-250		Über 250	
			von	bis	von	bis
Investitionskosten Gas-BW heute	EUR/kW	724	80	120	60	80
Investitionskosten Gas-BW 2050	EUR/kW	652	72	108	54	72
Investitionskosten Öl-BW heute	EUR/kW	789	100	160	90	110
Investitionskosten Öl-BW 2050	EUR/kW	710	90	144	81	99
Biomassekessel heute	EUR/kW	1.480	610	880	470	610
Biomassekessel 2050	EUR/kW	1.280	510	775	370	510

Quelle: Hempel et al. (2012), Nitsch et al. (2010), Nitsch et al. (2012)

Tabelle 11: Thermische Wirkungsgrade (Verhältnis Nutzenergie zu Heizwert) von Brennwertkesseln

Wirkungsgrad [%]	heute		2050	
	von	bis	von	bis
Gas-BW	90	94	92	98
Öl-BW		85	87	89
Biomassekessel	79	96	81	98

Quelle: Nitsch et al. (2010), Nitsch et al. (2012)

3.3.2 KWK-Techniken

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird als zentraler Baustein zur Erreichung der CO₂-Minderungs- und Energieeffizienzziele der Bundesregierung gesehen, weshalb ihr Anteil an der Stromerzeugung in Deutschland bis 2020 von 12,5 % im Jahr 2010 auf 25 % erhöht werden soll (vgl. Erdmann / Dittmar (2010) und § 1 KWKG²⁰). Bei der Kraft-Wärme-Kopplung werden verschiedene Techniken unterschieden. Eine Übersicht liefert Tabelle 12.

Tabelle 12: Überblick über derzeit gängige und nach derzeitigem Stand des Wissens zukünftig relevante KWK-Anlagentypen^{*)}

	Leistungsbereich [MW _e]	Elektrischer Wirkungsgrad (netto) [%]	Gesamtwirkungsgrad [%]
Gasturbinen	0,1-150	29-36	80-85
Mikrogasturbinen	0,03-0,2	25-30	80-85
GuD (Gegendruck)	20-500	35-40	80-90
GuD (Entnahme)		35-60	80-92
Dampfkraftwerk (Gegendruck)	5-200	25-35	80-90
Dampfkraftwerk (Entnahme)	50-800	33-45	55-92
Stirling	0,001-0,04	15-30	80-85
Brennstoffzellen (PEM/ PAFC)	0,002-1	35-45	85-95
Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MFC/ SOFC)	0,001-500	50-65	85-95
Organic-Rankine-Cycle (ORC)	0,01-2	10-20	70-80
Verbrennungsmotor (BHKW)	0,005-10	25-45	82-95
Dieselmotor		40-45	85-98
Feste Biomasse, KWK-ORC	> 0,5	13	84
Feste Biomasse, BHKW-Holzvergasung	0.03 - 2	18-40	63-85 (el./th.); 75 (Vergaser)
Feste Biomasse, KWK-Dampfkraftanlagen	2-10	15-25	84-85
Biogas-BHKW	< 1	27-39	79-91
Pflanzenöl-BHKW	0,005-5	29-41	90-91

^{*)} Die Kennwerte spiegeln den derzeitigen Stand der Technik wieder.

Quelle: Nitsch et al. (2010), Erdmann/Dittmar (2010), E.ON (2014), UBA (2013), Zeymer et al. (2012)

Für die weiteren Betrachtungen innerhalb dieser Studie werden die KWK-Techniken hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten unterschieden in Techniken zur Wärmebereitstellung in kleinen Wohngebäuden, in Mehrfamilienhäusern und Techniken für Nicht-Wohngebäude. Darüber hinaus gibt es noch KWK-Techniken, die hauptsächlich in Verbindung mit Wärmenetzen und in großen Industrie- und Gewerbekomplexen genutzt werden. KWK-Techniken, in denen flüssige und gasförmige Biomasse eingesetzt wird, werden separat betrachtet.

²⁰ Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung

Kleine Wohngebäude:

- Mini-/ Mikro-BHKW:** Nach ASUE (2011) lagen 2010 die Investitionskosten bei kleinen Erdgas-BHKWs mit einer elektrischen Leistung von 1 kW_{el} bei ca. 9.330 EUR/kW_{el} und bei einer Leistung von 10 kW_{el} bei ca. 3.220 EUR/kW_{el}. Legt man die erwartete Kostendegression kleiner BHKWs nach IEA (2010) von -40 % bis 2050 an, ergeben sich in 2050 Investitionskosten zwischen 1.930 und 5.600 EUR/kW_{el} bei einer elektrischen Leistung von 1 bis 10 kW_{el}. Nach IEA (2010) sind bei kleinen BHKWs nur marginale Steigerungen des elektrischen (η_{el}) und des Gesamt-Wirkungsgrades (η_{ges}) zu erwarten. η_{el} liegt heute zwischen 20 % und 40 % (Mittelwert 30 %) und η_{ges} zwischen 80 % und 85 % (Mittelwert 82,5%) (vgl. ASUE 2011, IEA 2010). Bis 2050 wird seitens der IEA ein leichter Anstieg der Effizienz erwartet (η_{el} : 26-40%, η_{ges} : 80-90 %)
- Stirling-Motor:** Stirling-Motoren zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung in Wohngebäuden sind derzeit in der Erprobungs- und Markteinführungsphase. Es sind wenige Daten zu den spezifischen Investitionskosten frei verfügbar. In Erdmann/Dittmar (2010) werden Kosten von 12.500 EUR für eine Mikro-KWK-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 1 kW genannt. Allerdings entsprechen die angegebenen Kosten den Kosten des Gesamtsystems inklusive eines Spitzenlastkessels mit 10 kW_{th}. Werden die oben angegebenen Kosten eines Gas-Brennwertkessels in Höhe von 724 EUR/kW_{th} zum Abzug gebracht, ergeben sich näherungsweise Kosten für einen Stirling-Motor von 5.260 EUR/kW_{el}. Wird die erwartete Kostendegression für Mini-/ Mikro-BHKWs und Mikrogasturbinen (-40 % bis 2050) auf Stirling-Motoren übertragen, ergeben sich für 2050 noch spezifische Investitionskosten von ca. 3.150 EUR/kW_{el}. Diese Angaben sind aufgrund mangelnder Daten mit großen Unsicherheiten behaftet. Der elektrische Wirkungsgrad η_{el} von Stirling-Motoren liegt nach Erdmann/Dittmar (2010) derzeit bei 15-30 % und bei der betrachteten Leistung von 1 kW_{el} bei 14 %. In FIZ (2013) werden für Stirling-Motoren elektrische Wirkungsgrade zwischen 10 und 30 % angegeben. Über zukünftig erwartete Effizienzsteigerungen liegen keine Informationen vor.
- Brennstoffzellen:** Brennstoffzellen, in denen Erdgas oder in Zukunft Biomethan in Strom und Wärme gewandelt wird, spielen heute noch keine Rolle. Die Technik ist derzeit noch in der Entwicklungsphase. In Nitsch et al. (2012) wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 eine Strommenge von bis zu 2 TWh in Brennstoffzellen-KWK-Anlagen erzeugt wird, was einem Anteil von ca. 2 % an der erwarteten KWK-Stromerzeugung und 0,3 % an der gesamten Netto-Stromerzeugung in 2050 entspräche. Brennstoffzellen werden daher auch in Zukunft nur eine untergeordnete Rolle spielen und es wird erwartet, dass sie nur in der Objektversorgung mit elektrischen Leistungen unter 50 kW zum Einsatz kommen. Einer der Gründe sind die im Vergleich mit anderen KWK-Techniken hohen Investitionskosten von im Mittel 14.400 EUR/kW_{el} im Jahr 2006 und 4.000 EUR/kW_{el} im Jahr 2050. Allerdings werden bei Brennstoffzellen höhere elektrische Wirkungsgrade erwartet. η_{el} wird voraussichtlich von 30-37 % in 2006 auf 35-45 % in 2050 steigen, η_{ges} von Brennstoffzellen-KWK-Anlagen auf 75-85 % (vgl. IEA (2010), S. 245). Eine größere Rolle werden Brennstoffzellen nach Nitsch et al. (2012) im Verkehrssektor spielen

Tabelle 13: Effizienz und spezifische Investitionskosten von KWK-Techniken in kleinen Wohngebäuden 2050

	P_{el} [kW _{el}]		η_{el} [%]		η_{ges} [%]		Kosten [EUR/kW _{el}]	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Mini-/ Mikro-BHKW	1	10	26	40	80	90	1.930	5.600
Stirling-Motor	1	10	15	30	80	85	3.150 (1 kW _{el})	
Brennstoffzelle	1	100	35	45	75	85	2.400	5.600

Quelle: Nitsch et al. (2012), Erdmann/Dittmar (2010), ASUE (2011), IEA (2010), FIZ (2013)

Mehrfamilienhäuser

- Mikro-Gasturbinen:** Nach Peche et al. (2007) lagen die Modulkosten bei Mikrogasturbinen 2006 zwischen 1.300 und 1.800 EUR/kW_{el} (nach IEA (2010) bei 1.600 bis 2.160 EUR/kW_{el} in der Leistungsklasse 30-250 kW_{el}; angenommener Wechselkurs 2006: 1,25 \$/EUR). Die Internationale Energie Agentur geht davon aus, dass die Kosten von Mikrogasturbinen bis 2050 um ca. 47% sinken, was Modulkosten zwischen 690 und 950 EUR/kW_{el} erwarten lässt (nach IEA 2010 bei 800 bis 1.200 EUR/kW_{el}). Für Mikro-Gasturbinen mit einer Leistung zwischen 30 und 250 kW wird erwartet, dass der elektrische Wirkungsgrad η_{el} von derzeit 25-30 % auf 30-43 % erhöht werden kann, womit η_{ges} auf im Mittel 75-85 % steigt (vgl. IEA (2010), S. 245).
- BHKW:** Verglichen mit Ein- und Zweifamilienhäusern werden in Mehrfamilienhäusern BHKWs mit höheren elektrischen Leistungen eingesetzt. Die installierte elektrische und thermische Leistung ist dabei stark von der Größe des Gebäudes und der damit verbundenen Wärmenachfrage abhängig. Für Mehrfamilienhäuser wird eine elektrische Leistung zwischen 10 und 50 kW_{el} angenommen. Die Investitionskosten liegen in dieser Leistungsklasse zwischen 1.530 und 3.220 EUR/kW_{el} (vgl. ASUE 2011). Wird eine Kostendegression entsprechend der erwarteten Degression bei kleinen BHKWs von 40 % bis 2050 angenommen, ergeben sich Investitionskosten zwischen 920 und 1.930 EUR/kW_{el}. Die Wirkungsgrade (η_{el} , η_{ges}) entsprechen nach IEA (2010) denen kleiner BHKWs.
- Brennstoffzellen:** Für die Leistungsklasse zwischen 1-100 kW_{el} ist die Entwicklung der Brennstoffzellentechnik unter „Kleine Wohngebäude“ beschrieben. Anlagen aus diesem Leistungsspektrum kämen auch bei Mehrfamilienhäusern zum Einsatz. Es ist zu erwarten, dass aufgrund der höheren Leistung in Mehrfamilienhäusern die Kosten eher im unteren Bereich der angegebenen Kosten nach Tabelle 14 liegen

Tabelle 14: Effizienz und spezifische Investitionskosten von KWK-Techniken in Mehrfamilienhäusern 2050

	P_{el} [kW _{el}]		η_{el} [%]		η_{ges} [%]		Kosten [EUR/kW _{el}]	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Mikro-Gasturbinen	30	250	30	43	75	85	690	1200
BHKW	10	50	35	45	80	88	920	1930
Brennstoffzelle	1	100	35	45	75	85	2.400	5.600

Quelle: Nitsch et al. (2012), Erdmann/Dittmar (2010), IEA (2010), FIZ (2013), Peche et al. (2007)

Nicht-Wohngebäude

Da Nicht-Wohngebäude (NWG) eine sehr heterogene Struktur aufweisen (z.B. kleine Handwerksbetriebe, Bürogebäude, Schwimmbäder, Krankenhäuser u.v.m.), wird bei den KWK-Techniken, die prinzipiell in NWG zum Einsatz kommen (können), eine breite Effizienzspanne angegeben. KWK-Anlagen, die große Industrie-Standorte versorgen, liegen von ihrer Leistungsklasse eher im Bereich von KWK-Anlagen, die bei der Wärmebereitstellung in Nah- und Fernwärmenetzen zum Einsatz kommen. Für NWG wird eine elektrische Leistung zwischen 50 und 300 kW_{el} angenommen. Bei großen Gebäudekomplexen und Industrieanlagen kann die Leistung aber auch deutlich höher sein.

- **(Mikro-) Gasturbine:** Aufgrund hoher Abgastemperaturen von bis zu 450 °C eignen sich Gasturbinen gerade in NWG, in denen auch Prozesswärme benötigt wird, zur gekoppelten Bereitstellung von Wärme und Strom. Durch eine Kaskadennutzung können dabei neben Prozess- auch Raumwärme und Warmwasser bereitgestellt werden. (Mikro-) Gasturbinen in dem definierten Leistungsspektrum kosten derzeit ca. 1.500 bis 1.600 EUR/kW_{el}. Die spezifischen Investitionskosten werden bis 2050 auf ca. 1.000 EUR/kW_{el} sinken (IEA, 2010). Werden die in Peche et al. (2007) angegebenen Investitionskosten zugrunde gelegt und die Kostendegression nach IEA (2010) angesetzt, ergeben sich für 2050 niedrigere Investitionskosten in einer Bandbreite von 690 bis 950 EUR/kW_{el}. 2050 wird bei Gasturbinen mit einer elektrischen Leistung bis 250 kW ein elektrischer Wirkungsgrad von 35-40 % und ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 85 % erwartet (IEA 2010).
- **BHKW:** Die Investitionskosten liegen nach ASUE (2011) für BHKWs der für NWG angenommenen Leistungsklasse zwischen 670 und 1.530 EUR/kW_{el}. Bei Annahme einer Kostendegression um 40% bis 2050 (vgl. IEA 2010) sinken sie auf 400 bis 920 EUR/kW_{el}. Die Internationale Energieagentur gibt für 2050 einen Wert von im Mittel 760 EUR/kW_{el} an (IEA 2010). Der elektrische Wirkungsgrad größerer BHKWs ist tendenziell höher als der kleinerer Anlagen und liegt nach IEA (2010) bei BHKWs mit einer elektrischen Leistung von 100 bis 3000 kW zwischen 30 und 40 % (vgl. ASUE (2011), IEA 2010). η_{el} wird bis 2050 auf 35 bis 45 % steigen. Der Gesamtwirkungsgrad wird dann voraussichtlich zwischen 80 und 88 % liegen (IEA 2010).
- **Brennstoffzellen:** Die Entwicklung der Brennstoffzellentechnik ist für die Leistungsklasse 1 bis 100 kW_{el} unter „Kleine Wohngebäude“ beschrieben. Anlagen dieser Leistungsklasse können auch teilweise in Nicht-Wohngebäuden zum Einsatz kommen. Es ist zu erwarten, dass aufgrund des höheren Leistungsbedarfs in Nicht-Wohngebäuden die Kosten eher im unteren Bereich der in Tabelle 15 angegebenen Kosten liegen
- **Feste Biomasse, ORC:** Bei wärmegeführten ORC (Organic-Rankine-Cycle)-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 500 kW belaufen sich die spezifischen Investitionskosten heute auf 7.200 EUR/kW_{el} (Nitsch et al. 2010). Diese werden bis 2050 auf 5.700 EUR/kW_{el} sinken. Im gleichen Zeitraum wird sich der elektrische Wirkungsgrad leicht von 13 auf 15% erhöhen, während der thermische Wirkungsgrad minimal von 71 auf 70% sinken wird (vgl. Nitsch et al. 2010).
- **Feste Biomasse, Vergasung und BHKW:** Die Nutzung fester Biomasse in Anlagen zur thermischen Vergasung mit gekoppeltem BHKW wird voraussichtlich ab einer elektrischen Leistung von mindestens 2 MW wirtschaftlich sein. Die Technik befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Nach Nitsch et al. (2010) werden die Investitionskosten von derzeit 3.900 auf ca. 2.000 EUR/kW_{el} im Jahr 2050 sinken. Die Holzvergasung hat dabei einen Wirkungsgrad von 75%. Der elektrische Wirkungsgrad wird sich voraussichtlich ähnlich entwickeln, wie jener gasbefuerter BHKWs der gleichen Leistungsklasse: von derzeit 40% auf etwa 43% in 2050; gleichzeitig wird erwartet, dass der thermische Wirkungsgrad auch in Zukunft bei 40% liegen wird (vgl. Nitsch et al. 2010).

Tabelle 15: Erwartete Effizienz und spezifische Investitionskosten von KWK-Techniken in Nicht-Wohngebäuden 2050

	P_{el} [kW _{el}]		η_{el} [%]		η_{ges} [%]		Kosten [EUR/kW _{el}]	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
(Mikro-) Gasturbinen	50	250	35	40	75	85	690	1.000
BHKW	50	300	35	45	80	88	420	920
Brennstoffzelle	1	100	35	45	75	85	2.400	5.600
Feste Biomasse, ORC		500		15		85		5.700
Feste Biomasse, Vergasung und BHKW	30	2.000	18	40	63	85	2.000	5.000

Quelle: Nitsch et al. (2010), Erdmann/Dittmar (2010), IEA (2010), FIZ (2013), Peche et al. (2007), Zeymer et al. (2012)

KWK-Techniken für große Industrie- und Gewerbekomplexe:

- Gasturbinen:** Mit Gasturbinen kann ein breites Leistungsspektrum abgedeckt werden (100 kW bis 150 MW, Erdmann/Dittmar 2010). Durch ihre gute Regelbarkeit und schnelle Anfahrzeiten (s. Nitsch et al. 2012) können sie darüber hinaus in einem Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien eine wichtige Rolle bei der Gewährleistung der Netzstabilität spielen. Mit Gasturbinen kann neben Raumwärme und Warmwasser auch Prozesswärme bereitgestellt werden. Die Investitionskosten für Gasturbinen mit einer elektrischen Leistung bis 5 MW lagen 2006 bei durchschnittlich 1.200 EUR/kW_{el} und werden bis 2050 auf voraussichtlich ca. 860 EUR/kW_{el} zurückgehen (vgl. IEA 2010). Der elektrische Wirkungsgrad η_{el} wird bis 2050 von heute durchschnittlich 32,5 % auf 36,5 % und η_{ges} von 75 % auf 80 % steigen (IEA 2010).
- Dampfkraftwerk:** Dampfkraftwerke haben eine Leistung zwischen 5 und 800 MW_{el}. Sie werden entweder als Gegendruck- oder Entnahme-KWK-Anlage konzipiert und können Wärme mit Temperaturen zwischen 100 und 300 °C bereitstellen. Dampfkraftwerke decken somit ein breites Leistungs- und Anwendungsspektrum ab. Die Anlagen haben einen elektrischen Wirkungsgrad zwischen 25 und 35 % (Gegendruck) bzw. 33 und 45 % (Entnahme) sowie einen Gesamtwirkungsgrad von 80 bis 90 % (Gegendruck) und 55 bis 92 % (Entnahme) (Erdmann/Dittmar 2010). Nach Nitsch et al. (2010) ist bei kohlebefeuerten Dampfkraftwerken mit einer Nennleistung von 800 MW_{el} bis 2050 mit keiner Kostendegression zu rechnen. Die spezifischen Investitionskosten werden bei einer Nennleistung von 800 MW_{el} auch in Zukunft bei ca. 1.300 EUR/kW_{el} liegen, bei kleineren Leistungen liegen die Kosten höher (nach Matthes/Ziesing (2011) belaufen sich die Investitionskosten für eine Steinkohle KWK-Anlage mit 320 MW_{el} auf 1.800 EUR/kW_{el}). Verglichen mit Kohle-Kondensationskraftwerken werden bei Erdgaskondensationskraftwerken zukünftig leicht höhere elektrische Wirkungsgrade von 59 % und niedrigere spezifische Investitionskosten von ca. 850 EUR/kW_{el} erwartet (IER/RWIZEW 2010).
- GuD-Kraftwerke:** Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) zählen zu den effizientesten fossilen Kraftwerken. Sie erreichen heute elektrische Wirkungsgrade von bis zu 60 % (E.ON 2014) und Gesamtwirkungsgrade von 92 % (Erdmann/Dittmar 2010). Bis 2050 wird erwartet, dass der elektrische Wirkungsgrad von GuD-Kraftwerken auf bis zu 65 % steigt (vgl. DLR 2010). Die Investitionskosten betragen nach Erdmann/Dittmar (2010) derzeit zwischen 680 und 1.060 EUR/kW_{el} (für 200, respektive 20 MW_{el}). In IER/RWIZEW (2010) werden Investitionskosten von 700 EUR/kW_{el} bei einer Leistung von 800 MW_{el} genannt. Bis 2050 werden nach der gleichen Quelle die Kosten für große GuD-Kraftwerke mit einer Leistung bis 800 MW_{el} voraussichtlich auf rund 630 EUR/kW_{el} sinken.

- Große BHKW:** Große, zentrale BHKW haben eine elektrische Leistung zwischen 1.000 und 5.000 kW (IEA, 2010) und gehen mit spezifischen Investitionskosten zwischen 800 und 1.280 EUR/kW_{el} einher. Diese Angaben liegen weit über den Investitionskosten nach ASUE (2011) (für die gleiche Leistungsklasse zwischen 180 und 390 EUR/kW_{el}). Dies kann daran liegen, dass die in ASUE (2011) beschriebene Kostenfunktion auf Daten kleinerer BHKW mit einer Leistung bis ca. 2200 kW_{el} basiert und daher die Kosten großer BHKWs mit dieser Kostenfunktion nicht mehr abgebildet werden können. Für die weiteren Betrachtungen werden daher auch die Kostenangaben nach IEA (2010) verwendet, welche auch näher an den Angaben nach Erdmann/ Dittmar (2010) liegen. Nach IEA (2010) wird bis 2050 eine Kostendegression von ca. 25 % erwartet, was zu spezifischen Investitionskosten für große BHKWs von 600 bis 960 EUR/kW_{el} führt. Der elektrische Wirkungsgrad ist bei großen BHKWs tendenziell höher als bei kleinen und liegt derzeit zwischen 30 und 40 %. Dieser Wert wird sich bis 2050 voraussichtlich auf 35 bis 45 % erhöhen, womit der Gesamtwirkungsgrad von im Mittel 80 % auf 84 % steigt (vgl. IEA 2010)
- Feste Biomasse, Dampfkraftanlagen:** Mit fester Biomasse betriebene Dampfkraftanlagen können weitestgehend auf etablierte Techniken zurückgreifen. Dennoch wird nach Nitsch et al. (2010) bei kleinen wärmegeführten Anlagen bis 2050 eine leichte Kostendegression von 4.750 auf 4.250 EUR/kW_{el}, sowie eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades von 15 auf 17,5 % erwartet. Bei stromgeführten Anlagen (P_{el} = 5-20 MW_{el}) werden die Investitionskosten bis 2050 von derzeit 2.500 bis 3.000 EUR/kW_{el} auf 2.150 bis 2.600 EUR/kW_{el} sinken, während davon ausgegangen wird, dass der elektrische Wirkungsgrad von 25 bis 28 % auf 29 bis 30,5 % ansteigt (vgl. Nitsch et al. 2010).

Tabelle 16: Erwartete spezifische Investitionskosten von netzgebundenen KWK-Techniken 2050

	P _{el} [MW _{el}]		η _{el} [%]		η _{ges} [%]		Kosten [EUR/kW _{el}]	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Gasturbinen	0,1	150	30	43	75	85	860	
Dampfkraftwerke (Kohle)	5	800	25	45	55	92	1.300	1.800
Dampfkraftwerke (Erdgas)	5	800		59		92	850	
GuD-Kraftwerke	20	800	55	65	80	92	630	1.060
Große BHKW	1	5	35	45	80	88	600	960
Feste Biomasse, Dampfkraftanlagen		20	17,5	30,5			2.150	4.250

Quelle: Nitsch et al. (2010), Erdmann/Dittmar (2010), ASUE (2011), IEA (2010), Matthes/Ziesing (2011), IER/RWI/ZEE (2010), DLR (2010)

3.3.2.1 Biomasse

Flüssige Biomasse

Flüssige Biomasse wird derzeit hauptsächlich im Verkehrssektor eingesetzt, kann aber auch in Pflanzenöl-BHKWs zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung verwendet werden. Die Investitionskosten belaufen sich für kleine Pflanzenöl-BHKWs (P_{el} < 10 kW) derzeit noch auf über 4.000 EUR/kW_{el}, werden aber voraussichtlich bis 2050 auf 2.600 EUR/kW_{el} sinken. Größere Anlagen (150 kW_{el} bis 5.000 kW_{el}) weisen niedrigere spezifische Investitionskosten auf. Sie liegen derzeit zwischen 1.300 EUR/kW_{el} (P_{el} bis 5 MW) und 3.000 EUR/kW_{el} (Anlagen bis 150 kW_{el}) und werden bis 2050 voraussichtlich auf 1.000 bis 2.400 EUR/kW_{el} sinken (Nitsch et al. 2010). Der elektrische Wirkungsgrad von Pflanzenöl-BHKWs mit einer Leistung von bis zu 5.000 kW_{el} liegt nach ASUE (2011) derzeit zwischen

29 und 46 % (Durchschnitt 39 %). Nach Nitsch et al. (2010) beläuft sich der durchschnittliche elektrische Wirkungsgrad derzeit auf rund 37,5 % und wird bis 2050 auf 40 % steigen. Dies entspricht einer Steigerung um 6,7 %. In der gleichen Quelle wird die Entwicklung des elektrischen und thermischen Wirkungsgrads differenziert nach der Leistung des BHKWs aufgezeigt. So haben BHKWs großer Leistung einen höheren elektrischen Wirkungsgrad als BHKWs mit einer kleinen Leistung. Umgekehrt ist der thermische Wirkungsgrad bei kleinen Anlagen größer. Wird diese Steigerung auf die Wirkungsgradangaben nach ASUE (2011) angewandt, ergeben sich für 2050 Wirkungsgrade zwischen 31 und 49 %. Der Gesamtwirkungsgrad beträgt heute zwischen 76 und 94 % (Durchschnitt 87 %) (ASUE 2011). Der Gesamtwirkungsgrad wird sich in Zukunft je nach Leistungsklasse um 2 bis 3 % erhöhen (vgl. Nitsch et al. 2010).

Gasförmige Biomasse

Die Nutzung von Biogas zur Wärme- und Stromerzeugung ist heute schon weit verbreitet und etabliert. Daher sind bei Biogas-BHKWs und Biogasanlagen künftig keine großen Kostendegressionspotenziale zu erwarten. Für Mini-BHKWs zur Biogasnutzung werden in Nitsch et al. (2010) spezifische Investitionskosten von 2.400 EUR/kW_{el} angegeben. Bis 2050 werden diese auf voraussichtlich 2.150 EUR/kW_{el} fallen. Bei Biogasanlagen (Biogaserzeugung inklusive BHKW zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung) sind die spezifischen Investitionskosten in erster Linie von der Anlagengröße abhängig. Sie liegen derzeit für kleine Biogasanlagen (< 150 kW_{el}) bei ca. 5.400 EUR/kW_{el} und für große Anlagen mit einer Leistung von 1 MW_{el} bei 2.700 EUR/kW_{el} (Nitsch et al. 2010). Die Kosten werden nach der gleichen Quelle bis 2050 auf 2.400 bis 4.900 EUR/kW_{el} fallen. Der elektrische Wirkungsgrad wird sich von derzeit durchschnittlich 37,5 auf 40,5 % erhöhen, was einer Steigerung von 8 % entspricht (ASUE 211). Nach Nitsch et al. (2010) wird der elektrische Wirkungsgrad η_{el} von Biogas-Mini-BHKWs bis 2050 von 27 auf 29,5 % und der thermische Wirkungsgrad η_{th} von 52 auf 54,5 % steigen. Bei größeren Anlagen steigt η_{el} bis 2050 von derzeit 32 bis 39 % auf 35 bis 42 %. η_{th} wird auch in Zukunft zwischen 49 bis 52 % liegen.

Da bei ländlichen Biogasanlagen eine Nutzung der bei der Stromproduktion anfallenden Wärme nicht immer möglich ist, wird die Einspeisung von aufbereitetem Biogas in das bestehende Erdgasnetz in Zukunft eine größere Rolle spielen. Die Einspeisung ins Erdgasnetz bietet neben der Entkopplung von Biogasproduktion und -nutzung auch die Möglichkeit der Speicherung erneuerbarer Energie und deren bedarfsgerechten Einsatzes in stromgeführten KWK-Anlagen oder Gaskraftwerken zum Ausgleich der fluktuierenden Stromeinspeisung aus Windenergie- und PV-Anlagen. Die Herstellungskosten für auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas beliefen sich 2011 nach BNetzA (2012) auf 16 bis 102 EUR/MWh und wiesen damit eine sehr breite Spanne auf. Berücksichtigt man die von den in Betrieb befindlichen Anlagen ins Gasnetz eingespeiste Menge, so ergeben sich nach BNetzA (2012) mittlere Herstellungskosten von 57 EUR/MWh, was einer Reduktion der Herstellungskosten um 8 % im Vergleich zum Vorjahr entspricht. Es wird erwartet, dass durch den technischen Fortschritt die Herstellungskosten weiter sinken werden, allerdings sind keine Studien zur erwarteten Kostendegression der Herstellungskosten bekannt. Für 2050 wird deshalb konservativ von Herstellungskosten in Höhe von 50 EUR/MWh ausgegangen

Tabelle 17: Effizienz und spezifische Investitionskosten von Biogas- und Pflanzenöl-KWK-Techniken, sowie der Biogaseinspeisung 2050

	P_{el} [kW _{el}]		η_{el} [%]		η_{ges} [%]		Kosten [EUR/kW]	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Pflanzenöl-BHKW	<10	5.000	31	49	78	97	1.000	2.600
Biogas-Mini-BHKW		50		29,5		85	2.150	
Biogas-Anlagen inkl. BHKW		1.000	35	42	84	94	2.400	4.900
Biogaseinspeisung							Ø 50 EUR/MWh	

Quelle: Nitsch et al. (2010), ASUE (2011), BNetzA (2012)

3.3.3 Wärmepumpen

Wärmepumpen nehmen in einem thermodynamischen Kreisprozess bei niedriger Temperatur Wärme auf und geben sie auf höherem Temperaturniveau wieder ab. Genutzt wird entweder die „warme“ Seite – zur Bereitstellung von Heizwärme und/oder Trinkwassererwärmung – oder die „kalte“ Seite bei der Klimatisierung bzw. Kühlung. In Sonderfällen werden auch beide Seiten genutzt (reversible WP). Neben Vorteilen bei der Effizienz der Wärmebereitstellung bei der Heizwärme können elektrisch angetriebene Wärmepumpen (WP) auch als steuerbare Last im Stromnetz dienen. Entsprechend werden und sollen sie zukünftig eine immer größere Rolle im Gebäudesektor spielen (vgl. Nitsch et al. 2012).

3.3.3.1 Wärmepumpen in Wohngebäuden

Nach Krewitt et al. (2009) lagen die Investitionskosten für Wärmepumpen 2005 zwischen 500 und 1.500 EUR/kW_{th}, allerdings wird nicht zwischen den verschiedenen Wärmepumpentechniken und Wärmequellen unterschieden. Nach Nitsch et al. (2004) lagen die Investitionskosten bei elektrischen Luftwärmepumpen Anfang der 2000er-Jahre zwischen 500 und 1.000 EUR/kW_{th}. Werden Kollektoren und Erdarbeiten nötig, steigen die Kosten um 250 bis 500 EUR/kW_{th}, womit sich Investitionskosten zwischen 500 und 1500 EUR/kW_{th} ergeben. Nach SAENA (2009) lagen in 2008 die Kosten für Luft/Wasser-Wärmepumpen bei einem Neubau mit 140 m² Nutzfläche bei 2.100 und für Sole/Wasser-Wärmepumpen bei 2.450 EUR/kW_{th}. Auch in IEA (2010) wird bei Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen eine sehr breite Kostenspanne angegeben: zwischen 500 und 2.550 EUR/kW_{th} bei Luft/Wasser-Wärmepumpen und zwischen 930 und 1.800 EUR/kW_{th} bei Sole/Wasser-Wärmepumpen. Diese Kostenspannen können mit der starken Abhängigkeit der Investitionskosten von den örtlichen Gegebenheiten (u.a. Bebauungsdichte, Grundwasservorkommen, Bodenbeschaffenheit) begründet werden. Die Investitionskosten werden bis 2050 voraussichtlich um ca. 20 % sinken (Krewitt et al. 2009). Damit ergeben sich für Luft/Wasser-Wärmepumpen für 2050 spezifische Investitionskosten zwischen 400 und 1.680 EUR/kW_{th} (nach IEA (2010) bis zu 2040 EUR/kW_{th}) und für Sole/Wasser-Wärmepumpen zwischen 600 und 1.440 EUR/kW_{th} (nach SAENA (2009) bis zu 1.960 EUR/kW_{th}). Niedrigere Kosten von durchschnittlich ca. 930 EUR/kW_{th} (keine Unterscheidung der Wärmequellen) werden hingegen in Nitsch et al. (2010) erwartet.

Die Effizienz von elektrischen Wärmepumpen, die in der Regel durch die Jahresarbeitszahl (JAZ) charakterisiert wird, wird bis 2050 voraussichtlich steigen, wobei die Abschätzungen der Entwicklung stark divergieren. Nach Müller et al. (2010) wird sich die JAZ bei Heizungssystemen mit einer Vorlauftemperatur von 55 °C auf 2,9 (Luft/Wasser-WP), bzw. 3,1 (Sole/Wasser-WP) erhöhen. Ist eine niedrigere Vorlauftemperatur der Heizung (35 °C) möglich, kann eine höhere Effizienz erreicht werden; bei Luft/Wasser-WP ein Wert von 4,0 und bei Sole/Wasser-WP von bis zu 4,9. Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. rechnet mit einem stärkeren und schnelleren Anstieg der JAZ. Nach BWP (2011) können Luft-WP in Neubauten bis 2030 eine JAZ von ca. 4,3, Wärmepumpen mit

Grundwasser als Wärmequelle eine JAZ von bis zu 5,7 und Erdreich-WP von 4,8 erreichen. Diese Jahresarbeitszahlen liegen schon 2030 über den Werten, die Müller et al. (2010) für das Jahr 2050 erwartet. In Nitsch et al. (2010) wird bis 2050 eine durchschnittliche JAZ von 4,0 erwartet (ohne Unterscheidung nach Wärmequellen und Vorlauftemperaturen). Diese JAZ liegt im Bereich der Entwicklung nach Müller et al. (2010). Wietschel et al. (2010) geht davon aus, dass es zukünftig durch die Optimierung des Gesamtsystems (Wärmebereitstellung, -speicherung, -verteilung und -übergabe, Betriebsoptimierung und optimierte Regelalgorithmen, geringere Temperaturdifferenzen durch den Einsatz thermisch aktiver Bauteilsysteme (TABS) und hydraulische Optimierung, minimierter hydraulischer Leitungswiderstand) bei reversiblen Wärmepumpen (Heizen und Kühlen) möglich ist, Jahresarbeitszahlen des Systems von bis zu 20 zu erreichen.

Neben elektrischen Wärmepumpen, die die Umweltwärme (Luft, Boden, Grundwasser u.a.) zur Raumwärmebereitstellung nutzen, werden auch Gassorptionswärmepumpen (s. Kapitel 3.3.3.3) an Bedeutung gewinnen, da diese als eine der Nachfolgetechniken für Gas-Brennwertkessel gesehen werden (vgl. Wietschel et al. 2010).

3.3.3.2 Großwärmepumpen

Die Investitionskosten bei großen Wärmepumpen hängen von den örtlichen Gegebenheiten (Bebauungsdichte, Bodenbeschaffenheit etc.) wie auch stark von der installierten thermischen Leistung P_{th} ab (vgl. Lambauer et al. 2008). Die spezifischen Investitionskosten reichen nach Lambauer et al. (2008) von ca. 570 EUR/kW_{th} für Gas-Wärmepumpen mit einer Leistung von 1.300 kW_{th} bis annähernd 1.200 EUR/kW_{th} bei kleineren Anlagen mit einer Leistung von ca. 200 kW_{th}. Große elektrische Wärmepumpen weisen nach Lambauer et al. (2008) wesentlich geringere Investitionskosten von 150 (installierte Leistung von 900 kW_{th}) bis 200 EUR/kW_{th} (installierte Leistung von 100 kW_{th}) auf. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den in dieser Quelle untersuchten Großwärmepumpen um Wärmepumpen handelt, die in den meisten Fällen Abwärme zur Wärmebereitstellung nutzen. Es fallen daher weniger Kosten für die Erschließung der Wärmequellen an als dies bei der Nutzung des Erdreichs oder Grundwassers der Fall wäre. Dies erklärt auch den großen Preisunterschied, verglichen mit den Angaben in Nitsch et al. (2010). Nach Nitsch et al. (2010) beliefen sich für Wärmepumpen mit einer Leistung größer 100 kW_{th} die durchschnittlichen spezifischen Investitionskosten in 2010 auf ca. 1.000 EUR/kW_{th}. Für Großwärmepumpen wird bis 2050 eine Reduktion der durchschnittlichen Investitionskosten um 45 % auf dann 550 EUR/kW_{th} erwartet. Wird die gleiche Kostendegression auf die Kostenangaben nach Lambauer et al. (2008) angewandt, ergeben sich im Jahr 2050 spezifische Investitionskosten zwischen 310 und 660 EUR/kW_{th} für große Gas-Wärmepumpen und ca. 100 EUR/kW_{th} für große elektrische Wärmepumpen.

Die in Lambauer et al. (2008) untersuchten elektrischen Großwärmepumpen haben eine JAZ zwischen 3,0 und 4,6. Die Anlagen liegen damit im Bereich der JAZ nach Nitsch et al. (2010) (3,71 im Jahr 2010). Nitsch et al. (2010) erwartet für Wärmepumpen (ohne Unterscheidung nach Wärmequelle und Vorlauftemperatur des Heizungssystems) bis 2050 eine Erhöhung der durchschnittlichen JAZ auf 4,0.

3.3.3.3 Gaswärmepumpen

Nach BWP (2011) werden Gaswärmepumpen bisher nur vereinzelt für die Wärmebereitstellung genutzt. Angaben zu den spezifischen Investitionskosten sind deswegen bei Gaswärmepumpen kaum vorhanden. Es wird erwartet, dass Gaswärmepumpen hauptsächlich bei der Sanierung von Gebäuden mit vorhandenem Gasanschluss oder größeren Neubauprojekten mit einer thermischen Leistung von mindestens 30 kW_{th} eingesetzt werden (Backhaus et al. 2012). Nach Lambauer et al. (2008) liegen die Kosten für große Gaswärmepumpen zwischen 570 EUR/kW_{th} (P_{th} 1.300 kW) und 1200 EUR/kW_{th} (P_{th} 200 kW_{th}), welche wie oben beschrieben voraussichtlich auf 310 bis 660 EUR/kW_{th} sinken werden. Gaswärmepumpen geringerer Leistung sind hingegen teurer. Nach Alfons (2010) lagen in 2010

die spezifischen Investitionskosten für eine Gaswärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 10 kW (inklusive 300 l-Wärmespeicher, Brennwertkessel und Hydraulik) bei 1.600 EUR/kW_{th} (Brutto-Listenpreis). Nach Einschätzung der Autoren sind im Jahr 2050 für kleinere Gaswärmepumpen (exkl. zusätzlichem Brennwertkessel, Speicher und Hydraulik) spezifische Investitionskosten von maximal 1.000 EUR/kW_{th} als realistisch anzusehen. Hier fehlen jedoch verlässliche Quellen zu der erwarteten langfristigen Kostenentwicklung.

Gaswärmepumpen haben nach BWP (2011) derzeit eine JAZ von durchschnittlich 1,3, welche sich bis 2030 auf im Schnitt 1,5 erhöhen wird. Nach ASUE (2002) kann bei Gaswärmepumpen schon heute eine JAZ von über 1,8 erreicht werden. Bis zum Jahr 2050 wird für Gaswärmepumpen eine geringe Steigerung der JAZ auf etwa 2,0 erwartet.

Tabelle 18: Erwartete zukünftige Effizienz verschiedener Wärmepumpen-Techniken zur Nutzung von Umweltwärme

	Performance Ratio/ JAZ [-]		Kosten [EUR/kW _{th}]	
	von	bis	von	bis
El. Sole/Wasser-WP	3,1	5,7	600	1960
El. Luft/Wasser-WP	2,9	4,3	400	2040
El. Großwärmepumpen	3,1	4,9	100	110
Gaswärmepumpen	1,3	2,0	310	1000

Quelle: Müller et al. (2010), BWP (2011), Lambauer et al. (2008), Nitsch et al. (2010), ASUE (2002)

3.3.4 Kältebereitstellung und Klimatisierung

Bei der Gebäudeklimatisierung und insbesondere bei der Kältebereitstellung ist die Nutzung natürlicher Kältequellen (z.B. Nachtluft, Erdreich) essentiell, um den Bedarf aktiver Kühlsysteme zukünftig möglichst niedrig zu halten. In Wietschel et al. (2010) wird auch darauf hingewiesen, dass bei der Klimatisierung und Kühlung das gesamte Bereitstellungssystem: der sogenannte Kälteverbund, bestehend aus Kälteerzeugung, Kältespeicherung, Kältetransport und der Erschließung natürlicher Kältequellen, betrachtet werden muss. Bei der Kältebereitstellung können zwei Anlagentypen grundsätzlich unterschieden werden: elektrisch (Kompressionstechnik) und thermisch (Ad-/ Absorptionstechnik) angetriebene Kältemaschinen (Henning et al. 2012). Kompressionskältemaschinen haben nach EA NRW (2010) derzeit einen Anteil von ca. 90 % bei der Kälteerzeugung.

Um Kälte zu erzeugen, wird Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres gehoben. Entscheidend für die Effizienz einer Kältemaschine ist dabei der benötigte Temperaturhub: je höher dieser Hub, desto niedriger ist die Effizienz (Henning et al. 2012). Darüber hinaus wird immer eine Wärmesenke für die abgegebene Wärme benötigt. In der Regel wird die Wärme an die Umgebungsluft abgegeben. Es eignen sich aber auch Erdreichwärmesonden oder Aquifere als Wärmesenken. Darüber hinaus kann die Abwärme von Kältemaschinen genutzt werden, um z.B. Warmwasser bereitzustellen. Im Folgenden werden verschiedene Kältemaschinen, deren Effizienz und Effizienzpotenziale beschrieben. Nach VDMA (2010) sind in der Kälte- und Klimatechnik Energieeinsparungen von bis zu 40 % möglich, wobei ein Großteil der Einsparungen aus einer besseren Regelung und Betriebsführung resultieren soll. Das Einsparpotenzial durch die Verbesserung einzelner Komponenten wird von Erdmann/Dittmar (2010) als eher gering eingestuft (im Gegensatz zu Wietschel et al. (2006): Hier wird auch bei der Verdichtertechnik noch ein hohes Einsparpotenzial gesehen).

3.3.4.1 Kompressionskältemaschinen

In Kompressionskältemaschinen wird ein Kältemittel in einem Kreislauf bestehend aus einem Verdampfer, einem Verdichter, dem Kondensator und einem Expansionsventil geführt, wobei die Kälte durch den Verdampfer bereitgestellt und am Kondensator abgegeben wird.

Bei der Kompressionstechnik können verschiedene Verdichter-Bauarten unterschieden werden: Scroll-Verdichter, Kolbenverdichter, Schraubenverdichter, Turboverdichter und Hubkolbenverdichter (Hempel et al. 2010, Henning et al. 2012). Anlagen können auch bezüglich der Größe unterschieden werden. Es gibt zum einen Anlagen, bei denen die Kälte zentral bereitgestellt und anschließend über ein Netz verteilt wird, zum anderen Kleinstgeräte, die die Kälte dezentral am Ort des Bedarfs bereitstellen.

Die Effizienz von strombasierten Kälteprozessen wird in der Regel durch die Leistungszahl angegeben. Dabei handelt es sich um einen stationären Effizienzwert unter Standardtestbedingungen, welcher meist über dem jährlichen Effizienzwert (Jahresarbeitszahl JAZ) liegt (Henning et al. 2012). Wassergekühlte Systeme weisen nach Henning et al. (2012) eine Leistungszahl zwischen 2,7 und 4,2 auf, während luftgekühlte Systeme leicht niedrigere Leistungszahlen zwischen 1,8 und 3,3 haben. Dezentrale Klimageräte haben eine Leistungszahl zwischen 2,0 und 4,2. Die breite Streuung hängt stark von der verwendeten Verdichtertechnik sowie der Systemsteuerung und -installation ab. Effizienzpotenziale bei der Kältebereitstellung sind in Tabelle 19 aufgeführt. Eine Optimierung der Temperaturen im Kältekreis kann die Effizienz der Kältebereitstellung ebenfalls verbessern. Die Erhöhung der Verdampfungstemperatur um 1 K kann nach EA NRW (2010) zu einer Reduktion des Energieaufwands am Verdichter von 4 % führen. Eine ähnliche Wirkung hat die Reduktion der Kondensations-temperatur um 1 K: dies führt zu einer Reduktion des Verdichter-Energiebedarfs von 3 % (Henning et al. 2012).

Tabelle 19: Effizienzpotenziale bei der Kältebereitstellung

Maßnahmenbereich	Einzelmaßnahme	Einsparpotenzial
Bedarfsminderung	Systemoptimierung	8-10%
	Wartung und Betrieb	4-8%
	Wärmedämmung	5-10%
	Wärmerückgewinnung	80% (der Wärme)
	Effiziente Geräte/ Beleuchtung in gekühlten Bereichen	2%
Nutzung effizienter Geräte und Anlagen	Drehzahlgeregelte Antriebe für Verdichter, Ventilatoren, Pumpen	4-6%
	Hocheffizienzmotoren Ventilator am Verdampfer	2-5%
	Hocheffiziente Kompressoren	2-5%
	Hocheffizienzmotoren Ventilator am Kondensator	2-5%
Bedienung und Vermeidung unnötiger Temperaturen	Reinigung Wärmeüberträgerflächen	3%
	Steuerung Verdichtungsdruck	10-15%
	Abtausteuern	5%

Quelle: Dena (2010)

Nach Lucas et al. (2002) ergeben sich für Kompressionskältemaschinen mit einer Leistung zwischen 10 und 10.000 kW spezifische Kosten in EUR/kW_{Kälte} in Abhängigkeit von der Kälteleistung nach der folgenden Funktion (mit Destatis (2013b) angepasst an 2011):

$$K = 6.025,5818 * \dot{Q}_0^{-0,6794} + 216,85$$

Dabei ist Q_0 die Kälteleistung der Kältemaschine in kW. Kompressionskältemaschinen sind eine etablierte und weit verbreitete Technik zur Kältebereitstellung. Daher wird das Kostensenkungspotenzial als gering betrachtet.

3.3.4.2 Ad- und Absorptionskältemaschinen

Ad- und Absorptionskältemaschinen bestehen wie elektrisch angetriebene Maschinen aus einem Kondensator und einem Verdampfer. Der Verdichter wird im Gegensatz zu den oben beschriebenen Anlagen allerdings nicht elektrisch angetrieben, sondern thermisch. Bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie sind thermisch angetriebene Prozesse in der Regel effizienter, vor allem wenn für den Antrieb Abwärme oder Umweltwärme (z.B. solare Einstrahlung) genutzt werden kann. In Absorptionskältemaschinen ist der Sorbent, d.h. der Stoff, der das Kältemittel absorbiert (aufnimmt), flüssig und kann in einem Kreislauf kontinuierlich geführt werden. In Adsorptionskältemaschinen ist der Sorbent in der Regel fest, weshalb die Kältebereitstellung in Adsorptionskältemaschinen diskontinuierlich erfolgt. Für die Antriebswärme eignen sich verschiedene Wärmequellen, solange sie Temperaturen von über 75 °C bereitstellen (u.a. Abwärme aus Prozessen oder von BHKWs (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)), Fernwärme, solarthermische Anlagen) (Henning et al. 2012). Aus energetischen Gründen sollte die direkte Befehuerung vermieden werden

Die Bewertung der Effizienz erfolgt mit zwei Kennzahlen:

- Thermische Leistungszahl (COP_{th}): Verhältnis erzeugte Kälte zu eingesetzter Wärme
- Elektrische Leistungszahl (COP_{el}): Verhältnis erzeugte Kälte zu eingesetztem Strom

Die Leistungszahlen beziehen sich dabei auf einen längeren Zeitraum (Kühlperiode) und sind nicht direkt mit den stationären Leistungszahlen der Kompressionskältemaschinen vergleichbar. Die thermische Leistungszahl liegt nach Henning et al. (2012) sowie Wiemken et al. (2013) für Absorptionskältemaschinen bei einstufigen Anlagen zwischen 0,5 und 0,8, bei zweistufigen zwischen 1,1 und 1,4 und bei dreistufigen Anlagen bei bis zu 1,8. Adsorptionskältemaschinen weisen eine niedrigere thermische Leistungszahl von 0,5 bis 0,6 auf (Wiemken et al. 2013). Die elektrische Leistungszahl beträgt zwischen 2,8 und 6,2, in einigen Studien werden aber auch Leistungszahlen von über 9 genannt (Henning et al. 2012). Ziel ist die Erhöhung des elektrischen COP auf über 12 (Henning 2013).

Die bereits erwähnte Nutzung solarthermischer Anlagen für die Kältebereitstellung in Wohn- und vor allem Nicht-Wohngebäuden befindet sich in Deutschland erst in der Entwicklungs-, beziehungsweise Markteinführungsphase. Durch solare Wärme können thermische Kälteprozesse angetrieben werden, mit denen Temperaturen zwischen -10 und 15 °C bereitgestellt werden können (Wietschel et al. 2010). Ein Vorteil der solar angetriebenen Kühlung besteht darin, dass Kältebedarf und Solarstrahlungsangebot zeitlich gut übereinstimmen.

Nach Lucas et al. (2002) lassen sich für einstufige Absorptionskältemaschinen mit einer Leistung zwischen 50 und 4.750 kW die spezifischen Investitionskosten in Euro in Abhängigkeit von der Kälteleistung nach folgender Formel abschätzen:

$$K = 14.740,2095 * \dot{Q}_0^{-0,6849} + 3,29$$

Dabei ist \dot{Q}_0 die Kälteleistung der Kältemaschine in kW. Für zweistufige Absorptionskältemaschinen mit einer Leistung von 400 bis 5.270 kW sieht der funktionale Zusammenhang folgendermaßen aus:

$$K = 231.975,0507 * \dot{Q}_0^{-1,1422} + 90,90$$

Über die spezifischen Investitionskosten von Adsorptionskältemaschinen liegen keine verlässlichen Informationen vor. Bei den Absorptionskältemaschinen liegt der Forschungsfokus derzeit auf Kältemaschinen mit niedriger Leistung, um deren Kosten zu senken. Darüber hinaus sind der Stromverbrauch und die Rückkühlwerke Gegenstand von Optimierungsansätzen (Henning et al. 2012). Für

Ad- und Absorptionskältemaschinen gibt es bislang keine Abschätzungen zu den langfristigen Kostendegressionspotenzialen.

3.3.4.3 Kontrollierte natürliche Lüftung

Im Gegensatz zur Lüftung mittels Lüftungsanlagen werden bei der natürlichen Lüftung Druck- und Temperaturunterschiede zwischen der Außenluft und dem Gebäudeinneren sowie innerhalb des Gebäudes zwischen den verschiedenen Zonen und Stockwerken für den Luftaustausch genutzt. Durch die geregelte Öffnung von Fenstern in der Fassade und Öffnungen im Dach mittels Elektromotoren werden die Luftzirkulation im Gebäude und der Luftaustausch mit der Umgebung angeregt, ohne dass Ventilatoren benötigt werden. Die Verbindung mit speziellen Verglasungen und Blendsystemen vermindert die starke Sonneneinstrahlung und damit das Aufheizen der Gebäude sowie den Kühlbedarf in den Sommermonaten. Im Vergleich mit der Lüftung und Klimatisierung mittels Lüftungsanlagen können durch eine kontrollierte/ automatisierte natürliche Lüftung und den damit verbundenen erhöhten Luftwechsel in der Nacht durch das Wegfallen der Ventilatoren und die Reduktion der Kühlenergie nach ZVEI (2013) bis zu 60 % Endenergie eingespart werden. Nach Eicker/Schulze (2012) kann in Nicht-Wohngebäuden durch eine kontrollierte natürliche Lüftung je nach klimatischen Bedingungen und Nutzung eine Primärenergiemenge von 8-50 kWh/(m²*a) eingespart werden und das, obwohl bei einer natürlichen Lüftung die Wärmerückgewinnung im Winter nur mit hohem Aufwand umsetzbar ist. Nach ZVEI (2013) können durch die kontrollierte natürliche Lüftung in Abhängigkeit von Gebäudetyp, Heizbedarf und Klimatisierung Endenergieeinsparungen zwischen 30 und 60 kWh/(m²*a) erzielt werden. Bei Konzepten zur natürlichen Lüftung werden drei grundsätzliche Varianten unterschieden; die einseitige Fensterlüftung, die Querlüftung und die Kaminlüftung/ Auftriebslüftung (Eicker/Schulze 2012).

3.3.4.4. Nachtlüftung/ passive Kühlung

Das Konzept der „passiven Kühlung“ beruht auf der Möglichkeit der thermischen Lastverschiebung, d.h. Speicherung von Wärmelasten (interne und solare Gewinne) im Tagesverlauf und der Abfuhr von Wärme über die Luft in den Nachtstunden, indem die geringeren nächtlichen Außentemperaturen genutzt werden. Die dafür notwendige Luftzirkulation wird in der Nacht entweder über Ventilatoren oder durch freie Konvektion, also Nutzung des natürlichen Auftriebs, gewährleistet. Voraussetzung für dieses Konzept ist die starke Minimierung von Wärmelasten (effiziente Geräte, Sonnenschutz), hochwertiger Wärmeschutz der Gebäudehülle sowie die Möglichkeit, ausreichend Wärme in der Gebäudemasse zu speichern (keine abgehängten Decken oder aufgeständerten Böden). Neben den baukonstruktiven Einschränkungen sind auch die lokalen (mikro-) klimatischen Bedingungen zu beachten.

Tabelle 20: Effizienz und Energieeinsparpotenziale von Kältebereitstellungs- und Klimatisierungstechniken und -Strategien

		Leistungszahl/ JAZ/ COP		Energiesparpotenzial
		von	bis	
Kompressionskältemaschinen	Luftgekühlt	1,8	3,3	Verdampfertemp. +1K → -4% Verdichter-Energiebedarf
	Wassergekühlt	2,0	4,2	Kondensationstemp. -1K → -3% Verdichter-Energiebedarf

Bedarfsminderung durch SMR ²¹ , Effizienztechnik und Dämmung				2-40%
Ad-/ Absorptionskältemaschinen	el. th.	0,5	>12 1,8	k.A.
Solare Kühlung				k.A.
Nachtlüftung				≤60%; 8-60 kWh/(m ² a)

Quelle: Henning et al. (2012), EA NRW (2010), VDMA (2010), Dena (2010), Wiemken et al. (2013), Henning (2013), ZVEI (2013), Eicker/Schulze (2012)

3.3.5 Umweltwärme

3.3.5.1 Solarthermie

Solarthermische Anlagen werden derzeit in Deutschland hauptsächlich zur Warmwasserbereitstellung und mittlerweile vermehrt auch zur Heizungsunterstützung eingesetzt. Zukünftig wird erwartet, dass Solarthermie-Anlagen auch verstärkt in Wärmenetze integriert werden (vgl. u.a. Nitsch et al. 2012). Die spezifischen Investitionskosten betragen nach IEA (2010) bei Anlagen für Ein- und Zweifamilienhäuser (Neubau) derzeit zwischen 630 und 750 EUR/m² und werden bis 2050 voraussichtlich auf 250 bis 300 EUR/m² sinken (Annahme nach ESTIF 2011: 0,7 kW_{th}/m²). Die Angaben über die derzeitigen Investitionskosten decken sich mit den in Nitsch et al. (2010) angegebenen Investitionskosten für Anlagen < 20 m² Kollektorfläche, wobei in letzterer Quelle für das Jahr 2050 mit ca. 380 EUR/m² von höheren Investitionskosten ausgegangen wird. Bei größeren Anlagen (Mehrfamilienhäuser, Nichtwohngebäude) mit einer Fläche bis 5.000 m² liegen die Kosten derzeit nach Nitsch et al. (2010) zwischen 240 und 470 EUR/m² und werden bis 2050 auf 140 bis 280 EUR/m² sinken. Nach IEA (2010) lagen die Investitionskosten bei Anlagen für Mehrfamilienhäuser (Neubau) bei ca. 560 EUR/m² und sinken bis 2050 auf 140 EUR/m² Kollektorfläche. In den letzten Jahren konnten bei solarthermischen Anlagen kaum noch Kostensenkungen beobachtet werden, was nach Ebert et al. (2012) daran liegt, dass die Potenziale der derzeitigen Techniken weitestgehend ausgeschöpft sind. Kostensenkungen werden hauptsächlich durch die Einsparung von Material erwartet, wobei die Hauptbestandteile Aluminium und Kupfer starken Preisschwankungen ausgesetzt sind und deren Preise tendenziell eher steigen werden. Die zukünftigen Kostensenkungspotenziale werden daher vor allem durch Technikänderungen wie die vollständige Fertigung der Kollektoren aus kostengünstigeren Kunststoffen erwartet (Ebert et al. 2012). In IEA (2010) wird noch unterschieden, ob es sich bei dem Gebäude, in dem die Solarthermie-Anlage eingesetzt werden soll, um einen Neubau oder um ein saniertes Bestandsgebäude handelt. Bei Sanierungen liegen die Investitionskosten nach IEA (2010) derzeit um 25-30 % über den Kosten bei Neubauten. Bis 2050 soll die Kostendifferenz weiter steigen und dann bei 50-100 % liegen, da die Kostendegression bei Anlagen in Neubauten nach IEA (2010) höher ist als bei Anlagen in Altbauten/ Sanierungen.

Derzeit haben kleine solarthermische Anlagen zur Warmwasserbereitstellung (<20 m², solarer Deckungsgrad 60 %) eine Performance Ratio (Verhältnis der Nutzenergie zur einfallenden Solarstrahlung²²) von 0,3. Dieser Wert wird nach Nitsch et al. (2010) bis 2050 auf voraussichtlich 0,35 steigen. Bei Anlagen bis 100 m² zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung (solarer Deckungsgrad 25 %) nehmen die nicht nutzbaren Wärmeüberschüsse im Sommer zu, weshalb die Performance Ratio heute nur bei 0,20 liegt und bis 2050 auf 0,25 steigen wird. Bei großen Anlagen (100-5.000 m²,

²¹ SMR: Steuerungs-, Mess- und Regelungstechnik

²² In Nitsch et al. (2010) wird eine solare Einstrahlung von 1.100 kWh/(m²a) zugrunde gelegt.

> 5.000 m²) liegt die Performance Ratio heute zwischen 0,20 und 0,37 und wird bis 2050 auf 0,25 bis 0,39 leicht ansteigen (Nitsch et al. 2010). Die Performance Ratio ist dabei stark vom angestrebten solaren Deckungsgrad und den eingebundenen Speichern (bei solaren Wärmenetzen saisonale Großspeicher) abhängig. Die größten Effizienzgewinne und Kostensenkungspotenziale bei solarthermischen Anlagen werden nach Müller et al. (2010) durch die Verwendung neuartiger Materialien (Kunststoffe, Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe, Kohlenstoff-Nanoröhrchen), bessere Dämmung der Kollektoren und neue Beschichtungen der transparenten Bauteile erwartet. Darüber hinaus wird erwartet, dass durch Wärmespeicher mit größeren Energiedichten ein höherer solarer Deckungsgrad wirtschaftlich darstellbar und möglich wird (Müller et al. 2010).

Weitere künftige Optionen sind die Integration solarthermischer Anlagen in Fassaden und Fenster. In (Chow et al. 2010) werden wasserdurchströmte Fenster beschrieben, in welchen klares Wasser zwischen den Scheiben auf der gesamten Fläche mit einer Geschwindigkeit zwischen 0,001 und 0,005 m/s aufwärts strömt (frei oder durch Pumpen angetrieben) (Chow et al. 2010). In diesen Fenstern können verschiedene Verglasungen (z.B. farbige oder reflektierende Scheiben) eingesetzt werden. Dies führt auf der einen Seite zu reduzierten Wärmeeinträgen im Sommer, wodurch der Kühlenergiebedarf gesenkt wird, auf der anderen Seite führen diese Verglasungen aber auch zu reduzierten Wärmeeinträgen in der Heizperiode, wodurch der Heizwärmebedarf erhöht wird. Das zirkulierende Wasser absorbiert einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung und wird erwärmt. Diese Wärme kann dem Beheizungs- und Trinkwarmwassersystem zugeführt werden (Chow et al. 2010). Dadurch wird die Oberflächentemperatur der innenliegenden Verglasung reduziert, wodurch der thermische Komfort v.a. in den heißen Sommermonaten erhöht wird. Der Wärmegewinn des durchströmenden Wassers liegen nach (Chow et al. 2010) zwischen 100 und 270 Watt pro Quadratmeter in den Sommermonaten. Es werden ähnliche Investitions- und Betriebskosten wie bei solarthermischen Systemen zur Trinkwarmwasserbereitstellung erwartet (Chow et al. 2010).

3.3.5.2 Wärmerückgewinnung/ Abwärmenutzung

Abluft- und Abwasserströme aus Gebäuden enthalten oftmals – wenn auch meist auf einem geringen Temperaturniveau – thermische Energie, die bisher noch nicht flächendeckend für die Bereitstellung von Raumwärme genutzt wird. Im Folgenden werden verschiedene (Ab-) Wärmequellen und die verfügbaren Techniken für die Nutzbarmachung der enthaltenen Wärme beschrieben.

Abwärmenutzung bei Lüftungsanlagen

Um die Luftqualität und den Komfort (Feuchtigkeit, Temperatur, Sauerstoffgehalt etc.) in Gebäuden aufrecht zu erhalten, ist ein ständiger Luftaustausch mit der Umgebung nötig (siehe auch Abschnitt 3.1.3). Dabei gehen gerade in den Wintermonaten große Wärmemengen „verloren“. Bei Altbauten machen die Lüftungswärmeverluste 20-35 % aus, bei neueren Gebäuden bis zu 45 % und bei Niedrigenergiehäusern bis zu 65 % (Borsch-Laaks 2012). Die Wärmerückgewinnung aus der Abluft gewinnt bei neuen Gebäuden nicht nur aus energetischer Sicht zunehmend an Bedeutung. Mechanische Lüftungsanlagen bieten die Möglichkeit, die Abwärme der Lüftung nutzbar zu machen und sie gewährleisten den erforderlichen Luftwechsel im Gebäude. Lüftungsanlagen (mit und ohne Wärmerückgewinnung) werden bisher hauptsächlich in Nicht-Wohngebäuden eingebaut, zunehmend aber auch bei gut gedämmten Wohngebäuden (Niedrigenergie- und Passivhäuser).

Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (Gegenstrom-Plattenwärmetauscher, Rotationswärmetauscher) erreichen heute Wärmerückgewinnungsgrade von 80 bis 90 %, teilweise auch über 90 % (Schramek et al. 2012, Universität Karlsruhe et al. 2008). Kreislaufverbundsysteme weisen einen geringeren Wärmerückgewinnungsgrad auf (ca. 70 %). Zukünftig werden Wärmerückgewinnungsgrade von 95 bis 97 % erwartet (Herstellerangaben, u.a. Viessmann 2014). Zur Steigerung der

Effizienz sollte nach Universität Karlsruhe et al. (2008) die spezifische Leistung bei Abluftanlagen maximal $0,15 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$ und bei Zu- und Abluftanlagen maximal $0,4 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$ betragen.

Neben gängigen Wärmerückgewinnungsanlagen eignen sich Abluftströme von Lüftungsanlagen auch für den Einsatz von Wärmepumpen (Abluftwärmepumpen). Der Vorteil bei der Nutzung von Abluft als Wärmequelle gegenüber der Nutzung anderer, natürlicher Wärmequellen ist das höhere Temperaturniveau, das sich positiv auf die Effizienz der Wärmepumpe auswirkt. Nach Henning et al. haben Wärmepumpen bei einer Quelltemperatur von 30°C einen COP (Coefficient of Performance) von über 4 und bei 45°C von über 5 (vgl. auch Brandstätter 2008).

Wärme aus Abwasser

Abwasser hat nach Wietschel et al. (2010) ganzjährig eine Temperatur von $10\text{-}15^\circ\text{C}$. Die Nutzung der im Abwasser enthaltenen Wärme durch den Einbau von Wärmetauschern in ausreichend großen Kanälen (angeschlossene Einwohnerzahl ≥ 3.000 , Trockenwetterabfluss $\geq 15 \text{ l/s}$, Innendurchmesser $\geq \text{DN } 800$) und bei Bedarf die nachgeschaltete Temperaturerhöhung mittels einer Wärmepumpe ist Stand der Technik und wird in der Schweiz in vielen Projekten angewandt. Nach Wietschel et al. (2010) gibt es in Deutschland ein Potenzial von 340 MW, womit durch die Nutzung von Wärmepumpen ($\text{JAZ} = 4$) ca. $36 \text{ PJ}_{\text{th}}/\text{a}$ für die Heizung und Warmwasserbereitung und ca. $60 \text{ PJ}_{\text{th}}/\text{a}$ bei der Nutzung des Systems zum Kühlen im Sommer bereitgestellt werden können (nach Vogt, Frisch & Pehnt (2010) beträgt das Potenzial bis zu 418 MW). Allerdings wird dieses Potenzial in Deutschland bislang nur in wenigen Pilotprojekten genutzt und es ist auch nicht das gesamte Potenzial unter ökonomischen Gesichtspunkten nutzbar, da der Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanäle teilweise aufwändig und damit kostenintensiv ist. Zusätzliche Wärmenutzungspotenziale bieten auch die Abflüsse von Klärwerken, da dort ein konstanter Wasserstrom zur Verfügung steht und es ökologisch auch vorteilhaft ist, die Temperatur des Abflusses durch Wärmeentnahme zu reduzieren bevor das Wasser in natürliche Gewässer eingeleitet wird (Wietschel et al. 2010).

Bei der Nutzung der Abwasserwärme besteht die Gefahr der Biofilm-Bildung (Fouling) auf den Wärmetauschern im Kanal, wodurch deren Effektivität reduziert wird. Die Entwicklung neuer Wärmetauscher-Materialien, die beständig gegenüber Fouling und Korrosion sind sowie große Oberflächen (Segmentierung) zulassen, können in Zukunft die Effektivität und Beständigkeit der Wärmetauscher erhöhen (Wietschel et al. 2010). Darüber hinaus hat die Erhöhung der JAZ von Wärmepumpen großen Einfluss auf die Nutzbarkeit der Abwasserwärme und die Effizienz des Gesamtsystems. Nach Wietschel et al. (2010) wird erwartet, dass 2050 durch die Nutzung der Abwasserwärme eine Wärmemenge in Höhe von $40\text{-}60 \text{ PJ}_{\text{th}}/\text{a}$ wirtschaftlich bereitgestellt werden könnte ($\text{JAZ} = 8$). Nach Fachzentrum Wärme aus Abwasser (ohne Jahresangabe) könnten 10 % aller Gebäude in Deutschland mit Wärme aus Abwasser versorgt werden.

3.3.6 Regenerative Stromerzeugung

Die Stromerzeugung soll 2050 in Deutschland weitgehend auf erneuerbaren Energien basieren (ca. 85 %) (Nitsch et al. 2012). Damit einhergehend wird eine Dezentralisierung der Stromerzeugung stattfinden und verstärkt auch die Stromerzeugung an und auf Gebäuden an Bedeutung gewinnen. Neben der Stromerzeugung in mit Biomasse (fest, flüssig, gasförmig) befeuerten KWK-Anlagen (s. Kapitel 3.3.2) werden dabei vor allem Photovoltaikanlagen und kleine Windkraftanlagen zum Einsatz kommen.

3.3.6.1 Photovoltaik

Bei den Techniken zur photovoltaischen Stromerzeugung können Silizium-basierte Techniken und Dünnschichttechniken unterschieden werden. Darüber hinaus spielen auch verstärkt „neue Konzepte“ wie Konzentratorzellen und organische Zellen (OPV) eine Rolle (Wietschel et al. 2010). Einen

Überblick über derzeit im Labor und in der Produktion erreichte Wirkungsgrade sowie Entwicklungsziele liefert Tabelle 21.

Tabelle 21: Stand der Technik und Entwicklungsziele verschiedener Techniken zur photovoltaischen Stromerzeugung

		Siliziumtechniken		Dünnschicht		„Neue Konzepte“	
		Mono-kristallin	Multikris-tallin	a-Si/ μ -Si	CIS, CdTe	III-V Halb-leiter Konzentrat or-zelle	Organische Zelle
Heute	Labor	25% (Zelle) 22,9% (Modul)	20,4% (Zelle) 18,5% (Modul)	13,4% (Zelle) 10,9% (Modul)	19,6-19,8% (Zelle) 15,7-16,1% (Modul)	44,7% (Zelle); 36,7% (Modul)	7-8%
	Industr. Produktion	16-18%	13-16%	6-8%	9-13%	27%	
Langfristige Ziele		24-26%	20-26%	>15%	22-25%	45%	10-17%

Quelle: Wietschel et al. (2010), ISE (2014)

Bei den Konzentratorzellen ist das langfristige Entwicklungsziel 2013 schon fast erreicht worden (44,7 %, Dimroth 2013). Auch in FVEE (2010) und Wietschel et al. (2010) wird von einem Wirkungsgrad von Konzentratorzellen von zukünftig über 50 % ausgegangen. Bei organischen Photovoltaikzellen werden mittlerweile Wirkungsgrade (PCE: Photo-Conversion Efficiency) von bis zu 11 % erreicht (vgl. Carlé/Krebs 2013, Khan et al. 2014, Green et al. 2013). Nach Janssen/Nelson (2013) liegt die maximale Effizienz von OPV-Zellen zwischen 20 und 24 %.

Die Kosten der Photovoltaik sind in den letzten Jahren stark gesunken und es wird auch für die Zukunft ein weiterer Rückgang der Produktions- und Investitionskosten erwartet. Nach IEA (2012) werden 2050 spezifische Investitionskosten zwischen 800 EUR/kW_p bei PV-Kraftwerken (Freifläche) und 1.000 EUR/kW_p bei Aufdachanlagen erwartet. Für Deutschland werden bei großen Anlagen nach Nitsch et al. (2010) niedrigere Kosten in einer Bandbreite zwischen 570-740 EUR/kW_p und für kleine Anlagen zwischen 800-1.000 EUR/kW_p erwartet. Die divergierenden Annahmen zu den Kosten und Kostensenkungspotenzialen basieren im Wesentlichen auf unterschiedlichen Annahmen zu den wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen und Kostensenkungspotenzialen durch Massenfertigung und Effizienzsteigerungen.

Die Kosten für neuere Techniken liegen derzeit noch über den Kosten der Silizium- und Dünnschichttechnik. Nach Sieg (2013) lagen die Kosten für hoch-konzentrierende Photovoltaik-Systeme (CPV) 2013 bei ca. 1.900 EUR/kW_p (nach Kost et al. (2013) zwischen 1.400 und 2.200 EUR/kW_p) und es wird erwartet, dass die Kosten bis 2017 auf ca. 1.150 EUR/kW_p fallen. Nach Kost et al. (2013) sinken die Stromgestehungskosten von CPV-Systemen bis 2050 um 50 bis 60 %, was bei einer Übertragung dieser Kostendegression auf die Investitionskosten zu CPV-Systemkosten zwischen 560 und 1.160 EUR/kW_p führt. Es sei darauf hingewiesen, dass CPV auf eine hohe direkte Sonneneinstrahlung angewiesen ist und eher als Option für Freiflächen-PV-Kraftwerke in südlichen Ländern gesehen wird und nicht als Technik für Anwendung auf oder an Gebäuden.

Die Entwicklung bei der organischen Photovoltaik OPV ist derzeit schwerer abzuschätzen, da die Technik noch in der Entwicklungsphase ist. Nach Kalowekamo/Baker (2009) lagen die Modulkosten in 2009 bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 5 % zwischen 800 und 2.200 EUR/kW_p. Durch

eine Steigerung des Wirkungsgrades und die Optimierung der Produktionsprozesse werden künftig Kosten zwischen 250 und 730 EUR/kW_p für möglich gehalten.

Gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV)

Bei gebäudeintegrierter Photovoltaik werden im Gegensatz zur derzeitigen Praxis Module nicht auf oder an ein Gebäude montiert, sondern Bestandteil der Gebäudehülle. Durch die Entwicklung der Dünnschicht- und organischen Photovoltaik konnte das Gewicht von Photovoltaikzellen reduziert werden und es wurden neue Anwendungsfelder eröffnet. Auch eröffnet diese Technik die Möglichkeit, die Farbe der Module den ästhetischen Anforderungen anzupassen. BIPV-Systeme können schon heute als multifunktionale Bauteile für Dächer (Solarziegel, Dachfolien), Fenster (Oberlichter, Verschattungselemente, semi-transparente Bauteile) und Fassaden (Vorhangfassaden) eingesetzt werden. BIPV-Systeme ersetzen dabei sonst notwendige konventionelle Bauteile und können als Verschattungselemente zu einer Reduktion des Kühlbedarfs von Gebäuden im Sommer beitragen. Nach Wietschel et al. (2010) können BIPV-Systeme auch in opake Fassaden als PV/T-Kollektoren integriert werden, in denen neben elektrischer Energie auch Niedertemperaturwärme bereitgestellt wird. Die Effizienz eines BIPV-Systems sollte nicht separat betrachtet werden. BIPV-Systeme haben zusätzliche positive Effekte, z.B. die Reduktion des Kühlbedarfs im Sommer, die mit in die Effizienz-betrachtung einbezogen werden sollten. Allgemeingültige Aussagen über die Effizienz solcher Systeme sind daher aufgrund vielseitiger Interdependenzen nicht möglich.

Nach Moor (2012) belaufen sich die Kosten von BIPV-Lösungen derzeit auf das Doppelte von herkömmlichen Photovoltaik-Systemen. Dies liegt zum einen daran, dass die Module teilweise extra angefertigt werden müssen, zum anderen an der schwierigeren Montage und der aufwändigeren technischen Handhabung. Der mittlere Anteil der Modulkosten an den Systemkosten beträgt dabei ca. 45 % (vgl. Karweger 2010). Karweger (2010) erwartet, dass sich die durchschnittlichen Systemkosten von 3.000 EUR/kW_p in 2010 auf 1.500 EUR/kW_p in 2020 halbieren. Weitere Kostendegressionen sind von Kostensenkungen der Module, der Entwicklung neuer PV-Techniken (u.a. OPV), sowie dem Grad der Vorfertigung und Standardisierung abhängig. Nach IEA (2012) werden die Kosten für Aufdach-PV-Anlagen zwischen 2020 und 2050 um ca. 40 % sinken. Wird dieses Kostensenkungspotenzial auf den Anteil der Modulkosten bei BIPV-Systemen angesetzt, ergeben sich 2050 Systemkosten zwischen 850 und 1.050 EUR/kW_p.

3.3.6.2 Kleinwindenergieanlagen

Das Segment kleiner Windenergieanlagen (KWEA) kann nach (Liersch 2010, Twele et al. 2012) vereinfacht in drei Klassen unterteilt werden:

- Mikrowindenergieanlagen: P_{nenn} bis 5 kW, einphasiger Anschluss in Niederspannungsnetz, Einsatz in Inselsystemen, freie oder gebäudeintegrierte Aufstellung netzgekoppelt.
- Miniwindenergieanlagen: $P_{\text{nenn}} = 5\text{-}30$ kW, dreiphasiger Anschluss in Niederspannungsnetz, keine Gebäudeintegration möglich.
- Mittelwindenergieanlagen: $P_{\text{nenn}} = 30\text{-}100$ kW, dreiphasiger Anschluss in Niederspannungsnetz oder Anschluss an Mittelspannungsnetz, keine Gebäudeintegration möglich.

Kleinwindenergieanlagen eignen sich je nach Leistungsklasse zur Gebäudeintegration oder gebäudenahen Aufstellung auf dem zum Gebäude gehörenden Grundstück zur Eigenversorgung von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden. Neben der Unterscheidung nach Leistungsklassen können Kleinwindenergieanlagen auch aufgrund der Rotorkonstruktion unterschieden werden. Eine Unterscheidung ergibt sich durch die Achsenausrichtung (vertikal, horizontal), wobei der Wirkungsgrad vertikaler Anlagen in der Regel etwas niedriger ist als der Wirkungsgrad von Anlagen mit horizontaler

Achse (Twele et al. 2012). Darüber hinaus werden langsam- und schnelllaufende Rotorkonstruktionen sowie besondere Bauformen unterschieden.

Die Effizienz von Kleinwindenergieanlagen ist von vielen Faktoren abhängig. Dies sind unter anderem die am Anlagenstandort auftretenden Windverhältnisse, die Auslegungswindgeschwindigkeit und der Leistungsbeiwert. In Liersch (2010) werden aufgrund unzuverlässiger Angaben von Anlagenherstellern für den Vergleich verschiedener Leistungsklassen und Standorte repräsentative Leistungskurven generiert. Mikrowindenergieanlagen haben nach dieser Quelle einen maximalen Leistungsbeiwert $C_{p,max}$ von 0,35 (optimale Windgeschwindigkeiten: Schwachwind KWEA 6m/s, Starkwind KWEA 9 m/s), Miniwindenergieanlagen von 0,37 (optimale Windgeschwindigkeiten: Schwachwind KWEA 5 m/s, Starkwind KWEA 8 m/s) und Mittelwindenergieanlagen von 0,39 (optimale Windgeschwindigkeit 11 m/s). Der maximale Leistungsbeiwert kann bei Mikro- und Miniwindenergieanlagen durch gutes Design und hochwertige Materialien auch auf bis zu 0,39 erhöht werden.

Mit den genannten Rahmenbedingungen ergeben sich nach Liersch (2010) je nach Leistungsklasse und Windbedingungen zwischen 848 und 1.835 Volllaststunden pro Jahr. Gerade bei Mikro- und Miniwindenergieanlagen liegen die Volllaststunden nach Reiterer (2013) jedoch oftmals niedriger und übersteigen nur an ausgezeichneten Standorten 1.200 Volllaststunden, an schlechten Standorten können es auch unter 500 Volllaststunden pro Jahr sein.

Verglichen mit großen Windenergieanlagen sind die spezifischen Investitionskosten bei Kleinwindenergieanlagen wesentlich höher und liegen nach Liersch (2010) derzeit zwischen 2.000 und 10.000 EUR/kW_N. Dabei gilt: je größer die Leistung, desto niedriger die spezifischen Kosten. Über erwartete Kostendegressionen bei kleinen Windenergieanlagen liegen keine Informationen vor. Werden die selben Kostensenkungspotenziale wie bei großen Onshore-Windenergieanlagen von -17 % bis 2050 (vgl. IEA 2012) zugrunde gelegt, ergeben sich für Kleinwindenergieanlagen Kosten zwischen 1.650 und 8.350 EUR/kW_N im Jahr 2050.

Tabelle 22: Spezifische Investitionskosten erneuerbarer Energien

	Kosten heute		Kosten 2050	
	von	bis	von	bis
Photovoltaik	1.000	1.800	570	1.000
Organische Photovoltaik	800	2.200	250	730
Gebäudeintegrierte Photovoltaik	3.000		850	1.050
Kleinwindenergie	2.000	10.000	1.650	8.350

Quelle: Nitsch et al. (2010), Kost et al. (2013), Kalowekamo/Baker (2009), IEA (2012), Karwegger (2010),

4 Entwicklung einer repräsentativen Gebäudetypologie

Im Folgenden werden die für die weiteren Betrachtungen generierten Gebäudetypen – unterschieden nach Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden – sowie die Datengrundlage, auf denen die Eigenschaften der Gebäude basieren, beschrieben.

4.1 Wohngebäude

In diesem Kapitel wird die heutige Wohngebäudestruktur (u.a. Anzahl Wohngebäude, Wohnfläche, Anzahl Wohneinheiten (WE), Baualter) beschrieben. Grundlage für die Strukturierung sind verschiedene Studien zum Wohngebäudebestand in Deutschland (v.a. Loga et al. 2011, Loga 2012, Diefenbach/Loga 2011, IWU 2012, Loga et al. 2012, Diefenbach et al. 2010, Destatis 2013a), in denen zum einen die Größe (Anzahl Wohngebäude, Wohnungen und Wohnflächen), zum anderen der energetische Zustand im Jahr der Erbauung der Wohngebäude und dessen Veränderungen durch energetische Sanierungen analysiert wurden. Die Datengrundlage ist in Tabelle 23 gegenübergestellt, die Zusammenführung und Anpassung der Daten in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Die beschriebenen und aufbereiteten Daten bilden die Grundlage für die gewählte Gebäudetypologie.

Bei der Anpassung der Gebäudedaten aus der Datenbasis Gebäudebestand und der Deutschen Wohngebäudetypologie gibt es zwei wesentliche Herausforderungen:

1. Die Baualtersklassen (BAK) unterscheiden sich und müssen angepasst werden.
2. Die Gebäudetypen sind unterschiedlich definiert und müssen angepasst werden.

Grundsätzlich wird bei der Anpassung der Datenquellen davon ausgegangen, dass die im Rahmen des Zensus ermittelten Gebäudezahlen dem tatsächlichen Gebäudebestand 2011 am ehesten entsprechen. Die anderen Datenquellen basieren im Wesentlichen auf den fortgeschriebenen Ergebnissen der Gebäudezählung im Rahmen des Zensus 1987. Die Fortschreibung basiert in der Regel auf Daten zur Bautätigkeit (u.a. Neubau, Abriss), wobei in der Vergangenheit die fortgeschriebenen Daten immer von den im Rahmen eines Zensus erhobenen Daten (teils erheblich) abwichen.

Zu Punkt 1:

Da die Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) die Angaben zu den energetischen Eigenschaften enthalten, werden die Baualtersklassen des Zensus an die Klassen der IWU Gebäudetypologie angepasst.

Bei der Anpassung der Baualtersklassen ist besonders auf die Zensus-Baualtersklasse 1949 bis 1978 (BAK Z3) zu achten. In der Gebäudetypologie ist diese Periode in drei Klassen unterteilt: 1949 bis 1957 (BAK 3), 1958 bis 1968 (BAK 4) und 1969 bis 1978 (BAK 5). Die Gesamtzahl der Gebäude der Zensus-BAK Z3 wird pro Gebäudetyp entsprechend folgender Gleichung auf die einzelnen IWU-BAK verteilt:

$$n_{BAK\ i=3-5} = \frac{n_{i,IWU}}{\sum_{i=3-5} n_{IWU}} * n_{BAK\ Z3}$$

Auch bei den neueren Baualtersklassen ab Mitte der 90er-Jahre des letzten Jahrhunderts weichen die Grenzen der Baualtersklassen leicht voneinander ab. Die Verteilung der Gebäudeanzahlen nach dem Zensus 2011 auf die Baualtersklassen der IWU-Gebäudetypologie erfolgt unter der Annahme, dass in den Zensus-Baualtersklassen jeweils ein linearer Zubau erfolgte. Dies kann zu leichten Verschiebungen der Anzahl in den Baualtersklassen führen. Der Fehler bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs der verschiedenen Wohngebäudetypen ist aber vernachlässigbar klein da sich

- die energetischen Eigenschaften der Wohngebäude zwischen 1995 und 2009 nur minimal verändert haben,

- die Gebäude im Rahmen des Projekts ohnehin in einer Klasse zusammengefasst werden und
- der Anteil dieser Baualtersklassen am gesamten Wärmebedarf vergleichsweise gering ist.

Zu Punkt 2:

Vor allem die Anpassung der Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH, ZFH) ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden, da der Zensus bei Gebäuden mit einer Wohneinheit und bei Gebäuden mit zwei Wohneinheiten zwischen freistehenden Gebäuden, Doppelhaushälften, gereihten Häusern und sonstigen Gebäuden unterscheidet. Die IWU-Gebäudetypologie unterscheidet hingegen nur zwischen Einfamilienhäusern (nicht-gereichte Häuser mit ein oder zwei Wohneinheiten) und Reihenhäusern (RH).

Die Verteilung der Gebäude mit ein und zwei Wohneinheiten nach dem Zensus 2011 auf die Gebäudetypen EFH und RH der IWU-Gebäudetypologie erfolgt auf der Basis folgender Annahmen:

- Wohngebäude mit den Eigenschaften „freistehend“ und „sonstige“ mit ein und zwei Wohneinheiten werden dem Gebäudetyp EFH zugeordnet.
- Doppelhaushälften und gereichte Häuser mit ein und zwei Wohneinheiten werden dem Gebäudetyp RH zugeordnet.

Bei den Mehrfamilienhäusern wird in der IWU-Gebäudetypologie nicht zwischen freistehenden und gereihten Gebäuden unterschieden. Mit den beschriebenen Annahmen und Ansätzen ergibt sich die in Tabelle 24 dargestellte Wohngebäudetypologie.

Die Angaben zum Sanierungsstand basieren auf den Daten der Datenbasis Gebäudebestand (Diefenbach et al. 2010). Datenbasis ist das Jahr 2009. Diese Daten werden an die Ergebnisse des Zensus (Destatis 2013a) und damit an das Jahr 2011 angepasst.

Hierzu wird zunächst die Differenz zwischen dem Zensus und den Angaben zur Gebäudeanzahl in der Datenbasis Gebäudebestand ermittelt. Diese Differenz wird anteilig auf die verschiedenen Dämmmerkmale (Dämmstoffstärke d , gedämmter Flächenanteil s) verteilt, wodurch die für das Jahr 2009 ermittelte Struktur der Sanierung erhalten bleibt. In einem zweiten Schritt wird die Sanierungsstruktur von 2009 mit den durchschnittlichen flächengewichteten Sanierungsraten und Dämmstoffstärken der Jahre 2005 bis 2009 der einzelnen Gebäudehüllelemente und Gebäudetypen nach der Datenbasis Gebäudebestand an das Jahr 2011 angepasst. Dabei wird angenommen, dass ein Gebäudehüllelement nur gedämmt wurde, wenn es bisher noch nie saniert worden ist und im Falle einer Sanierung bei dem jeweiligen Bauteil dann auch 100 % der Fläche saniert wurde.

Das Vorgehen bei der Anpassung ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt.

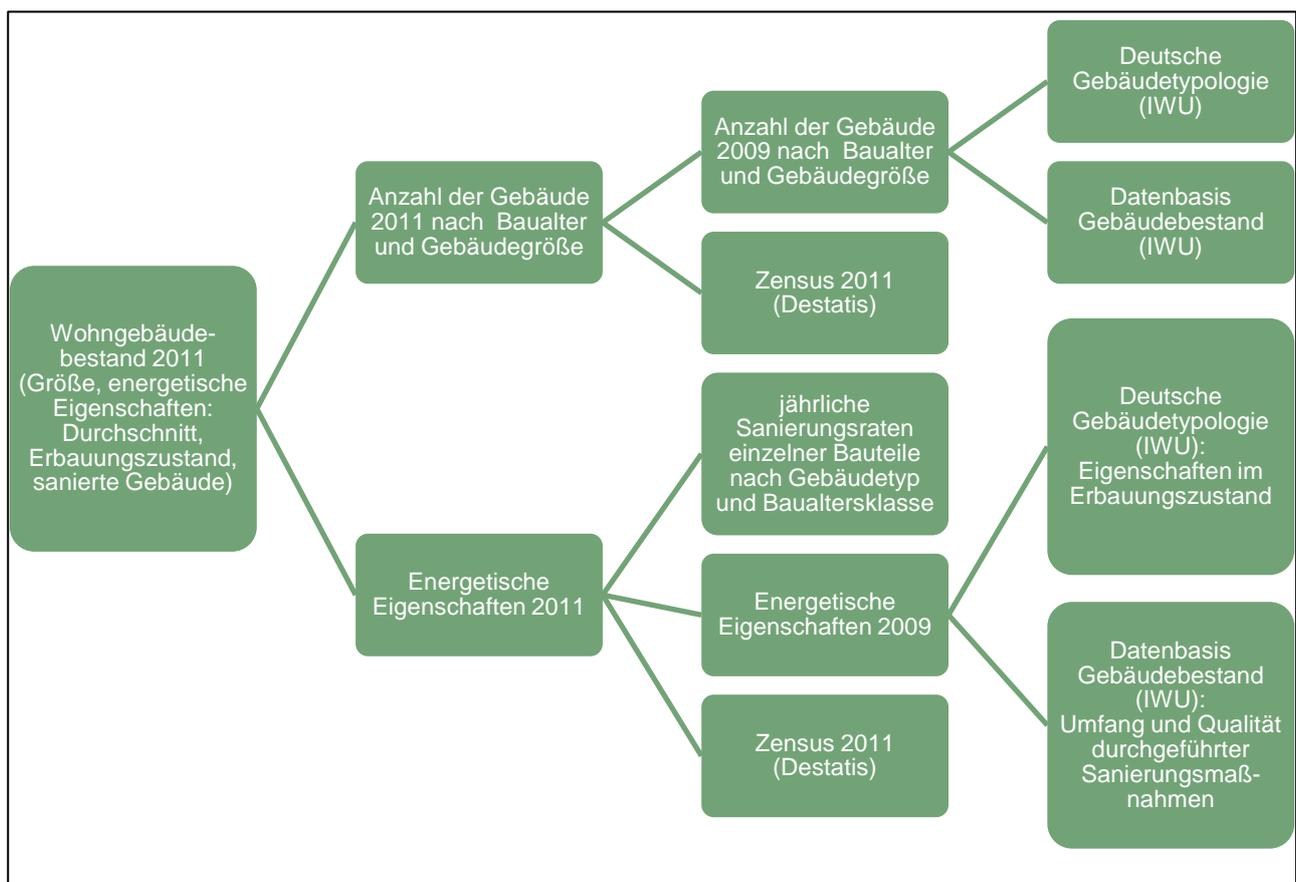
Tabelle 23: Datengrundlage für die Analyse des Wohngebäudebestands in Deutschland

	Deutsche Gebäudetypologie, TABULA	Datenbasis Gebäudebestand ²³	Zensus 2011
Gebäudetypen	Basis-Gebäudetypen: Einfamilienhaus (EFH) Reihenhaus (RH) Mehrfamilienhaus (MFH) Großes Mehrfamilienhaus (GMH)	Abgefragte Gebäudetypen: EFH RH Kleines MFH (KMH; 3 – 6 WE) Mittleres MFH (MMH; 7 – 12 WE) GMH (13 und mehr WE)	Abgefragt nach Anzahl WE: 1 2 3 – 6 7 – 12 13 und mehr Nach Gebäudetyp: Freistehende Wohngebäude Doppelhaushälfte Gereihtes Haus Anderer Gebäudetyp
Baualterklassen	Bis 1859 1860 – 1918 1919 – 1948 1949 – 1957 1958 – 1968 1969 – 1978 1979 – 1983 1984 – 1994 1995 – 2001 2002 – 2009	Bis 1918 1919 – 1948 1949 – 1957 1958 – 1968 1969 – 1978 1979 – 1983 1984 – 1994 1995 – 2001 2002 – 2004 2005 2006 2007 2008 Ab 2009	Vor 1919 1919 – 1948 1949 – 1978 1979 – 1986 1987 – 1990 1991 – 1995 1996 – 2000 2001 – 2004 2005 – 2008 2009 und später
Angaben zur energetischen Qualität	U-Werte im Erbauungszustand der Gebäude Weitere energetische Eigenschaften im Erbauungszustand Beispielhafte Sanierungsmaßnahmen	Opake Bauteile Dämmstoffstärke d (keine Dämmung, bis 5 cm, 6 – 9 cm, 10 – 13 cm, 14 – 17 cm, 18 – 21 cm, 22 – 25 cm, 26 cm oder mehr) Gedämmter Flächenanteil s (keine Dämmung, 100 %, 75 %, 50 %, 25 %, 10 %) Transparente Bauteile Fensterbaujahr Scheibenzahl	Keine
Weitere Angaben	Bauteilflächen Wohn-/ Nutzfläche Anzahl WE, Etagen	Wohnflächen	Gebäudedaten regional hochaufgelöst (Gemeindeebene)

Quelle: Datengrundlage für die Analyse des Wohngebäudebestands in Deutschland

²³ Abfrageergebnisse aus der Datenbasis Gebäudebestand wurden für diese Arbeit intern zur Verfügung gestellt.

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Zusammenführung und Aufbereitung der Gebäude-
daten



Quelle: Eigene Darstellung

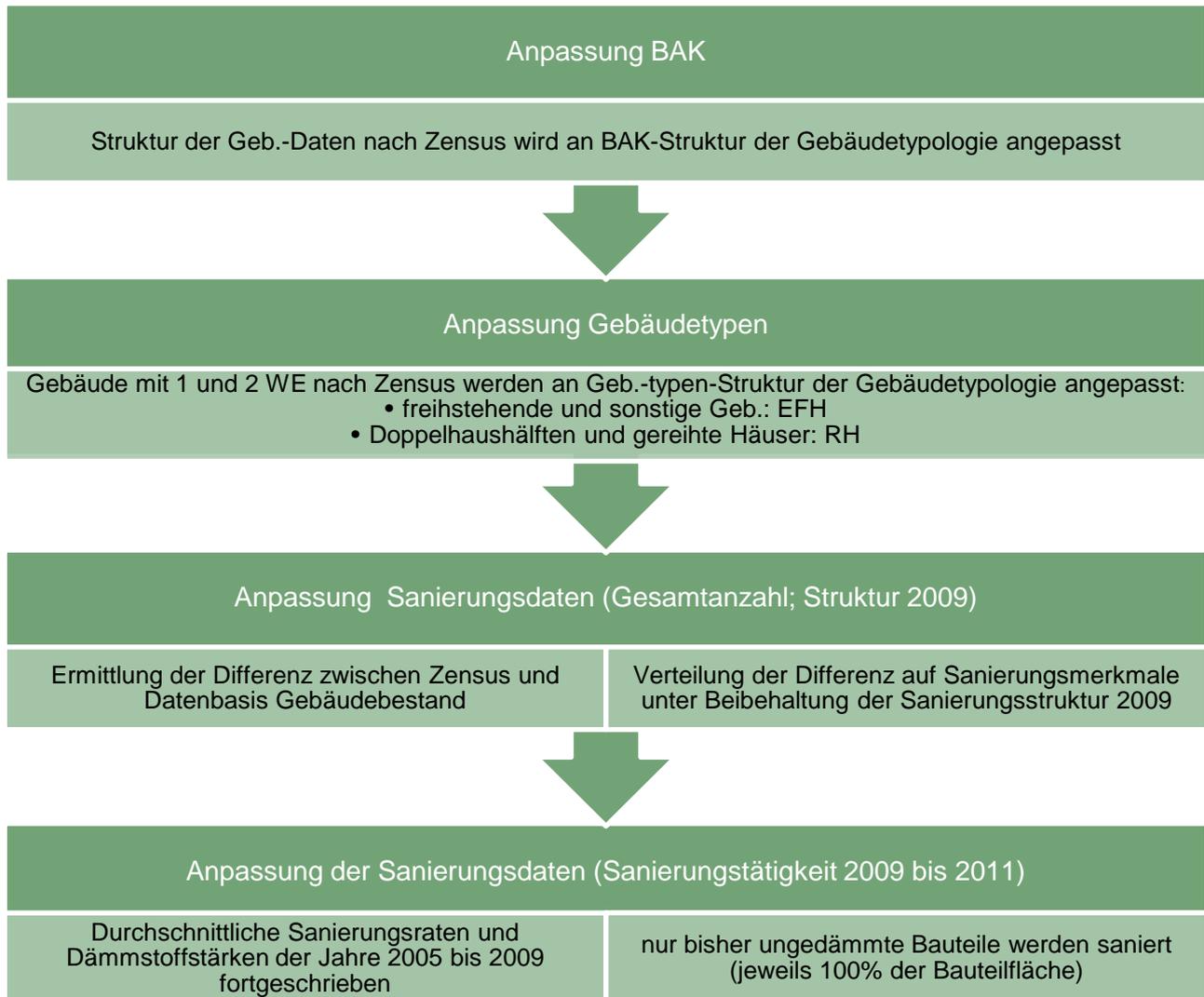
Tabelle 24 Struktur des Wohngebäudebestands in Deutschland

Baujahr	Anzahl Gebäude				
	EFH	RH	KMH	MMH	GMH
bis 1918	1.421.615	514.900	391.825	104.481	29.308
1919 - 1948	1.177.590	662.747	306.379	82.029	7.454
1949 - 1957	917.497	425.433	272.846	155.330	18.584
1958 - 1968	1.585.169	595.863	415.345	173.441	36.761
1969 - 1978	1.465.678	575.551	248.284	89.302	45.995
1979 - 1983	657.424	304.505	91.023	52.301	15.433
1984 - 1994	1.280.950	655.051	216.921	112.324	29.968
1995 - 2001	1.020.470	568.233	153.268	69.329	18.995
2002 - 2009	783.451	371.266	62.296	24.237	7.483
ab 2010	101.974	38.231	8.129	3.588	1.321

EFH: freistehendes Gebäude mit 1 oder 2 Wohneinheiten (WE), RH: gereihtes Haus und Doppelhaushälften mit 1 oder 2 WE, KMH: kleines Mehrfamilienhaus (MFH) mit 3 bis 6 WE, MMH: mittleres MFH mit 7 bis 12 WE, GMH: großes MFH mit 13 und mehr WE.

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 8: Anpassung des Sanierungsstands 2009 an die Daten des Zensus 2011 unter Berücksichtigung der Sanierungsraten der Jahre 2005 bis 2009



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Diefenbach et al. (2010)

4.1.1 Flächen- und Volumenermittlung der betrachteten Gebäudetypen

Die im Rahmen dieses Projekts für die Energiebilanzen verwendeten Flächen und Volumina basieren auf den im Rahmen des Projekts Datenbasis Gebäudebestand (Diefenbach et al. 2010) ermittelten typischen Wohnflächen und den Angaben zu Kubatur und Hüllflächen in der deutschen Gebäudetypologie (Loga et al. 2012, Loga 2012). Es sei darauf hingewiesen, dass in den im Projekt Datenbasis Gebäudebestand verwendeten Fragebögen explizit Schätzwerte zur Wohnfläche in den Gebäuden zugelassen werden (Diefenbach et al. 2010). Die ausgewiesenen Wohnflächen entsprechen damit nicht zwangsläufig der Wohnfläche nach zum Beispiel der Wohnflächenverordnung, die auch zur Wohnung gehörende Balkone, Loggien, Dachgärten oder Terrassen, sowie Wintergärten, Schwimmbäder und weitere ähnliche nach allen Seiten geschlossene Räume erfasst.²⁴ Da in der Datenbasis

²⁴ Wohnflächenverordnung vom 25. November 2003 (BGBl. I S. 2346)

Gebäudebestand keine Angaben zu den Bauteilflächen und Gebäudevolumina ermittelt wurden, sind für die Definition der Gebäudetypen im Rahmen des Projekts Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 wohnflächenspezifische Kennwerte aus den Angaben in der Gebäudetypologie (Loga 2012) gebildet worden:

- Wohnflächenspezifische Außenwand-, Dach-, Fußboden-/ Kellerdecken- und Fensterflächen
- Wohnflächenspezifisches Bruttovolumen.

Durch Multiplikation der wohnflächenspezifischen Faktoren werden die Bauteilflächen und das beheizte Gebäudevolumen der Gebäudetypen berechnet, wodurch die Kubatur typischer Wohngebäude nach der deutschen Gebäudetypologie erhalten bleibt und auf die Ergebnisse einer großflächigen Gebäudedatenerhebung übertragen wird. Die im weiteren verwendeten Flächen und Volumina werden nach dem beschriebenen Vorgehen ermittelt.

4.2 Nichtwohngebäude

Im Bereich der Nichtwohngebäude ist die Datengrundlage bezüglich Flächenbestand, Gebäudeart, Baualtersklasse und der gebäudetechnischen Ausstattung verglichen mit den Wohngebäuden als schlecht zu bezeichnen. In der Vergangenheit wurden diverse Studien zur genaueren Erfassung des Energieverbrauchs des Sektors Gewerbe-, Handel, Dienstleistung (GHD) durchgeführt, in deren Rahmen eine Einteilung des GHD-Sektors erfolgte. Einen Überblick über Typologieansätze und bereits durchgeführte Studien liefern Schlomann et al. (2011), BMVBS (2013), BMVBS (2011). Im Rahmen der Studie „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010“ (Schlomann et al. 2011) ist neben der Analyse des Energieverbrauchs eine Typologie entwickelt worden, die den NWG-Bestand in sechs Gebäudekategorien unterteilt und diese mit 12 Branchengruppen und Untergruppen korreliert. Die Branchengruppen sind:

1. Baugewerbe
2. Büroähnliche Betriebe
3. Herstellungsbetriebe
4. Handel
5. Krankenhäuser, Schulen, Bäder
6. Beherbergung, Gaststätten, Heime
7. Nahrungsmittelgewerbe
8. Wäschereien
9. Landwirtschaft
10. Gartenbau
11. Flughäfen
12. Bekleidung, Leder, Spedition

Die Gruppen Landwirtschaft, Gartenbau und Flughäfen werden allerdings in Schlomann et al. (2011) nicht weiter bei der Entwicklung der Nichtwohngebäudetypologie betrachtet. Die sechs betrachteten Gebäudekategorien nach Schlomann et al. (2011) sind:

1. Wohngebäude mit Mischnutzung: Gebäude mit überwiegender Wohnnutzung und teilweiser GHD-Nutzung
2. Bürogebäude: Gebäude mit größtenteils gewerblicher, büroähnlicher Nutzung; außer einer evtl. vorhandenen Hausmeisterwohnung keine Wohnnutzung
3. Laden-/ Verkaufsgebäude: Gebäude, die größtenteils eine GHD-Nutzung haben

4. Werkstattgebäude: Gebäude zur Montage und Demontage, Reparatur, Produktion, Produktverarbeitung und -veredelung, medizinischen Versorgung, Schulen, universitäre Einrichtungen
5. Lager-/ Garagengebäude: Überwiegende Nutzung durch GHD-Sektor; private Nutzung in geringem Umfang möglich
6. Sonstige Gebäude ohne Wohnnutzung: u.a. Schwimmbäder, Versammlungshallen, kirchliche und kulturelle Gebäude.

Die in Schlomann et al. (2011) dargestellten Ergebnisse bezüglich der durchschnittlichen Nettogeschossflächen pro Gebäude, der Gebäudeanzahl und des Energieverbrauchs basieren auf einer Erhebung mit Fragebögen bei rund 2.000 Arbeitsstätten, welche auf den gesamten Nichtwohngebäudebestand in Deutschland hochgerechnet wurden. Die Ergebnisse der Hochrechnungen sind in Tabelle 25 und Tabelle 26 dargestellt. Bezogen auf die Fläche dominieren die Lager- und Garagengebäude, die einen Anteil von ca. 30 % am gesamten Flächenbestand haben. Wird die Anzahl der Gebäude betrachtet, dominieren die Wohngebäude mit Mischnutzung mit einem Anteil von 55%, gefolgt von den Bürogebäuden mit einem Anteil von 12 % am gesamten Nichtwohngebäudebestand.

Tabelle 25: Flächenbestand des GHD-Sektors im Jahr 2008 nach Branchengruppen und Untergruppen

Grp.	Split	WG mit Mischnutzung	Bürogebäude	Laden-/ Verkaufsgbäude	Werkstattgebäude	Lager-/ Garagengebäude	Sonst. Geb. ohne Wohnnutzung	Gesamt
		Mio. m ²	Mio. m ²	Mio. m ²	Mio. m ²	Mio. m ²	Mio. m ²	Mio. m ²
1	Baugewerbe	27	3	10	49	23	9	120
9	Baugewerbe	27	3	10	49	23	9	120
2	Büroähnliche Betriebe	201	209	43	12	14	31	510
14	Kreditinstitute u. Versicherungen	14	29	7	0	0	2	52
17	Verlagsgewerbe	0	1	0	0	0	1	4
18	Sonst. betriebliche Dienstleistungen	147	75	16	12	13	19	282
20	Gebietskörperschaft u Sozialvers.	35	101	2	0	0	1	139
30	Deutsche Bundespost/ Postdienste	3	1	2	0	0	0	5
31	Telekommunikation	2	1	17	0	0	0	20
32	Deutsche Bahn AG	0	1	0	0	0	8	9
3	Herstellungsbetrieb	12	2	9	57	3	8	91
1	Metallgewerbe	5	1	1	29	2	4	42
2	KFZ-Gewerbe	5	0	8	19	0	3	35
3	Holzgewerbe	1	0	0	8	1	1	11
4	Papier- u. Druckgewerbe	2	0	0	1	0	0	3
4	Handel	87	22	145	40	113	58	464
24	Einzelhandel - food	14	1	40	0	1	0	56
25	Einzelhandel - nonfood	58	9	65	31	7	12	182
26	Großhandel - food	1	1	5	1	12	2	22

Grp.	Split	WG mit Misch-nutzung	Büroge-bäude	Laden-/Ver-kaufsgebäude	Werk-stattge-bäude	Lager-/Gara-ge-nge-bäude	Sonst. Geb. ohne Wohn-nutzung	Gesamt
27	Großhandel - nonfood	8	6	34	9	91	38	186
29	Handels-vermittlungen	6	5	0	0	2	6	19
5	Krankenhäuser, Schulen, Bäder	1	16	2	124	1	110	254
21	Krankenhäuser	0	1	0	44	0	18	65
22	Schulen	1	15	1	78	0	86	181
23	Bäder	0	0	1	2	0	6	9
6	Beherbergung, Gaststätten, Heime	67	17	15	7	18	195	319
15	Beherbergungsgewerbe	18	0	2	1	0	72	93
16	Gaststättengewerbe	19	1	10	0	0	13	44
19	Org. ohne Erwerbs-zweck u. Heime	31	16	4	6	17	110	183
7	Nahrungsmittelge-werbe	4	0	2	2	2	4	14
5	Backgewerbe	2	0	0	0	0	0	3
6	Fleischereien	1	0	1	0	0	1	4
7	Restl. Nahrungsmittelgewerbe	0	0	1	1	2	3	7
8	Wäschereien	1	0	0	0	0	0	2
8	Wäschereien u. (chem.) Reinigung	1	0	0	0	0	0	2
12	Textil, Bekleidung, Spedition	2	3	25	1	500	5	536
28	Bekleidung, Leder, Textil	0	0	0	1	0	1	2
34	Spedition, Lagerei, Verkehrsvermittlung	1	2	25	0	500	5	534
Summe		401	271	250	292	674	421	2.310

Quelle: Schlomann et al. (2011)

Tabelle 26: Anzahl der Gebäude des GHD-Sektors im Jahr 2008 nach Branchengruppen und Untergruppen

Grp.	Split	WG mit Misch-nutzung	Büroge-bäude	Laden-/Ver-kaufsgebäude	Werk-stattge-bäude	Lager-/Gara-ge-nge-bäude	Sonst. Geb. ohne Wohn-nutzung	Gesamt
		Tsd.	Tsd.	Tsd.	Tsd.	Tsd.	Tsd.	Tsd.
1	Baugewerbe	18	32	173	110	38	605	120
9	Baugewerbe	18	32	173	110	38	605	120
2	Büroähnliche Be-trieb	672	94	74	76	113	3.189	510
14	Kreditinstitute u. Versicherungen	90	8	0	0	10	250	52
17	Verlagsgewerbe	9	0	0	0	3	23	4

Grp.	Split	WG mit Misch- nutzung	Büroge- bäude	Laden-/ Ver- kaufsgeb- äude	Werk- stattge- bäude	Lager-/ Gara- genge- bäude	Sonst. Geb. ohne Wohn- nutzung	Gesamt
18	Sonst. Betriebl. Dienstleistungen	378	54	73	60	47	2379	282
20	Gebietskörperschaft u. Sozialvers.	188	11	1	0	3	359	139
30	Deutsche Bundes- post/ Postdienste	0	20	0	0	0	77	5
31	Telekommunikation	2	0	0	16	0	44	20
32	Deutsche Bahn AG	5	0	0	0	50	55	9
3	Herstellungsbetrieb	15	18	146	17	14	280	91
1	Metallgewerbe	8	6	70	11	7	143	42
2	KFZ-Gewerbe	4	11	56	0	3	89	35
3	Holzgewerbe	2	1	17	6	3	34	11
4	Papier- u. Druck- gewerbe	2	0	4	0	1	15	3
4	Handel	58	329	104	129	75	1.493	464
24	Einzelhandel - food	2	95	0	5	2	216	56
25	Einzelhandel - nonfood	10	156	77	39	14	805	182
26	Großhandel - food	3	7	1	11	6	29	22
27	Großhandel - nonfood	20	71	27	48	43	270	186
29	Handelsvermittlungen	22	0	0	26	11	173	19
5	Krankenhäuser, Schulen, Bäder	7	5	40	2	63	117	254
21	Krankenhäuser	2	1	6	1	7	17	65
22	Schulen	5	3	32	1	40	82	181
23	Bäder	0	1	1	0	16	19	9
6	Beherbergung, Gast- stätten, Heime	32	63	24	59	238	838	319
15	Beherbergungsgewer- be	0	5	5	3	63	135	93
16	Gaststättengewerbe	3	56	2	13	44	262	44
19	Org. ohne Erwerbs- zweck u. Heime	29	2	17	43	130	441	183
7	Nahrungsmittelge- werbe	0	4	2	2	5	33	14
5	Backgewerbe	0	1	1	1	2	16	3
6	Fleischereien	0	3	1	1	2	14	4
7	Restl. Nahrungsmit- telgewerbe	0	0	1	1	1	4	7
8	Wäschereien	1	2	1	1	1	15	2
8	Wäschereien u. (chem.) Reinigungen	1	2	1	1	1	15	2
12	Textil, Bekleidung, Spedition	15	14	3	158	5	220	536
28	Bekleidung, Leder, Textil	0	0	3	0	2	12	2
34	Spedition, Lagerei, Verkehrsvermittlung	15	14	0	158	4	209	534
Summe		3.738	818	561	568	554	553	6.792

Quelle: Schlomann et al. (2011)

Eine ähnliche Einteilung des Nichtwohngebäudebestands wie in Schlomann et al. (2011) ist in BMVBS (2013) zu finden, wobei hier nur reine Nichtwohngebäude betrachtet und die Wohngebäude mit Mischnutzung zunächst nicht berücksichtigt werden. Ziel des Vorhabens „Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen“ (BMVBS 2013) war neben der Entwicklung einer Typologie für beheizte Nichtwohngebäude auch die Abschätzung der energetischen Qualität. Der sehr heterogene NWG-Bestand wird anhand seiner Funktion, der Bauweise und Gebäudegeometrie, sowie des Baualters unterteilt. Grundlage für die Angaben zur Gebäudeanzahl und den entsprechenden Gebäudeflächen (Nettogrundfläche (NGF), Bruttogrundfläche (BGF)) sind in erster Linie ALK²⁵ bzw. ALKGIS®²⁶-Daten. Die Einteilung der beheizten NWG in Nutzungsklassen basiert dabei auf Erfahrungen des Projekts „Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland“ (BMVBS 2011). Die in BMVBS (2013) entwickelte Typologie unterteilt die beheizten NWG in acht Nutzungsklassen erster Ordnung und zwischen zwei und vier Nutzungsklassen zweiter Ordnung (s. Tabelle 27). Die in Tabelle 27 angegebenen Gebäudeanzahlen und -flächen basieren auf den in BMVBS (2013) angegebenen Werten für die Nutzungsklassen erster Ordnung, sowie Angaben zum prozentualen Anteil der Nutzungsklassen zweiter Ordnung an der Gesamtzahl und Gesamtfläche der Gebäude (BMVBS 2013). Die angegebenen Flächen sind dabei Mittelwerte der in BMVBS (2013) angegebenen Flächen, die auf verschiedenen Hochrechnungsansätzen basieren, insgesamt aber weniger als 10 % voneinander abweichen. Darüber hinaus werden vier Baualtersklassen unterschieden (bis 1975, 1976 – 1983, 1984 – 1994, ab 1995).

Tabelle 27: Nichtwohngebäude-Typologie: Einteilung in Nutzungsklassen erster und zweiter Ordnung, Gebäudeanzahl und Flächen

Nr.	Nutzungsklasse erster und zweiter Ordnung	Anzahl Gebäude	NGF Mio. m2
1	Bildung	140.353	227,7
1.1	Allgemeinbildende Schule	66.593	163,8
1.2	Hochschulen und Forschung	21.800	45,6
1.3	Kindertagesstätten	51.961	18,3
2	Büro und Verwaltung	293.846	278,0

²⁵ ALK: Automatisierte Liegenschaftskarte; Deutschlandweit

²⁶ ALKIS®: Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem; bisher nicht in allen Bundesländern

2.1	Regierungs- und Gerichtsgebäude	13.737	13,9
2.2	Verwaltungs-, Polizei- und Feuerwehrgebäude	253.830	234,6
2.3	Allgemeine Bürogebäude	26.279	29,5
3	Gewerbe und Industrie	1.778.006	602,4
3.1	Fabrikgebäude	77.045	163,9
3.2	Lagergebäude	62.711	49,9
3.3	Werkstattgebäude	276.227	64,6
3.4	Allgemeine Industrie- und Gewerbegebäude	1.362.023	323,9
4	Heilbehandlung	125.123	86,3
4.1	Krankenhäuser, Kliniken	12.244	59,3
4.2	Praxisgebäude und Gesundheitseinrichtungen	112.880	27,0
5	Handel und Dienstleistungen	304.298	182,0
5.1	Kaufhäuser	2.688	9,8
5.2	Einkaufszentren	10.750	35,4
5.3	Allgemeine Verkaufsgebäude	290.860	136,7
6	Sport	113.776	57,6
6.1	Sporthallen	24.786	24,6
6.2	Schwimmbädern	4.479	3,5
6.3	Allgemeine Sportbauten	84.511	29,7
7	Kultur	83.615	73,7
7.1	Museen, Bibliotheken und Ausstellungsgebäude	15.827	23,1
7.2	Oper, Theater und Veranstaltungshallen	23.293	22,2
7.3	Gebäude für kulturelle Zwecke	44.495	28,4
8	Beherbergung und Gastronomie	147.520	87,4
8.1	Hotels und Pensionen	37.627	39,0
8.2	Gaststätten und Restaurants	109.894	48,7
Summe		2.986.537	1.594,9

Quelle: BMVBS (2013)

Im Gegensatz zu Schlomann et al. (2011) enthält BMVBS (2013) Angaben zu den energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle (U-Werte) und Abschätzungen zur vorwiegenden Anlagentechnik (Wärme: Heizöl/ Erdgas, Fernwärme, Strom, Sonstige; ohne Lüftung, voll-/ teilklimatisiert) für alle Hauptnutzungsklassen, sowie Angaben zu Flächen, Geschossen, Längen und Breiten beispielhafter Gebäude für vier Nutzungsklassen.

Die beiden vorgestellten Typologie-Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der angegebenen Gebäudeanzahlen lediglich um ca. 3 %, wenn die Wohngebäude mit Mischnutzung nicht den Nichtwohngebäuden zugerechnet werden. Die angegebenen Flächen weichen allerdings wesentlich stärker ab (je nach Hochrechnung in BMVBS (2013) zwischen 15 und 25 %). Ein wesentlicher Unterschied bezüglich der Flächen ist, dass die in Schlomann et al. (2011) angegebenen großen Lager- und Garagegebäude (ca. 158.000 Gebäude, Gesamtnutzfläche ca. 500 Mio. m²) in BMVBS (2013) zu einem großen Teil als nicht beheizte Nichtwohngebäude betrachtet werden und damit nicht in der Typologie berücksichtigt sind. Werden die großen Lagerflächen aus Schlomann et al. (2011) von der gesamten NGF abgezogen liegt die Abweichung der Flächenangaben zwischen beiden Studien lediglich bei ca. 8 bis 15 %, was hinsichtlich der immer noch als unzureichend zu betrachtenden Datenlage und

der Tatsache der unterschiedlichen Basisjahre (Schloman et al. (2011): 2008, BMVBS (2013): Ende 2010) als vernachlässigbar angesehen wird.

4.3 Aufbau der Gebäudetypologie

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Gebäudetypologie einschließlich der Auswahl der betrachteten Modellgebäude, Wärmeschutzstandards und Versorgungstechniken beschrieben. Darüber hinaus werden die für die Heizwärmebedarfsberechnung verwendeten Tools vorgestellt.

4.3.1 Auswahl der Typgebäude

Im Projekt Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 werden 19 den gesamten Gebäudebestand repräsentierende Gebäude betrachtet, davon neun Wohn- und zehn Nichtwohngebäude. Hierzu werden die in Kapitel 4.1 beschriebenen fünf Wohngebäudetypen und jeweils 10 Baualtersklassen entsprechend aggregiert. Da der Energiebedarf eines Gebäudes entscheidend durch das Verhältnis der Gebäudehüllfläche zum beheizten Gebäudevolumen und die energetischen Eigenschaften der Hüllflächenelemente beeinflusst wird, spielen diese beiden Faktoren die entscheidende Rolle bei der Wahl und Definition der im Rahmen dieses Projekts betrachteten repräsentativen Typgebäude.

Die Wohngebäude werden nach 3 Größen und 3 Baualtersklassen unterteilt, in denen sich die energetischen Eigenschaften der Gebäude im Erbauungszustand besonders stark unterscheiden. In Tabelle 28 sind die betrachteten Gebäudetypen (in Klammern die darin enthaltenen Gebäudetypen nach Kapitel 4.1) in Baualtersklassen, die jeweilige Gebäudeanzahl und Kubatur (Bruttovolumen, Gebäudenutzfläche A_N , Gebäudehüllfläche und das A/V-Verhältnis) aufgelistet.

Die in Tabelle 28 angegebene Nutzfläche A_N wird nach Anlage 1 der Energieeinsparverordnung (EnEV)²⁷ aus dem beheizten Bruttovolumen V_e berechnet ($A_N = 0,32 * V_e$). Alternativ kann A_N für die Angabe in einem Energieverbrauchsausweis aus der Wohnfläche berechnet werden. Grundlage sind die in § 19, Absatz (2) der EnEV angegebenen Faktoren von 1,35 für Wohngebäude mit bis zu zwei Wohneinheiten und beheiztem Keller und 1,2 für alle anderen Wohngebäude. Die Gebäudenutzfläche kann (bei der Ausstellung von Energie-Verbrauchsausweisen) durch die Multiplikation der Wohnfläche im Gebäude mit den genannten Faktoren berechnet werden. In den weiteren Betrachtungen wird in Anlehnung an die verwendeten Berechnungstools A_N , berechnet aus dem Bruttovolumen, V_e verwendet. Berechnete Energieverbräuche werden jeweils auf die Gebäudenutzfläche A_N und auf die Wohnfläche nach der Datenbasis Gebäudebestand (Diefenbach et al. 2010) bezogen angegeben, d.h. ohne Teilflächen wie Balkone etc., die nach der Wohnflächenverordnung eigentlich zur Wohnung und damit zur Wohnfläche gehören.

²⁷ Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. November 2013 (BGBl. I S. 3951) geändert worden ist.

Tabelle 28: Betrachtete Wohngebäude, deren jeweilige Anzahl und zentrale geometrische Eigenschaften*)

Gebäudetyp	Baualtersklasse	Bezeichnung	Anzahl Gebäude	Wohnfläche [m ²]	Bruttovolumen [m ³]	Nutzfläche A _N [m ²]	Gebäudehüllfläche [m ²]	A/V-Verhältnis [1/m]
EZFH (EFH, RH)	Bis 1948	EZFH1	3.776.852	150,7	570,2	182,5	387,4	0,68
	1949 - 1994	EZFH2	8.463.121					
	Ab 1995	EZFH3	2.883.625					
MFH (KMH, MMH)	Bis 1948	MFH1	884.714	394,4	1.435,5	459,4	746,6	0,52
	1949 - 1994	MFH2	1.827.117					
	Ab 1995	MFH3	320.846					
GMH	Bis 1948	GMH1	36.762	1.801,6	6.531,8	2.090,2	2.467,3	0,38
	1949 - 1994	GMH2	146.741					
	Ab 1995	GMH3	27.798					

*) Basierend auf den Erläuterungen in Kapitel 4.1.

Quelle: Loga et al. (2011), Loga (2012), Diefenbach et al. (2010), Diefenbach/Loga (2011), IWU (2012a), Loga et al. (2012), Destatis (2013a)

Die energetischen Eigenschaften (U- und g-Werte) der Gebäude in deren Erbauungszustand, d.h. ohne nachträglich durchgeführte energetische Sanierungsmaßnahmen, zeigt Tabelle 29. Bei der Berechnung des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts H_{tr}' nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) sind die Temperaturkorrekturfaktoren F_{xi} nach DIN V 4108-6:2003-06, geändert durch DIN V 4108-6 Berichtigung 1 2004-03, zugrunde gelegt, wobei das Gebäudedach die Systemgrenze bildet.

Bei den Nichtwohngebäuden (NWG) hat neben der Kubatur und den energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle auch die Gebäudenutzung entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch der Gebäude. Bei der Definition von repräsentativen Nichtwohngebäudetypen wird auf die Ergebnisse vorhandener Forschungsvorhaben zurückgegriffen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Datengrundlage bei Nichtwohngebäuden wesentlich schlechter ist als bei Wohngebäuden, wodurch die Definition von Typgebäuden wesentlich erschwert wird. So sind zum Beispiel keine Studien bekannt, in denen für die verschiedenen Nichtwohngebäudetypen der Aufbau von Hüllflächenelementen und damit deren U-Werte, differenziert nach Gebäudetyp und Baualtersklasse, beschrieben sind. Allerdings spielen die Art der Nutzung und die Anzahl der Beschäftigten eine viel entscheidendere Rolle für den Energieverbrauch von Nicht-Wohngebäuden (vgl. u.a. Henning et al. 2012, Henning et al. 2013, Schломann et al. 2011). In Schломann et al. (2011) wird die Unterscheidung von sechs Nichtwohngebäudetypen und drei Baualtersklassen vorgeschlagen (vgl. auch Tabelle 26), was allerdings für das vorliegende Projekt eine zu feine Gliederung darstellt. Eine Unterscheidung von drei Nichtwohngebäudetypen (kleine NWG, mittlere NWG, große NWG) und eine Unterscheidung nach Nutzung wird in Esch et al. (2011) vorgeschlagen.

Tabelle 29: U- und g-Werte der Gebäude-Hüllfläche bei den betrachteten Typgebäuden in deren Erbauungszustand^{*)}

Bezeichnung	U-Wert Außenwand U_{AW_unsan}	U-Wert Dach U_{DA_unsan}	U-Wert Fußboden/ Kellerdecke U_{FB_unsan}	U-Wert Fenster U_{W_unsan}	g-Wert Fenster g_{W_unsan}	U-Wert Türen U_{door_unsan}	Spezifischer Transmissionswärmeverlust H_T' H_{T_unsan}
	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)
EZFH1	1,77	1,57	1,47	3,39	0,75	3,00	1,77
EZFH2	1,13	0,81	1,24	3,50	0,75	3,00	1,27
EZFH3	0,45	0,37	0,52	2,52	0,67	2,49	0,61
MFH1	1,92	1,78	1,10	3,28	0,75	3,00	1,86
MFH2	1,15	1,00	1,68	3,32	0,75	3,25	1,43
MFH3	0,53	0,39	0,57	2,83	0,69	3,32	0,73
GMH1	1,59	0,96	1,15	3,50	0,75	3,00	1,68
GMH2	1,15	0,77	1,34	3,29	0,75	3,45	1,40
GMH3	0,51	0,37	0,53	2,57	0,68	3,24	0,76

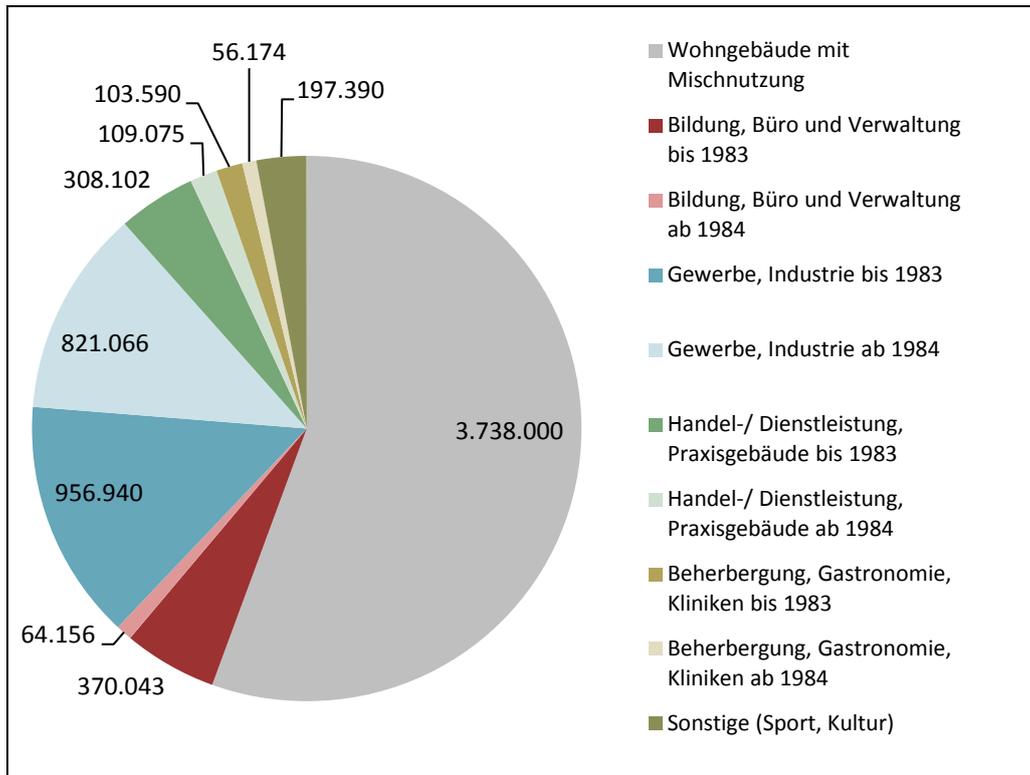
^{*)} Ohne Berücksichtigung nachträglicher energetischer Sanierungsmaßnahmen.

Quelle: Loga et al. (2011), Loga (2012), Diefenbach et al. (2010), Diefenbach/Loga (2011), IWU (2012a), Loga et al. (2012), Destatis (2013a)

Für die weiteren Betrachtungen, vor allem bezüglich des Energiebedarfs und -verbrauchs in Nichtwohngebäuden im Rahmen dieses Projekts werden die Erkenntnisse aus Schlomann et al. (2011) und BMVBS (2013) kombiniert und die Anzahl der Gebäudetypen reduziert. Basis für die Definition der aggregierten Gebäudetypen ist dabei die in BMVBS (2013) beschriebene Typologie (s. auch Tabelle 27). Da nach Schlomann et al. (2011) die Wohngebäude mengen- und flächenmäßig nicht zu vernachlässigen sind, werden diese in der NWG-Typologie nach BMVBS (2013) als eigener Gebäudetyp ergänzt, obwohl sie in BMVBS (2013) aufgrund der hauptsächlichen Nutzung als Wohngebäude nicht berücksichtigt sind. Die restlichen Nutzungsklassen erster und zweiter Ordnung werden auf Basis ähnlicher Bauarten und Nutzungsweisen zusammengefasst, so dass statt 23 Nutzungsklassen zweiter Ordnung und den Wohngebäuden mit Mischnutzung nur noch sechs Nutzungstypen unterschieden werden, wovon vier in jeweils zwei Baualtersklassen (bis 1983, ab 1984) unterteilt sind. Die sich ergebende Typologie zeigen Abbildung 9 und Abbildung 10. Die zugrunde liegenden Gebäudezahlen und Flächen sind BMVBS (2013) entnommen (außer für den Typ „Wohngebäude mit Mischnutzung“; diese Daten sind Schlomann et al. (2011) entnommen).

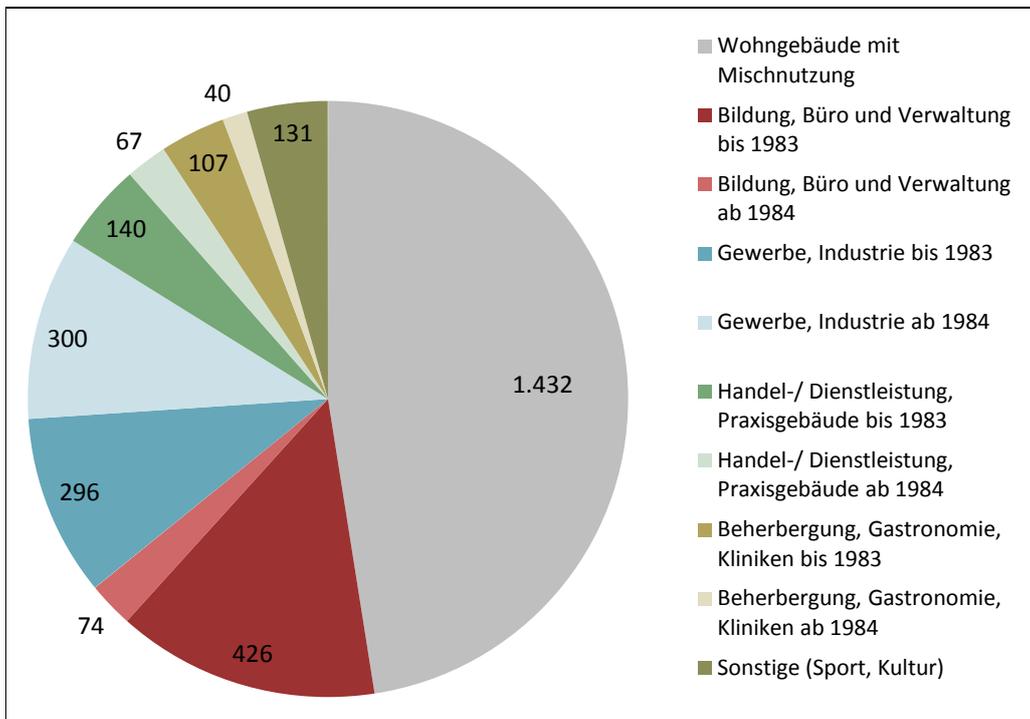
Der Gebäudetyp „Bildung, Büro und Verwaltung“ enthält die Nutzungsklassen (s. Tabelle 27) 1.1 – 1.3, sowie 2.1 – 2.3, der Typ „Gewerbe, Industrie“ die Klassen 3.1 – 3.4, „Handel-/ Dienstleistung, Praxisgebäude“ die Klassen 4.2 und 5.1 – 5.3, „Beherbergung, Gastronomie, Kliniken“ die Klassen 4.1 und 8.1 – 8.2, sowie der Typ „Sonstige“ die Klassen 6.1 – 6.3 und 7.1 – 7.3.

Abbildung 9: Anzahl der Wohngebäude mit Mischnutzung und der Nichtwohngebäude in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Schloman et al. (2011) und BMVBS (2013)

Abbildung 10: Flächenverteilung der Wohngebäude mit Mischnutzung und Nichtwohngebäude in Deutschland (Mio. m²)



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Schloman et al. (2011) und BMVBS (2013)

Für die energetische Bewertung ist die Zonierung bei Nichtwohngebäuden wesentlich wichtiger als bei Wohngebäuden. Die in Schlomann et al. (2011) betrachteten sechs Gebäudekategorien (s. oben) geben einen Eindruck über die Nutzungsrelevanz der Kategorien „Bürogebäude“, „Laden-/ Verkaufsbauwerke“, „Werkstattgebäude“, „Lager-/ Garagenbauwerke“ und „Sonstige“ in den unterschiedlichen Branchen. Nach Schlomann et al. (2011) spielen Lager- und Speditionsbauwerke im Nichtwohngebäudesektor eine große Rolle. Diese Gebäudekategorie ist in der beschriebenen aggregierten Nichtwohngebäudetypologie Teil des Typs „Gewerbe, Industrie“, weshalb bei diesem Typ statt der Zone „Lager, Technik, Archiv“ (vgl. DIN V 18599-10:2011-12) wie bei den übrigen Gebäudetypen die Zone 41 „Lagerhallen, Logistikhallen“ nach DIN V 18599-10:2011-12 zugrunde gelegt wird. Die Aggregierten Gebäudetypen haben jeweils sechs Zonen, deren Größe sich aus dem prozentualen Anteil der Kategorien „Bürogebäude“, „Laden-/ Verkaufsbauwerke“, „Werkstattgebäude“, und „Lager-/ Garagenbauwerke“ an der gesamten NGF der aggregierten Gebäudetypen ergibt. Wohngebäude mit Mischnutzung haben zusätzlich eine Zone „Wohnen MFH²⁸“ und der Bereich „Sonstige“ wird je nach Gebäudetyp in die Zonen „Verkehrsfläche“ und „WC/ Sanitär“ unterteilt. Hierfür werden die Flächenanteile dieser Zonen entsprechend verschiedener Studien zu den Flächenanteilen in Nichtwohngebäuden bestimmt. Für Hotels werden Erkenntnisse aus eigenen Projekten, sowie aus der Studie „Weitergehende Vereinfachungen für die Zonierung von Nichtwohngebäuden bei der Erstellung von Energieausweisen sowie im öffentlich-rechtlichen Nachweis nach EnEV“ (BMVBS, 2010) herangezogen, welche auch die Grundlage für die Zonierung in Krankenhäusern ist. Die Zonen, sowie deren Anteil an der NGF der jeweiligen Typgebäude zeigt Tabelle 30.

Tabelle 30: Zonen und Anteil der Zonen an der gesamten NGF der aggregierten Gebäudetypen

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
Wohngebäude mit Mischnutzung	Wohnung MFH 72,0%	Büro/ Verwaltung 14,0%	Werkstatt 3,0%	Einzelhandel 6,0%	Beherbergung 4,0%	Sanitär 1,0%
Bildung, Büro und Verwaltung	Büro 45,8%	Einzelhandel 9,0%	Werkstatt 18,4%	Lager 2,9%	Verkehrsflächen 21,0%	Sanitär 2,9%
Gewerbe, Industrie	Büro 1,1%	Einzelhandel 6,4%	Werkstatt 15,2%	Logistikhalle 69,7%	Verkehrsflächen 3,6%	Sanitär 4,6%
Handel-/ Dienstleistung, Praxisgebäude	Büro 5,8%	Einzelhandel 38,4%	Werkstatt 10,6%	Lager 29,9%	Verkehrsflächen 13,3%	Sanitär 2,0%
Beherbergung, Gastronomie, Kliniken	Bettzimmer 44,0%	Verkehrsflächen 25,0%	Lager/ Technik 10,0%	Büro 13,0%	Sanitär 4,0%	Verpflegung 4,0%
Sonstige (Sport, Kultur)	Halle 41,0%	Einzelhandel 8,0%	Werkstatt 4,0%	Lager 4,0%	Verkehrsflächen 31,0%	Sanitär 12,0%

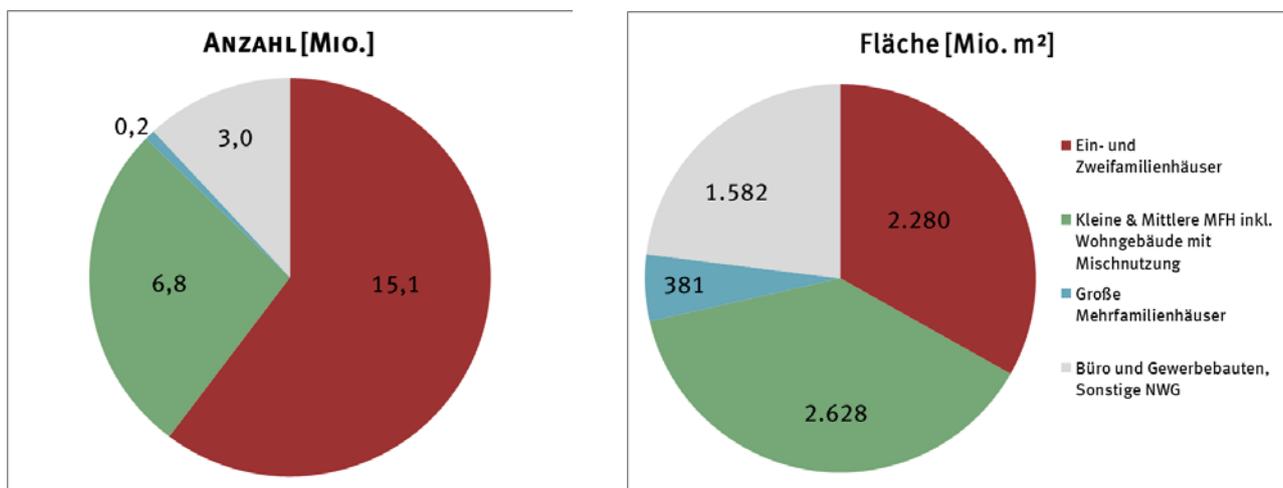
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Schlomann et al. (2011), BMVBS (2010)

²⁸ MFH: Mehrfamilienhaus

Die dargestellten Nichtwohngebäude-Typologien basieren auf Hochrechnungen und sind noch nicht durch statistische Erhebungen validiert. Damit ist auch die dargestellte aggregierte Typologie mit Unsicherheiten hinsichtlich der Anzahl und der Nettogeschossflächen der beheizten Nichtwohngebäude behaftet. Die dargestellten Typologien spiegeln dennoch den derzeitigen Stand des Wissens wider und die aggregierten Gebäudetypen werden bis zum Vorliegen neuerer und statistisch belegter Zahlen für die im Folgenden beschriebenen Betrachtungen des Energieverbrauchs in Nichtwohngebäuden verwendet.

Bezogen auf den gesamten Gebäudebestand in Deutschland spielen die Nichtwohngebäude und Wohngebäude mit Mischnutzung eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Werden die Wohngebäude mit Mischnutzung den kleinen und mittleren Mehrfamilienhäusern zugeschrieben, ergeben sich die in Abbildung 11 dargestellten Mengen- und Flächenverhältnisse im deutschen Gebäudebestand.²⁹

Abbildung 11: Gebäudeanzahl und -flächen in Deutschland^{*)}



^{*)} Wohngebäude mit Mischnutzung sind in den Angaben zu kleinen und mittleren Wohngebäuden enthalten.

Quelle: Eigene Darstellung nach Schloman et al. (2011), BMVBS (2013), BMVBS (2011), Loga et al. (2011), Loga et al. (2012), Loga (2012), Henning/Palzer (2012), Jagnow (2013)

4.3.2 Auswahl der Wärmeschutzstandards

Für die Betrachtung des zukünftig zu erwartenden Wärmebedarfs des Gebäudebestands werden drei Wärmeschutzstandards betrachtet:

1. unsanierte Gebäude
2. Sanierung nach den Standards der EnEV 2009 für Neubauten, allerdings verschärft um 25 % (EnEV -25 %) (vollsaniiert)
3. Sanierung entsprechend den Anforderungen an ein Passivhaus in Anlehnung an Feist (2013), allerdings mit im Vergleich zu Feist (2013) etwas ambitionierteren energetischen Eigenschaften (vollsaniiert plus)

²⁹ In der Regel werden diese Gebäude in den Statistiken den Nichtwohngebäuden zugeschrieben, da aber nach Schloman et al. (2011) die Wohnfläche einen Anteil von ca. 70 % an der Nettogrundfläche in Wohngebäuden mit Mischnutzung hat, werden sie an dieser Stelle den kleinen und mittleren Wohngebäuden zugeordnet; vgl. auch Tabelle 30.

Die energetischen Standards von Neubauten werden dabei analog zu den Sanierungsstandards betrachtet. Die Beschränkung auf nur drei Gebäudestandards ist mit der Begrenzung der zu betrachtenden Varianten begründet. Selbst bei der Beschränkung auf drei Wärmeschutzstandards ergeben sich mit den in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Versorgungstechniken alleine bei den Wohngebäuden über 300 zu betrachtende Varianten (bei fünf Wärmeschutzstandards über 500 Varianten). Für jede einzelne Variante muss eine Berechnung der Kennwerte nach der EnEV vorgenommen werden. Der zusätzliche Erkenntnisgewinn durch eine zu starke Ausdifferenzierung der Sanierungsstandards wird als gering eingeschätzt.

Dem Dämmstandard EnEV-25 % („vollsaniert“) ist die Annahme zugrunde gelegt, dass die Anforderungen der EnEV an Sanierungen mittelfristig in einem ähnlichen Umfang verschärft werden, wie dies nach der EnEV 2013 ab dem Jahr 2016 für Neubauten gilt. Die U-Werte nach Bauteilen sowie der resultierende spezifische Transmissionswärmeverlust bei einer Sanierung nach EnEV-25% und entsprechend den Kriterien in Anlehnung an Feist (2013) sind in Tabelle 31 aufgelistet.

Tabelle 31: U- und g-Werte der Hüllflächenelemente bei einer Sanierung nach den Anforderungen der EnEV 2009-25% und in Anlehnung an die Kriterien des Passivhausinstituts (Feist 2013)

Sanierungsstandard		vollsaniert (EnEV _{2009-25%})	vollsaniert plus (Passivhausstandard)
U-Wert Außenwand U_{AW}	W/(m ² *K)	0,29	0,10
U-Wert Dach U_{DA}	W/(m ² *K)	0,21	0,10
U-Wert Fußboden/ Kellerdecke U_{FB}	W/(m ² *K)	0,37	0,20
U-Wert Fenster U_W	W/(m ² *K)	1,37	0,70
g-Wert Fenster g_W		0,63	0,45
U-Wert Türen U_{door}	W/(m ² *K)	1,89	1,35
Spez. Transmissionswärmeverlust $H_T \cdot A_N$ < 350 m ²	W/(m ² *K)	0,42	-
Spez. Transmissionswärmeverlust $H_T \cdot A_N$ > 350 m ²	W/(m ² *K)	0,53	-

Quelle: Eigene Darstellung

4.3.3 Auswahl der Versorgungstechniken

Für die zukünftige Wärmebereitstellung in Wohngebäuden werden fünf Basis-Versorgungsvarianten betrachtet. Dies sind

1. Gas-Brennwertkessel (BWK)
2. Holz-/ Biomasse-BWK
3. elektrische Wärmepumpen (WP)
4. erdgasbetriebene Kraft-Wärmekopplungsanlagen (BHKW)
5. Fernwärme

Alle Versorgungsoptionen werden in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit und ohne Wärmerückgewinnung (WRG) sowie als Variante mit und ohne Solarthermie (ST) -Nutzung betrachtet. Die solarthermischen Anlagen werden als reine Brauchwasseranlagen ausgelegt. Gebäude, die mit einem BHKW versorgt werden, werden ausschließlich ohne eine zusätzliche Solarthermieanlage betrachtet. Bei Gebäuden, die auf den Standard „vollsaniert plus“ saniert werden, wird immer eine Wärmerückgewinnung angesetzt.

In Nichtwohngebäuden werden vier Techniken zur Wärmebereitstellung betrachtet:

1. Gas-Brennwertkessel

2. elektrische, reversible Wärmepumpe
3. fossile Kraft-Wärmekopplungsanlage (KWK-Anlagen)
4. Fernwärme

Alle betrachteten Technikvarianten in Nichtwohngebäuden werden mit und ohne eine Photovoltaikanlage zur Eigenstromerzeugung betrachtet. Da gemäß der DIN V 18599 in der aktuell gültigen Fassung bei Nichtwohngebäuden neben der Wärmebereitstellung auch die Bereitstellung von Kälte, die Lüftung sowie die Beleuchtung bilanziert werden müssen, werden für die Energieanwendungsbereiche ebenfalls Setzungen vorgenommen (s. Tabelle 34). Die Technikkombinationen für die Wärme-, Kälte- und on-site Stromerzeugung sind entsprechend Tabelle 35 bezeichnet. Die Bezeichnungen werden entsprechend bei der Darstellung der Ergebnisse verwendet.

Da die Effizienz von Wärmepumpen stark vom Temperaturhub zwischen Wärmequelle und –senke sowie der Wärmenutzung im Gebäude abhängig ist, wurden für die Wärmepumpen unterschiedliche Jahresarbeitszahlen für die Sanierungsgrade und Gebäudetypen angenommen. Die Jahresarbeitszahlen sind in Tabelle 32 aufgelistet.

Tabelle 32: Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Sanierungsgrad

	EZFH	MFH	NWG
	Luft/Wasser	Erdreich/Wasser	Erdreich/Wasser
unsaniert	2,2	2,75	2,75
vollsanert, vollsanert plus	2,7	4,0	4,0

Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswahl der betrachteten Versorgungstechniken erfolgte auf Basis intensiver Diskussionen und der Analyse diverser interner und externer Studien (vgl. u.a. Nitsch et al. 2012, Henning et al. 2012, Henning et al. 2013, Henning/Palzer 2012). Die Techniken für Wohngebäude sind in Tabelle 33 und für Nichtwohngebäude in Tabelle 34 zusammengefasst. Es wird erwartet, dass diese Techniken auch in Zukunft eine wesentliche Rolle bei der Bereitstellung von Wärme zur Gebäudebeheizung und Trinkwarmwasserbereitstellung spielen werden.

Tabelle 33: Vorauswahl an Heiztechniken für Wohngebäude

Typ	Baualtersklasse	unsaniert	vollsanert	vollsanert plus
EZFH	Bis 1948	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW	Holzkessel Wärmepumpe
	1949 - 1994	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW	Holzkessel Wärmepumpe
	Ab 1995	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW	Holzkessel Wärmepumpe

MFH	Bis 1948	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme
	1949 - 1994	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme
	Ab 1995	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Holzkessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme
GMH	Bis 1948	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme
	1949 - 1994	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme
	Ab 1995	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme	Gaskessel Wärmepumpe BHKW Fernwärme

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 34: Vorauswahl Heizungstechniken und weiterer technischer Parameter für NWG

	unsaniert	vollsaniiert	vollsaniiert plus
Heizung und Klimatisierung	Gaskessel und Absorptionskältemaschine Elektrische Wärmepumpe reversibel BHKW und Absorptionskältemaschine Fernwärme und Absorptionskältemaschine	Gaskessel und Absorptionskältemaschine Elektrische Wärmepumpe reversibel BHKW und Absorptionskältemaschine Fernwärme und Absorptionskältemaschine	Gaskessel und Absorptionskältemaschine Elektrische Wärmepumpe reversibel BHKW und Absorptionskältemaschine Fernwärme und Absorptionskältemaschine
Beleuchtung	Halogenlampen	Kompakte Leuchtstofflampe mit externem elektronischem Vorschaltgerät	Kompakte Leuchtstofflampe mit integriertem elektronischem Vorschaltgerät
Lüftung	Fensterlüftung	Raumluftechnische Anlage (RLT)	RLT
Wärmerückgewinnungsgrad	0 %	60 %	75 %

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 35: Bezeichnung/ Nummerierung der Technikkombinationen für die Wärme-, Kälte und on-site Stromerzeugung in Nichtwohngebäuden

Bezeichnung	Techniken
TPK01	Brennwertkessel, Absorptionskältemaschine

TPK02	Reversible Sole-Wasser-Wärmepumpe
TPK03	Blockheizkraftwerk, Absorptionskältemaschine
TPK04	Fernwärme, Absorptionskältemaschine
TPK05	Brennwertkessel, Absorptionskältemaschine, Photovoltaik
TPK06	Reversible Sole-Wasser-Wärmepumpe, Photovoltaik
TPK07	Blockheizkraftwerk, Absorptionskältemaschine, Photovoltaik
TPK08	Fernwärme, Absorptionskältemaschine, Photovoltaik

Quelle: Eigene Darstellung

4.3.4 Beschreibung der verwendeten Rechentools

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt für die Wohngebäude in Anlehnung an die EnEV auf Basis der DIN V 4108-6:2003-06, geändert durch DIN V 4108-6 Berichtigung 1 2004-03 und für Nichtwohngebäude auf Basis der DIN V 18599. Bei der Kennwertberechnung wird dabei auf etablierte Rechentools zurückgegriffen. Dies sind für Wohngebäude das Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP Version 8.1) des Passivhaus Instituts³⁰ und für Nichtwohngebäude das Programm EnerCalc³¹ (Version 4.43.101), ein im Rahmen von EnOB – Forschung für Energieoptimiertes Bauen des BMWi entwickeltes Tool zur vereinfachten energetischen Bilanzierung von Nichtwohngebäuden. Beide Tools sind sowohl in der Forschung als auch in der Energieberatung und Projektierung weit verbreitet und etabliert.

Das PHPP ist in erster Linie für die Projektierung von Passivhäusern entwickelt worden, eignet sich aber auch für die energetische Bewertung von Gebäuden mit niedrigerem energetischem Standard. Es handelt sich bei PHPP um ein Excel®-basiertes Tool. Das Tool ermöglicht intern einen vereinfachten EnEV-Nachweis und damit eine energetische Bilanzierung nach EnEV 2009, womit nach Ansicht der Projektpartner die Anforderung der Bilanzierung von Wohngebäuden auf Basis der DIN V 4108-6 erfüllt ist. Unter der Annahme, dass durch politische Vorgaben der Passivhausstandard in naher Zukunft zum Standard bei Neubauten festgelegt wird, erscheint die Nutzung eines etablierten und validierten Tools, mit dem Passivhäuser zuverlässig energetisch bilanziert werden können, als sinnvoll und zielführend.

EnerCalc ist wie das PHPP ein Excel®-basiertes Werkzeug zur vereinfachten energetischen Charakterisierung von Gebäuden und eignet sich insbesondere in frühen Planungsphasen von Nichtwohngebäuden. Das Tool ermöglicht die Definition von bis zu 11 Zonen. Mit dem Tool wird der Nutzenergiebedarf eines Gebäudes berechnet und es ermöglicht eine vereinfachte Primärenergiebilanz.

4.4 Ergebnisse der Berechnung

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der energetischen Berechnungen für Wohn- und Nichtwohngebäude exemplarisch beschrieben. Alle Ergebnisse sind in tabellarischer Form im Anhang zu finden.

4.4.1 Wohngebäude

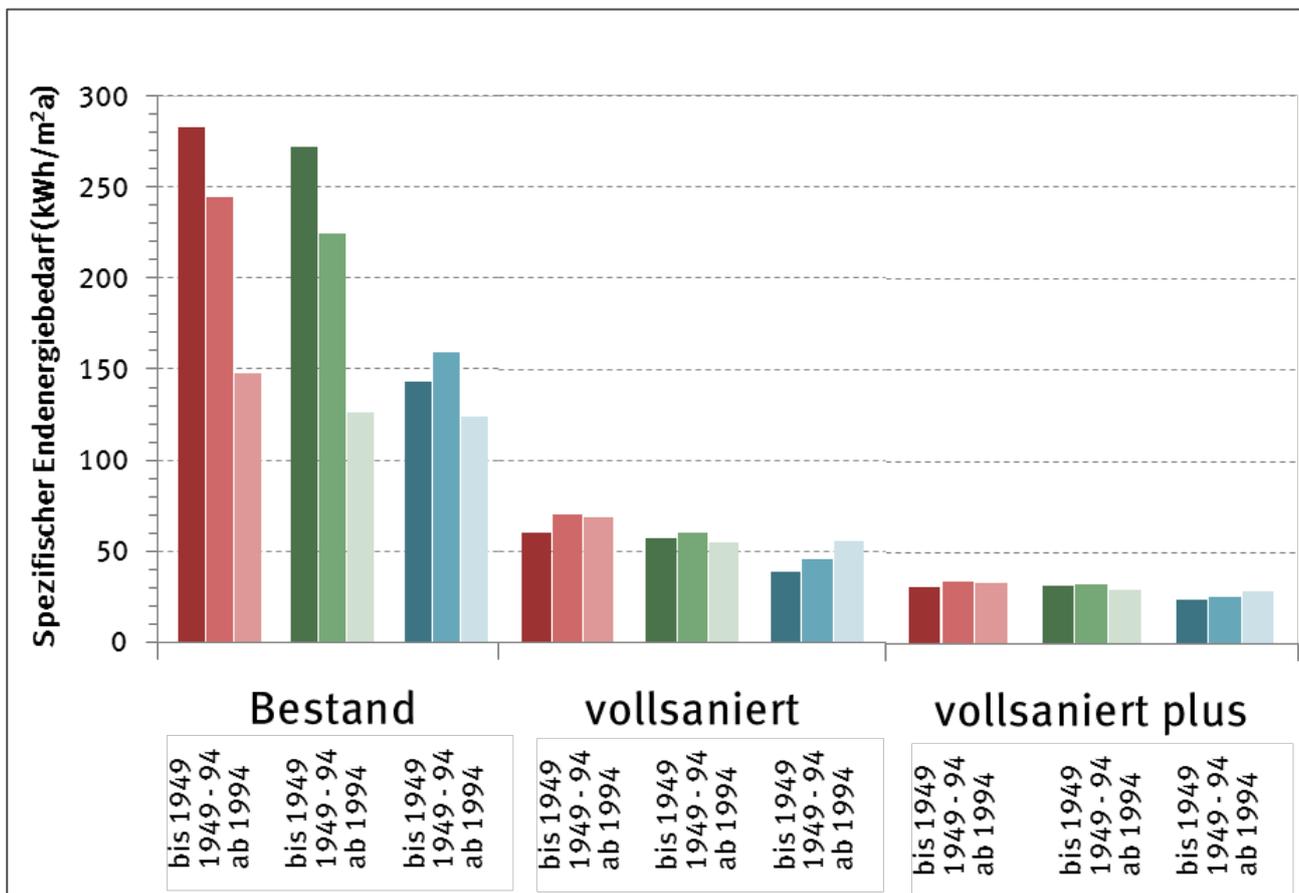
Mit der entwickelten Gebäudetypologie und der in Tabelle 33 dargestellten Matrix an Versorgungstechniken wurden mit den im voranstehenden Abschnitt genannten Werkzeugen auf Grundlage der

³⁰ http://www.passiv.de/de/04_phpp/04_phpp.htm

³¹ <http://www.enob.info/de/software-und-tools/projekt/details/enercalc-vereinfachte-energiebilanzen-nach-din-v-18599/>

DIN 4108, bzw. 4701-10 der End- und Primärenergiebedarf für Heizen und Trinkwassererwärmung (inkl. Hilfsenergie) berechnet. Die folgenden Grafiken zeigen beispielhaft Ergebnisse.

Abbildung 12: Endenergiebedarf Heizwärme und TWW mit Brennwertkessel als Versorgungstechnik; bei den Wärmeschutzstandards „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“ jeweils mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, ohne solarthermische Unterstützung

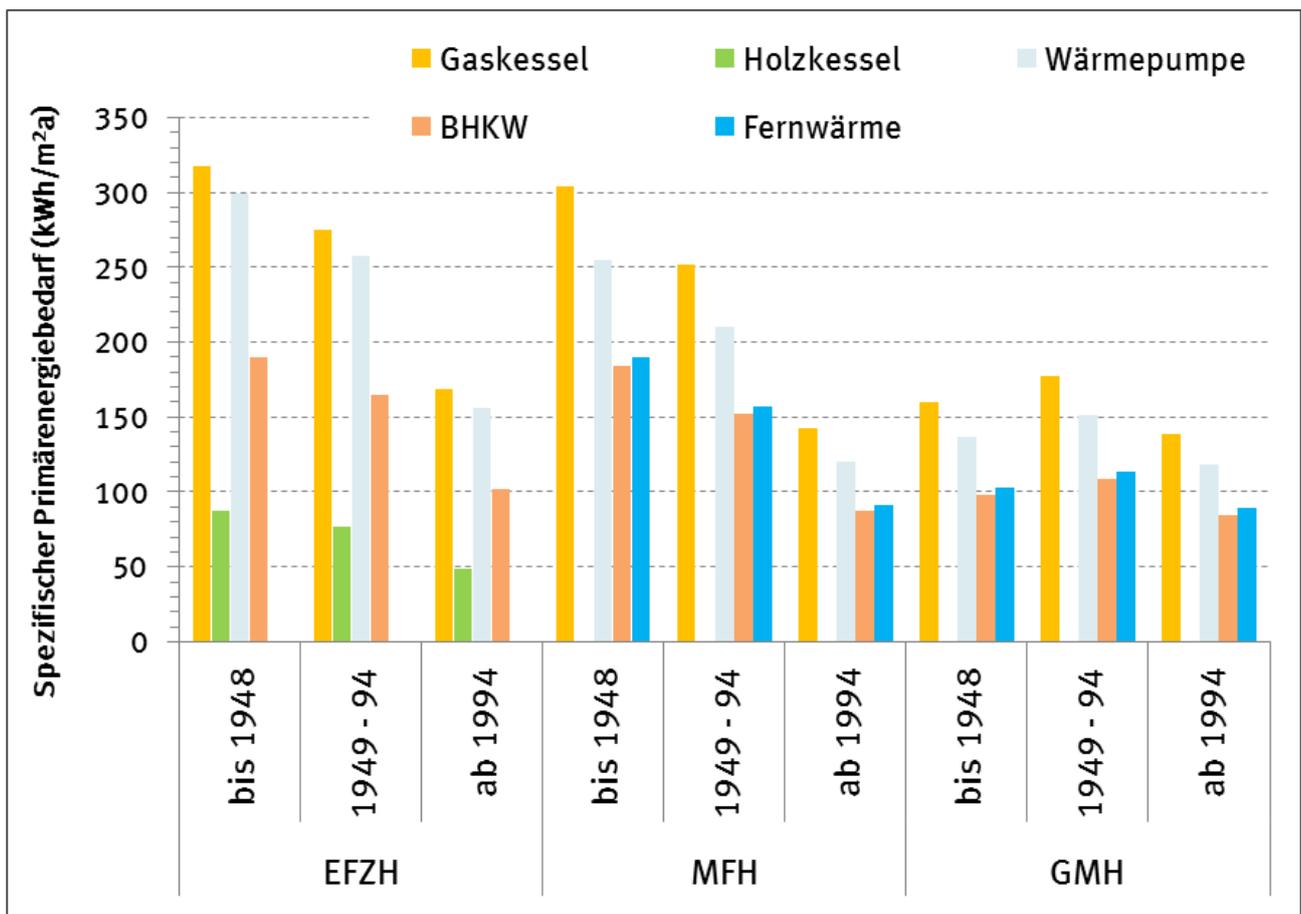


Quelle: Eigene Berechnungen des Fraunhofer ISE

Mit Steigerung der Qualität der Gebäudehülle nimmt erwartungsgemäß der spezifische Endenergiebedarf stark ab, im Sanierungsstand „vollsaniert plus“ dominiert beim Leistungsbedarf (maximale Heizlast gegenüber Leistung der Trinkwassererwärmung) und im Endenergiebedarf häufig die Trinkwassererwärmung.

Abbildung 13 zeigt beispielhaft den spezifischen Primärenergiebedarf eines Wärmeschutzstandards – hier „unsaniert“ – mit verschiedenen Versorgungstechniken. Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, werden nicht alle Kombinationen von Gebäuden und Anlagentechnik berechnet. So gibt es die Biomasse-versorgten Kessel nur in Einfamilienhäusern, wohingegen Fernwärme nur in Mehrfamiliengebäuden zum Einsatz kommt. Die primärenergetische Bewertung des Endenergiebedarfs erfolgt gemäß DIN 4701-10, mit Ausnahme von BHKWs. Bei diesen wird eine exergetische Bewertungsmethode angewandt.

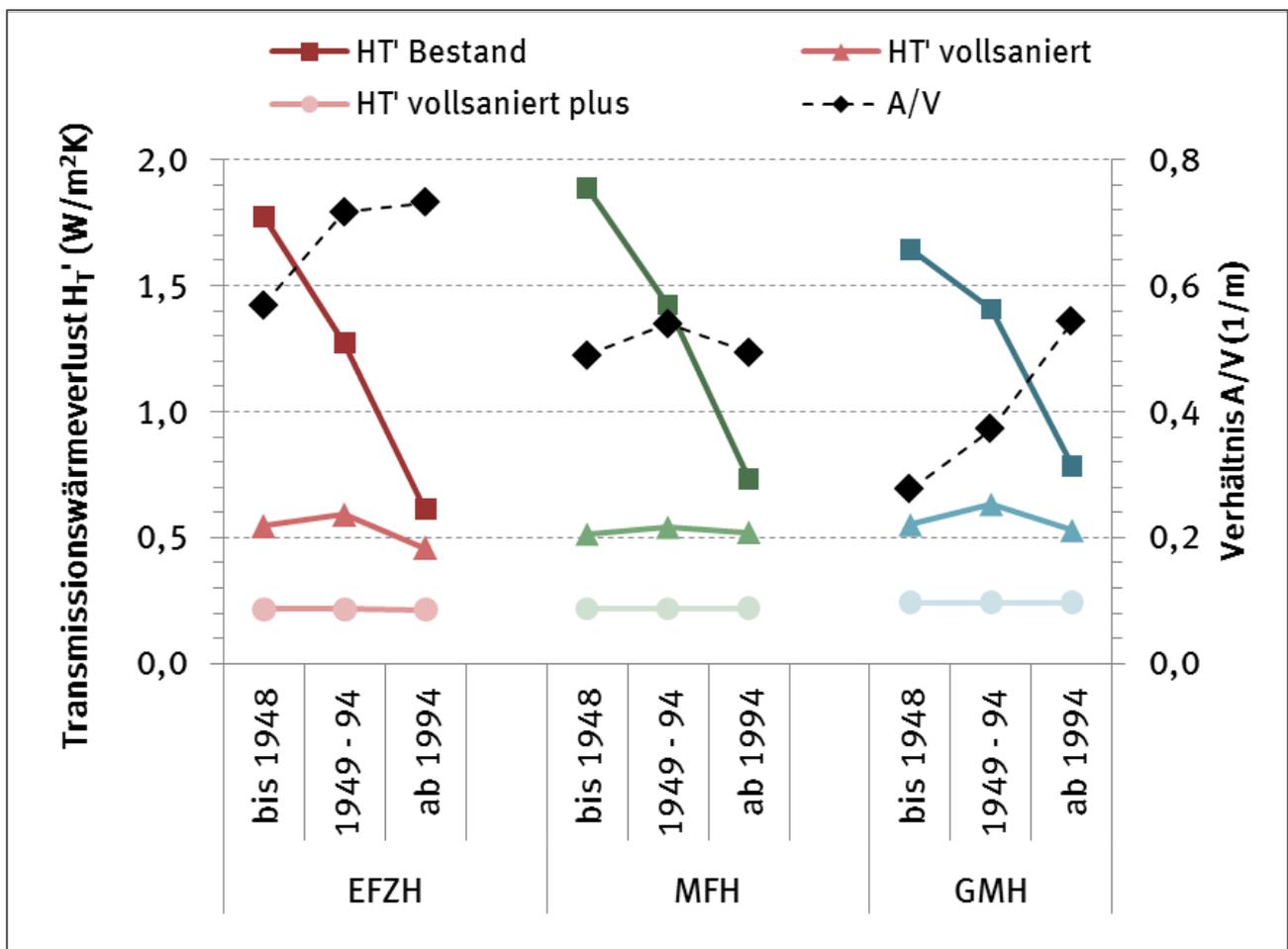
Abbildung 13: Exemplarische Darstellung des spezifischen Primärenergiebedarfs verschiedener Versorgungstechniken für die Sanierungsstufe „unsaniert“, jeweils ohne solarthermische Unterstützung



Quelle: Eigene Berechnungen des Fraunhofer ISE

Bei den beiden Wärmeschutzstandards „vollsanert“ und „vollsanert plus“ schwanken die Ergebnisse aufgrund ähnlicher Randbedingungen verhältnismäßig wenig. Hier tritt sogar das Phänomen auf, dass Gebäude neuerer Baualterklasse einen höheren rechnerischen Wärmebedarf aufweisen, als ältere Gebäude der gleichen Klasse. Der zugrunde liegende Effekt ist in Abbildung 14 verdeutlicht: bei den unsanierten Gebäuden sinkt der Transmissionswärmeverlust H_{tr} bei neueren Gebäudeklassen stark, bei den beiden Sanierungsstandards sind diese Unterschiede wenig bis kaum ausgeprägt. Im Gegenzug sind neuere Gebäude basierend auf der ermittelten Gebäudetypologie weniger kompakt – das A/V Verhältnis steigt, am deutlichsten bei großen Mehrfamilienhäusern. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass den Wärmeverlusten über die Hüllfläche weniger Bezugsfläche gegenübersteht: der spezifische Heizwärmebedarf steigt.

Abbildung 14: Entwicklung des Transmissionswärmeverlusts H_T' (linke Achse) und Kompaktheit der Gebäudeklassen (rechte Achse) in Abhängigkeit von Baualter und Wärmechutzstandard



Quelle: Eigene Berechnungen des Fraunhofer ISE

4.4.2 Nichtwohngebäude

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse je Bewertungskenngröße exemplarisch für den Nicht-Wohngebäudetyp *Bildung, Büro und Verwaltung bis 1983 (NWG2)* dargestellt und beschrieben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 36 zusammengefasst. Alle weiteren Ergebnistabellen sind im Anhang zu finden.

Die Ergebnistabellen sind in sieben einzelne Ergebnismatrizen für Nutz-, End-, und Primärenergiebedarf unterteilt:

1. Nutzenergiebedarf
2. Endenergiebedarf/ -produktion: Brennstoff/ Fernwärme
3. Endenergiebedarf/ -produktion: Strom; unterteilt in Strombedarf gesamt und Strombedarf für die Beheizung
4. Endenergiebedarf/ -produktion: Stromerzeugung (on-site)
5. Primärenergiebedarf/ -produktion: Brennstoff/ Fernwärme
6. Primärenergiebedarf/ -produktion: Strom (gesamt)
7. Primärenergiebedarf/ -produktion: Stromerzeugung (on-site).

Jede Ergebnis-Matrix (außer *Nutzenergiebedarf*) besteht dabei aus 3 Zeilen und 8 Spalten (beispielhaft s. Tabelle 36). Die Zeilen stehen für die drei Wärmeschutzstandards „unsaniert“, „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“, während in jeder Spalte eine Technikkombination (TPK1 – 8, s. Tabelle 35) beschrieben ist. Im Spaltennamen ist über die Nummerierung die Zusammensetzung (Wärme-/Kälteerzeuger, Energieträger, Solarthermie) zu entnehmen. Die Zahlen in der Matrix geben für die jeweilige Kombination aus Zeile (Sanierungsgrad) und Spalte (Technikkombination) das berechnete Ergebnis an. Im Folgenden sind die Ergebnisse für den Gebäudetyp NWG2 kurz erläutert:

Nutzenergiebedarf: Der Nutzenergiebedarf für Heizwärme sinkt bei einer Sanierung von „unsaniert“ auf „vollsaniert“ um ca. 75 % und von unsaniert auf vollsaniert plus um ca. 90 %. Gleichzeitig steigt der Kühlenergiebedarf um 60 %, respektive 175 %. Die Steigerung des Nutzenergiebedarfs für Beleuchtung vom Sanierungsgrad „vollsaniert“ auf „vollsaniert plus“ ist auf einen leicht höheren Strombedarf für interne, verglichen mit externen, elektronischen Vorschaltgeräten im verwendeten Tool zurückzuführen. Die Reduktion des Nutzenergiebedarfs für Lüftung von „vollsaniert“ auf „vollsaniert plus“ basiert auf dem Einsatz effizienterer Lüftungstechnik in Gebäuden mit dem Sanierungsgrad „vollsaniert plus“.

Endenergiebedarf/ -produktion:

- Brennstoff/ Fernwärme: TPK02 und TPK06 haben keinen Brennstoff-/ Fernwärmebedarf, da die Wärmebereitstellung durch eine Wärmepumpe erfolgt. Den höchsten Brennstoffbedarf haben die Varianten TPK03 und TPK07 (BHKW); es handelt sich dabei um den Brennstoffbedarf für die Wärme-/ Kältebereitstellung und die Stromerzeugung.
- Strom: BHKWs haben einen leicht niedrigeren Strombedarf (Endenergie) als die anderen Technikkombinationen. Der größte Bedarf besteht bei den Wärmepumpen, wobei der Großteil des Strombedarfs für die Wärme- und Kältebereitstellung anfällt.
- Stromerzeugung (on-site): Die höchste on-site Stromerzeugung weisen die Varianten mit einem BHKW auf. Die Stromerzeugung aus Photovoltaik ist bei allen Kombinationen mit einer PV-Anlage gleich, da die Anlagengröße unabhängig von der Wärme-/ Kältebereitstellungstechnik ist.

Primärenergiebedarf/ -produktion:

- Brennstoff/ Fernwärme: Den höchsten Primärenergiebedarf weisen die BHKWs auf (kompletter Primärenergiebedarf ohne Unterscheidung Strom-/ Wärmebereitstellung). Mit Fernwärme versorgte Gebäude haben einen leicht höheren Primärenergiebedarf als Gebäude, die über einen Gas-Brennwertkessel versorgt werden; die Ursache dafür liegt u.a. in den in EnerCalc angesetzten Primärenergiefaktoren.
- Strom: Den höchsten Primärenergiebedarf für Strom weisen die mit Wärmepumpen versorgten Gebäude auf (ca. viermal so hoch wie die Gebäude mit einer anderen Heizungstechnik).
- Stromerzeugung (on-site): Die höchste Stromerzeugung (primärenergetisch bewertet) erfolgt in den Gebäuden mit einem BHKW, wobei die Erzeugung mit zunehmender Sanierung abnimmt (niedrigerer Wärmebedarf bedingt kleineres BHKW bedingt weniger Volllaststunden).

Durch die hohe Stromproduktion der BHKWs haben diese Gebäude im unsanierten Zustand den niedrigsten Gesamtprimärenergiebedarf, gefolgt von den mit Wärmepumpen versorgten Gebäuden, dem Brennwertkessel und der Fernwärme. Im Sanierungszustand „vollsaniert plus“ schneiden die mit Wärmepumpen versorgten Gebäude knapp besser ab als die Gebäude, die über ein BHKW versorgt werden.

Tabelle 36: Bildung, Büro und Verwaltung bis 1983 (NWG2)

Nutzenenergiebedarf [kWh/m ² a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		261,97		68,46		23,43		
TWW		9,64		9,64		9,64		
Kühlung		8,10		12,77		22,41		
Beleuchtung		25,83		25,07		33,69		
Belüftung		0,00		12,75		9,66		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	285,4	0,0	413,6	286,6	285,4	0,0	413,6	286,6
vollsaniiert	101,3	0,0	170,7	101,8	101,3	0,0	170,7	101,8
vollsaniiert plus	74,3	0,0	118,4	74,7	74,3	0,0	118,4	74,7
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	30,0	121,9	29,8	30,0	30,0	121,9	29,8	30,0
vollsaniiert	41,6	71,1	41,4	41,6	41,6	71,1	41,4	41,6
vollsaniiert plus	47,4	64,5	47,1	47,4	47,4	64,5	47,1	47,4
davon Strom für Heizung								
unsaniert		87,8				87,8		
vollsaniiert		24,2				24,2		
vollsaniiert plus		9,4				9,4		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	93,1	0,0	13,7	13,7	106,8	13,7
vollsaniiert	0,0	0,0	50,4	0,0	13,7	13,7	64,1	13,7
vollsaniiert plus	0,0	0,0	32,0	0,0	13,7	13,7	45,7	13,7
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	319,6	0,0	463,2	326,8	319,6	0,0	463,2	326,8
vollsaniiert	113,5	0,0	191,2	116,1	113,5	0,0	191,2	116,1
vollsaniiert plus	82,2	0,0	132,6	85,1	82,2	0,0	132,6	85,1
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	78,3	318,3	77,7	78,2	78,3	318,3	77,7	78,2
vollsaniiert	108,7	185,6	107,9	108,6	108,7	185,6	107,9	108,6
vollsaniiert plus	123,8	168,3	123,0	123,7	123,8	168,3	123,0	123,7
Primärenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-243,0	0,0	-35,8	-35,8	-278,8	-35,8
vollsaniiert	0,0	0,0	-131,5	0,0	-35,8	-35,8	-167,3	-35,8
vollsaniiert plus	0,0	0,0	-83,4	0,0	-35,8	-35,8	-119,2	-35,8

Quelle: Eigene Darstellung

4.5 Siedlungs- und Quartiersstrukturen

Ähnlich wie Gebäude lassen sich auch Siedlungsstrukturen unterscheiden bzw. typisieren. Siedlungsstrukturen unterscheiden sich unter anderem durch ihre Bebauungsdichte und die in ihnen vorkommenden Gebäudetypen. In Roth/Häubi (1981) werden vier Raumtypen (s. Tabelle 37) und neun Siedlungsstrukturtypen (s. Tabelle 38) unterschieden.

Tabelle 37: Raumtypen des einfachen Raumstruktur-Modells

Raumtypen	Definition
RT 1	Stadtzentrum (großer) Metropol-/ Stadtregionen
RT 2	Vorstadtgebiet/ Außenzone von Metropol-/ Stadtregionen
RT 3	Mittelgroße Städte mit mehr als 10.000 Einwohnern außerhalb der Metropolregionen
RT 4	Kleine Siedlungen und Dörfer in ländlichen Regionen

Quelle: Roth/Häubi (1981)

Tabelle 38: Siedlungstypenmodell

Siedlungsstrukturtypen	Definition
SST 1	Ein- und Mehrfamilienhäuser mit einer niedrigen Konzentration/ Bebauungsdichte; 1 bis 2 Geschosse
SST 2	Dorfkern, Ein-/ Zweifamilienhaussiedlung mit hoher Bebauungsdichte; 2 Geschosse
SST 3	Reihenhaussiedlung; 2 Geschosse
SST 4	Zeilenbebauung, mittlere Bebauungsdichte; 3 – 5 Geschosse
SST 5	Zeilenbebauung, hohe Bebauungsdichte; 6 – 15 Geschosse
SST 6	Blockbebauung; 3 – 4 Geschosse
SST 7	Kernstadtbebauung ab Mitte des 19. Jh. (dichte Blockbebauung); 4 -6 Geschosse
SST 8	Historische/ mittelalterliche Altstadt; 3 – 5 Geschosse
SST 9	Industrie- und Lagergebäude; 2 – 4 Geschosse

Quelle: Roth/Häubi (1981)

Aus den genannten vier Raum- und neun Siedlungsstrukturtypen werden in Anlehnung an Esch et al. (2011) vier Siedlungstypen entwickelt, die in die weiteren Betrachtungen in AP2 einfließen (s. Tabelle 39). Diese unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der Bebauungs- und Bevölkerungsdichte, der Gebäudetypen und damit hinsichtlich des Energiebedarfs, den Energieeinsparpotenzialen, den Potenzialen und Kosten für die Nutzung erneuerbarer Energien und den Auf-/ Ausbau von Wärmenetzen. Die in Kapitel 4 beschriebenen Gebäudetypen und deren Anzahlen werden den vier Siedlungstypen zugewiesen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 40 zusammengefasst.

Neben gebäudetypspezifischen Kosten für die Wärme- und Kältebereitstellung werden Kosten für die netzgebundene Wärmebereitstellung und für die Solarthermienutzung in Abhängigkeit von den Siedlungstypen entwickelt, wodurch neben gebäudetypspezifischen Aussagen zu den Energieeinspar- und Anlagenkosten auch Aussagen über Unterschiede zwischen den Siedlungstypen im Rahmen der Gesamtsystemsimulation möglich sind.

Tabelle 39: Aggregierte Siedlungstypen

Siedlungstypen	Definition
ST II	Siedlung mit fast ausschließlicher Wohnbebauung
ST IIIa	Mittlere Bebauungsdichte
ST IIIb	Dichte städtische Bebauung; Anteil Gewerbegebäude
ST IV	Hauptsächlich gewerbliche und industrielle Gebäude

Quellen: Roth/Häubi (1981), Esch et al. (2011)

Tabelle 40: Siedlungstypen und deren Flächen nach Esch et al. (2011), sowie Gebäudetypen und -anzahlen, angepasst an die Ergebnisse des Zensus 2011

Siedlungstyp	Fläche	Gebäudetyp						Gesamt
		EZFH	Kleine MFH	Große MFH	Kleine NWG	Mittlere NWG	Große NWG	
	1.000 ha	Geb./ ha	Geb./ ha	Geb./ ha	Geb./ ha	Geb./ ha	Geb./ ha	Geb./ ha
ST II	1.656	8,58	0,47	0,00	0,17	0,03	0,03	9,28
ST IIIa	401	3,09	3,78	0,29	2,20	0,25	0,17	9,78
ST IIIb	93	0,40	9,06	1,11	4,08	0,35	0,25	15,25
ST IV	308	0,29	0,00	0,00	1,89	0,24	0,18	2,60

Quellen: Eigene Darstellung nach Esch et al. (2011), Destatis (2013a)

5 Kostenbetrachtungen aus der einzelwirtschaftlichen Perspektive

In diesem Arbeitsschritt wird die Gebäudetypologie um Kosteninformationen ergänzt. Die verschiedenen ambitionierten Wärmeschutzmaßnahmen an den verschiedenen Elementen der Außenhülle eines Gebäudes führen zu unterschiedlichen Wärmeschutzstandards und damit unterschiedlichen spezifischen Verbrauchswerten. Die Verschneidung der unterschiedlichen Verbrauchswerte mit den verschiedenen Versorgungsoptionen, die sich in Art und Effizienz der eingesetzten Technik sowie der Art der verwendeten Energieträger unterscheiden, führt damit pro Typgebäude zu einer Schar verschiedener Kostenpunkte.

5.1 Methodik und Ergebnisdarstellung

Für die Abschätzung der Kosteneffizienz verschiedener energetischer Standards bzw. technischer Versorgungsoptionen werden für die verschiedenen Typgebäude für verschiedene Ausgestaltungsvarianten im Rahmen einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung die jeweiligen Gesamtkosten ermittelt. Diese erfassen vor allem die mit dem jeweiligen Zustand verbundenen Investitionskosten (z.B. die Kosten einer energetischen Modernisierung oder die Kosten eines Neubaus mit einem bestimmten energetischen Standard) sowie die vom jeweiligen Wärmeschutzstandard und der gewählten Versorgungsoption abhängigen bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten (insbesondere Energiekosten, Kosten für Wartung und Instandhaltung).

Dargestellt werden die Vollkosten. Anders als bei einer Betrachtung der Differenzkosten, bei der die Investitionsvoll- bzw. Investitionsmehrkosten den eingesparten Energiekosten gegengerechnet werden, werden hier die jeweiligen Kostenbeiträge, die sich mit verschiedenen Kombinationen aus Wärmeschutzstandard und Versorgungstechnik verbinden, addiert und Vollkostenblöcke gebildet.

Die Kostenberechnung erfolgt aus der Perspektive eines Gebäudeeigentümers, also in erster Linie aus einzelwirtschaftlicher Perspektive. Einige Parameter (insbesondere zur Laufzeit einer Maßnahme sowie zu den ökonomischen Wirkungen von Förderprogrammen) werden jedoch so gewählt, dass sie von einer rein betriebswirtschaftlichen Sichtweise abweichen. Beispielsweise bleibt bei energetischen Modernisierungsmaßnahmen, für die prinzipiell eine Förderung beansprucht werden könnte, bei der Kostenrechnung die Förderung unberücksichtigt, obgleich sie aus der Perspektive des betroffenen Hauseigentümers eine maßgebliche Größe zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist (vgl. Kapitel 5.2.3). Die Kostenrechnung erfolgt auf der Preisbasis 2012, alle Kosten- und Preisangaben sind also als reale Kosten/Preise zur Preisbasis 2012 zu verstehen. Kostenansätze mit anderer Preisbasis werden über geeignete Indizes (Baupreis- bzw. Verbraucherpreisindex) auf die Preisbasis 2012 normiert. Die kapitalgebundenen Kosten (Investitionskosten) sowie die laufenden Kosten für Energie, Wartung und Instandhaltung werden ohne Umsatzsteuer angegeben.

In der Typologie werden für jedes der 19 Typgebäude (9 Wohngebäude, 10 Nichtwohngebäude) drei verschiedene Wärmeschutzstandards mit jeweils 18 (Wohngebäude) bzw. 8 (Nichtwohngebäude) Versorgungsvarianten kombiniert. Prinzipiell führt dies bei den Wohngebäuden pro Typgebäude zu 54 und bei den Nichtwohngebäuden zu 24 Ausgestaltungsoptionen (wobei nicht jede der möglichen Kombinationen aus Gebäudetyp-Wärmeschutzstandard-Versorgungsvariante berechnet wird). Hinzu kommt bei den Energiepreisen eine Hinterlegung von drei verschiedenen Preispfaden. Pro Typgebäude werden damit bei den Wohngebäuden für jeden betrachteten Zeitpunkt 162 verschiedene Kostenpunkte generiert. Bei den Nichtwohngebäuden sind es 72 Kostenpunkte. Eine weitere Ausdifferenzierung der berechneten Kostendaten erfolgt über den Zeitpunkt der Maßnahmenumsetzung (In welchem Jahr wird ein Gebäude in den betrachteten Zustand versetzt?). Wie bei der Auswahl der Typgebäude muss auch hier die Komplexität reduziert werden. Ziel dabei ist es, eine Darstellungs-

form zu finden, die ein möglichst hohes Maß an Aussagekraft erlaubt. Für die Darstellung der Kosteninformation wird für jedes der 19 Typgebäude folgende Form gewählt:

Darstellung des Kapitalwerts der verschiedenen Kostenparameter (Investitionskosten, Reparatur/Instandhaltung, Energiekosten) in Abhängigkeit von

- der gewählten Kombination aus Wärmeschutzstandard und Versorgungstechnik,
- dem Zeitpunkt, zu dem das Typgebäude in den betrachteten Zustand versetzt wird und
- für jedes der drei Energiepreisszenarien.

Der Kapitalwert wird dabei in Anlehnung an die technische Lebensdauer der Außenwanddämmung für einen Zeitraum von 40 Jahren berechnet (s. Kapitel 5.2.2). Investitionen in Bauteile mit niedrigerer Lebensdauer (z.B. Fenster, Versorgungstechniken) werden in Form einer entsprechenden Ersatzbeschaffung nach Ablauf der Lebensdauer berücksichtigt. Sind die Ersatzinvestitionen nach dem Betrachtungszeitraum nicht vollkommen abgeschrieben (lineare Abschreibung), wird der Kapitalwert um den entsprechenden Restwert bereinigt.

Die Aussagekraft des Kapitalwerts besteht in einer Abschätzung, wie sich verschiedene Maßnahmen (z.B. energetische Modernisierungsmaßnahmen auf verschiedenen anspruchsvollen energetischen Standards oder bezogen auf verschiedene Technikoptionen zur thermischen Raumkonditionierung) aus der ökonomischen Perspektive unterscheiden. Aufgrund der Lernraten und Preisentwicklungen verändern sich die Kapitalwerte natürlich auch in Abhängigkeit von dem Zeitpunkt, zu dem ein Gebäude in den betrachteten Zustand versetzt wird. Um diesen Effekt abbilden zu können, werden die Kapitalwerte für drei Investitionszeitpunkte berechnet, die Jahre 2014, 2025 und 2040.

Damit verbindet sich jedoch keine Aussage über den aus der ökonomischen Sicht günstigsten Investitionszeitpunkt. Hierfür müssten die Gesamtkosten einer Variante über einen festen Betrachtungszeitraum (z.B. 2014-2050) erfasst werden, bei einer Investition in 20XX also z.B. auch die Energiekosten im Zeitraum 2014-20XX. Diese Form der Bewertung steht jedoch nicht im Mittelpunkt des Vorhabens. Die Kostenbetrachtungen stellen vielmehr Vorarbeiten für die Ableitung der Kosten verschiedener Transformationspfade dar.

5.2 Rahmenparameter

In die dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung geht eine Reihe von Rahmenparametern ein, die in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert werden.

5.2.1 Kalkulatorischer Zinssatz

Die Annuitätenbildung der Investitionskosten (z.B. zur Berechnung von Jahreskosten) erfolgt unter Verwendung eines Kalkulationszinses, der die einzelwirtschaftliche Perspektive privater Gebäudeeigentümer reflektiert. In der Regel wird für größere Investitionssummen eine Mischfinanzierung aus Kredit und Eigenkapital unterstellt. Der Zinssatz ist ein Maß für die Renditeerwartung, die sich mit den Finanzierungsbeiträgen verbindet. Es wird ein Zinssatz von 4 % zugrunde gelegt. Der Zinssatz orientiert sich an den langfristigen Kapitalanlagemöglichkeiten³² privater Haushalte sowie einem

³² Der mittlere jährliche Effektivzinssatz deutscher Banken für Einlagen privater Haushalte lag bei Einlagen mit einer vereinbarten Laufzeit von über 2 Jahren zwischen 2003 und 2014 bei rund 2,6 % (Deutsche Bundesbank, http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomische_Zeitreihen/its_details_value_node.html?tsId=BBK01.SUD104).

akteursspezifischen Risikoaufschlag. Der kalkulatorische Zinssatz spiegelt die im Vergleich zu gewerblichen Investoren geringeren Gewinnerzielungserwartungen wider. Für die Diskontierung (z.B. zur Berechnung des Kapitalwertes oder des Barwerts laufender Kosten wie der Energiekosten) wird der gleiche Zinssatz unterstellt. Bei Nichtwohngebäuden wird ein kalkulatorischer Zinssatz von 8 % unterstellt, entsprechend der im Vergleich zu Privathaushalten höheren Gewinnerwartung in diesem Segment.

5.2.2 Laufzeit

Als Laufzeit der energetischen Modernisierungsmaßnahme bzw. eines Gebäudeneubaus wird deren technische Lebensdauer zugrunde gelegt. Die unterstellten Lebensdauern orientieren sich für Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle an BBSR (2011), BTE (2008) und für die Versorgungstechniken an der VDI-Norm 2067.³³

Für die einzelnen Bauteile bzw. Techniken werden die in Tabelle 41 dargestellten Lebensdauern unterstellt.

Tabelle 41: Technische Lebensdauern verschiedener Bauteile

Bauteil	Technische Lebensdauer
Wärmeschutz opake Bauteile (Außenwand, Dach, Fußboden/Kellerdecke)	40 Jahre
Fenster	30 Jahre
Versorgungstechniken (Heizung, Warmwasser, Lüftung, Kälteanlagen, PV)	25 Jahre

Quelle: BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Norm 2067

5.2.3 Soziale Transfers

Soziale Transfers werden in Form der energiepreisrelevanten Steuern (Energiesteuer für fossile Brennstoffe, Stromsteuer) oder anderer energiepreisrelevanter Kostenelemente wie EEG- und KWK-Umlage berücksichtigt. Gleiches gilt in Hinblick auf die Erlöse, die ein Gebäudeeigentümer aus der Netzeinspeisung von Strom aus PV-Anlagen bzw. BHKWs erzielt. Auch hier werden die Förderung aus dem EEG sowie dem KWKG berücksichtigt. Die finanzielle Förderung von effizienten Neubauten sowie Sanierungsmaßnahmen (die in einer einzelwirtschaftlichen Betrachtung aus Sicht des Hauseigentümers natürlich mit einbezogen werden müsste) wird hingegen nicht erfasst. Gleiches gilt für weitere politikmaßnahmeninduzierte Transfers, z.B. eine Ausweitung der Aufschläge auf die Energiepreise infolge neuer Förderinstrumente wie Einsparverpflichtungssysteme oder Prämienmodelle oder einer Erhöhung der Energiesteuer zur Gegenfinanzierung staatlicher Förderprogramme (vgl. z.B. Öko-Institut/Klinski 2013, Nabu 2012).

5.2.4 Kostendaten

5.2.4.1 Investitionskosten

Für jedes der Typgebäude werden für drei verschiedene Wärmeschutzstandards (unsaniert, vollsaniert, vollsaniert plus) sowie 18 (Wohngebäude) bzw. 10 (Nichtwohngebäude) verschiedene Versorgungstechnikvarianten die entsprechenden Investitionskosten ermittelt.

³³ Richtlinie VDI 2067 Blatt 1 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung“

Bei den energetischen Modernisierungsmaßnahmen (Wärmeschutz und Versorgungstechniken) im Bereich der Wohngebäude wird v.a. auf die Kostenfunktionen des Instituts für Wohnen und Umwelt (BMVBS 2012) zurückgegriffen. Die daraus ermittelten Kostenangaben (Preisbasis Q1/2009) werden über den Baupreisindex des Statistischen Bundesamtes auf die Preisbasis 2012 normiert.³⁴ Zur Verifizierung werden die gewonnenen Daten mit aktuellen Kostendaten aus der Baukostendatenbank sirAdos³⁵ abgeglichen. Die Kostenfunktionen aus BMVBS (2012) basieren auf der Auswertung von rund 530 Sanierungsprojekten aus der KfW-Förderung oder auf dem dena Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“. Bei allen diesen Projekten handelt es sich um ambitionierte energetische Sanierungsmaßnahmen, bei denen die gesetzlichen Mindestanforderungen der EnEV für Bestandsanierungen übertroffen wurden. Dabei handelt es sich jedoch in aller Regel nicht um Sanierungen auf einen Passivhausstandard (wie er im Rahmen unseres Projektes mit dem Wärmeschutzstandard „vollsaniert plus“ unterstellt wird). Entsprechend reicht die Punktwolke – Grundlage für die Regressionskurve für die Kostenfunktion – bei der Außenwanddämmung „nur“ bis zu einer Dämmstärke von 33cm (bei der Dachdämmung bis 23cm). Bei der Außenwanddämmung unterstellen wir jedoch für den Zustand „vollsaniert plus“ bei einigen Gebäudetypen durchaus Dämmdicken von 30 cm, bei der Dämmung des Daches sogar bis zu 40 cm. Diese sehr extremen Dämmstärken werden durch die Kostenfunktionen aus BMVBS (2012) nicht abgedeckt. Mangels einer statistisch belastbaren empirischen Datenbasis für die Kosten einer Passivhaussanierung auf Ebene der einzelnen Gewerke werden die Kostenfunktionen dennoch verwendet und die Kostenpunkte durch Extrapolation der entsprechenden Funktionen ermittelt.

Die Kostenannahmen für Wärmeschutzmaßnahmen im Bereich der Nichtwohngebäude basieren auf den Kostenfunktionen aus ITG (2014). Für die Kostendaten für die Versorgungstechniken bei den NWG wird auf ITG (2014), IWU (2012b), Schmidt Reuter (2012), BSW/EuPD (2013) und Lucas et al. (2002) zurückgegriffen. Auch hier erfolgt eine Umrechnung auf die Preisbasis 2012 über den Baupreisindex.

Die Investitionskosten für die Wärmeerzeugungsanlagen umfassen alle Kostenkomponenten, die im Heizraum, der Abgasanlage (Schornstein) bzw. für die Brennstofflagerung (z.B. Pelletlager) und den Transport (z.B. Förderschnecke) anfallen. Die Kosten erfassen also auch die Demontage und Entsorgung des Altgeräts, den Einbau des neuen Wärmeerzeugers inkl. Speicher, Kosten für Armaturen (inkl. Pumpen). Nicht erfasst werden die Kosten für das Heizverteilsystem. Ebenso bleiben Kosten für den umbauten Raum, der durch Wärmeerzeuger und Peripheriekomponenten benötigt wird, unberücksichtigt. Bei den Wärmepumpen werden bei den Wohngebäuden EZFH Luft-Wärmepumpen, in MMH/KMH sowie GMH wird die Installation einer Erdsonden-Wärmepumpe unterstellt. Bei den Nichtwohngebäuden wird eine reversible Sole-Wärmepumpe eingesetzt.

Nach den Kostenfunktionen aus BMVBS (2012) ergeben sich bei den Wohngebäuden die Investitionskosten für die meisten Versorgungstechniken in Abhängigkeit von der zu beheizenden Fläche des Gebäudes. Aufgrund der ausgewerteten Primärdaten handelt es sich dabei um energetisch gut sanierte Gebäude. Die Autoren der Studie führen an, dass eine Auswertung der Kosten in Abhängigkeit von der Nennleistung der Kessel zu keinen plausiblen Ergebnissen führe, da der Kessel nur einen Teil der Gesamtsystemkosten ausmache und die Kosten der anderen Systemkomponenten stark streuten. Bezogen auf unsere Auswertungen führt dies jedoch dazu, dass der Wärmeschutzstandard der unter-

³⁴ Preisindizes für die Bauwirtschaft, Wohngebäude (https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=3A4D60EC7CAA05FE077ADE7E6292F5CC.tomcat_GO_1_1?operation=begriffsRecherche&suchanweisung=%20Baupreise)

³⁵ sirAdos – Baudaten; Stand März 2014

suchten Typgebäude keine Auswirkungen auf die Höhe der Investitionskosten der Versorgungstechniken hat. Lediglich für BHKWs und Fernwärme liegen Kostenkurven als Funktion der Nennleistung vor (Schmidt Reuter 2012). Zur Vermeidung von Datenverzerrungen zwischen den verschiedenen Versorgungstechniken haben wir auch für diese beiden Techniken spezifische Investitionskosten für den Einsatz in einem Gebäude mit dem Wärmeschutzstandard „vollsaniert“ unterstellt.

Bei den Nichtwohngebäuden wird nur bei der Versorgungsoption Gas-Brennwertkessel eine flächenbezogene Kostenfunktion angelegt. Alle anderen Versorgungsoptionen greifen auf leistungsbezogene Kostenfunktionen zurück. Dies ist hat den Vorteil, dass die unterschiedlichen Leistungen der Versorgungsoptionen bei den verschiedenen Wärmeschutzstandards kostenseitig besser abgedeckt werden. Da ein Teil der Kosten allerdings nicht von der Leistung abhängt, führt diese Vorgehensweise ebenfalls zu einer leichten Verzerrung. Letztlich ist es der unterschiedlich guten Datenlage über die Technikkosten geschuldet, ob eine leistungs- oder flächenbezogene Kostenfunktion verwendet wird.

Bei den Investitionskosten für BHKW erfolgt keine Aufteilung der Gesamtkosten auf die Strom- und Wärmeseite. Vielmehr werden die gesamten Investitionskosten der Wärmeseite zugeordnet. Eine „Gegenrechnung“ der Stromerzeugung erfolgt in Form einer Stromgutschrift über die Bilanzierung der Energiekosten (s. Kapitel 5.2.5).

Eine Übersicht der spezifischen Investitionskosten zeigt Tabelle 42.

Tabelle 42: Spezifische Investitionskosten

Bauteil	Kostenfunktion WG (Preisbasis Q1/2009)	Kostenfunktion NWG (Preisbasis verschieden)
Wärmeschutz Außenwand, Vollkosten	2,431 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 87,35 EUR [EUR _{brutto} /m ² Bauteilfläche]	1,9 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 75 EUR [EUR _{netto} /m ² Bauteilfläche]
Wärmeschutz Außenwand, energiebedingte Mehrkosten	2,431 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 15,00 EUR [EUR _{brutto} /m ² Bauteilfläche]	1,9 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 26 EUR [EUR _{netto} /m ² Bauteilfläche]
Wärmeschutz Dach, Vollkosten	2,702 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 172,80 EUR [EUR _{brutto} /m ² Bauteilfläche]	1,9 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 115 EUR [EUR _{netto} /m ² Bauteilfläche] ³⁶
Wärmeschutz Dach, energiebedingte Mehrkosten	2,21 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 0 EUR [EUR _{brutto} /m ² Bauteilfläche]	1,9 EUR/cm* xcm Dämmstoff [EUR _{netto} /m ² Bauteilfläche]
Wärmeschutz Fußboden/Kellerdecke (Dämmung von unten)	1,368 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 40,77 EUR [EUR _{brutto} /m ² Bauteilfläche]	1,8 EUR/cm* xcm Dämmstoff + 45 EUR [EUR _{netto} /m ² Bauteilfläche]
Gerüst	11 [EUR _{brutto} /m ² Wohnfläche]	7,6 EUR/m ² * xm ² + 326 EUR [EUR _{netto} /m ² eingerüsteter Bauteilfläche]
Fenster		
U _w = 1,3 W/(m ² *K)	315 EUR _{brutto} /m ²	290-330 EUR _{brutto} /m ²
U _w = 0,7 W/(m ² *K)	450 EUR _{brutto} /m ²	400 EUR _{brutto} /m ²
Wärmepumpe Luft	2.314 EUR/m ² * xm ² Wohnfläche ^(-0,58) [EUR _{brutto} /m ² Wohnfläche]	na
Wärmepumpe Erdkollaktor	na	3.518,3 EUR/kW * xkW ^(-0,322) [EUR _{netto} /kW _{th}]
Wärmepumpe Erdsonde	5.367 EUR/m ² * xm ² Wohnfläche ^(-0,56) [EUR _{brutto} /m ² Wohnfläche]	na

³⁶ Dachdämmung mit Erneuerung der Außenhaut.

Bauteil	Kostenfunktion WG (Preisbasis Q1/2009)	Kostenfunktion NWG (Preisbasis verschieden)
Solarthermie (Warmwasser)	307,66 EUR/m ² * xm ² Wohnfläche ^(-0,426) [EUR _{brutto} /m ² Wohnfläche]	na
Holzpelletkessel	4.570 EUR/m ² * xm ² Wohnfläche ^(-0,71) [EUR _{brutto} /m ² Wohnfläche]	na
BHKWs	5.433 EUR/kW _{el} * xkW _{el} ^(-0,359) [EUR _{netto} /kW _{el}]	5.433 EUR/kW _{el} * xkW _{el} ^(-0,359) [EUR _{netto} /kW _{el}]
Fernwärme (Übergabestation)	545,47 EUR/kW * xkW ^(-0,468) [EUR _{netto} /kW _{th}]	545,47 EUR/kW * xkW ^(-0,468) [EUR _{netto} /kW _{th}]
Brennwertkessel fossil	1.307 EUR/m ² * xm ² Wohnfläche ^(-0,64) [EUR _{brutto} /m ² Wohnfläche]	1.307 EUR/m ² * xm ² Nutzfläche ^(-0,64) [EUR _{brutto} /m ² Nutzfläche]
Absorptionskälte	na	14.740,2095 EUR/kW * xkW ^(-0,6849) + 3,29 EUR [EUR _{netto} /kW _{th}]
Lüftungsanlagen mit WRG	356,9 EUR/m ² * xm ² Wohnfläche ^(-0,39) [EUR _{brutto} /m ² Wohnfläche]	18 EUR/(m ³ /h) * x(m ³ /h) + 1.500 EUR [EUR _{netto} /Anlage]
Beleuchtung (LED)	na	208 EUR/kW [EUR _{netto} /kW _{el}]
Photovoltaik	na	3-10 kW: 1.607 EUR/kW 10-100 kW: 1.409 EUR/kW [EUR _{netto} /kW _{el}]

Quellen: BMVBS (2012), Baudatenbank sirAdos, Schmidt Reuter (2012), ASUE (2011), BSW/EuPD (2013), ITG (2014), Lucas et al. (2002), Thema et al. (2010)

Bei den Investitionskosten für die Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle wird zwischen Vollkosten bzw. energiebedingten Mehrkosten unterschieden. Letztere reflektieren die Kostenperspektive, die v.a. bei Sanierungsmaßnahmen zum Tragen kommen sollte, wenn eine Maßnahme im Zuge einer ohnehin stattfindenden Renovierungsmaßnahme erfolgt, also im Rahmen des „normalen“ Reinvestitionszyklus stattfindet. Im Falle der opaken Bauteile wird dabei als Referenzfall, der die „Ohnehinkosten“ definiert, eine reine Renovierung des entsprechenden Bauteils unterstellt.³⁷ Bei der Außenwand ist dies beispielsweise eine Putzerneuerung ohne Wärmedämmung. Bei der Dämmung des Fußbodens – i.d.R. handelt es sich dabei um die nachträgliche Dämmung der Kellerdecke – werden die gesamten Kosten als energiebedingte Mehrkosten eingestuft, da eine reine Renovierung der Kellerdecke in aller Regel nicht vorgenommen wird. Bei den Fenstern bestehen die Ohnehin-Kosten aus den Kosten für ein Fenster, das die Anforderungen der EnEV 2009 erfüllt.

Die Ableitung der spezifischen Investitionskosten zukünftiger Sanierungsmaßnahmen erfolgt über die Verwendung technikspezifischer Lernkurven. Dabei wird für jede Investition eine Aufteilung der Gesamtkosten in „Materialkosten“ und „Arbeitskosten“ vorgenommen und für beide Parameter eine eigene Lernkurve entwickelt. Die Lernkurve einer bestimmten Technik ergibt sich dann aus der Überlagerung der beiden „Teil-Lernkurven“.

Tabelle 43 zeigt die wichtigsten Parameter, die in die Entwicklung der Lernkurven einfließen. Die Lernrate reflektiert die langfristige Entwicklung der Material- und Arbeitskosten für eine bestimmte Technik. Konkret gibt sie an, wie sich die spezifischen Kosten einer bestimmten Technik entwickeln,

³⁷ Eine Alternative bestünde darin, als Referenzfall eine EnEV-konforme energetische Modernisierung des Bauteils zu unterstellen. Dies würde jedoch voraussetzen, dass es sich bei der Mehrzahl der Renovierungsmaßnahmen um solche handelt, die eine Vorgabe nach der EnEV auslöst. In der Realität dürfte dies nicht der Fall sein (z.B. löst bei der Außenwand nur die vollständige Erneuerung des Putzes eine Dämmpflicht aus, nicht jedoch, wenn am Putz nur Ausbesserungsarbeiten vorgenommen werden).

wenn sich das umgesetzte Volumen der betroffenen Technik verdoppelt. Lernrateneffekte resultieren dabei z.B. aus Mengen- oder Innovationseffekten. Mangels einer breiten empirischen Basis, die eine ausreichend lange Zeitreihe abdeckt, handelt es sich bei den in Tabelle 43 dargestellten Werten um eigene Schätzwerte. Die Aufteilung der Investitionskosten in Material- und Arbeitskosten erfolgt u.a. anhand der Daten aus der sirAdos Baukostendatenbank.

Tabelle 43: Lernraten

Bauteil	Lernrate Material	Lernrate Arbeit
Wärmeschutz opake Bauteile (Außenwand, Dach, Fußboden/Kellerdecke)	100%	90%
Wärmeschutzfenster	90%	95%
Wärmepumpen	95%	95%
Solarthermie	90%	95%
Holzpelletkessel	95%	95%
BHKWs	95%	95%
Fernwärme ³⁸	100%	100%
Brennwertkessel fossil	100%	100%
Kälteanlagen	95%	95%
Lüftungsanlagen mit WRG	80%	95%
Beleuchtung (LED)	78%	95%
Photovoltaik	78%	95%

Quelle: Eigene Abschätzung u.a. auf der Basis der Baukostendatenbank sirAdos

Zur Bestimmung des Effekts der Lernrate auf die zukünftigen Technikkosten müssen Annahmen über die Entwicklung der Umsatzvolumina bei den verschiedenen Techniken getroffen werden (z.B. Entwicklung des Umsatzvolumens von Wärmepumpen bis 2050). Hierfür wurde eine Entwicklung unterstellt, die sich an den langfristigen Klimaschutzziele der Bundesregierung orientiert. Grundlage für das Mengengerüst sind Vorarbeiten aus Henning et al. (2013) sowie eigene Abschätzungen v.a. zur Entwicklung der technikspezifischen Sanierungs- bzw. Austauschraten. Die Annahmen beziehen sich dabei nur auf die Marktentwicklung in Deutschland. Vor dem Hintergrund dieser Beschränkung sowie der mangelnden empirischen Datenbasis sind die verwendeten Lernraten mit verhältnismäßig großen Unsicherheiten behaftet. Ferner fließen in die abgeschätzten Lernraten die Einschätzungen ein, wie sich die verschiedenen Techniken langfristig entwickeln werden (vgl. Kapitel 3). Auch diese Einschätzungen sind extrem unsicher.

5.2.4.2 **Wartung/Instandhaltung der Wärmeerzeugungs- und sonstiger Versorgungsanlagen**

Die Bemessung des finanziellen Aufwands für die Wartung und Instandhaltung der Wärmeerzeugungsanlagen orientiert sich an den Ansätzen aus der VDI 2067, Blatt 1.³⁹ Diese weist für die verschiedenen Technikoptionen spezifische prozentuale Ansätze für den Aufwand für Wartung und Instandsetzung bezogen auf die Investitionskosten an. Bemessungsgrundlage dafür ist jedoch der „nackte“ Wärmeerzeuger. Die Ansätze aus der VDI 2067 müssen deswegen auf das gesamte Technik-

³⁸ Es wird dabei angenommen, dass sich die Lernkurveneffekte bei der Erzeugung und dem Netzausbau im Fernwärmepreis niederschlagen, nicht in der Übergabestation.

³⁹ Richtlinie VDI 2067 Blatt 1 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung“

paket (also die Investitionskosten inkl. Einbau, Speicher, Armaturen usw.) umgerechnet werden. Tabelle 44 zeigt die verwendeten Ansätze.

Tabelle 44: Jährlicher Aufwand für Wartung und Instandhaltung

Technik	Jährlicher Aufwand für Wartung und Instandhaltung (bezogen auf die Investitionskosten)
Wärmepumpen	2,8%
Solarthermie	0,7%
Holzpelletkessel	3,2%
BHKWs	5,6%
Fernwärme	3,0%
Brennwertkessel fossil	2,8%
Kälteanlagen	1,8%
Lüftungsanlagen mit WRG	4,5%
Beleuchtung (LED)	3,5%
Photovoltaik	5,0%

Quelle: Eigene Abschätzung u.a. auf der Basis von VDI 2067

5.2.5 Energiekosten und Energiepreisentwicklung

Im Rahmen der Kostenrechnungen gehen die Energiekosten in Form von Endverbraucherpreisen ein, die auf Endverbraucherpreisen basieren. Die Preisentwicklung der Endverbraucherpreise für fossile Brennstoffe, Fernwärme sowie Strom orientiert sich an der Methodik sowie den unterlegten Preisentwicklungen der BMU Projekte „Erarbeitung einer integrierten Wärme- und Kältestrategie“ (Fraunhofer ISE et al. 2012/2013) sowie „Klimaschutzszenarien 2050“ (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014). Eine Normierung auf die Preisbasis 2012 erfolgt über den Verbraucherpreisindex (VPI) (Destatis 2014).

Neben der Preisentwicklung an den globalen Rohstoffmärkten hängt die Entwicklung der Endverbraucherpreise von einer Reihe weiterer Parameter ab, u.a. Steuern und Abgaben. Einige der entsprechenden Preisbestandteile resultieren aus der Ausgestaltung der politischen Instrumentierung. Bei den fossilen Brennstoffen ist dies insbesondere die Energiesteuer; bei Heiz- und Heizkraftwerken mit einer Feuerungswärmeleistung >20 MW zudem die Ausgestaltung des Emissionshandels (als zentraler Einflussparameter für die Entwicklung der CO₂-Preise). In den Strompreis gehen neben der Stromsteuer eine Reihe von Preisbestandteilen ein, die aus der Umlage verschiedener Fördergesetze resultieren. Besonders zu nennen sind hier die EEG- und KWK-Umlage sowie die Umlage nach § 19 Abs. 2 StromNEV. Diese Preisbestandteile – und damit die Strompreisentwicklung als Ganzes – hängen also sehr stark von der Weiterentwicklung der zugrunde liegenden Instrumente ab. Weitere Strompreisbestandteile sind die Netzentgelte sowie die Konzessionsabgabe. Für Wohn- und Nichtwohngebäude werden einheitliche Strompreise unterstellt.

Es werden drei verschiedene Energiepreisentwicklungen zugrunde gelegt. Der mittlere Preispfad orientiert sich an dem Preispfad des „Klimaschutzszenario 80“ (KS 80) aus dem Projekt „Klimaschutz-

szenario 2050“ (1. Modellierungsrunde).⁴⁰ Ferner wird ein oberer und ein unterer Preispfad unterstellt. Für diese werden die Preisentwicklungsraten des mittleren Preispfades mit für alle Energieträger einheitlichen Faktoren multipliziert. Für den oberen Preispfad wird eine Erhöhung der Preissteigerungsraten des mittleren Preispfades, für den unteren Preispfad eine Reduktion der Preissteigerungsrate des mittleren Pfades um jeweils 50 % in Ansatz gebracht. Mit dem oberen und unteren Preispfad verbindet sich die Intention, eine denkbare Spannbreite des zukünftigen Preiskorridors aufzuspannen.

Wie oben dargestellt, werden bei BHKWs als Energiekosten die Kosten für den Erdgasbezug für die Gesamtanlage bilanziert. Für die Anlage werden ein elektrischer Wirkungsgrad von 30 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 60 % unterstellt. Das BHKW wird wärmegeführt betrieben. Teile der Stromerzeugung werden direkt im Gebäude verbraucht (Eigenverbrauch), die verbleibende Strommenge in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Für den Eigenverbrauch wird eine Stromgutschrift in Höhe der vermiedenen Strombezugskosten angesetzt. Für die Netzeinspeisung wird eine Stromgutschrift unterstellt, die sich aus dem anlegbaren „üblichen“ Preis nach § 4 Abs. 3 KWKG, dem KWK-Bonus (§7 KWKG) sowie den vermiedenen Netznutzungsentgelten zusammensetzt.

Für die Wohngebäude wird angenommen, dass im Wärmeschutzstandard „unsaniert“ 25 % der Stromerzeugung des BHKW im Gebäude verbraucht wird. Entsprechend werden 75 % des Stroms ins öffentliche Netz eingespeist. In den Zuständen „vollsaniert“ bzw. „vollsaniert plus“ erzeugt das BHKW wesentlich weniger Wärme, entsprechend gering ist die erzeugte Strommenge. Bei diesen Zuständen wird für die Stromerzeugung eine hälftige Aufteilung in Eigenverbrauch und Netzeinspeisung angenommen. Auch bei den Nichtwohngebäuden werden die BHKWs wärmegeführt betrieben. Auch hier ist der Eigenverbrauch abhängig vom Sanierungszustand des Gebäudes. Im unsanierten Zustand werden 25 % des erzeugten Stroms eigenverbraucht und 75 % ins Netz eingespeist. Bei den beiden Sanierungszuständen (vollsaniert sowie vollsaniert plus) wird der erzeugte Strom komplett im Gebäude verbraucht. Die Stromerzeugung aus den PV Anlagen der Nichtwohngebäude geht bilanziell ebenfalls komplett in den Eigenverbrauch.

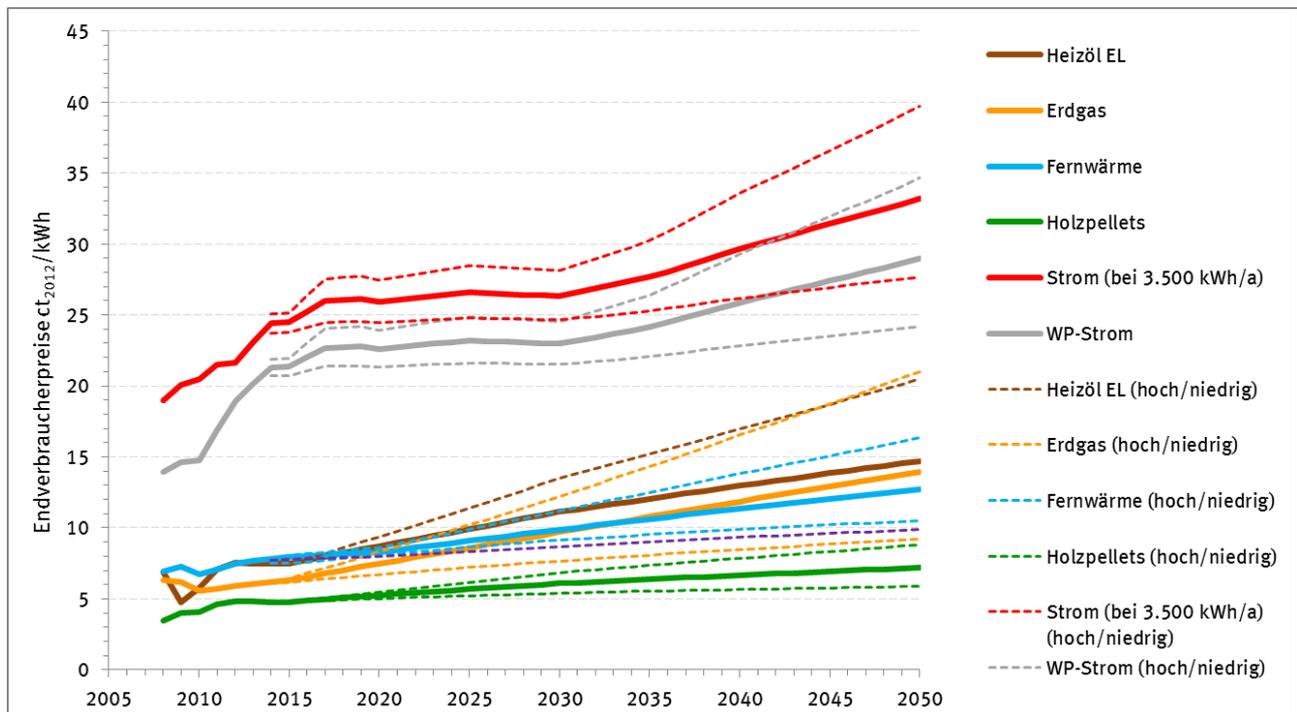
⁴⁰ In diesem Szenario sollen die im Energiekonzept der Bundesregierung für Treibhausgasminde rung, erneuerbare Ener gien und Energieeffizienz festgelegten Ziele möglichst erreicht werden. Für die Treibhausgasemissionen wird dabei ein Minderungsziel von 80 % zugrunde gelegt.

Tabelle 45: Entwicklung der Endverbraucherpreise (netto ohne MWSt) für die wichtigsten Endenergieträger für die thermische Wärmeversorgung in Wohn- und Nichtwohngebäuden (Preisbasis 2012)

	2014	2020	2030	2040	2050
	ct/kWh	ct/kWh	ct/kWh	ct/kWh	ct/kWh
Preisfad niedrig					
Heizöl EL	7,49	8,10	9,15	9,88	10,53
Erdgas	6,11	6,73	7,67	8,49	9,20
Fernwärme	7,73	7,97	8,70	9,34	9,87
Holzpellets	4,79	5,02	5,41	5,66	5,88
Biogas 100%	12,41	13,05	14,06	14,99	15,82
Strom (bei 3.500 kWh/a)	23,73	24,46	24,66	26,17	27,69
WP-Strom	20,70	21,34	21,52	22,84	24,16
Preisfad mittel					
Heizöl EL	7,49	8,72	11,13	12,97	14,72
Erdgas	6,17	7,49	9,70	11,87	13,94
Fernwärme	7,80	8,29	9,88	11,37	12,71
Holzpellets	4,79	5,25	6,09	6,67	7,20
Biogas 100%	12,48	13,79	16,00	18,17	20,24
Strom (bei 3.500 kWh/a)	24,40	25,92	26,36	29,67	33,18
WP-Strom	21,29	22,62	23,00	25,89	28,96
Preisfad hoch					
Heizöl EL	7,49	9,38	13,51	16,97	20,50
Erdgas	6,24	8,32	12,23	16,53	21,02
Fernwärme	7,87	8,62	11,21	13,83	16,34
Holzpellets	4,79	5,49	6,85	7,86	8,80
Biogas 100%	12,54	14,57	18,19	22,01	25,85
Strom (bei 3.500 kWh/a)	25,07	27,44	28,13	33,57	39,70
WP-Strom	21,88	23,94	24,54	29,29	34,64

Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis Fraunhofer ISE et al. (2012/2013), Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2014), Destatis (2014)

Abbildung 15: Entwicklung der Endverbraucherpreise (netto ohne MWSt) für die wichtigsten Endenergieträger für die thermische Wärmeversorgung in Wohn- und Nichtwohngebäuden



Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis Fraunhofer ISE et al. (2012/2013), Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2014), Destatis (2014)

5.3 Ergebnisse der Kostenbetrachtung

5.3.1 Wohngebäude

Aus der Vielzahl der möglichen Kombinationen aus Typgebäude, Baualtersklasse, Wärmeschutzstandard, Versorgungstechnik und Investitionszeitpunkt werden im Folgenden exemplarisch die Kapitalwerte für jeweils ein EZFH, ein MMH/KMH sowie ein GMH jeweils aus der Baualtersklasse 1949-1994 dargestellt. Die Wahl fiel auf diese Baualtersklasse, da sie für alle Typgebäudeklassen den größten Anteil an Gebäuden erfasst (EZFH 56 %, MMH/KMH 60 %, GMH 69 %, vgl. Tabelle 28). Die Kapitalwerte umfassen die Kosten über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren.

Abbildung 16 bis Abbildung 18 zeigen die Kapitalwerte für ein EZFH, KMH/MMH sowie GMH für die 18 Versorgungstechniken in Abhängigkeit der drei verschiedenen Wärmeschutzstandards „unsaniert“, „vollsanert“ und „vollsanert plus“. In jeder Abbildung stellt jede der drei Grafiken die Situation zu einem anderen Investitionszeitpunkt dar. Gezeigt werden die Kapitalwerte für das Jahr 2014 (das Gebäude wird also in 2014 in den jeweiligen Wärmeschutzzustand versetzt), 2025 und 2040.

Da nicht jede Technikoption für jeden Gebäudetyp bzw. Wärmeschutzstandard betrachtet wurde (vgl. Kapitel 4.3.3), bleiben einige Werte leer. Beispielsweise wird davon ausgegangen, das Gebäude im Sanierungszustand „vollsanert plus“ immer über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung verfügen. Im Gegensatz dazu wird bei unsanierten Gebäuden stets nur die Variante ohne Lüftungsanlage betrachtet.

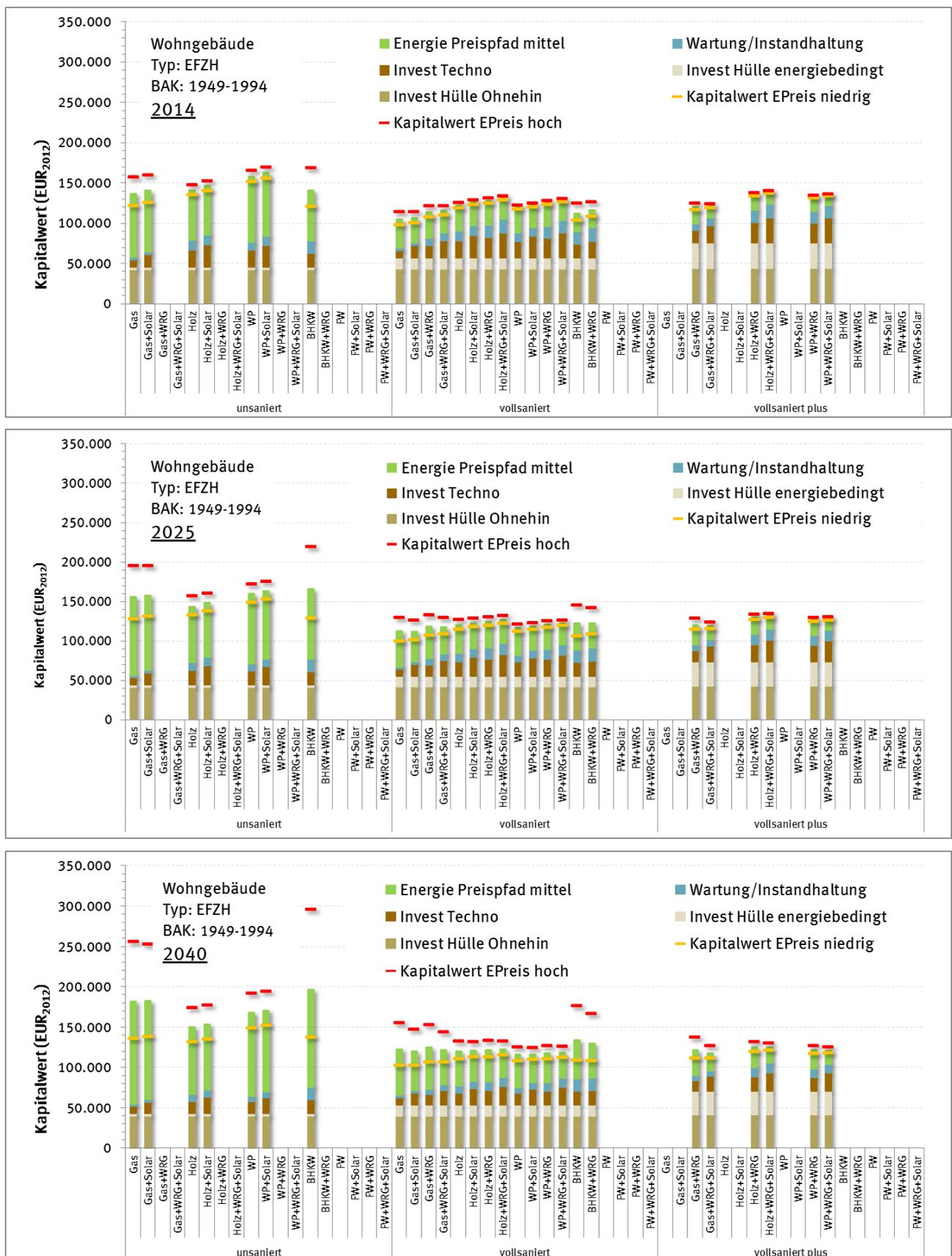
Für alle drei Gebäudetypen stellt der unsanierte Zustand den Zustand mit dem höchsten Kapitalwert dar (mittlerer Energiepreispfad). Dies ist unabhängig vom Zeitpunkt der energetischen Sanierung (Zustände „vollsanert“ und „vollsanert plus“) bzw. der reinen Renovierung (Zustand „unsaniert“).

Die Kapitalwerte der beiden Sanierungszustände „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“ unterscheiden sich dabei nur unwesentlich. Aufgrund der Lernkurveneffekte bei den Investitionskosten sowie den unterstellten Energiepreissteigerungen konvergiert der Kapitalwert des Zustands „vollsaniert plus“ bei fortschreitendem Investitionszeitpunkt sukzessive gegen den Zustand „vollsaniert“ (mittlerer Energiepreispfad). Auch dieser Effekt gilt unabhängig vom Gebäudetyp.

Die Kosten einer Solarthermieanlage refinanzieren sich nicht in allen gezeigten Gebäudetyp/Wärmeschutz-Kombinationen. In GMH liegen die Kapitalwerte für die Technikoption mit Solaranlage stets unter denen ohne Kollektor (mittlerer Energiepreispfad). In KMH/MMH liegen die Kapitalwerte der Technikoptionen mit Solaranlage bei einem Investitionszeitpunkt in 2014 im Bereich der Werte für die jeweilige Option ohne Kollektor (unabhängig vom Sanierungszustand und dem Investitionszeitpunkt). Bei einem Investitionszeitpunkt in 2025 hingegen liegen die Kapitalwerte der Option mit Solarkollektor bei Gebäuden im Zustand „vollsaniert plus“ systematisch unter denen ohne Kollektor. Bei einem Investitionszeitpunkt in 2040 oder später liegen die Kapitalwerte der Optionen mit Kollektor in jeder der untersuchten Technikkombinationen unter den Optionen ohne Kollektor. Bei EZFH hingegen liegen die Kapitalwerte inkl. Solarthermieanlage nur in Kombination mit einem Gaskessel, beschränkt auf die Sanierungszustände „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“ und erst ab einem Investitionszeitpunkt in 2025 oder später systematisch unter den Kapitalwerten der Technikoption ohne Solarthermieanlage.

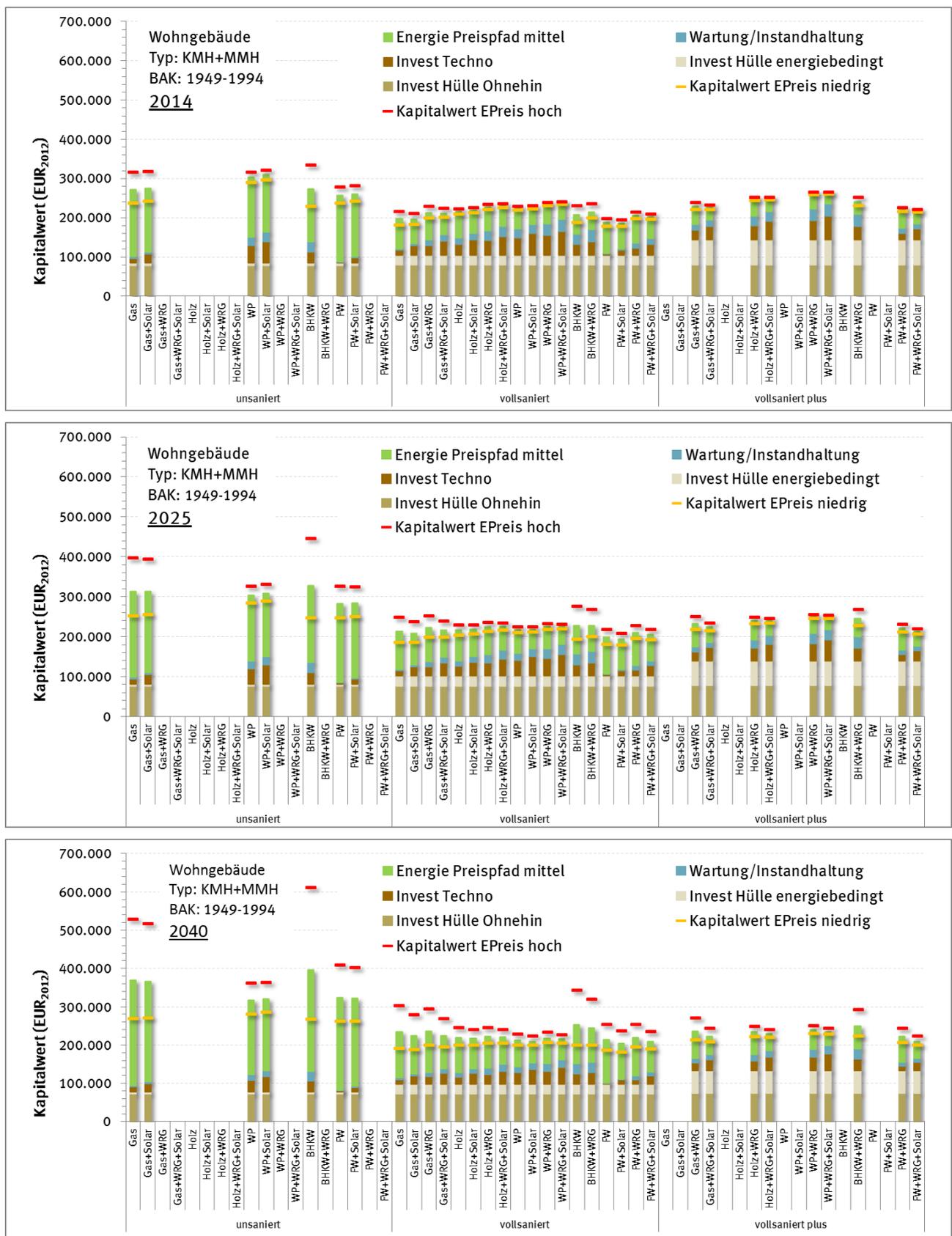
Die Installation einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung führt bei EZFH und KMH/MMH hinsichtlich der gewählten Kostenansätze tendenziell zu deutlich höheren Kapitalwerten als die Ausgangstechnik (z.B. Wärmepumpe) mit/ohne Kombination mit einer Solarthermieanlage (mittlerer Energiepreispfad). Ausnahme ist die Kombination einer solchen Lüftungsanlage mit einem BHKW. Bei dieser Kombination liegen ab einem Investitionszeitpunkt nach 2040 die Kapitalwerte der Option mit Lüftungsanlage im mittleren Energiepreispfad systematisch unter der Option ohne Lüftungsanlage. Bei GMH liegt ab einem Investitionszeitpunkt in 2040 oder später der Kapitalwert für die Option mit Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung auch in Kombination mit einem Gaskessel sowie einem Anschluss an die Fernwärme unter dem Kapitalwert der jeweiligen Option ohne Lüftungsanlage.

Abbildung 16: Kapitalwerte für ein EZFH in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt



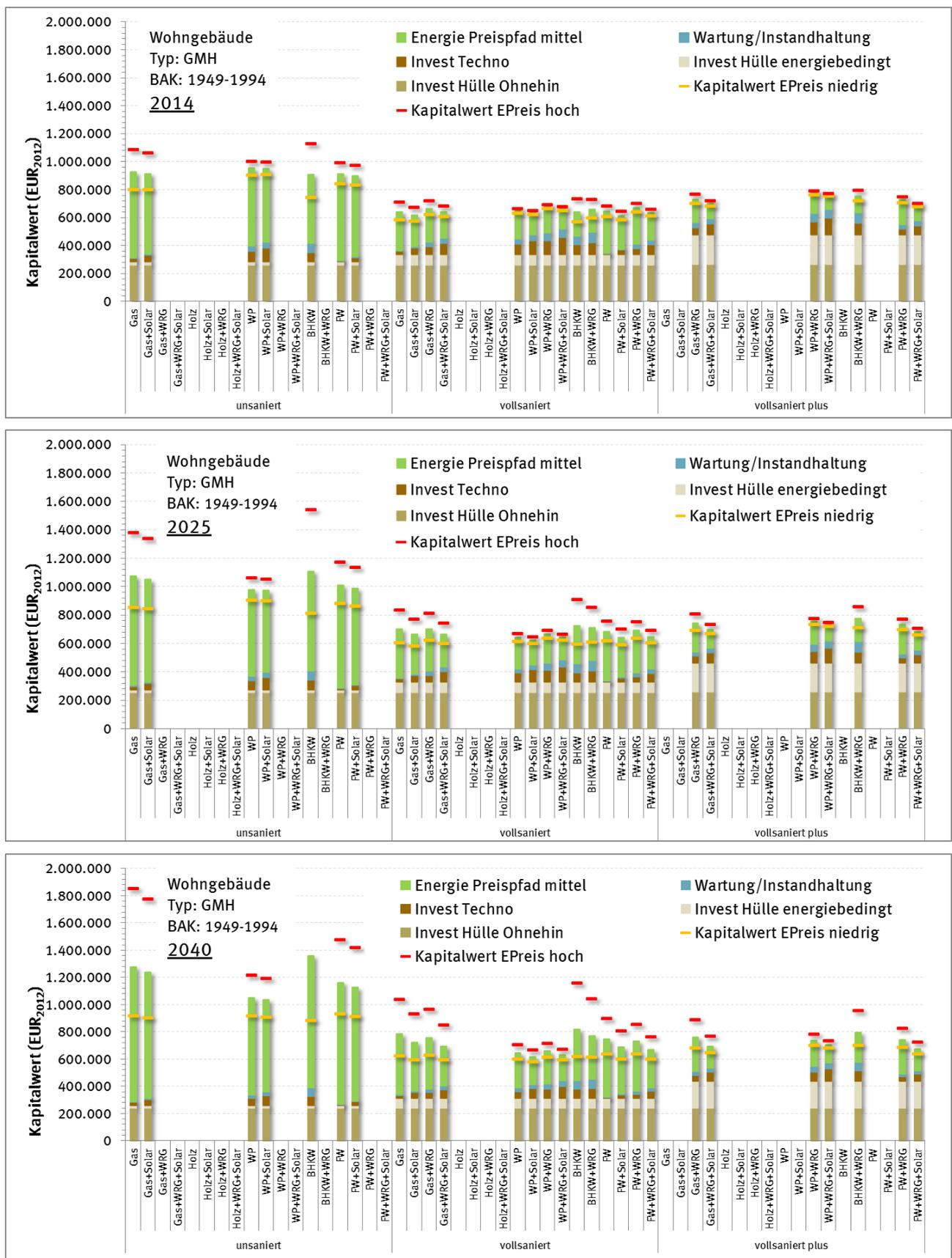
Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 17: Kapitalwerte für ein KMH/MMH in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 18: Kapitalwerte für ein GMH in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

5.3.2 Nichtwohngebäude

Wie bei den Wohngebäuden führt auch bei den Nichtwohngebäuden die große Anzahl an möglichen Kombinationen zu der Notwendigkeit, gezielt Gebäudetypen und Baualtersklassen herauszugreifen und anhand dieser exemplarisch die Kostensituation darzustellen. Es werden folgende Nichtwohntypgebäude näher betrachtet: a) Wohngebäude mit Mischnutzung (alle Baualtersklassen), b) Bildungs-, Büro- und Verwaltungsgebäude der Altersklasse bis 1983 sowie c) Gewerbe- und Industriegebäude (Baualtersklasse ab 1984). Flächenmäßig dominieren diese Nichtwohngebäudetypen den Nichtwohngebäudebestand als Ganzes und haben damit die höchste Relevanz (vgl. Abbildung 10).

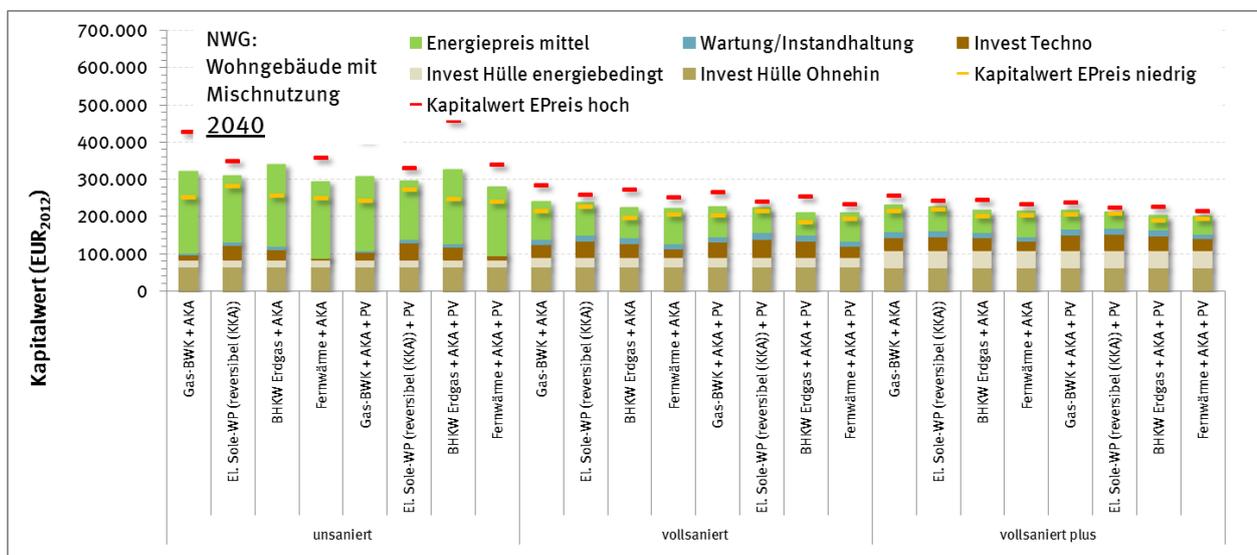
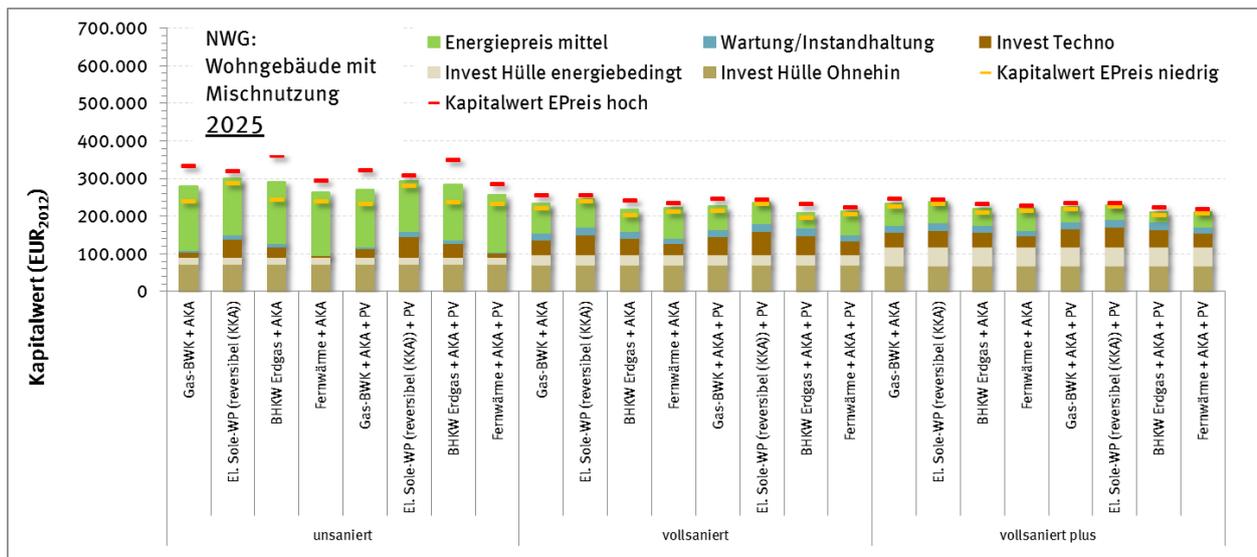
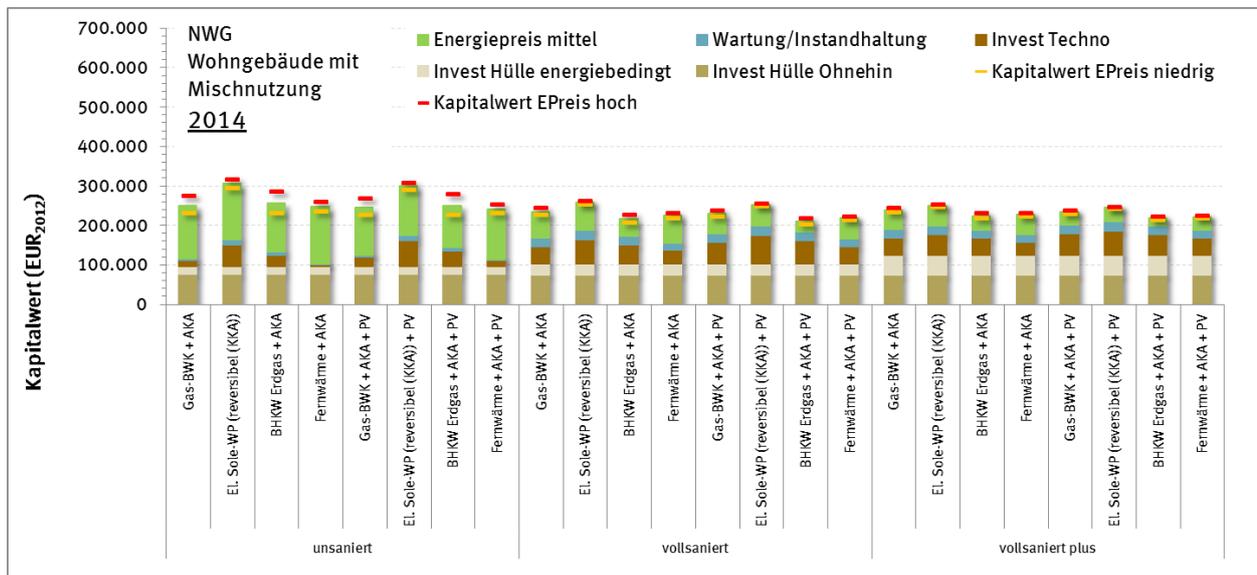
Abbildung 19 bis Abbildung 21 zeigen die Kapitalwerte für Investitionen in die jeweiligen Gebäudetypen in Abhängigkeit des Investitionszeitpunkts (2015, 2025 oder 2040), des Sanierungszustands („unsaniert“, „vollsanert“ und „vollsanert plus“) und des Energiepreisszenarios (niedrig, mittel, hoch, siehe dazu Kapitel 5.2.5). Gezeigt werden außerdem je Sanierungszustand die acht verschiedenen Versorgungstechnikoptionen, bestehend aus den vier Basisvarianten Gas-Brennwertkessel, Sole-Wärmepumpe, BHKW auf Erdgasbasis sowie Fernwärme, jeweils mit und ohne PV-Anlage. Alle Versorgungsoptionen schließen zudem eine Absorptionskältemaschine mit ein, bis auf die Wärmepumpenoption, welche eine Kompressionskältemaschine nutzt.

Erkennbar ist, dass auch im unsanierten Zustand energiebedingte Mehrkosten erscheinen. Dies liegt daran, dass in der gewählten Typologie die unsanierten NWG schon etwas gedämmt sind und somit im Rahmen einer Renovierung, bei der der energetische Zustand nicht verändert wird, diese Dämmschicht ebenfalls ausgetauscht wird. Die damit verbundenen Dämmkosten fallen unter die energiebedingten Mehrkosten. Die verhältnismäßig geringe Differenz bei den energiebedingten Mehrkosten zwischen den Zuständen „unsaniert“ und „vollsanert“ erklärt sich durch die geringe Differenz der Dämmstoffdicken zwischen den beiden Zuständen.

Folgende weiteren allgemeinen Erkenntnisse lassen sich anhand der Abbildungen festhalten (wenn nicht anders beschrieben, beziehen sich die Aussagen auf den mittleren Energiepreispfad):

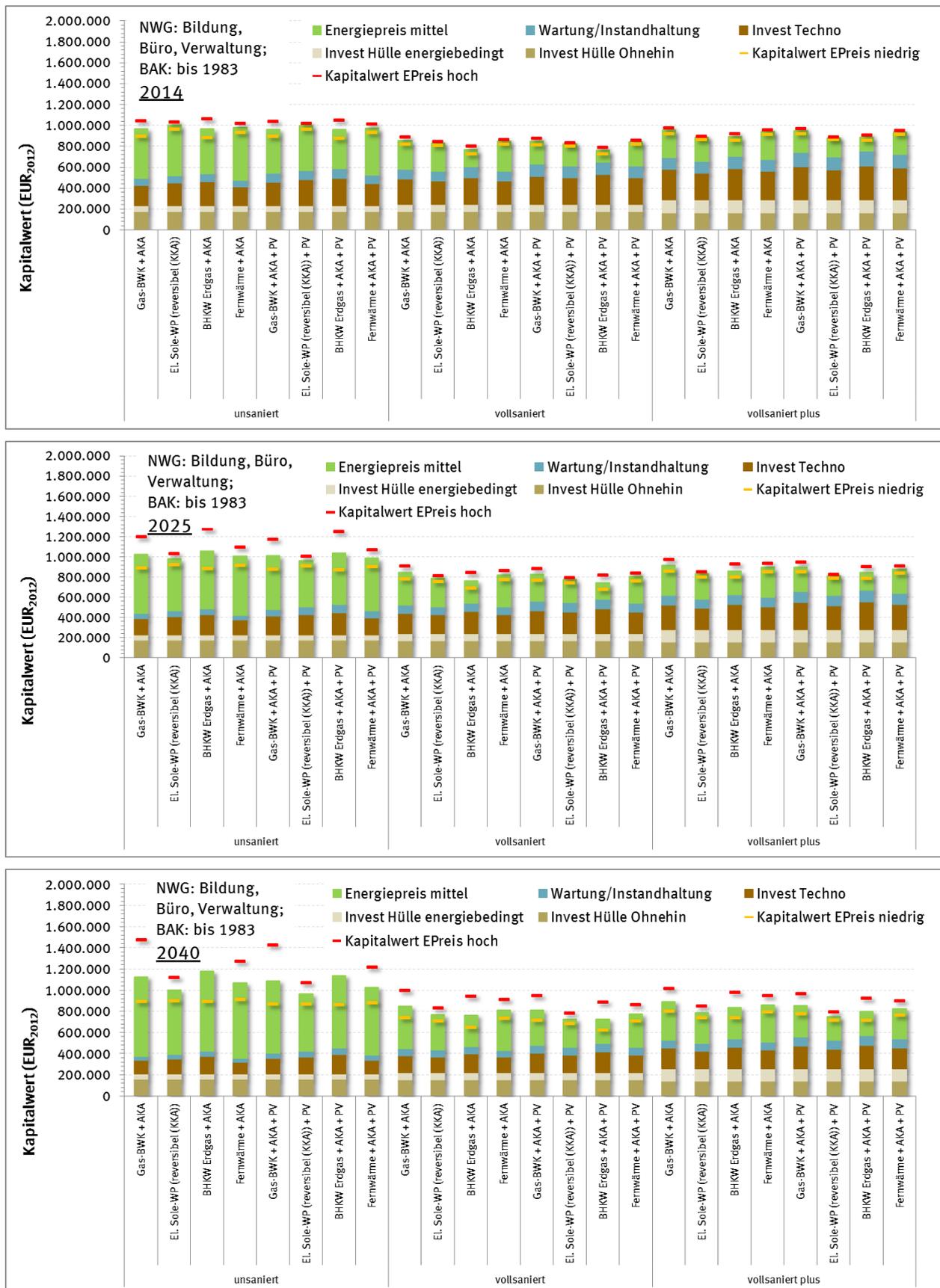
- Je höher der Sanierungsgrad ist, desto geringer fallen die Energiekosten aus und desto geringer ist auch das Energiepreisszenario, welches durch die verschiedenen Energiepreisszenarien vorgegeben wird.
- Die Investition in PV-Anlagen verringert grundsätzlich den Kapitalwert aller Gebäudetypen zu jedem Sanierungszeitpunkt und in jedem Sanierungszustand. Hier zeigt sich, dass die erhöhte Anfangsinvestition in die PV-Anlage durch die Strom-Eigennutzung und die damit verbundene Stromgutschrift mehr als aufgewogen wird.
- Das geringste Energiepreisszenario (sprich die geringste Spreizung zwischen dem niedrigen und dem hohen Energiepreisszenario) innerhalb eines Sanierungszustands bietet die Versorgungsoption der Sole-Wärmepumpe.
- Aufgrund der Lernkurveneffekte liegt der Kapitalwert im Sanierungszustand „vollsanert plus“ bei allen betrachteten Typgebäuden umso niedriger, je später die entsprechende Sanierung stattfindet.

Abbildung 19: Kapitalwerte für ein Nichtwohngebäude mit Mischnutzung in Abh. von Versor-
gungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt



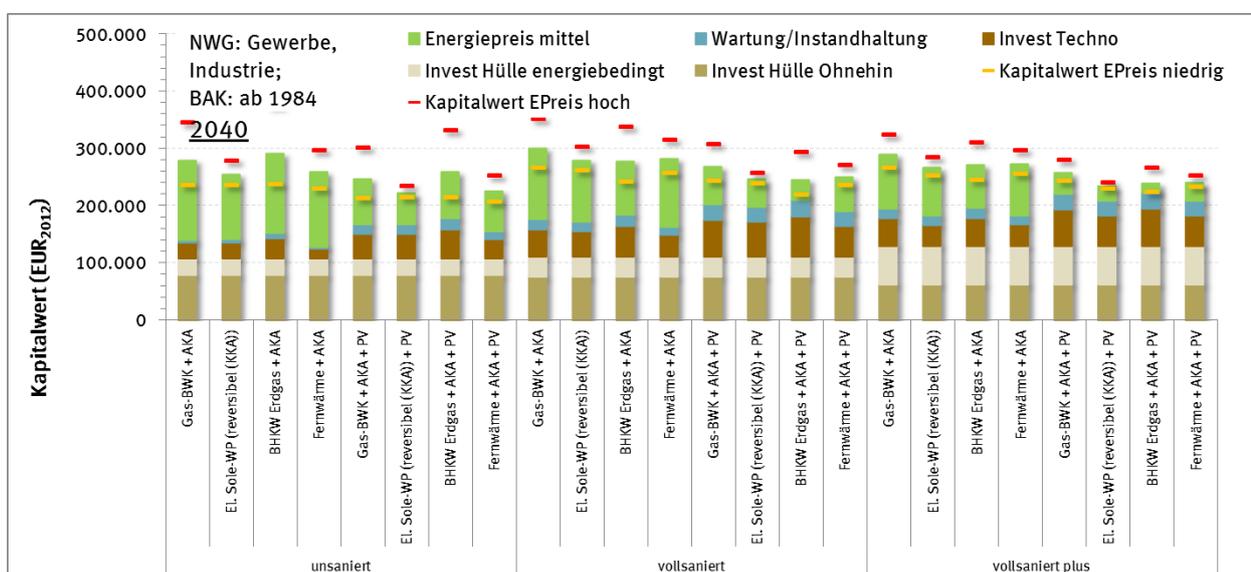
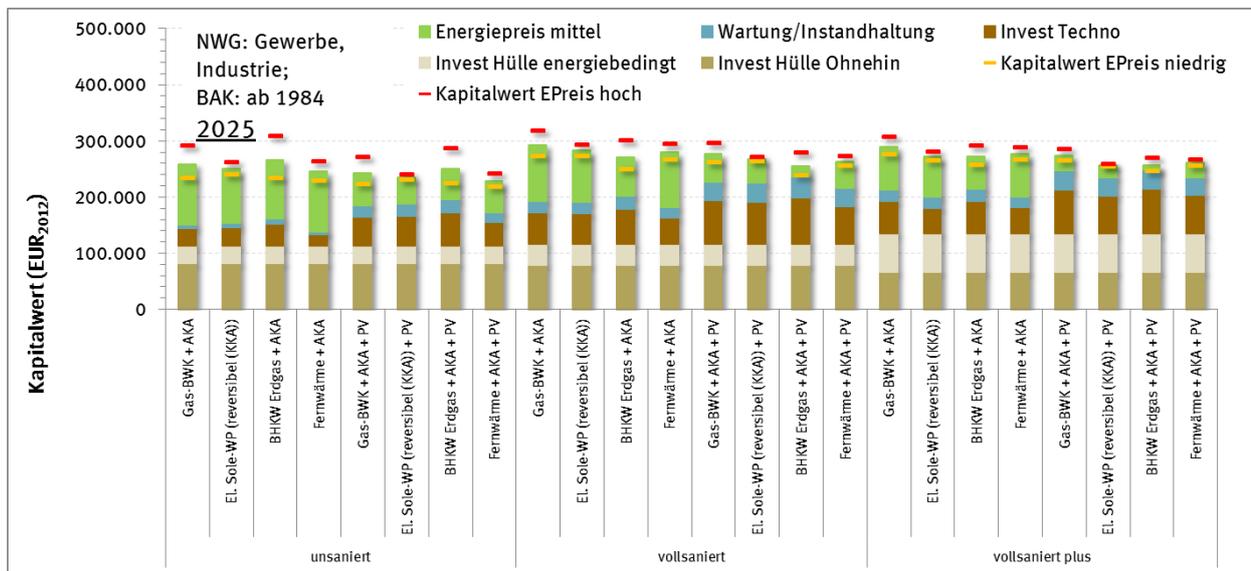
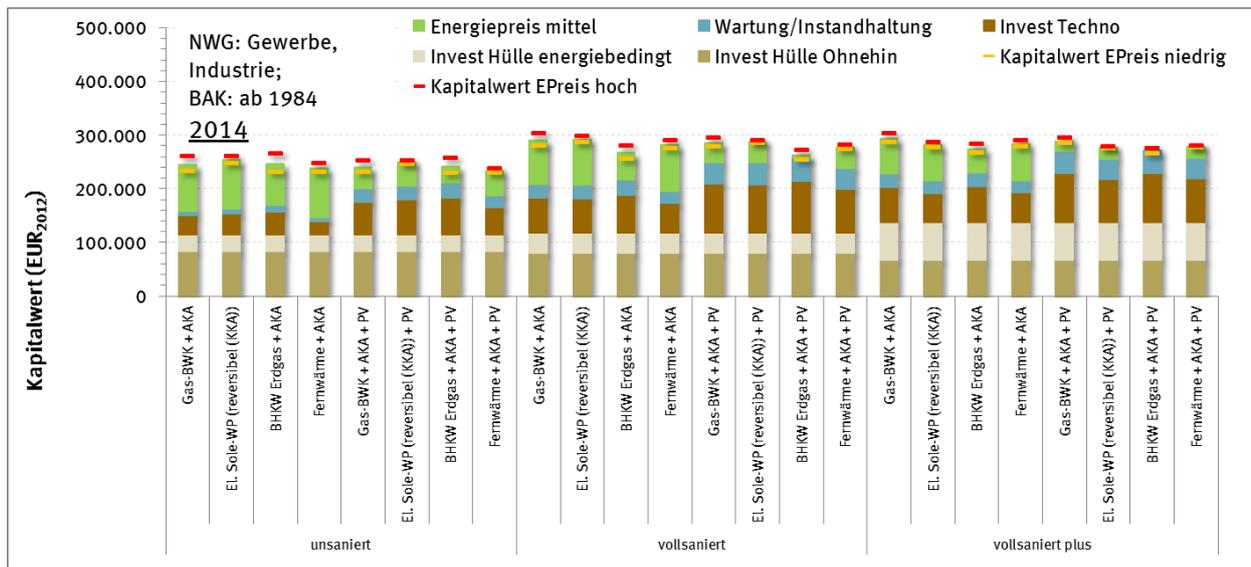
Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 20: Kapitalwerte für Bildungs-, Büro- und Verwaltungsgebäude in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 21: Kapitalwerte für Gewerbe- und Industriegebäude in Abh. von Versorgungstechnik, Wärmeschutzstandard und Investitionszeitpunkt



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

6 Entwicklung verschiedener Zielbilder für das Jahr 2050 sowie Ableitung von Transformationspfaden

6.1 Herangehensweise

6.1.1 Zielsetzung

Wie in Kapitel 2 dargestellt, wird das Ziel des nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes lediglich durch die Reduktion des Primärenergiebedarfs bis 2050 um 80 % quantifiziert. Dabei handelt es sich um den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf PE_{NE} . Das übergeordnete, auf PE_{NE} bezogene Reduktionsziel ist jedoch in Form verschiedener Zielbilder darstellbar (vgl. die ausführliche Diskussion dazu in Kapitel 2.2). Die beiden miteinander verbundenen zentralen Zieldimensionen sind dabei die Reduktion des Endenergiebedarfs („Effizienz der umbauten Technik“) sowie die Zusammensetzung des Endenergeträgermixes (v.a. der darin enthaltene EE-Anteil). Zur Darstellung des möglichen Zielkorridors werden deswegen im Folgenden drei verschiedene Zielbilder entwickelt, die sich hinsichtlich der beiden zentralen Zieldimensionen stark unterscheiden. Es werden sogenannte Transformationspfade abgeleitet, die den heutigen Gebäudebestand (Ist-Zustand) in die jeweiligen Zielbilder im Jahr 2050 überführen. Und es wird untersucht, wie der durch die verschiedenen Zielbilder charakterisierte Gebäudebereich mit dem gesamten Energiesystem interagiert.

6.1.2 Methodik

Die Entwicklung der Zielbilder sowie der Transformationspfade erfolgt nach folgender Methodik:

1. Nachbildung des heutigen Gebäudebestandes (Wohn- und Nichtwohngebäude) anhand der Gebäudetypologie aus Kapitel 4 (Bottom-up-Darstellung); dabei Kalibrierung des Ist-Zustands über die Verteilung der Typgebäude auf die drei definierten Wärmeschutzstandards sowie die verschiedenen Technikoptionen.
2. Entwicklung einer groben Struktur des Gebäudebereichs (Typologie) für das Jahr 2050 unter Berücksichtigung einer unterstellten Entwicklung des Wohn- und Nutzflächenbedarfs sowie weiterer Parameter wie der Abgang- und Neubaurate.
3. Entwicklung von drei zielkonformen Zukunftsbildern des Gebäudebereichs im Jahr 2050 (mit Reduktion des PE_{NE} um 80 %), die sich in den Zieldimensionen „Endenergie-reduktion“ und „EE-Anteil am Endenergeträgermix“ unterscheiden. Die Zielbilder werden dabei zunächst für die beiden Teilbereiche (Wohngebäude, Nichtwohngebäude) getrennt erstellt und dann zusammengeführt. Analog zu Schritt 1 entstehen die Zukunftsbilder über die Bestückung der Struktur der beiden Teilbereiche des Gebäudesektors in 2050 mit den Typgebäuden aus Kapitel 4, allerdings unter Berücksichtigung der unterstellten Flächennachfrage in 2050 sowie einer Neuverteilung der Typgebäude auf die drei verschiedenen Wärmeschutzstandards und Technikoptionen.
4. Ableitung von Transformationspfaden, die den heutigen Gebäudebestand in die jeweiligen Zielbilder überführen. Wesentliche Einflussgrößen sind dabei die Sanierungsraten für Wärmeschutz und Versorgungstechniken sowie die dabei erzielten Sanierungsniveaus.

Bei der Berechnung der Zielbilder werden folgende Setzungen zugrunde gelegt:

- Die Berechnung des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs PE_{NE} erfolgt anhand der Primärenergiefaktoren der DIN-V 18599-1, Anlage A. Infolge der Transformation des Umwandlungssektors ändern sich die Primärenergiefaktoren für Strom und Fernwärme bis 2050 substantiell. Die verwendeten PE-Faktoren sowie CO_2 -Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme orientieren sich an der Entwicklung aus dem KS 80-Szenario des Projektes „Klima-

schutzszenario 2050“ für das BMUB (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014, 1. Modellierungsrunde). Sowohl bei Strom wie auch bei Fernwärme wird dabei für 2050 ein Restsockel fossiler Erzeugungskapazitäten unterstellt.⁴¹

- Die Berechnung des Endenergiebedarfs erfolgt im Sinne der Energiebilanz. Anders als im Rahmen der EnEV werden lokal gewandelte Umweltenergien (Solarthermie und die von Wärmepumpen nutzbar gemachte Umgebungswärme) also endenergetisch bilanziert. Bei Erdgas und Holz bezieht sich dabei der Endenergiebedarf auf den oberen Heizwert.
- Für die Wohngebäude erfolgt die Umrechnung des rechnerischen Endenergiebedarfs in den Endenergieverbrauch anhand der Korrekturfaktoren aus IWU (2012a), dabei wird auch eine Anpassung des Umrechnungsfaktors an die Gebäudenutzfläche A_N sowie den oberen Heizwert vorgenommen. Bei den Nichtwohngebäuden werden die Bedarfs- in die Verbrauchswerte über die Korrekturfaktoren aus BBSR (2015) umgerechnet.
- Der Erdgasbedarf der BHKW wird endenergetisch auf die Strom- und Wärmeerzeugung über die Exergiemethode aufgeteilt.
- Die Darstellung der Kosten erfolgt in Form von Jahreskosten und auf Vollkostenbasis. Die Kosten umfassen die jährlichen Kapitalkosten (annuisierte Investitionskosten) für Renovierung und Modernisierung (energetische Sanierung) der Gebäudehülle und der Versorgungstechniken, die laufenden Kosten für Wartung, Instandhaltung und Energiebezug (Brennstoffe, Strom und Fernwärme) sowie mögliche Erlöse aus der Netzeinspeisung von gebäudenah erzeugtem Strom (z.B. aus BHKWs und PV).

In einem weiteren Schritt (vgl. Kapitel 6.3) wird untersucht, wie die drei verschiedenen Zielbilder mit dem gesamten Energiesystem interagieren bzw. sich mit den Energiewendezielen für das gesamte Energiesystem vertragen. Dabei wird für eine Reihe ausgewählter Indikatoren verglichen, wie sich die drei Zielbilder mit festgelegtem Parametersatz (v.a. bezogen auf die Reduktion des Endenergieverbrauchs des Gebäudesektors) im Vergleich zu einer weitgehend freien Optimierung, bei der sich sowohl die Reduktion des Endenergiebedarfs als auch die Technikverteilung im Gebäudebereich aus einer Gesamtsystemoptimierung ergeben, verhalten.

6.1.3 Darstellung des IST-Zustands

6.1.3.1 Wohngebäude

Die Kalibrierung des Ist-Zustands bei den Wohngebäuden, d.h. die Verteilung der Typgebäude auf die drei Wärmeschutzstandards sowie der verschiedenen Technikoptionen (vgl. Kapitel 4.3) erfolgt über die in nachfolgender Tabelle dargestellten Referenzgrößen.

41

	Primärenergiefaktor (nicht-erneuerbarer Anteil)		CO ₂ -Emissionsfaktor (g/kWh)	
	Strom	Fernwärme	Strom	Fernwärme
2020	1,95	0,66	393	203
2030	1,25	0,61	274	195
2040	0,77	0,55	165	145
2050	0,44	0,50	78	90

Tabelle 46: Referenzgrößen zur Kalibrierung des Ist-Zustands bei Wohngebäuden

Kalibrierungsgröße	Referenz
Gebäudezahl, Flächen (Wohnfläche bzw. A_N), Altersverteilung	Typologie aus Kapitel 4.1.1
Spezifischer flächenbezogener Endenergiebedarf und -verbrauch ($kWh/(m^2 A_N * a)$)	dena-Gebäudereport (dena 2015)
Energieträgerverteilung Endenergieträgermix (prozentuale Energieträgerverteilung bezogen auf die Gebäudezahl, aufgeteilt nach EZFH und MFH (=KMH/MMH/GMH), den drei BAK sowie einem aggregierten Energieträgermix)	Mikrozensus Zusatzerhebung (Destatis 2012)
Installierte Kollektorfläche	BSW (2015)
Anzahl BHKWs	BHKW-Monitoring Öko-Institut
Endenergieverbrauch, differenziert nach Energieträgern	Anwendungsbilanz (AGEB 2013), klimabereinigt

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Kalibrierung des Ist-Zustands wurden zunächst die Typgebäude so auf die drei verschiedenen Wärmeschutzstandards verteilt, dass – bezogen auf eine aggregierte Typologie – die spezifischen Werte für den rechnerischen Endenergiebedarf getroffen werden. Dies führt in Summe zu einem knapp 20 % höheren gesamten Endenergieverbrauch im Vergleich zu den temperaturbereinigten Werten aus der Anwendungsbilanz (jeweils bezogen auf den unteren Heizwert). Ein Teil der Überschätzung erklärt sich durch den Leerstand, der in der Realität nicht oder nur teilbeheizt wird und somit geringere Endenergiebeiträge liefert. Der heutige Wohnflächen-Leerstand in Höhe von rund 0,3 Mio. m^2 (Destatis 2012) reicht aber als alleinige Erklärung für die Abweichung nicht aus.

Die Verteilung der Versorgungstechniken anhand des Mikrozensus führt bezogen auf die Endenergieträgerverteilung (Energieträgermix) ebenfalls zu Abweichungen von der Anwendungsbilanz. Dies lässt sich aber insbesondere über die begrenzten Auswahlmöglichkeiten bei den Technikoptionen erklären. Abweichungen beim Endenergieverbrauch Strom ergeben sich beispielsweise daraus, dass die gewählte Typologie keine Nachtspeicherheizungen erfasst, die einen Großteil des Endenergieverbrauchs Strom verantworten.

Im Ergebnis kann anhand der gewählten Typologie der heutige Bestand an Wohngebäuden bezogen auf einige, jedoch nicht alle Kalibrierungsgrößen verhältnismäßig gut abgebildet werden. Bei der Bewertung der Abweichungen ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Rahmen des gewählten Bottom-up-Ansatzes infolge der begrenzten Anzahl an Typgebäuden, Wärmeschutzstandards und Technikoptionen Abweichungen in dieser Größenordnung durchaus nicht überraschen.

6.1.3.2 Nichtwohngebäude

Die Kalibrierung des Ist-Zustands der Nichtwohngebäude erfolgt über die in Tabelle 47 dargestellten Referenzgrößen. Für die Kalibrierung des Ist-Zustands der Nichtwohngebäude wurde versucht, analog zu den Wohngebäuden zunächst den Endenergieverbrauch über eine Verteilung der drei Sanierungszustände je Typgebäude abzubilden. Hierbei zeigt sich, dass eine Kalibrierung über einen Top-down-Ansatz mit Hilfe der Anwendungs- und Energieträgerbilanz (BMWi 2014) zu erheblichen Abweichungen im Vergleich zu einem Bottom-up-Ansatz über empirische spezifische Verbrauchswerte der einzelnen Nichtwohngebäudetypen (eigene Berechnungen auf der Basis von Schlomann et al., 2015) führt. Da die Datenlage zu Nichtwohngebäuden im Allgemeinen wesentlich schlechter ist als diejenige für Wohngebäude, wurde ein Mittelweg zwischen den beiden Ansätzen gewählt. Hierbei wurde für das Ausgangsjahr 2013 je Typgebäude eine Verteilung auf die Sanierungszustände „unsaniert“, „vollsanert“ und „vollsanert plus“ von jeweils 79 %, 20 % und 1 % gewählt. Daraus resultiert ein Endenergieverbrauch, der etwa 8,5 % unter dem Wert liegt, den die Anwendungsbilanz

ausweist. Die gewählte Verteilung auf die Sanierungszustände führt aber gleichzeitig zu gebäudespezifischen Verbrauchswerten, die um rund 25 % über denen aus dena (2015) liegen. In einem zweiten Schritt wurde anhand dena (2015) die Verteilung der Versorgungstechniken auf die Typgebäude vorgenommen.

Die im Rahmen der Kalibrierung identifizierten teilweise erheblichen Abweichungen lassen sich nicht eindeutig erklären. Abweichungen resultieren sicherlich aus den gewählten Vereinfachungen, die notwendig waren, um den sehr heterogenen Bestand an Nichtwohngebäuden anhand einer vereinfachten Typologie abzubilden. Gleichzeitig können keine belastbaren Aussagen darüber getroffen werden, inwieweit die Datenquellen, anhand derer die Kalibrierung des Ist-Zustands vorgenommen wurde, miteinander korrelieren.

Tabelle 47: Referenzgrößen zur Kalibrierung des Ist-Zustands bei Nichtwohngebäuden

Kalibrierungsgröße	Referenz
Gebäudezahl, Flächen (Nettogeschossfläche), Altersverteilung	Typologie aus Kapitel 4.3.1
Spezifischer flächenbezogener Endenergiebedarf und -verbrauch (kWh/(m ² *a))	Eigene Berechnungen auf Basis von Schloman et al. (2015) und BMVBS (2013)
Energieträgerverteilung Endenergieträgermix	Eigene Berechnungen auf Basis dena-Gebäudereport (dena 2015)
Installierte PV Leistung	Eigene Berechnungen auf Basis BMWi (2014), Braun et al. (2012) und Kelm et al. (2014)
Anzahl BHKWs	BHKW-Monitoring Öko-Institut
Endenergieverbrauch, differenziert nach Energieträgern	Eigene Berechnungen nach BMWi (2014), klimabereinigt

Quelle: Eigene Darstellung

6.2 Darstellung der Zielbilder und Transformationspfade

Für den Gebäudebereich im Jahr 2050 wird eine Entwicklung der Wohn- bzw. Nutzfläche anhand bestehender Langfristszenarien unterstellt. Trotz sinkender Bevölkerung geht beispielsweise Prognos et al. (2014) in der Referenzprognose für die Bundesregierung davon aus, dass die Wohnfläche bis 2050 um rund 7 % steigt (Anstieg der Wohnfläche in EZFH um 12 %, in KMH und MMH um 0,5 %, kein Zubau neuer GMH). Die Entwicklung der Nutzfläche bei den Nichtwohngebäuden bewerten die bestehenden Langfristszenarien (z.B. Prognos et al. 2014, Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014, Prognos et al. 2010) jedoch uneinheitlich. Hier wird für 2050 eine gleichbleibende Nutzfläche angenommen.

Zu berücksichtigen ist zudem der Neubau und Abgang an Gebäuden. Der Abgang umfasst Rückbau/Abriss sowie den unbeheizten Leerstand. Teilbeheizter Leerstand wird hingegen nicht berücksichtigt.

Für die Wohngebäude wird eine über die Jahre hinweg konstante Abgangrate von 0,3 % pro Jahr (bezogen auf die gesamte Wohnfläche des Vorjahres) angenommen (IWU 2013). Damit würden bis zum Jahr 2050 rund 12 % der heutigen Wohnfläche aus dem Markt genommen. Der Abgang betrifft dabei nur Gebäude mit Baujahr vor 1995 im Zustand „unsaniert“. Die Neubaurate ergibt sich aus der Wohnflächenentwicklung sowie der Abgangsrate. Aus der unterstellten Wohnflächenentwicklung folgt eine Neubaurate (bezogen auf die gesamte Wohnfläche des Vorjahres) von ca. 0,85 % in 2015. Bis zum Jahr 2050 sinkt die Rate auf etwa 0,2 %/a. Damit würden bis 2050 rund 735 Mio. m² Wohnfläche neu zugebaut werden. Bezogen auf die Wohnfläche in 2050 beträgt dieser Anteil rund 18 %. Der Zubau erfolgt überwiegend im Standard „vollsaniert plus“.

Bei den Nichtwohngebäuden wird eine konstante Abgang- und gleichzeitig Neubaurate von 1,35 % pro Jahr angenommen, was einem Durchschnitt der Baufertigstellungen der Jahre 2004 bis 2013 entspricht (Destatis 2014). Dies führt dazu, dass bis zum Jahr 2050 knapp die Hälfte der Nutzfläche aller Nichtwohngebäude „ausgetauscht“ wird.

Die Grundidee der Zielbilder besteht darin, möglichst unterschiedliche Varianten aufzuzeigen, wie ein nahezu klimaneutraler Gebäudesektor in 2050 bei Einhaltung des Ziels, PE_{NE} um 80 % zu reduzieren, aussehen könnte. Es geht also darum, einen möglichst breiten Zielkorridor aufzuspannen. Insofern werden drei Zielbilder entwickelt, die sich insbesondere in der Reduktion des Endenergiebedarfs und damit verbunden dem EE-Anteil an der thermischen Gebäudekonditionierung unterscheiden.

In einem ersten Schritt werden jeweils drei getrennte Zielbilder für den Wohn- und Nichtwohngebäudebereich entwickelt. Die Zielbilder der beiden Teilbereiche werden daraufhin zusammengeführt und damit Zielvisionen für den gesamten Gebäudebereich entworfen.

- Für die Zielbilder der Wohngebäude wird der Endenergieverbrauch um 40 % (WG Zielbild -40 %), 55 % (WG Zielbild -55 %) bzw. 70 % (WG Zielbild -70 %) reduziert. Das WG Zielbild -70 % setzt also vorwiegend auf Effizienz. Im WG Zielbild -40 % wird hingegen der Endenergieverbrauch wesentlich weniger reduziert, entsprechend höhere EE-Anteile werden notwendig, um das übergeordnete Ziel PE_{NE} -80 % zu erreichen.
- Die Beschaffenheit der Nichtwohngebäude lässt keine so starke Reduktion des Endenergieverbrauchs zu. Die Zielbilder orientieren sich auch hier an der maximal erreichbaren Endenergieeinsparung. Der Zielkorridor reicht von einer Endenergieeinsparung von 25 % (NWG Zielbild -25 %), über 35 % (NWG Zielbild -35 %) bis hin zu 45 % (NWG Zielbild -45 %). Eine PE_{NE} -Reduktion von 80 % wird auch hier in allen Zielbildern erreicht.

Die Reduktion des Endenergieverbrauchs bezieht sich dabei auf die Endenergie-Definition im Sinne der Energiebilanz. Anders als bei der EnEV führt dies dazu, dass der Endenergieverbrauch nicht durch den Einsatz gebäudenaher Umweltenergien (z.B. Solarthermie, Umgebungswärme) gesenkt werden kann. Die Reduktion bedingt vielmehr insbesondere verstärkte Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle. Im Rahmen der Zielbilder beziehen sich die auf den Endenergiebedarf bezogenen Reduktionswerte jeweils auf die im Rahmen der gewählten Methodik erzielten Ausgangswerte (siehe oben und Kapitel 6.2.3).

Die energetische Modernisierung von Gebäuden unterliegt einer Vielzahl verschiedener Restriktionen. Dämmrestriktionen finden sich z.B. an der Hüllfläche von nahezu allen Gebäuden. Die Dämmrestriktionen resultieren u.a. aus schützenswerten Fassaden (u.a. Denkmalschutz), geometrischen Einschränkungen bei der Überdämmung des Gehweges oder der Dämmung von Hofdurchfahrten oder zu niedrigen Kellerdecken (ausführlich dazu vgl. Jochum et al. 2012). Die Dämmrestriktionen führen dazu, dass nicht alle Gebäude auf den höchstmöglichen Wärmeschutzstandard saniert werden können. Im Rahmen der Zielbilder wird diesem Effekt Rechnung getragen, indem für das Zieljahr 2050 ein Sockel unsanierter Gebäude unterstellt wird. Diese repräsentieren sowohl die aufgrund von Restriktionen gar nicht sanierbaren aber auch die nur teilweise sanierbaren Gebäude (im Sinne einer „Voll-Nichtsanierrate“). Die Sockelwerte differenzieren nach Gebäudetyp und Baualtersklasse (vgl. Tabelle 49). Der verhältnismäßig hohe Sockelwert bei den Mehrfamilienhäusern der Baualtersklasse bis 1948 reflektiert z.B. die Gründerzeitbauten, die aufgrund ihrer Sichtfassaden nur eingeschränkt sanierbar sind.

Tabelle 48: Zentrale Annahmen für die Zielbilder

	Wohngebäude	Nichtwohngebäude
Neubaurate	absinkend von 0,85% in 2015 auf	konstant 1,35% pro Jahr

Abgangrate	0,2% in 2050 konstant 0,3% pro Jahr			konstant 1,35% pro Jahr		
Flächenentwicklung bis 2050	+ 7%			+/- 0%		
Zielbilder	Zielbild -70	Zielbild -55	Zielbild -40	Zielbild -45	Zielbild -35	Zielbild -25
Reduktion Endenergieverbrauch bis 2050	-70%	-55%	-40%	-45%	-35%	-25%
Reduktion nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf PE _{NE} bis 2050	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 49: Sockel unsanierbarer Gebäude (bezogen auf die Wohn- bzw. Nutzfläche der unsanierten Gebäude im jeweiligen Ist-Zustand)

Baualterklasse	EZFH	KMH/MMH/GMH	NWG
bis 1948	10%	20%	2,5-10%
1949-1994	5%	5%	(abhängig von der Nutzungsart des Gebäudes)
ab 1994	0%	0%	

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Eine weitere Restriktion besteht beim Einsatz von Holz in der zukünftigen Wärmeversorgung der Gebäude. Nach UBA (2014) ist das Potenzial nachhaltiger holzartiger Reststoffe in 2050 auf rund 85 TWh/a beschränkt (inkl. Industrierestholz und Altholz). Zur thermischen Versorgung der Wohngebäude steht also nur diese Energiemenge zur Verfügung (die gewählte Typologie sieht im Bereich der Nichtwohngebäude keinen Einsatz von Holz vor).

In Hinblick auf die zukünftige Verteilung der Versorgungstechniken wurde angenommen, dass der Anschlussgrad von Gebäuden an das Fernwärmenetz bezogen auf den Ist-Zustand weitgehend konstant bleibt, d.h. kein nennenswerter Ausbau der Fernwärme erfolgt. Bei den Wohngebäuden wird der Anteil an Pelletheizungen durch das maximal zu Verfügung stehende Potenzial an Holz begrenzt. Der Ausbau gasbetriebener BHKW erfolgt moderat. Damit verbleiben als wesentliche Stellschrauben bezogen auf die Versorgungstechniken die Anteile an Gaskesseln sowie Wärmepumpen.

6.2.1 Wohngebäude

6.2.1.1 Zielbild -70 %

Für das Zielbild -70 % werden die sanierbaren Wohngebäude zunächst so auf die drei verschiedenen energetischen Zustände „unsaniert“, „vollsanziert“ und „vollsanziert plus“ verteilt, dass sich eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um 70 % einstellt. Dabei stellt sich heraus, dass eine solch starke Reduktion anhand der zugrunde gelegten Typgebäude und bezogen auf die gewählten Definitionen – Reduktion des Endenergieverbrauchs (nicht des rechnerischen Bedarfs), Endenergie-Definition im Sinne der Energiebilanz (nicht der EnEV) – gar nicht möglich ist. Denn werden alle prinzipiell sanierbaren Wohngebäude (jenseits des unsanierbaren Sockels) in den Zustand „vollsanziert plus“ versetzt, erhält man „lediglich“ eine Reduktion des Endenergieverbrauchs von rund 68 %. Dabei muss berücksichtigt werden, dass alle sanierten Gebäude über eine RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung verfügen (mit entsprechenden Reduktionsbeiträgen bezogen auf den Endenergieverbrauch).

Der Aufbau eines Sanierungsmarktes, der energetische Modernisierungen im erforderlichen Volumen und insbesondere der erforderlichen Tiefe leisten kann, benötigt einen gewissen zeitlichen Vorlauf.

Es wurde deswegen angenommen, dass die Sanierungsraten zwischen 2014 und 2020 langsam ansteigen und erst ab 2021 in der Größenordnung von 2 % möglich sind. Die Sanierungsrate bezieht sich dabei auf die sanierte Wohnfläche, sie ergibt sich also aus dem Verhältnis der sanierten Wohnfläche zur gesamten Wohnfläche im Jahr X. Teilsanierungen, d.h. die Sanierung einzelner Bauteile, werden in Form einer äquivalenten Vollsanierungsrate subsummiert. Im Zielbild -70 % liegt die Sanierungsrate für Sanierungen von den Zuständen „unsaniert“ bzw. „vollsaniert“ auf „vollsaniert plus“ zwischen 2014 und 2020 bei durchschnittlich 0,7 % pro Jahr. Im Zeitraum 2021 bis 2050 beträgt sie dann rund 2,5 %/a. Da die beiden möglichen Sanierungszustände („vollsaniert“ und „vollsaniert plus“) auf sehr ambitionierte energetische Niveaus führen („vollsaniert“ entspricht einer 25 % Unterschreitung der Anforderungen der EnEV 2009 an einen Neubau), sind die abgeleiteten Sanierungsraten bezogen auf ihre Wirkung (in Form erzielter Endenergieeinsparungen) nicht mit den Sanierungsraten vergleichbar, wie sie z.B. in IWU (2010) berechnet wurden. Denn Letztere spiegeln Sanierungen wider, die in der Mehrzahl auf weitaus anspruchslosere energetische Niveaus führen.

Die Reduktion des Endenergieverbrauchs um 68 % führt zu einer starken Reduktion von P_{ENE}. Für den Zielwert von minus 80 % fehlt allerdings noch ein gewisser Zielbeitrag, der durch den Versorgungstechnikmix erbracht werden muss. Der Technikmix wird dabei so eingestellt, dass das Ziel P_{ENE} minus 80 % gerade erreicht wird. Dies ist z.B. mit der in Tabelle 51 dargestellten Technikverteilung denkbar. Es wären aber auch andere Verteilungen möglich (z.B. weniger Wärmepumpen zu Gunsten von mehr Holz). Weitere Annahmen beziehen sich auf den Anteil von Solarkollektoren (s. Tabelle 52). Im Zielbild -70 % werden diese auf eine Kollektorgesamtfläche von rund 53 Mio. m² ausgeweitet.

Die Technikverteilung zeigt deutlich, dass in einem Zielbild, welches insbesondere auf die Zieldimension „Effizienz“ setzt, nur verminderte Anstrengungen unternommen werden müssen, die Wärmeversorgung auf erneuerbare Energieträger umzustellen.

Tabelle 50: Verteilung der Wohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -70 % (Bezugsgröße Wohnfläche)

	bis 1948	1949-1994	ab 1994
EZFH			
unsaniert	9%	4%	0%
vollsaniert	0%	0%	0%
vollsaniert plus	91%	96%	100%
KMH/MMH/GMH			
unsaniert	15%	4%	0%
vollsaniert	0%	0%	0%
vollsaniert plus	85%	96%	100%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 51: Versorgungstechnikmix Wohngebäude im Zielbild -70 %

		Gaskessel	Gaskessel+WRG	Holzessel	Holzessel+WRG	Wärmepumpe	Wärmepumpe+WRG	BHKW	BHKW+WRG	FW	FW+WRG
EZFH	unsaniert	80%		5%		10%		5%			
EZFH	vollsaniert	61%	8%	4%	1%	20%	5%	1%	0%		
EZFH	vollsaniert plus		53%		5%		42%		0%		
KMH+MMH	unsaniert	55%		5%		10%		5%		25%	

KMH+MMH	vollsanziert	49%	8%	4%	1%	10%	2%	1%	0%	20%	5%
KMH+MMH	vollsanziert plus		45%		5%		25%		0%		25%
GMH	unsaniert	65%				5%		5%		25%	
GMH	vollsanziert	58%	12%			4%	1%	1%	0%	20%	5%
GMH	vollsanziert plus		65%				10%		0%		25%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 52: Anteil von Wohngebäuden mit Solarthermie im Zielbild -70 %

	EZFH	KMH/MMH	GMH
unsaniert	20%	10%	5%
vollsanziert	40%	25%	10%
vollsanziert plus	40%	25%	10%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

6.2.1.2 Zielbild -55%

Auch hier wird in einem ersten Schritt das auf den Endenergieverbrauch bezogene Reduktionsziel - 55 %) über eine Verteilung der Wohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände eingestellt. Wie aus Tabelle 53 ersichtlich kann aufgrund des geringeren Reduktionsziels ein größerer Anteil an Wohnfläche komplett unsaniert (bzw. teilsaniert) bleiben. Für rund ein Drittel aller Wohngebäude reicht es, auf den Zustand „vollsanziert“ zu gelangen. Dennoch müsste auch hier in allen Gebäudekategorien (Ausnahme MFH mit BAK bis 1948) deutlich mehr als die Hälfte der Wohnfläche in den Zustand „vollsanziert plus“ versetzt werden, was einer Passivhaussanierung entspricht.

Im Zielbild -55 % liegt die Sanierungsrate für Sanierungen vom Zustand „unsaniert“ auf „vollsanziert“ zwischen 2014 und 2020 bei durchschnittlich 0,4 % pro Jahr (bezogen auf die gesamte Wohnfläche). Im Zeitraum 2021-2050 beträgt diese (Teil)Sanierungsrate dann durchschnittlich 0,6 %/a. Für die Sanierung von „unsaniert“ bzw. „vollsanziert“ auf den Zustand „vollsanziert plus“ liegt die Sanierungsrate im Zeitraum 2014 bis 2020 bei durchschnittlich 0,2 % pro Jahr. In 2012 bis 2050 steigt sie auf durchschnittlich rund 1,3 %/a. In Summe ergibt sich für den Zeitraum 2021 bis 2050 eine Sanierungsrate von durchschnittlich rund 1,9 % pro Jahr.

Der Zielbeitrag der Endenergieverbrauchsminderung auf das Reduktionsziel bezogen auf P_{ENE} ist im Zielbild -55 % geringer als im Zielbild -70 %. Dem zufolge muss eine größere Lücke über einen geänderten Technikmix geschlossen werden. Eine mögliche zielerfüllende Technikkombination zeigt Tabelle 54 in Verbindung mit Tabelle 55 (Anteil Solarthermie). Im Vergleich zum Zielbild -70 % sind deutlich höhere Anteile an Wärmepumpen und Holzheizungen erforderlich, um P_{ENE} im gewünschten Maße zu senken. Die höheren EE-Anteile gehen v.a. zu Lasten der Gaskessel mit ihrem hohen nicht-erneuerbaren Primärenergieanteil. Die gesamte Kollektorfläche beläuft sich auf rund 62 Mio. m².

Tabelle 53: Verteilung der Wohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -55 % (Bezugsgröße Wohnfläche)

	bis 1948	1949-1994	ab 1994
EZFH			
unsaniert	13%	6%	0%
vollsanziert	32%	35%	37%
vollsanziert plus	55%	59%	63%
KMH/MMH/GMH			
unsaniert	22%	8%	1%

	bis 1948	1949-1994	ab 1994
vollsaniiert	29%	34%	37%
vollsaniiert plus	49%	58%	62%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 54: Versorgungstechnikmix Wohngebäude im Zielbild -55 %

		Gaskessel	Gaskessel+WRG	Holzessel	Holzessel+WRG	Wärmepumpe	Wärmepumpe+WRG	BHKW	BHKW+WRG	FW	FW+WRG
EZFH	unsaniert	36%		25%		34%		5%			
EZFH	vollsaniiert	22%	8%	15%	5%	39%	10%	1%	0%		
EZFH	vollsaniiert plus		25%		15%		60%		0%		
KMH+MMH	unsaniert	22%		15%		28%		10%		25%	
KMH+MMH	vollsaniiert	28%	8%	5%	5%	28%	8%	1%	0%	20%	5%
KMH+MMH	vollsaniiert plus		20%		5%		50%		0%		25%
GMH	unsaniert	58%				8%		10%		25%	
GMH	vollsaniiert	48%	12%			12%	2%	1%	0%	20%	5%
GMH	vollsaniiert plus		60%				15%		0%		25%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 55: Anteil von Wohngebäuden mit Solarthermie im Zielbild -55 %

	EZFH	KMH/MMH	GMH
unsaniert	30%	10%	5%
vollsaniiert	50%	25%	10%
vollsaniiert plus	50%	25%	10%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

6.2.1.3 Zielbild -40 %

Im Zielbild -40 % wird der Endenergieverbrauch „nur“ um 40 % gesenkt. Dies erlaubt, noch mehr Wohngebäude unsaniert (bzw. teilsaniert“) zu belassen als im Zielbild -55 %. Hinzu kommt, dass nur etwa 10-15 % der gesamten Wohnfläche mit Passivhauskomponenten vollsaniiert werden müsste. Beim Gros der Gebäude reicht die Sanierung in den Standard „vollsaniiert“, was in etwa einer Unterschreitung des in 2015 geltenden Neubaustandards (EnEV 2009) um 25 % entspricht (s. Tabelle 56).

Im Zielbild -40 % liegt die Sanierungsrate für Sanierungen vom Zustand „unsaniert“ auf „vollsaniiert“ zwischen 2014 und 2020 bei durchschnittlich 0,4 % pro Jahr (bezogen auf die gesamte Wohnfläche). Im Zeitraum 2021 bis 2050 beträgt diese (Teil)Sanierungsrate dann durchschnittlich ca. 1,3 %/a. Für die Sanierung von „unsaniert“ bzw. „vollsaniiert“ auf den Zustand „vollsaniiert plus“ liegt die Sanierungsrate im Zeitraum 2014 bis 2020 bei durchschnittlich 0,1 % pro Jahr. In 2012 bis 2050 steigt sie auf durchschnittlich rund 0,25 %/a. In Summe ergibt sich für den Zeitraum 2021 bis 2050 eine Sanierungsrate von durchschnittlich ca. 1,5 %/a.

Anstelle höherer Anstrengungen im Bereich des Wärmeschutzes müssen sehr große Minderungsbeiträge bezogen auf PE_{NE} aus den Versorgungstechniken kommen. In der in Tabelle 57 gewählten Technikkombination wird das zur Verfügung stehende Potenzial an Holz weitgehend ausgeschöpft.

Der Anteil an Wärmepumpen steigt in den beiden Sanierungszuständen „voll saniert“ und „voll saniert plus“ bei EZFH auf 70 % und bei kleinen und mittelgroßen MFH (KMH+MMH) auf 60 %. Aber auch bei den unsanierten Gebäuden muss ein verhältnismäßig hoher Anteil (wesentlich ineffizienterer) Wärmepumpen eingesetzt werden, um das Primärenergieziel zu erreichen. Ferner sind sehr hohe Durchdringungsraten von Solarkollektoren von Nöten (s. Tabelle 58). Die gesamte Kollektorfläche beläuft sich auf rund 71 Mio. m².

Tabelle 56: Verteilung der Wohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -40 % (Bezugsgröße Wohnfläche)

	bis 1948	1949-1994	ab 1994
EZFH			
unsaniert	18%	9%	1%
voll saniert	71%	79%	77%
voll saniert plus	11%	12%	23%
KMH/MMH/GMH			
unsaniert	29%	12%	1%
voll saniert	61%	76%	77%
voll saniert plus	9%	12%	22%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 57: Versorgungstechnikmix Wohngebäude im Zielbild -40 %

		Gaskessel	Gaskessel+WRG	Holzessel	Holzessel+WRG	Wärmepumpe	Wärmepumpe+WRG	BHKW	BHKW+WRG	FW	FW+WRG
EZFH	unsaniert	30%		25%		40%		5%			
EZFH	vollsaniiert	13%	1%	15%	5%	55%	10%	1%	0%		
EZFH	vollsaniiert plus		15%		15%		70%		0%		
KMH+MMH	unsaniert	10%		15%		40%		10%		25%	
KMH+MMH	vollsaniiert	2%	2%	5%	5%	50%	10%	1%	0%	20%	5%
KMH+MMH	vollsaniiert plus		10%		5%		60%		0%		25%
GMH	unsaniert	55%				10%		10%		25%	
GMH	vollsaniiert	42%	7%			20%	5%	1%	0%	20%	5%
GMH	vollsaniiert plus		50%				25%		0%		25%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 58: Anteil von Wohngebäuden mit Solarthermie im Zielbild -40 %

	EZFH	KMH/MMH	GMH
unsaniert	40%	10%	5%
vollsaniiert	60%	25%	10%
vollsaniiert plus	60%	25%	10%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

6.2.2 Nichtwohngebäude

6.2.2.1 Zielbild -45 %

Für das Zielbild -45 % werden alle Nichtwohngebäude jenseits des unsanierbaren Sockels in den Zustand „vollsaniiert plus“ versetzt (s. Tabelle 59). Die daraus resultierende Endenergieeinsparung (Endenergie im Sinne der Energiebilanz) liegt bei rund 42 %. Der maximal mögliche Minderungswert ist damit wesentlich geringer als bei den Wohngebäuden.

Vergleichbar den Wohngebäuden steigt die Sanierungsrate auch bei den Nichtwohngebäuden schrittweise über die Jahre an. Im Zielbild -45 % werden alle Sanierungen mit Passivhauskomponenten durchgeführt („vollsaniiert plus“). Damit spiegelt auch eine verhältnismäßig niedrige Sanierungsrate schon eine sehr ambitionierte Sanierungsaktivität wider. Die Sanierungsrate auf den Zustand „vollsaniiert plus“ liegt in den ersten Jahren bei rund 0,3 %/a, steigt dann für die Periode 2021 bis 2030 auf rund 1,1 %/a und erreicht schließlich ab 2031 einen Wert von durchschnittlich 1,6 % pro Jahr. Die Sanierungsrate bezieht sich dabei auf die sanierte Nettogeschossfläche. Teilsanierungen, d.h. die Sanierung einzelner Bauteile, werden auch hier in Form einer äquivalenten Vollsanierungsrate subsummiert.

Neben den Wärmeschutzmaßnahmen wird die anvisierte PE_{NE} -Einsparung von 80 % durch eine Änderung des Versorgungstechnikmix erreicht. Auch hier wird der Technikmix so eingestellt, dass das Reduktionsziel zwar erreicht, aber nicht übererfüllt wird (s. Tabelle 60). Wesentliche Stellgröße ist dabei der Anteil an Wärmepumpen (Sole-Wasser). Dieser liegt im Zielbild -45 % zwischen 50 % (NWG unsaniert) und 64 % (NWG saniert). Weiterhin wird angenommen, dass 2050 jedes zweite Nichtwohngebäude über eine PV-Anlage verfügt. Dies führt in etwa zu einer Verdopplung der PV-

Stromerzeugung der NWG, verglichen zur Ausgangssituation. Im Rahmen der gewählten Bilanzierungsmethodik hat dies jedoch weder Einfluss auf die Minderung des Endenergieverbrauchs noch die Primärenergiereduktion.

Tabelle 59: Verteilung der Nichtwohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -45 % (Bezugsgröße: Nettogeschossfläche)

		unsaniert	vollsaniiert	vollsaniiert plus
Wohngebäude mit Mischnutzung	alle BAKs	8%	0%	92%
Bildung, Büro und Verwaltung	bis 1983	8%	0%	92%
Bildung, Büro und Verwaltung	ab 1984	1%	0%	99%
Gewerbe, Industrie	bis 1983	8%	0%	92%
Gewerbe, Industrie	ab 1984	1%	0%	99%
Handel/Dienstleistung, Praxisgebäude	bis 1983	8%	0%	92%
Handel/Dienstleistung, Praxisgebäude	ab 1984	1%	0%	99%
Beherbergung, Gastronomie, Kliniken	bis 1983	9%	0%	91%
Beherbergung, Gastronomie, Kliniken	ab 1984	1%	0%	99%
Sonstige (Sport, Kultur)	alle BAKs	8%	0%	92%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 60: Versorgungstechnikmix Nichtwohngebäude im Zielbild -45 %

	Gas-BWK + AKA	El. Sole-WP (re-versibel) (KKA)	BHKW Erdgas + AKA	Fernwärme + AKA	Gas-BWK + AKA + PV	El. Sole-WP (re-versibel) (KKA) + PV	BHKW Erdgas + AKA + PV	Fernwärme + AKA + PV
unsaniert	14%	25%	5%	6%	14%	25%	5%	6%
vollsaniiert	12%	30%	3%	5%	13%	30%	3%	5%
vollsaniiert plus	12%	30%	3%	5%	13%	30%	3%	5%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

6.2.2.2 Zielbild -35 %

Im Zielbild -35 % ändert sich die Verteilung der sanierten Gebäude zu Gunsten des Standards „vollsaniiert“, d.h. anders als im Zielbild -45 % werden nicht alle sanierbaren Gebäude auf „vollsaniiert plus“ gebracht. Der Anteil an Gebäuden im Zustand „vollsaniiert plus“ sinkt bezogen auf die Nettogeschossfläche auf 50-55 % (Tabelle 61).

Die Sanierungsrate auf den Zustand „vollsaniiert“ steigt von 0,15 %/a in den ersten Jahren über 0,4 %/a in der Dekade 2021 bis 2030 auf durchschnittlich 0,4 %/a ab 2031. Die Sanierungsraten von den Zuständen „unsaniert“ und „vollsaniiert“ auf „vollsaniiert plus“ steigt bis 2030 schrittweise auf einen Wert von durchschnittlich 0,9 %/a. Die Summen-Sanierungsrate erreicht in diesem Zielbild einen niedrigeren Wert als im Zielbild -45 %.

Aufgrund der geringeren Endenergieeinsparung vergrößert sich im Vergleich zum Zielbild -45 % die Lücke zum Reduktionsziel für P_{ENE} (Tabelle 62). Der Anteil an Wärmepumpen liegt deswegen zwischen 50 % (NWG unsaniert) sowie 70 % (NWG saniert); entsprechend sinkt der Anteil der gasbetriebenen Versorgungstechniken (v.a. Gas-Brennwertkessel)

Tabelle 61: Verteilung der Nichtwohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -35 % (Bezugsgröße: Nettogeschossfläche)

		unsaniert	vollsanert	vollsanert plus
Wohngebäude mit Mischnutzung	alle BAKs	8%	41%	51%
Bildung, Büro und Verwaltung	bis 1983	8%	41%	51%
Bildung, Büro und Verwaltung	ab 1984	1%	45%	55%
Gewerbe, Industrie	bis 1983	8%	42%	51%
Gewerbe, Industrie	ab 1984	1%	44%	54%
Handel/Dienstleistung, Praxisgebäude	bis 1983	8%	42%	50%
Handel/Dienstleistung, Praxisgebäude	ab 1984	1%	45%	54%
Beherbergung, Gastronomie, Kliniken	bis 1983	9%	41%	51%
Beherbergung, Gastronomie, Kliniken	ab 1984	1%	44%	55%
Sonstige (Sport, Kultur)	alle BAKs	8%	41%	51%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 62: Versorgungstechnikmix Nichtwohngebäude im Zielbild -35 %

	Gas-BWK + AKA	El. Sole-WP (re-versibel (KKA)	BHKW Erdgas + AKA	Fernwärme + AKA	Gas-BWK + AKA + PV	El. Sole-WP (re-versibel (KKA) + PV	BHKW Erdgas + AKA + PV	Fernwärme + AKA + PV
unsaniert	12%	25%	8%	6%	12%	25%	8%	6%
vollsanert	7%	35%	3%	5%	8%	35%	3%	5%
vollsanert plus	7%	35%	3%	5%	8%	35%	3%	5%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

6.2.2.3 Zielbild -25 %

Unter den drei Zielbildern repräsentiert das Zielbild -25 % die Zukunftsvision mit der geringsten Endenergieeinsparung. Dem zufolge werden in diesem Zielbild weniger Gebäude saniert. Insbesondere ist der Anteil an Gebäuden im Zustand „vollsanert plus“ mit Werten zwischen 0-2 % (bezogen auf die Nettogeschossfläche) deutlich unterrepräsentiert (s. Tabelle 63), d.h. das Gros der Sanierungen erreicht „lediglich“ den Zustand „vollsanert“ (was jedoch einer Unterschreitung des Neubaustandards der EnEV 2009 um 25 % gleichkommt). Im Vergleich der drei Zielbilder werden im Zielbild -25 % die niedrigsten Sanierungsraten erreicht. Die Sanierungsrate auf den Zustand „vollsanert“ erreicht Maximalwerte von durchschnittlich 0,7 %/a.

Entsprechend hoch wird der Ausbaudruck auf die Wärmepumpen, die unter den Versorgungstechniken, die im Rahmen der gewählten Typologie zur Auswahl stehen, die Technik mit den größten er-

neuerbaren Anteilen darstellt (s. Tabelle 64). Der Anteil an Wärmepumpen liegt hier zwischen 60 % (NWG unsaniert) und 76 % (NWG saniert).

Tabelle 63: Verteilung der Nichtwohngebäude auf die drei verschiedenen energetischen Zustände im Zielbild -25 % (Bezugsgröße: Nettogeschossfläche)

		unsaniert	vollsaniiert	vollsaniiert plus
Wohngebäude mit Mischnutzung	alle BAKs	16%	83%	1%
Bildung, Büro und Verwaltung	bis 1983	16%	82%	2%
Bildung, Büro und Verwaltung	ab 1984	1%	99%	0%
Gewerbe, Industrie	bis 1983	16%	82%	2%
Gewerbe, Industrie	ab 1984	3%	97%	1%
Handel/Dienstleistung, Praxisgebäude	bis 1983	16%	82%	2%
Handel/Dienstleistung, Praxisgebäude	ab 1984	2%	98%	0%
Beherbergung, Gastronomie, Kliniken	bis 1983	18%	81%	1%
Beherbergung, Gastronomie, Kliniken	ab 1984	2%	98%	0%
Sonstige (Sport, Kultur)	alle BAKs	16%	83%	1%

Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

Tabelle 64: Versorgungstechnikmix Nichtwohngebäude im Zielbild -25 %

	Gas-BWK + AKA	El. Sole-WP (reversibel) (KKA)	BHKW Erdgas + AKA	Fernwärme + AKA	Gas-BWK + AKA + PV	El. Sole-WP (reversibel) (KKA) + PV	BHKW Erdgas + AKA + PV	Fernwärme + AKA + PV
unsaniert	6%	30%	8%	6%	7%	30%	8%	6%
vollsaniiert	4%	38%	3%	5%	5%	38%	3%	5%
vollsaniiert plus	4%	38%	3%	5%	5%	38%	3%	5%

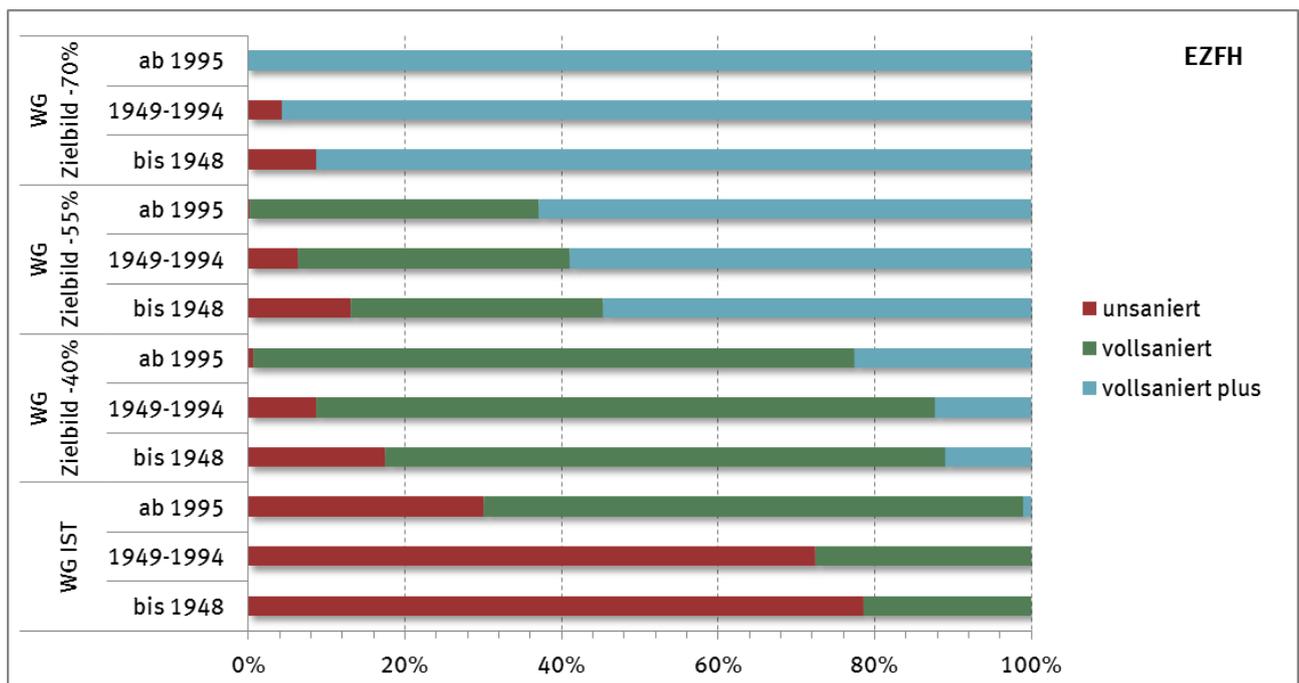
Quelle: Eigene Abschätzung des Öko-Instituts

6.2.3 Vergleich der Zielbilder und Transformationspfade

6.2.3.1 Wohngebäude

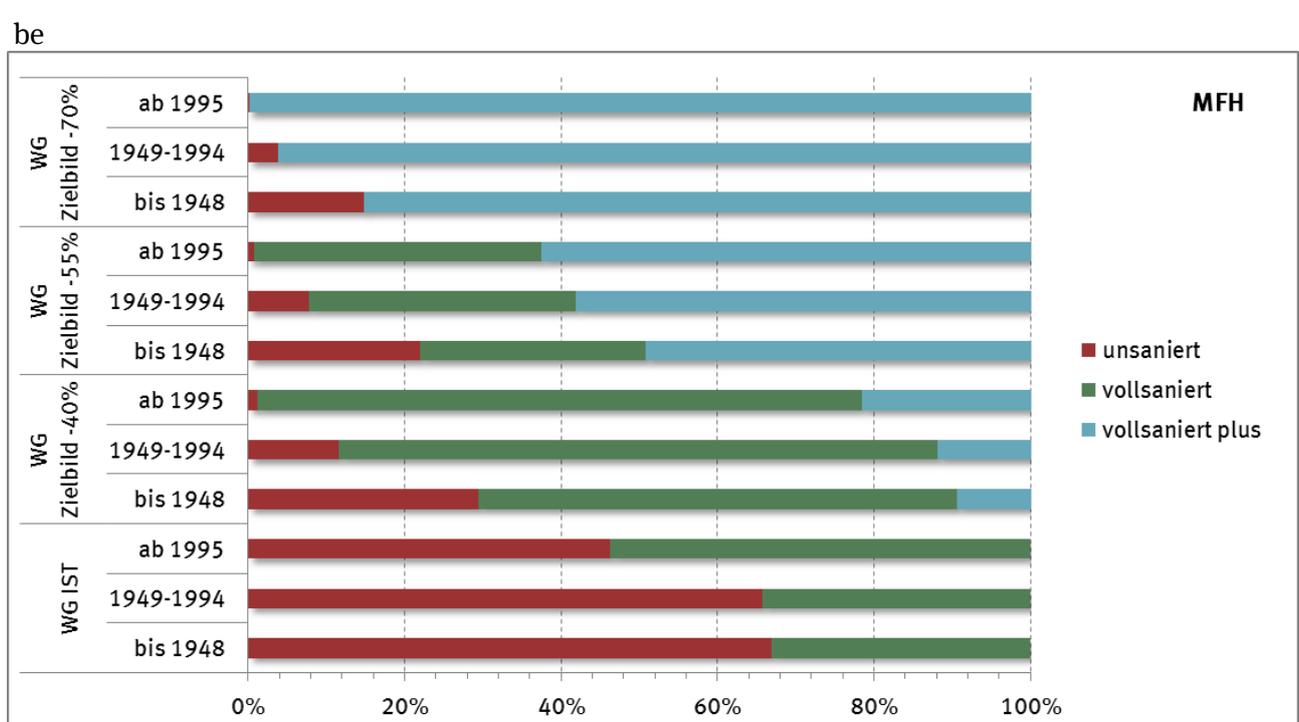
Nachfolgende Abbildungen ermöglichen einen übersichtlichen Vergleich der drei Zielbilder der Wohngebäude gegenüber dem Ist-Zustand sowie der Zielbilder untereinander. Abbildung 22 bis Abbildung 24 zeigen die prozentuale Verteilung der Wohnfläche in 2050 auf die verschiedenen Sanierungsstandards, differenziert nach EZFH und MFH. Die MFH erfassen dabei die kleinen, mittleren und großen MFH (KMH, MMH, GMH). Deutlich zu erkennen ist die Zunahme des Gebäudeanteils bzw. der Wohnfläche im Sanierungszustand „vollsaniiert plus“, je stärker der Endenergieverbrauch reduziert wird. Im Zielbild -70 % müssen alle prinzipiell sanierbaren Gebäude, also alle Wohngebäude jenseits des unsanierbaren Sockels, in den Zustand „vollsaniiert plus“ überführt werden.

Abbildung 22: Prozentuale Verteilung der Wohnfläche in 2050 auf die verschiedenen Sanierungsstandards EZFH



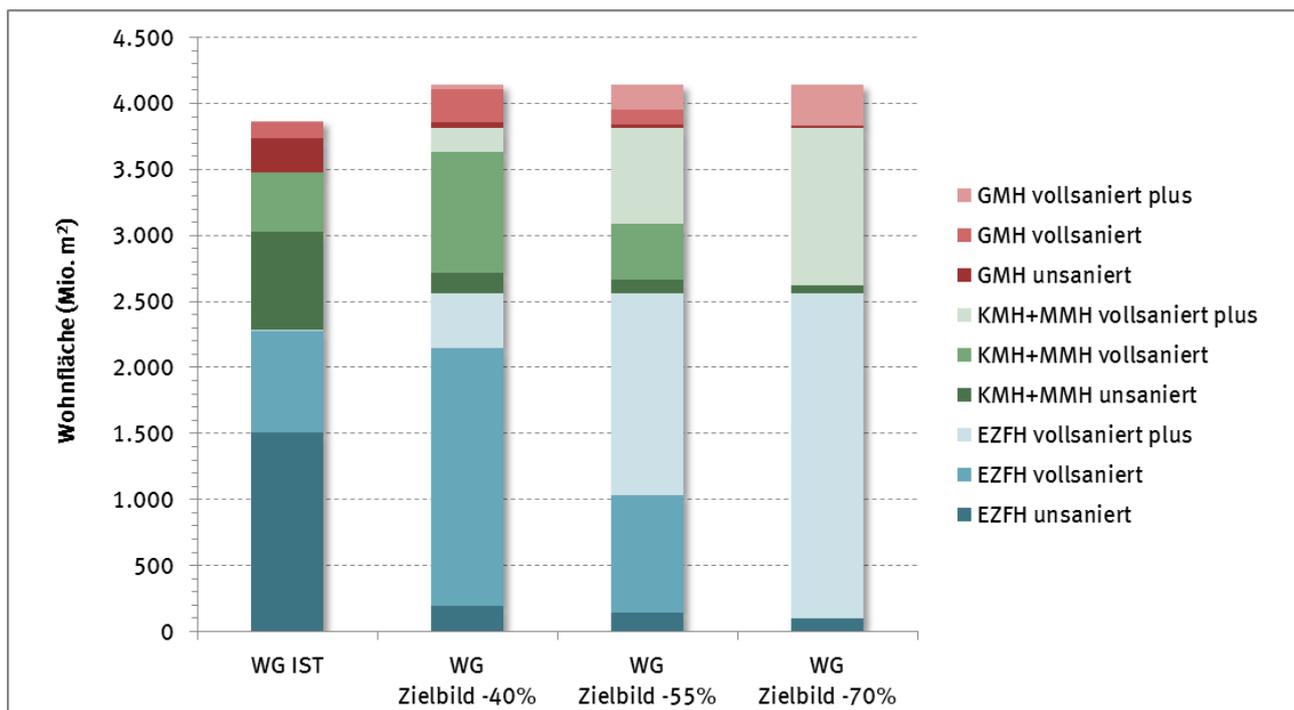
Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 23: Prozentuale Verteilung der Wohnfläche in 2050 auf die verschiedenen Sanierungsstandards MFH



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 24: Verteilung der Wohnfläche auf die verschiedenen Sanierungsstandards



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 25 zeigt die Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs bzw. -verbrauchs in den drei Zielbildern, verglichen mit dem heutigen Gebäudebestand. Zur Veranschaulichung werden vier verschiedene Größen verglichen:

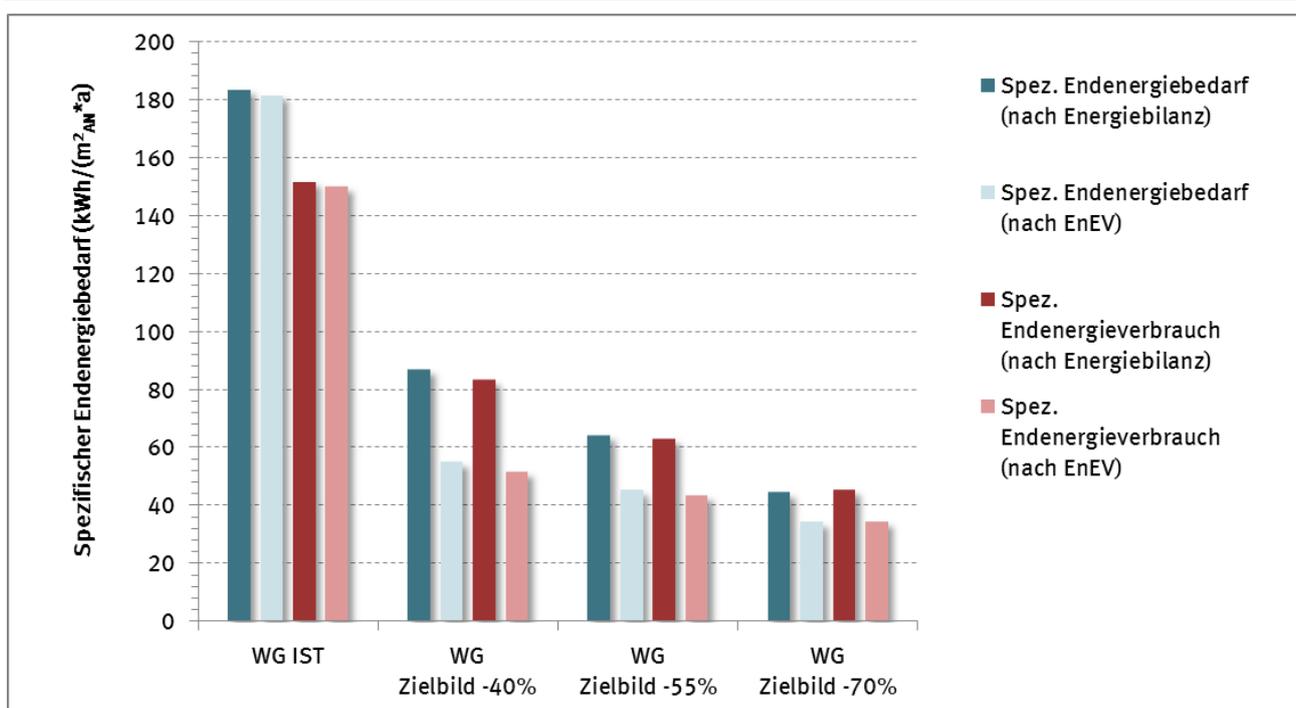
- der spezifische rechnerische Endenergiebedarf nach der Endenergie-Definition der EnEV,
- der spezifische rechnerische Endenergiebedarf nach der Endenergie-Definition der Energiebilanz,
- der spezifische korrigierte Endenergieverbrauch nach der Endenergie-Definition der EnEV, und
- der spezifische korrigierte Endenergieverbrauch nach der Endenergie-Definition der Energiebilanz.

Rechnerischer Endenergiebedarf und Endenergieverbrauch unterscheiden sich um einen Korrekturfaktor, der der empirischen Beobachtung Rechnung trägt, dass der gemessene Endenergieverbrauch insbesondere bei Wohngebäuden mit einem schlechten energetischen Zustand den rechnerischen Bedarf um Einiges unterschreitet (IWU 2012a). Je besser der Sanierungszustand, desto geringer wird die Abweichung; bei Wohngebäuden mit einem extrem niedrigen Wärmebedarf kann sich der Effekt umkehren, so dass der reale Verbrauch den rechnerischen Bedarf übertrifft. Der Unterschied zwischen der Endenergie-Definition im Sinne der EnEV bzw. der Energiebilanz liegt in der Art der Anrechnung der lokal gewandelten Umweltenergien, die im Rahmen der EnEV gleich Null gesetzt werden (s.o.).

Mit der Abbildung wird deutlich, wie wichtig es ist, bei der Angabe von Endenergie-bezogenen Reduktionswerten immer den genauen definitorischen Rahmen mit anzugeben, für den die Angaben gelten. Die Unterschiede sollen anhand des Zielbilds -70 % veranschaulicht werden. Bezogen auf die verschiedenen Definitionen können dort die in Tabelle 65 dargestellten Reduktionswerte erreicht werden.

Ferner kann sich die Reduktionsangabe auf den spezifischen flächenbezogenen Endenergiebedarf/-verbrauch beziehen oder auf den absoluten Bedarfs-/Verbrauchswert. Während beispielsweise im Zielbild -70 % der spezifische korrigierte Endenergieverbrauch im Sinne der Energiebilanz um 70 % sinkt, sinkt der absolute Endenergieverbrauch infolge der Wohnflächenzunahme „nur“ um 68 % (s.o.).

Abbildung 25: Spezifischer Endenergiebedarf bzw. -verbrauch, bezogen auf A_N , in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 65: Reduktion des Endenergiebedarfs bzw. -verbrauchs im Zielbild -70% der Wohngebäude bezogen auf unterschiedliche Definitionen

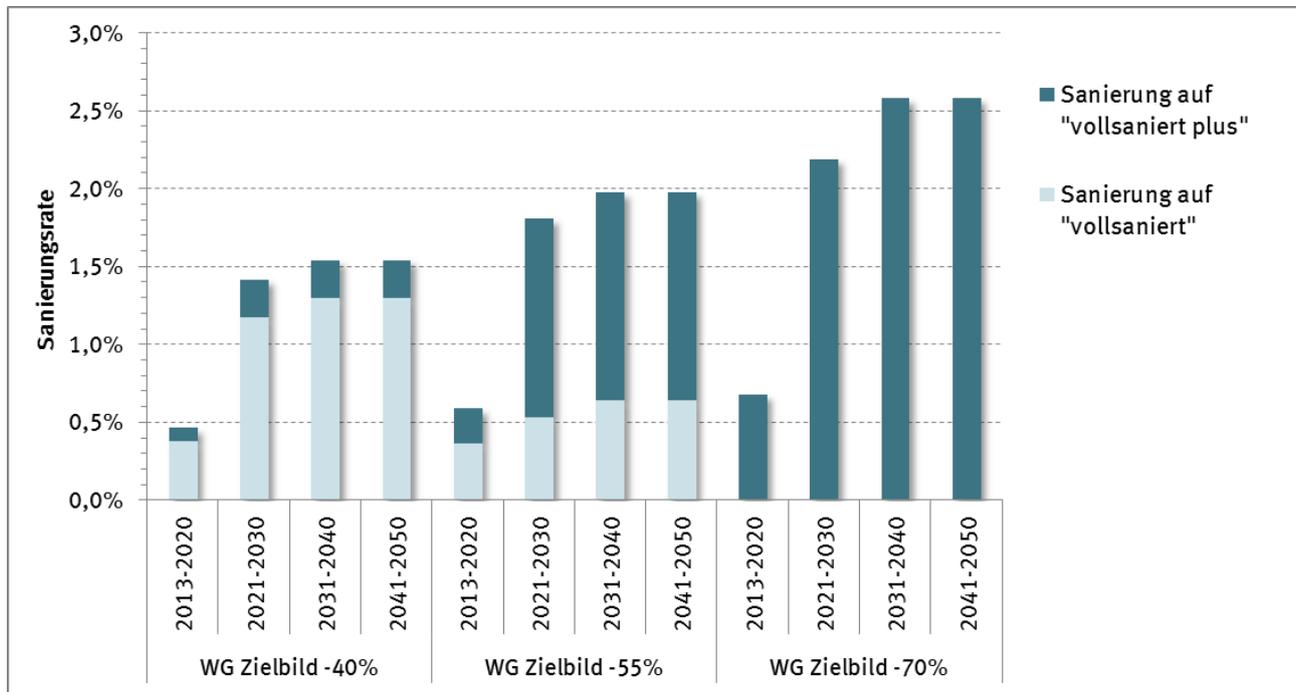
Definition	Reduktion bezogen auf den Ist-Zustand
Spezifischer rechnerischer Endenergiebedarf im Sinne der EnEV	-81%
Spezifischer rechnerischer Endenergiebedarf im Sinne der Energiebilanz	-76%
Spezifischer korrigierter Endenergieverbrauch im Sinne der EnEV	-77%
Spezifischer korrigierter Endenergieverbrauch im Sinne der Energiebilanz	-70%

Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 26 zeigt die Entwicklung der Sanierungsraten (berechnet aus dem Verhältnis der sanierten Wohnfläche zur gesamten Wohnfläche im Jahr X) in den drei Zielbildern. Dabei wird in Form von Teilsanierungsrate zwischen Sanierungen auf die Zustände „vollsaniert“ bzw. „vollsaniert plus“ differenziert. Die Darstellung zeigt in allen drei Zielbildern einen deutlichen Anstieg der Sanierungsrate ab dem Jahr 2021. Wie oben dargestellt, spiegeln die vorher geringeren Sanierungsraten die Tatsache wider, dass der Sanierungsmarkt in den Anfangsjahren sukzessive ausgebaut werden muss, um in den Folgedekaden die notwendig hohen Sanierungsraten und v.a. Sanierungstiefen leisten zu können. Überdies ist in der Darstellung erkennbar, dass im Zielbild -70 % die gesamte Sanierungsrate

höher ist als in den anderen beiden Zielbildern und dabei alle Sanierungen auf den Zustand „vollsaniert plus“ erfolgen. Hingegen ist im Zielbild -40 % die Gesamtsanierungsrate am niedrigsten und ein Großteil der Sanierungen erfolgt „lediglich“ auf den Zustand „vollsaniert“.

Abbildung 26: Jährliche Sanierungsraten in den drei Zielbildern der Wohngebäude

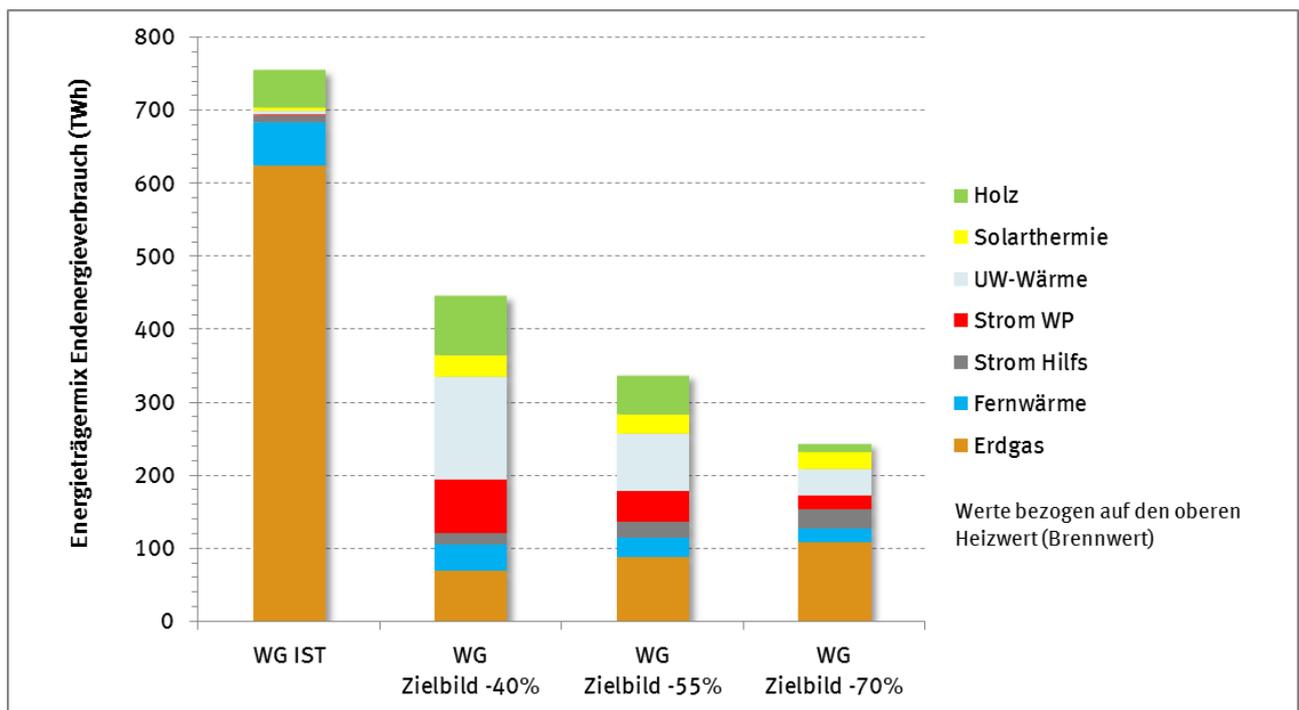


Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen den Energieträgermix des Endenergieverbrauchs in den verschiedenen Zielbildern. Da PE_{NE} in allen drei Zielbildern gleichermaßen um 80 % bezogen auf den Ist-Zustand sinkt, steigt der zulässige Sockel erdgasbetriebener Heizanlagen (Gas-Brennwert und BHKWs) mit sinkendem Endenergieverbrauch an. So können im Zielbild -70 % noch rund 45 % des Endenergieverbrauchs aus Erdgas geliefert werden und trotzdem wird das übergeordnete auf PE_{NE} bezogene Reduktionsziel erreicht. Hingegen liegt der zulässige Erdgassockel im Zielbild -40 % bei nur 15 %. Deutlich wird auch die steigende Bedeutung von Wärmepumpen (verbunden mit dem entsprechenden Stromverbrauch zum Betrieb der Wärmepumpen). Im Zielbild -40 % liegt der Anteil an Wärmepumpen (Umweltwärme + Wärmepumpenstrom) am gesamten Endenergieverbrauch bei rund 50 % (im Zielbild -70 % hingegen bei nur bei rund 22 %). Im Zielbild -70 % zeigt sich zudem die steigende Bedeutung des Hilfsstromverbrauchs für den Betrieb der Lüftungsanlagen (in diesem Zielbild verfügt jedes(!) sanierte Gebäude über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung). Der Hilfsstromverbrauch liegt hier bei etwa 11 % des gesamten Endenergieverbrauchs.

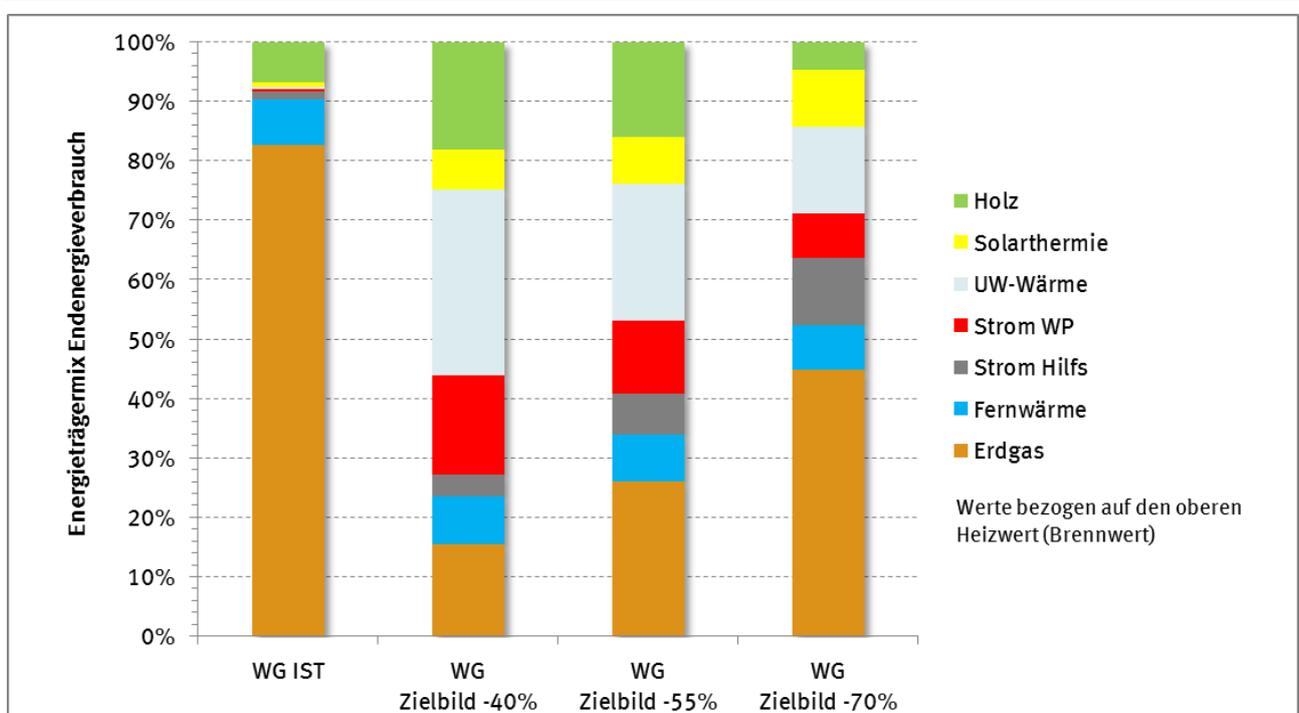
Der Anteil an Strom (Strom für Wärmepumpen und Hilfsstrom) am gesamten Endenergieverbrauch liegt in allen Zielbildern bei etwa 20 %. Allerdings wird im Zielbild -40% mit rund 90 TWh eine fast doppelt so hohe Strommenge benötigt wie im Zielbild -70 %.

Abbildung 27: Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

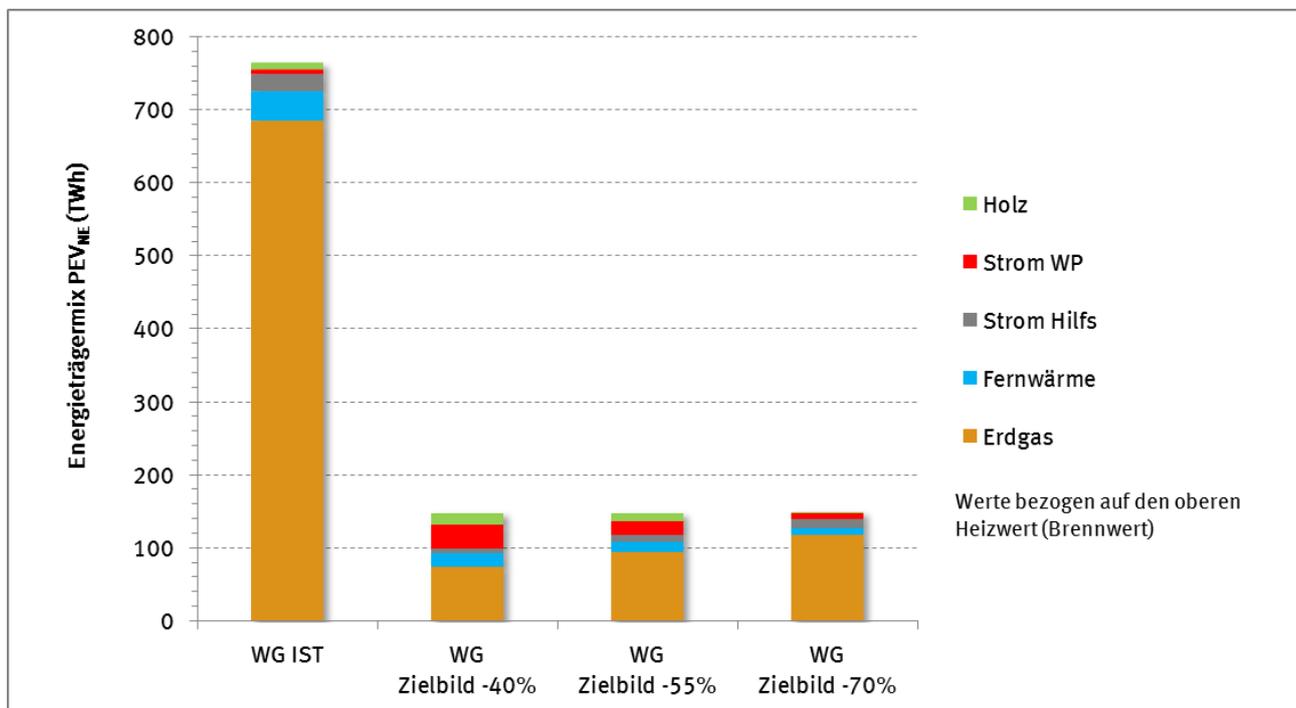
Abbildung 28: Prozentuale Verteilung des Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 29 zeigt die Zusammensetzung des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs PE_{NE} in den verschiedenen Zielbildern. PE_{NE} sinkt in allen drei Zielbildern um 80 %. Die Beiträge von PE_{NE} stammen aus den erdgasbetriebenen Heizsystemen, den nicht-erneuerbaren Primärenergieanteilen an der Strom und Fernwärmeversorgung sowie aus den Holzheizungen.

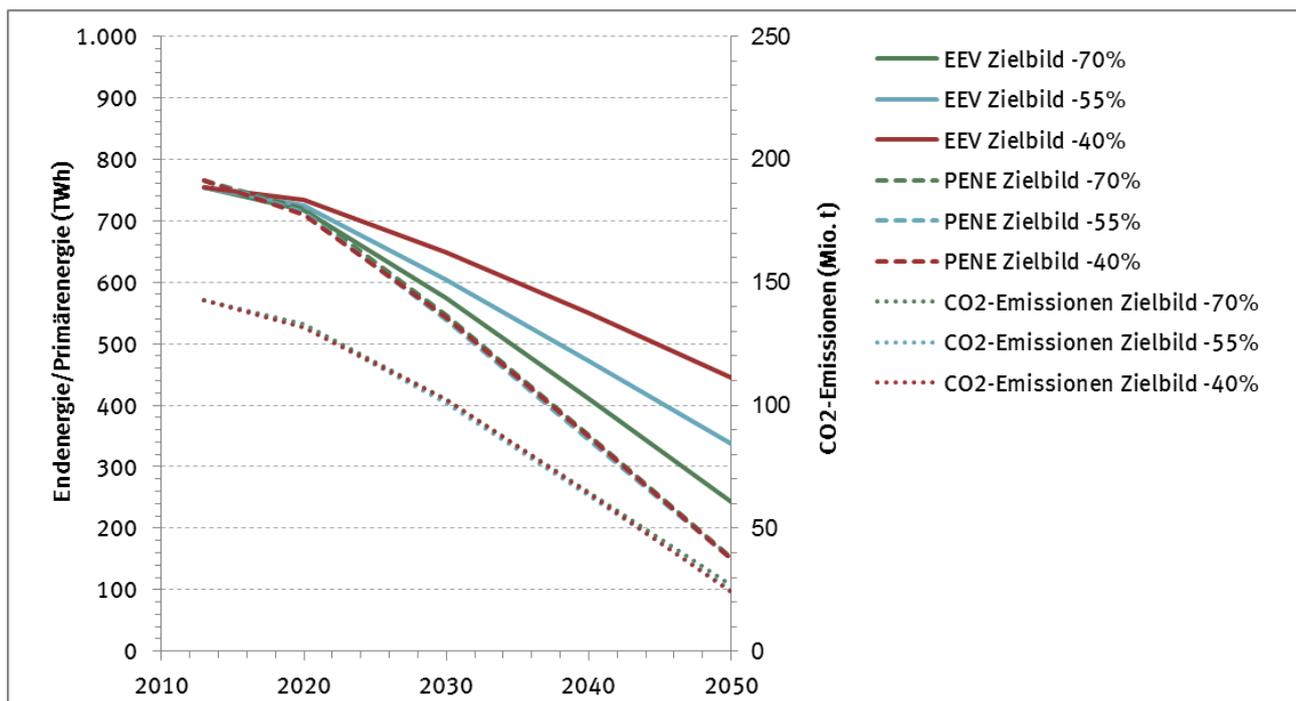
Abbildung 29: Energieträgermix des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in den verschiedenen Zielbildern der Wohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 30 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs, des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs PE_{NE} sowie der gesamten CO_2 -Emissionen entlang der Transformationspfade für die drei Zielbilder. Deutliche Unterschiede zwischen den drei Transformationspfaden sind lediglich bezogen auf die Entwicklung des Endenergiebedarfs erkennbar. Hinsichtlich PE_{NE} sowie CO_2 -Emissionen sind die drei Transformationspfade fast deckungsgleich. Die auf den Wohngebäudesektor bezogenen CO_2 -Emissionen sinken im Zielbild -70 % bezogen auf das Ausgangsjahr um 81 %. In den anderen beiden Zielbildern liegt die Reduktion bei 82 % (Zielbild -55 %) bzw. 83 % (Zielbild -40%). Die CO_2 -Bilanzierung erfasst dabei auch die Emissionen, die mit der Erzeugung des Strombedarfs für die thermische Raumkonditionierung (z.B. Wärmepumpenstrom, Hilfsstrom) einhergehen und die i.d.R. im Umwandlungssektor bilanziert werden. Gleiches gilt für die Fernwärme.

Abbildung 30: Transformationspfade Wohngebäude – Energetische Kennwerte^{*)}



^{*)} End- und Primärenergie projiziert auf die linke Achse, CO₂-Emissionen projiziert auf die rechte Achse

Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

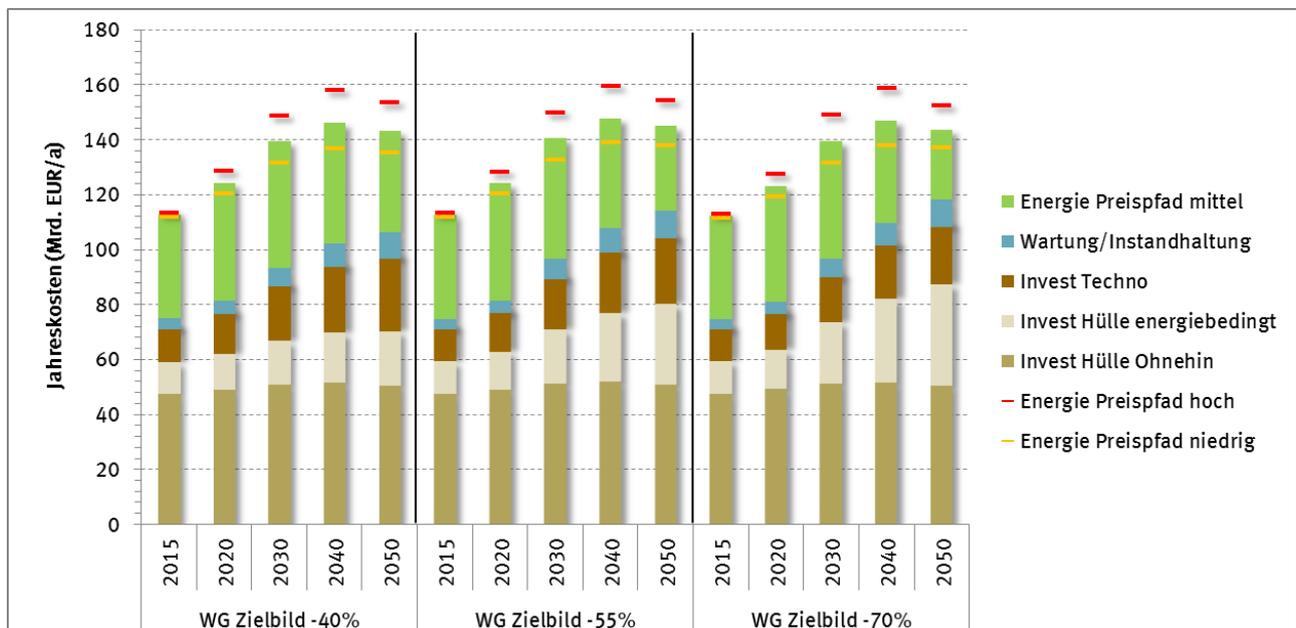
Abbildung 31 zeigt abschließend die Entwicklung der Jahreskosten entlang der drei Transformationspfade. Dargestellt werden die annuisierten Investitionskosten für Renovierung/Modernisierung der Gebäudehülle und der Versorgungstechniken, die laufenden Kosten für Wartung und Instandhaltung sowie die jährlichen Energiekosten (für drei verschiedene Preispfade), bezogen auf den realen Endenergieverbrauch. Bei den Investitionskosten für den baulichen Wärmeschutz wird zwischen Ohnehinkosten und energiebedingten Mehrkosten differenziert. Da für alle Gebäude der gleiche Renovierungszyklus unterstellt wird, ist die Entwicklung der Ohnehinkosten in allen drei Pfaden identisch. Die Entwicklung der energetischen Mehrkosten zeigt einen deutlich flacheren Verlauf, da die Sanierungsaktivität im Zielbild -40 % wesentlich geringer ist als im Zielbild -70 %. Dafür liegen im Zielbild -40 % die Jahreskosten für die Versorgungstechniken sichtbar höher. Grund hierfür sind die notwendigerweise höheren Investitionen in CO₂-ärmere Versorgungstechniken, um trotz geringerem Wärmeschutz das übergeordnete Ziel PENE-80 % zu erreichen. Aufgrund des höheren zu deckenden Restwärmebedarfs verzeichnet das Zielbild -40 % auch die höchsten Kosten für den Bezug von Brennstoffen, Strom und Fernwärme. In der Entwicklung der Energiekosten schlägt sich auch die unterstellte Entwicklung der Energiepreise nieder: Selbst im Zielbild -70 %, in dem der Endenergieverbrauch v.a. durch Wärmeschutzmaßnahmen um 70 % gesenkt wird, sinken die Energiekosten im Jahr 2050 „nur“ um etwa ein Drittel.

Die Entwicklung der Gesamtkosten nimmt in allen Zielbildern einen vergleichbaren Verlauf (Abweichung unter 1 %). Die Jahreskosten steigen von etwa 113 Mrd. EUR im Jahr 2015 auf knapp 160 Mrd. EUR im Jahr 2040. Wegen der danach wieder abnehmenden Wohnflächennachfrage sowie geringeren Energiekosten, die infolge der Sanierungstätigkeit weiter sinken, fallen die Jahreskosten bis 2050 wieder auf rund 153 Mrd. EUR ab.

Legt man die Jahreskosten auf die gesamte Wohnfläche um, erhält man für den mittleren Energiepreispfad spezifische Kosten von etwa 29 EUR/m² in 2015 sowie 35 EUR/m² in 2050. Dies entspricht einem Anstieg um etwa 22 %. Beim niedrigen Energiepreispfad steigen die spezifischen Kosten von

29 EUR/m² in 2015 auf rund 33 EUR/m² in 2050, dies entspricht einem Anstieg von rund 16 %. Beim hohen Energiepreispfad steigen die spezifischen Kosten auf maximal 37 EUR/m².

Abbildung 31: Transformationspfade Wohngebäude - Jahreskosten



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Wie oben in Kapitel 6.1.3.1 dargestellt, führt bei den Wohngebäuden die Kalibrierung des Ist-Zustands anhand des spezifischen rechnerischen Endenergiebedarfs der Typgebäude zu einem knapp 20 % höheren gesamten Endenergieverbrauch im Vergleich zu den temperaturbereinigten Werten aus der Anwendungsbilanz. Im Umkehrschluss führt eine Kalibrierung anhand des spezifischen Endenergieverbrauchs (z.B. unter Rückgriff auf die spezifischen Verbrauchswerte aus dem dena Gebäudereport (dena 2015) zu spezifischen rechnerischen Bedarfswerten, die etwa 15 % unter den Werten aus dena (2015) liegen. Dennoch sollen im Folgenden die wichtigsten Ergebnisse für die Zielbilder der Wohngebäude, die sich bei einer Kalibrierung anhand des spezifischen Endenergieverbrauchs ergeben, cursorisch dargestellt werden⁴²:

- Die Kalibrierung anhand des spezifischen Endenergieverbrauchs der Typgebäude ergibt einen gesamten Endenergieverbrauch (bezogen auf den unteren Heizwert) von rund 616 TWh. Dies sind etwa 6 % mehr als die (temperaturbereinigte) Anwendungsbilanz für das Jahr 2012 ausweist.
- Im Zielbild mit den ambitioniertesten Anstrengungen im Bereich des Wärmeschutzes – alle prinzipiell sanierbaren Gebäude werden dabei bis 2050 auf den Standard „vollsaniert plus“ gebracht – sinkt der Endenergieverbrauch um rund 65 % (anstelle von 68 % im Zielbild - 70 %). In den anderen beiden Zielbildern sinkt der Endenergieverbrauch um 51 % bzw. - 36 % (anstelle von 55 % bzw. 40 % bei der Kalibrierung nach dem rechnerischen Bedarf).

⁴² Alle weiteren Annahmen (z.B. zur Abschätzung des unsanierbaren Sockels an Gebäuden oder zur Technikverteilung im Zieljahr 2050) bleiben bei der alternativen Kalibrierung unverändert.

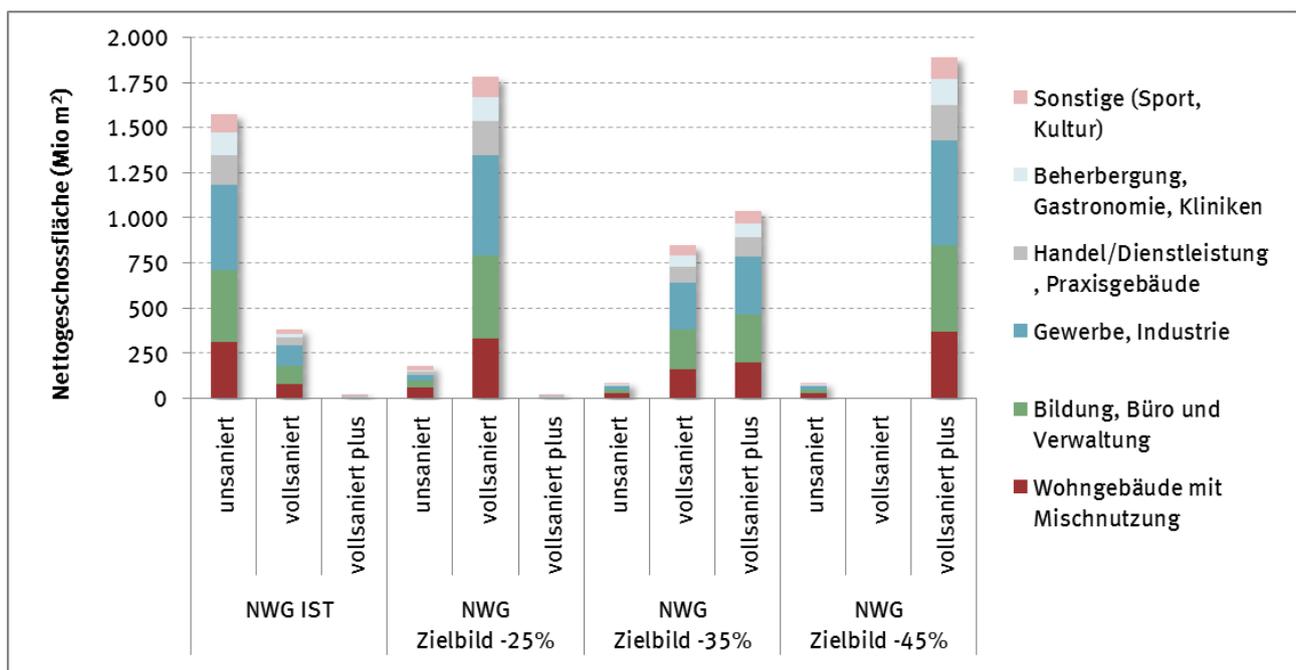
- In allen drei Zielbildern wird eine Reduktion des PE_{NE} um knapp 80 % erreicht. Die auf den Wohngebäudesektor bezogenen CO_2 -Emissionen sinken um 80-82 %.

Bezogen auf Jahreskosten entlang der drei Transformationspfade ergeben sich leichte Unterschiede in den Gesamtkosten in der Größenordnung von knapp 2 %. Die aus den Kostenrechnungen abgeleiteten Aussagen zur Kostenentwicklung in den drei Zielbildern bleiben davon jedoch unberührt.

6.2.3.2 Nichtwohngebäude

Nachfolgende Abbildungen erlauben einen Vergleich der drei Zielbilder für den Nichtwohngebäudebereich. Abbildung 32 zeigt die Verteilung der beheizten Nettogeschossfläche auf die verschiedenen Sanierungsstandards, differenziert nach den Nutzungsarten der NWG-Typologie. Wie bei den Wohngebäuden zeigt sich der zunehmende Anteil der Flächen in den beiden Sanierungszuständen. Während jedoch im Zielbild -45 % bis zum Jahr 2050 alle prinzipiell sanierbaren Gebäude einer Passivhaussanierung unterzogen werden, reicht im Zielbild -25 % größtenteils der Zustand „vollsaniert“ aus, um die anvisierte Reduktion des Endenergieverbrauchs um 25 % zu erreichen.

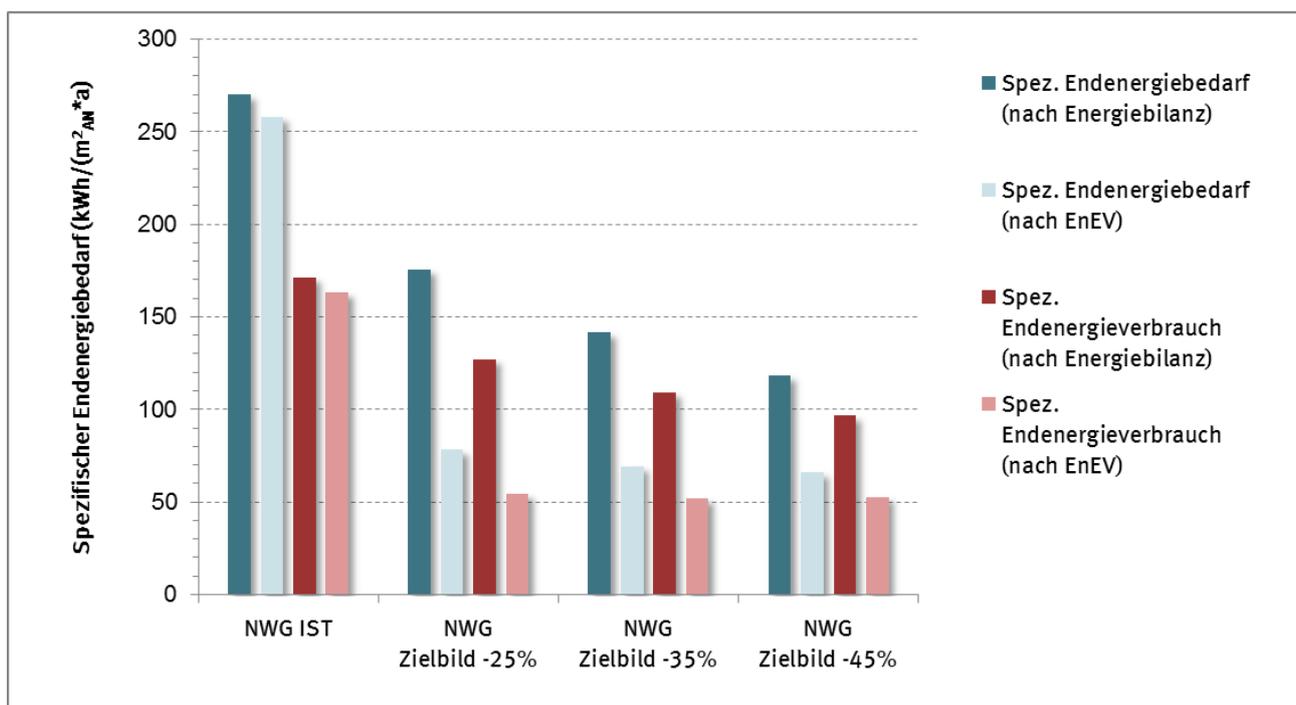
Abbildung 32: Verteilung der Nettogeschossfläche auf die verschiedenen Sanierungsstandards



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 33 zeigt die Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs bzw. -verbrauchs in den drei Zielbildern, verglichen mit dem heutigen Nichtwohngebäudebestand. Zur Veranschaulichung der Unterschiede werden auch hier Endenergiebedarf und -verbrauch sowohl nach Definition der EnEV als auch Energiebilanz dargestellt. Vergleichbar den Wohngebäuden können auch hier je nach gewählter Definition sehr unterschiedliche Minderungswerte erreicht werden (vgl. Tabelle 66 für das Zielbild -45 %).

Abbildung 33: Spezifischer Endenergiebedarf bzw. -verbrauch, bezogen auf die Nettogeschossfläche in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

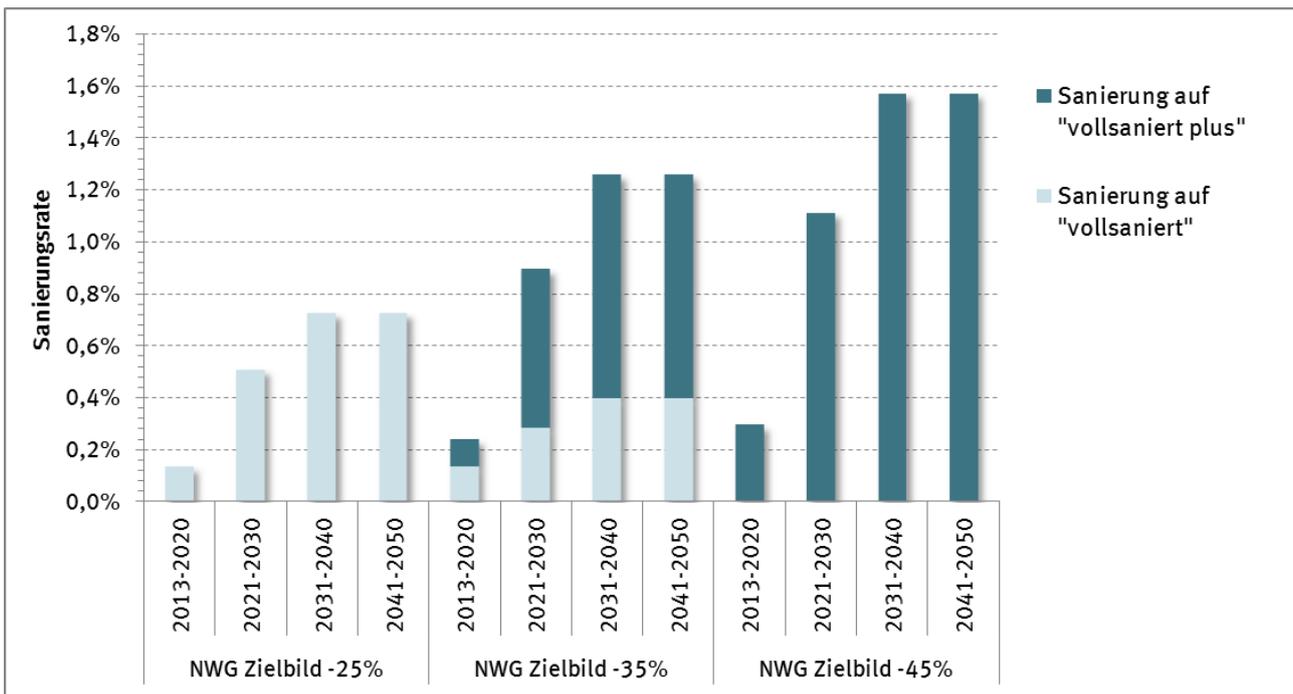
Tabelle 66: Reduktion des Endenergiebedarfs bzw. -verbrauchs im Zielbild -45 % der Nichtwohngebäude bezogen auf unterschiedliche Definitionen

Definition	Reduktion bezogen auf den Ist-Zustand
Spezifischer rechnerischer Endenergiebedarf im Sinne der EnEV	-74%
Spezifischer rechnerischer Endenergiebedarf im Sinne der Energiebilanz	-56%
Spezifischer korrigierter Endenergieverbrauch im Sinne der EnEV	-68%
Spezifischer korrigierter Endenergieverbrauch im Sinne der Energiebilanz	-44%

Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 34 zeigt die Entwicklung der Sanierungsraten in den drei Zielbildern. Wie bei den Wohngebäuden werden dabei Teilsanierungsraten für die beiden Zustände „vollsaniert“ bzw. „vollsaniert plus“ unterschieden. Die Darstellung zeigt in allen drei Zielbildern einen deutlichen Anstieg der Sanierungsrate ab dem Jahr 2021. Ferner zeigt sich deutlich, dass im Zielbild -45 % die höchste Gesamtsanierungsrate erreicht wird, wobei alle dabei erfassten Sanierungen auf den Zustand „vollsaniert plus“ erfolgen. Hingegen ist im Zielbild -25 % die Gesamtsanierungsrate am niedrigsten und ein Großteil der Sanierungen erfolgt „lediglich“ auf den Zustand „vollsaniert“.

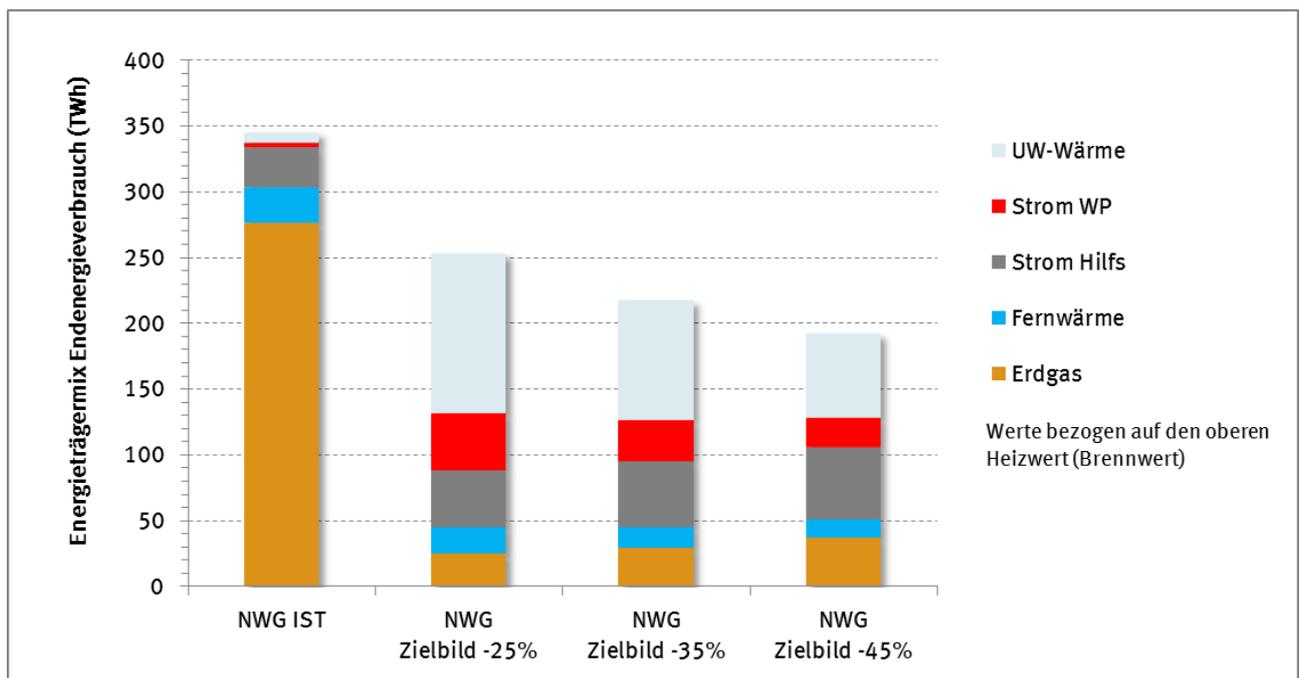
Abbildung 34: Jährliche Sanierungsraten in den drei Zielbildern der Nichtwohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

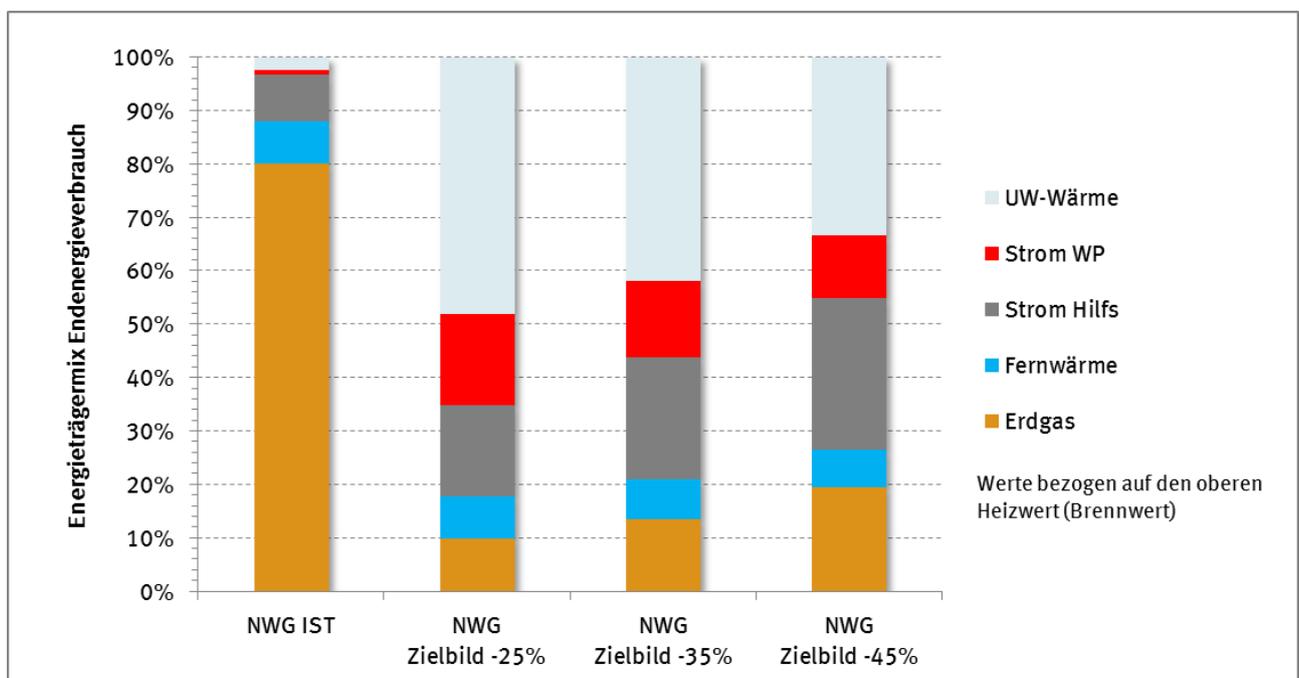
Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen den Energieträgermix des Endenergieverbrauchs in den drei verschiedenen Zielbildern. Da sich der Endenergieverbrauch bei den Nichtwohngebäuden durch Wärmeschutzmaßnahmen nicht so stark reduzieren lässt wie bei den Wohngebäuden, erfordert die Reduktion des PE_{NE} um 80 % eine stärkere Verschiebung des Energieträgermixes in Richtung erneuerbarer Energien. In Hinblick auf die im Rahmen der NWG-Typologie zur Verfügung stehenden Versorgungstechniken bedeutet dies eine Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen. Die Verschiebung fällt dabei umso stärker aus, je schwächer der Endenergieverbrauch sinkt. Deutlich wird auch die steigende Bedeutung des Stromverbrauchs für den Betrieb der Versorgungstechniken (Hilfsstrom) inkl. Kälteerzeugung und Beleuchtung. Auf die Kälteerzeugung entfallen im Schnitt 31% des Hilfsstroms, wobei dieser Anteil im NWG Zielbild -45% knapp 40% erreicht. Der relative Anteil des Stromverbrauchs (ohne Strom für den Betrieb der Wärmepumpen) steigt von heute rund 10 % auf Werte zwischen 17 % (Zielbild -25 %) bzw. 28 % (Zielbild -45 %) an.

Abbildung 35: Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

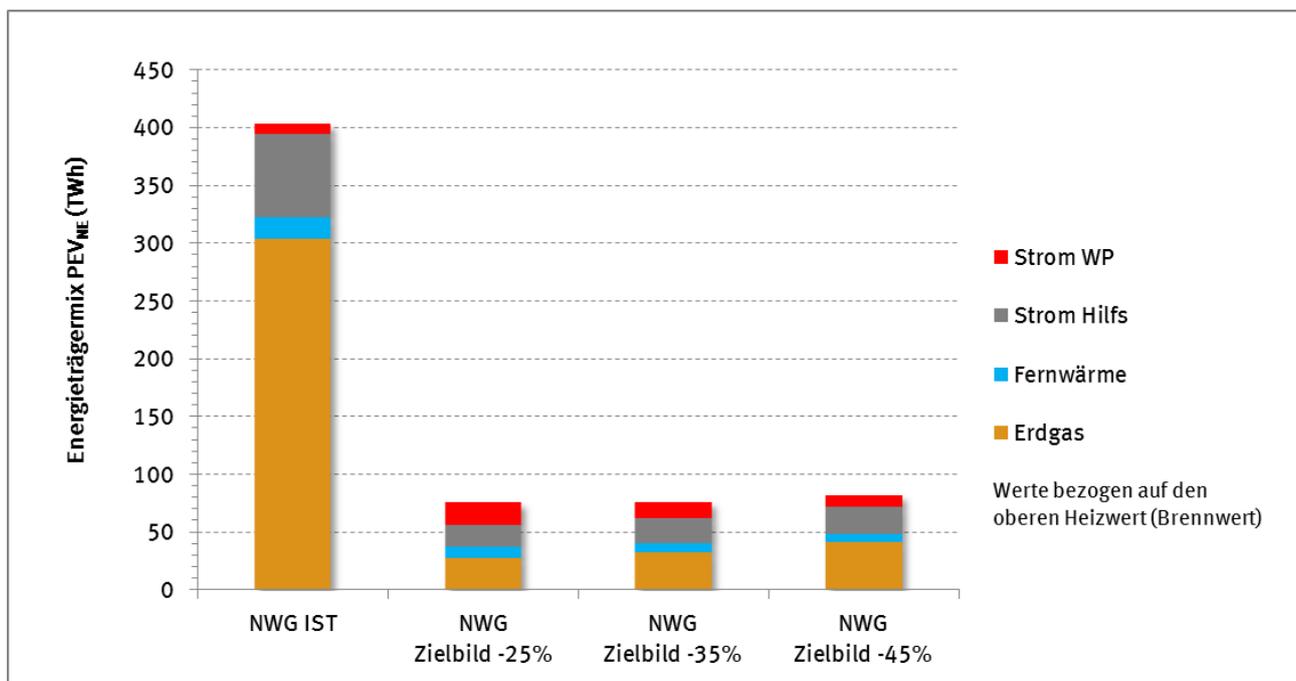
Abbildung 36: Prozentuale Verteilung des Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 37 zeigt schließlich die Zusammensetzung des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs PE_{NE} in den verschiedenen Zielbildern. Entsprechend der Vorgabe sinkt PE_{NE} in allen drei Zielbildern um 80 %. Wie bei den Wohngebäuden stammen die Beiträge von PE_{NE} aus den erdgasbetriebenen Heizsystemen sowie den nicht-erneuerbaren Primärenergieanteilen an der Strom- und Fernwärmeversorgung.

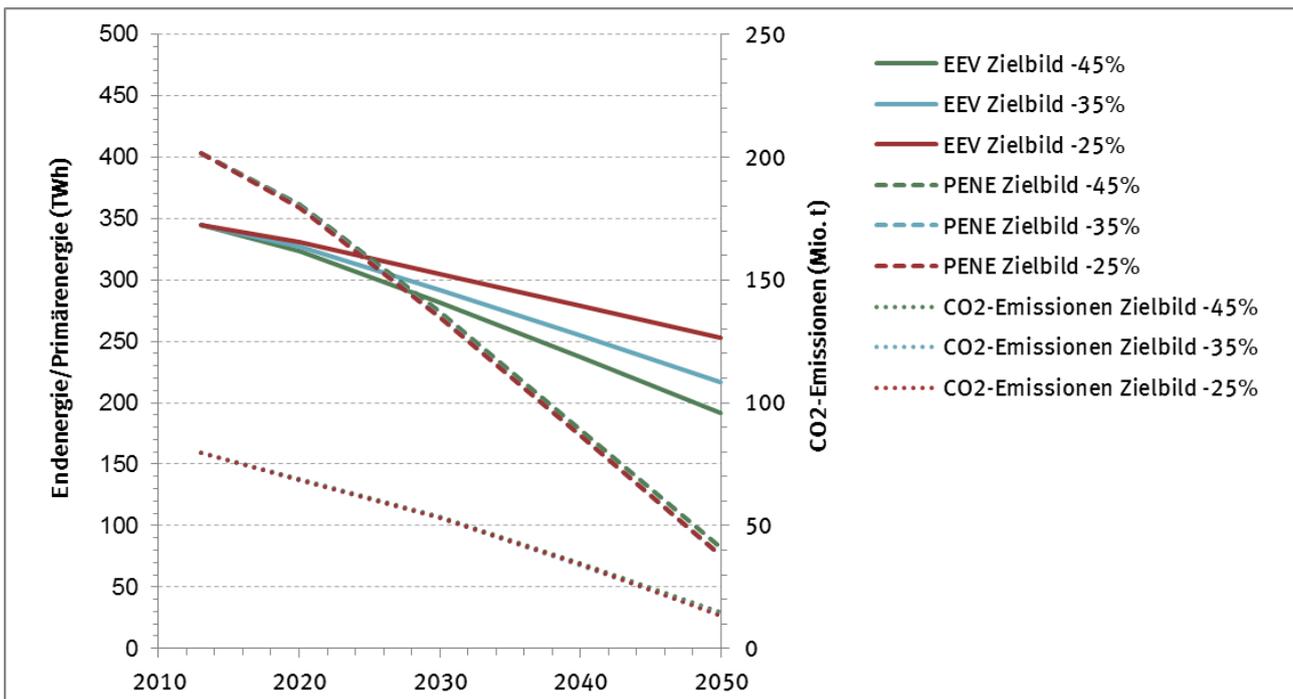
Abbildung 37: Energieträgermix des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in den verschiedenen Zielbildern der Nichtwohngebäude



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 38 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs, des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs PE_{NE} sowie der gesamten CO_2 -Emissionen entlang der Transformationspfade für die drei Zielbilder der Nichtwohngebäude. Vergleichbar den Wohngebäuden sind auch hier lediglich Unterschiede im Verlauf des Endenergiebedarfs erkennbar, während PE_{NE} sowie CO_2 -Emissionen weitgehend deckungsgleich sind. Die CO_2 -Emissionen der Nichtwohngebäude sinken in allen drei Zielbildern um rund 82-84 % bezogen auf den Ausgangszustand. Die CO_2 -Bilanzierung erfasst dabei auch hier die Emissionen, die aus der Stromerzeugung für die thermische Raumkonditionierung (z.B. Wärmepumpenstrom, Hilfsstrom, Kompressionskälte) sowie die Beleuchtung resultieren. Gleiches gilt für die Fernwärme.

Abbildung 38: Transformationspfade Nichtwohngebäude – Energetische Kennwerte^{*)}



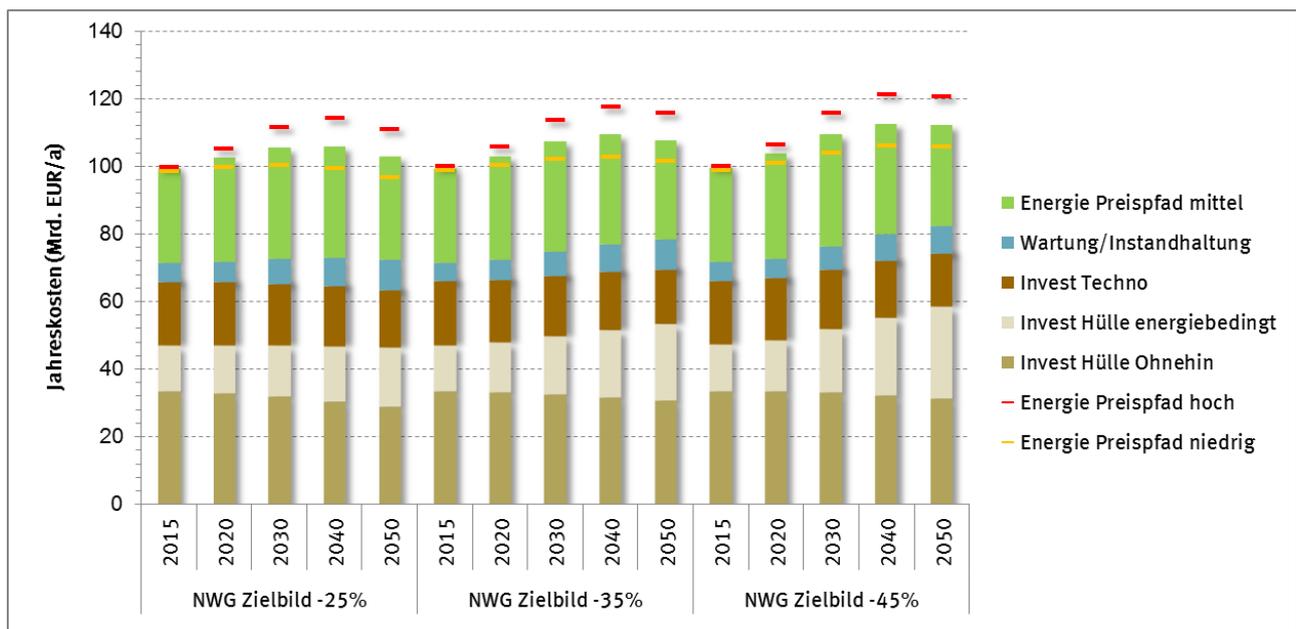
^{*)} End- und Primärenergie projiziert auf die linke Achse, CO₂-Emissionen projiziert auf die rechte Achse

Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

In Abbildung 39 werden für die Nichtwohngebäude schließlich die Jahreskosten der Transformationspfade dargestellt. Wie bei den Wohngebäuden, werden dabei die annuisierten Investitionskosten für Wärmeschutz (aufgeteilt nach Ohnehin- und energetischen Mehrkosten) und Versorgungstechniken, die jährlichen Kosten der Wartung/Instandhaltung sowie die laufenden Energiekosten (für drei verschiedene Energiepreisszenarien) gezeigt. Die Energiekosten erfassen dabei auch etwaige Erlöse aus der Netzeinspeisung von überschüssig erzeugtem Strom aus BHKWs und PV.

Die Entwicklung der Ohnehinkosten für den Wärmeschutz ist in allen drei Szenarien identisch, da in den Szenarien der gleiche Renovierungszyklus unterstellt wird. Bei den energetischen Mehrkosten sieht man deutliche Unterschiede zwischen dem Zielbild -45 %, welches einen hohen Wärmeschutz vorsieht und entsprechend höhere Mehrkosten aufweist, und dem hinsichtlich des Wärmeschutzes weniger ambitionierten Zielbild -25 %. Umgekehrt sind die Versorgungstechnikkosten sowie die Kosten für Wartung/Instandhaltung im Zielbild -25 % leicht höher als im Zielbild -45 %. Dies liegt vor allem daran, dass im Zielbild -25 % insgesamt mehr Wärme bereitgestellt werden muss und somit größere Anlagen installiert werden, die höhere Kosten verursachen. Die Entwicklung der jährlichen Energiekosten nimmt in allen drei Szenarien einen fast deckungsgleichen Verlauf. Die Energiekosten spielen damit die Unterschiede im Endenergiebedarf nicht wider. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass im Zielbild -45 % zwar geringere Energiekosten zur Deckung des Wärmebedarfs anfallen, diese Kosteneinsparung jedoch durch die Kosten eines höheren Stromverbrauchs (z.B. für die Kühlung) kompensiert werden. Die gesamten Jahreskosten steigen damit im Zielbild -25 % von rund 100 Mrd. EUR in 2015 auf einen Maximalwert von rund 106 Mrd. EUR in 2040 um dann wieder bis 2050 auf rund 103 Mrd. EUR abzufallen. Im Zielbild -45 % steigen die Jahreskosten auf einen maximalen Wert von 113 Mrd. EUR. Die spezifischen Jahreskosten steigen damit von rund 50 EUR pro m² Nutzfläche auf rund 57 EUR/m². Dies entspricht einem Anstieg der spezifischen Jahreskosten um rund 13 %.

Abbildung 39: Transformationspfade Nichtwohngebäude - Jahreskosten



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

6.2.3.3 Gesamter Gebäudebereich

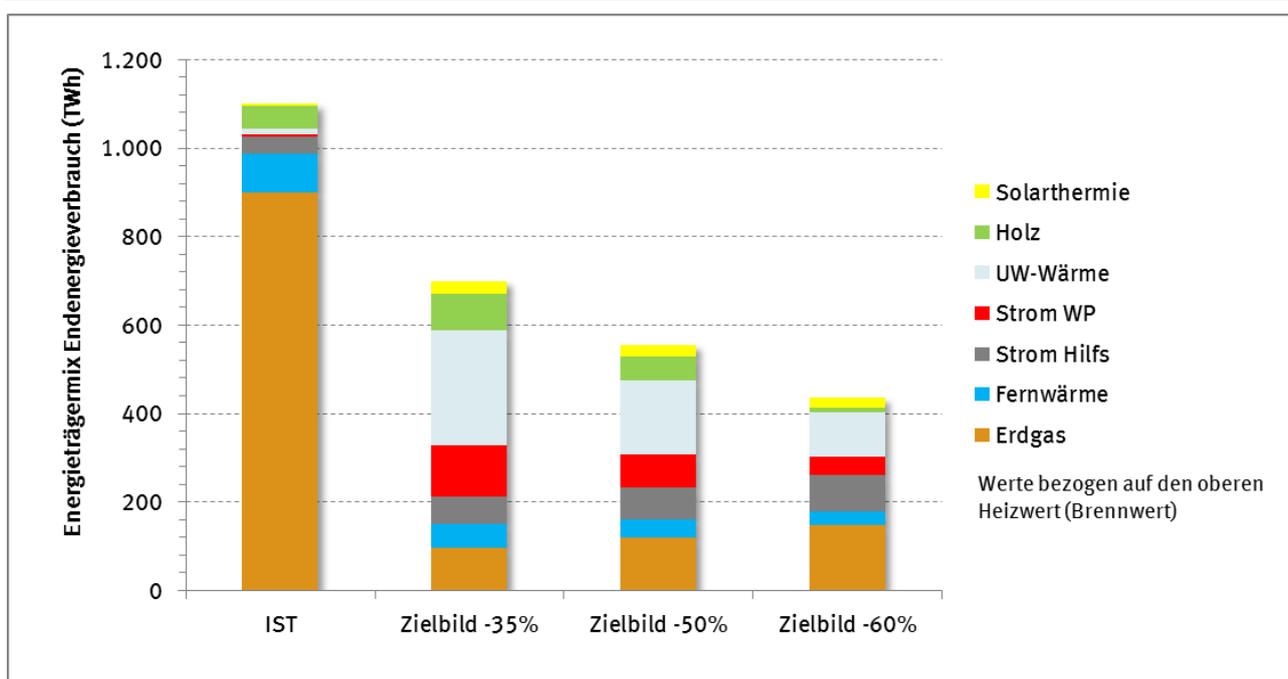
Die Zielbilder für den gesamten Gebäudebereich ergeben sich über die Aufsummierung der beiden Teilbereiche Wohn- und Nichtwohngebäude. Bezogen auf die Endenergieeinsparung ergeben die beiden Zielbilder mit der stärksten Endenergieminderung (WG Zielbild -70 % und NWG Zielbild -45 %) zusammen eine Endenergieeinsparung in Höhe von 60 % (s. Abbildung 40). Konkret bedeutet dies, dass sich der Endenergieverbrauch in der gewählten definitorischen Abgrenzung (Endenergie- definition im Sinne der Energiebilanz) um maximal 60 % bezogen auf den heutigen Ausgangszu- stand absenken lässt. Dazu müssten alle Gebäude, die im Rahmen der gewählten Methodik als prin- zipiell sanierbar eingestuft werden, auf den Sanierungszustand „vollsaniert plus“ gebracht werden. Die Zusammenführung des „mittleren“ Zielbilds bei den Wohngebäuden (WG Zielbild -55 %) mit dem entsprechenden Zielbild der Nichtwohngebäude (NWG Zielbild -35 %) ergibt in Summe eine End- energieminderung von rund -50 %. Die beiden Zielbilder mit den geringsten Ambitionen hinsichtlich der Endenergiereduktion (WG Zielbild -40 % und NWG Zielbild -25 %) führen zusammen zu einer Endenergieeinsparung von etwa 35 %. Somit lässt sich das langfristige Transformationsziel für den Gebäudesektor durch einen Zielkorridor eingrenzen, der durch Endenergieeinsparungen zwischen 35 % und 60 % aufgespannt wird.

Neben der Endenergieeinsparung unterscheiden sich die beiden Eckpunkte des Zielkorridors natür- lich auch in ihrem Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (Abbildung 40). Infolge der hohen Wärmeschutzanforderungen können im Zielbild -60 % knapp 55 TWh mehr Erdgas eingesetzt werden als im Zielbild -35 %. Im Gegensatz dazu wird im Zielbild -35 % eine um fast einen Faktor drei größe- re Endenergiemenge aus erneuerbaren Energien benötigt, um das Ziel $PE_{NE} -80 %$ zu erreichen. Dabei ist der EE-Anteil am Strombedarf noch gar nicht eingeschlossen, d.h. der Mehrbedarf erfasst nur Holz, Umweltwärme und Solarthermie. Das Zielbild mit den geringsten Effizienzanstrengungen

(Zielbild -35 %) geht zudem mit einem wesentlich höheren Strombedarf einher. Die beiden Zielbilder -35 % und -60 % unterscheiden sich im Strombedarf um etwa 55 TWh, d.h. im Zielbild -35 % ist die Stromnachfrage etwa 55 TWh höher als im Zielbild -60 %.⁴³ Der im Rahmen der Modellierung verwendete Primärenergiefaktor für Strom impliziert einen hohen EE-Anteil im Strommix. Dies führt dazu, dass der höhere Strombedarf im Zielbild -35 % zu einem zusätzlichen Ausbaudruck auf die EE-Stromkapazitäten führt.

Abbildung 42 zeigt die Entwicklung der energetischen Kennwerte für die drei Zielbilder für den gesamten Gebäudebereich. Analog den beiden Teilbereichen unterscheiden sich die Transformationspfade lediglich hinsichtlich der Entwicklung des Endenergiebedarfs. Da die Sanierungsraten in beiden Teilbereichen erst ab 2020 deutlich steigen, verzeichnen die Verläufe sowohl von End- als auch Primärenergie ab 2020 einen erkennbaren Knick nach unten. Der im Vergleich zum Endenergieverlauf bis zum Jahr 2020 etwas stärkere Abfall bei der Primärenergie basiert darauf, dass in den kommenden Jahren der Umstieg auf CO₂-ärmere Heizungstechniken etwas stärker voranschreitet als die Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle. Die CO₂-Emissionen des Gebäudebereichs sinken in der gewählten Abgrenzung/Zuordnung um durchschnittlich 82 %.

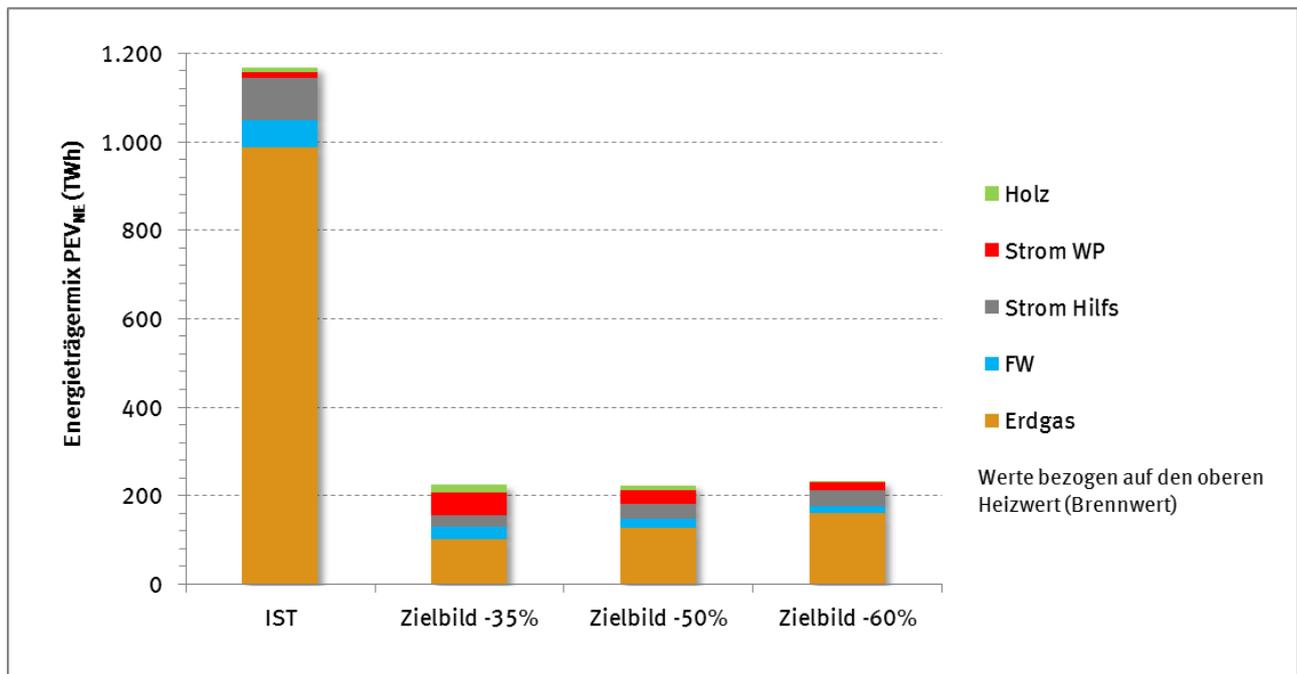
Abbildung 40: Energieträgermix des Endenergieverbrauchs (im Sinne der Energiebilanz) in den drei verschiedenen Zielbildern für den gesamten Gebäudebereich



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

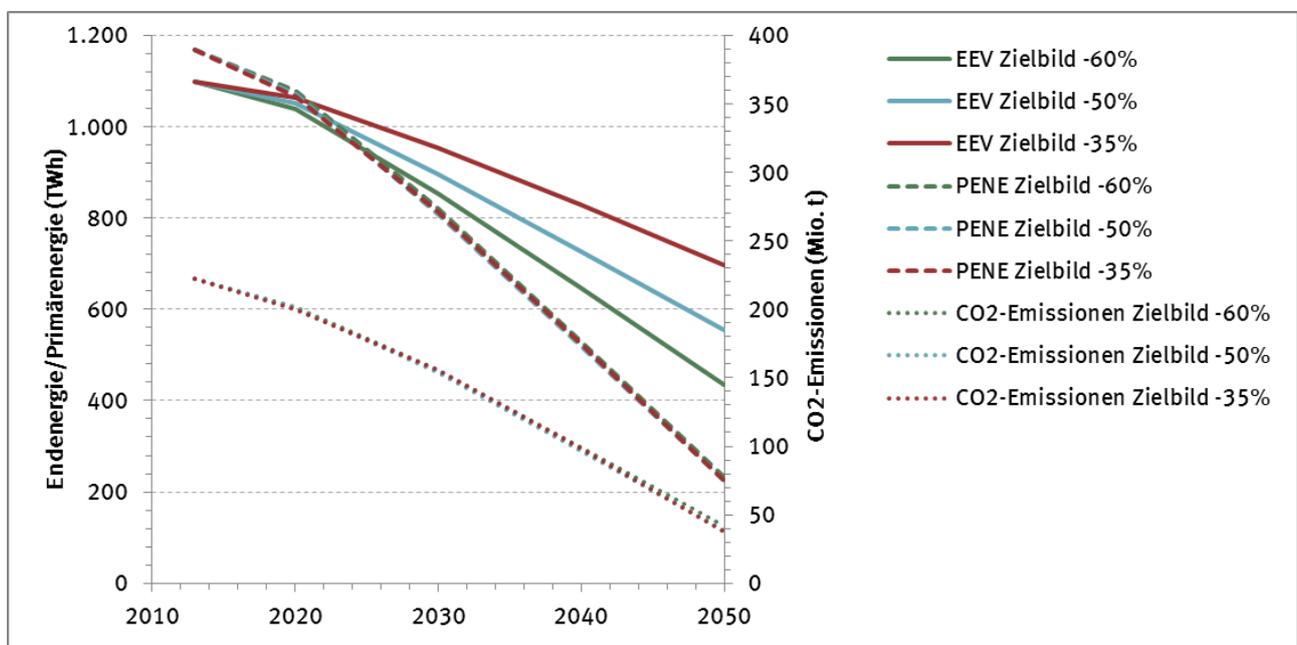
⁴³ Zum Vergleich: Im Jahr 2014 erzeugten Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energien rund 160 TWh Strom. Der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch lag damit bei rund 28 % (BMW 2015).

Abbildung 41: Energieträgermix des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in den drei verschiedenen Zielbildern für den gesamten Gebäudebereich



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 42: Transformationspfade für den gesamten Gebäudebereich – Energetische Kennwerte*)



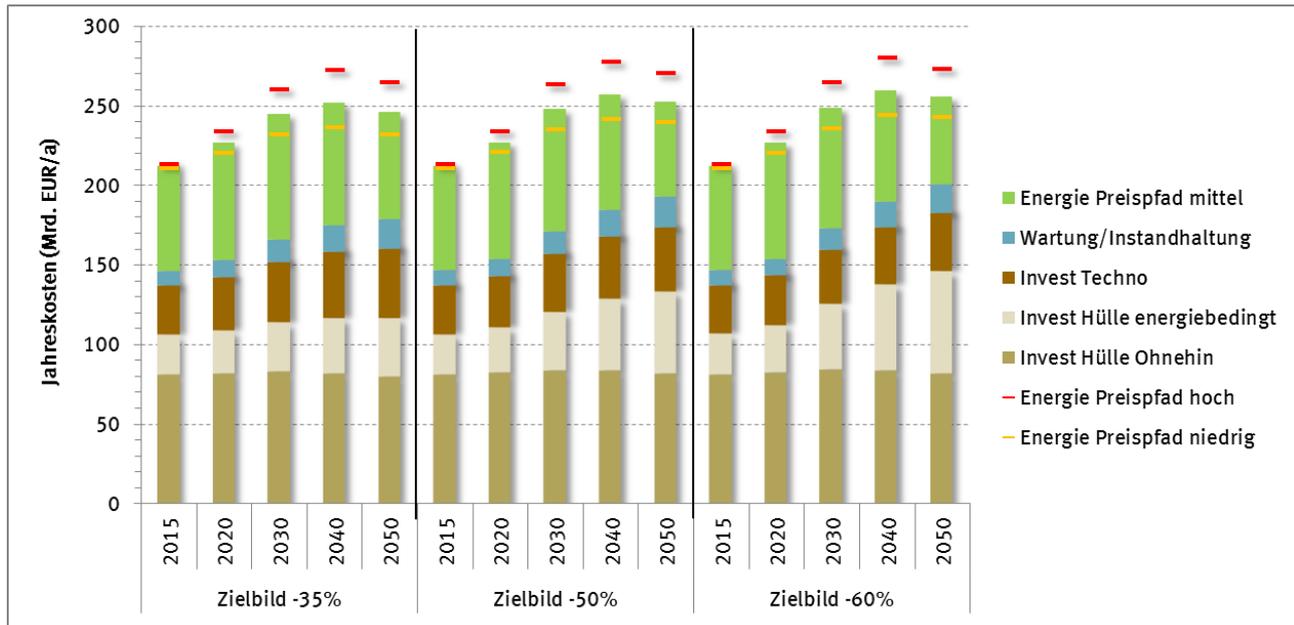
*) End- und Primärenergie projiziert auf die linke Achse, CO₂-Emissionen projiziert auf die rechte Achse

Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 43 beschreibt die Entwicklung der Jahreskosten für die drei Zielbilder des gesamten Gebäudebereichs. Diese ergeben sich aus der Summe der Jahreskosten für die Wohn- und die Nichtwohngebäude. Die dargestellte Entwicklung resultiert deswegen aus einer Überlagerung der in den beiden vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Effekte. Die Jahreskosten steigen von rund 210

Mrd. EUR in 2015 auf einen Maximalwert von rund 260 Mrd. EUR in 2040 (Zielbild -60 % und Zielbild -50 %) bzw. 250 Mrd. EUR (Zielbild -35 %) und sinken dann bis 2050 wieder leicht um rund 2 %. Die Jahreskosten liegen dem zufolge in den beiden Zielbildern mit höheren Wärmeschutzanstrengungen etwas höher als in dem Zielbild mit den geringeren Wärmeschutzaktivitäten. Die Kostendifferenzen sind allerdings sehr gering. Angesichts der großen Unsicherheiten, denen eine Vielzahl der Annahmen unterliegt, die im Zuge der Berechnungen getroffen werden mussten, können daraus allerdings keine Aussagen darüber abgeleitet werden, welcher der Transformationspfade aus der Kostenperspektive der Beste ist.

Abbildung 43: Transformationspfade für den gesamten Gebäudebereich – Jahreskosten



Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Die in Kapitel 6.2.3.1 dargestellten Ergebnisse der Kalibrierung des Ist-Zustands der Wohngebäude anhand des spezifischen Endenergieverbrauchs der Typgebäude (anstelle des rechnerischen Endenergiebedarfs) gehen natürlich auch bezogen auf die Zielbilder und Transformationspfade des gesamten Gebäudebereichs mit leichten Verschiebungen einher:

- Die Kalibrierung anhand des spezifischen Endenergieverbrauchs der Typgebäude ergibt einen gesamten Endenergieverbrauch (bezogen auf den unteren Heizwert) von rund 933 TWh. Dies sind etwa 1,5 % weniger als die (temperaturbereinigte) Anwendungsbilanz für das Jahr 2012 für die bilanzierten Anwendungen ausweist.
- Im Zielbild mit den ambitioniertesten Anstrengungen im Bereich des Wärmeschutzes – alle prinzipiell sanierbaren Wohn- und Nichtwohngebäude werden dabei bis 2050 auf den Standard „vollsaniert plus“ gebracht – sinkt der Endenergieverbrauch um rund 58 % (anstelle von 60 % im Zielbild -60 %). In den anderen beiden Zielbildern sinkt der Endenergieverbrauch um 47 % bzw. 33 % (anstelle von 50 % bzw. 35 % bei der Kalibrierung nach dem rechnerischen Bedarf).
- In allen drei Zielbildern wird eine Reduktion des PE_{NE} um knapp 80 % erreicht. Die auf den Wohngebäudesektor bezogenen CO_2 -Emissionen sinken um 81-82 %.
- Die aus den Kostenrechnungen abgeleiteten Aussagen zur Kostenentwicklung in den drei Zielbildern bleiben unverändert.

6.3 Wechselwirkung der Zielbilder 2050 mit dem gesamten Energiesystem

6.3.1 Das Regenerative Energien Modell Deutschland (REMod-D)

Das am Fraunhofer ISE entwickelte „Regenerative Energien Modell – Deutschland (REMod-D)“ basiert auf einer sektorübergreifenden Modellierung des gesamten Energiesystems Deutschlands unter Einbeziehung aller Verbrauchssektoren. Es handelt sich um die Modellierung eines Zielsystems „auf der grünen Wiese“ (lediglich für die heute installierten fossilen Kraftwerke wird anhand der technischen Lebensdauer ermittelt, welche Kraftwerkskapazitäten voraussichtlich auch 2050 noch in Betrieb sein werden), bei dem als wichtigste Randbedingung die Menge der zulässigen energiebedingten CO₂-Emissionen und daraus abgeleitet die Menge insgesamt nutzbarer fossiler Energieträger vorgegeben wird. Mit Hilfe dieser Vorgabe wird sichergestellt, dass ein bestimmtes politisches Ziel zur Minderung der energiebedingten CO₂-Emissionen erfüllt wird (Zielsystem-Optimierung). Ein Gesamtschema des Modells inklusive aller Energiequellen, -wandler sowie der Verbrauchssektoren ist in Abbildung 44 zu sehen, wobei die Verbrauchssektoren an dieser Stelle nur aggregiert dargestellt werden. Die in den Verbrauchssektoren Verkehr, Strom, Industrie und Wärme zugelassenen einzelnen Techniken sind in der Abbildung nicht dargestellt, werden aber im Folgenden, bzw. in Kapitel 6.3.2, im Einzelnen beschrieben. In Kapitel 9.3 im Anhang sind darüber hinaus alle wesentlichen Parameter für die Gesamtsystemmodellierung aufgelistet

Für die Sektoren Strom und Wärme und deren Wechselwirkung wird eine gesamtwirtschaftliche Kostenoptimierung durchgeführt, die die energetische Sanierung von Gebäuden und die für die Wärmebereitstellung eingesetzten Techniken mit umfasst. Kostenoptimierung bedeutet in diesem Zusammenhang die Identifikation von Systemlösungen, die zu minimalen jährlichen Gesamtkosten zum Erhalt und Betrieb des Energiesystems unter der oben genannten Randbedingung der Begrenzung der CO₂-Emissionen führen. In die Kostenbetrachtung fließen die technologiespezifische kapital- und betriebsgebundene Annuität sowie die Kosten für Energieträger und CO₂-Zertifikate mit ein. Durch die reine Kostenoptimierung wird auch bei geringfügigen Kostenunterschieden zwischen einzelnen Optionen immer die kostengünstigere Option gewählt (innerhalb der gesetzten Rahmenparameter wie z.B. Potenzialgrenzen für erneuerbare Energien). Bei der Optimierung müssen die stündlichen Energiebilanzen des Gesamtsystems immer ausgeglichen sein. Das Modell rechnet zeitlich aufgelöst in Stundenzeitschritten, so dass die Wechselwirkung von Erzeugung und Nachfrage nach Energieträgern sektor- und energieträgerübergreifend erfasst wird. Insbesondere Flexibilisierungsoptionen der Stromerzeugung und -nutzung im Wärmesektor und die Implikation eines steigenden Strombedarfs im Verkehrssektor werden im Modell abgebildet. Die exogenen Vorgaben, das Optimierungsziel und die Modellergebnisse sind in Abbildung 45 schematisch dargestellt.

Die Stromversorgung und -nachfrage wird im Modell durch einen Knoten (sog. Kupferplatten-Modell) vereinfacht abgebildet. Das Modell kann daher keine Aussage über mögliche technische Stromengpässe treffen (REMod-D ist demnach kein detailliertes Stromnetzmodell und nicht für die Optimierung des Stromnetzes entwickelt worden). Die Kosten des erforderlichen Stromnetzausbaus sind aber proportional zur installierten Leistung der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeuger (fEE) berücksichtigt. Der Gebäudebereich ist wesentlich detaillierter abgebildet. Im Modell werden die vier Gebäudetypen Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH), Mehrfamilienhäuser (MFH), große Mehrfamilienhäuser (GMH) und Nicht-Wohngebäude (NWG) unterschieden. Die in diesem Projekt definierten Gebäudetypen, die unter anderem noch eine Unterscheidung nach Baualtersklassen aufweisen, wurden für die Simulation des gesamten Energiesystems entsprechend aggregiert.

Gebäude können im Modell durch insgesamt zehn Techniksysteme versorgt werden. Für die Wärmebereitstellung in Gebäuden sind zwei netzgebundene und acht dezentrale Versorgungsoptionen implementiert, wobei nicht alle Systeme im Rahmen des Projekts genutzt werden (s.u.). Als netzgebundene Lösungen sind zum einen große und mittlere KWK-Anlagen, d.h. GUD-KWK und BHKW-

Anlagen und zum anderen mittels tiefer Geothermie versorgte Wärmenetze abgebildet. In KWK-versorgten Fernwärmenetzen werden große KWK-Anlagen mit großen Wärmepumpen, Solarthermieanlagen und großen thermischen Speichern kombiniert. Zusätzlich sind große Gas-Brennwertkessel zur Deckung der Spitzenlast implementiert. Die Wärmepumpen werden zu Zeiten mit hoher Stromerzeugung aus fEE eingesetzt und stellen Wärme entweder direkt für die Gebäude zur Verfügung oder speichern diese in zentralen Speichern, da bei Stromüberschuss im Netz der Betrieb von KWK-Anlagen die Netzbelastung zusätzlich vergrößern würde.

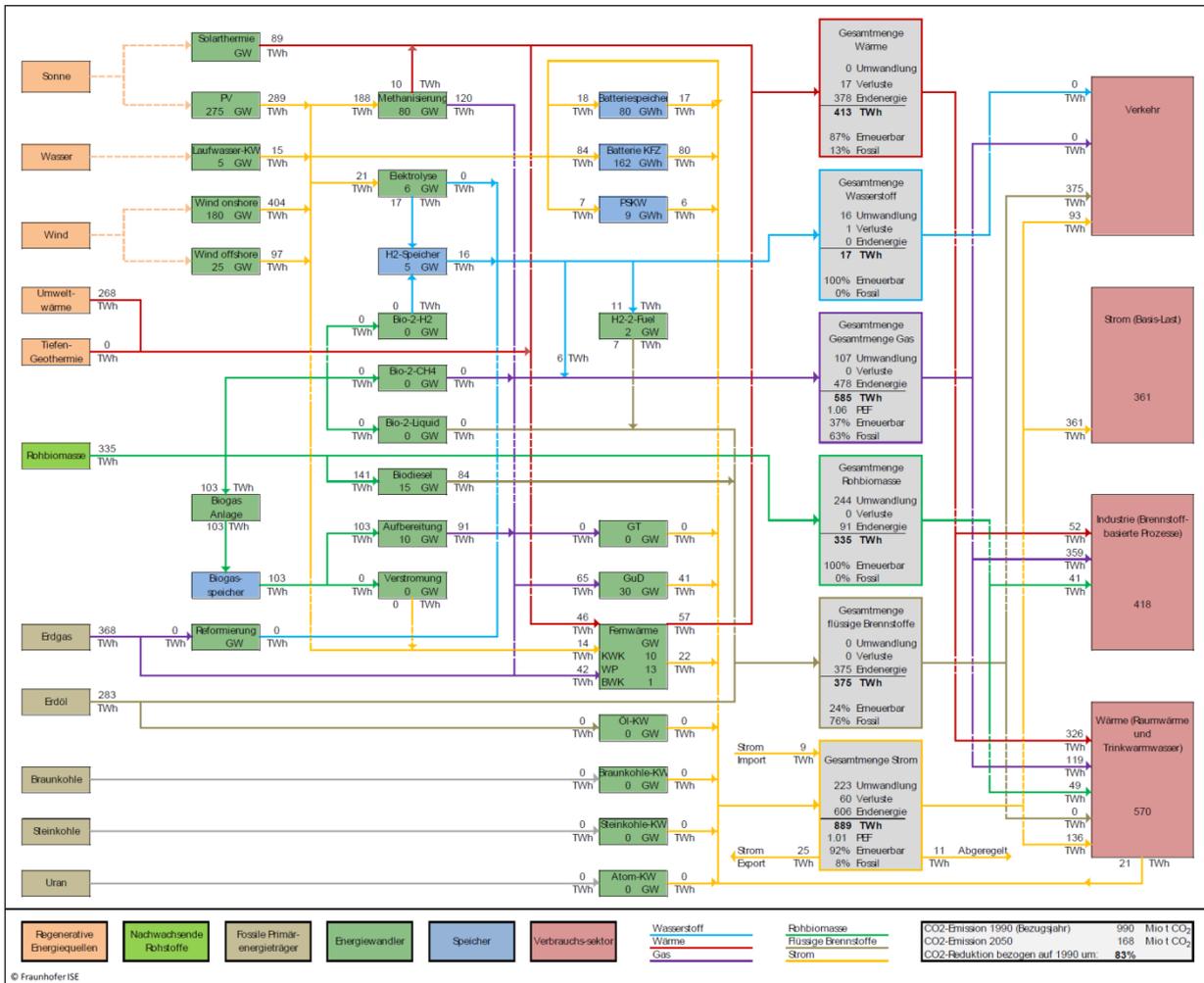
Bei der netzgebundenen Wärmeversorgung basierend auf KWK-Anlagen werden vier Siedlungsstrukturen unterschieden, die sich in der benötigten Wärmeleistung und den spezifischen Kosten der Wärmenetze unterscheiden. Die Siedlungsstrukturen Stadtrandgebiete, Dörfer und Kleinstädte (ST II), städtische Gebiete mit mittlerer Gebäudedichte (ST IIIa), dicht besiedelte Stadtzentren (ST IIIb) und Industrie- und Gewerbegebiete (ST IV) basieren auf den Definitionen in Nast (1997) und sind den definierten Gebäudetypen EZFH, MFH, GMH respektive NWG entsprechend dem jeweils dominierenden Gebäudetyp zugeordnet (genauere Beschreibung der Siedlungsstrukturtypen sind in Kapitel 4.5).

Die dezentralen Heizungstechniken verwenden entweder Strom (Sole-, Luft- und Hybrid-Wärmepumpen), Gas als Brennstoff für Brennwertkessel, Gas- und Hybrid-Wärmepumpen oder kleine BHKW Anlagen, holzartige Biomasse als Brennstoff in Holzkesseln oder Heizöl/ flüssige Brennstoffe in Öl-Brennwertkesseln. Die dezentralen Systeme verfügen auch über thermische Wasserspeicher und die Möglichkeit, solare Wärme (Solarkollektoren) zu nutzen und als weitere Option Strom in den Speichern direkt in Wärme zu wandeln und zu speichern. Die Option der direkten Wärmeerzeugung mittels Heizstab in den Speichern wird nur genutzt, wenn bei hoher Stromeinspeisung aus fEE keine weitere Möglichkeit der Stromnutzung im System gegeben ist.

Zur besseren Anbindung an die vorangegangenen Arbeitsschritte steht dem Modell im Rahmen dieses Projekts allerdings nur eine begrenzte Auswahl an Versorgungstechniken zur Wärmebereitstellung zur Verfügung, nämlich die in Kapitel 4.3.3 definierten Optionen.

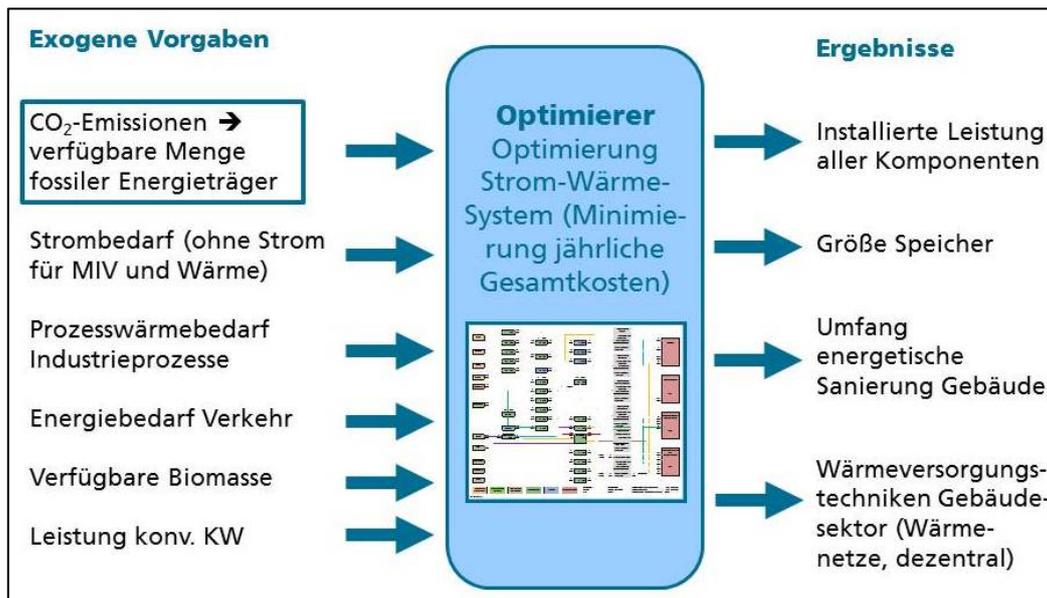
Die Systemzusammensetzung ergibt sich aus einer kostenoptimalen Verteilung der Techniken unter der Prämisse, dass während eines Jahres zu jeder Stunde die Strom-, Wärme- und Brennstoffnachfrage bedient werden kann. Die spezifischen Kosten, z.B. Investitionskosten (in EUR₂₀₁₃/kW_{el}, EUR₂₀₁₃/kW_{th}, EUR₂₀₁₃/kWh) der Techniken repräsentieren das erwartete Kostenniveau im Zieljahr 2050. Verglichen zu heutigen Kosten sind aufgrund der bis dahin erwarteten Marktdurchdringung und Technikfortschritte die Kostenansätze dementsprechend niedriger als heute.

Abbildung 44: Schema des Energiesystems im Modell REMod-D



Quelle: Fraunhofer ISE

Abbildung 45: Schema der exogenen Vorgaben, der Optimierung und der Ergebnisse des Modells REMod-D



Quelle: Fraunhofer ISE

Weitere Eingangsgrößen für die Modellierung sind die Stromlastprofile der ENTSO-E für u.a. Haushalte (ohne Strom für Wärme), Industrie und den Schienenverkehr. Die restliche Stromlast aus den Erfordernissen der Wärmebereitstellung, Erzeugung synthetischer Brennstoffe oder auch aus der Zusammensetzung des Verkehrssektors wird im Modell berechnet. Die Energienachfrage der Luft- und (Binnen-)Schifffahrt sowie des Schienenverkehrs und die Bereitstellung brennstoffbasierter Prozesswärme im Gewerbe werden durch ein konstantes, stündliches Profil abgebildet. Dabei wird angenommen, dass sich der Energiebedarf in diesen Bereichen bis zum Jahr 2050 bezogen auf 2013 nicht ändert.

Die Ergebnisse der Gesamtsystemmodellierung können sich von den Ergebnissen der Zielbilder (s. Kapitel 6.2) insbesondere beim Endenergieverbrauch unterscheiden. Dies liegt unter anderem an den unterschiedlichen Rechenansätzen. Grundlage für die Berechnung der Zielbilder sind Monatsbilanzverfahren, wohingegen für die Einbindung der Wärmenachfrage in das Gesamtsystem ein Stundenverfahren verwendet wird (vereinfachtes Stundenverfahren nach DIN EN 13790). Darüber hinaus unterscheiden sich die Rechnungen hinsichtlich der Wetterdaten. Grundlage für die Berechnungen mit REMod-D sind reale, stündliche Wetterdaten von zwei Referenzstandorten für Nord- und Süddeutschland des Jahres 2011, wohingegen bei der Berechnung der Energiekennwerte monatliche Standardwetterdaten verwendet wurden. Darüber hinaus orientiert sich die Betriebsweise der Heizungstechniken in REMod-D nicht ausschließlich am Wärmebedarf der Gebäude, sondern auch am Gesamtenergieangebot und der gesamten Nachfrage im Energiesystem und wird, zusammen mit den thermischen Speichern, für die Stabilisierung des Energiesystems genutzt. Ein weiterer Unterschied zwischen den Ansätzen ist, dass in REMod-D der Hilfsstrombedarf für die Wärmebereitstellung (Heizung und Warmwasser) nicht separat ausgegeben wird und daher – anders als bei der Darstellung der Zielbilder – nicht in den Bilanzen des Endenergiebedarfs für die Wärmebereitstellung der Gebäude erscheint. Auch haben in REMod-D Wärmepumpen eine variable Effizienz, die vom Temperaturunterschied zwischen der Umgebung und dem Heizungsvorlauf abhängt, wohingegen die Berechnungen der Zielbilder für Wärmepumpen konstante Jahresarbeitszahlen zugrunde legen.

6.3.2 Annahmen und Rahmenparameter

Für die im Rahmen des Projekts durchgeführten Simulationen wurden verschiedene Rahmenparameter gesetzt und definiert, die im Folgenden beschrieben werden.

Ein wichtiger Faktor für das Energiesystem ist die maximal zugelassene Menge an CO₂-Emissionen. Aus dieser Menge lässt sich ableiten, welche Menge fossiler Energieträger dem Energiesystem noch zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Projekts wurden Szenarien mit einer Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen zwischen 79 und 83 % bis 2050 bezogen auf 1990 berechnet. Dies entspricht einer insgesamt noch zur Verfügung stehenden CO₂-Menge von 208 bis 168 Millionen Tonnen pro Jahr. Die daraus ableitbaren maximal zulässigen Mengen an fossilen Energieträgern ergeben sich aus dem ermittelten Technikmix, v.a. im Gebäude- und Verkehrssektor. Da für die Energiesystemmodellierung festgelegt wurde, dass im Jahr 2050 keine Kohlekraftwerke mehr in Betrieb sein werden, stehen als fossile Energien, Erdgas und Erdölprodukte zur Nutzung in den verschiedenen Sektoren zur Verfügung. Neben der Einfuhr und Nutzung dieser fossilen Energieträger stehen dem Energiesystem 20 GW_{el} an Im- und Exportkapazitäten für Strom zur Verfügung (basierend auf dem Szenario KS 80 aus Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014). Dies entspricht einer leichten Steigerung gegenüber der heute zur Verfügung stehenden Koppelleistung von ca. 15-17 GW_{el}.

Weitere Rahmenparameter sind durch die langfristigen Ziele der Bundesregierung vorgegeben (BMW_i 2010). Die Ziele bis zum Jahr 2050 umfassen vor allem die Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs um 50 % bezogen auf das Jahr 2008, ein Anteil erneuerbarer Energien von 60 % am Brutto-Endenergieverbrauch, die Reduktion des Stromverbrauchs um 25 % verglichen mit 2008 und ein Anteil erneuerbarer Energien von 80 % an der Stromerzeugung. Es wird dabei angenommen, dass das 25 %-Reduktionsziel beim Stromverbrauch den Stromverbrauch für Heizungsanlagen und den Verkehrssektor nicht erfasst.

Für die erneuerbare Stromerzeugung stehen dem Energiesystem die in Tabelle 67 aufgelisteten Potenziale zur Verfügung. Im Rahmen der Modellierung werden die installierten Kapazitäten für Wasser- und Pumpspeicherkraftwerke als feste Größe vorgegeben; sie sind somit nicht Gegenstand der Optimierung. Darüber hinaus kann die verfügbare Biomasse nicht nur für die direkte Stromerzeugung in z.B. Biogasanlagen oder für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme im Gebäudesektor genutzt, sondern mit verschiedenen Techniken aufbereitet und gewandelt werden, wodurch sie von verschiedenen Anwendungen und Sektoren genutzt werden kann. Biomasse kann darüber hinaus für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme in Gewerbe- und Industrie genutzt werden.

Tabelle 67: Potenziale Erneuerbarer Energien

Erneuerbare Energie	Maximales Potenzial	Quelle
Wind Offshore	25 GW	Setzung nach Rücksprache mit UBA, angelehnt an UBA (2014)
Wind Onshore	180 GW	Setzung nach Rücksprache mit UBA, angelehnt an UBA (2014)
Photovoltaik	275 GW	UBA (2014)
Wasserkraft	5,2 GW	UBA (2014)
Pumpspeicherkraftwerke	8,6 GW	UBA (2014)
Biomasse (gesamt)	335 TWh	Öko-Institut/Prognos (2009)
davon holzartige Biomasse	91 TWh	Öko-Institut/Prognos (2009), FNR (2011)

Quelle: Fraunhofer ISE

Um die Ergebnisse der Modellierung für die verschiedenen Szenarien und Zielbilder bezogen auf den Gebäudebestand besser vergleichen zu können, wurden darüber hinaus die eingesetzten Antriebstechniken im Verkehrssektor festgesetzt; sie sind damit nicht Gegenstand der Optimierung. Die Verteilung der Techniken basiert auf der Studie Treibhausgasneutrales Deutschland 2050 (UBA 2014) und ist in Tabelle 68 dargestellt.

Tabelle 68: Anteil der jeweiligen Antriebskonzepte am PKW- und LKW-Bestand im Jahr 2050

Antriebskonzept	PKW	LKW
Flüssige Treibstoffe, konventionelle Motoren	4%	70%
Plug-In-Hybrid, flüssige Treibstoffe	81%	23%
Batterieelektrisch	15%	7%

Quelle: Darstellung des Fraunhofer ISE auf Grundlage von UBA (2014)

Für den Gebäudesektor werden sieben verschiedene Varianten modelliert (vgl. Tabelle 69):

- Die drei zentralen Varianten sind die in Kapitel 6.2 dargestellten Zielbilder. Diese geben den Sanierungsgrad der Gebäudetypen und die in den Gebäudetypen eingesetzten Heizungstechniken vor.
- Darüber hinaus wird für jedes der drei Sanierungsszenarien (Endenergiereduktion im Gebäudesektor -35 %, -50% und -60 %) eine freie Optimierung der (im Rahmen dieses Projekts zugelassenen) Heizungstechniken vorgenommen. Anders als bei den ersten drei Varianten wird bei diesen Varianten die Verteilung auf die Heizungstechniken also nicht exogen vorgegeben, vielmehr ist sie ein Ergebnis der Optimierung. Es wird also untersucht, welche Technikverteilung sich bei einer Optimierung der Jahresgesamtkosten des gesamten Energiesystems im Jahr 2050 ergibt.
- Die siebte Variante wurde ohne eine Festsetzung des Sanierungsgrades und der Heizungstechniken durchgeführt. Vielmehr ergeben sich diese Parameter aus der Optimierung.

Die Szenarien unterscheiden sich ausschließlich im Gebäudesektor. Alle anderen Parameter werden konstant gehalten. Die Ergebnisse der Simulation werden im folgenden Kapitel vorgestellt und diskutiert. Die technischen und ökonomischen Parameter der wesentlichen Techniken (EE-Stromerzeugung, Stromspeicher, Erzeuger synthetischer Brennstoff, Heizungstechniken) sind im Anhang (s. Kapitel 9.3) aufgelistet.

Tabelle 69: Wesentliche Merkmale der untersuchten Varianten*)

Szenario	Setzung Sanierungsgrad/ Minderung des Endenergiebedarfs im Gebäudesektor	Setzung Heizungstechniken
Frei -83% CO2	Frei	Frei
Frei-35%EEV -83%CO2	Wohngebäude: Zielbild -40% Nichtwohngebäude: Zielbild -25%	Frei
Zielbild-35%EEV -83%CO2	Wohngebäude: Zielbild -40% Nichtwohngebäude: Zielbild -25%	Wohngebäude: Zielbild -40% Nichtwohngebäude: Zielbild -25%
Frei -50%EEV -83%CO2	Wohngebäude: Zielbild -55% Nichtwohngebäude: Zielbild -35%	Frei

Zielbild -83%CO ₂ -50%EEV	Wohngebäude: Zielbild -55% Nichtwohngebäude: Zielbild -35%	Wohngebäude: Zielbild -55% Nichtwohngebäude: Zielbild -35%
Frei -60%EEV -83%CO ₂	Wohngebäude: Zielbild -70% Nichtwohngebäude: Zielbild -45%	Frei
Zielbild -60%EEV -83%CO ₂	Wohngebäude: Zielbild -70% Nichtwohngebäude: Zielbild -45%	Wohngebäude: Zielbild -70% Nichtwohngebäude: Zielbild -45%

*¹⁾ EEV steht in der Bezeichnung der Szenarien für den Endenergieverbrauch, Zielbild steht für die Technikzusammensetzung und Endenergiereduktionsniveau nach den Berechnungen in Kapitel 6.2.

Quelle: Fraunhofer ISE

6.3.3 Ergebnisse der Gesamtsystemoptimierung

Die im Folgenden vorgestellten und beschriebenen Ergebnisse basieren auf den in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Rahmenparametern und der Vorgabe, die energiebedingten CO₂-Emissionen bezogen auf die Emissionen im Jahr 1990 um 83 % zu reduzieren. Das Reduktionsziel von 83 % wurde vor dem Hintergrund der Annahme gewählt, dass es in einigen Sektoren, wie z.B. der Landwirtschaft, schwer fallen dürfte, die sektorspezifischen THG-Emissionen in der Größenordnung von 80 % zu reduzieren. Es wird deswegen unterstellt, dass zu Kompensationszwecken die energiebedingten Emissionen stärker sinken müssen, um sektorübergreifend eine THG-Emissionsminderung von mindestens 80 % zu erreichen.

6.3.3.1 Sanierungsstandards

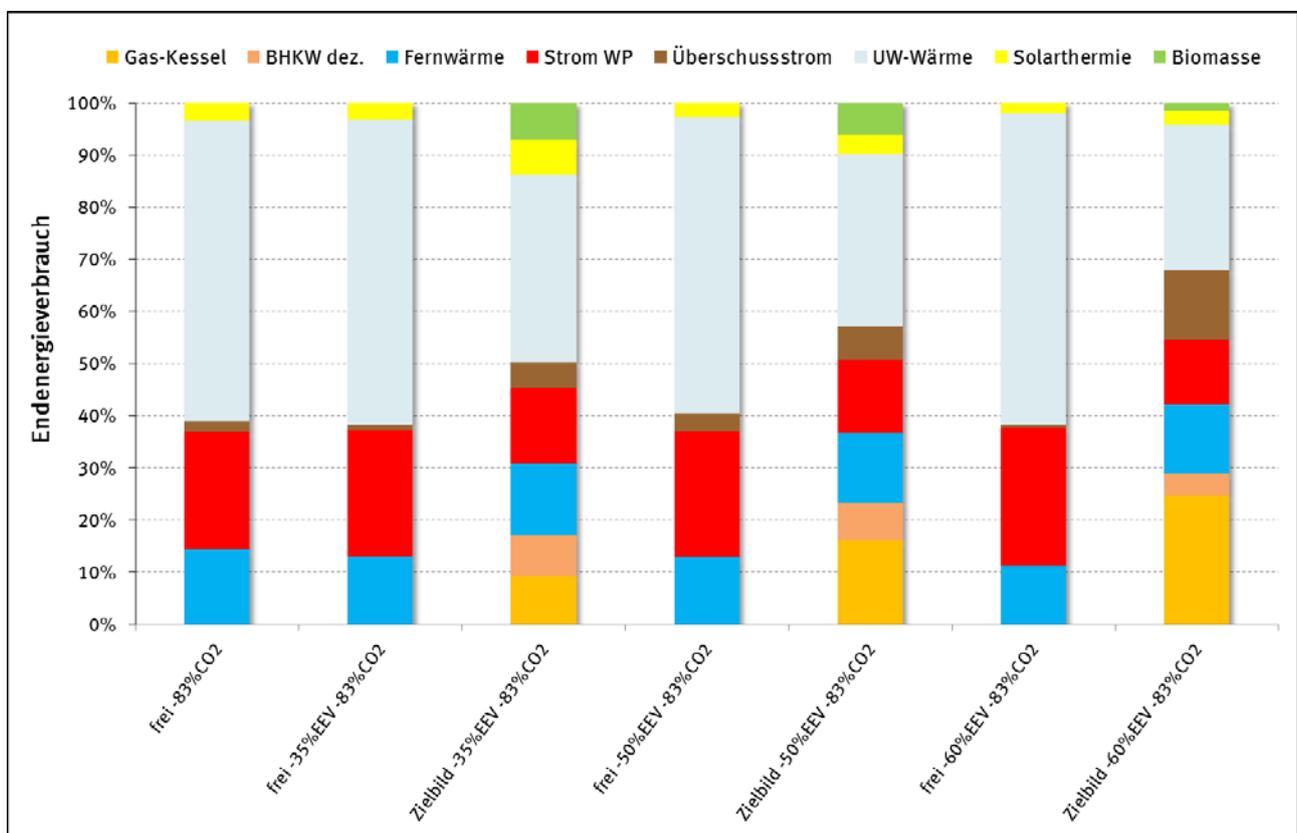
Die drei Zielbilder des Gebäudesektors unterscheiden sich unter anderem in der Verteilung der Gebäude bzw. Wohn- und Nutzfläche auf die drei im Rahmen der Untersuchung zulässigen energetischen Zustände „unsaniert“, „vollsaniert“ und „vollsaniert plus“. Die Verteilung ergibt sich in erster Linie aus dem Zielwert für die Minderung des Endenergieverbrauchs. Die entsprechende Verteilung ist in Kapitel 6.2.3 dargestellt. Im Szenario „Frei -83 % CO₂“ wird hingegen keine Verteilung exogen vorgegebene, vielmehr ist die Verteilung Ergebnis der Optimierung. Es zeigt sich, dass in dem Szenario lediglich eine Endenergiebedarfsreduktion von ca. 20 % erreicht wird (im Gegensatz zu den drei Zielbildern mit Reduktionswerten von 35 %, 50 % und 60 %). Der Anteil vollsanierter Gebäude liegt in dem Szenario mit komplett freier Optimierung bei 75 %, der Anteil unsanierter Gebäude bei 25 %. Der Standard „vollsaniert plus“ wird im Rahmen der Optimierung gar nicht „gezogen“, d.h. weder beim Neubau noch bei energetische Sanierungen bestehender Gebäude wird dieser Sanierungsstatus aufgrund der höheren spezifischen Kosten erreicht. Ein weiterer Unterschied zwischen komplett freier Optimierung und den festgelegten Zielbildern besteht darin, dass nahezu alle Wohngebäude den Standard „vollsaniert“ erreichen, wohingegen die Nichtwohngebäude fast ausschließlich im unsanierten Zustand verbleiben. Grund hierfür ist, dass die spezifischen Einsparkosten in Wohngebäuden geringer sind als in Nichtwohngebäuden.

6.3.3.2 Heizungstechniken und Wärmebereitstellung

Abbildung 46 zeigt den Anteil der verschiedenen Techniken an der Wärmebereitstellung im Gebäudesektor bezogen auf die gesamte bereitgestellte Endenergiemenge. Der Anteil der Heizungstechniken an der Wärmebereitstellung in den auf den Zielbildern basierenden Szenarien kann sich von den in Kapitel 6.2 dargestellten Anteilen unterscheiden. Gründe für die Unterschiede sind in Kapitel 6.3.1 beschrieben. Weitere Unterschiede ergeben sich aus der Wahl des Bilanzierungsraums. Während im Rahmen der Modellierung mit REMoD-D die Sektoren miteinander interagieren, wird bei der Erstellung der Zielbilder nur der isolierte Gebäudesektor betrachtet. Dies führt u.a. dazu, dass bei der Gesamtsystemmodellierung infolge der Sektorinteraktion in Zeiten hoher Stromproduktion Strom auch in die Wärmeversorgung im Gebäudesektor fließen und dabei konventionelle Brennstoffe verdrängen kann (Wärmeerzeugung über Heizstäbe in zentralen und dezentralen Wärmespeichern; die Option

der Nutzung ist prinzipiell in jedem Wärmespeicher möglich, wird aber nur verwendet, wenn alle anderen Möglichkeiten der Stromnutzung ausgeschöpft wurden). Im Rahmen der Zielbilder ist diese Option nicht möglich.

Abbildung 46: Prozentuale Verteilung der Wärmebereitstellung im Jahr 2050 (bezogen auf den Endenergieverbrauch) im Gebäudesektor in den verschiedenen Szenarien



Quelle: Eigene Berechnungen des Fraunhofer ISE

Bei der freien Optimierung (linker Balken in Abbildung 46) haben Wärmepumpenstrom und durch Wärmepumpen gewandelte Umweltwärme einen Anteil von 23 % bzw. 58 % an der Wärmebereitstellung im Gebäudesektor, gefolgt von der Fernwärme mit 14 %, der Solarthermie mit 3 % und der Nutzung von Überschussstrom mit 2 %. Kesseltechniken und dezentrale BHKWs spielen hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Mit Wärmepumpen dominiert eine strombasierte Technik die Wärmebereitstellung deutlich, gefolgt von der Fernwärmeversorgung. Dies ist zum einen auf die im Vergleich zu dezentralen BHKWs geringeren spezifischen Kosten zurückzuführen, zum anderen aber auch auf die Flexibilität, die Wärmepumpen hinsichtlich der Integration fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitstellen. Die Flexibilität von Fernwärmenetzen wird durch die Kombination mit großen thermischen Speichern und zentralen Wärmepumpen ermöglicht, wodurch sowohl auf ein Stromüber- als auch -unterangebot reagiert werden kann.

Endenergieverbrauch -35 %:

Wird in dem Zielbild -35 % die Verteilung der Heizungstechniken frei optimiert, ergibt sich eine Verteilung der Wärmebereitstellung, die sich von der komplett freien Optimierung nur unwesentlich unterscheidet. Die Anteile der Überschussstromnutzung und der Fernwärme sind mit 1 % bzw. 13 % etwas niedriger, der Anteil der Solarthermie mit 3 % gleichbleibend. Der Wärmepumpenstrom trägt mit 24 % am meisten zur Wärmebereitstellung bei und die Umweltwärme hat einen Anteil von 59 %.

Im Szenario „Zielbild -35 %EEV -83 %CO₂“ werden die Anteile der Heizungstechniken über das Zielbild direkt vorgegeben. An der Wärmebereitstellung haben Wärmepumpen verglichen mit der freien Optimierung einen geringen Anteil von 15 % (Strombezug) und 36 % (Umweltwärme). Fernwärme spielt mit ca. 14 % eine vergleichbare Rolle. Der Anteil der Solarthermie ist mit 7 % an der bereitgestellten Wärme hingegen höher. Im Gegensatz zur freien Optimierung spielen Kesseltechniken und dezentrale BHKWs eine wichtige Rolle. Gaskessel haben noch einen Anteil von 9 %, Biomassekessel von 7 % und dezentrale BHKWs stellen 8 % der Wärme in Gebäuden bereit. Darüber hinaus werden ca. 5 % der Wärme durch die direkte Nutzung von Überschussstrom bereitgestellt.

Endenergieverbrauch -50 %:

Wärmepumpen dominieren auch im Szenario „Frei -50 % EEV -83 % CO₂“ den Wärmesektor und decken mit einem Anteil von 81 % den Großteil des Wärmebedarfs (Strom 24 %, Umweltwärme 57 %). Die Bedeutung der Fernwärme nimmt im Vergleich zu dem Szenario „Frei -35 % EEV -83 % CO₂“ nochmals leicht ab und auch der Anteil der Solarthermie sinkt leicht. Der Anteil von Überschussstrom steigt hingegen leicht auf ca. 3 %.

Im Gegensatz zur freien Optimierung („Frei -50 % EEV -83 % CO₂“) sinkt der Anteil der Wärmepumpen an der bereitgestellten Wärmemenge im Szenario „Zielbild -50 % EEV -83 % CO₂“ auf 47 % (Strom 14 %, Umweltwärme 33 %). Eine leicht größere Rolle spielen hingegen die Solarthermie (4 %) die Biomassekessel (6 %) und dezentrale BHKWs (7 %). Stärker an Bedeutung gewinnen die Gaskessel (16 %) und die Nutzung von Überschussstrom (ca. 7 %). Die Fernwärme ist mit 13 % in beiden Szenarien relativ konstant. Im Vergleich zum Szenario „Zielbild -35 % EEV -83 % CO₂“ nimmt im Szenario „Zielbild -50 % EEV -83 % CO₂“ die Bedeutung der Solarthermie (minus 3 Prozentpunkte), die Biomassekessel (minus 1 %) und dezentrale BHKWs (minus 1 Prozentpunkt) ab.

Endenergieverbrauch -60 %:

Im Vergleich zu der Verteilung der Heizungstechniken bei den zuvor beschriebenen Endenergiebedarfsreduktionszielen ergeben sich bei der freien Optimierung der Heizungstechniken keine wesentlichen Veränderungen im Szenario „Frei -60 % EEV -83 % CO₂“. Wärmepumpen dominieren mit 86 % die Wärmebereitstellung (Strom 26 %, Umweltwärme 60 %), gefolgt von Fernwärme mit 11 % und Solarthermie mit ca. 2 %. Die Nutzung von Überschussstrom trägt nur zu 0,6 % zur Wärmebereitstellung bei.

Die größten Veränderungen im Vergleich zum Szenario „Zielbild -50 %EEV -83 % CO₂“ ergeben sich im Szenario „Zielbild -60 % EEV -83 % CO₂“ bei den Gaskesseln, deren Anteil auf 25 % steigt, den BHKWs, deren Anteil auf nur noch 4 % sinkt und den Biomassekesseln, die nur noch einen Anteil von 1,6 % an der gesamten Wärmebereitstellung haben. Der Anteil der Wärmepumpen verringert sich geringfügig auf 40 % und der Anteil der Fernwärme steigt leicht auf ca. 13 %. Der Anteil der Solarthermie ist mit 2,5 % auf einem niedrigen Niveau. Eine Besonderheit des Szenarios „Zielbild -60% EEV -83 % CO₂“ ist, dass die Nutzung von Überschussstrom für die Wärmebereitstellung einen Anteil von 13 % am Endenergiebedarf einnimmt, also einen etwa doppelt so hohen Anteil hat wie im Szenario „Zielbild -50 % EEV -83 % CO₂“.

Zusammenfassung:

Die Wärmebereitstellung bei der freien Optimierung der Wärmetechniken unterscheidet sich deutlich von den Anteilen an der Wärmebereitstellung, die sich mit den in Kapitel 6.2 beschriebenen Zielbildern ergeben. Bei der freien Optimierung kommen wesentlich mehr Wärmepumpen zum Einsatz, und auch Fernwärmesysteme haben einen größeren Anteil. Dies liegt in erster Linie daran, dass beide Optionen direkt mit dem Stromsystem interagieren und auf Schwankungen der Stromerzeugung besser reagieren können. Die größere Rolle von Techniken, die flexibel auf ein schwankendes Stromangebot reagieren können, ist darauf zurückzuführen, dass künftige Energiesysteme mit einem hohen

Anteil fEE stark „stromgetrieben“ sein werden. Heizungstechniken, die in den Zielbildern noch eine wichtige Rolle spielen (vor allem Kessel und dezentrale BHKWs, die zusammen einen Anteil zwischen 43 % und 56 % an der Wärmebereitstellung haben), werden bei der freien Optimierung hingegen kaum genutzt. Dies liegt an folgendem Zusammenhang: Der Einsatz von Erdgas und Biomasse zur Wärmebereitstellung im Gebäudesektor führt aus der Perspektive des Gesamtsystems dazu, dass diese Brennstoffmengen anderen Sektoren nicht mehr zur Verfügung stehen. Dies hätte zur Folge, dass insbesondere im Industrie- und Verkehrssektor diese Brennstoffe verstärkt durch die Erzeugung erneuerbarer flüssiger und gasförmiger Brennstoffe ersetzt werden müssten. Hierfür wären zusätzliche Wandler erforderlich. Die zusätzlichen Wandlungsschritte sind jedoch mit höheren Verlusten verbunden und verursachen damit einen insgesamt höheren Strombedarf im Energiesystem. Aus der Gesamtsystemperspektive ist es also günstiger, die Brennstoffe bevorzugt im Industrie- und Verkehrssektor einzusetzen und Niedertemperaturwärme im Gebäudesektor mittels Wärmepumpen zu erzeugen.

Die Unterschiede in der Technikverteilung machen deutlich, dass unterschiedliche Perspektiven zu unterschiedlichen Verteilungen führen können. Die Technikverteilung, wie sie bei der Entwicklung der Zielbilder vorgenommen wurde, erfolgt aus der (isolierten) Perspektive des individuellen Sektors. Sie spiegelt damit in erster Linie die Entscheidungskalküle der Bauherren und Hauseigentümer des Gebäudesektors wider. Bei der Wahl eines Heizsystems haben Kriterien, welche Rolle das Heizsystem in Hinblick auf die Optimierung des gesamten Energiesystems einnehmen kann, bislang keine Bedeutung. Vielmehr spiegelt die vorgenommene Technikverteilung den Wunsch vieler Bauherren und Gebäudeeigentümer nach einem „eigenen“ Heizungssystem („Erzeugungsautarkie“) wider. Entsprechend hoch ist der Anteil dezentraler Systeme. Auch bei den Rahmenbedingungen aus ordnungsrechtlichen Anforderungen oder bestehenden Förderprogrammen spielt die Wechselwirkung des Gebäudesektors mit den anderen Sektoren keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Bei der Entwicklung der Zielbilder und Transformationspfade in Kapitel 6.2 wurde deswegen unterstellt, dass sich die Ausgangslage auch in Zukunft nicht grundlegend ändert. In Folge ergibt sich eine Technikverteilung, die aus der Perspektive bzw. den Anforderungen des gesamten Energiesystems suboptimal erscheint.

6.3.3.3 Stromerzeugung

Die Strombereitstellung für das gesamte Energiesystem ist in Abbildung 47 dargestellt. Die Stromerzeugung in den Szenarien beträgt zwischen ca. 800 und 950 TWh pro Jahr. Die höchste Stromerzeugung ergibt sich im Szenario „Frei -83 % CO₂“. Dieses Szenario weist mit ca. 216 TWh auch den höchsten Stromverbrauch für die Wärmebereitstellung in Gebäuden auf. Die im Vergleich zu den anderen Szenarien geringere Sanierungstiefe führt zu einem höheren Energieverbrauch und einer größeren installierten Leistung der Heizungstechniken im Gebäudesektor (ca. 300 GW_{th} vs. 100 bis 200 GW_{th} in den Szenarien, in denen die Sanierungstiefe exogen vorgegeben ist). Darüber hinaus werden für die Wärmebereitstellung zu einem großen Teil Wärmepumpen und damit strombasierte Heizungstechniken eingesetzt. Die vorgegebenen Potenziale erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung (Photovoltaik, Onshore und Offshore Wind) werden in diesem Szenario komplett ausgeschöpft, da es aus Systemsicht (unter den für diesen Fall getroffenen Kostenannahmen) günstiger ist, Strom aus erneuerbaren Quellen bereitzustellen als in Form verstärkter Wärmeschutzmaßnahmen weitere Energie einzusparen.

Endenergieverbrauch -35 %:

In den Szenarien mit einer Endenergiebedarfsreduktion um 35 % (-35 % EE) unterscheidet sich die Gesamtstromerzeugung nur geringfügig (895 TWh im Szenario mit freier Optimierung der Heizungstechniken, 891 TWh im Szenario mit vorgegebener Heizungsstruktur). Die Stromerzeugungsstruktur unterscheidet sich hingegen. Im Szenario „Zielbild -35 % EEV -83 % CO₂“ wird wie bei der freien

Optimierung das komplette Potenzial an erneuerbaren Stromerzeugung ausgenutzt, wohingegen im Szenario „Frei -35 % EEV -83 % CO₂“ nur 15 GW offshore Windleistung installiert werden und ein größerer Teil der Stromerzeugung in großen, gasbetriebenen Kraftwerken (v.a. in GuD-Kraftwerken) erzeugt wird, wohingegen dezentrale BHKW keine Rolle spielen. Die Unterschiede in der Erzeugungsstruktur basieren in erster Linie auf der Festsetzung der Gebäudeanzahl, die mit Fernwärme versorgt wird, und damit der Festsetzung der installierten Leistung zentraler KWK-Anlagen im Szenario „Zielbild -35 % EEV -83 % CO₂“. Die aus dieser Festsetzung resultierende zentrale KWK-Leistung, die niedriger ist als im Szenario „Frei -35 % EEV -83 % CO₂“, wird durch höhere installierte Leistungen von Offshore-Windenergieanlagen und PV-Anlagen ausgeglichen.

Der Stromverbrauch für die Wärmebereitstellung in Gebäuden beträgt im Zielbildszenario ca. 150 TWh und bei der freien Heizungstechnikoptimierung ca. 180 TWh.

Endenergieverbrauch -50 %:

Bei den Szenarien mit einer Endenergiebedarfsreduktion im Gebäudesektor um 50 % sind größere Unterschiede bei der Stromerzeugung zwischen dem Szenario mit vordefinierter Heizungsstruktur und dem Szenario mit freier Optimierung der Heizungen erkennbar (s. Abbildung 47). Die Stromerzeugung beträgt im Szenario „Frei -50 %EEV -83 % CO₂“ ca. 830 TWh pro Jahr und ist 6 % niedriger als im Szenario „Zielbild -50 %EEV -83 % CO₂“. Wie bei dem zuvor beschriebenen Zielbild werden beim Szenario mit vorgegebener Heizungstechnik alle erneuerbaren Potenziale komplett ausgenutzt, wohingegen das Szenario mit freier Optimierung der Heizungen zu einer geringeren installierten Leistung von Offshore-Windenergieanlagen (6,1 GW im Vergleich zu 25,0 GW) und auch von Photovoltaikanlagen (247 GW im Vergleich zu 275 GW) führt. Auch bei der Reduktion des Endenergiebedarfs um 50 % werden im Szenario mit freier Heizungstechnikoptimierung verstärkt große, gasbefeuerte Kraftwerke zur Strombereitstellung genutzt, dezentrale BHKW kommen nicht zum Einsatz.

Der Stromverbrauch für die Wärmebereitstellung in Gebäuden beträgt im Zielbildszenario ca. 123 TWh und bei der freien Heizungstechnikoptimierung ca. 160 TWh.

Endenergieverbrauch -60 %:

Die Reduktion des Endenergiebedarfs im Gebäudesektor um 60 % führt zu einer geringeren Stromerzeugung als in den zuvor beschriebenen Szenarien. Das Szenario mit freier Optimierung der Wärmebereitstellung in Gebäuden führt zu einer um 8 % niedrigeren Stromerzeugung als das Szenario mit exogen vorgegebener Verteilung der Heizungstechniken und insgesamt zu einer ähnlichen Verteilung der Stromerzeugung wie bei den zuvor beschriebenen Endenergiebedarfsreduktionszielen. Einziger Unterschied ist, dass bei der Reduktion um 60 % auch in dem Szenario mit der vorgegebenen Heizungsstruktur nicht alle Potenziale der erneuerbaren Energien genutzt werden (offshore Wind 20 GW_{el} statt 25 GW_{el}).

Der Stromverbrauch für die Wärmebereitstellung in Gebäuden beträgt im Zielbildszenario ca. 121 TWh und bei der freien Heizungstechnikoptimierung ca. 130 TWh.

Zusammenfassung:

Abbildung 47 zeigt deutlich, dass sowohl die eingesetzten Heizungstechniken als auch der Endenergiebedarf des Gebäudesektors die Stromerzeugungsmenge bzw. den Strombedarf des Gesamtsystems beeinflussen. Ein stärkerer Sanierungsgrad und damit die umfangreichere Reduktion des Endenergiebedarfs in Gebäuden führen zu einer insgesamt um 6-17 % geringeren Stromerzeugung als die komplett freie Optimierung.

Die Szenarien mit freier Optimierung der Heizungsstrukturen führen im Vergleich zu den Szenarien mit exogen vorgegebener Heizungsstruktur zwar zu einer stärker strombasierten Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen. Da allerdings in den Szenarien mit vorgegebener Heizungsstruktur im

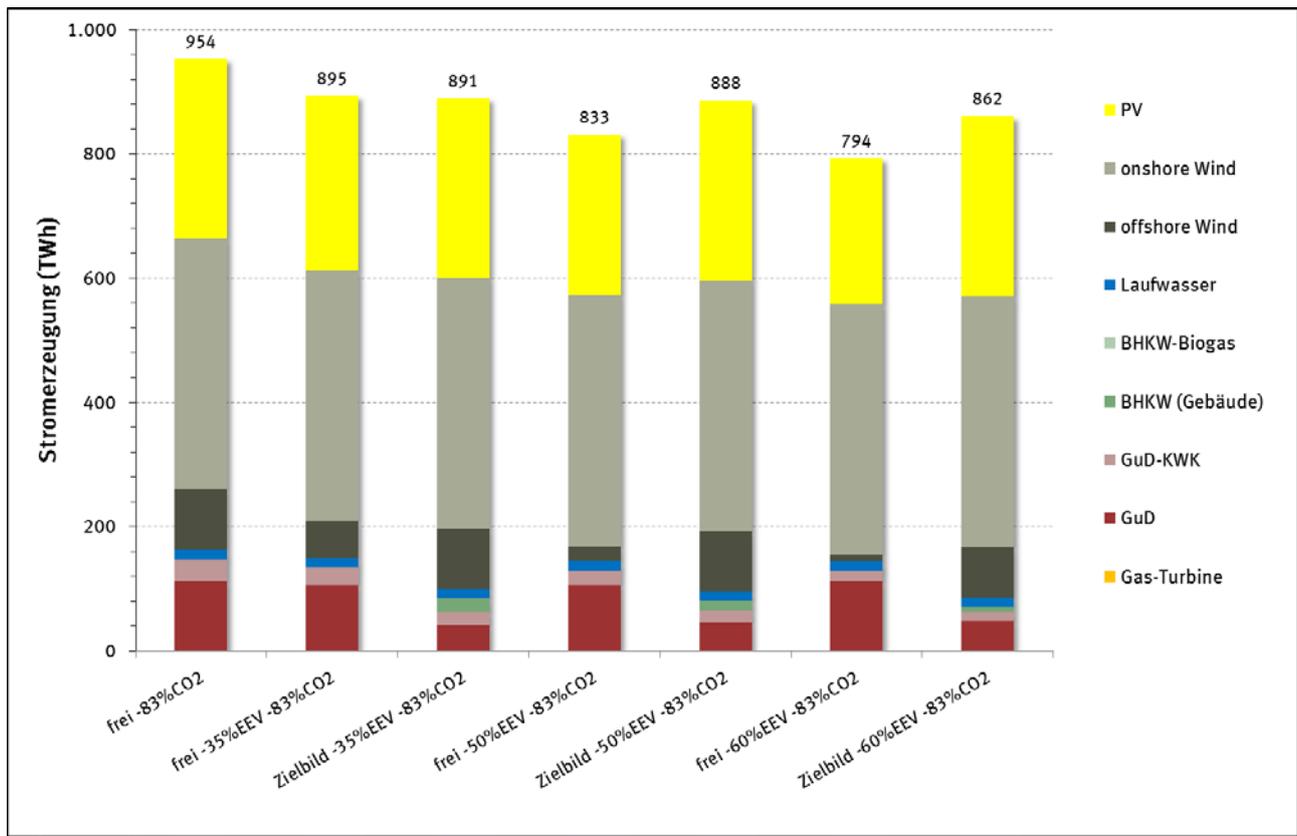
Gebäudesektor noch relevante Mengen an gasförmigen Brennstoffen und Biomasse eingesetzt werden, führt dies im Gesamtsystem zu einem höheren Bedarf an regenerativ bereitgestellten gasförmigen und flüssigen Brennstoffen, um den Brennstoffbedarf in den anderen Sektoren (v.a. Industrie und Verkehr) zu decken (s.o.). Da die Bereitstellung dieser Brennstoffe im Vergleich zur Wärmebereitstellung mit Wärmepumpen energieintensiver ist, gehen die entsprechenden Szenarien mit einem höheren Stromerzeugungsvolumen einher. Dieser Zusammenhang wird in den Ausführungen zur Stromwandlung und Speicherung in Kapitel 6.3.3.4 nochmals verdeutlicht.

Die Stromerzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien betrug 2010 bei einer installierten Leistung von 44,3 GW rund 50 TWh (vgl. z.B. UBA 2014). Der gesamte Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten, der aus den vorgestellten Szenarien resultiert, entspricht einer Kapazitätzunahme um den Faktor 9 bis 11. Die Stromerzeugung aus fEE nimmt dabei um den Faktor 13 bis 16 auf ca. 650 bis 790 TWh/a im Jahr 2050 zu. Damit ist die Stromerzeugung aus fEE in den hier vorgestellten Szenarien um 107 % bis 130 % höher als in dem Szenario UBA (2014) sowie um 148 % bis 245 % höher als in den Szenarien KS 80 und KS 90 in der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014, 1. Modellierungsrunde). Zentrale Unterschiede zwischen den in dieser Studie vorgestellten Ergebnissen und den genannten Vergleichsstudien liegen zum einen in unterschiedlichen Annahmen zum inländischen Potenzial erneuerbarer Energien; zum anderen werden wesentlich geringere Stromimporte unterstellt (5–11 TWh/a in dieser Studie gegenüber 74 bis ca. 150 TWh/a in Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2014, 1. Modellierungsrunde) sowie 137 - 151 TWh/a in UBA (2014).

Darüber hinaus lässt REMoD-D den Import regenerativ erzeugter Kohlenwasserstoffe nicht zu, d.h. alle benötigten regenerativen Kohlenwasserstoffe werden national bereitgestellt. In UBA (2014) hingegen ist von einem Importanteil am Endenergieverbrauch von 62 % die Rede, was wesentlich höher ist, als in unseren Szenarien (Stromimporte haben einen Anteil von ca. 1 % an der gesamten verfügbaren Strommenge; Importe haben einen Anteil am gesamten Endenergieverbrauch von ca. 35 bis 41 %).

In den Szenarien, bei denen die Verteilung der Heiztechniken frei optimiert wird, führt die stärkere Reduktion des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor („Frei -60 % EEV -83 % CO₂ Frei -60 % EEV -83 % CO₂“) im Vergleich zu dem Szenario „Frei -35 % EEV -83 % CO₂“ zu einer um rund 16 % niedrigeren installierten PV-Leistung. Dies entspricht einem um etwa 183 km² geringeren Flächenbedarf für PV-Anlagen (mittlerer Wirkungsgrad 2050: 24 %; vgl. Fürstenwerth et al. 2015). Hingegen kommt es in den Szenarien mit vorgegebener Heizungsverteilung zu keiner Reduktion der benötigten PV-Fläche, je ambitionierter der Endenergiebedarf gesenkt wird (z.B. Zielbild -60 % im Vergleich zu -35 %). In beiden Zielbildern wird das gesamte verfügbare Potenzial an PV und Onshore Windenergie ausgeschöpft. Einer der wesentlichen Gründe dafür besteht darin, dass im Szenario mit einer Endenergieverbrauchsreduktion im Gebäudesektor um 60 % Gastechiken eine größere Rolle spielen und das dabei benötigte Erdgas zumindest teilweise synthetisch erzeugt werden muss, wofür entsprechende Stromerzeugungskapazitäten erforderlich sind.

Abbildung 47: Stromerzeugung im Gesamtenergiesystem in den verschiedenen Szenarien im Jahr 2050



Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISE

6.3.3.4 Stromwandlung und Speicherung

2050 stammt ein großer Teil des erzeugten Stroms aus fluktuierenden erneuerbaren Energien (fEE). Um in jeder Stunde des Jahres die Bereitstellung des benötigten Strom-, Wärme- und Brennstoffbedarfs zu gewährleisten, bedarf es in einem auf fEE basierenden Energiesystem verschiedener Wandler- und Speichertechniken, um zum einen den Strom kurz- bis mittelfristig zu speichern und zum anderen mit erneuerbarem Strom synthetische Brennstoffe zu erzeugen, die lange gespeichert und flexibel in verschiedenen Sektoren eingesetzt werden können.

In allen hier untersuchten Szenarien wird eine Batteriekapazität von 162 GWh zur Stromspeicherung benötigt, wobei der größte Teil dieser Kapazität durch die Nutzung von Batterien in Fahrzeugen zur Verfügung steht. Darüber hinaus werden in allen Szenarien größere Mengen Methan und Wasserstoff durch Methanisierung und Elektrolyse bereitgestellt. Der erzeugte Wasserstoff wird teilweise dem Erdgasnetz beigemischt und zu einem großen Teil für die Bereitstellung flüssiger Brennstoffe (H₂-to-fuel) verwendet.

In allen Szenarienvarianten, in denen eine Reduktion des Endenergieverbrauchs des Gebäudesektors exogen vorgegeben wird, werden in den Szenarien mit definierter Heizungsstruktur mehr Strom, sowie eine größere Menge an synthetischen Gasen, benötigt als in den Szenarien mit frei optimierter Heizungsstruktur (s. Erklärung in Kapitel 6.3.3.2). Der energetische Mehraufwand (Stromverbrauch) für die Bereitstellung erneuerbarer Gase liegt zwischen 28 und 75 %. Die bereitgestellte Energiemenge in Form regenerativer Gase und der dafür notwendige Stromeinsatz sind in Tabelle 70 zusammengefasst.

Tabelle 70: Erzeugte regenerative Gasmenge und dafür benötigter Stromeinsatz in Abhängigkeit von Endenergiebedarfsreduktion und eingesetzten Heizungstechniken

Endenergieverbrauchs-reduktion	Heizungsstruktur	Gas-Erzeugung [TWh]	Strom-Input [TWh]	Sonstige Stromerzeugung [TWh]
Endenergie -35%	Zielbild	137	209	891
	Frei optimiert	129	163	895
Endenergie -50%	Zielbild	176	229	888
	Frei optimiert	91	131	833
Endenergie -60%	Zielbild	150	190	862
	Frei optimiert	90	128	794

Quelle: Eigene Berechnungen des Fraunhofer ISE

In den meisten Szenarien dominiert die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse. Ausnahmen stellen die Szenarien „Zielbild -35 % EEV -83 % CO₂“, „Frei -50 % EEV -83 % CO₂“ und „Frei -60 % EEV -83 % CO₂, Frei -60 % EEV -83 % CO₂“ dar, in denen mehr Methan als Wasserstoff aus erneuerbarem Strom erzeugt wird. Der erzeugte Wasserstoff wird größtenteils für die Bereitstellung flüssiger Brennstoffe eingesetzt (bereitgestellte Energiemenge zwischen 85 und 88 TWh pro Jahr). Der hohe Bedarf flüssiger Brennstoffe kommt zum einen aus dem Verkehrssektor, für den exogen festgelegt wurde (s.o.), dass keine gasbetriebenen Fahrzeuge vorkommen und liegt zum anderen an der Substitution von gasförmigen und biogenen Brennstoffen im Industriesektor. Die Heizungstechnikverteilung in den Zielbildern führt dazu, dass mehr Methan und Biomasse im Gebäudesektor genutzt wird und damit den anderen Sektoren nicht für Anwendungen zur Verfügung steht, für die Strom nur bedingt direkt genutzt werden kann. Hingegen führt eine stärkere Verschiebung hin zu einer strombasierten Wärmebereitstellung in Gebäuden dazu, dass mehr Brennstoffe in anderen Sektoren zur Verfügung stehen, in denen die Umstellung auf Strom als Endenergieträger schwieriger ist. Dadurch müssen weniger regenerative Gase bereitgestellt werden.

6.3.3.5 Kostenanalyse

Im Folgenden werden zunächst die Kosten des Gebäudesektors in den verschiedenen Szenarien analysiert, und zwar unterschieden nach energetischen Sanierungs- und Technikkosten (s. Abbildung 48). Dargestellt werden die energiebedingten Mehrkosten (bei der Sanierung der Gebäudehülle) sowie bei den Versorgungstechniken die Vollkosten. Anschließend werden die Gesamtkosten des Energiesystems betrachtet, wobei zwischen den Kosten des Gebäudesektors (ohne Ohnehinkosten der Sanierungen) und den Kosten des restlichen Energiesystems unterschieden wird (s. Abbildung 49).

Das Szenario mit der komplett freien Optimierung (bezogen auf die Sanierungstiefe und die Verteilung der Heizungstechniken) führt im Vergleich aller sieben Szenarien zu den geringsten Kosten im Gebäudesektor (53 Mrd. EUR pro Jahr). Dies liegt in erster Linie an den in diesem Szenario im Vergleich mit den anderen Szenarien niedrigen Sanierungsgraden und damit auch niedrigen Sanierungskosten (s.o.). Dafür weist das Szenario „Frei -83 % CO₂“ mit ca. 34 Mrd. EUR pro Jahr die höchsten Versorgungstechnikkosten auf.

Die Kosten des gesamten Energiesystems sind mit den getroffenen Annahmen und den gesetzten Rahmenparametern im Szenario „Frei -83 % CO₂“ (206 Mrd. EUR pro Jahr) um ca. 3 bis 13 % niedriger als in den anderen Szenarien.

Endenergieverbrauch -35 %:

In den Szenarien mit einer Endenergiereduktion um 35 % sind die Kosten im Gebäudesektor bei der freien Optimierung der Heizungsstruktur mit 65 Mrd. EUR nur unwesentlich höher, verglichen mit

der exogen vorgegebenen Technikverteilung (63,5 Mrd. EUR). Dies liegt ausschließlich an den höheren Technikkosten, die durch den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen verursacht werden, die höhere spezifische Kosten aufweisen als Biomasse- und Gaskessel. Das restliche Energiesystem, wie auch das Gesamtsystem (inkl. Gebäudesektor), sind im Szenario „Frei -35 % EEV -83 % CO₂“ hingegen etwas günstiger als die Kosten im Szenario „Zielbild -35 % EEV -83 % CO₂“ (Gesamtkosten 213, respektive 221 Mrd. EUR). Die höheren Kosten im Szenario „Zielbild -35 % EEV -83 % CO₂“ sind hauptsächlich auf den höheren Bedarf regenerativ erzeugter Gase zurückzuführen (s. Kapitel 6.3.3.4).

Endenergieverbrauch -50 %:

Wie in den Szenarien „-35 % EE“ sind auch bei der Endenergiebedarfsreduktion um 50 % die Kosten des Gebäudesektors bei der frei optimierten Technikzusammenstellung im Gebäudesektor höher als die des Szenarios mit der Technikverteilung entsprechend dem Zielbild -50 %. Grund für den Unterschied sind die höheren Technikkosten im Szenario „Frei -50 % EEV -83 % CO₂“ (15,8 Mrd. EUR) verglichen mit dem Szenario „Zielbild -50 % EEV -83 % CO₂“ (15,3 Mrd. EUR). Die Gesamtkosten des Energiesystems sind hingegen im Szenario mit optimierter Heizungstechnikverteilung um 2,6 Mrd. EUR geringer als im Szenario „Zielbild -50 % EEV -83 % CO₂“ (226,2 gegenüber 228,8 Mrd. EUR). Die Gründe für die Kostenunterschiede liegen, wie oben bereits beschrieben, in den für die Gasbereitstellung eingesetzten Techniken.

Endenergieverbrauch -60 %:

Die beiden Szenarien mit einer Endenergiereduktion im Gebäudesektor um 60 % weisen dieselben Unterschiede und Merkmale auf wie die beiden zuvor beschriebenen Reduktionsszenarien. Der Gebäudesektor ist bei der freien Optimierung der Heizungstechniken leicht teurer als im Szenario mit vorgegebener Technikverteilung entsprechend dem Zielbild -60 % (90,8 gegenüber 88,1 Mrd. EUR). Die Gesamtsystemkosten liegen hingegen im Szenario „Frei -60 %EEV -83 % CO₂“ mit 235,7 Mrd. EUR etwas niedriger als im Szenario „Zielbild -60 % EEV -83 % CO₂“ mit Kosten in Höhe von 237,6 Mrd. EUR.

Zusammenfassung:

Die vorgestellten Rechnungen zeigen, dass der Einsatz teurerer Techniken (z.B. Wärmepumpen), die zu höheren Gesamtkosten im Gebäudesektor führen, im Gesamtenergiesystem bei jedem auf den Sektor bezogenen Endenergiereduktionsziel zu insgesamt niedrigeren Kosten führt. Die Kostenunterschiede im Gebäudesektor von 1 bis 3 % zwischen den Varianten mit derselben Sanierungstiefe sind allerdings gering.

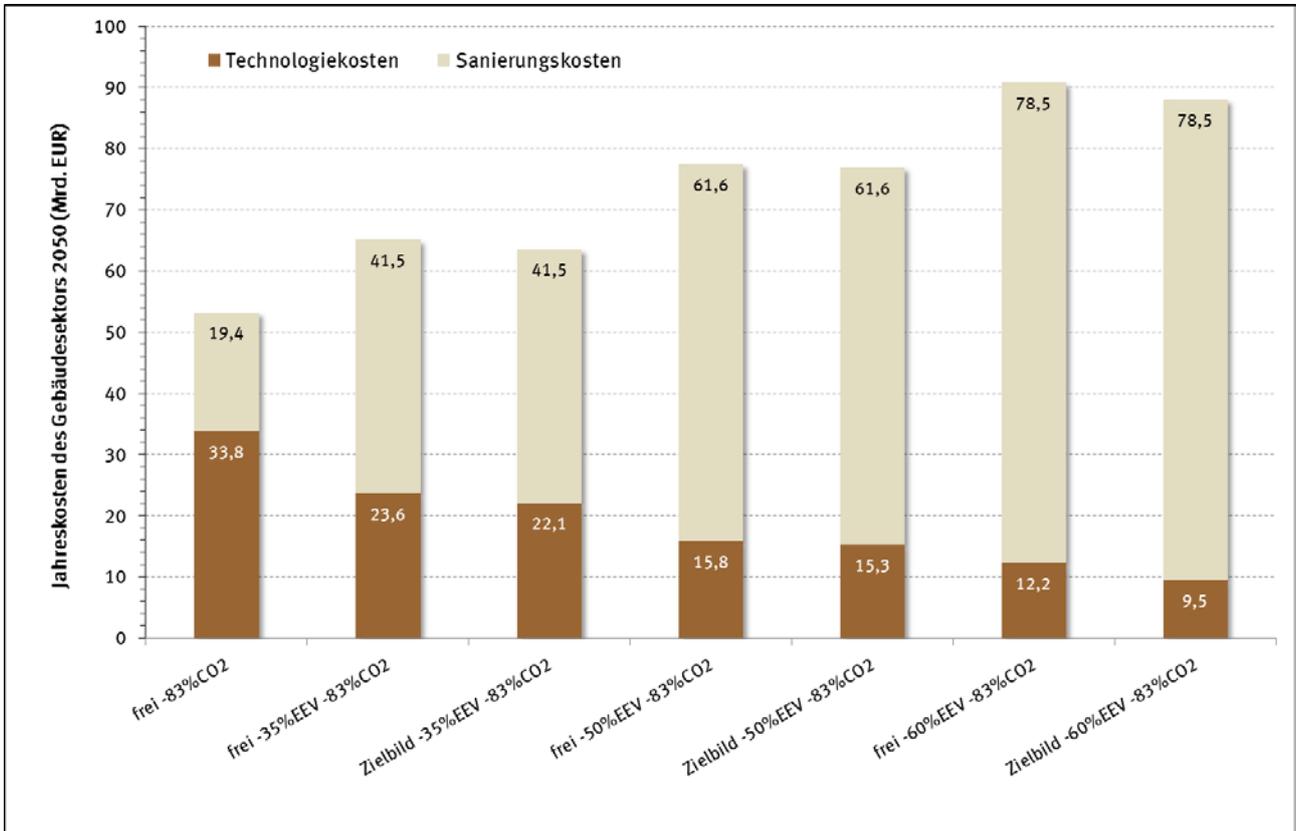
Auch bezogen auf die Kosten des gesamten Energiesystems sind die Kostenunterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien verhältnismäßig gering. Das teuerste System („Zielbild -60 % EEV -83 % CO₂“) ist lediglich 15 % teurer als das Szenario mit komplett freier Optimierung („Frei -83 % CO₂“).

Angesichts der erheblichen Unsicherheiten bei den zahlreichen Annahmen, die in die Kostenrechnungen fließen, können aus den Kostendifferenzen nur bedingt Aussagen für, bzw. gegen ein bestimmtes Zielbild abgeleitet werden. Die Unsicherheiten betreffen vor allem technische Entwicklungen bezüglich erzielbarer Wirkungsgrade und Lebensdauern der Techniken sowie die Entwicklung der spezifischen Technikkosten. Die Modellierungsergebnisse können deswegen nur Tendenzen aufzeigen, aber keine Aussagen hinsichtlich der absoluten Werte im Jahr 2050 treffen.

Im Ergebnis zeigt dies, dass es verschiedene Zielsysteme gibt, mit denen eine Minderung der energiebedingten CO₂-Emissionen um 83 % erreicht werden kann, die sich aber in ihrer Technikzusammensetzung deutlich unterscheiden. Systeme mit einer unterschiedlich starken Nutzung erneuerbarer

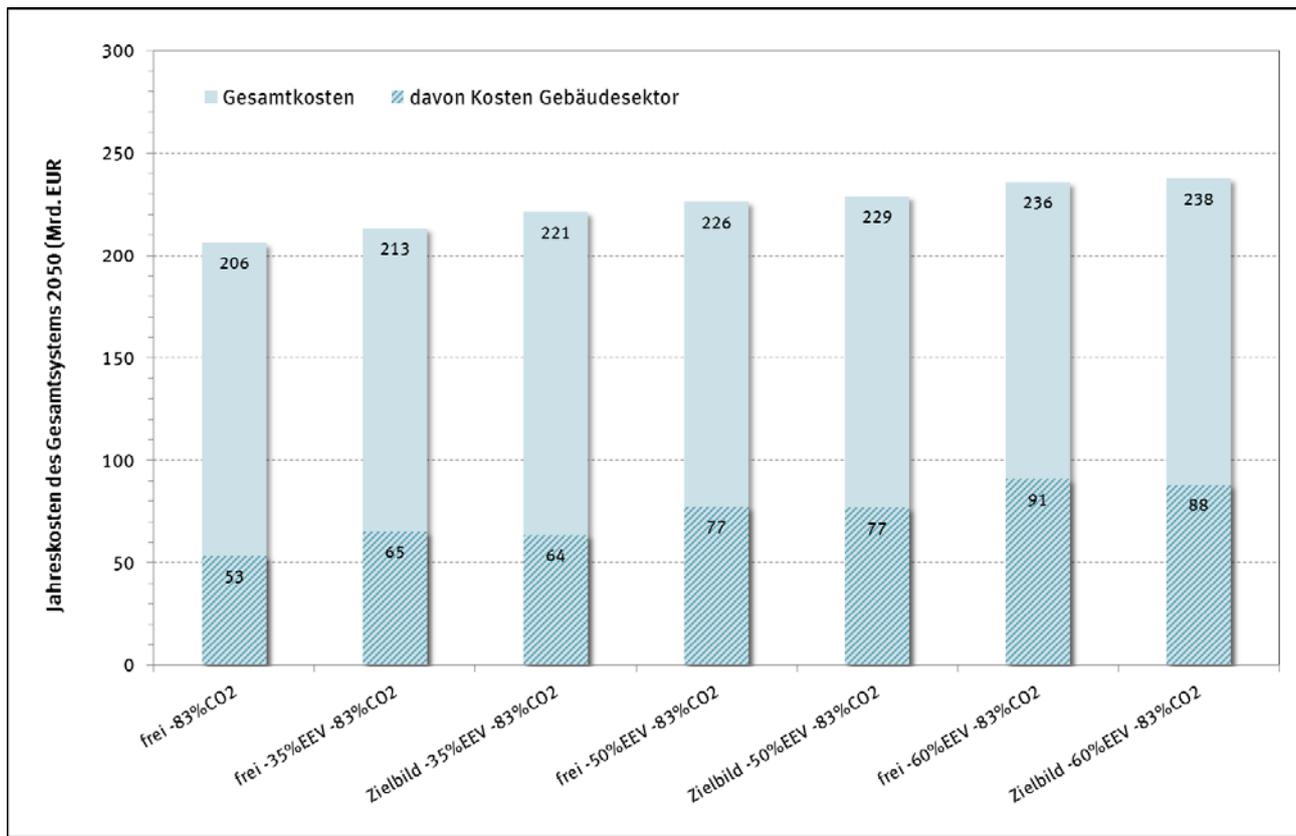
Energien, dem unterschiedlich starken Einsatz der verschiedenen Wandlungstechniken und verschiedenen Endenergiebedarfen im Gebäudesektor können zu ähnlichen Kosten führen.

Abbildung 48: Jährliche Kosten des Gebäudesektors bezogen auf das Jahr 2050 unterteilt nach Sanierungskosten und Technikkosten in den verschiedenen Szenarien



Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISE

Abbildung 49: Jährliche Kosten des Gesamtsystems unterteilt nach Kosten des Gebäudesektors und Kosten des restlichen Energiesystems in den verschiedenen Szenarien



Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISE

6.4 Zusammenfassung der Zielbilder

Die Ergebnisse der vorangehenden Kapitel zeigen sehr deutlich, dass das übergeordnete Ziel, den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf des Gebäudesektors bis zum Jahr 2050 um 80 % bezogen auf das Ausgangsjahr 2008 zu reduzieren, in Form verschiedener Sektorausgestaltungen (Zielbilder) erreicht werden kann. Unter Vorgabe eines bestimmten Technikportfolios unterscheiden sich die Zielbilder in zwei wesentlichen Zieldimensionen. Diese sind einerseits das Maß an Endenergieeinsparung, die durch Effizienzmaßnahmen (baulicher Wärmeschutz, Wandlungseffizienz der Versorgungstechnik) erzielt werden; andererseits der EE-Anteil an der Wärmeversorgung.

Die drei Zielbilder wurden so parametrisiert, dass ein möglichst breiter Zukunftskorridor aufgespannt wird. Alle drei Zielbilder erreichen das Primärenergiereduktionsziel (PENE minus 80%), unterscheiden sich jedoch in den genannten Zieldimensionen. Aus Mangel an einer eindeutigen Definition bleibt dabei unklar, inwieweit alle drei Zielbilder mit den Vorstellungen konform gehen, wie ein „nahezu klimaneutraler“ Gebäudebestand aussehen sollte/könnte (vgl. Kapitel 2). Dies bezieht sich insbesondere auf die qualitative Forderung, „dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen“. Hingegen wird – wie qualitativ gefordert – in allen drei Zielbildern der „verbleibende Energiebedarf zum überwiegenden Teil durch erneuerbare Energien gedeckt“, sofern die EE-Anteile an der Strom- und Fernwärmeversorgung mit einberechnet werden.

Die drei bottom-up entwickelten Zielbilder unterscheiden sich in folgenden Kernparametern:

- Endenergieeinsparung: In allen drei Zielbildern wird bis zum Jahr 2050 ein Großteil der Wohn- und Nichtwohngebäude energetisch auf ein Niveau saniert, das die Neubauanforde-

rungen der EnEV 2009 unterschreitet. Im Zielbild -60 % werden alle prinzipiell sanierbaren Gebäude sogar mit Passivhauskomponenten saniert, alle Wohngebäude erhalten in diesem Zielbild zudem eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG).

- **Endenergieträgermix:** Im Zielbild -60 % kann eine größere Menge an Erdgas eingesetzt werden als im Zielbild -35 %. Dies liegt daran, dass im Zielbild -60 % ein größerer Beitrag zur Erreichung des übergeordneten Primärenergieziels durch die ambitionierteren Maßnahmen zur Endenergieerzeugung erbracht wird. Im Endenergieträgermix weisen diese beiden Zielbilder ferner erhebliche Unterschiede im Einsatz von Holz und Umgebungswärme bzw. Strom auf.
- **CO₂-Emissionen:** Das übergeordnete PE-bezogene Einsparziel führt in allen drei Zielbildern zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen, die durch den Gebäudesektor verursacht werden, von 81-83 %.
- **Kosten:** Die Jahreskosten liegen in dem Zielbild mit den höchsten Wärmeschutzanstrengungen (Zielbild -60 %) etwas höher als in den anderen Zielbildern. Die Differenzen bezogen auf die Gesamtkosten wie auch die Kostenverläufe sind allerdings sehr gering. Angesichts der großen Unsicherheiten, denen eine Vielzahl der Annahmen unterliegt, die im Zuge der Berechnungen getroffen werden mussten, lassen sich daraus keine robusten Aussagen ableiten, welches dieser Zielbilder aus Perspektive der Kosten angesteuert werden sollte.

Da keines der Zielbilder aus Sicht der Jahreskosten zu einem eindeutig zu präferierenden Ergebnis führt, gewinnen andere Auswahlkriterien an Bedeutung. Diese wären unter anderem:

- die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber den verschiedenen Maßnahmen, die den jeweiligen Zielbildern zugrunde liegen. Insbesondere zu berücksichtigen sind dabei die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber dem Ausbau zusätzlicher EE-Kraftwerke (v.a. Wind und PV) sowie der dafür notwendigen Infrastruktur (Stichwort Netzausbau) im Zielbild -35 % im Gegensatz zur Akzeptanz gegenüber den sehr tiefgreifenden Sanierungsaktivitäten – dies betrifft insbesondere den Wärmeschutz der Gebäudehülle – im Zielbild -60 %.
- Die mit dem starken Ausbau von Wärmepumpen verbundenen Herausforderungen, die aus der Interaktion mit dem Stromsystem folgen; denn Wärmepumpen verbrauchen als Heizungstechnik gerade dann viel Strom, wenn die Stromnachfrage auch in den anderen Sektoren sehr hoch sowie die PV-Einspeisung eher niedrig sind, hinzu kommen die mit dem starken Ausbau von Luft/Wasser-Wärmepumpen verbundenen Lärmemissionen.
- Die möglicherweise unterschiedliche Verteilung von Kosten und Nutzen. Leitfragen wären hier z.B.: Welche Kostenblöcke führen zu Investitionen in Deutschland, welche zu einem Kapitalfluss ins Ausland? Wie verteilen sich die Kosten in den verschiedenen Zielbildern auf Eigentümer und Mieter?

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde untersucht, wie die drei sektorbezogenen Zielbilder mit dem gesamten Energiesystem interagieren. Dazu wurden die drei Zielbilder parametrisiert und in ein Gesamtenergiesystemmodell „eingefügt“. Dabei wurden drei Szenariengruppen modelliert:

- a) die Verwendung der Zielbilder mit fixierter Endenergieeinsparung sowie Technikverteilung („starre“ Zielbilder),
- b) die Verwendung der Zielbilder mit fixierter Endenergieeinsparung wohingegen die Technikverteilung über das Modell frei optimiert wird,
- c) eine komplett freie Optimierung, bei der sich sowohl das Reduktionsmaß bezogen auf den Endenergieverbrauch als auch die Technikverteilung aus der Optimierung ergeben.

Die komplett freie Optimierung führt zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs von lediglich rund 20 % (im Gegensatz zu einer Reduktion von 60 %, 50 % sowie 35 % bei den starren Zielbildern). Dies folgt aus den höheren Kosten der Zielbilder mit ambitionierteren Sanierungsaktivitäten. Ferner führen die Szenarien, bei denen sich die Technikverteilung aus der Optimierung ergibt zu anderen Technikmischen als in den „starrten“ Zielbildern, die aus der isolierten Sektorperspektive entwickelt wurden. Bei der freien Optimierung kommen wesentlich mehr Wärmepumpen zum Einsatz und auch Fernwärmesysteme haben einen größeren Anteil. Die Verschiebung hin zu Wärmepumpen und Fernwärme resultiert aus der größeren Interaktionsfähigkeit dieser Techniken mit dem Stromsystem. Dezentrale Gaskessel, BHKWs oder Pelletkessel werden bei der freien Optimierung hingegen kaum „gezogen“. Denn Erdgas und Biomasse, die im Rahmen der „starrten“ Zielbilder zum Einsatz kommen, werden in der freien Optimierung in anderen Sektoren eingesetzt, insbesondere im Industrie- und Verkehrssektor. Stehen sie diesen Sektoren nicht zur Verfügung, müssen sie dort durch alternative synthetische Brennstoffe ersetzt werden. Hierfür wären zusätzliche Wandler erforderlich. Die zusätzlichen Wandlungsschritte sind jedoch mit höheren Verlusten verbunden und verursachen damit einen insgesamt höheren Strombedarf im Energiesystem. Aus der Gesamtsystemperspektive ist es also günstiger, die Brennstoffe bevorzugt im Industrie- und Verkehrssektor einzusetzen und Niedertemperaturwärme im Gebäudesektor mittels Wärmepumpen zu erzeugen.

Unterschiedliche Technikverteilungen spiegeln aber auch die unterschiedlichen Perspektiven wider, vor deren Hintergrund die Zielbilder entwickelt wurden. Die Technikverteilung der „starrten“ Zielbilder reflektiert die Entscheidungskalküle der Bauherren und Hauseigentümer. Hier spielen Kriterien wie Erzeugungsautarkie eine größere Rolle als eine mögliche Optimierung hinsichtlich des gesamten Energiesystems.

Wie oben wiederholt dargestellt, können aus dem Vergleich der Zielbilder nur dann robuste Aussagen abgeleitet werden, wenn sich die dabei zugrunde liegenden Indikatoren signifikant unterscheiden. Zur Einordnung der Ergebnisse sollen deswegen abschließend noch einmal die wesentlichen Unsicherheiten zusammengefasst werden, denen die Entwicklung der Zielbilder unterlag. Aus einigen der Unsicherheiten lässt sich direkt weiterer Forschungsbedarf ableiten, andere Unsicherheiten resultieren aus Vereinfachungen, die notwendig waren, um den Gebäudesektor bzw. das gesamte Energiesystem modelltechnisch abzubilden:

- **Datenlage:** Insbesondere bei den Nichtwohngebäuden ist die Datenlage über den Ist-Zustand nach wie vor sehr schlecht. Dies umfasst z.B. die Flächen und Technikverteilung. Hinzu kommt sowohl für Wohn- als auch Nichtwohngebäude eine große Wissenslücke über die Sanierungsaktivitäten, die außerhalb der Förderung der KfW durchgeführt werden.
- **Aufgrund der großen Heterogenität innerhalb des Gebäudesektors** basieren eine Reihe funktionaler Zusammenhänge (z.B. Kostenfunktionen, Umrechnung von rechnerischen Endenergiebedarfs- auf -verbrauchswerte) auf Regressionsfunktionen, die ein verhältnismäßig niedriges Bestimmtheitsmaß aufweisen. Die Funktionen sind deswegen nur eingeschränkt geeignet.
- **Technologieentwicklung:** Es ist sehr schwierig, die Entwicklung des Technikportfolios für die kommenden 35 Jahre zu prognostizieren. Mit Blick auf den Gebäudesektor gilt dies z.B. für Prognosen über die zukünftige Bedeutung von PtG, PtH, Gas-Wärmepumpen oder Brennstoffzellen. Bei der Entwicklung der Zielbilder wurde deswegen eine konservative Herangehensweise gewählt, bei der lediglich auf heute schon bewährte Techniken zurückgegriffen wird.
- **EE-Importe:** Freiheitsgrade ergeben sich aus der Möglichkeit, zukünftig verstärkt EE-Strom, Biomasse sowie im Ausland über den Einsatz von EE erzeugte synthetische Gase nach Deutschland zu importieren und damit den inländischen EE-Ausbaudruck zu reduzieren. Aufgrund der Ungewissheit über mögliche Importmengen wurde auch hier ein konservativerer Ansatz gewählt und auf EE-Importe gänzlich verzichtet.

- Biomasse: Es stellt sich die Frage, in welchen Sektoren die begrenzten Biomassepotenziale am sinnvollsten eingesetzt werden sollten. Je mehr Biomasse in den Gebäudesektor geht, desto kleiner sind die Anteile, die den anderen Sektoren zur Verfügung stehen. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch: Je geringer der Biomasseanteil für den Gebäudesektor umso größer sind die Freiheitsgrade in den anderen Sektoren, dort die Klimaschutzziele zu erreichen.
- Dynamik des Sanierungsmarktes: Alle Zielbilder erfordern ein signifikantes Ausweiten des Sanierungsmarktes. Es geht dabei darum, dass ein wesentlich größeres Sanierungsvolumen in hinreichend guter Qualität ausgeführt wird. Gerade bei den ambitionierteren Sanierungsniveaus spielt die Sanierungsqualität eine bedeutende Rolle. Es stellt sich also die Frage, wie schnell die notwendigen Kapazitäten insbesondere im Bereich des Handwerks aufgebaut werden können. Bei der Entwicklung der Transformationspfade wurden verhältnismäßig vorsichtige Annahmen getroffen, entsprechend steigen die Sanierungsraten zunächst recht moderat an.
- Klimaschutzbeitrag: Das primärenergiebezogene Reduktionsziel (PENE minus 80 %) impliziert, dass der Gebäudesektor seine von ihm verursachten CO₂-Emissionen um etwa 80 % reduzieren muss. Es stellt sich die Frage ob dieser Beitrag angesichts der Reduktionsherausforderungen in anderen Sektoren (z.B. Verkehr, prozessbedingte Emissionen in der Industrie) ausreichend ist. Interessant wäre deswegen die Untersuchung, mit welchen Maßnahmen im Gebäudesektor ein noch größerer Reduktionsbeitrag erreicht werden könnte (z.B. hinsichtlich eines CO₂-Einsparziels von 95 %) bzw. wie ein komplett klimaneutraler Gebäudesektor ausgestaltet sein müsste (sowohl aus der isolierten Perspektive des Sektors wie auch aus der Gesamtsystemperspektive).

7 Politischer Handlungsbedarf

Die im vorangegangenen Kapitel entwickelten Zielbilder beschreiben den möglichen Zielkorridor, innerhalb dessen sich der Gebäudesektor langfristig hin entwickeln muss. Einiges spricht dafür, den Rand des Zielkorridors anzusteuern, der durch ein hohes Maß an Endenergieeinsparung gekennzeichnet wird (Zielbild -50 %/-60 %). Jede Kilowattstunde an Energieverbrauch, die durch Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle oder der Versorgungstechnik eingespart wird, verringert den Druck auf den Ausbau erneuerbarer Energien. Dies betrifft u.a. die begrenzten Ressourcen an Biomasse. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Strom für die Wärmeversorgung betrifft der Ausbaudruck aber auch die Windenergie und PV. Damit verbindet sich die Herausforderung an die Systemintegration dieser fluktuierenden Quellen. Ein Zielbild, bei dem Abstriche bei der Effizienz durch einen Mehreinsatz an EE „kompensiert“ werden, birgt hingegen das Risiko, aufgrund der langen Reinvestitionszyklen bei den Wärmeschutzmaßnahmen möglicherweise Effizienzpotenziale zu verlieren, sollte sich im Laufe der Transformation herausstellen, dass die notwendigen EE-Mengen gar nicht bereitgestellt werden können. Dann nämlich müsste der fehlende Klimaschutzbeitrag durch nachträgliche Effizienzmaßnahmen geleistet werden, die dann größtenteils außerhalb des Reinvestitionszyklus erbracht werden müssen.

Die wichtigsten Stellschrauben bei der energetischen Gebäudesanierung sind die Sanierungsrate, die Sanierungstiefe sowie die Dekarbonisierung der Versorgungstechnik. Die Transformation des Gebäudesektors wird nur dann erfolgreich sein, wenn alle drei Hebel durch politische Intervention angesteuert werden. Politischer Handlungsbedarf lässt sich in Hinblick auf folgende Aspekte ableiten:

- Verstärkung der Anstrengungen, die darauf abzielen, auf Ebene der Gebäudeeigentümer die energetische Sanierungsrate signifikant zu erhöhen. Gleichzeitig ist durch geeignete Instrumente zu gewährleisten, dass die Akteure auf dem Sanierungsmarkt (u.a. Stuckateure, Fensterbauer, Dachdecker, Installateure, usw.) das steigende Volumen an notwendiger Sanierungsaktivität in Menge und erforderlicher Qualität erbringen können.
- Verstärkung der Anreize oder regulatorischer Vorgaben in Richtung zielkonformer Sanierungsstandards. Im Zielbild -60 % wird für den gesamten Gebäudebestand in 2050 ein durchschnittlicher Primärenergiekennwert sowie Transmissionswärmekoeffizient H_{tr} erreicht, der in etwa dem Effizienzhausstandard KfW-55 entspricht. Dieser Standard sollte deswegen mittelfristig als Leitstandard der energetischen Gebäudesanierung etabliert werden.
- Verstärkung der Anreize oder regulatorischer Vorgaben für den Umstieg bestehender Heizsysteme auf EE. Gleichzeitig sollte durch geeignete Instrumente darauf hingewirkt werden, bestehende Heizsysteme auf Niedertemperaturverteilsysteme umzustellen.
- Verstärkte Anstrengungen im Bereich F&E, die darauf abzielen, auch „restriktive“ Gebäude zu sanieren (z.B. durch die Entwicklung von Hochleistungsdämmstoffen) bzw. die Kosten der energetischen Sanierung zu senken (z.B. durch die Entwicklung günstigerer Dämmmaterialien, die Vorfertigung von Dämmelementen, die Entwicklung innovativer Sanierungskonzepte usw.); ferner F&E Anstrengungen im Bereich der Wärmespeicherung (z.B. thermische und thermochemische Speicher), der Effizienzverbesserung bei den bestehenden Versorgungstechniken (insbesondere bei Luft/Wasser-Wärmepumpen) sowie der Systemkosten bei der Solarthermie.
- Verstärkte Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Dämmstoffauswahl: Bei der Verwendung von Dämmstoffen sollten neben den Belangen des Klimaschutzes verstärkt weitere Nachhaltigkeitsdimensionen einbezogen werden, z.B. Fragen der Ressourceneffizienz, der Schadstoffbelastung bei der Herstellung, der Verwendung und der Entsorgung von Dämmmaterialien und der Wiederverwertbarkeit.

- Die Entwicklung einer sektorübergreifenden Biomasse-Allokationsstrategie (Verteilung der Biomassepotenziale auf die Nachfragesektoren und den Umwandlungssektor), aus der sich ableiten lässt, welche Menge an Biomasse mittel- bis langfristig dem Gebäudesektor zur Verfügung steht.
- Die Etablierung eines regelmäßigen Monitorings über die Sanierungsaktivität (Sanierungsrate, Sanierungsstandards, Teilsanierungen usw.) und die Entwicklung der energetischen Kenngrößen des Gebäudesektors. Grundlage hierzu sind empirische Erhebungen, die darauf abzielen, die Datenlage deutlich zu verbessern.

8 Quellenverzeichnis

- Adamek, F. et al. (2012): Energiespeicher für die Energiewende. Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.); Frankfurt/Main.
- AEE (Agentur für Erneuerbare Energien e.V.) (2009): Hintergrundinformation Wärme speichern; Berlin.
- AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) (2013): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2010 und 2011; Berlin.
- AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) (2011): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland im Jahr 2008; Berlin.
- AGFW (2001): AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: „Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien - Erster Bearbeitungsschritt;“ Frankfurt/Main.
- Albrecht et al. (2013). Analyse der Kosten erneuerbarer Gase – Eine Expertise für den Bundesverband Erneuerbare Energie, den Bundesverband Windenergie und den Fachverband Biogas. Bearbeitet durch die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH; Ottobrunn.
- Alfons, W. (2010): TGA news: Verkaufsstart der Zeolith-Gas-Wärmepumpe.
- ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) (2011): BHKW-Kenndaten 2011; Frankfurt/Main.
- ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) (2002): ASUE-Arbeitskreis „Gaswärmepumpen und Kältetechnik“: Gaswärmepumpen; Kaiserslautern.
- Auer, J.; Keil, J. (2012): Moderne Stromspeicher. Unverzichtbare Bausteine der Energiewende. Hg. v. Deutsche Bank Research. 2012, Frankfurt/Main.
- Backhaus, K.-H. et al. (2012): Gaswärmepumpen: eine Bereicherung des Gasgeräteangebots; gwf - Gas/Erdgas; München.
- BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) (2012): Merkblatt Wärme- und Kältespeicher; Eschborn.
- Bardsley Consulting et al. (2010): Solid-State Research and Development: Manufacturing Roadmap; Washington D.C.
- Bauer, D. et al. (2009): Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher; Stuttgart.
- Benke, G.; Leutgöb, K. (2008): Energieeffizienz bei Lüftungsanlagen; Wien.
- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2015): Sondierungsstudie zur Quantifizierung von Rebound-Effekten bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/Bundesliegenschaften. BBSR-Online-Publikation, 01/2015; Berlin.
- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2011): Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB); Berlin.
- Beckmann & Klemm (2008): Beckmann, M.; Klemm, M.: Strategien der energetischen Biomassenutzung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 5. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky; Neuruppin.
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2009): Abschlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt „Biogaseinspeisung“; „Beseitigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Hemmnisse bei der Einspeisung biogener Gase in das Erdgasnetz zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen durch Aufbau und Anwendung einer georeferenzierten Datenbank – Band 3: Synthesegasmethanisierung. Verfahrenstechnische und ökonomische Analyse thermochemischer Gaserzeugungs- und Aufbereitungsverfahren. Oberhausen, Leipzig, Wuppertal, Bochum, Essen Magdeburg, Trier.
- BMU (2004): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); 2004: Erneuerbare Energien Innovationen für die Zukunft. Berlin.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg.) (2013): Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen. BMVBS-Online-Publikation 27/2013.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg.) (2012): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden; Berlin.

- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg.) (2011). Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 16/2011.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg.) (2010). Weitergehende Vereinfachungen für die Zonierung von Nichtwohngebäuden bei der Erstellung von Energieausweisen sowie im öffentlich-rechtlichen Nachweis nach EnEV. BMVBS-Online-Publikation 30/2010.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2015): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2014. Berlin.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2013): Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung; Berlin.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2011): Eckpunkte Energieeffizienz; Berlin.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung; Berlin.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2009): Energietechniken 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Politikbericht; Berlin.
- BNetzA (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen) (2012): Biogas-Monitoringbericht; Bericht der Bundesnetzagentur über die Auswirkungen der Sonderregelungen für die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz; Bonn.
- Borsch-Laaks, R. (2012): Lüftung im Wohngebäude; Energiesparinformationen; Wiesbaden.
- Brandstätter, R. (2008): Industrielle Abwärmenutzung. Beispiele und Technologien. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz.
- Braun, M. et al. (2012): Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung; Kassel.
- BSW-Solar (Bundesverband Solarwirtschaft e.V.) (2015): Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie). Stand 02/2015; Berlin.
- BSW-Solar (Bundesverband Solarwirtschaft e.V.) (2013): Photovoltaik-Preismonitor Deutschland Ergebnisse 1. Quartal 2013; Berlin.
- BTE (Bund Technischer Experten e.V.) (2008): Arbeitsblatt der BTE - Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte; Essen.
- Bünger, U. et al. (2009): Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf; Frankfurt/Main.
- Bundesregierung (2012): Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG-Erfahrungsbericht) gemäß § 18 EEWärmeG. Berlin.
- Bundesregierung (2010): Wachstum. Bildung. Zusammenhalt. Der Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und FDP. Berlin.
- Bunke, D.; Gensch, C.-O.; Möller, M.; Rüdener, I.; Ebinger, F.; Graulich, K. (2003): Assessment of Toxicological Risks due to Hazardous Substances: Ranking of Risk Phrases; International Journal of Life Cycle Assessment, 8 (1). Freiburg i.Br.
- BWP (Bundesverband Wärmepumpe e.V.) (2011): BWP-Branchenstudie – Szenarien und politische Handlungsempfehlungen Daten zum Wärmepumpenmarkt bis 2010 und Prognosen bis 2030; Berlin.
- Carlé, J.E.; Krebs, F.C. (2013): Technological status of organic photovoltaics (OPV); Solar Energy Materials and Solar Cells 119(0).
- Chow, T.-T.; Li, C.; Lin, Z. (2010): Innovative solar windows for cooling-demand climate; Solar Energy Materials & Solar Cells, Issue 94.
- DBFZ (Deutsches Biomasse Forschungszentrum) (2011): gGmbH (Hrsg.). Sonderheft zum DBFZ Report Bioenergie heute und morgen - 11 Bereitstellungskonzepte. Leipzig.
- Dena (Deutsche Energie-Agentur) (2015): Der dena-Gebäudereport 2015; Statistiken und Analysen zu Energieeffizienz im Gebäudebestand, Berlin.
- Dena (Deutsche Energie-Agentur) (2012): Energiespartipps für die Beleuchtung; Berlin.

- Dena (Deutsche Energie-Agentur); (2010): Ratgeber „Kältetechnik für Industrie und Gewerbe“; Berlin.
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2014): Verbraucherpreisindex insgesamt; Wiesbaden.
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2013a): Ergebnisse der Gebäudezählung des Zensus 2011 auf Gemeindeebene; Wiesbaden.
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2013b): Preise: Verbraucherpreisindizes für Deutschland, Lange Reihen ab 1948; Wiesbaden.
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2013c): Baupreisindizes: Deutschland, Jahre, Messzahlen mit/ohne Umsatzsteuer, Gebäudearten, Bauarbeiten (Hochbau); Wiesbaden.
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2012): Bauen und Wohnen, Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010: Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte (Fachserie 5 Heft 1); Wiesbaden.
- Diefenbach, N.; Loga, T. (2011): Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung August 2011; Darmstadt.
- Diefenbach, N. et al. (2010): Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand; Darmstadt/Bremen.
- Dimroth, F. (2013): Weltrekord-Solarzelle mit 44,7 Prozent Wirkungsgrad; Freiburg.
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) et al. (2010): Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung – Politikbericht; Karlsruhe.
- Drück, H. (2012): Speichertechnik für Sonnenhäuser. Vortrag beim Expertenworkshop „Heizsolar“ am 08.03. 2012 in Frankfurt/Main.
- DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.) (2004): Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen; Bonn.
- EA NRW (Energie Agentur NRW) (2010): Kälteerzeugung – Potenziale zur Energieeinsparung; Düsseldorf.
- Ebert, V.; Kremer, Z.; Bauer, D.; Drück, H.; Jahnke, K. (2012): Fahrplan Solarwärme – Strategie und Maßnahmen der Solarwärme-Branche für ein beschleunigtes Marktwachstum bis 2030; Berlin, München, Stuttgart.
- ECO (2011): ECOFYS: de Jager, D., et al., Financing Renewable Energy in the European Energy Market. Final report. 2011, European Commission, DG Energy; Brüssel.
- Eicker, U.; Schulze, T. (2012): Kontrollierte natürliche Lüftung für energieeffiziente Gebäude; Stuttgart.
- EnBauSa GmbH (2014): Dämmplatten eignen sich gut für den sommerlichen Wärmeschutz Dämmstoff punktet mit konstanter Wärmeleitfähigkeit. Online-Magazin für energetisches Bauen und Sanieren, Tübingen.
- E.ON SE: Kraftwerk Irsching; Düsseldorf.
- Erdmann, G.; Dittmar, L. (2010): Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland; Berlin.
- Esch, T. et al. (2011): Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale; Weßling.
- ESTIF (European Solar Thermal Industry Federation) (2011): Estimating annual solar collector energy output at national level; Brüssel.
- WDVS (Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme) (2012): Statistik Marktentwicklung 1992-2011; Baden-Baden.
- Fachzentrum Wärme aus Abwasser Dresden GmbH (ohne Jahr): Mit Abwasser heizen und kühlen; Dresden.
- FG Speicher (Fachgruppe Speicher) (2014): Wasserstoffelektrolyse und Wasserstoffrückverstromung (draft); Bremerhaven (unveröffentlichter Entwurf).
- Feist, W. (2013): EnerPHit und EnerPHio+i – Zertifizierungskriterien für die Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten (Stand 13.05.2013); © Passivhaus Institut; Darmstadt.
- Fichtner/DLR/Ifeu/GFZ/SWT/TFZ (2012): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2009 bis 2011 – Evaluierung des Förderjahres 2011; Stuttgart.

- Fichtner/DLR/Ifeu/GFZ/SWT (2011): Evaluierung des Marktanzreizprogramms für erneuerbare Energien: Ergebnisse der Förderung für das Jahr 2010; Stuttgart.
- Fichtner/DLR/Ifeu/GFZ/SWT/TFZ (2010): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanzreizprogramm) für den Zeitraum 2009 bis 2011 – Evaluierung des Förderjahres 2009.
- Fingerling, K.-H. et al. (2000): Konstruktionshandbuch für Passivhäuser; Darmstadt.
- Fischedick (2006): Fischedick, M.; „Anforderungen an Nah- und Fernwärmenetze sowie Strategien für Marktakteure in Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2020, Endbericht,“ Umweltbundesamt (UBA); Wuppertal, Stuttgart, Leipzig.
- FIW München (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen; München.
- FIZ (Fachinformationszentrum Karlsruhe GmbH) (2013): Kraft und Wärme koppeln; basisEnergie 21; Karlsruhe.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (2014): Faustzahlen Biogas.
- Fördergemeinschaft Gutes Licht (Hrsg.) (2005): Induktionslicht - sparsam - langlebig – wartungsarm; Frankfurt /Main.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hrsg.) (2014): Photovoltaics Report; Freiburg, 24. Oktober 2014.
- Fraunhofer ISE/Öko-Institut/Fraunhofer ISI/IREES/TU Wien/Bremer Energie Institut (2012/2013): Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie; Freiburg, Karlsruhe, Wien.
- Fürstenwerth et al. (2015): Fürstenwerth, D.; Mayer, J. N.; Philipps, S.; Hussein, N. S.; Schlegl, T.; Senkpiel, C.; 2015: Future cost of Photovoltaic in 2050 Long term scenarios on market development, system prices and LCOE of utility scale PV systems. Fraunhofer-ISE; Freiburg.
- FVEE (Forschungsverbund Erneuerbare Energien) (2010): Energiekonzept 2050 – Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % erneuerbaren Energien; Berlin.
- Gantefort, W. (2006): Beurteilung von Biogasanlagen mit Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen und realistische Kalkulation von Gaserträgen. Vortrag 7. Bio-Solar Biogasfachtagung. 22. Februar 2006; Heiden.
- Georg, A. et al. (1998): Switchable glazing with a large dynamic range in total solar energy transmittance (TSET); Solar Energy Vol. 62, No. 3.
- Gerbert, P. et al. (2013): Trendstudie 2030+ Kompetenzinitiative Energie des BDI; München, Düsseldorf.
- GDI (Gesamtverband Dämmstoffindustrie e.V.) (2010): Baumarktstatistik 2001-2009; Berlin.
- Green, M.A. et al. (2013): Solar cell efficiency tables (version 41); Progress in Photovoltaics: Research and Applications 21(1).
- Greiff, R. (2009): Neuartige Dämmstoffe; Forum Friedrichsdorf Seminar 2 „Altbausanierung“; Friedrichsdorf.
- Heinemann, U.; Weinländer, H.; Gintars, D. (2011): Dämmen durch Vakuum; Themeninfo I; 2011.
- Hempel, A. et al.: (2012): Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012; BMVBS-Online-Publikation, Nr. 08/2012.
- Henning, H.-M. (2013): Solare Kühlung; 3. Deutsche Solarthermie-Technologiekonferenz; Berlin.
- Henning, H.-M.; Palzer, A. (2013): A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies – Part I: Methodology; Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013(0); Freiburg.
- Henning, H.-M.; Palzer, A. (2012): 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland; Freiburg.
- Henning, H.-M. et al. (2013): Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie (Phase 2) – Zielsysteme für den Gebäudebereich im Jahr 2050; Freiburg, Karlsruhe, Wien, Bremen.
- Henning, H.-M. et al. (2012): Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie; Freiburg, Karlsruhe, Wien, Bremen.
- Hochrein, J. (2013): Energetische Sanierung der Außenwand unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte und des Gefahrstoffpotentials. Masterthesis im Studiengang Zukunftssicher Bauen an der Fachhochschule Frankfurt.

- IBK (Ingenieurbüro Kammelter e.K.) (2010): Kosten Fußbodenheizung im Altbau.
- IEA (International Energy Agency) (2012): Energy Technology Perspectives (2012): Scenarios & Strategies to 2050; Paris.
- IEA (International Energy Agency) (2012a): Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power 2012; Paris.
- IEA (International Energy Agency) (2010): Energy Technology Perspectives 2010 – Scenarios & Strategies to 2050; Paris.
- IER/RWI/ZEW (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung) (2010): Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 – Energieprognose 2009; Stuttgart, Essen, Mannheim.
- ITG (Institut für technische Gebäudeausrüstung Dresden) (2014): Kosten energierelevanter Bau- und technischer Anlagenteile bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/Bundesliegenschaften (BBSR-Online-Publikation, Nr. 06/2014).
- IWU (Institut Wohnen und Umwelt GmbH) (2013): Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich – Zielerreichungsszenario (BMVBS-Online-Publikation, Nr. 03/2013).
- IWU (Institut Wohnen und Umwelt GmbH) (2012a): „TABULA“ – Entwicklung von Gebäudetypologien zur energetischen Bewertung des Wohngebäudebestands in 13 europäischen Ländern; Darmstadt.
- IWU (Institut Wohnen und Umwelt GmbH) (2012b): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden (BMVBS-Online-Publikation, Nr. 07/2012).
- Jakobiak, R. (2005): Tageslichtnutzung in Gebäuden; BINE Informationsdienst, Themeninfo I/05.
- Janssen, R.A.J.; Nelson, J. (2013): Factors Limiting Device Efficiency in Organic Photovoltaics; *Advanced Materials* 25(13).
- Jochum, Patrick; Bülbül, Funda; Jarling, Mathias; Kelavic, Mario; Mellwig, Peter; Pehnt, Martin; Brischke, Lars (2012): Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden; Berlin.
- Kabus, S. (2009): Bedarfsgeregelte Lüftung (Variabler Volumenstrom); EnergieAgentur.NRW GmbH (Hrsg.); Düsseldorf, Wuppertal.
- Kah, O.; Feist, W. (2005): Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen im Gebäudebestand 2005, Passivhaus Institut; Darmstadt.
- Kalowekamo, J.; Baker, E. (2009): Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells; *Solar Energy* 83(8).
- Karl et al. (2010): Auf dem Holzweg. In: Erneuerbare Energien | September 2010.
- Karweger, A. (2010): Gebäudeintegrierte Photovoltaik auf dem Weg zum Massenmarkt.
- Kelm, T. et al. (2014): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG, Vorhaben IIc, Solare Strahlungsenergie; Berlin, Stuttgart.
- KEVAG (2006): KEVAG Vertrieb Privat- und Gewerbekunden Produktberatung; 2006: Sole-Wasser-Wärmepumpe; Koblenz.
- Khan, M.R.; Ray, B.; Alam, M.A. (2014): Prospects of layer-split tandem cells for high-efficiency OPV; *Solar Energy Materials and Solar Cells* 120, Part B(0).
- Kleinhempel, A.-K. (2005): Innovative Dämmstoffe im Bauwesen; Bremen.
- Kost, C. et al. (2013): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien; Freiburg.
- Krewitt, W. et al. (2009): Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply; Dessau.
- Krus, M.; Sedlbauer, K.; Künzel, H.: Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht; Stuttgart.
- Kuhn, T. E. (2006): Solar control: Comparison of two new systems with the state of the art on the basis of a new general evaluation method for facades with venetian blinds or other solar control systems; *Energy and Buildings*, 38 (6) (2006).
- Lambauer, J. et al. (2008): Industrielle Großwärmepumpen – Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele; Stuttgart.
- Lamsfuß (2010): Präsentation "Cofely macht mehr aus Ihrer Energie" bei SO-PRO (Solar Process Heat Solarthermie in industriellen Prozessen)-Workshop 2010; Essen.
- Lange, S. (ohne Datum): Zukunftsorientierte Regeltechnik für energieeffiziente Bedarfslüftung.
- licht.de Fördergemeinschaft Gutes Licht (Hrsg.) (2010): licht.wissen 17 LED: Das Licht der Zukunft; Frankfurt/ Main.

- licht.de Fördergemeinschaft Gutes Licht (Hrsg.) (2008): licht.wissen 01: Die Beleuchtung mit künstlichem Licht; Frankfurt/Main.
- Liersch, J. (2010): Wirtschaftlichkeit und Vergütung von Kleinwindenergieanlagen; Key Wind Energy; Berlin.
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Born, R. (2011): Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; Darmstadt.
- Loga, T. (2012): Excel Workbook TABULA.xls; Darmstadt.
- Loga, T. et al. (2012): TABULA - Scientific Report Germany Further Development of the National Residential Building Typology; Darmstadt.
- Lucas et al. (2002): Preisatlas - Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung.
- Lunz (2014): FG Speicher - Elektrochemische Energiespeicher - Lithium-Ionen-Batterien (unveröffentlichter Entwurf).
- Matthes, C.; Ziesing, H.-J. (2011): Wirtschaftlichkeit von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen; Band 1: Der KWK-Wirtschaftlichkeitsindikator COGIX – Methodenband; Berlin.
- Mauthner (2014): "2nd TM - Solar Heat & Energy Economics in Urban Environments," in Task 52 - AEE - Institute for Sustainable Technologies (AEE INTEC); Bern.
- Mehling, H.; Schossig, P.; Kalz, D. (2009): Latentwärmespeicher in Gebäuden – Wärme und Kälte kompakt und bedarfsgerecht speichern; Karlsruhe.
- Moor, D. (2012): Die Zukunft von BIPV: Kosten, Märkte, Potenziale; 10. Nationale Photovoltaik Tagung; Amstetten/Austria.
- Morhart, A. (2014): Asiatische Hersteller haben Lösungen in der Baumusterprüfung Vakuum-Glas könnte 2015 marktreif werden; EnBauSa GmbH Online-Magazin für energetisches Bauen und Sanieren; Tübingen.
- Morhart, A. (2008): Alternativen zum Stahltank; Sonne, Wind & Wärme 18/2008.
- Müller, A. et al. (2010): Heizen 2050 – Systeme zur Wärmebereitstellung und Raumklimatisierung im österreichischen Gebäudebestand: Technologische Anforderungen bis zum Jahr 2050; Wien, Graz.
- Müller-Steinhagen, H. (ohne Jahr): Aquifer-Wärmespeicher.
- Nabu (Hrsg.) (2012): Strategie für eine wirkungsvolle Sanierung des deutschen Gebäudebestandes; Berlin.
- Nast, M. (1997): Klimaschutzkonzept für das Saarland, Materialband 2 "Potenzial der Kraft-Wärme/Kälte-Kopplung und Nutzung regenerativer Energien; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Stuttgart.
- Neideck, P. et al. (2013): Vorhangfassade.
- Nielsen, J.E.; (2011): Smart District Heating; Workshop on Smart Cities – integrating Renewable Heating & Cooling; Brüssel.
- Nitsch, J. et al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Schlussbericht; Stuttgart, Kassel, /Teltow.
- Nitsch, J. et al. (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“ (Endbericht inkl. Datenanhang II); Stuttgart, Kassel, /Teltow.
- Nitsch, J. et al. (2004): Erneuerbare Energien Innovationen für die Zukunft; Stuttgart.
- Öhlinger, C. et al. (2010): Innovative und effiziente Beleuchtung – Technologien und Lösungen für Büros und andere Dienstleistungsgebäude; Linz.
- Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2014): Klimaschutzszenario 2050; Berlin, Karlsruhe.
- Öko-Institut; Klinski, S. (2013): Konzepte für die Beseitigung rechtlicher Hemmnisse des Klimaschutzes im Gebäudebereich; Freiburg, Darmstadt, Berlin.
- Öko-Institut/Prognos (2009): Endbericht Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken; Basel, Berlin.
- Peche, R.; Tronecker, D.; Rommel, W. (2007): Klimaschutz durch effiziente Einsatzmöglichkeiten der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen; Augsburg.
- Pfoser, N. (2014): Gebäude, Begrünung und Energie unter dem Aspekt unterschiedlicher Begrünungstechniken – Fassadenbegrünung; Vortrag am 12.04.2014, Messe Gebäude Energie Technik (11. – 13.04.2014); Freiburg.

- Pillen, N., et al. (2010): dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand. Begleitforschung zum dena-Projekt "Niedrigenergiehaus im Bestand", 2010, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin.
- Platzer, W. (2008): VIP – Entwicklung innovativer Wärmedämmsysteme auf der Basis von Hochleistungs-Vakuumisoliationspaneelen; Freiburg.
- Podewils, C. (2010): Strom für gute Zeiten, Photon – Das Solarstrom-Magazin; Aachen.
- PresseComapny GmbH (Hrsg.) (2012): Der Markt der Wärmedämmstoffe in Deutschland, Energieportal – Das Portal für Gebäude und Energie; Stuttgart.
- Prognos; EWI; gws (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose; Basel, Köln, Osnabrück.
- Prognos; EWI; gws (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung; Basel, Köln, Osnabrück.
- Rech (2014): Rech, B.; 2014: FG Photovoltaik. Poster zur Tagung Energiesysteme der Zukunft; Bremerhaven.
- Reiterer, D. (2013): Kleinwindkraft Ein Leitfaden zur Planung und Umsetzung; Wien.
- Reuter et al. (2014): Energiesysteme der Zukunft - Windkraftanlagen on/offshore; Bremerhaven (unveröffentlichter Entwurf).
- Roth, U.; Häubi, F. (1981): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen, Schweizer Ingenieur und Architekt; Zürich.
- SAENA (Sächsische Energieagentur) (2009): Wärmepumpen – Heizen mit Wärme aus der Umwelt; Dresden.
- Sahin, D. (2012): Energieeffiziente Lüftungsanlagen; Bremen.
- Sauer, D. U. (2014): FG Speicher. Poster zur Tagung Energiesysteme der Zukunft; Bremerhaven.
- Schlesinger, M. et al. (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung; Basel, Köln, Osnabrück.
- Schlomann, B. et al. (2015): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013, Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Anschlussauftrag des Forschungsvorhabens 53/09; Karlsruhe/ München/ Nürnberg.
- Schlomann, B. et al. (2011): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010, Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Projektnummer 53/09; Karlsruhe, München, Nürnberg.
- Schmidt Reuter – Planung für Betriebs- und Gebäudetechnik (2012): Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012, BMVBS online Publikation 08/2012.
- Schmidt, T. et al. (2005): Saisonale Wärmespeicher – aktuelle Speichertechnologien und Entwicklungen bei Heißwasser-Wärmespeichern; Oberflächennahe Geothermie; Regenstauf.
- Schneider, B. (2013): Sonnenenergie in der Erde speichern; Projektinfo FIZ Karlsruhe; Eggenstein-Leopoldshafen.
- Schramek, E.-R.; Recknagel, H.; Sprenger, R. (2012): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik; München.
- Schulzke et al. (2014): Schulzke, T.; Sauer, J.; Herrmann, A.; Müller-Langer, F.: Energiesysteme der Zukunft - Holzvergasung. Fraunhofer UMSICHT. Bremerhaven (unveröffentlichter Entwurf).
- Sieg, M. (2013): Boom für konzentrierende Photovoltaik erwartet. In: PV-Magazin, 10. Dezember 2013.
- Solites (2014a): Das Wissensportal für die saisonale Wärmespeicherung – Projekte in Deutschland; Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme; Stuttgart.
- Solites (2014b): Das Wissensportal für die saisonale Wärmespeicherung – Kosten; Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme; Stuttgart.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (Hrsg.) (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten; Berlin.
- Sterner, M. (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems; Kassel.

- Stolte et al. (2012): Stolte, C., et al., dena-Sanierungsstudie. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“, 2012, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Berlin.
- Streicher, W.; Mueller, M.J. (2009): Multifunktionelle Plub & Play Fassade (MPPF)/ K-Projekt; Erneuerbare Energie – Zeitschrift für eine nachhaltige Energiezukunft; Gleisdorf.
- TGA (2011): Jagnow, K.; Wolff, D.; 2011: Zukünftige Wärmeversorgung von Gebäuden - Nah- und Fernwärme: Aus- oder Rückbau? In TGA Fachplaner, Ausgabe 09.2011.
- Thema, J. et al. (2010): Umwelt- und Ressourcenaspekte einer verstärkten Nutzung von Leuchtdioden, Wuppertal.
- Twele, J. et al.; (2011): Qualitätssicherung im Sektor der Kleinwindenergieanlagen; Reiner Lemoine Institut; Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (2015): Hexabromcyclododecan (HBCD) - Antworten auf häufig gestellte Fragen; UBA- Hintergrund 02/2015; Dessau.
- UBA (Umweltbundesamt) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050; Dessau.
- UBA (Umweltbundesamt) (2013): Kraft-Wärme-Kopplung; Dessau-Roßlau.
- Universität Karlsruhe et al. (2008): Effiziente Energienutzung in Bürogebäuden Planungsleitfaden; Augsburg.
- VDI-Nachrichten (2014): Effizienzsteigerung im Fermenter. VDI Nachrichten Nr. 19/2014, VDI Verlag GmbH (Hrsg.); Düsseldorf.
- VDMA (Fachabteilung Allgemeine Lufttechnik im VDMA und Fachabteilung für Kälte- und Wärmepumpentechnik im VDMA) (2010): Energieeffiziente Kältetechnik; Frankfurt/Main.
- VFF/BF (Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e.V./Bundesverband Flachglas e.V.) (2011): Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern – Aktualisierung Juli 2011 der Studie "Im neuen Licht: Energetische Modernisierung von alten Fenstern"; Frankfurt/Main, Troisdorf.
- Viessmann Werke GmbH & Co KG (2014): Wohnungslüftungs-System mit Wärmerückgewinnung.
- Vogt, R., Frisch, S., Pehnt, M. (2010): Klimaschutz- und Energieeffizienzpotenziale im Bereich Abfall und Abwasserwirtschaft. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung; Heidelberg.
- Voss, K.; Löhnert, G.; Herkel, S.; Wagner, A.; Wambgsanß, M. (2005): Bürogebäude mit Zukunft; 1. Auflage; TÜV-Verlag GmbH; Köln.
- Wagner, A.; Herkel, S.; Kohne, W. (2013): Energieeffiziente Fenster und Verglasungen; 4. vollständig überarbeitete Auflage; Fraunhofer IRB Verlag; Stuttgart.
- Weidner, E. (2014a): FG Biomasse. Poster zur Tagung Energiesysteme der Zukunft; Bremerhaven.
- Weidner, E. (2014b): FG Speicher. Methanisierung. Bremerhaven. (unveröffentlichter Entwurf).
- Widmer, P. (2005): Bedarfslüftung – Komfort bei reduzierten Kosten; Solutions 2/05.
- Wiemken, E. et al. (2013): Planungsleitfaden Solare Kühlung; Freiburg.
- Wiese, L. (2007): Energetische, exergetische und ökonomische Evaluierung der thermochemischen Vergasung zur Stromerzeugung aus Biomasse. Dissertation an der Technischen Universität Hamburg-Harburg.
- Wietschel, M. et al. (2010): Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung – Technologienbericht; Fraunhofer Verlag; Stuttgart.
- Wünsch, M. et al. (2011): Beitrag von Wärmespeichern zur Integration erneuerbarer Energien; Berlin.
- Zech et al. (2013): Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (Hrsg.). Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse; Leipzig.
- Zeymer et al.; (2012): Bundesmessprogramm zur Weiterentwicklung der kleintechnischen Biomassevergasung; DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH; Leipzig.
- Ziesing, H.-J. et al. (2008): Wirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen des integrierten Energie- und Klimaprogramms (IEKP); Umweltbundesamt; Dessau-Roßlau.

ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.) (2013): Mehr Energieeffizienz durch natürliche Lüftung; Frankfurt/Main.

9 Anhang

9.1 Energetische Kennwerte Wohngebäude

EZFH mit BAK bis 1948

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	282,8	266,3			397,3	377,1			112,6	107,7			445,6					
voll saniert	75,1	58,9	60,2	44,0	107,7	87,5	85,3	65,1	25,5	20,6	20,2	15,3	121,6	96,5				
voll saniert plus			31,4	15,2			41,9	21,7			10,0	5,1						
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	2,3	2,7			3,3	3,8			2,3	2,6			2,3					
voll saniert	2,3	2,7	4,0	4,4	3,3	3,8	5,0	5,5	2,3	2,6	4,0	4,3	2,3	4,0				
voll saniert plus			4,9	5,3			5,9	6,4			4,9	5,2						

EZFH mit BAK bis 1949-1994

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	244,2	227,7			342,5	322,3			96,9	92,0			384,3					
voll saniert	85,1	68,9	70,2	54,0	122,7	102,5	100,3	80,1	29,0	24,1	23,8	18,9	138,4	113,3				
voll saniert plus			34,5	18,3			46,5	26,3			11,1	6,2						
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	2,3	2,7			3,3	3,8			2,3	2,6			2,3					
voll saniert	2,3	2,7	4,0	4,4	3,3	3,8	5,0	5,5	2,3	2,6	4,0	4,3	2,3	4,0				
voll saniert plus			4,9	5,3			5,9	6,4			4,9	5,2						

EZFH mit BAK ab 1995

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	147,6	131,2			205,6	185,4			57,6	52,7			231,1					
voll saniert	84,0	67,8	69,1	53,0	121,1	100,9	98,7	78,5	28,7	23,8	23,4	18,5	136,6	111,5				
voll saniert plus			33,2	17,0			44,6	24,3			10,6	5,7						
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	2,3	2,7			3,3	3,8			2,3	2,6			2,3					
voll saniert	2,3	2,7	4,0	4,4	3,3	3,8	5,0	5,5	2,3	2,6	4,0	4,3	2,3	4,0				
voll saniert plus			4,9	5,3			5,9	6,4			4,9	5,2						

KMH+MMH mit BAK bis 1948

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	271,7	255,6							95,4	90,5			432,1		264,8	248,6		
vollsanert	71,8	56,0	57,1	41,3	102,2	82,3	80,1	60,3	19,1	14,2	15,6	10,7	117,1	92,0	73,9	57,7	58,8	42,5
vollsanert plus			32,1	16,2			42,5	22,7			9,5	4,6		49,4			32,9	16,7
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	2,0	2,1							2,5	2,6			2,0		1,7	1,7		
vollsanert	2,0	2,1	3,7	3,8	3,0	3,3	4,7	5,0	2,5	2,6	4,2	4,3	2,0	3,7	1,7	1,7	3,4	3,4
vollsanert plus			4,6	4,7			5,6	5,9			5,1	5,2		4,6			4,3	4,3

KMH+MMH mit BAK bis 1949-1994

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	224,1	208,0							78,5	73,6			355,8		218,6	202,4		
voll saniert	75,1	59,3	60,4	44,6	107,1	87,3	85,0	65,2	19,9	15,0	16,4	11,5	122,7	97,6	77,3	61,1	62,2	45,9
voll saniert plus			33,1	17,3			44,0	24,2			9,7	4,8		51,1			34,0	17,8
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	2,0	2,1							2,5	2,6			2,0		1,7	1,7		
voll saniert	2,0	2,1	3,7	3,8	3,0	3,3	4,7	5,0	2,5	2,6	4,2	4,3	2,0	3,7	1,7	1,7	3,4	3,4
voll saniert plus			4,6	4,7			5,6	5,9			5,1	5,2		4,6			4,3	4,3

KMH+MMH mit BAK ab 1995

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	126,5	111,8							44,3	39,7			201,6		124,9	110,0		
voll saniert	70,2	55,7	55,4	41,0	99,1	81,0	77,3	59,2	18,7	14,1	15,1	10,6	115,0	89,9	72,4	57,5	57,3	42,3
voll saniert plus			30,0	15,5			39,6	21,5			8,9	4,4		46,6			31,0	16,1
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	1,5	1,6							2,0	2,1			1,5		1,4	1,3		
voll saniert	1,5	1,6	3,2	3,3	2,6	2,8	4,3	4,5	2,0	2,1	3,7	3,8	1,5	3,2	1,4	1,3	3,1	3,0
voll saniert plus			4,1	4,2			5,2	5,4			4,6	4,7		4,1			4,0	3,9

GMH mit BAK bis 1948

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar	
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																			
unsaniert	143,2	129,8							50,9	46,7			231,3		142,8	128,9			
voll saniert	53,9	40,9	39,4	26,4					14,8	10,7	11,3	7,1	89,2	64,2	56,7	42,8	41,5	27,7	
voll saniert plus			24,3	11,3							7,6	3,4		38,4			25,9	12,0	
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																			
unsaniert	0,9	1,0							1,5	1,6			0,9		1,0	0,9			
voll saniert	0,9	1,0	2,6	2,7					1,5	1,6	3,2	3,3	0,9	2,6	1,0	0,9	2,7	2,6	
voll saniert plus			3,5	3,6							4,1	4,2		3,5			3,6	3,5	

GMH mit BAK bis 1949-1994

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	159,3	146,0							56,8	52,6			257,8		158,8	145,0		
voll saniert	60,9	47,9	46,3	33,3					16,5	12,4	13,0	8,8	101,1	76,1	63,9	50,0	48,7	34,9
voll saniert plus			26,1	13,1							8,0	3,8		41,3			27,6	13,8
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	0,9	1,0							1,5	1,6			0,9		1,0	0,9		
voll saniert	0,9	1,0	2,6	2,7					1,5	1,6	3,2	3,3	0,9	2,6	1,0	0,9	2,7	2,6
voll saniert plus			3,5	3,6							4,1	4,2		3,5			3,6	3,5

GMH mit BAK ab 1995

	Gaskessel	Gaskessel+ Solar	Gaskessel+ WRG	Gaskessel+ WRG+ Solar	Holzessel	Holzessel+ Solar	Holzessel+ WRG	Holzessel+ WRG+ Solar	Wärmepumpe	Wärmepumpe+ Solar	Wärmepumpe+ WRG	Wärmepumpe+ WRG+ Solar	BHKW	BHKW+ WRG	FW	FW+ Solar	FW+ WRG	FW+ WRG+ Solar
Endenergiebedarf Brennstoffe [kWh/m ² (A _N)a]																		
unsaniert	123,9	110,7							44,0	39,8			200,2		123,9	110,1		
voll saniert	70,6	57,7	56,0	43,1					18,9	14,8	15,3	11,2	117,9	92,9	74,0	60,3	58,8	45,1
voll saniert plus			29,0	16,1							8,7	4,6		46,4			30,7	16,9
Endenergiebedarf Strom [kWh/m ² a]																		
unsaniert	0,7	0,8							1,4	1,5			0,7		0,9	0,8		
voll saniert	0,7	0,8	2,4	2,5					1,4	1,5	3,1	3,2	0,7	2,4	0,9	0,8	2,6	2,5
voll saniert plus			3,3	3,4							4,0	4,1		3,3			3,5	3,4

9.2 Energetische Kennwerte Nichtwohngebäude

Wohngebäude mit Mischnutzung (NWG1)

Nutzenenergiebedarf [kWh/m ² a]								
		unsaniert	vollsaniiert	vollsaniiert plus				
Heizwärme		250,58	68,,61	20,18				
TWW		20,65	20,65	20,65				
Kühlung		0,00	0,00	0,00				
Beleuchtung		14,96	14,54	19,59				
Belüftung		0,00	8,09	6,13				
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	270,0	0,0	378,5	271,2	270,0	0,0	378,5	271,2
vollsaniiert	88,9	0,0	132,8	89,3	88,9	0,0	132,8	89,3
vollsaniiert plus	40,7	0,0	66,5	40,8	40,7	0,0	66,5	40,8
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	17,2	107,0	16,8	16,9	17,2	107,0	16,8	16,9
vollsaniiert	24,8	54,9	24,5	24,6	24,8	54,9	24,5	24,6
vollsaniiert plus	27,9	42,1	27,6	27,7	27,9	42,1	27,6	27,7
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		84,5				84,5		
vollsaniiert		24,7				24,7		
vollsaniiert plus		8,8				8,8		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	78,8	0,0	12,4	12,4	91,2	12,4
vollsaniiert	0,0	0,0	31,9	0,0	12,4	12,4	44,3	12,4
vollsaniiert plus	0,0	0,0	18,7	0,0	12,4	12,4	31,1	12,4
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	302,4	0,0	424,0	309,2	302,4	0,0	424,0	309,2
vollsaniiert	99,5	0,0	148,8	101,8	99,5	0,0	148,8	101,8
vollsaniiert plus	45,5	0,0	74,4	46,6	45,5	0,0	74,4	46,6
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m ² a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	44,8	279,3	44,0	44,2	44,8	279,3	44,0	44,2
vollsaniiert	64,8	143,3	64,0	64,2	64,8	143,3	64,0	64,2

voll saniert plus	72,9	109,8	72,1	72,3	72,9	109,8	72,1	72,3
Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-205,6	0,0	-32,4	-32,4	-238,0	-32,4
voll saniert	0,0	0,0	-83,3	0,0	-32,4	-32,4	-115,7	-32,4
voll saniert plus	0,0	0,0	-48,9	0,0	-32,4	-32,4	-81,3	-32,4

Bildung, Büro und Verwaltung bis 1983 (NWG2)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert			vollsaniert		vollsaniert plus	
Heizwärme				261,97		68,46		23,43
TWW				9,64		9,64		9,64
Kühlung				8,10		12,77		22,41
Beleuchtung				25,83		25,07		33,69
Belüftung				0,00		12,75		9,66
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	285,4	0,0	413,6	286,6	285,4	0,0	413,6	286,6
vollsaniert	101,3	0,0	170,7	101,8	101,3	0,0	170,7	101,8
vollsaniert plus	74,3	0,0	118,4	74,7	74,3	0,0	118,4	74,7
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	30,0	121,9	29,8	30,0	30,0	121,9	29,8	30,0
vollsaniert	41,6	71,1	41,4	41,6	41,6	71,1	41,4	41,6
vollsaniert plus	47,4	64,5	47,1	47,4	47,4	64,5	47,1	47,4
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		87,8				87,8		
vollsaniert		24,2				24,2		
vollsaniert plus		9,4				9,4		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	93,1	0,0	13,7	13,7	106,8	13,7
vollsaniert	0,0	0,0	50,4	0,0	13,7	13,7	64,1	13,7
vollsaniert plus	0,0	0,0	32,0	0,0	13,7	13,7	45,7	13,7
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	319,6	0,0	463,2	326,8	319,6	0,0	463,2	326,8
vollsaniert	113,5	0,0	191,2	116,1	113,5	0,0	191,2	116,1
vollsaniert plus	82,2	0,0	132,6	85,1	82,2	0,0	132,6	85,1
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	78,3	318,3	77,7	78,2	78,3	318,3	77,7	78,2
vollsaniert	108,7	185,6	107,9	108,6	108,7	185,6	107,9	108,6
vollsaniert plus	123,8	168,3	123,0	123,7	123,8	168,3	123,0	123,7

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-243,0	0,0	-35,8	-35,8	-278,8	-35,8
voll saniert	0,0	0,0	-131,5	0,0	-35,8	-35,8	-167,3	-35,8
voll saniert plus	0,0	0,0	-83,4	0,0	-35,8	-35,8	-119,2	-35,8

Bildung, Büro und Verwaltung ab 1984 (NWG3)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
			unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus	
Heizwärme			123,16		68,15		23,21	
TWW			9,63		9,63		9,63	
Kühlung			9,51		12,74		22,44	
Beleuchtung			20,90		25,08		33,70	
Belüftung			0,00		12,75		9,66	
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	149,8	0,0	228,1	150,5	149,8	0,0	228,1	150,5
vollsaniiert	101,0	0,0	170,1	101,4	101,0	0,0	170,1	101,4
vollsaniiert plus	74,1	0,0	119,1	74,5	74,1	0,0	119,1	74,5
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	24,6	71,3	24,4	24,6	24,6	71,3	24,4	24,6
vollsaniiert	41,7	71,0	41,4	41,6	41,7	71,0	41,4	41,6
vollsaniiert plus	47,4	64,4	47,1	47,4	47,4	64,4	47,1	47,4
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		42,1				42,1		
vollsaniiert		24,1				24,1		
vollsaniiert plus		9,3				9,3		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	56,8	0,0	13,7	13,7	70,5	13,7
vollsaniiert	0,0	0,0	50,1	0,0	13,7	13,7	63,8	13,7
vollsaniiert plus	0,0	0,0	32,7	0,0	13,7	13,7	46,3	13,7
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	167,7	0,0	255,4	171,5	167,7	0,0	255,4	171,5
vollsaniiert	113,1	0,0	190,5	115,6	113,1	0,0	190,5	115,6
vollsaniiert plus	83,0	0,0	133,4	84,9	83,0	0,0	133,4	84,9
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	64,3	186,1	63,7	64,2	64,3	186,1	63,7	64,2
vollsaniiert	108,7	185,3	108,0	108,6	108,7	185,3	108,0	108,6
vollsaniiert plus	123,8	168,1	123,0	123,8	123,8	168,1	123,0	123,8

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-148,3	0,0	-35,7	-35,7	-184,0	-35,7
voll saniert	0,0	0,0	-130,9	0,0	-35,7	-35,7	-166,6	-35,7
voll saniert plus	0,0	0,0	-85,2	0,0	-35,7	-35,7	-120,9	-35,7

Gewerbe, Industrie bis 1983 (NWG4)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		311,17		93,19		40,49		
TWW		29,39		29,39		29,39		
Kühlung		0,66		0,89		1,80		
Beleuchtung		11,42		16,05		21,75		
Belüftung		0,00		12,37		9,37		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	340,3	0,0	484,4	341,8	340,3	0,0	484,4	341,8
vollsaniiert	123,7	0,0	187,7	124,3	123,7	0,0	187,7	124,3
vollsaniiert plus	72,9	0,0	114,9	73,3	72,9	0,0	114,9	73,3
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	14,4	127,1	14,0	14,1	14,4	127,1	14,0	14,1
vollsaniiert	31,2	72,4	30,9	30,9	31,2	72,4	30,9	30,9
vollsaniiert plus	34,0	58,0	33,6	33,6	34,0	58,0	33,6	33,6
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		104,6				104,6		
vollsaniiert		33,0				33,0		
vollsaniiert plus		15,7				15,7		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	104,6	0,0	37,3	37,3	141,9	37,3
vollsaniiert	0,0	0,0	46,5	0,0	37,3	37,3	83,8	37,3
vollsaniiert plus	0,0	0,0	30,4	0,0	37,3	37,3	67,7	37,3
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	381,1	0,0	542,5	389,7	381,1	0,0	542,5	389,7
vollsaniiert	138,5	0,0	210,3	141,7	138,5	0,0	210,3	141,7
vollsaniiert plus	81,7	0,0	128,7	83,5	81,7	0,0	128,7	83,5
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	37,5	331,8	36,5	36,7	37,5	331,8	36,5	36,7
vollsaniiert	81,5	189,0	80,6	80,7	81,5	189,0	80,6	80,7
vollsaniiert plus	88,6	151,5	87,8	87,8	88,6	151,5	87,8	87,8

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-273,0	0,0	-97,3	-97,3	-370,3	-97,3
voll saniert	0,0	0,0	-121,3	0,0	-97,3	-97,3	-218,6	-97,3
voll saniert plus	0,0	0,0	-79,5	0,0	-97,3	-97,3	-176,7	-97,3

Gewerbe, Industrie ab 1984 (NWG5)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		144,73		89,18		38,63		
TWW		28,33		28,33		28,33		
Kühlung		0,67		0,88		1,80		
Beleuchtung		11,72		16,35		22,15		
Belüftung		0,00		12,37		9,37		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	173,5	0,0	251,4	174,3	173,5	0,0	251,4	174,3
vollsaniiert	118,6	0,0	181,3	119,2	118,6	0,0	181,3	119,2
vollsaniiert plus	70,0	0,0	111,8	70,3	70,0	0,0	111,8	70,3
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	14,3	72,0	13,9	14,0	14,3	72,0	13,9	14,0
vollsaniiert	31,2	70,8	30,9	31,0	31,2	70,8	30,9	31,0
vollsaniiert plus	34,1	57,2	33,8	33,8	34,1	57,2	33,8	33,8
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		49,8				49,8		
vollsaniiert		31,5				31,5		
vollsaniiert plus		14,9				14,9		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	56,5	0,0	37,3	37,3	93,8	37,3
vollsaniiert	0,0	0,0	45,5	0,0	37,3	37,3	82,8	37,3
vollsaniiert plus	0,0	0,0	30,3	0,0	37,3	37,3	67,6	37,3
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	194,4	0,0	281,6	198,7	194,4	0,0	281,6	198,7
vollsaniiert	132,9	0,0	203,1	135,8	132,9	0,0	203,1	135,8
vollsaniiert plus	78,4	0,0	125,2	80,2	78,4	0,0	125,2	80,2
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	37,2	187,9	36,4	36,6	37,2	187,9	36,4	36,6
vollsaniiert	81,5	184,7	80,6	80,9	81,5	184,7	80,6	80,9
vollsaniiert plus	88,9	149,3	88,1	88,2	88,9	149,3	88,1	88,2

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-147,5	0,0	-97,3	-97,3	-244,8	-97,3
voll saniert	0,0	0,0	-118,8	0,0	-97,3	-97,3	-216,1	-97,3
voll saniert plus	0,0	0,0	-79,2	0,0	-97,3	-97,3	-176,5	-97,3

Handel-/ Dienstleistung, Praxisgebäude bis 1983 (NWG6)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		442,94		121,05		47,82		
TWW		8,90		8,90		8,90		
Kühlung		8,47		10,54		16,50		
Beleuchtung		14,10		13,75		18,70		
Belüftung		0,00		9,76		7,39		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	465,6	0,0	659,5	467,7	465,6	0,0	659,5	467,7
vollsaniiert	149,0	0,0	229,0	149,7	149,0	0,0	229,0	149,7
vollsaniiert plus	87,2	0,0	136,7	87,6	87,2	0,0	136,7	87,6
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	19,0	170,3	18,8	18,9	19,0	170,3	18,8	18,9
vollsaniiert	27,8	73,8	27,5	27,7	27,8	73,8	27,5	27,7
vollsaniiert plus	30,5	53,8	30,2	30,3	30,5	53,8	30,2	30,3
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		147,5				147,5		
vollsaniiert		41,7				41,7		
vollsaniiert plus		17,7				17,7		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	140,7	0,0	33,5	33,5	174,2	33,5
vollsaniiert	0,0	0,0	58,0	0,0	33,5	33,5	91,5	33,5
vollsaniiert plus	0,0	0,0	35,9	0,0	33,5	33,5	69,4	33,5
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	521,5	0,0	738,6	533,2	521,5	0,0	738,6	533,2
vollsaniiert	166,9	0,0	256,4	170,7	166,9	0,0	256,4	170,7
vollsaniiert plus	97,7	0,0	153,1	99,9	97,7	0,0	153,1	99,9
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	49,7	444,5	49,0	49,3	49,7	444,5	49,0	49,3
vollsaniiert	72,6	192,6	71,8	72,2	72,6	192,6	71,8	72,2
vollsaniiert plus	79,5	140,5	78,7	79,1	79,5	140,5	78,7	79,1

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-367,3	0,0	-87,4	-87,4	-454,7	-87,4
voll saniert	0,0	0,0	-151,4	0,0	-87,4	-87,4	-238,8	-87,4
voll saniert plus	0,0	0,0	-93,7	0,0	-87,4	-87,4	-181,1	-87,4

Handel-/ Dienstleistung, Praxisgebäude ab 1984 (NWG7)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		157,77		100,88		39,13		
TWW		7,93		7,93		7,93		
Kühlung		8,43		10,28		16,91		
Beleuchtung		12,88		15,46		20,99		
Belüftung		0,00		9,76		7,39		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	180,7	0,0	264,6	181,5	180,7	0,0	264,6	181,5
vollsaniiert	127,5	0,0	199,3	128,1	127,5	0,0	199,3	128,1
vollsaniiert plus	78,4	0,0	124,1	78,7	78,4	0,0	124,1	78,7
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	16,7	73,9	16,4	16,6	16,7	73,9	16,4	16,6
vollsaniiert	29,0	68,0	28,7	28,9	29,0	68,0	28,7	28,9
vollsaniiert plus	32,3	52,6	32,0	32,2	32,3	52,6	32,0	32,2
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		53,6				53,6		
vollsaniiert		34,9				34,9		
vollsaniiert plus		14,6				14,6		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	60,9	0,0	26,6	26,6	87,5	26,6
vollsaniiert	0,0	0,0	52,1	0,0	26,6	26,6	78,7	26,6
vollsaniiert plus	0,0	0,0	33,2	0,0	26,6	26,6	59,8	26,6
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	202,4	0,0	296,3	206,9	202,4	0,0	296,3	206,9
vollsaniiert	142,8	0,0	223,2	146,0	142,8	0,0	223,2	146,0
vollsaniiert plus	87,8	0,0	139,0	89,7	87,8	0,0	139,0	89,7
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	43,5	192,9	42,8	43,2	43,5	192,9	42,8	43,2
vollsaniiert	75,7	177,5	75,0	75,5	75,7	177,5	75,0	75,5
vollsaniiert plus	84,3	137,4	83,5	84,1	84,3	137,4	83,5	84,1

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-158,9	0,0	-69,5	-69,5	-228,4	-69,5
voll saniert	0,0	0,0	-136,0	0,0	-69,5	-69,5	-205,5	-69,5
voll saniert plus	0,0	0,0	-86,7	0,0	-69,5	-69,5	-156,2	-69,5

Beherbergung, Gastronomie, Kliniken bis 1983 (NWG8)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		263,62		69,24		23,62		
TWW		62,54		62,54		62,54		
Kühlung		11,77		19,82		34,72		
Beleuchtung		27,75		26,90		36,01		
Belüftung		0,00		13,46		10,19		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	346,6	0,0	489,5	348,2	346,6	0,0	489,5	348,2
vollsaniiert	168,0	0,0	228,3	168,8	168,0	0,0	228,3	168,8
vollsaniiert plus	150,3	0,0	184,5	151,0	150,3	0,0	184,5	151,0
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	32,2	142,9	32,0	32,1	32,2	142,9	32,0	32,1
vollsaniiert	45,0	93,7	44,9	45,0	45,0	93,7	44,9	45,0
vollsaniiert plus	51,8	89,1	51,8	51,8	51,8	89,1	51,8	51,8
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		88,3				88,3		
vollsaniiert		24,4				24,4		
vollsaniiert plus		9,5				9,5		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	103,7	0,0	13,4	13,4	117,1	13,4
vollsaniiert	0,0	0,0	43,7	0,0	13,4	13,4	57,1	13,4
vollsaniiert plus	0,0	0,0	24,8	0,0	13,4	13,4	38,2	13,4
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	388,2	0,0	548,3	396,9	388,2	0,0	548,3	396,9
vollsaniiert	188,2	0,0	255,7	192,4	188,2	0,0	255,7	192,4
vollsaniiert plus	168,4	0,0	206,7	172,1	168,4	0,0	206,7	172,1
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	84,0	373,0	83,5	83,9	84,0	373,0	83,5	83,9
vollsaniiert	117,4	244,6	117,2	117,3	117,4	244,6	117,2	117,3
vollsaniiert plus	135,2	232,6	135,1	135,1	135,2	232,6	135,1	135,1

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-270,8	0,0	-34,9	-34,9	-305,7	-34,9
voll saniert	0,0	0,0	-114,1	0,0	-34,9	-34,9	-149,0	-34,9
voll saniert plus	0,0	0,0	-64,8	0,0	-34,9	-34,9	-99,7	-34,9

Beherbergung, Gastronomie, Kliniken ab 1984 (NWG9)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		145,07		78,86		26,49		
TWW		62,88		62,88		62,88		
Kühlung		13,73		20,73		35,44		
Beleuchtung		21,76		26,11		34,99		
Belüftung		0,00		13,46		10,19		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	232,5	0,0	323,5	233,6	232,5	0,0	323,5	233,6
vollsaniiert	179,6	0,0	244,9	180,5	179,6	0,0	244,9	180,5
vollsaniiert plus	154,8	0,0	190,5	155,6	154,8	0,0	190,5	155,6
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	26,3	98,6	26,1	26,2	26,3	98,6	26,1	26,2
vollsaniiert	44,6	96,8	44,5	44,5	44,6	96,8	44,5	44,5
vollsaniiert plus	51,2	89,7	51,1	51,1	51,2	89,7	51,1	51,1
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		49,4				49,4		
vollsaniiert		27,7				27,7		
vollsaniiert plus		10,5				10,5		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	66,0	0,0	15,4	15,4	81,5	15,4
vollsaniiert	0,0	0,0	47,4	0,0	15,4	15,4	62,8	15,4
vollsaniiert plus	0,0	0,0	25,8	0,0	15,4	15,4	41,3	15,4
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	260,4	0,0	362,3	266,3	260,4	0,0	362,3	266,3
vollsaniiert	201,2	0,0	274,3	205,7	201,2	0,0	274,3	205,7
vollsaniiert plus	173,4	0,0	213,3	177,3	173,4	0,0	213,3	177,3
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	68,6	257,4	68,1	68,3	68,6	257,4	68,1	68,3
vollsaniiert	116,4	252,7	116,1	116,2	116,4	252,7	116,1	116,2
vollsaniiert plus	133,6	234,1	133,5	133,4	133,6	234,1	133,5	133,4

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-172,4	0,0	-40,3	-40,3	-212,7	-40,3
voll saniert	0,0	0,0	-123,7	0,0	-40,3	-40,3	-163,9	-40,3
voll saniert plus	0,0	0,0	-67,4	0,0	-40,3	-40,3	-107,7	-40,3

Sonstige (NWG10)

Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]								
		unsaniert		vollsaniiert		vollsaniiert plus		
Heizwärme		392,09		114,63		48,07		
TWW		17,38		17,38		17,38		
Kühlung		0,66		1,04		2,14		
Beleuchtung		19,32		18,84		25,59		
Belüftung		0,00		10,64		8,06		
Endenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	408,9	0,0	571,4	410,7	408,9	0,0	571,4	410,7
vollsaniiert	133,4	0,0	195,8	134,0	133,4	0,0	195,8	134,0
vollsaniiert plus	69,2	0,0	107,5	69,5	69,2	0,0	107,5	69,5
Endenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	21,2	156,7	21,0	21,1	21,2	156,7	21,0	21,1
vollsaniiert	31,3	75,7	31,0	31,2	31,3	75,7	31,0	31,2
vollsaniiert plus	35,5	58,3	35,2	35,4	35,5	58,3	35,2	35,4
Davon Strom für Heizung								
unsaniert		130,6				130,6		
vollsaniiert		39,4				39,4		
vollsaniiert plus		17,6				17,6		
Endenergiebedarf/-produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	117,9	0,0	25,6	25,6	143,6	25,6
vollsaniiert	0,0	0,0	45,3	0,0	25,6	25,6	70,9	25,6
vollsaniiert plus	0,0	0,0	27,8	0,0	25,6	25,6	53,5	25,6
Primärenergiebedarf/-produktion: Brennstoff/Fernwärme [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	457,9	0,0	639,9	468,2	457,9	0,0	639,9	468,2
vollsaniiert	149,4	0,0	219,3	152,7	149,4	0,0	219,3	152,7
vollsaniiert plus	77,5	0,0	120,4	79,2	77,5	0,0	120,4	79,2
Primärenergiebedarf/-produktion: Strom [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	55,4	409,0	54,7	55,1	55,4	409,0	54,7	55,1
vollsaniiert	81,6	197,6	81,0	81,4	81,6	197,6	81,0	81,4
vollsaniiert plus	92,6	152,1	91,9	92,3	92,6	152,1	91,9	92,3

Primärenergiebedarf-/produktion: Stromerzeugung (on-site) [kWh/m²a]								
	TPK01	TPK02	TPK03	TPK04	TPK05	TPK06	TPK07	TPK08
unsaniert	0,0	0,0	-307,8	0,0	-66,9	-66,9	-374,7	-66,9
voll saniert	0,0	0,0	-118,2	0,0	-66,9	-66,9	-185,2	-66,9
voll saniert plus	0,0	0,0	-72,6	0,0	-66,9	-66,9	-139,5	-66,9

9.3 Technische und ökonomische Parameter für die Gesamtsystemmodellierung

Tabelle 71: Technische und wirtschaftliche Annahmen für den Gebäudesektor

Heizungstechniken nach Gebäudetyp/ thermischer Leistung		EZF H	MFH	GMH	NWG	Einheit	Quellen
Absenkung der Heizkreistemperatur/ Einbau Fußbodenheizung im Altbau							
	Spez. Kosten	80	80	80	80	EUR/m ²	IBK (2010)
	Lebensdauer	50	50	50	50	a	Schätzung
	O&M	1	1	1	1	%/a	Schätzung
Durchschnittliche Installierte Leistung der Heizungstechniken (Ausgangszustand)							
BHKW	Elektr. Leistung	10	23	130	50	kW _{el}	Eigene Berechnung
	Thermische Leistung	15	30	130	50	kW _{th}	Eigene Berechnung
Ökonomische Rahmenparameter							
Fernwärmenetze	Spez. Kosten	554.5	347.8	133	466.9	EUR/kW _{th}	Esch et al. (2011); Fishedick (2006); AGFW (2001)
	Lebensdauer	50	50	50	50	a	TGA (2011)
	O&M	1	1	1	1	%/a	Nitsch et al. (2010)
Solarthermie dezentral	Spez. Kosten	306	155	98	116	EUR/m ²	Mauthner (2014); Nitsch et al. 2010; IWU (2012b)
	Lebensdauer	25	25	25	25	a	BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Richtlinie 2067
	O&M	1	1	1	1	%/a	Nitsch et al. (2012), VDI 2067, eigene Annahme
energetische Sanierung	Spez. Kosten „vollsaniert“	102	73	53	86	EUR/m ²	IWU (2012b); Stolte et al. (2012); Pillen et al. (2010); Kah, Feist (2005); Destatis (2013c)
	Spez. Kosten „vollsaniertplus“	205	147	115	169	EUR/m ²	IWU (2012b); Stolte et al. (2012); Pillen et al. (2010); Kah, Feist (2005); Destatis (2013c)
	Lebensdauer	40	40	40	40	a	BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Richtlinie 2067
	O&M	1	1	1	1	%/a	Schätzung
dezentrale KWK (BHKW)	Spez. Kosten	2035	1613	995	1339	EUR/kW _{el}	ASUE 2011; IEA 2010
	Lebensdauer	25	25	25	25	a	BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Richtlinie 2067
	O&M	5,6	5,6	5,6	5,6	%/a	VDI-Richtlinie 2067, eigene Annahme
elektrische Wärmepumpe Luft	Spez. Kosten	1260	918	474	695	EUR/kW _{th}	Krewitt et al. (2009), KEVAG (2006), SAENA (2009), BMU (2004); IWU (2012b)
	Lebensdauer	25	25	25	25	a	BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Richtlinie 2067
	O&M	2,8	2,8	2,8	2,8	%/a	VDI-Richtlinie 2067, eigene Annahme
elektrische Wärmepumpe Sole	Spez. Kosten	1591	1249	817	1084	EUR/kW _{th}	Krewitt et al. (2009), KEVAG (2006), SAENA (2009), BMU (2004)
	Lebensdauer	25	25	25	25	a	BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Richtlinie 2067
	O&M	2,8	2,8	2,8	2,8	%/a	VDI-Richtlinie 2067, eigene Annahme
Holzheizung	Spez. Kosten	1038	789	244	511	EUR/kW _{th}	Hempel et al. (2012), Nitsch et al. (2010), Nitsch et al. (2012); Henning et al. (2012); IWU (2012b)

Gas-Brennwertheizung	Lebensdauer	25	25	25	25	a	BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Richtlinie 2067
	O&M	3,2	3,2	3,2	3,2	%/a	VDI-Richtlinie 2067, eigene Annahme
	Spez. Kosten	327	231	122	180	EUR/kW _{th}	Nitsch et al. 2010; IWU (2012b)
	Lebensdauer	25	25	25	25	a	BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Richtlinie 2067
	O&M	1,8	1,8	1,8	1,8	%/a	VDI-Richtlinie 2067, eigene Annahme

Tabelle 72: Weitere technische und wirtschaftliche Annahmen für die Gesamtsystemmodellierung

Technik		Einheit	Quelle	
Stromerzeugung				
Wind Offshore	Spezifische Kosten 2050	2750	EUR/kW _{el}	IEA (2012); Reuter et al. (2014)
	Kosten O&M	3.03	% _{v.I./a}	IEA (2012); Reuter et al. (2014)
	Lebensdauer	20	a	IEA (2012); Reuter et al. (2014)
Wind Onshore	Spezifische Kosten 2050	950	EUR/kW _{el}	IEA (2012); Reuter et al. (2014); Kost et al. (2013)
	Kosten O&M	3.4	% _{v.I./a}	IEA (2012); Reuter et al. (2014)
	Lebensdauer	22.5	a	IEA (2012); Reuter et al. (2014)
Photovoltaik	Spezifische Kosten 2050	571	EUR/kW _{el}	Rech (2014); Fürstenwerth et al. (2015)
	Kosten O&M	1.96	% _{v.I./a}	IEA (2012); Rech (2014)
	Lebensdauer	30	a	IEA (2012); Rech (2014); Fürstenwerth et al. (2015)
Wasserkraft	Spezifische Kosten 2050	1600	EUR/kW _{el}	IEA (2010)
	Kosten O&M	2	% _{v.I./a}	IEA (2010)
	Lebensdauer	50	a	ECO (2011)
Speicher				
Elektrolyse	Spezifische Kosten 2050	200	EUR/kW _{el}	FG Speicher (2014)
	Kosten O&M	4	% _{v.I./a}	FG Speicher (2014)
	Wirkungsgrad	80%	%	UBA (2014)
	Lebensdauer	18.5	a	FG Speicher (2014)
Wasserstoffspeicher	Spezifische Kosten Pipeline	575	EUR/kWh _{el}	Sauer (2014)
	Spezifische Kosten Speicherkapazität	0.45	EUR/kWh _{el}	FG Speicher (2014)
	O&M	1.6	% _{v.I./a}	Schätzung
	Lebensdauer Speicher	40	a	Sauer (2014)
	Lebensdauer Kompressions-/Expansionseinheit	25	a	Schätzung
	Wirkungsgrad	97%	%	Schätzung
Methanisierung	Spezifische Kosten 2050	800	EUR/kW _{el}	Sterner (2009); Weidner (2014b)
	Kosten O&M	2.5	% _{v.I./a}	Sterner (2009); Weidner (2014b)
	Wirkungsgrad Sabatier	80	%	Sterner (2009); Weidner (2014b)
	th. Wirkungsgrad exothermer Prozess	6.8%	%	Schätzung
	Lebensdauer	25	a	Sterner (2009); Weidner (2014b)
Batteriespeicher	Spezifische Kosten 2050	304	EUR/kWh _{el}	Bünger et al. (2009); Lunz (2014)
	Kosten O&M	1	% _{v.I./a}	Schätzung
	Wirkungsgrad	95	%	BMWi (2009b)
	Lebensdauer	25	a	BMWi (2009b); Sauer (2014)
Pumpspeicherkraftwerke	Spezifische Kosten 2050	850	EUR/kW _{el}	SRU (2011); Sauer (2014)

	Kosten O&M	1	% v.I./a	SRU (2011)
	Wirkungsgrad	80	%	Schätzung
	Lebensdauer	80	a	SRU (2011); Sauer (2014)
Biomasse				
Feste Rohbiomasse (v.a. Holz mit ca. 5 kWh/kg)	Kosten feste Biomasse 2050	28	EUR/MWh	IEA (2012a); Weidner (2014a)
Feuchte Biomasse	Kosten feuchte Biomasse 2050	30	EUR/MWh	IEA (2012a); Nitsch et al. (2010)
Anbaubiomasse	Kosten Anbaubiomasse 2050	35	EUR/MWh	IEA (2012a); Weidner (2014a)
	WG Anbaupflanze zu Biogas	68	%	Zech et al. (2013)
Biodieselanlage	Spezifische Kosten 2050	150	EUR/kW _{KS}	DBFZ (2011)
	O&M	5	% v.I./a	Zech et al. (2013)
	Lebensdauer	20	a	Gantefort (2006)
	WG Anbau zu Biodiesel	60	%	Firrisa et al. (2014)
Biogasanlage	Spezifische Kosten 2050	697	EUR/kW _{EE}	Weidner (2014a)
	O&M	5	% v.I./a	Zech et al. (2013); Weidner (2014a)
	Lebensdauer	20	a	Gantefort (2006); Weidner (2014a)
	el. WG Direktverstromung	25	%	ASUE (2011)
	th. WG Direktverstromung	40	%	ASUE (2011)
Biogasaufbereitung	Spezifische Kosten 2050	240	EUR/kW _{EE}	FNR (2014); Weidner (2014a)
	O&M	3	% v.I./a	Zech et al. (2013); Weidner (2014a)
	Lebensdauer	25	a	Albrecht et al. (2013)
	Wirkungsgrad	88	%	Zech et al. (2013); Karl et al. (2010); VDI-nachrichten (2014)
Biomassevergasung	Spezifische Kosten 2050	944	EUR/kW _{EE}	Schulzke et al. (2014); BMBF (2009)
	O&M	6	% v.I./a	Zech et al. (2013)
	Lebensdauer	20	a	Wiese (2007)
	Wirkungsgrad	78	%	Wiese (2007); Zech et al. (2013)
Biomass-to-liquid	Spezifische Kosten 2050	1700	EUR/kW _{EE}	BMBF (2009); DBFZ (2011)
	O&M	6	% v.I./a	Zech et al. (2013)
	Lebensdauer	20	a	Wiese (2007)
	Wirkungsgrad	46	%	Beckmann & Klemm (2008), Wiese (2007), Zech et al. (2013)
Biomass-to-H2	Spezifische Kosten 2050	1882	EUR/kW _{EE}	Zech et al. (2013); BMBF (2009); DBFZ (2011)
	O&M	6	% v.I./a	Zech et al. (2013)
	Lebensdauer	20	a	Wiese (2007)
	Wirkungsgrad	48	%	Zech et al. (2013)
Biomass-to-CH4	Spezifische Kosten 2050	1244	EUR/kW _{EE}	BMBF (2009); DBFZ (2011)
	O&M	6	% v.I./a	Zech et al. (2013)
	Lebensdauer	20	a	Wiese (2007)
	Wirkungsgrad	61	%	Karl et al. (2010), BMBF (2009), DBFZ (2011)
Wärmebereitstellung				
Solarthermie zentral	Obergrenze	200	GW _{th}	Setzung
Solar bereit gestellte Prozesswärme Industrie		25	TWh _{th}	Setzung
Kosten Prozesswärme aus solarthermischen Anlagen	Spezifische Kosten	50	EUR/MWh _t	Lamsfuß (2010), Wietschel et al. (2010)
Abkürzungen	v.I.: von Invest WG: Wirkungsgrad KS: Kraftstoff EE: Endenergie			

