

# Management Summary

## Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern

Dezember 2011

**Dr. Hartmut Krause, Frank Erler**

DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg

**Wolfgang Köppel**

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie

**Markus Fischer**

Gaswärme-Institut e.V. Essen

**Dr. Patrick Hansen, Dr. Peter Markewitz, Dr. Wilhelm Kuckshinrichs, Prof. Jürgen-Fr. Hake**

Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und  
Technologische Entwicklung

## Management Summary

### **Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern – Einfluss moderner Gastechnologien in der häuslichen Energieversorgung auf Effizienz und Umwelt** **G 5/04/09-TP2**

#### Kernaussage:

Bei der häuslichen Energieversorgung können durch den vermehrten Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen in privaten Haushalten und eine verstärkte Nutzung von Biogas sowie anderen regenerativen Brenngasen im Vergleich zu den Vorgaben des Energiekonzeptes der Bundesregierung deutliche Kostenvorteile bei gleicher Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion erzielt werden.

---

Die Studie untersucht, ob für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung der privaten Haushalte Alternativen zum Energiekonzept der Bundesregierung bestehen, mit denen sich vergleichbare Emissionseinsparungen bei möglicherweise geringeren Kosten erzielen lassen. Daher werden u.a. die Kernelemente der DVGW-Innovationsoffensive Gastechnologien in Form eines Szenarios abgebildet und deren mögliche Auswirkungen im Vergleich zu den Maßnahmen des Energiekonzepts der Bundesregierung untersucht.

Als Referenzentwicklung wurde das **Szenario Trend** entwickelt, das die aktuellen politischen Instrumente zur Gebäudesanierung und die heutige energetische Sanierungsrate von einem Prozent fortschreibt. An dieser Trendprojektion werden die anderen definierten Szenarien gespiegelt. Als Szenarienhorizont ist der Zeitraum bis zum Jahr 2050, dem Zieljahr des Energiekonzepts der Bundesregierung, definiert. Die Analyse umfasst nur den Wohngebäudebereich der privaten Haushalte und liefert kein geschlossenes Bild, das alle Energiesektoren umfasst. Das Szenario Trend ist im Sinne einer „business as usual“-Entwicklung zu interpretieren. Im **Szenario Energiekonzept** werden die im Energiekonzept enthaltenen Maßnahmen und Instrumente simuliert, mit denen bis zum Jahr 2050 ein klimaneutraler Wohngebäudebestand erreicht werden soll. Wesentliches Kernelement ist die Erhöhung der energetischen Sanierungsrate entlang eines Sanierungsfahrplans u.a mit einer Verdoppelung der Sanierungsrate auf zwei Prozent. Im **Szenario Innovationsoffensive Gas** werden die wesentlichen Kernelemente der Innovationsoffensive des DVGW abgebildet. Dies sind vor allem ein verstärkter Einsatz gasbasierter Heizungssysteme, insbesondere Mikro-KWK-Anlagen, sowie eine deutlich höhere Zumischung von erneuerbaren, CO<sub>2</sub>-freien Gasen (wie Biogas, Wasserstoff etc.). Flankiert werden die

Maßnahmen von einer energieeffizienten Sanierung der Gebäudehülle wie im Szenario Trend.

Mit der Fortschreibung des Trends (Szenario Trend) werden die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele nicht erreicht. In den beiden Szenarien "Energiekonzept" und "Innovationsoffensive Gas" wird deshalb in dieser Studie ermittelt, mit welchem Zusatzaufwand und welchen Maßnahmen in diesen beiden Szenarien eine CO<sub>2</sub>-Emissionsreduzierung gegenüber dem Trend-Ergebnis erreicht werden kann, um im Jahr 2050 die CO<sub>2</sub>-Ziele für diesen Verbrauchssektor in etwa zu erreichen. Das Untersuchungsergebnis ist also ein Differenzvergleich mit dem Szenario "Trend".

In allen Szenarien nehmen der Energieverbrauch und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich ab. So erreicht bereits im Szenario Trend im Jahr 2050 der spezifische Raumwärme- und Warmwasserverbrauch einen Wert von ca. 100 kWh/m<sup>2</sup>a (gesamter Wohngebäudebestand), der gegenüber heute um über 40 Prozent niedriger ist. Die vergleichbaren Werte für die Szenarien Energiekonzept sowie Innovationsoffensive Gas liegen mit 55 bzw. 78 kWh/m<sup>2</sup>a deutlich darunter und verdeutlichen die effizienzsteigernden Wirkungen der jeweils unterstellten Maßnahmen. Die Berechnungen zeigen, dass mit den Maßnahmen der Szenarien Energiekonzept sowie Innovationsoffensive Gas (unter Einbeziehung von Mikro-KWK-Anlagen) erhebliche Emissionseinsparungen erwartet werden, die im Jahr 2050 zu einem nahezu klimaneutralen Wohngebäudebestand führen würden. In beiden Szenarien wird die Forderung nach einer primärenergie- und emissionsseitigen Einsparung von 80 Prozent bis zum Jahr 2050 (gegenüber 1990) erreicht.

Vergleicht man die über den Betrachtungszeitraum (2010-2050) kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen, fallen diese für das Szenario Energiekonzept um etwa 80 Mio. t höher aus als im Szenario Innovationsoffensive Gas. Der Vergleich beider Szenarien zeigt allerdings, dass die Investitions- und aufsummierten Energiekosten des Szenarios Energiekonzept deutlich höher liegen als im Szenario Innovationsoffensive Gas. Dies ist durch die relativ teuren und zum großen Teil außerhalb des gewöhnlichen Renovierungszyklus zu ergreifenden gebäudeseitigen Effizienzmaßnahmen zu erklären. Die eingesparten Energiekosten können die höheren Investitionskosten nicht annähernd kompensieren. Insgesamt errechnen sich über den gesamten Zeitraum für das Szenario Energiekonzept spezifische Vermeidungskosten gegenüber dem Szenario Trend in Höhe von ca. 120 €/t CO<sub>2</sub> und für das Szenario Innovationsoffensive Gas 6 €/t CO<sub>2</sub>.

Mit einer vorgezogenen Steigerung der energetischen Sanierungsrate von 1,0 Prozent auf 1,5 Prozent im Jahr 2020 könnte im Szenario Innovationsoffensive Gas die gleiche kumulierte Einsparung direkter Emissionen erzielt werden wie im Szenario Energiekonzept. Dies wäre allerdings mit höheren Investitionen verbunden. Die spe-

zifischen Vermeidungskosten liegen selbst in diesem Fall mit etwa 30 €/t CO<sub>2</sub> immer noch deutlich unter dem Wert des Szenarios Energiekonzept. Der vermehrte Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen führt im Szenario Innovationsoffensive Gas zu einer nennenswerten Stromerzeugung, die im Jahr 2050 etwa 25 TWh beträgt. Die hierdurch substituierte Strommenge im Umwandlungsbereich ist dem Haushaltssektor emissions- und kostenseitig gutzuschreiben. Die Emissionsgutschrift liegt in Abhängigkeit von der substituierten konventionellen Technik in einer Bandbreite von jährlich 1,8 bis 19,7 Mio. t CO<sub>2</sub>.



# Studie

## Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern

13. Dezember 2011

**Dr. Hartmut Krause, Frank Erler**

DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg

**Wolfgang Köppel**

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie

**Markus Fischer**

Gaswärme-Institut e.V. Essen

**Dr. Patrick Hansen, Dr. Peter Markewitz, Dr. Wilhelm Kuckshinrichs, Prof. Jürgen-Fr. Hake**

Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und  
Technologische Entwicklung

## **Studie**

**Bewertung der Energieversorgung  
mit leitungsgebundenen gasförmigen  
Brennstoffen im Vergleich  
zu anderen Energieträgern**

**Einfluss moderner Gastechnologien  
in der häuslichen Energieversorgung auf  
Effizienz und Umwelt**

**Abschlussbericht  
DVGW-Förderzeichen G 5/04/09-TP2**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Begriffe .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Motivation und Zielstellung .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Aktuelle Szenarienanalysen .....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Methodologie der Szenarienentwicklung und Szenariendefinition.....</b>	<b>15</b>
5.1	Vorbemerkungen.....	15
5.2	Szenario Trend.....	16
5.3	Szenario Energiekonzept .....	17
5.4	Szenario Innovationsoffensive Gas .....	18
5.5	Festlegung der zu berücksichtigenden Maßnahmen.....	18
<b>6</b>	<b>Einsatz des Nachfragemodells.....</b>	<b>26</b>
6.1	Methodik.....	26
6.2	Leitparameter für die Berechnung .....	27
6.3	Berechnung von Maßnahmen .....	30
6.4	Bewertung von Maßnahmen .....	32
<b>7</b>	<b>Rahmendaten.....</b>	<b>34</b>
7.1	Energetischer Zustand des Wohngebäudebestandes 2009 .....	34
7.1.1	Wärmetechnischer Ausgangszustand und Gebäudedaten .....	34
7.1.2	Energiebedarf und Nachfrage .....	36
7.1.3	Bestand an Heizungstechnologien .....	39
7.2	Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung .....	41
7.3	Entwicklung der Wohnflächennachfrage .....	42
7.3.1	Bestandsveränderungen .....	44
7.3.2	Energetische Sanierungsraten .....	46
7.4	Entwicklung der Heiztechnologien.....	47
7.4.1	Generelles Vorgehen zur Nutzungsgradermittlung der berücksichtigten Heiztechnologien .....	47
7.4.2	Berücksichtigte Technologien .....	48

7.4.3	Anlagennutzungsgradermittlung für das EFH.....	53
7.4.4	Anlagennutzungsgradentwicklung für das MFH .....	56
7.4.5	Systemkosten.....	58
7.4.6	Austausch von Heizungssystemen.....	62
7.5	Zusammensetzung des Energieträgers Gas im Erdgasnetz .....	67
7.5.1	Entwicklung des Mix gasförmige Energieträger .....	68
7.5.2	Entwicklung der Energiepreise.....	78
7.6	CO <sub>2</sub> -Footprint und Gesamteffizienz der Energieträger .....	82
7.6.1	Allgemeine Grundsätze .....	82
7.6.2	Methodik.....	82
7.6.3	Brennstoffe .....	84
7.6.4	Strommix .....	84
7.6.5	Nah- und Fernwärmemix.....	91
<b>8</b>	<b>Vergleich und Bewertung der Szenarienergebnisse .....</b>	<b>96</b>
8.1	Allgemeine Vorbemerkungen .....	96
8.2	Energetischer Vergleich .....	97
8.2.1	Vergleich der Basisszenarien.....	97
8.2.2	Sensitivitätsanalysen.....	102
8.3	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	107
8.3.1	Vergleich der direkten CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	107
8.3.2	Sensitivitätsanalysen.....	111
8.3.3	Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen unter Berücksichtigung der Vorketten.....	113
8.4	Kostenvergleich.....	116
8.4.1	Kostenmethodik.....	116
8.4.2	Vergleich der Szenarien Trend, Energiekonzept und Innovationsoffensive.....	117
8.4.3	Sensitivitätsanalysen.....	119
8.5	Interpretation der Ergebnisse .....	127
<b>9</b>	<b>Zielgruppenorientierte Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>133</b>
9.1	Politische Entscheidungsträger .....	133
9.2	Entscheidungsträger in der Energieversorgung .....	136
9.3	Private Verbraucher, Haushalte .....	137

<b>10</b>	<b>Forschungsbedarf .....</b>	<b>139</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>141</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>144</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>148</b>

# 1 Zusammenfassung

Etwa 30 % des deutschen Erdgasverbrauchs werden derzeit für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser in den privaten Haushalten eingesetzt. Der Erdgasabsatz für die privaten Haushalte stellt somit eine wichtige Säule der derzeitigen Gaswirtschaft dar. Die Bundesregierung beabsichtigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie den Energieverbrauch zu senken. Insbesondere im Gebäudebereich wird ein erhebliches Einsparpotenzial gesehen. Nach dem Energiekonzept der Bundesregierung soll dies im Wesentlichen mit Maßnahmen gehoben werden, die auf die Verbesserung der Energieeffizienz insbesondere der Gebäudehülle abzielen.

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen Szenarien analysiert, die zum einen das Energiekonzept der Bundesregierung abbilden. Zum anderen werden aber auch die alternativen Pfade und Optionen abgebildet, mit denen die Zielsetzungen der Bundesregierung erreicht werden können. Als Szenarienhorizont wird ein Zeitraum bis zum Jahr 2050 festgelegt. Folgende Szenarien wurden betrachtet:

- Im **Szenario Trend** wird davon ausgegangen, dass die derzeit implementierten Maßnahmen fortgeschrieben werden. Das Szenario Trend ist im Sinne einer „Business as Usual“ Entwicklung zu interpretieren.
- Im **Szenario Energiekonzept** werden die im Energiekonzept enthaltenen Maßnahmen und Instrumente simuliert, mit denen bis zum Jahr 2050 ein klimaneutraler Wohngebäudebestand erreicht werden soll. Wesentliches Kernelement ist die Erhöhung der energetischen Sanierungsrate entlang eines Sanierungsfahrplans.
- Im **Szenario Innovationsoffensive Gas** werden die wesentlichen Kernelemente der Innovationsoffensive des DVGW abgebildet. Dies sind vor allem ein verstärkter Einsatz gasbasierter Heizungssysteme, insbesondere Mikro-KWK-Anlagen, sowie eine deutlich höhere Zumischung von erneuerbaren Gasen (wie Biogas, Wasserstoff etc.). Flankiert werden diese Maßnahmen von einer energieeffizienten Sanierung der Gebäudehülle wie im Szenario Trend.

Die zugrunde gelegten Rahmendaten wie Energiepreise etc. orientieren sich stark an den von der Bundesregierung in Auftrag gegebenen Energieszenarien, die eine Grundlage für das im Jahr 2010 veröffentlichte Energiekonzept bilden. Für die emissions-, energie- und kostenseitige Analyse der Szenarien wird ein Simulationsmodell eingesetzt, das den Wohngebäudebestand der privaten Haus-

halte mit der Gebäudehülle, seinen Heizungssystemen und dem Nutzerverhalten in Jahresschritten abbildet. Die datenseitige Beschreibung der Heizungssysteme basiert auf der Studie Systemanalyse I [SYST2010a-c], die vom DVGW im Jahr 2009 in Auftrag gegeben wurde und als Vorläuferstudie für die vorliegende Untersuchung gesehen werden kann. In dieser Untersuchung wurde u.a. eine sehr fundierte datenseitige Beschreibung der Heizungssysteme erarbeitet. Gegenüber anderen vergleichbaren gebäudespezifischen Untersuchungen ermöglicht sie darüber hinaus die gebäudespezifische Zuordnung bzw. Kombination mit geeigneten Heizungssystemen.

Einen besonderen Schwerpunkt der Studie stellt die Analyse der Möglichkeiten der Zumischung von Gasen aus erneuerbaren Energieträgern dar. Während sie in den Szenarien Trend und Energiekonzept eine eher untergeordnete Rolle spielt, stellen sie im Szenario Innovationsoffensive ein Kernelement dar. So beträgt die Zumischung in diesem Szenario im Jahr 2050 etwa 56 %. D.h. der Anteil konventionellen Erdgases liegt bei 44 %. Die vergleichbaren Anteile der zugemischten Gase der anderen Szenarien betragen etwa 6 % (Trend) bzw. ca. 34 % (Energiekonzept). Die Potenziale wurden unter Berücksichtigung der gesamten Gaswirtschaft und somit aller möglichen Gasabnehmer ermittelt. Für die jeweiligen Gasgemische wurden Verbraucherpreise berechnet, die auch die Produktionskosten der jeweiligen zugemischten Gase (Wasserstoff, Biogas, SNG) implizieren. Erwartungsgemäß sinken die spezifischen Emissionen des Gasgemisches des Szenarios Innovationsoffensive Gas im Vergleich zu konventionellem Erdgas bis zum Jahr 2050 um ca. 60 %, allerdings liegt der verbraucherseitige Preis um etwa 45 % höher.

In allen Szenarien nehmen der Energieverbrauch und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich ab. Die Berechnungen zeigen, dass mit den Maßnahmen der Szenarien Energiekonzept und Innovationsoffensive Gas (unter Einbeziehung von Mikro-KWK-Anlagen) erhebliche Emissionseinsparungen ausgelöst werden, die im Jahr 2050 zu einem klimaneutralen Wohngebäudebestand führen würden. Auch wird in beiden Szenarien die Forderung der Bundesregierung einer primärenergie- und emissionsseitigen Einsparung von 80 % bis zum Jahr 2050 (gegenüber 1990) erreicht. Vergleicht man die über den Betrachtungszeitraum (2010 – 2050) kumulierten direkten Emissionseinsparungen in den Haushalten, fallen diese für das Szenario Energiekonzept mit etwa 77 Mio. t (ca. 14 %) höher aus als im Szenario Innovationsoffensive Gas. Der kostenseitige Vergleich beider Szenarien zeigt allerdings, dass die kumulierten Mehrkosten des Szenarios Energiekonzepts um ein Vielfaches (ca. 24-fach) höher als im Szenario Innovationsoffensive Gas liegen, was durch die relativ teuren und hauptsächlich außerhalb des Renovierungszyklus zu ergreifenden gebäudeseitigen Effizienz-

maßnahmen zu erklären ist. Die eingesparten Energiekosten vermögen die Investitionskosten nicht annähernd zu kompensieren. Insgesamt errechnen sich über den gesamten Zeitraum (2010 – 2050) für das Szenario Energiekonzept spezifische Vermeidungskosten (gegenüber dem Szenario Trend) in Höhe von ca. 120 €/t CO<sub>2</sub> und für das Szenario Innovationsoffensive Gas 6 €/t CO<sub>2</sub>. Mit einer etwas vorgezogenen Erhöhung der Sanierungsrate könnte im Szenario Innovationsoffensive Gas eine gleiche kumulierte Einsparung direkter CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielt werden. Dies wäre allerdings mit höheren Investitionen verbunden. Die spezifischen Vermeidungskosten liegen selbst in diesem Fall mit etwa 30 €/t CO<sub>2</sub> immer noch deutlich unter dem Wert des Szenarios Energiekonzept.

Der vermehrte Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen führt im Szenario Innovationsoffensive Gas zu einer nennenswerten Stromerzeugung, die im Jahr 2050 etwa 25 TWh beträgt. Die hierdurch substituierte Strommenge im Umwandlungsbereich ist in dem Haushaltssektor emissions- und kostenseitig gutzuschreiben. Die Emissionsgutschrift liegt in Abhängigkeit von der substituierten konventionellen Technik in einer Bandbreite von 1,8 bis 19,7 Mio. t CO<sub>2</sub>.

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass eine Änderung der energetischen Sanierungsrate sowie der Potenzialausnutzung die größten energie-, emissions- und kostenseitigen Auswirkungen besitzt. Diese Parameter haben in allen Szenarien einen sehr starken Einfluss. Im Szenario Energiekonzept stellt sie aufgrund des ambitionierten Sanierungsfahrplans die entscheidende Maßnahme dar, um die primär- und emissionsseitigen Ziele der Bundesregierung zu erreichen. Ließe sich dieser ambitionierte Sanierungsfahrplan, bedingt durch eine mangelnde Akzeptanz in der Bevölkerung, nicht durchsetzen, würde dies in Ermangelung von Alternativen zu einer sehr weiten Verfehlung der Zielstellung führen.

Eine Aussage über die vollständigen CO<sub>2</sub>-Emissionen der in den Szenarien eingesetzten Energieträger erfordert eine Berücksichtigung der vorgelagerten Versorgungsketten, die über den Bilanzraum privater Haushalte und somit der ausschließlichen Betrachtung der direkten Emissionen hinausgeht. Unter Berücksichtigung der Vorketten der eingesetzten Energieträger für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung beträgt die kumulierte CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung (Vorkette und direkte Emissionen) über den gesamten Zeithorizont (2010 – 2050) etwa 963 Mio. t im Szenario Energiekonzept, während sie mit 776 Mio. t im Szenario Innovationsoffensive Gas um etwa 187 Mio. t (19,4 %) geringer ausfällt. Auch bei einer etwas vorgezogenen Erhöhung der Sanierungsrate im Szenario Innovationsoffensive Gas fällt die kumulierte Emissionseinsparung immer noch um ca. 97 Mio. t (9,3 %) geringer aus, was im Wesentlichen auf den höheren



Energieeinsatz und den damit verbundenen Mehremissionen der vorgelagerten Ketten zurückzuführen ist. Werden in Analogie zu den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen die spezifischen Vermeidungskosten unter Einbeziehung der Vorketten berechnet, so resultieren bei jeweils unveränderten Gesamtkosten durch die höheren CO<sub>2</sub>-Einsparungen veränderte spezifische Vermeidungskosten. Im Szenario Energiekonzept betragen diese ca. 78 €/t CO<sub>2</sub>, im Szenario Innovationsoffensive Gas ca. 4 €/t CO<sub>2</sub> und für den Fall der etwas vorgezogenen Erhöhung der Sanierungsrate im Szenario IS 3 ca. 22 €/t CO<sub>2</sub>. D.h., dass durch die Einbeziehung der Emissionen der Vorketten die Vorteilhaftigkeit der Innovationsoffensive hinsichtlich der spezifischen Vermeidungskosten bestätigt bleibt.

Sowohl die Umsetzung des Energiekonzepts als auch die Umsetzung der Maßnahmen, wie sie in der Innovationsoffensive gefordert werden, vollziehen sich nicht autonom. Hierfür sind entsprechende Rahmenbedingungen zu schaffen. Hier sind sowohl Entscheidungsträger aus der Politik als auch aus der Wirtschaft gefragt. Die Handlungsfelder der Entscheidungsträger aus der Politik erstrecken sich von der Schaffung von Anreizsystemen bis hin zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen. Die Wirtschaft hat dafür Sorge zu tragen, dass die technischen Voraussetzungen für eine Implementierung gegeben sind, von der Entwicklung marktreifer Techniken bis hin zur Ausbildung der Marktpartner (z.B. Installateure), die für eine Markteinführung unerlässlich sind. Basis stellt jedoch die konsequente Ausrichtung der jeweiligen Unternehmensstrategien dar, was insbesondere für die neuen Geschäftsfelder Erzeugung, Verteilung und Bereitstellung erneuerbarer Gase gilt.

## 2 Begriffe

### CO<sub>2</sub>-Emissionen:

Unter diesem Begriff werden die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Energieträgers verstanden. Dies kann sowohl CO<sub>2</sub> aus dem chemisch gebundenen Kohlenstoff als auch CO<sub>2</sub> aus Verlusten durch Umwandlung und Transport auf dem Weg zwischen Quelle und Endverbraucher beinhalten.

### Mikro-KWK-Systeme:

Mit Mikro-KWK werden nach aktueller Normen- und Richtliniendefinition Systeme bestehend aus KWK-Einheit und einem möglichen Zusatzheizgerät bezeichnet, die eine Brennstoffleistung von 70 kW nicht überschreiten.

### Biogas:

Als Biogas wird in diesem Bericht aus Biomasse und organischen Reststoffen fermentativ erzeugtes und auf Erdgasqualität aufbereitetes Gas bezeichnet. Alternative Begriffe sind Biomethan und Bioerdgas.

### SNG:

Bezeichnet synthetisch erzeugtes Erdgas aus thermochemischen Erzeugungsprozessen auf der Basis von Biomasse, vorzugsweise Holz.

### NawaRo:

Bezeichnet nachwachsende Rohstoffe, wie Energiepflanzen, landwirtschaftliche Reststoffe u. ä.

### Wirkungsgrad:

Als Wirkungsgrad wird in diesem Vorhaben, wie in der Heizungsbranche üblich, die vom Hersteller angegebene Energieeffizienz einer Heizungsanlage beschrieben. Der Wirkungsgrad ist dabei der Quotient aus Nutzenergie (Wärme oder Strom) und der eingesetzten Endenergie (Gas, Heizöl, Strom etc.) als Heizwert in einem stationären Betriebszustand bei Nennleistung des Systems. Gemäß dieser Vereinbarung kann der Wirkungsgrad einen Wert von über 100 % aufweisen.

### Nutzungsgrad:

Der Nutzungsgrad eines Heizungssystems (auch Systemnutzungsgrad) bezeichnet die über einen Zeitraum errechnete durchschnittliche Gesamteffizienz eines Heizungssystems als Quotient aus Nutzenergie (Wärme oder Strom) und der eingesetzten Endenergie (Gas, Heizöl,

Strom etc.) als Heizwert. Das Heizungssystem kann aus verschiedenen Modulen zur Wärme- und Strombereitstellung bestehen.

#### Energetische Sanierungsrate:

Die jährliche Sanierungsrate legt den Anteil der Wohnfläche fest, der aufgrund der technischen Lebensdauer der Bauteile der Gebäudehülle zu sanieren ist. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Instandhaltungsarbeiten, die zu keiner energetischen Verbesserung beitragen und energetischen Sanierungen gemäß den Vorgaben der gültigen Energie-Einsparverordnung (EnEV). In der vorliegenden Arbeit bezieht sich die energetische Sanierungsrate und somit der Anteil der jährlich zu sanierenden Fläche auf den Wohnflächenbestand bis einschließlich 1994.

### 3 Motivation und Zielstellung

Ziel des im Rahmen der DVGW-Innovationsoffensive Gas gestarteten Projektes ist die Erarbeitung einer Gesamtanalyse für die zukünftige Gasversorgung von Wohngebäuden und der darauf basierenden Energiebereitstellung im Vergleich zu anderen Energieträgern und zu bestehenden Versorgungsinfrastrukturen. Der Fokus richtet sich hierbei auf den privaten Wohngebäudesektor, der derzeit ca. 20 % des gesamten deutschen Endenergieaufkommens für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser bei einem Erdgasanteil von ca. 44 % verbraucht. [AGEB2011]

Motiviert durch politische Steuerungsinstrumente, wie beispielsweise die Subventionierung der energetischen Sanierung des Altbauwohngebäudebestandes oder die Vorgabe ordnungsrechtlicher Maßnahmen (z.B. EnEV, EEWärmeG) ist davon auszugehen, dass der Energieverbrauch für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser zukünftig insgesamt und damit auch der Erdgaseinsatz deutlich abnehmen wird. Vor diesem Hintergrund stellen sich aus Sicht der Gasversorgungswirtschaft verschiedene Fragen:

- Welche emissions-, energie- und kostenseitigen Auswirkungen sind bei einem forcierten Einsatz von gasbasierten KWK-Anlagen zu erwarten?
- Welche emissions- und kostenseitigen Auswirkungen sind zu erwarten, wenn gasförmige erneuerbare Energieträger, Erdgas und andere fossile Energieträger substituieren? Hierbei wird angestrebt, dass Biogas und synthetisches Erdgas SNG aus Biomasse erzeugt sowie elektrischer Überschussstrom in einen speicherbaren, leicht transportierbaren und gasförmigen Energieträger gewandelt wird und zu höchst möglichen Anteilen in die Erdgasinfrastruktur integriert wird.
- Wie hoch ist das Substitutionspotenzial? Eine andere Anwendungsmöglichkeit besteht in dem Einsatz von KWK-Anlagen für den Mini- und Mikrobereich, was eine zusätzliche Versorgungsaufgabe (Strom und Wärme) bedeutet.
- Welche anderen (weiteren) Erdgasanwendungen wären möglich, um die einsparbedingte Reduktion zu kompensieren? Prinzipiell besteht z. B. eine Möglichkeit darin, bestehende veraltete nicht auf Erdgas basierende Heizungssysteme durch erdgasbasierte Systeme zu substituieren.

Das Energiekonzept der Bundesregierung setzt u. a. auf eine forcierte energetische Sanierung des Altbaubestandes. Erfahrungsgemäß erfordert dies

einen hohen Investitionsaufwand. Eine mögliche Alternative der Emissionsreduktion wäre die Fortschreibung einer energetischen Gebäudesanierung, die einer Fortschreibung des Trends der letzten Jahre entspricht bei gleichzeitig erhöhtem Einsatz von gasbasierten Heizungssystemen. Vor diesem Hintergrund stellt sich neben den energie- und emissionsseitigen Folgen auch die Frage nach den kostenseitigen volkswirtschaftlichen Auswirkungen.

Für die Beantwortung dieser Fragen, wird ein vom Forschungszentrum Jülich entwickeltes Gebäudesimulationsmodell eingesetzt, das die dynamische Fortschreibung des deutschen Wohngebäudebestandes ermöglicht und mit dem eine Vielzahl von Maßnahmen (z.B. bauliche Maßnahmen, Austausch von Heizungstechniken) simuliert werden können. Mit Hilfe dieses Modells lassen sich die obigen Fragen hinsichtlich des Energieverbrauchs, der Kosten und der CO<sub>2</sub>-Emissionen beantworten. Um eine weitgehende Kompatibilität mit den Arbeiten der ersten Systemanalysestudie der DVGW-Innovationsoffensive Gastechnologien [SYST2010a-c] zu gewährleisten, werden die dort erarbeiteten Daten der Heizungstechniken den Modellrechnungen zugrunde gelegt und ein Abgleich der gebäudeseitigen Daten vorgenommen. Zusätzlich werden die Auswirkungen der Vorketten der Energieversorgung bis zum Hausanschluss der Gebäude einbezogen also deren CO<sub>2</sub>-Frachten und Kosten. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hier in der Berücksichtigung erneuerbarer gasförmiger Energieträger.

Die Analyse erfolgt mit Hilfe von Szenarien, deren Zeithorizont bis zum Jahr 2030 bzw. 2050 reicht. Eine detaillierte Analyse erfolgt für den Zeithorizont bis zum Jahr 2030 während für den Zeitraum danach ein Ausblick gegeben wird. Insgesamt werden drei Szenarien definiert, die eine hinreichende Beantwortung des skizzierten Fragenspektrums erlauben.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt aufgebaut: In einem ersten Schritt erfolgt eine Analyse bereits bestehender aktueller Szenarien, insbesondere vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung der vorliegenden Studie. Danach folgt eine ausführliche Beschreibung der Szenarien, die eine Erläuterung der zugrunde gelegten Rahmendaten, der implementierten gebäudeseitigen Maßnahmen sowie der Gebäude- und Heizungsstrukturen enthält. Daran schließt sich eine Beschreibung des Simulationsmodells an, die sowohl auf die Methodik und wichtige Modellparameter als auch auf die Datenschnittstelle zum ersten Systemanalyseprojekt der DVGW-Innovationsoffensive Gastechnologie eingeht. Danach erfolgt die Beschreibung der Simulationsrechnungen sowie der erzielten Ergebnisse, die auch einen Szenarienvergleich beinhaltet. Mit der Darstellung der emissionsseitigen Ergebnisse unter Berücksichtigung der Vorketten wird das Ergebniskapitel abgeschlossen. Mögliche Handlungsempfehlungen sowie das Aufzeigen eines weiteren Forschungsbedarfs bilden die Schlusskapitel der

vorliegenden Studie. Die Studie wurde vom Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung im Forschungszentrum Jülich (IEK-STE), dem DBI - Gastechnologischen Institut gGmbH Freiberg (DBI), dem Gas-Wärme-Institut e.V. Essen (GWI) sowie der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Institut für Technologie Karlsruhe (EBI) bearbeitet. Die Szenarienrechnungen wurden vom IEK-STE durchgeführt. Das GWI war für die Aufbereitung der heizungstechnischen Daten verantwortlich. Das EBI führte u. a. die Berechnungen zu den emissionsseitigen Vorketten durch. Das DBI war für den Datenabgleich der gebäudeseitigen Daten verantwortlich sowie für die Zusammensetzung und für die datenseitige Beschreibung der im Rahmen der Szenarien eingesetzten Gasgemische. Das Projekt wurde vom DBI koordiniert.

## 4 Aktuelle Szenarienanalysen

Bevor auf die im Rahmen des Vorhabens gerechneten Szenarien detailliert eingegangen wird, erfolgt eine kurze Darstellung bzw. Bewertung anderer aktueller Szenarien bzw. Prognosen. Hierbei wird der Fokus auf den Energieverbrauch der privaten Haushalte gelegt und speziell auf den Raumwärme- bzw. Warmwasserbedarf und deren Deckung eingegangen. Ziel ist es, die nachfolgenden eigenen Szenarienergebnisse einzuordnen und mögliche Unterschiede erklären zu können. Auf folgende aktuelle Szenarien wird im Nachfolgenden eingegangen:

- **Energieszenarien der Bundesregierung [EGP2010]**  
Die Energieszenarien wurden von der Bundesregierung im Auftrag gegeben, um szenarienbezogene Leitlinien für eine zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung für die Generierung eines Energiekonzepts zu erarbeiten. Das Energiekonzept der Bundesregierung wurde am 28. September 2010 veröffentlicht. Wesentliches Augenmerk bei den Szenarien, die einen Zeithorizont bis zum Jahr 2050 beschreiben, wurde auf die zukünftige Stromversorgung gelegt, indem verschiedene Kernenergievarianten und deren Auswirkungen analysiert wurden. Vergleicht man den Endenergieverbrauch der Haushalte der verschiedenen Kernenergieszenarien, sind keine großen Unterschiede festzustellen. Während es sich bei den Ausstiegsszenarien um Zielszenarien mit Treibhausgasemissionsreduktionsziele für 2020 (-40 %) und 2050 (-85 %) handelt, wurden bei dem Referenzszenario keine Reduktionsziele vorgegeben. Für den Szenarienvergleich wird daher im Nachfolgenden die Referenzentwicklung sowie das Zielszenario II heran gezogen.
- **Energieprognose 2009 [IRZ2009]**  
Während es sich bei den vorherigen Projektionen der Bundesregierung um Szenarien handelt, besitzt die Energieprognose einen stark prognostischen Charakter im Sinne einer Erwartungshaltung. Die Energieprognose besitzt große Tradition und wird in zeitlichen Abständen vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) in Auftrag gegeben. Die Energieprognose gilt für einen Zeitraum bis zum Jahr 2030 mit einem groben Ausblick bis zum Jahr 2050. Auch hier wurde der Kernenergieproblematik sowie den hohen Ölpreisen ein besonderes Augenmerk geschenkt und in Form von Sensitivitätsrechnungen berücksichtigt. Für den nachfolgenden Vergleich wird jedoch lediglich die Referenzprognose herangezogen.

**Tabelle 1:** Ausgewählte Rahmendaten aktueller Projektionen [EGP2010], [IRZ2009]

	<b>Energieszenarien</b>			<b>Energieprognose</b>	
<b>CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele</b>	2020: - 40 % 2050: - 85 %			2020: - 30 % 2030: - 40 %	
<b>Demographische Daten</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>
Bevölkerung (Mio.)	80,5	79,1	73,8	81,4	79,9
Anzahl der Haushalte (Mio.)	40,7	41	39,7	41,5	42
Wohnfläche (Mio. m <sup>2</sup> )	3530	3639	3653	3788	4015
Wohnfläche pro Kopf (m <sup>2</sup> )	43,9	46	49,5	46,4	50,5
Wohnfläche pro Haushalt (m <sup>2</sup> )	86,7	88,8	92	91,3	95,6
<b>Energiepreise (real)</b>					
Rohöl (\$/bbl)	97,5	110	130	69	75
Erdgas (€/MWh), H <sub>s</sub>	2,3	2,6	3,2	2,2	2,28
<b>Private Haushalte (inkl. Steuern, real)</b>					
Leichtes Heizöl (€/100 l)	82,1	97,6	133,5	61	65
Erdgas (ct/kWh), H <sub>s</sub>	7,2	7,8	9,1	7,6	7,8

Anmerkungen: Preisbasis Energieszenarien: 2008, Preisbasis Energieprognose: 2007

Tabelle 1 enthält einige der wichtigsten Rahmendaten, die den beiden Untersuchungen zugrunde liegen. Hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele unterscheiden sich die beiden Projektionen im zeitlichen Verlauf. So wird bei den Energieszenarien (mit Ausnahme des Referenzszenarios) bereits für das Jahr 2020 von einer Zielgröße von 40 % ausgegangen. Sowohl bei der Bevölkerungsentwicklung als auch bei der Anzahl der Haushalte bestehen nur relativ kleine Unterschiede. Allerdings variiert die angenommene Wohnflächenentwicklung beträchtlich. So liegt die Wohnfläche in absoluten Werten bei der Energieprognose in allen Jahren deutlich höher. Allerdings ist unklar, ob es sich wie im Fall der Energieszenarien um die bewohnte Wohnfläche (ohne Leerwohnungen) handelt. Auch der Anstieg der Wohnfläche ist im Fall der Energieprognose deutlich größer und deutet darauf hin, dass die Anzahl der Single-Haushalte, die mit einer höheren Wohnflächeninanspruchnahme einhergeht, deutlich ausgeprägter ist. Gravierende Unterschiede sind bei den Energiepreisprojektionen festzustellen. Während in den Energieszenarien ein starker Anstieg des Ölpreises angenommen wird, fällt der Ölpreisanstieg in der Energieprognose sehr moderat aus. Dies führt zu starken Unterschieden der Preisgerüste sowie der Verbraucherpreise. So liegt der Ölpreis der Energieszenarien im Jahr 2030 um ca. 60 % höher als bei der Energieprojektion. Dies



wiederum hat deutliche Auswirkungen auf die Entwicklung des Erdgaspreises sowie der verbraucherseitigen Energiepreise, wie Tabelle 1 verdeutlicht.

▪ **CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte**

In allen Szenarien und Projektionen ist ein deutlicher Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte festzustellen. Selbst für die Referenzentwicklungen ist ein Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen bezogen auf die Emissionen des Jahres 2008 von 42 % (Energierport) bzw. 33,6 % (Energieszenarien-Referenz) bis zum Jahr 2030 zu verzeichnen. Der Unterschied ist umso bemerkenswerter, da die Zielvorgaben bei den Energieszenarien im Zeitverlauf deutlich stringenter sind. Im weiteren zeitlichen Verlauf erfolgt eine weitere Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 54 % (Energieszenarien-Referenz) bzw. etwa 83 % bis zum Jahr 2050. Bemerkenswert erscheint auch die signifikante Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2020, die je nach Szenario in einer Bandbreite von ca. 20 bis 27 % liegt.

**Tabelle 2:** CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte (in Mio. t) in ausgewählten Projektionen, Quelle: [EGP2010], [IRZ2009], [ZIES2011], eigene Berechnungen

	2008	2020	2030	2040	2050
Energierport	104	76	60	-	-
Energieszenarien Referenz	104	83	69	57	48
Energieszenarien Zielszenario II	104	79	51	31	18

Da der Endenergieverbrauch und insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen der privaten Haushalte vornehmlich durch die Raumwärme- und Warmwassererzeugung verursacht werden, fokussiert sich die nachfolgende Szenarienauswertung auf diesen Bereich.

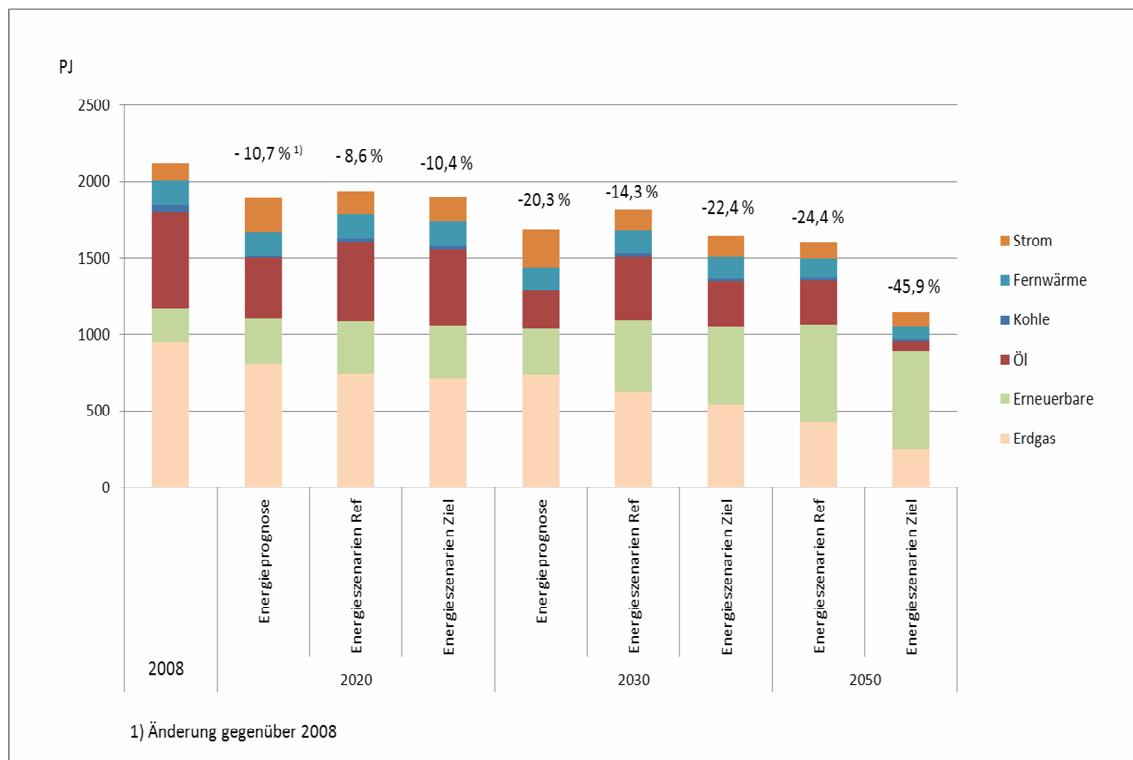
▪ **Energieträgereinsatz für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser**

In allen Szenarien ist der Energieeinsatz für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser stark rückläufig. Wie Abbildung 1 zeigt, unterscheiden sich die Szenarien sowohl hinsichtlich der Ausprägung des Rückgangs als auch in der Zusammensetzung der Energieträger im zeitlichen Verlauf. So differenziert sich der Energieverbrauch des Energierports von der Referenzentwicklung der Energieszenarien recht deutlich. Für das Jahr 2030 liegt der Rückgang gegenüber 2008 bei etwa 20 % (Energierport), während er mit 14 % bei der Referenzentwicklung der Energieszenarien deutlich niedriger ausfällt. Für das

betrachtete Zielszenario der Energieszenarien beträgt der vergleichbare Wert etwa 22 %. Hieraus lässt sich schließen, dass für das Jahr 2030 die gebäudeseitig ergriffenen Maßnahmen des Zielszenarios der Energieszenarien und die des Energiereports vergleichbar sind und in etwa die gleiche Wirkung entfalten. Allerdings ist der Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2030 im Zielszenario der Energieszenarien deutlich höher (vgl. Tabelle 2), da im Vergleich zum Energiereport deutlich mehr Erneuerbare Energien eingesetzt werden. Gegenüber 2008 reduziert sich der Energieverbrauch bis zum Jahr 2050 im Zielszenario um etwa 46 % während die Reduktion in der Referenzentwicklung mit 24 % deutlich moderater ausfällt. Tabelle 3 verdeutlicht die erheblichen zusätzlichen gebäudeseitigen Maßnahmen, die im Zielszenario ergriffen werden müssen. Die Tabelle enthält für die betrachteten Szenarien den spezifischen Raumwärmebedarf für den gesamten Wohngebäudebestand (Bestand und Neubau) im zeitlichen Verlauf. Danach liegt der spezifische Raumwärmebedarf für das Zielszenario bei etwa 70 kWh/m<sup>2</sup>, was eine Reduktion gegenüber dem Jahr 2008 von 57 % bedeutet. In der Referenzentwicklung der Energieszenarien liegt der vergleichbare Wert mit etwa 105 kWh/m<sup>2</sup> deutlich höher und ist in etwa vergleichbar mit dem Wert des Zielszenarios für das Jahr 2030. Dies deutet auf eine deutlich andere zeitliche Dynamik der im Zielszenario ergriffenen Maßnahmen hin, die als sehr ambitioniert zu sehen sind.

Da in den nachfolgenden gerechneten Szenarien insbesondere die Rolle von Erdgas untersucht wird, bietet sich in Analogie eine Analyse des Erdgas-einsatzes zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung der betrachteten Szenarien an. Wie Abbildung 1 verdeutlicht, ist in allen Szenarien ein deutlicher Rückgang des Erdgas- und des Erdöleinsatzes für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung festzustellen. Mit Blick auf das Jahr 2050 ist zu erkennen, dass der Einsatz Erneuerbarer Energien sowohl in der Referenzentwicklung als auch im Zielszenario den größten Anteil aller eingesetzten Energieträger besitzt. Besonders prägnant sind die Rückgänge des Erdgaseinsatzes für das Jahr 2050 im Zielszenario. Hier beträgt der Erdgaseinsatz nur noch etwa 250 PJ, was gegenüber 2008 einem Rückgang von etwa 73 % bedeutet. Für die Referenzentwicklung beträgt der vergleichbare Wert etwa 55 %.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die CO<sub>2</sub>-Reduktion in den Energieszenarien im Wesentlichen über den forcierten Einsatz Erneuerbarer Energien sowie durch stringente gebäudeseitige Maßnahmen erreicht wird. Gegenüber der heutigen Situation spielt im Zielszenario der Einsatz von Erdöl und Erdgas nur noch eine untergeordnete Rolle.



**Abbildung 1:** Energieträgereinsatz zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser in den betrachteten Szenarien, Quelle: [EGP2010], [IRZ2009], [ZIES2011], eigene Berechnungen

**Tabelle 3:** Spezifischer Raumwärmebedarf (in kWh/m<sup>2</sup>) über alle Gebäude, Quelle: [EGP2010], [IRZ2009], [ZIES2011], eigene Berechnungen

	2008	2020	2030	2040	2050
Energierreport	153	130	110	-	-
Energieszenarien Referenz	162	134	121	112	105
Energieszenarien Zielszenario II	162	130	108	89	70

## **5 Methodologie der Szenarienentwicklung und Szenariendefinition**

### **5.1 Vorbemerkungen**

Für die oben skizzierte Zielstellung werden drei Szenarien definiert, die einen energie-, emissions- und kostenseitigen Vergleich erlauben. Aufgrund der langsamen Veränderung von Gebäudebeständen erstreckt sich der gewählte Zeithorizont der Szenarien bis zum Jahr 2050. Die Generierung der Szenarien erfordert die Annahme von so genannten Rahmendaten. Dies sind z.B. die Bevölkerungsentwicklung, Haushaltsstrukturen und Haushaltsgrößen, die wiederum die zukünftige Wohnflächennachfrage maßgeblich bestimmen und die ein fundamentaler Parameter der Szenarien darstellt. Auch die Kostenanalyse macht eine Vielzahl von Annahmen notwendig, wie beispielsweise die Annahme von Investitionskosten für Heizungssysteme oder gebäudeseitige Maßnahmen zur energetischen Sanierung. Von ebenfalls großer Bedeutung ist die Projektion von Energiepreisen über den Szenarienzeithorizont. Für die Entwicklung der Gebäudestruktur wird der Wohngebäudebestand des Jahres 2009 unter Berücksichtigung der Neubauwohnfläche sowie der Bestandserweiterung und der abgerissenen Altbaufläche bis 2050 fortgeführt. Dieses Niveau dient als Referenz zur Herleitung der Einsparungen in den jeweiligen Szenarien. Allen Szenarien liegen die gleichen Rahmendaten zugrunde, um einen Szenarienvergleich zu ermöglichen und somit die Auswirkungen der im Nachfolgenden skizzierten Szenariounterschiede eindeutig identifizieren zu können.

Die Szenarien unterscheiden sich zum einen durch die unterstellten energetischen Gebäudesanierungsmaßnahmen sowie zum anderen durch die Substitutionsmöglichkeiten der altersbedingt auszutauschenden Heizungsanlagen. Die Forcierung der Umsetzungsmaßnahmen wird durch die Sanierungsrate beschrieben, die eine wichtige Stellschraube darstellt. Für die Szenarien „Innovationsoffensive Gas“ und „Energiekonzept“ werden darüber hinaus Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Wirkung von Einzelmaßnahmen bewerten zu können.

Als Ergebnisse werden Energieverbräuche, Emissionen und Kosten ausgewiesen. Systemgrenze ist der Wohngebäudebereich. Es werden entsprechend der üblichen Bilanzierungsmethodik nur die Emissionen bilanziert, die direkt erzeugt werden. In einem nachfolgenden Exkurs werden die Systemgrenzen erweitert. Im Rahmen der Studie Systemanalyse I wurden Vorketten für die jeweiligen

Techniken ermittelt [SYST2010c], die zusätzlich den vorgelagerten Energieverbrauch sowie die Emissionen entsprechend der Lebenszyklusbetrachtung berücksichtigen. Diese Vorketten werden mit den Energieverbräuchen und Emissionen verknüpft, die für den Wohngebäudebereich errechnet wurden.

**Tabelle 4:** Kurzcharakterisierung der Szenarien

Trend	Innovationsoffensive Gas	Energiekonzept
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fortschreibung der aktuellen politischen Instrumente zur gebäudeseitigen Sanierung (Effizienzstandards EnEV 2009)</li> <li>▪ Fortschreibung der heutigen Sanierungsrate von 1%/a bis 2020; moderate Erhöhung ab 2020 von 1%/a auf 1,5 %/a im Jahr 2050</li> <li>▪ Einsatz von Heizungssystemen (Neubau, Altbau), Fortschreibung mit Erneuerungszyklus von 25 a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ähnlich wie Trend</li> <li>▪ ähnlich wie Trend</li> <li>▪ Verstärkte Nutzung von gasförmigen EE</li> <li>▪ Erhöhte Nutzung gasbasierter Heizungssysteme mit verkürztem Erneuerungszyklus von 20 a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Implementierung der gebäudeseitigen Maßnahmen des Energiekonzepts (Sanierungsfahrplan 2050)</li> <li>▪ Verschärfung der Effizienzstandards der EnEV in 2013 und 2020 im Alt- und Neubaubereich um je 30% und Verdopplung der Sanierungsrate und Effizienz ab 2015</li> <li>▪ Einsatz von Heizungssystemen (Neubau, Altbau), Fortschreibung mit Erneuerungszyklus von 25 a</li> </ul>
Sensitivitätsvarianten		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Steigerung der Sanierungsrate und Effizienz wie im Szenario Energiekonzept</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erhöhte Nutzung gasbasierter Heizungssysteme wie im Szenario Innovationsoffensive</li> </ul>

## 5.2 Szenario Trend

Das Szenario Trend beschreibt die zu erwartende Entwicklung für die Fortschreibung der aktuellen Klimaschutzaktivitäten. Dabei umfasst das Szenario die Wirkungen der Maßnahmen und Instrumente, die bis einschließlich des Jahres 2010 gesetzlich implementiert worden sind. Dies betrifft einerseits die ordnungspolitischen Instrumente wie z.B. die EnEV und das EEWärmeG in den

Fassungen des Jahres 2009 sowie die Vorgaben der neu gefassten europäischen Gebäuderichtlinie<sup>1</sup> und andererseits Förderinstrumente wie die Programme der KfW, der Städtebauförderung, das Marktanreizprogramm für erneuerbare Energien und weitere Maßnahmen und Kampagnen. Die Fördermittelhöhe wird auf dem Niveau des aktuellen Jahres fortgeschrieben. Die Sanierungsrate der letzten Jahre wird bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben und danach für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 moderat erhöht.

### 5.3 Szenario Energiekonzept

Das Szenario „Energiekonzept“ geht über die Trendentwicklung hinaus und simuliert eine vollständige Umsetzung der im aktuellen Energiekonzept<sup>2</sup> der Bundesregierung vorgesehenen Maßnahmen für den Gebäudesektor (Handlungsfeld E: Energetische Gebäudesanierung und energieeffizientes Bauen). Demnach ist es zentrales Ziel, bis 2050 über einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu verfügen. Hierzu soll der Wärmebedarf zunächst bis zum Jahr 2020 um 20 % und der Primärenergiebedarf bis zum Jahr 2050 um 80 % vermindert werden. Wesentliche Elemente sind die Novellierungen der bestehenden Fassungen der EnEV und des EEWärmeG, die Installierung eines Sanierungsfahrplans für Bestandsgebäude (Gebäudehülle, Anlagentechnik etc.) sowie die dafür vorgesehenen Instrumente (bessere finanzielle Ausstattung des KfW-Programms CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierung, Einrichtung eines neuen Förderprogramms zur „Energetische Städtebausanierung“, Förderung von Ersatz-Neubau im Rahmen des Gebäudesanierungsprogramms etc.). Zusätzlich sollen die Möglichkeiten des Energie-Contractings zur Hebung der Einsparpotenziale im Mietwohnungsbereich erweitert werden. Entsprechend dem Sanierungsfahrplan wird gegenüber dem Szenario Trend eine deutliche höhere Sanierungsrate und -effizienz für Maßnahmen im Gebäudebestand angenommen. Dabei wird die energetische Sanierungsrate bis 2015 auf 2 % pro Jahr verdoppelt und verbleibt bis 2050 auf diesem Niveau.

Aufbauend auf diesem Szenario werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, wie z.B. die Wirkung einer höheren Sanierungsrate, der Erneuerung der Heizungssysteme oder eines veränderten Gasgemischpreises.

---

<sup>1</sup> Neugefasste Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Amtsblatt der Europäischen Union L 153/13;

<sup>2</sup> Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 28.9.2010, [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)

## **5.4 Szenario Innovationsoffensive Gas**

In dem Szenario Innovationsoffensive Gas wird wie im Szenario Trend angenommen, dass die bis zum Jahre 2010 implementierten Maßnahmen und Instrumente fortgeschrieben werden. Gleiches gilt für die unterstellte Sanierungsrate. Im Gegensatz zum Szenario Trend wird unterstellt, dass entsprechend den Zielen der DVGW-Innovationsoffensive Gastechnologien die Substitution von veralteten Heizungssystemen vorwiegend durch gasbasierte Heizungssysteme sowie KWK-Systeme erfolgt und diese früher ausgetauscht werden. Zusätzlich wird fossiles Erdgas durch eine deutlich höhere Zumischung von CO<sub>2</sub>-freien Gasen wie Biogas, SNG, Wasserstoff und synthetischem Methan aus EE-Strom substituiert. Mit dem Szenario Innovationsoffensive Gas sollen insbesondere die emissions- und kostenseitigen Auswirkungen im Vergleich zum Szenario Energiekonzept analysiert werden.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird zusätzlich untersucht, wie sich eine höhere Sanierungsrate der Wohngebäude auf die Entwicklungsdynamik auswirkt. Hierzu wird u.a. die Sanierungsrate zugrunde gelegt, wie sie entsprechend dem Sanierungsfahrplan des Energiekonzepts der Bundesregierung (siehe Szenario Energiekonzept) gefordert wird. Darüber hinaus wird die Auswirkung des höheren Preises aus dem Gemisch von erneuerbaren gasförmigen Energieträgern und Erdgas sowie die Verringerung der technischen Lebensdauer von Heizsystemen untersucht.

## **5.5 Festlegung der zu berücksichtigenden Maßnahmen**

Für die Berechnung der Szenarien wurden die in der Tabelle 5 aufgeführten energie- und klimapolitischen Maßnahmen und Instrumente für den Einsatz von Raumwärme und Warmwasser im Wohngebäudebereich angenommen. Im Trendszenario werden die aktuell gültigen Maßnahmen, die zugleich eine große Bedeutung für die Sanierung von Wohngebäuden haben, abgebildet. Die gebäudeseitigen zusätzlichen und ergänzenden Maßnahmen des Energiekonzepts der Bundesregierung zur Erreichung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 werden im Szenario – Energiekonzept simuliert. Diese Aktivitäten sind wesentliches Element der Strategie der Bundesregierung vom Herbst 2010 [BMWi2010]. Mit der Entscheidung zum beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie gewinnt der Beitrag des Klimaschutzes und der Energieeffizienz im Gebäudebereich weiter an Bedeutung [BMWi2011]. Mit den Maßnahmen des Szenarios Innovationsoffensive Gas wird im Rahmen des

Projekts u.a. der CO<sub>2</sub>-seitige Reduktionsbeitrag durch den verstärkten Einsatz von gasbasierten Heizungssystemen und gasförmigen Erneuerbaren Energieträgern (Zumischung von Biogas, H<sub>2</sub> etc.) anstelle forcierter Gebäudesanierungsaktivitäten, wie sie im Energiekonzept unterstellt werden, analysiert.

**Tabelle 5:** Übersicht der Maßnahmen in den Szenarien

Trend	Innovationsoffensive Gas	Energiekonzept
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm (KfW) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Energieeffizient Bauen</li> <li>- Energieeffizient Sanieren</li> </ul> </li> <li>▪ Städtebauförderung <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stadtumbau West</li> <li>- Stadtumbau Ost</li> </ul> </li> <li>▪ Marktanreizprogramm EE</li> <li>▪ EnEV 2009</li> <li>▪ EEWärmeG 2009</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einsatz von hocheffizienten Gastechiken</li> <li>▪ Verstärkte Nutzung von gasförmigen EE</li> <li>▪ Ausweitung des EEWärmeG auf den Altbau (nach Vorgabe Baden-Württemberg)</li> <li>▪ Ökodesignrichtlinie für Heizkessel und Warmwasserbereiter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Förderprogramm Energetische Städtebausanierung</li> <li>▪ Steigerung der Förderungen im KfW-Programm „Energieeffizient Sanieren“</li> <li>▪ Novellierungen der EnEV 2009</li> <li>▪ Novellierung EEWärmeG: Verbesserung der Bedingungen zur Einspeisung von Biogas</li> <li>▪ Ökodesignrichtlinie für Heizkessel und Warmwasserbereiter</li> <li>▪ Wärme-Contracting im Mietwohnungsmarkt</li> </ul>

Die **Maßnahmen des Trendszenarios** können wie folgt beschrieben werden:

- a. **KfW-Programm „Energieeffizient Sanieren“:** Die früheren Förderprogramme CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierung sowie die ÖKO-Plus-Variante des Programms „Wohnraum Modernisieren“ werden seit April 2009 unter dem Programm „Energieeffizient Sanieren“ weitergeführt. Das CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm dient der langfristigen Finanzierung von Investitionen zur Energieeinsparung und zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung in Gebäuden über zinsverbilligte Kredite und Investitionszuschüsse (sog. „KfW-Effizienzhäuser“; KfW-EH). Eine Zahlenangabe beschreibt deren Primärenergieverbrauch im Vergleich zum jeweils zulässigen Höchstwert: ein KfW-EH 70 hat nur 70 %



des zulässigen Primärenergieverbrauchs. Zusätzlich gelten Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz. So beträgt beispielsweise beim KfW-EH 70 der Höchstwert des spezifischen Transmissionsverlusts der wärmeübertragenden Fläche maximal 85 % des geltenden Neubauniveaus.

- b. **Das KfW-Programm „Energieeffizient Bauen“:** Das frühere Programm „Ökologisch Bauen“ wird seit April 2009 unter dem Programm „Energieeffizient Bauen“ weitergeführt. Es dient der langfristig zinsgünstigen Finanzierung für die Errichtung und den Ersterwerb von energiesparenden Häusern (sog. „KfW-Effizienzhäuser“; EH).

Zusammenfassend werden im Trendszenario die Maßnahmen „Energieeffizient Bauen und Sanieren“ mit den in der mittelfristigen Finanzplanung für 2012 geplanten Mittelansätzen von jährlich 1,5 Mrd. Euro fortgeführt.

- c. **Städtebauförderung:** Die Finanzhilfen des Bundes zur Förderung des Stadtumbaus sollen nach der Verwaltungsvereinbarung zur Städtebauförderung 2010 die Gemeinden mit Gebieten, die von erheblichen städtebaulichen Funktionsverlusten betroffen sind, in die Lage versetzen, sich frühzeitig auf Strukturveränderungen vor allem in Demographie und Wirtschaft und auf die damit verbundenen städtebaulichen Auswirkungen einzustellen. So werden mit dem Programm „Stadtumbau West“ u.a. Maßnahmen zum Rückbau von leer stehenden Gebäuden gefördert. Ferner wird auch die Erhaltung von Gebäuden mit baukultureller Bedeutung, wie z.B. die Instandsetzung und Modernisierung von das Stadtbild prägenden Gebäuden unterstützt.

Mit dem Bund-Länder-Programm „Stadtumbau Ost“ wurde in 2002 eine Initiative zur Verbesserung der Stadt- und Wohnungsmarktentwicklung in den neuen Bundesländern gestartet. Das Programm soll insbesondere einen wirkungsvollen Beitrag zur Verbesserung der wohnungswirtschaftlichen Rahmenbedingungen und zur Sicherung der Funktionsfähigkeit der Wohnungsmärkte leisten, indem sowohl notwendige Rückbau- als auch Instandsetzungs- und Modernisierungsinvestitionen gezielt gefördert werden.

- d. **Marktanreizprogramm für EE:** Das Marktanreizprogramm fördert schwerpunktmäßig die Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärmebereitstellung. Der Zweck des Programms besteht darin, die breite Markteinführung erneuerbarer Energien zur Wärmebereitstellung zu erleichtern sowie Kosten senkungen und Technologieentwicklung anzustoßen. Mit dem im Jahr 1999 gestarteten Marktanreizprogramm wird für die Wärmeversorgung im Ge-

bäudesektor die Installation von thermischen Solaranlagen und von kleinen oder großen Biomasseanlagen gefördert.

Zusätzlich zu diesen Fördertatbeständen wird seit 2008 der Einbau von Wärmepumpen in Gebäuden finanziell unterstützt. Für die Abwicklung des Programms sind das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und die Kreditanstalt für Wiederaufbau verantwortlich.

- e. **EnEV 2009:** Mit der Änderung der Energieeinsparverordnung (EnEV 2009), werden zur Erhöhung der Energieeffizienz und unter Wahrung der wirtschaftlichen Vertretbarkeit die Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf und an die maximal zulässigen U-Werte für Alt- und Neubauten im Mittel um 30 % verschärft. Im Altbaubereich wurde zudem festgelegt, dass bereits bei einer Sanierung, die einen Anteil der Bauteilfläche von mehr als 10 % umfasst, die Bauteilanforderungen erfüllt werden müssen. Im Detail wurden die nachfolgenden Änderungen mit der EnEV 2009 vorgenommen:
  - i. Auf der Grundlage der DIN V 18599 wird ein neues Berechnungsverfahren für Wohngebäude eingeführt, das alternativ zum bestehenden Verfahren zur Bilanzierung herangezogen werden kann. Die bisherige Berechnung nach dem vereinfachten Verfahren wird durch ein Referenzgebäudeverfahren ersetzt, das bezüglich der Verwendung solarthermischer Anlagen das Erneuerbare – Energien – Wärmege-  
setz (EEWärmeG) abbildet. Dabei wird der maximal zulässige Primärenergiebedarfskennwert für das Gebäude individuell anhand eines Referenzgebäudes mit gleicher Geometrie, Ausrichtung und Nutzfläche unter der Annahme standardisierter Bauteile und Anlagentechnik ermittelt.
  - ii. Einzelne Nachrüstpflichten zur Dämmung werden hinsichtlich der Anforderungen an die Dämmqualität erweitert. Die Pflicht zur Dämmung wird u.a. auf begehbare und bisher ungedämmte oberste Geschossdecken ausgedehnt. Bislang mussten nur ungedämmte, nicht begehbare, aber zugängliche oberste Geschossdecken mit einer Dämmung ausgestattet werden.
  - iii. Elektrisch betriebene Speicherheizsysteme dürfen in Wohngebäuden mit mehr als 5 Wohneinheiten nicht mehr betrieben werden, wenn durch sie ausschließlich Raumwärme erzeugt wird. Ist das Heizsystem vor 1990 eingebaut worden, so ist das System in der Regel bis Ende 2019 außer Betrieb zu nehmen. Bei Einbauten ab 1990 ist das Speicherheizsystem grundsätzlich nach Ablauf von 30

Jahren nicht weiter zu betreiben. Für Nichtwohngebäude gelten dieselben Regeln ab einer Mindestnutzfläche von 500 m<sup>2</sup>.

- iv. Zur Verbesserung des Vollzugs der EnEV werden die privaten Nachweispflichten wie beispielsweise Unternehmererklärungen intensiviert. Die Bezirksschornsteinfeger wurden mit der Durchführung von Prüfungen an heizungstechnischen Anlagen beauftragt (z. B. Außerbetriebnahme von Heizkesseln, Wärmedämmung an heizungstechnischen Anlagen).
- f. **EEWärmeG:** Mit dem beschlossenen EEWärmeG verfolgt die Bundesregierung das Ziel, den Anteil von erneuerbaren Energien am gesamten Wärmeverbrauch auf 14 % bis 2020 zu steigern. Nach dem Gesetz sind Eigentümer von neu errichteten Gebäuden ab 2009 verpflichtet, den Wärmeenergiebedarf durch die anteilige Nutzung von Erneuerbaren Energien oder durch die im Gesetz vorgesehenen Ausgleichsmaßnahmen zu decken.

Die **Maßnahmen des Szenarios – Energiekonzept** lassen sich wie folgt charakterisieren:

- a. **Förderprogramm „Energetische Städtebausanierung“:** Die energetische Sanierung wird unter besonderer Berücksichtigung von Stadtquartieren durch ein gesondertes Programm gefördert. Ziel dieses Programms „Energetische Städtebausanierung“ soll es sein, Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energien in innerstädtischen Bereichen verstärkt anzustoßen.
- b. **Steigerung der Förderungen im KfW-Programm „Energieeffizient Sanieren“:** Die Förderung des Programms soll im Rahmen der Erhöhung der Bundesmittel für das CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms auf ein jährliches Niveau von 2 Mrd. € aufgestockt werden.
- c. **Novellierungen der EnEV 2009**

**Verschärfung der EnEV 2009 um 30 % ab 2013:** Zur Erhöhung der Energieeffizienz wird ab 2013 eine weitere Verschärfung der wärmetechnischen Anforderungen im Alt- und Neubaubereich um rund 30 % umgesetzt.

**Verschärfung der EnEV 2012 für Neubauten ab 2021:** Mit der Novelle der EnEV 2012 wird die Umsetzung der neu gefassten EU-Gebäuderichtlinie 2010/31/EG (Umsetzungsfrist: 09. Juli 2012) in deutsches Recht durchgeführt. Dabei wird die Einführung des Niedrigstenergiegebäudes ab

Anfang 2021 für alle Neubauten sowie die Erweiterung der Aushangpflicht für Energieausweise festgeschrieben. Als Anforderung aus der EU-Gebäuderichtlinie wird somit neben der Verschärfung der primärenergetischen Anforderungen für Neubauten um 30 % ab 2013 auch das Niveau eines Niedrigstenergiegebäudes (sehr geringer Energiebedarf, der weitestgehend mit Erneuerbaren Energien gedeckt wird) auf der Basis von primärenergetischen Kennwerten ab 2021 eingeführt. Der Neubaubereich soll mit dieser Novellierung schrittweise an den klimaneutralen Gebäudestandard (Niedrigstenergiegebäude), der ab 2021 gilt, herangeführt werden.

**Verschärfung der EnEV 2012 für Altbauten ab 2021:** Im Bestand soll durch einen Sanierungsfahrplan, der im Jahr 2020 beginnen soll, bei einer angestrebten Verdopplung der energetischen Sanierungsrate der klimaneutrale Gebäudebestand in 2050 erzielt werden. Dieser soll als Handlungsempfehlung eine Orientierung für Eigentümer liefern, mit welchen Sanierungsmaßnahmen der Niedrigstenergiestandard erreicht werden kann. Die wirtschaftlichen Anreize für energetische Gebäudesanierungen sollen sich am Sanierungsfahrplan ausrichten.

- d. **Verbesserung der Bedingungen für die Einspeisung von aufbereitetem Biogas im EEWärmeG:** Nach dem Energiekonzept der neuen Bundesregierung soll der Rahmen für die Biogasnutzung im EEWärmeG verbessert werden. So wird hier von einer erhöhten Biogaseinspeisung (aufbereitetes Biogas) in Kombination mit effizienten Brenntechnologien ausgegangen.
- e. **Ökodesign-Richtlinie:** Die neu gefasste Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte verfolgt mehrere Ziele. Die Verbesserung der Umweltauswirkungen energiebetriebener Produkte soll durch die Formulierung von einzelnen Anforderungen in Durchführungsmaßnahmen sowie von Vorschriften zur Kontrolle, Dokumentation und Kennzeichnung von Produkten erreicht werden. Ein weiteres Ziel ist die Verringerung des Energieverbrauches und der Emission von Treibhausgasen durch Produktion, Betrieb und Entsorgung energiebetriebener Produkte. Die geforderten Mindesteffizienzstandards der Produkte werden dabei nicht durch die Richtlinie selbst, sondern durch die auf ihrer Grundlage erlassenen Durchführungsmaßnahmen etabliert, meist als EU-Verordnungen, die keiner weiteren Umsetzung durch die EU-Mitgliedsstaaten bedürfen. Die erforderlichen Vorstudien und die Einbeziehung aller Beteiligten (Mitgliedsstaaten, Hersteller und Vertrieber, Umwelt- und Verbraucherorganisationen) im Rahmen von Kon-

sultationsforen für elektrisch betriebene, öl- oder gasgefeuerte Zentralheizungsanlagen und Warmwasserbereiter sind abgeschlossen. Entsprechende Verordnungen für die Durchführungsmaßnahmen werden für Warmwasserbereiter und für Heizkessel in der zweiten Jahreshälfte 2011 erwartet. Nach den Entwürfen soll beim Einsatz von öl- und gasbefeuerten Heizkesseln die Brennwertechnik als Mindeststandard ab 2015 verpflichtend werden. Zudem ist angedacht, in einem zweiten Schritt Mindeststandards für Biomassekessel einzufordern.

Neben den technischen Verbesserungen durch die Durchführungsmaßnahmen der Ökodesign-Richtlinie soll die neu gefasste EU-Rahmenrichtlinie zur Energieverbrauchskennzeichnung (2010/30/EU) mit der Einführung der Angabe des Verbrauches an Energie und anderer Ressourcen durch energieverbrauchsrelevante Produkte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen zu einer gesteigerten Transparenz beitragen. Die neue Richtlinie ersetzt die ursprüngliche Kennzeichnungs-Rahmenrichtlinie 92/75/EG. Hinsichtlich der Energieverbrauchskennzeichnung soll für Warmwasserbereiter und Zentralheizungen bis 70 kW eine Energieverbrauchskennzeichnungspflicht eingeführt werden.

f. **Investitionsanreize durch Wärme-Contracting im Mietwohnungsmarkt:**

Die Möglichkeiten des Energie-Contractings werden erweitert, damit vor allem auch im Mietwohnungsbereich bestehende Einsparpotentiale effizient realisiert werden können. Nach den Vorgaben des Energiekonzepts wird ein einheitlicher rechtlicher Rahmen für Wärme-Contracting geschaffen.

Mit diesem Instrument sollen unter der Berücksichtigung der mietrechtlichen Voraussetzungen verstärkt die Energieeinsparpotenziale im Mietwohnungsbau durch Contracting-Projekte erschlossen werden. Die Effizienzsteigerungen durch Contracting führen zu optimierten Jahresnutzungsgraden bei der Umwandlung von Primärenergie in Wärme.

Die **Maßnahmen des Szenarios – Innovationsoffensive Gas** spiegeln die Kernelemente der aktuellen DVGW-Innovationsoffensive Gastechnologie wider und können wie folgt beschrieben werden:

- a. **Einsatz von hocheffizienten Gasanwendungstechnologien:** Durch die verstärkte Substitution der bestehenden Heizungssysteme durch innovative gasbasierte Heizungssysteme soll bei einem beschleunigten Erneuerungszyklus der Heizkessel (Austausch alle 20 Jahre statt 25 Jahre) das energetische Einsparpotenzial erschlossen werden. In der Innovationsoffensive wird unterstellt, dass ab dem Jahr 2020 überwiegend gasbasierte Hei-

zungssysteme eingesetzt werden. So werden z.B. im Laufe der Zeit Erdölheizungen durch gasbasierte Systeme ersetzt. Ein weiterer Schwerpunkt stellt dabei insbesondere der Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen dar.

- b. **Verstärkte Nutzung von gasförmigen Erneuerbaren Energieträgern im Erdgasnetz:** Mit dieser Maßnahme sollen in der Innovationsoffensive die Wirkungen eines zunehmenden Einsatzes gasförmiger regenerativer Energieträger als Zumischung zum konventionellen Erdgas im Hinblick auf den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen analysiert werden. Dabei wird unterstellt, dass die Zumischung von Biogas, Wasserstoff, Methan oder SNG durch regenerative Prozesse erfolgt und im zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2050 signifikant zunimmt.
- c. **Ausweitung des EEWärmeG auf Altbauten:** Entgegen dem bestehenden EEWärmeG wird mit diesem Instrument eine Übertragung zur verpflichtenden Nutzung von Erneuerbaren beim Austausch von Heizkesseln entsprechend dem gültigen EEWärmeG in Baden-Württemberg auf den Gebäudebestand ab 2012 vorgenommen.
- d. **Ökodesign-Richtlinie:** siehe Maßnahmenbeschreibung e) des Szenarios - Energiekonzept

## 6 Einsatz des Nachfragemodells

### 6.1 Methodik

Für die Szenariorechnungen wird ein vom Forschungszentrum Jülich entwickeltes Simulationsmodell eingesetzt, das seit vielen Jahren im Rahmen diverser gebäudeseitiger Analysen eingesetzt wird. Hierbei handelt es sich um ein dynamisches Simulationsmodell, mit dem Maßnahmen an Einzelgebäuden in ihrer zeitlichen Abfolge vorgegeben und ihre Auswirkungen über einen festgelegten Betrachtungszeitraum ermittelt werden können. Das Modell weist für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung den Energieverbrauch, die CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die jeweiligen Kosten aus.

Das Wohngebäude-Modell ist ein dynamisches Simulationsmodell, welches die zeitabhängige Entwicklung des Energiebedarfs der Wohngebäude und die Abbildung technischer Optionen in Form von Szenarien simuliert. Die Zeitschritte der zu definierenden Szenarien umfassen in der Regel ein Jahr, wobei der Zeithorizont frei wählbar ist. Bei der Durchführung von Szenariorechnungen ist das Modell unter Einbezug von Rahmenbedingungen insbesondere hinsichtlich der Wohnflächen und Haushaltsstrukturen zuerst auf den vereinbarten Ausgangszustand in einem bestimmten Referenzjahr und zur Modelljustierung an die realen Daten des Bezugsjahres anzupassen.

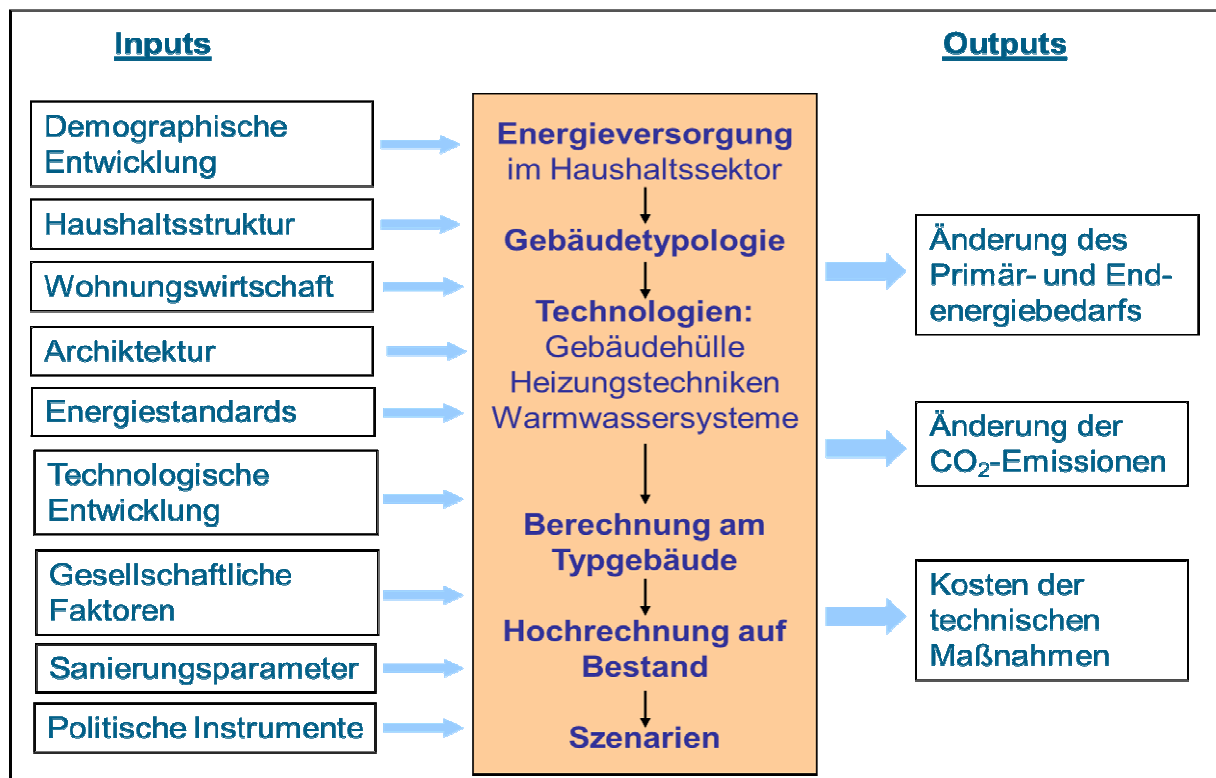
Ausgehend von einer umfassenden Datenbank, in der alle relevanten Alters- und Größenklassen des Wohngebäudebestandes sowie die Heizungs- und Warmwassersysteme enthalten sind, berechnet das Modell den jährlichen Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser differenziert nach den Energieträgern sowie den zugehörigen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird auf der Basis der UBA-CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren<sup>3</sup> durchgeführt. Mit den Typologien der Datenbank kann der gesamte deutsche Wohngebäudebestand abgebildet und für die Zukunft u.a. unter Berücksichtigung der Wirkungen von gesellschaftlichen und demographischen Entwicklungen dynamisch fortgeschrieben werden. Durch jährliche Updates wird eine kontinuierliche Fortführung der Datenbank sichergestellt.

Die Auswirkungen verschiedener Maßnahmen zur Wärmedämmung an der Gebäudehülle und zur Heizungsanlagenverbesserung können mit dem Modell abgeschätzt werden. Dabei können alle Systemparameter variiert werden, so dass

---

<sup>3</sup> Nach der DIN 4108-6 und 4701-10 sind die Endenergiewerte bei EnEV-Berechnungen auf den Heizwert bezogen. Die Umrechnung auf den Brennwert kann nach den Standardwerten der DIN 18599-1 Anhang B durchgeführt werden.

grundsätzlich die Auswirkungen aller möglichen Maßnahmen auch in ihrer Kombination berechnet werden können. Die für die jeweiligen Szenarien ausgewählten Maßnahmen sowie Instrumente werden zuvor auf die Schnittstellen des Modells übersetzt und dann hinsichtlich ihrer energie-, emissions- und kosten-seitigen Auswirkungen im zeitlichen Verlauf analysiert.



**Abbildung 2:** Struktur des FZJ-Wohngebäudesimulationsmodells

## 6.2 Leitparameter für die Berechnung

Unter variablem Einsatz der Parameter Sanierungsrate, Ausnutzung der Sanierungspotenziale und Veränderung der Bedarfsstruktur können vielfältige technische Analysen, die in diesem Projekt zur Herleitung der Potenziale für innovative Gastechnologien dienen, durchgeführt werden. Zur Hebung dieser Potenziale für den gesteigerten Gasabsatz sind grundsätzlich die Nachfragestrukturen und Trends der Simulationsmodelle der systemanalytischen Analysen aus Teil I an das FZJ-Wohngebäudesimulationsmodell anzupassen und die differenzierten Technologieketten zu Technologiepfaden der o.g. Datenbank zu aggregieren sowie zu implementieren.



Eine Übersicht zur Struktur des Modells ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Analyse der zukünftigen Energieversorgung im Haushaltssektor ist dabei von einer Reihe von Eingangsgrößen abhängig, die dem Modell exogen vorgegeben werden:

- **Demographische Entwicklung:** Die Bevölkerungsentwicklung wird im Modell anhand von Vorausschätzungen des Statistischen Bundesamtes berücksichtigt. Auf der Basis der Geburtenhäufigkeit, den Lebenserwartungen sowie dem Wanderungssaldo von Zu- und Abwanderungen wird der Stand der Bevölkerungszahlen je Altersjahrgang fortgeschrieben.
- **Haushaltsstruktur:** Die Gesamtzahl der privaten Haushalte und ihre Entwicklung sowie die Struktur der Haushalte hinsichtlich der Anzahl der Personen und ihre jeweilige Haushaltsgröße im Ausgangsjahr werden durch die Verwendung von historischen Daten und Haushaltsprognosen des Statistischen Bundesamtes im Modell berücksichtigt. Unter Einbezug des Einkommens und den Ausgaben von privaten Haushalten für Wohnen werden differenziert nach Eigentums- und Mieterhaushalten sowie in Abhängigkeit von Altersgruppen die Strukturen der Haushalte dynamisch fortgeführt.
- **Wohnwirtschaftliche Parameter:** Der Wohnungsbedarf steht in direktem Zusammenhang zu den Haushaltszahlen und -strukturen und führt vor allem aufgrund von regional verschiedenen wirtschaftlichen Entwicklungen zu einer differenzierten Nachfrage nach Wohnraum. Im Modell werden bundesweit aggregierte Werte für die Wohnflächennachfrage verwendet. Der zukünftige Wohnflächenkonsum wird dabei in Anlehnung an die Methodik des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung ermittelt. Die Nachfrage nach Wohnraum wird differenziert nach Eigentums- und Mieterhaushalten sowie in Abhängigkeit von Altersgruppen unter der Berücksichtigung des Einflusses der demographischen Entwicklungen, der zukünftigen Haushaltsstrukturen sowie des verfügbaren Einkommens analysiert. Die in das Modell eingehenden wohnwirtschaftlichen Parameter sind der Abriss und Zubau von Wohnraum sowie die Erweiterungsmaßnahmen im Bestand.
- **Architektur:** Die architektonischen Besonderheiten des Wohngebäudesektors werden durch die Gebäudetypen und Baualtersklassen im Modell beschrieben.
- **Energiestandards:** Die energetischen Anforderungen an die Bauteile der Gebäudehülle und der Heizungsanlage werden, entsprechend den nationalen Gesetzen und Verordnungen sowie den europäischen Richtlinien, dem

Modell vorgegeben. Auf nationaler Ebene sind dies die Energie-Einsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbaren-Energien-Wärmege-  
setz (EEWärmeG). Die Vorgaben der EU beziehen sich auf die Gebäude-richt-  
linie, die Richtlinie zur Förderung der Nutzung von erneuerbaren Energien,  
die Energieeffizienzrichtlinie sowie die Ökodesign-Richtlinie.

- **Technologische Entwicklung:** Der Fortschritt der technischen Maßnah-  
men für Wärmedämmungen oder Heizungstechnologien wird im Modell je  
Maßnahme über den Szenariohorizont unter Berücksichtigung von Lern-  
kurveneffekten hinsichtlich technologischer Parameter und der Entwicklung  
der Kosten abgeschätzt.
- **Gesellschaftliche Faktoren:** Die veränderten Lebens- und Arbeitsformen  
führen zu gesellschaftlichen Ansprüchen an das Wohnen und können direk-  
ten Einfluss auf die Bedeutung des eigenen Hauses sowie der Eigentümer-  
quote haben. Im Nachfolgenden wird dieser Aspekt im Zusammenhang mit  
der Herleitung des zukünftigen Wohnflächenkonsums gesondert erörtert  
(s. Kapitel 7.3).
- **Sanierungsparameter:** Da die Lebensdauer von Wohngebäuden mit na-  
hezu 150 Jahren die technischen Lebensdauer der Bauteile der Gebäude-  
hülle und der Heizungsanlage deutlich übersteigt, sind in regelmäßigen Re-  
novierungszyklen Sanierungsmaßnahmen erforderlich. Hierbei wird zw-  
ischen baulichen und energetischen Sanierungen unterschieden. Werden  
dabei nur Maßnahmen zur Instandhaltung der Bauteile vorgenommen (z.B.  
Putzerneuerung der Fassade), so handelt es sich um bauliche Sanierun-  
gen, die keinerlei energieseitige Auswirkungen besitzen. Werden stattdes-  
sen energetische Sanierungen durchgeführt, führen diese Maßnahmen zur  
Verminderung des Energieverbrauchs und der Emissionen.

Im Modell werden energetische Sanierungen, die nach dem Renovierungs-  
zyklus der betrachteten Technologie erfolgen, durch energetische  
Sanierungsraten je technischer Maßnahme vorgegeben. Mit dieser energe-  
tischen Sanierungsrate wird die Quantität der Sanierungen festgelegt. Unter  
gleichzeitiger Berücksichtigung der Qualität der energetischen Sanierungs-  
maßnahme kann die Ausschöpfung des Sanierungspotenzials, die als  
Potenzialausnutzung bezeichnet wird, als Input für das Modell bestimmt  
werden. In der vorliegenden Arbeit berücksichtigt die derzeitige energe-  
tische Sanierungsrate von 1 %/a eine Potenzialausnutzung von 32 %.  
Abhängig von den Szenarien wird im Nachfolgenden ein gleichmäßiger  
Anstieg der Sanierungsrate und der Potenzialausnutzung unterstellt.

- **Politische Instrumente:** Die Wirkungen von nationalen und europäischen klimapolitischen Instrumenten im Bereich der Raumwärme- und Warmwassererzeugung zur Energieversorgung im Haushaltssektor kann durch die Modellierung bzw. Übersetzung in technische Maßnahmen differenziert simuliert werden.

Um den gesamten Wärmebedarf und den daraus resultierenden Energieverbrauch des Sektors für Raumwärme und Warmwasser zu erfassen, ist die Kenntnis des Gebäudebestandes erforderlich. Die architektonische Vielfalt der Gebäude macht es erforderlich, den Bestand auf einige charakteristische Typen zu reduzieren, die mit ihrer Häufigkeit an der Gesamtwohnfläche den modellmäßigen Gebäudebestand bilden. Die Qualität der Aussagen über den Gebäudebestand hängt entscheidend davon ab, wie gut diese Typgebäude mit ihren Anteilen den aktuellen Zustand des Gebäudebestandes repräsentieren. Diese Gebäudetypen werden durch einen Satz von spezifischen Merkmalen charakterisiert.

Die klimatischen Einflüsse werden durch die Länge und Intensität der Heizperiode gekennzeichnet. Zur Abbildung der klimatischen Bedingungen in Deutschland wird im Modell eine Temperaturbereinigung auf der Basis von 41 Messstationen in Deutschland in Bezug zum langjährigen Mittel von 1970 bis 2009 vorgenommen.

Der Raumwärmebedarf in Alt- und Neubauten wird durch Verhaltensweisen und Gewohnheiten beim Wohnen und Heizen mitbestimmt. Dazu gehören insbesondere Ansprüche an Belüftung mit Frischluft, Komfortansprüche bei den Innentemperaturen in Wohn-, Bade- und Schlafzimmern sowie in Wirtschaftsräumen und der Warmwasserbedarf und sein Temperaturniveau. Im Modell werden diese Parameter durch drei für alle Gebäude einheitliche Größen (die mittlere Raumtemperatur, die Lüftungszahl und die Orientierung nach Himmelsrichtungen) festgelegt.

### 6.3 Berechnung von Maßnahmen

Zur Berechnung der energie-, emissions- und kostenseitigen Wirkungen einer einzelnen Maßnahme an einem konkreten Gebäude ist die Kenntnis des jeweiligen Typgebäudes erforderlich. Voraussetzung ist ein Verfahren zur Berechnung des Wärmebedarfs eines Gebäudes anhand genauer Gebäudedaten, wie Flächen der Wand-, Dach-, Keller- und Fenster-Bauteile mit Orientierung und bauphysikalischen Kennwerten. Ferner ist der Einfluss der Bewohner bzw. Nutzer zu berücksichtigen. Die Berechnung des spezifischen Heizwärme- und Warmwasserbedarfs für die Gebäudetypen des Wohngebäudesektors erfolgt auf der

Grundlage der in der geltenden EnEV 2009 geforderten Normen und Vorgehensweisen. Grundsätzlich können alle Größen, die den Wärmebedarf eines Gebäudes bestimmen, variiert werden, um deren Einfluss zu analysieren.

Die Berechnung einer einzelnen Maßnahme setzt dabei voraus, dass die notwendigen Kenndaten eine exogene Bestimmungsgröße für das Verfahren zur Berechnung des Wärmebedarfs darstellen. Um den Aufwand bei der Datenerhebung in einem vernünftigen Verhältnis zur erzielbaren Genauigkeit zu halten, wurde für die Typgebäude eine Reihe von Vereinfachungen getroffen. Umgekehrt bestimmt die Art der zu simulierenden Maßnahmen das Maß der Detaillierung.

Zur Berechnung von Energieeinspar- bzw. Emissionsminderungs-Maßnahmen und ihren Kosten für den gesamten Gebäudebestand sind Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenkombinationen an den Typgebäuden möglich. Dabei bezieht sich eine Maßnahme nicht auf alle Gebäude eines Typs, sondern auf einen Anteil der Gebäude. So können auch am selben Typ gleichzeitig unterschiedliche Maßnahmenkombinationen untersucht werden. Die Ergebnisse beziehen sich dann auf die Gesamtwohnfläche pro Typgebäude. Somit können Maßnahmewirkungen für ein einzelnes Typgebäude berechnet werden und anschließend auf den Bestand der Gesamtwohnfläche hochgerechnet werden. Dabei sind die technischen und ökonomischen Kriterien festzulegen, nach denen eine Maßnahme zum Einsatz kommt.

Die Angabe, welche Anteile des Bestandes infolge einer Maßnahme umzurüsten sind, erfolgt durch den Renovierungszyklus. Kommen innerhalb eines Zeitintervalls  $[t_1, t_2]$  Bauteile mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von  $\Delta\tau$  Jahren zum Einsatz, so werden diese im Zeitintervall  $[t_1+\Delta\tau, t_2+\Delta\tau]$  ersetzt. Bezieht sich das Intervall nur auf eine Baualtersklasse, so kann der Anteil der Umrüstungen bezogen auf das Zeitintervall durch  $1/(t_2-t_1)$  im Zeitintervall  $[t_1+\Delta\tau, t_2+\Delta\tau]$  approximiert werden.

Im Modell werden Sanierungsmaßnahmen zur Reduzierung der Wärmeverluste der Außenbauteile (Wände, Fenster, Dächer, Decken) oder am Heizungs- und Warmwassersystem (Modernisierung, Austausch des Wärmeerzeugers, Substitution des Brennstoffs), die zur Absenkung des Wärmebedarfs beitragen, analysiert.

Das Spektrum der Emissionsreduktionspotentiale erstreckt sich über die Verbesserung aller konventionellen Systeme und den Einsatz schadstoffarmer innovativer Heizungssysteme bis hin zu Schadstoff substituierenden Heizungssystemen die Umweltenergien nutzen. Die Maßnahmen an dem Heizungssystem beinhalten im Modell die Einführung von Techniken des jeweils modernsten Stands bei festgehaltener Ausgangstechnologie (z.B. Ersatz veralteter Kessel durch moderne Heizungssysteme). Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden die in der

Systemanalyse I untersuchten Heizungssysteme und Technikdaten [SYST2010a, b] mit ihren Daten in das Modell integriert.

## 6.4 Bewertung von Maßnahmen

Zur Bewertung von unterschiedlichen Maßnahmen an Gebäuden wird im Modell ein so genanntes Referenz-Niveau definiert, das als Bezug für Energieverbrauchs-, Emissions- und Kostenanalysen anderer Szenarien dient. Dieses Referenzniveau beinhaltet Maßnahmen, bei denen im Wesentlichen nur Bestandsveränderungen durch Abriss, Zubau und Erweiterungen im Bestand über den definierten Szenariohorizont erfolgen. Alternativszenarien sind alle Szenarien, die sich beim jeweils konkreten Maßnahmenkatalog (bei gleichen Basisparametern wie Diskontfaktor und Zeitrahmen) vom Referenzszenario unterscheiden.

Die Datenvorgabe ist gegliedert nach Maßnahmen an der Gebäudehülle, den Heizungs- und Warmwassersystemen sowie der Wärmeverteilung in den Gebäuden. Aus den baulichen Maßnahmen an den Gebäudehüllen wird zunächst der resultierende jährliche Wärmebedarf des Gebäudes bzw. des Bestands berechnet. In einem weiteren Schritt werden die zur Deckung des Wärmebedarfs erforderlichen Brennstoffmengen infolge der neuen Heizungsstruktur ermittelt. Die Berechnungen liefern für jeden Zeitschritt die Jahresmengen der jeweils eingesetzten Brennstoffe und der entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Aus den vorgegebenen Maßnahmen werden die jährlichen Investitionskosten und aus den Brennstoffmengen die Brennstoffkosten (inklusive Nebenkosten wie Wartung und Instandhaltung) hergeleitet.

Das Modell ermöglicht eine kostenseitige Bewertung nach verschiedenen Verfahren (Annuitätenmethode, Barwertmethode). Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Barwertmethode gewählt, da die Analyseergebnisse über den gesamten Zeitraum von Interesse sind. Die Barwertmethode garantiert hierbei die Vergleichbarkeit von zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Kosten.

Von entscheidender Bedeutung ist die Definition einer Referenzentwicklung an der die Wirkungen der Maßnahmen gespiegelt werden. Ausgehend von diesem Referenzniveau werden im Vergleich mit den alternativ generierten Szenarien die Differenzen der Kostenbarwerte, der Energieverbräuche und der CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgewiesen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Szenarien durch die Endenergieverbräuche, deren Zusammensetzung, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Kosten der technischen Maßnahmen (abdiskontierte Summe der jährlichen

Gesamtkosten aus Investitionen an Gebäuden und Versorgungssystemen und den verbrauchten Endenergieträgern) beschrieben werden. Das Simulationsmodell weist sowohl Jahreswerte als auch kumulierte Werte über den Betrachtungszeitraum (2010 – 2050) aus. Der kosten- und emissionsseitige Vergleich erlaubt auch eine Berechnung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einzelner Maßnahmen.

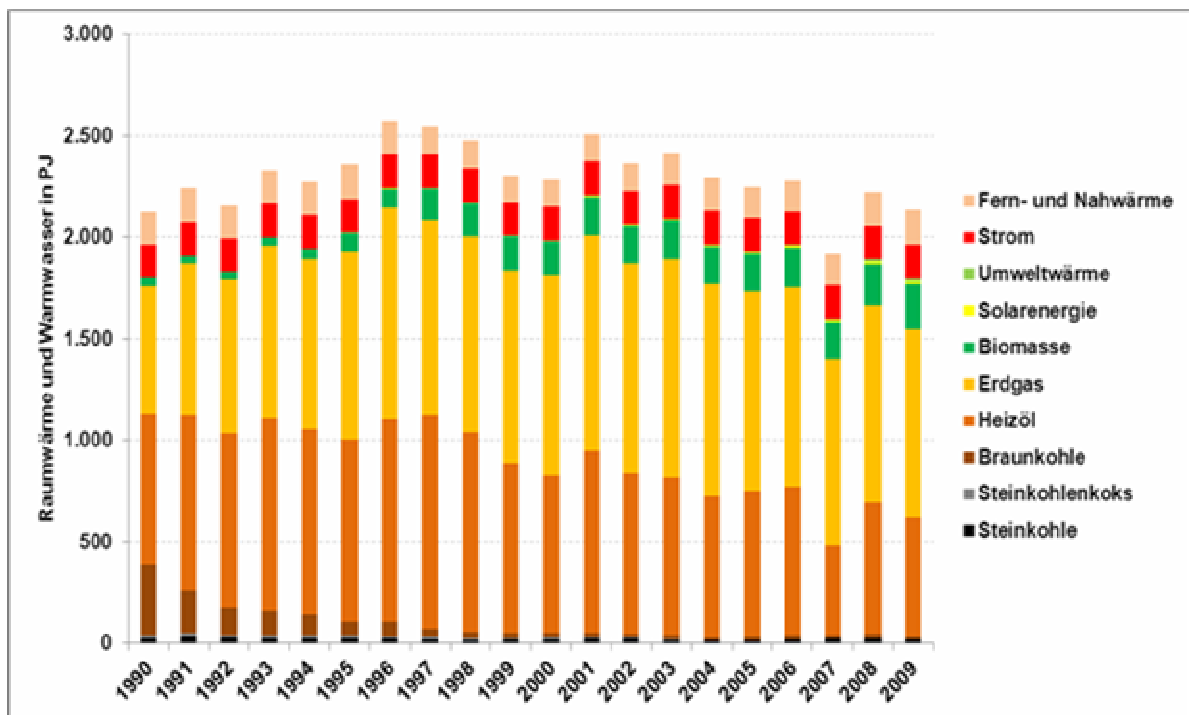
## **7 Rahmendaten**

### **7.1 Energetischer Zustand des Wohngebäudebestandes 2009**

Der energetische Zustand des Wohngebäudebestandes und seiner zukünftigen Entwicklungen lässt sich mit dem beschriebenen FZJ-Wohngebäudesimulationsmodells (Kapitel 6.3) abbilden. Im Zuge der Anpassung des Modells wurden die Nutzungsgrade der verschiedenen Heizungssysteme entsprechend den Gebäude- bzw. der Wohneinheitengrößen bestimmt. Für die Abbildung der Nutzungsgrade der Heizungssysteme in den entsprechenden Gebäuden wurde jedoch auf eine reduzierte Anzahl besonders typischer Gebäude zurückgegriffen, um den Aufwand zur Nutzungsgradermittlung zu reduzieren. Zwischen diesen Gebäudetypen wurde innerhalb des Modells interpoliert, um Vollständigkeit zu gewährleisten. Die genaue Beschreibung der Ermittlung typischer Modellgebäude und der Bestimmung der Nutzungsgrade ist den Berichten der Studie Systemanalyse I [SYST2010b und c] zu entnehmen.

#### **7.1.1 Wärmetechnischer Ausgangszustand und Gebäudedaten**

Im Jahr 2010 gab es in Deutschland ca. 40 Millionen Wohnungen, die auf über 18 Millionen Wohngebäude verteilt waren [StBA2010]. Ca. 83 % der Wohngebäude entfallen derzeit auf Ein- und Zweifamilienhäuser. Der Anteil von Gebäuden mit mehr als zwei Wohneinheiten liegt bei 17 %. Fast drei Viertel des Bestands wurde vor der ersten Wärmeschutzverordnung 1978 errichtet, sodass der Bestand über ein großes Energieeinsparpotenzial verfügt. Der wärmetechnische Ausgangszustand des Wohngebäudebestands kann mit dem Gesamtenergieverbrauch charakterisiert werden. Etwa 85 % des Endenergiebedarfs entfallen auf die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser. In Abbildung 3 ist der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser, entnommen aus der Datenbank der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, für den Zeitraum 1990 bis 2009 [AGEB2011a] nicht temperaturbereinigt dargestellt. Demnach ist der Verbrauch der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2009 um ca. 0,6 % gegenüber 1990 gestiegen.



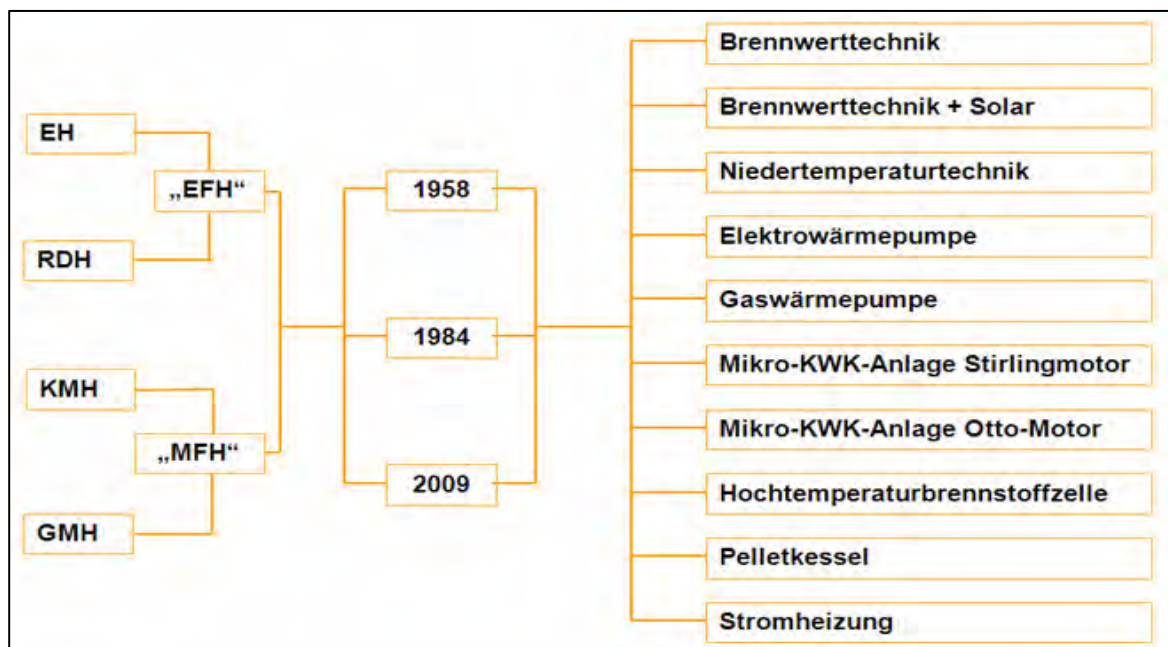
**Abbildung 3:** Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser der privaten Haushalte von 1990 bis 2009 [AGEB2011a]

Im eingesetzten Wohngebäudesimulationsmodell ist der wärmetechnische Zustand der Bauteile der Gebäudehülle u. a. durch die Wärmedurchgangskoeffizienten, die in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet sind, gekennzeichnet. Die vorliegenden Gebäudetypen differenziert nach Baualtersklassen werden im vorliegenden Projekt in Analogie zu den betrachteten Gebäudetypen aus der [SYST2010c] gemäß der Struktur in der Tabelle 6 zusammengefasst. Dabei werden zur Anpassung der Datenbank des Simulationsmodells an die Gebäudetypologie der Vorläuferstudie die Werte für Einfamilien- und Reihenhäuser zur neuen Gruppe der Einfamilienhäuser und die Daten der kleinen und großen Mehrfamilienhäuser zur Gruppe der Mehrfamilienhäuser für die Analyse zusammengefasst. Ferner werden für die neu definierten Gebäudetypen die detaillierten Werte je Baualtersklasse zu den zeitlichen Bereichen 1958, 1984 und 2009 zusammengeführt. Auf diese Art ist es möglich, insbesondere die energetischen Wirkungen der betrachteten konventionellen und innovativen Heizungssysteme spezifisch für die jeweiligen Gebäudetypen mit dem Simulationsmodell zu untersuchen. Eine detaillierte Beschreibung der in Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern eingesetzten Heizungssysteme erfolgt im nachfolgenden Kapitel 7.1.3.



**Tabelle 6:** Wärmetechnische Kennzahlen (U-Wert in  $W/(m^2K)$ ) für Bauteile der Gebäudehülle differenziert nach Baualtersklassen für den Wohngebäudebestand 2010

Bauteil	Altersklasse								
	vor 1919	1919 bis 1948	1949 bis 1957	1958 bis 1968	1969 bis 1977	1978 bis 1983	1984 bis 1994	1995 bis 2009	ab 2010
Oberste Geschossdecke	1,00	0,80	0,80	0,80	0,60	0,40	0,30	0,30	0,24
Fassade	1,70	1,70	1,40	1,40	1,00	0,80	0,60	0,50	0,24
Fenster	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	1,30
Keller	1,20	1,20	1,50	1,00	1,00	0,80	0,60	0,60	0,30



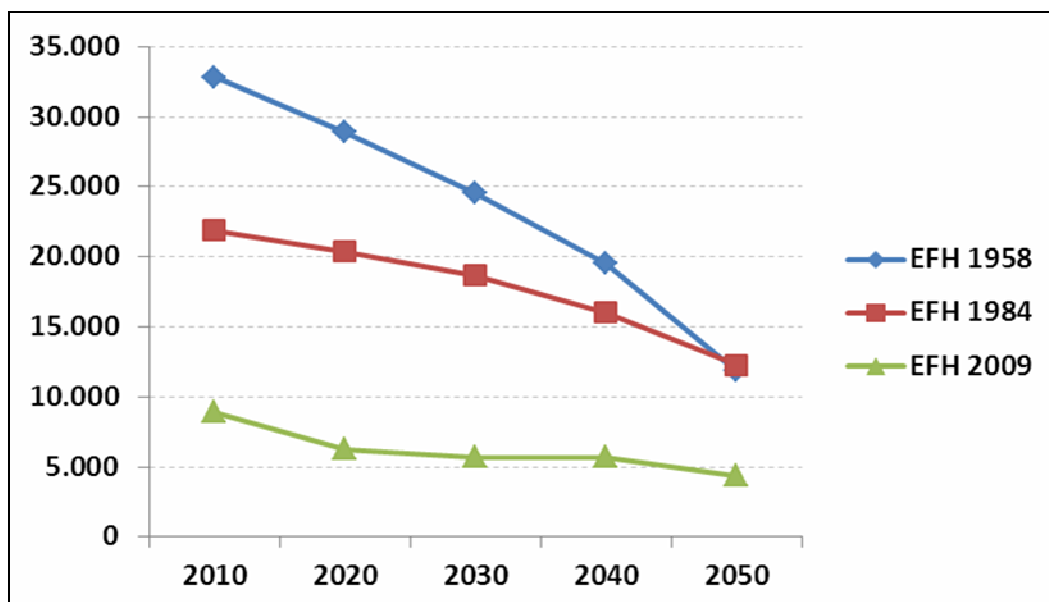
**Abbildung 4:** Gebäude- und Heizungsstruktur der Analyse

### 7.1.2 Energiebedarf und Nachfrage

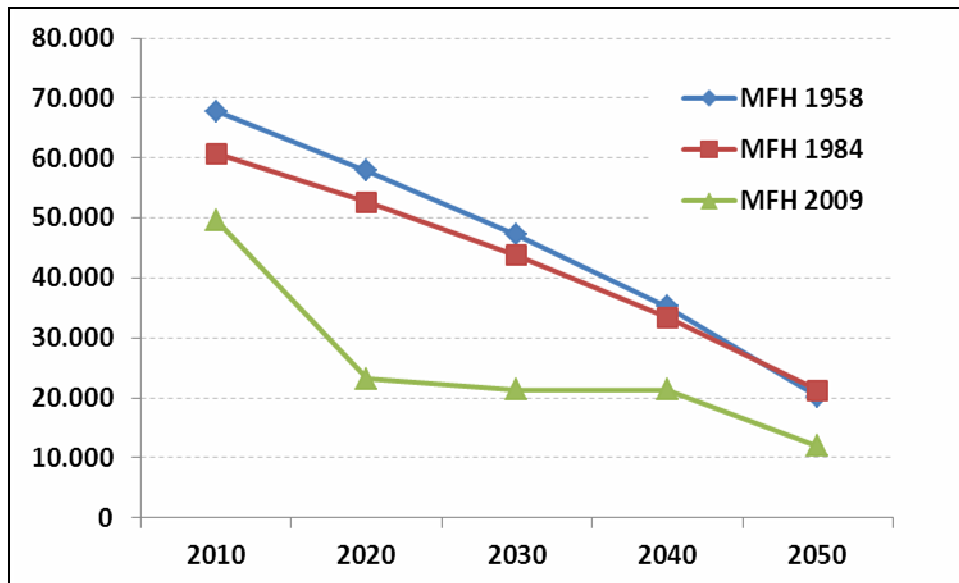
Der für das jeweilige Wohngebäude erforderliche Heizwärmebedarf kann u. a. durch die wärmetechnische Beschaffenheit des Gebäudes beschrieben werden. Ausgehend vom Heizwärmeverbrauch des Jahres 2010, der differenziert für die Gebäudetypen vorliegt, können für die verschiedenen Szenarien unter Berücksichtigung der energetischen Sanierungsrate und der Entwicklung der Energiestandards Aussagen zur Fortentwicklung des Jahresheizwärmebedarfs bis 2050 getroffen werden. Da sowohl im Trendszenario als auch im Szenario Innovations-

offensive Gas gleiche energetische Sanierungsraten und Energiestandards unterstellt werden, sind die Werte der nachgefragten Jahresheizwärme gleich. In beiden Szenarien wird vom Energiestandard der EnEV 2009 und einer energetischen Sanierungsrate von jährlich 1 %, die ab 2020 auf 1,5 % pro Jahr bis 2050 ansteigt, ausgegangen. Hierdurch sinkt vor allem bei älteren Wohngebäuden (EFH 1958 und MFH 1958) bis zum Jahr 2050 der Jahresheizwärmebedarf deutlich. Im Jahr 2050 erreichen die Gebäudetypen EFH 1954 und EFH 1984 mit 12.500 kWh/a ungefähr das gleiche Niveau. Neue Einfamilienhäuser erreichen einen Jahresheizwärmebedarf unter 5.000 kWh/a. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 5 und Abbildung 6) sind für das Trendszenario und das Szenario Innovationsoffensive Gas die Entwicklungen des Jahresheizwärmebedarfs je Gebäudetyp abgebildet.

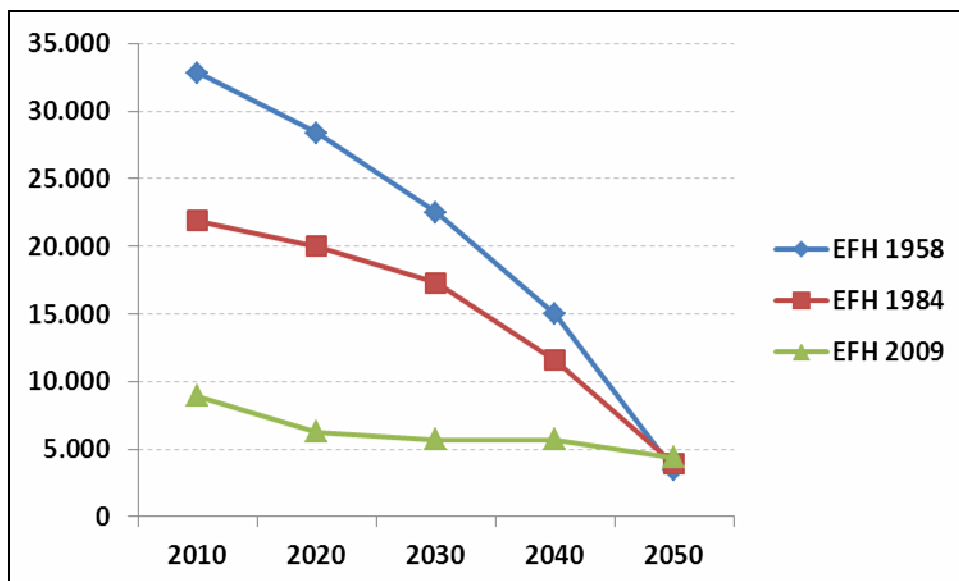
Ausgehend vom Jahresheizwärmebedarf des Jahres 2010 wird im Szenario Energiekonzept gemäß [BMWi2010] eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate und weitere Verschärfungen der Energiestandards in 2013 und 2020 für Alt- und Neubauten um je 30 % unterstellt. Durch diese Maßnahmen soll das angestrebte Ziel eines nahezu klimaneutralen Wohngebäudebestands realisiert werden. Entsprechend resultiert für die Gebäudetypen im Vergleich zum Trendszenario und Szenario Innovationsoffensive Gas eine größere Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfs, der in Abbildung 7 und Abbildung 8 getrennt für Ein- und Mehrfamilienhäuser ausgewiesen ist.



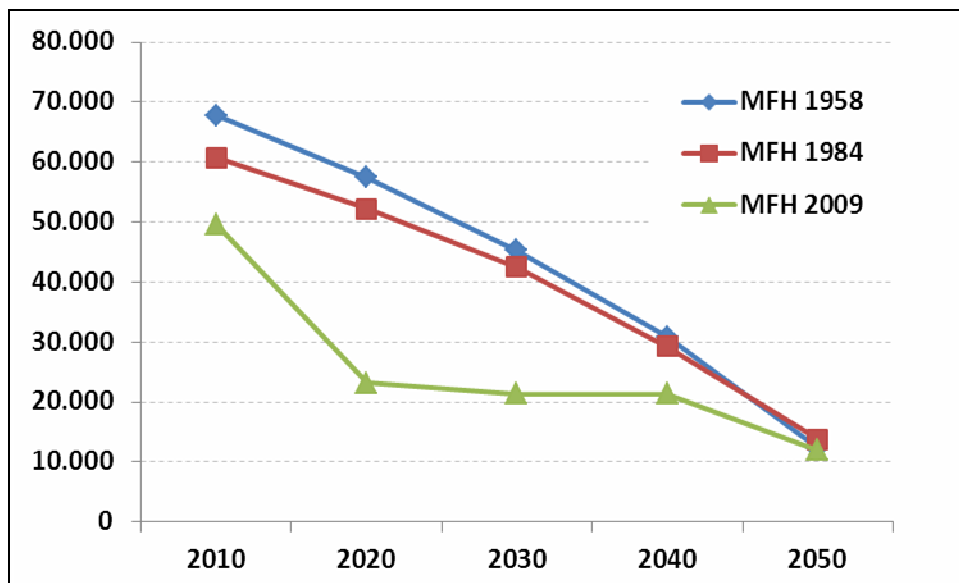
**Abbildung 5:** Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Einfamilienhäuser im Szenario Trend und Innovationsoffensive Gas in kWh/a



**Abbildung 6:** Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Mehrfamilienhäuser im Szenario Trend und Innovationsoffensive Gas in kWh/a



**Abbildung 7:** Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Einfamilienhäuser im Szenario Energiekonzept in kWh/a

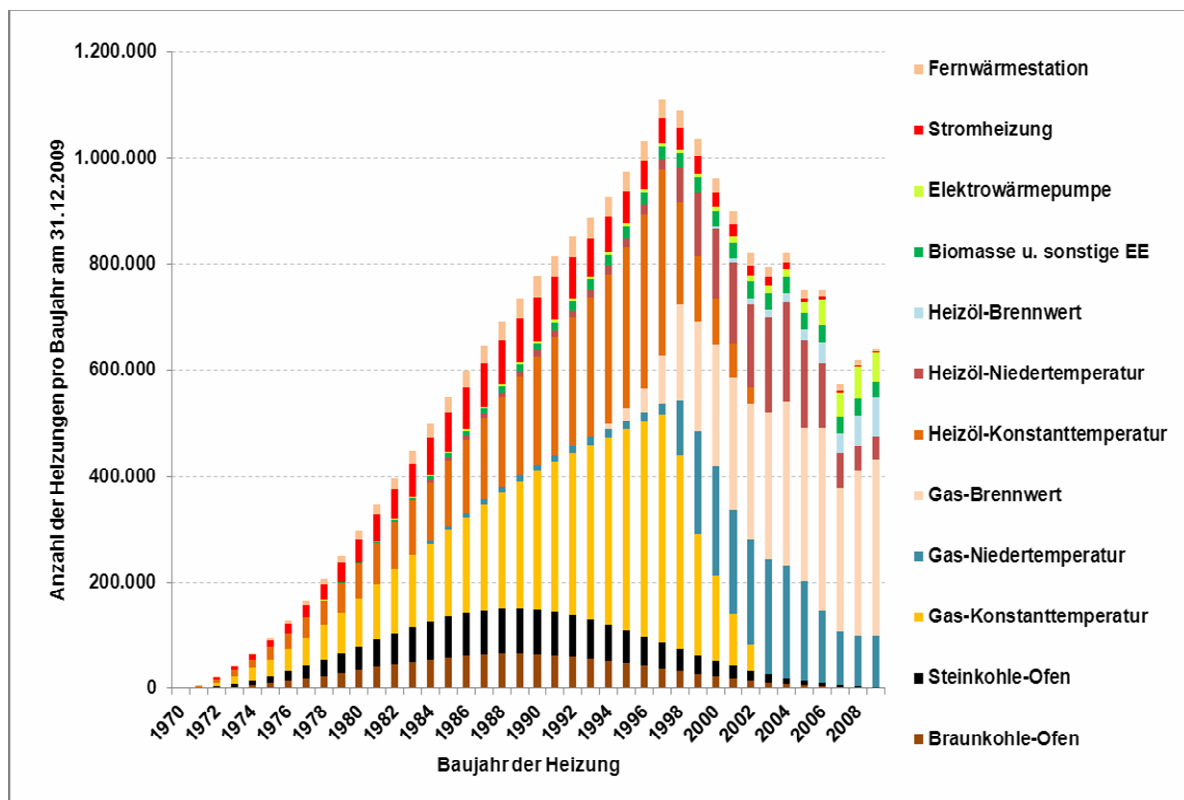


**Abbildung 8:** Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Mehrfamilienhäuser im Szenario Energiekonzept in kWh/a

### 7.1.3 Bestand an Heizungstechnologien

Neben den konventionellen Heizungstechnologien, wie der Niedertemperatur- und Brennwerttechnik, wurde der Heiztechnikmarkt in den letzten Jahren zunehmend mit einer Vielzahl von innovativen Technologien bereichert. Insbesondere die Wärmepumpentechnik, sowohl strom- als auch gasbetrieben, sowie solarunterstützte Heizungssysteme sind hier zu nennen. Weiterhin haben vollautomatisierte Festbrennstoffkessel, die mit Holzpellets betrieben werden und Holzhackschnitzelfeuerungen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Einen wesentlichen Anteil am Heizungsmarkt, sowohl beim Austausch als auch beim Neubau, sollen in Zukunft Mikro-KWK-Technologien haben. Der Begriff Mikro-KWK wird in den neusten Normen und Richtlinien häufig mit einer Brennstoffbelastung  $< 70$  kW definiert. Dieser Begriff wird im Rahmen des Projektes sowohl für Anlagen im Ein- als auch im Mehrfamilienhauseinsatz genutzt. Bisher waren es vor allem die ottomotorisch betriebenen Mikro-KWK-Anlagen, die in der Klasse 3 – 6 kW elektrischer Leistung eingesetzt werden. Nachdem erste Stirlingmotoranlagen ebenfalls das Entwicklungsstadium hinter sich gelassen haben, wird angenommen, dass diese Technologie kurzfristig flächendeckend eingeführt wird. Des Weiteren wird angenommen, dass die Brennstoffzellentechnik aufgrund hoher elektrischer Nutzungsgrade zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.



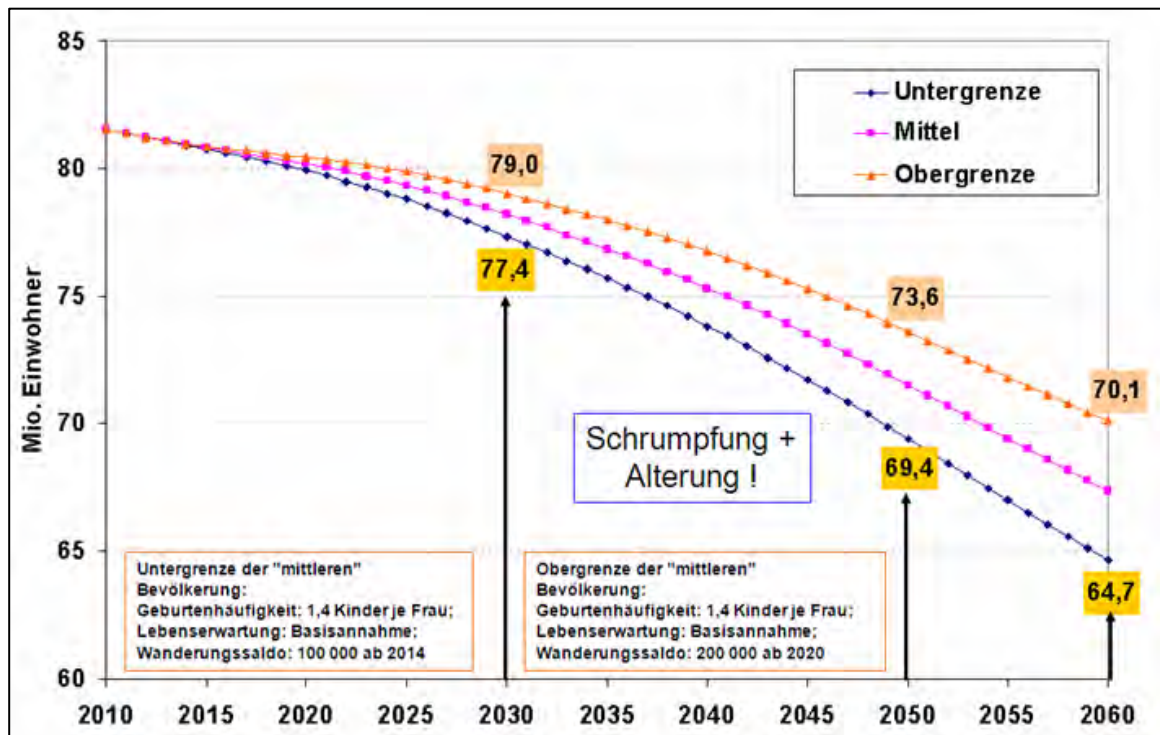
**Abbildung 9:** Heizkesselbestand in privaten Haushalten am 31.12.2009

Diese innovativen Heizungssysteme werden den derzeitigen Heizkesselbestand, vollkommen verändern. In der Abbildung 9 ist der Bestand der Heizkessel, gegliedert nach den Gesamtzahlen der jährlich installierten Heizkessel und differenziert nach den Heizkesselarten, ausgewiesen. Am Ende des Jahres 2009 war der aktuelle Heizkesselbestand der privaten Haushalte, der insgesamt rund 23,3 Mio. Kessel umfasst, dominiert durch 11,1 Mio. Gaskessel. Insgesamt waren bis Ende 2009 rund 3,4 Mio. Gasbrennwertkessel in Wohngebäuden installiert. Zugleich ist festzustellen, dass mehr als 70 % des Kesselbestands des Jahres 2009 unter Berücksichtigung eines mittleren Erneuerungszyklus von 25 Jahren als veraltet und sanierungsbedürftig einzustufen ist. Folglich kann durch eine verstärkte Erneuerung der Heizkessel bzw. der Heizungssysteme im Bestand ein erhebliches Energieeinsparpotenzial gehoben werden (vgl. Kapitel 8.2).

## 7.2 Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung

Ein wesentlicher Parameter zur Kennzeichnung der weiteren Energienachfrage stellt neben der Beschreibung des wärmetechnischen Ausgangszustands und des Anlagenbestandes sowie der Entwicklung der Heizungstechniken insbesondere die zukünftige Entwicklung der Bevölkerungszahlen und der Anzahl der Haushalte dar, da diese Parameter unmittelbaren Einfluss auf die zukünftige Wohnflächen-nachfrage haben. Dabei sind hinsichtlich der Entwicklung der Bevölkerung neben den Gesamtzahlen vor allem die strukturellen Änderungen zu beachten, die Auswirkungen auf die Anzahl der Haushalte und die Haushaltsgrößen haben. Im vorliegenden Projekt wurden für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 die Bevölkerungszahlen der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes [STBA2010] entnommen. Strukturell überlagern sich in den Varianten die Effekte einer zunehmenden Alterung und Schrumpfung der Bevölkerung in Deutschland. Konkret wurde in den Szenarien die Untergrenze der mittleren Bevölkerungsentwicklung unterstellt, wonach die Anzahl der Einwohner bis 2030 auf 77,4 Mio. und bis 2050 auf 69,4 Mio. sinkt (s. Abbildung 10). Analysen zu den vergangenen Entwicklungen der Bevölkerungszahlen in den Jahren 2003 bis 2009 bestätigen bei niedrigen bzw. negativen Wanderungssalden die zukünftige Entwicklung gemäß der Untergrenze.

Auf der Basis der Bevölkerungsentwicklung differenziert nach Altersgruppen wird mit dem Nachfragetool des Wohngebäudesimulationsmodells unter Berücksichtigung der Haushaltsvorausberechnung und der Einkommens-Verbrauchs-stichprobe des Statistischen Bundesamtes die Anzahl der Haushalte und die Zusammensetzung der Struktur der Haushalte ermittelt [StBA2007; EVS2008]. Die Veränderungen der Altersgruppen führen demnach bei der Untergrenze der mittleren Bevölkerungsentwicklung zunächst zu einer mäßigen Steigerung der Haushaltszahlen bis 2020 auf 40,4 Mio., die sich jedoch bis 2050 auf 37,2 Mio. Haushalte verringern. Während die Zahlen der Ein- und Zwei-Personen-Haushalte zunehmen, vermindern sich die Zahlen der Mehrpersonenhaushalte deutlich. Folglich nimmt die Zahl der Personen pro Haushalt von 2,04 auf 1,87 im Jahr 2050 ab (vgl. Tabelle 7).



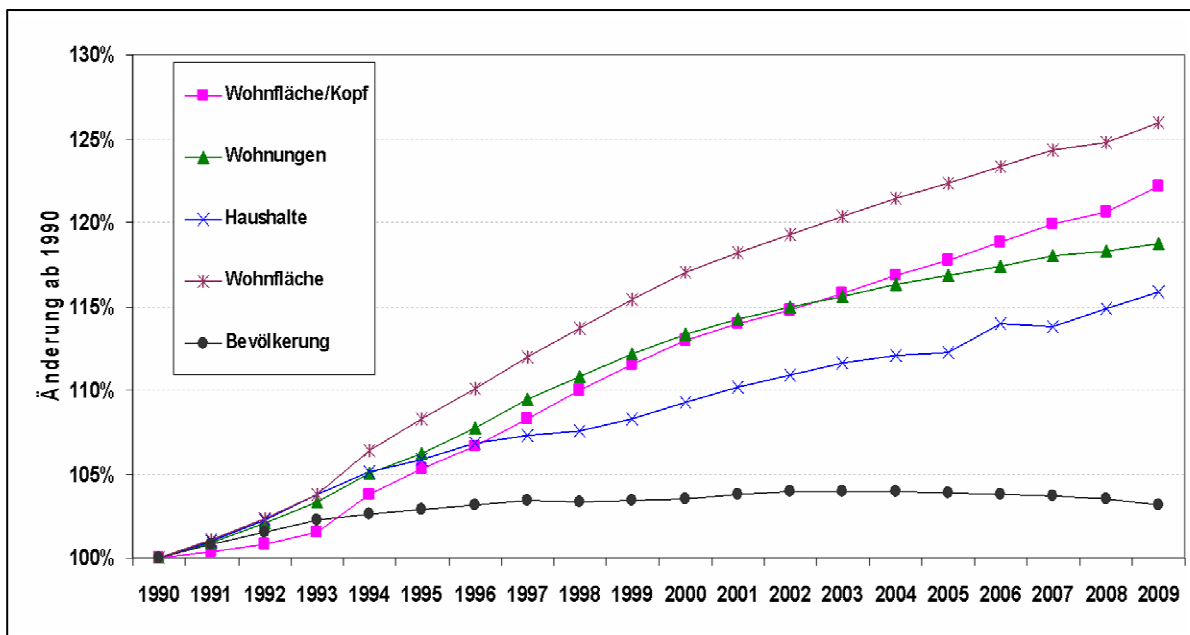
**Abbildung 10:** Entwicklung der Bevölkerungszahlen in Deutschland nach der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamts [STBA2010]

### 7.3 Entwicklung der Wohnflächennachfrage

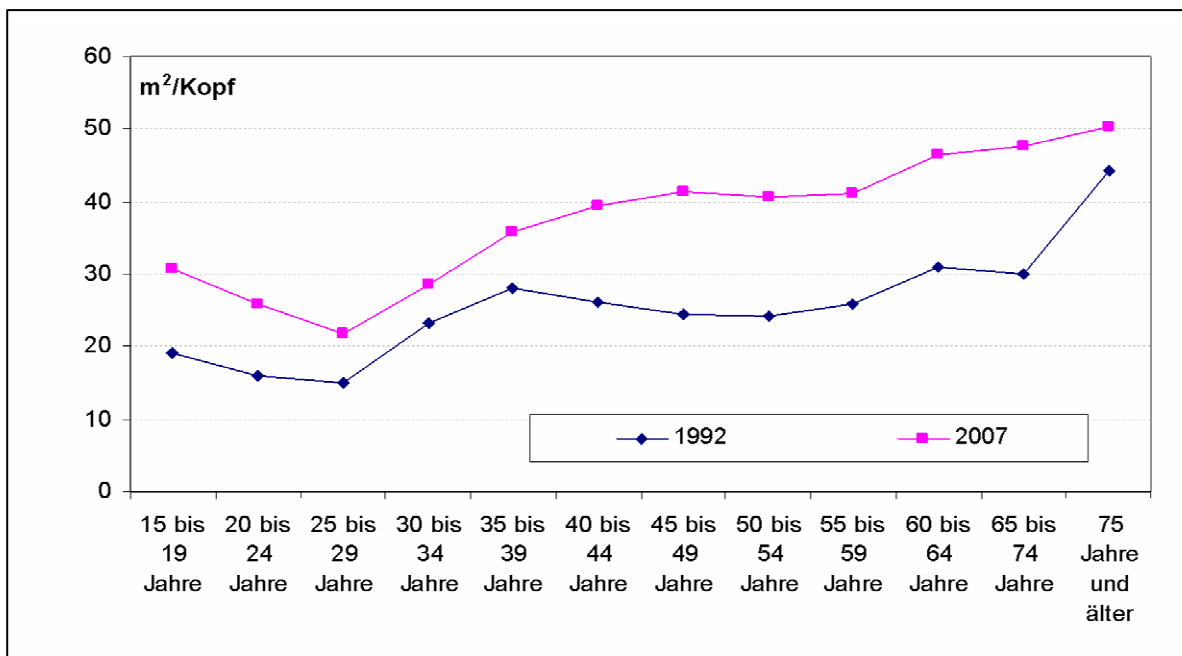
Die nachgefragte Wohnfläche der privaten Haushalte hat sich im Zeitraum 1990 bis 2009 um 27,5 % vergrößert. Die Anzahl der Haushalte ist im gleichen Zeitraum um 17,5 % und die Gesamtzahl der Bevölkerung um ca. 3,5 % angestiegen. Somit ist die personenspezifisch nachgefragte Wohnfläche gegenüber den Haushaltszahlen überproportional gewachsen. Der Trend zu kleineren Haushaltsgrößen (Personen je Haushalt; vgl. Tabelle 7) und der so genannte Remanenzeffekt sind hierfür vor allem als Gründe anzuführen. Die personenspezifische Wohnfläche ist gegenüber dem Jahr 1990 bis zum Jahr 2009 um mehr als 20 % auf nunmehr 42,5 m<sup>2</sup> gestiegen (s. Abbildung 11).

Eine differenzierte Untersuchung der spezifischen Wohnflächennachfrage nach Altersgruppen ist vom Institut der Deutschen Wirtschaft in 2010 in [IDW2009] vorgenommen worden (vgl. Abbildung 12). Die altersgruppenspezifische Nachfrage wurde für die Jahre 1992 und 2007 durchgeführt. Im Vergleich der beiden Analysejahre ist generell festzustellen, dass die Wohnflächennachfrage in allen Altersgruppen deutlich angewachsen ist und dass die spezifische

Wohnflächennachfrage mit zunehmendem Alter ansteigt. Die größten Anstiege sind bei den Altersgruppen der 40- bis 60-Jährigen zu erkennen.



**Abbildung 11:** Entwicklung der Bevölkerungszahlen, Haushaltszahlen und Wohnfläche im Zeitraum 1990 bis 2009 [BMW2011]



**Abbildung 12:** Altersspezifische Wohnflächennachfrage in den Jahren 1992 und 2007 [IDW2009]



**Tabelle 7:** Entwicklung der Wohnfläche bis 2050 [STBA2010, Variante 1-W1  
Untergrenze; eigene Berechnungen]

	2005	2009	2020	2030	2040	2050
Wohnbevölkerung in Mio.	82,44	81,80	79,91	77,35	73,83	69,41
Private Haushalte in Mio.	39,18	40,19	40,40	40,10	38,82	37,17
davon (in Mio.)						
1-Personenhaushalte	14,69	16,00	16,30	16,53	16,55	16,57
2-Personenhaushalte	13,28	13,74	14,59	14,90	15,03	15,15
3-Personenhaushalte	5,48	5,14	4,79	4,36	3,60	2,68
4-Personenhaushalte	4,23	3,89	3,46	3,23	2,82	2,23
5 u. mehr Personenhaushalte	1,53	1,43	1,26	1,09	0,81	0,54
Personen je Haushalt	2,10	2,04	1,98	1,93	1,90	1,87
Wohnfläche in Mrd. m <sup>2</sup>	3,40	3,48	3,68	3,83	3,88	3,87
Neubauwohnfläche in Mrd. m <sup>2</sup>			0,31	0,59	0,82	1,03
Bestandswohnfl. in Mrd. m <sup>2</sup>			3,37	3,24	3,06	2,84
Wohnfläche je Haushalt in m <sup>2</sup>	86,7	86,6	91,2	95,6	99,9	104,0
Wohnfläche je Person in m <sup>2</sup>	41,2	42,5	46,1	49,6	52,6	55,7

### 7.3.1 Bestandsveränderungen

Bei Analysen des Wohngebäudesektors stellt die Entwicklung der Gebäudeflächen zur Abschätzung der Wirkungen einen entscheidenden Parameter dar. Dabei setzt sich der Bestand der Gebäudewohnflächen aus den Altbau- und Neubauflächen zusammen. Die insgesamt bewohnte Wohnfläche kann aus der Addition des Altbaus, der ohne den Leerstand berücksichtigt wird und der Neubauwohnfläche bestimmt werden. Die aktuelle Leerstandsquote liegt bundesweit nach Angaben des Statistischen Bundesamts bei ca. 8 % und sinkt nach den gesetzten Annahmen auf nahezu 5 % bis zum Jahr 2050 ab. Die Bestandsveränderungen durch Abriss werden durch eine konstante Abrissquote von 0,2 % berücksichtigt. Die jährliche Neubauwohnfläche steigt nach den in den Szenarien getroffenen Annahmen von dem erreichten Tiefpunkt von 18,5 Mio. m<sup>2</sup> im Jahr 2009 auf 23,5 Mio. m<sup>2</sup> im Jahr 2015 an und bleibt bis zum Jahr 2050 nahezu konstant. Folglich kann unter der Berücksichtigung der demographischen Rahmendaten für die Entwicklung der Wohnbevölkerung und der Haushaltsstruktur die gesamte bewohnte Wohnfläche sowie die Neubauwohnfläche ausgewiesen und für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 ermittelt werden. Unter Einbeziehung der Neubauwohnfläche des Zeitraums 2010 bis 2050 von 1,03 Mrd. m<sup>2</sup> steigt die bewohnte Wohnfläche insgesamt von 3,22 Mrd. m<sup>2</sup> im Jahr 2009 um 14 % auf 3,67 Mrd. m<sup>2</sup> im Jahr 2050 an (Tabelle 7 und Tabelle 8).

**Tabelle 8:** Bestandsveränderungen in der Wohnfläche (alle Angaben in Mrd. m<sup>2</sup>)

	2009	2010	2020	2030	2040	2050
Altbau (netto ohne Leerstand)	3,22	3,21	3,16	3,05	2,87	2,65
Neubau	0,00	0,03	0,31	0,59	0,82	1,03
Bewohnte Wohnfl. (Ref. V1-W1)	3,22	3,24	3,47	3,64	3,69	3,67

Auf dieser Grundlage können mit Hilfe des Wohngebäudesimulationsmodells die Wirkungen verschiedener Maßnahmen und Einflussgrößen errechnet werden. Die notwendigen Leitparameter aus der Bau- und Heizungspraxis gehen direkt in die Modellrechnungen ein und beeinflussen die erreichbare CO<sub>2</sub>-Einsparung (vgl. Kapitel 8.3). Die relevanten Parameter sind u.a. die Renovierungszyklen der Gebäudehülle und der Heizungen sowie die Ausschöpfung der Sanierungspotenziale im Altbaubereich.

- Die Renovierungszyklen der Bauteile werden von den technischen Lebensdauern bestimmt. Die Zahlen aus der Sanierungspraxis variieren in einem relativ großen Bereich mit einer bestimmten Häufigkeitsverteilung. Gründe für die Streubreite sind die unterschiedliche Qualität der Bauteile, die unterschiedliche Belastung bei der Nutzung und der mögliche Einfluss von Reparaturen.
- Die Ausschöpfung der Sanierungspotenziale bei energetischen Sanierungen wird durch die Kennzahl „Potenzialausnutzung“ erfasst und gibt das Verhältnis der tatsächlich erreichten Einsparungen zu den maximal möglichen Einsparungen an. Die Sanierungspraxis im Jahr 2005 kann nach Kleemann & Hansen [KLEE2005] durch einen Wert von 32 % beschrieben werden. Ferner zeigen die Analysen des CO<sub>2</sub>-Gebäudereports (2007) hinsichtlich der kumulierten Sanierungsquote zwischen 1989 und 2006, dass in diesem Zeitraum in den Altbauten weniger als 30 % aller möglichen energetischen Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Bezüglich der energetischen Sanierungsrate hat die Sensitivitätsanalyse in „Politik-szenarien V“ [CLI2010] gezeigt, dass die derzeitige energetische Sanierungsrate in den Jahren 2005 bis 2008 im Mittel einen Wert von 0,83 % aufweist. Bezug nehmend auf die mittlere Sanierungsrate der gesamten Gebäudehülle von 2,6 % pro Jahr bedeutet dies, dass aktuell nur 32 % des möglichen Sanierungspotenzials energetisch gemäß den Vorgaben der EnEV 2009 saniert werden. Die Details zu den Renovierungs-

zyklen der einzelnen Bauteile der Gebäudehülle sind in Tabelle 9 dargestellt.

**Tabelle 9:** Renovierungszyklen der Bauteile der Gebäudehülle und mittlere Sanierungsraten nach [HANSEN2009]

Bauteile	Renovierungszyklen in a		mittlere Sanierungsrate in %/a
	Min	Max.	
Fassaden	30	60	2,22
Steildach	40	60	2,00
Flachdach	20	40	3,33
Keller	30	60	2,22
Fenster	20	35	3,64
Gebäudehülle gesamt	20	60	2,60

### 7.3.2 Energetische Sanierungsraten

In Anlehnung an die Aussagen in [HANSEN2009] kann die energetische Sanierungsrate durch das Produkt der Sanierungsrate und der zugehörigen Sanierungsqualität bestimmt werden. Bei der Durchführung einer Sanierung der Gebäudehülle beschreibt die Sanierungsqualität die Ausschöpfung der Sanierungspotenziale, die auch als Potenzialausnutzung bezeichnet werden kann. Da die aktuelle energetische Sanierungsrate bei max. 1,0 % pro Jahr liegt, wird im Szenario Trend und im Szenario Innovationsoffensive Gas unterstellt, dass diese energetische Sanierungsrate bis 2020 bei 1,0 % pro Jahr verbleibt und bis 2050 auf 1,5 % ansteigt. Somit wird bereits im Szenario Trend gegenüber heute von verstärkten Sanierungsaktivitäten ausgegangen. Im Szenario Innovationsoffensive Gas wird entgegen dem Szenario Trend keine weitere Erhöhung der Sanierungen und der zugehörigen Sanierungsqualität angenommen (Tabelle 10).

Im Szenario Energiekonzept wird entsprechend dem Energiekonzept [BMW2010] eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate auf 2 % pro Jahr angenommen. Die ambitionierte Sanierungsrate wird gemäß den Annahmen des Szenarios ab 2015 erreicht und bleibt bis 2050 auf diesem Niveau. Die zusätzlich energetisch sanierte Wohnfläche gegenüber dem Szenario Trend nach den Vorgaben der jeweils gültigen EnEV beträgt fast 900 Mio. m<sup>2</sup>.

**Tabelle 10:** Vergleich der energetischen Sanierungsraten und sanierten Wohnflächen in den Szenarien Innovationsoffensive Gas und Energiekonzept

	Energetische Sanierungsrate in %		Energetisch sanierte Fläche (in Mio. m <sup>2</sup> ) der Szenarien Trend und Innovationsoffensive Gas			Energetisch sanierte Fläche (in Mio. m <sup>2</sup> ) des Szenario Energiekonzept		
	Innovations-offensive	Energie-konzept	EFH	MFH	Gesamt	EFH	MFH	Gesamt
2010	1,00	1,00	16,8	12,3	29,1	16,8	12,3	29,1
2020	1,00	2,00	184,6	135,8	320,4	318,9	234,6	553,5
2030	1,17	2,00	367,9	270,6	638,5	654,6	481,5	1.136,1
2040	1,33	2,00	579,1	426,0	1.005,1	990,4	728,4	1.718,8
2050	1,50	2,00	818,3	601,9	1.420,2	1.326,1	975,4	2.301,4

## 7.4 Entwicklung der Heiztechnologien

### 7.4.1 Generelles Vorgehen zur Nutzungsgradermittlung der berücksichtigten Heiztechnologien

Basis zur Ermittlung der benötigten Nutzungsgrade ist die in der Studie Systemanalyse I [Syst2010b] dieses Projektes durchgeführte Simulation zur Analyse der Energieflusketten der dezentralen Erzeugungsketten. Es wurden dabei für jede der berücksichtigten Technologien, Lastgänge auf Basis der VDI 4655 [VDI2008] in tagesgenauer Auflösung vorgegeben. Ebenfalls aus der VDI 4655 ließen sich Trinkwarmwasserbedarfe sowie Strombedarfe in Abhängigkeit der Personenzahl bei Einfamilienhäusern bzw. in Abhängigkeit der Wohnungsanzahl bei Mehrfamilienhäusern entnehmen. Die jeweils betrachteten Anlagen mussten hinsichtlich der Leistungsgröße so ausgelegt sein, dass sie die benötigte Wärme für Heizung und Trinkwarmwasser in jedem Fall abdecken konnten. Insbesondere bei den innovativen Heiztechnologien mussten aufgrund der häufig geringen thermischen Leistungsabgabe, Zusatzheizgeräte integriert werden, um die benötigte thermische Leistung bereitstellen zu können. Dementsprechend wurden in den Simulationen keine Gerätenutzungsgrade sondern Systemnutzungsgrade ermittelt.

Während in der Studie Systemanalyse I [Syst2010b] die Bilanzgrenze um das gesamte Gebäude gelegt wurde und somit auch der bezogene elektrische Strom in die Nutzungsgradermittlung einfluss, sind in dieser Studie lediglich die thermischen Nutzungsgrade von Relevanz. Hierbei war es von besonderer

Bedeutung, die Abhängigkeit der Systemnutzungsgrade vom Wärmebedarf des Gebäudes so zu ermitteln, dass diese bei den Szenarienberechnungen dynamisch als Funktion des Wärmebedarfs eingebunden werden konnten. Die angegebenen thermischen und elektrischen Nutzungsgrade sind demnach endenergiebezogen.

Als Eingangsgrößen für die Simulation wurden neben den Technologiedaten, Gebäudedaten aus Kapitel 7.1.1 verwendet.

## **7.4.2 Berücksichtigte Technologien**

Die in der Szenarienberechnung enthaltenen Heizungstechnologien für das Einfamilienhaus entstammen im Wesentlichen den Vorgaben aus Teil I [SYST2010c] dieses Projektes. Betrachtet werden die in Tabelle 13 dargestellten Technologien mit ihren Eckdaten für den Einsatz im Einfamilienhaus sowie analog dazu in Tabelle 15 die Technologien und Eckdaten für den Einsatz im Mehrfamilienhaus. Die Angaben beruhen im Wesentlichen auf Herstellerangaben und eigenen Annahmen, welche im Folgenden je Technologie kurz erläutert werden.

### **7.4.2.1 Eingesetzte Heiztechnologien im EFH**

Unter Berücksichtigung von Voll- und Teillastbetrieb - abhängig von der betrachteten Anlage - ist es möglich, realitätsnahe Simulationsergebnisse zu erhalten (eine detaillierte Beschreibung liefert [Syst2010b]). Hierzu ist es notwendig, die Voll- und Teillastdaten der jeweiligen betrachteten Technologien zu kennen. Die im Folgenden verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 12 erläutert. Für die konventionellen, modulierenden Technologien (A1, A2, A10) geben Hersteller in der Regel einen Volllastwirkungsgrad und die entsprechende Leistung sowie einen Teillastwirkungsgrad bei einem Leistungsanteil von 30 % der Gesamtleistung an. Diese Daten werden für die Simulation benötigt und sind in Tabelle 13 hinterlegt. Bei innovativen, bivalenten Heizungssystemen (A5, A6, A7, A8, A9) ist der Teillastbetrieb als alleiniger Betrieb des innovativen Moduls im System definiert. Die Daten des Volllastbetriebes gelten für ein im System integriertes Zusatzheizgerät (i. d. R. ein Brennwertkessel). Die Gesamtleistung des Systems ist dementsprechend bei den konventionellen Technologien gleich der Leistung im Volllastbetrieb. Bei den innovativen, bivalenten Systemen errechnet sich die Gesamtleistung des Systems als Summe der Leistung im Volllastbetrieb und der Leistung im Teillastbetrieb, da bei Volllast immer beide Module gleichzeitig betrieben werden. Neben den modulierenden, konventionellen Technologien und den bivalenten innovativen Systemen werden die Elektrowärmepumpe und die Stromheizung als konventionelle, taktende Systeme betrachtet, welche lediglich

durch Ein- und Ausschaltungen geregelt werden. Die verschiedenen Betriebsweisen sind in Tabelle 11 zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 11:** Systemarten und Betriebsweisen der eingesetzten Technologien im EFH

	Systemarten		
	Konventionell modulierend	Konventionell taktend	Innovativ bivalent
<b>Teillastbetrieb</b>	30% der Volllast	-	100% Leistung des innovativen Moduls
<b>Volllastbetrieb</b>	100% Leistung	100% Leistung	100% Leistung des innovativen Moduls + 100% Leistung des Zusatzheizgerätes

Aus Tabelle 12 lassen sich die Abkürzungen der betrachteten Technologien entnehmen.

**Tabelle 12:** Kurzbezeichnung der eingesetzten Systeme im EFH

Abkürzung	System (EFH)
A1	Niedertemperatur
A2	Brennwert
A3	Brennwert + Solar
A4	Elektrowärmepumpe mit Bodenkollektoren
A5	Gaswärmepumpe
A6	PEM-Brennstoffzelle
A7	Stirlingmotor
A8	Ottomotor
A9	SOFC-Brennstoffzelle
A10	Pelletkessel
A11	Stromheizung

Die Angaben zu den konventionellen Technologien (**A1**, **A2**, **A10**) beruhen auf Herstellerangaben und eigenen Abschätzungen. Für das System Brennwertkessel + Solar (**A3**) wird ein zu A2 baugleicher Brennwertkessel genutzt. Der angenommene Flachkollektor weist einen auf Herstellerangaben basierenden Kollektorstufenwirkungsgrad von 70 % auf. Die angesetzte Fläche von 4,5 m<sup>2</sup> wurde aus den Vorgaben des EEWärmeG abgeleitet und entspricht diesen.

Die Daten der Elektrowärmepumpe (**A4**) wurden unter Berücksichtigung von gemessenen Leistungszahlen [WPZW2010] ermittelt. Es handelt sich um eine nichtmodulierende Wärmepumpe mit Erdwärmenutzung. Über die Angaben der Effizienz bei verschiedenen Bodentemperaturen und Daten zum jährlichen Verlauf der Bodentemperatur aus DIN 4710 [DIN2003] konnte der Einfluss der sich im Jahresverlauf ändernden Quellentemperaturen in der Simulation berücksichtigt werden. Obwohl Elektrowärmepumpen z. T. nicht - bzw. nur mit erheblichen Effizienzeinbußen - zur Trinkwarmwasserbereitung beitragen können, wurde dies zur Vereinfachung angenommen.

Das System Gaswärmepumpe (**A5**) besteht aus dem eigentlichen Wärmepumpenmodul, welches nach dem Absorptionsprinzip betrieben wird und einem integrierten Zusatzheizgerät mit Brennwertnutzen. Die Daten für dieses System beruhen auf Veröffentlichungen der ASUE [GASW2002] sowie auf Herstellerangaben.

Als Niedertemperaturbrennstoffzellensystem (**A6**) wurde eine PEM-Brennstoffzelle mit einem integrierten Brennwertzusatzheizgerät gewählt. Die Leistungs- und Effizienzangaben basieren auf Herstellerangaben sowie eigenen Annahmen und Messungen.

Die Daten des eingesetzten Stirlingmotorsystems (**A7**) beruhen ebenfalls auf Herstellerangaben und eigenen Annahmen. Das System besteht aus dem KWK-Modul mit Stirlingmotor sowie einem integriertem zusätzlichen Brennwertgerät.

Der eingesetzte Ottomotor als System mit zu A2 identischem Zusatzheizgerät (**A8**) ist - im Gegensatz zum in Teil 1 des Vorhabens [SYST2010b] - eine Anlage mit einer sehr geringen thermischen Leistung, was dem Einsatz im Einfamilienhaus zugute kommt. Die Daten wurden auf Grundlage von Herstellerangaben und eigenen Annahmen ermittelt.

Als Zukunftstechnologie wird ein System (**A9**) bestehend aus Hochtemperaturbrennstoffzelle nach dem SOFC-Prinzip zusammen mit einem zu A2 identischen Zusatzheizgerät eingesetzt. Die Daten für das System basieren auf Herstellerangaben und eigenen Annahmen.

Der betrachtete Pelletkessel (**A10**) wird als monovalente Anlage ausgeführt und mit KUP-Pellets betrieben. Als Datengrundlage wurden Herstelleraussagen genutzt.

Die elektrische Widerstandsheizung (**A11**) wandelt gemäß physikalischem Grundsatz elektrischen Strom zu 100 % in Wärme um.

**Tabelle 13:** Eckdaten der betrachteten Heiztechnologien für das EFH

Anlagennr.		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
Leistung Vollast	$Q_{th,Voll}$ kW	18	17	17	21,58	11	20	17,6	17	17	18	-
Leistung Teillast	$Q_{th,teil}$ kW	5,4	5,1	5,1	-	3,6	1,83	5,6	2,5	0,5	5,4	-
Wirkungsgrad Vollast	$\eta_{th,Voll}$ %	92,5	96,1	96,1	400	96,1	100,5	98	96,1	96,1	95	100
Wirkungsgrad Teillast	$\eta_{th,teil}$ %	93,4	108,8	108,8	-	150	62,3	82	67	25	94	-
Elektrische Leistung	$P_{el}$ kW	-	-	-	-	-	0,96	0,94	1	1,5	-	-
Elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el}$ %	-	-	-	-	-	32,8	14	27	60	-	-
Solarkollektorfläche	$A_{koll}$ m <sup>2</sup>	-	-	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Solarkollektorstufenwirkungsgrad	$\eta_{koll}$ %	-	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-

#### 7.4.2.2 Eingesetzte Technologien im MFH

Die Ermittlung der benötigten thermischen Leistung je Gebäude erfolgt im Gegensatz zum EFH beim MFH bedarfsgerecht. Es werden daher keine Leistungsdaten je Anlage angegeben. Die in Tabelle 15 angegebenen Formeln zur Ermittlung der thermischen Leistung werden in Kapitel 7.5.4 erläutert. Die Versorgung der betrachteten MFH erfolgt in diesem Vorhaben ausschließlich über eine zentrale Heizungsanlage. Diese Art der Beheizung ist im Mehrfamilienhausbereich mit einem Anteil von ca. 62,5 % die häufigste in Deutschland. Weitere 25 % der Mehrfamilienhäuser werden dezentral versorgt<sup>4</sup> [SANI2011]. Für diesen Anteil wurden keine gesonderten Simulationen bezüglich der Heizungs-technologien durchgeführt.

Zur Ermittlung der Systemnutzungsgrade über eine Simulation, wurde analog zum Vorgehen beim EFH im Wesentlichen auf Gerätedaten von Herstellern sowie eigene Annahmen zurückgegriffen. Zum Einsatz im Mehrfamilienhaus kommen die in Tabelle 14 dargestellten Technologien.

<sup>4</sup> 12,5 % aller Mehrfamilienhäuser werden mit Fernwärme versorgt.



**Tabelle 14:** Kurzbezeichnung der eingesetzten Systeme im MFH

Abkürzung	System (MFH)
A1	Niedertemperatur
A2	Brennwert
A3	Brennwert + Solar
A4	Elektrowärmepumpe mit Erdsonden
A5	Gaswärmepumpe
A6	PEM-Brennstoffzelle
A7	Ottomotor
A8	Pelletkessel
A9	Stromheizung

Für die konventionellen Technologien im MFH (**A1**, **A2**) wurden die dem im EFH eingesetzten konventionellen Technologien entsprechenden Effizienzdaten zu Grunde gelegt.

Die Solarflächen für das System **A3** wurden mit der Annahme, dass je Wohnung im MFH, 4,5 m<sup>2</sup> Solarfläche vorgehalten werden, errechnet. Als Zusatzheizgerät für den Wärmebedarf außerhalb der Nutzungsperiode der Solaranlage wird ein Brennwertkessel mit zu A2 identischen Daten genutzt.

Die monovalent betriebene Elektrowärmepumpe (**A4**) im MFH wird unter Berücksichtigung von gemessenen COP-Werten [WPZW2010] mit einem Wert von 3,0 angenommen. Dieser gilt explizit für Anlagen mit Vorlauftemperaturen von ca. 55 °C, die sich somit ebenfalls zur Trinkwarmwasserbereitung eignen. Dieser Ansatz trifft für den überwiegenden Gebäudebestand zu. Beim Neubau mit Fußbodenheizungen (Rücklauftemperatur 28 °C) können COP-Werte bis 4,0 angesetzt werden. Als Wärmequelle für die Kältemittelverdampfung kommen hier Erdsonden mit konstanten Quellentemperaturen zum Einsatz.

Bei der Ermittlung der Heizzahl der eingesetzten Gaswärmepumpe (**A5**) mit Absorptionsprinzip konnte die Marktübersicht Gaswärmepumpen 2010 [MARK2010] herangezogen werden. In den benötigten Leistungsbereichen wird von einer Heizzahl in Höhe von 1,5 ausgegangen. Im Gegensatz zum Einfamilienhaus wird aufgrund der größeren Planungsmöglichkeiten auf ein Zusatzheizgerät verzichtet.

Die PEM Brennstoffzelle (**A6**) als monovalenter Energieerzeuger weist eine auf Herstellerangaben beruhende Stromkennzahl von 0,5 auf. Die Wirkungsgrade

wurden abgeschätzt und decken sich im Wesentlichen mit Herstellerangaben. Als Zusatzheizgerät wird ein Brennwertkessel mit zu A2 identischen Daten genutzt.

Zur Ermittlung der Effizienzdaten des betrachteten Mikro-KWK-Moduls (**A7**) wurde auf Basis der BHKW-Kenndaten 2011 [BHKW2011] der ASUE aus insgesamt 30 Modulen in den entsprechenden Leistungsgrößen jeweils ein mittlerer elektrischer sowie ein mittlerer thermischer Wirkungsgrad ermittelt. Da Mikro-KWK-Anlagen in der Regel auf den Grundlastbetrieb ausgelegt sind, wird ein Zusatzgerät mit den zu A2 entsprechenden Daten eingesetzt.

Für den Pelletkessel (**A8**) im Mehrfamilienhaus wurden die zum Einsatz im Einfamilienhaus identischen Daten verwendet. Diese beruhen auf Herstellerangaben und eigenen Abschätzungen.

Die elektrische Heizung (**A9**) wandelt gemäß physikalischem Grundsatz elektrischen Strom zu 100 % in Wärme.

**Tabelle 15:** Eckdaten der betrachteten Heiztechnologien für das MFH

Anlagennr.		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Leistung Volllast	$Q_{th,Voll}$ kW	$A_W \cdot q_W$								
Leistung Teillast	$Q_{th,Teil}$ kW	$Q_{th,Voll} \cdot 0,3$			-	-	$Q_{th,Voll} \cdot 0,2$		$Q_{th,Voll} \cdot 0,3$	-
Wirkungsgrad Volllast	$\eta_{th,Voll}$ %	92,5	96,1	96,1	300	150	96,1	96,1	95	100
Wirkungsgrad Teillast	$\eta_{th,Teil}$ %	93,4	108,8	108,8	-	150	60	61,8	94	-
Elektrische Leistung	$P_{el}$ kW	-	-	-	-	-	$0,5 \cdot Q_{th,Teil}$	$0,47 \cdot Q_{th,Teil}$	-	-
Elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el}$ %	-	-	-	-	-	30	28,8	-	-
Solarkollektorfläche	$A_{koll}$ m <sup>2</sup>	-	-	$4,5 \text{ m}^2 \cdot \eta_W$	-	-	-	-	-	-
Solarkollektorstufenwirkungsgrad	$\eta_{koll}$ %	-	-	60	-	-	-	-	-	-

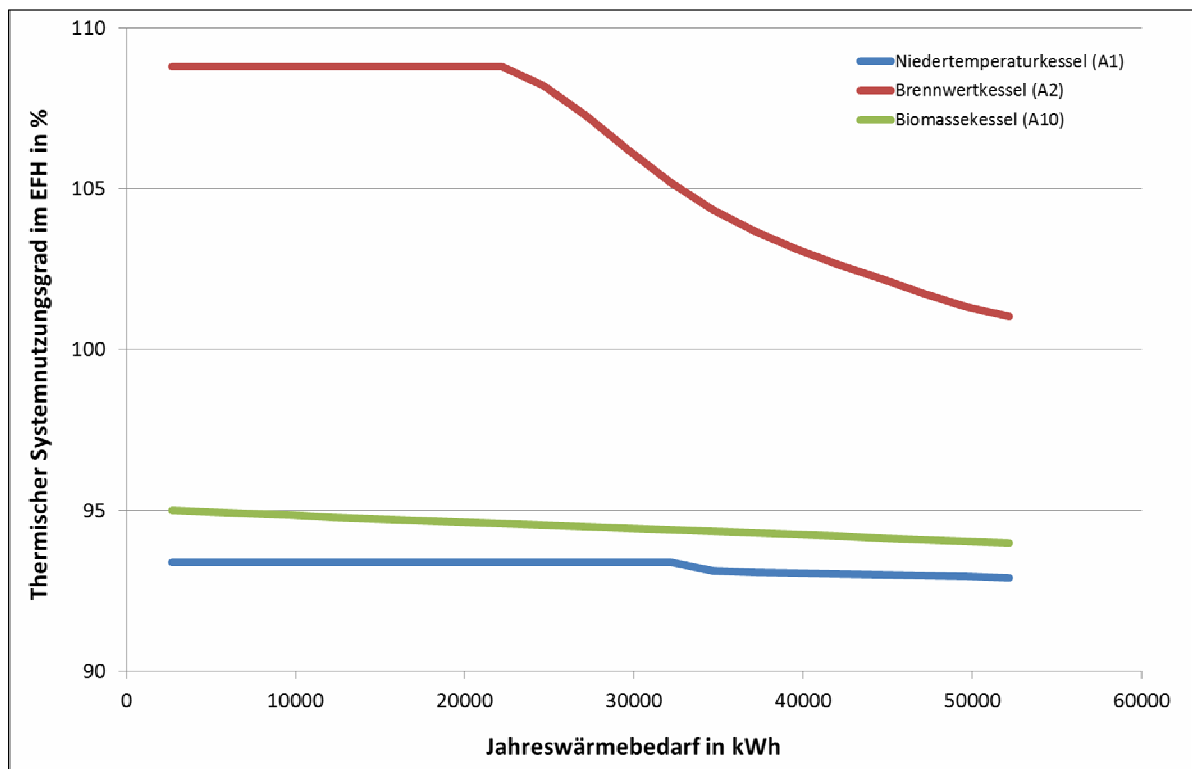
### 7.4.3 Anlagennutzungsgradermittlung für das EFH

Obwohl eine Vielzahl verschiedener Heizungstechnologien für den Einsatz im Einfamilienhaus am Markt erhältlich ist, werden diese häufig nur in einer Leistungsklasse bzw. in wenigen Leistungsklassen angeboten. Konkret bedeutet dies, dass eine Leistungsklasse für alle EFH zunächst unabhängig vom Wärmebedarf des Gebäudes eingesetzt wird. Bei monovalenten Anlagen wie z.B. einem Brennwertgerät wird die Leistungsabgabe entweder durch modulierenden Betrieb bzw. sofern dies nicht möglich ist, durch eine taktende Betriebsweise geregelt. Ebenfalls ist es in vielen Fällen möglich und sinnvoll, die maximale Leistung des Heizgerätes zu beschränken, was insbesondere in Gebäuden mit geringem Wärmebedarf zum Tragen kommt. Bei monovalenten Anlagen unterscheiden sich die Nutzungsgrade in Abhängigkeit vom Wärmebedarf des Gebäudes dementsprechend durch zumeist etwas bessere thermische Wirkungsgrade im Teillast-

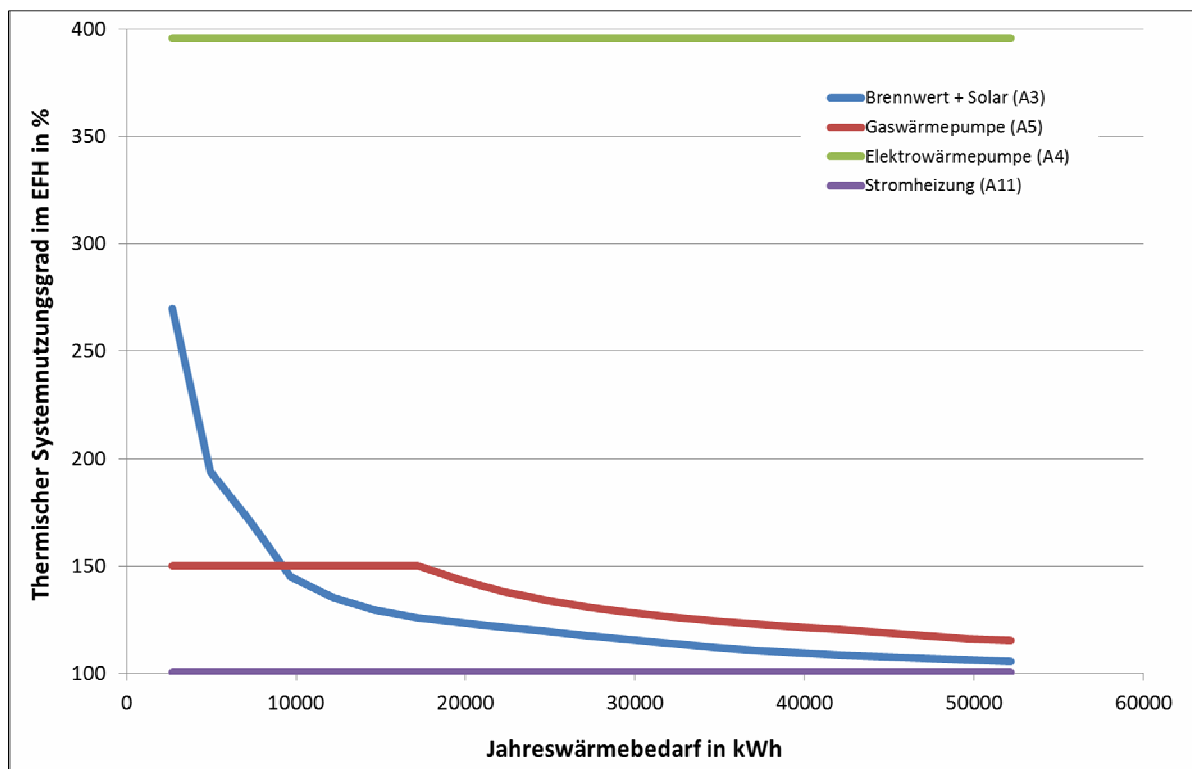
betrieb. Wird unterstellt, dass unabhängig vom Wärmebedarf in jedem der betrachteten Gebäudegrößen ein monovalentes Heizgerät mit immer gleicher thermischer Maximalleistung eingesetzt wird, so ändert sich der Nutzungsgrad in Abhängigkeit vom jährlichen Wärmebedarf des jeweiligen Gebäudes, wie aus Abbildung 13 ersichtlich ist. Die Anpassung an den Wärmebedarf wird lediglich durch Modulation bzw. durch eine taktende Betriebsweise erreicht. Bei Gebäudegrößen mit Wärmebedarfen bis 22.000 kWh ist zu erkennen, dass die Anlage die benötigte Wärme vollständig im Teillastbetrieb bereitstellen kann. Ab einem Wärmebedarf von über 28.000 kWh wird zunehmend der Volllastbetrieb benötigt, um den Wärmebedarf zu decken, was einen etwas schlechteren Nutzungsgrad zur Folge hat.

Während die Unterschiede in den Nutzungsgraden in Abhängigkeit vom Wärmebedarf bei monovalenten, modulierenden Anlagen in der Regel nur wenige Prozentpunkte betragen, ist der Einfluss des Wärmebedarfs auf den Nutzungsgrad bei bivalenten Anlagen je nach Technologie erheblich größer. In Abbildung 14 ist unter anderem die Abhängigkeit des Nutzungsgrades vom Wärmebedarf einer Gaswärmepumpe als Beispiel für eine bivalente Anlage dargestellt. Zu erkennen ist der bei geringen Wärmebedarfen zunächst hohe Nutzungsgrad von 150 %. Dies entspricht dem vom Hersteller angegebenen und in Tabelle 13 hinterlegten thermischen Wirkungsgrad bei reinem Wärmepumpenbetrieb. Ab einem Wärmebedarf von ca. 18.000 kWh muss zur Deckung des Wärmebedarfs zunehmend der Spitzenlastkessel mit einem thermischen Wirkungsgrad von 96,1 % Wärme bereitstellen. Folglich sinkt der Gesamtnutzungsgrad der Anlage mit steigendem Wärmebedarf im Gebäude. Insbesondere bei Mikro-KWK-Systemen, die in der Regel so betrieben werden, dass das KWK-Modul den Grundlastbetrieb übernimmt und das Spitzenlastgerät nur in Fällen einer Unterdeckung betrieben wird, hat der Wärmebedarf des Gebäudes einen signifikanten Einfluss auf den Nutzungsgrad des Gesamtsystems.

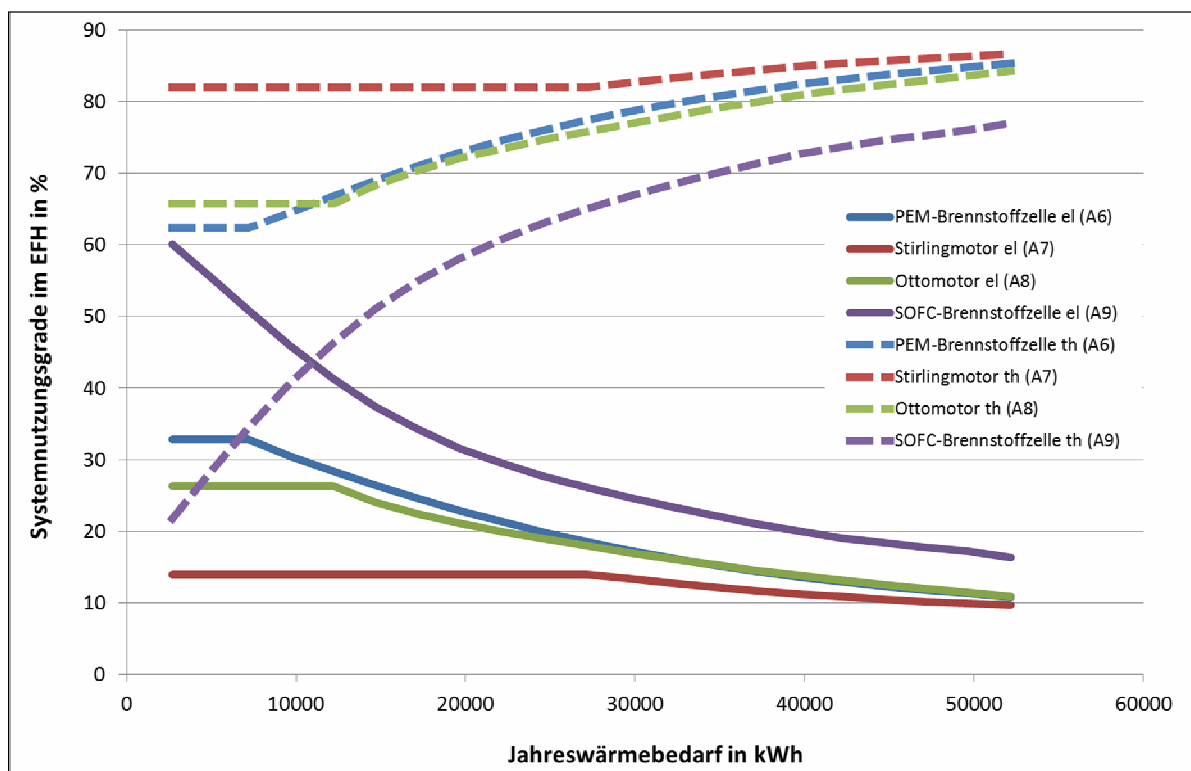
Mit Hilfe einer Polynomfunktion sowie der Angabe eines Gültigkeitsbereiches, konnten die in den Szenarienberechnungen benötigten dynamischen Abhängigkeiten des Systemnutzungsgrades vom Gebäudewärmebedarf für jede Technologie erstellt werden. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.



**Abbildung 13:** Systemnutzungsgrade konventionell modulierender Heiztechnologien im EFH



**Abbildung 14:** Systemnutzungsgrade konventionell taktender und innovativ bivalenter Heiztechnologien im EFH



**Abbildung 15:** Systemnutzungsgrade innovativ bivalenter Heiztechnologien (KWK) im EFH

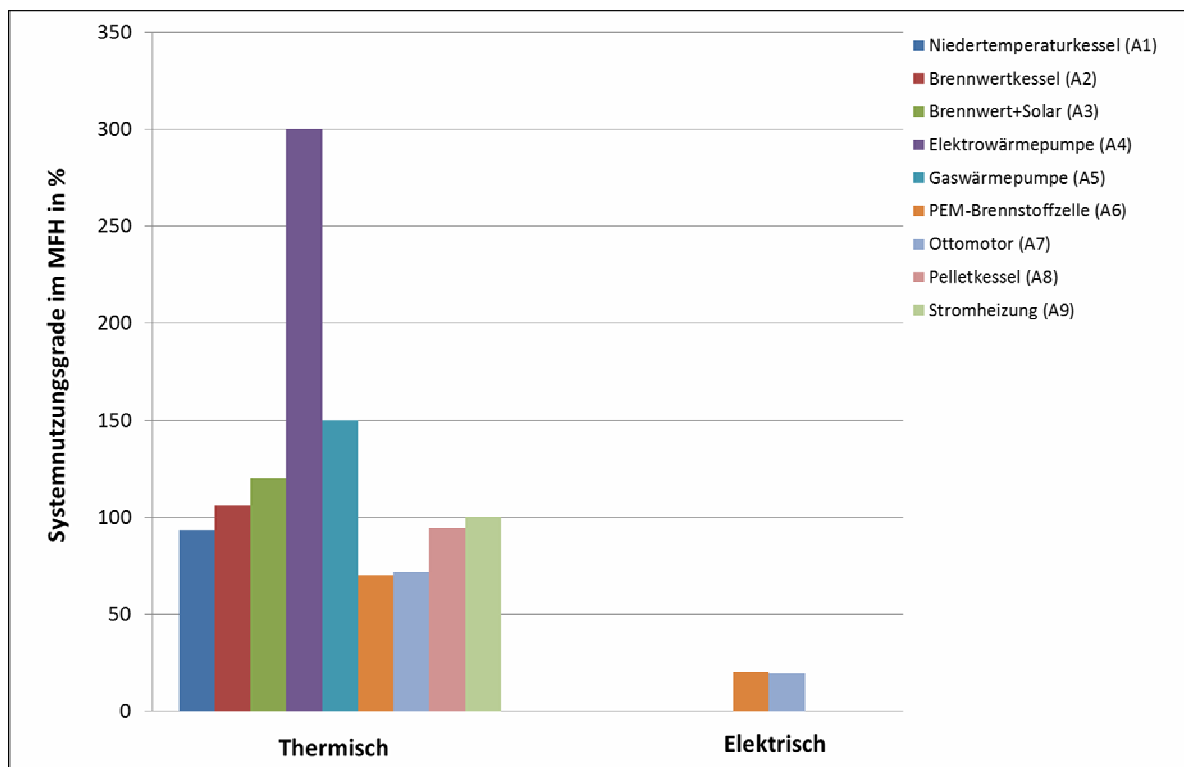
#### 7.4.4 Anlagennutzungsgradentwicklung für das MFH

Im Gegensatz zur Ermittlung der Nutzungsgrade von Heiztechnologien im Einfamilienhaus wurde bei der Ermittlung der Systemnutzungsgrade im Mehrfamilienhaus eine andere Herangehensweise gewählt. Der Einsatz von Heiztechnologien im EFH ist, wie oben beschrieben, geprägt von einigen wenigen Leistungsklassen, die im Großteil aller Einfamilienhäuser eingesetzt werden können. Bei Mehrfamilienhäusern mit einer gebäudezentralen Heizungsanlage ist die Auswahl an Anlagen in verschiedenen Leistungsklassen durch den in der Regel erheblich höheren Wärmebedarf des Gebäudes um ein vielfaches höher. Hierdurch und durch weitere Unterschiede zum EFH - wie beispielsweise größere Heizräume etc. - können Systeme bedarfsgerecht geplant und installiert werden. Möglich ist dies insbesondere durch Kaskadenlösungen, wo neben der gezielten Auslegung auch eine Redundanz bei Ausfällen oder Wartungen von Vorteil ist. In Folge dessen wurden die Nutzungsgrade von Heiztechniken für das Mehrfamilienhaus nicht dynamisch in Abhängigkeit des Wärmebedarfes ermittelt, sondern gezielt ausgelegt. Zur Auslegung der Heizungsanlagen im Mehrfamilienhaus mussten die jeweiligen Heizlasten der betrachteten Gebäude bekannt sein. Diese konnten mit Hilfe einer überschlägigen Rechnung [ÜBER2004] anhand der

aus Teil I des Projektes [SYST2010b] bekannten Jahreswärmebedarfe ermittelt werden. Mit den ermittelten Leistungen und den Eckdaten aus Tabelle 15 konnten die Simulationen analog zum EFH durchgeführt werden.

Der Anteil der elektrischen Leistung an der Gesamtleistung des Systems wurde nach [TECH2010] mit 20 % abgeschätzt. Die elektrische Leistung ergibt sich über die Angabe der Stromkennzahl für den Ottomotor von  $\sigma = 0,47$  und für die Brennstoffzelle von  $\sigma = 0,5$ . Bei den konventionell modulierenden Systemen wird die Teillast mit 30 % der Gesamtleistung angegeben.

In Folge der gezielten Auslegung der Planung war zu erwarten, dass die berechneten Nutzungsgrade in den verschiedenen Mehrfamilienhausgrößen nur marginale Differenzen aufweisen. Da dies der Fall war, konnte je Technologie ein Nutzungsgrad für alle Gebäudegrößen ausgewiesen werden. Lediglich beim System Brennwert + Solar traten bedingt durch die unterschiedlichen Solarflächen größere Abweichungen untereinander auf. Zur Vereinfachung wurde aus diesen Daten ein Mittelwert gebildet. Die für die Szenarienberechnung relevanten Nutzungsgrade sind Abbildung 16 zu entnehmen.



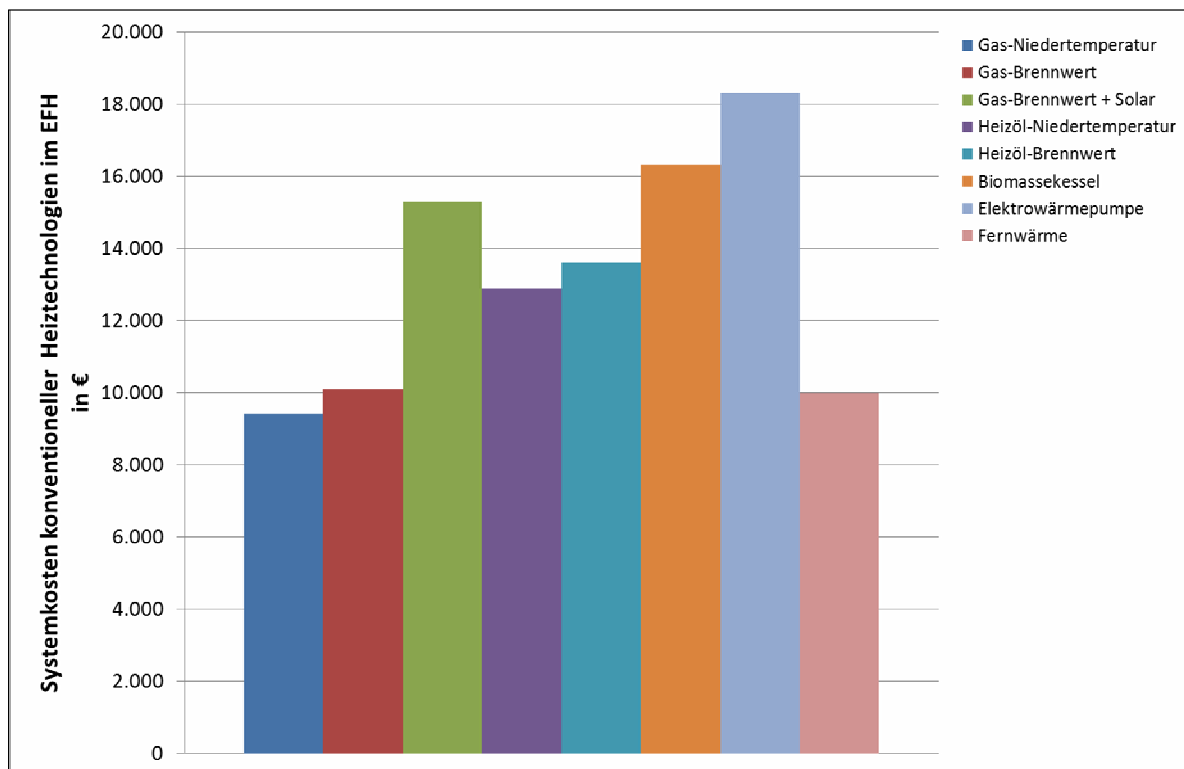
**Abbildung 16:** Systemnutzungsgade aller Heiztechnologien im MFH

### 7.4.5 Systemkosten

Während im Szenario Energiekonzept eine CO<sub>2</sub>-Einsparung über Dämmmaßnahmen erreicht wird, soll im Szenario Innovationsoffensive Gas diese neben ambitionierten aber im Vergleich zum Energiekonzept moderaten Dämmmaßnahmen im Wesentlichen über einen verstärkten Austausch der Heizungssysteme und insbesondere der KWK-Systeme sowie durch eine zunehmende Einspeisung erneuerbarer Gase (z.B. Biogas, Wasserstoff und SNG) erreicht werden. Die Systemkosten der eingesetzten Heizungssysteme sind bei der Darstellung der Szenarienergebnisse daher von zentraler Bedeutung.

Alle folgenden Kosten sind als Kosten für ein Komplettsystem zu verstehen. Dieses besteht aus den notwendigen Speichern, Peripherie zur Einbindung in das Heizungsnetz, Installationskosten sowie den Investitionskosten für jeweilige Heizungstechnologie inklusive einem gegebenenfalls benötigten Zusatzheizgerät. Alle angegebenen Preise beruhen auf Herstellerbefragungen sowie auf Veröffentlichungen [ZFK2011]. Sofern keine Angaben verfügbar waren, wurden Annahmen getroffen. Die Kostenangaben der konventionellen Heizungstechnologien sind für die eingesetzten Wärmeerzeuger der aktuellen Preisliste von Viessmann [VIESS2011] entnommen worden. Die weiteren Kostenelemente, die zur Bestimmung der jeweiligen Systemkosten erforderlich sind, wurden in Anlehnung an die Studie von Ecofys [BETT2011] ermittelt.

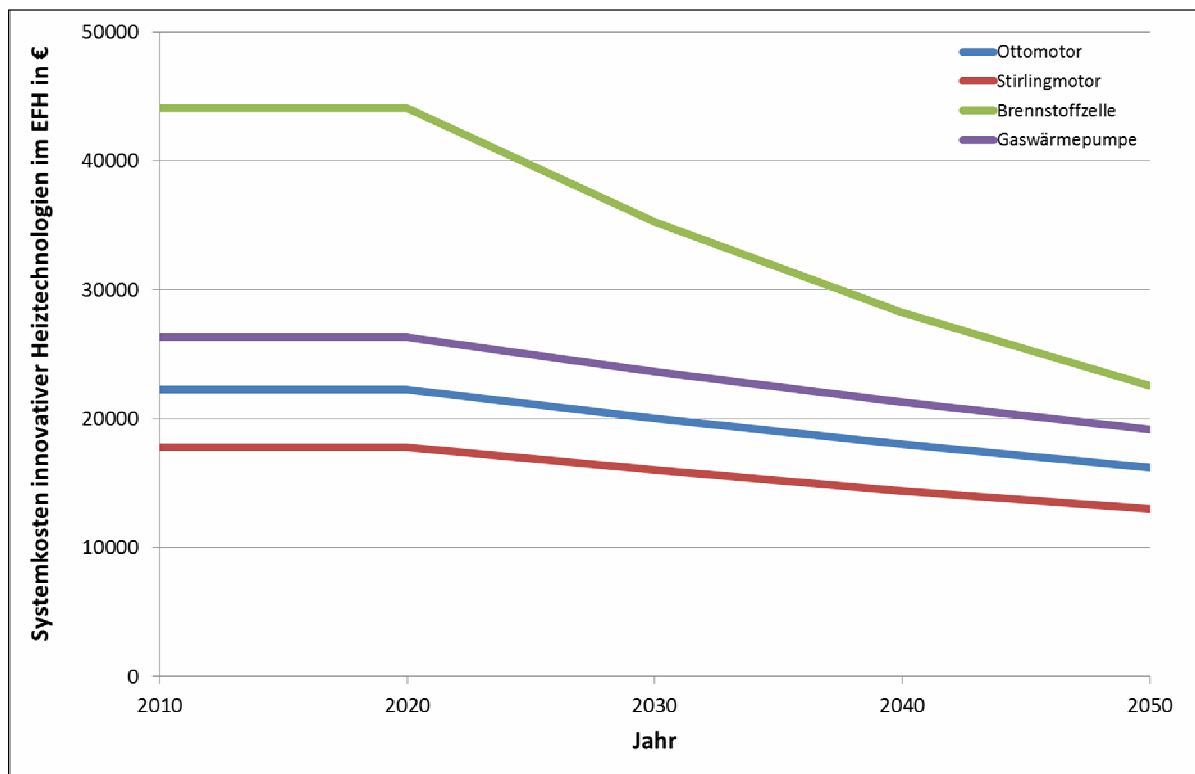
Bei der Ermittlung der Heizungssystemkosten im EFH wurde zunächst die folgende grundlegende Herangehensweise gewählt: Konventionelle Heizungssysteme sind weitestgehend vollständig entwickelt und voll am Markt eingeführt. Es wird daher die Annahme getroffen, dass sich die Kosten für diese Systeme bis ins Jahr 2050 nicht wesentlich ändern. Die angenommenen Kosten für die konventionellen, am Markt eingeführten Technologien sind Abbildung 17 zu entnehmen.



**Abbildung 17:** Systemkosten konventioneller Heiztechnologien im EFH

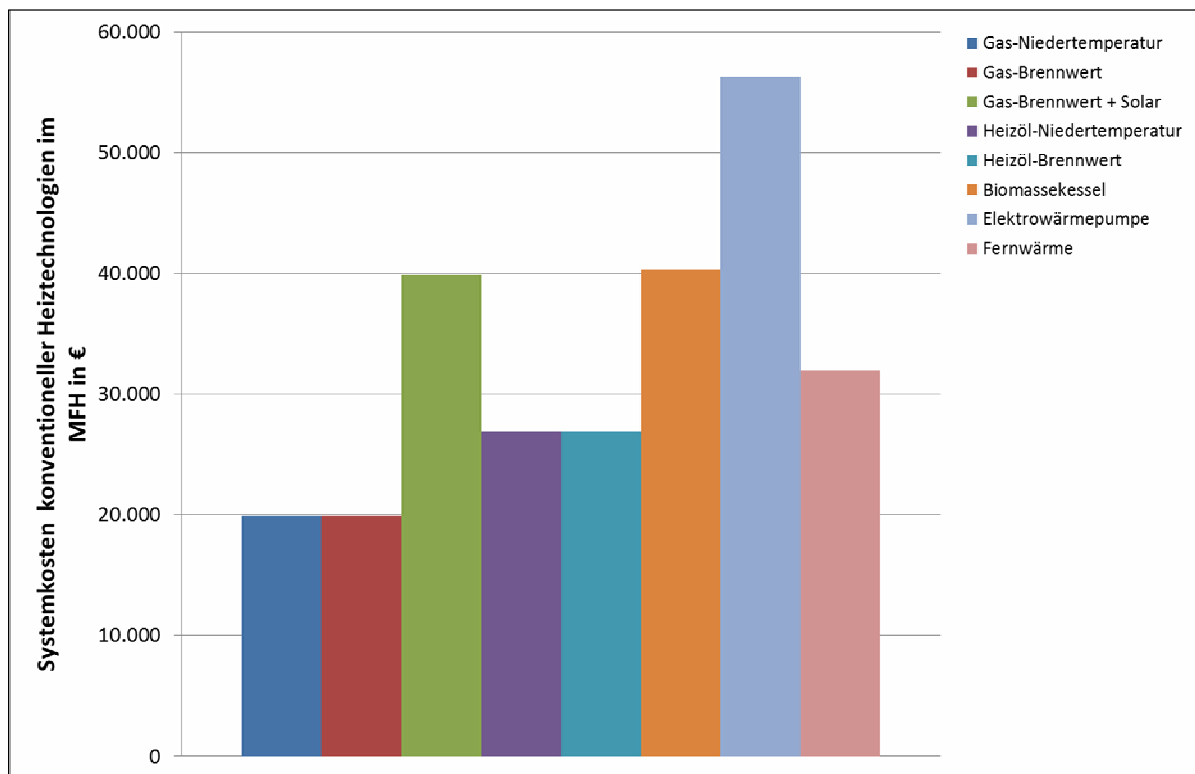
Im Gegensatz zu den konventionellen Technologien sind die innovativen Technologien zum großen Teil noch nicht umfassend am Markt eingeführt. Ebenfalls befinden sich einige (z.B. Brennstoffzellen) der in diesem Vorhaben betrachteten Technologien noch im Entwicklungs- und Teststadium. Insbesondere für Mikro-KWK-Anlagen und Gaswärmepumpen sind zum heutigen Zeitpunkt hohe Investitionssummen notwendig. Bei diesen Technologien wird bis ins Jahr 2050 von sinkenden Systemkosten ausgegangen. Dabei wird zunächst unterstellt, dass die derzeitigen Preise der Systeme aufgrund geringer Stückzahlen, Entwicklungsarbeit und Prototypenerstellung unter den Kosten des Herstellers liegen. Mit zunehmenden Stückzahlen verringern sich die Kosten für den Hersteller. Diese Kostenreduzierung wird voraussichtlich in den ersten 5-10 Jahren der Einführung nicht an den Endkunden weitergegeben. Der Hersteller nutzt diese Einnahmen vielmehr um die zuvor entstandenen Kosten zu kompensieren und eventuell erste Gewinne einzufahren. Danach wird bei allen innovativen Systemen von einer sukzessiven Kostenreduktion über jeweils 10 Jahre ausgegangen. Die ermittelten Kosten für die innovativen Heizungssysteme im EFH sind in Abbildung 18 dargestellt.



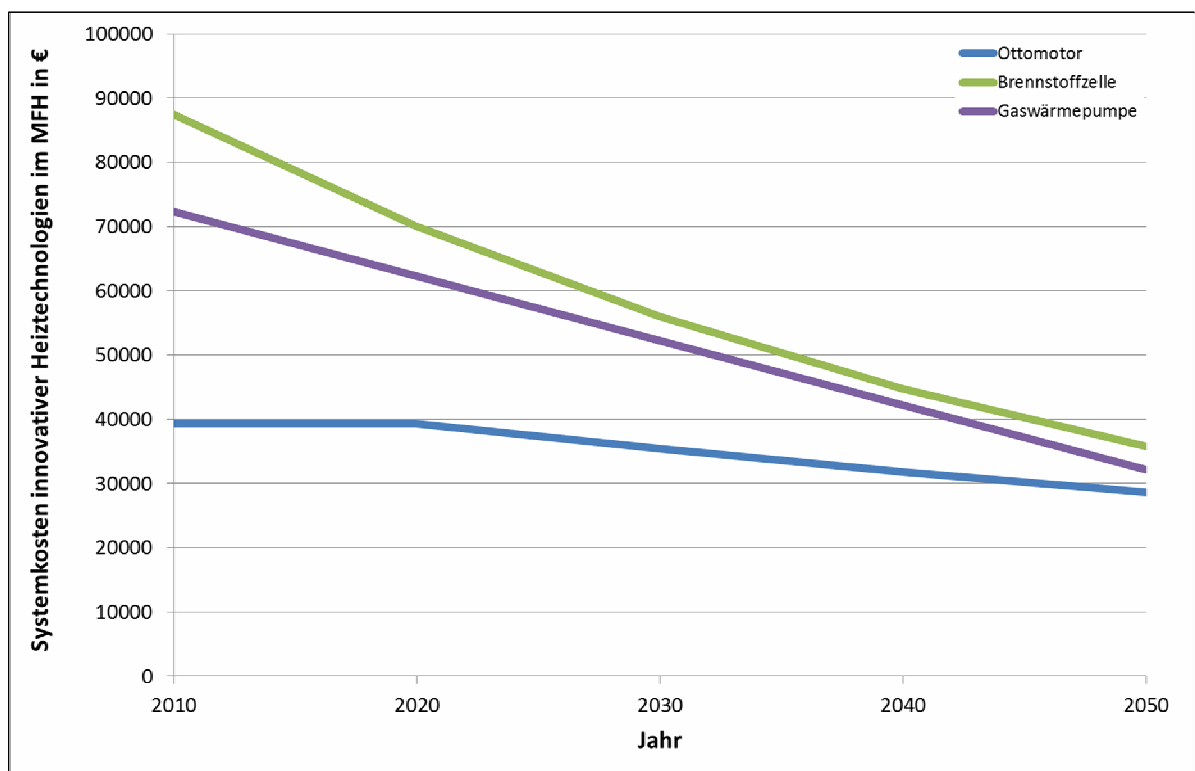


**Abbildung 18:** Systemkosten innovativer Heiztechnologien im EFH

Analog zur Ermittlung der Heizungssystemkosten im EFH werden diese für die Systeme im MFH ermittelt. Die Kosten für die am Markt eingeführten konventionellen Technologien im MFH sind in Abbildung 19 enthalten. Die Kosten für die innovativen Heizungssysteme im MFH werden in Abbildung 20 dargestellt. Es gilt zu beachten, dass es sich bei den angegebenen Preisen für die Technologien im MFH um Mittelwerte über alle MFH-Gebäude handelt. Für konkrete Gebäudegrößen können die realen Kosten daher stark von den hier angegebenen abweichen.



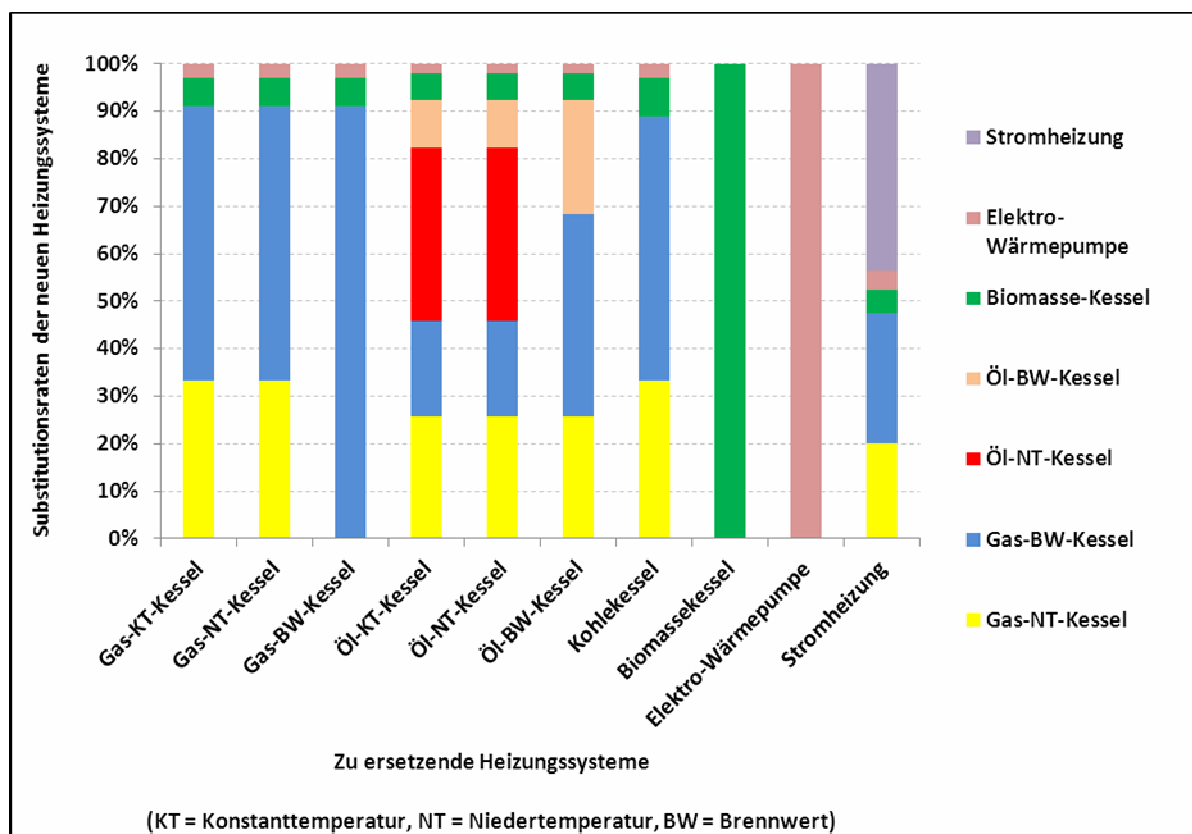
**Abbildung 19:** Systemkosten konventioneller Heiztechnologien im MFH



**Abbildung 20:** Systemkosten innovativer Heiztechnologien im EFH

### 7.4.6 Austausch von Heizungssystemen

Die Erneuerung von Heizkesseln wurde für die Justierung der Austauschraten im Ausgangsjahr 2010 auf der Basis der Verkaufsstatistiken des BDH [BDH2010] und der Analyse der Heizungssanierungen im KfW-Programm „Energieeffizient Sanieren“ [BEI2007-2010] durchgeführt. Demnach wurden im Zeitraum 2005 bis 2009 insgesamt 2,7 Mio. Heizungssysteme im Wohngebäudebestand ausgetauscht. Von diesen substituierten Wärmeenergeuern waren ca. 1,0 Mio. neue Gas-Brennwertkessel und weitere 0,5 Mio. Gas-Niedertemperaturkessel. Der Anteil der gasbasierten Heizungssysteme an den ausgetauschten Wärmeenergeuern beträgt somit insgesamt 57 %. In der Abbildung 21 sind die mittleren Substitutionsraten für die im Zeitraum 2005 bis 2009 ersetzten Heizungssysteme dargestellt.



**Abbildung 21:** Mittlere Substitutionsraten neuer Heizungssysteme nach der Analyse des Modernisierungsmarkts im Zeitraum von 2005 bis 2009

Für die Fortschreibung der Heizungssystemstruktur über den Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2050 werden so genannte Austauschraten für die Heizungs-

systeme festgelegt. Die Austauschrate beschreibt die technologiespezifische Substitutionsrate für die altersbedingt zu ersetzenden Heizungssysteme. Aus der Kombination der Austauschraten sowie der Altersstruktur des jeweiligen Bestandes bzw. den zu ersetzenden Heizungssystemen errechnet sich der aktuelle Bestand von Heizungssystemen. Die Berechnung erfolgt in Jahres-schritten für den Zeitraum von 2010 bis zum Jahr 2050. Für den Zeitraum bis 2015 orientieren sich die Austauschraten an den historischen Austauschraten. Für den Zeitraum danach verstärkt sich ihr szenarioabhängiger Charakter immer mehr. Ab dem Jahr 2020 werden die für die jeweiligen Szenarien angenommenen Werte verwendet, die sich an den Vorgaben zu den Szenarien und an der Performance der Heizungssysteme (Kosten, Effizienz etc.) orientieren.

Die Substitutionsraten der Heizungssysteme und die Durchdringung von innovativen Heiztechniken werden in den Szenarien für alle Energieträger vorgegeben. Zur Abbildung der Dynamik des Heizkesselbestands werden unter Berücksichtigung der abgerissenen Wohnfläche und des unterstellten (szenario-abhängigen) Erneuerungszyklus der Heizungssysteme die Potenziale für den Einsatz neuer Heizungsanlagen mit dem Wohngebäudesimulationsmodell pro Jahr ermittelt. Da der aktuelle Heizkesselbestand vor allem durch heizöl- und gasbasierte Heizungssysteme dominiert wird, liegen hier die größten Ersatzpotenziale. Im Folgenden werden die Annahmen deshalb am Beispiel der Austauschraten von heizöl- und gasbasierten Heizungssystemen näher erläutert. Die vorgegebenen Austauschraten der zu ersetzenden Heizungssysteme werden in Tabelle 16 bis Tabelle 19 differenziert nach den Energieträgern Heizöl und Gas für die verschiedenen Szenarien dargestellt.

In den Szenarien Trend und Energiekonzept wird angenommen, dass beim Austausch von heizölbasierten Heizungssystemen bis zum Jahr 2050 mindestens eine Restgröße von 20 % für ölbasierte Systeme verbleibt. In diesen beiden Szenarien wird unterstellt, dass die zu ersetzenden Ölheizungen zunehmend durch einen Mix von Heizungssystemen (Gasbasierte Systeme, Biomassekessel und Elektrowärmepumpen etc.) substituiert werden. Zudem wird von einer leichten Durchdringung von Mikro-KWK-Anlagen ausgegangen.

**Tabelle 16:** Austauschraten von heizölbasierten Heizungssystemen in den Szenarien Trend und Energiekonzept (alle Angaben in %)

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Brennwert Öl	10,0	11,8	30,0	15,0	10,0	5,0
Brennwert Öl + Solar	4,7	5,2	10,0	10,0	15,0	15,0

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Niedertemperatur Öl	24,3	23,0	10,0	5,0	0,0	0,0
Brennwert Gas	20,0	19,1	10,0	17,0	15,0	10,0
Brennwert Gas + Solar	7,6	7,4	5,9	10,0	15,0	24,9
Niedertemperatur Gas	25,7	23,8	4,1	3,0	0,0	0,0
Elektrowärmepumpe	2,0	2,7	10	15	16,1	16,1
Gaswärmepumpe	0,0	0,1	0,7	0,4	0,3	0,3
Mikro-KWK Stirling (Gas)	0,0	0,2	2,3	1,9	1,7	1,3
Mikro-KWK Otto (Gas)	0,0	0,1	1,3	1,7	2,5	2,5
Mikro-KWK BZ (Gas)	0,0	0,1	0,7	1,0	3,0	3,5
Biomassekessel	5,7	6,5	15,0	20,0	21,4	21,4
Stromheizung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Holz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Beim Austausch der erdgasbasierten Heizungssysteme wird unterstellt, dass diese Systeme ab dem Jahr 2020 ausschließlich durch gasbasierte Heizungssysteme ersetzt werden. Die größten Austauschraten bestehen im Jahr 2050 mit 52,5 % beim Einsatz von Gas-Brennwertkesseln mit Solaranlage und mit ca. 29 % beim verstärkten Einsatz von Mikro-KWK-Systemen. Diese Annahmen gehen davon aus, dass bedingt durch die gegenwärtigen Anreizsysteme KWK-Systeme moderat unterstützt werden. Gaswärmepumpen weisen nur kleine Raten auf, da sie bisher noch nicht in den Markt eingedrungen sind und nur wenige Anbieter existieren. Außerdem bestehen kein wesentlicher Kostenvorteil bzw. keine Anreizsysteme die einen Ausgleich schaffen.

**Tabelle 17:** Austauschraten von erdgasbasierten Heizungssystemen in den Szenarien Trend und Energiekonzept (alle Angaben in %)

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Brennwert Öl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brennwert Öl + Solar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Niedertemperatur Öl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brennwert Gas	52,1	52,4	55,3	46,7	35,2	17,5
Brennwert Gas + Solar	16,7	17,6	27,2	35,3	42,3	52,5
Niedertemperatur Gas	22,3	21,2	10,0	5,0	0,0	0,0
Elektrowärmepumpe	2,9	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Gaswärmepumpe	0,0	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0
Mikro-KWK Stirling (Gas)	0,0	0,3	3,5	5,0	5,0	5,0
Mikro-KWK Otto (Gas)	0,0	0,2	2,0	4,5	7,5	10,0
Mikro-KWK BZ (Gas)	0,0	0,1	1,0	2,5	9,0	14,0
Biomassekessel	6,0	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Stromheizung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Holz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Für das Szenario Innovationsoffensive Gas, dass zur Ableitung des Potenzials zum Einsatz gasbasierter und hocheffizienter Heiztechniken dient, wird beim Austausch der Heizungssysteme die Annahme getroffen, dass alle zu ersetzenden heizöl- und gasbasierten Heizungssysteme ab dem Jahr 2020 ausschließlich durch gasbasierte Heizungssysteme substituiert werden. Dem Ansatz des Szenarios Innovationsoffensive Gas entsprechend wird der verstärkte Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen mit verbesserten Anreizsystemen sowohl beim Austausch von heizölbasierten als auch von gasbasierten Heizungssystemen angenommen. Im Jahr 2050 beträgt der Anteil von Mikro-KWK-Anlagen (einschließlich Brennstoffzellenanlagen) an den zu ersetzenden Systemen insgesamt 60 %. Bei Gaswärmepumpen wird aus analogen Überlegungen wie in den anderen Szenarien nur eine geringfügig höhere Marktdurchdringung erwartet.

**Tabelle 18:** Austauschraten von heizölbasierten Heizungssystemen im Szenario Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %)

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Brennwert Öl	10,0	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Brennwert Öl + Solar	4,7	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Niedertemperatur Öl	24,3	22,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Brennwert Gas	20,0	23,5	60,0	44,0	25,0	10,0
Brennwert Gas + Solar	7,6	9,2	25,0	30,0	30,0	30,0
Niedertemperatur Gas	25,7	23,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrowärmepumpe	2,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Gaswärmepumpe	0,0	0,2	2,0	2,0	2,0	2,0
Mikro-KWK Stirling (Gas)	0,0	0,6	7,0	10,0	10,0	10,0
Mikro-KWK Otto (Gas)	0,0	0,4	4,0	9,0	15,0	20,0
Mikro-KWK BZ (Gas)	0,0	0,2	2,0	5,0	18,0	28,0
Biomassekessel	5,7	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Stromheizung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Holz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

**Tabelle 19:** Austauschraten von erdgasbasierten Heizungssystemen im Szenario Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %)

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Brennwert Öl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brennwert Öl + Solar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Niedertemperatur Öl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brennwert Gas	52,1	52,4	60,0	44,0	25,0	10,0
Brennwert Gas + Solar	16,7	17,6	25,0	30,0	30,0	30,0
Niedertemperatur Gas	22,3	21,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektrowärmepumpe	2,9	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Gaswärmepumpe	0,0	0,1	2,0	2,0	2,0	2,0
Mikro-KWK Stirling (Gas)	0,0	0,3	7,0	10,0	10,0	10,0
Mikro-KWK Otto (Gas)	0,0	0,2	4,0	9,0	15,0	20,0
Mikro-KWK BZ (Gas)	0,0	0,1	2,0	5,0	18,0	28,0

Heizungssystem	2005-2009	2010	2020	2030	2040	2050
Biomassekessel	6,0	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Stromheizung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Holz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

## 7.5 Zusammensetzung des Energieträgers Gas im Erdgasnetz

Für die Ermittlung und Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist die Berücksichtigung der Vorketten zur Versorgung der privaten Haushalte mit Energieträgern von wesentlicher Bedeutung. Erst diese Betrachtungsweise liefert eine vollständige Aussage zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen, denn viele Energieträger verursachen den Hauptteil der Emissionen außerhalb des Bilanzkreises Haushalt bzw. Wohngebäude (z.B. Strom, Fernwärme). Ebenso ist der Preis der Energieträger für die privaten Haushalte für die Bestimmung der laufenden Kosten von Bedeutung. Aus diesem Grund sind die Verteilung der Energieträger, wie sie den Haushalten geliefert werden, und ihre zukünftige Entwicklung zu analysieren. In diesem Kapitel wird auf das über das Erdgasnetz verteilte Gasgemisch aus fossilem Erdgas und erneuerbaren gasförmigen Energieträgern wie Biogas, Wasserstoff und SNG eingegangen. Im Kapitel 7.5.1 werden zunächst die Annahmen erläutert, die in den jeweiligen Szenarien herangezogen wurden und daraus die Zusammensetzung des Energieträgers Gas abgeleitet. Die Analyse umfasst auch eine Einordnung vor dem Hintergrund des gesamten Systems der Gasversorgung, da auch andere Bereiche den Energieträger nutzen. Daran schließt sich eine Kostenabschätzung der Herstellung (Kapitel 7.5.2) an, die für die Ermittlung der verbraucherseitigen Preise genutzt wird.

Die Entwicklung der klassischen fossilen und erneuerbaren Energieträger wie Kohle, Heizöl, Holz folgt prinzipiell den in den Referenzszenarien (Leitstudie 2010 [LEST2010], das Politikscenario V [CLI2010] und die Energieszenarien 2010 [EGP2010]) verwendeten Ansätzen und wird im Zusammenhang mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kapitel 7.6 behandelt.



### 7.5.1 Entwicklung des Mix gasförmige Energieträger

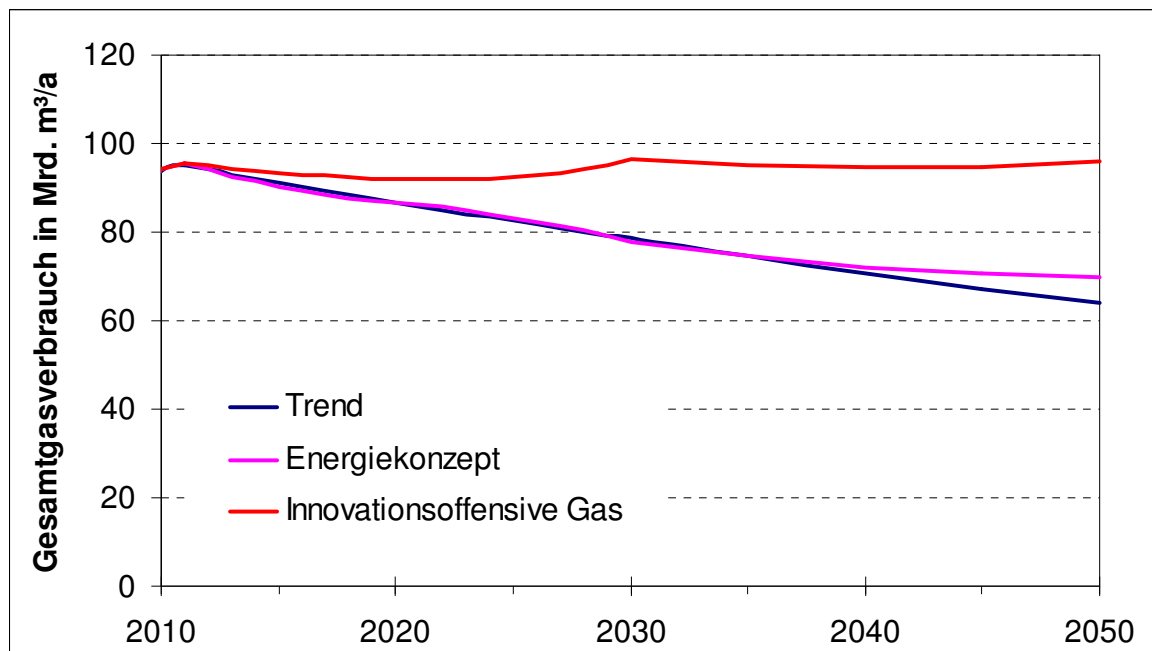
Eine der wesentlichen Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Einsatz Erneuerbarer Energieträger auch in der Gasversorgung. Für folgende EE sind entweder Technologien erprobt, verfügbar bzw. im betrachteten Zeitraum als verfügbar anzusehen:

- **Biogas:** wird auf Erdgasqualität (G260) [DVGW2008] aufbereitet und in das Erdgasnetz, sowohl in Verteilnetz- als auch in Transportleitungen eingespeist. Biogas wird durch Fermentation aus Biomasse hergestellt. Die Zahl der Einspeiseanlagen ist in den vergangenen Jahren erheblich gestiegen. Es existieren ausgereifte Verfahren zu Biogasproduktion und zur Aufbereitung. Gegenwärtig werden bedingt durch die Gesetzgebung (EEG) hauptsächlich nachwachsende Rohstoffe NawaRo (Energiepflanzen) eingesetzt. Perspektivisch sind aber auch vermehrt Abfallstoffe aus Landwirtschaft, Industrie und Haushalten einzusetzen. In allen Szenarien wird unterstellt, dass ein ausreichendes Potenzial vorhanden ist und keine Einschränkungen durch konkurrierende Nutzungspfade der Rohstoffe zu erwarten sind. Eigene Untersuchungen zum Rohstoffaufkommen belegen dies und werden in Kürze durch den DVGW veröffentlicht [DVGW2012]. Zur besseren Übersicht werden die Rohstoffquellen getrennt ausgewiesen.
- **SNG aus Biomasse** (vorrangig Holz): Synthetisches Erdgas kann durch Vergasung von Biomasse, Reinigung der Vergasungsgase und anschließender Methanisierung erzeugt werden. Derzeit existieren erste Versuchsanlagen im europäischen Raum. Die Verfahrenstechnik wird als beherrschbar eingeschätzt, muss aber für Biomasseanlagen etabliert werden. Offene Forschungsfelder sind derzeit insbesondere die Gaserzeugung und Gasreinigung. Auch im Bereich der Methanisierung werden neue Entwicklungen vorangetrieben. Es wird erwartet, dass die Technologien bis zum Jahr 2020 zur Marktreife entwickelt werden und sich danach im Markt etablieren können. Grundsätzlich wird damit gerechnet, dass durch weitere FuE-Aktivitäten der Gestehungspreis von SNG marktfähig wird. Auch hier kann davon ausgegangen werden, dass ein ausreichendes Potenzial an Holz in Deutschland vorhanden ist.
- **Power-to-Gas-Technologien (PtG):** Die Notwendigkeit Strom aus Windkraft- und PV-Anlagen in einen langzeit-speicherfähigen Energieträger zu wandeln, hat auch dazu geführt, chemische Energieträger zu suchen, die sich in vorhandene Infrastrukturen einordnen lassen. Dabei wird Wasserstoff über eine Elektrolyse erzeugt und anschließend gemeinsam mit CO<sub>2</sub> methanisiert. Wasserstoff lässt sich in die Ergasinfrastruktur

integrieren. Die Grenze der Zumischung ist dabei abhängig von den am jeweiligen Gasnetzsegment angeschlossenen Verbrauchseinrichtungen [KRAU2010]. Grundsätzlich sind zum Zeitpunkt der Studiererstellung Anteile bis 5 % in Netzgebieten ohne Gasturbinen und Erdgastankstellen möglich. Über diese Grenze hinaus wird Wasserstoff in Methan umgewandelt und eingespeist. Für die Zukunft wird eine Anpassung der Gasverwendungstechnologien unterstellt, sodass Anteile über 5 Vol. % Wasserstoff möglich werden. Durch die Integration in das Gasnetz stehen die Gase aus den PtG-Technologien für eine breite Verwendung in hoch-effizienten Gastechnologien zur Verfügung. Sowohl die Elektrolyse als auch die Methanisierung sind technisch verfügbar und werden gegenwärtig hochskaliert. Zurzeit befinden sich erste Pilotanlagen in Planung. Es ist zu erwarten, dass ab dem Jahr 2020 eine Markteinführung der verschiedenen Technologien möglich ist. Für die weitere Analyse sind Überschüsse aus Wind- und PV-Stromerzeugung berücksichtigt worden, Wasserstoff und Methan werden getrennt ausgewiesen, da unterschiedliche Wirkungsgrade und Preise sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen (Gutschriften) zu veranschlagen sind.

Die verschiedenen Anteile der EE-Gase werden je Szenario gesondert prognostiziert. Dabei wird einerseits von den gegenwärtigen Wachstumsraten der Märkte (Biogas, SNG sowie Wasserstoff und Methan aus PtG-Technologien) ausgegangen. Andererseits werden die politischen Maßnahmen der einzelnen Szenarien in Betracht gezogen. Die Ansätze für die jeweiligen Prognosen werden im Folgenden erläutert.

Basis für die Bestimmung der Anteile an EE-Gasen im Erdgasnetz ist der Verbrauch an Erdgas in allen Bereichen (Endenergieverbrauch zuzüglich des Verbrauchs für die Stromerzeugung). Hierfür wurden verschiedene aktuelle Szenarien analysiert. Der verwendete Gesamtgasverbrauch im Szenario Trend (Referenz) lehnt sich an den Energiereport des BMWi [BMWi2009], die Energieszenarien der Bundesregierung 2010 (Referenz-Szenario) [EGP2010] sowie Politiksznarien V [CLI2010] an. Eine exakte Übernahme von Daten ist nicht möglich, da nicht immer von der gleichen Basis (Gesamtgasverbrauch) ausgegangen wurde. Aufbauen darauf ergibt sich je nach Prognoseannahme ein veränderter Gasverbrauch in den Szenarien Energiekonzept und Innovations-offensive Gas. Der angenommene gesamte Gasverbrauch ist in Abbildung 22 dargestellt. Der überraschend hohe Gasverbrauch im Szenario Innovations-offensive Gas ergibt sich aus dem niedrigeren volumenspezifischen Energieinhalt des Gases wegen des höheren Wasserstoffanteils. Damit wird aber zugleich die Kapazität der vorhandenen Infrastruktur genutzt.



**Abbildung 22:** Gesamtgasverbrauch für die betrachteten Szenarien

#### **Ansätze im Szenario Trend (Abbildung 23):**

**a. Biogas:**

Es wird das bisherige Wachstum der Jahre 2009 und 2010 linear in die Zukunft extrapoliert. Dabei wird auf die Datenbank Biogaspartner der DENA [DENA2011] zurückgegriffen. Ein überproportionales Wachstum kann nicht erwartet werden, da die bisherigen Hemmnisse (alleinige Nutzung von Biogas in KWK-Anlagen, keine Freigabe für hocheffiziente Gasanlagen) weiter bestehen bleiben. Die Anlagengrößen bleiben ebenfalls nahezu unverändert. Ab dem Jahr 2030 wird sich das Wachstum verlangsamen, da weitere Hemmnisse zu erwarten sind, wie z.B. Rückgang der EEG-Förderung und zunehmende Flächen-Konkurrenzen beim Anbau von Energiepflanzen.

**b. Wasserstoff und Methan aus Wind und PV - Power-to-Gas (PtG):**

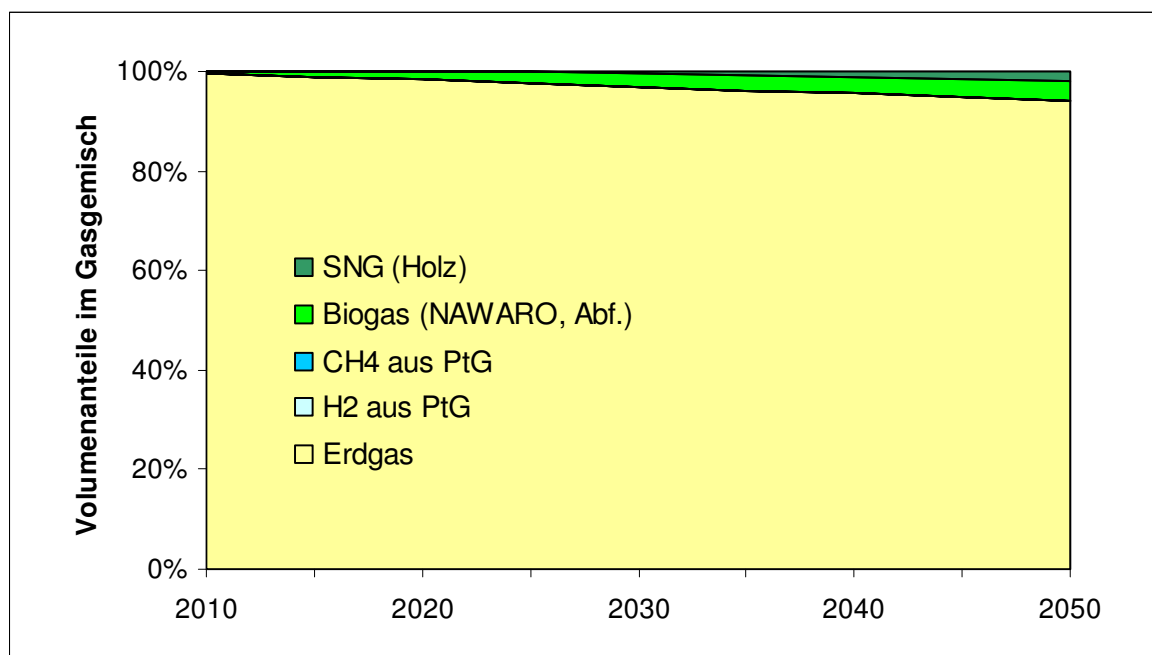
Da derzeit keine konkreten Maßnahmen/Förderinstrumente zur Unterstützung der Marktvorbereitung und Markteinführung existieren, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die PtG-Technologie unter diesen aktuellen Randbedingungen eine Rolle im zukünftigen Energiemarkt spielen kann. Stattdessen wird angenommen, dass ein moderater Ausbau der Stromnetze sowie die Abschaltung der EEG-Anlagen in Niedriglast-Zeiten erfolgen.

**c. SNG:**

Bisher wird kein SNG aus Biomasse eingespeist. Erste Versuchsanlagen werden momentan gebaut, so dass Einspeisungen erst in den nächsten Jahren zu erwarten sind. Da die Technologie somit noch nicht im großen Maßstab getestet ist und sich erst entwickeln muss, ist eine nennenswerte Steigerung erst ab 2030 zu erwarten. Aufgrund des heutigen politischen Willens ist ab 2030 mit einem ähnlichem Anstiegsverhalten beim eingespeisten SNG wie derzeit beim Biogas unter der Annahme veränderter Rahmenbedingungen zu rechnen.

**d. Gasverbrauch gesamt:**

Die eingespeisten Mengen an Biogas und SNG sind gegenüber dem Gesamtgasverbrauch klein. Sie erreichen im Jahr 2030 ca. 3,2 % und im Jahr 2050 lediglich 6,1 %. Durch den ausschließlichen Einsatz im KWK-Bereich werden die absoluten Mengen von Biogas und SNG dem Gasverbrauch hinzugerechnet.



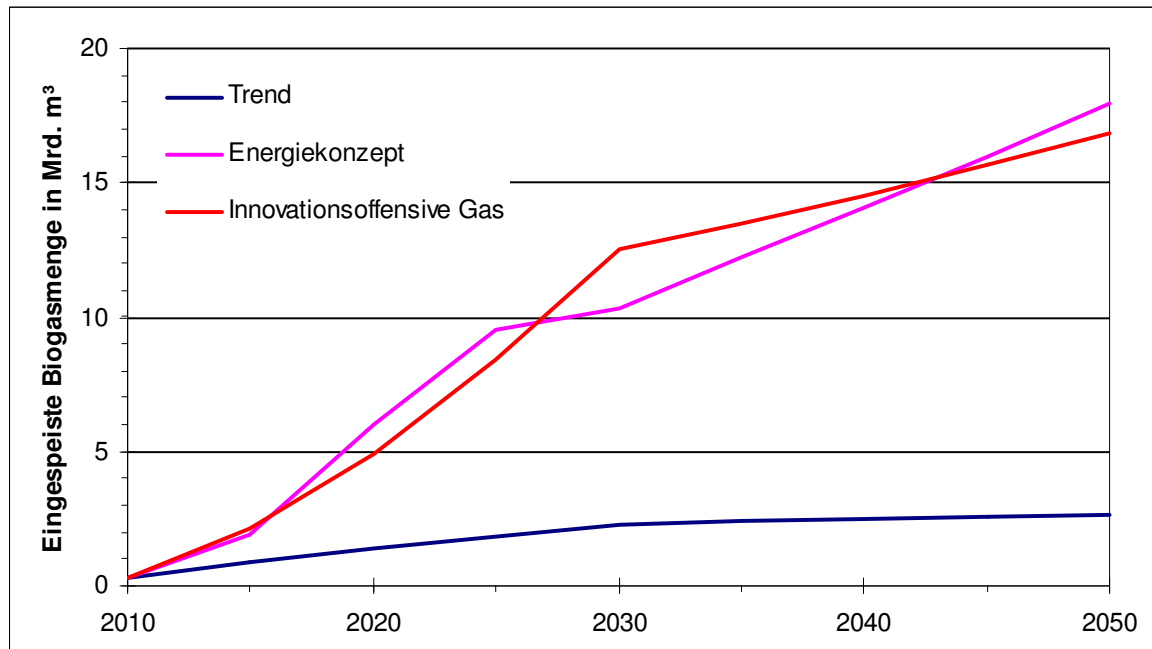
**Abbildung 23:** Volumenanteile der EE-Gase im Gasgemisch des Szenarios Trend

**Ansätze im Szenario Energiekonzept:**

**a. Biogas:**

Für das Szenario Energiekonzept wird unterstellt, dass die Zielstellungen für diesen Bereich aus dem vorherigen und weiterhin aktuellen Energiekonzept der Bundesregierung [BMWl2010] (2020: 6 Mrd. m³ und 2030:

10 Mrd. m<sup>3</sup>) erfüllt werden können, obwohl die gegenwärtigen Wachstumsraten der Branche dies nicht nahe legen.



**Abbildung 24:** Entwicklung der Biomethanproduktion in den Szenarien

Innerhalb des gegenwärtigen Energiekonzeptes werden dazu kaum fördernde Maßnahmen außer der Fortführung der EEG-Förderung und einer geplanten Öffnung für den Wärmemarkt (vgl. Kapitel 5.5) vorgesehen. Grundsätzlich müssen jedoch weitere Maßnahmen entwickelt werden, um gegenwärtige Hemmnisse abzubauen. Die Anlagengrößen werden nur unwesentlich steigen. Auch innerhalb dieses Szenarios wird eine Sättigung des Marktes allerdings auf einem wesentlich höheren Niveau erwartet, insbesondere durch eine zunehmend restriktive Genehmigungspraxis sowie den Nutzungskonkurrenzen zur Biomasse (s. Abbildung 24).

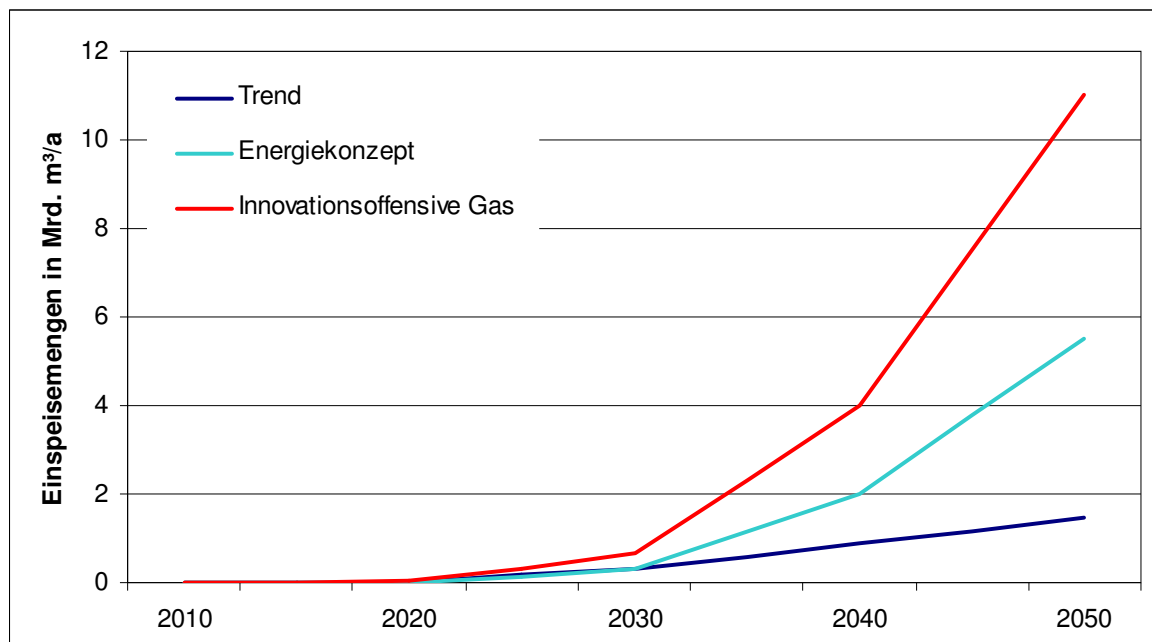
**b. Wasserstoff und Methan aus Wind und PV – Power-to-Gas (PtG):**

Ähnlich wie im Szenario Trend sind auch im Energiekonzept der Bundesregierung [BMWi2010] keine Fördermaßnahmen für die Erzeugung von Wasserstoff bzw. Methan und dessen Nutzung in der Gebäudeenergieversorgung vorgesehen. Derzeit wird lediglich in der Novellierung des EnWG [EnWG2011] die Einspeisung von Wasserstoff bzw. Methan dem von Biogas gleichgestellt, ohne jedoch konkret in den dazugehörigen Verordnungen ausgeführt zu sein. Dies liefert zwar eine Grundlage für den

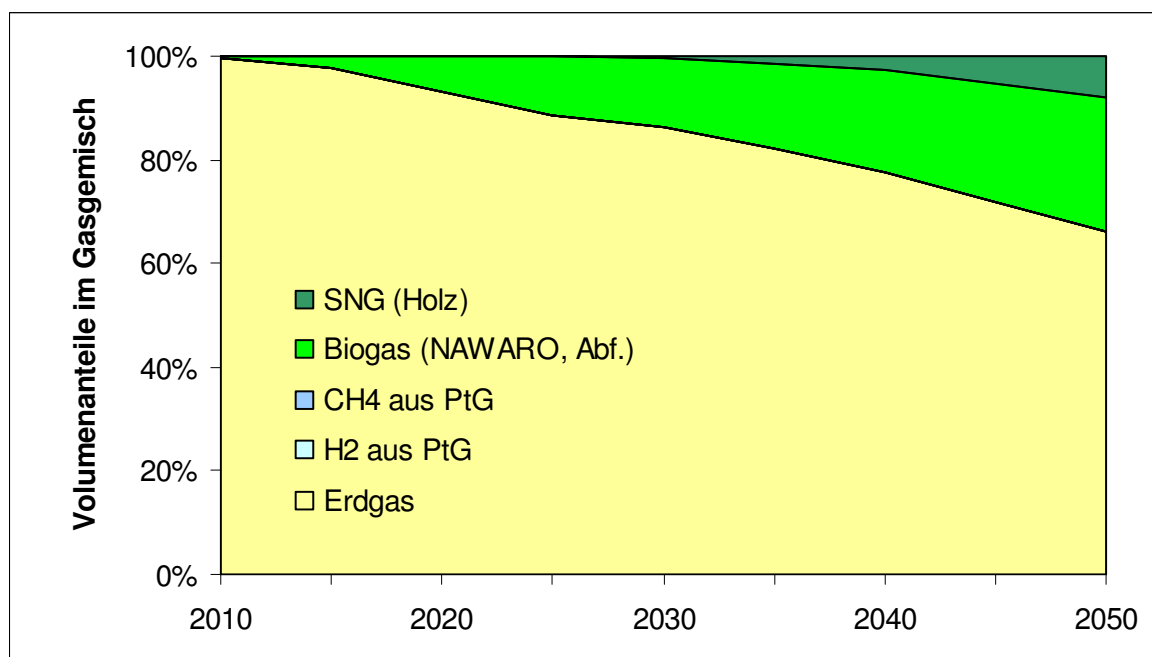
regulatorischen Rahmen, ist jedoch nicht ausreichend für die Einführung der Technologie in den Markt. Es ist umso kritischer zu sehen, dass der gegenwärtige Erzeugungspreis deutlich über dem von Erdgas bzw. Biogas liegt. Das gegenwärtig laufende Förderprogramm „Energiespeichertechnologien“ wird nur zum sehr geringen Teil wirksam werden. Auch in diesem Szenario wird analog zum Szenario Trend angenommen, dass ein starker Ausbau der Stromnetze sowie die Abschaltung der EEG-Anlagen in Niedriglast-Zeiten erfolgen.

c. **SNG:**

Aufgrund der grundsätzlichen Unterstützung der Erneuerbaren Energien durch die Bundesregierung und der verbesserten Nutzung des einheimischen Rohstoffs Holz [BMWl2010] kann unterstellt werden, dass auch die Produktion von SNG und dessen Einspeisung in Zukunft eine Förderung erfährt. Diese Förderung bedeutet einerseits die Herstellung eines regulatorischen Rahmens für die Verteilung und den Handel mit dieser Energieform und andererseits auch eine Förderung während des Markteintritts. Anders als bei PtG oder Biogas ist diese Technologie in ihrem Entwicklungsaufwand deutlich höher anzusetzen. Für die Markt- und Vertriebsmodelle gelten allerdings die gleichen Notwendigkeiten: Vermeidung von Nutzungseinschränkungen (EEWärmeG), für die gegenwärtig keine Lösung prognostiziert werden kann. Dies vorausgesetzt wird angenommen, dass eine moderate Entwicklung der Technologie und zeitversetzt der Produktion stattfindet. Analog zu den beiden vorangestellten Gasarten werden realistische Szenarien hinsichtlich des Kapazitätsausbaus für den Anlagenbau und die Errichtung von Anlagen angesetzt. Damit kann SNG einen Beitrag zur Energieversorgung leisten. Zudem sind Nutzungskonkurrenzen weit weniger ausgeprägt als beim Anbau von NawaRo für die Biogasproduktion. Der erwartete Ausbau der SNG Produktion für die betrachteten Szenarien ist in der Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25:** Prognose der Einspeisemengen von SNG



**Abbildung 26:** Gaszusammensetzung im Szenario Energiekonzept

**d. Gasverbrauch gesamt:**

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass der Gasverbrauch den Projektionen der Politikszenerarien V folgt (analog Szenario Trend) und die

eingespeisten EE-Gase (Biogas und SNG) Erdgas substituieren. Die eingespeisten Mengen an Biogas und SNG nehmen dadurch gegenüber dem Gesamtgasverbrauch einen wesentlich höheren Anteil ein. Sie erreichen im Jahr 2030 ca. 13,7 % und im Jahr 33,7 % (s. Abbildung 26).

### **Ansätze im Szenario Innovationsoffensive Gas:**

#### **a. Biogas:**

Für das Szenario Innovationsoffensive Gas wird davon ausgegangen, dass grundsätzlich die Unterstützung der Bundesregierung (durch EEG, GasNZV etc.) weiter bestehen bleibt. Es tritt keine Hemmung durch Genehmigungsverfahren ein. Es gelingt, die Bevölkerung von der Notwendigkeit der Biogasproduktion zu überzeugen. Der Markt für das Produkt Biogas wird für alle Technologien geöffnet, damit erweitert sich das Absatzvolumen und daraus resultierende Hemmnisse werden aufgelöst. Eine Unterstützung durch Zertifikationsverfahren für nachhaltigen Anbau ist gegeben. Zusätzlich werden Potenziale zur Vergärung organischer Abfälle aus der Industrie gehoben. Dadurch werden Konkurrenzsituationen auf der Rohstoffseite abgebaut. Ebenso wird vorausgesetzt, dass ein dynamisches Wachstum im Anlagenbau einsetzt und ausreichend Kapazitäten für die Errichtung der Biogasanlagen zur Verfügung stehen. Trotz der positiven wirtschaftlichen Entwicklung der Branche wird das Ziel der Bundesregierung für 2020 (6 Mrd. m<sup>3</sup> eingespeistes Biogas) nicht erreicht werden können. Erst in der nachfolgenden Dekade kann davon ausgegangen werden, dass die Branche ein ausreichendes Wachstum schafft. Dann kann allerdings die Zielstellung für 2030 mit ca. 12,5 Mrd. m<sup>3</sup> überschritten werden. Für den Zeitraum danach wird mit einem Rückgang des Wachstums wegen zunehmender Nutzungskonkurrenzen gerechnet (s. Abbildung 24).

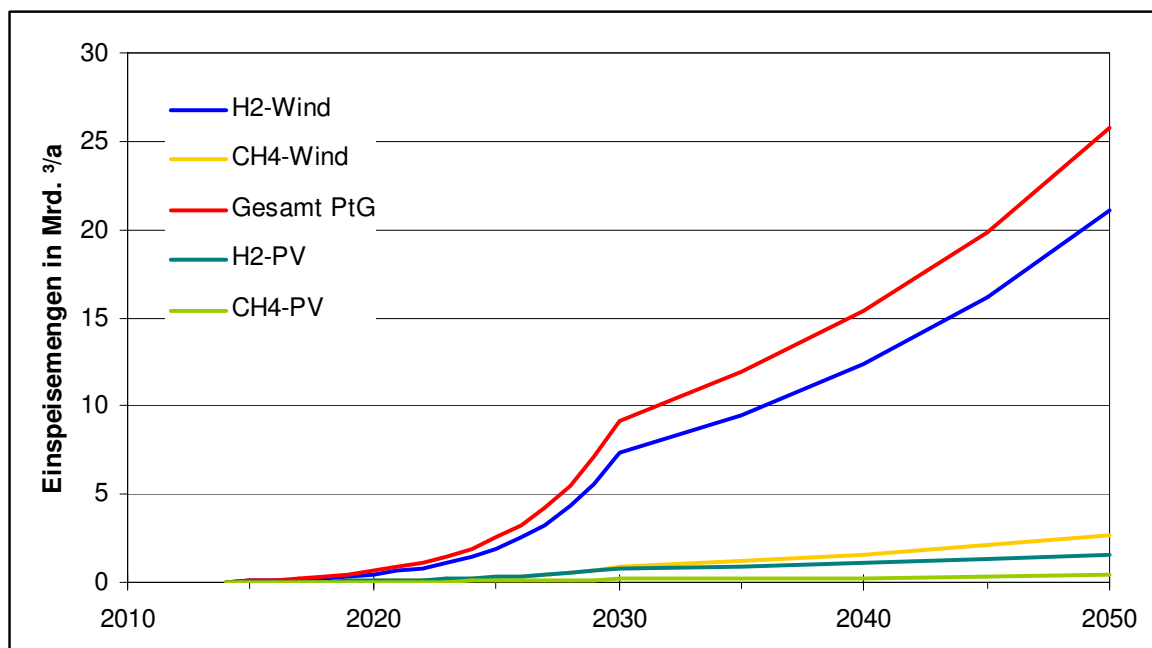
#### **b. Wasserstoff und Methan aus Wind und PV - Power-to-Gas (PtG):**

Die Power-to-Gas Technologien stellen einen wesentlichen Schwerpunkt des Szenarios Innovationsoffensive Gas dar. Es wird unterstellt, dass durch den zunehmenden Ausbau von Wind- und PV-Stromerzeugung gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung einerseits sehr große Erzeugerkapazitäten aufgebaut werden und andererseits ein sehr großer Bedarf besteht, Energie zu speichern um tages-, monats- und jahreszeitliche Fluktuationen in Erzeugung und Bedarf auszugleichen. Es wird erwartet, dass ein entsprechender regulatorischer Rahmen geschaffen wird und sich darauf aufbauend Geschäftsmodelle für Netzbetreiber und Energiehändler



in einem liberalisierten Markt ergeben. Analog zum Biogas sollten Einschränkungen zu Nutzung der Gase vermieden werden.

Weiter wird davon ausgegangen, dass die technischen Regelwerke auf den vermehrten Einsatz von Wasserstoff angepasst werden. Im Bereich der technologischen Entwicklung werden bestehende Technologien (alkalische und PEM-Elektrolyse) weiterentwickelt und vor allem auf die erforderlichen Größen skaliert. Nach einem Zeitraum von ca. 5 – 10 Jahren kann erwartet werden, dass die Technologien marktfähig sind und der Anlagenbau in der Lage ist, Kapazitäten für einen beschleunigten Ausbau bereitzustellen. Bedingt durch das große Potenzial auf der Stromseite und den hohen Bedarf wird danach von einem exponentiellen Wachstum der Erzeugung ausgegangen (s. Abbildung 27). Ebenso wird erwartet, dass aus dem Bereich Biogas genügend regeneratives CO<sub>2</sub> verfügbar ist. Dennoch wird realistischer Weise angenommen, dass es ab dem Jahr 2030, bedingt durch die Verringerung der Förderung in Wind- und PV-Stromerzeugung, zu einer Abschwächung des Wachstums kommt.



**Abbildung 27:** Prognose der Erzeugung von PtG-Gasen aus EE-Strom im Szenario Innovationsoffensive Gas

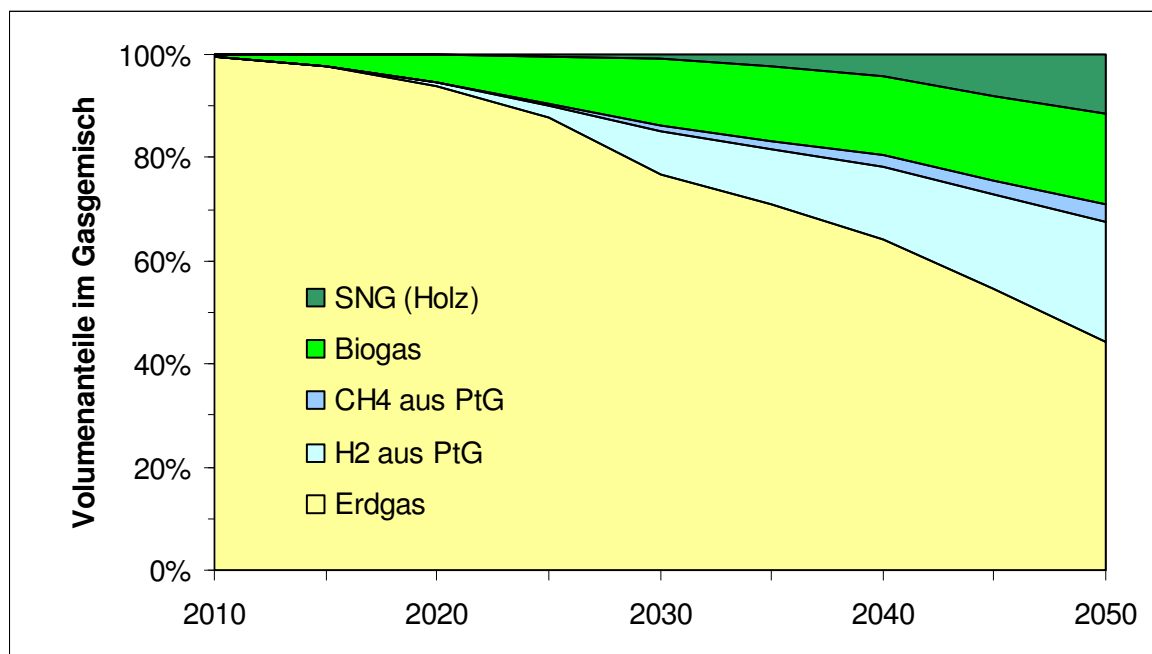
c. **SNG:**

Im Szenario Innovationsoffensive Gas wird für SNG eine gegenüber dem Szenario Energiekonzept deutlich verstärkte Entwicklung erwartet. D. h. die

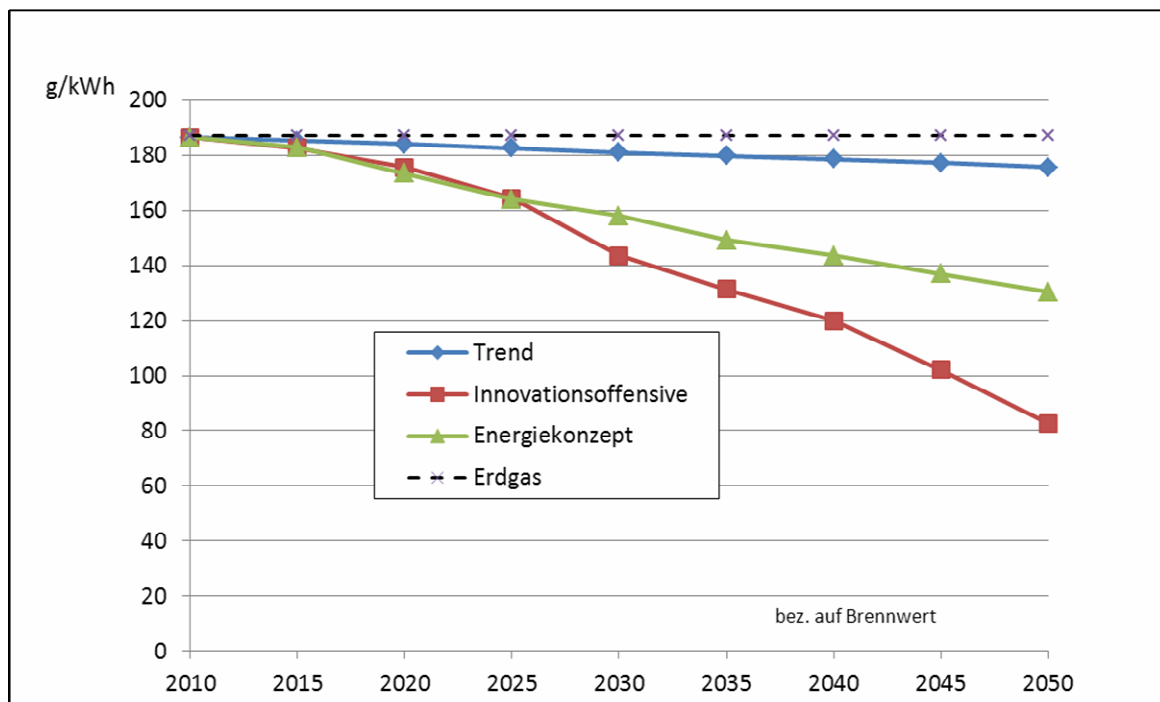
absoluten Einspeisemengen werden nahezu verdoppelt (s. Abbildung 25). Unterstützt wird diese Entwicklung durch eine deutliche Förderung der technologischen Entwicklung als auch eine Vereinfachung des Markteintritts. Der Abbau von Hemmnissen entspricht dem des Szenarios Energiekonzept mit der Maßgabe, auch Nutzungseinschränkungen vollständig zu vermeiden. Aufgrund dieser Voraussetzungen kann das Wachstum der SNG-Erzeugung über dem des Energiekonzeptes liegen. Mit einer Abschwächung wird erst nach 2050 gerechnet.

**e. Gasverbrauch gesamt:**

Im Vergleich zu den Politikszenerarien V erhöht sich der Gasamtgasverbrauch, da aufgrund der Rückverstromung von PtG-Gasen eine Substitution anderer Energieträger (Kohle, Heizöl) erreicht werden muss. Durch den hohen Anteil an EE-Gasen wird aber dennoch eine Substitution von Erdgas in etwa der gleichen Größenordnung wie im Szenario Energiekonzept erreicht. Im Ergebnis erreichen die EE-Gase im Jahr 2030 ca. 23,2 % und im Jahr 2050 55,8 % (s. Abbildung 28) am Endenergieverbrauch Gas. Den Vorteil der Integration der erneuerbaren gasförmigen Energieträger hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen stellt Abbildung 29 dar.



**Abbildung 28:** Gaszusammensetzung des Szenarios Innovationsoffensive Gas



**Abbildung 29:** Entwicklung des spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für die Gasgemische in den jeweiligen Szenarien

## 7.5.2 Entwicklung der Energiepreise

Für die Berechnungen wird als Orientierungshilfe die Energiepreisentwicklung der Energieszenarien-Studie [EGP2010] zugrunde gelegt (siehe Tabelle 20). In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass der Rohölpreis sukzessive bis zum Jahr 2050 auf etwa 130 \$/bbl (real) ansteigt, was sich letztlich auch in dem Anstieg der Grenzübergangspreise für Rohöl widerspiegelt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Grenzübergangspreis für Erdgas von heute 1,9 ct/kWh [BMWi2011] auf 3,2 ct/kWh im Jahr 2050 ansteigt. Auf der Basis dieses Trends und des Preisgerüsts der Grenzübergangspreise werden die Verbraucherpreise der privaten Haushalte ermittelt, wie im Nachfolgenden erläutert wird.

**Tabelle 20:** Referenzpreis-Projektionen für Rohöl, Erdgas und Steinkohle [EGP2010]

Preisbasis 2008, real <sup>1)</sup>		2010 [BMWi2011]	Projektion			
			2020	2030	2040	2050
Rohöl	\$/bbl	71,5	97,5	110	120	130
Rohöl	€/t	411	554	675	802	947
Erdgas H <sub>s</sub>	€/MWh	19	23	26	29	32
Steinkohle	€/t SKE	76,7	77	83	91	110

<sup>1)</sup> Soweit nicht ausgewiesen, beziehen sich alle Angaben auf den unteren Heizwert H<sub>i</sub>

Da in der Energiekonzeptstudie keine Preise für Holzpellets, Fernwärme und Brikett angegeben werden, wurde mit Hilfe einer Regressionsanalyse der Zusammenhang von Rohölpreis und den Verbraucherpreisen Fernwärme sowie Brikett durchgeführt. Dabei wurde die Energiepreisentwicklung der letzten beiden Jahrzehnte zugrunde gelegt. Hierauf aufbauend wurden die Verbraucherpreise für diese Energieträger von der aus den Energieszenarien übernommenen Rohölpreisentwicklung abgeleitet. Die Annahme der Holzpelletpreise erfolgte auf der Grundlage vorliegender Preisentwicklungen der vergangenen Jahre in Relation zum Preis für leichtes Heizöl und Erdgas. Die Entwicklung der Strompreise (inkl. Wärmepumpenstrom) wurde aus der Ecofys-Studie [BETT2011] übernommen. Alle Preisangaben sind als reale Preise (Preisbasis 2008) zu verstehen. Für die Ermittlung der Endverbraucherpreise wird davon ausgegangen, dass Steuern und Abgaben für den Betrachtungszeitraum konstant bleiben. Gleiches gilt für die Entgelte für Gasverteilung, -transport und sonstige Dienstleistungen. Für die Ermittlung der einzelnen Anteile wurde der Monitoringbericht 2010 der Bundesnetzagentur [BNA2011] zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Preisermittlung sind für die einzelnen Energieträger in Tabelle 21 zusammengefasst. Durch die Verwendung anerkannter und auch von der Bundesregierung verwendeter Preisentwicklungsprognosen ist eine Kompatibilität zu den Referenzszenarien anderer Studien sicher gestellt.

**Tabelle 21:** Energiepreisprojektion für private Haushalte (inkl. Steuern und Abgaben, konstant bis 2050)

Preisbasis 2008, real <sup>0)</sup>		2010 <sup>1)</sup>	Projektion			
			2020	2030	2040	2050
Heizöl leicht	€/100 l	59	82,1	97,6	114,9	133,5
Erdgas (H <sub>s</sub> )	ct/kWh	5,71	6,93	7,50	8,06	8,62
Briketts	€/100 kg	30	30,1	28,3	26,4	24,2
Fernwärme	€/GJ	19	23	24,6	26,4	28,3
Pellets	€/t	225 <sup>2)</sup>	219	250	279	312
Strom	€/kWh	21	0,265	0,284	0,304	0,325
Strom WP	€/kWh	-	0,204	0,219	0,234	0,250

<sup>0)</sup> Soweit nicht ausgewiesen, beziehen sich alle Angaben auf den unteren Heizwert H<sub>i</sub>

<sup>1)</sup> [BMW2011]

<sup>2)</sup> [CARMEN2011]

## **Gasgemische, Produktionskosten und Verbraucherpreise**

Für den Gaseinsatz wird für die im Rahmen dieser Studie definierten Szenarien von unterschiedlichen Gasgemischen ausgegangen. Dies wiederum hat Auswirkungen auf den Heizwert, die spezifischen Emissionen sowie den Preis des Gasgemisches. Alle diese Parameter sind somit szenarienabhängig.

Die Gestehungskosten der jeweiligen Gasbestandteile (Biogas, H<sub>2</sub> aus Wind, H<sub>2</sub> aus PV, CH<sub>4</sub> auf der Basis von Wind- bzw. PV-Strom, SNG aus biogenen Abfällen sowie Holz) bilden neben den oben beschriebenen Grenzübergangspreis für Erdgas die Grundlage für den Gesamtpreis der Gasgemische sowie deren zeitliche Entwicklung. Wie aus Tabelle 22 hervorgeht, wurden für die Preise im zeitlichen Verlauf Kostendegressionen angenommen.

Bei den Gestehungskosten für Biomethan wurden vollständige Invest- und Betriebskosten für den gegenwärtigen Anlagenmix bestimmt. Dazu gehören die Aufwendungen für die Beschaffung und Bereitstellung der Rohstoffe, die Produktion selbst sowie die Aufbereitung und Konditionierung mit Einspeiseanlage. Da die Technologien zur Produktion von Biomethan schon heute einen sehr hohen Stand erreicht haben und der Anlagengrößenmix schon jetzt eine breite Verteilung besitzt, ist anders als bei anderen gasförmigen Energieträgern davon auszugehen, dass keine weitere Degression eintritt.

Für die Prozessstrecke Power-to-Gas wurde eine Analyse der Einspeisekonzepte durchgeführt. Dazu wurden Invest- und Betriebskosten inkl. der Wandlungsverluste der Anlagen von der Stromeinspeisung bis zur Zumischung in das Erdgasnetz berücksichtigt. Die Kostenberechnung geht auf Ergebnisse eigener Berechnungen zurück, die im Rahmen des DVGW-Projektes Energiespeicherkonzepte [DVGW2012a] ermittelt wurden. Weiter wurden die Kosten des EE-Stroms gemäß EEG für die unterschiedlichen Pfade (Wind und PV) und dessen Degression berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Stromkosten nach Auslaufen der EEG Förderung auf den marktüblichen Einkaufspreis fallen. Neben den genannten Aspekten werden die Anlagengrößen beginnend mit der Markteinführung steigen, was weiter zu einer Effizienzsteigerung und Kostendegression führt.

Für die Kostenermittlung beim SNG wurde die Studie [MLR2011] als Basis gewählt. In dieser ausführlichen Studie wurde eine Vollkostenrechnung aufgestellt, die von der Biomassebeschaffung bis zur Einspeisung des SNG die gesamte Prozesskette monetär betrachtet. Angenommen wird, dass zuerst kleine Anlagen gebaut werden und erst in einem zweiten Schritt größere Anlagen, die eine Kostendegression verursachen. Bis zum Jahr 2040 ist mit einer starken Kostenreduktion zu rechnen, da nach der Einführung neuer Technologien große

technische Fortschritte erzielt werden können. Ab dem Jahr 2040 ist nur noch mit einer moderaten Kostenreduktion zu rechnen, da die Technologie dann etabliert ist und somit die technischen Fortschritte langsamer voranschreiten.

**Tabelle 22:** Produktionskosten der verschiedenen Gasbestandteile (alle Angaben in ct/kWh)

	Projektion			
	2020	2030	2040	2050
H <sub>2</sub> aus Wind	20	15	13	13
H <sub>2</sub> aus PV	42	30	23	23
CH <sub>4</sub> aus Wind	32	26	22	22
CH <sub>4</sub> aus PV	59	42	32	25
Biogas aus NawaRo	8	8	8	8
Biogas aus Abfall	8	8	8	8
SNG aus Holz	21,8	14,3	12,1	12,1

Für die jeweiligen Gasgemische (Kapitel 7.5.1) errechnen sich Verbraucherpreise auf der Basis der Produktionskosten, die den Szenariorechnungen zugrunde liegen. Tabelle 23 enthält die Preise für die szenarioabhängigen Gasgemische im Vergleich mit dem verbraucherseitigen Erdgaspreis (vgl. Tabelle 21). Bis zum Jahr 2020 besteht in allen Szenarien die Zumischung vornehmlich aus Biogas (aus NawaRo), was die Preisänderungen gegenüber konventionellem Erdgas erklärt. Nach dem Jahr 2020 nimmt die Beimischung anderer Gasbestandteile je nach Szenario unterschiedlich stark zu. Da die Beimischung CO<sub>2</sub>-freier Gasbestandteile ein wesentliches Ziel der Innovationsoffensive ist, sinkt der Anteil an konventionellem Erdgas bis zu Jahr 2050 auf etwa 44 %. Dies erklärt wiederum den deutlich höheren Gasgemischpreis gegenüber den anderen Szenarien. Zwar ist die spezifische CO<sub>2</sub>-Emission gegenüber dem Szenario Trend um ca. 53 % niedriger (vgl. Abbildung 29), allerdings liegt der Gasgemischpreis gegenüber dem Szenario Trend um ca. 46 % (gegenüber Erdgas: ca. 53 %) höher. Der Anstieg des Gaspreises im Szenario Energiekonzept beträgt gegenüber dem Szenario Trend im Jahr 2050 etwa 17 % und fällt damit deutlich geringer aus. Als Zumischung wird im Wesentlichen Biogas angenommen, dessen Anteil im Jahr 2050 ca. 30 % (70 % konventionelles Erdgas) beträgt.

**Tabelle 23:** Verbraucherpreise in ct/kWh für die szenarioabhängigen Gasgemische inklusive Steuern und Abgaben

	Projektion			
	2020	2030	2040	2050
Trend	7,04	7,72	8,38	9,06
Energiekonzept	7,47	8,62	9,62	10,62
Innovationsoffensive	7,38	9,30	10,76	13,22
Zum Vergleich: Erdgas	6,93	7,50	8,06	8,62

## 7.6 CO<sub>2</sub>-Footprint und Gesamteffizienz der Energieträger

### 7.6.1 Allgemeine Grundsätze

Eine Erweiterung der emissionsseitigen Betrachtung stellt die Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus den Vorketten dar, die den direkten Emissionen im Bilanzkreis der Wohngebäude hinzuaddiert werden müssen. Daher wird wie in der Studie Systemanalyse I [SYST2010a] die fossile CO<sub>2</sub>-Emission von der Förderung bzw. Erzeugung des Brennstoffes bis hin zur Nutzung der Endenergie (Strom und Wärme) inklusive aller für die Nutzbarmachung benötigten Energien, Materialien und Hilfsstoffe und deren benötigten Energien zur Herstellung ermittelt (Lebensweganalyse). Dies bedeutet, dass der Bilanzraum Haus bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emission auf ein globales Niveau mit veränderten Bilanzgrenzen erweitert wird.

Als Basis für die Berechnung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden eigene Berechnungen, GEMIS-Daten (Global Emissions-Modell Integrierter Systeme Version 4.5), Primärenergiefaktoren gemäß DIN 18599 (10/2009) und Stromnutzungsgrade von Kraftwerken [SYST2010a] herangezogen. Für weitestgehend ausgereifte Systeme in den Bereichen Wind- und Wasserkraft wurden keine Wirkungsgradverbesserungen angenommen (s. Tabelle 29). Die ausführliche Ermittlung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Herstellung/Förderung, des Transport und der Aufarbeitung kann [SYST2010a] entnommen werden. In dieser Studie wird zum besseren Verständnis lediglich die Methodik vorgestellt.

### 7.6.2 Methodik

Die Methodik zur Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die einzelnen Pfade basiert auf Lebensweganalysen entsprechend Abbildung 30. Zur Ermittlung wurden die Zusammensetzungen der Strom- und Wärmeerzeugung für die Zukunft definiert.

Parallel dazu wurden die Umwandlungstechnologien identifiziert und zeitabhängige Wirkungsgrade für die Wandlung spezifiziert. Weiterhin wurden spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Hilfe von GEMIS 4.5, Primärenergiefaktoren sowie eigenen Berechnungen für die Stromerzeugung, die Wärmeerzeugung und die Vorketten bestimmt (s. Kapitel 7.6.3 bis Kapitel 7.6.5). In einem finalen Schritt wurden anschließend die Daten aus allen Paketen gekoppelt und die CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet. Folgende Randbedingungen wurden dabei unterstellt:

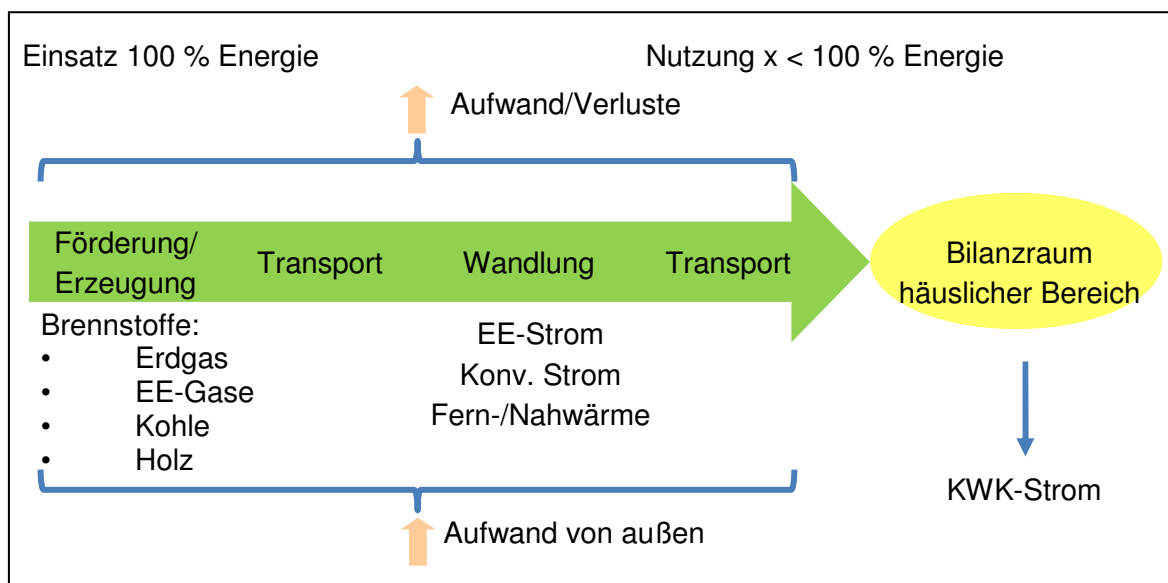
#### Strommix:

- Vereinfachende Annahme: Stromerzeugung ohne Wärmeerzeugung bei Großkraftwerken
- Stromerzeugung mit Wärmeerzeugung bei BHKWs, Holz- und Müllheizkraftwerken
- Anwendung der Wirkungsgradmethode zur Ermittlung der Aufteilung von CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Bereiche Strom und Wärme

#### Wärmemix:

- Wärmeauskopplung aus Großkraftwerken
- Wärmeauskopplung bei BHKW-Nutzung außerhalb des häuslichen Bereichs
- Anwendung der Wirkungsgradmethode zur Ermittlung der Aufteilung von CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Bereiche Strom und Wärme

Die Berechnungen wurden ausführlich in [SYST2010a] beschrieben.



**Abbildung 30:** Schematische Darstellung der Methodik zur Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen



### 7.6.3 Brennstoffe

Aufbauend auf den Ergebnissen des DVGW-Forschungsprojekts Systemanalyse I [SYST2010a] wurden in diesem Forschungsprojekt die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bereitstellung von Brennstoffen (s. Tabelle 24) betrachtet. Per Definition in dieser Arbeit treten bei der Wandlung im häuslichen Bereich für die regenerativen Brennstoffe keine fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Die bei regenerativen Brennstoffen anzurechnenden CO<sub>2</sub>-Emissionen werden in den Vorketten ermittelt. In einem zweiten Schritt werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Vorkette und aus dem häuslichen Bereich zusammengeführt.

**Tabelle 24:** CO<sub>2</sub>-Emissionen der Brennstoffe (bezogen auf Brennwert, alle Angaben in g/kWh)

	CO <sub>2</sub> -Emission Vorkette	CO <sub>2</sub> -Emission Brennstoff im häuslichen Bereich	CO <sub>2</sub> -Emissionen gesamt
Erdgas	18,7	187	205,7
H <sub>2</sub> aus Wind	27,2	0	27,2
H <sub>2</sub> aus PV	84,5	0	84,5
CH <sub>4</sub> aus Wind	33	0	33,0
CH <sub>4</sub> aus PV	102,6	0	102,6
Biogas (NawaRo)	58,9	0	58,9
Biogas (Abfall)	4,8	0	4,8
SNG aus Holz	60,4	0	60,4
Heizöl	25,2	252,0	277,2
Steinkohle	34,1	341,3	375,4
Braunkohle	37,8	377,6	415,4
Holzpellets	25,4	0	25,4

### 7.6.4 Strommix

#### 7.6.4.1 Entwicklung des Strommix

Der Strommix in Deutschland ist einer ständigen Änderung unterzogen, da die Zusammensetzung der Stromerzeuger (u. a. konventionelle Kraftwerke und regenerative Quellen) sich immer mehr von der fossilen Stromerzeugung in

Richtung regenerative Stromerzeugung ändert. Um nun die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommixes für die Zukunft abschätzen zu können, muss die Zusammensetzung der erzeugten Strommengen aus den unterschiedlichen Quellen und deren fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen abgeschätzt werden. Hierfür wurden vorbereitend die Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung [EGP2010], die Leitstudie 2010 [LEST2010] und die Projektion des Vorhabens Politikscenario V [CLI2010] als Datengrundlage für die Entwicklung der Stromerzeugung betrachtet und ausgewertet. Innerhalb dieser Arbeit liegt der Fokus nicht in der Analyse von Szenarien für die Stromerzeugung, sondern in Szenarien zur Erzeugung der Energie für den häuslichen Bereich. Daher wurde der Strommix an das Referenzszenario der Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung [EGP2010] (Szenario mit ursprünglichem Ausstiegsszenario aus der Kernkraft) angelehnt. Da die Studie vor der Verabschiedung des Atomgesetzes [ATG2010] erstellt wurde, wurden die Restlaufzeiten der Kernkraftwerke aus dem Atomgesetz eingepflegt. Um die fehlenden Kapazitäten aus der Kernkraft aufzufangen, liegt der Fokus entsprechend [EGP2010] in einem forcierten Ausbau der regenerativen Energiequellen. Zum Ausgleich der steigenden Stromerzeugung insbesondere durch Wind und Sonne um das Jahr 2020 und der damit verbundenen Volatilität, werden verstärkt schnell regelbare Gaskraftwerke in den Strommix eingesetzt. Dafür wurde im Gegenzug die Stromerzeugung aus schlecht regelbaren Kohlekraftwerken vermindert. Entsprechende Daten bzgl. der Regelbarkeit können [SYST2010a] entnommen werden. Die Strategie, Gaskraftwerke zu stärken und gleichzeitig Kohlekraftwerke zu schwächen, wird durch die politische Ablehnung des Neubaus von Kohlekraftwerken aufgrund der höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen gestützt.

Ein späterer Ersatz von Gaskraftwerken durch Kohlekraftwerke mit CCS-Technologie wird als unwahrscheinlich betrachtet, da die Standzeiten von Kraftwerken mit 40 - 50 Jahren sehr lang sind und aufgrund der weiteren Verminderung der Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken die älteren Kraftwerke stillgelegt würden. Zusätzlich muss bedingt durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommix eine noch höhere Volatilität ausgeglichen werden, was wiederum die Gaskraftwerke stärken würde. Auch ist durch die Ablehnung des CCS-Gesetzes im Bundesrat und der damit verbundenen Verhinderung bzw. zeitlich stark verzögerten möglichen großtechnischen Nutzung der CCS-Technologien die Akzeptanz von Kohlekraftwerken auf einem niedrigen Niveau geblieben.

Entsprechend den in diesem Bericht betrachteten Szenarien - Trend, Energiekonzept, Innovationsoffensive Gas - wurden unter den oben dargelegten Überlegungen spezifische Strommixe (s. Tabelle 25 bis Tabelle 27) unterstellt. In den

Szenarien Trend und Energiekonzept sind die erzeugten Strommengen bis auf die Anteile von KWK im Wohngebäudesektor und Import gleich. Der Anteil KWK aus dem Wohngebäudesektor wurde aus den Berechnungen des IEK-STE übernommen und die fossilen Importmengen entsprechend substituiert.

Im Szenario Innovationsoffensive Gas wurde die eingesetzte Gasmenge entsprechend der Intention des Szenarios erhöht und der Strom aus Kohle entsprechend verringert (vgl. Kapitel 7.5). Auch in diesem Szenario wurden die durch KWK erzeugten Strommengen gemäß den Berechnungen des IEK-STE (vgl. Kapitel 8.2, Abbildung 33) eingepflegt. Importstrom ist ähnlich dem Politikscenario V nicht vorgesehen, da hohe KWK-Strommengen zur Verfügung stehen.

Unter dem Begriff Strom aus Biomasse werden biogene Festbrennstoffe (Holz), Biogas und flüssige biogene Brennstoffe zusammengefasst. Biogene Festbrennstoffe erfahren bis zum Jahr 2020 eine Steigerung von 2 % pro Jahr und ab dem Jahr 2020 von 1 %. Ab 2030 ist das Potential für die Stromgewinnung ausgeschöpft. Unter Biogas wird hier die direkte Verstromung von Biogas verstanden sowie die Verstromung in dezentralen BHKW außerhalb der Wohngebäude. Für Biogas aus NawaRo wird eine Steigerung von 4 % bis zum Jahr 2020 und danach bis zum Jahr 2030 eine Steigerung von 0,5 % pro Jahr angenommen. Ab dem Jahr 2030 ist keine Steigerung mehr vorgesehen, da hier auch die Einspeisung entsprechend der GasNZV [GNZV2010] ihr Maximum erreicht und somit das Potential erschöpft ist. Für Biogas aus Abfall- und Reststoffen wird angenommen, dass die Gasproduktion für das Jahr 2020 ca. 25 %, für das Jahr 2030 ca. 33 % und für das Jahr 2040 ca. 38,7 % der Biogasmengen aus NawaRo beträgt, da ein großer Nachholbedarf besteht und die Entwicklung dem Biogas aus NawaRo folgt. Ab 2040 wird auch für diesen Sektor keine Erhöhung mehr angenommen. Die biogenen flüssigen Brennstoffe weisen bis zum Jahr 2030 nur eine Steigerung von 10 % pro Jahrzehnt auf. Ab 2030 stagniert die Stromerzeugung aus biogenen flüssigen Brennstoffen, da auch hier das Potential erschöpft ist und keine Importe von biogenen Kraftstoffen angenommen werden, weil diese zum einen stark umstritten sind und zum anderen wird davon ausgegangen, dass die erzeugenden Länder diese selbst verbrauchen werden.

**Tabelle 25:** Deutscher Strommix für das Szenario Trend (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Import Erneuerbare	0,0	0,0	3,2	2,8	3,8
Import Konventionelle	0,0	0,0	4,9	3,7	7,8
KWK Privathaushalte	0,0	0,1	0,4	0,7	1,1
Kernkraft	22,5	10,2	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	23,2	18,8	13,7	8,5	8,2
Steinkohle	18,8	17,2	15,9	16,0	12,6
Erdgas	13,4	15,0	14,6	17,2	12,5
Heizöl	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
andere Brennstoffe <sup>1)</sup>	3,4	3,6	4,2	4,6	5,0
Pumpspeicher	1,2	1,3	1,5	1,7	1,5
Lauf- und Speicherwasser	3,2	4,3	4,5	4,5	4,5
Wind onshore	5,8	11,7	13,1	13,7	14,3
Wind offshore	0,0	4,5	8,6	10,7	12,2
Photovoltaik	1,9	5,3	6,5	6,8	7,0
Geothermie	0,0	0,3	0,5	0,7	0,9
Biomasse <sup>2)</sup>	4,3	6,4	7,2	7,3	7,4
andere erneuerbare Brennstoffe <sup>3)</sup>	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2

<sup>1)</sup> Müll, und sonstige nicht EE nach AGEB

<sup>2)</sup> Biogas und Holz und biogene Flüssigbrennstoffe

<sup>3)</sup> biogener Müll, Klär und Deponiegas

**Tabelle 26:** Deutscher Strommix für das Szenario Energiekonzept (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Import Erneuerbare	0,0	0,0	3,2	2,8	3,8
Import Konventionelle	0,0	0,0	5,2	3,9	7,9
KWK Privathaushalte	0,0	0,1	0,3	0,6	0,9
Kernkraft	22,5	10,2	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	23,2	18,8	13,7	8,5	8,2
Steinkohle	18,8	17,2	15,9	16,0	12,7
Erdgas	13,4	15,0	14,5	17,2	12,5
Heizöl	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0

	2010	2020	2030	2040	2050
andere Brennstoffe <sup>1)</sup>	3,4	3,6	4,2	4,6	5,0
Pumpspeicher	1,2	1,3	1,5	1,7	1,5
Lauf- und Speicherwasser	3,2	4,3	4,5	4,5	4,5
Wind onshore	5,8	11,7	13,1	13,7	14,3
Wind offshore	0,0	4,5	8,6	10,7	12,2
Photovoltaik	1,9	5,3	6,5	6,8	7,0
Geothermie	0,0	0,3	0,5	0,7	0,9
Biomasse <sup>2)</sup>	4,3	6,4	7,2	7,3	7,4
andere erneuerbare Brennstoffe <sup>3)</sup>	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2

<sup>1)</sup> Müll, und sonstige nicht EE nach AGEB

<sup>2)</sup> Biogas und Holz und biogene Flüssigbrennstoffe

<sup>3)</sup> biogener Müll, Klär und Deponiegas

**Tabelle 27:** Deutscher Strommix für das Szenario Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Import Erneuerbare	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Import konventionelle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KWK Privathaushalte	0,0	0,3	1,1	2,1	3,6
Kernkraft	22,5	10,7	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	23,1	18,6	13,5	11,5	9,0
Steinkohle	18,8	15,1	11,3	9,8	9,0
Erdgas	13,4	16,8	26,8	25,5	24,3
Heizöl	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
andere Brennstoffe <sup>1)</sup>	3,4	3,6	4,2	4,6	5,0
Pumpspeicher	1,2	1,3	1,5	1,7	1,5
Lauf- und Speicherwasser	3,2	4,3	4,5	4,5	4,5
Wind onshore	5,8	11,7	13,2	13,7	14,3
Wind offshore	0,0	4,5	8,6	10,7	12,3
Photovoltaik	1,9	5,3	6,5	6,8	7,0
Geothermie	0,0	0,3	0,5	0,7	0,9
Biomasse <sup>2)</sup>	4,3	6,4	7,2	7,3	7,4

	2010	2020	2030	2040	2050
andere erneuerbare Brennstoffe <sup>3)</sup>	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2

<sup>1)</sup> Müll, und sonstige nicht EE nach AGEb

<sup>2)</sup> Biogas und Holz und biogene Flüssigbrennstoffe

<sup>3)</sup> biogener Müll, Klär und Deponiegas

#### 7.6.4.2 CO<sub>2</sub>-Footprint des Strommix

Zur Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommixes wurden die in Kapitel 7.6.4.1 festgelegten Verteilungen der Stromquellen mit ihren CO<sub>2</sub>-Emissionen (s. Tabelle 28) verknüpft. Wirkungsgradverbesserungen bei der Wandlung wurden berücksichtigt (s. Tabelle 29). Die Tabelle 30 bis Tabelle 32 verdeutlichen, dass die unterschiedliche Zusammensetzung des Strommixes und insbesondere die unterschiedlichen Gaszusammensetzungen einen wesentlichen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen haben. Beim Szenario Trend können mit Bezug auf das Jahr 2010 für 2050 ca. 47,5 % CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Das Szenario Energiekonzept weist ein Einsparpotential von ca. 49,3 % und das Szenario Innovationsoffensive Gas von ca. 51,7 % auf.

**Tabelle 28:** CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung für den Deutschen Strommix bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh)

	2010	2020	2030	2040	2050
Kernkraft	31,0	31,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	1155,4	1155,4	1078,9	1078,9	1035,1
Steinkohle	867,8	867,8	814,6	814,6	767,0
Erdgas	490,3	490,3	451,7	451,7	428,5
Heizöl	797,5	797,5	756,8	756,8	717,9
andere Brennstoffe <sup>1)</sup>	676,0	676,0	634,5	634,5	597,5
Pumpspeicher	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lauf- und Speicherwasser	40,3	40,3	40,3	40,3	40,3
Wind onshore	18,7	18,5	18,3	18,2	18,0
Wind offshore	22,7	22,4	22,2	22,0	21,8
Photovoltaik	94,7	92,8	90,9	89,1	87,3
Geothermie	130,2	117,2	105,5	94,9	85,4
Biomasse <sup>2)</sup>	105,8	99,4	87,5	81,5	76,7

	2010	2020	2030	2040	2050
andere erneuerbare Brennstoffe <sup>3)</sup>	14,4	14,3	14,3	14,5	15,1

<sup>1)</sup> Müll, und sonstige nicht EE nach AGEb

<sup>2)</sup> Biogas und Holz und biogene Flüssigbrennstoffe

<sup>3)</sup> biogener Müll, Klär und Deponiegas

**Tabelle 29:** Wirkungsgrade bezogen auf den Lebensweg an der Systemübergabegrenze Hauswand bei der Stromgestehung ohne Abwärmenutzung (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Biogene Festbrennstoffe	26,8	26,8	31,2	31,2	33,9
Biogas (NawaRo)	23,2	23,8	25,1	26,3	27,6
Biogas (Abfall)	26,4	27,1	28,5	29,9	31,4
Biogene Flüssigbrennstoffe	25,2	25,8	27,1	28,3	29,6
Braunkohle	32,7	32,7	35	35	36,5
Steinkohle	39,3	39,3	41,9	41,9	44,5
Erdgas (GuD)	29,9	29,9	34,2	34,2	36,8
Erdgas (GT)	50,4	50,4	52,2	52,2	53,9
Heizöl	31,6	31,6	33,3	33,3	35,1

**Tabelle 30:** Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommixes für das Szenario Trend bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh)

	2010	2020	2030	2040	2050
Strommix (Bruttostromerzeugung <sup>1)</sup> )	544,9	482,7	398,5	355,0	300,3
Strommix (Nettostromerzeugung <sup>2)</sup> )	624,8	542,7	443,1	392,0	328,0

<sup>1)</sup> Stromerzeugung inklusive KWK, Import, Eigenverbrauch und Verlusten

<sup>2)</sup> Stromerzeugung inklusive KWK und Import

**Tabelle 31:** Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommixes für das Szenario Energiekonzept bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh)

	2010	2020	2030	2040	2050
Strommix (Brutto- stromerzeugung <sup>1)</sup> )	544,9	480,0	392,8	343,8	289,7
Strommix (Netto- stromerzeugung <sup>2)</sup> )	624,8	539,6	436,7	379,6	316,5

<sup>1)</sup> Stromerzeugung inklusive KWK, Import, Eigenverbrauch und Verlusten

<sup>2)</sup> Stromerzeugung inklusive KWK und Import

**Tabelle 32:** Summe CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommixes für das Szenario Innovationsoffensive Gas bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh)

	2010	2020	2030	2040	2050
Strommix (Brutto- stromerzeugung <sup>1)</sup> )	544,9	468,2	387,2	342,2	276,1
Strommix (Netto- stromerzeugung <sup>2)</sup> )	624,8	526,1	430,6	377,7	301,6

<sup>1)</sup> Stromerzeugung inklusive KWK, Import, Eigenverbrauch und Verlusten

<sup>2)</sup> Stromerzeugung inklusive KWK und Import

## 7.6.5 Nah- und Fernwärmemix

### 7.6.5.1 Entwicklung der Fern- und Nahwärme

Die Entwicklung des Fern- und Nahwärmemarktes ist zum einen abhängig von der Entwicklung des Strommarktes, da gerade fossile Kraftwerke und Müllheizkraftwerke in die Nah- und Fernwärmenetze einspeisen und zum anderen von der Entwicklung der eingesetzten BHKWs, die insbesondere den Nahwärmemarkt bedienen. Als Basis wurden die Energieszenarien 2010 [EGP2010] verwendet. Die Jahre 2040 und 2050 wurden anhand der Entwicklung im Stromsektor abgeschätzt.

Entsprechend Tabelle 33 und Tabelle 34 wird deutlich, dass die Fern- und Nahwärme aus Kohle zurückgedrängt wird und die Wärme insbesondere aus Biomasse deutlich steigt. Die Wärmeerzeugung aus Heizöl wird im Gegensatz zur Stromerzeugung weiterhin eine Rolle spielen, da nicht überall andere alternative Energieträger eingesetzt werden können.



**Tabelle 33:** Deutscher Wärmemix für die Szenarien Trend und Energiekonzept (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Steinkohle	18,9	11,2	12,4	11,2	10,5
Braunkohle	6,8	6,9	4,1	3,1	3,2
Heizöl	1,7	0,7	0,4	0,3	0,2
Erdgas	56,7	51,1	42,6	39,2	33,5
Müll (nEE)	6,4	3,8	3,9	4,3	4,8
Biomasse <sup>1)</sup>	9,4	21,4	26,8	29,3	31,4
Geothermie	0,1	4,9	9,8	12,6	16,4

<sup>1)</sup> Biogas und Holz und biogene Flüssigbrennstoffe

**Tabelle 34:** Deutscher Wärmemix für die Szenarien Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Steinkohle	18,9	11,2	12,4	10,6	9,0
Braunkohle	6,8	6,9	4,1	2,8	2,7
Heizöl	1,7	0,7	0,4	0,3	0,2
Erdgas	56,7	51,1	42,6	40,1	35,5
Müll (nEE)	6,4	3,8	3,9	4,3	4,8
Biomasse <sup>1)</sup>	9,4	21,4	26,8	29,3	31,4
Geothermie	0,1	4,9	9,8	12,6	16,4

<sup>1)</sup> Biogas und Holz und biogene Flüssigbrennstoffe

### 7.6.5.2 CO<sub>2</sub>-Footprint der Fern- und Nahwärme

Die fossile CO<sub>2</sub>-Emission im Nah- und Fernwärmesektor wurde mit Hilfe der Wirkungsgradmethode berechnet. Die benötigten Wirkungsgrade (s. Tabelle 35 und Tabelle 36) wurden entsprechend [SYST2010a] anhand einer Lebensweganalyse berechnet. Abweichend zu dieser Studie wurden jedoch entsprechend neuerer Literatur (u. a. [NAH2011] und [NAH2008]) 15 % Verluste bei der Fernwärmeverteilung und 5 % Verluste bei der Nahwärmeverteilung eingerechnet. Heizöl und biogene Festbrennstoffe wurden zur reinen Wärmeerzeugung angesetzt und unterliegen somit nicht der Aufteilung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen

auf den Strom- und den Wärmebereich, so dass keine Wirkungsgradmethode angewandt werden musste.

**Tabelle 35:** Thermische Wirkungsgrade der Umwandlungsprozesse bei der Wärmeerzeugung für Nah- und Fernwärme (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Steinkohle	18,9	11,2	12,4	10,6	9,0
Braunkohle	6,8	6,9	4,1	2,8	2,7
Heizöl	1,7	0,7	0,4	0,3	0,2
Erdgas	56,7	51,1	42,6	40,1	35,5
Müll (nEE)	6,4	3,8	3,9	4,3	4,8
Biomasse (biogene Brennstoffe)	9,4	21,4	26,8	29,3	31,4
Geothermie	0,1	4,9	9,8	12,6	16,4

**Tabelle 36:** Elektrische Wirkungsgrade der Umwandlungsprozesse bei der Wärmeerzeugung für Nah- und Fernwärme (alle Angaben in %)

	2010	2020	2030	2040	2050
Steinkohle	33,3	33,3	34,0	34,0	34,6
Braunkohle	27,4	27,4	27,9	27,9	28,5
Heizöl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas, GuD	44,5	44,5	45,4	45,4	46,3
Erdgas, BHKW	34,2	34,2	35,9	35,9	37,7
Müll (nEE)	33,3	33,3	34,0	34,0	34,6
biogene Festbrennstoffe (Holz)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogas (NawaRo)	23,2	23,2	24,4	24,4	25,6
Biogas (Abfall)	23,2	23,2	24,4	24,4	25,6
Biogene Flüssigbrennstoffe	23,2	23,2	24,4	24,4	25,6
biogener Müll	33,3	33,3	34,0	34,0	34,6

Ebenfalls entsprechend dem Stromsektor wurde im Wärmesektor die sich ändernde Gasmischung im Erdgasbereich berücksichtigt, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Jahre 2020 - 2050 berechnen zu können. In Tabelle 37 bis Tabelle 39 sind

die brennstoffspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Wärmemix für die einzelnen Szenarien dargestellt. Zu erkennen ist, dass im Jahr 2050 im Vergleich zu 2010 für das Szenario Trend ca. 43,7 %, für das Szenario Energiekonzept ca. 46,4 % und für das Szenario Innovationsoffensive Gas ca. 55,7 % CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden können.

**Tabelle 37:** CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Wärmemixes für das Szenario Trend bezogen auf thermische Energie (alle Angaben in g/kWh)

	2010	2020	2030	2040	2050
Steinkohle	133,5	79,3	85,7	77,5	71,3
Braunkohle	57,4	58,9	34,2	25,6	25,7
Heizöl	5,9	2,4	1,2	1,0	0,5
Erdgas <sup>1)</sup>	174,5	155,4	123,8	112,9	92,5
Müll (nEE)	11,8	7,0	7,1	7,8	8,5
Biomasse <sup>2)</sup>	6,2	13,5	15,9	17,1	17,7
Geothermie	0,0	0,9	1,8	2,4	3,1
<b>Summe</b>	<b>389,2</b>	<b>317,5</b>	<b>269,9</b>	<b>244,2</b>	<b>219,2</b>

<sup>1)</sup> 70 % BHKW, 30 % GuD

<sup>2)</sup> 90 % Biogas, Holz und biogene Flüssigbrennstoffe und 10 % biogener Müll

**Tabelle 38:** CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Wärmemixes für das Szenario Energiekonzept bezogen auf thermische Energie (alle Angaben in g/kWh)

	2010	2020	2030	2040	2050
Steinkohle	133,5	79,3	85,7	77,5	71,3
Braunkohle	57,4	58,9	34,2	25,6	25,7
Heizöl	5,9	2,4	1,2	1,0	0,5
Erdgas <sup>1)</sup>	174,5	150,1	115,6	101,8	82,0
Müll (nEE)	11,8	7,0	7,1	7,8	8,5
Biomasse <sup>2)</sup>	6,2	13,5	15,9	17,1	17,7
Geothermie	0,0	0,9	1,8	2,4	3,1
<b>Summe</b>	<b>389,2</b>	<b>312,1</b>	<b>261,6</b>	<b>233,2</b>	<b>208,7</b>

<sup>1)</sup> 70 % BHKW, 30 % GuD

<sup>2)</sup> 90 % Biogas, Holz und biogene Flüssigbrennstoffe und 10 % biogener Müll

**Tabelle 39:** CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Wärmemixes für das Szenario Innovationsoffensive Gas bezogen auf thermische Energie (alle Angaben in g/kWh)

	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Steinkohle	133,5	79,3	85,7	73,6	61,1
Braunkohle	57,4	58,9	34,2	23,3	22,1
Heizöl	5,9	2,4	1,2	1,0	0,5
Erdgas <sup>1)</sup>	174,5	150,6	105,0	86,9	59,5
Müll (nEE)	11,8	7,0	7,1	7,8	8,5
Biomasse <sup>2)</sup>	6,2	13,5	15,9	17,1	17,7
Geothermie	0,0	0,9	1,8	2,4	3,1
<b>Summe</b>	<b>389,2</b>	<b>312,6</b>	<b>251,0</b>	<b>212,0</b>	<b>172,4</b>

<sup>1)</sup> 70 % BHKW, 30 % GuD

<sup>2)</sup> 90 % Biogas, Holz und biogene Flüssigbrennstoffe und 10 % biogener Müll

## 8 Vergleich und Bewertung der Szenarienergebnisse

Im Nachfolgenden werden die Szenarien hinsichtlich ihrer energie-, emissions- und kostenseitigen Auswirkungen detailliert analysiert. Von besonderer Bedeutung ist hierbei der Szenarienvergleich, da er eine quantitative Abschätzung der Gesamtwirkungen der in den Szenarien abgebildeten Strategien (z.B. Energiekonzept oder Innovationsoffensive) erlaubt. Um eine Aussage über die Wirksamkeit und Bedeutung einzelner Maßnahmen treffen zu können, werden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt (vgl. Kapitel 8.3.2).

### 8.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Die energie- und emissionsseitige Bilanzierung erfolgt nach dem Schema der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) [AGEB2011]. Demnach wird für die Szenarien der endenergieseitige Verbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Haushaltssektor ausgewiesen. Gleiches gilt auch für die Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die nach den üblichen Bilanzierungsregeln der AGEB bzw. des IPCC<sup>5</sup> erfolgt. Danach werden nur die direkten Emissionen bilanziert. Entsprechend werden vorgelagerte Emissionen, wie beispielsweise für den Stromverbrauch (z.B. für Elektroheizungen oder Wärmepumpen) nicht eingerechnet. Sie werden gemäß der Bilanzierungskonvention dem Umwandlungssektor zugerechnet.

Um solche Effekte zu berücksichtigen, werden so genannte Vorketten definiert (s. Kapitel. 7.6), die mit den Energieverbräuchen der Szenarien verknüpft werden. Auf dieser Basis werden die szenarioabhängigen CO<sub>2</sub>-Emissionen der vorgelagerten Ketten quantifiziert. Ein Vergleich mit den im Rahmen dieses Kapitels errechneten direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen ermöglicht somit eine Aussage über die Wirkungen (Mehremissionen) der Vorketten über den Bilanzraum hinaus. Hinsichtlich der monetären Betrachtung der Vorketten wurde im Rahmen der Studie eine Kalkulation der Verbraucherpreise für die szenarioabhängigen Gasgemische vorgenommen (s. Kapitel 7.5.2 und Tabelle 23).

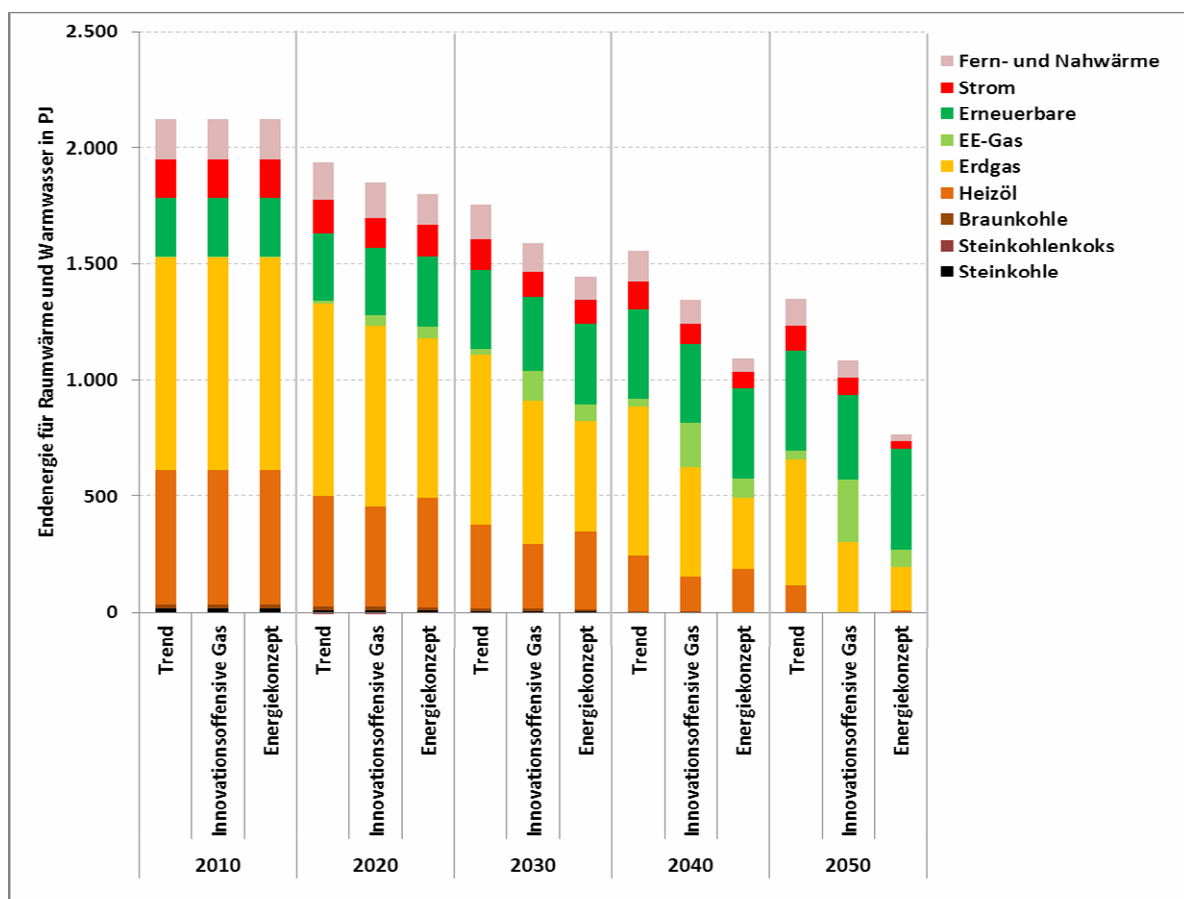
---

<sup>5</sup> IPCC: Intergovernmental Panel of Climate Change

## 8.2 Energetischer Vergleich

### 8.2.1 Vergleich der Basisszenarien

Der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser nimmt in den drei Szenarien im Zeitraum 2010 bis 2050 deutlich ab (s. Abbildung 31 und Tabelle 40). Während im Jahr 2009 noch ca. 2.140 PJ für die Wärme- und Warmwasserversorgung der Wohngebäude benötigt wurden, sinkt dieser Bedarf im Szenario Trend bis zum Jahr 2030 um 18 % und bis zum Jahr 2050 um 37 %. Dieser Rückgang ist sowohl durch den Abriss älterer und den Neubau energieeffizienter Wohngebäude als auch durch energetische Sanierungen von Altbauten begründet. Insgesamt errechnet sich für das Szenario Trend bis zum Jahr 2050 somit eine Reduzierung des Energiebedarfs um ca. 790 PJ.



**Abbildung 31:** Entwicklung des Energieverbrauchs für Raumwärme- und Warmwassererzeugung in den Szenarien

Im Vergleich der einzelnen Energieträger errechnen sich gegenüber dem Jahr 2009 für Heizöl mit 464 PJ und Erdgas mit 388 PJ die größten Verminderungen. Kleinere Beiträge zur Verringerung des Energiebedarfs ergeben sich für den Einsatz von Strom und Fernwärme mit 59 bzw. 56 PJ. Die Nutzung von regenerativen Energien in Form von Biomasse, Solarenergie und Umweltwärme sowie Biogas steigt in Summe um mehr als 80 % bzw. 210 PJ. Bis zum Jahr 2050 verdreifacht sich der Anteil der sonstigen Erneuerbaren (Biomasse, Solarenergie, Umweltwärme). Ihr Anteil steigt von 12 % im Jahr 2009 auf einen Anteil von 32 %.

Die Berechnungen für das Szenario Energiekonzept zeigen, dass vor allem durch eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate auf 2 % pro Jahr bei gleichzeitiger Verbesserung der Potenzialausnutzung und weitere Verschärfungen der Energiestandards gegenüber dem Trend bis zum Jahr 2030 zusätzlich mehr als 310 PJ und bis zum Jahr 2050 mehr als 580 PJ eingespart werden können. Insgesamt nimmt der Wärmebedarf im Szenario Energiekonzept bis 2030 um 33 % (ca. 700 PJ) sowie bis zum Jahr 2050 um weitere 31 % (ca. 670 PJ) im Vergleich zum Jahr 2009 ab. Insgesamt sinkt der Energiebedarf bis zum Jahr 2050 somit auf ca. 770 PJ. Der größte Rückgang bei den Energieträgern erfolgt bis zum Jahr 2050 mit nahezu 750 PJ beim Einsatz von Erdgas. Der Heizölverbrauch sinkt um 570 PJ, so dass mit 12 PJ im Jahr 2050 nur noch ein Restbedarf der Wärme- und Warmwasserversorgung der privaten Haushalte mit Heizöl gedeckt wird. Der Stromverbrauch sinkt um fast 130 PJ und die Nutzung der Fernwärme um insgesamt rund 150 PJ bis zum Jahr 2050. Durch Zumischungen von Biogas und SNG aus Holz zu konventionellem Erdgas können durch dieses erneuerbare Gasgemisch in 2050 mit 76 PJ rund 10 % des Energiebedarfs gedeckt werden. Der Anteil der Erneuerbaren ohne die Berücksichtigung des erneuerbaren Gasgemischs kann bis 2050 insgesamt um den Faktor 4,8 auf 56 % und mehr als 430 PJ erhöht werden.

Durch die Sanierungsmaßnahmen und die Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz der Heizungssysteme im Szenario Innovationsoffensive Gas ist es möglich, den Endenergiebedarf der Haushalte zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung des Jahres 2009 bis zum Jahr 2030 um 26 % (550 PJ) sowie bis zum Jahr 2050 um 49 % (1.050 PJ) zu vermindern. Somit sinkt der Wärmebedarf im Zeitraum bis 2050 um 264 PJ mehr als im Szenario Trend. Allerdings ist die Einsparung geringer als im Szenario Energiekonzept. Die zusätzliche Einsparung gegenüber dem Szenario Trend ist durch eine Verkürzung der Erneuerungszyklen der Heizungsanlagen und vor allem durch den verstärkten Einsatz von innovativen gasbasierten Heizungssystemen wie Mikro-KWK-Anlagen zu begründen. Heizöl kann bis zum Jahr 2030 um mehr als die Hälfte und bis zum Jahr 2050 vollständig durch andere gasförmige Energieträger substituiert werden.

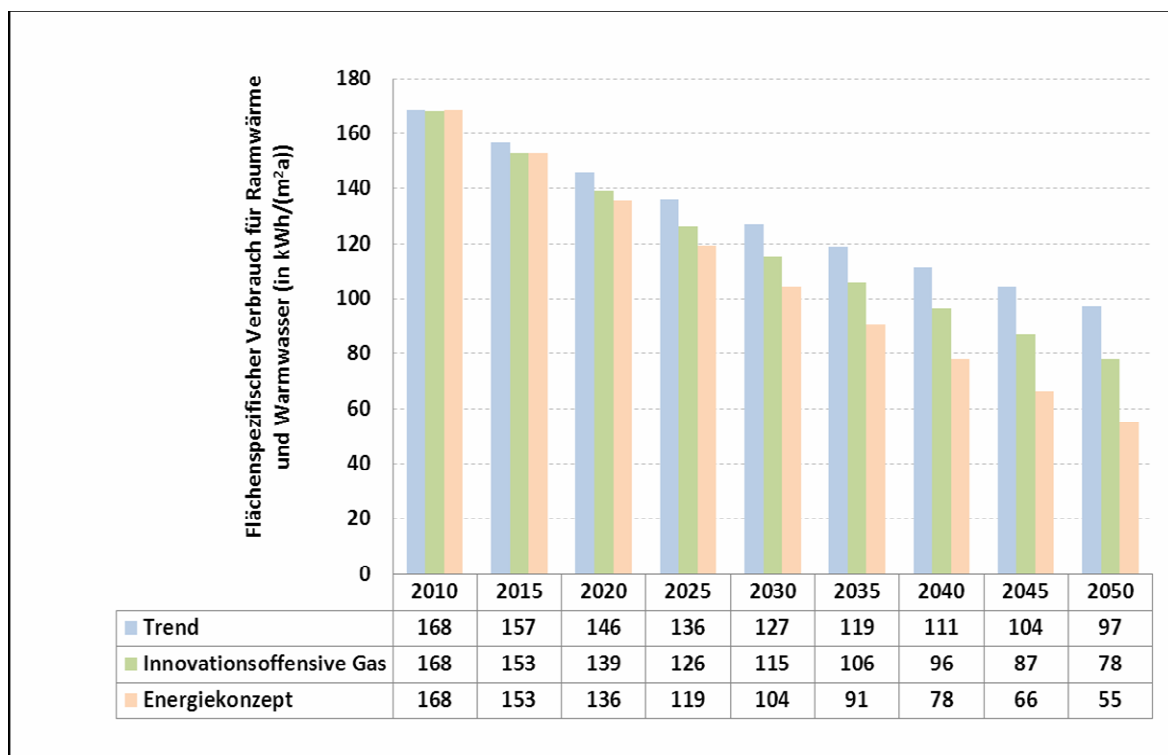
Der Einsatz von konventionellem Erdgas vermindert sich bis zum Jahr 2030 um ca. 300 PJ und bis zum Jahr 2050 um weitere 320 PJ. Demgegenüber steigt der Einsatz von erneuerbarem Gas durch die Zumischungen von H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Biogas und SNG bis zum Jahr 2050 insgesamt auf mehr als 260 PJ. Das erneuerbare Gasgemisch besitzt im Jahr 2050 einen Anteil am gesamten Endenergiebedarf von fast 25 %. Der Strom- und Fernwärmebedarf verringert sich bis zum Jahr 2050 zusammen um mehr als 190 PJ. Der Anteil der Erneuerbaren aus Biomasse, Solarenergie und Umweltwärme steigt um 45 %. Der zunehmende Einsatz ist insbesondere durch die unterstellten Substitutionsraten der Heizungssysteme zu erklären (s. Kapitel 7.4.6).

**Tabelle 40:** Endenergieeinsatz für Raumwärme- und Warmwassererzeugung nach Energieträgern in den Szenarien

Endenergie für Raumwärme und Warmwasser in PJ	2020			2030			2040			2050		
	Trend	Innovations- offensive Gas	Energie- konzept	Trend	Innovations- offensive Gas	Energie- konzept	Trend	Innovations- offensive Gas	Energie- konzept	Trend	Innovations- offensive Gas	Energie- konzept
Steinkohle	12	12	12	8	8	7	4	4	2	0	0	0
Steinkohlenkoks	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	13	13	13	9	9	7	4	4	2	0	0	0
Heizöl	475	432	469	359	278	335	238	144	182	119	0	12
Gas gesamt	838	820	735	758	747	545	671	663	389	574	570	258
Erdgas	826	776	686	734	613	473	641	477	307	541	306	180
EE-Gas	13	45	48	23	134	72	29	186	82	34	264	78
Gas mit H <sub>2</sub> aus Wind	0	1	0	0	18	0	0	29	0	0	45	0
Gas mit H <sub>2</sub> aus Photovoltaik	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	3	0
Gas mit CH <sub>4</sub> aus Wind	0	1	0	0	8	0	0	13	0	0	19	0
Gas mit CH <sub>4</sub> aus Photovoltaik	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	3	0
Biogas-Zumischung (NawaRo)	12	40	46	17	82	57	17	86	56	16	85	44
Biogas-Zumischung (Abfall)	1	2	2	4	17	12	5	24	16	6	32	16
Gas mit SNG aus Holz	0	0	0	3	5	2	8	30	10	12	77	19
Erneuerbare ohne EE-Gas	292	294	304	341	319	349	388	342	392	433	368	432
Biomasse	237	233	250	253	229	273	270	225	295	284	221	315
Solarenergie	22	37	29	37	65	50	52	92	68	67	123	85
Umweltwärme	33	25	25	51	25	26	67	25	29	81	24	32
Strom	146	127	138	133	104	106	119	87	69	105	70	37
Fern- und Nahwärme	161	149	133	148	125	92	134	102	57	120	78	27
<b>Summe</b>	<b>1.938</b>	<b>1.848</b>	<b>1.802</b>	<b>1.754</b>	<b>1.590</b>	<b>1.441</b>	<b>1.557</b>	<b>1.347</b>	<b>1.092</b>	<b>1.351</b>	<b>1.087</b>	<b>767</b>



Zusammengefasst können im Szenario Innovationsoffensive Gas im Jahr 2050 mehr als 50 % des Energiebedarfs durch Erdgas sowie erneuerbare Gase gedeckt werden. Gegenüber dem Szenario Energiekonzept fallen die Reduktionen des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2030 um 150 PJ und bis 2050 um 320 PJ deutlich geringer aus (siehe Tabelle 40). Ein Indikator für die energieseitigen Einsparungen ist der flächenspezifische Energieverbrauch für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser. Die in Abbildung 32 dargestellten Werte gelten für den kompletten Wohngebäudebestand. Der flächenspezifische Verbrauch sinkt von 168 kWh/(m<sup>2</sup>a) im Jahr 2010 im Szenario Trend bis zum Jahr 2030 auf 127 kWh/(m<sup>2</sup>a). Aufgrund der Maßnahmen in den Szenarien Innovationsoffensive Gas und Energiekonzept kann dieser spezifische Verbrauchswert bis zu diesem Zeitpunkt um weitere 12 bzw. 23 kWh/(m<sup>2</sup>a) vermindert werden. Für das Jahr 2050 errechnet sich für das Szenario Energiekonzept ein flächenspezifischer Bedarf von 55 kWh/(m<sup>2</sup>a). Im Szenario Innovationsoffensive Gas beträgt der vergleichbare Wert für das Jahr 2050 ca. 78 kWh/(m<sup>2</sup>a). Im Szenario Trend errechnet sich ein Wert von 97 kWh/(m<sup>2</sup>a) für das Jahr 2050.



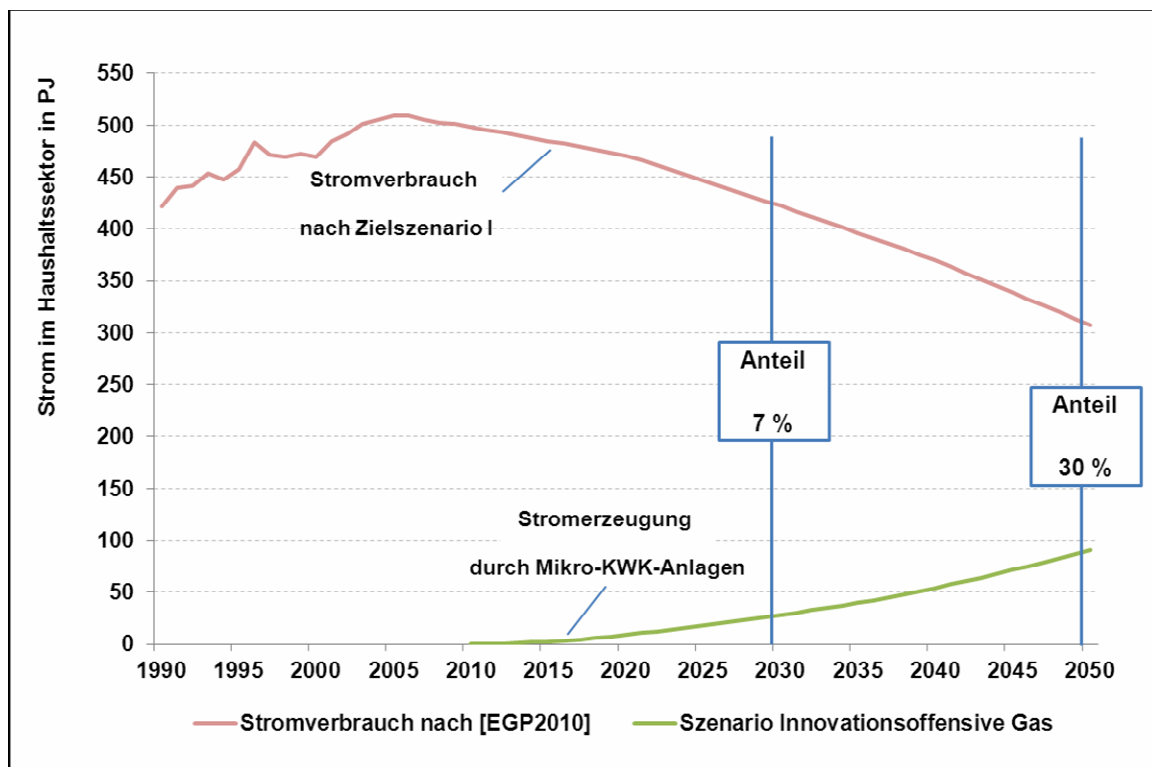
**Abbildung 32:** Flächenspezifischer Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in den Szenarien

Durch den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen können die in der Tabelle 41 aufgeführten Strommengen erzeugt werden. Im Szenario Trend wird im Jahr 2050 eine Strommenge von rund 23 PJ produziert werden. Im Szenario Energiekonzept liegt die erzeugte Strommenge noch um 5 PJ unter dem Szenario Trend, bedingt durch eine generell geringere Raumwärmenachfrage. Durch den verstärkten Einsatz der Mikro-KWK-Anlagen im Szenario Innovationsoffensive Gas wird im Jahr 2050 eine Strommenge von nahezu 91 PJ erzeugt. Sie liegt damit deutlich über der Erzeugung der anderen Szenarien und nimmt im zeitlichen Verlauf auch deutlich stärker zu. So verdreifacht sie sich bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2030. Dieser rasante Anstieg ist u.a. auf die erheblichen Reduktionen der Anschaffungskosten zurückzuführen, die eine höhere Marktdurchdringung bewirken.

**Tabelle 41:** Stromerzeugung aus Mikro-KWK-Anlagen in den Szenarien (alle Angaben in PJ)

	2010	2020	2030	2040	2050
Trend	0,0	3,0	8,7	15,0	22,7
Energiekonzept	0,0	2,8	7,5	12,4	17,9
Innovationsoffensive Gas	0,0	9,0	28,2	54,0	90,9

Der Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen substituiert damit einen wenn auch kleinen Teil der Stromerzeugung des Umwandlungssektors und trägt so zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. D.h. der externe Strombezug der Haushalte kann durch die häusliche Erzeugung von Strom durch Mikro-KWK-Anlagen verringert werden. Der Anteil des erzeugten KWK-Stroms am gesamten Stromverbrauch der Haushalte ist unter der Berücksichtigung der Entwicklung des Stromverbrauchs der Energieszenarien für die Bundesregierung [EGP2010] bis zum Jahr 2050 beispielhaft in der Abbildung 33 für das Szenario Innovationsoffensive Gas dargestellt. So könnten in 2030 rund 7 % (28 von 422 PJ) und im Jahr 2050 insgesamt 30 % (91 von 307 PJ) des häuslichen Strombedarfs durch den aus Mikro-KWK-Anlagen erzeugten Strom gedeckt werden.



**Abbildung 33:** Stromverbrauch der Haushalte und Stromerzeugung durch Mikro-KWK-Anlagen im Szenario Innovationsoffensive Gas [EGP2010, eigene Ber.]

## 8.2.2 Sensitivitätsanalysen

Um die Einflüsse und Wirkungen einzelner Maßnahmen zu bewerten, werden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Eine Variation von Parametern wird sowohl für das Szenario Energiekonzept als auch für das Szenario Innovationsoffensive durchgeführt. Eine Kurzbeschreibung der im Nachfolgenden analysierten Sensitivitätsparameter findet sich in Tabelle 42:

**Tabelle 42:** Analysierte Sensitivitäten<sup>6</sup>

Maßnahmen	Erläuterung der Änderungen	Abkürzung
<b>Szenario Energiekonzept</b>		
Verringerung der Sanierungsrate und schlechtere Potentialausnutzung bei gleichen Effizienzstandards	Gebäudeseitige Maßnahmen werden innerhalb des Renovierungszyklus ergriffen, trägere Dynamik der Sanierung als im Szenario Innovationsoffensive Gas, jedoch höhere Effizienzstandards	Energiekonzept ES1

<sup>6</sup> Die Basisvarianten werden im Nachfolgenden mit ES0 (Energiekonzept) bzw. IS0 (Innovationsoffensive) bezeichnet.

Maßnahmen	Erläuterung der Änderungen	Abkürzung
- Verringerung der Lebensdauer von Heizsystemen (Mittelwert von 25 auf 20 Jahre)	Heizsysteme werden wie im Szenario Innovationsoffensive Gas schneller ausgetauscht (höhere Austauschdynamik, vorgezogener Austausch)	Energiekonzept ES2
- Verringerung der Lebensdauer von Heizsystemen und Substitution der Heiztechniken wie im Szenario Innovationsoffensive Gas bei gleichen Gebäudeeffizienzstandards	Erhöhter Einsatz gasbasierter Systeme, Gasgemisch wie im Szenario Innovationsoffensive Gas, Verringerung der technischen Lebensdauer von Heizsystemen (vorgezogener Austausch) und Energiepreisentwicklung wie im Szenario Innovationsoffensive Gas	Energiekonzept ES3
- Gleicher Energiepreis wie Szenario Trend	Gleiche Energiepreisentwicklung wie im Szenario Trend, jedoch keine Änderung des Gasgemisches	Energiekonzept ES4
<b>Szenario Innovationsoffensive Gas</b>		
- Verdopplung der energetischen Sanierungsrate ab 2015 auf 2 %/a bei gleichen Effizienzstandards	Gebäudeseitige Maßnahmen erfolgen auch außerhalb des Renovierungszyklus, höhere Dynamik	Innovationsoffensive Gas IS1
- Steigerung der Lebensdauer von Heizsystemen (Mittelwert von 20 auf 25 Jahre)	Heizsysteme werden wie im Szenario Energiekonzept ausgetauscht (schlechtere Austauschdynamik)	Innovationsoffensive Gas IS2
- Vorgezogene Steigerung der energetischen Sanierungsrate auf 1,5 %/a ab 2020	Energetische Sanierungsrate steigt ab 2010 mit 1 %/a bis 2020 auf 1,5 %/a an und bleibt bis 2050 konstant. Es wird eine gleiche kumulierte Emissionseinsparung erzielt, wie im Szenario ES0.	Innovationsoffensive Gas IS3
- Gleicher Energiepreis wie Trend	Gleiche Energiepreiseentwicklung wie im Szenario Trend, jedoch keine Änderung des Gasgemisches	Innovationsoffensive Gas IS4

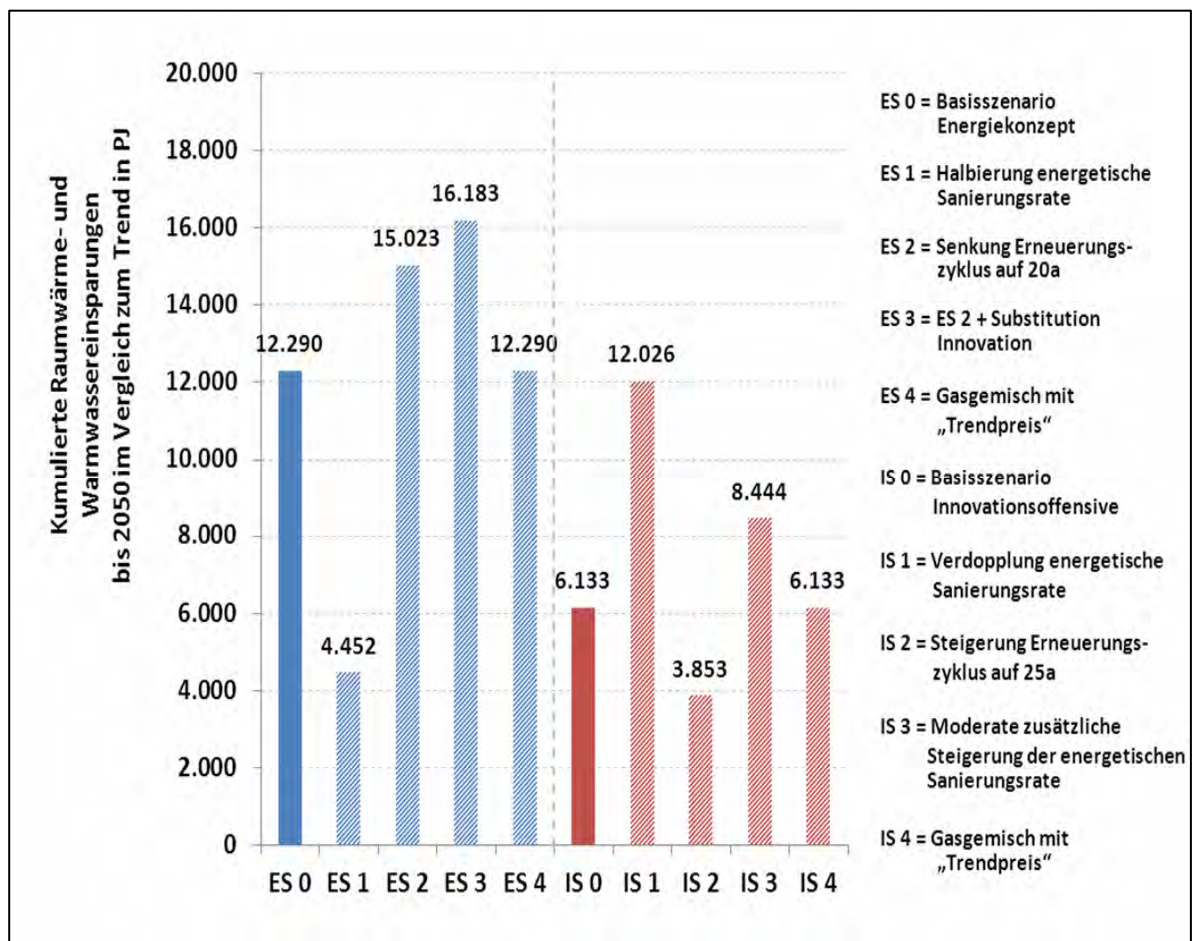
Die energetischen Wirkungen der kumulierten Einsparungen von Raumwärme und Warmwasser im Vergleich zum Szenario Trend sind für die beiden Basisszenarien Energiekonzept (ES0) und Innovationsoffensive Gas (IS0) sowie die zugehörigen Sensitivitäten in Abbildung 34 für den Zeitraum 2010 bis 2050 dargestellt. Im Detail führen die Verdopplung der Sanierungsrate und die bessere Potenzialausnutzung sowie die Verschärfung der Energiestandards im Szenario Energiekonzept (ES0) zu kumulierten Mehreinsparungen von 12.290 PJ gegenüber dem Szenario Trend. Wird demgegenüber die energetische Sanierungsrate (ES1) halbiert, so führt dies gegenüber dem Szenario Trend zu einer Absenkung der kumulierten Einsparungen auf 4.452 PJ. Die verbleibende Einsparung ergibt sich aufgrund der höheren Effizienzstandards. Die Wirkung der Verkürzung der Erneuerungszyklen für Heizungssysteme (ES2) von 25 auf 20 Jahre führt im Vergleich zum Szenario Trend bis zum Jahr 2050 zu kumulierten Mehrein-

sparungen zusätzlich 2.733 PJ. Werden zudem die Heiztechniken gemäß der Innovationsoffensive Gas (ES3) substituiert, so können weitere 1.160 PJ im Vergleich zu ES2 gegenüber dem Szenario Trend eingespart werden.

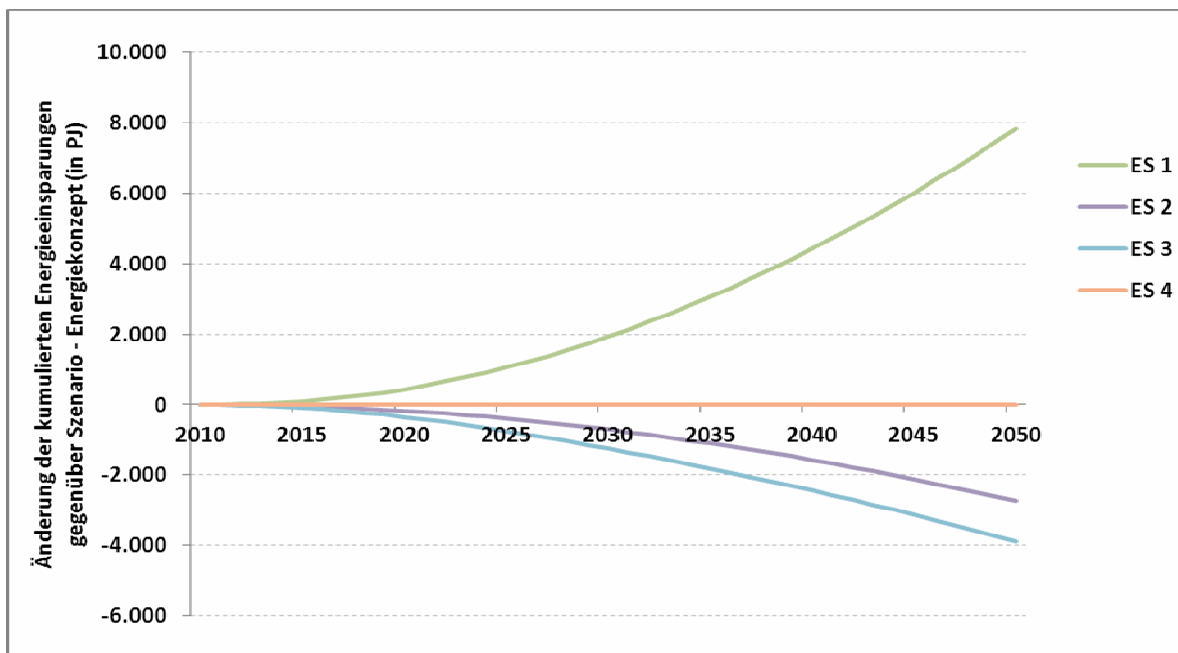
Die kumulierte Energieeinsparung des Szenarios Innovationsoffensive Gas (IS0) beträgt wegen kürzerer Renovierungszyklen bei den Heizungssystemen (20 statt 25 Jahre) und dem verstärkten Einsatz von gasbasierten Heizungssystemen im Vergleich zum Szenario Trend ca. 6.133 PJ. Sie liegt somit deutlich niedriger als im Szenario Energiekonzept. Wird der Erneuerungszyklus der Heizungen nicht abgesenkt (IS2), so vermindern sich die Mehreinsparungen um 2.280 PJ. Eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate, wie sie im Szenario Energiekonzept unterstellt wurde, verdoppelt die Mehreinsparungen auf einen Wert von nahezu 12.026 PJ (IS1). Eine moderate Erhöhung der energetischen Sanierungsrate ab dem Jahr 2020 auf 1,5 %/a (IS3) bei gleichem Energiestandard (EnEV 2009) führt im Vergleich zum Szenario Trend zu Mehreinsparungen von 8.444 PJ. Gegenüber der Variante IS1 verringern sich durch die verminderten Sanierungsaktivitäten die Mehreinsparungen deutlich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Veränderung der Sanierungsrate sowie der Potenzialausnutzungen sowohl im Szenario Energiekonzept als auch im Szenario Innovationsoffensive Gas die größten energieverbrauchsseitigen Auswirkungen besitzen. Eine Gegenüberstellung der energetischen Sensitivitäten in den verschiedenen Szenarien zeigt darüber hinaus, dass sowohl die Variation der Sanierungsrate und der Effizienz von Sanierungen als auch die Veränderung der Renovierungszyklen für Heizungssysteme im Szenario Energiekonzept zu größeren Änderungen als im Szenario Innovationsoffensive Gas führen. Hinsichtlich der energetischen Mehreinsparungen im Vergleich zum Szenario Trend sind die kumulierten Energieeinsparungen bei gleicher Sanierungsaktivität und –effizienz, jedoch unterschiedlichen Erneuerungszyklen und Substitutionsraten für die Heizungssysteme im Szenario Energiekonzept mit 12.290 PJ (ES0) und der Variante IS1 des Szenarios Innovationsoffensive Gas mit 12.026 PJ etwa gleich groß.

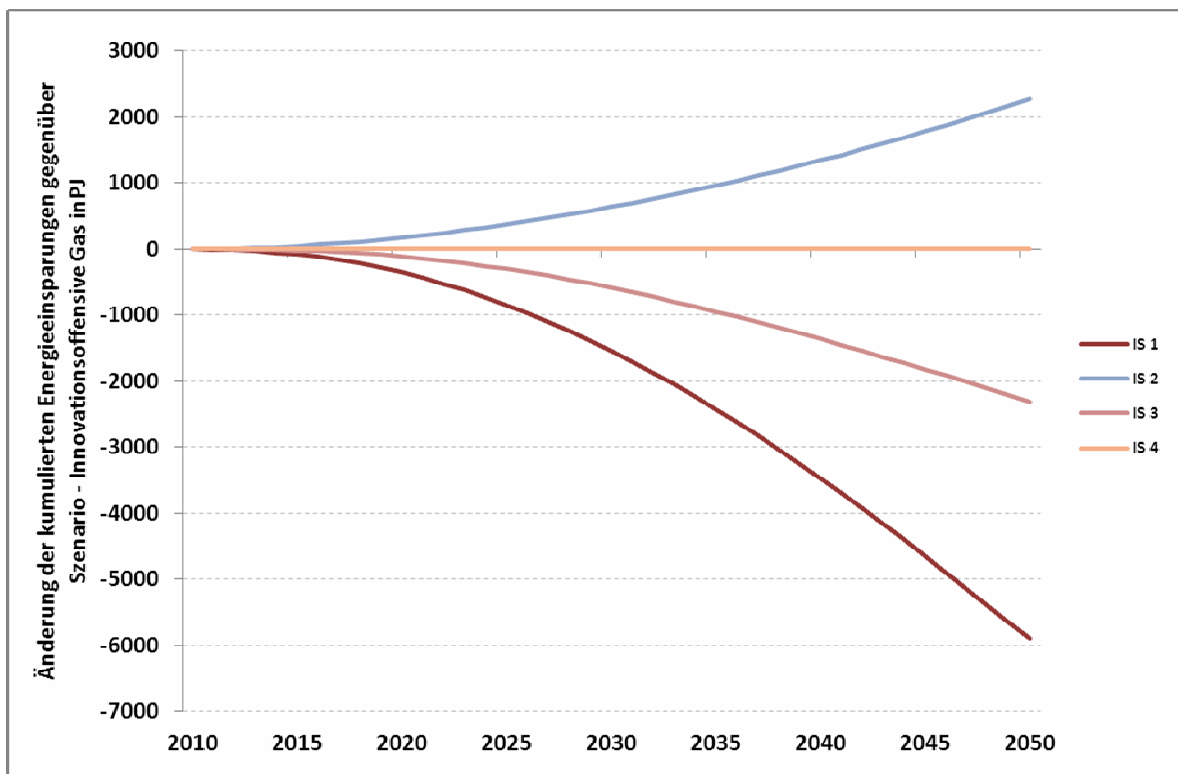
Werden die Änderungen der kumulierten Endenergieeinsparungen für Raumwärme und Warmwasser der einzelnen Sensitivitätsrechnungen (ES1 bis ES4 bzw. IS1 bis IS4) in Bezug zu den jeweiligen Ausgangsszenarien (ES0 bzw. IS0) gesetzt, so können für die Sensitivitäten ES1 bis ES4 im Vergleich zum Energiekonzept und für die Sensitivitäten IS1 bis IS4 im Vergleich zur Innovationsoffensive Gas die jährlichen Wirkungen bis zum Jahr 2050 in Abbildung 35 und Abbildung 36 abgelesen werden.



**Abbildung 34:** Kumulierte Endenergieeinsparungen (2010-2050) für Raumwärme und Warmwasser der Szenariovarianten im Vergleich zum Szenario Trend



**Abbildung 35:** Jährliche Endenergieeinsparungen für Raumwärme- und Warmwassererzeugung, Szenario Energiekonzept: Vergleich mit ES0



**Abbildung 36:** Jährliche Endenergieeinsparungen für Raumwärme- und Warmwassererzeugung, Szenario Innovationsoffensive Gas: Vergleich mit IS0

## 8.3 Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen

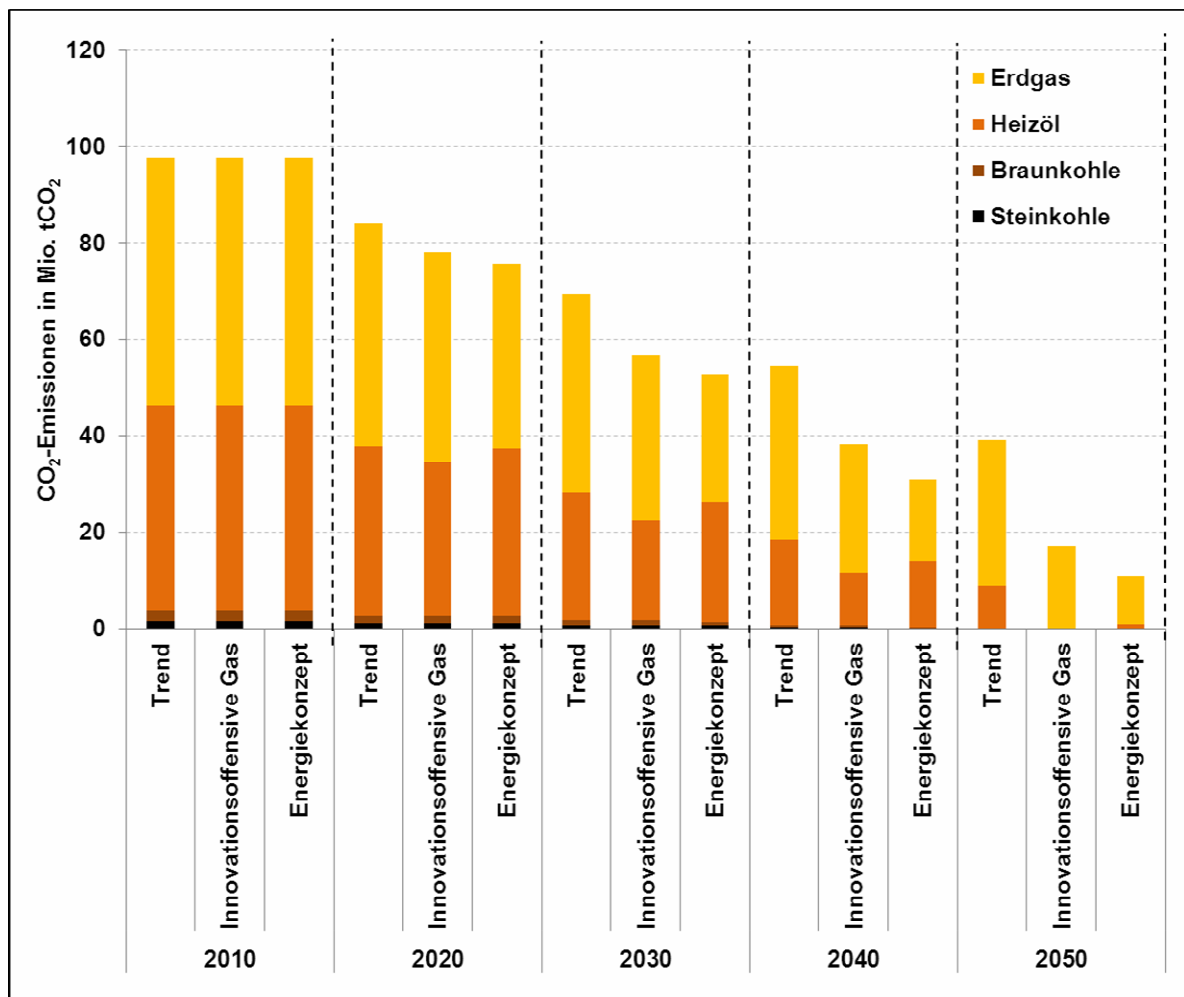
Im nachfolgenden Kapitel erfolgen eine Analyse und ein Vergleich der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die jeweiligen Szenarien. Danach schließt sich eine Analyse der im Rahmen der Sensitivitätsanalysen gewonnenen Ergebnisse an. Im letzten Kapitel erfolgt ein Vergleich der Szenarien unter Berücksichtigung der vorgelegten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Erzeugung der Energieträger entstehen und die für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung eingesetzt werden.

### 8.3.1 Vergleich der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen

Bereits im Szenario Trend erfolgt im zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2050 sukzessive eine deutliche Emissionsreduktion (Abbildung 37). Die Emissionen betragen im Jahr 2050 gut 39 Mio. t CO<sub>2</sub> und liegen gegenüber heute um 62% (2030: 33%) niedriger. Verantwortlich hierfür sind die bereits heute von der Bundesregierung aufgelegten Maßnahmen zur Effizienzverbesserung bzw. zur CO<sub>2</sub>-Reduktion, die für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben wurden.

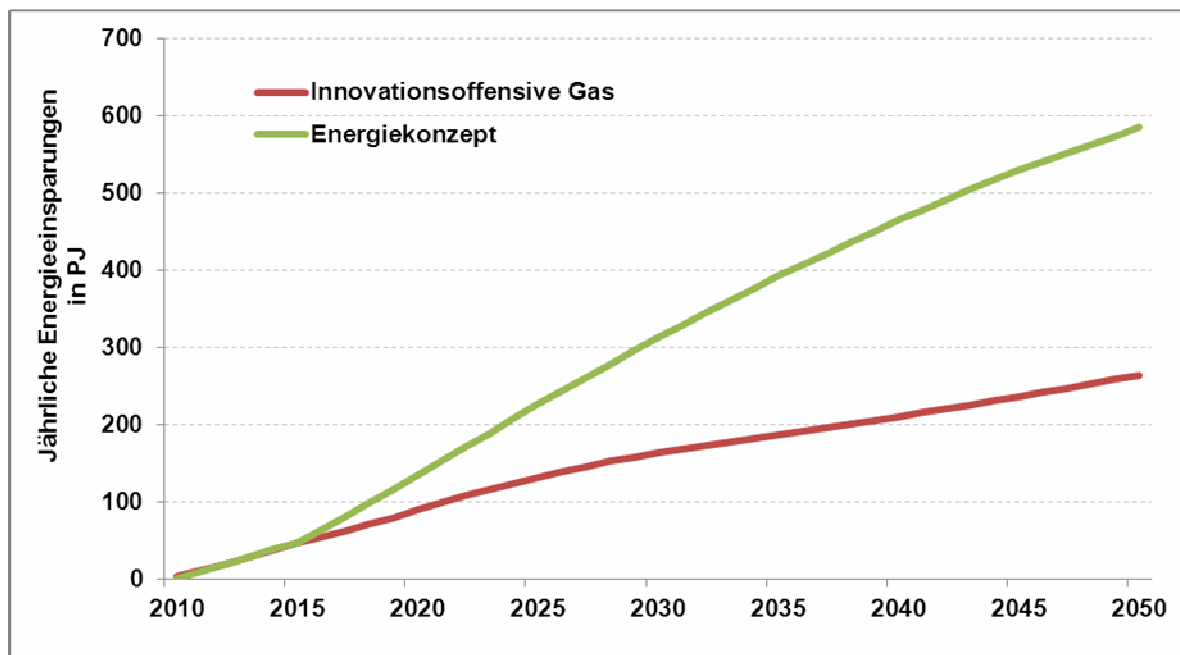
Sowohl die Maßnahmen des Szenarios Energiekonzept als auch des Szenarios Innovationsoffensive Gas führen zu erheblichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen gegenüber dem Szenario Trend. So beträgt die jährliche Emissionseinsparung im Jahr 2030 im Szenario Energiekonzept gegenüber dem Szenario Trend 25 % (17,3 Mio. t CO<sub>2</sub>). Im Jahr 2050 beträgt die Einsparung 72 % (28 Mio. t CO<sub>2</sub>). Die vergleichbaren Emissionseinsparungen für das Szenario Innovationsoffensive Gas fallen für das Jahr 2030 mit 18 % (12,7 Mio. t CO<sub>2</sub>) bzw. 56 % (22 Mio. t CO<sub>2</sub>) im Jahr 2050 deutlich geringer aus. Dies bedeutet, dass die Maßnahmen des Energiekonzepts in ihren emissionsseitigen Auswirkungen deutlich ausgeprägter sind als die Maßnahmen des Szenarios Innovationsoffensive Gas. Wesentliche Ursache ist die gegenüber dem Szenario Innovationsoffensive Gas höhere Sanierungsrate bzw. die verbesserte Potentialausnutzung. Bis zum Jahr 2020 sind die Emissionsreduktionen der beiden Szenarien Energiekonzept und Innovationsoffensive Gas gegenüber dem Szenario Trend etwa gleich groß. Ab dem Jahr 2030 entfalten die Maßnahmen des Szenarios Energiekonzept eine deutlich höhere Emissionseinsparung, da für den Zeitraum nach dem Jahr 2030 von einer Verdopplung der Sanierungsrate und einer deutlich erhöhten Potenzialausnutzung ausgegangen wird.



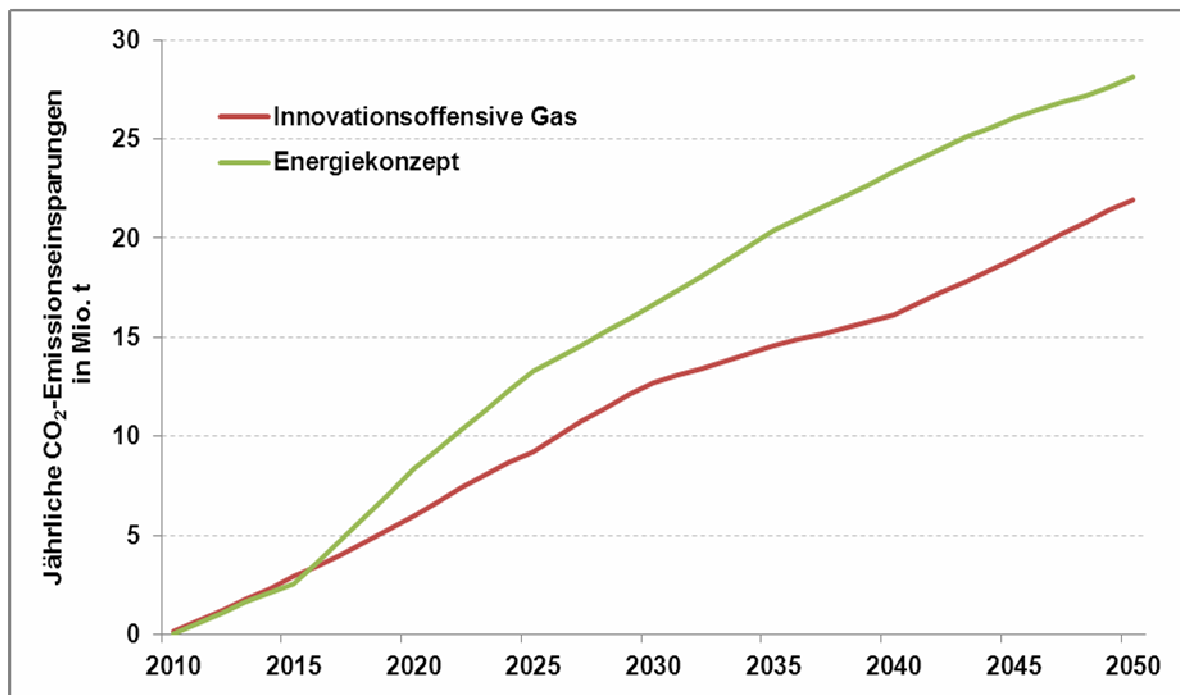


**Abbildung 37:** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien

Um die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion der Szenarien über den gesamten Zeithorizont bewerten zu können, bietet sich ein Vergleich der jährlichen Energie- und Emissionseinsparungen (Abbildung 38 und Abbildung 39) gegenüber dem Szenario Trend an (Tabelle 43). So liegen die endenergieseitigen Einsparungen im Szenario Energiekonzept etwa doppelt so hoch wie im Szenario Innovationsoffensive Gas. Demgegenüber ist die Emissionsreduzierung mit etwa 38 % weniger ausgeprägt, was auf die dort unterstellte Substitution von Heizungssystemen (höherer Einsatz erdgasbasierter Systeme) sowie das CO<sub>2</sub>-ärmere Gasgemisch des Szenario Innovationsoffensive Gas (vgl. Kapitel 7.4) zurückgeführt werden kann.



**Abbildung 38:** Jährliche Energieeinsparungen gegenüber dem Szenario Trend



**Abbildung 39:** Jährliche Emissionseinsparungen gegenüber dem Szenario Trend

**Tabelle 43:** Kumulierte jährliche Energie- und Emissionseinsparungen gegenüber dem Trendszenario

<b>Endenergieeinsparung kumuliert über den Zeitraum 2010 – 2050</b>	
Szenario Innovationsoffensive Gas (IS0)	6.133 PJ
Szenario Energiekonzept (ES0)	12.290 PJ
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung kumuliert über den Zeitraum 2010 – 2050</b>	
Szenario Innovationsoffensive Gas (IS0)	555 Mio. t CO <sub>2</sub>
Szenario Energiekonzept (ES0)	632 Mio. t CO <sub>2</sub>

### Einfluss der KWK-Stromerzeugung

Wie zuvor erläutert, unterscheidet sich das Szenario Innovationsoffensive Gas gegenüber den anderen Szenarien u.a. durch einen gezielten, erhöhten Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen. Bei den in Tabelle 41 aufgeführten Strommengen stellt sich die Frage nach den zu substituierenden Stromerzeugungstechniken. Auftragsgemäß wird im Rahmen dieses Vorhabens kein geschlossenes Szenario über alle Energiesektoren hinweg generiert, was eine Bewertung des KWK-Stroms ermöglichen würde. Um aber die Bandbreite der möglichen Emissionseinsparungen aufzuzeigen, werden im Nachfolgenden die Emissionseinsparungen für verschiedene substituierte Stromerzeugungstechniken am Beispiel des Jahres 2050 für die Szenarien dargestellt (Tabelle 44). Für die substituierte Stromerzeugung wurden unterschiedliche Techniken gewählt, die sich hinsichtlich Energieträgereinsatz sowie Effizienz unterscheiden. Über den Zeitverlauf wird auch bei diesen Techniken eine sukzessive Effizienzverbesserung unterstellt. Je nach Technik fallen die Gutschriften sehr unterschiedlich aus und schwanken in einer Bandbreite von 1,8 (Steinkohlekraftwerk mit CCS) bis 19,7 Mio. t CO<sub>2</sub> (Braunkohlekraftwerk) im Szenario Innovationsoffensive Gas. Unterstellt man den Strommix der Referenzentwicklung der Energieszenarien [EGP2010] für das Jahr 2050, so errechnet sich eine Gutschrift von ca. 5,7 Mio. t CO<sub>2</sub>. Verglichen mit den heutigen Emissionen für die Raumwärme- und Warmwasserbereitung sind die Gutschriften als moderat einzustufen. Allerdings wirken sich die Gutschriften für das Jahr 2050 signifikant aus, da die absoluten direkten Emissionen bereits sehr gering sind. So würde beispielsweise im Szenario Innovationsoffensive Gas die

Substitution von Braunkohlestrom durch Mikro-KWK-Anlagen die absoluten Emissionen von 17 Mio. t CO<sub>2</sub> mit 19,7 Mio. t CO<sub>2</sub> mehr als kompensieren.<sup>7</sup>

In den nachfolgenden Berechnungen wird der Strommix der Referenzentwicklung nach [EGP2010] als CO<sub>2</sub>-Emissionsgutschrift für die Stromerzeugung aus Mikro-KWK-Anlagen verwendet.

**Tabelle 44:** CO<sub>2</sub>-Emissionsgutschriften (Jahr 2050) für Mikro-KWK in den Szenarien (in Mio. t CO<sub>2</sub>)

	<b>Trend</b>	<b>Innovations- offensive Gas (IS0)</b>	<b>Energiekonzept (ES0)</b>
CO <sub>2</sub> -Emission ohne Gutschrift im Jahr 2050	39	17	11
	<b>Emissionsgutschriften für den Ersatz von</b>		
Steinkohlekraftwerk	4,0	16,0	3,2
Braunkohlekraftwerk	4,9	19,7	3,9
Erdgas GuD	2,0	7,9	1,6
Strommix [EGP2010] Energieszenarien Ref.	1,4	5,7	1,1
Steinkohlekraftwerk mit CCS Technik	0,5	1,8	0,4

### 8.3.2 Sensitivitätsanalysen

Um die Wirkungen einzelner Maßnahmen zu bewerten, werden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Eine Variation von Parametern wird sowohl für das Szenario Energiekonzept als auch für das Szenario Innovationsoffensive durchgeführt.

Die emissionsseitigen Auswirkungen der Sensitivitäten sind in Abbildung 40 dargestellt. Eine Verringerung der Sanierungsrate bzw. Potentialausnutzung im Szenario Energiekonzept (ES1) führt fast zu einer Halbierung der kumulierten Emissionseinsparung, die auf einen Wert von 343 Mio. t CO<sub>2</sub> sinkt. Von allen untersuchten Sensitivitäten besitzt eine Veränderung der energetischen Sanierungsrate den größten emissionsseitigen Effekt. Dies gilt auch für das Szenario Innovationsoffensive Gas, wie im Nachfolgenden noch gezeigt wird.

<sup>7</sup> Bei der Betrachtung handelt es sich um eine rein emissionsseitige und vereinfachte Betrachtung. Die Frage, ob Mini-KWK-Anlagen Braunkohlestrom entsprechend mit gleicher Versorgungsaufgabe ersetzen können, war nicht Gegenstand des Vorhabens und wurde daher nicht behandelt.

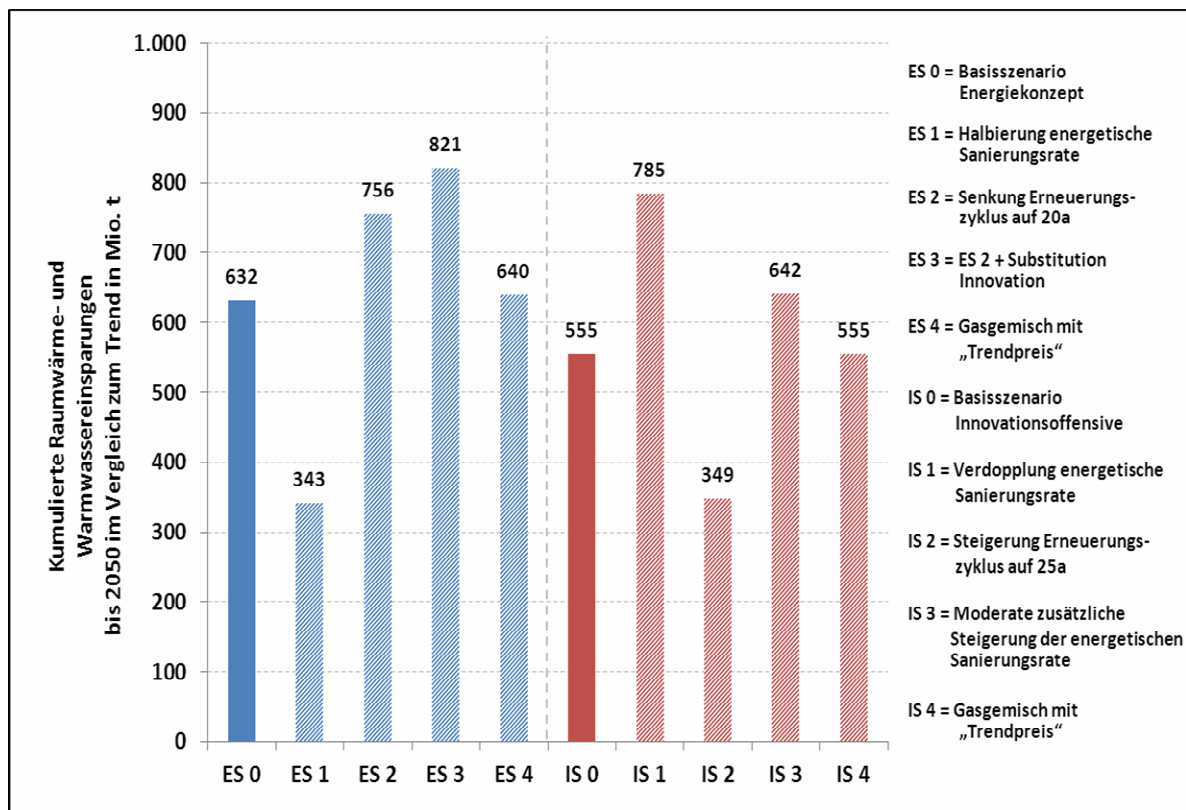
Eine Verringerung der Lebensdauer der Heizungssysteme (ES2) bedeutet einen schnelleren bzw. vorgezogenen Austausch von alten Systemen. Dies wiederum führt dazu, dass effizientere Heizsysteme früher eingesetzt werden, was sich durch eine zusätzliche Emissionseinsparung auswirkt, die gegenüber dem ursprünglichen Szenario Energiekonzept etwa 124 Mio. t beträgt.

Unterstellt man, dass die Maßnahmen des Szenarios Innovationsoffensive Gas (verstärkter Austausch von Heizsystemen, verändertes Gasgemisch, verstärkter Einsatz von gasbasierten Heizungssystemen) auch im Szenario Energiekonzept (ES3) ergriffen werden, führt dies gegenüber dem Szenario Energiekonzept (ES0) zu zusätzlichen Emissionseinsparungen von 189 Mio. t CO<sub>2</sub>. Gegenüber der Variante ES2 (Verringerung der Lebensdauer) fällt die Emissionseinsparung relativ moderat aus. Zwar werden deutlich mehr veraltete Erdölheizungen durch gasbasierte Heizungssysteme ersetzt, allerdings wird im Basisszenario (ES0) auch eine deutliche höhere Anzahl an Biomasseheizungen zugebaut, so dass im Saldo der Emissionsreduktionseffekt relativ klein ausfällt.

Eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate wirkt sich im Szenario Innovationsoffensive Gas (IS1) ebenfalls signifikant aus. So beträgt die zusätzliche kumulierte Emissionseinsparung gegenüber der Grundvariante (IS0) ca. 230 Mio. t CO<sub>2</sub>. Die Veränderung der Sanierungsrate besitzt demzufolge auch hier die größten Wirkungen. Eine mäßige Erhöhung der Sanierungsrate auf 1,5 %/a ab 2020 (IS3) wirkt sich gegenüber dem Grundszenario mit kumulierten Emissionseinsparungen von 87 Mio. t zwar geringer aus. Dies führt aber dazu, dass mit der Variante IS3 nahezu die gleiche kumulierte Emissionseinsparung (direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen) wie im Szenario Energiekonzept erzielt werden kann.

Eine Steigerung der Lebensdauer von Heizsystemen im Szenario Innovationsoffensive Gas (IS2), d.h. ein langsamerer Austausch von Heizsystemen, bewirkt eine Verringerung der Emissionseinsparung, die gegenüber dem Basisszenario ES0 etwa 206 Mio. t beträgt.

Sowohl für das Szenario Energiekonzept als auch für das Szenario Innovationsoffensive Gas wurden im Rahmen einer weiteren Sensitivität Gasgemischpreise wie im Szenario Trend angenommen, allerdings werden die Gasgemische beibehalten und demzufolge tritt kein emissionsseitiger Effekt auf. Diese Varianten besitzen aber einen kostenseitigen Einfluss, der im Nachfolgenden (Kapitel 8.4) im Rahmen der kostenseitigen Sensitivitätsanalysen erläutert wird.



**Abbildung 40:** Kumulierte Emissionseinsparungen (2010 bis 2050) im Vergleich zum Szenario Trend

### 8.3.3 Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Berücksichtigung der Vorketten

In den vorherigen Kapiteln wird deutlich, dass die Reduktion der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien Innovationsoffensive Gas und Energiekonzept gegenüber dem Szenario Trend erheblich ist. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn zusätzlich die Emissionen der Vorketten mit betrachtet werden, was durch die Einsparung an Primärenergie und die Substitution von fossilen durch regenerative Energieträger zu erklären ist. Die kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Einsparungen unter Berücksichtigung der Vorketten sind in Tabelle 45 aufgelistet. Unter Berücksichtigung der stromseitigen KWK-Gutschrift (KWK-Gutschrift mit Strommix aus [EGP2010], vgl. Tabelle 44) ergeben sich insgesamt CO<sub>2</sub>-Einsparungen zwischen 776 (Innovationsoffensive Gas) und 963 Mio. t CO<sub>2</sub> (Energiekonzept). Wie zuvor gezeigt wurde, ist die Differenz zwischen den direkten Emissionen des Szenarios Energiekonzept (ES0) und den Emissionen der Szenariovariante IS3 unter Einbeziehung der KWK-Gutschriften marginal. Diese Kompensation konnte mit Maßnahmen erreicht werden, die über das Szenario IS0 hinausgehen und Mehrkosten nach sich ziehen. Unter Berück-

sichtigung der Vorkettenemissionen errechnet sich eine höhere Einsparung im Szenario Energiekonzept. Da der Energiebedarf zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung der Variante IS3 des Szenarios Innovationsoffensive Gas nur geringfügig sinkt, ist die Gesamtersparnis an CO<sub>2</sub> ca. 97 Mio. t niedriger als beim Szenario Energiekonzept. Dies bedeutet, dass bei Berücksichtigung der Vorketten die Maßnahmen zur Energieeinsparung einen leichten emissionsseitigen Vorteil gegenüber der verstärkten Nutzung Erneuerbarer Energien aufweisen. Allerdings zeigt Tabelle 46, dass das Reduktionsziel der Bundesregierung, welches für das Jahr 2050 eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 80 % vorsieht, sowohl vom Szenario Energiekonzept (ES0) als auch vom Szenario Innovationsoffensive Gas (IS0) und der Sensitivität (IS3) auch unter Berücksichtigung der Vorketten erreicht wird.

**Tabelle 45:** CO<sub>2</sub> Emissionen in 10<sup>6</sup> t CO<sub>2</sub> kumuliert über den Zeitraum 2010 - 2050 im Vergleich der Szenarien

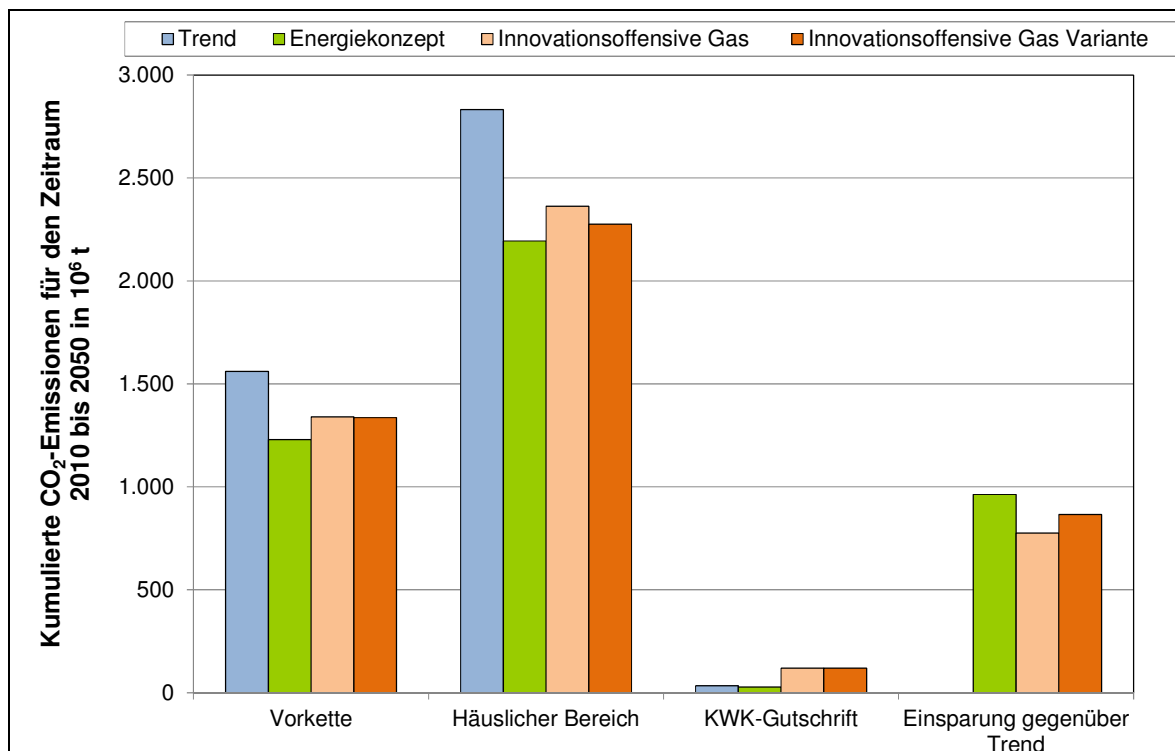
	Emissionen aus Vorketten	Direkte Emissionen der privaten Haushalte	KWK-Gutschrift *)	Summe	Einsparung gegenüber Trend
Szenario Trend	1.560	2.832	-34	4.358	-
ES0	1.229	2.194	-28	3.395	963
IS0	1.340	2.362	-120	3.582	776
IS3	1.336	2.276	-120	3.492	866

\*) inkl. KWK-Gutschrift mit Strommix aus [EGP2010] berechnet

**Tabelle 46:** Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in % gegenüber dem Vergleichsjahr 1990

	2010	2020	2030	2040	2050
Szenario Trend	24,6	37,0	48,9	59,4	69,8
ES0	24,8	43,0	61,1	76,6	90,2
IS0	24,9	42,2	58,0	70,4	82,1
IS3	24,9	42,7	59,2	72,1	85,1

Die beschriebenen Zusammenhänge werden in Abbildung 41 verdeutlicht.



**Abbildung 41:** Kumulierte CO<sub>2</sub>-Emissionen aus den einzelnen Bereichen und die kumulierte vermiedene CO<sub>2</sub>-Emission für den Zeitraum von 2010 bis 2050

Ein Vergleich der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen von Vorketten und direkten Emissionen zeigt, dass die Vorketten nicht vernachlässigt werden dürfen. Im Nachfolgenden wird der Einfluss der Vorkettenemissionen genauer erläutert. Die Stromheizung weist z. B. die CO<sub>2</sub>-Emission des deutschen Strommixes auf. Dies bedeutet, wie Kapitel 7.6.4 zu entnehmen ist, für das Jahr 2050 immer noch eine hohe CO<sub>2</sub>-Emission für die Bereitstellung von Wärme von ca. 328 g/kWh für das Szenario Trend und bis zu 302 g/kWh für das Szenario Innovationsoffensive Gas. Die in dieser Studie eingesetzten KWK-Systeme können dabei in Summe weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen. Sie weisen für die Bereitstellung von Wärme CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 165 g/kWh für das Szenario Trend und bis zu 111 g/kWh für das Szenario Innovationsoffensive Gas auf, was eine Reduktion gegenüber der Stromheizung von 64 % bzw. 51 % bedeutet. Eine Gutschrift für die Strom-einspeisung ist dabei noch einzurechnen, so dass sogar eine positive Bilanz erreicht werden kann. Pelletkessel weisen ca. 30 g/kWh für Wärmebereitstellung auf, was auf die niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Vorkette und Wirkungsgrade über 90 % zurückzuführen ist. Zu beachten ist, dass neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen keine weiteren Schadstoffe wie z. B. Feinstaub, CO, NO<sub>x</sub> oder SO<sub>x</sub> betrachtet wurden, welche gerade bei der Verbrennung von Holz eine weitaus höhere Rolle spielen als bei Gasen. Elektrowärmepumpen mit einer Arbeitszahl von 3 liegen bei



den CO<sub>2</sub>-Emissionen je nach Szenario in der gleichen Größenordnung wie KWK-Systeme zwischen 109 – 100 g/kWh für die Wärmebereitstellung. Die Gaswärmepumpen liegen bei einer Arbeitszahl von 1,5 für die Wärmebereitstellung bei ca. 128 g/kWh für das Szenario Trend und bei 87 g/kWh für das Szenario Innovationsoffensive Gas.

## 8.4 Kostenvergleich

Bevor auf die kostenseitige Analyse und Bewertung der Szenarienergebnisse eingegangen wird, erfolgt in diesem Kapitel eine kurze Erläuterung der zugrunde gelegten Kostenphilosophie und Bewertungsmethodik. Analog zur energie- und emissionsseitigen Analyse schließt sich hieran eine Sensitivitätsanalyse an.

### 8.4.1 Kostenmethodik

Das Simulationsmodell berechnet für die Maßnahmen die Investitions- und jährlichen Betriebskosten sowie die Erlöse durch KWK-Strom und bilanziert hieraus die Jahreskosten der Szenarien aus der Perspektive eines Endverbrauchers. Die Berechnung erfolgt in Jahresschritten von 2010 bis 2050. Die Jahreskosten der Szenarien werden auf das Jahr 2010 abdiskontiert<sup>8</sup> und summiert. Die Gesamtkosten eines Szenarios werden somit als Barwert ausgewiesen. Dies ermöglicht einen Vergleich der im Zeitverlauf unterschiedlichen Kostenströme.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse nur vor dem Hintergrund des gewählten Bilanzierungsraumes, der expliziten sowie impliziten Annahmen und auch der gewählten Bilanzierungs- und Bewertungsmethode zu interpretieren sind. So wird in den Szenarien nicht von einem individuellen oder gruppenspezifischen Akteursverhalten ausgegangen, indem z.B. das reale Entscheidungskalkül eines Investors abgebildet ist oder die vorgeschriebenen Maßnahmen in Abhängigkeit vom Einkommen sowie der Altersstruktur der Akteure umgesetzt werden. Das Modell simuliert die Kosten in Abhängigkeit der Szenariovorgaben. Weiterhin werden mögliche Fremdfinanzierungskosten für die Umsetzung der Maßnahmen nicht berücksichtigt, und es werden nur die Zahlungsströme für die privaten Haushalte für den Gebäudereich berücksichtigt. Die Kosten für den Staatshaushalt, wie z.B. evtl. Steuerausfälle oder Subventionen für das Stimulieren von Sanierungsaktivitäten (z.B. Kosten für Förderprogramme) oder Substitutionseffekte innerhalb des Haushaltssektors (z.B. Verlagerung von

---

<sup>8</sup> Es wird ein Diskontsatz von 4 % angenommen.

Ausgaben) werden nicht berücksichtigt. Die Kostenanalysen können somit nicht als geschlossene volkswirtschaftliche Betrachtung gesehen werden.

#### **8.4.2 Vergleich der Szenarien Trend, Energiekonzept und Innovationsoffensive**

Die über das Szenario Trend hinausgehenden Gesamtkosten des Szenarios Energiekonzept liegen mit ca. 76 Mrd. € deutlich über den vergleichbaren Werten des Szenarios Innovationsoffensive Gas mit ca. 3 Mrd. € (Tabelle 47). Maßgebliche Ursache hierfür sind die hohen Investitionskosten für die Sanierungsmaßnahmen (Wärmedämmung im Bestand), die infolge der höheren Sanierungsrate sowie der gesteigerten Effizienzstandards deutlich über den Investitionskosten der Innovationsoffensive liegen. Insbesondere durch die Verdopplung der Sanierungsrate müssen auch Maßnahmen außerhalb des üblichen Renovierungszyklus ergriffen werden, was einen erheblichen Teil der hohen Mehrinvestitionen erklärt. Dagegen ist im Szenario Energiekonzept die Energieeinsparung deutlich höher, so dass die Ausgaben für Energie geringer als im Szenario Innovationsoffensive Gas sind. Bei den Erlösen aus der KWK-Gutschrift ist für das Szenario Energiekonzept ein geringer Rückgang zu verzeichnen, während im Szenario Innovationsoffensive hier ein Anstieg zu verzeichnen ist. In der Summe kann aber der Rückgang der Energiekosten im Szenario Energiekonzept den Anstieg der Investitionen nicht kompensieren.

Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten betragen im Szenario Energiekonzept etwa 120 €/t CO<sub>2</sub><sup>9</sup> bei einer kumulierten CO<sub>2</sub>-Einsparung von 632 Mio. t. Im Szenario Innovationsoffensive Gas betragen die spezifischen Vermeidungskosten dagegen ca. 6 €/t CO<sub>2</sub> bei einer kumulierten CO<sub>2</sub>-Einsparungen von ca. 555 Mio. t.

Die Mehrinvestitionen des Szenarios Innovationsoffensive Gas betragen nur etwa 40 % der Mehrinvestitionen des Szenarios Energiekonzept. Allerdings sind aufgrund der niedrigeren Sanierungsrate und der niedrigeren Effizienzstandards im Szenario Innovationsoffensive Gas die Energieeinsparungen geringer und in der Folge die Energiekosten höher. Während im Szenario Energiekonzept rund 114 Mrd. € Energiekosten eingespart werden, beträgt die Einsparung im Szenario Innovationsoffensive Gas nur rund 44 Mrd. €. Zu dem Ergebnis trägt auch der höhere Preis für das Gasgemisch im Szenario Innovationsoffensive Gas bei. Dieser wirkt in zwei Richtungen. Jede eingesparte Einheit wird monetär deutlich

---

<sup>9</sup> Es ist darauf hinzuweisen, dass im Szenario Trend die heute implementierten Minderungsmaßnahmen fortgeschrieben werden, die ebenfalls mit Kosten verbunden sind. Die spezifischen Vermeidungskosten gelten somit nur für die Maßnahmen, die im Szenario Energiekonzept über den Trend hinaus ergriffen werden.

höher bewertet, aber der verbleibende Gasverbrauch wird erheblich teurer. Dennoch ist das Ergebnis umso bemerkenswerter, da die Preise für das Gasgemisch sehr konservativ, ohne Subventionen angesetzt wurden.

Gegenüber dem Szenario Trend werden im Szenario Innovationsoffensive Gas keine zusätzlichen gebäudeseitigen Maßnahmen ergriffen, so dass die höheren Investitionskosten (Bestand: 69,2 Mrd. €; Neubau: 3,5 Mrd. €) allein auf den erhöhten Einsatz von neuen gasbasierten Heizungssystemen zurückzuführen sind. Die höheren Erlöse resultieren aus dem gestiegenen Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen, deren Stromproduktion monetär vergütet und als Erlös gezählt wird.

Hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ist der Kostenvorteil im Szenario Innovationsoffensive Gas überaus deutlich. Zwar sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2050 in beiden Szenarien nur noch geringfügig unterschiedlich, allerdings ist die kumulierte Emissionseinsparung über den Betrachtungszeitraum im Szenario Energiekonzept mit 632 Mio. t gegenüber 555 Mio. t im Szenario Innovations-offensive Gas ausgeprägter.

**Tabelle 47:** Kumulierte Mehrkosten der Szenarien Energiekonzept und Innovations-offensive Gas im Vergleich zum Szenario Trend (Barwerte im Zeitraum 2010 bis 2050)

	<b>Energiekonzept</b>	<b>Innovationsoffensive Gas</b>
<b>Δ Investition</b>	187,9 Mrd. €	72,7 Mrd. €
davon:		
- Heizungserneuerungen im Bestand	-	69,3 Mrd. €
- Heizungserneuerungen im Neubau	-	3,4 Mrd. €
- Wärmedämmungen im Bestand	185,4 Mrd. €	-
- Wärmedämmungen im Neubau	2,6 Mrd. €	-
<b>Δ Energiekosten</b>	- 113,8 Mrd. €	- 44,1 Mrd. €
<b>Δ Erlöse (KWK-Gutschrift)</b>	- 1,4 Mrd. €	25,4 Mrd. €
<b>Δ Gesamtkosten</b>	75,6 Mrd. €	3,2 Mrd. €
<b>Δ CO<sub>2</sub><sup>*)</sup></b>	- 632 Mio. t	- 555 Mio. t
<b>Spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten</b>	120 €/tCO <sub>2</sub>	6 €/tCO <sub>2</sub>

\*) inkl. KWK-Gutschrift mit Strommix aus [EGP2010] berechnet; nur direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen

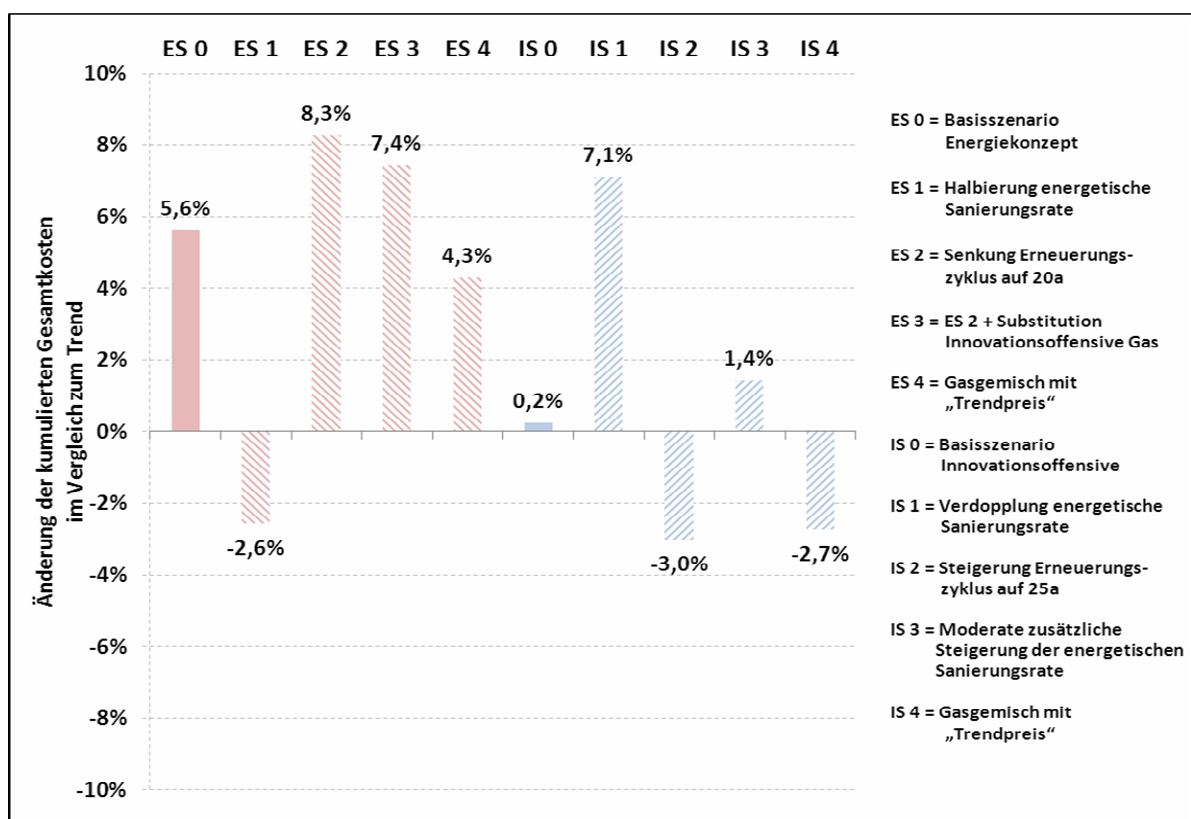
Im Rahmen der folgenden Sensitivitätsanalyse wird eine Variante der Innovationsoffensive mit etwas stärkeren gebäudeseitigen Maßnahmen dargestellt (IS3), die im Ergebnis zu annähernd gleich großen kumulierten Emissions-einsparungen führt. Mit den etwas höheren Investitionskosten liefert dies spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von ca. 30 €/t CO<sub>2</sub>. Die Kosten sind damit zwar höher als im Szenario Innovationsoffensive Gas aber immer noch deutlich geringer als im Szenario Energiekonzept.

### 8.4.3 Sensitivitätsanalysen

Wie aus den vorherigen Ausführungen hervorgeht, liegen den drei Szenarien sehr unterschiedliche Strategien zur Reduzierung von Energieverbrauch und Emissionen zugrunde. Während das Szenario Trend im Sinne einer „Business as Usual“ Entwicklung zu sehen ist, in dem die heute ergriffenen Maßnahmen fortgeschrieben werden, umfasst das Szenario Innovationsoffensive Gas die Grundelemente der DVGW-Innovationsoffensive. Dies sind der bevorzugte Einsatz von gasbasierten Heizungssystemen mit dem Schwerpunkt auf den Mikro-KWK-Anlagen, ein CO<sub>2</sub>-ärmeres Gasgemisch durch Zumischung von Biogas, H<sub>2</sub> etc. sowie ein schnellerer Austausch der Heizungssysteme mit einem verkürzten Erneuerungszyklus von 20 Jahren. Dem gegenüber zeichnet sich das Szenario Energiekonzept durch eine erhöhte Sanierungsrate bzw. bessere Potentialausnutzung sowie durch höhere Effizienzstandards aus. Im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen werden im Nachfolgenden einige Kernelemente dieser Strategien analysiert.

Abbildung 42 zeigt die Veränderung der Gesamtkosten der einzelnen Szenarien und Sensitivitätsanalysen gegenüber dem Szenario Trend. Die Aufschlüsselung nach Kostenarten findet sich in Abbildung 43. Im Vergleich der beiden Basisszenarien führt das Szenario Energiekonzept (ES0) zu ca. 5,6 % höheren Gesamtkosten. Die Erhöhung der Gesamtkosten des Szenarios Innovations-offensive Gas (IS0) gegenüber dem Szenario Trend ist stattdessen vernachlässigbar. Eine Verringerung der Sanierungsrate sowie der Potentialausnutzung im Szenario Energiekonzept (ES1) führt zu einer starken Kostenverringerung gegenüber dem Trend von 2,6 %. Da nun Maßnahmen innerhalb und nicht mehr außerhalb des Renovierungszyklus ergriffen werden, sind die Investitionskosten geringer. Auf der anderen Seite steigert eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate im Rahmen der Innovationsoffensive (IS1) mit der Folge hoher Investitionskosten für Wärmedämmung die Gesamtkosten um 7,1 %. Bei einem geringeren Anstieg der energetischen Sanierungsrate auf 1,5 % ab dem Jahr 2020 (IS3) und den dann wieder etwas niedrigeren Kosten für Wärmedämmung sind die

Gesamtkosten gegenüber dem Szenario Trend nur noch um 1,4 % höher. Eine Senkung des Erneuerungszyklus für Heizkessel von 25 auf 20 Jahre (ES2) ist teurer als das Szenario Energiekonzept und mit 8,3% erheblich teurer im Vergleich zum Szenario Trend. Werden wie im Szenario Innovationsoffensive Gas verstärkt gasbasierte Heizungssysteme verwendet (ES3), so liegen die Kosten etwas niedriger als bei der Sensitivität ES2, aber mit 7,4% immer noch deutlich höher als im Trend. Umgekehrt führt in der Innovationsoffensive eine Erhöhung des Erneuerungszyklus für Heizkessel von 20 auf 25 Jahren (IS 2) im Vergleich zum Trend zu geringeren Gesamtkosten von ca. 3 %. Werden für das Gasgemisch in beiden Basisszenarien (Energiekonzept (ES0), Innovationsoffensive Gas (IS0) der niedrigere Preis des Trendszenarios angenommen (ES4 und IS4)<sup>10</sup>, so steigen die Gesamtkosten für die Sensitivität ES4 nur noch um 4,3 %, während sie für die Sensitivität IS4 sogar um 2,7 % sinken.



**Abbildung 42:** Änderung der Gesamtkosten im Vergleich zum Szenario Trend

<sup>10</sup> Die annahmegemäße Ursache für einen so niedrigen Preis für das Gasgemisch ist hier von Bedeutung. Implizit wird von einem sinkenden Angebotspreis für H<sub>2</sub> und Biomethan ausgegangen, der sich z.B. durch stärkern technischen Fortschritt ergibt. Alternativ ist der Ansatz äquivalent zu einer Substitution, so dass dann die Kosten außerhalb der Bilanzgrenze anfallen würden.

Zusammenfassend bleibt mit Blick auf die Gesamtkosten festzuhalten, dass insbesondere die Veränderung der Sanierungsrate sowie der Potenzialausnutzung, in deren Folge unterschiedlich hohe Investitionskosten anfallen, die stärksten Änderungen verursachen. Dem gegenüber fallen die Auswirkungen der Variation des Erneuerungszyklus von Heizungen oder die Änderung des Gasgemischpreises auf den Preis des Szenarios Trend deutlich geringer aus.

Abbildung 43 enthält die jeweiligen Kostenanteile (Investition, Betriebskosten, Erlöse) und zeigt die Ursachen für die Veränderung in den gerechneten Szenarien im Vergleich zum Szenario Trend. Es zeigt sich mit Ausnahme der Fälle ES1, IS2 und IS4, dass die Mehrbelastung durch höhere Investitionen durch eine Minderbelastung durch geringere Betriebskosten bzw. höhere KWK-Strom-Gutschriften nicht kompensiert werden kann. Für das Szenario Energiekonzept ergeben sich somit höhere Investitionskosten von 14 % und Erlöse durch KWK-Strom von 0,1 % sowie verminderte Betriebskosten von 8,5 %. Die Erhöhung der Investitionskosten ist vor allem durch die gesteigerten Sanierungsaktivitäten und höheren Effizienzstandards begründet, die zugleich zu geringeren Betriebskosten führen. Die Summe der Einzeleffekte der Kostenelemente führt zu höheren Gesamtkosten von 5,6 %. Die Umsetzung des Szenarios Innovationsoffensive Gas ist gegenüber dem Trend mit mehr Investitionskosten von 5,4 % verbunden. Zudem sinken die Betriebskosten um rund 3,2 % und die gesteigerten Erlöse vermindern die Gesamtkosten anteilig um ca. 1,9 %. Folglich ergeben sich insgesamt für dieses Szenario entsprechend der saldierte Mehrkosten von 0,3 % im Vergleich zum Szenario Trend.

Die Mehrinvestitionen der Sensitivität ES1 gegenüber dem Szenario Trend in Höhe von 0,8% entstehen durch die Einhaltung höherer Effizienzstandards. Denn durch die Verringerung der Sanierungsrate sinken die Energieeinsparung und somit auch die Betriebskosten um 3,4 %. Allerdings können mit den Energiekosteneinsparungen die Mehrinvestitionen überkompensiert werden. Im Saldo errechnet sich somit gegenüber dem Szenario Trend eine Gesamtkosteneinsparung von 2,6 % bei einer kumulierten Emissionseinsparung von 343 Mio. t CO<sub>2</sub>, die um ca. 290 Mio. t niedriger liegt als in dem ursprünglichen Szenario Energiekonzept. Im Umkehrschluss lassen sich auch die spezifischen Vermeidungskosten für die Erhöhung der Sanierungsrate und verbesserter Potentialausnutzung im Szenario Energiekonzept ableiten, die etwa 376 €/t CO<sub>2</sub> betragen.

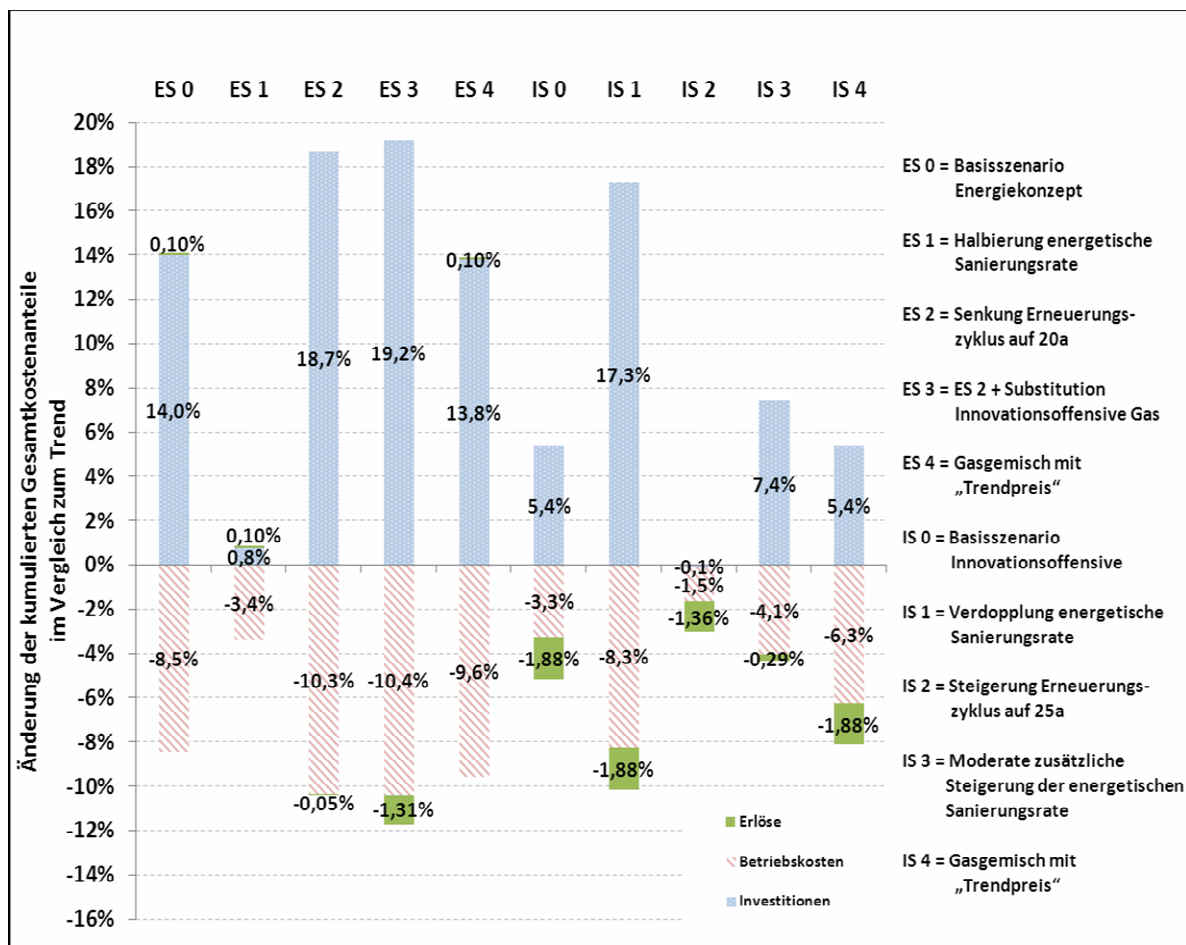
Im Szenario Innovationsoffensive Gas (IS0) wird durch eine verkürzte Lebensdauer ein vorzeitiger Austausch von Heizungssystemen unterstellt. Findet diese Maßnahme auch im Szenario Energiekonzept (ES2) Anwendung, erhöhen sich die Kosten für Investitionen gegenüber dem Trendszenario um ca. 19 %. Der

Unterschied der Investitionen zum Szenario Energiekonzept beträgt ca. 5 %. Durch die Maßnahme werden Energieeinsparungen erzielt, die eine Verringerung der Energiekosten gegenüber dem Szenario Trend von etwa 10,3 % bewirken. Dies bedeutet gegenüber dem ursprünglichen Szenario Energiekonzept (ES0) eine zusätzliche Einsparung von fast 2 %. Im Saldo führt dies gegenüber dem Szenario Trend zu erhöhten Gesamtkosten von etwa 8,3 % bei einer kumulierten Emissionseinsparung von 756 Mio. t. Die spezifischen Vermeidungskosten eines erhöhten Austausches von Heizungssystemen betragen 287 €/t CO<sub>2</sub>.

Wie zuvor erläutert, unterscheiden sich die Szenarien auch hinsichtlich der Preise für die jeweiligen Gasgemische. Legt man im Szenario Energiekonzept bei unveränderter Zusammensetzung des Gasgemisches den gleichen Preis wie im Szenario Trend (ES4) an, führt dies zu etwas niedrigeren Betriebskosten. Aufgrund der nur geringen Unterschiede der Gasgemischpreise (Trend vs. Energiekonzept) fällt der Gesamteffekt aber nur relativ moderat aus (vgl. Tabelle 23).

Geht man davon aus, dass alle Strategieelemente der Innovationsoffensive auch Bestandteil des Szenarios Energiekonzept (ES3) sind, führt dies zu einer Erhöhung der Gesamtkosten gegenüber dem Szenario Trend um 7,4 %. Gegenüber dem ursprünglichen Szenario Energiekonzept beträgt die Erhöhung der Gesamtkosten etwa 1,8 %. Die spezifischen Vermeidungskosten für die Maßnahmen der Innovationsoffensive Gas betragen gegenüber dem unveränderten Szenario Energiekonzept (ES0) etwa 203 €/t CO<sub>2</sub>.

Im Nachfolgenden werden einige Sensitivitätsrechnungen diskutiert, die auf der Basis des Szenarios Innovationsoffensive Gas durchgeführt wurden. So führt eine höhere Sanierungsrate (IS1), wie sie im Szenario Energiekonzept unterstellt wird, zu einer deutlichen Erhöhung der Gesamtkosten gegenüber dem Szenario Trend um 7,1 % bei einer kumulierten Emissionseinsparung von 785 Mio. t CO<sub>2</sub>. Dies bedeutet gegenüber der Basisvariante des Szenarios Innovationsoffensive Gas einen um etwa 41,4 % höheren Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Verantwortlich hierfür sind zusätzliche Investitionen für gebäudeseitige Maßnahmen außerhalb des Renovierungszyklus, die gegenüber dem Szenario Trend ca. 17 % betragen. Der Unterschied der Investitionen zum Szenario Innovationsoffensive Gas (IS0) beträgt ca. 12 %. Die investitionsbedingten Mehrkosten können durch die verminderten Energiekosten aufgrund der Energieeinsparung trotz eines höheren Preises für das Gasgemisch nicht kompensiert werden. Für die Erhöhung der Sanierungsrate bzw. der Potentialausnutzung errechnen sich gegenüber dem unveränderten Innovationsszenario spezifische Vermeidungskosten in Höhe von 402 €/t CO<sub>2</sub>.



**Abbildung 43:** Änderung der einzelnen Kostenelemente (kumuliert) im Vergleich zum Szenario Trend

Eine Steigerung der Lebensdauer von Heizsystemen im Szenario Innovationsoffensive Gas (IS2) führt in der Summe zu einer Gesamtkostenminderung gegenüber dem Szenario Trend von etwa 3 %, die vor allem durch geringere Investitionen für den langsameren Austausch von Heizsystemen zu erklären ist. Allerdings ist auch die deutlich geringere kumulierte Emissionseinsparung von 349 Mio. t CO<sub>2</sub> zu berücksichtigen, die auch gegenüber dem Szenario Innovationsoffensive Gas nochmals um ca. 206 Mio. t CO<sub>2</sub> niedriger ausfällt. Im Umkehrschluss lassen sich hieraus die spezifischen Vermeidungskosten für den verstärkten Austausch von Heizungssystemen ableiten. Diese betragen ca. 213 €/t CO<sub>2</sub>.

Unterstellt man im Szenario Innovationsoffensive Gas bei unveränderter Zusammensetzung des Gasgemisches den deutlich niedrigeren Gasgemischpreis des Szenarios Trend (IS4), vermindert dies die Gesamtkosten gegenüber dem



Trendszenario um etwa 2,7 %. Der Gesamtkosteneffekt ist in etwa vergleichbar mit dem des verstärkten Austausches von Heizungssystemen. Den Betriebskosteneinsparungen des unveränderten Szenarios Innovationsoffensive Gas (IS0) von 3,2 % (gegenüber Szenario Trend) stehen nun durch einen niedrigeren Gasgemischpreis vergleichbare Kosteneinsparungen von 6,3 % gegenüber.

**Tabelle 48:** Kumulierte Mehrkosten der Szenarien Energiekonzept und Innovations-offensive Gas sowie der Sensitivität IS3 im Vergleich zum Szenario Trend (Barwerte, Zeitraum 2010 bis 2050)

	<b>Energie- konzept ES0</b>	<b>Innovations- offensive Gas IS0</b>	<b>Innovations- offensive Gas Sensitivität IS3</b>
<b>Δ Investition</b>	187,9 Mrd. €	72,7 Mrd. €	99,7 Mrd. €
davon:			
- Heizungserneuerungen im Bestand	-	69,3 Mrd. €	69,3 Mrd. €
- Heizungserneuerungen im Neubau	-	3,4 Mrd. €	3,4 Mrd. €
- Wärmedämmungen im Bestand	185,4 Mrd. €	-	27,0 Mrd. €
- Wärmedämmungen im Neubau	2,6 Mrd. €	-	-
<b>Δ Energiekosten</b>	-113,8 Mrd. €	-44,1 Mrd. €	-54,9 Mrd. €
<b>Δ Erlöse (KWK-Gutschrift)</b>	- 1,4 Mrd. €	25,4 Mrd. €	25,4 Mrd. €
<b>Δ Gesamtkosten</b>	75,6 Mrd. €	3,2 Mrd. €	19,4 Mrd. €
<b>Δ CO<sub>2</sub><sup>*)</sup></b>	-632 Mio. t	-555 Mio. t	-642 Mio. t
<b>Spezifische Vermeidungskosten</b>	120 €/t CO <sub>2</sub>	6 €/t CO <sub>2</sub>	30 €/t CO <sub>2</sub>

\*) inkl. KWK-Gutschrift mit Strommix aus [EGP2010] berechnet, nur direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen

Das Potenzial der kumulierten CO<sub>2</sub>-Einsparung ist allerdings im Szenario Innovationsoffensive Gas (IS0) um ca. 77 Mio. t CO<sub>2</sub> geringer als im Szenario Energiekonzept (ES0). Wie zuvor schon angedeutet, ist es mit der Umsetzung der Sensitivität IS3 (moderate Steigerung der energetischen Sanierungsrate gegenüber Szenario Trend) möglich, dass die gleiche kumulierte Emissionseinsparung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen wie im Szenario Energiekonzept erzielt werden kann (vgl. Tabelle 48). Die im Vergleich zum Szenario Innovationsoffensive Gas zusätzlich durchgeführten Wärmedämmungen im Bestand führen zu Mehrinvestitionen von 27,0 Mrd. €. Diese Investitionen lösen zusätzliche Energieeinsparungen aus und vermindern die Betriebskosten um 54,9 Mrd. €, die somit

um 10,8 Mrd. € geringer sind als im Szenario Innovationsoffensive Gas. Die Erlöse aus der KWK-Gutschrift, die für die Szenarien aus den Stromerzeugungsmengen aus Mikro-KWK-Anlagen gemäß der Tabelle 41 und dem Strompreis aus der Tabelle 21 berechnet werden, sind im Szenario Energiekonzept gegenüber dem Trend wegen des verringerten Wärmebedarfs kumuliert über den Zeitraum 2010 bis 2050 rund 1,4 Mrd. € geringer. Der deutlich verstärkte Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen im Szenario Innovationsoffensive Gas IS0 und der Sensitivität IS3 erhöht die Erlöse aus der KWK-Gutschrift gegenüber dem Trend um 25,4 Mrd. €.

Mit der Sensitivität IS3 steigen die Gesamtkosten um 19,4 Mrd. € gegenüber dem Trend bzw. um 16,2 Mrd. € im Vergleich zum Szenario Innovationsoffensive Gas (IS0). Die spezifischen Vermeidungskosten steigen bei dieser Sensitivität gegenüber dem Basisszenario von 6 €/t CO<sub>2</sub> auf nunmehr 30 €/t CO<sub>2</sub> an, liegen aber immer noch deutlich unter den spezifischen Reduktionskosten des Szenarios Energiekonzept ES0.

Die entscheidenden Unterschiede zwischen dem Szenario Energiekonzept ES0 und dem Szenario Innovationsoffensive Gas sowie der Sensitivität IS3 sind neben den veränderten Betriebskosten die Mehrinvestitionen für Heizungssysteme und Wärmedämmungen (vgl. Tabelle 48). So sind gegenüber dem Trend im Szenario Energiekonzept Mehrinvestitionen für Wärmedämmungen von insgesamt 187,9 Mrd. € notwendig. Der wesentliche Anteil entfällt im Zeitraum 2010 bis 2050 mit 185,4 Mrd. € auf energetische Sanierungen im Bestand. Durch die in diesem Szenario unterstellten Verdopplungen der energetischen Sanierungsrate auf 2 %/a und der Effizienz der Sanierungen von derzeit 32 % auf rund 65 % ab 2015 ist es erforderlich, dass gemittelt über alle Bauteile der Gebäudehülle rund 38 % der gesamten Sanierungen im Zeitraum bis 2050 außerhalb des Renovierungszyklus erfolgen. Anstelle der Differenzinvestitionen werden daher für diesen Teil der Sanierungen die Vollkosten angesetzt. In den anderen Szenarien und der Sensitivität IS3 werden dagegen nur Differenzinvestitionen berücksichtigt, weil die Sanierungen im Renovierungszyklus stattfinden. Die in den Szenarien angesetzten bauteilspezifischen Kosten für die sanierte Wohnfläche sind in der Tabelle 49 für den Energiestandard der EnEV 2009 gegliedert nach Differenzinvestitionen und Vollkosten gemäß [ENP2011] ausgewiesen. Die im Szenario Energiekonzept unterstellten Novellierungen der EnEV 2009 führen im Mittel zur Steigerung der spezifischen Kosten ab 2014 und 2021 um jeweils rund 9 %.

**Tabelle 49:** Spezifische Kosten für die Wärmedämmung im Bestand differenziert nach Differenzinvestitionen und Vollkosten in €/m<sup>2</sup> sanierte Wohnfläche gemäß dem Energiestandard der EnEV 2009 (Kosten nach [ENP2011])

	Trend und Innovationsoffensive Gas IS0 und IS3			Energiekonzept ES0		
	EFH	MFH	Ges.	EFH	MFH	Ges.
	Differenzinvestitionen (innerhalb des Renovierungszyklus)					
Dach	86,02	24,86	60,10	86,02	24,86	60,10
Fassade	72,82	47,08	61,91	72,82	47,08	61,91
Keller	11,72	4,79	8,78	11,72	4,79	8,78
Fenster	10,15	5,82	8,31	10,15	5,82	8,31
Summe	180,71	82,55	139,11	180,71	82,55	139,11
	Vollkosten (außerhalb des Renovierungszyklus)					
Dach				141,27	40,83	98,70
Fassade				118,69	76,73	100,91
Keller				11,72	4,79	8,78
Fenster				100,01	57,40	81,95
Summe				371,68	179,75	290,34

In der Tabelle 50 sind die bauteilabhängigen Kostenbarwerte für die Investitionen für Wärmedämmungen im Bestand differenziert für die Szenarien bzw. die Sensitivität IS3 und die Mehrinvestitionen im Vergleich zum Szenario Trend dargestellt. Die gesamten Investitionen für die Wärmedämmungen im Bestand summieren sich in den Szenarien Trend und Innovationsoffensive Gas auf 93,9 Mrd. €, da die gleiche energetische Sanierungsrate angenommen wurde, Drei Viertel dieser Investitionen (ca. 70,3 Mrd. €) fallen dabei auf Maßnahmen zur Wärmedämmung von Einfamilienhäusern. Demgegenüber sind im Szenario Energiekonzept für die Wärmedämmungen im Bestand mit 279,2 Mrd. € insgesamt Mehrinvestitionen in Höhe von 185,4 Mrd. € gegenüber dem Szenario Trend erforderlich. Entsprechend sind in der Sensitivität IS3 Gesamtinvestitionen für Wärmedämmungen im Bestand von 120,9 Mrd. € und somit Mehrinvestitionen von 27,0 Mrd. € notwendig.

**Tabelle 50:** Investitionskosten für Wärmedämmungen im Bestand und Differenzkosten im Vergleich mit dem Trendszenario (Barwerte in Mrd. €, Zeitraum 2010 bis 2050)

	Trend und Innovations- offensive Gas IS 0			Szenario Energie- konzept ES 0			Sensitivität IS 3 der Innovationsoffensive Gas		
	EFH	MFH	Ges.	EFH	MFH	Ges.	EFH	MFH	Ges.
	Investitionen								
Dach	33,6	7,1	40,7	80,3	17,1	97,4	43,2	9,2	52,4
Fassade	28,4	13,5	41,9	70,0	33,3	103,3	36,6	17,4	54,0
Keller	4,3	1,3	5,6	8,6	2,6	11,2	5,6	1,7	7,2
Fenster	4,0	1,7	5,6	47,3	20,0	67,3	5,1	2,2	7,3
Summe	70,3	23,6	93,9	206,3	72,9	279,2	90,5	30,4	120,9
	Differenzkosten im Vergleich zum Szenario Trend								
Dach				46,8	9,9	56,7	9,7	2,1	11,7
Fassade				41,6	19,8	61,4	8,2	3,9	12,0
Keller				4,3	1,3	5,6	1,3	0,4	1,6
Fenster				43,4	18,3	61,7	1,2	0,5	1,6
Summe				136,0	49,3	185,4	20,2	6,8	27,0

## 8.5 Interpretation der Ergebnisse

Die wesentliche Zielsetzung des Projekts bestand darin, zu analysieren, ob für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung des Wohngebäudesektors der privaten Haushalte mögliche Alternativen zum Energiekonzept der Bundesregierung existieren, mit denen sich vergleichbare Emissionseinsparungen bei möglicherweise geringeren Kosten erreichen lassen. Aus diesem Grund wurden u.a. die Kernelemente der DVGW-Innovationsoffensive Gastechnologien in Form eines Szenarios abgebildet und deren mögliche Auswirkungen im Vergleich zu den Maßnahmen des Energiekonzepts der Bundesregierung untersucht. Als Referenzentwicklung wurde das Szenario Trend entwickelt, das eine Fortschreibung der heute implementierten Maßnahmen beschreibt und an denen die anderen definierten Szenarien gespiegelt werden.

## Bilanzraum der privaten Haushalte

In allen Szenarien nehmen der Energieverbrauch und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich ab. So erreicht bereits im Szenario Trend im Jahr 2050 der spezifische Raumwärme- und Warmwasserverbrauch einen Wert von ca. 100 kWh/m<sup>2</sup>a (gesamter Wohngebäudebestand), der gegenüber heute um über 40 % niedriger liegt. Die vergleichbaren Werte für die Szenarien Energiekonzept sowie Innovationsoffensive Gas liegen mit 55 bzw. 78 kWh/m<sup>2</sup>a deutlich niedriger und verdeutlichen die effizienzsteigernden Wirkungen der jeweils unterstellten Maßnahmen. Die Berechnungen zeigen, dass mit den Maßnahmen der Szenarien Energiekonzept sowie Innovationsoffensive Gas (unter Einbeziehung von Mikro-KWK-Anlagen) erhebliche Emissionseinsparungen ausgelöst werden, die im Jahr 2050 zu einem nahezu klimaneutralen Wohngebäudebestand führen würden. In beiden Szenarien wird die Forderung nach einer primärenergie- und emissionsseitigen Einsparung von 80% bis zum Jahr 2050 (geg. 1990) erreicht.

Vergleicht man die über den Betrachtungszeitraum (2010 – 2050) kumulierten Emissionseinsparungen, fallen diese für das Szenario Energiekonzept um etwa 80 Mio. t höher aus als im Szenario Innovationsoffensive Gas. Der Vergleich beider Szenarien zeigt allerdings, dass die Gesamtkosten des Szenarios Energiekonzept deutlich höher als im Szenario Innovationsoffensive Gas liegen, was durch die relativ teuren und zum großen Teil außerhalb des Renovierungszyklus zu ergreifenden gebäudeseitigen Effizienzmaßnahmen zu erklären ist. Die eingesparten Energiekosten vermögen die höheren Investitionskosten nicht annähernd zu kompensieren. Insgesamt errechnen sich über den gesamten Zeitraum für das Szenario Energiekonzept spezifische Vermeidungskosten gegenüber dem Szenario Trend in Höhe von ca. 120 €/t CO<sub>2</sub> und für das Szenario Innovationsoffensive Gas 6 €/t CO<sub>2</sub>.

Mit einer etwas vorgezogenen Erhöhung der Sanierungsrate könnte im Szenario Innovationsoffensive Gas eine gleiche kumulierte Einsparung direkter Emissionen erzielt werden (Variante IS3) wie im Szenario Energiekonzept. Dies wäre allerdings mit höheren Investitionen verbunden. Die spezifischen Vermeidungskosten liegen selbst in diesem Fall mit etwa 30 €/t CO<sub>2</sub> immer noch deutlich unter dem Wert des Szenarios Energiekonzept.

Der vermehrte Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen führt im Szenario Innovationsoffensive Gas zu einer nennenswerten Stromerzeugung, die im Jahr 2050 etwa 25 TWh beträgt. Die hierdurch substituierte Strommenge im Umwandlungsbereich ist dem Haushaltssektor emissions- und kostenseitig gutzuschreiben. Die Emissionsgutschrift liegt in Abhängigkeit von der substituierten konventionellen Technik in einer Bandbreite von 1,8 bis 19,7 Mio. t CO<sub>2</sub>.

## **Bilanzraum der privaten Haushalte unter Beachtung der Emissionen aus Vorketten**

Die Berücksichtigung der vorgelagerten CO<sub>2</sub>-Emissionen ermöglicht eine Betrachtung, die über den Bilanzraum privater Haushalte und somit der ausschließlichen Betrachtung der direkten Emissionen hinausgeht. Unter Berücksichtigung der Vorketten beträgt die kumulierte Emissionseinsparung über den gesamten Zeithorizont (2010 – 2050) etwa 963 Mio. t im Szenario Energiekonzept, während sie mit 776 Mio. t im Szenario Innovationsoffensive Gas um etwa 187 Mio. t geringer ausfällt (Tabelle 45). Auch bei einer etwas vorgezogenen Erhöhung der Sanierungsrate im Szenario Innovationsoffensive Gas fällt die kumulierte Emissionseinsparung immer noch um ca. 97 Mio. t geringer aus, was im Wesentlichen auf den höheren Energieeinsatz und die damit verbundenen Mehremissionen der vorgelagerten Ketten zurückzuführen ist. Die genannten Emissionseinsparungen beziehen sich nur auf den Wohngebäudebereich. Würde man die Bereiche Industrie/Gewerbe und Verkehr ebenfalls einbeziehen, kann man im Szenario Innovationsoffensive Gas durch die verstärkte Integration der Erneuerbaren Energieträger mindestens von einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung ausgehen. Im Szenario Energiekonzept fällt die CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung aus den genannten Bereichen deutlich geringer aus und der scheinbare Vorteil aus dem Wohngebäudebereich wird wieder relativiert. Unter Einbeziehung der Vorketten ändern sich die jeweils dargestellten Gesamtkosten nicht. Auf der Basis der höheren CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei Einbeziehung der Vorketten ergeben sich neue spezifische Vermeidungskosten. Für das Energiekonzept betragen diese ca. 78 €/t CO<sub>2</sub>, dagegen für die Innovationsoffensive 4 €/t CO<sub>2</sub> und für die Sensitivität IS3 ca. 22 €/t CO<sub>2</sub> (Tabelle 51). D.h., dass durch die emissionsseitige Einbeziehung der Vorketten die Vorteilhaftigkeit des Szenarios Innovationsoffensive Gas hinsichtlich der spezifischen Vermeidungskosten bestätigt bleibt.

Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass eine Änderung der energetischen Sanierungsrate sowie der Potenzialausnutzung die größten energie-, emissions- und kostenseitigen Auswirkungen besitzt. Diese Parameter haben in allen Szenarien einen sehr starken Einfluss. Im Szenario Energiekonzept stellt sie aufgrund des ambitionierten Sanierungsfahrplans die entscheidende Maßnahme dar, um die primär- und emissionsseitigen Ziele der Bundesregierung zu erreichen.

**Tabelle 51:** Spezifische Vermeidungskosten der Szenarien Energiekonzept und Innovationsoffensive Gas sowie der Sensitivität IS3 im Vergleich zum Trend unter Einbeziehung der Emissionen der Vorketten (Barwerte, Betrachtungszeitraum 2010 bis 2050)

	<b>Energie- konzept ES0</b>	<b>Innovations- offensive Gas IS0</b>	<b>Innovations- offensive Gas Sensitivität IS3</b>
Δ Gesamtkosten	75,6 Mrd. €	3,2 Mrd. €	19,4 Mrd. €
Δ CO <sub>2</sub> ohne Vorketten <sup>*)</sup>	-632 Mio. t	-555 Mio. t	-642 Mio. t
Spezifische Vermeidungskosten ohne Vorketten	120 €/t CO <sub>2</sub>	6 €/t CO <sub>2</sub>	30 €/t CO <sub>2</sub>
Δ CO <sub>2</sub> mit Vorketten <sup>*)</sup>	-963 Mio. t	-776 Mio. t	-866 Mio. t
Spezifische Vermeidungskosten mit Vorketten	78 €/t CO <sub>2</sub>	4 €/t CO <sub>2</sub>	22 €/t CO <sub>2</sub>

<sup>\*)</sup> inkl. KWK-Gutschrift mit Strommix aus [EGP2010] berechnet

In allen Szenarien wird idealer Weise unterstellt, dass die jeweils vorgesehenen Maßnahmen auch von den jeweiligen Akteuren ergriffen und umgesetzt werden. Dies gilt z.B. für die Umsetzung der gebäudeseitigen Sanierungsmaßnahmen, den vorgezogenen altersbedingten Heizungs austausch, wie er z.B. im Szenario Innovationsoffensive Gas durchgeführt wird, oder auch für die Wahl eines durch Erneuerbare geprägten, gasförmigen Energieträgers anstelle einer Nutzung von Erdöl trotz höherer Kosten. Es ist davon auszugehen, dass für die meisten Maßnahmen Anreize zu setzen sind, damit eine Umsetzung stattfindet. Dies gilt selbst für die im Trend unterstellten gebäudeseitigen Effizienzmaßnahmen, die bereits heute durch entsprechende Fördermaßnahmen (z.B. KfW-Förderprogramme) flankiert und dementsprechend fortgeschrieben werden. Programmkosten dieser Art sind im Rahmen des Projektes nicht analysiert worden. Wie die Ergebnisse zeigen, gehen die Maßnahmen mit erheblichen Investitionen einher, die in vielen Fällen eine Fremdfinanzierung benötigen. Diese möglicherweise erheblichen zusätzlichen Kosten (z.B. Finanzierungskosten) sind in den Ergebnissen nicht enthalten. Es ist davon auszugehen, dass dies aufgrund der hohen Investitionskosten gerade im Szenario Energiekonzept noch einmal eine deutliche Kostenerhöhung für Investoren nach sich ziehen dürfte.

Für die vollständige Umsetzung der einzelnen Szenarien sind mögliche Unsicherheiten zu berücksichtigen. Wesentliche Aspekte sind:

- Verdopplung der energetischen Sanierungsrate

Während im Szenario Innovationsoffensive Gas nur eine moderate Steigerung der energetischen Sanierungsrate und Effizienz gemäß dem Trend angenommen wird, ist im Szenario Energiekonzept eine kurzfristige Verdopplung nach den Vorgaben des Energiekonzepts der Bundesregierung unterstellt. Da die energetische Sanierungsrate im Szenario Energiekonzept den entscheidenden und nahezu ausschließlichen Parameter darstellt, ist bei einer Verfehlung dieser Sanierungsrate das für 2050 angestrebte Klimaschutzziel nicht zu erreichen.

- Anreizprogramme zur Förderung von energetischen Sanierungen oder innovativen Heiztechnologien

Zur Steigerung der energetischen Sanierungsrate ist neben ordnungspolitischen Instrumenten wie der EnEV und dem EEWärmeG auch eine transparente Förderpolitik mit einem langfristig angelegten und verlässlichen Anreizsystem notwendig. Die Bundesregierung veranschlagt in ihrem Energiekonzept 2 Mrd. €/Jahr vor allem für zinsvergünstigte Kredite und Zuschüsse im Rahmen des KfW-Programms „Energieeffizient Sanieren“. Die Mitglieder und Träger der Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz, die von der Deutschen Energieagentur (DENA) initiiert wurde, fordern, dass die Fördermittel des Bundes anstelle von 2 Mrd. € bei jährlich ca. 5 Mrd. € liegen müsste, um den Sanierungsstau zu beheben und die langfristigen Klimaziele zu erreichen [AGEE2011]. Andererseits hat die Bundesregierung aktuell beschlossen, die Fördermittelhöhe des Bundes in den Jahren 2012 bis 2014 entgegen dem Energiekonzept auf einem jährlichen Niveau von 1,5 Mrd. € zu begrenzen. Somit hat die Unsicherheit zur vollständigen Umsetzung der Maßnahmen des Szenarios Energiekonzept tendenziell zugenommen.

Der zunehmende Einsatz von innovativen gasbasierten Heiztechnologien wird im Szenario Innovationsoffensive Gas durch die Festlegung der Substitutionsraten exogen vorgegeben. Es ist davon auszugehen, dass hierzu Anreizprogramme und Informationskampagnen notwendig sind.

- Kostenreduktionen für innovative gasbasierte Heiztechnologien

Die unterstellten Reduktionen der Systemkosten für die innovativen gasbasierten Heiztechnologien sind im Szenario Innovationsoffensive Gas über den Zeitraum 2011 bis 2050 recht groß. Die Kostenreduktion ist ambitioniert, aber in dem gegenwärtigen Entwicklungsstadium der Technologien durchaus möglich. Allerdings bleibt bei der Umsetzung dieser Kostenreduktionen in der Praxis eine gewisse Unsicherheit, da diese auch von der erwarteten Nachfrage abhängig sind.



- Hohe Beimischungsraten von gasförmigen Erneuerbaren zum konventionellem Erdgas und der damit verbundene Preis für das Gasgemisch

Neben den innovativen gasbasierten Heiztechnologien stellt der erhöhte Einsatz von gasförmigen Erneuerbaren im Gasgemisch einen wesentlichen Bestandteil des Szenarios Innovationsoffensive Gas dar. Die Auswirkungen des mit steigendem Anteil der Erneuerbaren wachsenden Preises für das Gasgemisch wurden hinsichtlich des Nachfrageverhaltens der Akteure im Szenario nicht analysiert. Die Netzkosten blieben im Szenario unverändert. Diese Aspekte können tendenziell zur Einschränkung des im Szenario ausgewiesenen Potenzials für gasförmige Erneuerbare führen. Auch in diesem Fall ist ein Anreizsystem für die Integration von Power-to-Gas-Technologien ähnlich wie beim Biogas mit der Anpassung des regulatorischen Rahmens notwendig. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass Kosten aus Dienstleistungen wie die Speicherung von erneuerbarem Strom auch auf das Stromnetz umgelegt werden, um einseitige Belastungen des Energieträgers Gas und daraus Hemmnisse zu vermeiden.

- Verkürzung des Erneuerungszyklus für Heizungssysteme

Mögliche technische Einsatzprobleme durch größere Beimischungen von erneuerbaren Gasen zum konventionellen Erdgas werden im Szenario Innovationsoffensive Gas durch die Verkürzung des Erneuerungszyklus für Heizungssysteme von im Mittel 25 auf 20 Jahre behoben. Durch diese Maßnahme sollen ältere Heizungssysteme, die technisch möglicherweise nicht mit dem erwarteten Gasgemisch betrieben werden können, früher ausgetauscht werden. Auch bei dieser Maßnahme ist davon auszugehen, dass für eine signifikante Umsetzung gezielte Förderprogramme notwendig sind.

Die vorhergehende Analyse umfasst auftragsgemäß nur den Wohngebäudebereich der privaten Haushalte und liefert kein geschlossenes Szenariobild, das alle Energiesektoren umfasst. So müsste beispielsweise der Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen in seinen Wechselwirkungen zur sonstigen Stromwirtschaft (Erzeugungspark, Netze) sowie die emissionsmindernde Integration erneuerbarer gasförmiger Energieträger auf die Sektoren Industrie, Gewerbe und Mobilität detailliert untersucht werden, um allen Facetten dieser Problematik gerecht zu werden. Auch die volkswirtschaftlichen Implikationen bedürften einer eingehenden Analyse, die auch Budgeteffekte des Staates in den Blick nimmt.

## 9 Zielgruppenorientierte Handlungsempfehlungen

In diesem Abschnitt sollen aufbauend auf den Ergebnissen der Studie Handlungsempfehlungen für eine kurz- und mittelfristige umsetzbare ökologische sinnvolle und ökonomisch tragbare Umgestaltung der häuslichen Energieversorgung gegeben werden. Dabei sind die Handlungsempfehlungen aus dem Vergleich der Szenarien aber besonders aus dem Szenario Innovationsoffensive Gas abgeleitet worden. Diese Handlungsempfehlungen sind im Folgenden nach Zielgruppen geordnet. Für die Autoren dieser Studie existieren im Zusammenhang mit der Energieversorgung von Wohngebäuden drei wesentliche Zielgruppen:

- politische Entscheidungsträger, die in der Lage sind, den legislativen Rahmen durch Anreize und Ordnungsrecht für Energieversorger und Energienutzer zu schaffen,
- wirtschaftliche Entscheidungsträger insbesondere in Unternehmen der Energieversorgung, welche für Unternehmensstrategien verantwortlich sind sowie
- private Wohnungseigentümer, welche sich für die Erneuerung der Energieversorgung und die energetische Sanierung ihres Wohneigentums nach ihren eigenen finanziellen Möglichkeiten und ökologischen Gesichtspunkten entscheiden müssen.

### 9.1 Politische Entscheidungsträger

Die Ziele des Energiekonzeptes der Bundesregierung gehen von sehr ambitionierten energetischen Sanierungsraten aus. Die Analyse der Sanierungsergebnisse der vergangenen Jahre zeigt aber, dass die energetische Sanierungsrate bei den gegenwärtig existierenden politischen Maßnahmen mit knapp 1 % pro Jahr sehr niedrig ist (vgl. Kapitel 7.3.2). Daraus abgeleitet, erscheint eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate, wie sie das Energiekonzept vorsieht, ohne Ordnungsrecht und sehr hohen Förderungen außerordentlich ambitioniert und kaum durchsetzbar. In diesem Kontext ist es fraglich, ob das Ziel der Bundesregierung allein durch die energetische Sanierung der Wohngebäude erreicht werden kann. Die Sensitivitätsanalysen der Szenarien zeigen auch, dass gerade die Sanierungsrate und ihre Effizienz den höchsten Einfluss auf die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen haben. Bei Nichterreichen der

Sanierungsrate wird deshalb die gewollte CO<sub>2</sub>-Einsparung im Wohngebäudebereich weit verfehlt werden.

Die Autoren dieser Studie empfehlen aus diesem Grund eine deutliche Erweiterung des Katalogs, insbesondere auf solche Maßnahmen, mit denen sich die Ziele einfacher bzw. mit geringeren Kosten durchsetzen lassen.

Zu diesem Katalog sollten die folgenden Maßnahmen gehören:

#### 1. Energetische Sanierung von Gebäuden

Die energetische Sanierung des Gebäudebestandes sollte auf einen Zielwert von 1,5 %/a der bestehenden Wohngebäudefläche ausgerichtet sein. Dazu sind flankierende Anreizprogramme zur finanziellen Unterstützung von Sanierungsmaßnahmen bei einem gleichzeitigen Effizienznachweis für die Inanspruchnahme von Förderungen zu schaffen.

- Erweiterung des bestehenden Anreizprogramms für Wohngebäude-sanierungen
- Verbesserung des Vollzugs der bestehenden EnEV 2009 bei Altbausanierungen,, Erweiterung der Energieausweispflicht

#### 2. Verstärkte Erneuerung der Gebäudeenergieversorgung durch moderne Hocheffizienztechnologien (KWK, Solarthermie, Wärmepumpen)

Analog zur Gebäudesanierung sind bestehende Anreizprogramme für den Ersatz von veralteten Heizungssystemen zu erweitern und diese gegebenenfalls ordnungsrechtlich zu verankern. Zielstellung sollte eine technologieoffene, an der Primärenergieeffizienz des Systems ausgerichtete Förderung sein. Darin sollten der Anteil der eingebundenen Umweltwärme (Solar, oberflächennahe Geothermie, Außenluft) und des erzeugten Stromes mit KWK-Systemen sowie die Gebäudegröße (Verbrauchsstruktur und Vermeidung von Überdimensionierung) Berücksichtigung finden. Die in der EnEV vorgesehenen Energieausweise sollten auf die Heizungstechnik ausgeweitet werden.

- Erweiterung des EEWärmeG um die anteilige Nutzung von erneuerbaren Gasen zur Energieversorgung (Wärme und Strom) von Haushalten,
- Erweiterung und Weiterentwicklung von bestehenden Marktanzreizprogrammen

#### 3. Verstärkte Integration erneuerbarer gasförmiger Energieträger in die Gasinfrastruktur (Biogas, SNG, PtG)

Die genannten Energieträger müssen Berücksichtigung im EEG finden. Die Nutzung sollte technologieoffen sein. Einschränkungen der Förderung auf einzelne Nutzungspfade führen zu Hemmnissen bei der Marktintegration. Dabei sind auch hier Förderinstrumente zu schaffen, die sich an der Vermeidung von fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen orientieren. Die Umwälzung von Kosten der Integration von erneuerbaren Energieträgern ist deutschlandweit sicherzustellen zur Vermeidung einer regionalen Überbelastung bzw. der Überbelastung der gasförmigen Energieträger. Um die Nachhaltigkeit der Maßnahmen zu sichern, ist ein Zertifizierungssystem für die Erzeugung der erneuerbaren gasförmigen Energieträger aufzubauen.

- Novellierung EEG, GasNZV, Entwicklung eines Gaseinspeisegesetzes
- Entwicklung von spezifischen Förderinstrumenten für PtG-Gase und SNG

Neben den Maßnahmen die direkt auf einzelne Technologien bzw. Energieträger gerichtet sind, sollten Hemmnisse abgebaut werden, die die Markteinführung und –durchdringung der genannten Energieträger oder der Technologien behindern. Diese ergeben sich im Wesentlichen aus der gemeinsamen Betrachtung der verschiedenen Elemente der Energieversorgung, wie die Erzeugung/Bereitstellung unterschiedlicher Energieträgern, der Verteilung der Energieträger (Strom- und Gasnetz), dem effizienten Einsatz beim Endverbraucher und der Verbesserung der Gebäudehülle.

- Vereinheitlichung der Gesetzgebung für klimaschützende Maßnahmen wie die Erzeugung und den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern, die Förderung effizienter Technologien und die energetische Sanierung von Wohngebäuden zur Vermeidung von konkurrierenden Instrumenten
- Verbesserung der Genehmigungspraxis von Erzeugungsanlagen erneuerbarer gasförmiger Energieträger
- Vereinfachung der Fördermittelbeantragung und -gewährung für hoch-effiziente Heizungstechnologien
- Entwicklung von Informationskampagnen für Verbraucher hinsichtlich der energieeffizienten Gebäudesanierung, des Einsatzes moderner Heizungstechnologien und der Nutzung erneuerbarer gasförmiger Energieträger

## 9.2 Entscheidungsträger in der Energieversorgung

Die Maßnahmen zur Energiewende, die sich im Einflussbereich der Entscheidungsträger der Wirtschaft befinden, basieren auf den regulatorischen Rahmenbedingungen die durch die Politik gesetzt werden. Dies ist vor dem Kontext der Liberalisierung des Gasmarktes zu sehen, aus dem sich neue Marktpartner mit unterschiedlichen Interessen ergeben. Während die Frage der Sanierung der Gebäudehülle außerhalb des Einflussbereiches der Energieversorgung liegt, kommt dieser Gruppe die Aufgabe zu, erneuerbare gasförmige Energieträger zu erzeugen, im Gasnetz aufzunehmen und beim Endverbraucher bereitzustellen. Gemäß dieser Betrachtungsweise müssen verschiedene Marktpartner zusammenwirken, dies sind: Erzeuger bzw. Produzenten erneuerbarer gasförmiger Energieträger, Netzbetreiber sowie Vertreiber des Energieträgers Gas beim Endkunden. Folgende Maßnahmen wären notwendig:

- Konsequente Ausrichtung der eigenen Unternehmensstrategie auf die Erzeugung, Verteilung und Bereitstellung der EE-Gase beim Endverbraucher. Einerseits müssen sich neue Marktpartner auf der Erzeugungsseite bilden, dies trifft neben SNG und PtG auch auf die sich im Wachstum befindliche Biogasbranche zu. Andererseits müssen die Netzbetreiber und Vertreiber der Energie neue Geschäftsfelder für EE-Gase entwickeln. Allein eine solche Strategie wird langfristig die Energiewende hin zu Erneuerbaren Energieträgern sichern. Nur dann bleibt die Bedeutung des Industriezweiges Gasversorgung mit seinem Anlagevermögen erhalten.
- Die Übernahme von EE-Strom durch PtG-Technologien sowie der verstärkte Einsatz von hocheffizienten KWK-Technologien erfordern eine enge Zusammenarbeit von Strom und Gasnetzbetreibern. Insbesondere in diesem Bereich sind die Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Netze mit IKT, zum Ausbau der Netze und zum übergreifenden Netzmanagement zwischen den Netzen abzustimmen und gemeinsam zu regeln.
- Aus den vorgenannten Gründen ist es jetzt wichtig, Pilotprojekte für moderne Energieversorgungssysteme aufzulegen, um diese Technologien zu erproben und daran neue Marktmodelle zu entwickeln.
- Bedingt durch die Veränderung der Gaszusammensetzung durch die Integration der erneuerbaren gasförmigen Energieträger ergibt sich die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung des technischen Regelwerks (Gas, Strom, Gerätehersteller). Diese Weiterentwicklung bezieht sich auch auf alle anderen Bereiche des Energieeinsatzes (Industrie, Gewerbe und Mobilität). Insbesondere für die Bereiche außerhalb der Gebäudeenergie-

versorgung ergeben sich daraus erhebliche neue Potenziale zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aber auch Herausforderungen für die Anpassung bestehender Technologien.

- Gemeinsam mit den politischen Entscheidungsträgern ist es notwendig, ein Zertifizierungssystem für die nachhaltige Erzeugung von erneuerbaren Energieträgern zu entwickeln, um Fehlallokationen, Mitnahmeeffekte und Fehlentwicklungen zu vermeiden.
- Entwicklung von Contracting-Modellen für eine moderne häusliche Energieversorgung (Hocheffizienztechnologien und EE)  
Neue Hocheffizienztechnologien zeichnen sich bei ihrer Markteinführung häufig durch einen höheren Preis aus. Ein Weg zur Einführung sind Investitionsförderungen für den Endnutzer (vgl. Kapitel 9.1). Dennoch können Geschäftsmodelle zum Contracting von Energieversorgungsanlagen in privaten Haushalten die Marktdurchdringung entscheidend befördern. Mit Hilfe von Contracting-Modellen können die Fragen der Finanzierung größerer Investitionen, der Wartung und des rechtzeitigen Austauschs durch effizientere Geräte außerhalb der Investitionsmöglichkeiten des privaten Nutzers gelöst werden.
- Ausbildung von Marktpartnern (Installateure)  
Ein wesentlicher Multiplikator in der Schnittstelle zum Verbraucher und zur Umsetzung der Energiewende sind die Installateure der Heizungssysteme in Wohngebäuden. Der Aus- und Weiterbildung dieser Marktpartner kommt eine wesentliche Schlüsselposition zu. Außerdem ändert sich das Berufsbild durch den spartenübergreifenden Charakter der modernen Heizungssysteme. Neben den politischen Entscheidungsträgern sollten sich auch Energieversorger an solchen Weiterbildungsmaßnahmen beteiligen.

### **9.3 Private Verbraucher, Haushalte**

Private Haushalte sind als Endverbraucher einerseits den gesetzlichen Regelungen und andererseits den eigenen finanziellen Möglichkeiten unterworfen. Die Erfahrungen aus den vergangenen Jahren lehren, dass häufig die Hürden einer hohen Anfangsinvestition – trotz der möglichen Energiekostensenkung in der Folgezeit – die Umsetzung von energiesparenden Maßnahmen verhindern. Dies trifft sowohl für die Sanierung von Gebäuden als auch für die Erneuerung des Heizungssystems zu. Auch in diesem Bereich herrschen Unsicherheit und Unkenntnis über die Auswirkungen und Potenziale von Energiesparmaßnahmen.

Es ist deshalb von immenser Bedeutung, private Haushalte zu sensibilisieren über:

- den energetischen Zustand des eigenen Gebäudes und der häuslichen Energieversorgung;
- Energieeinsparmöglichkeiten durch wärmedämmende Maßnahmen und durch effizientere Heizungssysteme aber auch durch das Verhalten der Nutzer.

Diese Sensibilisierung muss bereits bei der Ausbildung der Kinder stattfinden. Das Bewusstsein über eine effiziente Nutzung von Energieressourcen ist auch im Erwachsenenalter durch Informationskampagnen (vgl. Kapitel 9.1) aufzufrischen und aufrecht zu erhalten.

## 10 Forschungsbedarf

### **Systemanalytische Untersuchung der Gebäudeenergieversorgung**

Im Rahmen der Studie konnten einige Fragen zum Verständnis der Wirkungen verschiedener Maßnahmen nicht vollständig geklärt werden. Dazu gehören:

- die Auswirkungen von kreditfinanzierten Investitionen und der Nutzung von Förderprogrammen auf das Entscheidungskalkül der privaten Verbraucher; Erkenntnisse der Entscheidungsbildung bei privaten Verbrauchern tragen wesentlich dazu bei, Fördermaßnahmen zu priorisieren und effizient zu gestalten;
- die Berücksichtigung der Altersstruktur und Vermögen der Haushalte;
- der Effekt des Anteils des dezentralen Energieversorgungsbereichs im Mehrfamiliengebäudebestand auf die Innovationsoffensive Gas;
- die Auswirkungen der Innovationsoffensive auf den Nicht-Wohngebäudebestand;
- die Wirkungen der Szenarioanalysen auf den Staatshaushalt;
- die Entwicklung eines konsistenten Gesamtbildes, welches alle Energiesektoren umfasst und insbesondere deren Wechselwirkungen in den Blick nimmt.

### **Systemanalytische Untersuchung der gesamten Energieversorgung:**

Während der Bearbeitung des Projektes haben sich die Autoren der Studie im Wesentlichen auf den Bereich der Wohngebäudeenergieversorgung konzentriert, wenngleich auch die Versorgung mit Energieträgern einen wesentlichen Raum einnahm. Dies zeigt, dass die Betrachtung einzelner Bereiche allein nur einen beschränkten Blick auf zukünftige Entwicklungen erlaubt. Die Erweiterung des Untersuchungsbereiches hat aber auch ein erhebliches Potenzial und weitere Maßnahmen zur Senkung von fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgedeckt. Nicht zuletzt konnten dadurch auch Wege aufgezeigt werden, die gleiche Wirkungen bei wesentlich geringeren Kosten aufweisen.

Gerade durch die Integration der erneuerbaren gasförmigen Energieträger in die Bereiche Industrie, Gewerbe und Mobilität können wesentliche Potenziale zur Senkung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen gehoben werden. Insbesondere in diesen Bereichen bestehen deutlich geringere Möglichkeiten zur Energieeinsparung als



sie in der Gebäudesanierung möglich sind, was die Bedeutung des gesteigerten Einsatzes Erneuerbarer Energien unterstreicht.

Aus Sicht der Autoren ist es deshalb zwingend erforderlich, die Betrachtung auch auf die Bereiche Industrie, Gewerbe und Mobilität auszudehnen und auch für diese Bereiche den Sektor der Stromversorgung einzubeziehen. Dadurch können die Auswirkungen der Maßnahmen aus der Innovationsoffensive Gas auf den Ausbau und das Zusammenwirken der Strom- und Gasnetze beurteilt werden. Nur die komplexe Untersuchung der Auswirkung auf alle Bereiche erlaubt ein vollständiges und konsistentes Bild über die in dieser Studie dargestellten Maßnahmen.

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Energieträgereinsatz zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser in den betrachteten Szenarien, Quelle: [EGP2010], [IRZ2009], [ZIES2011], eigene Berechnungen .....	14
<b>Abbildung 2:</b>	Struktur des FZJ-Wohngebäudesimulationsmodells .....	27
<b>Abbildung 3:</b>	Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser der privaten Haushalte von 1990 bis 2009 [AGEB2011a] .....	35
<b>Abbildung 4:</b>	Gebäude- und Heizungsstruktur der Analyse .....	36
<b>Abbildung 5:</b>	Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Einfamilienhäuser im Szenario Trend und Innovationsoffensive Gas in kWh/a .....	37
<b>Abbildung 6:</b>	Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Mehrfamilienhäuser im Szenario Trend und Innovationsoffensive Gas in kWh/a .....	38
<b>Abbildung 7:</b>	Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Einfamilienhäuser im Szenario Energiekonzept in kWh/a .....	38
<b>Abbildung 8:</b>	Jahresheizwärmebedarf des jeweiligen Gebäudetyps der Mehrfamilienhäuser im Szenario Energiekonzept in kWh/a .....	39
<b>Abbildung 9:</b>	Heizkesselbestand in privaten Haushalten am 31.12.2009.....	40
<b>Abbildung 10:</b>	Entwicklung der Bevölkerungszahlen in Deutschland nach der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamts [STBA2010].....	42
<b>Abbildung 11:</b>	Entwicklung der Bevölkerungszahlen, Haushaltszahlen und Wohnfläche im Zeitraum 1990 bis 2009 [BMWi2011] .....	43
<b>Abbildung 12:</b>	Altersspezifische Wohnflächennachfrage in den Jahren 1992 und 2007 [IDW2009] .....	43
<b>Abbildung 13:</b>	Systemnutzungsgrade konventionell modulierender Heiztechnologien im EFH.....	55
<b>Abbildung 14:</b>	Systemnutzungsgrade konventionell taktender und innovativ bivalenter Heiztechnologien im EFH .....	55
<b>Abbildung 15:</b>	Systemnutzungsgrade innovativ bivalenter Heiztechnologien (KWK) im EFH .....	56

<b>Abbildung 16:</b> Systemnutzungsgrade aller Heiztechnologien im MFH.....	57
<b>Abbildung 17:</b> Systemkosten konventioneller Heiztechnologien im EFH .....	59
<b>Abbildung 18:</b> Systemkosten innovativer Heiztechnologien im EFH.....	60
<b>Abbildung 19:</b> Systemkosten konventioneller Heiztechnologien im MFH .....	61
<b>Abbildung 20:</b> Systemkosten innovativer Heiztechnologien im EFH.....	61
<b>Abbildung 21:</b> Mittlere Substitutionsraten neuer Heizungssysteme nach der Analyse des Modernisierungsmarkts im Zeitraum von 2005 bis 2009 .....	62
<b>Abbildung 22:</b> Gesamtgasverbrauch für die betrachteten Szenarien.....	70
<b>Abbildung 23:</b> Volumenanteile der EE-Gase im Gasgemisch des Szenarios Trend.....	71
<b>Abbildung 24:</b> Entwicklung der Biomethanproduktion in den Szenarien .....	72
<b>Abbildung 25:</b> Prognose der Einspeisemengen von SNG.....	74
<b>Abbildung 26:</b> Gaszusammensetzung im Szenario Energiekonzept.....	74
<b>Abbildung 27:</b> Prognose der Erzeugung von PtG-Gasen aus EE-Strom im Szenario Innovationsoffensive Gas.....	76
<b>Abbildung 28:</b> Gaszusammensetzung des Szenarios Innovationsoffensive Gas .....	77
<b>Abbildung 29:</b> Entwicklung des spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktors für die Gasgemische in den jeweiligen Szenarien.....	78
<b>Abbildung 30:</b> Schematische Darstellung der Methodik zur Ermittlung der CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	83
<b>Abbildung 31:</b> Entwicklung des Energieverbrauchs für Raumwärme- und Warmwassererzeugung in den Szenarien .....	97
<b>Abbildung 32:</b> Flächenspezifischer Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in den Szenarien .....	100
<b>Abbildung 33:</b> Stromverbrauch der Haushalte und Stromerzeugung durch Mikro-KWK-Anlagen im Szenario Innovationsoffensive Gas [EGP2010, eigene Ber.] .....	102
<b>Abbildung 34:</b> Kumulierte Endenergieeinsparungen (2010-2050) für Raumwärme und Warmwasser der Szenariovarianten im Vergleich zum Szenario Trend.....	105

<b>Abbildung 35:</b> Jährliche Endenergieeinsparungen für Raumwärme- und Warmwassererzeugung, Szenario Energiekonzept: Vergleich mit ES0 .....	106
<b>Abbildung 36:</b> Jährliche Endenergieeinsparungen für Raumwärme- und Warmwassererzeugung, Szenario Innovationsoffensive Gas: Vergleich mit IS0.....	106
<b>Abbildung 37:</b> Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in den Szenarien.....	108
<b>Abbildung 38:</b> Jährliche Energieeinsparungen gegenüber dem Szenario Trend.....	109
<b>Abbildung 39:</b> Jährliche Emissionseinsparungen gegenüber dem Szenario Trend.....	109
<b>Abbildung 40:</b> Kumulierte Emissionseinsparungen (2010 bis 2050) im Vergleich zum Szenario Trend.....	113
<b>Abbildung 41:</b> Kumulierte CO <sub>2</sub> -Emissionen aus den einzelnen Bereichen und die kumulierte vermiedene CO <sub>2</sub> -Emission für den Zeitraum von 2010 bis 2050.....	115
<b>Abbildung 42:</b> Änderung der Gesamtkosten im Vergleich zum Szenario Trend.....	120
<b>Abbildung 43:</b> Änderung der einzelnen Kostenelemente (kumuliert) im Vergleich zum Szenario Trend.....	123

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Ausgewählte Rahmendaten aktueller Projektionen [EGP2010], [IRZ2009].....	11
<b>Tabelle 2:</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen der privaten Haushalte (in Mio. t) in ausgewählten Projektionen, Quelle: [EGP2010], [IRZ2009], [ZIES2011], eigene Berechnungen .....	12
<b>Tabelle 3:</b>	Spezifischer Raumwärmebedarf (in kWh/m <sup>2</sup> ) über alle Gebäude, Quelle: [EGP2010], [IRZ2009], [ZIES2011], eigene Berechnungen.....	14
<b>Tabelle 4:</b>	Kurzcharakterisierung der Szenarien.....	16
<b>Tabelle 5:</b>	Übersicht der Maßnahmen in den Szenarien.....	19
<b>Tabelle 6:</b>	Wärmetechnische Kennzahlen (U-Wert in W/(m <sup>2</sup> K) für Bauteile der Gebäudehülle differenziert nach Baualtersklassen für den Wohngebäudebestand 2010.....	36
<b>Tabelle 7:</b>	Entwicklung der Wohnfläche bis 2050 [STBA2010, Variante 1-W1 Untergrenze; eigene Berechnungen].....	44
<b>Tabelle 8:</b>	Bestandsveränderungen in der Wohnfläche (alle Angaben in Mrd. m <sup>2</sup> ) .....	45
<b>Tabelle 9:</b>	Renovierungszyklen der Bauteile der Gebäudehülle und mittlere Sanierungsraten nach [HANSEN2009] .....	46
<b>Tabelle 10:</b>	Vergleich der energetischen Sanierungsraten und sanierten Wohnflächen in den Szenarien Innovationsoffensive Gas und Energiekonzept .....	47
<b>Tabelle 11:</b>	Systemarten und Betriebsweisen der eingesetzten Technologien im EFH.....	49
<b>Tabelle 12:</b>	Kurzbezeichnung der eingesetzten Systeme im EFH .....	49
<b>Tabelle 13:</b>	Eckdaten der betrachteten Heiztechnologien für das EFH.....	51
<b>Tabelle 14:</b>	Kurzbezeichnung der eingesetzten Systeme im MFH .....	52
<b>Tabelle 15:</b>	Eckdaten der betrachteten Heiztechnologien für das MFH.....	53
<b>Tabelle 16:</b>	Austauschraten von heizölbasierten Heizungssystemen in den Szenarien Trend und Energiekonzept (alle Angaben in %).....	63

<b>Tabelle 17:</b>	Austauschraten von erdgasbasierten Heizungssystemen in den Szenarien Trend und Energiekonzept (alle Angaben in %)	64
<b>Tabelle 18:</b>	Austauschraten von heizölbasierten Heizungssystemen im Szenario Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %)	65
<b>Tabelle 19:</b>	Austauschraten von erdgasbasierten Heizungssystemen im Szenario Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %)	66
<b>Tabelle 20:</b>	Referenzpreis-Projektionen für Rohöl, Erdgas und Steinkohle [EGP2010]	78
<b>Tabelle 21:</b>	Energiepreisprojektion für private Haushalte (inkl. Steuern und Abgaben, konstant bis 2050)	79
<b>Tabelle 22:</b>	Produktionskosten der verschiedenen Gasbestandteile (alle Angaben in ct/kWh)	81
<b>Tabelle 23:</b>	Verbraucherpreise in ct/kWh für die szenarioabhängigen Gasgemische inklusive Steuern und Abgaben	82
<b>Tabelle 24:</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen der Brennstoffe (bezogen auf Brennwert, alle Angaben in g/kWh)	84
<b>Tabelle 25:</b>	Deutscher Strommix für das Szenario Trend (alle Angaben in %)	87
<b>Tabelle 26:</b>	Deutscher Strommix für das Szenario Energiekonzept (alle Angaben in %)	87
<b>Tabelle 27:</b>	Deutscher Strommix für das Szenario Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %)	88
<b>Tabelle 28:</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen bei der Stromerzeugung für den Deutschen Strommix bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh)	89
<b>Tabelle 29:</b>	Wirkungsgrade bezogen auf den Lebensweg an der Systemübergabegrenze Hauswand bei der Stromgestehung ohne Abwärmenutzung (alle Angaben in %)	90
<b>Tabelle 30:</b>	Summe CO <sub>2</sub> -Emissionen des deutschen Strommixes für das Szenario Trend bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh)	90
<b>Tabelle 31:</b>	Summe CO <sub>2</sub> -Emissionen des deutschen Strommixes für das Szenario Energiekonzept bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh)	91

<b>Tabelle 32:</b>	Summe CO <sub>2</sub> -Emissionen des deutschen Strommixes für das Szenario Innovationsoffensive Gas bezogen auf elektrische Energie (alle Angaben in g/kWh) .....	91
<b>Tabelle 33:</b>	Deutscher Wärmemix für die Szenarien Trend und Energiekonzept (alle Angaben in %) .....	92
<b>Tabelle 34:</b>	Deutscher Wärmemix für die Szenarien Innovationsoffensive Gas (alle Angaben in %) .....	92
<b>Tabelle 35:</b>	Thermische Wirkungsgrade der Umwandlungsprozesse bei der Wärmeerzeugung für Nah- und Fernwärme (alle Angaben in %) .....	93
<b>Tabelle 36:</b>	Elektrische Wirkungsgrade der Umwandlungsprozesse bei der Wärmeerzeugung für Nah- und Fernwärme (alle Angaben in %) .....	93
<b>Tabelle 37:</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen des deutschen Wärmemixes für das Szenario Trend bezogen auf thermische Energie (alle Angaben in g/kWh) .....	94
<b>Tabelle 38:</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen des deutschen Wärmemixes für das Szenario Energiekonzept bezogen auf thermische Energie (alle Angaben in g/kWh) .....	94
<b>Tabelle 39:</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen des deutschen Wärmemixes für das Szenario Innovationsoffensive Gas bezogen auf thermische Energie (alle Angaben in g/kWh) .....	95
<b>Tabelle 40:</b>	Endenergieeinsatz für Raumwärme- und Warmwassererzeugung nach Energieträgern in den Szenarien .....	99
<b>Tabelle 41:</b>	Stromerzeugung aus Mikro-KWK-Anlagen in den Szenarien (alle Angaben in PJ) .....	101
<b>Tabelle 42:</b>	Analysierte Sensitivitäten .....	102
<b>Tabelle 43:</b>	Kumulierte jährliche Energie- und Emissionseinsparungen gegenüber dem Trendszenario .....	110
<b>Tabelle 44:</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionsgutschriften (Jahr 2050) für Mikro-KWK in den Szenarien (in Mio. t CO <sub>2</sub> ) .....	111
<b>Tabelle 45:</b>	CO <sub>2</sub> Emissionen in 10 <sup>6</sup> t CO <sub>2</sub> kumuliert über den Zeitraum 2010 - 2050 im Vergleich der Szenarien .....	114

<b>Tabelle 46:</b>	Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen in % gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 .....	114
<b>Tabelle 47:</b>	Kumulierte Mehrkosten der Szenarien Energiekonzept und Innovationsoffensive Gas im Vergleich zum Szenario Trend (Barwerte im Zeitraum 2010 bis 2050) .....	118
<b>Tabelle 48:</b>	Kumulierte Mehrkosten der Szenarien Energiekonzept und Innovationsoffensive Gas sowie der Sensitivität IS3 im Vergleich zum Szenario Trend (Barwerte, Zeitraum 2010 bis 2050) .....	124
<b>Tabelle 49:</b>	Spezifische Kosten für die Wärmedämmung im Bestand differenziert nach Differenzinvestitionen und Vollkosten in €/m <sup>2</sup> sanierte Wohnfläche gemäß dem Energiestandard der EnEV 2009 (Kosten nach [ENP2011]) .....	126
<b>Tabelle 50:</b>	Investitionskosten für Wärmedämmungen im Bestand und Differenzkosten im Vergleich mit dem Trendszenario (Barwerte in Mrd. €, Zeitraum 2010 bis 2050) .....	127
<b>Tabelle 51:</b>	Spezifische Vermeidungskosten der Szenarien Energiekonzept und Innovationsoffensive Gas sowie der Sensitivität IS3 im Vergleich zum Trend unter Einbeziehung der Emissionen der Vorketten (Barwerte, Betrachtungszeitraum 2010 bis 2050) .....	130



## Literaturverzeichnis

- [AGEB2011] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Vorwort zu den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland. <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=5>; Stand: August 2010, Abruf: 27.05.2011
- [AGEB2011a] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Auswertungstabellen zur Energiebilanz in Deutschland 1990 bis 2010; <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139>; Stand: 29.07.2011
- [AGEE2011] Energieeffizienz in Gebäuden – der Schlüssel zur Umsetzung des Energiekonzepts, Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz; Positionspapier der Deutschen Energieagentur (DENA); [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Download/Pressemitteilungen/2011/Positionspapier\\_Allianz\\_GEE.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Pressemitteilungen/2011/Positionspapier_Allianz_GEE.pdf), v. 06.05.2011
- [ATG2011] Atomgesetz (ATG); Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren, v. 08. November 2011; BGBl. I S. 2178
- [BDH2010] Jesse, K.: Trends und Herausforderungen im Wärmemarkt. Jahrespressekonferenz des Bundesindustrieverbands Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V. (BDH), Köln, 26.01.2010
- [BEI2007-2010] Effekte des KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms 2005 bis 2009. Gutachten im Auftrag der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), Arbeitsgemeinschaft Bremer Energie Institut (BEI), Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), Institut für Statistik der Universität Bremen, Bremen, 2007 - 2010
- [BETT2011] Bettgenhäuser, K., Boermanns, Th.: Umwelt-wirkung von Heizungssystemen in Deutschland. Climate Change Report 02/2011, Studie der ECOFYS GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2010, Förderkennzeichen: 370841150
- [BHKW2011] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: BHKW-Kenndaten 2011, Kaiserslautern, 2011
- [BMWi2010] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. BMWi, 28.09.2010

- [BMW2011] Zahlen und Fakten der Energiedaten, Statistik des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/Energiedaten/gesamtausgabe.html>, v. 27.05.2011
- [BNA2011] Doerr, H.: Monitoringbericht 2010. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, [www.bundesnetzagentur.de](http://www.bundesnetzagentur.de), Bonn, 2011
- [CARMEN2011] Preisentwicklung für Holzpellets zur Festlegung des Preises im Jahr 2010, Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing und Entwicklungs-Netzwerk, [http://www.carmen-ev.de/dt/energie/pellets/pelletpreis\\_jahresmittelwerte.html](http://www.carmen-ev.de/dt/energie/pellets/pelletpreis_jahresmittelwerte.html); Stand 24.03.2011
- [CLI2010] Matthes, F. Chr. et al.: Politiksszenarien für den Klimaschutz V - auf dem Weg zum Strukturwandel; Treibhausgas-Emissions-szenarien bis zum Jahr 2030, Herausgeber: Hansen, P. und Matthes, F. Chr., Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 62, Jülich, 2010
- [DENA2011] [www.biogaspartner.de](http://www.biogaspartner.de)
- [DVGW2008] Technische Regel Arbeitsblatt G 260 „Gasbeschaffenheit“, DVGW, Stand 05/2008
- [DVGW2012] Erler, R.; Köppel, W.; Kiefer, J.; Pflaum, H.: Potenzialstudie zur nachhaltigen Erzeugung und Einspeisung gasförmiger, regenerativer Energieträger in Deutschland (Biogasatlas), DVGW-Forschungsprojekt, Forschungskennzeichen GW2/01/10, Laufzeit: 12/2010 – 11/2012
- [DVGW2012a] Müller-Syring, G.; Köppel, W.; Sterner, M.: Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan in das Erdgasnetz, DVGW-Forschungsprojekt, Forschungskennzeichen G1/07/10, Laufzeit: 10/2010 – 03/2012
- [EGP2010] Schlesinger, M. et al.: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studie von ewi/gws/prognos im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft und Technologie, Abschlussbericht, Projekt Nr. 12/10, Berlin, 2010
- [ENP2011] Hottgenroth: Energieberater Professional – Version 7.1. Hottgenroth Software GmbH & Co KG, Köln, 2011

- [EnWG2011] Energiewirtschaftsgesetz – EnWG: Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung, Stand: Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 28.7.2011, BGBl. I S. 1690.
- [EVS2008] Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2008, Haus- und Grundbesitz sowie Wohnverhältnisse privater Haushalte, Fachserie 15, Sonderheft 1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2008
- [GASW2002] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Gaswärmepumpen, Kaiserslautern, 2002
- [GNZV2010] Gasnetzzugangsverordnung – GasNZV, Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen, v. 3. September 2010, BGBl. I S. 1261
- [HANSEN2009] Hansen, P.: Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Gebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale bis 2030. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 48, Jülich, 2009
- [IDW2009] Auswirkungen des demographischen Wandels auf die Wohn- und Büroimmobilienmärkte, Institut der Deutschen Wirtschaft, Deutscher Instituts-Verlag; Köln, 2009
- [IRZ2009] IER/rwi/ZEW: Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 (Energieprognose 2009), Studie im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft und Technologie, Projektnr. 23/08, Berlin, 2010
- [KLEE2005] Kleemann, M.; Hansen, P.: Evaluierung der CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen im Gebäudebereich. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe Umwelt, Band 60, Jülich, 2005
- [KRAU2010] Krause, H.; Müller-Syring, G.: Erdgasnetz als Speicher für Regenerative Energie. In: gwf, 11/2010, Oldenbourg Verlag
- [LEST2010] DLR/Fraunhofer/IfnE: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU, Dezember 2010

- [MARK2010] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Marktübersicht Gaswärmepumpen 2010, Berlin, 02/2010
- [MLR2011] Ministerium für ländlichen Raum Baden-Württemberg MLR: Systemanalyse biogene Gase, in Bearbeitung, voraussichtlicher Abschluss 2012
- [NAH2008] Fritsche, U. R., Rausch, L.: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes UBA, In: Climate Change 08/2008
- [NAH2011] Wolff, D., Jagnow, K.: Untersuchungen von Nah- und Fernwärmenetzen - Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung, FH Wolfenbüttel/Braunschweig, nur online unter [www.delta-q.de](http://www.delta-q.de), 2011
- [SANI2011] Burmeister, F., Bruch, J., Brauner, J., Feldpausch-Jägers, S.; Sanierungskonzepte für Mehrfamilienhäuser, Gaswärme Institut e.V., Essen, 2011
- [STBA2007] Entwicklung der Privathaushalte bis 2025, Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung 2007, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2007
- [STBA2010] Bevölkerung Deutschlands bis 2060, 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2010
- [SYST2010a] Köppel, W.; Buchholz, D.; Götz, M.; Kussin, P.; Wonneberger, A.-M.: Bewertung der Energie-versorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern - Analyse der Energiefluss-ketten der zentralen Erzeugungsketten, Abschlussbericht, DVGW G5/04/09-TP1-A Bonn, 2010
- [SYST2010b] Fischer, M., Scherber, B., Burmeister, F.: Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern- Analyse der Energieflussketten der dezentralen Erzeugungsketten, Abschlussbericht, DVGW G5/04/09-TP1-B, Bonn, 2010

- [SYST2010c] Krause, H.; Erler, F.: Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern - Nachfragestruktur, Bedarfs- und Bestandsanalyse; Abschlussbericht, DVGW G5/04/09-TP1-C, Bonn, 2010
- [TECH2010] Pielke, M.; Technisch-wirtschaftliche Systembetrachtung zur netzorientierten Integration von Mini-Blockheizkraftwerken, Dissertation, TU Braunschweig, 2010
- [ÜBER2004] Burger, H., Rogatty, W.: Überschlägige Ermittlung der erforderlichen Kesselleistung. In: IKZ-Haustechnik 18/2004
- [VDI2008] VDI 4655; Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen (2008)
- [VIESS2011] Preisliste für Heizungssysteme des Jahres 2011 der Viessmann Deutschland GmbH, Allendorf, 2011
- [WPZW2010] Wärmepumpentestzentrum WPZ Buchs: Prüfergebnisse Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen basierend auf EN 14511. In: WPZ-Bulletin 01/2010, CH – Buchs, 2010
- [ZFK2011] Mini-Blockheizkraftwerke im Fokus, ZfK Umfrage, In: Zeitung für kommunale Wirtschaft, 03/2011
- [ZIES2011] Ziesing, H.-J.: Deutschland im Zeichen der wirtschaftlichen Krise: Drastischer Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 60. Jg. (2010), Heft 4, S. 68-74