

Effekte von Investitionsbudgets im Haushaltssektor auf die Entwicklung der Wärmeversorgung in der Energiesystemmodellierung

Markus Stehle, Markus Blesl, Kai Hufendiek

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der
Universität Stuttgart, Heßbrühlstr. 49a, 70565 Stuttgart, Tel +49 711 685-87831,
markus.stehle@ier.uni-stuttgart.de, www.ier.uni-stuttgart.de

Kurzfassung:

Investitionsentscheidungen von linearen Optimierungsmodellen im Kontext der Energiesystemanalyse unterliegen oftmals keiner monetären Beschränkung. Dies kann dazu führen, dass die Investitionsausgaben die tatsächlichen finanziellen Mittel der Akteure in einzelnen Modelljahren übersteigen. Infolgedessen können Modellergebnisse der Energiesystemanalyse und daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen für die Politikberatung weniger aussagekräftig sein. Im Rahmen des Beitrages wird untersucht, welche Auswirkungen eine Vorgabe eines Budgets für Investitionen in Wohngebäude-Heizsysteme auf die Entwicklung der Wärmeversorgungsstruktur hat. Erste Ergebnisse einer Fallstudie zeigen, dass eine weitestgehende Dekarbonisierung der Wärmeversorgung auch mit den unterstellten Investitionsbudgets der Gebäudeeigentümer für Heizanlagen gelingen kann. Dabei wird die kostenoptimale Wärmeversorgungsstruktur ermittelt, die das Budget der Gebäudeeigentümer für Heizanlagen berücksichtigt.

Keywords: Budgetrestriktion, Akteure, Wärmeversorgung, Energiesystemmodellierung, TIMES

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Da etwa die Hälfte des Endenergieverbrauchs bei der Wärmeerzeugung anfällt [1], nimmt die Wärmewende als Teil der Energiewende eine bedeutende Rolle ein. Angestrebt wird bis 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand [2]. Dies soll durch die Reduktion des Wärmebedarfs bei gleichzeitiger Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien gelingen. In den letzten Jahren stagniert jedoch die erzielte Emissionsminderung an Treibhausgasemissionen im Wärmesektor in Deutschland bei knapp 40 % [3], der Anteil der erneuerbaren Energien bei ca. 14 % [4]. Angesichts langer Investitionszyklen in der Wärmeversorgung müssen Wärmeerzeuger, die ab dem Jahr 2030 zugebaut werden, jedoch bereits nahezu klimaneutral sein, um die Klimaziele in 2050 erreichen zu können. Obwohl erneuerbare Wärme im Vergleich zu konventionellen Heizungen durch günstigere laufende Heizkosten gekennzeichnet ist (z.B. Pellets, Solarthermie, Umgebungswärme), erweist sich die hohe Anfangsinvestition als eines der Haupthemmnisse für den Zubau erneuerbarer Wärmeerzeuger [5]. In Energiesystemmodellen jedoch, bei denen Investitionsentscheidungen auf der Kapitalwert- bzw. Annuitätenmethode basieren, können hohe Kapitalkosten durch geringe variable Kosten kompensiert werden. Zwar werden Zinssätze zur Finanzierung des Kapitals berücksichtigt (vgl. [6]), jedoch wird die

Kapitalverfügbarkeit oftmals nicht beschränkt. Dies kann dazu führen, dass das Optimierungsmodell Investitionen tätigt, die die finanziellen Mittel der Akteure übersteigen. Infolgedessen resultieren Modellergebnisse aus denen Handlungsempfehlungen für die Energiepolitik abgeleitet werden, die den Aspekt des verfügbaren Budgets der Akteure nicht ausreichend berücksichtigen. Im Rahmen des Beitrages wird versucht, die Perspektive des zentralen Planers in linearen Optimierungsmodellen, um die Perspektive der Eigentümer von Wohngebäuden hinsichtlich des verfügbaren Budgets für Investitionen in Wohngebäude-Heizsysteme zu erweitern. Die Auswirkungen der Budgetrestriktion auf die Transformationspfade der Wärmeversorgung bis 2050 werden analysiert und eine kostenoptimale Wärmeversorgungsstruktur unter Berücksichtigung der Eigentümer-Budgets ermittelt.

2 Methodik

Im Folgenden wird das für die Szenariorechnungen verwendete Energiesystemmodell vorgestellt und die Implementierung der Budgetrestriktion als auch die Herleitung des Budgetvolumens der betrachteten Modellregion erläutert.

2.1 Das lokale Energiesystemmodell TIMES Local

TIMES¹ Local ist ein lineares Optimierungsmodell mit der Zielfunktion die diskontierten Systemkosten für den Ausbau und Einsatz von technischen Anlagen des lokalen Energiesystems über den gesamten Modellhorizont integral zu minimieren (unter perfekter Voraussicht). Als Randbedingungen sind z.B. technische und ökologische Vorgaben zu erfüllen (z.B. Verfügbarkeit von Technologien, Klimaschutzziele).

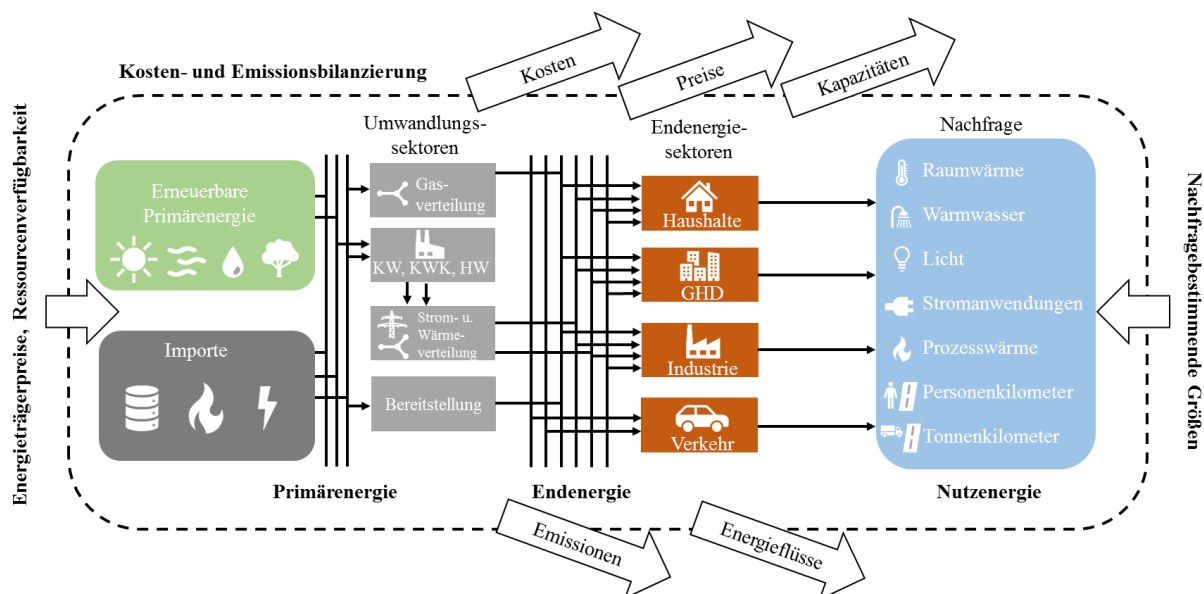


Abbildung 1: Das Referenzenergiesystem von TIMES Local

¹ TIMES Local ist eine Anwendung des Modellgenerators TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System), der in der allgemeinen Modellierungssprache GAMS implementiert ist und im Rahmen des Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) der Internationalen Energieagentur (IEA) unter Mitwirkung des IER entwickelt wurde [17] [18].

Das Energiesystem wird im Modell über ein sog. Referenzenergiesystem (RES) abgebildet (vgl. *Abbildung 1*). Das RES besteht aus einem Netzwerk von Prozessen (z.B. Technologietypen) und Gütern (z.B. Energieträger), die durch Flüsse (z.B. Energiemengen) miteinander verbunden sind. Mit diesem Ansatz kann die gesamte Energiebereitstellungskette von der Primärenergie- über die Endenergie- bis hin zu Nutzenergieebene technologisch detailliert abgebildet werden. Einzelne Anlagen eines Technologietyps werden aggregiert berücksichtigt. Die Nachfrage, als Treiber des Modells, wird durch die vorgelagerten Prozesse und die mit ihnen verbundenen Gütern, gedeckt, wobei diese unter der Prämisse der Kostenminimierung in einem Wettbewerb stehen. Im Ergebnis ermittelt TIMES Local neben der wirtschaftlich optimalen Energieversorgungsstruktur den wirtschaftlich optimalen Technologieeinsatz (Dispatch).

Der geografische Bilanzraum von TIMES Local umfasst die lokale Ebene einer Kommune bis zu einer Region. Der Modellzeitraum erstreckt sich von 2010 bis 2050, wobei Stützjahre in 5-Jahresschritten betrachtet werden. Ein Stützjahr untergliedert sich in Zeitsegmente, um die Verteilung von Energienachfrage und –angebot (z.B. erneuerbare Energien) abzubilden. Es werden dazu repräsentative Typwochen für die Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst, Winter sowie eine Herbst-Spitzenlastwoche berücksichtigt. Für die vorliegenden Modellrechnungen wurden 70 Zeitsegmente gewählt: 5 Typwochen x 7 Tage x 2 Zeitsegmente pro Tag.

Im Weiteren erfolgt eine sektorale Unterteilung des Energiesystems nach Haushalten, Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor (GHD), Industrie, Verkehr sowie Strom- und Wärmeerzeugung (öffentlich und industriell). Exogen vorgegeben werden der anfängliche Anlagenbestand (z.B. Heizungsanlagen) sowie die Entwicklung der Energienachfrage der einzelnen Sektoren bis zum Zieljahr 2050.

Im Haushaltssektor wird die Nachfrage von sechs Wohngebäudetypen unterschieden, wovon jeweils drei dem Bestands- bzw. Neubau zugeordnet werden: Es wird differenziert nach Ein- und Zweifamilienhäusern im urbanen (Urban) bzw. ländlichen Raum (Rural) sowie Mehrfamilienhäusern (Multi). Jeder Gebäudetyp verfügt über ein eigenes Technologieportfolio zur Deckung der Wärmenachfrage. Dieses bietet neben der Nutzung von Einzelgebäudeanlagen (z.B. Erdgas-Brennwertkessel oder elektrische Luftwärmepumpen) auch die Möglichkeit des Anschlusses an zentrale Wärmeversorgungs-systeme. Die Wärmeerzeugung erfolgt dann z.B. durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Spitzenkessel, solarthermische Freiflächenanlagen und/oder elektrische Großwärmepumpen.

Zur Beschreibung der Technologien und Energieträger werden neben technischen Parametern (z.B. Effizienz, Verfügbarkeit) auch ökonomische Parameter (z.B. Investitionen, Energiepreise) vorgegeben. Spezifische Investitionsausgaben (EUR/kW) für Heizungsanlagen basieren auf recherchierten Grundpreisen unterschiedlicher Hersteller und beinhalten Installationskosten sowie weitere Aufwendungen (wie z.B. Anschlusskosten an Wärmenetze). Die Energieträgerpreise für Erdgas, Heizöl, usw. im Basisjahr 2010 und Statistikjahr 2015 sind den Angaben des BMWi [7] entnommen. Die Fortschreibung dieser Preise für die Zukunft orientiert sich am World Energy Outlook 2015 [8].

2.2 Modellierung der Budgetrestriktion

Die modelltechnische Abbildung der Budgetrestriktion im linearen Optimierungsmodell TIMES Local wird im Folgenden vorgestellt. Ziel der Budgetrestriktion ist es, die Investitionssumme für den Kapazitätszubau von Technologien in einzelnen Modellperioden zu limitieren. Dies geschieht vor dem Hintergrund begrenzter finanzieller Mittel der Akteure für die Durchführung von Investitionen. Das Budget für Investitionen ist als Randbedingung nach der (Un-)Gleichung (1) implementiert. Die Investitionen in ein Technologie-Set (z.B. Heizungsanlagen von Wohngebäuden) dürfen demnach in Summe das über den Zeitraum vorgegebene Budget nicht übersteigen.

$$BUDGET_{exogen(r,t,pg,cur)} \geq \sum_{p \in pg} NCAP_COST_{(r,t,p,cur)} \cdot VAR_NCAP_{(r,t,p)} \quad (1)$$

mit

<i>BUDGET_{exogen}</i> :	<i>Exogene Vorgabe des Budgets für Investitionen</i>
<i>NCAP_COST</i> :	<i>spezifische Investitionen der Technologien</i>
<i>VAR_NCAP</i> :	<i>technologiespezifischer Kapazitätszubau</i>
<i>Indizes</i> :	<i>r: Region, t: Periode², pg: Technologie-Set /-Gruppe, p: Technologie/Prozess, cur: Währung</i>

Die Budgetrestriktion schränkt damit den Lösungsraum für Investitionen ein. Davon betroffen sind die wesentlichen Entscheidungsvariablen des Modells:

- Investitionen (neue Kapazität für Technologie *p*): *VAR_NCAP*
- Fluss von Gütern (z.B. Energiemenge): *VAR_FLO*
- Aktivitätslevel einer Technologie: *VAR_ACT*

Demnach sind Effekte einer Budgetrestriktion in erster Linie auf die Technologiewahl zu erwarten und damit auf die Entwicklung der Wärmeversorgungsstruktur bis 2050. Ein indirekter Effekt resultiert hieraus auch auf den Energiemix der Wärmeversorgung, da die Energieträgerwahl mit der Technologiewahl in Zusammenhang steht. Im Weiteren kann die Betriebsführung von Technologien beeinflusst sein. So könnten bestehende Anlagen bis zu ihrem maximal vorgegebenen Aktivitätslevel zum Einsatz kommen, wenn das vorgegebene Budget einen Zubau von aus Vollkostensicht günstigeren Technologien limitiert³.

2.3 Herleitung des Investitionsbudgets

Im Folgenden ist ein erster Ansatz skizziert, um das Budget für Investitionen in Technologien abzuschätzen. Dieses soll ausgehend von heutigen Investitionen hergeleitet werden. Eine Anforderung ist, dass die Budgetvorgabe auf Basis der im Modell hinterlegten Kostenparameter berechnet wird, damit eine Kohärenz der Daten gegeben ist, die in Ungleichung (1) Eingang finden. Der Ansatz ist, das gegenwärtige Investitionsbudget [EUR] für eine Technologiegruppe (z.B. Heizanlagen) aus dem Produkt der Zubaukapazität [kW] und den durchschnittlichen spezifischen Investitionen [EUR/kW] zu berechnen (vgl. Gleichung (2)).

² Zu beachten ist, dass das Budget für eine Modellperiode vorzugeben ist, da sich VAR_NCAP auf die komplette in einer Modellperiode zugebaute Kapazität bezieht.

³ mit der in der Fallstudie gewählten Budgethöhe zeigte sich dieser Effekt jedoch nicht

$$BUDGET_{exogen, Techgr} = Zubaukap_{Techgr} \cdot \emptyset \text{ spez. Invest}_{Techgr} \quad (2)$$

mit

$BUDGET_{exogen, Techgr}$:	Budget für Investitionen
$Zubaukap_{Techgr}$:	erforderliche Zubaukapazität der Technologie-Gruppe
$\emptyset \text{ spez. Invest}_{Techgr}$:	durchschnittlich spezifische Investitionen in Technologien

Die erforderliche Zubaukapazität ergibt sich näherungsweise^{4,5} aus der mittleren jährlichen Austauschrate, d.h. den bestehenden Kapazitäten der Technologiegruppe bezogen auf die durchschnittliche technische Lebensdauer nach Gleichung (3). So ergibt sich z.B. bei einer technischen Lebensdauer von 20 Jahren eine erforderliche jährliche Austauschrate für die Technologiegruppe in Höhe von 5 %.

$$Zubaukap_{Techgr} \approx \frac{Bestandskap_{Techgr}}{\emptyset \text{ techn. Lebensdauer}_{Techgr}} \quad (3)$$

mit

$Bestandskap_{Techgr}$:	Bestandskapazität der Technologiegruppe
$\emptyset \text{ techn. Lebensdauer}_{Techgr}$:	durchschnittlich technische Lebensdauer

Die durchschnittlichen spezifischen Investitionen [EUR/kW] für die Technologiegruppe werden aus dem Summenprodukt der Anteile der installierten Technologietypen, die Statistiken⁶ entnommen werden, und ihrer spezifischen Investitionen, die im Modell als ökonomische Parameter hinterlegt sind, ermittelt (vgl. Gleichung (4)).

$$\emptyset \text{ spez. Invest}_{Techgr} = \sum_{Techtyp\ i} A_{Techtyp\ i} \cdot \text{spez. Invest}_{Techtyp\ i} \quad (4)$$

mit

$A_{Techtyp\ i}$:	Anteile je Technologie-Typ
$\text{spez. Invest}_{Techtyp\ i}$:	spezifische Investition des Technologietyps i

Damit kann das gegenwärtige Budget für Investitionen in eine Technologiegruppe für Ungleichung (1) abgeschätzt werden. Zu berücksichtigen ist, dass Marktdaten zu Investitionen auch die finanziellen Zuschüsse der derzeitigen Förderkulisse beinhalten können und damit in das verfügbare Budget der Akteure mit einfließen. Es wird im Weiteren also davon ausgegangen, dass die Investitionsfähigkeit der Gebäudeeigentümer und auch die Förderung konstant bleiben. Diese Annahme muss nicht notwendigerweise zutreffen, wird für diesen ersten Schritt als gültig angenommen. Eine Variation ist grundsätzlich auf Basis des Modellansatzes in zukünftigen Arbeiten möglich.

⁴ Abgänge bzw. Zugänge von Kapazitäten durch z.B. Gebäudeabriss bzw. –neubau seien an dieser Stelle vernachlässigt.

⁵ Aufgrund rückläufiger Energiebedarfe können die erforderlichen Zubaukapazitäten sinken (z.B. bei Heizanlagen).

⁶ z.B. für die Berechnung der Anteile der installierten Wärmeerzeuger: u.a. [16]

3 Modellergebnisse – Auswirkungen von Investitionsbudgets für Wohngebäude-Heizungen auf die Wärmeversorgung

Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse einer Fallstudie anhand von drei Szenarien vorgestellt.

Untersucht wird, ob Wohngebäudeeigentümer finanziell in der Lage wären die aus Sicht des regionalen Energiesystems optimalen Investitionen bei Heizanlagen in Klimaziel-Szenarien tragen zu können, wenn unterstellt wird, dass die verfügbaren Investitionsbudgets für Heizanlagen in diesem Sektor real konstant bleiben. Auf einer Modellrechnung ohne Budgetrestriktionen aufbauend, die das volkswirtschaftliche Kostenminimum der Modellregion zur Erreichung der Klimaziele darstellt, wird dann im Weiteren eine kostenoptimale Wärmeversorgungsstruktur ermittelt, die für die Eigentümer hinsichtlich des Investitionsbedarfs realisierbar ist. Auf dieser Basis werden dann die Effekte einer Budgetrestriktion der Investitionen in Wärmeerzeuger auf den Transformationspfad der Wärmeversorgung von Wohngebäuden analysiert.

3.1 Modellregion und Rahmenannahmen

Der geografische Bilanzraum der Fallstudie umfasst die in Baden-Württemberg gelegene Region Neckar-Alb. Mit rund 700.000 Einwohnern setzt sich die Modellregion aus den südlich von Stuttgart gelegenen Landkreisen Reutlingen, Tübingen und Zollernalbkreis zusammen. Die Anzahl der Wohngebäude beziffert sich auf über 170.000, wovon etwa 150.000 Ein- und Zweifamilienhäuser sowie rund 20.000 Mehrfamilienhäuser sind.

Eingangsdaten, wie die Endenergiebilanz für das Basisjahr 2010 und Potentiale von Technologien, basieren auf dem *Integrierten Klimaschutzkonzept der Region Neckar-Alb* aus dem Jahr 2012 [9]. An ein Nahwärmenetz könnten demnach potentiell 15 % der Einfamilienhäuser und 90 % der Mehrfamilienhäuser angeschlossen werden. Das Potential fester Biomasse beziffert sich auf ca. 7.500 TJ/a. Der Ausbau der bestehenden Gasnetzinfrastruktur und der daran angeschlossenen Wohngebäude wird entsprechend der Entwicklung des deutschlandweiten Gasnetzausbaus der letzten Jahrzehnte auf ca. 2 %/a angenommen [10]. Das technische Potential der Wärmepumpen steht in Zusammenhang mit der Vorlauftemperatur der Heizung bzw. dem spezifischen Raumwärmebedarf des jeweiligen Gebäudes. Nach [11] beläuft sich das technische Wärmepumpen-Potential auf etwa 60 % des Wärmebedarfs von Wohngebäuden in 2050. Darunter fallen Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser mit spezifischen Raumwärmebedarfen kleiner als ca. 70 kWh/m² bzw. ca. 50 kWh/m².

Die zukünftige Entwicklung des Raumwärmebedarfs der Modellregion Neckar-Alb ist dem Wärmeatlas BW [12] entnommen und berücksichtigt neben der Fortschreibung der Bevölkerungsentwicklung sowie der Wohnflächen auch die Vorgaben und Fortschreibung der Energieeinsparverordnung (EnEV). Für den Zubau von Wärmeerzeugern in Bestandsgebäuden gilt das Erneuerbare Wärme Gesetz (EWärmeG) von Baden-Württemberg. Dieses schreibt bei der Erneuerung einer Heizungsanlage einen Pflichtanteil an Erneuerbaren Energien in Höhe von 15 % vor [13]. Die Erfüllung dieser Vorgabe kann auch mit Ersatzmaßnahmen erreicht werden, welche jedoch in den folgenden Szenarien

nicht berücksichtigt sind (z.B. Kopplung der Teilerfüllungsoption Bioöl mit einem energetischen Sanierungsfahrplan).

Für die Klimafreundlichkeit von strombetriebenen Heizungen ist entscheidend, wie sich der spezifische CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Strommixes über den Modellzeitraum entwickelt. Für diesen wird ein Rückgang von 574 g CO₂/kWh (2010) auf 60 g CO₂/kWh (2050) im Referenzszenario bzw. auf 30 g CO₂/kWh im Klimaziel-Szenario unterstellt.

Zur Diskontierung der Energiesystemkosten auf das Basisjahr 2010 wird ein Zinssatz in Höhe von 3 % p.a. angenommen. Unterschiedliche wirtschaftliche Kalküle der Sektoren als auch der Eigentümer und Vermieter von Wohngebäuden sind über aktorenspezifische Zinssätze nach [6] berücksichtigt: Privathaushalte (3 %), GHD (8 %), Industrie (15 %), Verkehr (Privater Verkehr: 3 % bzw. gewerblicher Verkehr: 8 %) sowie selbstnutzende Eigentümer (3 %) und Vermieter von Gebäuden (8 %).

Zu den Parametern, die das Modellergebnis wesentlich beeinflussen, zählen die Investitionsausgaben für Heizungstechnologien (vgl. *Abbildung 2*) und die Energieträgerpreise sowie deren unterstellte Entwicklung über den Betrachtungszeitraum (vgl. *Abbildung 3*). Die durchschnittliche Investitionsausgabe für in Deutschland in 2015 installierte Heizungsanlagen in Einfamilienhäusern beläuft sich schätzungsweise auf ca. 8.500 EUR_{netto}, wenn von einer installierten Leistung von 16 kW ausgegangen wird.

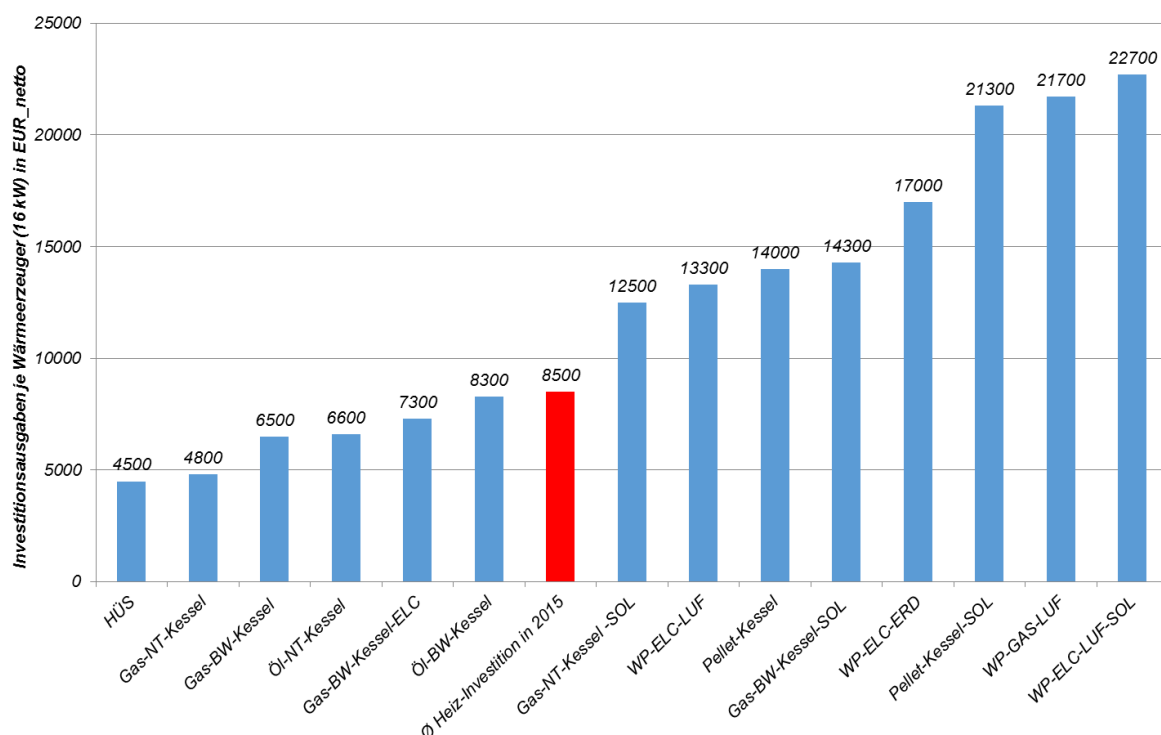


Abbildung 2: Netto-Investitionsausgaben je Wärmeerzeuger (16 kW) für ein Einfamilienhaus in 2015
 Abkürzungen: HÜS = Hausübergabestation, NT = Niedertemperatur, SOL = Solar unterstützte Heizung, WP = Wärmepumpe, ELC = Elektrisch, LUF = Luft (-wärmepumpe), ERD = Erd (-wärmepumpe)⁷

⁷ WP-ELC-LUF: nur Raumwärmebereitstellung

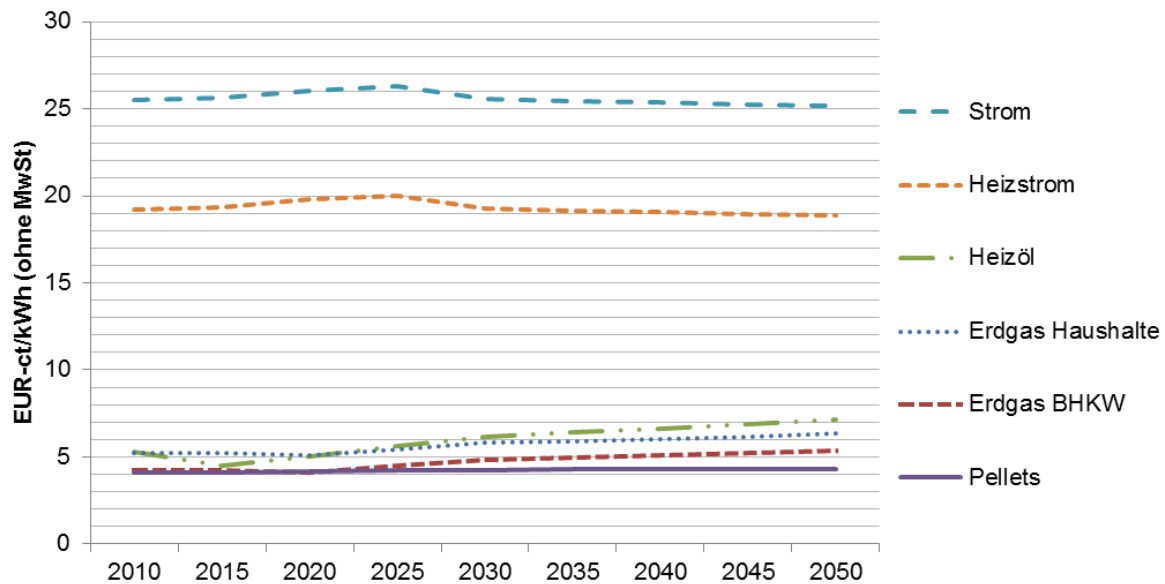


Abbildung 3: Angenommene Entwicklung der Energieträgerpreise (ohne MwSt) der Privathaushalte basierend auf [7] und [8]

Für die Modellregion Neckar-Alb erfolgt eine erste Abschätzung des verfügbaren Budgets für Investitionen in Wohngebäude-Heizungen nach Abschnitt 2.3. Die Bestandskapazitäten werden aus der Endenergiebilanz der Modellregion hergeleitet. Es wird dem Modell entsprechend eine durchschnittliche technische Lebensdauer der Heizanlagen von ca. 20 Jahren unterstellt. Damit ergibt sich eine jährliche Austauschrate von 5 %, die über den ganzen Modellhorizont angenommen wird. Zum Vergleich belief sich die jährliche Austauschrate der Wärmeerzeuger auf etwa 3 % in Deutschland im Jahr 2015 [14]. Dieser Wert ist jedoch nur eine Momentaufnahme. Wenn 20 Jahre als Lebensdauer von Heizanlagen unterstellt werden, muss sich langfristig eine Austauschrate von 5 % einstellen. Die Anteile der in Deutschland in 2015 installierten Wärmeerzeuger wurden auf Basis von Statistiken zum Absatz von Wärmeerzeugern [15] abgeschätzt⁸. Eine Vereinfachung ist dabei, dass sich die Anteile der Statistik [15] auf die Stückzahlen beziehen und nicht auf die installierten Kapazitäten. Bei den Anteilen wird die Installation neuer Wärmeerzeuger von Bestands- und Neubauten berücksichtigt. Da Angaben zur Installation von Hausübergabestationen in der Statistik nicht enthalten sind, werden die durchschnittlichen Investitionsausgaben auf Basis der verwendeten Zahlen tendenziell etwas überschätzt.

Das verfügbare Budget für Investitionen in Wohngebäude-Heizungen wird zudem entsprechend den Gebäudetypen unterschieden: Ein-/Zweifamilienhäuser (Stadt), Ein-/Zweifamilienhäuser (Land) und Mehrfamilienhäuser (vgl. Tabelle 1). Die Gebäudetypen unterscheiden sich in den Bestandskapazitäten und -auslegungsbedingt - in den durchschnittlich spezifischen Investitionen je Heizung. Das verfügbare jährliche Gesamtbudget für Investitionen in Wohngebäude-Heizungen beträgt für den Bilanzraum nach dieser ersten Abschätzung insgesamt etwa 69 Mio. EUR_{netto}, wenn von einer jährlichen

⁸ Zusätzlich wurde die Installation von über 100.000 Solarthermie-Anlagen als Heizungsunterstützung bzw. zur Warmwasserbereitstellung berücksichtigt.

Austauschrate von 5 % ausgegangen wird. Die spezifischen Investitionen je m² Wohnfläche und Jahr belaufen sich damit je nach Gebäudetyp auf 2,10 bzw. 2,50 EUR_{netto}.

Über den Modellzeitraum wird vereinfachend von einem konstanten Investitionsbudget ausgegangen, welchem jedoch eine jährliche Austauschrate von 5 % zugrunde liegt im Vergleich zu gegenwärtig etwa 3 %.

Tabelle 1: Abgeschätztes Budget für Investitionen in Wärmeerzeuger von Wohngebäuden für die betrachtete Modellregion

	Einheit	Einfamilien- häuser (Stadt)	Einfamilien- häuser (Land)	Mehrfamilien- häuser
Bestandskapazität der Wärmeerzeuger ⁹	MW	~ 1400	~ 800	~ 900
Austauschrate	%/a	5	5	5
Zubaukapazität in 2015	MW	~ 60 ¹⁰	~ 35 ¹⁰	~ 40 ¹⁰
Ø spezifische Investitionen ¹¹	EUR _{netto} /kW	~ 530 ¹²	~ 530 ¹²	~ 430 ¹³
Budget	EUR _{netto} /a	33 Mio.	18 Mio.	18 Mio.
spezifisches Budget	EUR _{netto} /m ² a	2,5	2,5	2,1

Während das Budget für Investitionen in Wohngebäude-Heizsysteme limitiert wird, wird eine Beschränkung der insgesamten Heizkosten bzw. des Energiekonsumbudgets an dieser Stelle nicht eingeführt. Investitionen in energetische Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle werden exogen vorgegeben und werden über die Entwicklung des Wärmebedarfs entsprechend der EnEV fortgeschrieben. Die Budgetrestriktion limitiert das gesamte Budgetvolumen für Investitionen in Wohngebäude-Heizsysteme. Budgetunterschiede einzelner Gebäudeeigentümer sind nicht abgebildet, die die realisierbaren Investitionen aber weiter beschränken könnten. Eine Budget-Vorgabe für Investitionen in Wohngebäuden, die nicht die Wärmeerzeugung betreffen, ist nicht berücksichtigt (z.B. PV-Anlagen). Im Weiteren können Investitionen in den Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Industrie, Verkehr sowie öffentliche Strom- und Wärmeversorgung ohne Limitierung erfolgen.

⁹ aus der Endenergiebilanz für die Modellregion hergeleitete Kapazitäten der Wärmeerzeuger

¹⁰ Annahme, dass die Zubaukapazität 10% geringer ausfällt als die zu ersetzende Kapazität

¹¹ durchschnittliche spez. Investitionen aller in Deutschland in 2015 installierten Wärmeerzeuger

¹² bei 16 kW installierter Heizleistung

¹³ bei 30 kW installierter Heizleistung

3.2 Szenarienbeschreibung

Im Folgenden werden die Szenarien zur modellgestützten Analyse der Entwicklung des Wärmeversorgungssystems in einem systemanalytischen Kontext vorgestellt.

Als Maßstab für das Klimaziel-Szenario (KLIM) bzw. dasselbe mit Budgetrestriktion (KLIM-BUD) dient das Business-As-Usual-Szenario (BAU). Dieses unterscheidet sich von den anderen beiden Szenarien dadurch, dass weder eine Klimaziel-Vorgabe noch eine Budgetrestriktion für Wärmeerzeuger von Wohngebäuden gesetzt wurde. Dem Klimaziel-Szenario (KLIM) liegt das Treibhausgas-Minderungsziel der Landesregierung Baden-Württemberg von 90 % CO₂-Reduktion im Zieljahr 2050 gegenüber 1990 zugrunde [16]. Die Budgetrestriktion im Klimaziel-Budget-Szenario (KLIM-BUD) schränkt die Investitionssumme in Wärmeerzeuger von Wohngebäuden entsprechend des in Abschnitt 3.1 abgeschätzten Budgets ein. Allen Szenarien gemein ist eine Vorgabe der technischen Potentiale der Anlagen (vgl. Abschnitt 3.1).

3.3 Szenarioergebnisse

Erste Ergebnisse der Szenarien zeigen den Beitrag unterschiedlicher Wärmeversorgungsoptionen zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung. Dabei werden die Effekte der Vorgabe unterschiedlicher Randbedingungen (CO₂-Ziel, Investitionsbudget) auf die Wärmeversorgung der Modellregion Neckar-Alb analysiert.

Abbildung 4 zeigt die relative Entwicklung der Investitionsausgaben für Heizungsanlagen in Wohngebäuden über den Modellzeithorizont bezogen auf das Jahr 2020 in den o.a. drei Szenarien der Fallstudie im Vergleich.

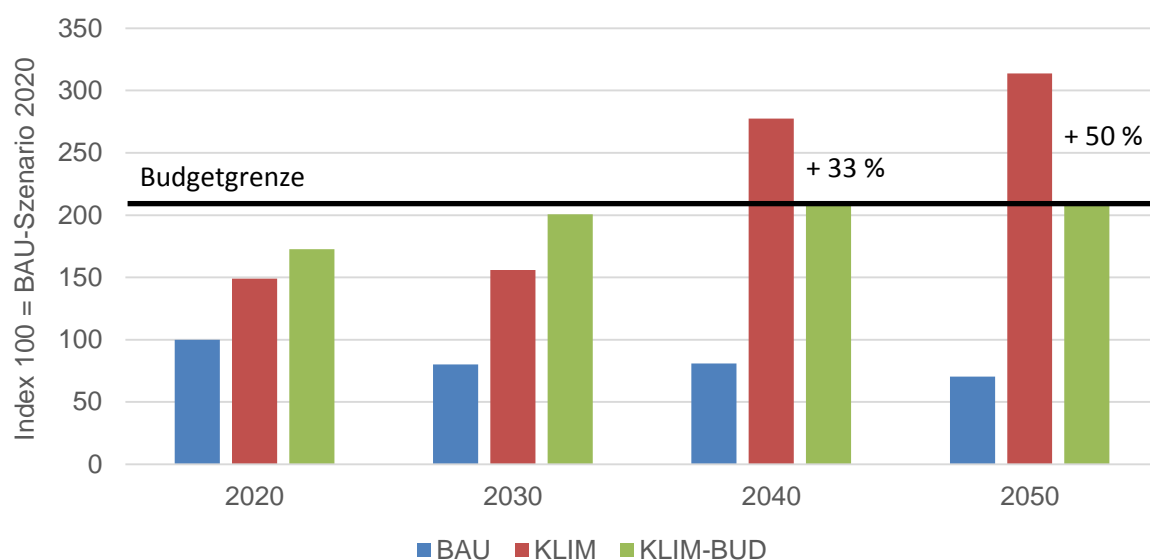


Abbildung 4: Relative Investitionsausgaben für Heizungsanlagen in Wohngebäuden im Szenarienvergleich bezogen auf das BAU-Szenario im Jahr 2020

Es zeigt sich, dass das verfügbare Kapital der Gebäudeeigentümer nach 2030 nicht mehr ausreicht, um die aus Systemsicht kostenoptimalen Investitionen im Klimaziel-Szenario zu realisieren. Im Zieljahr 2050 wird das Budget um 50 % überschritten. Die Ambitionen im Klimaschutz bringen damit eine zusätzliche finanzielle Belastung der Akteure im

Wohngebäude-Heizungsmarkt mit sich, wenn volkswirtschaftlich optimale Investitionen vorausgesetzt werden sollen. Über die hier gezeigten Szenarien hinaus berechnete Sensitivitäten mit weniger ambitionierten Klimazielen (80% THG-Minderung)¹⁴ zeigen, dass auch dann die Budgets der Wohngebäudeeigentümer nicht ausreichen, um volkswirtschaftlich optimale Investitionen zu realisieren. Demgegenüber fallen die Investitionsausgaben im BAU-Szenario über den Betrachtungszeitraum. Dies ist auf den rückläufigen Wärmebedarf durch die energetische Gebäudesanierung auf Basis der geltenden EnEV zurückzuführen und die in Folge kleineren erforderlichen Kapazitäten für die Wärmebereitstellung.

Beim Vergleich der Szenarien mit und ohne Budgetrestriktionen zeigt sich, dass das lineare Optimierungsmodell mit perfekter Voraussicht investiert. Durch die Vorgabe der Budgetrestriktion, die nach 2030 effektiv greift, werden Investitionen in die Modellperioden 2020 und 2030 vorgezogen, da hier noch freies Budget verfügbar ist. Allerdings entspricht dieses Verhalten nicht dem realen Verhalten der Akteure, die nicht über eine perfekte Voraussicht verfügen. Dennoch zeigen die Ergebnisse deutlich, dass das erweiterte Modell, wie erwartet funktioniert.

Detailauswertungen der Modellrechnungen ergeben, dass Investitionsausgaben im Klimaziel-Szenario neben der Restriktion des CO₂-Ziels von der Vorgabe der technischen Potentiale der einzelnen Technologien abhängen (vgl. Abschnitt 3.1). So würde das Modell deutlich mehr investieren, wenn beispielsweise das technische Potential von Wärmepumpen nicht begrenzt wäre. Somit sind die konkreten Ergebnisse immer auch vor dem Hintergrund der technischen Potentiale der jeweiligen Technologien zu bewerten. Im Weiteren spielt der Modernisierungszyklus der Heizsysteme eine wichtige Rolle bei den Investitionen. Technologien mit einer kurzen technischen Lebensdauer erfordern häufigere Ersatzinvestitionen als langlebige Technologien und beeinflussen somit auch das Investitionsniveau.

Im Folgenden zeigen erste Ergebnisse den Einfluss eines maximal verfügbaren Budgets für Heizanlagen auf die wirtschaftlich optimale Wärmerversorgungsstruktur von Wohngebäuden. Die Beiträge der Wärmetechnologien zur Raumwärmebereitstellung für die betrachtete Modellregion sind in einem Zeitraum von 2010 bis 2050 in *Abbildung 5* für alle drei Szenarien dargestellt.

Das Ergebnis der Optimierung im Budget-Szenario zeigt, dass eine nahezu vollständige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung auch bei einer Annahme eines konstanten verfügbaren Budgets der Gebäudeeigentümer für Heizsysteme zu erreichen ist¹⁵, der Technologiemitmix der eingesetzten Heizsysteme sich jedoch verändert: Infolge der Budgetrestriktion kommen weniger kapitalintensive Heiztechnologien zum Einsatz, die jedoch höhere variable Kosten zur Folge haben. In Summe ergeben sich für die Wärmeversorgung dadurch höhere Vollkosten, so dass die Systemkosten insgesamt

¹⁴ Das KLIM-Szenario mit Vorgabe einer 80%-THG-Minderung anstatt 90%-THG-Minderung wird nur an dieser Stelle betrachtet und im Weiteren nicht analysiert.

¹⁵ Dies setzt jedoch die vorgegebene Entwicklung des Wärmebedarfs und damit den Vollzug der EnEV-Bestimmungen zum Wärmeschutz von Gebäuden voraus. Nicht Bestandteil der Betrachtung ist die finanzielle Belastung der Eigentümer durch die Realisierung der EnEV-Vorgaben. Es wird daher vereinfachend davon ausgegangen, dass das Budget für Investitionen in die Gebäudehülle nicht das Budget für Investitionen in die Heizanlage beeinflusst.

geringfügig ansteigen. Dieser Anstieg liegt jedoch im Promille-Bereich der auf das Basisjahr 2010 diskontierten Energiesystemkosten.

Bei den getroffenen Annahmen zu Kosten-, Nachfrage- und Technologieentwicklung ist eine kostenoptimale Wärmeversorgungsstruktur unter Berücksichtigung der Budgets im Zieljahr 2050 geprägt durch die Nutzung von Umgebungswärme mit elektrischen Luftwärmepumpen (z.T. auch mit solarthermischer Unterstützung). Weitere bedeutende Versorgungsoptionen stellen Pelletkessel (zum Großteil solar thermisch unterstützt) und die Nahwärmeversorgung dar. Auch Erdwärmepumpen tragen in geringem Maße zur Wärmeversorgung bei. Als Technologien für die Nahwärmeversorgung kommen neben Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (~ 56 % Anteil) auch elektrische Großwärmepumpen (~ 23 %) und solarthermische Freiflächenanlagen (~ 20 %) zum Einsatz.

Eine Dekarbonisierung der Wärmeversorgung von heutigen Einzelgebäudeheizungen wird damit in gewissem Umfang durch Umstieg auf eine Nahwärmeversorgung umgesetzt. Demgegenüber bleibt die Nutzung von Nahwärme und monovalenten Heizungen im KLIM-Szenario ohne Budgetrestriktionen auf einem niedrigen Niveau. Bivalente Heizungen, also Heizungen, die zwei Wärmequellen nutzen, prägen die Wärmeversorgung im Klimaziel-Szenario ohne Budgetrestriktionen. Obwohl die solar unterstützten Wärmepumpen bzw. Pelletkessel durch hohe Anschaffungskosten charakterisiert sind, stellen sie infolge geringer Heizkosten aus Vollkostensicht eine wirtschaftlich bessere Versorgungsoption dar. Im Budget-Szenario hingegen übersteigen die hohen Initialkosten der bivalenten Heizsysteme die finanziellen Mittel der Gebäudeeigentümer, so dass diese Versorgungsoptionen nur in geringerem Umfang zum Einsatz kommen.

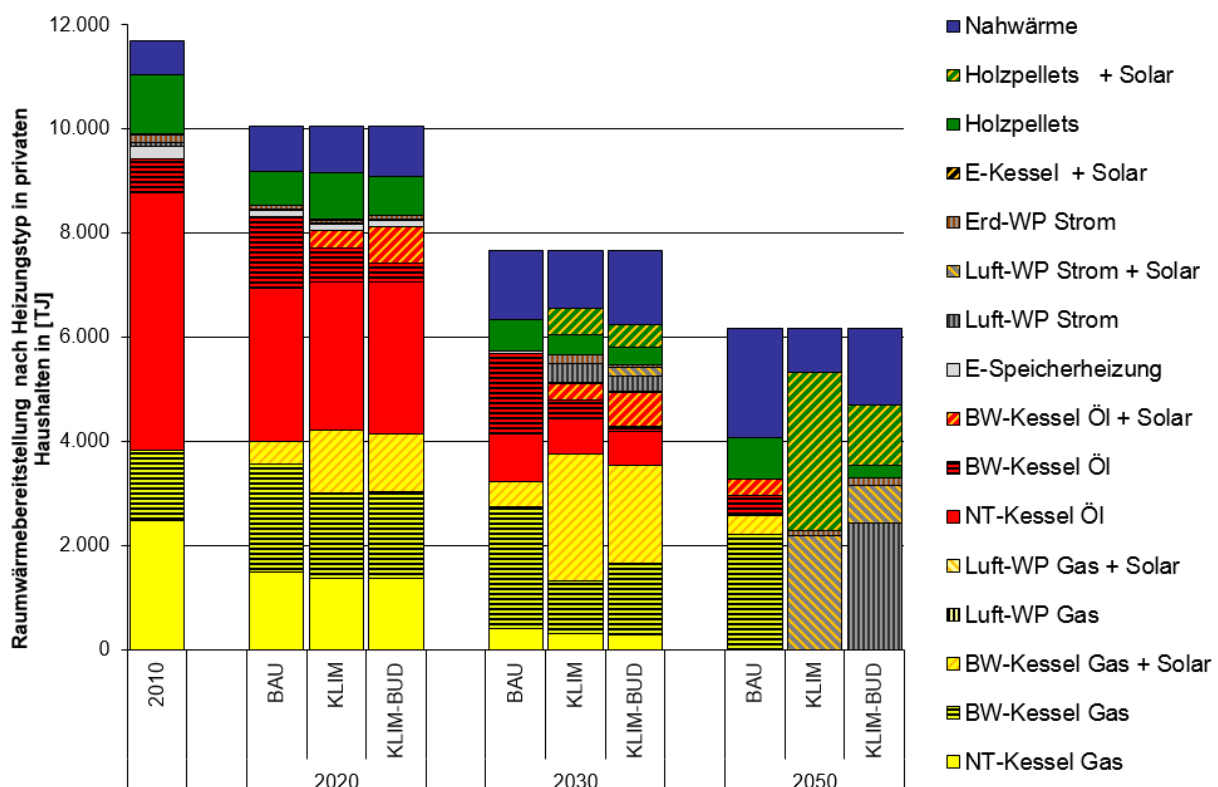


Abbildung 5: Struktur und Entwicklung der Wärmeversorgung der privaten Haushalte bis 2050 in allen drei Szenarien für die Fallstudie

Andererseits können solarthermische Systeme mit Pufferspeicher die Effizienz von elektrischen Luftwärmepumpen steigern (z.B. in dem der Pufferspeicher als Wärmequelle genutzt wird) und an kalten Wintertagen die Rückkopplung auf den Stromsektor abmildern.

Im Hinblick auf die konventionellen Energieträger zeigt sich in beiden Klimaziel-Szenarien eine vollständige Substitution der fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas bis 2050. Solar unterstützte Erdgas- bzw. Heizöl-Brennwertkessel stellen nur eine Zwischenlösung dar.

Weitere technische Alternativen wie die Gas-Wärmepumpe erweisen sich bei den getroffenen Annahmen als zu kostenintensiv bei gleichzeitig geringen Jahresarbeitszahlen. Auch der Einsatz von Prozessen zur Herstellung synthetischer Gase aus erneuerbaren Energien (Power-To-Gas) für die weitere Nutzung von Gas-Brennwertkesseln stellt für die Fallstudie keine wirtschaftliche Dekarbonisierungsoption in der Wärmeversorgung dar¹⁶. Dabei stellt diese Option eine interessante Variante dar, weil Brennwertkessel deutlich geringere Investitionen erfordern als z.B. Wärmepumpen.

Im BAU-Szenario prägen dagegen Erdgas-Brennwertheizungen die Wärmeversorgung im Zieljahr 2050 (z.T. mit solarer Heizungsunterstützung) als kostengünstigste Option, wenn keine Klimaschutzrestriktionen zu berücksichtigen sind. Weitere wirtschaftlich optimale Versorgungsoptionen im BAU-Szenario stellen der Ausbau der Nahwärmeversorgung und die Nutzung von Pelletkesseln sowie Öl-Brennwertkesseln dar. Damit sind sowohl Pelletkessel als auch die Nahwärmeversorgung, welche zu 50 % auf erneuerbaren Energien in 2050 basiert, die einzigen erneuerbaren Versorgungsoptionen, die unter den getroffenen Annahmen bereits ohne CO₂-Restriktion aus wirtschaftlichen Gründen zum Einsatz kommen¹⁷.

Zusammenfassend kann eine weitestgehend vollständige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung unter den getroffenen Annahmen nicht ohne zusätzliche Maßnahmen, aber mit den vorhandenen Kapitalmitteln der Gebäudeeigentümer für Heizsysteme und mit der gegenwärtigen Förderkulisse im Wärmemarkt für Heizsysteme für die Fallstudie erreicht werden. Voraussetzung ist jedoch eine Realisierung der EnEV-Vorgaben zum Wärmeschutz von Gebäuden als auch eine für die Eigentümer gegebene finanzielle Tragfähigkeit dieser Investitionen in die Gebäudehülle, welche jedoch in diesem Beitrag nicht Bestandteil der Betrachtung ist.

¹⁶ Ein möglicher Import synthetischer erneuerbarer Energieträger wurde nicht betrachtet.

¹⁷ unter Beachtung des EWärmeG

4 Schlussbetrachtung und Ausblick

Durch die Implementierung einer Budgetrestriktion für Investitionen in Wohngebäude-Heizungen in der Energiesystemmodellierung kann grundsätzlich die Perspektive der Akteure hinsichtlich ihrer finanziellen Möglichkeiten abgebildet werden. Damit ist es möglich die wirtschaftlich optimale Wärmeversorgungsstruktur zu ermitteln, die für die Wohngebäudeeigentümer bei begrenzt verfügbarem Kapital für Heizanlagen auch realisierbar ist.

Erste Ergebnisse einer Fallstudie zeigen, dass die Implementierung der Budgetrestriktion im Modell grundsätzlich die erwarteten Effekte abbilden kann und ein Einfluss auf die entstehende Struktur der Wärmeversorgung entsteht. Mit dem verfügbaren Investitionsbudget der Wohngebäudeeigentümer für Heizsysteme ist eine weitestgehende Dekarbonisierung der Wärmeversorgung bis 2050 für die betrachtete Fallstudie zu erreichen. Dies setzt jedoch voraus, dass die Investitionen in die Gebäudehülle entsprechend der EnEV realisiert werden und von den Eigentümern finanziell getragen werden können. Letzteres wurde bei den bestehenden Modellrechnungen nicht untersucht.

Darüber hinaus muss geprüft werden, wie sich die verfügbaren Budgets in Zukunft entwickeln und ob die angenommene Fortschreibung in konstanter Höhe eine adäquate Annahme darstellt.

Unter den getroffenen Annahmen, Vereinfachungen sowie Rahmenbedingungen wird im Klimaziel-Szenario ohne Budgetrestriktion im Zieljahr 2050 erheblich mehr Kapital investiert (ca. + 50 %). Dies ist auf die höheren Anschaffungskosten bivalenter Heizsysteme zurückzuführen, die sich aufgrund der zusätzlichen Nutzung von Solarwärme durch geringe laufende Kosten auszeichnen.

Wird ein begrenztes jährliches Investitionsbudget berücksichtigt, reicht das Kapital der Gebäudeeigentümer nach 2030 nicht mehr aus, um den aus Systemkostensicht wirtschaftlich optimalen Transformationspfad einzuschlagen. Daher kommen in diesem Szenario hauptsächlich monovalente Heizsysteme mit niedrigeren Anschaffungskosten zum Einsatz (z.B. elektrische Luftwärmepumpe). Im Weiteren erfolgt auch ein verstärkter Ausbau der Wärmenetze. Eine Dekarbonisierung wird damit im Budget-Szenario zum Teil von Einzelgebäudeheizungen auf zentrale Wärmesysteme ausgelagert (z.B. Biomasse-KWK-Anlagen, elektrische Großwärmepumpen, solarthermische Freiflächenanlagen).

Es zeigt sich zudem, dass eine Budgetrestriktion in einem Optimierungsmodell mit perfekter Voraussicht dazu führt, dass kapitalintensive Investitionen in Perioden vorgezogen werden, in denen das Budgetlimit noch nicht erreicht wurde. Hier ist in zukünftigen Arbeiten zu prüfen, ob diesem Effekt durch eine disaggregierte Abbildung der Budgets nach Eigentümergruppen als auch einer Entwicklung der Budgets über den Modellzeitraum begegnet werden kann.

Zusammenfassend kann mit der Integration von Budgetrestriktionen bei Investitionen einzelner Akteurgruppen (hier: Gebäudeeigentümer) der kostenoptimale Transformationspfad des Energiesystems unter Berücksichtigung der Kapitalmittel der Akteure ermittelt werden. Auf dieser Basis müssen die Analysen o.a. Fragestellungen noch weiter vertieft werden.

Acknowledgement

Der vorliegende Beitrag wurde durch das Projekt „Solnet BW II - Solare Wärmenetze für Baden-Württemberg“ im Rahmen des BWPLUS-Programms (Baden-Württemberg-Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung) unterstützt. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Landes Baden-Württemberg und des Projektmanagements Karlsruhe (PTKA).

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „www.bmwi.de,“ 1 8 2018. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-09.html>. [Zugriff am 25 1 2019].
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), „Energiekonzept - für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung,“ BMWi, Berlin, 2010.
- [3] K. Hufendiek, „Wege eines Klimaschutzbeitrags in der Wärmeversorgung,“ in *2. Stuttgarter Energiedialog*, Stuttgart, 2018.
- [4] Umweltbundesamt, „Erneuerbare Energien in Zahlen,“ 10 12 2018. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#textpart-1>. [Zugriff am 21 1 2019].
- [5] F. A. Toro, C. Gollmer, F. Reizte, M. Schön und E. Chassein, „Hemmnisse und Best-Practice für Energieeffizienz- sowie erneuerbare Wärme- und Kältetechnologien,“ in *Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT)*, Wien, 2017.
- [6] M. Stehle und M. Blesl, „Erweiterung der Investitionsentscheidungen in der Energiesystemmodellierung,“ in *15. Symposium Energieinnovation*, Graz, 2018.
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Zahlen und Fakten Energiedaten,“ 14 08 2018. [Online]. Available: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls?__blob=publicationFile&v=89. [Zugriff am 08 01 2019].
- [8] International Energy Agency, „World Energy Outlook 2015,“ Paris, 2015.
- [9] U. Fahl, T. Steidle, M. Blesl, B. Götz, R. Lo und et al., „Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept für die Region Neckar-Alb (IKENA),“ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA), Stuttgart, 2012.
- [10] Statista, „www.statista.com,“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162214/umfrage/gasnetzentwicklung-in->

- deutschland-seit-dem-jahr-1996/. [Zugriff am 29 01 2019].
- [11] M. Schulz, J. Kumm, M. Blesl, K. Hufendiek, B. Thomas und T. Kemmler, „Heat4SmartGrid BW,“ in *Statuskolloquium Umweltforschung BW*, Fellbach, 2018.
- [12] M. Blesl, S. Kempe, M. Ohl, U. Fahl, A. König, T. Jenssen und L. Eltrop, „Wärmeatlas Baden-Württemberg,“ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2009.
- [13] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, „[www.um.baden-wuerttemberg.de](https://um.baden-wuerttemberg.de),“ [Online]. Available: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/neubau-und-gebaeudesanierung/erneuerbare-waermegesetz-2015/was-ist-neu-im-ewaermeg-2015/>. [Zugriff am 24 1 2019].
- [14] dena, „Der dena-Gebäudereport 2015. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand,“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2015.
- [15] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH), „Fakten und Hintergründe zum Wärmemarkt,“ *Deutsches Wärmejournal*, p. 4, April 2016.
- [16] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, „Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg (IEKK),“ Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart, 2014.
- [17] M. Blesl, „Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas - eine Energiesystem- und Technikanalyse,“ Stuttgart, 2014.
- [18] ETSAP, „International Energy Agency Energy Technology Systems Analysis Programme: Contributing to the Kyoto Protocol, Summary of Annex VII (1999-2002),“ IEA, 2002.