

Analyse der Wärme- und Elektrizitätsversorgung des deutschen Wohngebäudesektors in einem optimierenden Energiesystemmodell

Erik MERKEL, Daniel FEHRENBACH*, Russell MCKENNA, Wolf FICHTNER

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, Lehrstuhl für Energiewirtschaft, Campus West, Gebäude 06.33, Hertzstr. 16, D-76187 Karlsruhe, +49 721 608 44639, Erik.Merkel@kit.edu, <http://www.iip.kit.edu>

*Europäisches Institut für Energieforschung, Emmy-Noether-Straße 11, D-76131 Karlsruhe, +49 721 6105 1350, fehrenbach@eifer.org, <http://www.eifer.org>

Kurzfassung: Im Zuge des Umbaus der Energieversorgung sind der Ausbau erneuerbarer Energieträger sowie der Kraft-Wärme-Kopplung und die Steigerung der Energieeffizienz wichtige Pfeiler der deutschen Energiepolitik. Mit einem Anteil von ca. 29% am gesamten Endenergiebedarf der Bundesrepublik stellt der Wohngebäudesektor ein entscheidendes Handlungsfeld zur Energieeffizienzsteigerung und Treibhausgasminderung dar.

Wirtschaftliche Potenziale von objektbasierter Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmepumpen im Wohngebäudebereich werden in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Daher wird in diesem Beitrag ein optimierendes Energiesystemmodell in der TIMES-Modellumgebung vorgestellt, welches es durch die integrierte Betrachtung von Elektrizitäts- und Wärmesystem erlaubt, das wirtschaftliche Potenzial von Techniken an der Schnittstelle beider Systeme, insbesondere dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungs-Techniken und Wärmepumpen in Wohngebäuden, im Systemzusammenhang über einen Planungshorizont bis 2050 zu untersuchen.

Erste Modellergebnisse zeigen eine Steigerung der kumulierten Kapazität von Wärmepumpen von ca. 4 GW_{th} im Jahr 2010 auf ca. 54,5 GW_{th} im Jahr 2050 auf. Darüber hinaus lässt sich ein Zubau von Blockheizkraftwerken im Umfang von ca. 11,5 GW_{th} ableiten.

Keywords: Energiesystemanalyse, Optimiermodell, deutscher Wohngebäudesektor, Wärmepumpen, Mikro-KWK, Erneuerbare Energien

1 Einführung

Zum Zweck der Absenkung des Treibhausgasausstoßes sowie der Importabhängigkeit hat sich die deutsche Bundesregierung ehrgeizige Ziele zum Umbau der Energieversorgung gesteckt. Diese Ziele beinhalten den Ausbau erneuerbarer Energieträger sowie der Kraft-Wärme-Kopplung und die Steigerung der Energieeffizienz (BMW_i 2010a). Aufgrund seines hohen Anteils von ca. 29% am gesamten Endenergiebedarf der Bundesrepublik kommt dabei dem Wohngebäudesektor und dort insbesondere der Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser mit einem Anteil von ca. 80% an der Sektor spezifischen Endenergienachfrage eine entscheidende Rolle zu (BMW_i 2010b).

Zur Erreichung der Ziele werden die Verschärfung von Wohngebäude-neubaustandards sowie die Sanierung von Bestandsgebäuden diskutiert. Daneben liegen Potenziale im Einsatz von erneuerbaren Energieträgern wie Biomasseheizungen oder Solarthermie. Insbesondere vor dem Hintergrund des wachsenden Anteils nur stark eingeschränkt regelbarer erneuerbarer Elektroenergie-techniken an der Elektrizitätsversorgung werden auch wirtschaftliche Potenziale für Techniken wie Wärmepumpen sowie objektbasierter Kraft-Wärme-Kopplung vermutet.

Zur Analyse des beschriebenen angestrebten Umbaus und der Bewertung der genannten Optionen zur Zielerreichung wird in diesem Beitrag ein entwickeltes optimierendes Energiesystemmodell in der TIMES-Modellumgebung vorgestellt.

1.1 Hintergrund

Mit dem im Oktober 2010 vorgelegten Energiekonzept bekräftigt die Bundesregierung erneut ihren Willen zur klima- und ressourcenschonenden Nutzung von Energie in Deutschland. Die Zielsetzungen für den Gebäudebereich sehen – jeweils bezogen auf das Basisjahr 2008 – die Verringerung des Wärmebedarfs um 20% bis 2020 und eine Reduktion des Primärenergiebedarfs um 80% bis 2050 vor. Dies soll vorrangig durch die schrittweise Erhöhung der energetischen Anforderungen an Gebäudeneubauten und -sanierungen sowie durch die gleichzeitige Verdopplung der jährlichen Sanierungsrate von derzeit knapp unter 1% auf 2% erreicht werden (Statistisches Bundesamt 2010).

Private Haushalte nutzen momentan etwa ein Viertel der Endenergie der Bundesrepublik Deutschland, wovon der überwiegende Anteil für die Bereitstellung von Raumwärme (ca. 71%) und die Warmwasserbereitung (ca. 12%) aufgewendet wird (vgl. Abbildung 1) (BMW 2010b). Rund 87% des derzeitigen Wohnungsbestandes befindet sich in Gebäuden, welche vor 1990 mit – im Vergleich zu den aktuellen Bestimmungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) – wesentlich geringeren energetischen Anforderungen an die Gebäudehülle und Anlagentechnik errichtet wurden (Statistisches Bundesamt 2008). Eine Abschätzung des Modernisierungsstatus ergibt, dass Maßnahmen zur Verbesserung der Gebäudedämmung bislang lediglich an ca. 40% dieser Altbauten umgesetzt wurden. Am häufigsten erfolgten der Austausch von Fenstern sowie Dämmmaßnahmen am Dach bzw. der obersten Geschossdecke. Eine Fassaden- und Kellerdeckendämmung wurde bisher an weniger als 20% dieser Gebäude vorgenommen (BMW 2010a; BMW 2010b).

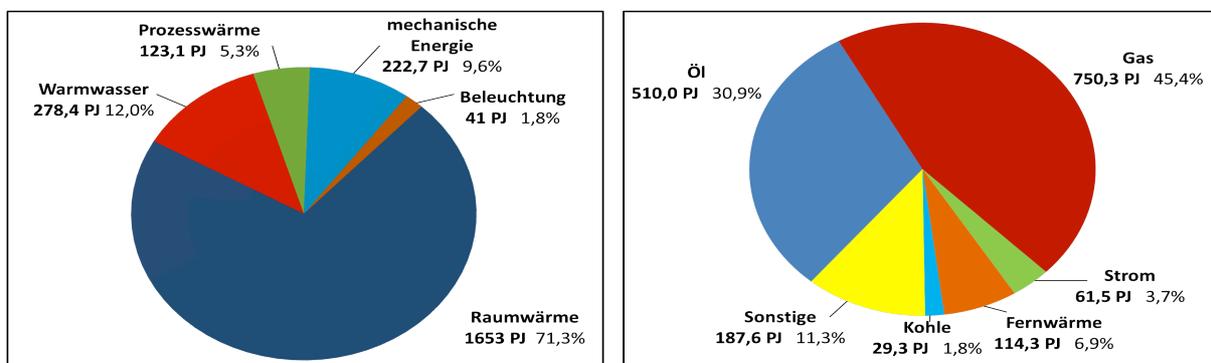


Abbildung 1: Endenergiebedarf nach Anwendung (links) und nach Energieträger (rechts) in deutschen Haushalten 2007 (BMW 2010b)

Unabhängig von der Baualtersklasse wird der Wärmebedarf im deutschen Gebäudebestand nach wie vor hauptsächlich durch die Energieträger Gas und Öl gedeckt, welche zusammen einen Anteil von ca. 75% erreichen (vgl. Abbildung 1). Bedingt durch die technische Nutzungsdauer der Heizanlagen von ca. 20-25 Jahren ist der Anteil der Altbauten mit inzwischen erneuerten Heizanlagen deutlich höher als der Anteil der Altbauten mit durchgeführten Modernisierungen an der Gebäudehülle anzusetzen. Laut der aktuellen Erhebung des Schornsteinfegergewerbes sind zwischen 5 und 10% der heute noch betriebenen Gas- und Öl-befeuerten Heizungsanlagen älter als 27 Jahr (ZIV 2011).

1.2 Literaturüberblick

Zur Analyse des deutschen Energiesystems, insbesondere des Wärmesystems, existieren in der Forschung bereits verschiedene Ansätze modellgestützter Systemanalyse. Dabei werden hauptsächlich optimierende Energiesystemmodelle wie auch Simulationsmodelle eingesetzt. Während allgemein in einer Optimierung kostenminimale (bzw. gewinnmaximale) Handlungsoptionen bei vorgegebenen Rahmenbedingungen abgeleitet werden, werden in Simulationsmodellen die Auswirkungen vorgegebener Handlungsoptionen simuliert (Möst 2008). Seitens optimierender Energiesystemmodelle existieren überwiegend Modelle zur Analyse des Elektrizitätsmarkts. Entwicklungen auf dem Gebiet der Simulation von Energiesystemen finden sich beispielsweise in Genoese (2010). Neben den beiden genannten werden auch andere Modelltypen wie beispielsweise Investitionsmodelle entwickelt (Horn et al. 2007).

Bestehende Modellierungsansätze von Elektrizitäts- und Wärmesystemen unterscheiden sich weiterhin hinsichtlich des Untersuchungsfokus. So liegt bei der Analyse des Wärmesystems der Schwerpunkt der Forschungsfragen bei unterschiedlichen Untersuchungsfeldern, wie der Bestimmung des wirtschaftlichen Potenzials von Fernwärme und zentralen KWK-Anlagen (Blesl et al. 2004) oder der Deckung von Fern-, Nah- und Prozesswärme durch zentrale Erzeugungstechniken (Bartels 2009). In bestehenden Systemmodellen wird weiterhin die Modellierung auf verschiedenen Betrachtungsebenen durchgeführt, wie z.B. auf nationaler (Blesl et al. 2004), kommunaler (Bruckner 1996) sowie auf Gebäudeebene (Kunze et al. 2011). Hierbei entsteht häufig ein Zielkonflikt zwischen einer zeitlich und räumlich disaggregierten und detaillierten Abbildung des Energiesystems einerseits und der Größe des Bilanzraums im Hinblick auf Datenverfügbarkeit sowie Rechenkapazität andererseits. Zudem ergeben sich Probleme der Übertragbarkeit der Ergebnisse von einer detaillierten auf eine aggregierte Betrachtungsebene (Kunze et al. 2011).

In bestehenden Systemmodellen wurden dezentrale KWK-Anlagen bisher explizit nicht adäquat berücksichtigt (Horn et al. 2007), oder aber war der Betrachtungsfokus hierauf nicht gerichtet, oder eine kleinräumige Optimierung steht im Vordergrund (Bruckner 1996). Darüber hinaus existieren neben modellgestützten Systemanalysen auch Studien, die das wirtschaftliche Potential von Mikro-KWK gänzlich ohne Modellansatz untersuchen (Eikmeier et al. 2005).

Potenziale von Mikro-KWK-Anlagen und Wärmepumpen werden in der Literatur teilweise kontrovers diskutiert, so leitet Eikmeier et al. (2005) ein Wärmeerzeugungspotenzial für

Objekt-Kleinst-BHKW in Wohngebäuden von 1,2 TWh/a ab, während in Nabe (2011) die von Wärmepumpen bereitgestellte Nutzenergie auf ca. 44 TWh/a geschätzt wird.

Daher entwickeln das Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) und das Europäische Institut für Energieforschung (EIFER) seit Juli 2010 ein Optimiermodell in der TIMES-Modellumgebung (Loulou et al. 2005), welches es durch die integrierte Betrachtung von Elektrizitäts- und Wärmesystem erlaubt, das wirtschaftliche Potenzial von Techniken an der Schnittstelle beider Systeme, insbesondere dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungs-Techniken und Wärmepumpen in Wohngebäuden, im Systemzusammenhang über einen Planungshorizont bis 2050 zu untersuchen (McKenna et al. 2011, Kunze et al. 2011). Die im Modell bereits umgesetzte Kopplung des Wärme- und Elektrizitätssystems zu einem integrierten Systemmodell stellt eine entscheidende methodische Weiterentwicklung zu bestehenden reinen Elektrizitäts- oder Wärmesystemmodellen dar.

2 Methodik

Im Folgenden werden die gewählten methodischen Ansätze zur Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials von Wärmepumpen- und Mikro-KWK-Techniken im deutschen Wohngebäudesektor vorgestellt.

Das wirtschaftliche Technikpotenzial wird durch den Einsatz eines optimierenden Energiesystemmodells ermittelt. Zielfunktion ist dabei die Minimierung der diskontierten Systemausgaben, die sich aus investitionsabhängigen, betriebsabhängigen und Brennstoffausgaben zusammensetzen. Ermittelt wird die ausgabenminimale Konfiguration aus Kapazitäts-Ersatz bzw. Zubau und Einsatzplanung im Elektrizitäts- sowie Wärmesystem, die unter Einhaltung von Nebenbedingungen wie Energie- und Kapazitätsbilanzen, des modellierten Referenzenergiesystems sowie technischer und wirtschaftlicher Zusammenhänge, die exogen vorgegebene Elektrizitäts- und Wärmenachfrage gewährleistet. Bei der Umsetzung des Modells kommt der Modellgenerator TIMES (*The Integrated MARKAL EFOM System*) zum Einsatz. Eine Einführung findet sich in Loulou et al. (2005). Eine formale Beschreibung der zugrundeliegenden Zielfunktion sowie der Nebenbedingungen wird dort ab S. 34 gegeben. Als Zeithorizont der Modellierung wird das Jahr 2050 gewählt, da dieser erlaubt ein bis zwei Ersatzzyklen der betrachteten Technik zu untersuchen.

2.1 Nachfrageklassifizierung

Das deutsche Elektrizitätsversorgungssystem ist von zentraler Elektrizitätserzeugung in Großkraftwerken und netzinfrastrukturbasierter Versorgung gekennzeichnet. Da eine Zuordnung von Produktionseinheiten zu Nachfrageentitäten in diesem Zusammenhang nicht von Interesse ist, erfolgt unter der vereinfachenden Annahme des Fortbestands der umfassenden Netzinfrastruktur die Modellierung der Elektrizitätsnachfrage aggregiert.

Hingegen herrscht im Wärmeversorgungssystem des deutschen Wohngebäudesektors die objektbasierte Wärmeerzeugung vor, während, beungünstigt durch den höheren Transportaufwand von Wärme im Vergleich zu Elektrizität, der Anteil netzinfrastrukturbasierter Raumwärme- und Trinkwarmwasser-Versorgung im deutschen Wohngebäudebereich bei lediglich 7,5 % liegt (BMW 2010b). Daher muss bei der

Modellierung des Wärmesystems der Zusammenhang zwischen Produktionseinheiten und Nachfrageobjekten in die Betrachtung mit einbezogen werden, indem der Wohngebäudebestand anhand geeigneter Kriterien klassifiziert und diesen Nachfrageklassen zur Verfügung stehende Versorgungsoptionen zugewiesen werden.

Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal wird dabei die zur Verfügung stehende Energieträgerinfrastruktur herangezogen, d.h. die Unterscheidung, ob ein Erdgasverteilnetz oder Fernwärmenetz oder keines von beiden zur Verfügung steht.

Weiterhin wird zur Berücksichtigung von Größendegressionseffekten in fünf Klassen der gebäudespezifischen Wärmenachfrage unterschieden. Für Wohneinheiten ist die gemeinsame Verteilung der Merkmale Gebäudegrößenklasse, Beheizungsart und Nutzfläche in Statistisches Bundesamt (2008) gegeben. Da in dieser Quelle hingegen keine Aussage über den Wärmebedarf getroffen wird bzw. nicht der energetische Gebäudezustand, z.B. als flächenspezifischer Heizwärmebedarf, gegeben ist, wird eine durch eigene Berechnungen aktualisierte Verteilung gemäß Kleemann et al. (2004) herangezogen. Da die objektbasierte Wärmeerzeugung in Deutschland zumeist und weiter zunehmend auf Gebäudeebene statt auf Wohneinheitenebene stattfindet, wird zusammen mit einer angenommenen Verteilung der gebäudespezifischen Wohneinheitenzahl eine Verteilung des gebäudespezifischen Jahresgesamtwärmebedarfs ermittelt und o.g. Klassifizierung zugrunde gelegt.

2.2 Abbildung der Technikooptionen

Technikooptionen zur Wärmeversorgung werden anhand der Parameter *spezifische Investition*, *thermischer* (und bei KWK elektrischer) *Wirkungsgrad*, *technische Lebensdauer* und *Betriebskosten* in fünf Leistungsklassen gemäß Kleemann et al. (2004) und ASUE (2005), ergänzt durch Herstellerangaben, spezifiziert und den entsprechenden Wärmebedarfsklassen als Versorgungsoption bzw. Zubauoption zugewiesen. Die auf diese Weise berücksichtigten Techniken umfassen Gas-, Öl- und Holzpelletskessel, Mikro-BHKW, Festbrennstofföfen, Wärmepumpen, Fernwärme und solarthermische Heiz- und Trinkwarmwasserbereitung. Weiterhin erlaubt der Zubau der Technikooption *Speicher* die Übertragung von Wärme auf zeitlich nachgelagerte Zeitpunkte. Zunehmende Wärmeschutzmaßnahmen in Neubau- und Bestandsgebäuden werden durch eine Technikooption *passive Wärmeeffizienz* abgebildet. Dieser wird ein exogener Mindestausbau zugewiesen, der nicht technisch-wirtschaftlich motivierte Maßnahmen repräsentiert, wie sie in der Energieeinsparverordnung oder im Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz vorgeschrieben sind.

Bei der Abbildung des elektrischen Kraftwerksparks werden 15 Techniken in technikabhängig bis zu drei Größenklassen in analoger Weise parametrisiert. Die Altersstruktur der Bestandskraftwerke, abgeleitet aus Platts und BMU (2011), und mithin das Ersatzpotenzial ist in Form von bis zu sieben Altersklassen gegeben.

Im Modell werden die Emissionen von CO₂ nach Fritsche (2007) sowie Struschka et al. (2008) bilanziert. Während in Fritsche (2007) auch Vorketten betrachtet werden, erfolgt die Berechnung des CO₂-Ausstoßes bei Struschka et al. (2008) auf Basis der Emission an der jeweiligen Stufe in der Energieumwandlungskette. Weiterhin wird der CO₂-Ausstoß im Modell nach dessen Kostenrelevanz unterschieden. Während Großkraftwerke und bestimmte

Industriebranchen für eine emittierte Einheit CO₂ eigene zugestandene Zertifikate geltend machen oder zusätzliche Zertifikate erwerben müssen, ist die Energieumwandlung beim Endverbraucher (z.B. bei der Raumheizung mit Erdgas-Brennwerttechnik) ohne Emissionsausgaben verbunden.

2.3 Zeitauflösung und energiepolitische Instrumente

Zur beabsichtigten Analyse der Interaktionen zwischen Elektrizitätssystem mit wachsendem Anteil fluktuierend einspeisender erneuerbarer Techniken und dem Wärmesystem mit flexibel einsetzbaren Elektrizität erzeugenden oder verbrauchenden Wärmeversorgungsstechniken (BHKW resp. Wärmepumpen) erfordert die gewählte Zeitauflösung die Abbildbarkeit von Jahresgängen, Wochengängen und Tagesgängen, gründend auf 50Hertz Transmission et al. und ENTSO-E. Daher werden in vier Jahreszeiten je eine Typwoche in dreistündiger Auflösung betrachtet.

Die gesetzliche Zulage sowie vermiedene Netznutzungsentgelte nach KWK-G werden als negative Ausgaben in der Zielfunktion berücksichtigt. Da der Zubau erneuerbarer Elektrizitätstechniken in Deutschland bislang sehr weitgehend vom Niveau der Einspeisevergütung nach EEG abhängig ist, welche wiederum im Gegensatz zur gesetzlichen Zulage nach KWK-G dynamisch an die Erreichung der Ausbauziele angepasst wird, werden diesen Techniken exogen Ausbaupfade zugewiesen.

3 Ergebnisse

Erste Modellergebnisse zeigen eine Steigerung der kumulierten Kapazität von Wärmepumpen von ca. 4 GW_{th} im Jahr 2010 auf ca. 54,5 GW_{th} im Jahr 2050 auf (vgl. Abbildung 2). Weiterhin lässt sich ein Zubau von Blockheizkraftwerken im Umfang von ca. 11,5 GW_{th} ableiten, welches überwiegend in der Nachfrageklasse der großen Mehrfamilienhäuser realisiert wird.

Dies sind Ergebnisse eines Szenarios, in dem von einer Absenkung des jährlichen Heizenergiebedarfs von ca. 2100 PJ im Jahr 2010 auf 1600 PJ im Jahr 2050 im Sektor der privaten Haushalte und von einer konstanten Stromnachfrage über alle Sektoren bis 2050 ausgegangen wird. Weitere Rahmendaten sind ein vorgegebener, da politisch motivierter, Ausbaupfad von Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energieträger und eine Energieträgerpreisentwicklung gemäß BMWi (2010). Von Investitionsreduktionen der Energieumwandlungstechniken des Wärmesystems im Zeitverlauf wird in diesem Szenario abgesehen. Diese sind „Technikoptimismus“-Szenarien vorbehalten, deren detaillierte Ausführung den Rahmen dieses Beitrages übersteigen würde.

Anhand der Ergebnisse der Optimierläufe verschiedener Szenarien werden darüber hinaus die Kosten der Sektor übergreifenden Elektrizitäts- und der Wärmeversorgung des Wohngebäudesektors für die gesamte deutsche Volkswirtschaft ersichtlich. Zusätzlich kann die Emission von CO₂ bilanziert und deren Entwicklung skizziert werden sowie durch die explizite Vorgabe von Emissionsgrenzwerten ein ausgabenminimales Energieversorgungssystem unter Einhaltung von Emissionszielen bestimmt werden.

Abbildung 2 stellt den Verlauf der kumulierten Kapazität von Energiewandlungstechniken des deutschen Wärmesystems im Sektor der privaten Haushalte im Zeitverlauf bis 2050 dar.

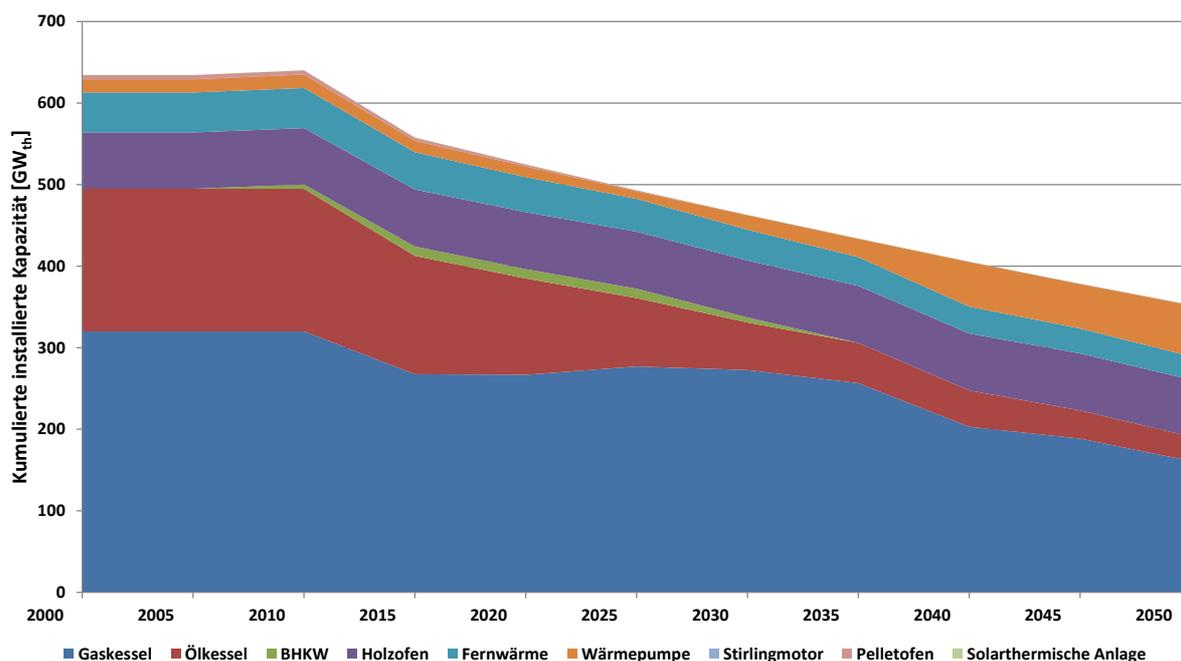


Abbildung 2: Verlauf der kumulierten Kapazität von Energiewandlungstechniken des Wärmesystems bis 2050

Abbildung 3 skizziert den Ausstoß an CO₂ auf die in der Methodik beschriebenen zwei Arten.

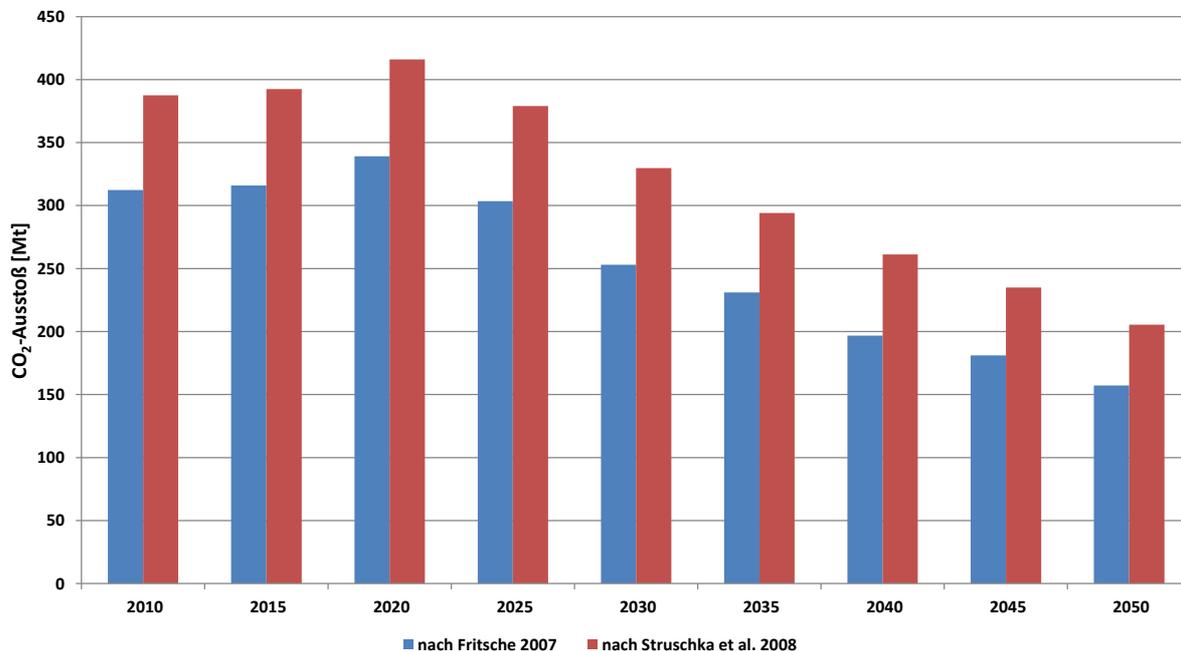


Abbildung 3: CO₂-Ausstoß 2010 bis 2050 bilanziert mit Emissionsfaktoren auf Basis von (Fritsche 2007; Struschka et al. 2008)

Abbildung 4 verdeutlicht die Strom- und Wärmegestehungskosten im Zeitverlauf bis 2050 für das Referenz-Szenario. Die Stromgestehungskosten sind einerseits als Gestehungskosten ab Kraftwerk und andererseits aus Sicht der Endverbraucher ausgewiesen und bewegen

sich im Bereich zwischen 3,5 – 5,5 €cent/kWh bzw. 17,5 – 19,5 €cent/kWh. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für Leitungsentgelte, Steuern, Abgaben etc. pauschal Ausgaben in Höhe von 14 €cent/kWh angenommen werden, welche sich in etwa in der Differenz zwischen Großhandels- und Endverbraucherpreisen widerspiegeln.

Die Stromgestehungskosten verlaufen bis 2030 steigend, im weiteren Verlauf bis 2050 weitgehend konstant. Strombezugskosten aus Sicht der Endverbraucher verhalten sich analog zu den Gestehungskosten mit dem skizzierten Aufschlag von 14 €cent/kWh. Die Wärmegegestehungskosten sind auf zwei Arten skizziert, für sämtliche Wandlungstechniken ohne Wärmepumpen und für alle Wärmetechniken mit Wärmepumpen. Insgesamt ist ein fallender Verlauf festzustellen, da der zu deckende Heizwärmebedarf ebenfalls absinkt.

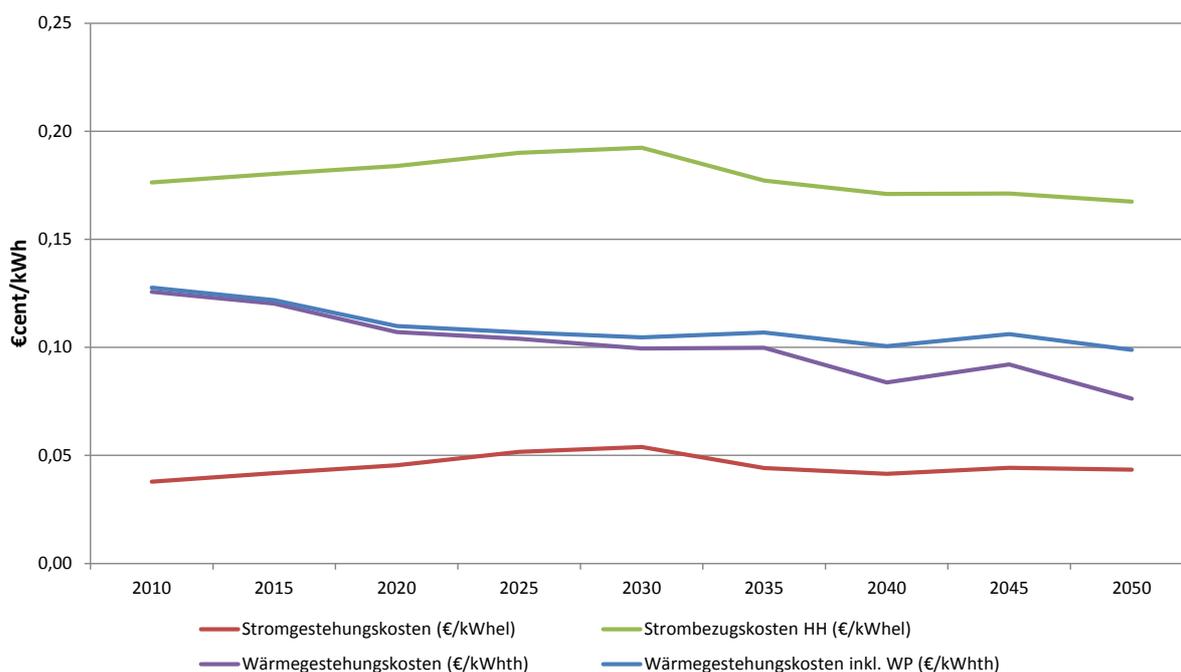


Abbildung 4: Strom- und Wärmegegestehungskosten im Zeitverlauf bis 2050

4 Diskussion

Die Ansätze des vorgestellten Modells sollten insbesondere hinsichtlich der Ergebnisse und der Methodik kritisch reflektiert werden.

4.1 Ergebnisse

Die kumulierte Kapazität Energiewandlungstechniken des Wärmesystems ist insgesamt fallend, da die Annahme getroffen wird, dass der jährliche Heizenergiebedarfs um 1 %/a auf Grund von Energieeffizienzsteigerung durch Ersatz- und Neubau abgesenkt wird.

Die Ergebnisse, Strom-/ Wärmegegestehungskosten, werden in erheblichem Maße von der Entwicklung des Elektrizitätssystems beeinflusst. Hierbei wird ein Ausbaupfad der Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energieträger, wie Wind-Onshore/ Offshore und Photovoltaik, fest vorgegeben und nicht in der Optimierung bestimmt. Durch resultierende niedrigere Gestehungskosten und steigende Preise fossiler Energieträger wird der Ausbau von Wärmepumpen begünstigt.

Die Stromgestehungskosten verlaufen bis 2030 steigend, da von einem weiterhin dominanten thermischen Kraftwerkspark und einer Preissteigerung fossiler Energieträger ausgegangen wird. Der Ausbau von Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energieträger folgt einem Entwicklungspfad vorgegeben durch die Ausbauziele der Bundesregierung (BMU 2010). Diese Techniken gewinnen zunehmend an Bedeutung, was die Stromgestehungskosten angesichts der Substitution sich vertuernder fossiler Energieträger absinken und dann auf Grund von Kompensationseffekten des weiteren Ausbaus von EE-Techniken einerseits und steigender Energieträgerpreise andererseits fast konstant halten lässt.

4.2 Methodik

Investitionsentscheidungen werden in den Optimierläufen nicht für jedes Gebäudeobjekt einzeln, sondern für eine jeweilige Nachfrageklasse getroffen. Damit wird in den Ergebnissen implizit angenommen, dass alle Gebäude in der jeweiligen Klasse mit den gleichen Technologien oder dem gleichen Technologiemix versorgt werden. Hier kann es zu einem „Portfolio“-Effekt kommen d.h. dass jedes Einzelgebäude in einer bestimmten Nachfrageklasse über einen ganzen Mix an Techniken wärmeversorgt wird, anstatt jeweils alleinig einer der verschiedenen, der Nachfrageklasse zugewiesenen Techniken direkt zugeordnet werden kann.

Im beschriebenen Modell repräsentieren die Nachfrageklassen abstrakte Klassen ohne räumliche Referenzierung. Dabei bleiben Fragen nach Nutzungskonkurrenzen von leitungsgebundener und objektbasierter Wärmeversorgung weitgehend unbeantwortet. Der Anteil der über Fernwärme versorgten Gebäude bleibt gemäß des derzeitigen Anteils über den Zeitverlauf konstant.

In der Entwicklungsumgebung TIMES wird ein Optimieransatz gewählt. Hierbei wird von einer perfekten Voraussicht bei den Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen ausgegangen. Kenntnisse beispielsweise der Änderungen der Nachfrage oder der Entwicklung der Energieträgerpreise werden hierbei angenommen. Des Weiteren ist keine Trägheit bei den Investitions- wie Desinvestitionsentscheidungen implementiert.

Das beschriebene Modell fokussiert auf Seiten des Wärmesystems ausschließlich auf den Wohngebäudesektor. Wechselwirkungen mit anderen Sektoren, wie dem GHD-Sektor, was weiteren Erkenntnisgewinn hinsichtlich des Potenzials leitungsgebundener Wärme erbringen könnte, bleiben unberücksichtigt.

In Bezug auf Ableitung von Nachfrageklassen wird auf eine weitere Untergliederung der Nachfrage anhand weiterer Merkmale wie das nutzerspezifische Verhalten wird aufgrund der Notwendigkeit der Begrenzung der Modellkomplexität verzichtet.

Eine Problematik bei der Parametrierung der vorgestellten Zeittypen mit Mittelwerten aller durch den jeweiligen Zeittyp repräsentierten Werte aus dem vollständigen Zeitgang ist die prinzipbedingt gute Wiedergabe der Mittelwerte bzw. Stimmigkeit der Gesamtbilanz bei gleichzeitig unzureichend guter Wiedergabe der Varianz bzw. von Extremwerten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das wirtschaftliche Potenzial von Techniken an der Schnittstelle von Elektrizitäts- und Wärmesystem wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Daher wurde in diesem Beitrag ein Modell vorgestellt, in welchem beide Teilsysteme gleichermaßen abgebildet sind. Dadurch wird das Potenzial von Schnittstellentechniken wie Mikro-KWK-Anlagen und Wärmepumpen durch die Dynamiken beider Systeme, wie die Entwicklung der Stromgestehungskosten oder der Nachfrage nach Raumwärme und Warmwasser, bestimmt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass unter gegebenen Randbedingungen ein inneres Optimum existiert, das ein wirtschaftliches Potenzial für Mikro-KWK-Anlagen und Wärmepumpen in der Größenordnung von 11,5 GW_{th} bzw. 54,5 GW_{th} ausweist.

Zukünftige Erweiterungen des entwickelten Modells betreffen die Implementierung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung, die Integration weiterer Nachfragesektoren und die Untersuchung des Verbundsystems von KWK, Wärmepumpen und thermischer Speicher hinsichtlich dessen Potenzial zum Lastmanagement fluktuierender Energieeinspeisung.

Literaturverzeichnis

50Hertz Transmission, Amprion, EnBW Transportnetze, TenneT TSO (n.d.): Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Abrufbar unter <http://www.eeg-kwk.net>

ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2005): BHKW-Kenndaten 2005. Kaiserlautern: ASUE (Hrsg.).

ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2005): Ratgeber Wärmeversorgung mit Kostenvergleich Heizung 2011 Neubau/Grundsanierung. Kaiserlautern: ASUE (Hrsg.).

Bartels, M. (2009): Cost Efficient Expansion of District Heat Networks in Germany. München: Oldenbourg Industrieverlag.

Blesl, M.; Kempe, S.; Fahl, U.; Voß, A. (2004): Die Rolle der KWK und der Fernwärme in der deutschen Energieversorgung bis 2020. In: AGFW (Hrsg.): Pluralistische Wärmeversorgung, Zweiter Bearbeitungsabschnitt, Band 3, Frankfurt, S. 3-82.

Bruckner, T. (1996): Dynamische Energie- und Emissionsoptimierung regionaler Energiesysteme. Diss. Würzburg: Universität Würzburg.

BMU Bundesministerium Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Nationaler Aktionsplan für erneuerbare Energie gemäß der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Berlin: BMU.

BMU Bundesministerium Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011): Datenbank „Kraftwerke in Deutschland“. Berlin: BMU (Hrsg.).

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und BMU Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: BMWi (Hrsg.).

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010): Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung (Gesamtausgabe); Zahlen und Fakten. Berlin: BMWi Referat III C 3.

Statistisches Bundesamt (2008): Bautätigkeit und Wohnungen -: Mikrozensus - Zusatzerhebung 2006 Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte; Fachserie 5, Heft 1. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Hrsg.).

Statistisches Bundesamt (2010): Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Abgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969 - 2009. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Hrsg.).

Eikmeier, B.; Gabriel, J. et al. (2005): Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Herrsching: Energie & Management.

ENTSO-E (n.d.): Statistical Database. Abrufbar unter <https://www.entsoe.eu>

Fritsche, U. R. (2007): Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten; Kurzbericht im Auftrag des Bundesverbands der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. (BGW). Darmstadt.

Genoese, M. (2010): Energiewirtschaftliche Analysen des deutschen Strommarkts mit agentenbasierter Simulation. Baden-Baden: Nomos.

Horn, M.; Ziesing, H.-J. et al. (2007): Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO₂-Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Dessau.

Kleemann, M., Krüger, B., Heckler, R. (2004): Verbrauchskennzahlen und Fernwärmepotenziale für Wohn- und Nichtwohngebäude in Städten. In: AGFW (Hrsg.) Pluralistische Wärmeversorgung, Zweiter Bearbeitungsabschnitt, Band 1, Frankfurt, S. 49.

Kunze, R.; McKenna, R. et al. (2011): Wärmebedarf in Gebäuden – Methodische Ansätze zur modellgestützten Analyse von Energiesystemen. In: Energieeffizienz – Tagungsband des VDI-Expertenforums „Energieeffizienz in den Städten und der Industrie von morgen“. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 11-27.

Loulou, R.; Remme, U.; Kanudia, A.; Lehtila, A.; Goldstein, G. (2005): Documentation for the TIMES Model. Abrufbar unter: <http://www.iea-etsap.org/web/Docs/TIMESDoc-Intro.pdf>

McKenna, R.; Fehrenbach, D.; Merkel, E.; Fichtner, W. (2011): Modelling of the German domestic heat sector in TIMES, Beitrag auf der 34. IAEE-Konferenz, Stockholm.

Möst, D. (2008): Einführung zur Energiesystemanalyse. In: Workshop Energiesystemanalyse. Karlsruhe: Universitätsverlag, S. 20.

Nabe, C. (2011): Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strom und zur Netzintegration erneuerbarer Energien. Berlin: Ecofys

Platts (n.d.): UDI World Electric Power Plants Data Base. Washington DC: Platts, UDI Products Group (Hrsg.).

Struschka, M.; Kilgus, D.; Springmann, M.; Baumbach, G. (2008): Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Dessau-Roßlau: UBA (Hrsg.).

ZIV Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks Zentralinnungsverband (Hrsg.) (2011): Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2010; ZIV.