

ECOFYS

sustainable energy for everyone



**IWU** Institut  
Wohnen und  
Umwelt



INSTITUT FÜR ENERGIE-  
UND UMWELTFORSCHUNG  
HEIDELBERG



## **Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich**

### **AP 1: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 und Transformationspfad**

**Heidelberg, Darmstadt, Köln, Bielefeld, April 2015**

## Hauptauftragnehmer:



ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg  
Dr. Martin Pehnt (Projektleitung), Peter Mellwig, Markus Duscha,  
Dr. Amany von Oehsen  
Wilckensstraße 3  
D-69120 Heidelberg  
Tel: 06221 / 4767-0  
E-Mail: martin.pehnt@ifeu.de

## Unterauftragnehmer:



Ecofys Germany GmbH  
Thomas Boermans, Dr. Kjell Bettgenhäuser, Markus Offermann,  
Dr. Andreas Hermelink  
Am Wassermann 36  
D-50829 Köln  
Tel: 0221 27070-151  
E-Mail: k.bettgenhaeuser@ecofys.com



IWU Institut Wohnen und Umwelt GmbH  
Dr. Nikolaus Diefenbach, Dr. Andreas Enseling  
Rheinstraße 65  
D-64295 Darmstadt  
Tel: 06151-2904-32  
E-Mail: n.diefenbach@iwu.de



Universität Bielefeld  
Prof. Dr. Markus Artz  
Fakultät für Rechtswissenschaft  
Lehrstuhl für Bürgerliches Recht, Europäisches Privatrecht, Handels-  
und Wirtschaftsrecht sowie Rechtsvergleichung  
Forschungsstelle für Immobilienrecht  
Universitätsstraße 25  
33615 Bielefeld  
Tel: 0521 / 106-6912 und -2666  
E-Mail: markus.artz@uni-bielefeld.de

## Inhalt

Zusammenfassung .....	5
Executive Summary.....	13
1 Einführung .....	19
2 Operationalisierung des Ziels „Nahezu klimaneutraler Gebäudebestand“ im Rahmen dieses Projektes .....	19
3 Methodische Vorgehensweise zur Bestimmung eines klimaneutralen Gebäudebestands .....	21
3.1 Beschreibung der Methodik.....	22
3.2 Bilanzierungsrahmen .....	22
3.3 Wesentliche Annahmen und Randbedingungen.....	22
4 Der Gebäudebestand in der Ausgangslage.....	23
5 Transformationspfade zum klimaneutralen Gebäudebestand.....	26
5.1 Definition der Transformationspfade .....	26
5.2 Der klimaneutrale Gebäudebestand - Vergleich der Transformationspfade .....	28
5.2.1 Treiber der Transformation.....	28
5.2.2 Entwicklung des Gebäudebestands .....	30
5.2.3 Energetische Kennwerte .....	31
5.2.4 Kostenbewertungen.....	37
5.2.5 Bewertung der Dynamik der Transformationspfade .....	41
5.2.6 Zusammenfassung des Szenariovergleichs .....	41
5.2.7 Übersicht der Berechnungsergebnisse .....	44
5.3 Sensitivitätsanalysen .....	56
5.3.1 Sensitivität Energiepreise.....	56
5.3.2 Sensitivität Zinssatz.....	57
5.3.3 Sensitivität Senkung der Sanierungskosten .....	59
5.3.4 Sensitivität Bauteilanforderungen.....	60
5.3.5 Sensitivität Solarthermieanteil .....	60
5.3.6 Sensitivität $f_p$ der KWK .....	60
5.4 Vergleich der Szenarienergebnisse mit anderen Studien .....	61
5.4.1 Wärmebedarf .....	62
5.4.2 Endenergie .....	62
5.4.3 Erneuerbare Energie .....	63
5.4.4 Wärmenetze .....	64
5.4.5 Wärmepumpen.....	64
5.4.6 Biomasse .....	65
6 Resultierende Anforderungen an Einzelgebäude und gebäudepolitische Schlussfolgerungen ....	66
7 Literatur.....	69

---

8	Anhang .....	72
8.1	Anhang „Klimaneutralität“ .....	72
8.2	Anhang „Methodik“ .....	78
8.3	Anhang „Bilanzierungsrahmen“ .....	79
8.4	Anhang „Modellannahmen und Randbedingungen“ .....	80

## Zusammenfassung

Übergeordnetes Ziel des Arbeitspaketes 1, dessen Szenarioberechnungen federführend von Ecofys bearbeitet wurde, ist die Ableitung und Darstellung von Transformationspfaden zu einem „nahezu klimaneutralen Gebäudebestand“ im Jahr 2050. Neben der übergeordneten Definition für den gesamten Gebäudebestand, die sich maßgeblich aus dem Energiekonzept der Bundesregierung ableitet, sind außerdem Fragen der Bilanzgrenze sowie der Anrechenbarkeit z.B. von (Hilfs-) Strombedarfen auf Einzelgebäudeebene zu klären.

Im Rahmen des Projektes werden mögliche Transformationspfade auf Basis unterschiedlicher strategischer Schwerpunkte definiert und analysiert. Für jeden Transformationspfad werden ausgehend vom Jahr 2008 die Wegmarken 2020, 2030 und 2040 sowie der Endpunkt der Betrachtung im Jahr 2050 betrachtet. Für die Transformationspfade muss das Ziel des „nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes im Jahr 2050“ operationalisiert werden: In Übereinstimmung mit dem im Energiekonzept formulierten Gebäudeziel ist der Gebäudebestand nahezu klimaneutral, wenn der *nicht-erneuerbare* Primärenergiebedarf um 80 % gegenüber 2008 gesenkt wird. Der Primärenergiebedarf für Wohn- und Nichtwohngebäude wird mit den Primärenergiefaktoren nach den Regeln der EnEV 2014 berechnet.

Um letztendlich einen „nahezu klimaneutralen Gebäudebestand“ durch eine Reduktion des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs um 80 % von 2008 bis 2050 zu erreichen, ist die Zielmarke für 2050 demnach 239 TWh/a nicht-erneuerbarer Primärenergie. Berücksichtigt man, dass der Primärenergiebedarf für Beleuchtung in Nichtwohngebäuden durch einen Rückgang des Endenergiebedarfs um 40 % und einen sinkenden Primärenergiefaktor auf rund 27 TWh sinken wird, liegt der Zielwert für den Primärenergiebedarf für Heizen, Warmwasser, Kühlen<sup>1</sup> und Hilfsenergiebedarfe in Wohn- und Nichtwohngebäuden bei ca. 212 TWh/a, siehe Tabelle 0-1.

Tabelle 0-1: Zieldefinition für den Verbrauch nicht-erneuerbarer Primärenergie des nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes im Jahr 2050

	Basisjahr 2008	Ziel 2050
Heizen+WW in Wohngebäuden	640 TWh	
Heizen+WW in Nichtwohngebäuden	310 TWh	
Hilfsenergie gesamt	42 TWh	
Kühlenergiebedarf	14 TWh	
Beleuchtung in Nichtwohngebäuden	190 TWh	
Summe	1.196 TWh	239 TWh
Beleuchtung in Nichtwohngebäuden		27 TWh
Ziel 2050 ohne Beleuchtung		<b>212 TWh</b>

Für die **Modellierung** wird das Ecofys Built-Environment-Analysis-Model BEAM eingesetzt, eine flexible Softwarelösung zur vollständigen Abbildung von Gebäudebeständen über die Zeit. Mit diesem Modell können nicht nur der Status-quo, sondern auch Zukunftsszenarien für alle Gebäudetypen und Energieträger unter Annahme von geeigneten Randbedingungen berechnet werden.

In diesem Vorhaben sind aufbauend auf dem Forschungsprojekt [IFEU et al. 2014] eine Vergleichsentwicklung („Trend“) erarbeitet worden, die das Ziel des nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes im Jahr 2050 *nicht* erreicht, sowie **vier zielführende Transformationspfade**, die dieses Ziel jeweils unter Umsetzung verschiedener strategischer Grundausrichtungen erreichen. Alle

<sup>1</sup> Anteil Wohngebäude im Vergleich zu Nichtwohngebäuden sehr gering.

fünf Transformationspfade unterscheiden sich in ihren Annahmen bezüglich folgender Parameter (vgl. Tabelle 0-2):

- Effizienz der Gebäudehülle: hier wurden drei Sanierungsniveaus Effizienz 0, 1 und 2 unterschieden.
- Sanierungsrate als Parameter für die Dynamik der Sanierungsumsetzung.
- Anteile der unterschiedlichen erneuerbaren Energien (getrennt nach Strom und Wärme).

Im Transformationspfad „Trend“ werden gegenwärtige Maßnahmen mit Fortschritten in Bezug auf die Sanierungsgeschwindigkeit und die Sanierungstiefe abgebildet. EE-Wärmesysteme<sup>2</sup> haben moderate Zuwachsraten am jährlichen Austausch. Es handelt sich beim Trendszenario also nicht um eine bloße Fortschreibung der aktuellen Entwicklung. Vielmehr wird bereits hier eine Steigerung der Dynamik vorausgesetzt. Die Sanierungsraten beispielsweise steigen für Fenster und Dächer auf 2 % und für Außenwände auf 1 %. Diese Dynamik reicht zwar zur Zielerreichung noch nicht aus, erfordert aber bereits eine Weiterentwicklung des heutigen Instrumentariums. Aus diesem Grund wurde der Transformationspfad „Trend“ nicht „Business as Usual“ genannt.

Tabelle 0-2: Übersicht über die wichtigsten Annahmen (Quelle: Annahmen Ecofys, basierend auf IFEU et al. 2014)

Transformationspfad	Effizienz Gebäudehülle	Sanierungsrate und –qualität	Anteile EE
„Trend“	Weiterentwicklung der heutigen Förderung mit ambitioniert-realistischen Sanierungsraten Hohe Vollzugsdefizite	Nach Bauteil unterschieden, moderater Zuwachs, 20 % Effizienz 0, 50 % Effizienz 1, 30 % Effizienz 2	Fortschreibung
„Effizienz plus EE-Wärme“	Effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs, 10 % Effizienz 0, 40 % Effizienz 1 und 50 % Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Biomasse, Solarthermie und Wärmenetze
„Effizienz plus EE-Strom“	Effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs, 10 % Effizienz 0, 40 % Effizienz 1 und 50 % Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Wärmepumpen
„Hocheffizienz plus EE-Wärme“	Hoch effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs, 10 % Effizienz 0, 15 % Effizienz 1 und 75 % Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Biomasse, Solarthermie und Wärmenetze
„Hocheffizienz plus EE-Strom“	Hoch effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs, 10 % Effizienz 0, 15 % Effizienz 1 und 75 % Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Wärmepumpen

<sup>2</sup> Im Folgenden werden „Erneuerbare Energieträger“ häufig mit „EE“ abgekürzt.

Die vier *Zielerreichungsszenarien*

- Effizienz plus EE-Wärme,
- Effizienz plus EE-Strom,
- Hocheffizienz plus EE-Wärme sowie
- Hocheffizienz plus EE-Strom

ergeben sich durch die Kombination von unterschiedlich ambitionierten Maßnahmen an der Gebäudehülle einerseits und einen Schwerpunkt auf entweder Wärme bzw. Strom aus erneuerbaren Energieträgern, siehe Tabelle 0-2. Dabei soll die Frage untersucht werden, welcher Transformationspfad unter technischen, ökologischen und ökonomischen Kriterien am meisten Sinn ergibt und welche Vor- und Nachteile hieraus resultieren.

Eine zukünftige Änderung der klimatischen Randbedingungen wurde für die hier durchgeführten Berechnungen auf Grund der erheblichen Unsicherheiten nicht berücksichtigt, genauso wenig wie Rebound-Effekte etwa durch verhaltensbedingte Mehrverbräuche. Beide Effekte sind gegenläufig.

**Ergebnisse**

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 1 zeigen in einer vergleichenden Bewertung der Szenarien, dass in Bezug auf den Gebäudebestand aufgrund der deutlich erhöhten Sanierungsraten für die Gebäudehülle bei den Zielszenarien „Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“ nahezu alle Komponenten im Gebäudebestand und im Szenario „Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“ wesentliche Anteile saniert werden, während im Pfad „Trend“ noch ein deutlicher Prozentsatz des Bestandes bis 2050 nicht saniert wird.

Der **Heizwärmebedarf** kann im Pfad „Trend“ von 2008 auf 2050 um 54 % gesenkt werden, während in den Zielpfaden „Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“ 60 – 62 % Minderung und „Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“ 71– 74 % erreicht werden. Dieser im Hocheffizienz-Szenario erreichbare Heizwärmebedarf ist als Obergrenze zu interpretieren, denn er ergibt sich aus der Kombination von äußerst hoher Sanierungstiefe und einer hohen Sanierungsrate. Aber selbst in diesem Pfad wird das 2050-Gebäudeziel nicht ohne den weiteren Einsatz von EE-Wärme erreicht.

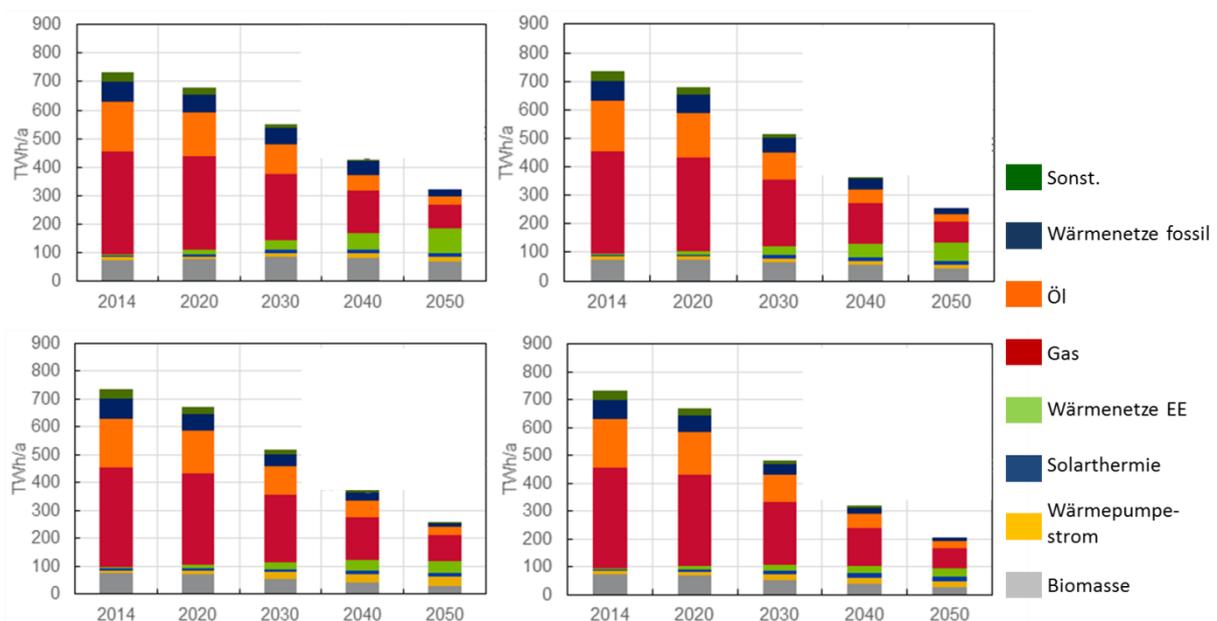


Abbildung 0-1: Endenergiebedarf und eingesetzte Energieträger in den vier Transformationspfaden (oben: Effizienz und Hocheffizienz plus EE-Wärme, unten: Effizienz und Hocheffizienz plus EE-Strom)

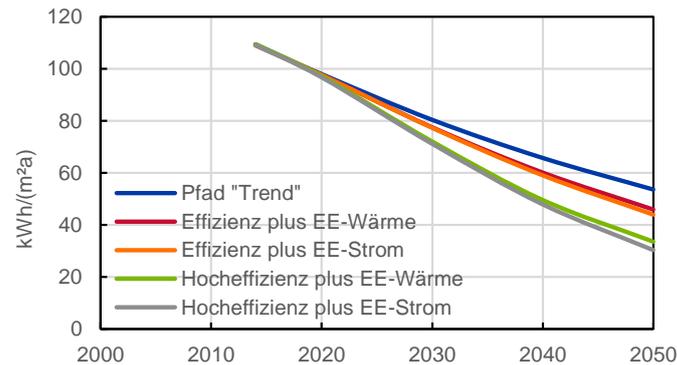


Abbildung 0-2: Spezifische Heizwärmebedarfe für den Gebäudebestand

Wie aus Abbildung 0-2 zu erkennen ist, sinkt der durchschnittliche Heizwärmebedarf im Gebäudebestand auf ca. 50 kWh/(m<sup>2</sup>a) in den Effizienzpfaden und 30 kWh/(m<sup>2</sup>a) in den Hocheffizienzpfaden.

Der **gesamte Endenergiebedarf** inkl. der Anwendungen Warmwasser, Kühlen und Hilfsenergie kann im Pfad „Trend“ um 52 % gemindert werden. Für die Pfade „Effizienz plus EE-Wärme“ sind 56 %, „Effizienz plus EE-Strom“ 64 %, „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ 65 % und „Hocheffizienz plus EE-Strom“ 71 % erreichbar (Abbildung 0-1). Dieser Rückgang geht vor allem zu Lasten fossiler Energieträger.

Der Anteil der **erneuerbaren Energien** am Wärmebedarf (ohne den Anteil der EE-Energieträger in Wärmenetzen) steigt im Pfad „Trend“ auf 32 %, während in den Zielpfaden je nach Ausgestaltung Anteile zwischen 35 % und 43 % erreicht werden. Dies steigt auf bis zu 60 % unter Berücksichtigung der Anteile in Wärmenetzen. Das Potenzial von **Wärmenetzen** ergibt sich aus den Obergrenzen der in einer anderen Studie durch eine orts aufgelöste Analyse erhobenen Potenziale. Anteile von insgesamt 35 % werden in den EE-Wärme-Szenarien erreicht und sind darstellbar; in den anderen Szenarien liegen sie darunter. Dabei ergibt sich eine „Aufgabenteilung“: Wärmenetze sind verstärkt für den urbanen, verdichteten Raum prädestiniert, wo zudem die EE-Potenziale stärker eingegrenzt sind. Damit ergibt sich auch die Notwendigkeit, eine **Wärmeplanung regional** zu strukturieren beispielsweise durch eine Wärmenutzungsplanung.

Je nach Szenariofamilie tragen unterschiedliche Erneuerbare hierzu bei. In den „plus EE-Wärme“-Szenarien spielt **Biomasse** eine tragende Rolle. Alle Szenarien, auch „Effizienz plus EE-Wärme“, liegen aber bezüglich des Biomasse-Einsatzes mit etwa 85 TWh direkter Biomassenutzung (zzgl. etwa 40 bis 60 TWh aus Wärmenetzen) deutlich innerhalb der nachhaltigen Potenzialgrenzen, die auf knapp 400 TWh/a im Jahr 2050 abgeschätzt wurden. Allerdings fehlt dieses Biomasse-Kontingent für andere Sektoren, insbesondere für den Güter- und Luftverkehr und für industrielle Prozessenergie.

Der Anteil der gebäudegebundenen **Solarthermie** ist im Szenario „Effizienz plus EE-Wärme“ gering und liegt bei rund 4 %. Dies ist der Fall, obwohl der Anteil der installierten Heizungsanlagen mit Solarthermie auf 60 % (2030) bzw. 80 % (2050) ansteigt. In einer Sensitivität „Solarthermie“ wird gezeigt, dass sich der Anteil an Solarthermieanlagen noch steigern lässt, aber auf Grund der insgesamt begrenzten erzielbaren energetischen Anteile auch in einem ambitionierten Ausbaupfad 10 % nicht überschreitet.

In den strombasierten Szenarien („plus EE-Strom“) steigt der Bedarf an **Strom** insbesondere für Wärmepumpen lediglich in einer Größenordnung von 15 TWh/a bis 2050 an, da neben dem Rückgang des Heizwärmebedarfs auch ineffiziente direktelektrische Heizungssysteme durch Wärmepumpen substituiert werden. Verglichen mit dem gesamten deutschen (Brutto-)Strombedarf von 597 TWh im Jahr 2013 ist der Zuwachs von 13 TWh allerdings gering und entspricht dem

jährlichen EE-Stromzubau im Mittel der letzten fünf Jahre. In den anderen Szenarien geht der Stromverbrauch für den Gebäudebereich zurück.

Mit diesen in allen vier Zielszenarien erzielten Reduktionen wird insgesamt das -80 %-Ziel für **nicht erneuerbare Primärenergie** erreicht (geringfügige Abweichungen ergeben sich aus der Modellkalibrierung) (Abbildung 0-3).

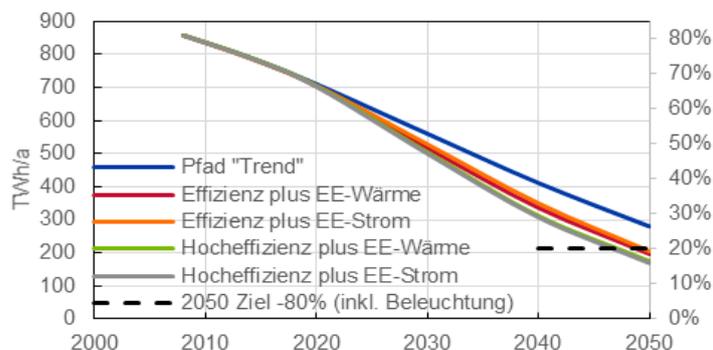


Abbildung 0-3: Gesamter nicht-erneuerbarer Primärenergieeinsatz der fünf Transformationspfade (Heizen, WW, Kühlen, HE)

Im Gegensatz zu den Energiekosten sind die **Investitionskosten** auf Basis der zu Grunde gelegten detaillierten Kostenfunktionen in den Zielpfaden deutlich höher als im Trendszenario, da hier einerseits deutlich höhere Sanierungsraten angenommen sind und andererseits die Maßnahmen wesentlich ambitionierter ausgestaltet sind, im Ergebnis also Quantität und Qualität steigen. Erwartungsgemäß am höchsten sind die Investitionen entsprechend in den „Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“-Pfad, siehe Abbildung 0-4.

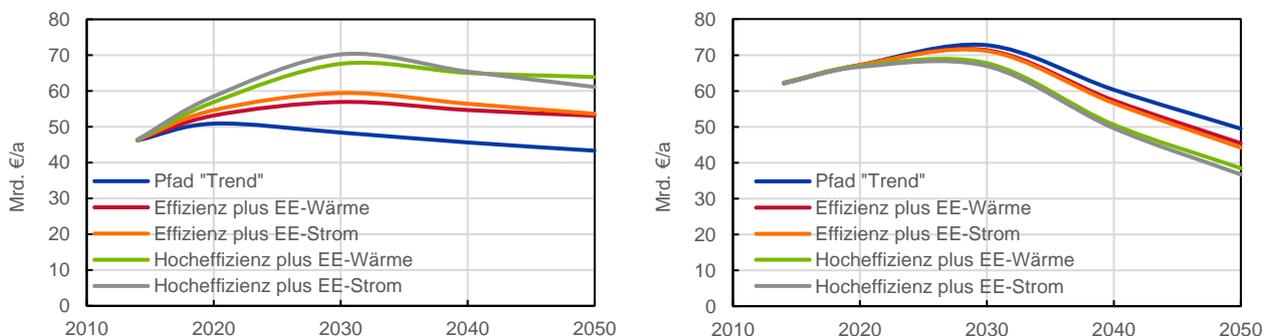


Abbildung 0-4: Links: Investitionen gesamt (Gebäudehülle, Anlagentechnik, Instandhaltung). Rechts: Energiekosten (Heizen, WW, Kühlen, HE)

Ein guter Wirtschaftlichkeitsindikator für die Gesamtwirtschaftlichkeit sind die **Jahresgesamtkosten**. Diese enthalten neben den Energiekosten auch die Annuitäten der Investitionen und stellen somit die gesamten Kosten im Gebäudesektor pro Jahr dar.

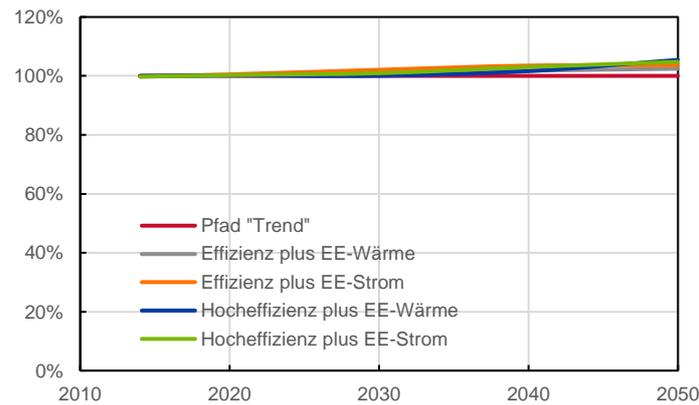


Abbildung 0-5: Jahresgesamtkosten im Vergleich zum Pfad „Trend“<sup>3</sup>

Abbildung 0-5 stellt einen Vergleich der Jahresgesamtkosten der Zielpfade mit dem „Trend“-Pfad dar. Es zeigt sich, dass sich die Kosten der Pfade nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Im Rahmen der Unsicherheiten der zu Grunde liegenden Kostenfunktionen kann daher kein „Gesamtkosten-Sieger“ ausgemacht werden. Bereits kleine Unterschiede bei den Annahmen würden zu identischen Kosten führen. Umgekehrt bedeutet dies auch, dass **aus rein finanzieller Sicht** im Grunde **Wahlfreiheit** zwischen den Zielpfaden, die in der einen oder anderen Hinsicht alle sehr ambitioniert sind, gewährt werden kann. Je stärker insgesamt der Brennstoffeinsatz reduziert werden kann, desto geringer ist allerdings das Risiko in Bezug auf zukünftige Energiekostensteigerungen.

Weiterhin zeigen die **Sensitivitätsbetrachtungen**, dass durch einen größeren/kleineren Anstieg der Energiepreise (Annahme: Preissteigerung bis 2030 von 1,4 % bzw. 2,6 % statt 2 %/a) die jährlichen Energiekosten für den Gebäudebestand um bis zu 6,4 Mrd. Euro pro Jahr größer/kleiner sein können. Dies entspricht etwa 5 % der durchschnittlichen Jahresgesamtkosten. Auch der angenommene Zinssatz hat große Auswirkungen auf die jährlich anfallenden Annuitäten der Investitionen in Gebäudehülle und Anlagentechnik, hier sind Schwankungen von bis zu +/- 14,2 Mrd. Euro möglich.

Von Bedeutung ist auch die Verteilung der Sanierungsqualitäten; würde beispielsweise im Hocheffizienzzenario der Anteil der Hocheffizienz-Sanierungen aller neuen Sanierungen statt bei 75 % – 85 % nur bei 30 % liegen, würde der Endenergieeinsatz um ca. 11 % höher liegen. Ein so hoher Anteil bester Sanierungsqualitäten erfordert eine Weiterentwicklung des Gebäudeinstrumentariums in Richtung einer **verstärkten Akzentuierung bester Bauteilqualitäten**.

In einer strategischen **Gesamtbetrachtung** zeigen die Szenarien, dass das Primärenergieziel für 2050 (- 80 %) machbar ist bei Jahresgesamtkosten, die innerhalb eines engen Kostenkorridors im Vergleich zur „Trendentwicklung“ liegen. Kostenseitig liegt das Trendszenario unter den Zielszenarien, allerdings sind die Abweichungen insgesamt minimal, sodass unter Berücksichtigung der vorhandenen Unsicherheiten aus Kostensicht **keine Priorisierung für eine eher strombasierte oder EE-Wärme-basierte Strategie** oder für Dämmung anstelle von Erneuerbaren oder umgekehrt vorgenommen werden kann. Diese Frage muss auf einer **Einzelobjektebene** unter Berücksichtigung der vorhandenen/geplanten Infrastruktur beantwortet werden.

<sup>3</sup> Da im Zeitraum zwischen 2009 (Basisdaten Gebäudebestand) und 2014 (Startjahr Betrachtung) eine Referenzentwicklung des Gebäudebestandes angenommen ist, starten die Annuitäten und damit auch die Jahresgesamtkosten in 2014 deutlich über den Energiekosten. Auf die Vergleichbarkeit der Szenarien hat dies aber keinen Einfluss.

Neben der geringen Gesamtkostenabweichung ist zu berücksichtigen, dass dies nicht bedeutet, dass die Zielszenarien unwirtschaftlich sind; die Wirtschaftlichkeit müsste gegenüber einem Szenario mit „eingefrorener Effizienzentwicklung“ bemessen werden; dies kann in den Szenariorechnungen aber nicht methodisch abgebildet werden.

Die Sanierungsaktivität im – bereits gegenüber heute dynamischeren – Trendszenario reicht nicht aus, um eine Zielerreichung bzgl. des 2050-Gebäudeziels herbeizuführen. Damit das Trendszenario das Primärenergieziel einhielte, müssten weitere 66 TWh aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden (entsprechend beispielsweise ca. 6,5 Mio. zusätzlichen Biomassekesseln für Einfamilienhäuser). Eine **Erhöhung der jährlichen Sanierungsraten auf** mind. 1,5 % (Außenwand, Kellerdecken), 2,1 % (Dächer), 2,5 % (Fenster) bzw. 4 % (Anlagentechnik) wie in den beiden Effizienzszenarios ist angebracht; die entsprechenden Zielwerte des Hocheffizienzszenarios sind 2 %, 2,5 %, 3 % und 4 %. Ein Hauptziel der Weiterentwicklung des Gebäudeinstrumentariums muss daher in der Steigerung der Wärmeschutz-Sanierungsraten liegen.

In allen Zielerreichungspfaden findet ein deutlicher Umbau des Wärmeversorgungssystems statt mit einem Rückgang des Anteils von Öl- und Gas-Wärme auf unter 40 % in den Effizienzszenarios. Eine **grundsätzlich überlegene Art der Wärmebereitstellung** kann aus den Szenario-Untersuchungen **nicht** abgeleitet werden. Diese Frage muss auf einer Einzelobjektebene unter Berücksichtigung der vorhandenen/geplanten Infrastruktur beantwortet werden. Hier kann insbesondere der gebäudeindividuelle Sanierungsfahrplan einen Beitrag leisten. Die Unsicherheit bezüglich des „besten“ Wärmeversorgungssystems ist gut beherrschbar, denn innerhalb des Betrachtungszeitraums bis 2050 wird die Heizung in der Regel nochmals ausgetauscht, so dass eine Revision einer einmal getroffenen Entscheidung noch wirtschaftlich möglich ist. Allerdings muss das Gebäude- und Klimaschutzinstrumentarium gewährleisten, dass bei den Neuanlagen die Strukturänderung in Richtung auf die zukünftig erforderlichen Wärmeerzeugungstechnologien auch tatsächlich rechtzeitig stattfindet.

Im **Gesamtstrategiebild** in Abbildung 0-6 sind die möglichen Transformationspfade noch einmal zusammengefasst. Dabei entsprechen die einzelnen Punkte jeweils Dekaden-Stationen (2014, 2020, ..., 2050). Die Zielszenarien überschreiten die 80 %-„Ziellinie“ mit jeweils unterschiedlichen Graden der Endenergie- und  $f_p$ -Reduktion. Pfade mit Schwerpunkt auf EE-Strom führen aufgrund der hohen Anteile an Wärmepumpen bei gleicher Effizienz der Gebäudehülle zu höheren Endenergie-Einsparungen als die Pfade mit Schwerpunkte auf EE-Wärme (x-Achse).

Auf der y-Achse ist erkennbar, dass die Szenarien mit dem Schwerpunkt EE-Strom jeweils zu einer niedrigeren  $f_p$ -Einsparung führen als die Schwerpunkte EE-Wärme, da der Primärenergiefaktor von Strom insgesamt trotz seines starken Absinkens höher bleibt als der Primärenergiefaktor der in den EE-Wärme-Szenarien eingesetzten Energieträger.

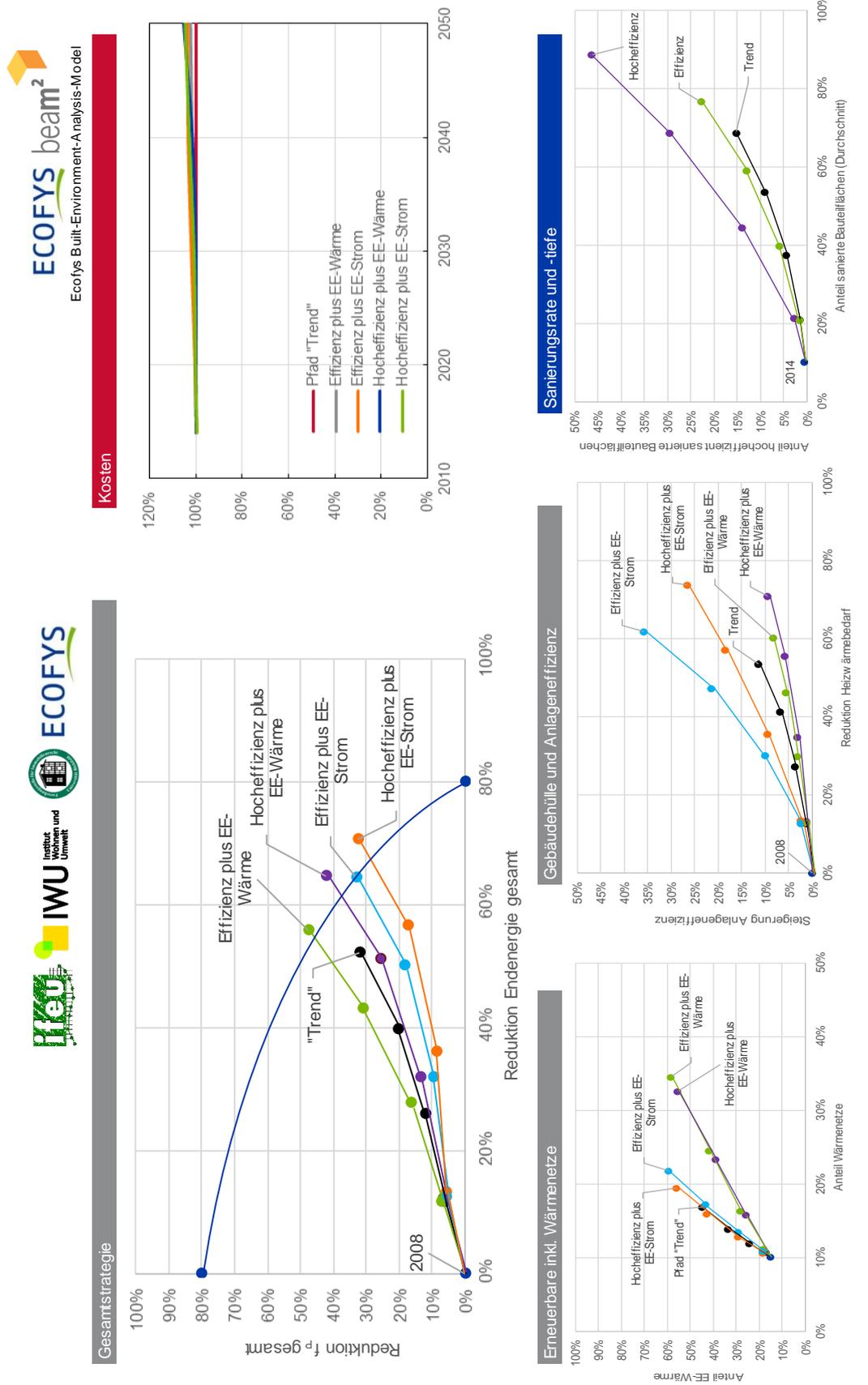


Abbildung 0-6: Gesamtstrategiebild Transformationspfade. Die Punkte in den Grafiken beschreiben jeweils den Zustand in der nächsten erreichten Dekade (Bsp. 2014, 2020, 2030, 2040, 2050).

## Executive Summary

**Primary Target** of work package 1 is the representation of transformation pathways into a “nearly climate neutral building stock” by 2050. Along with the subordinate definition for the entire buildings stock - which is derived from the energy concept of the German government - questions regarding the system boundary for the energy balance and regarding the eligibility, of (auxiliary) power demands for example, need to be addressed.

Within the scope of the project, possible transformation pathways with different emphases are defined. The 2050 target of a nearly climate neutral building stock is defined as follows: In accordance with the buildings target formulated in the energy concept, the buildings stock is “nearly climate neutral” if the non-renewable primary energy demand is reduced by 80 % compared to 2008. The primary energy demand of residential and non-residential buildings is calculated with primary energy factors and according to the methodology of the current Energy Saving Ordinance (EnEV).

In order to achieve a “nearly zero-energy building stock” through the reduction of the non-renewable primary energy demand by 80 % from 2008 to 2050, the milestone for 2050 is consequently 239 TWh/a of non-renewable primary energy. Subtracted by the fraction of lighting in non-residential buildings considering a further developing primary energy factor, a resulting target value of 212 TWh/a for space heating, hot water, space cooling<sup>4</sup>, and auxiliary energy demand in residential and non-residential buildings remains, see Table 0-1.

	Baseyear 2008	Target 2050
Heating + hot water res buildings	640 TWh	
Heating + hot water nonres buildings	310 TWh	
Auxiliary energy	42 TWh	
Cooling energy	14 TWh	
Lighting in nonres buildings	190 TWh	
sum	1.196 TWh	239 TWh
Lighting in nonres buildings		27 TWh
Target 2050 without lighting		<b>212 TWh</b>

Table 0-1: Definition of targets in building sector until 2050

For **modelling**, the *Ecofys Built-Environment Analysis Model* (BEAM) is used which offers a flexible environment for a complete depiction of building stocks. Not only the status quo, but also future scenarios for all types of buildings and energy sources can be calculated using this model based on assumptions of suitable boundary conditions.

Analogue to the research project [Ifeu et al. 2014], a reference development and **four transformation pathways** each reaching the target of a “climate neutral building stock” in 2050 were compiled in this scheme.

The transformation pathway “*Trend*” maps currently existing measures with moderate improvements, both with respect to speed and depth of renovation. Renewable energy systems have moderate growth rates. Therefore, the “*Trend*” scenario does not just extrapolate the current development but already considers increasing dynamics.

The “*Target Scenarios*” result from the combination of differently ambitious measures on the building envelope on the one side, and a focus on either heat or electricity from renewable energy sources on the other side. The question which transformation path is the most reasonable under

<sup>4</sup> Fraction of residential buildings considerably lower than of non-residential buildings

technical, ecologic, and economic criteria and what advantages and disadvantages may arise will be examined.

**The results** show in a comparative evaluation of scenarios with regard to the building stock that due to significantly increased renovation rates for building envelopes almost all components of the building stock will be renovated in the scenarios *“High-efficiency plus RE-Heat/Power”* and still considerable shares in the scenarios *“Efficiency plus RE-Heat/Power”*. On the transformation pathway *“Trend”* on the other hand, a significant percentage of buildings will not be renovated until 2050.

The **heating demand** can be reduced by 54 % from 2008 to 2050 for *“Trend”* while on *“Efficiency plus RE-Heat/Power”* a reduction of 60 – 62 % can be achieved. The pathways for *“High-efficiency plus RE-Heat/Power”* even project a reduction of 71 – 74 %, see Figure 0-1. This heating demand in the high-efficiency scenario is to be interpreted as upper limit as it results from a combination of high renovation depth and speed. But even in this pathway the 2050 target cannot be reached without renewable energy technologies.

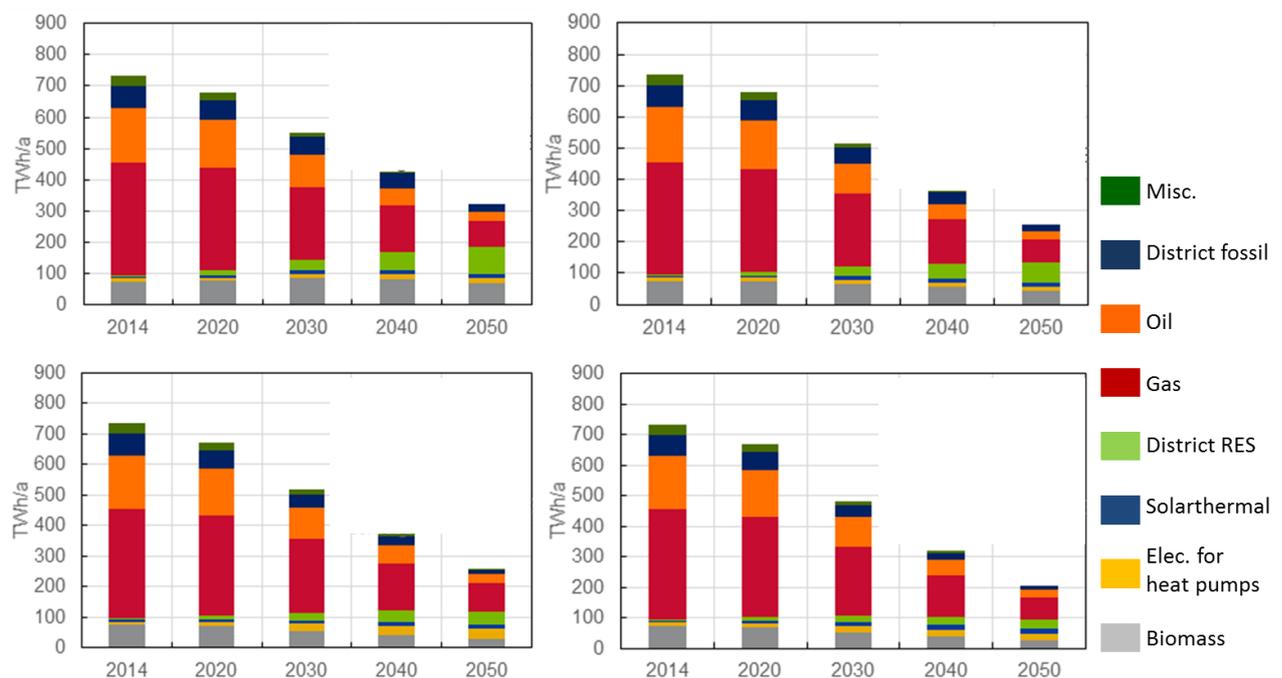


Figure 0-1: Final Energy Demand per energy carrier for the target scenarios (upper row: Efficiency and High Efficiency plus EE-Heat, lower row: Efficiency and High Efficiency plus EE-Power)

The **total final energy demand** including the application of warm water, cooling, and auxiliary energy can be reduced by 52 % on the *“Trend”* path. On the target pathways, a reduction by 56 % (*“Efficiency plus RE-Heat”*), 64 % (*“Efficiency plus RE-Power”*), 65 % (*“High-efficiency plus RE-Heat”*) and 71 % (*“High-efficiency plus RE-Power”*) are achievable. The percentage of renewable energies as part of the heating demand (without the share of RE-energy sources in heating grids) will rise to 32 % in the pathway of *“Trend”*, while in the other pathways percentages between 35 % and 43 % can be achieved, depending on the development. In combination with district heat networks, up to 60 % renewable share can be reached. The potential of heating networks results from the upper limit of the potentials collected in another study by a spatially resolved analysis. Shares of 35 % can be achieved in the RE heat scenarios; in the other scenarios they are below this rate. This results in a *“division of tasks”*: heating networks are increasingly destined for urban, dense spaces where the RE potentials are more limited. This amounts in a requirement to structure a heat-planning regionally.

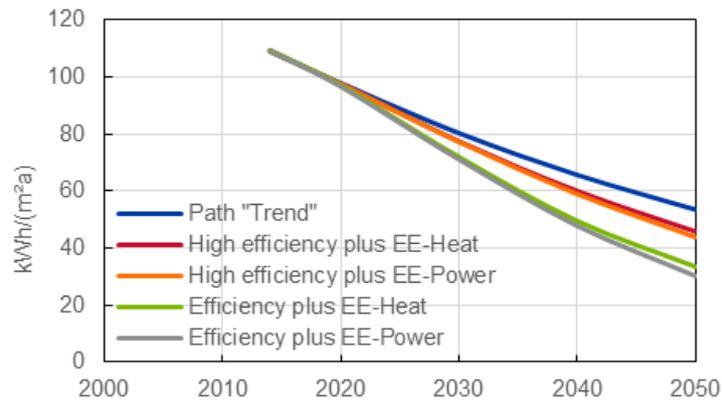


Figure 0-2: Specific Heating Demand in the building sector

As Figure 0-2 shows, the specific heating demand drops to approx. 50 kWh/(m<sup>2</sup>a) in the efficiency paths and to approx. 30 kWh/(m<sup>2</sup>a) in the high efficiency paths.

Depending on the scenario family, various **renewable energies** contribute to this. In the “plus EE-heat” scenarios biomass plays a major role. With a biomass consumption of approximately 85 TWh direct **biomass use** (in addition to approx. 40 to 60 TWh from heat networks), all scenarios including “efficiency plus EE-heat” are within the sustainable potential limits, which were estimated to about 400 TWh/a in the year 2050. However, this biomass-contingent is missing within other sectors, particularly for freight and air traffic and for industrial process energy.

The proportion of building-mounted **solar thermal** energy is low in the scenario „efficiency plus EE-heat” and ranges at around 4 %. This is the case even though the amount of installed solar thermal heating systems increases to 60 % (2030) respectively 80 % (2050). In a sensitivity analysis - “Solar Thermal” – it is being shown that the proportion of solar thermal systems can be still increased, but does not exceed 10 % due to the overall limited achievable energy shares in an ambitious expansion path.

In the electricity-based scenarios („plus RES-E), the electricity demand especially for **heat pumps** just increases in the order of 15 TWh/a until 2050. This is due to a reduction of the heating demand as well as the substitution of inefficient direct electricity heating systems by heat pumps. Compared to the entire German (gross) electricity consumption of 597 TWh in 2013, the increase of 13 TWh is small and corresponds to the average annual extension of renewable electricity capacities over the last five years. In the other scenarios, the electricity consumption in the building sector is declining.

With the reductions achieved in all four scenarios, the 80 % target for **non-renewable primary energy** is reached (minor differences result from the model calibration), see Figure 0-3.

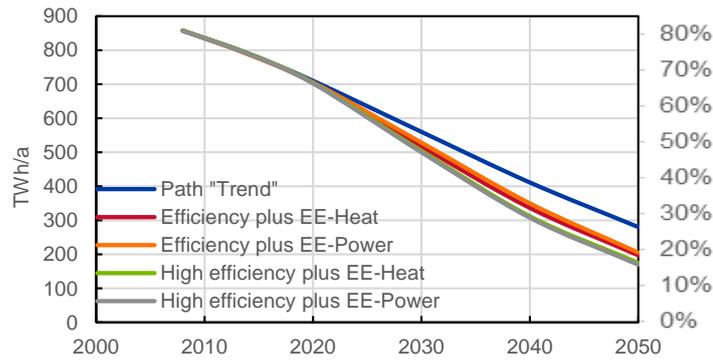


Figure 0-3: Total non-renewable primary energy use in the five transformation pathways (space heating, hot water, space cooling, and auxiliary energy)

Contrary to the energy costs, the **costs for investments** based on the detailed cost functions for each path are substantially higher than in “Trend” since distinctly higher rates of renovation are assumed on one hand, and measures are embellished in a much more ambitious fashion on the other hand. In the path of “*High-efficiency plus RE-Heat*” these costs are about 47 % higher in 2050 than in the path of “*Trend*”, see Figure 0-4.

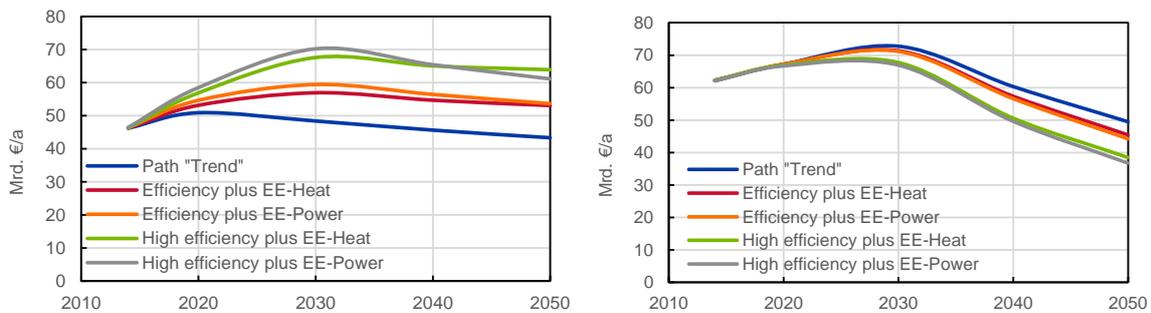


Figure 0-4: Left: Investments, cumulated (building envelope, installations, maintenance). Right: Energy Costs (Heating, Hot water, Cooling, Aux)

Good indicators for cost-effectiveness in terms of overall economic viability are the **total annual costs**. They include energy costs as well as annuities of the investments and hence represent the total costs in the building sector per year.

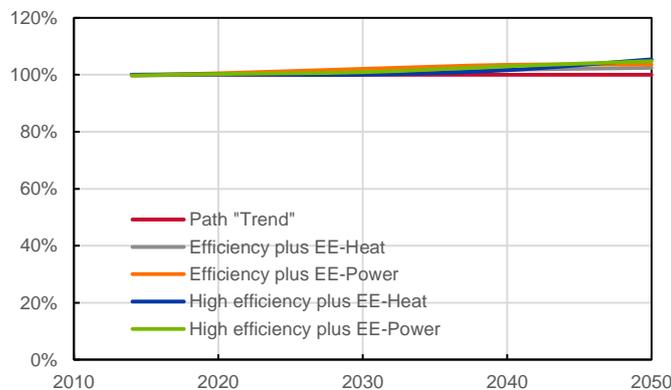


Figure 0-5: Total annual costs in comparison to the path “Trend”

Figure 0-5 displays a comparison of total annual costs for the target pathways with the path of “*Trend*”. It becomes visible that the costs of the different pathways differ only slightly from each other. In the scope of the uncertainties of the cost functions used, small variations would lead to

identical costs and therefore a “winner” in the category total costs cannot be determined. Conversely, this also means that from a **purely financial standpoint, freedom of choice** between the target paths, which are in one way or another very ambitious, can be granted. However, the more the fuel use can be reduced, the lower is the risk in relation to future energy cost increases.

A **sensitivity analysis** shows that the impact of higher energy prices until 2030 is significant and can lead to +/- 6.4 billion Euro energy costs per year. Another important assumption with regard to the yearly costs of the building stock is the discount rate. A variation of yearly costs up to 14.2 billion Euro per year are possible.

Important is also the distribution of renovation qualities (depths): for example, would the share of high-efficiency renovations of all new renovations within the high-efficiency scenario range at 30% instead of 75-85 %, the energy consumption would be higher by 11 %. Such a **high share of deep renovations** requires a further development of building-instruments.

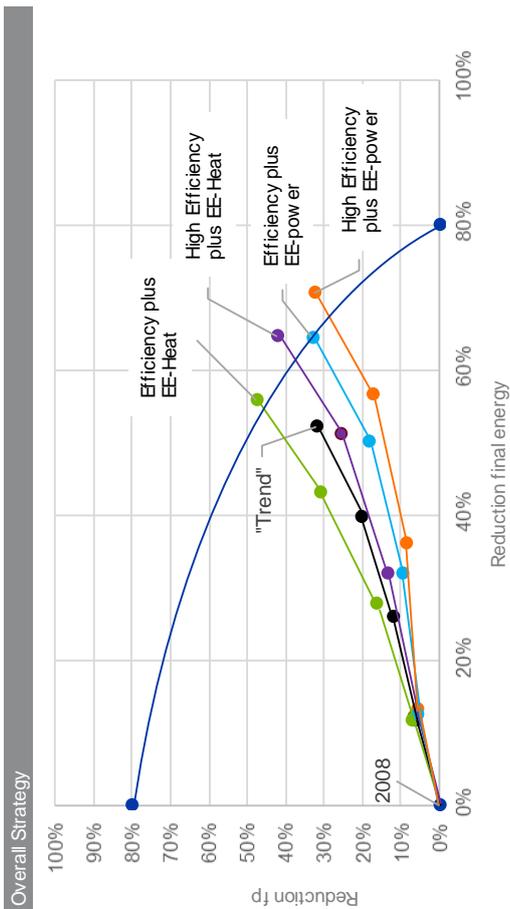
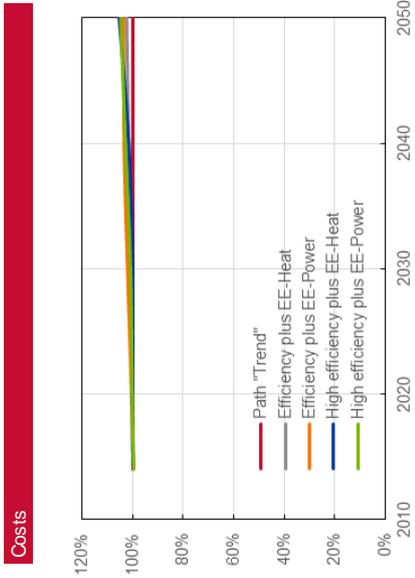
In an **overall strategic consideration** the scenarios show that the primary energy target for 2050 (- 80 %) is feasible with total additional costs within a narrow corridor compared to the " trend scenario". The costs of the trend scenario are below the target scenarios, however, all scenarios are very close together, so that, taking into account the existing uncertainties from a cost perspective, **no prioritization for a more electricity-based or renewable heat-based strategy** or for insulation instead of renewable energy systems or vice versa can be made. This question must be answered on an individual property level, taking into account the existing / planned infrastructure.

It needs to be taken into account that the low deviation of total costs does not mean that the target scenarios are uneconomical; the cost-effectiveness would have to be compared to a scenario with “frozen efficiency development”; this however cannot be shown methodically within the scenario calculations.

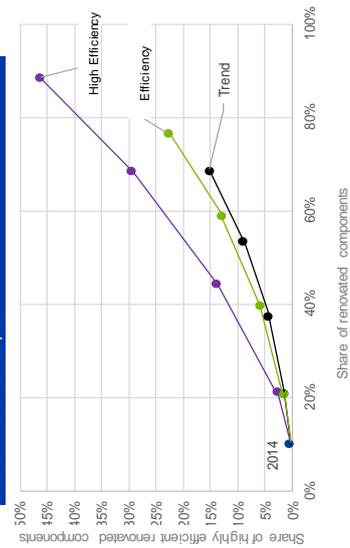
The renovation activity in the trend scenario, which is already more dynamic than the current development, is not sufficient to achieve the 2050 building sector target. If the trend scenario were to achieve the primary energy target using renewables, for instance, it would require an additional 66 TWh provided from renewable sources (for example, about 6.5 million additional biomass boilers for residential applications). An **increase of the annual renovation rates** to at least 1.5 % (outer wall, basement ceiling), 2.1 % (roofs), 2.5% (windows) respectively 4 % (systems) as laid out in the two efficiency scenarios is appropriate; the corresponding target rates in the high efficiency scenarios are 2 %, 2.5 %, 3 % and 4 %. A major goal of the development of building instruments must therefore be to improve the thermal insulation remediation rates.

In all target scenarios, a substantial transformation of the heat supply infrastructure takes place leading to a decreasing share of oil and gas systems to less than 40 %. A principle **superior heating system cannot be derived** from the scenario studies. This question must be answered on an individual property level, taking into account the existing/planned infrastructure. For this purpose, especially the building-specific renovation roadmap can be helpful. The uncertainty about the “best” heating system is easy to control, because within the observation period up to 2050, the systems will be replaced again and decisions can be revised. However, the building policy instruments must ensure that the structural change of heat generation technologies required in the future will actually take place in time.

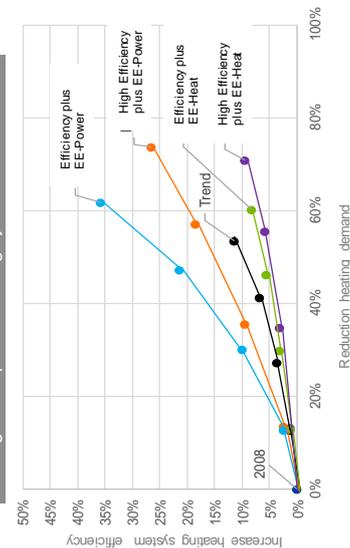
Figure 0-6 summarises the transformation pathways. The dots in the figures represent the situations in the different decades.



**Retrofit rate vs. Depth**



**Building envelope vs. Heating systems**



**RES heat vs. District heat**

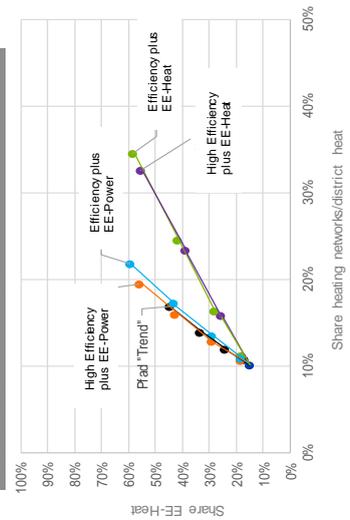


Figure 0-6: Overall strategy illustration of transformation pathways. The dots in the figures describe the situation in the next decade (example 2014, 2020, 2030, 2040, 2050)

## 1 Einführung

Übergeordnetes Ziel des Arbeitspaketes 1, dessen Szenarioberechnungen federführend von Ecofys bearbeitet wurde, ist die Ableitung und Darstellung möglicher Transformationspfade zu einem „nahezu klimaneutralen Gebäudebestand“ im Jahr 2050. Hierzu wird der Begriff „nahezu klimaneutraler Gebäudebestand“ im Rahmen dieses Projektes zunächst definiert. Neben der übergeordneten Definition für den gesamten Bestand, die sich maßgeblich aus dem Energiekonzept der Bundesregierung ableitet, sind außerdem Fragen der Bilanzgrenze (wie wird bspw. gebäudenah und erneuerbar erzeugter Strom räumlich und zeitlich bilanziert) sowie der Anrechenbarkeit z.B. von (Hilfs-) Strombedarfen auf Einzelgebäudeebene zu klären.

Im Anschluss daran wird basierend auf diesen Definitionen das methodische Vorgehen zur Bestimmung des angestrebten Zielzustandes „nahezu klimaneutraler Gebäudebestand“ im Jahr 2050 erläutert. Die im Projekt definierten fünf Transformationspfade mit unterschiedlichen Schwerpunkten werden über die Zeitachse betrachtet und daraus vier sog. Zielszenarien so definiert, dass sie diesen Zielzustand erreichen.

Im letzten Schritt der Analyse werden die Ergebnisse der Szenarien-Berechnungen in Steckbriefen dargestellt und mit einer Sensitivitätsanalyse geprüft. Dies wird vor allem in Bezug auf die Gebäudebestandsentwicklung, die Entwicklung der energetischen Parameter wie Nutz- und Endenergiebedarfe und Anteile unterschiedlicher Energieträger sowie volkswirtschaftlicher Parameter wie Primärenergiebedarf, THG-Emissionen und Kosten geschehen. In einer vergleichenden Analyse und Interpretation werden die unterschiedlichen Transformationspfade hinsichtlich ihrer Ergebnisse bewertet. Abschließend werden die Szenarien-Ergebnisse mit anderen Studien verglichen und Unterschiede diskutiert sowie Ableitungen in Bezug auf den Sanierungsfahrplan für die folgenden Arbeitspakete getroffen, u. a. Aussagen zum notwendigen Dämmniveau, der Sanierungsgeschwindigkeit für Einzelgebäude oder zur Robustheit verschiedener Gebäudestrategien.

## 2 Operationalisierung des Ziels „Nahezu klimaneutraler Gebäudebestand“ im Rahmen dieses Projektes

Im Rahmen dieses Projektes werden vier Transformationspfade zu einem „klimaneutralen Gebäudebestand“ berechnet und beschrieben. Hierzu ist es zunächst notwendig, die Begrifflichkeiten und den Bilanzierungsrahmen zu definieren. Daher wird zunächst der „klimaneutrale Gebäudebestand“ definiert. Eine Abgrenzung des Begriffs „Klimaneutralität“ auf unterschiedlichen Ebenen, vor allem auf der Einzelgebäudeebene, ist im Anhang 8.1 zu finden.

Der Begriff des „nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes“ wurde erstmalig im Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 [Bundesregierung 2010] erwähnt und als zentrales Ziel für den Gebäudebereich für das Jahr 2050 vorgegeben. Im Energiekonzept wird „klimaneutral“ dabei wie folgt definiert:

*„Klimaneutral heißt, dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt wird.“*

Auf europäischer Ebene reiht sich dieses Ziel ein in das durch die Europäische Kommission gesetzte Sektorziel von 88 – 91 % Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudesektor (Basis 1990) entsprechend dem „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft bis 2050“ (KOM(2011) 112). Die im Energiekonzept genannte Definition ist dabei nahezu deckungsgleich mit derjenigen des "Niedrigstenergiegebäudes" gemäß Art. 2 der europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD). Dort heißt es:

*"Das ‚Niedrigstenergiegebäude‘ [ist] ein Gebäude, das eine sehr hohe ... Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen — einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird — gedeckt werden."*

Für die Transformationspfade muss dieses Ziel operationalisiert werden. Definiert wird es dabei wie folgt:

**(1) Übergeordnete Definition.** In Übereinstimmung mit dem Gebäudeziel im Energiekonzept ist der Gebäudebestand nahezu klimaneutral, wenn der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf um 80 % gegenüber 2008 gesenkt wird. Der Primärenergiebedarf wird analog der aktuellen Rechenweise der EnEV nur mit dem nicht-erneuerbaren Anteil berechnet. Entsprechend dem derzeit geltenden Berechnungsansatz der EnEV wirkt sich vor Ort erzeugter Strom aus erneuerbaren Quellen mindernd auf den ausschließlich nicht erneuerbare Energie beinhaltenden Primärenergiekennwert aus.<sup>5</sup> Nichtwohngebäude haben in der Regel einen hohen zusätzlichen Anteil an Strom (Beleuchtung, Lüftung, Klimatisierung,...), was im Unterschied zu Wohngebäuden zu berücksichtigen ist. Da der klimaneutrale Gebäudebestand sowohl Neu- als auch (teilweise denkmalgeschützte) Altbauten enthält, ist es bei der Festlegung des Anforderungsniveaus darüber hinaus sinnvoll, auch diese Unterscheidung aufzugreifen. Eine genauere Festlegung der Anforderungsniveaus muss unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und technischen Machbarkeit sowie der Häufigkeiten der unterschiedlichen Gebäudetypen (bottom-up Ansatz) erfolgen. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass die Gleichsetzung eines annähernd klimaneutralen Gebäudebestandes mit einer Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs um 80 % ggü. 2008 inzwischen durchaus als nicht ausreichend ambitioniert kritisiert wird. So schreibt beispielsweise das Umweltbundesamt in einem Positionspapier aus dem Jahr 2014 „[dass] aus Sicht des Umweltbundesamtes eine Minderung des (nichterneuerbaren) Primärenergiebedarfs um 80 % mit einem Rest von 20 % fossilen Energieträgern nicht den Anspruch [erfüllt], annähernd klimaneutral zu sein.“ [Umweltbundesamt 2014]

## **(2) Berücksichtigung von Strombedarf für Gebäudetechnik, Beleuchtung, Kühlung und weitere Plug Loads.**

Der Strombedarf zur Beleuchtung von Nichtwohngebäuden wird im hier verwandten Modell nicht modellendogen berücksichtigt. Daher erfolgt eine Abschätzung nach [BMW Energie 2014]: Für die Bereiche GHD und Industrie werden für das Jahr 2013 Strombedarfe (*Endenergie*) zur Beleuchtung von 250 PJ angegeben, also etwa 69,5 TWh. Dies entspricht bei der gegenwärtigen Nutzfläche in Nichtwohngebäuden von ca. 2,3 Mrd. m<sup>2</sup> einem Strombedarf von 30 kWh/m<sup>2</sup>a. Bis zum Jahr 2050 wird vereinfachend mit Effizienzverbesserungen von 40 % gerechnet, sodass sich

---

<sup>5</sup> Die der Berechnung des Gebäudeenergiekennwerts zugrunde liegende europäische Norm EN 15603 wird voraussichtlich 2015/16 in einer erheblich überarbeiteten Fassung in Kraft treten. Die Überarbeitung beinhaltet insbesondere Anpassungen bei der Berücksichtigung der innerhalb der verschiedenen „Perimeter“ „on-site“, „nearby“ sowie „distant“ erzeugten erneuerbaren Energie in der Gebäudebilanzierung. Nach aktuellem Stand der Neufassung ist es möglich, erneuerbare Energie aus allen drei „Perimetern“ zu berücksichtigen, sowohl für die Berechnung des erneuerbaren Anteils als auch für die Gebäudeenergiebilanz. Die erste Abstimmung der Mitgliedsstaaten zur Abstimmung über Final Draft FprEN 15603 - *Energy performance of buildings - Overarching standard EPB* i.d.F. vom 12. August 2014 endete am 8. Oktober 2014 und war nicht erfolgreich, so dass eine Überarbeitung mit anschließender erneuter Abstimmung stattfinden wird. Diese laufende Aktualisierung der Norm spiegelt die zunehmende Interdependenz der Stromversorgung mit der gebäudeseitigen Stromnachfrage sowie den zunehmend vor Ort, in der Nähe oder entfernt erneuerbar erzeugten und in Gebäuden verbrauchten Strom wider. Es ist zu erwarten, dass auch zukünftige Fassungen der EnEV diesen durch EN 15603 erweiterten Bilanzierungsrahmen, dessen Nutzung indirekt durch die Gebäuderichtlinie (Annex I) empfohlen wird, aufgreifen könnten.

zusammen mit einer leicht höheren Nutzfläche in 2050 ggü. 2012 ein Strombedarf von ca. 45 TWh/a (Endenergie) ergibt.

**(3) Zieldefinition.** Die Zielformulierung „Senkung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs um 80 % von 2008 bis 2050“ bezieht sich auf den Bilanzrahmen der EnEV, somit sind die Energiebedarfe für Heizen, Warmwasser und Hilfsenergie bei Wohn- und Nichtwohngebäuden und zusätzlich die Energiebedarfe für Kühlen und Beleuchtung in Nichtwohngebäuden erfasst. Die entsprechenden nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfe *im Basisjahr 2008* werden wie folgt angesetzt: Heizen und Warmwasser in Wohngebäuden mit 640 TWh<sup>6</sup>, Heizen und Warmwasser in Nichtwohngebäuden 310 TWh<sup>7</sup>, Hilfsenergie in Wohn- und Nichtwohngebäuden 42 TWh<sup>4</sup>, Beleuchtung in Nichtwohngebäuden 190 TWh<sup>8</sup>, Kühlen in Nichtwohngebäuden 14 TWh<sup>4</sup>. In Summe sind es 1.196 TWh. Eine 80%ige Reduktion führt dann auf die Zielmarke für 2050 von 239 TWh nicht erneuerbare Primärenergie. Zieht man den Anteil für die Beleuchtung in Nichtwohngebäuden ab (45 TWh Endenergie in 2050 und  $f_{p,Strom}=0,6$  führen auf 27 TWh Primärenergie), so bleibt ein Anteil von ca. 212 TWh für Heizen, Warmwasser, Kühlen<sup>9</sup> und Hilfsenergiebedarfe in Wohn- und Nichtwohngebäuden übrig (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Zieldefinition Gebäudebereich 2050

	Basisjahr 2008	Ziel 2050
Heizen+WW in Wohngebäuden	640 TWh	
Heizen+WW in Nichtwohngebäuden	310 TWh	
Hilfsenergie gesamt	42 TWh	
Kühlenergiebedarf	14 TWh	
Beleuchtung in Nichtwohngebäuden	190 TWh	
Summe	1.196 TWh	239 TWh
Beleuchtung in Nichtwohngebäuden		27 TWh
Ziel 2050 ohne Beleuchtung		<b>212 TWh</b>

**(4) Kraft-Wärme-Kopplung.** Für Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen wird im Unterschied zur Stromgutschrift-Methode, die beispielsweise in der Vorschrift FW 309 der AGFW angewendet wird, das „Exergie-Verfahren“ in Ansatz gebracht. Bei dieser Methode wird neben der Quantität der Energie auch deren Qualität über den Carnot-Faktor berücksichtigt. In der Regel führt dies aufgrund des geringeren Exergie-Anteils der Wärme im Vergleich zu Strom zu einer niedrigeren Allokation von Energieträgern und THG-Emissionen auf die Wärme<sup>10</sup>.

Neben der übergeordneten Definition der „Klimaneutralität“ für den gesamten Gebäudebestand sind weitere Abgrenzungen und Definitionen auf untergeordneten Ebenen notwendig. Diese werden in einem separaten Abschnitt im Anhang diskutiert.

### 3 Methodische Vorgehensweise zur Bestimmung eines klimaneutralen Gebäudebestands

Basierend auf den obigen Definitionen wird im folgenden Abschnitt das methodische Vorgehen zur Bestimmung des angestrebten Zielzustandes „nahezu klimaneutraler Gebäudebestand“ im Jahr 2050 erläutert. Hierzu werden verschiedene Transformationspfade mit unterschiedlichen Schwerpunkten auf Energieeffizienz und Anteil von Versorgungssystemen auf Basis erneuerbarer Energieträger über die Zeitachse betrachtet, von denen alle – mit Ausnahme des Szenarios „Trend“ – den gewünschten

<sup>6</sup> Basierend auf [IWU 2012].

<sup>7</sup> Basierend auf Modellierungen mit BEAM<sup>2</sup>.

<sup>8</sup> Strombedarf für Beleuchtung siehe Abschätzung oben.

<sup>9</sup> Anteil Wohngebäude im Vergleich zu Nichtwohngebäuden sehr gering.

<sup>10</sup> Das Stromgutschriftverfahren führt insbesondere bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien zu methodischen Schwierigkeiten. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es auch noch andere Bewertungsmethoden gibt, z.B. nach [IWU 2002].

Zielzustand erreichen. Hierbei werden neben dem Zielzustand im Jahr 2050 die Wegmarken für die Jahre 2020, 2030 und 2040 angegeben.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die methodischen Vorarbeiten und die Modellweiterentwicklung von BEAM<sup>2</sup> im Forschungsprojekt „100 % Wärme aus erneuerbaren Energien? Auf dem Weg zum Niedrigstenergiehaus im Gebäudebestand“ [IFEU et al. 2014] erbracht wurden. Durch die Erarbeitung eines gemeinsamen Datengerüsts und der grundlegenden Szenariophilosophie für beide Projekte wurde eine zusätzliche Detailtiefe erzeugt, z.B. eine Definition von komponentenweisen Sanierungsraten für den Gebäudebestand. Daher wird dieses Projekt mehrfach zitiert.

### 3.1 Beschreibung der Methodik

Zur Modellierung der Transformationspfade wird das Ecofys Built-Environment-Analysis-Model BEAM<sup>2</sup> eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine flexible Umgebung zur vollständigen Abbildung von Gebäudebeständen. Neben der Abbildung des Status-quo können Zukunftsszenarien für alle Gebäudetypen und Energieträger unter Annahme von geeigneten Randbedingungen gerechnet werden. Details zum Berechnungsmodell können dem Anhang in Abschnitt 8.1 sowie [Bettgenhäuser 2013] entnommen werden. Der im Rahmen des Modells berechnete Energiebedarf wird mit Hilfe der Energiestatistik [BMWi 2012] kalibriert, womit ein Abgleich Bedarf-Verbrauch stattfindet.

### 3.2 Bilanzierungsrahmen

Im Rahmen der Berechnung der Transformationspfade werden dem Bilanzierungsraum der EnEV entsprechend folgende Anwendungen bilanziert: Heizenergiebedarf, Warmwasserbedarf, Kühlenergiebedarf und Hilfsstrombedarf für Wohn- und Nichtwohngebäude. Der Strombedarf für Beleuchtung in Nichtwohngebäuden wird separat berücksichtigt und ist nicht Teil des eigentlichen Berechnungsmodells. Eine Bilanzierung darüber hinausgehender Stromverbraucher (z. B. Haushaltsgeräte, Elektronik oder Büroeinrichtung) erfolgt nicht.

Der EE-Anteil ergibt sich aus dem Nutzenergiebeitrag der Solarthermieanlagen zur Warmwasserbereitung und zur Deckung des Heizwärmebedarfs sowie dem Endenergiebedarf der Biomasseanlagen und dem Anteil Umweltwärme für Wärmepumpen. Der Anteil erneuerbare Energien bei Wärmepumpen wird in Anlehnung an die EE-Richtlinie [EC 2009/28] mit Anteil-EE =  $Q_{\text{nutz}} * (1 - 1/JAZ)$  berechnet<sup>11</sup>.

Hinzuzurechnen sind die EE-Anteile aus Wärmenetzen, die in diesem Rahmen nicht explizit dokumentiert, sondern in Form der Reduktion des Primärenergiefaktors berücksichtigt werden. Auch der Anteil erneuerbarer Energien beim verwendeten elektrischen Strom wird im EE-Anteil in Übereinstimmung mit den Konventionen der Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energiestatistik nicht explizit dokumentiert.

### 3.3 Wesentliche Annahmen und Randbedingungen

Wo immer möglich wurden als Startpunkt Daten aus der Datenbank zum Zensus 2011 genutzt (siehe [www.zensus2011.de](http://www.zensus2011.de)). Alle wesentlichen Annahmen zur Berechnung der Szenarien sind in Anhang 8.4 dargestellt. Neben der Bevölkerungs- und Flächenentwicklung betreffen diese Annahmen Investitionskosten mit den zugehörigen Lernkurven sowie Lebensdauern der Komponenten. Die Lernkurven für die einzelnen Komponenten wurden ausführlich in [IFEU et al. 2014] recherchiert und sind dort beschrieben. Weiterhin sind Energiepreisannahmen für Wohn- und Nichtwohngebäude von

---

<sup>11</sup> Dabei sind:  $Q_{\text{nutz}}$  = die gesamte Nutzwärme; JAZ = die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.

großer Bedeutung. Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Faktoren haben wesentlichen Einfluss auf die Zielerfüllung, ebenso wie Sanierungsraten und Effizienzklassen, Annahmen zur Qualität von Gebäudehüllen und zur Anlagentechnik.

Der Anteil der möglichen netzgebundenen Wärme basiert auf raumbezogenen Abschätzungen, die im Rahmen einer GIS-Analyse durchgeführt wurden [GEF 2014]. Hier wurde abgeschätzt, dass zusätzlich zu den bestehenden Fernwärmenetzen ein weiteres Ausbaupotenzial für netzgebundene Systeme, insbesondere Nahwärme, in einer Größenordnung zwischen 50 und 100 TWh/a liegt. Dieses Potenzial hängt stark von der Entwicklung der Verlegekosten, aber auch den anlegbaren Kosten der Vergleichssysteme ab.

#### **Infobox: Obergrenzen des Wärmenetzausbaus**

Im Rahmen einer Kurzstudie untersuchte GEF das Ausbaupotenzial von Nahwärmenetzen zusätzlich zum heutigen Fernwärmenetzausbau in einer GIS-gestützten Analyse auf Basis eines digitalen Wärmeatlas für Gesamtdeutschland. Auf Grund der noch lückenhaften Datenlage mussten dabei Vereinfachungen vorgenommen werden insbesondere bezüglich der Nichtwohngebäude.

Dabei wurde zunächst eine gebäudescharfe Wärmemodellierung zu Grunde gelegt, darauf aufbauend eine Wärmedichtekarte erstellt, die Leitungslänge und erzielbare Wärmeabsätze errechnet und damit das technische Potenzial der Nahwärme (abzüglich der existierenden Fernwärme) abgeschätzt. Aufbauend auf einer groben Abschätzung der zukünftigen Wärmebedarfsentwicklung, den anlegbaren Kosten von Konkurrenztechnologien, den Kosten der eingespeisten Wärmequellen und der Verlegekosten wird ein technisch-wirtschaftliches Potenzial errechnet.

Das technische Potenzial nach heutigen Randbedingungen beträgt 240 TWh/a. Von diesem technischen Potenzial ist nach den Berechnungen von GEF bei einem anlegbaren Wärmepreis von 100 €/MWh und Wärmeeinspeisekosten von 25 €/MWh ein Anteil von rd. 50 % wirtschaftlich nutzbar. Dies sinkt auf 20 % (Wärmeeinspeisekosten von 35 €/MWh) bzw. 4 % (Wärmeeinspeisekosten von 45 €/MWh). Bei höheren anlegbaren Wärmekosten steigt die Attraktivität der Nahwärme stark an auf beispielsweise rd. 80 – 40 % (25 bis 45 €/MWh) des technischen Potenzials bei 120 €/MWh anlegbaren Wärmekosten. Diese Potenzialangaben sinken für 2030 und 2050 deutlich ab, wenn ein Großteil des Gebäudebestandes saniert sein wird.

Eine Änderung der klimatischen Randbedingungen wurde für die hier durchgeführten Berechnungen nicht angenommen. Die Reduktion von Einsparungen auf Grund der klimabedingten Erwärmung ist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Andere Studien, etwa [Prognos et al. 2014], beziffern den klimabedingten Rückgang der jährlichen Gradtagszahl auf bis zu 15 %. Dem zu Grunde gelegt ist allerdings ein Temperaturanstieg, der im Jahr 2050 das 2 °C schon fast erreicht hat; ein vorsichtigerer Ansatz, wie in [IWU 2013] mit max. 10 % angesetzt, erscheint daher ebenfalls diskutabel. Auf der anderen Seite bildet das Gebäudemodell keine Rebound-Effekte (wie z.B. höhere Innenraumtemperaturen nach der Sanierung) ab, da verhaltensbedingte Mehrverbräuche in Gebäuden nicht statistisch abgesichert modelliert werden können. Beide Effekte sind gegenläufig und kompensieren sich daher zu einem Teil, dessen genaue Quantifizierung auf Grund der beschriebenen grundsätzlichen methodischen Probleme nicht beziffert werden kann.

## **4 Der Gebäudebestand in der Ausgangslage**

Erster Schritt für die Berechnung möglicher Transformationspfade ist eine Bestandsaufnahme des aktuellen Gebäudebestandes. Grundsätzlich ist die Datenlage im Wohngebäudebereich deutlich besser als im Nichtwohngebäudebereich. Im Rahmen dieses Projektes ist die Datenbasis Gebäudebestand des IWU [IWU et al. 2010] die Hauptquelle für den Wohngebäudebestand. Für die

Nichtwohngebäude (Öffentliche Gebäude, Gewerbe, Handel und Industrie) sind [Schlomann 2011], [Kleeberger et al. 2011] sowie [Frondele und Ritter 2011] die wichtigsten Datenquellen.

Zur Modellierung des Gebäudebestandes sind zehn Gebäudetypen definiert. Für den Wohnbereich sind dies Einfamilienhäuser (EFH), Doppelhaushälften/Reihenendhäuser (REH), kleine Mehrfamilienhäuser (KMH) und große Mehrfamilienhäuser (GMH). Die Nichtwohngebäude gliedern sich wegen der unterschiedlichen Nutzungsstrukturen in folgende sechs Typen: Büro- und Verwaltungsgebäude (BVG), Schul- und Hochschulgebäude (SHG), Produktions- und Industriegebäude (PIG), Handels- und Einzelhandelsgebäude (HEG), Hotels und Krankenhäuser (HKH) sowie Sportstätten und Schwimmbäder (SSB). Die Unterteilung des Gebäudebestandes in zehn Wohn- und Nichtwohngebäudetypen inkl. Mengengerüst ist in Abbildung 4-1 dokumentiert. Für jeden Typ ist eine Unterteilung in die Baualtersklassen vor 1948, 1948 – 1978, 1979 – 1994, 1995 – 2009 und ab 2010 möglich.

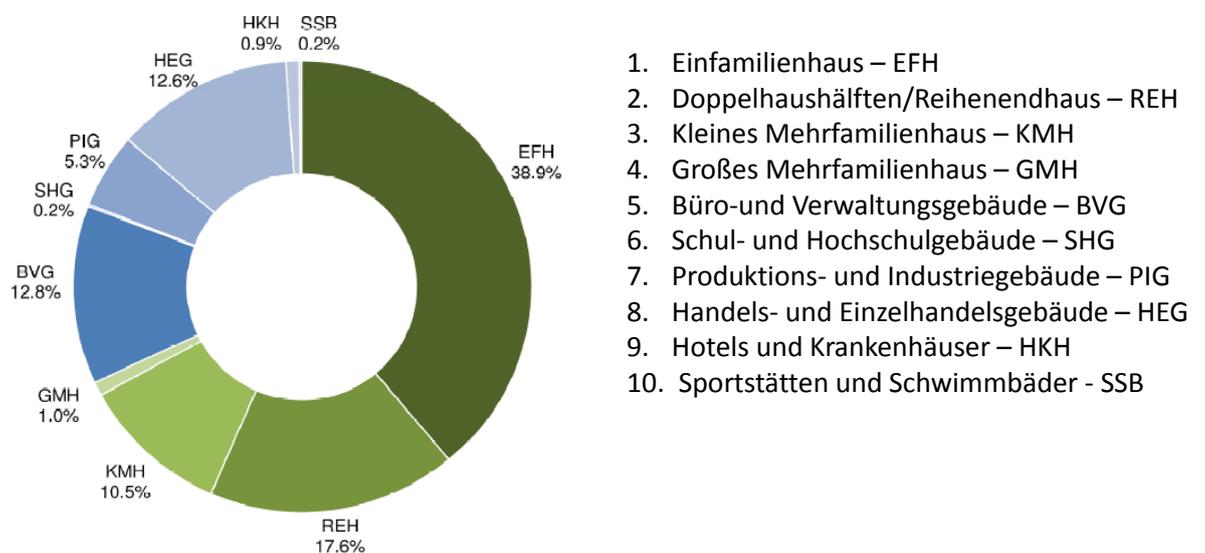


Abbildung 4-1: Aufteilung von Wohn- und Nutzflächen im Gebäudebestand

Die in Abbildung 4-1 dokumentierte Unterteilung des Gebäudebestandes kann in Bezug auf Sanierungsniveaus der Gebäudehülle weiter aufgesplittet werden, siehe Abbildung 4-2 für Wohngebäude und Abbildung 4-3 für Nichtwohngebäude.

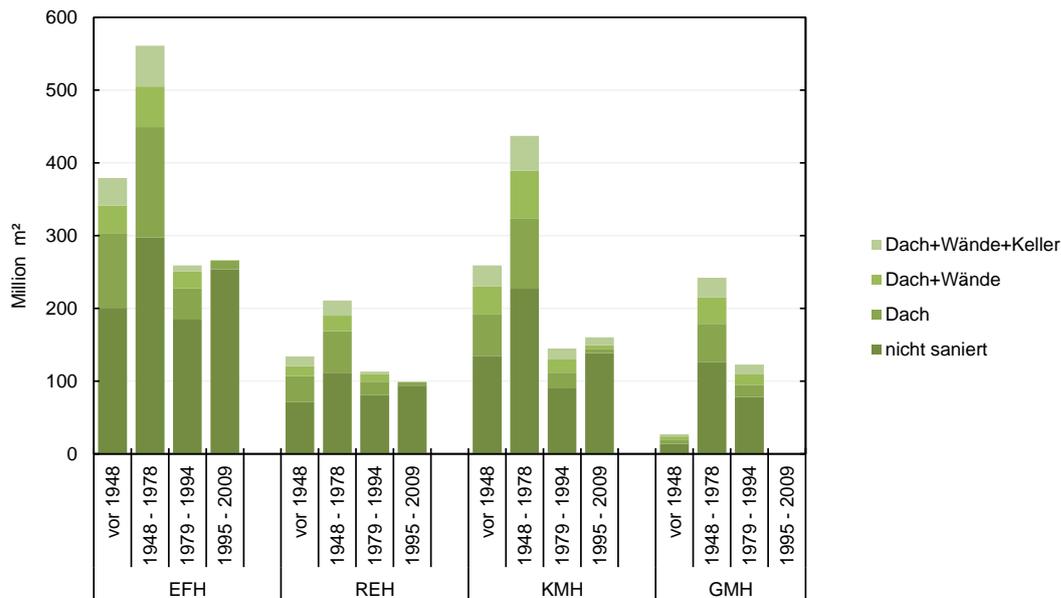


Abbildung 4-2: Flächenverteilung für Wohngebäude nach Sanierungsstand

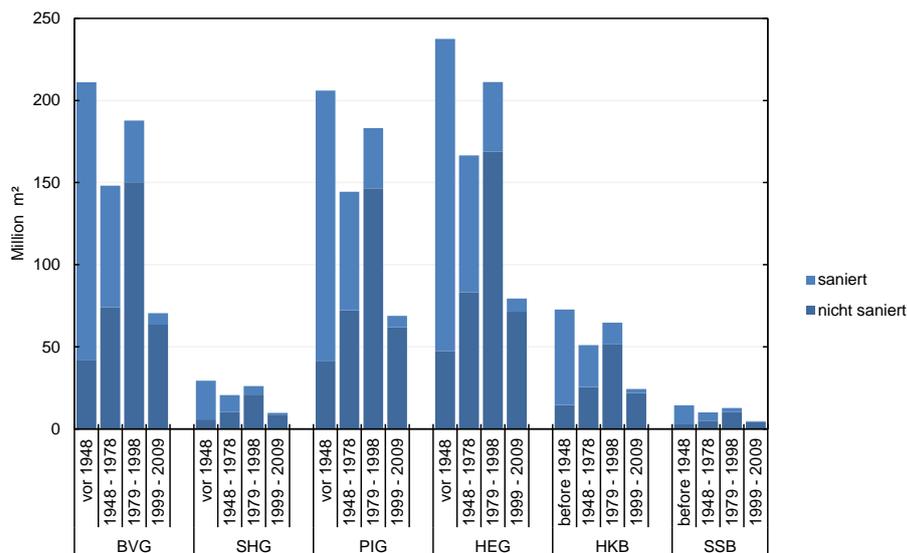


Abbildung 4-3: Flächenverteilung für Nichtwohngebäude nach Sanierungsstand

In der Modellierung wird nahtlos an die Energieverbräuche nach Energiestatistik [BMWi 2012] angeschlossen. Im Wohngebäudebereich sind im Jahr 2012 rund 462 TWh Endenergie für die Raumwärmeerzeugung sowie 103 TWh für die Warmwasserbereitung genutzt worden. Im Nichtwohngebäudebereich sind es 247 TWh für Raumwärme und 28 TWh für Warmwasser.

Weiterhin ist die Energieträgerstruktur für Wohn- und Nichtwohngebäude sowie die Aufteilung auf die jeweiligen Gebäudetypen eine wichtige Information. Der Energieträgermix zur Deckung der Heizwärmebedarfe ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

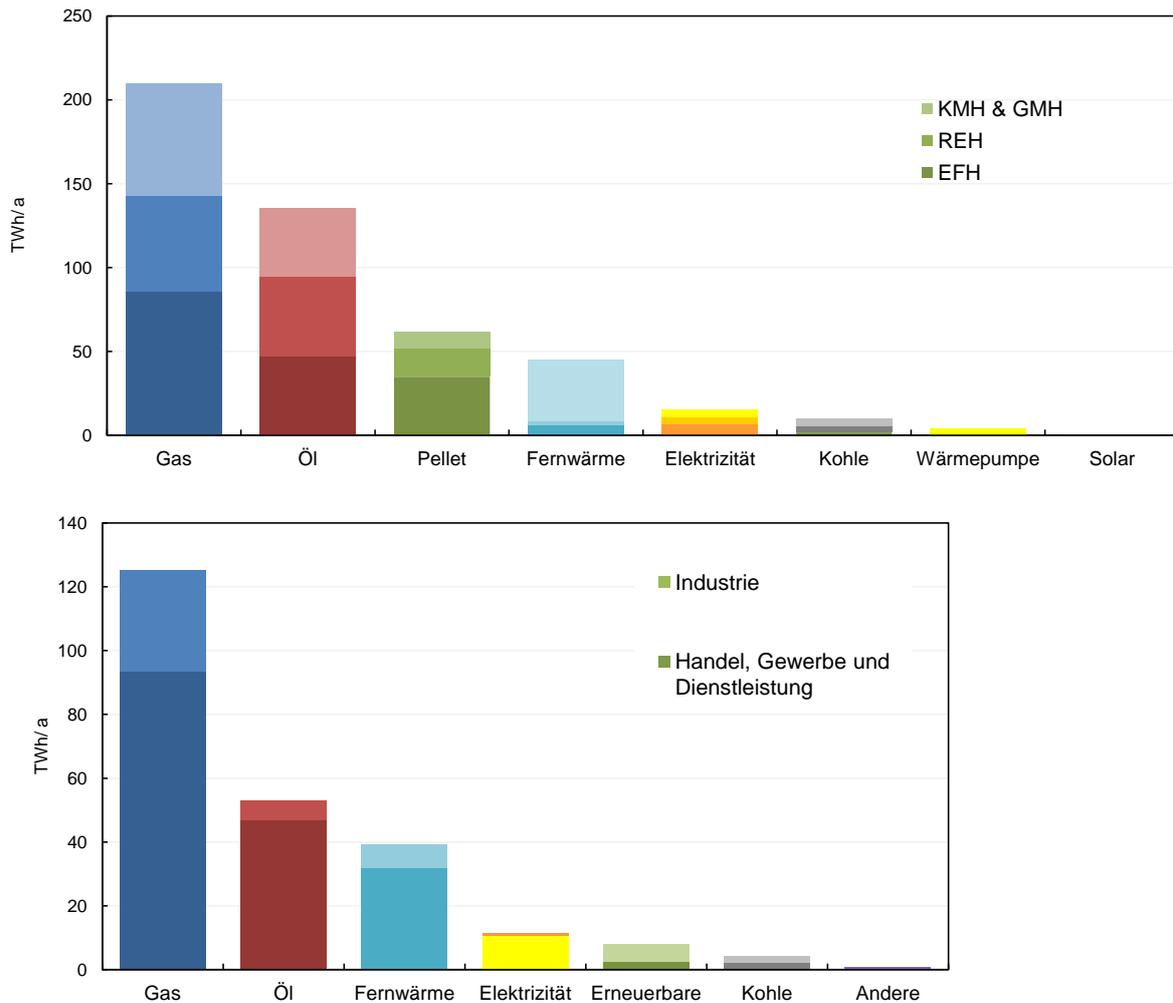


Abbildung 4-4: Endenergie zur Deckung des Heizwärmebedarfs (oben) in Wohngebäuden 2009 (eigene Darstellung nach Daten in Frondel und Ritter 2011), (unten) in Nichtwohngebäuden 2009 (eigene Darstellung nach Daten in Kleeberger et al. 2011)

## 5 Transformationspfade zum klimaneutralen Gebäudebestand

### 5.1 Definition der Transformationspfade

In diesem Vorhaben sind aufbauend auf das Forschungsprojekt [IFEU et al. 2014] eine Referenzentwicklung sowie vier zielführende Transformationspfade zur Erreichung des klimaneutralen Gebäudebestandes im Jahr 2050 erarbeitet worden.

Im Transformationspfad „Trend“ werden gegenwärtige Maßnahmen mit moderaten Fortschritten bei der Effizienz der Gebäudehülle abgebildet, sowohl in Bezug auf die Sanierungsgeschwindigkeit als auch die Sanierungstiefe. EE-Erzeugungstechniken haben moderate Zuwachsraten am jährlichen Austausch. Insgesamt ist das Trendszenario schon als recht ehrgeizig zu bezeichnen. Die Sanierungsraten beispielsweise steigen für Fenster und Dächer auf 2 % und für Außenwände auf 1 %. Es handelt sich beim Trendszenario also nicht um eine direkte Fortschreibung der aktuellen Entwicklung. Vielmehr wird eine Steigerung der Dynamik vorausgesetzt, zu deren Erreichung schon eine Weiterentwicklung des heutigen Instrumentariums notwendig sein würde.

Um die Sanierungstiefe zu quantifizieren, werden drei unterschiedliche Effizienz-Ambitionsgrade definiert, die in unterschiedlichen Anteilen umgesetzt werden. „Effizienz 0“ charakterisiert eine

flache Sanierungstiefe, die in der Praxis aus unterschiedlichen Gründen auftreten wird: Zum einen begrenzen Dämmrestriktionen die mögliche Tiefe der Sanierung, zum anderen kommt es auch zu einer Nichteinhaltung der Bauteilanforderungen der EnEV und zu einer geringeren handwerklichen Qualität der Umsetzung. In der Konsequenz ergeben sich beispielsweise Außenwand-U-Werte in einer Größenordnung von  $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Tabelle 8-17). „Effizienz 1“ ist ein durchschnittlicher Sanierer (mit Außenwand-U-Werten in der Sanierung von  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), während „Effizienz 2“ einen hohen Ambitionsgrad der Sanierung aufweist ( $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) (Tabelle 8-17).

Die *Zielerreichungsszenarien* ergeben sich durch die Kombination von sehr ambitionierten bzw. nur moderateren Maßnahmen an der Gebäudehülle einerseits und einem Schwerpunkt auf der Wärmebereitstellung aus Strom-basierten Systemen (Wärmepumpen) oder anderen erneuerbaren Energieträgern, siehe Tabelle 5-1. Dabei soll die Frage untersucht werden, welcher Transformationspfad unter technischen, ökologischen und ökonomischen Kriterien am meisten Sinn ergibt und welche Vor- und Nachteile hieraus resultieren.

Im Pfad *Effizienz plus EE-Wärme* wird konventionelle Energieeffizienz der Gebäudehülle mit einem hohen Anteil EE-Wärme (Schwerpunkt auf nicht-elektrischen Wärmesystemen) kombiniert. Beispielsweise wird unterstellt, dass der Anteil der Heizungssysteme mit Solarthermie im Jahr 2050 80 % beträgt. Dies ist als eine sehr optimistische Obergrenze zu interpretieren. Zu den genauen Annahmen siehe Tabelle 8-18 ff.

Tabelle 5-1: Übersicht über die wichtigsten Annahmen (Quelle: Annahmen Ecofys, basierend auf Ifeu et al. 2014). Zu den genauen quantitativen Annahmen siehe Tabelle 8-14 ff.

Transformationspfad	Effizienz Gebäudehülle	Sanierungsrate und –qualität	Anteile EE
„Trend“	Weiterentwicklung der heutigen Förderung mit ambitioniert-realistischen Sanierungsraten Vollzugsdefizite	Nach Bauteil unterschieden, moderater Zuwachs auf 20 % Effizienz 0, 50% Effizienz 1, 30% Effizienz 2	Fortschreibung
„Effizienz plus EE-Wärme“	Effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs auf 10% Effizienz 0, 40% Effizienz 1 und 50% Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Biomasse, Solarthermie und Wärmenetze
„Effizienz plus EE-Strom“	Effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs auf 10% Effizienz 0, 40% Effizienz 1 und 50% Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Wärmepumpen
„Hocheffizienz plus EE-Wärme“	Hoch effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs auf 10% Effizienz 0, 15% Effizienz 1 und 75% Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Biomasse, Solarthermie und Wärmenetze
„Hocheffizienz plus EE-Strom“	Hoch effiziente Gebäudehüllen	Nach Bauteil unterschieden, deutlicher Zuwachs auf 10% Effizienz 0, 15% Effizienz 1 und 75% Effizienz 2 bei Sanierungen im Jahr 2050	Schwerpunkt Wärmepumpen

Der Transformationspfad *Effizienz plus EE-Strom* verbindet konventionelle Energieeffizienz der Gebäudehülle mit einem hohen Anteil EE-Strom. Hier wird ein Schwerpunkt auf Wärmepumpen gelegt. Die Annahme ist, dass im Jahr 2050 75 % der Heizkesselinstallationen im Bestand mit Wärmepumpen vollzogen wird.

Der Transformationspfad *„Hocheffizienz plus EE-Wärme“* bzw. *„EE-Strom“* kombiniert analog thermische bzw. elektrische EE-Wärme mit ambitionierter Energieeffizienz. Die jeweiligen Anteile der erneuerbaren Energien können entsprechend reduziert werden, da die Zielerreichung durch eine verbesserte Effizienz erleichtert wird.

## 5.2 Der klimaneutrale Gebäudebestand - Vergleich der Transformationspfade

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Transformationspfade erläutert und verglichen. Hierzu werden zunächst die Treiber der Transformation wie beispielsweise Sanierungsraten und -qualitäten beschrieben und im Anschluss daran die sich daraus ergebende Entwicklung des Gebäudebestandes inklusive energetischer Kennwerte und Parameter sowie der Kostenbetrachtung dokumentiert. Die Energiebedarfe und CO<sub>2</sub>-Emissionen werden vom Basisjahr 2008 an dargestellt, während die Investitions- und Energiekosten für alle Szenarien ab dem Jahr 2014 ausgewiesen werden. Als Ergebnis der fünf Szenariorechnungen ergeben sich vier zielkompatible Zustände, die alle als klimaneutraler Gebäudebestand bezeichnet werden können, aber jeweils eine unterschiedliche Charakteristik aufweisen.

### 5.2.1 Treiber der Transformation

In dieser Studie werden die **Sanierungsraten** im Gebäudebestand komponentenscharf angenommen, d.h. jeweils unterschiedliche Sanierungsraten für Wände, Dächer bzw. oberste Geschossdecken, Fenster und untere Gebäudeabschlüsse. Dieses Vorgehen erlaubt ein detailliertes Anknüpfen an die aktuellen Sanierungsaktivitäten, die z. B. in Untersuchungen des [IWU 2010] dokumentiert sind und sich – je nach Komponente – stark unterscheiden.

Im *Trendszenario* werden die Sanierungsraten für Komponenten der Gebäudehülle gegenüber dem tatsächlichen aktuellen Ist-Zustand im Schnitt leicht angehoben, für Außenwände und Kellerdecken auf 1 % p.a. (von 0,7 % für Außenwände und 0,3 % für Kellerdecken (hohe Zunahme!)) sowie für Fenster und Dächer/OGD auf 2 % p.a. (von 1,4 % für Fenster und 1,5 % für Dächer/OGD). Die Modernisierungsrate der Anlagentechnik bleibt unverändert bei 3 % p.a. Damit stellt das Trendszenario schon eine *merkliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Baupraxis* dar, zu der sicherlich eine Änderung der gegenwärtigen Instrumentierung notwendig ist. Grundlage des Trendszenarios ist eine Entwicklung, die sich bei vollständiger Implementierung aller in der Umsetzung befindlichen sowie aller beschlossenen bzw. vorgeschriebenen Instrumente einstellen würde<sup>12</sup>.

Für die Zielszenarien *„Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“* werden die Sanierungsraten der Gebäudehülle gegenüber dem Trendszenario deutlich erhöht. Für Außenwände und Kellerdecken werden 1,5 % p.a. angesetzt, für Dächer 2,1 % p.a. sowie für Fenster 2,5 % p.a. Die Modernisierungsrate der Anlagentechnik wird auf 4 % erhöht. Eine weitere Steigerung der Sanierungsraten bis zu einem maximal sinnvoll umsetzbaren Niveau finden in den Szenarien *„Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“* statt, hier werden für Außenwände 2 % p.a. angesetzt, für Dächer/ODG und Kellerdecken 2,5 % p.a. sowie für Fenster 3 % p.a.

---

<sup>12</sup> Als Beispiel für solch ein zusätzliches Instrument im Trendszenario ist die steuerliche Abschreibung zu nennen.

In Bezug auf die umgesetzten **Effizienzstandards der Sanierungen** von Gebäudehüllen unterscheiden sich die Szenarien ebenfalls signifikant. Hierbei spiegelt die Klasse „Eff0“ einen Mittelwert aller nicht zu sanierenden Komponenten wieder<sup>13</sup>, während „Eff1“ in Anlehnung an die EnEV 2014 definiert ist und die Klasse „Eff2“ Passivhaus-Komponenten enthält. In der *Trendentwicklung* finden im Jahr 2050 50 % aller Sanierungen in diesem Jahr in der Effizienzklasse 1 statt und 30 % in der Effizienzklasse 2, die restlichen 20 % in Effizienzklasse 0 (die heutige Verteilung der Effizienzklassen an den Sanierungen entwickelt sich dorthin).

Für die Zielszenarien *„Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“* werden deutlich höhere Anteile in den besseren Effizienzklassen angenommen: im Jahr 2050 werden 40 % aller Sanierungen in „Eff1“ und 50 % aller Sanierungen in Eff2 vorgenommen, damit verbleiben lediglich 10 % in „Eff0“. In den *„Hocheffizienzszenerarien plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“* findet eine weitere Verschiebung hin zur höchsten Effizienzkategorie statt (75 % Eff2, 15 % Eff1). Die 10 % in Eff0 verbleiben unverändert.

In Bezug auf die **Modernisierung der Anlagentechnik** bestehen ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen den Transformationspfaden. Neben unterschiedlichen Modernisierungsraten (s.o. unter Sanierungsraten) werden unterschiedliche Schwerpunkte in Bezug auf Energieträger und Systeme im Falle einer Modernisierung gesetzt. So werden beispielsweise im Trendszenario noch bis zum Jahr 2050 hohe Anteile an Gasbrennwertkesseln eingesetzt, während gleichzeitig Biomasse-Heizungen und Wärmepumpen zunehmen. Deutlich anders sieht es in den *Effizienz- bzw. Hocheffizienzszenerarien mit dem Schwerpunkt EE-Wärme* aus: Hier werden bis zum Jahr 2050 nur noch sehr kleine Anteile fossiler Systeme bei der Modernisierung eingesetzt, während ein deutlicher Schwerpunkt bei Wärmenetzen und Biomasse besteht. Im Fall der *Effizienz- bzw. Hocheffizienzszenerarien mit dem Schwerpunkt EE-Strom* sind die Anteile fossiler Systeme bis zum Jahr 2050 ebenfalls sehr klein, während ein Großteil der modernisierten Geräte elektrische Wärmepumpen sind. Detaillierte Annahmen sind im Anhang 8.4 zu finden.

Neben der Sanierung des Gebäudebestands werden außerdem **Neubauten** und der **Abriss** von Bestandsgebäuden in die Bilanzierung mit einbezogen (Tabelle 8-2). Da Neubau und Abriss allerdings in allen Transformationspfaden gleich angesetzt ist, ergeben sich hieraus keine Unterschiede in den Szenarien, aber sehr wohl Effekte, die in allen Pfaden gleich berücksichtigt sind.

Daten zu den aktuellen **Energiepreisen** stammen aus Eurostat, Carmen und ISI, siehe Tabelle 8-10. Hier findet eine Differenzierung zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD und Industrie) statt. Die Annahmen zu zukünftigen Energiepreissteigerungen stammen aus [EC 2012].

Neben den Investitionskosten von Maßnahmen an Gebäudehülle und Anlagentechnik (siehe hierzu Kapitel 8.4) sind in dieser Studie auch zukünftig zu erwartende **Lernkurveneffekte** mit entsprechenden Annahmen berücksichtigt (zu Details siehe ebenfalls Kapitel 8.4). Dies macht insbesondere dann Sinn, wenn große Unterschiede zwischen Szenarien in Bezug auf eingesetzte Menge/Anzahl an z.B. Dämmstoffen und/oder Anlagentechnik bestehen. Somit sind für die Schwerpunkte mit hocheffizienter Gebäudehülle etwas günstigere spezifische Dämmstoffkosten aufgrund größerer Dämmstoffvolumina zu erwarten und bei einem Schwerpunkt auf EE-Strom niedrigere spezifische Kosten für Wärmepumpen. Da jedoch in die tatsächliche Preisbildung von Sanierungskomponenten noch viele andere Einflussfaktoren eingehen, zielt die Annahme von Lernkurveneffekten nicht darauf ab, genaue Preise für zukünftige Sanierungen anzugeben, sondern Tendenzen in Bezug auf Kostendegressionspotentiale zu berücksichtigen.

---

<sup>13</sup> Nach IWU-Zielerreichungsszenario, Tabelle 10 S.36 definiert.

## 5.2.2 Entwicklung des Gebäudebestands

Insgesamt entwickelt sich der Gebäudebestand unter den in dieser Studie getroffenen Annahmen zur Bevölkerungs- und BIP-Entwicklung (siehe Kapitel 8.4) und unter Einbeziehung der neuesten Daten des Zensus 2011 bezüglich der **Wohn-/Nutzflächen** relativ gleichbleibend. Bis zum Jahr 2030 steigen Wohn- und Nutzfläche allerdings, um dann im Verlauf bis 2050 wieder zu sinken. Damit geht insgesamt die Wohnfläche bis zum Jahr 2050 um 2,3 % zurück, während die Nutzfläche in Nichtwohngebäuden um 3,8 % steigt.

Aufgrund der deutlich erhöhten Sanierungsraten für die Gebäudehülle werden bis 2050 nahezu alle Komponenten im Gebäudebestand bei den Zielszenarien „*Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom*“ und „*Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom*“ saniert, während im Pfad „Trend“ noch ein deutlicher Teil des Bestandes bis 2050 nicht saniert wird.

Bezüglich der **Gebäudehülle** ergibt sich in den vier Zielszenarien für 2050 folgendes Bild: In Bezug auf unsanierte Bauteile sind Fenster und unterer Gebäudeabschluss in allen vier Szenarien „durchsaniert“, während es in allen vier Zielszenarien noch Außenwände bzw. obere Gebäudeabschlüsse gibt, die nicht saniert sind – allerdings deutlich weniger als im Trendszenario, wo sich 22 % bzw. 38% der Bauteilflächen in unsaniertem Zustand befinden. Im Effizienzscenario reduzieren sich die Anteile nicht sanierter Bauteilflächen auf rund 17 % bzw. 25%, im Hocheffizienzscenario auf 5%. Das bedeutet, dass weitere Energie- und Emissionseinsparungen im Hocheffizienzscenario fast nur noch durch zusätzliche EE-Anteile möglich sind, während im Effizienzscenario (in dem es ja schon größere absolute EE-Energiemengen gibt) noch Reduktionspotential durch weitere Sanierungen erschlossen werden kann.

Bei der **Bauteilqualität** ergeben sich deutlich größere Unterschiede. In den beiden *Effizienzscenarien* dominiert die mittlere Bauteilqualität Eff1. Der Anteil der ambitionierten Effizienzklasse Eff2 liegt – je nach Komponente – zwischen 20 und 30 % im Jahr 2050. Anders bei den *Hocheffizienzscenarien*: Ausgelöst durch ein entsprechendes politisches Instrumentarium liegt hier der Anteil von Eff2 zwischen 40 % und 60 % im Jahr 2050 (Abbildung 5-1). Ersterer Wert ergibt sich bei der Außenwanddämmung, wo bedingt durch die verschiedenen Dämmrestriktionen, die gemäß [IFEU und Beuth 2012] berücksichtigt wurden, der Anteil der höchsten Effizienzklasse reduziert werden musste. Hierdurch wird deutlich, dass Bauteilqualitäten über lange Zeiträume erreicht/vorgeschrieben werden müssen, um allein durch die Qualität der Bauteile einen nennenswerten Effekt in der Energieeinsparung zu bekommen. Eine solche Entwicklung erfordert eine Weiterentwicklung des Gebäudeinstrumentariums in Richtung einer verstärkten Akzentuierung bester Bauteilqualitäten; instrumentelle Vorschläge werden in AP 3 dieses Projektes unterbreitet und könnten beispielsweise die Definition und verstärkte Kommunikation von Bauteil-Effizienzklassen oder eine verstärkte qualitätsbezogene Förderung von Einzelmaßnahmen im KfW-Programm umfassen, mit einer damit verbundenen Transformation der Sanierungspraxis bei Handwerkern, Planern und Architekten.

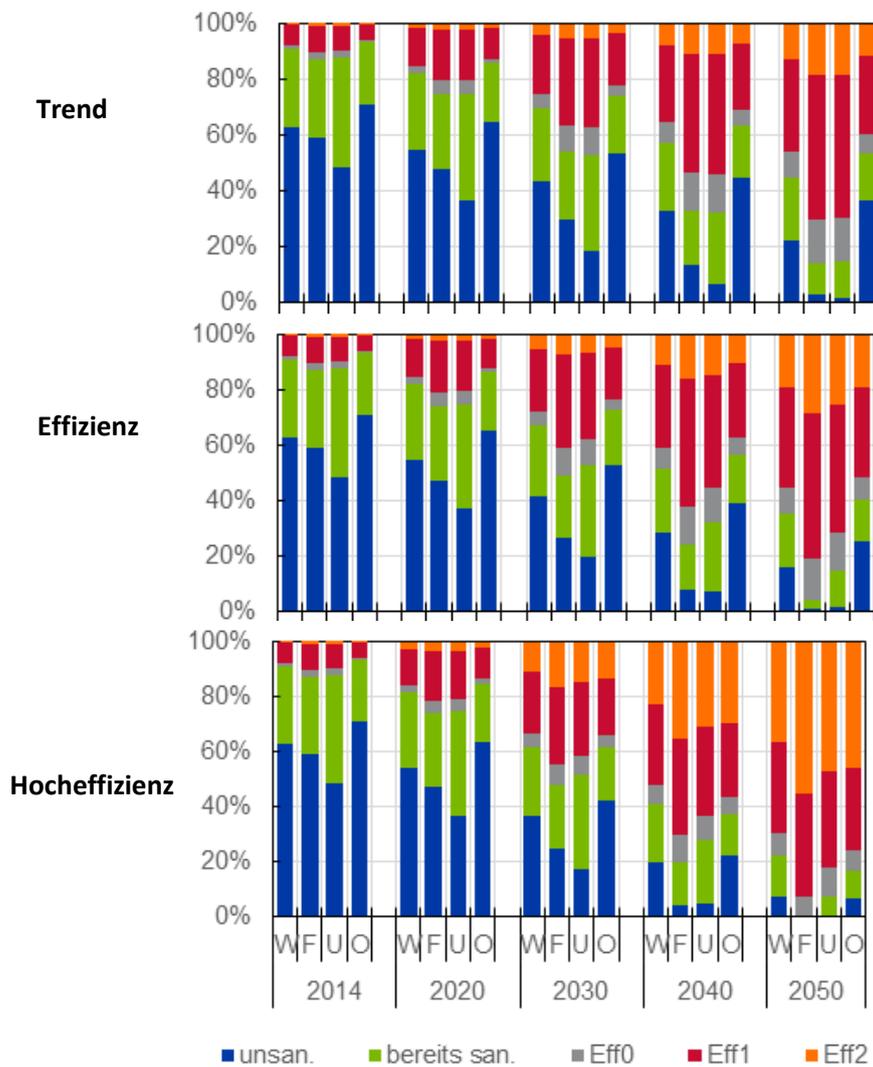


Abbildung 5-1: Effizienzklassen-Verteilung nach Wohn-/Nutzflächen bei Außenwand (W), Fenster (F), oberer (O) und unterer (U) Gebäudeabschluss in den Transformationspfaden „Trend“, „Effizienz“ und „Hocheffizienz“

Detaillierte Zahlen zur Verteilung von Wohn- und Nutzflächen über verschiedene Effizienzklassen sowie die Anteile von Gebäudetypen und Baualtersklassen sind den Ergebnisübersichten in Kapitel 5.2.7 zu entnehmen.

### 5.2.3 Energetische Kennwerte

#### Entwicklung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs

Aus den zu Grunde gelegten Sanierungs-, Neubau- und Abrissaktivitäten ergibt sich der zu deckende **Heizwärme- und Kältebedarf**. Er sinkt in den Zielszenarien „Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“ um 60 % bis 62 % von 2008 bis 2050; in den Pfaden „Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“ sogar um 71 % bis 74 %. Dieser im Hocheffizienz-Szenario erreichbare Heizwärmebedarf ist als Obergrenze zu interpretieren, denn er ergibt sich aus der Kombination von äußerst hoher Sanierungstiefe (hoher Anteil Eff2) und einer hohen Sanierungsrate. Aber selbst in diesem Pfad wird das 2050-Gebäudeziel nicht ohne den weiteren Einsatz von EE-Wärme erreicht. Im Trendpfad wird hingegen wegen geringerer Sanierungsqualität und -geschwindigkeit eine Reduktion von 54 % erzielt, siehe Abbildung 5-2.

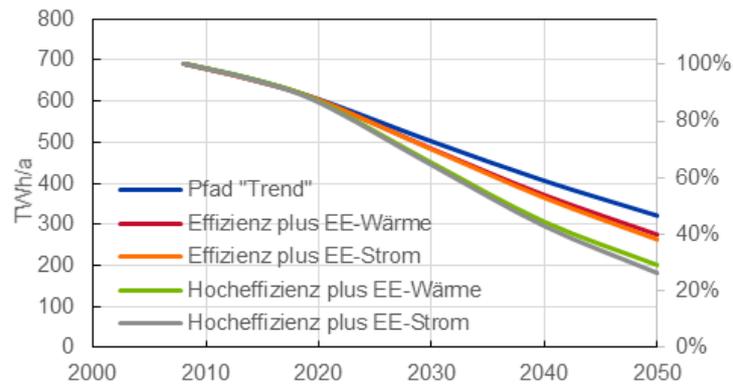


Abbildung 5-2: Netto-Heizwärmebedarf<sup>14</sup> in den verschiedenen Transformationspfaden

Neben den Heizwärmebedarfen werden die **Kühlenergiebedarfe** ebenfalls maßgeblich von der Gebäudehülle bestimmt. Diese steigen in den Zielszenarien von 2008 bis 2050 von 75 TWh/a auf eine Größenordnung zwischen 97 bis 108 TWh/a an. Der Anstieg resultiert vor allem aus dem Effekt, dass die internen Lasten nicht mehr so gut wie vorher über Infiltration und Transmission abgegeben werden können wie im unsanierten Fall. Wird hierbei jedoch das Lüftungsverhalten optimiert (Einführung von optimierter Nachtlüftung etc.), können diese zusätzlichen Energiebedarfe sehr wahrscheinlich kompensiert werden.

Der Heizwärmebedarf bei Neubauten (der in allen Szenarien gleich definiert ist) liegt mit ca. 27 TWh im Jahr 2050 je nach Szenario zwischen 8 % und 13 % des gesamten Heizwärmebedarfs. Hieraus wird ersichtlich, dass die Neubauten zwar zum Gesamtenergiebedarf beitragen, dieser jedoch im Vergleich zum verbleibenden Energiebedarf des Bestandes in 2050 gering ausfällt.

### Endenergiebedarf

Bedingt durch Fortschritte bei der Anlageneffizienz sinkt der Endenergieeinsatz zum Heizen in allen Szenarien stärker als der Heizwärmebedarf. Im Vergleich der Szenarien wird der *Endenergiebedarf zum Heizen* im Szenario „Trend“ bereits um 58 % gemindert, während die Pfade „Effizienz plus EE-Wärme“ 63 %, „Effizienz plus EE-Strom“ 72 %, „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ 73 % und „Hocheffizienz plus EE-Strom“ 79 % erreichen, siehe Abbildung 5-3. Insbesondere die Pfade mit Schwerpunkt „EE-Strom“ erreichen diese hohen Minderungen wegen großer Anteile an Wärmepumpen. In der Endenergie werden hier die verwendeten Brennstoffe (Heizwerte), Strom und Fernwärme berücksichtigt. Solar- und Umweltwärme sind dagegen nicht enthalten.

<sup>14</sup> Der Netto-Heizwärmebedarf ergibt sich aus dem Brutto-Heizwärmebedarf des Gebäudes (Nutz-Heizwärmebedarf plus Wärmeverteilungsverluste der Heizung im Gebäude) nach Abzug der Beiträge der Wärmerückgewinnung und von Erträgen der Solarthermie. Daher ergeben sich für die Versorgungsvarianten EE-Wärme und EE-Strom unterschiedliche Netto-HWB bei gleichem Brutto-HWB.

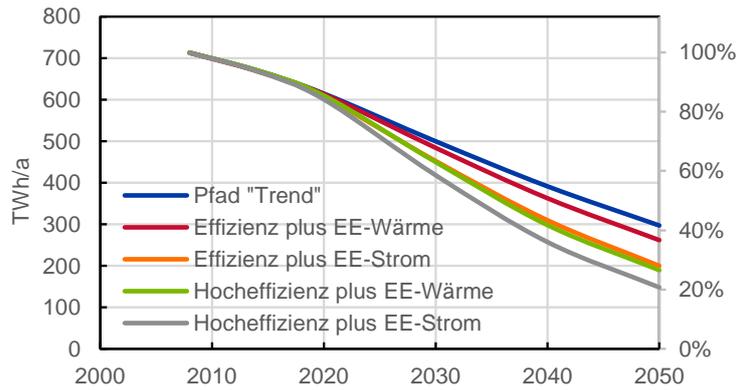


Abbildung 5-3: Endenergie Heizen in den verschiedenen Transformationspfaden

Der *gesamte Endenergiebedarf* inkl. der Anwendungen Warmwasser, Kühlen und Hilfsenergie (ohne Beleuchtung für Nichtwohngebäude) kann im Pfad „Trend“ um 52 % gemindert werden. Für die Pfade „Effizienz plus EE-Wärme“ sind 56 %, „Effizienz plus EE-Strom“ 64 %, „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ 65 % und „Hocheffizienz plus EE-Strom“ 71 % erreichbar (Abbildung 5-4).

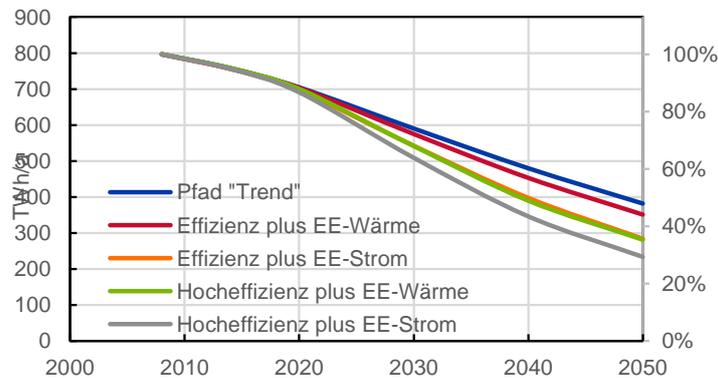


Abbildung 5-4: Endenergie gesamt (Heizen, WW, Kühlen, HE)

Übersetzt man die notwendigen Sanierungsaktivitäten in **Effizienzklassen** der aktuellen KfW-Standards, so müssten in Bezug auf die Gebäudehülle zur Umsetzung der Hocheffizienzpfade durchschnittlich Sanierungen auf den KfW55-Standard durchgeführt werden. Dies geht aus der Verteilung der Komponenten der Gebäudehülle über die Sanierungsstandards hervor. Dies bedeutet jedoch nicht, dass beispielsweise die Standards KfW40 sowie KfW70 und KfW85 nicht mehr gebraucht würden, denn im Mittel wäre etwa der KfW55 Standard zu erreichen. Gebäude, die auf Grund von Dämmrestriktionen dieses Niveau nicht erreichen, müssen durch Gebäude mit höherem Standard kompensiert werden.

**Energieträgereinsatz**

Bezüglich des gebäudebezogenen **Energieträgereinsatzes** zeigen sich naturgemäß deutliche Unterschiede. Das Szenario „Effizienz plus EE-Wärme“ setzt strategisch auf Solarthermie, Biomasse und Wärmenetze, in die wiederum Biomasse, Geothermie und Solarthermie in hohen Anteilen eingespeist werden. Insgesamt steigt der Anteil erneuerbarer Energien inkl. Wärmenetze auf rund 60 % am Wärmebedarf; daran hat Biomasse-Einzelfeuerung einen Anteil an 18 Prozentpunkten und Wärmenetze von rund 25 Prozentpunkten, siehe Abbildung 5-5. Deutliche Unterschiede zwischen Wärmebedarf und Endenergie ergeben sich bei den Wärmepumpen, da in die Endenergie nicht deren ins Haus gelieferte Wärme, sondern nur der um den Faktor der Jahresarbeitszahl kleinere Strombezug eingeht.

Bezüglich des absoluten **Biomasse**-Einsatzes liegt das Szenario mit etwa 85 TWh direkter Biomassenutzung (ohne Wärmenetze<sup>15</sup>) deutlich innerhalb der nachhaltigen Potenzialgrenzen, die in [IFEU et al. 2014] auf knapp 400 TWh/a im Jahr 2050 abgeschätzt wurden. Allerdings fehlt dieses Biomasse-Kontingent für andere Sektoren, insbesondere für den Güter- und Luftverkehr und für industrielle Prozessenergie.

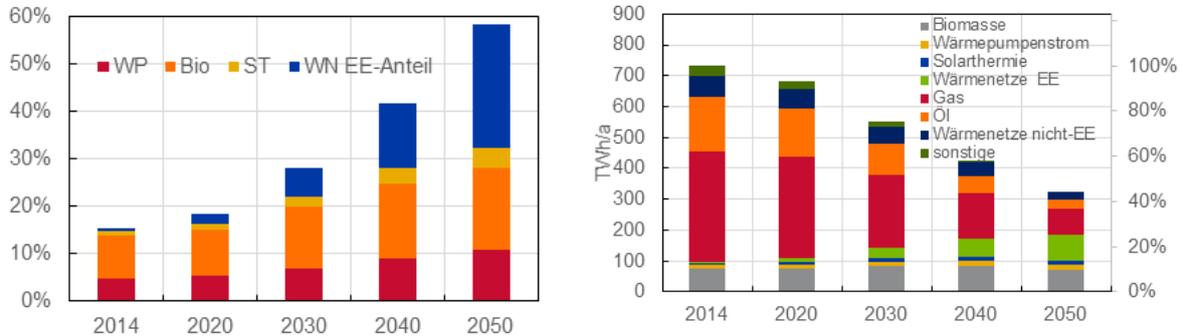


Abbildung 5-5: Anteile EE-Technologien zur Deckung von Wärmebedarfen (links) und Endenergie aus EE und fossilen Brennstoffen (rechts) im Pfad „Effizienz plus EE-Wärme“ (Heizen+WW)

Der Anteil der gebäudegebundenen **Solarthermie** ist im Szenario „Effizienz plus EE-Wärme“ gering und liegt bei rund 4 %. Dies ist der Fall, obwohl der Anteil der installierten Heizungsanlagen mit Solarthermie auf 60 % (2030) bzw. 80 % (2050) ansteigt. Begründet ist dies in dem begrenzten Gesamtenergie-Anteil, der durch Solarthermie bereitgestellt werden kann. Wärmenetzgebundene Versorgung spielt im Szenario eine größere Rolle; sie steigt auf 35 % an. Damit liegt der Beitrag recht nahe an der in [GEF 2014] abgeleiteten Potenzialobergrenze. Dieser Anteil liegt aber immer noch deutlich unter den in der Leitstudie 2012 unterlegten Ausbauzahlen [DLR et al. 2012]. Insgesamt ergibt sich in diesem Szenario, wie auch in den anderen, ein starker Umbau der Wärmeversorgung: Öl- und gasbasierte Wärmeversorgung mit Kesseln sinkt deutlich ab, der Anteil fossiler Wärmeversorgung reduziert sich von 75 % auf rund 30 %. Bedingt durch den Fokus auf thermische (hier verstanden als: nicht strombetriebene) Wärmeversorgung sinkt der Stromverbrauch zum Heizen, Kühlen und Konditionieren bis 2050 leicht von 51 TWh/a auf 47 TWh/a im Jahr 2050 ab.

Eine insgesamt ähnliche prozentuale Wärmeversorgungsstruktur ergibt sich im Szenario „Hocheffizienz plus EE-Wärme“. Darin zeigen sich zwei gegenläufige Tendenzen: Der relative Anteil Erneuerbarer erhöht sich durch den niedrigeren absoluten Wärmebedarf, allerdings ist zur Zielerreichung auch der Einsatz geringerer absoluter Mengen EE-Wärme erforderlich, siehe Abbildung 5-6. Beispielsweise liegt hier der Anteil der Solarthermie bei 6 %. Eine Zielerreichung ergibt sich in diesem Szenario also bereits bei ca. 38 % fossilem Wärmeerzeugungsanteil.

<sup>15</sup> Ein Biomasseanteil in Wärmenetzen von 50 %-75 % wäre denkbar, dies würde dann etwa je nach Szenario 40-60 TWh/a an Biomasse für Wärmenetze bedeuten.

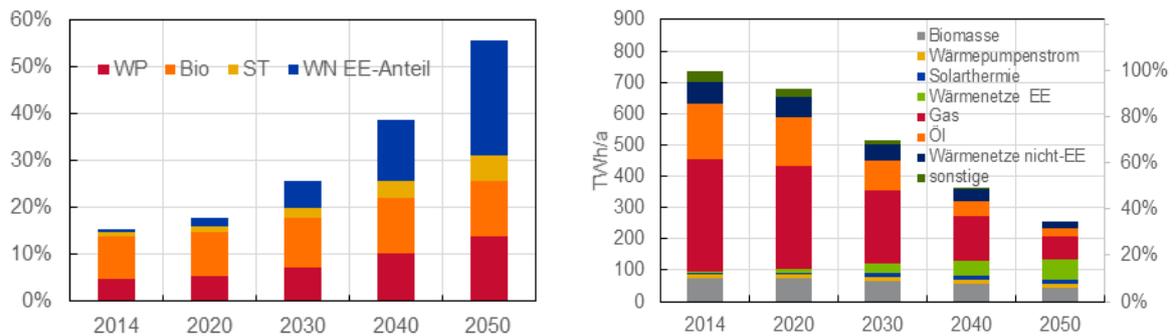


Abbildung 5-6: Anteile EE-Technologien zur Deckung von Wärmebedarfen (links) und Endenergie aus EE und fossilen Brennstoffen (rechts) im Pfad „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ (Heizen+WW)

Eine andere Wärmeversorgungsstruktur ergibt sich im Szenario „Effizienz plus EE-Strom“. Hier liegt der Anteil der stromversorgten Wärmeversorgung endenergetisch gleichauf mit Wärmenetzen, bei der Wärmebedarfsdeckung sind Wärmepumpen jedoch klar vorne. Verursacht wird dies durch einen stark steigenden Ausbau von Wärmepumpen. Mit einem Anteil von 40 % (2030) bzw. 75 % (2050) am jährlichen Austausch werden Wärmepumpen sowohl im Neubau als auch im Bestand die dominierende Heizungstechnologie. Dadurch steigt der Strombedarf in diesem Szenario von 51 TWh/a heute auf 64 TWh/a im Jahr 2040, verharrt dann aber durch die Effizienzgewinne auf diesem Wert. Abbildung 5-7 veranschaulicht die relativen Anteile Erneuerbarer Energien am Wärmebedarf.

Hinter diesem nur geringen Anstieg verbergen sich verschiedene Trends: zum einen ein Rückbau ineffizienter direktelektrischer Heizungssysteme und Austausch gegen effiziente Wärmepumpen sowie strombetriebene Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung; zum anderen der Rückgang des Heizwärmebedarfs.

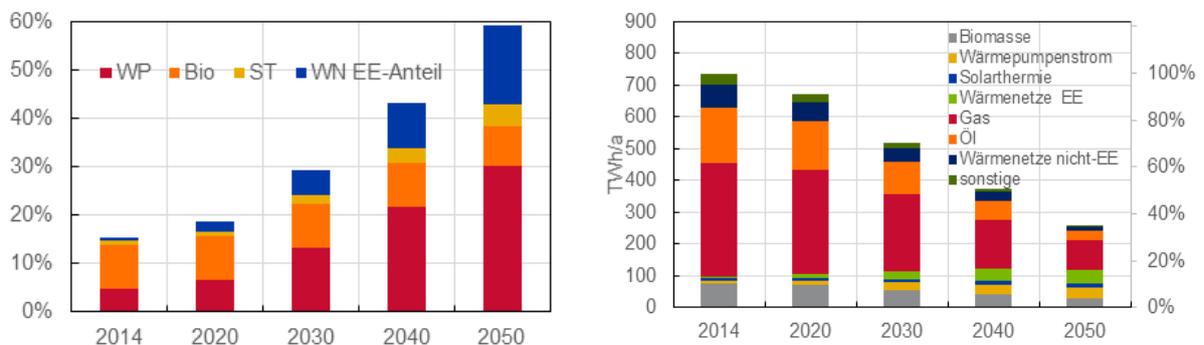


Abbildung 5-7: Anteile EE-Technologien zur Deckung von Wärmebedarfen (links) und Endenergie aus EE und fossilen Brennstoffen (rechts) im Pfad „Effizienz plus EE-Strom“ (Heizen+WW)

Verglichen mit dem gesamten deutschen (Brutto-)Strombedarf von 597 TWh im Jahr 2013 ist der Zuwachs von 13 TWh allerdings gering und entspricht dem jährlichen EE-Stromzubau im Mittel der letzten fünf Jahre. Abgesehen von lokalen Engpässen insbesondere auf Verteilnetzebene ist ein solcher Verbrauchszuwachs, der auch gedämpft wird durch den Austausch direktelektrischer Heizungen durch Wärmepumpen, energiewirtschaftlich als unkritisch einzuschätzen. Allerdings könnte ein solches Szenario durch andere Hemmnisse (siehe hierzu [IFEU et al. 2014], beispielsweise Restriktionen bedingt durch die Bebauungsdichte, Anteile an Flächenheizungen, rechtliche Restriktionen, Geräuschbelastung bei Luft-Wasser-Wärmepumpen etc.) potenziell die Grenzen ausschöpfen; eine raum aufgelöste Analyse wäre erforderlich, um dies noch genauer zu untersuchen. Insgesamt liegt der erneuerbare Energieanteil in diesem Szenario ebenfalls bei knapp 60 %.

Im Szenario „*Hocheffizienz plus EE-Strom*“ reduziert sich der Stromzuwachs bis 2040 um 3 TWh, es werden dann 61 TWh nachgefragt; bis 2050 sinkt der Strombedarf. Bedingt durch den hohen Rückgang des Wärmebedarfs sinkt auch das Potenzial für Wärmenetze, der Anteil liegt dann nur noch bei 20 %, vgl. Abbildung 5-8. Der Solarthermie-Anteil wirkt höher, weil der Endenergieeinsatz wegen des hohen Stromanteils stärker sinkt als in den thermischen Szenarien.

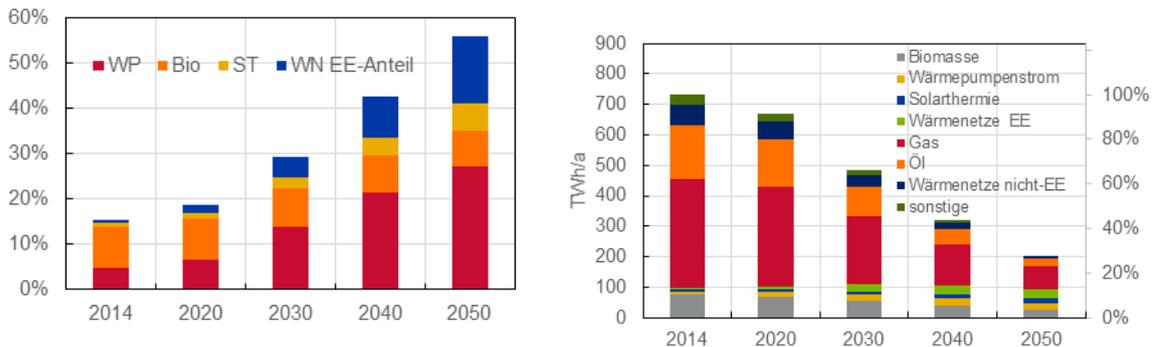


Abbildung 5-8 Anteile: EE-Technologien zur Deckung von Wärmebedarfen (links) und Endenergie aus EE und fossilen Brennstoffen (rechts) im Pfad „*Hocheffizienz plus EE-Strom*“ (Heizen + WW)

In Bezug auf Wärmeerzeugung aus **fossilen Energieträgern** (Gas und Öl) ist festzustellen, dass der Anteil direkt genutzter fossiler Energieträger im Trendszenario um ca. 45 % reduziert werden kann, in den Effizienz- bzw. Hocheffizienzsznarien jedoch um bis zu 70 %, und dies bei ohnehin kleineren Energiebedarfen (d.h. der absolute Energieeinsatz aus fossilen Energieträgern ist noch kleiner). Dies hat einen signifikanten Einfluss auf die Energieimport-Abhängigkeit und die Versorgungssicherheit.

*Primärenergie und Treibhausgase*

Die **nicht-erneuerbare Primärenergie** geht bis 2050 in allen Szenarien signifikant zurück. Die Zielszenarien wurden so kalibriert, dass sie das -80 %-Ziel einhalten; geringfügige Abweichungen ergeben sich durch die modelltechnische Kalibrierung (Abbildung 5-9).

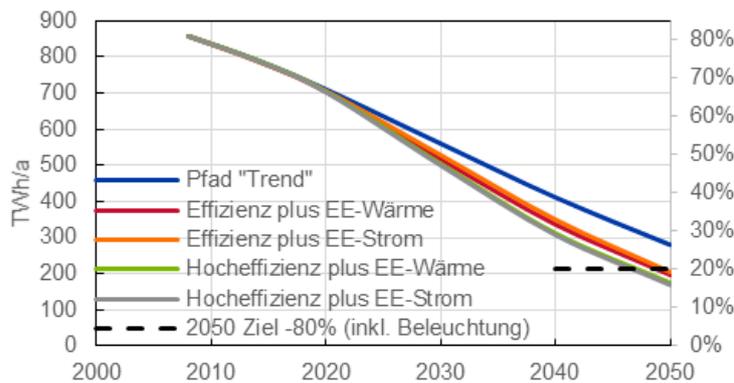


Abbildung 5-9: Primärenergie nicht erneuerbar gesamt (Heizen, WW, Kühlen, HE)<sup>16</sup>

Ein ähnliches Bild ergibt sich in Bezug auf die *CO<sub>2</sub>-Emissionen*. Sie fallen von 208 Gt in 2008 im Pfad „*Trend*“ um 69 % auf 65 Gt in 2050, während die Zielpfade Minderungen in der Größenordnung von 78 % bis 82 % erreichen.

<sup>16</sup> 100 % auf der 2. y-Achse entspricht dem NE-Primärenergieverbrauch 2008 inkl. Beleuchtung (Beleuchtung in diesem Diagramm jedoch nicht enthalten)

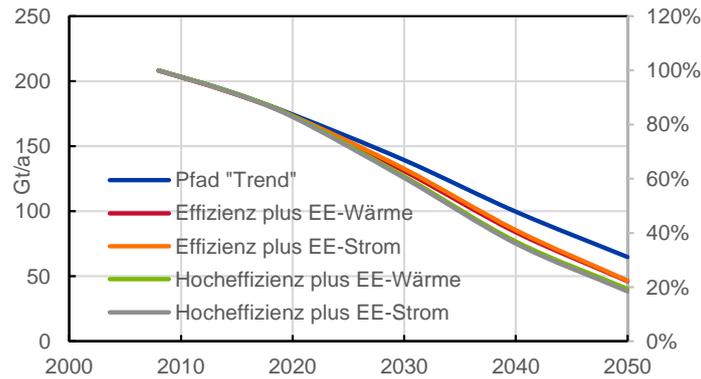


Abbildung 5-10: CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt (Heizen, WW, Kühlen, HE)

### 5.2.4 Kostenbewertungen

Wesentlicher Bestandteil der Untersuchung ist neben der Bilanzierung von energetischen Parametern eine ökonomische Bewertung der Transformationspfade. Zu diesem Zweck werden laufende Energiekosten aller Energieträger für Heizen, Kühlen, Warmwasser und Hilfsstrombedarfe im Gebäudebestand sowie die jährlichen Investitionskosten für Sanierungs- und Neubaumaßnahmen an der Gebäudehülle und Anlagentechnik bilanziert.

Zu beachten ist, dass hier *Vollkosten* der Transformationspfade verglichen werden, und zwar gleichermaßen für energetische Sanierungen und reine Instandhaltungen. Sie setzen sich aus Energiekosten und Investitionskosten zusammen. Dies macht die Kosten der Pfade untereinander auch tatsächlich vergleichbar. Aus den Vollkosten können mit der Annuitätenmethode jährliche Kosten berechnet werden, die zusammen mit den jährlichen Energiekosten die Jahresgesamtkosten darstellen. Die Darstellung der reinen Annuitäten (Jahreskosten der Investitionen) wäre an dieser Stelle verwirrend, da die Annuitäten sich Jahr für Jahr (über die Lebensdauer der Komponenten) kumulieren und somit steigende Gesamtkosten suggerieren, die nicht die Realität abbilden, da vergangene Sanierungen ebenfalls annuitätische Kosten verursachen, die aber modelltechnisch nicht abgebildet werden können.

Die **Energiekosten** (real zum Bezugsjahr 2014) im Pfad „Trend“ erreichen im Jahr 2030 mit ca. 72 Mrd. €/a den Höchststand. In den Pfaden „Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“ sinken die Energiekosten auf ca. 38 Mrd. €/a in 2050 ab, was im Vergleich zum Pfad „Trend“ ca. 23 % geringere Energiekosten bedeutet, siehe Abbildung 5-11.

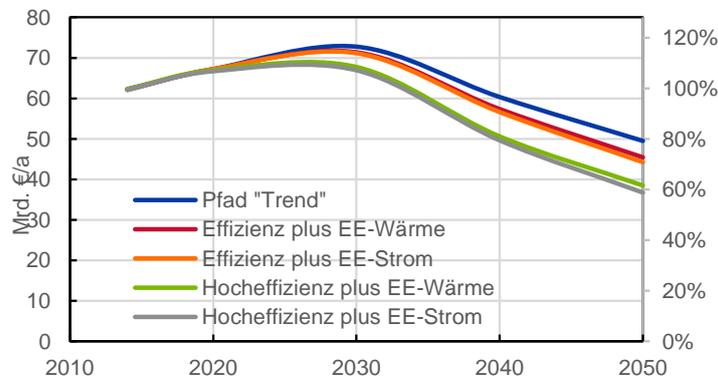


Abbildung 5-11: Energiekosten gesamt (Heizen, WW, Kühlen, HE)

In den Pfaden „Effizienz plus EE-Wärme bzw. Strom“ sinken die Energiekosten aufgrund weniger ambitionierter Sanierungen an der Gebäudehülle auf immerhin ca. 47 Mrd. €/a in 2050 und in den Pfaden „Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. Strom“ auf 38 Mrd. €/a. Eine detailliertere Aufschlüsselung der Energiekosten nach Anwendungen ist in den Szenarienübersichten in Kapitel 5.2.7 zu finden.

Im Gegensatz zu den Energiekosten sind die **Investitionskosten** auf Basis der zu Grunde gelegten detaillierten Kostenfunktionen in den Zielpfaden im Vergleich zum „Trend“-Pfad jedoch deutlich höher, da hier einerseits deutlich höhere Sanierungsraten angenommen sind, und andererseits die Maßnahmen wesentlich ambitionierter ausgestaltet sind. Abbildung 5-12 zeigt die jährlichen Investitionen für den Pfad „Trend“, getrennt für Gebäudehülle, Anlagentechnik und Instandhaltung.

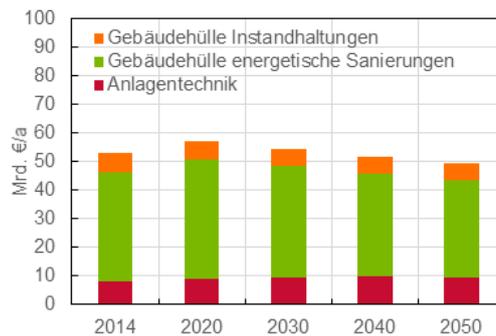


Abbildung 5-12: Jährliche Investitionen für Gebäudehülle, Anlagentechnik und Instandhaltung im Pfad „Trend“

Im Vergleich zu den Investitionsvolumina der Zielpfade (siehe Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-16) ist klar zu erkennen, dass für die Instandhaltungsaufwendungen ohne energetische Verbesserung der Gebäudehülle relativ am meisten im „Trend“-Pfad investiert wird. Im rechten Teil der Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-16 ist jeweils die **Differenz in den Jahresgesamtkosten** des jeweiligen Zielpfades zum „Trend“-Pfad darstellt. Dabei ergeben sich die jeweiligen Jahresgesamtkosten (linker Teil der Abbildung) als Summe von Energiekosten (s.o.) und Annuitäten der Investitionskosten) unter Einbeziehung von Lebensdauer und Zinssatz. Beim Vergleich der Differenzen in den Jahresgesamtkosten fällt auf, dass die Investitionen in Gebäudehülle und Anlagentechnik auf Grund der höheren Sanierungsrate und qualitativ höherwertigeren und dadurch auch teureren Komponenten stets größer sind als im „Trend“-Pfad, die Energiekosten jedoch aufgrund der effizienteren Gebäudehüllen kleiner sind als im „Trend“-Pfad.

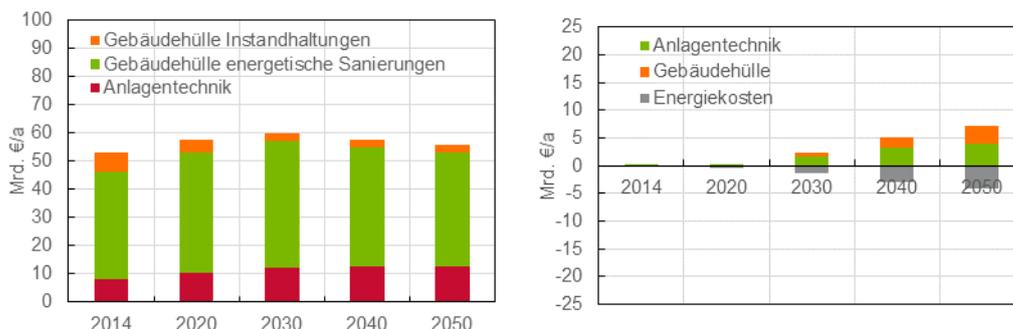


Abbildung 5-13: Jährliche Investitionen für Gebäudehülle, Anlagentechnik und Instandhaltung (links) sowie Differenz zu Jahresgesamtkosten „Trend“ (rechts) im Pfad „Effizienz plus EE-Wärme“ (Kostendifferenz in 2050: 3,1 Mrd. Euro)

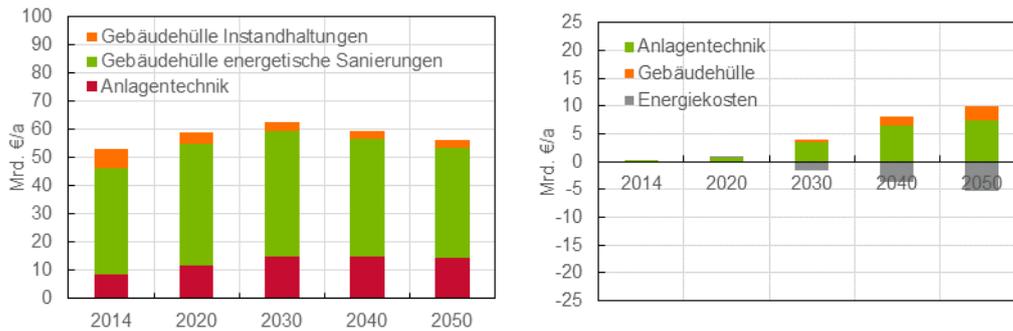


Abbildung 5-14: Jährliche Investitionen für Gebäudehülle, Anlagentechnik und Instandhaltung (links) sowie Differenz zu Jahresgesamtkosten „Trend“ (rechts) im Pfad „Effizienz plus EE-Strom“ (Kostendifferenz in 2050: 4,7 Mrd. Euro)

Außerdem kann festgestellt werden, dass in den Hocheffizienzsznarien die Kosten für Gebäudehülle größere Unterschiede zum „Trend“-Pfad aufweisen als die Effizienzsznarien, aber auch die Einsparungen bei den Energiekosten größer sind. Hieraus lässt sich eine etwas größere Robustheit der Hocheffizienzsznarien folgern, die weniger anfällig für mögliche zusätzliche Energiepreisteigerungen in Zukunft sind, da der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten kleiner ist als in den Effizienzsznarien und dem „Trend“-Pfad. Weiterhin fällt auf, dass Ausgaben für Anlagentechnik in den Szenarien mit Schwerpunkt EE-Strom stets etwas höher sind als im Schwerpunkt EE-Wärme, sich über die Zeit allerdings angleichen. Dies ist mit den zunächst höheren Investitionskosten für Wärmepumpen zu begründen, die jedoch auch sehr effizient arbeiten und dementsprechend wenig Endenergieinput benötigen, und mit den Lernkurveneffekten, die diese Technologie über die Zeit günstiger werden lassen.

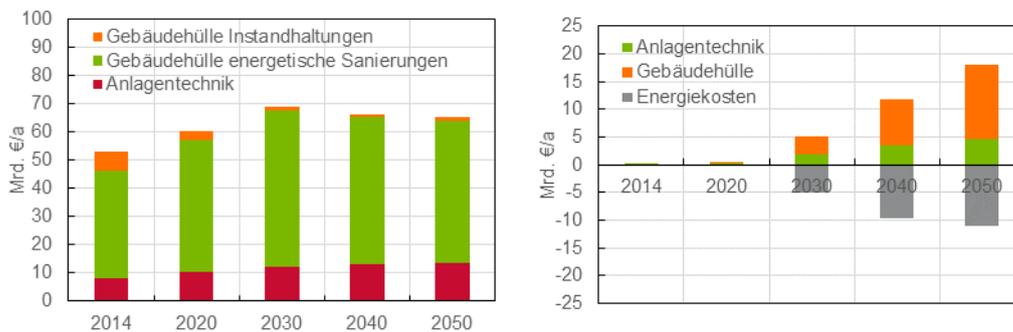


Abbildung 5-15: Jährliche Investitionen für Gebäudehülle, Anlagentechnik und Instandhaltung (links) sowie Differenz zu Jahresgesamtkosten „Trend“ (rechts) im Pfad „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ (Kostendifferenz in 2050: 7,0 Mrd. Euro)

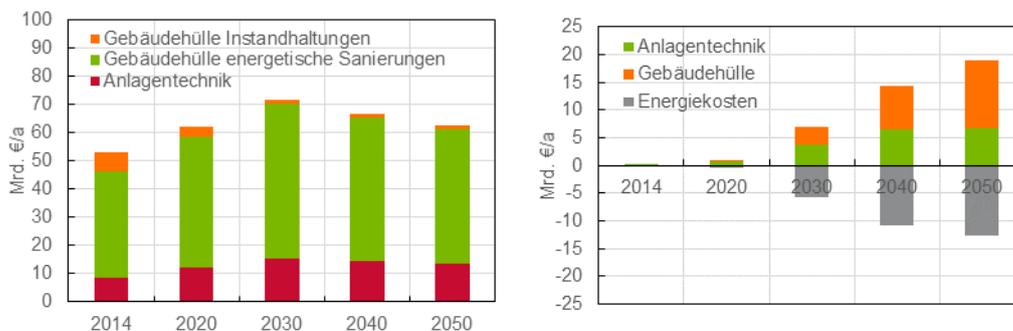


Abbildung 5-16: Jährliche Investitionen für Gebäudehülle, Anlagentechnik und Instandhaltung (links) sowie Differenz zu Jahresgesamtkosten „Trend“ (rechts) im Pfad „Hocheffizienz plus EE-Strom“ (Kostendifferenz in 2050: 6,1 Mrd. Euro)

Die Kosten für die Gebäudehülle beinhalten energetische Sanierungen und Instandhaltungen.

Im **Vergleich der Pfade** ist offensichtlich, dass die Investitionskosten im Szenario „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ in 2050 am höchsten sind und damit um 47 % höher als im Pfad „Trend“ liegen, siehe Abbildung 5-17.

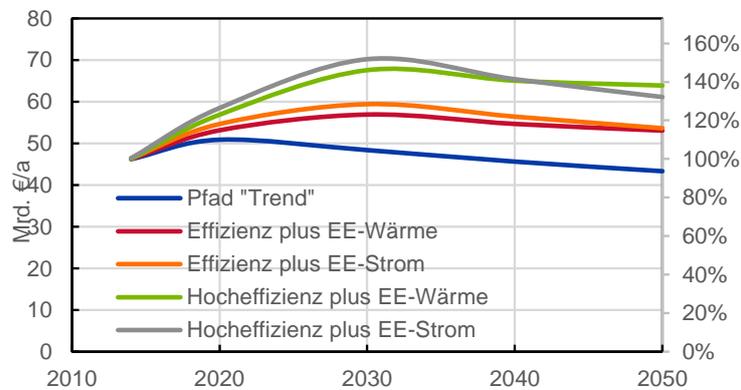


Abbildung 5-17: Investitionen gesamt (Gebäudehülle, Anlagentechnik, Instandhaltung)

Der oben bereits angesprochene Vergleich der Jahresgesamtkosten im Vergleich zum „Trend“-Pfad ist für alle Pfade noch einmal in Abbildung 5-18 dargestellt. Es zeigt sich hierbei, dass sich die Kosten der Pfade nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Im Rahmen der Unsicherheiten der zu Grunde liegenden Kostenfunktionen kann daher **kein „Gesamtkosten-Sieger“** ausgemacht werden. Bereits kleine Unterschiede bei den Annahmen würden zu identischen Kosten führen.

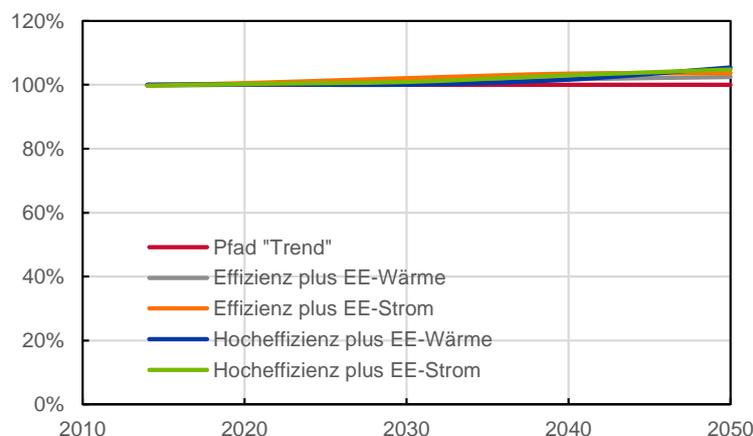


Abbildung 5-18: Jahresgesamtkosten im Vergleich zum Pfad „Trend“<sup>17</sup>

Die Größenordnung der Gesamtkosten der Gebäudesanierung inkl. Neubau von 50 – 70 Mrd. €/a sowie der annuitätischen Mehrkosten (exkl. der eingesparten Energiekosten im Vergleich zum „Trend“-Pfad) in Höhe von 10 – 20 Mrd. €/a ist ähnlich wie in [BMW 2014a] angenommen.

Ein weiterer Vergleich mit der aktuellen Evaluierung des KfW-Programms „Energieeffizient Sanieren“ für das Förderjahr 2013 zeigt, dass mit 6,5 Mrd. €/a an Investitionsvolumina für das KfW-Programm nach [IWU/IFAM 2014] etwa 1/10 der im Mittel notwendigen Sanierungsinvestitionen (inkl.

<sup>17</sup> Da im Zeitraum zwischen 2009 (Basisdaten Gebäudebestand) und 2014 (Startjahr Betrachtung) eine Referenzentwicklung des Gebäudebestandes angenommen ist, starten die Annuitäten und damit auch die Jahresgesamtkosten in 2014 deutlich über den Energiekosten. Auf die Vergleichbarkeit der Szenarien hat dies aber keinen Einfluss.

Instandhaltung) in den Transformationspfaden (Vollkosten) aktuell über das KfW-Programm finanziert werden.

### 5.2.5 Bewertung der Dynamik der Transformationspfade

In Bezug auf den Einsatz von Effizienzmaßnahmen und Erneuerbaren Energien gibt es signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien. Tabelle 5-2 gibt die beispielhafte Absatzentwicklung für Dämmstoffe, Fenster, Lüftungsanlagen, Solarkollektoren und Wärmepumpen in den verschiedenen Szenarien an. Diese Zahlen zeigen eindrücklich, welche deutliche Strategieentscheidung hinter den einzelnen Szenarien steht, beispielsweise ein bis 2050 nahezu vollständig zurückgehender Solarthermiemarkt in den strombasierten Szenarien.

Tabelle 5-2: Beispielhafte Absatzentwicklung

	Status 2013	2050			
		Effizienz plus EE-Wärme	Effizienz plus EE-Strom	Hocheffizienz plus EE-Wärme	Hocheffizienz plus EE-Strom
Dämmstoffe (m <sup>3</sup> /a)	ca. 22 Mio.	ca. 24 Mio.	ca. 24 Mio.	ca. 63 Mio.	ca. 63 Mio.
Fenster (m <sup>2</sup> /a)	ca. 20 Mio.	ca. 22 Mio.	ca. 22 Mio.	ca. 33 Mio.	ca. 33 Mio.
Lüftungsanlagen (Stk/a)		ca. 60 Tsd.	ca. 60 Tsd.	ca. 260 Tsd.	ca. 260 Tsd.
Sonnenkollektoren (m <sup>2</sup> /a)	ca. 1,2 Mio.	ca. 2,5 Mio.	ca. 0,2 Mio.	ca. 2,5 Mio.	ca. 0,2 Mio.
Wärmepumpen (Stk./a)	ca. 80 Tsd.	ca. 170 Tsd.	ca. 415 Tsd.	ca. 170 Tsd.	ca. 415 Tsd.

### 5.2.6 Zusammenfassung des Szenariovergleichs

Zusammenfassend ist zunächst festzuhalten, dass sich die vier Zielpfade trotz ähnlicher Gesamtkosten recht deutlich in ihrer jeweiligen Strategie unterscheiden, bis zum Jahr 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Sowohl die Hocheffizienzpfade mit moderaten Mengen an erneuerbaren Energien als auch die Pfade mit mittlerer Effizienz, aber großen Mengen an erneuerbaren Energien können als Zielerreichungsszenarien entwickelt werden. Mit der Definition dieser jeweils beim Wärmeschutz bzw. bei der regenerativen Wärmeversorgung sehr weitgehenden Pfade werden gleichzeitig die Leitplanken für einen möglichen Entwicklungskorridor angedeutet, innerhalb dessen sich der nahezu klimaneutrale Gebäudebestand unter den hier getroffenen Annahmen und Randbedingungen realisieren lässt. Dass die Ziele am Ende auch mit noch ehrgeizigeren Pfaden in Bezug auf die Reduzierung des Wärmeverbrauchs oder die erneuerbare Wärmeversorgung erreicht werden könnten, ist allerdings nicht auszuschließen.

In Anlehnung an eine Darstellung in [BMWi 2014a], allerdings bezüglich der Darstellungsform abgeändert, beschreibt Abbildung 5-19 die „Leitplanken“ der Entwicklungskorridore detaillierter. Die Darstellung zeigt die Reduktion des Primärenergiefaktors  $f_p$  versus der Reduktion des Endenergiebedarfs. In dieser Logik können die Transformationspfade exakt verortet werden.

Sämtliche Zielzustände des Gebäudebestands, die oberhalb der Zielerfüllungslinie liegen, sind zielkompatibel, alle darunter nicht.

Wie zu erwarten war, führen die Effizienzpfade zu einer geringeren Reduktion der gesamten Endenergie als die Hocheffizienzpfade. Entsprechend führen die Pfade mit Schwerpunkt auf EE-Strom aufgrund der hohen Anteile an Wärmepumpen bei gleicher Effizienz der Gebäudehülle zu höheren Endenergie-Einsparungen als die Pfade mit Schwerpunkt auf EE-Wärme (x-Achse).

Auf der y-Achse ist erkennbar, dass die Szenarien mit dem Schwerpunkt EE-Strom jeweils zu einer niedrigeren  $f_p$ -Einsparung führen als die mit dem Schwerpunkt EE-Wärme, da der Primärenergiefaktor von Strom insgesamt trotz seines starken Absinkens höher bleibt als der Primärenergiefaktor der in den EE-Wärme-Szenarien eingesetzten Energieträger.

Die Dichte der Jahrzehnt-Punkte dokumentiert zugleich die Geschwindigkeit des Transformationsprozesses.

Ob das Endziel des nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes erreicht wird, hängt aber auch davon ab, inwieweit die in den ersten Jahrzehnten erzielten Fortschritte fortgesetzt werden können und nicht beispielsweise durch „flache Sanierungen“ (*shallow renovation*) wirtschaftlich erschwert wurden. Daher dokumentieren weitere Diagramme die Entwicklungskorridore: den Anteil an EE-Wärme und Wärmenetzen, den Anteil von Effizienzverbesserung von Anlagentechnik sowie Gebäudehülle und den Beitrag von Sanierungsrate und -tiefe über die Zeit.<sup>18</sup>

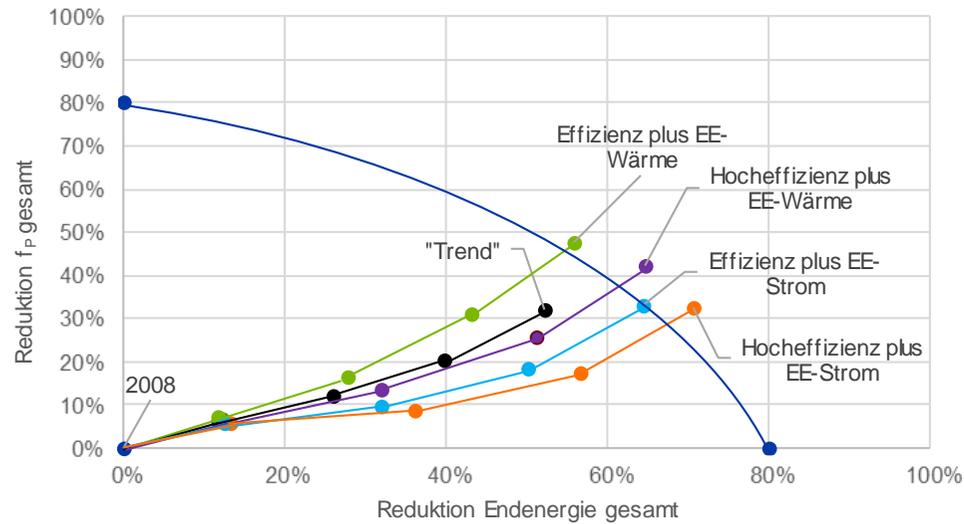
Dieses „Monitoring“ von Hauptparametern ( $f_p$  und Energiebedarfsreduktion) sowie wichtiger Nebenbedingungen kann eingesetzt werden, um im Zweitverlauf mögliche Zielabweichungen möglichst frühzeitig zu erkennen.

---

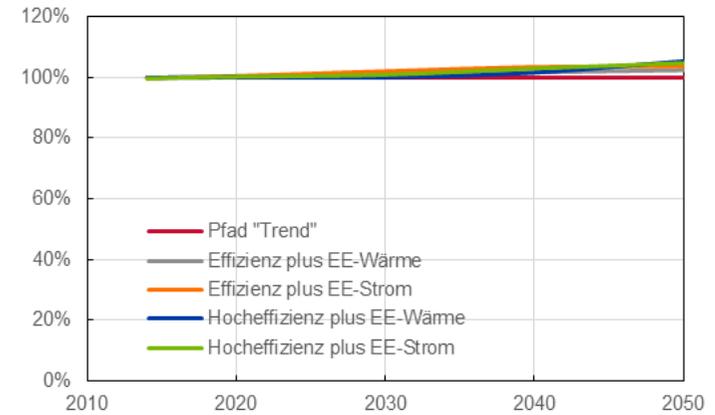
<sup>18</sup> Der Anteil erneuerbarer Energien ist definiert als (Umweltwärme bei Wärmepumpen, Beitrag Solarthermie und Endenergie Biomasse + Anteil Wärmenetze)/ (gesamter Endenergiebedarf). Die Anlageneffizienz ist definiert als Nutzwärmebedarf bezogen auf die Endenergie. Der Anteil der hocheffizient sanierten Gebäudeflächen ist definiert als Flächenanteil der auf Eff2-Niveau sanierten Komponenten.



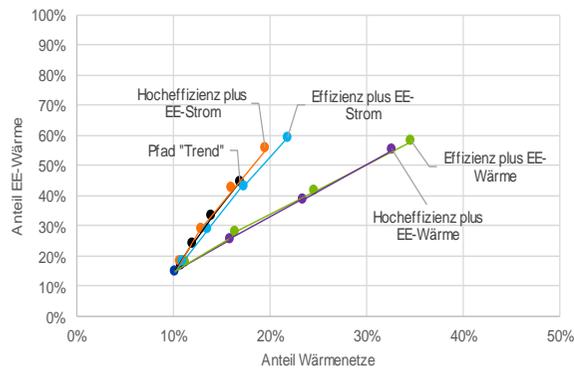
**Gesamtstrategie**



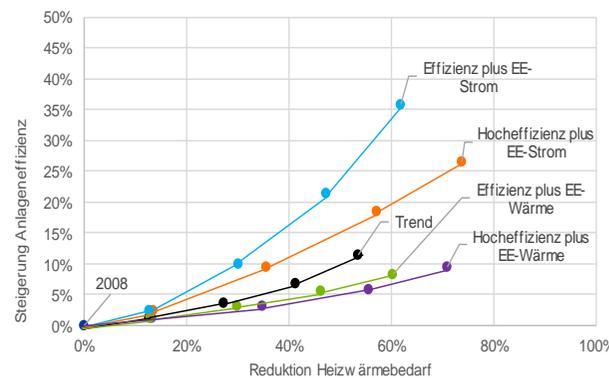
**Kosten**



**Erneuerbare inkl. Wärmenetze**



**Gebäudehülle und Anlageneffizienz**



**Sanierungsrate und -tiefe**

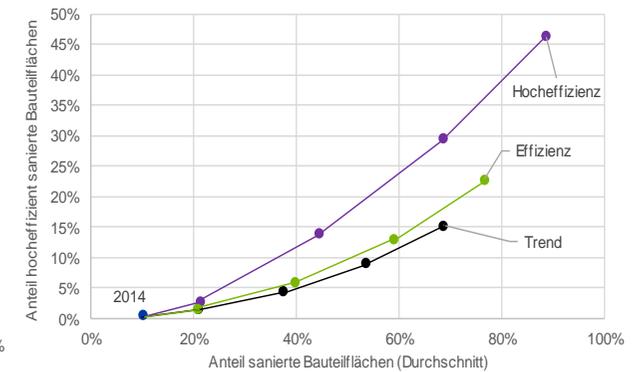


Abbildung 5-19: Gesamtstrategiebild Transformationspfade. Die Punkte in den Grafiken beschreiben jeweils den Zustand in der nächsten erreichten Dekade (Bsp. 2014, 2020, 2030, 2040, 2050).

### 5.2.7 Übersicht der Berechnungsergebnisse

Die nachfolgenden Übersichten stellen die Ergebnisse der *Transformationspfade* noch einmal in Form eines „Gebäudecockpits“ dar. Die folgenden grafischen Übersichten erlauben dem Leser, alle relevanten Aspekte der verschiedenen Pfade direkt miteinander zu vergleichen, indem die Übersichten nebeneinander gelegt werden. In einer weitergehenden vergleichenden Bewertung der Szenarien spielen vor allem Zielerreichung, Wahrscheinlichkeit, Unsicherheiten, Kosten und Implikationen für Einzelgebäude eine Rolle.

Die Übersichten sind spaltenweise in die Kategorien *Treiber* (Spalte 1, 5 Grafiken), *Gebäude* (Spalte 2, 4 Grafiken), *Energie* (Spalten 3 und 4, je 5 Grafiken) sowie *Kosten* (Spalte 5, 2 Grafiken für Trend- und 3 Grafiken für Zielszenarien) gegliedert. In den Zielszenarien gibt es gegenüber „Trend“ eine zusätzliche Grafik, die jeweils die Differenzkosten zum Trendszenario darstellt.

Details zu den hinterlegten Annahmen sind ausführlich im Anhang dokumentiert. Im Einzelnen werden für die untersuchten Pfade folgende Aspekte dargestellt:

- **Treiber**
  - Sanierungsraten
  - Energiepreise Haushalte
  - Energiepreise GHD und Industrie
  - Lernraten (Senkung der spezifischen Kosten) für Wärmepumpen, Lüftungsanlagen, Fenster, Dämmung und Solarthermie.
  - Anteile verschiedener Heizungssysteme am jährlichen Austausch
- **Gebäude**
  - Sanierungsniveaus: zeigt die Verteilung der erreichten Effizienzstandards in den Stichjahren 2014, 2020, 2030, 2040 und 2050 im jeweiligen Szenario für die Bauteile Außenwand, Fenster, oberer und unterer Gebäudeabschluss
  - Bestandsentwicklung Gebäudetypen: kumulierte Wohn-/Nutzfläche der vier hier unterschiedenen Wohngebäude- und sechs Nichtwohngebäudetypen
  - Kumulierte m<sup>2</sup>-Anteile der verschiedenen Baualtersklassen am Gesamtbestand
  - Wohn-/Nutzfläche: Entwicklung der Wohnfläche (basierend auf Zensus 2011), getrennt nach Wohnfläche (Wohngebäude) sowie gesamter Wohn-/Nutzfläche (Wohn- und Nichtwohngebäude)
- **Energie**
  - Wärme- und Kältebedarfe (Nutzenergie): getrennte Darstellung für Heizen, Heizen und Warmwasser, Heizen, Warmwasser und Kühlen<sup>19</sup>
  - Endenergie Heizen, Warmwasser (WW), Kühlen, Hilfsenergie (HE) insgesamt für Wohn- und Nichtwohngebäude
  - Endenergie Erneuerbare (Erläuterung s. Kapitel 3.2; Bio: Biomasse, WP: Wärmepumpe, ST: Solarthermie, WN: Wärmenetze)
  - Anteile erneuerbarer Energien, Wärme (Erläuterung s. Kapitel 3.2): Anteil erneuerbarer Energien an der Endenergie für Wärme
  - Verteilung Heizungssysteme: dargestellt ist der Anteil an allen Heizungsanlagen im jeweiligen Stichjahr (BW: Brennwertkessel, NT: Niedertemperaturkessel) an der gesamten Heizwärmebereitstellung

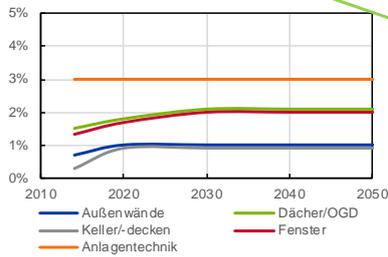
<sup>19</sup> Die hier dargestellten Netto-Wärmebedarfe sind definiert als Brutto-Wärmebedarfe (Wärmebedarfe der Gebäudehülle abzüglich Wärmerückgewinnung bzw. Warmwasserbedarfe) abzüglich der Erträge der Solarthermie.

- Stromverbrauch gesamt für Heizen, untergliedert in Strom für Wärmepumpen, elektrische Direktheizung, Kühlen und Hilfsenergie
- Anteil Wärmenetze, Solarthermie und Strom: für Strom und Wärmenetze am Endenergiebedarf für Heizen und Warmwasser, für Solarthermie am Nutzenergiebedarf für Heizen und Warmwasser
- Anteil direkte fossile Energieträger: Vor-Ort-Anteile der Energieträger Gas, Öl und Kohle am Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser
- Primärenergie nicht erneuerbar: berechnete Primärenergiebedarfe unterteilt nach Heizen, Heizen und Warmwasser, Heizen, Warmwasser und Kühlen sowie Heizen, Warmwasser, Kühlen und Hilfsenergie
- CO<sub>2</sub>-Emissionen: berechnete CO<sub>2</sub>-Emissionen unterteilt nach Heizen, Heizen und Warmwasser, Heizen, Warmwasser und Kühlen sowie Heizen, Warmwasser, Kühlen und Hilfsenergie
- Kosten
  - Jährliche Investitionen für energetische Sanierung der Gebäudehüllen, Instandhaltungsanteile sowie Erneuerung von Anlagentechnik
  - Differenz der Jahresgesamtkosten des jeweiligen Zielszenarios zum Trendszenario Die Jahresgesamtkosten ergeben sich als ab 2014 kumulierte Annuitäten der Investitionen in die Gebäudehülle und Anlagentechnik (Mehraufwand) sowie der jährlichen Energiekosten (Minderaufwand)
  - Energiekosten, jährlich, unterteilt nach Heizung (h), Warmwasser (dhw), Kühlung (c) und Hilfsenergie (aux).

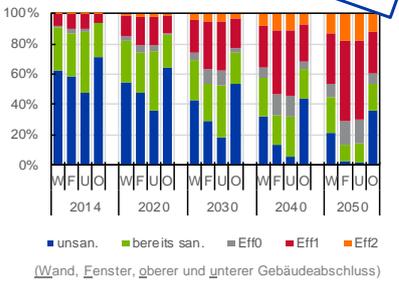
# Strategiebild "Trend"

BMW Projekt "Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich" 28. November 2014

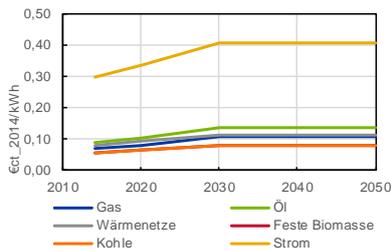
## Sanierungsraten



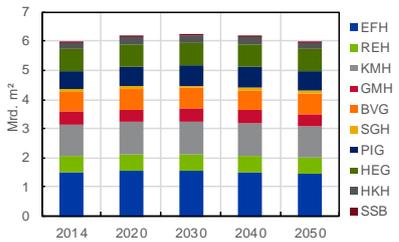
## Sanierungsniveaus (NB+San)



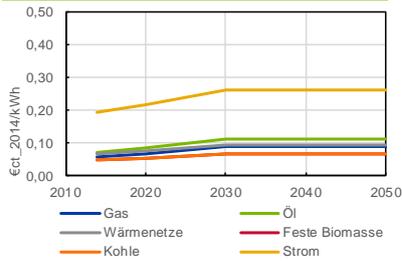
## Energiepreise Haushalte



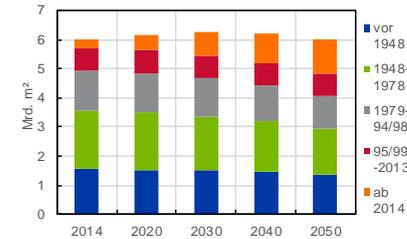
## Bestandsentwicklung Gebäudetypen



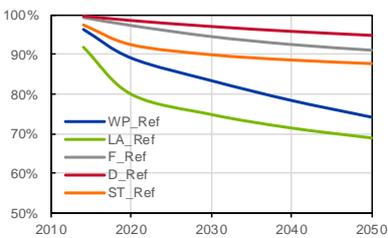
## Energiepreise GHD u. Industrie



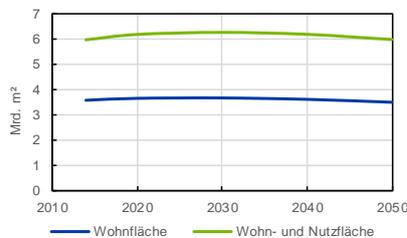
## Bestandsentwicklung Altersgruppen



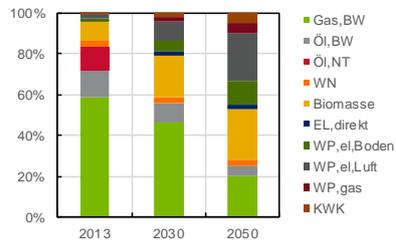
## Lernkurveneffekte (Lernraten)



## Wohn-/ Nutzflächen



## Anteile Heizungssysteme am jährlichen Austausch

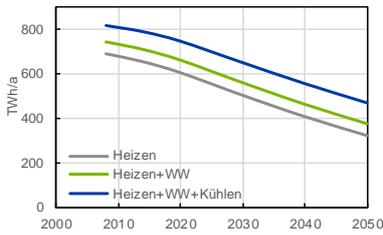


Anmerkungen: Betrachtungsrahmen [...], Anwendungen [...], CO2- und PE-Faktoren [...] etc.

<sup>1</sup> Differenz der Jahresgesamtkosten auf Vollkosten-Basis und im Vergleich zum Trendszenario; <sup>2</sup> Anteile für Strom und Wärmenetze auf

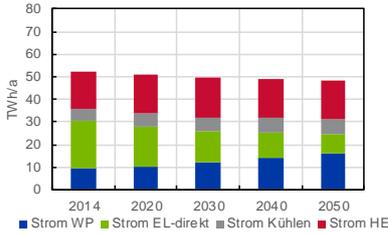


Wärme- und Kältebedarfe<sup>3</sup>

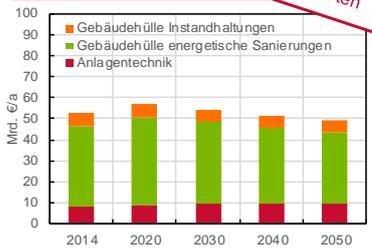


Energie

Stromverbrauch gesamt

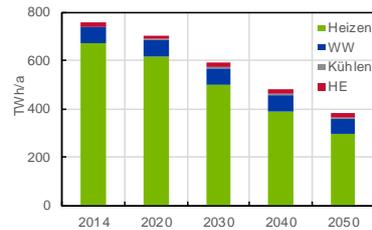


Jährliche Investitionen

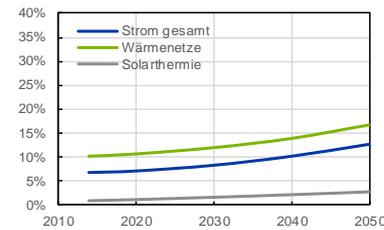


Kosten

Endenergie Heizen, WW, Kühlen, HE (WG+NWG)

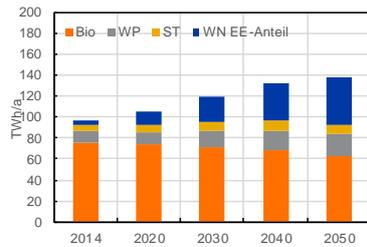


Anteil Wärmenetze, Solarthermie und Strom<sup>2</sup>

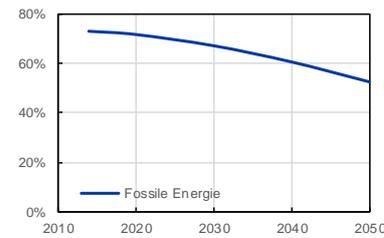


keine Differenzkosten darstellbar

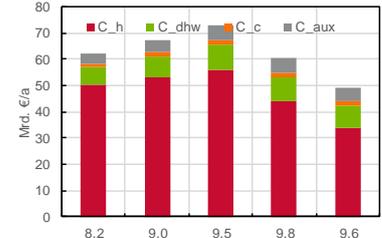
Endenergie Erneuerbare (Q<sub>f</sub>-Bezug)



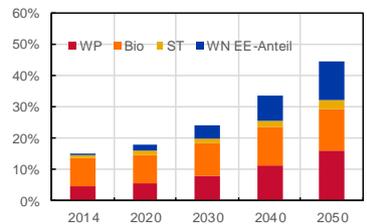
Anteil direkte fossile Energieträger (Gas, Öl, Kohle)



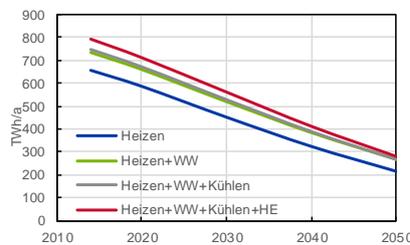
Energiekosten



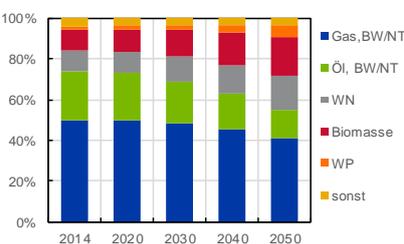
Anteile Erneuerbarer Energien Wärme (Q<sub>d</sub>-Bezug)



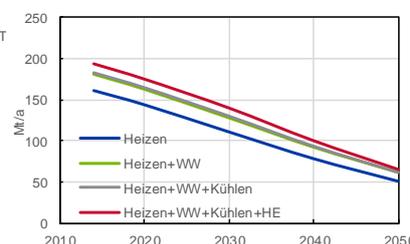
Primärenergie nicht erneuerbar



Verteilung Heizungssysteme (Q<sub>f</sub>-Bezug)



CO<sub>2</sub>-Emissionen

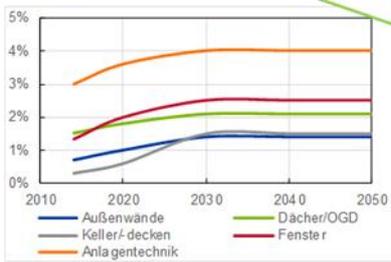


Basis der Endenergie Heizen+WW und für Solarthermie auf Basis der Nutzenergie Heizen+WW; <sup>3</sup> Kältebedarfe in Wohngebäuden werden in 2014 zu 2% gedeckt, in 2050 zu 10% und in Nichtwohngebäuden zu 100%.

# Strategiebild "Effizienz plus EE-Wärme"

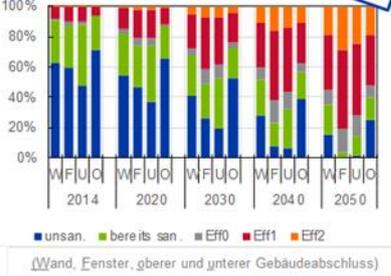
BMW Projekt "Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich" 28. November 2014

## Sanierungsraten



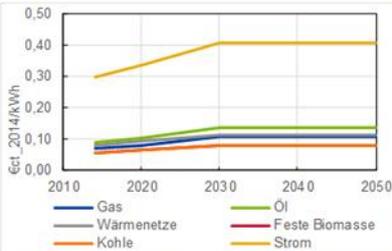
Treiber

## Sanierungsniveaus (NB+San)

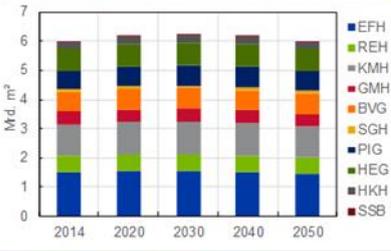


Gebäude

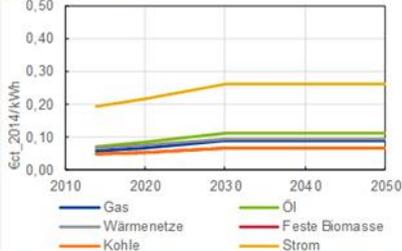
## Energiepreise Haushalte



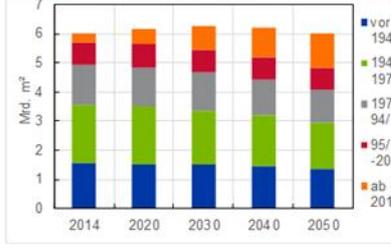
## Bestandsentwicklung Gebäudetypen



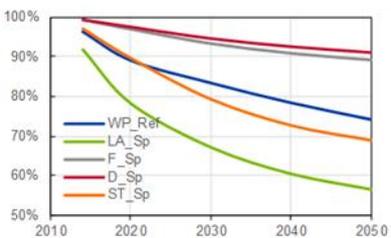
## Energiepreise GHD u. Industrie



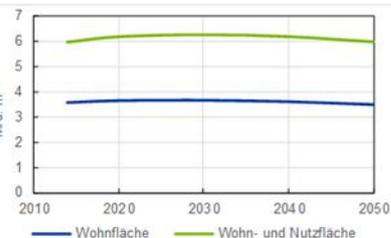
## Bestandsentwicklung Altersgruppen



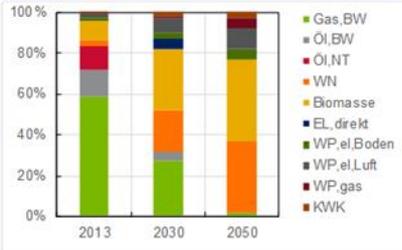
## Lernkurveneffekte (Lernraten)



## Wohn-/ Nutzflächen

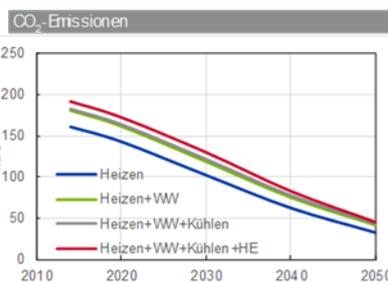
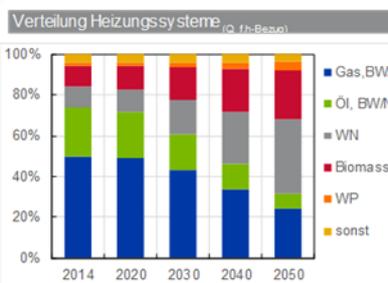
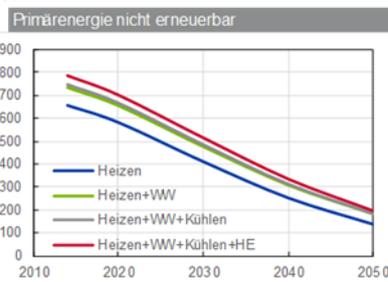
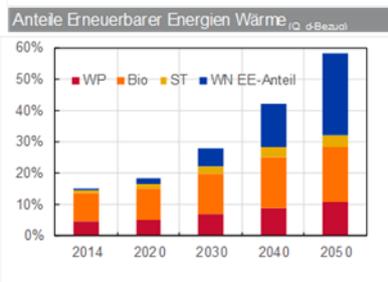
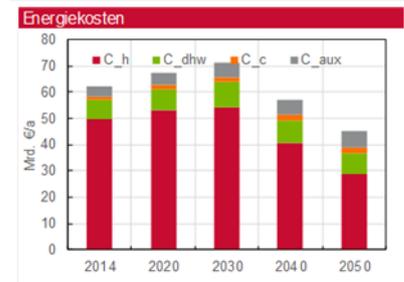
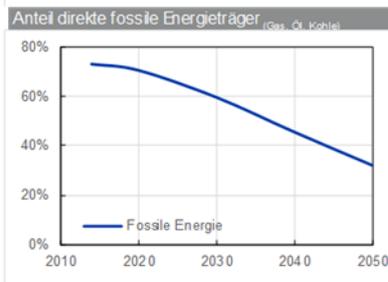
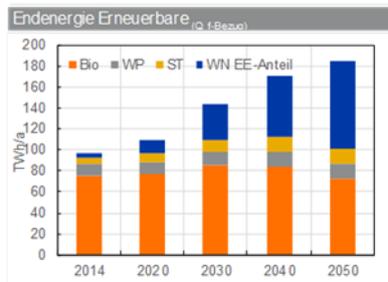
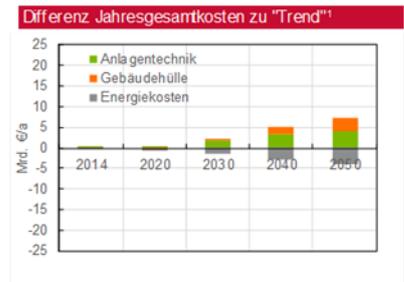
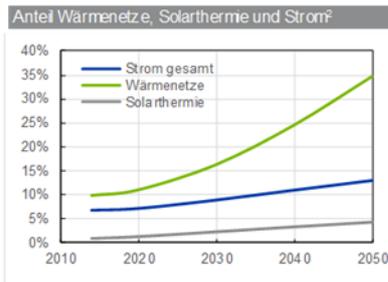
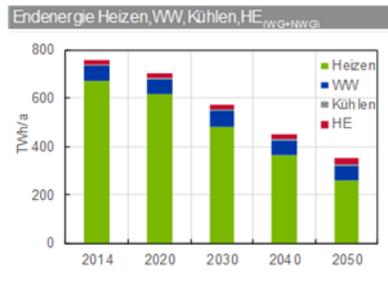
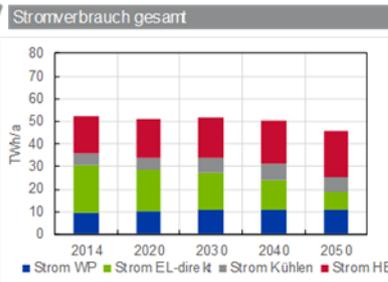
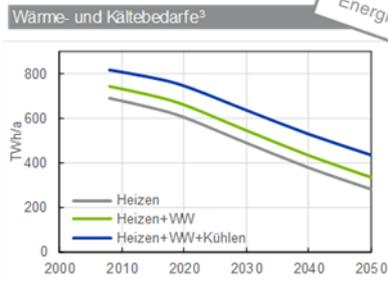


## Anteile Heizungssysteme am jährlichen Austausch



Anmerkungen: Betrachtungsrahmen [...], Anwendungen [...], CO2- und PE-Faktoren [...] etc.

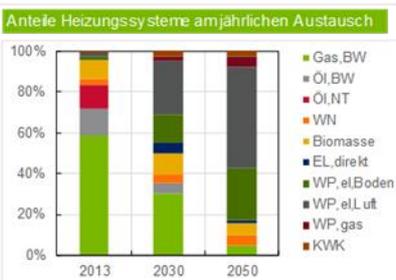
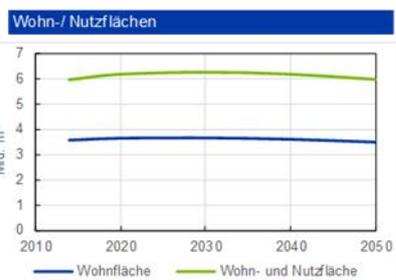
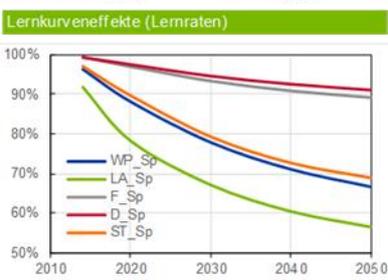
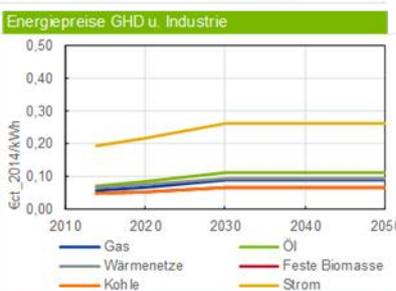
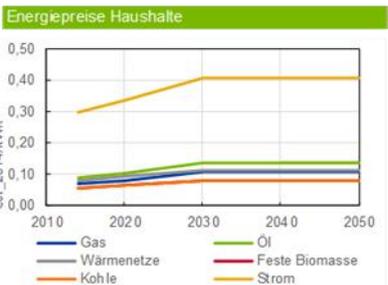
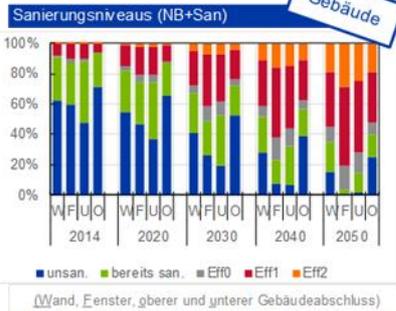
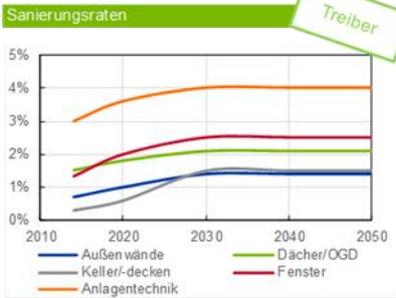
<sup>1</sup> Differenz der Jahresgesamtkosten auf Vollkosten-Basis und im Vergleich zum Trendszenario; <sup>2</sup> Anteile für Strom und Wärmenetze auf



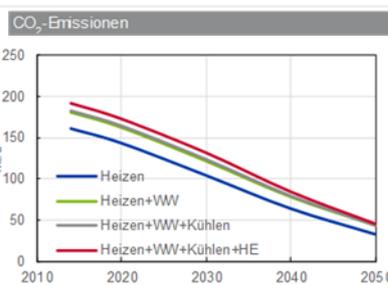
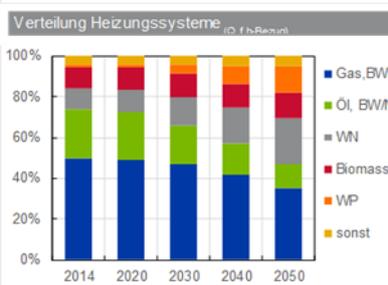
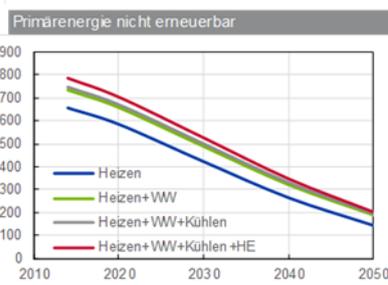
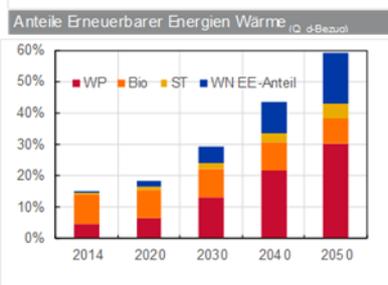
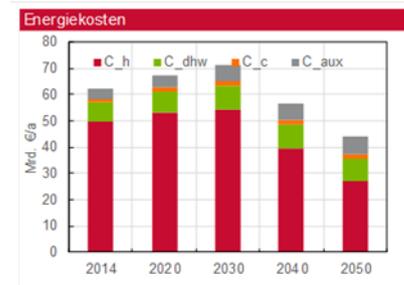
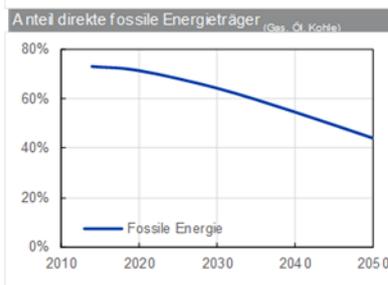
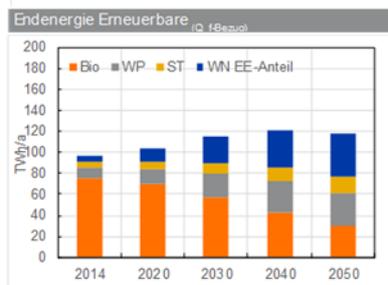
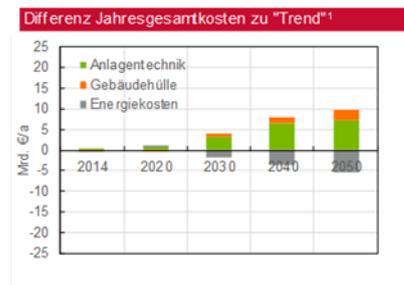
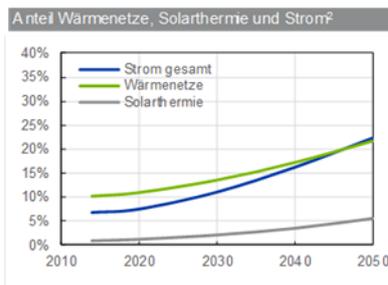
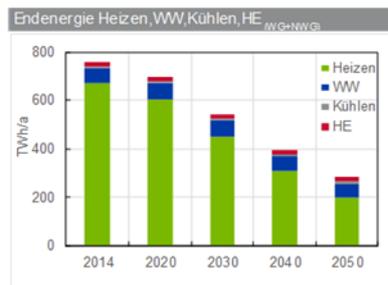
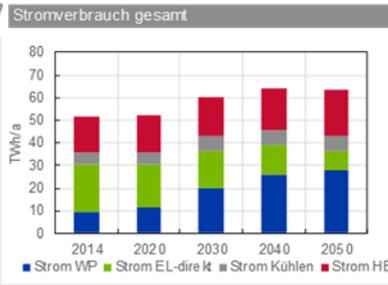
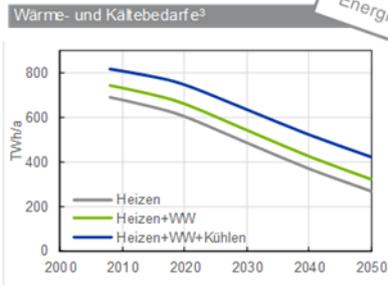
<sup>3</sup> Basis der Endenergie Heizen+WW und für Solarthermie auf Basis der Nutzenergie Heizen+WW. <sup>4</sup> Kältebedarfe in Wohngebäuden werden in 2014 zu 2% gedeckt, in 2050 zu 10% und in Nichtwohngebäuden zu 100%

# Strategiebild "Effizienz plus EE-Strom"

BMW Projekt "Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich" 28. November 2014



Anmerkungen: Betrachtungsrahmen [...], Anwendungen [...], CO2- und PE-Faktoren [...] etc.  
 1 Differenz der Jahresgesamtkosten auf Vollkosten-Basis und im Vergleich zum Trendszenario; 2 Anteile für Strom und Wärmenetze auf

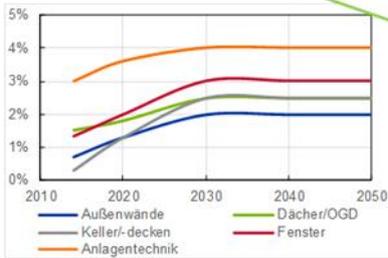


<sup>1</sup> Basis der Endenergie Heizen+WW und für Solarthermie auf Basis der Nutzenergie Heizen+WW; <sup>2</sup> Kältebedarfe in Wohngebäuden werden in 2014 zu 2% gedeckt, in 2050 zu 10% und in Nichtwohngebäuden zu 100%

# Strategiebild "Hocheffizienz plus EE-Wärme"

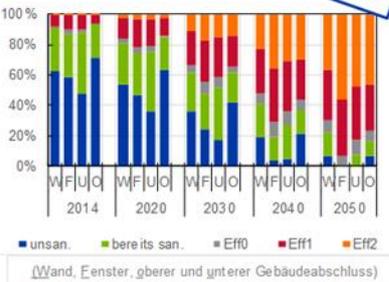
BMW Projekt "Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich" 28. November 2014

## Sanierungsraten



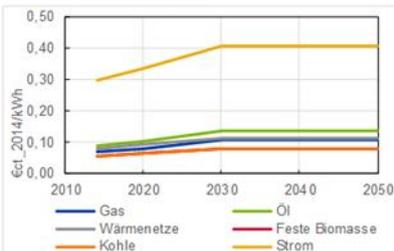
Treiber

## Sanierungsniveaus (NB+San)

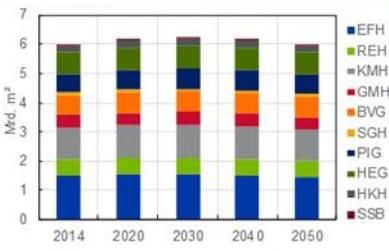


Gebäude

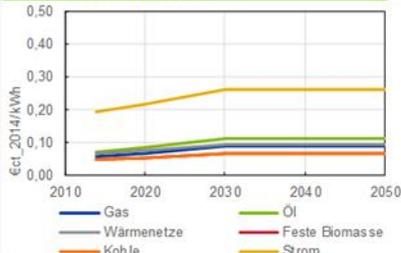
## Energiepreise Haushalte



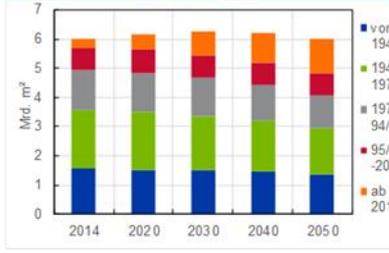
## Bestandsentwicklung Gebäudetypen



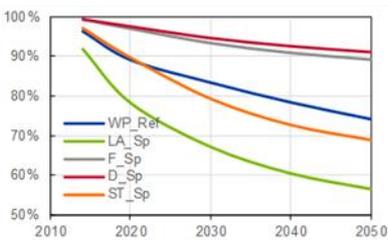
## Energiepreise GHD u. Industrie



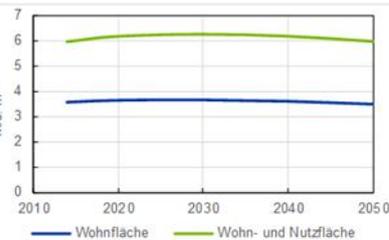
## Bestandsentwicklung Altersgruppen



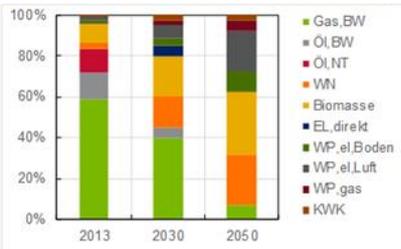
## Lernkurveneffekte (Lernraten)



## Wohn-/ Nutzflächen

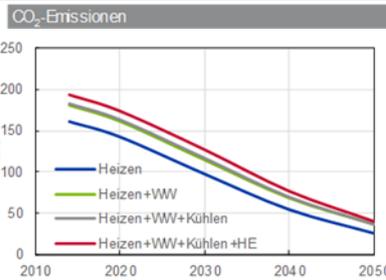
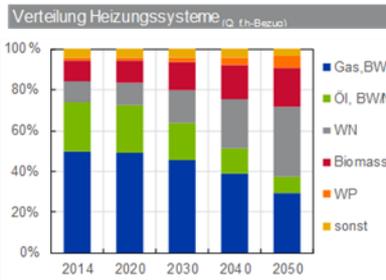
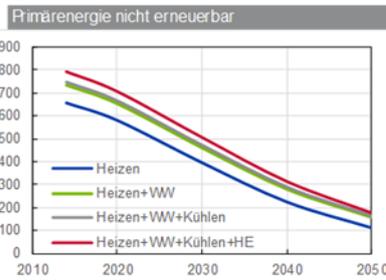
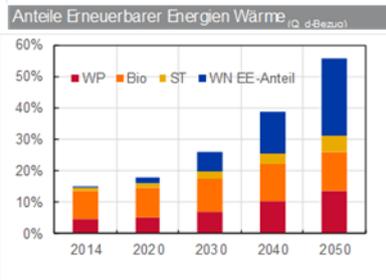
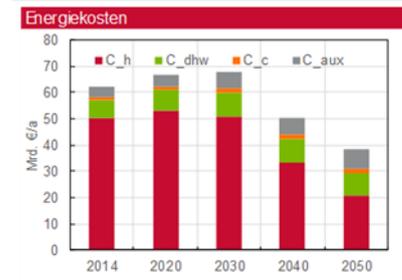
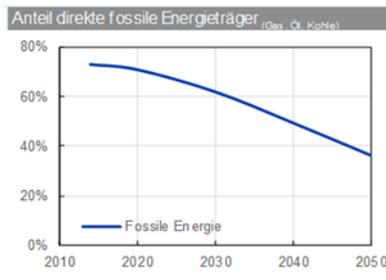
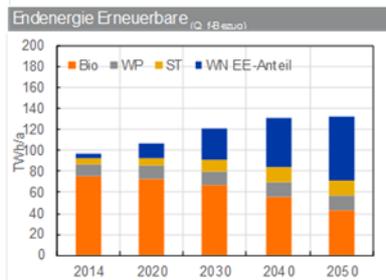
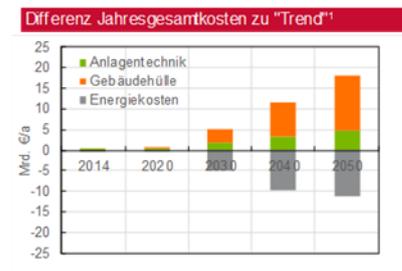
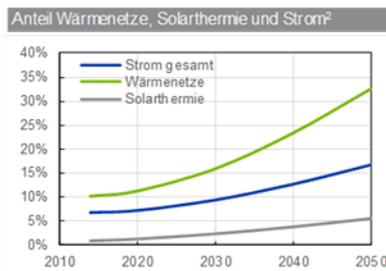
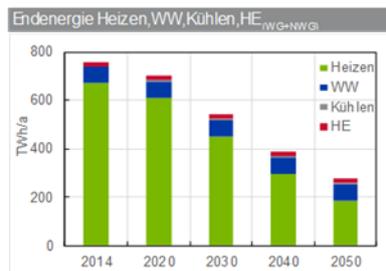
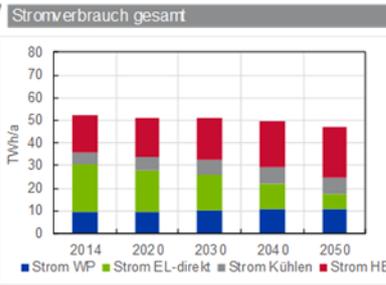
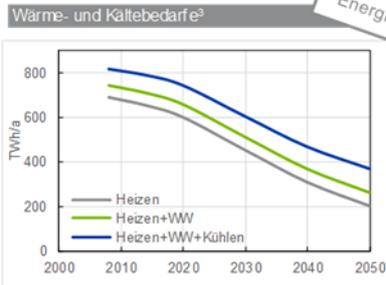


## Anteile Heizungssysteme am jährlichen Austausch



Anmerkungen: Betrachtungsrahmen [...], Anwendungen [...], CO2- und PE-Faktoren [...] etc.

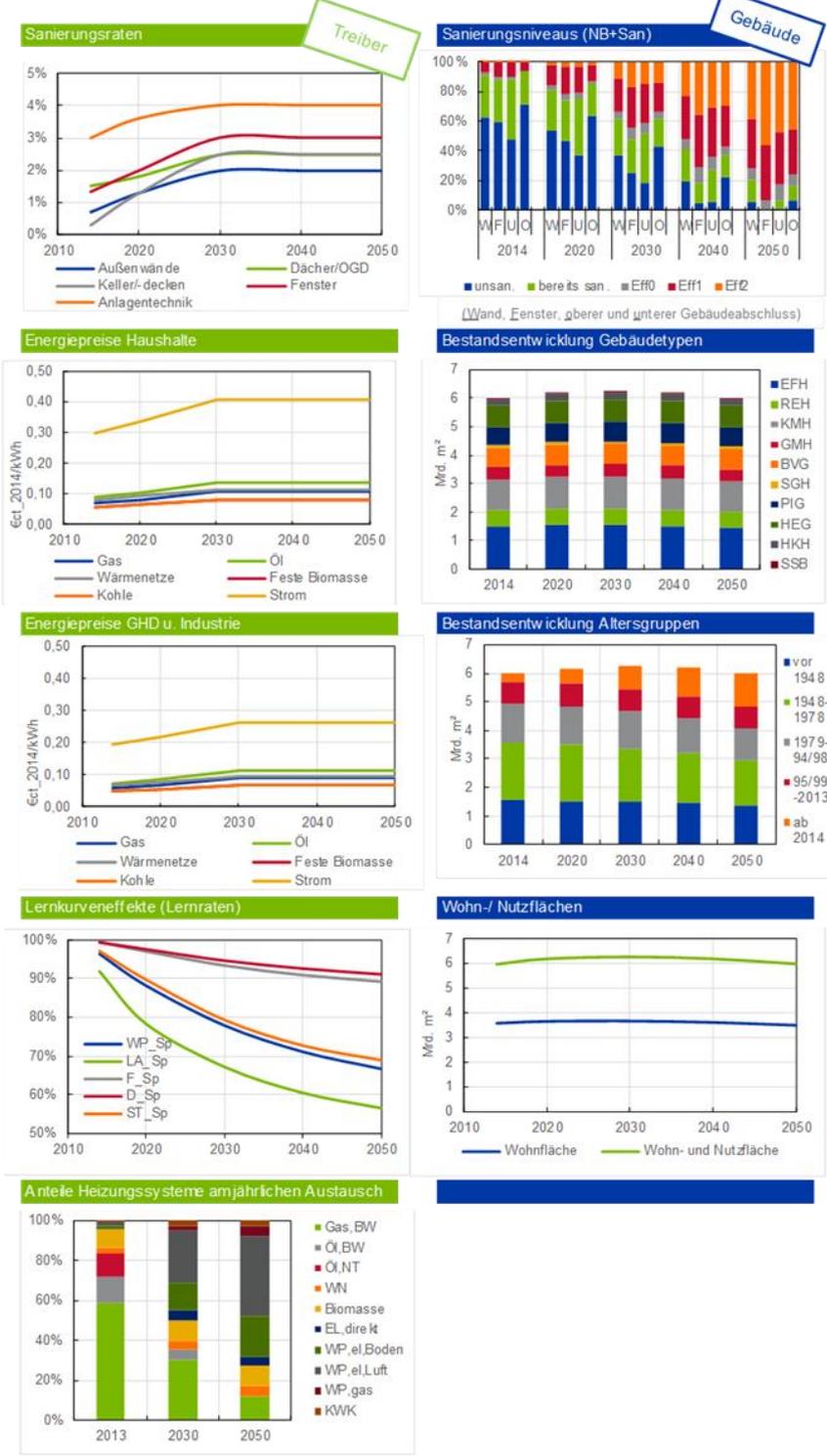
<sup>1</sup> Differenz der Jahresgesamtkosten auf Vollokosten-Basis und im Vergleich zum Trendszenario; <sup>2</sup>Anteile für Strom und Wärmenetze auf



Basis der Endenergie Heizen+WW und für Solarthermie auf Basis der Nutzenergie Heizen+WW. <sup>3</sup> Kältebedarfe in Wohngebäuden werden in 2014 zu 2% gedeckt, in 2050 zu 10% und in Nichtwohngebäuden zu 100%

# Strategiebild "Hocheffizienz plus EE-Strom"

BMW Projekt "Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich" 28. November 2014



Anmerkungen: Betrachtungsrahmen [...], Anwendungen [...], CO2- und PE-Faktoren [...] etc.  
 1 Differenz der Jahresgesamtkosten auf Vollkosten-Basis und im Vergleich zum Trendszenario; 2 Anteile für Strom und Wärmenetze auf



Basis der Endenergie Heizen+WW und für Solarthermie auf Basis der Nutzenergie Heizen+WW; <sup>3</sup> Kaltebedarfe in Wohngebäuden werden in 2014 zu 2% gedeckt, in 2050 zu 10% und in Nichtwohngebäuden zu 100%

### 5.3 Sensitivitätsanalysen

Im Rahmen dieser Studie mussten zahlreiche Annahmen über die Zukunft getroffen und Randbedingungen gesetzt werden. Basierend darauf sind Ergebnisse beschrieben und Schlussfolgerungen abgeleitet worden. Natürlich ist es denkbar, dass die reale zukünftige Entwicklung von diesen Annahmen abweicht. Beispielsweise gilt dies für Energiepreise, Sanierungskosten, Zinssätze, den Kraftwerkspark oder politische Vorgaben. Entscheidend ist, wie robust bzw. sensibel die oben beschriebenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen gegenüber derartigen Abweichungen sind. Aufschluss hierüber geben eine Reihe von Sensitivitätsanalysen zu denjenigen Parametern, bei denen signifikante Abweichungen von den Grundannahmen möglich erscheinen. Die Parameterstudie soll zeigen, ob es Ausprägungen einzelner Parameter gibt, bei denen die obigen Schlussfolgerungen z.B. bzgl. der Wirtschaftlichkeit von Handlungsalternativen nicht mehr haltbar wären, und wo diese liegen. Zielsetzung ist, die strategischen Schlussfolgerungen für den gebäudeindividuellen Sanierungsfahrplan zu schärfen.

#### 5.3.1 Sensitivität Energiepreise

**Frage:** Wie robust verhalten sich die Ergebnisse für die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf unterschiedliche Energiepreispfad-Entwicklungen?

**Annahme:** In den Berechnungen wird ein Anstieg der Energiepreise um 2 % p.a. bis 2030 berücksichtigt. Danach sind die Preise gedeckelt. Der Anstieg wird um  $\pm 0,6$  Prozentpunkte p.a. variiert auf 1,4 % bzw. 2,6 % p.a. Die Deckelung ab 2030 wird beibehalten. Untersucht wird die Auswirkung eines höheren/niedrigeren Energiepreises auf die beiden Transformationspfade mit den höchsten („Trend“) und den niedrigsten („Hocheffizienz plus EE-Strom“) Energiekosten.

**Ergebnis:** Wie in Abbildung 5-20 für den Transformationspfad „Trend“ dargestellt, hat eine 30 % höhere/geringere Energiepreisteigerungsrate bis 2030 eine jährliche Energiekostendifferenz von  $\pm 6,4$  Mrd. € in 2030 zur Folge. Bei danach gleichbleibenden Energiepreisen von 2030 bis 2050 reduziert sich die Differenz auf Grund zunehmender Gebäudesanierungen auf  $\pm 4,2$  Mrd. €.

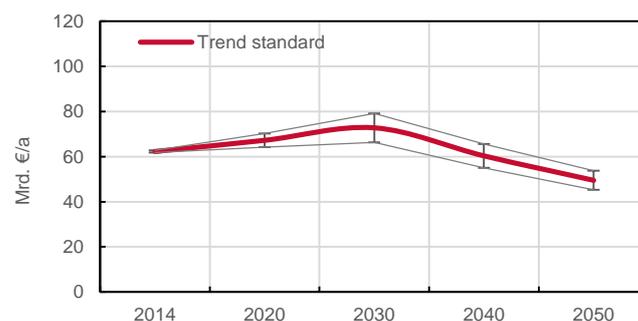


Abbildung 5-20: Energiekosten gesamt im Szenario „Trend“ bei Standard-Energiepreisentwicklung (rote Linie) und Einfluss einer  $\pm 30$  % höheren/geringeren Energiepreisteigerung bis 2030

Für den Transformationspfad „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ ist die Differenz zwischen Standard-Energiepreisentwicklung und höherer/geringerer Entwicklung mit  $\pm 5,8$  Mrd. € in 2030 etwas geringer und verringert sich bis 2050 weiter auf  $\pm 3,0$  Mrd. €, siehe Abbildung 5-21.

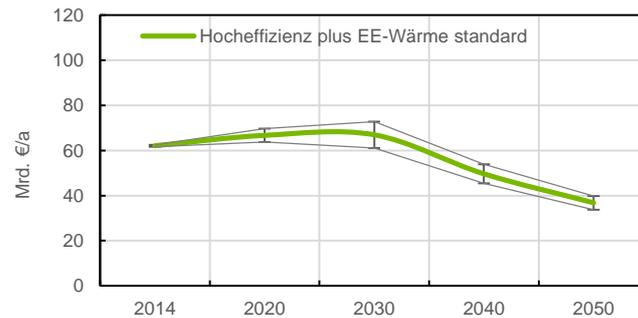


Abbildung 5-21: Energiekosten gesamt im Szenario „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ bei Standard-Energiepreisentwicklung (grüne Linie) und Einfluss einer +/- 30 % höheren/geringeren Energiepreissteigerung bis 2030

**Bewertung:** Insgesamt führen die Veränderungen bei den Energiekosten zu Ausschlägen in der Größenordnung 7 % – 10 % von den absoluten Kosten für Energie in den Grundvarianten. Der für die Beurteilung relevante sich ändernde *Abstand* zwischen den Szenarien verändert sich bei dieser Variation um maximal +/- 1,2 Mrd. €/a im Jahr 2050 (2030 maximal +/- 0,6 € Mrd. €/a). Dies entspricht in etwa 1 % – 2 % der jährlichen Energiekosten. Unter Hinzurechnung der unverändert gehaltenen jährlichen Investitionskosten, die in der Größenordnung 50 – 70 Mrd. €/a liegen, schmilzt diese relative Differenz auf ca. 1% – 1,5 % ab. Somit führt selbst eine deutlich veränderte Annahme zu den Energiepreissteigerungen nicht dazu, dass die Gesamtkosten dieser beiden Extremszenarien in erheblichem Maße auseinanderdriften. Da das Trendszenario das Ziel jedoch gar nicht erreicht und alle anderen Szenarien geringere Energiekosten aufweisen, ist die Differenz zwischen den relevanten Zielszenarien sogar noch kleiner.

Der Einfluss des Energiepreisanstiegs auf die Gesamtkosten ist deutlich unterproportional. In künftigen Förderprogrammen und -instrumenten muss dieser – praktisch nicht vorhersagbaren – Größe keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, solange sie innerhalb der betrachteten Grenzen bleibt.

### 5.3.2 Sensitivität Zinssatz

**Frage:** Ist der kalkulatorische Zinssatz für die Bewertung unterschiedlicher Sanierungsstrategien eine entscheidende Größe?

**Annahme:** In der Berechnung wurde ein kalkulatorischer Zinssatz von 3 % p.a. angesetzt. Variation des Zinssatzes auf 2 % bzw. 4 % für die Transformationspfade „Trend“, „Effizienz plus EE-Strom“ und „Hocheffizienz plus EE-Wärme“.

**Ergebnis:** Die Annuitäten aller jährlichen Investitionen steigen im Szenario „Trend“ bis zum Jahr 2050 bei einem Zinssatz von 4 % statt 3 % um zusätzlich 13,0 Mrd. € an und sinken um 12,0 Mrd. € bis 2050 bei Annahme eines Zinssatzes von 2 %, siehe Abbildung 5-22.

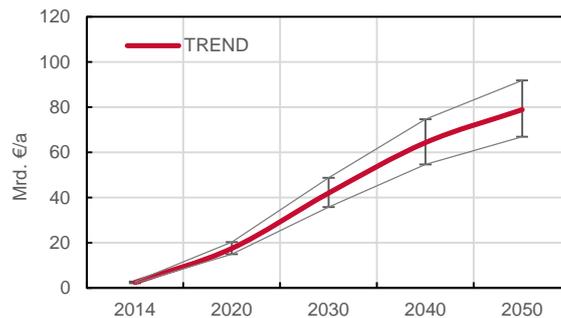


Abbildung 5-22: Annuitäten aller Investitionen bei einer Verzinsung von 3 % (rote Linie) und Sensitivitäten 2 % und 4 % für den Transformationspfad „Trend“

Auf Grund höherer Investitionen im Szenario „Hocheffizienz plus EE-Strom“ steigen die Annuitäten hier sogar um 13,9 Mrd. € bis 2050 an bzw. sinken um 12,9 Mrd. €, siehe Abbildung 5-23 (links). Ein noch größerer Unterschied ergibt sich im Szenario „Hocheffizienz plus EE-Wärme“, wo die Annuitäten um 14,2 Mrd. € bis 2050 nach oben bzw. 13,1 Mrd. € nach unten abweichen, siehe Abbildung 5-23 (rechts).

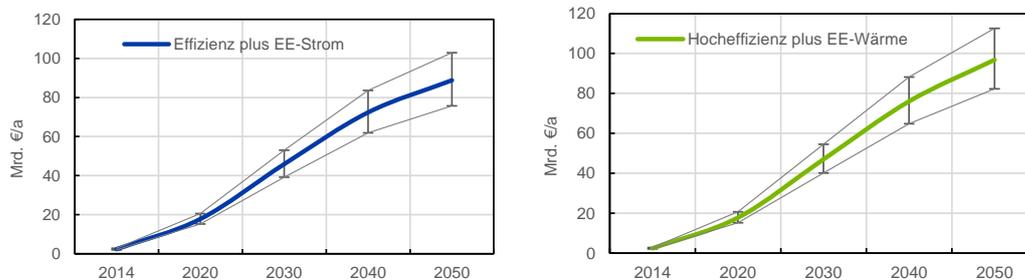


Abbildung 5-23: Annuitäten aller Investitionen bei einer Verzinsung von 3 % (blaue Linie) und Sensitivitäten 2 % und 4 % für den Transformationspfad „Effizienz plus EE-Wärme“ (links, blaue Linie) und „Hocheffizienz plus EE-Wärme“ (rechts, grüne Linie)

**Bewertung:** Insgesamt verursachen die Veränderungen bei den Zinssätzen Ausschläge in der Größenordnung von bis zu 15 % der jährlichen Investitionskosten der Grundvarianten. Im Vergleich zur Variation der Preissteigerung führt eine Variation der Zinssätze also zu absolut wesentlich stärkeren Ausschlägen innerhalb der einzelnen Szenarien. Steigende Zinsen könnten daher für jeglichen Pfad bremsend auf die notwendigen Investitionen zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes wirken. Der für die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einzelner Szenarien relevante sich ändernde *Abstand* zwischen den Szenarien bewegt sich mit maximal + 1,2 Mrd. bzw. - 1,1 Mrd. €/a im Jahr 2050 in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Variation der Energiepreissteigerungen zuvor und wiederum liegt die Differenz zwischen den Szenarien innerhalb einer Bandbreite von ca. 1 % der gesamten Investitionskosten. Auch hieraus lässt sich bezüglich der ökonomischen Parameter keine eindeutige Präferenz für einen bestimmten Pfad herleiten. Besonders frappierend ist, dass die genannte Differenz von ca. 1 % selbst zum Trendszenario besteht, welches nicht zielführend ist. Die Differenzen zwischen den Zielszenarien sind noch geringer.

Der geringe Einfluss des kalkulatorischen Zinssatzes auf die Differenzen zwischen den Szenarien ist auch darauf zurückzuführen, dass die Ausbaugeschwindigkeit in allen Szenarien gleich verteilt ist. Der Zinssatz wäre sensibler, wenn Szenarien mit frühzeitigen Sanierungspeaks solchen mit eher verzögerter Sanierungstätigkeit gegenübergestellt würden.

Neben dem hohen Einfluss des Zinssatzes auf die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen wirkt er sich auch auf Förderinstrumente aus. Steigt der Zins für Investitionsdarlehen, so steigt automatisch die Attraktivität von Förderdarlehen und andersherum (zurzeit zu beobachtender

Effekt). Bei gleichbleibend niedrigen Zinsen hingegen entfällt der Einfluss von Förderdarlehen auf die Sanierungstätigkeit. Förderprogramme könnten in Zukunft z.B. an den Zinssatz gekoppelt werden, um ihre Attraktivität zu erhalten.

### 5.3.3 Sensitivität Senkung der Sanierungskosten

**Frage:** Wie verändert sich die Bewertung der Strategieelemente Dämmung/EE bei einer Erhöhung/Absenkung der Investitionskosten für Dämmung?

**Annahme:** Variation der Kosten für Dämmung um +/- 30 %.

**Ergebnis:** Wie in Abbildung 5-24 dargestellt, nehmen die Annuitäten der Investitionskosten bei einer Variation der Kosten für Gebäudedämmung von +/- 30 % bis zum Jahr 2050 im Pfad „Trend“ um +/- 12,5 Mrd. € zu bzw. ab. Wegen eines höheren Investitionskostenanteils im Szenario „Effizienz plus EE-Strom“ variieren hier die Annuitäten mit +/- 13,6 Mrd. € im Jahr 2050 (s. Abbildung 5-25) und im Szenario „Hocheffizienz plus EE-Strom“ mit +/- 16,2 Mrd. €, siehe Abbildung 5-26.

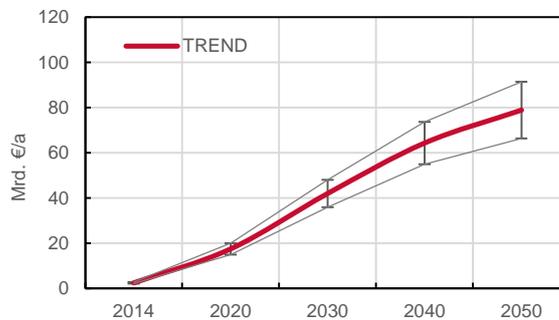


Abbildung 5-24: Annuitäten aller Investitionen bei normalen Investitionskosten für Gebäudedämmung (rote Linie) sowie 70 % und 130 % der Dämmkosten im Pfad „Trend“

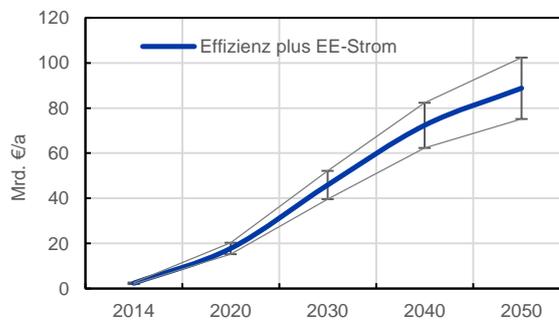


Abbildung 5-25: Annuitäten aller Investitionen bei normalen Investitionskosten für Gebäudedämmung (blaue Linie) sowie 70 % und 130 % der Dämmkosten im Pfad „Effizienz plus EE-Strom“

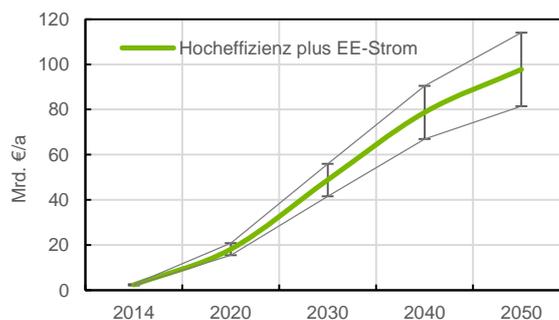


Abbildung 5-26: Annuitäten aller Investitionen bei normalen Investitionskosten für Gebäudedämmung (grüne Linie) sowie 70 % und 130 % der Kosten Dämmkosten im Pfad „Hocheffizienz plus EE-Strom“

**Bewertung:** Ähnlich wie die Variation der Zinssätze führt eine Veränderung der angesetzten Sanierungskosten zu signifikant größeren Investitionsvolumina. Hierbei schwanken die Annuitäten der Investitionskosten um ca. +/- 20 % im Jahr 2050. Damit ist der Einfluss der Sanierungskosten jeweils größer als der von Energiepreisen und Zinssatz.

Daraus folgt, dass Instrumente, die eine Senkung der Investitionskosten adressieren, besonders wirksam sein können. Dies sind insbesondere Zuschüsse und Teilschulderlässe. Aber auch eine mittelbare Senkung der Kosten über Skaleneffekte kann angereizt werden (vgl. EEG).

### 5.3.4 Sensitivität Bauteilanforderungen

**Frage:** Wie wichtig ist die Sanierungstiefe?

**Annahme:** Zur Abschätzung des Effektes der Sanierungstiefe werden die nach einer Sanierung erreichten U-Werte variiert. Dazu wird das Hocheffizienzscenario erneut berechnet, indem die (geringeren) U-Werte des Trendszenarios angesetzt werden. Alle anderen Randbedingungen des Hocheffizienzscenarios bleiben unverändert (Sanierungsraten, Heizungsstruktur u.a.m.).

**Ergebnis:** In seiner ursprünglichen Ausprägung kommt das Trend-Szenario auf einen Endenergiebedarf von 325 TWh im Jahr 2050 und das Hocheffizienzscenario auf 190 TWh. Bei der erneuten Berechnung des Hocheffizienzscenarios mit der herabgesetzten Sanierungstiefe des Trendszenarios ergeben sich 210 TWh. Das ist eine Verschlechterung um rund 10 %. Der Reduktionseffekt durch die höhere Sanierungsdynamik ist also deutlich höher als der Effekt durch die ambitionierteren U-Werte. Dennoch trägt die hohe Sanierungstiefe mit einem Reduktionseffekt von 20 TWh merklich zur Zielerreichung bei.

**Bewertung:** Der künftige Instrumentenmix sollte bestmögliche freiwillige Impulse für tiefe Sanierungen setzen, muss aber nicht in jedem Einzelfall solche ambitionierten Qualitäten verlangen.

### 5.3.5 Sensitivität Solarthermieanteil

**Frage:** Wie hoch kann der maximale Anteil der Solarthermie sein?

**Annahme:** Im Rahmen der Berechnungen eines 100 % EE-Wärme Szenarios im Projekt [Ifeu et al. 2014] wird diese Frage adressiert und hier zitiert.

**Ergebnis:** Das im Rahmen des Projekts [Ifeu et al. 2014] berechnete 100% EE-Wärme Szenario hat mit insgesamt max. 30 TWh und einem Anteil von etwa 10 % am Wärmebedarf einen höheren Anteil an Solarthermie als die übrigen Pfade. Weiterhin ist in dem Projekt eine Betrachtung von Erneuerbaren-Restriktionen durchgeführt worden, die bei einem sehr ambitionierten Zubau zu einem maximalen Beitrag der Solarthermie-Anlagen von etwa 40 – 50 TWh in 2050 kommen, der durch Anzahl und Größe geeigneter Dachflächen sowie durch die Zubaugeschwindigkeit bestimmt/begrenzt wird.

**Bewertung:** Absolut gesehen sind die Anteile der Solarthermie begrenzt. Den o.g. 30 TWh/a stehen z. B. ca. 180 TWh/a Endenergie aus erneuerbaren Energien im Pfad „Effizienz EE-Wärme“ gegenüber. Allerdings entlastet Solarthermie die Nutzung anderer, begrenzter Energieträger.

### 5.3.6 Sensitivität $f_p$ der KWK

**Frage:** Ist die methodisch derzeit diskutierte Primärenergiebewertung von KWK von Bedeutung für die Bewertung der Gebäudeszenarien?

**Annahme/ Ergebnis:** Für *KWK-Anlagen in Gebäuden* (Mini- bzw. Mikro-KWK) sind in den Szenarien mit max. 2 % der jährlich zum Austausch stehenden Heizungssysteme relativ geringe Anteile angenommen. Damit ist der Anteil am Endenergiebedarf nach der angewendeten Exergiemethode

mit einer Größenordnung von < 5TWh in 2050 kleiner als 1,5 % des Endenergiebedarfs und somit sehr gering.

**Bewertung:** Würde an dieser Stelle z.B. mit der Stromgutschriftmethode gerechnet, wäre der Einfluss auf das Gesamtergebnis geringfügig. Im Gegensatz hierzu spielt die primärenergetische Bewertung der *KWK-Anlagen in Wärmenetzen* in den Transformationspfaden zukünftig eine deutlich größere Rolle. Je nach Pfad decken Wärmenetze bis zu 35 % des Endenergiebedarfs ab. Hierbei ist angenommen, dass Wärmenetze bis 2050 einen regenerativen Erzeugungsanteil von 75 % aufweisen. Dabei ist der Primärenergiefaktor für den regenerativen Anteil zu 0,2 und für den fossilen Anteil mit 0,7 angenommen. Bei einer anderen primärenergetischen Bewertung ändern sich diese Faktoren entsprechend. Der Einfluss kann aufgrund des je nach Pfad teilweise hohen Wärmenetz-Anteils groß sein.

#### 5.4 Vergleich der Szenarienergebnisse mit anderen Studien

Dieses Kapitel vergleicht die wichtigsten Ergebnisse der fünf Szenarien in dieser Studie mit denen anderer Untersuchungen um sie zu validieren und zu plausibilisieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle hier betrachteten Szenarien zur Zielerreichung führen. Konkret wurde ein Vergleich mit folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Henning et al. 2013
- FhG-ISE et al. 2013 (Wärme- und Kältestrategie)
- Prognos et al. 2014 (Energiewirtschaftliche Referenzprognose)
- IWU 2013
- DLR et al. 2012 (Leitstudie)

Der Vergleich umfasst die Entwicklung des Nutzenergiebedarfs bis 2050, des Endenergiebedarfs, des Anteils erneuerbarer Energien, der Wärmenetze, Wärmepumpen sowie Biomasse. Veröffentlichte Berichte, aus denen diese Aspekte nicht eindeutig zu entnehmen waren, wurden in der jeweiligen Grafik nicht berücksichtigt. Es wird außerdem darauf hingewiesen, dass die einzelnen Untersuchungen auch teilweise unterschiedliche Bilanzräume nutzen und daher die unten abgebildeten Vergleiche nur eingeschränkt exakt sein können. So betrachten einige Studien für einige Aspekte den gesamten Gebäudebereich, also Wohn- und Nichtwohngebäude, einige aber nur den Wohngebäudebereich (worauf sich die jeweiligen Zahlen beziehen, ist jeweils in den Grafiken angegeben). Auch gibt es Unterschiede bei den untersuchten Energieanwendungen. Teilweise wurden alle Wärmeanwendungen gemeinsam betrachtet, teilweise separat oder nur Raumwärme. Zusätzlich gibt es auch Unterschiede beim methodischen Vorgehen und den Annahmen wie zum Beispiel bei der Berücksichtigung von Lüftungsanlagen, dem Einfluss des Klimawandels, der Berücksichtigung von Verteilungs- und Speicherverlusten, der Berücksichtigung von Rebound-Effekten, der Bevölkerungsentwicklung, der spezifischen Wohnfläche pro Kopf oder den Sanierungs-, Abriss- und Neubauraten. All diese Faktoren beeinflussen demnach auch die Vergleichbarkeit der Resultate entscheidend. Zur allgemeinen Einordnung und als Plausibilitätscheck sind die Ergebnisse jedoch ausreichend.

Es wurde auch versucht, einen Vergleich der erforderlichen Gesamtkosten für die Entwicklung des Gebäudesektors durchzuführen. In einigen der betrachteten Studien sind diese Zahlen jedoch nicht explizit für den Gebäudesektor abgebildet oder liegen vollständig außerhalb der Betrachtung. Ein konkreter Vergleich ist mit der Wärme- und Kältestrategie möglich. Dort werden die jährlichen Gesamtkosten im Jahr 2050 zwischen 170 und 190 Milliarden Euro angegeben; die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung weisen auf einen Korridor zwischen 128 und 135 Milliarden Euro hin.

### 5.4.1 Wärmebedarf

Die folgende Abbildung stellt einen Vergleich des **Wärmebedarfs** im Jahr 2050 in den unterschiedlichen Szenarien der oben aufgeführten Untersuchungen dar.

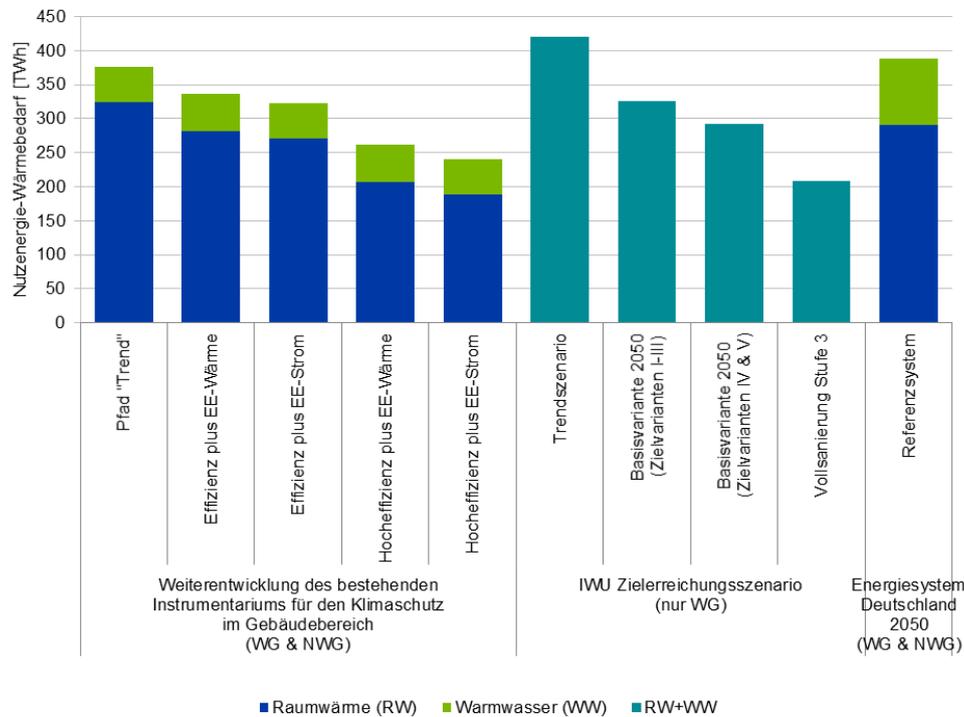


Abbildung 5-27: Studienvergleich Nutzenergie Wärme 2050<sup>20</sup>

Die Übersicht beinhaltet drei Referenzszenarien, die von einer ähnlichen Entwicklung bis zum Jahr 2050 ausgehen. Im Hinblick auf die IWU-Szenarien ist zu beachten, dass deren Werte inkl. Nichtwohngebäude um sehr grob geschätzt 50 % zunehmen würden, gleichzeitig aber neben der Nutzwärme bereits Verteil- und Speicherverluste enthalten, so dass eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Die Zahlen deuten allerdings darauf hin, dass die Wärmebedarfswerte in den IWU-Berechnungen unter vergleichbaren Bedingungen höher liegen als in der vorliegenden Studie. Dies ist plausibel, da das Trendszenario in dieser Studie eher optimistisch ausgerichtet ist, während das IWU-Szenario z.B. erhebliche Rebound-Effekte unterstellt.

### 5.4.2 Endenergie

Zum Vergleich des zu erwartenden **Endenergiebedarfs** stellen die Studien mehr Informationen zur Verfügung. Eine Übersicht kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

<sup>20</sup> Im IWU Zielerreichungsszenario beinhalten die dargestellten Nutzenergiebedarfe auch die Speicher- und Verteilverluste für RW+WW, daher sind die Zahlen nicht 1:1 mit den anderen Szenarien vergleichbar.

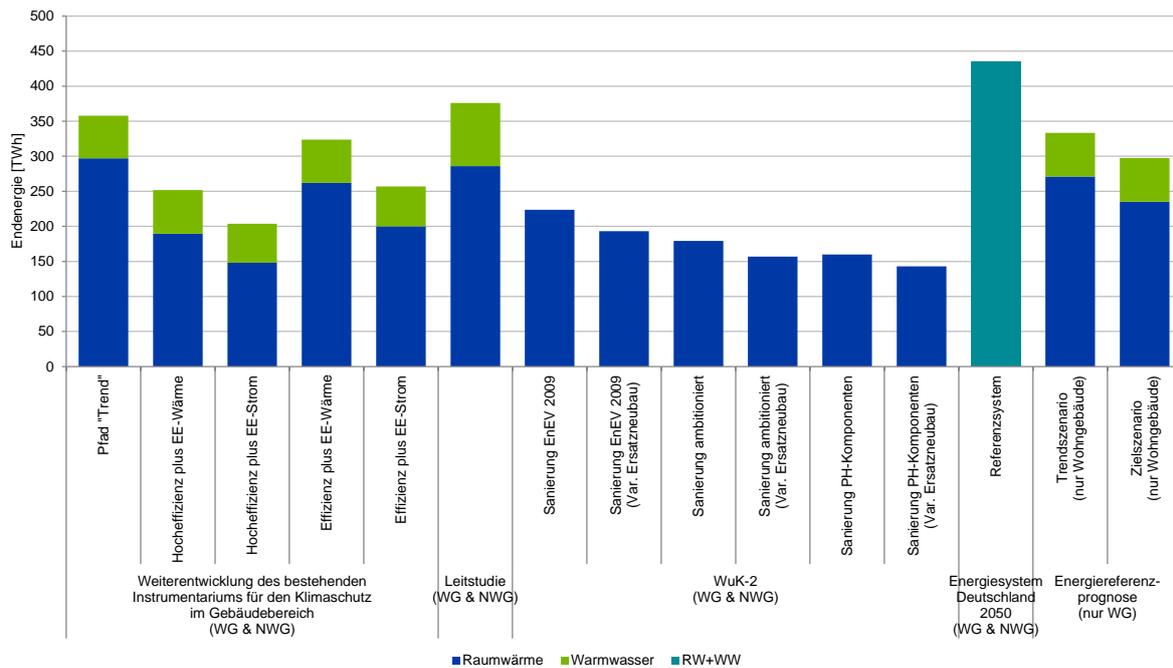


Abbildung 5-28: Studienvergleich Endenergie

Die Endenergiebedarfe in den Referenzsystemen für Raumwärme und Warmwasser liegen alle in einem Bereich zwischen etwa 350 und 430 TWh. Und auch sonst fallen hier keine Szenarien komplett aus dem Rahmen. Die Annahmen zum Raumwärme-Endenergiebedarf liegen alle in einem Bereich zwischen etwa 150 und 250 TWh.

### 5.4.3 Erneuerbare Energie

Die folgende Abbildung stellt einen Vergleich der angenommenen **Anteile an erneuerbaren Energien** dar.

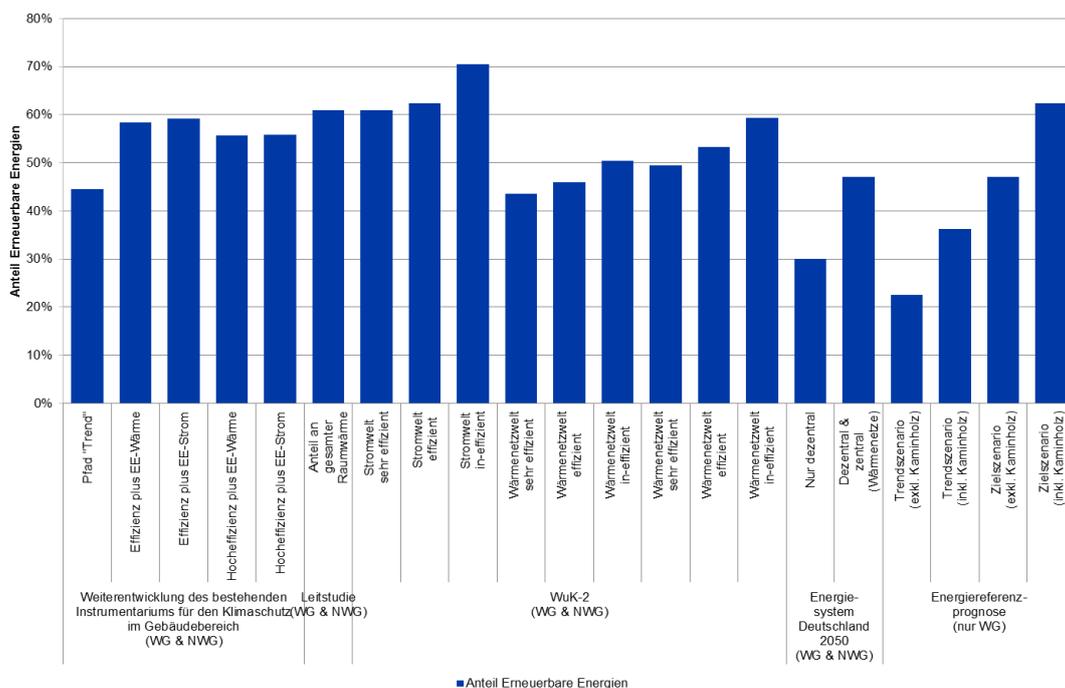


Abbildung 5-29: Studienvergleich Erneuerbare-Anteile

Man kann erkennen, dass es hierbei erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien gibt. So liegen die Anteile zwischen etwa 22 % und 70 %, wobei der größte Teil zwischen 30 % und 60 % liegt. Auch weitere Berechnungsmethoden (z. B. Berechnungsmethodik für Umweltwärme; EE-Stromanteil) unterscheiden sich, können aber aus den Veröffentlichungen nicht hinreichend entnommen werden, so dass der Vergleich nur einer groben Orientierung dienen kann.

### 5.4.4 Wärmenetze

Die folgende Abbildung zeigt die jeweils angenommenen **Anteile von Wärmenetzen** an der Energieversorgung im Gebäudebereich 2050.

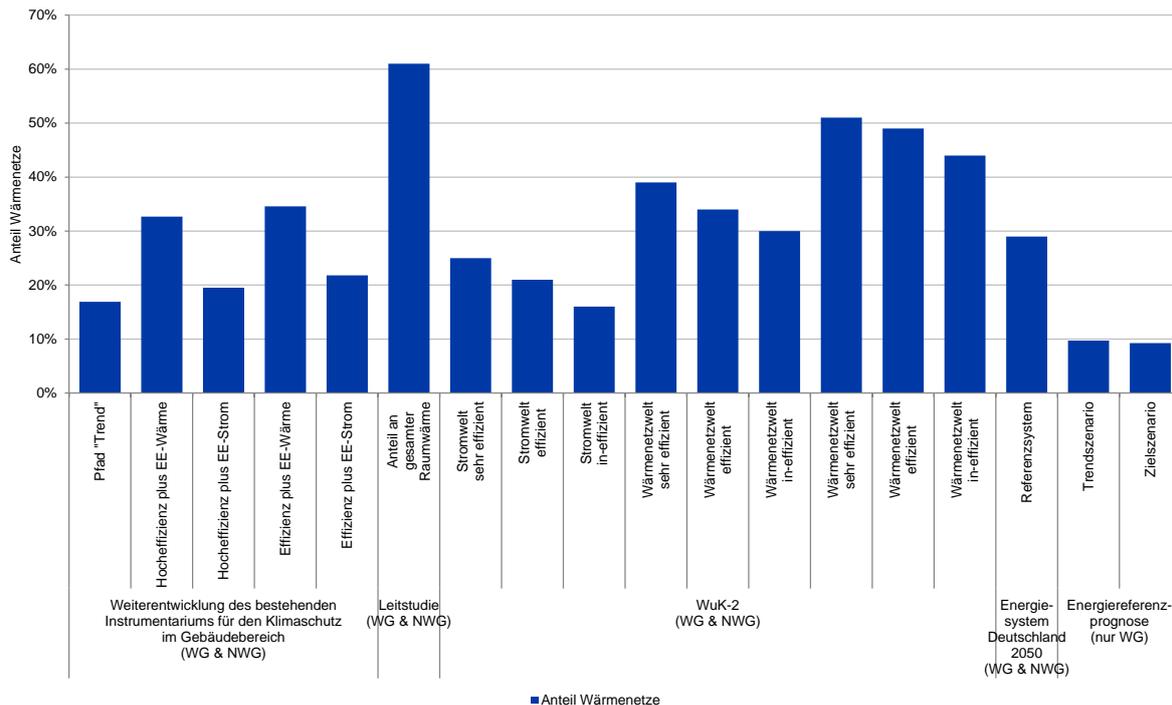


Abbildung 5-30: Studienvergleich Wärmenetz-Anteile

Auffällig sind zunächst der hohe Anteil in der Leitstudie, der mit über 60 % deutlich über den anderen Szenarien liegt, sowie die sehr geringen Anteile von unter 10 % in der Prognos-Studie (2014). Die meisten Szenarien gehen jedoch von einem Anteil zwischen etwa 20 % und 40 % aus. Wir weisen darauf hin, dass in den einzelnen Untersuchungen unterschiedliche Berechnungsmethoden zur Ausweisung des Anteils von Wärmenetzen angewandt worden sein können und ein Vergleich der Szenarienergebnisse demnach nur Tendenzen darstellen kann.

### 5.4.5 Wärmepumpen

Die folgende Abbildung präsentiert den Vergleich zu den **Anteilen der Wärmepumpen** an der Energieversorgung im Gebäudebereich.

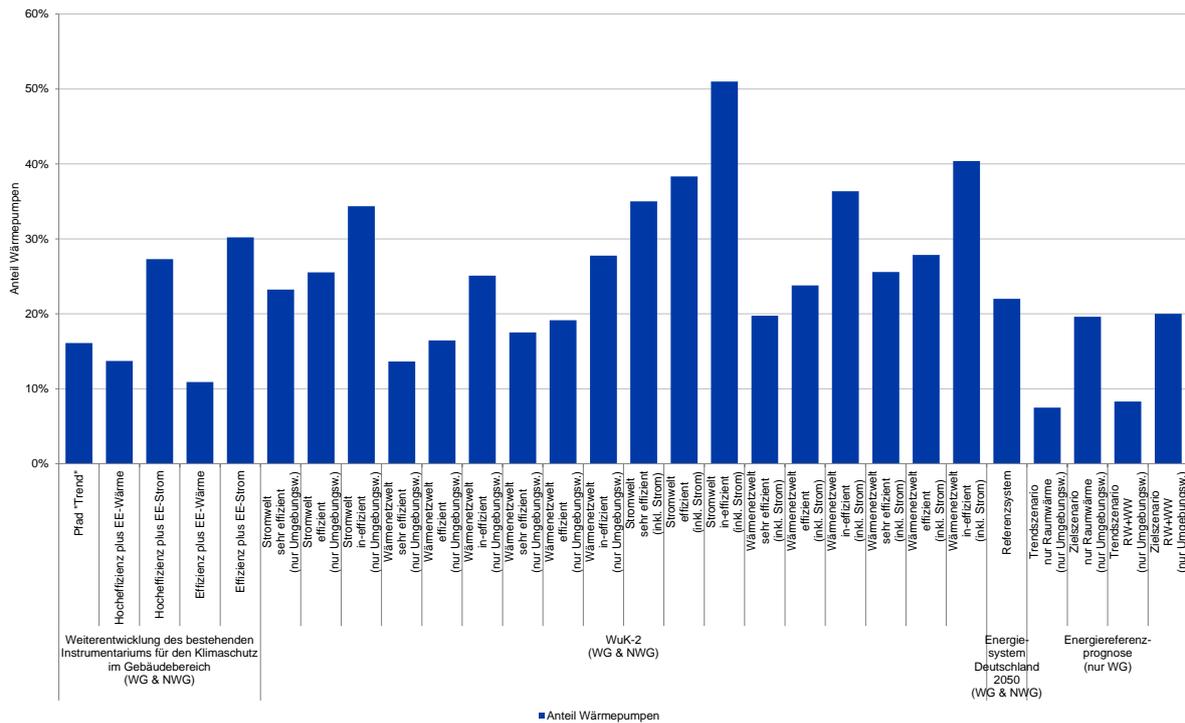


Abbildung 5-31: Studienvergleich Wärmepumpen-Anteile

Auch hier weichen die Szenarien deutlich voneinander ab, liegen aber zumeist zwischen 10 % und 40 %. Wir weisen darauf hin, dass in den einzelnen Untersuchungen unterschiedliche Berechnungsmethoden zur Ausweisung des Anteils von Wärmepumpen angewandt worden sein können und ein Vergleich der Szenarienergebnisse demnach nur eingeschränkt möglich ist.

### 5.4.6 Biomasse

Zuletzt geht es um den Vergleich der angenommenen **Biomasse-Anteile**.

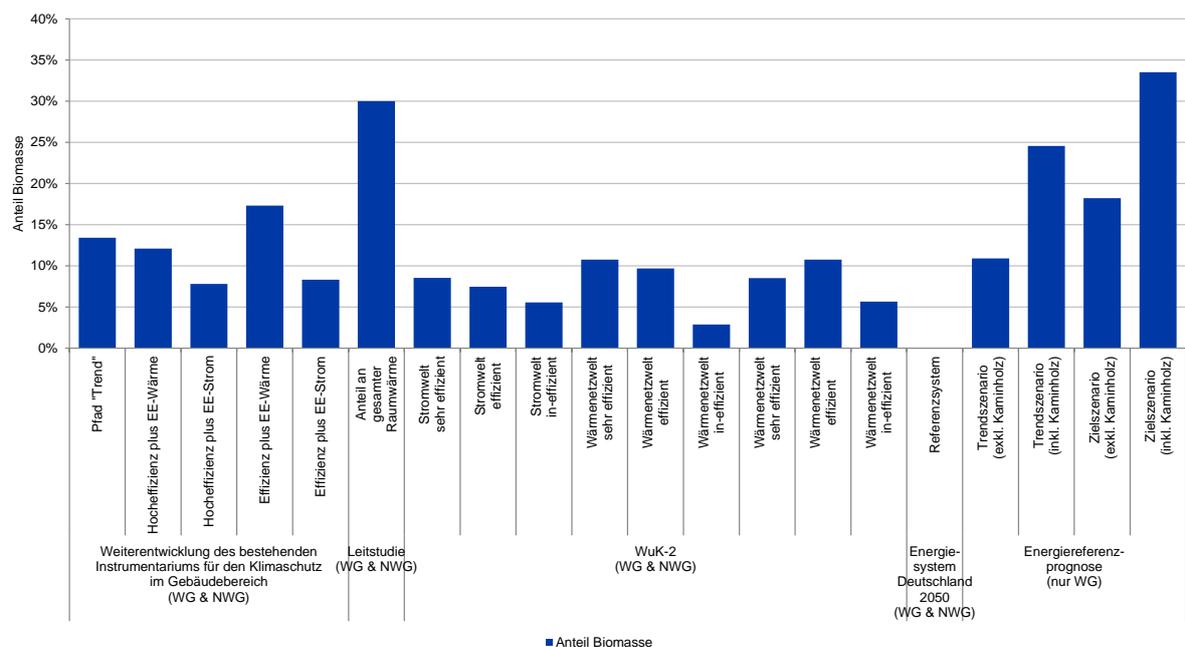


Abbildung 5-32: Studienvergleich Biomasse-Anteile

Auffällig ist hier insbesondere der Anteil von 0 % aus der Henning et al. (2013)-Untersuchung. Aber auch darüber hinaus sind starke Unterschiede erkennbar, wobei der Biomasse offenbar generell eine eher geringere Relevanz im zukünftigen Wärmemarkt zugeordnet wird. Dies hängt mit den insgesamt limitierten zukünftigen Biomasseressourcen zusammen. Wir weisen darauf hin, dass in den einzelnen Untersuchungen unterschiedliche Berechnungsmethoden zur Ausweisung des Anteils von Biomasse angewandt worden sein können (z. B. Berechnungsmethode für KWK-Wärme) und ein Vergleich der Szenarienergebnisse demnach nur eingeschränkt möglich ist.

## 6 Resultierende Anforderungen an Einzelgebäude und gebäudepolitische Schlussfolgerungen

Zweck der Untersuchung der verschiedenen Pfade ist es, vom Ziel her gedacht verschiedene Optionen darzustellen, wie die angestrebte Reduktion des Primärenergieverbrauchs im Gebäudesektor erreicht werden kann. Basierend auf den Ergebnissen der bezüglich Effizienz und Einsatz erneuerbarer Energien sehr unterschiedlichen Zielerreichungspfade lassen sich sowohl für einen Fahrplan auf Bundesebene als auch für gebäudeindividuelle Fahrpläne folgende Ergebnisse aus der Analyse ableiten:

- Die gegenüber der heutigen Situation bereits erhöhte **Sanierungsaktivität im Trendszenario reicht im Zusammenhang mit den getroffenen Annahmen zur Weiterentwicklung der Wärmeversorgung nicht aus**, um die Zielerreichung einer 80%igen Primärenergieeinsparung herbeizuführen. Das bedeutet: die angenommenen Steigerungen der Sanierungsrate z.B. der Außenwände von heute 0,7 %/a auf 1 %/a, der Dächer von 1,5 %/a auf 2,5 %/a usw. allein sind nicht hinreichend. Damit das Trendszenario das Primärenergieziel einhielte, müssten weitere 66 TWh aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Dies entspräche beispielsweise ca. zusätzlichen 6,5 Mio. Biomassekesseln für Einfamilienhäuser oder gut doppelt so viel wie die insgesamt in sehr ambitionierten Szenarien aus Solarthermie bereitgestellte Wärme.
- In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass das Trendszenario keine direkte Fortschreibung der aktuell beobachteten Entwicklung darstellt, also eben kein „Business-as-usual-Szenario“. Vielmehr sind hier bereits Annahmen zu erzielbaren Fortschritten bei energetischen Modernisierungsraten, Dämmqualitäten und verbesserten Wärmeversorgungssystemen eingeflossen, für deren Erreichung ein bereits weiterentwickeltes Klimaschutzinstrumentarium erforderlich sein würde.
- **Das Primärenergieziel für 2050 (- 80 %) ist machbar** bei Jahresgesamtkosten, die innerhalb eines engen Kostenkorridors im Vergleich zur „Trendentwicklung“ liegen. Zwischen den vier Zielpfaden gibt es kleine Unterschiede in den errechneten Jahresgesamtkosten, die aber im Rahmen der Ungenauigkeiten der Bestimmung zukünftiger Kosten liegen dürften. Das nicht zielführende Trendszenario liegt kostenmäßig geringfügig unter den Zielszenarien, was vor allem daran liegt, dass in diesem Szenario bis zum Jahr 2050 weniger Aktivitäten zur Steigerung der Effizienz der Gebäudehülle, des Anteils erneuerbarer Energien sowie zur Erneuerung der Anlagentechnik stattfinden. Insbesondere die Zielszenarien liegen sehr nahe beieinander, sodass unter Berücksichtigung der vorhandenen Unsicherheiten **aus Kostensicht keine Priorisierung** für eine eher strombasierte oder EE-Wärme-basierte Strategie oder für Dämmung anstelle von Erneuerbaren oder umgekehrt vorgenommen werden kann.
- Umgekehrt bedeutet dies auch, dass **aus rein finanzieller Sicht im Grunde Wahlfreiheit** zwischen den Zielpfaden, die in der einen oder anderen Hinsicht alle sehr ambitioniert sind, gewährt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass allen Pfaden – unabhängig vom gesetzten

Schwerpunkt – wesentliche Fortschritte in allen Bereichen (Wärmeschutz und Wärmeversorgung) zu Grunde liegen.

- Je stärker insgesamt der Brennstoffeinsatz reduziert werden kann, desto geringer ist das Risiko in Bezug auf zukünftige Energiekostensteigerungen. Gleichzeitig sind allerdings auch Risiken bei der Finanzierung höherer Investitionen denkbar, z.B. das Risiko eines höheren Zinssatzes.
- Da die bereits im Trendszenario erhöhten Sanierungsraten (und auch -tiefen) nicht ausreichen für eine Zielerreichung in 2050, ist eine deutliche Erhöhung von Sanierungsraten unabdingbar für die Zielerreichung. Die Zielszenarien weisen am Ende **Sanierungsraten** von 1,4 (Effizienz) bis 2 %/a (Hocheffizienz) für Außenwände und analoge Steigerungen für die anderen Komponenten aus, die für die Zielerreichung erforderlich sind.
- Die Hocheffizienzvarianten erfordern ein möglichst rasches Umdenken in Richtung einer **Betonung der bauteilbezogenen Qualität**. In den Hocheffizienzvarianten hat die beste Effizienzqualitätsstufe („Eff2“) einen Anteil von rund 50 % (bezogen auf die Bauteilflächen im Gesamtgebäudebestand des Jahres 2050). Diese Effizienzstufe bedeutet Bauteilqualitäten, die über den heutigen Bauteilanforderungen der EnEV im Bereich der Anforderungen von Passivhauskomponenten liegen (U-Werte in der Sanierung in  $W/m^2K$ : Außenwand 0,15, Fenster 0,96). Übersetzt in KfW-Standards erfordern die Hocheffizienz-Szenarien im Mittel Sanierungen auf den KfW55-Standard. Gebäude, die auf Grund von Dämmrestriktionen dieses Niveau nicht erreichen, müssen durch Gebäude mit höherem Standard kompensiert werden. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass ein Absenken des Anteils der Eff2-Qualitätsstufe auf die rund 20 – 30 % des Trendszenarios (im Gesamtbestand 2050) den Endenergiebedarf um ca. 20 TWh steigern würde. Damit kommt neben den Sanierungsraten beim Wärmeschutz auch der Komponentenqualität eine wesentliche Bedeutung zu. Instrumente sollten daher auch so gestaltet werden, dass sie eine möglichst hohe Bauteilqualität anreizen (beispielsweise eine verstärkte Kennzeichnung, Kommunikation und qualitätsbezogene Förderung von Einzelmaßnahmen im KfW-Programm).
- Die Neubauten machen im Gesamtkontext lediglich einen Anteil des Heizwärmebedarfs von 8 % 13 % je nach Szenario in 2050 aus und sind damit von der Bedeutung her nachrangig.
- In allen Zielerreichungspfaden findet ein **deutlicher Umbau des Wärmeversorgungssystems** statt. Der Bereitstellungsanteil von Gas- und Öl-Brennwert/Niedertemperaturkesseln geht auf unter 40 % in den Effizienzvarianten zurück. In den Hocheffizienzvarianten ist der relative Anteil von Gas- bzw. Ölkesseln noch etwas höher (deren absolute Heizwärmebereitstellung jedoch geringer), da durch die gesteigerte Effizienzentwicklung für die Zielerreichung der EE-Anteil etwas geringer sein kann.

Der Anteil erneuerbarer Energien steigt in den Szenarien auf bis zu 43 % ohne den Beitrag von Wärmenetzen. Nimmt man diese hinzu, liegt der Anteil bei über 60 %.

- **Welche Art von Wärmeversorgung die grundsätzlich „beste“ ist, kann aus den Szenario-Untersuchungen nicht abgeleitet werden.** Diese Frage muss auf einer Einzelobjektebene unter Berücksichtigung der vorhandenen/geplanten Infrastruktur beantwortet werden. Hier kann insbesondere der gebäudeindividuelle Sanierungsfahrplan einen Beitrag leisten. Die Unsicherheit bezüglich des „besten“ Wärmeversorgungssystems ist gut beherrschbar, denn innerhalb des Betrachtungszeitraums bis 2050 wird die Heizung in der Regel nochmals ausgetauscht, so dass die Revision einer einmal getroffenen Entscheidung noch wirtschaftlich möglich ist. Damit sollte die Unsicherheit kein Hinderungsgrund für einen möglichst schnellen Übergang zu neuen Wärmeversorgungsstrukturen sein: Vielmehr erscheint eine ausreichend frühzeitige und breite Einführung aller in Frage kommenden Technologien sinnvoll, um den notwendigen technologischen Umbau rechtzeitig erreichen zu können. Allerdings muss das Gebäude- und Klimaschutzinstrumentarium gewährleisten, dass bei den Neuanlagen die Strukturänderung in Richtung auf die zukünftig erforderlichen Wärmeerzeugungstechnologien auch tatsächlich rechtzeitig stattfindet.

- Der energetische Anteil von **Solarkollektoren** bleibt insgesamt, trotz vergleichsweise hoher Anteile bei der Installation (beispielsweise haben 60 % der Heizungssanierungen im Jahr 2030 im Effizienzscenario eine Solaranlage), auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau von 5– 7 % Gesamtanteil. Dies hängt insbesondere mit den erzielbaren Deckungsanteilen zusammen.
- Im Transformationspfad Effizienz plus EE-Wärme beträgt der **Beitrag der Biomasse** immerhin noch 85 TWh/a im Jahr 2030 und 73 TWh/a im Jahr 2050 zzgl. 40 bis 60 TWh für Wärmenetze. Dies liegt innerhalb des von IFEU geschätzten maximalen Biomassepotenzials [IFEU et al. 2014] von 400 TWh/a, zieht aber gleichwohl Biomasseressourcen aus anderen Sektoren, insbesondere aus dem Verkehrssektor, ab. Auch die Biomassenutzung im Stromsektor (insbesondere zur Produktion des im Wärmesektor verwendeten Stroms) ist hierbei noch nicht berücksichtigt.
- Das Potenzial von **Wärmenetzen** ergibt sich aus den Obergrenzen der in einer orts aufgelösten Analyse erhobenen Potenziale [GEF/IFEU 2014]. Anteile von insgesamt 35 % werden in den EE-Wärme-Szenarien erreicht und sind darstellbar; in den anderen Szenarien liegen sie darunter. Dabei ergibt sich eine „Aufgabenteilung“: Wärmenetze sind verstärkt für den urbanen, verdichteten Raum prädestiniert, wo zudem die EE-Potenziale stärker eingegrenzt sind.
- Während die Wahlfreiheit im Bereich der Effizienzmaßnahmen in der Tat individuell und im Zusammenspiel mit ggf. bestehenden Dämmrestriktionen bzw. Einschränkungen bei der Nutzung erneuerbarer Energien entschieden werden kann, erfordern die Alternativen EE-Wärme oder EE-Strom (insbesondere bei Fokus auf Wärmenetzen) **eine Vorentscheidung zumindest auf regionaler Ebene bzgl.** der zur Verfügung gestellten **Infrastruktur** (Ausbau Wärmenetze, Ausbau elektrische Verteilnetze usw.), auf die der individuelle Sanierungsfahrplan dann reagieren kann. Hier kann eine Wärmenutzungsplanung wichtige Voraussetzung für einen Sanierungsfahrplan sein.
- Bei der Abwägung zwischen Beitrag von Effizienzmaßnahmen und erneuerbaren Energien sind auch **regionale Unterschiede**, etwas auf Grund von Klima, Brennstoffverfügbarkeit oder Tradition zu berücksichtigen. Diese Unterschiede können im Gesamtmodell nicht abgebildet werden.
- Beim den Szenarien mit Schwerpunkt „**EE-Strom**“ ist zu beachten, dass höhere Strombedarfe im Gebäudesektor erzeugt werden als dies gegenwärtig der Fall ist. Die Strombedarfe liegen allerdings lediglich in einer Größenordnung von bis zu 15 TWh, wenn man die zukünftig erwarteten Effizienzgewinne bei Heizung, (auch Austausch von Nachtspeicherheizungen) Beleuchtung, Lüftung und Hilfsenergie gegenrechnet (ohne Effizienzgewinne würden diese bis zur Hälfte größer ausfallen). Verglichen mit dem gesamten deutschen Brutto-Strombedarf von 597 TWh im Jahr 2013 ist dieser Strombedarf allerdings abbildbar.

Instrumentelle Konsequenzen, die sich aus diesen Analysen ergeben, werden in AP 3 untersucht.

## 7 Literatur

BBSR (2013). Gutachten zur Umsetzung von Artikel 14 der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Bearbeitung durch Ecofys 2013. Verfügbar unter: [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/DL\\_ON192013.pdf;jsessionid=3DFAFD88D4979B484080126F76C474EE.live2052?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/DL_ON192013.pdf;jsessionid=3DFAFD88D4979B484080126F76C474EE.live2052?__blob=publicationFile&v=2).

BBSR (2013b). Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung "Cost-Optimal-Level"-Modellrechnungen", Mittelwerte beider Preisszenarien, Ecofys 2013. Verfügbar unter: [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/DL\\_ON262013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/DL_ON262013.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

Bettgenhäuser et al. (2011). Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Umweltbundesamt 2011.

Bettgenhäuser, K. (2013). Integrated Assessment Modelling for Building Stocks - A Technical, Economical and Ecological Analysis. Dissertation TU Darmstadt D17, Ingenieurwissenschaftlicher Verlag 2013.

BMWi (2012). BMWi Energiedaten 2012.

BMWi (2014). Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. EWI, GWS, Prognos 2014.

BMWi (2014a). Sanierungsbedarf im Gebäudebestand. Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin 2014

BPIE (2012). Principles for nearly Zero-Energy Buildings - Paving the way for effective implementation of policy requirements. Ecofys and SBI 2012.

BTE (2008). Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte; Webpräsenz des Bunds technischer Experten e. V., Agethen, U., Frahm, K.-J., Renz, K., Thees, E. P., Essen.

Bundesregierung (2010). Das Energiekonzept der Bundesregierung, September 2010.

CEN/TR 15615 (2008). Explanation of the general relationship between various CEN standards and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). Umbrella document 2008.

DLR et al. (2012). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. BMU - FKZ 03MAP146. DLR, Fraunhofer IWES, IfNE, Stuttgart, Kassel, Berlin 2012.

EC 2009/28. European Commission: DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.

EC COM(2011) 112. European Commission: European Roadmap for a Low Carbon Economy by 2050.

EC (2012). VERORDNUNGEN DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 244/2012 DER KOMMISSION vom 16. Januar 2012 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden durch die Schaffung eines Rahmens für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudekomponenten.

EC (2012b). Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology

framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements (2012/C 115/01)

Ecofys (2012). Strategie und Analysen zum Sanierungsfahrplan – Kurzgutachten. Thomas Boermans, Andreas Hermelink, Kjell Bettgenhäuser, Daniel Becker. Ecofys 2012.

Ecofys (2013). Bestandsaufnahme zur Energie- und Klimaschutzentwicklung - Monitor 2012/ Gebäude und Verkehr. Ecofys 2013.

FhG-ISE (2013). Forschungsvorhaben „Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie – Aufstockung mit Zeithorizont 2050“. Fraunhofer ISE und ISI, TU Wien, Öko-Institut, Bremer Energieinstitut.

Fronde, Manuel and Nolan Ritter (2011). Erstellung der Anwendungsbilanzen 2009 und 2010 für den Sektor Private Haushalte, Endbericht, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen.

GEF (2014). Potenziale für den Nahwärmenetzausbau: GIS-basierte Potenziale. Berechnungen im Rahmen der Aktualisierung der Leitstudie. Unveröffentlichtes Arbeitspapier. GEF, Leimen, Unterauftrag im Rahmen der Leitstudie, Consentec, Fraunhofer ISI, IFEU.

Henning et al. (2013). ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050 - Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien. Fraunhofer ISE.

Herkel et al. (2015). Laufendes Forschungsprojekt „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ im Umweltbundesamt.

Hertle et al. (2013). Diskussionspapier Vergleich verschiedener Allokationsmethoden, Ifeu 2013.

IBP (2007). Weiterentwicklung und Evaluierung von Technologien und von Bewertungsmethoden zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EnEff06). Stuttgart 2007.

IFEU et al. (2014). Forschungsprojekt „100 % Wärme aus erneuerbaren Energien? Auf dem Weg zum Niedrigstenergiehaus im Gebäudebestand“ FKZ 0325358A. Ifeu, BU Wuppertal, Ecofys, Dena, TU Darmstadt 2014. Endbericht in Bearbeitung.

IFEU und Beuth (2012). Forschungsprojekt „Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden“, IFEU, Beuth Hochschule, Heidelberg, Berlin 2012. Download [www.ifeu.de/energie/pdf/Bericht\\_Daemmrestriktionen.pdf](http://www.ifeu.de/energie/pdf/Bericht_Daemmrestriktionen.pdf), Zugriff 30.11.2014.

IWU (2002): N. Diefenbach; Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002.

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) und Bremer Energie Institut (BEI) (2010). Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand.

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) (2013). Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich – Zielerreichungsszenario, im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), BMVBS-Online-Publikation Nr. 03/2013.

IWU/IFAM (2014). Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2013.

Kleeberger, Heinrich, Peter Tzscheuschler, and Bernd Geiger (2011). Erstellen der Anwendungsbilanz 2009 und 2010 für den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Endbericht, IfE TUM, München.

Oehsen, Amany v.; Pehnt, Martin; Jentsch, Mareike; Gerhardt, Norman (2014): Benötigt man zeitlich aufgelöste Stromprimärenergiefaktoren in der Energieeinsparverordnung? In *et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 64 (11), S. 67–72.

Pehnt (2010). *Energieeffizienz, Lehr- und Handbuch*, Springer-Verlag 2010.

Prognos et al. (2014). *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*. Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Prognos, EWI, GWS, Berlin, Köln, Osnabrück

Quaschnig (2015). *Energieaufwand zur Herstellung regenerativer Anlagen*. Quelle: <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php>, abgerufen am 8.10.2014.

Rohde, Clemens (2011). *Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2009 und 2010 für das verarbeitende Gewerbe*, Endbericht, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

Schimschar, Sven; Jan Grözinger, Henning Korte, Thomas Boermans, Velizara Lilova, Riadh Bhar (2011). *Panorama of the European non-residential construction sector*. Ecofys 2011.

Schimschar, S. (2013). *Laufende Dissertation Universität Utrecht*, noch nicht abgeschlossen.

Schlomann et al. (2011). *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Schlomann, Barbara, Elisabeth Dütschke, Michaela Gigli, Jan Steinbach, Heinrich Kleeberger, Bernd Geiger, Antje Lindardt, Edelgard Gruber, Michael Mai, Andreas Gerspacher, and Werner Schiller. Fraunhofer-ISI, IfE TUM, GfK Retail, IREES, BASE-ING, Karlsruhe, München, Nürnberg. 2011.

StBa (2009). *Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - Ergebnisse der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung*, Statistisches Bundesamt 2009.

Sürmeli, A.N.; Molenbroek, E.C.; Hermelink, A.H; Nabe, C. (2013): *Nearly Zero-Energy Buildings and Off-Site Renewables*. Umweltbundesamt (2013). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012*.

Umweltbundesamt (2013). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012*.

Umweltbundesamt (2014). *Der Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand*. Dessau, Oktober 2014.

World Energy Outlook (2012). IEA 2012.

## 8 Anhang

### 8.1 Anhang „Klimaneutralität“

Die für 2015/2016 absehbare Neufassung der EN 15603 „Energieeffizienz von Gebäuden“, die derzeit als *FprEN 15603 - Energy performance of buildings - Overarching standard EPB* in der Abstimmung der Mitgliedsstaaten ist, greift zahlreiche neue Aspekte auf, die in immer stärkerem Maße in die Bilanzierung von Gebäuden hineinspielen.

A) Berücksichtigung unterschiedlicher Bilanzgrenzen; die Neufassung nennt hier die Perimeter „on-site“, „nearby“ und „distant“.

B) Die Frage nach dem Zeitschritt, in dem die Berechnungen erfolgen: ein Jahr, ein Monat, eine Stunde.

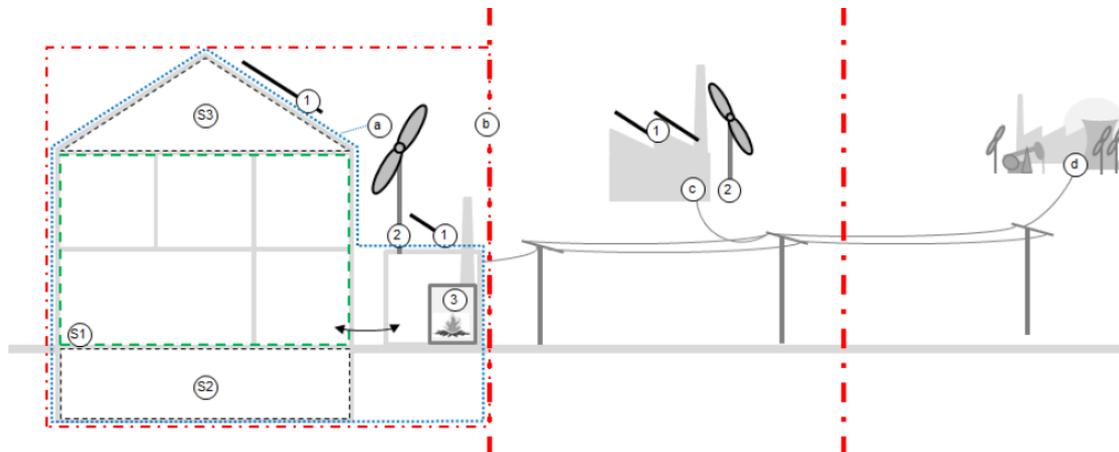
C) Die Anforderung der Berechnung erneuerbarer Anteile auf Basis erneuerbar erzeugter Energien, die aus allen eben genannten Perimetern stammen können.

D) Die Möglichkeit der Bilanzierung auf Basis der gesamten Primärenergie („total primary energy“), der nicht-erneuerbaren sowie der erneuerbaren Primärenergie.

Im Folgenden wird vertieft auf die Aspekte A) und B) eingegangen, anschließend werden noch einige perspektivisch darüber hinaus relevante Aspekte andiskutiert.

#### A) Unterschiedliche Bilanzgrenzen

Abbildung 8-1 zeigt schematisch die gemäß der Neufassung von EN 15603 möglichen Bilanzgrenzen:



#### Key

a	Assessment boundary (use energy balance)	S1	Thermally conditioned space	1	PV
b	On-site	S2,	Space outside thermal envelope	2	Wind
c	Nearby	S3	Boiler room		
d	Distant				

Abbildung 8-1. Bilanzierungsräume gemäß FprEN 15603

Die Norm ermöglicht es, gerade im Hinblick auf erneuerbar erzeugten Strom, für Gebäudeenergiebilanzen die Bilanzgrenze bei b), c) oder d) zu ziehen. Für b) und c) ist erheblich, dass hierbei auch der Export erneuerbarer Energie nach c) bzw. d) mit in Betracht gezogen und dies der Bilanz variabel von vollständig bis gar nicht gutgeschrieben werden kann.

So wird gebäudenah erzeugter Strom im Projekt „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ [Herke et al. 2015] „zur Reduktion des Eigenbedarfs angesetzt, wenn er tatsächlich dort genutzt und nicht eingespeist wird. Im Gebäude erzeugter Strom, der nicht selbst genutzt, sondern eingespeist wird, wird nicht zur Reduktion des Eigenbedarfs angesetzt.“

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit es unter dem Gesichtspunkt der Optimierung des Gesamtsystems sinnvoll ist, den Fokus auf einzelne Gebäude bzw. auch nur auf gebäudenah erzeugten Strom zu richten. Die Neufassung der EN 15603 erlaubt auch, entfernt erzeugten Strom anzurechnen. Sie führt jedoch bewusst nicht aus, unter welchen genauen Bedingungen dies möglich ist. Eine Betrachtung auf der Ebene einzelner Gebäude führt schnell zu dem Ergebnis, dass beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Sonnenscheindauer, Verschattung oder Windexponiertheit des Gebäudes sehr unterschiedliche Chancen zur Erfüllung z.B. eines vorgegebenen erneuerbaren Anteils bestehen, der sich entsprechend positiv auf die Gebäudeenergiebilanz auswirkt.<sup>21</sup> In diesem Zusammenhang hätten eine große Zahl von Investoren in neue oder bestehende Gebäude hinsichtlich der Energieeffizienz sehr unterschiedliche, selbst nur sehr schwer oder gar beeinflussbare Chancen, bestimmte Ziele für den Anteil erneuerbarer Energien oder einen bestimmten Primärenergiekennwert zu erreichen.

In diesen Fällen ließe sich in einem über das Gebäude hinaus erweiterten Bilanzraum mit derselben Investition prinzipiell ein wesentlich größerer Beitrag zur Gesamtenergieeffizienz bzw. zur Erhöhung des erneuerbaren Anteils leisten, als wenn dies „on-site“ geschähe, bzw. mit einer wesentlich geringeren Investition derselbe Effekt wie an einem für diese Ziele zufällig günstigeren Standort.<sup>22</sup>

Da es sich beim „klimaneutralen Gebäudebestand“ um eine Gesamtsystemoptimierung handelt, birgt die Vorstellung, der klimaneutrale Gebäudebestand sei die Summe klimaneutraler Gebäude, ein Risiko für sowohl technisch als auch ökonomisch sub-optimale Lösungsansätze.

Die Gebäuderichtlinie betont mehrfach den Grundsatz, dass Niedrigstenergiegebäude zunächst sehr effizient sein sollen (im Sinne eines geringen Nutzenergiebedarfes), um dann einen signifikanten Anteil erneuerbarer Energien an der Versorgung erreichen zu können. Angesichts der zwischen den Szenarien sehr geringen Kostendifferenzen sollte dieser Grundsatz zur Umsetzung möglichst vieler „hocheffizienter“ Gebäude („Effizienz 2“) im Sinne der beiden hier betrachteten „Hocheffizienz“-Szenarien verstanden werden. Unter Anwendung heute gängiger Begrifflichkeiten wäre damit eine Qualität zu verstehen, die in etwa dem Passivhaus entspricht.

Im Sinne der europäischen Gebäuderichtlinie ist es daher theoretisch vorstellbar, dass zur Umsetzung eines sehr effizienten Niedrigstenergiegebäudes ein „entfernt“ in Deutschland gelegener erneuerbarer Anteil z.B. an einem Windpark oder virtuellen erneuerbaren Kraftwerk

- untrennbar
- ohne Doppelzählung

---

<sup>21</sup> Vgl. Sürmeli et al. 2013.

<sup>22</sup> Diese Investition sollte dann durchaus die Kosten eines damit zusammenhängenden ggf. erforderlichen Netzausbaus (z.B. -50 %) sowie je nach Gedanken-Modell auch die Kosten der Verluste und Investitionen einer notwendigen saisonalen Speicherung enthalten, zumindest wenn es sich um Modelle handelt, bei denen nicht direkt nutzbare Anteile zugekauft werden. Im Grunde sind dies weitergehende Überlegungen zum Grünstrom, bei dem in jedem Fall sicher gestellt werden muss, dass dieser 1) zu 100 % aus neuen erneuerbaren Anlagen stammt und 2) darin auch die Kosten und Verluste der saisonalen Speicherung und des Netzausbaus berücksichtigt sind.

- mit einem zu den betrachteten Energiedienstleistungen (z.B. EnEV konform Heizung, Kühlen, Lüftung etc.) passenden Lastprofil<sup>23</sup>

erworben wird. Aus heutiger Sicht ist die praktische Umsetzung eines solchen Konzeptes allerdings nur mit hohem Verwaltungsaufwand vorstellbar, so dass der potenzielle finanzielle Vorteil der „entfernten“ Lösung zumindest teilweise wieder aufgezehrt würde.

Die oben dargestellten individuell sehr unterschiedlichen Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien werden umso mehr abgemildert, je mehr Gebäude zu einer Gruppe zusammengefasst werden, für die die Klimaneutralität erfüllt werden soll.

Fasst man die Bilanzgrenzen nicht für Einzelgebäude, sondern auf der **Quartiersebene**, so würde sich ein „klimaneutrales Quartier“ in Bezug auf die Bilanzgrenze realisieren lassen, wenn der selbst erzeugte, aber nicht unmittelbar selbst genutzte Strom anderswo im Quartier (räumliche Bilanzgrenze) innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls (Jahr, Monat, Tag oder Stunde) genutzt werden kann. Für das Ziehen der Bilanzgrenze gibt es somit nicht nur auf der Versorgungsseite, sondern natürlich auch auf der Nachfrageseite (Gebäude, Quartier, Stadt, Region, Land ...) verschieden weit gefasste Optionen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die Definition und Erreichbarkeit der Klimaneutralität für Gebäude umso leichter erreichen lässt, je weiter der Bilanzraum gezogen wird, denn je größer der Bilanzraum ist, desto größer ist der Pool an „on-site“ erneuerbarer Energie, also erneuerbarer Energie im Bilanzraum der Gebäude. Überdies können die Bilanzräume für die Nachfrageseite und die Versorgungsseite problemlos zusammenfallen, was bei einer Einzelgebäudebetrachtung zur Erreichung der Klimaneutralität schwieriger ist, weshalb die oben dargestellten Behelfskonstruktionen, bei denen diese Bilanzräume auseinander fallen („nearby“, „distant“), aufgrund der Anforderungen der EPBD im Rahmen der Aktualisierung der EN 15603 diskutiert werden.

Grundsätzlich sollte die Gebäudehülle stets mindestens auf kostenoptimalem Niveau realisiert werden. Hierbei empfehlen wir, die Maßgabe der „cost-optimality guidelines“ [EC 2012] anzuwenden, einen kostenoptimalen Bereich zu definieren und den linken Rand (niedrigerer Primärenergiebedarf) als Leitlinie zur Definition des kostenoptimalen Niveaus zu verwenden. Die den „guidelines“ entnommene Abbildung 8-2 illustriert diesen Gedanken<sup>24</sup>.

---

<sup>23</sup> Diesen Anteil müsste man sich nicht als ein Stück vom erneuerbaren Kraftwerk vorstellen, sondern als einen gedanklich aus dem Erzeugungsprofil des erneuerbaren Erzeugers herausgeschnitten zum Gebäude passendes Lastprofil, so dass der übrige Anteil der Erzeugerlastkurve eventuell noch von einem oder mehreren komplementären Nachfragern erworben werden könnte.

<sup>24</sup> Kapitel 7.1. der Guidelines: “As stipulated in paragraph 2 of Annex I(6) to the Regulation, if packages have the same or very similar costs, the package with the lower primary energy use (= left border of the cost-optimal range) should if possible guide the definition of the cost-optimum level.”

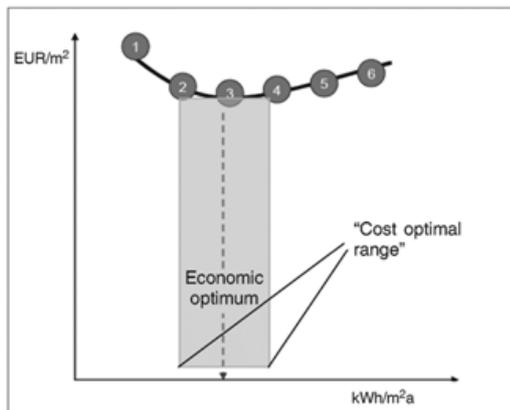


Abbildung 8-2. Der kostenoptimale Bereich

Sie zeigt auf der x-Achse den Primärenergiekennwert und auf der y-Achse die Lebenszykluskosten für im Beispiel sechs verschiedene berechnete Varianten eines Gebäudes. Da die günstigsten Varianten 2, 3 und 4 sehr ähnliche Lebenszykluskosten aufweisen, die im Rahmen der Ungenauigkeit der Inputdaten liegen, würde die Guideline nahelegen, den Primärenergiekennwert von Variante 2 als Mindestanforderung festzulegen.

Die Kurve bezieht Optionen zur Nutzung von „on-site“ erneuerbaren Energien, wie z.B. Solarthermie oder PV-Anlagen mit ein. Allerdings wird das Ergebnis sehr stark davon beeinflusst, wie diese Optionen den Primärenergiekennwert des Gebäudes beeinflussen. Dies wiederum hängt davon ab, welcher Primärenergiekennwert dem durch die „vor-Ort“-Anlage ersetzten Strom zugeordnet wird. Im Effizienzhaus Plus geschieht dies z.B. durch eine vollständige Anrechnung der Jahresstromproduktion mit dem Primärenergiefaktor des Strommixes.

Inwieweit dies zulässig ist, ist unter anderem von der zeitlichen Auflösung der Bilanzierung abhängig.

## B) Zeitschritt

Der Zeitschritt, in dem die Bilanzierung erfolgt, beeinflusst sehr stark den tatsächlichen Deckungsgrad, mit dem eine oder mehrere erneuerbare Energiequellen ein Gebäude oder eine Gruppe von Gebäuden versorgen. Dies zeigt sich anhand des sog. „load-match factor“. Große Zeitschritte führen in der Regel zu unrealistisch hohen Deckungsgraden. Abbildung 8-3 zeigt das Beispiel gebäudeintegrierter PV.<sup>25</sup>

Die PV-Anlage ist so dimensioniert, dass ihre Jahresproduktion gerade dem Jahresstromverbrauch für die betrachteten Energiedienstleitungen entspricht. Das Bild zeigt, dass bei stundenweiser Betrachtung das Gebäude jedoch nur in 25 % der Stunden des Jahres ohne Strombezug aus dem Netz „überleben“ kann.

<sup>25</sup> Koch, A., Girard, S. (2011). Urban neighbourhoods - an intermediate scale for the assessment of energy performance of buildings. Proceedings of the ECEEE 2011 Summer Study, France, 1377-1385.

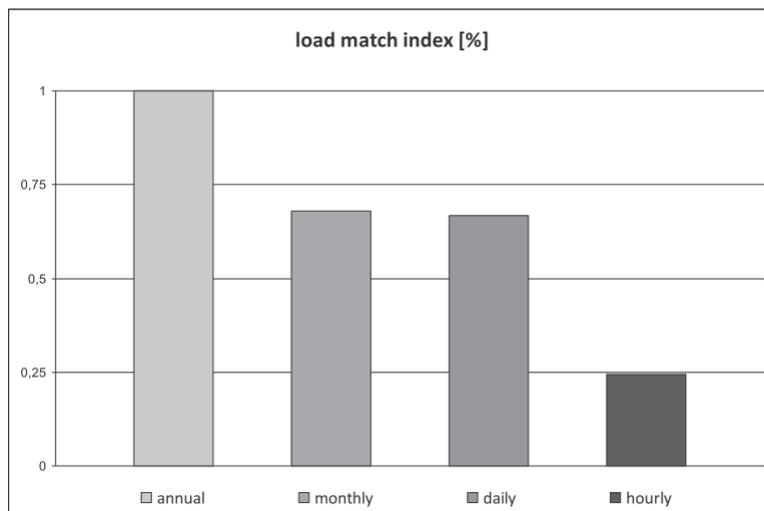


Abbildung 8-3: Load Match Factor

Dies wird auch von [Oehsen et al 2014] bestätigt, die die Kombination einer zusätzlichen Wärmepumpe mit einer zusätzlichen PV Anlage, die gerade den Jahresstromverbrauch der Wärmepumpe abdeckt, aus der Perspektive eines Stromsystems des Jahres 2020 und 2030 untersucht. Der durch die PV verdrängte Strom ist ohne Maßnahmen zum Lastmanagement nicht identisch mit dem durch die Wärmepumpe bezogenen Strom. Entsprechend ergibt sich aus einer Stundensimulation des veränderten Kraftwerkseinsatzes ein Primärenergiefaktor für die zusätzlich produzierte Strommenge von ca. 0,5 und CO<sub>2</sub>-Emissionen von 124 g/kWh, die deutlich über dem Ergebnis eines vereinfachten Jahresansatzes liegen, der einen Primärenergiefaktor von 0,1 und CO<sub>2</sub>-Emissionen von 0 ansetzen würde. Dies verdeutlicht, dass der Ansatz der Systemperspektive nicht dem Einzelgebäudeansatz der EnEV entspricht, jedoch die Wirkung auf das Stromsystem erfasst. Ein deutlich günstigeres Ergebnis (Primärenergiefaktor 0,06, CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor 26 g/kWh) ermitteln die Autoren für die Kopplung zusätzlicher gebäudeferner (aktuell nach EnEV daher nicht anrechenbarer) Windkraft mit zusätzlich gebauten Wärmepumpen, deren Kapazität ebenfalls auf den Jahresstromverbrauch der zusätzlichen Wärmepumpen ausgelegt wird.

Ohne die Kopplung einer Wärmepumpe an eine zusätzliche PV-Anlage ermittelten die Autoren bei balanciertem Ausbau von Wind und PV einen Primärenergiefaktor für den tatsächlich von Wärmepumpen bezogenen Strom, der sich in einer monatlichen Betrachtung kaum von dem jahresmittleren Primärenergiefaktor unterscheidet.

Sofern jedoch ein Lastmanagement betrieben wird, das ausdrücklich der Erhöhung des PV-Anteils am Wärmepumpenstrom dient, kann eine stündliche Auflösung von Primärenergiefaktoren sinnvoll werden. Hier geben die Autoren zu bedenken, dass dies evtl. den Rahmen der EnEV sprengt. Es bleibt entsprechenden weiteren Simulationen vorbehalten, ob sich einfache Lösungen für typische Gebäude-Erneuerbaren-Lösungen finden lassen.

Eine Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie mit einer Deckung des verbleibenden niedrigen Energiebedarfs ganz wesentlich aus erneuerbaren Energien erfordert parallel zur Weiterentwicklung der EnEV einen entsprechend koordinierten Ausbau der aus der Umsetzung der zukünftigen EnEV resultierenden zusätzlichen erforderlichen erneuerbaren Kapazitäten.

### Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Für die Definition und Überprüfung der angestrebten Klimaneutralität wäre es aus Sicht der Autoren notwendig, im Rahmen einer nationalen Strategie für den Gebäudesektor neben der Primärenergie auch die Treibhausgas- bzw. CO<sub>2</sub> Emissionen als zentralen Zielwert mit zu betrachten, um den direkten Bezug zur im Kern angestrebten Eindämmung des Klimawandels herzustellen (siehe hierzu auch [Umweltbundesamt 2014]).

Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen wird in [BPIE 2012] und [ECOFYS 2012] ein Zielwert für den Gebäudebestand in 2050 von 3 kg/m<sup>2</sup>a bzw. 4 kg/m<sup>2</sup>a bezogen auf die gesamte beheizte Wohn- und Nutzfläche von Wohn- und Nichtwohngebäuden angegeben. In [BPIE 2012] wird dieser Wert aus einem europäischen Reduktionsziel von 90% (1990-2050) basierend auf [EC COM(2011)] abgeleitet, in [ECOFYS 2012] aus einem 90% Reduktionsziel für den deutschen Gebäudebestand. Hierbei ist zu beachten, dass [EC COM(2011)] den Gebäuden dieses Reduktionsziel im Rahmen eines übergeordneten Gesamtreduktionsziels für Europa von 80% zuweist. Geht man in diesem Rahmen davon aus, dass bis zum Jahr 2050 20% des Gebäudebestandes auf dem sehr hohen Standard eines Nahezu-Nullmissionsgebäudes zugebaut werden (0 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/m<sup>2</sup>a), dann darf der Mittelwert der Treibhausgasemissionen der heute existierenden Gebäude im Jahr 2050 maximal 5 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/m<sup>2</sup>a betragen.<sup>26</sup> Der hier berechnete Wert für die Zielszenarien beträgt etwa 8 kg/m<sup>2</sup>a für den gesamten Gebäudebestand, und ist damit in etwa doppelt so hoch wie in [ECOFYS 2012] als Zielwert vorgeschlagen. Angesichts der hier erzielten CO<sub>2</sub>-Reduktion von ca. 80%, die u.a. eng an die Annahmen zu den Emissionsfaktoren gekoppelt ist (vgl. Kapitel 8.4) ist dies plausibel. Es ist zu beachten, dass im Energiekonzept der Bundesregierung kein Gebäudeziel für die Treibhausgasemissionen genannt ist. Die in dieser Studie erzielten ca. 80% Reduktion der Zielszenarien für Gebäudeemissionen liegen innerhalb der übergeordneten Zielspanne von 80%-95% Treibhausgasemissionen aus dem Energiekonzept der Bundesregierung, wenn auch an der unteren Grenze.

Eine weitere Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wäre zum einen möglich, wenn die sehr hohen EE-Anteile der „Effizienz“-Szenarien mit den besonders effizienten Gebäudehüllen der „Hocheffizienz“-Szenarien kombiniert würden. Zum anderen ist es denkbar, die versorgungsseitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter abzusenken. Während die verwendete Referenzprognose aus [BMW 2014] z.B. von einer Reduktion des spezifischen Emissionsfaktors für Strom zwischen 2011 und 2050 von ca. 78% ausgeht, erwartet die EU Kommission in [EC COM(2011)] eine Reduktion im Stromsektor zwischen 93% und 99% zwischen 1990 und 2050. Außerdem wurden in dieser Studie die Emissionsfaktoren für Gas und Öl bis 2050 konstant gehalten (vgl. Kapitel 8.4), was unter Berücksichtigung der Beimischung von Gas und Öl aus Biomasse oder Technologien wie Power-to-gas ebenfalls verbessert werden könnte.

Desweiteren ist zu beachten, dass aus Sicht des Klimaschutzes nicht in erster Linie die Emissionen im Jahr 2050, sondern insbesondere auch die Gesamtemissionen im Zeitraum bis 2050 von erheblicher Bedeutung sind. Auch diese sollten daher zukünftig in die Überlegungen einbezogen werden.

### Berücksichtigung der vollständigen Ökobilanz

Für die Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren wird bereits heute durch den Rückgriff auf Ökobilanzdaten Bau, Betrieb und Entsorgung berücksichtigt. Eine ähnliche Überlegung gilt für die Bilanz des klimaneutralen Gebäudebestandes. Da sich die Bilanzierung an den aktuellen Grenzen der EnEV orientiert, werden die Herstellungs- und Entsorgungsphase der Gebäude in den Primär- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen nicht berücksichtigt. Da aber gerade bei Niedrigstenergiegebäuden, die das

---

<sup>26</sup> Ein Vorschlag zu einer an die primärenergetische Anlagenaufwandszahl angepassten Logik mit CO<sub>2</sub>-Aufwandszahlen wurde in „NABU (2012). Strategie für eine wirkungsvolle Sanierung des deutschen Gebäudebestandes“ erarbeitet.

Basiselement eines klimaneutralen Gebäudebestandes bilden, Primärenergiebedarf und auch CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Herstellung und Entsorgung unterschiedlicher möglicher Baukonstruktionen die gleiche Größenordnung erreichen wie für deren Energieverbrauch, sollte überlegt werden, wie langfristig auch diese Elemente der Lebenszyklusunweltwirkungen des Gebäudes im Sinne einer Gesamtoptimierung des Gebäudebestandes in die Betrachtung mit einfließen können. Hierfür wären aber zunächst praxisgerechte Methoden zu entwickeln.

## 8.2 Anhang „Methodik“

Zur Szenarien-Modellierung wird das Built-Environment-Analysis-Model BEAM<sup>2</sup> eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine flexible Umgebung zum vollständigen Abbilden von Gebäudebeständen. Neben der Abbildung des Status-quo können Zukunftsszenarien für alle Gebäudetypen und Energieträger unter Annahme von geeigneten Randbedingungen gerechnet werden.

Eine Übersicht über die grundlegende Struktur des BEAM<sup>2</sup> Modells findet sich in Abbildung 8-4. Sie basiert auf den Energiebedarfsberechnungen für Raumwärme und –kälte gemäß dem ISO Standard 13790:2008 –siehe auch DIN EN ISO 13790.

Den Input in das Modell stellen Daten zum Gebäudebestand, wie Gebäudearten, Wohn-/Nutzfläche, Baualtersklassen, Sanierungsniveaus, Anlagentechnik sowie Bevölkerungszahlen, dar. Des Weiteren werden Daten zum vorherrschenden Klima wie beispielsweise Temperatur und Strahlungsenergie benötigt. Auf Basis dieser Daten kann ein Status-quo des Gebäudebestandes des betrachteten Landes aufgestellt werden.

Die Szenarien-Analyse bildet das Kernstück des Modells. Für sie werden weitere Input-Daten wie Bevölkerungsentwicklung, BIP-Entwicklung, Neubau-, Abriss- und Sanierungsaktivitäten, Dämmstandards, Heizen, Lüftung und Kühlen, erneuerbare Energiesysteme und Energieeffizienz Maßnahmen, benötigt.

Im nächsten Schritt werden Energiekosten, Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen an Gebäudehülle und Kosten für Heizungs-, Kühlungs- und Belüftungsanlagen sowie Kosten von Erneuerbare-Energie-Systemen unter Berücksichtigung von Wachstumsraten und Abzinsungssätzen untersucht.

Zusätzlich werden Emissionsfaktoren und Primärenergiefaktoren pro Energieträger und grauer Energie sowie THG-Emissionen für Energieeffizienz-Systeme und Anlagentechnik benötigt.

Der Berechnungsprozess über die Laufzeit des Szenarios ist wie folgt organisiert. Basierend auf der Ausgangsverteilung der Wohnfläche wird eine Prognose für die Entwicklung der Wohnfläche entlang der Referenzgebäude, Baualtersklassen, Sanierungsniveaus, Heizungssysteme, Warmwasser- und Kühlsysteme getätigt. Dabei werden Neubau-, Abriss und Sanierungsprogramme für alle oder Teile dieser Kombinationen mitberücksichtigt. Alle Aktivitäten aus dem Jahr  $i$  haben einen Effekt mit Beginn des Jahres  $i+1$ .

Der Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen wird aus einem integrierten Algorithmus abgeleitet (basierend auf die DIN EN ISO 13790<sup>27</sup>). Hieraus können bei Bedarf auch die Energiebedarfe für Warmwasser, Hilfsenergie oder elektrische Geräte abgeleitet werden. Die aggregierte Endenergie für Heizen kann mit top-down Daten verglichen werden. Dabei wird zuvor ein Kalibrierungsfaktor

---

<sup>27</sup> Zum Vergleich der Rechenverfahren nach aktueller EnEV und DIN EN ISO 13790 kann gesagt werden, dass das Bilanzierungssystem zur Bewertung der Energieeffizienz von beheizten Gebäuden der EnEV physikalisch auf den Modellen der Normen EN 13790 (Bewertung Gebäude) bzw. prEN 14335 (Bewertung Heizungstechnik) fußt, siehe [IBP 2007]. Da das das Berechnungsmodell BEAM<sup>2</sup> europaweit zur Anwendung kommt, basiert es auf der allgemeineren Europäischen Norm zur Gebäudebewertung.

berechnet, welcher auf die Endenergie zum Heizen angewandt werden kann. Zusammen mit den Primärenergie- und THG-Emissionsfaktoren werden aus der Bezugsenergie die Primärenergie sowie die gesamten THG-Emissionen bestimmt.

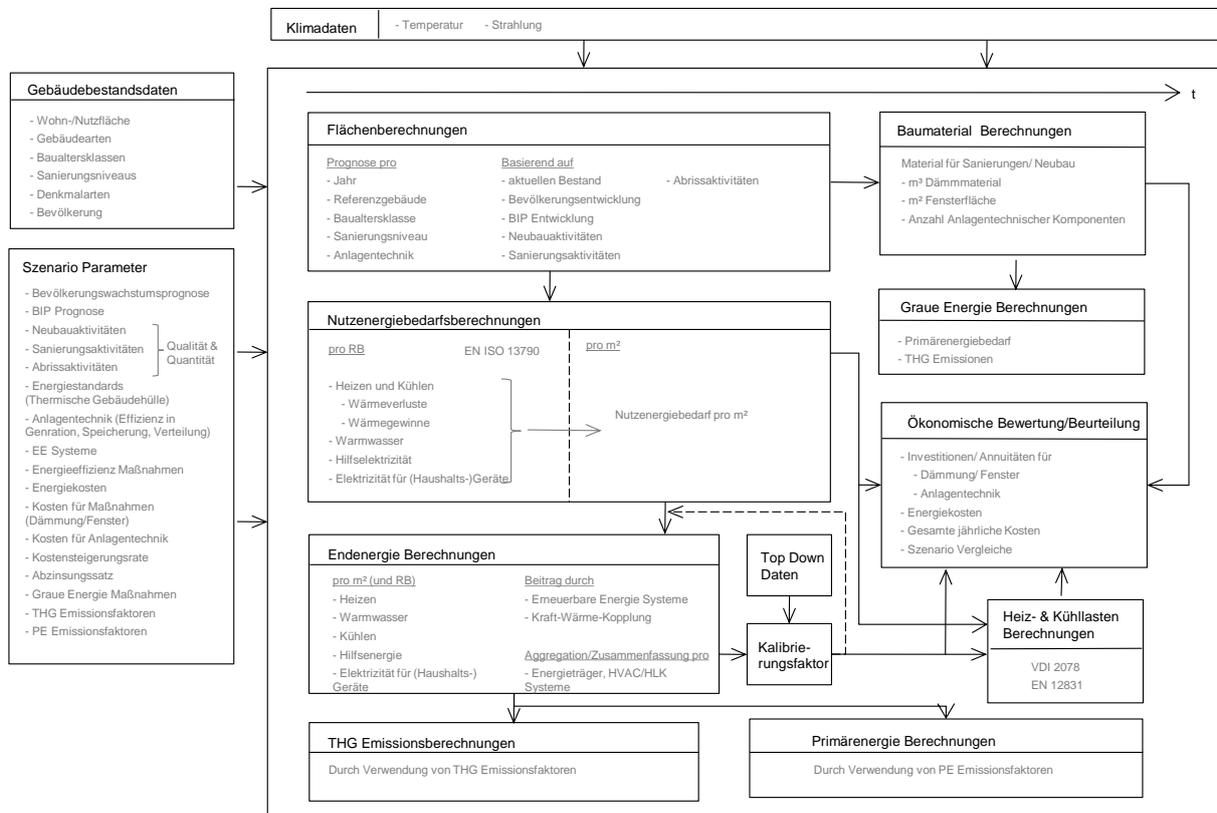


Abbildung 8-4: Berechnungsablauf im Built-Environment-Analysis Model (BEAM<sup>2</sup>) [Bettgenhäuser 2013]

Für die finanzielle Abschätzung werden die Heiz- und Kühllasten pro Gebäudetyp berechnet, welche für die Systemgröße (Leistung) und die Investitionskosten relevant sind. Diese Evaluation berücksichtigt neben den Investitionskosten auch die Energiekosten.

Neben diesen Output-Daten werden auf Basis des Gesamtvolumens an Dämmung, Fensterfläche und Anzahl und Leistung der Anlagentechnik auch die graue und die Primärenergie für alle energiebezogenen Komponenten (Effizienz und Anlagentechnik) im Rahmen des Modells quantifiziert.

### 8.3 Anhang „Bilanzierungsrahmen“

Um die komplexen Energieströme in Gebäuden korrekt abbilden zu können, bedarf es der Definition des Bilanzierungsrahmens. Hier wird beispielsweise festgelegt, dass neben den Energiebedarfen zum Heizen und Kühlen auch die Hilfsstrombedarfe sowie die Beiträge der erneuerbaren Energien bilanziert werden. Abbildung 8-5 gibt einen Überblick über die Berechnungsschritte. Die Bilanzierungsgrenzen sind an die Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) angelehnt, für die das *umbrella document* CEN/TR 15615 den Rahmen vorgibt. Es ist hierbei zu beachten, dass diese Systematik mit der Neufassung der EN 15603, die aktuell für Januar 2015 erwartet wird, an die spezifischen Anforderungen der Berechnung klimaneutraler Gebäude angepasst wird.

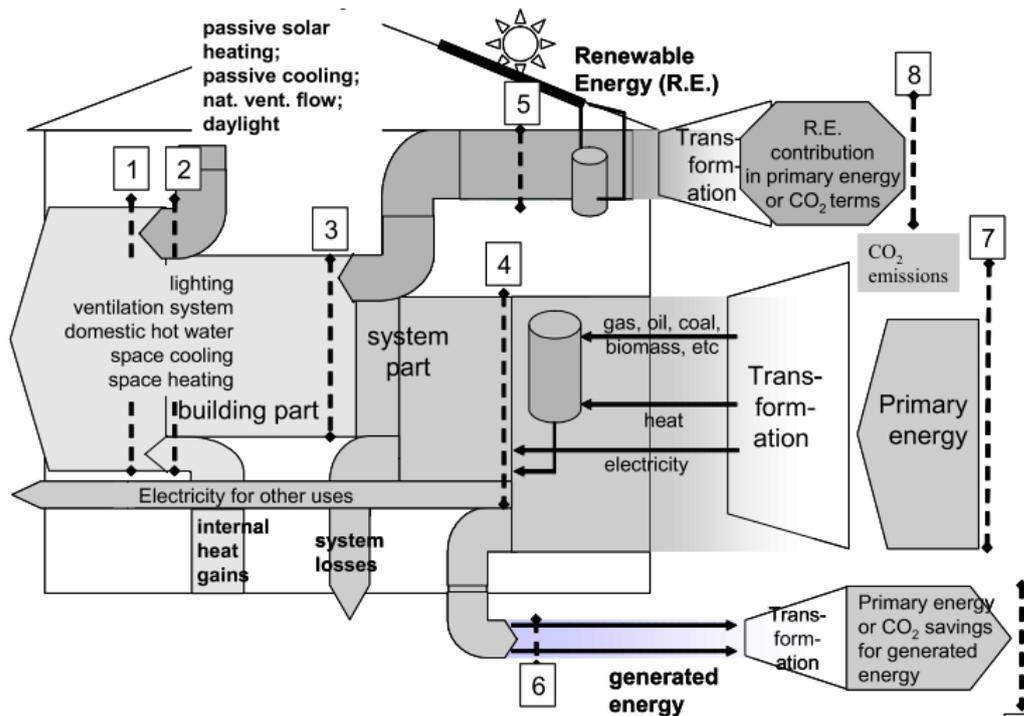


Abbildung 8-5: Bilanzierungsgrenzen in Bezug auf das Rechenschema (CEN/TR 15615:2008, 2008) 9

In Abbildung 8-5 wird dem Energiefluss von links nach rechts gefolgt, gemäß dem umbrella document CEN/TR 15615. Dabei entspricht:

- (1) Der Energie, die benötigt wird, um die Anforderungen des Verbrauchers an Heizen, Kühlen, Beleuchtung etc. gemäß den durch die Berechnung spezifizierten Niveaus zu erfüllen
- (2) Den „natürlichen“ Energiegewinnen – passives solares Heizen, passive Kühlung, natürliche Belüftung, Tagesbeleuchtung in Verbindung mit inneren Gewinnen (Nutzer, Beleuchtung, elektrische Geräte)
- (3) Der Energiebedarfe des Gebäudes, die sich zusammen mit den Gebäudecharakteristika aus (1) und (2) ergeben
- (4) Der Bezugsenergie, die für jeden Energieträger separat aufgezeichnet wird, inkl. der Hilfsenergie für Raumwärme, Kühlung, Lüftung, Warmwasser und dem Beleuchtungssystem unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung (in Energieeinheiten oder Einheiten der Energieware – kg, m<sup>3</sup>, kWh etc.)
- (5) Den erneuerbaren Energien, die auf dem Gebäudegelände erzeugt werden
- (6) Der auf dem Gelände generierten Energie, die eingespeist wird, dies kann Teile von (5) enthalten
- (7) Primärenergieverbrauch oder CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudes
- (8) Primärenergieverbrauch oder CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in Verbindung mit der Energiegewinnung und dem Verbrauch vor Ort stehen; wird nicht von (7) abgezogen
- (9) Primärenergie oder CO<sub>2</sub>-Einsparungen, die in Verbindung zur Einspeisung stehen; werden von (7) abgezogen

### 8.4 Anhang „Modellannahmen und Randbedingungen“

#### Klimadaten

Für Deutschland ist der Referenzstandort „Potsdam“ mit durchschnittlichen Wetterjahren aus Meteonorm angenommen, siehe Tabelle 8-1.

Tabelle 8-1 Relevant sind die mittleren monatlichen Außentemperaturen sowie minimale und maximale Werte, außerdem die Sonneneinstrahlung.

Tabelle 8-1: Klimadaten

Klimadaten							
Monat	$\Theta_{ext}$	$\Theta_{ext,max}$	$\Theta_{ext,min}$	$I_{sol,N}$	$I_{sol,E}$	$I_{sol,S}$	$I_{sol,W}$
	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]
Januar	0,9	11,9	-12,3	13,7	22,1	63,6	26,5
Februar	2,4	14,5	-8,5	25,1	43,6	92,8	46,1
März	5,6	19,7	-5,4	37,1	73,9	119,4	76,1
April	10,2	22,3	-1,1	51,3	105,4	127,2	107,2
Mai	14,9	29,0	3,5	71,5	141,9	127,7	127,9
Juni	17,9	32,1	6,1	80,3	150,2	115,7	127,6
Julie	19,3	33,5	9,3	82,1	150,3	121,6	130,0
August	19,2	32,9	8,9	61,3	124,7	134,3	120,5
September	14,4	27,7	4,3	39,5	90,8	130,2	90,6
Oktober	10,0	23,2	-0,1	26,1	51,5	99,3	57,2
November	5,2	16,7	-2,2	13,9	23,2	60,9	28,6
Dezember	1,7	11,8	-7,7	10,4	17,2	49,5	20,4

## Bevölkerungs- und Flächenentwicklung

Bis zum Jahr 2050 ist eine Bevölkerungsentwicklung basierend auf [StBa 2009] angenommen<sup>28</sup>. Zusammen mit der prognostizierten BIP-Entwicklung aus [World energy outlook 2012] bildet diese die Grundlage zur Berechnung der Wohnfläche pro Einwohner nach [Schimschar 2013]. Weiterhin besteht ein Zusammenhang (S-Kurve) zwischen der Wohnfläche pro Einwohner und der Nutzfläche in NWG pro Einwohner, der ebenfalls in [Schimschar 2013] analysiert wird. Daraus lässt sich eine Flächenprognose für Wohn- und Nutzflächen aufstellen (Tabelle 8-2).

Aus dieser Ausgangsbasis ergeben sich dann die Neubau- und Abrissraten, wobei eine minimale Neubaurate von 0,30 % sowie minimale Abrissraten von 0,10 % für Wohngebäude und 0,35 % für Nichtwohngebäude angesetzt sind.

Tabelle 8-2: Angenommene Bevölkerungs- und Flächenentwicklung sowie Neubau- und Abrissraten

Bevölkerung und Flächen		Einheit	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Makroökonomische Rahmendaten</b>		<b>Einheit</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
	Einwohner	1.000	80.388	78.647	76.084	72.562	68.145
	BIP pro Einwohner	€ <sub>2009</sub>	32.946	40.505	46.887	53.890	61.168
	Wohnfläche pro Einwohner	m <sup>2</sup>	42	45	46	48	49
	Nutzfläche NWG pro Einwohner	m <sup>2</sup>	15	17	18	19	19
<b>... daraus resultierende Neubau- und Abrissraten</b>			<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
	Neubaurate Wohnen	%/p.a.	0,59%	0,43%	0,30%	0,30%	0,30%
	Neubaurate Nichtwohnen	%/p.a.	1,48%	1,04%	0,51%	0,30%	0,30%
	Abrissrate Wohnen	%/p.a.	0,10%	0,10%	0,30%	0,55%	0,71%
	Abrissrate Nichtwohnen	%/p.a.	0,35%	0,35%	0,35%	0,47%	0,64%

## Lebensdauern

Neben den Kosten sind die Lebensdauern von Komponenten ein wichtiger Faktor bei der Berechnung der Jahreskosten (Annuitäten).

<sup>28</sup> Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - Ergebnisse der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung, Szenario Variante 1-W2 ("mittlere" Bevölkerung, Obergrenze)

Tabelle 8-3 stellt die wesentlichen Annahmen dar.

Tabelle 8-3: Angenommene Lebensdauern von Komponenten

Ökonomische Rahmenparameter	Einheit		
Welche Perspektive wird gewählt?			
Mikroökonomische/private Perspektive:	Inkl. Steuern und Förderungen (aus Sicht der Investors)		
Makroökonomische/soziale Perspektive:	Exkl. Steuern und Förderungen (aus Sicht des Staates)		
Kalkulatorischer Zinssatz	jew eils unterschiedlich		
Preisbasis	zu bestimmen		
Annahmen zu technischen Lebensdauern:	Komponente	Lebensdauer	
	Heizkessel	24a	
	Wärmepumpen	24a	
	Anschluss Wärmenetz	24a	
	Heizungsverteilsysteme	40a	
	Lüftungsanlagen	30a	
	Thermische Solaranlage	20a	
	<u>Mittel Fenster und Außentüren</u>	<u>30a</u>	
	- Anstrich Fenster	6a	
	<u>Mittel Fassade</u>	<u>40a</u>	
	- Außenputz	50a	
	- WDVS mit Putz	40a	
	- Holz	30a	
	- Anstrich Putz/Holz	15a	
	<u>Steildächer</u>	<u>50a</u>	
	<u>Flachdächer</u>	<u>25a</u>	
	- Abdichtung	20a	
	- Dachsteine	50a	
	- Dachöffnungen	30a	

Die genutzten Daten stammen aus dem "Gutachten zur Umsetzung von Artikel 14 der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden" [BBSR 2013] sowie dem „Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte“, siehe [BTE 2008].

Der kalkulatorische Zinssatz zur Berechnung jährlicher Kosten (Annuitäten) beträgt in Anlehnung an die europäischen Vorgaben der Kostenoptimalität 3,0 % p.a.

**Investitionskosten**

Folgende Kosten für Effizienzmaßnahmen und Anlagentechnik-Komponenten verstehen sich incl. MwSt, Basisjahr ist 2014. Alle Kostenannahmen stammen aus der „Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung "Cost-Optimal-Level"-Modellrechnungen", Mittelwerte beider Preisszenarien“ [BBSR 2013b], siehe Tabelle 8-4 bis Tabelle 8-8.

Tabelle 8-4: Preise für Dämmung der Gebäudehülle und für Fenster

Wohngebäude			Außenwand	Schrägdach	Flachdach	Kellerdecke	OGD
incl. MwSt.	Fixkosten Neubau	[€/m²]					
	Fixkosten Sanierung	[€/m²]	87	173	157	41	26
	Variable Kosten Neubau	[€/(cm²m²)]	1,85	2,30	1,80	1,90	1,90
	Variable Kosten Sanierung	[€/(cm²m²)]	2,00	1,30	1,80	1,50	1,90
	Vollkosten Instandhaltung	[€/m²]	50	50	50	0	0
Nichtwohngebäude			Außenwand	Schrägdach	Flachdach	Kellerdecke	OGD
incl. MwSt.	Fixkosten Neubau	[€/m²]					
	Fixkosten Sanierung	[€/m²]	87	n.a.	157	40	26
	Variable Kosten Neubau	[€/(cm²m²)]	1,84	n.a.	1,79	1,90	1,90
	Variable Kosten Sanierung	[€/(cm²m²)]	2,02	n.a.	1,79	1,84	1,90
	Vollkosten Instandhaltung	[€/m²]					
	Fenstertyp		Sanierung		Neubau		
incl. MwSt.	Fenster (u=1,3)		774		696		
	Fenster (u=1,0)		845		760		
	Fenster (u=0,75)		916		825		

Tabelle 8-5: Preise für Heizungssysteme – Teil 1

Gas Brennwertkessel			Öl Brennwertkessel		
[€/kW]			[€/kW]		
Leistung bis	spezifische Kosten		Leistung bis	spezifische Kosten	
kW	Neubau	Sanierung	kW	Neubau	Sanierung
5,4	1.613	-	5,4	1.631	-
6,2	1.405	1.132	6,2	1.420	1.132
15,0	701	629	15,0	850	748
50,0	151	151	50,0	440	370
100,0	126	126	100,0	300	252
>100	113	113	140,0	250	210
			150,0	225	189
			> 150	200	168
Luft-Wärmepumpe			Boden-Wärmepumpe		
[€/kW]			[€/kW]		
Leistung bis	spezifische Kosten		Leistung bis	spezifische Kosten	
kW	Neubau	Sanierung	kW	Neubau	Sanierung
5,4	2.370	-	5,4	3.419	-
6,2	2.042	2.425	6,2	3.089	3.089
15,0	1.402	1.447	15,0	2.145	2.145
50,0	833	833	50,0	1.700	1.700
>50	774	774	100,0	1.550	1.550
			150,0	1.450	1.450
			>150	1.400	1.400

Tabelle 8-6: Preise für Heizungssysteme – Teil 2

<b>Öl NT-Kessel</b>			<b>Holzpellet-Kessel</b>		
[€/kW]			[€/kW]		
Leistung bis	spezifische Kosten		Leistung bis	spezifische Kosten	
kW	Neubau	Sanierung	kW	Neubau	Sanierung
5,4	1.468	-	5,4	3.363	-
6,2	1.278	1.019	6,2	2.929	2.856
15,0	765	673	15,0	1.365	1.497
50,0	396	333	50,0	491	491
100,0	270	227	100,0	428	428
140,0	225	189	150,0	315	315
150,0	203	170	>150	252	252
> 150	180	151			
<b>Elektro-Direktheizung</b>			<b>Fernwärme-Anschluss</b>		
[€/kW]			[€/kW]		
Leistung bis	spezifische Kosten		Leistung bis	spezifische Kosten	
kW	Neubau	Sanierung	kW	Neubau	Sanierung
alle	38	40	12,0	285	300
			20,0	190	200
			30,0	124	130
			50,0	113	113
			100,0	76	76
			>100	63	63

Tabelle 8-7: Preise für Lüftungsanlagen

<b>Lüftungsanlagen NWG (inkl. WRG &gt;80%)</b>		
[€/(m³/h)]		
Größe bis	spezifische Kosten	
m³/h	Neubau	Sanierung
170	31	39
250	30	37
850	28	35
1.000	27	34
4.000	22	28
9.700	18	23
15.000	16	20
40.000	12	15

Tabelle 8-8: Preise für Solarthermieanlagen

<b>Solarthermieanlagen</b>		
[€/m² Kollektorfläche]		
Größe bis	spezifische Kosten	
m²	Neubau	Sanierung
6	700	700
12	500	500
30	430	430
40	400	400
ab 40	350	350

## Lernkurven

Für Wärmepumpen, Lüftungsanlagen, Fenster, Dämmstoffe und Solarthermieanlagen sind im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Kostendegressionen über die Zeit angenommen worden. Hauptgrund ist ein teilweise deutlich erwarteter Anstieg der Produktionszahlen sowie Kostensenkungspotentiale beim Einbau.

Tabelle 8-9 gibt einen Überblick der Annahmen, die auf Grundlage von empirischen Untersuchungen im Forschungsprojekt [Ifeu et al. 2014] erarbeitet worden sind. Die Menge/Anzahl der eingebauten Komponenten sind jeweils im Berechnungsmodell ermittelt worden und bilden die Grundlage für die Berechnung der angesetzten Lernraten.

Tabelle 8-9: Lernraten

Lernkurven					
Technologie	Einheit	Kum. Menge	Material-	Lernrate	Lernrate
		Ende 2012	anteil	Material	„Rest“
Wärmepumpen	Stück	500.000	42%	85%	95%
Lüftungsanlagen	Stück	700.000	40%	80%	90%
Fenster	m <sup>2</sup>	498.000.000	60%	90%	100%
Dämmung	m <sup>3</sup>	899.000.000	34%	95%	95%
Solarthermie	m <sup>2</sup>	16.500.000	25%	80%	90%

Trendentwicklung				Schwerpunkte auf Effizienz Plus, WP und ST			
Kum. Menge	Material-	Kosten	Gesamt-	Kum. Menge	Material-	Kosten	Gesamt-
2050	kosten 2050	Rest“ 2050	kosten 2050	2050	kosten 2050	Rest“ 2050	kosten 2050
4.520.000	60%	85%	74%	10.190.000	49%	80%	67%
3.980.000	57%	77%	69%	9.980.000	43%	67%	57%
1.440.000.000	85%	100%	91%	1.820.000.000	82%	100%	89%
1.810.000.000	95%	95%	95%	3.200.000.000	91%	91%	91%
32.820.000	80%	90%	88%	113.070.000	54%	75%	69%

**Energiepreise.** Tabelle 8-10 stellt die angenommenen Energiepreise mit Basisjahr 2014 dar. Die Gaspreise sind aus Eurostat<sup>29</sup> angelehnt, ebenso die Strompreise<sup>30</sup>. Öl- und Biomassepreise stammen aus der Carmen-Datenbank, die Preise für Nah-/Fernwärme aus Wärmenetzen aus WuK-Teil II<sup>31</sup>. Für die Energiepreissteigerungsraten sind die Annahmen aus EC (2012)<sup>32</sup> angesetzt, was für Gas und Öl 2,8 % bedeutet und 2,0 % für alle anderen Energieträger.

<sup>29</sup> Eurostat: Gas prices for domestic consumers, from 2007 onwards - bi-annual data [nrg\_pc\_202] Band D2 : 20 GJ < Consumption < 200 GJ und Gas prices for industrial consumers, from 2007 onwards - bi-annual data [nrg\_pc\_203] Band I3 : 10 000 GJ < Consumption < 100 000 GJ.

<sup>30</sup> Eurostat: Electricity prices for domestic consumers, from 2007 onwards - bi-annual data [nrg\_pc\_204] Band DC : 2 500 kWh < Consumption < 5 000 kWh und Electricity prices for industrial consumers, from 2007 onwards - bi-annual data [nrg\_pc\_205] Band IC : 500 MWh < Consumption < 2 000 MWh.

<sup>31</sup> Forschungsvorhaben [FhG-ISE 2013]: „Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie – Aufstockung mit Zeithorizont 2050“. Fraunhofer ISE und ISI, TU Wien, Öko-Institut, Bremer Energieinstitut .

<sup>32</sup> DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 244/2012 DER KOMMISSION vom 16. Januar 2012 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/31/EU.

Tabelle 8-10: Energiepreise

Energiepreise		Einheit	2014	2020	2030	2040	2050
<b>Energiepreise private Haushalte</b>			<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Gas	€ct_2014		0,07	0,08	0,11	0,11	0,11
Öl	€ct_2014		0,09	0,10	0,14	0,14	0,14
Wärmenetze	€ct_2014		0,08	0,09	0,11	0,11	0,11
Feste Biomasse	€ct_2014		0,06	0,06	0,08	0,08	0,08
Kohle	€ct_2014		0,06	0,06	0,08	0,08	0,08
Strom	€ct_2014		0,30	0,34	0,41	0,41	0,41
<b>Energiepreise GHD und Industrie</b>			<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Gas	€ct_2014		0,06	0,07	0,09	0,09	0,09
Öl	€ct_2014		0,07	0,09	0,11	0,11	0,11
Wärmenetze	€ct_2014		0,07	0,08	0,09	0,09	0,09
Feste Biomasse	€ct_2014		0,05	0,05	0,07	0,07	0,07
Kohle	€ct_2014		0,05	0,05	0,07	0,07	0,07
Strom	€ct_2014		0,19	0,22	0,26	0,26	0,26

### Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Faktoren

Die Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Faktoren für direkte Energieträger sind nach Tabelle 8-11 angenommen. Für Strom basieren die CO<sub>2</sub>-Faktoren auf dem Energieträgersplit der Energiewirtschaftlichen Referenzprognose des BMWi, siehe [BMWi 2014] und Tabelle 8-12 und Abbildung 8-6, die mit den entsprechenden Emissionsfaktoren von GEMIS<sup>33</sup> verknüpft wurden. Dabei ist zu beachten, dass die Rechenweise der Rechenlogik der EnEV entsprechen, die Werte allerdings von dem für 2016 angesetzten Faktoren 1,8 abweichen; die der EnEV zu Grunde liegende Studie war noch von optimistischeren Annahmen bezüglich des EE-Ausbaus ausgegangen (vor der EEG-Novelle und der Anpassung der Ziele). Auch in Zukunft kann es sinnvoll sein, dass die energiewirtschaftlichen Primärenergiefaktoren nicht den in der EnEV festgelegten Faktoren entsprechen. Für den Fern- bzw. Nahwärmemix basiert der aktuelle Wert auf GEMIS und die Entwicklung ist anhand einer Aufteilung in fossile und regenerative Anteile vorgenommen, siehe Tabelle 8-13.

Tabelle 8-11: Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Faktoren direkte Energieträger

PE-Faktoren (f <sub>p</sub> )			CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren (Quelle: Gemis)		
			(mit Vorketten)		
Gas	kWh/kWh	1,10	Gas	g/kWh	227
Öl	kWh/kWh	1,10	Öl	g/kWh	316
Feste Biomasse	kWh/kWh	0,20	Feste Biomasse	g/kWh	17
Kohle	kWh/kWh	1,10	Kohle	g/kWh	359

Tabelle 8-12: Primärenergie- (nicht erneuerbarer Anteil) und CO<sub>2</sub>-Faktoren Strom

Annahmen Strom						
	2011	2020	2025	2030	2040	2050
f <sub>p</sub>	2,66	2,11	1,78	1,69	1,15	0,61
eCO <sub>2</sub>	579	514	508	481	304	127

<sup>33</sup> GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, siehe <http://www.iinas.org/gemis-de.html>.

Tabelle 8-13: Primärenergie- (nicht-erneuerbarer Anteil) und CO<sub>2</sub>-Faktoren Wärmenetze

Annahmen Wärmenetze						
	2011	2020	2025	2030	2040	2050
<b>fossil</b>						
fp	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
eCO <sub>2</sub>	260	260	260	260	260	260
<b>regenerativ</b>						
fp	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
eCO <sub>2</sub>	20	20	20	20	20	20
<b>Anteile</b>						
fossil	100%	83%	73%	63%	44%	25%
regenerativ	0%	17%	27%	37%	56%	75%
<b>gesamt</b>						
fp	0,70	0,61	0,57	0,52	0,42	0,33
eCO <sub>2</sub>	260	218	195	172	126	80

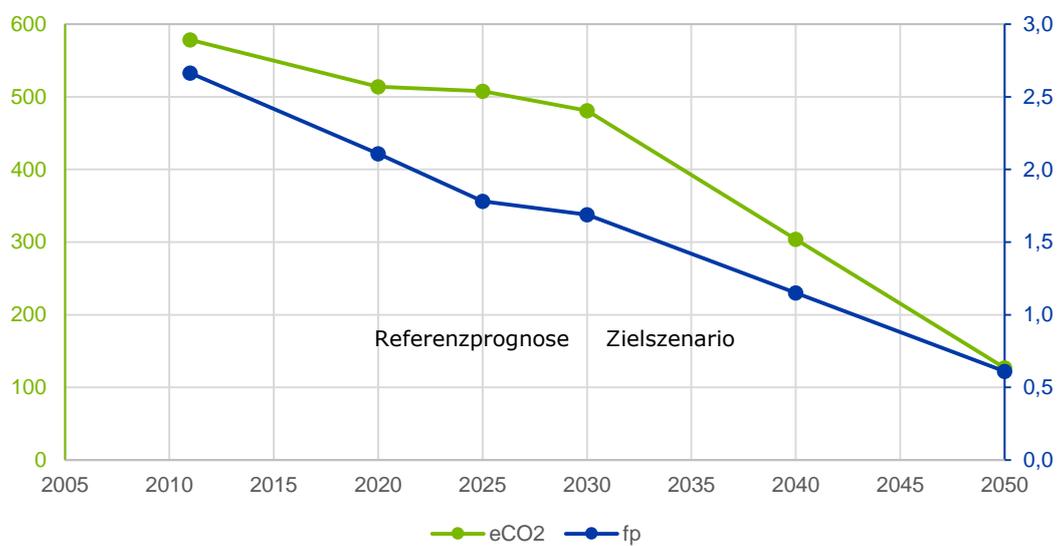


Abbildung 8-6: Angenommene Entwicklung des Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für Strom (Quelle: Energieträgersplit und Kraftwerkspark nach [BMW<sub>i</sub> 2014], verknüpft mit den Vorketten gemäß Gemis 4.8).

### Sanierungsraten und Effizienzklassen

Die angenommenen Sanierungsraten sowie die Verteilung auf die Effizienzklassen sind in Tabelle 8-14 bis Tabelle 8-15 angegeben.

Tabelle 8-14: Sanierungsraten und Anteil Effizienzklassen für den Pfad „Trend“

	2014	2020	2030	2040	2050
<b>Außenwände</b>	0,7%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Anteil Eff0	30%	29%	26%	23%	20%
Anteil Eff1	65%	63%	59%	54%	50%
Anteil Eff2	5%	9%	16%	23%	30%
<b>Dächer/OGD</b>	1,5%	1,8%	2,1%	2,1%	2,1%
Anteil Eff0	30%	29%	26%	23%	20%
Anteil Eff1	65%	63%	59%	54%	50%
Anteil Eff2	5%	9%	16%	23%	30%
<b>Keller/-decken</b>	0,3%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%
Anteil Eff0	30%	29%	26%	23%	20%
Anteil Eff1	65%	63%	59%	54%	50%
Anteil Eff2	5%	9%	16%	23%	30%
<b>Fenster</b>	1,4%	1,7%	2,0%	2,0%	2,0%
Anteil Eff0	30%	29%	26%	23%	20%
Anteil Eff1	65%	63%	59%	54%	50%
Anteil Eff2	5%	9%	16%	23%	30%
<b>Anlagentechnik</b>	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%

Tabelle 8-15: Sanierungsraten und Anteil Effizienzklassen für die Pfade „Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“

	2014	2020	2030	2040	2050
<b>Außenwände</b>	0,7%	1,0%	1,4%	1,4%	1,4%
Anteil Eff0	30%	27%	21%	16%	10%
Anteil Eff1	65%	61%	54%	47%	40%
Anteil Eff2	5%	11%	24%	37%	50%
<b>Dächer/OGD</b>	1,5%	1,8%	2,1%	2,1%	2,1%
Anteil Eff0	30%	27%	21%	16%	10%
Anteil Eff1	65%	61%	54%	47%	40%
Anteil Eff2	5%	11%	24%	37%	50%
<b>Keller/-decken</b>	0,3%	0,6%	1,5%	1,5%	1,5%
Anteil Eff0	30%	27%	21%	16%	10%
Anteil Eff1	65%	61%	54%	47%	40%
Anteil Eff2	5%	11%	24%	37%	50%
<b>Fenster</b>	1,4%	2,0%	2,5%	2,5%	2,5%
Anteil Eff0	30%	27%	21%	16%	10%
Anteil Eff1	65%	61%	54%	47%	40%
Anteil Eff2	5%	11%	24%	37%	50%
<b>Anlagentechnik</b>	3,0%	3,6%	4,0%	4,0%	4,0%

Tabelle 8-16: Sanierungsraten und Anteil Effizienzklassen für die Pfade „Hocheffizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“

	2014	2020	2030	2040	2050
<b>Außenwände</b>	0,7%	1,3%	2,0%	2,0%	2,0%
Anteil Eff0	30%	20%	10%	10%	10%
Anteil Eff1	65%	40%	40%	28%	15%
Anteil Eff2	5%	40%	50%	63%	75%
<b>Dächer/OGD</b>	1,5%	1,8%	2,5%	2,5%	2,5%
Anteil Eff0	30%	20%	10%	8%	5%
Anteil Eff1	65%	40%	30%	20%	10%
Anteil Eff2	5%	40%	60%	73%	85%
<b>Keller/-decken</b>	0,3%	1,3%	2,5%	2,5%	2,5%
Anteil Eff0	30%	20%	10%	8%	5%
Anteil Eff1	65%	40%	30%	20%	10%
Anteil Eff2	5%	40%	60%	73%	85%
<b>Fenster</b>	1,4%	2,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Anteil Eff0	30%	20%	10%	8%	5%
Anteil Eff1	65%	40%	30%	20%	10%
Anteil Eff2	5%	40%	60%	73%	85%
<b>Anlagentechnik</b>	3,0%	3,6%	4,0%	4,0%	4,0%

### Qualitäten der Gebäudehülle

Für die Qualitäten der Bauteile der Gebäudehülle sind die U-Werte in Tabelle 8-17 dargestellt.

Tabelle 8-17: U-Werte Gebäudehülle. Wand = Außenwand

Szenario	Effizienz basic (Eff0)			
	Dach	Wand	Keller	Fenster
	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]
Sanierung - WG	0,31	0,37	0,39	1,60
Sanierung - NWG	0,31	0,37	0,39	1,60

Szenario	Effizienz plus (Eff1)				Hocheffizienz (Eff2)			
	Dach	Wand	Keller	Fenster	Dach	Wand	Keller	Fenster
	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]	[W/m²K]
Sanierung - WG	0,24	0,24	0,30	1,48	0,15	0,15	0,22	0,96
Neubau - WG	0,20	0,28	0,35	1,36	0,12	0,13	0,17	0,88
Sanierung - NWG	0,24	0,24	0,30	1,43	0,13	0,15	0,22	0,93
Neubau - NWG	0,20	0,28	0,35	1,33	0,11	0,13	0,17	0,87

### Annahmen zur Anlagentechnik

Die Verteilung der Jahr für Jahr eingesetzten Anlagentechnik für die Szenarien ist in Tabelle 8-18 dargestellt. Die Annahmen zu Lüftungsanlagen und Solarthermie sind in Tabelle 8-19 gegeben.

Tabelle 8-18: Verteilung von Heizungssystemen

Szenario	MW Datenbasis	Trend		Schwerpunkt EE-Wärme			
				Hocheffizienz		Effizienz	
				2013	2030	2050	2030
Heizungssystem	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Gas,BW	58,8%	46,0%	20,0%	40,0%	7,0%	27,0%	2,0%
Öl,BW	13,3%	10,0%	5,0%	5,0%	0,0%	5,0%	0,0%
Öl,NT	11,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
WN	2,5%	3,0%	3,0%	15,0%	25,0%	20,0%	35,0%
Biomasse	9,3%	20,0%	25,0%	20,0%	30,0%	30,0%	40,0%
EL_direkt	0,6%	2,0%	2,0%	5,0%	0,0%	5,0%	0,0%
WP,el,Boden	1,3%	5,1%	11,9%	3,4%	10,2%	3,4%	5,1%
WP,el,Luft	2,3%	9,9%	23,1%	6,6%	19,8%	6,6%	9,9%
WP_gas	0,0%	2,0%	5,0%	2,0%	5,0%	1,0%	5,0%
KWK	0,2%	2,0%	5,0%	3,0%	3,0%	2,0%	3,0%

Szenario	Schwerpunkt EE-Strom				Neubauten		
	Hocheffizienz		Effizienz		2013	2030	2050
	2030	2050	2030	2050			
Heizungssystem	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Gas,BW	30,0%	12,0%	30,0%	5,0%	58,0%	15,0%	0,0%
Öl,BW	5,0%	0,0%	5,0%	0,0%	6,0%	0,0%	0,0%
Öl,NT	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
WN	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	3,5%	20,0%	25,0%
Biomasse	10,0%	10,0%	10,0%	6,0%	9,0%	10,0%	20,0%
EL_direkt	5,0%	5,0%	5,0%	1,0%	2,0%	0,0%	0,0%
WP,el,Boden	13,6%	20,4%	13,6%	25,5%	19,5%	20,0%	20,0%
WP,el,Luft	26,4%	39,6%	26,4%	49,5%		30,0%	30,0%
WP_gas	2,0%	5,0%	2,0%	5,0%	2,0%	2,0%	2,0%
KWK	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	0,0%	3,0%	3,0%

Tabelle 8-19: Anteil von Lüftungsanlagen und Solarthermie

Szenario	2013	Trend		Schwerpunkt EE-Wärme			
		2030	2050	Hocheffizienz		Effizienz	
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
<b>Lüftungsanlage</b>	2,0%	5,0%	5,0%	30,0%	75,0%	20,0%	50,0%
davon mit WRG	25,0%	40,0%	50,0%	50,0%	75,0%	50,0%	75,0%
davon ohne WRG	75,0%	60,0%	50,0%	50,0%	25,0%	50,0%	25,0%
<b>Solarthermie</b>	24,0%	30,0%	30,0%	40,0%	50,0%	60,0%	80,0%
davon WW+HS Unterst.	35,0%	45,0%	50,0%	50,0%	50,0%	75,0%	90,0%
davon WW Bereitung	65,0%	55,0%	50,0%	50,0%	50,0%	25,0%	10,0%

Szenario	2013	Schwerpunkt EE-Strom				Neubauten					
		Hocheffizienz		Effizienz		Wohngebäude			Nichtwohngebäude		
		2030	2050	2030	2050	2013	2030	2050	2013	2030	2050
Heizungssystem	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
<b>Lüftungsanlage</b>	2,0%	30,0%	75,0%	20,0%	50,0%	9%	60%	90%	60%	90%	
davon mit WRG	25,0%	50,0%	75,0%	50,0%	75,0%	18%	60%	80%	60%	80%	
davon ohne WRG	75,0%	50,0%	25,0%	50,0%	25,0%	82%	40%	20%	40%	20%	
<b>Solarthermie</b>	24,0%	30,0%	30,0%	30,0%	40,0%	28%	60%	75%	60%	75%	
davon WW+HS Unterst.	35,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	35%	75%	75%	75%	75%	
davon WW Bereitung	65,0%	50,0%	50,0%	50,0%	50,0%	65%	25%	25%	25%	25%	

### Annahmen KWK

Bei den im Modell abgebildeten dezentralen BHKW-Systemen (ohne KWK im Strommix) wird vereinfachend ein Gas-BHKW mit einem thermischen Wirkungsgrad von  $\eta_{th} = 50\%$  und einem elektrischen Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 35\%$  angenommen.

Für die zu Grunde gelegte „Exergie-Methode“ ergibt sich bei Annahme einer mittleren Umgebungstemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und einer Arbeitstemperatur von  $90^\circ\text{C}$  der Carnot-Faktor für die Wärme (Carnot-Faktor für Strom gleich 1) zu

$$\eta_c = 1 - \frac{T_u}{T_A} = 1 - \frac{(273 + 20) \text{ K}}{(273 + 90) \text{ K}} = 0,19$$

und der Allokationsfaktor für Strom zu

$$a_{el} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{el} + \eta_c \eta_{th}} = \frac{0,35}{0,35 + 0,19 * 0,50} = 0,79$$

sowie der Allokationsfaktor für Wärme zu

$$a_{th} = \frac{\eta_c \eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_c \eta_{th}} = \frac{0,19 * 0,50}{0,35 + 0,19 * 0,50} = 0,21.$$

Vergleiche hierzu auch die Ausführungen in Pehnt [2010] und [Hertle et al. 2013]. Im Berechnungsmodell werden nur die Allokationsanteile für die Wärmeproduktion entsprechend berücksichtigt, da für den Strommix separate Annahmen getroffen werden.

### Annahmen Deckungsraten Kühlenergiebedarfe

Im Rahmen dieses Projektes wird in Anlehnung an [Bettgenhäuser et al. 2011] angenommen, dass die Kühlenergiebedarfe bei Nichtwohngebäuden zu 100 % gedeckt werden. Für Wohngebäude wird eine aktuelle Deckungsrate von 2 % angesetzt, die sich bis zum Jahr 2050 auf 10 % erhöht.

Tabelle 8-20: Übersicht wesentlicher Parameter der Transformationspfade

<b>Heizwärmebedarfe</b>						
<b>TWh/a</b>	<b>2008</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	692	655	605	502	406	321
Effizienz plus EE-Wärme	692	653	603	484	371	275
Effizienz plus EE-Strom	692	653	603	483	365	264
Hocheffizienz plus EE-Wärme	692	655	600	450	306	201
Hocheffizienz plus EE-Strom	692	653	597	445	296	182

<b>Endenergie Heizen</b>						
<b>TWh/a</b>	<b>2008</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	713	671	615	500	391	297
Effizienz plus EE-Wärme	713	669	613	484	363	262
Effizienz plus EE-Strom	713	669	607	452	310	200
Hocheffizienz plus EE-Wärme	713	671	610	450	298	190
Hocheffizienz plus EE-Strom	713	669	601	418	257	148

<b>Endenergie gesamt</b>						
<b>TWh/a</b>	<b>2008</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	797	758	704	590	480	382
Effizienz plus EE-Wärme	796	756	703	575	453	351
Effizienz plus EE-Strom	797	756	696	542	397	284
Hocheffizienz plus EE-Wärme	797	758	700	541	389	281
Hocheffizienz plus EE-Strom	796	756	691	509	346	233

<b>Primärenergie nicht erneuerbar gesamt</b>						
<b>TWh/a</b>	<b>2008</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	857	791	710	560	411	280
Effizienz plus EE-Wärme	857	789	703	517	336	197
Effizienz plus EE-Strom	857	788	706	528	350	205
Hocheffizienz plus EE-Wärme	857	790	704	504	312	175
Hocheffizienz plus EE-Strom	857	789	702	500	307	169

<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>						
<b>Gt/a</b>	<b>2008</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	208	193	174	139	100	65
Effizienz plus EE-Wärme	208	192	173	131	84	46
Effizienz plus EE-Strom	208	192	173	133	85	47
Hocheffizienz plus EE-Wärme	208	193	173	127	77	40
Hocheffizienz plus EE-Strom	208	192	172	126	75	38

<b>Investitionen gesamt</b>					
<b>Mrd. €/a</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	46,2	50,9	48,4	45,6	43,3
Effizienz plus EE-Wärme	46,2	53,1	56,9	54,7	53,1
Effizienz plus EE-Strom	46,4	54,6	59,4	56,4	53,6
Hocheffizienz plus EE-Wärme	46,2	56,9	67,6	65,0	63,9
Hocheffizienz plus EE-Strom	46,4	58,5	70,2	65,4	61,1

<b>Energiekosten gesamt</b>					
<b>Mrd. €/a</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	62,3	67,2	72,8	60,3	49,5
Effizienz plus EE-Wärme	62,1	67,2	71,4	57,3	45,4
Effizienz plus EE-Strom	62,1	67,2	71,2	56,6	44,2
Hocheffizienz plus EE-Wärme	62,3	67,0	67,7	50,6	38,5
Hocheffizienz plus EE-Strom	62,1	66,7	66,9	49,6	36,7

<b>Jahresgesamtkosten differenz zu TREND</b>					
<b>%</b>	<b>2014</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Pfad "Trend"	100%	100%	100%	100%	100%
Effizienz plus EE-Wärme	100%	100%	101%	102%	102%
Effizienz plus EE-Strom	100%	101%	102%	103%	104%
Hocheffizienz plus EE-Wärme	100%	100%	100%	102%	105%
Hocheffizienz plus EE-Strom	100%	100%	101%	103%	105%