

Erreichung der Klimaschutzziele 2050 bei der Wohngebäude-Wärmeversorgung

Nikolaus Diefenbach, Marc Großklos, André Müller, Michael Grafe und Stefan Swiderek

Klimaschutz heißt nicht nur Strom- oder Verkehrs-, sondern auch Wärmewende. Das bedeutet, die Wärmeversorgung schrittweise auf erneuerbare Energiequellen umzustellen. Bei den Wohngebäuden lauten die Schlüsselfaktoren zur Erreichung der langfristigen Klimaschutzziele Wärmeschutz, Wärmepumpen und Windenergie. Zu diesem Ergebnis kommt ein Forschungsprojekt zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von erneuerbarem Energieangebot und -bedarf.

Entwicklung eines Simulationsmodells

Aussagen zur zukünftigen Wärmeversorgung mit Nutzung der fluktuierenden Wind- und Solarenergie erfordern eine Untersuchung des zeitlichen Zusammenspiels von Energieangebot und -nachfrage. Zu diesem Zweck wurde im Projekt ein Simulationsmodell für die Jahresanalyse in Stundenschritten entwickelt. Unterschiedliche Wohngebäudetypen (Ein- und Mehrfamilienhäuser mit unterschiedlichen Wärmeschutz-Standards) können ebenso wie die Solar- und Windstromerzeugung (inklusive Offshore-Anteil) über verschiedene Standorte in Deutschland verteilt untersucht werden. Individuelle Nutzungs- und Haushaltsstromprofile für die Gebäude werden mit einem stochastischen Modellansatz festgelegt, der auf der Zeitverwendungserhebung des statistischen Bundesamtes basiert [1-3].

Abb. 1 gibt einen Überblick über die Funktionsweise des Modells. Die elektrische Energiebilanz wird aufgrund der räumlichen Ausgleichsfunktion des Stromnetzes in einem Punkt zusammengezogen: So werden in der „ersten Strombilanz“ der Haushaltsstromverbrauch, die Photovoltaik(PV)- und Windstromerzeugung sowie die in Stromspeichern vorhandene Energie soweit möglich zum Ausgleich gebracht. Ein Restbedarf an elektrischer Energie bzw. ein Überschuss von Photovoltaik- und Windstrom geht dann in die „zweite Strombilanz“ ein. Dabei werden zum einen diejenigen Wärmeversorgungssysteme berücksichtigt, die elektrische Energie entweder verbrauchen (elektrische Wärmepumpen und Heizstäbe) oder erzeugen (Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, KWK). Zum anderen wird ein Kraftwerkspark mit brennstoffbetriebenen Kraftwerken für den Lastausgleich betrachtet. Wenn anschließend noch Solar- und Wind-



Wärmeschutz, Wärmepumpen und Windenergie sind Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Energiewende bei Wohngebäuden

Bild: Adobe Stock

stromüberschüsse verbleiben, so werden diese in der „dritten Strombilanz“ vorrangig zur Ladung von Strom- und anschließend (durch Wärmepumpen bzw. Heizstäbe) von Wärmespeichern verwendet. Sollten nun immer noch Überschüsse bestehen, so verlassen diese ohne Berücksichtigung von Gutschriften ungenutzt die Bilanzgrenze.

Anders als bei der elektrischen Energie lässt sich die Wärmebilanz der Gebäude nicht in einem Punkt (also etwa mithilfe eines einzigen „mittleren“ Gebäudes) analysieren, da sich beispielsweise Überschüsse in einzelnen Wärmespeichern nicht auf andere Gebäude übertragen lassen. Außerdem können im Simulationsmodell multivalente Heizsysteme, die den Einsatz unterschiedlicher Wärmeerzeugungstechnologien erlauben, berücksichtigt werden: So ist es im Modell möglich, in einem Gebäude-Heizsystem oder Wärmenetz einen Heizkessel, eine elektrische Wärme-

pumpe, eine KWK-Anlage, einen elektrischen Heizstab und eine Solarthermieanlage einzusetzen – und zwar in beliebiger Kombination mit jeweils unterschiedlichen Anlagentypen und wahlweise mit oder ohne Wärmespeicher. Die einzelnen Heizsysteme weisen also eine unterschiedliche und ggf. sehr hohe Flexibilität im Hinblick auf die Verwendung bzw. Erzeugung von elektrischer Energie auf, so dass sich im Rahmen der „zweiten Strombilanz“ die Frage nach dem jeweils richtigen Betriebspunkt stellt.

Gelöst wurde dieses Problem mit einem Ansatz, der sich an das „Merit-Order“-Konzept für die Ermittlung der Einsatzreihenfolge im elektrischen Kraftwerkspark anlehnt. Wärmeversorgungssysteme mit flexiblem elektrischen Energiebedarf können gedanklich in einzelne Blöcke von (Einspar-)Kraftwerken zerlegt werden: So lässt sich beispielsweise in einem System mit elektrischer

Wärmepumpe und Heizkessel der aktuelle Wärmebedarf einerseits mit der elektrischen Wärmepumpe decken: Dann muss ein tatsächlicher Kraftwerksblock aus dem elektrischen Energiesystem die benötigte Leistung bereitstellen. Andererseits lassen sich aber auch die Wärmepumpe herunter- und der Kessel hochfahren – der elektrische Energiebedarf des Heizsystems wird nun quasi durch einen elektrischen „Einspar-Block“ des flexiblen Heizsystems selbst gedeckt. Welche Lösung besser ist, entscheidet sich an den Grenzkosten der jeweiligen Option, d.h. hier an den pro erzeugter oder vermiedener Kilowattstunde elektrischer Energie anfallenden Brennstoffkosten im Kraftwerk bzw. im Heizkessel.

Im Simulationsmodell werden für die „zweite Strombilanz“ alle im Zeitschritt verfügbaren Blöcke berücksichtigt, sowohl im tatsächlichen Kraftwerkspark als auch in den flexiblen Wärmeversorgungssystemen, und entsprechend ihren Grenzkosten geordnet. Auf diese Weise werden diejenigen Blöcke ermittelt, mit denen sich der Gesamtstrombedarf auf die günstigste Weise decken lässt, und es ergeben sich die Betriebspunkte aller flexiblen Heizsysteme und aller Kraftwerke. Statt der Brennstoffkosten lassen sich in diesem Konzept auch andere Zielgrößen verwenden, so wie konkret im Projekt der (nicht-erneuerbare) Primärenergiebedarf oder die Treibhausgasemissionen.

Randbedingungen zur Wohngebäude-Wärmeversorgung

Mit dem Simulationsmodell wurden Untersuchungen zur Wärmeversorgung im Wohngebäudebestand durchgeführt. Als Ziel wurde die Treibhausgaseminderung um 87,5 % bis 2050 gegenüber 1990 betrachtet, also der Mittelwert des Zielintervalls in Höhe von 80-95 % für die nationalen Treibhausgasemissionen aus dem Energiekonzept der Bundesregierung von 2010. Für die Wohngebäude-Wärmeversorgung resultiert damit ein Zielwert von ungefähr 25 Mt/a (Megatonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr) inklusive Vorketten zur Gewinnung der eingesetzten Brennstoffe.

Weitere Randbedingungen der Untersuchung sind in der Tab. weiter unten angegeben. Die großen Bandbreiten der für die Wohngebäude-Wärmeversorgung angesetzten Solar- und Windstrompotenziale ergeben sich aus den Unsicherheiten über die Gesamtpotenziale in Deutschland. Darüber hinaus ist das Herunterbrechen auf die Wohngebäude mit Unsicherheiten behaftet.

Das Biomasse-Potenzial für die Wohngebäude-Wärmeversorgung wird aufgrund einer kritischeren Einschätzung des Energiepflanzenanbaus deutlich geringer ange-

nommen als in früheren Untersuchungen des IWU. Aus dem gleichen Grund wurde im Projekt ausschließlich Holz als Biomasse-Brennstoff berücksichtigt. Die Betrachtung der fossilen Brennstoffe wurde auf Erdgas beschränkt, also auf denjenigen fossilen Energieträger mit den günstigsten spezifischen Treibhausgas-Emissionswerten.

Für die allgemeine Stromerzeugung werden Erdgas-Kraftwerke und – je nach Untersuchungsvariante zur Ausnutzung des Biomasse-Potenzials – auch mit Holz befeuerte Kraftwerke berücksichtigt. Als Energiequelle der Wärmepumpen wurden je zur Hälfte Außenluft und Erdreich angenommen.

Der Wärmebedarf Q im deutschen Wohngebäudesektor (für Heizung und Warmwasser mit Wärmeverteilungsverlusten in den Gebäuden) liegt aktuell in einer Größenordnung von 550 TWh/a. Für den Wohngebäudebestand 2050 wurde ein Bereich von 250-450 TWh/a angesetzt: Der Mittelpunkt dieses Intervalls entspricht mit 350 TWh/a ungefähr dem Ergebnis des Basisszenarios in [4] und setzt sehr weitgehende Anstrengungen zur Verbesserung des Wärmeschutzes voraus, insbesondere eine Verdopplung der mittleren Wärmeschutz-Modernisierungsrate (vgl. [5]) innerhalb weniger Jahre. Die untere Grenze von 250 TWh/a wäre vor diesem Hintergrund nur mit sehr ehrgeizigen Maßnahmen erreichbar und ist daher eher von theoretischer Bedeutung. Im Trendszenario – bei Fortschreibung der bisherigen Entwicklung für den Wärmeschutz – würde dagegen ungefähr die Intervallobergrenze von 450 TWh/a erreicht.

Untersuchung unterschiedlicher Wärmeversorgungsstrategien

Mit dem Simulationsmodell wurden zehn „idealtypische“ Wärmeversorgungsvarianten für den Wohngebäudesektor untersucht. Als Wärmebedarf im Wohngebäudebestand wurden 350 TWh/a angenommen, der Biomasseverbrauch wurde in allen Varianten auf 50 TWh/a einjustiert.

Der Einsatz einzelner Heizkessel (teils Erdgas-, teils Holzpelletkessel) bzw. Wärmepumpen erfolgte in Einzelhausheizungen, für KWK-Anlagen wurden Nahwärme-Block-

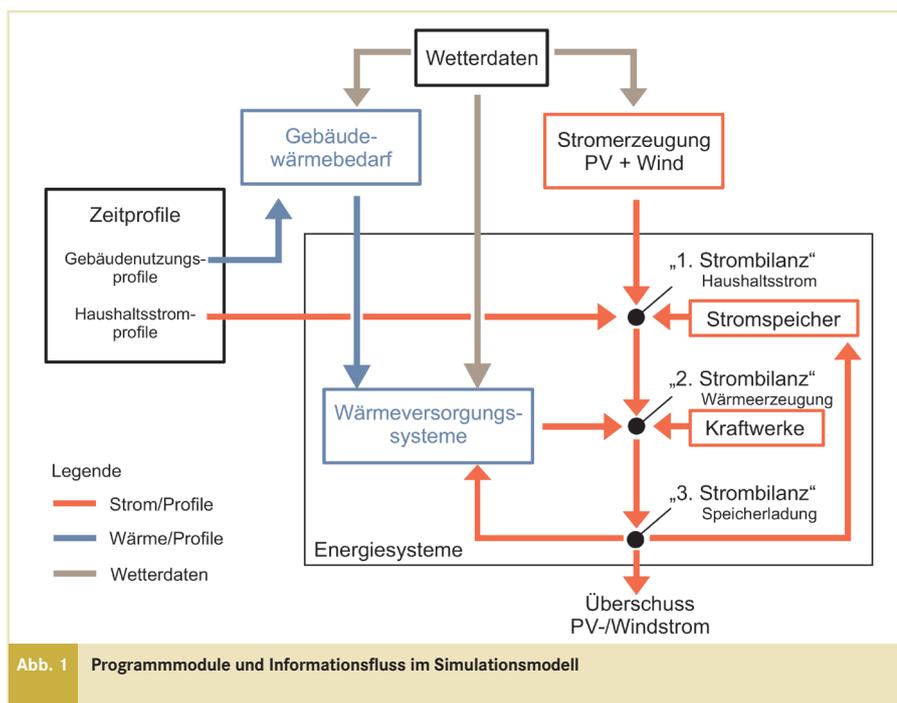


Abb. 1 Programmodule und Informationsfluss im Simulationsmodell

heizkraftwerke angenommen. Bivalente Wärmepumpen und KWK-Anlagen sind auf einen Anteil von 35 % der Wärmeleistung ausgelegt und werden durch Spitzenlast-Heizkessel begleitet.

Bei den ersten sechs Varianten (Var 0 bis Var 5) wurde keine Wind- und Solarstromnutzung für die Wohngebäude-Wärmeversorgung berücksichtigt. In den Varianten 1, 3 und 5 wurden hier jeweils ergänzend zur vorherigen Variante großzügig dimensionierte Solarthermieanlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung eingesetzt.

In den vier weiteren Varianten (Var 6 bis Var 9) wurde die Verwendung von 40 TWh/a Solarstrom und 80 TWh/a Windstrom für die Wohngebäude-Wärmeversorgung angesetzt. In separaten Analysen konnte gezeigt werden, dass sich Solarthermie und die Kombination von Photovoltaik und Wärmepumpen bei der Wärmeversorgung weitgehend gegenseitig substituieren können. Daher konnte in den Varianten 6-9 auf die

Betrachtung ergänzender solarthermischer Systeme verzichtet werden.

Abb. 2 gibt nähere Informationen zu den eingesetzten Wärmeerzeugungstechnologien der zehn Untersuchungsvarianten und zeigt die Ergebnisse für die Treibhausgasemissionen. Der Zielwert von 25 Mt/a ist als horizontale Linie eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die ersten sechs Varianten trotz teils großzügigem Einsatz von Solarthermieanlagen den Zielwert bei weitem nicht erreichen. Die letzten vier Varianten kommen der Zielmarke dagegen sehr nahe. Aus dieser Untersuchung und weiteren Variationen der Eingangsparameter konnten die folgenden Schlüsse gezogen werden:

■ Allein mit effizienter Brennstoffnutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmepumpen lässt sich das Klimaschutzziel für die Wohngebäude-Wärmeversorgung nicht erreichen. Dies gilt auch dann, wenn alle Möglichkeiten der Solarenergienutzung (durch Solarthermie und/oder Photovoltaik mit Wärmepumpen) voll ausgeschöpft werden.

■ Aus diesem Grund muss auch Windenergie mit erheblichen Anteilen zur Wärmeerzeugung beitragen. Dies ist vor dem Hintergrund zu verstehen, dass auch im wärmedämmten Wohngebäudebestand das Gros des Wärmeverbrauchs im Winter auftritt. Der Beitrag der Solarenergie ist vor allem hierdurch und nicht durch generelle Potenzialgrenzen (vgl. Tab.) beschränkt.

■ Umgekehrt kann und sollte in der zukünftigen Gebäude-Wärmeversorgung ein Brennstoffverbrauch im Sommer weitgehend vermieden werden. Dies gilt für fossile Energieträger Biomasse und für Einzelhausheizungen ebenso wie für Wärmenetze.

■ Für eine effiziente Windstromnutzung zur Wärmeversorgung sind elektrische Wärmepumpen notwendig, die zur Ausnutzung des fluktuierenden Energieangebots mit Wärmespeichern zu kombinieren sind. Dieser Technologie kommt somit eine entscheidende Rolle in der zukünftigen Wärmeversorgung zu. Dies gilt auch dann, wenn – wie im Projekt – konservative Annahmen zur Wärmepumpeneffizienz getroffen und über alle Systeme gemittelt Jahresarbeitszahlen in einer Größenordnung von lediglich 2,5 erreicht werden. Höhere Arbeitszahlen sind gleichwohl anzustreben und können die Zielerreichung erheblich vereinfachen.

Ergänzende Untersuchungen mit einem vereinfachten Energiebilanzmodell

Um die Ergebnisse der Simulationsrechnungen besser zu verstehen, im Hinblick auf ihre Verallgemeinerbarkeit besser zu begründen und weitere Parametervariationen leichter durchführen zu können, wurde noch ein paralleler Analyseansatz verfolgt. Grundlage ist dabei eine einfache Energiebilanz: Der Gebäude-Wärmebedarf Q (z. B. $Q = 350$ TWh/a) muss in seiner Summe durch Wärmeerzeugungssysteme gedeckt werden, die auf die vier hier betrachteten Energieträger Holz, Erdgas, Sonne und Wind zurückgreifen:

$$Q = Q_{\text{Holz}} + Q_{\text{Gas}} + Q_{\text{Sonne}} + Q_{\text{Wind}}$$

Alle diese Energieträger weisen aber begrenzte Potenziale auf: Im Fall der erneuerbaren Energien sind die angenommenen Obergrenzen in der Tab. genannt, beim Erd-

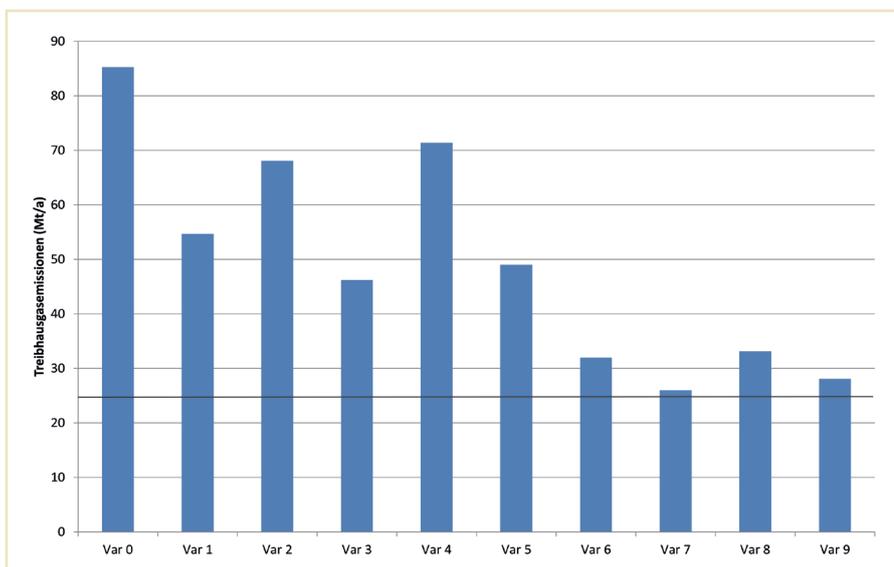


Abb. 2 Treibhausgasemissionen der Wohngebäude-Wärmeversorgung für die zehn Untersuchungsvarianten (Nr. 0 - 9)

CO₂-Äquivalente aller Treibhausgase inklusive Vorketten für die Gewinnung der Brennstoffe, Gebäude-Wärmebedarf 350 TWh/a, Biomassepotenzial (Holz) 50 TWh/a durchgezogene Linie: Treibhausgas-Emissionsziel 25 Mt/a

Var 0: Heizkessel

Var 1: Heizkessel + Solarthermie

Var 2: KWK + bivalente Wärmepumpen

Var 3: KWK + bivalente Wärmepumpen + Solarthermie

Var 4: Kraftwerke + monovalente Wärmepumpen

Var 5: Kraftwerke + monovalente Wärmepumpen + Solarthermie

Var 6: Photovoltaik-/Windstrom + Kraftwerke + monovalente Wärmepumpen

Var 7: Photovoltaik-/Windstrom + Kraftwerke + bivalente Wärmepumpen

Var 8: Photovoltaik-/Windstrom + KWK + bivalente Wärmepumpen

Var 9: Photovoltaik-/Windstrom + KWK kombiniert mit Wärmepumpen + bivalente Wärmepumpen

Tab.: Randbedingungen zur Analyse der Wohngebäude-Wärmeversorgung 2050

Emissionsziel (CO ₂ -Äquivalente)	25 Mt/a
Wärmebedarf der Wohngebäude	250-450 TWh/a
Windstrompotenzial	50-100 TWh/a
Solarstrompotenzial	50-100 TWh/a
Biomassepotenzial (Holz, Heizwert)	25-50 TWh/a

Die Potenzialgrenzen beziehen sich jeweils nur auf den Beitrag zur Wohngebäude-Wärmeversorgung

gas ist der Einsatz wegen des einzuhaltenen Klimaschutzziels limitiert. Wenn man nun annimmt, dass die Brennstoffe möglichst effizient, d.h. möglichst weitgehend in der Kombination Kraft-Wärme-Kopplung/effiziente Kraftwerke + Wärmepumpen und nur noch in geringen Anteilen (Annahme: ca. 20 %) in Spitzenlast-Heizkesseln bzw. ver-

bleibenden Heizkessel-Systemen eingesetzt werden, so stehen die maximal möglichen Beiträge der Wärmeerzeugung durch Brennstoffe bereits fest. Im Projekt wurden hierfür auf Basis des Treibhausgas-Emissionsziels von 25 Mt/a und des oberen Biomassepotenzials von 50 TWh/a die Werte $Q_{\text{Gas}} = 109$ TWh/a und $Q_{\text{Holz}} = 43$ TWh/a abgeschätzt.

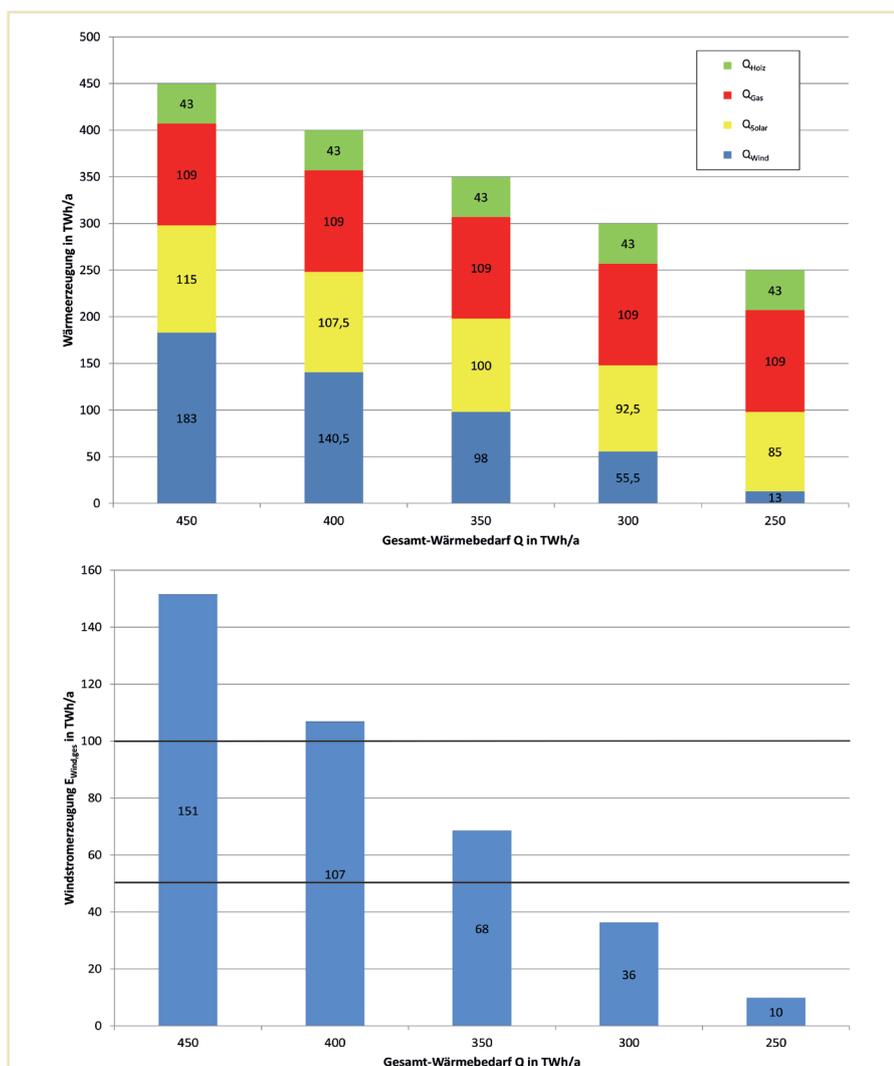


Abb. 3 Untersuchung unterschiedlicher Werte für den Gesamt-Wärmebedarf Q der Wohngebäude 2050 oben: Deckung des Wohngebäude-Wärmebedarfs durch die betrachteten Energieträger, unten: für die Wohngebäude-Wärmeversorgung erforderliche Windstromerzeugung, durchgezogene Linien: pessimistische (50 TWh/a) und optimistische (100 TWh/a) Windstrom-Potenzialgrenzen

Die möglichen Beiträge der fluktuierenden Energieträger Sonne und Wind wurden mit dem Simulationsmodell analysiert. Im Fall der Sonnenenergie ergab sich ein Betrag in der Größenordnung von $Q_{\text{Solar}} = 100$ TWh/a, der in grober Näherung unabhängig von der Höhe des Wohngebäude-Wärmeverbrauchs Q ist bzw. bei genauerer Analyse zwischen ungefähr $Q_{\text{Solar}} = 85$ TWh/a (bei $Q = 250$ TWh/a) und $Q_{\text{Solar}} = 115$ TWh/a (bei $Q = 450$ TWh/a) variiert.

Die verbleibende Differenz zum Gebäude-Wärmebedarf Q muss durch die Wärmeerzeugung aus Windkraft Q_{Wind} mit Hilfe von Wärmepumpen bereitgestellt werden. Abb. 3 oben zeigt diese Situation für Werte des Gebäude-Wärmebedarfs zwischen $Q = 450$ TWh/a (links) und $Q = 250$ TWh/a (rechts). Es ist zu erkennen, dass die Höhe des durch Windenergie zu deckenden Wärmebedarfs Q_{Wind} in sensitiver Weise vom Wärmebedarf im Wohngebäudebestand abhängt: So ergibt sich für $Q = 300$ TWh/a der Wert $Q_{\text{Wind}} = 55,5$ TWh/a. Bei einem um ein Drittel höheren Wärmebedarf von $Q = 400$ TWh/a beträgt der notwendige Wärmebeitrag der Windenergie dagegen $Q_{\text{Wind}} = 140,5$ TWh/a, liegt also um den Faktor 2,5 höher.

Noch deutlicher sind die Auswirkungen auf den Betrag der Windstromerzeugung $E_{\text{Wind,ges}}$ der insgesamt zur Deckung dieses Wärmebedarfs benötigt wird. Dieser ist im unteren Teil von Abb. 3 dargestellt: Bei $Q = 300$ TWh/a ergibt sich $E_{\text{Wind,ges}} = 36$ TWh/a. Dieser Wert liegt noch unter der pessimistischen Untergrenze des Windstromangebots für die Wohngebäude-Wärmeversorgung von 50 TWh/a (s. Tab.). Bei $Q = 400$ TWh/a resultiert dagegen ein circa dreimal so hoher Wert von $E_{\text{Wind,ges}} = 107$ TWh/a, der die optimistische Grenze von 100 TWh/a bereits überschreitet. Diese nochmals höhere Sensitivität der Windstrommengen liegt darin begründet, dass bei steigendem Deckungsbeitrag der Windenergie (Quotient Q_{Wind}/Q) die Effizienz der Windstromnutzung für die Wärmeversorgung abnimmt, da insbesondere vermehrt nicht mehr im System nutzbare Windstromüberschüsse auftreten.

Bei der Interpretation der konkreten Zahlenwerte ist zu beachten, dass die Windstromnutzung in diesem theoretischen Modellansatz immer erst nach der Solarenergienut-

zung erfolgt, da hier die Potenzialgrenzen der Windenergie ausgelotet werden sollen. In der Realität – bei gleichzeitigem Anstieg der Wind- und Solarenergiebeiträge für die Wärmeerzeugung – wären zunächst deutlich günstigere Relationen zwischen der aus Windstrom produzierten Wärme Q_{Wind} und der dafür benötigten elektrischen Energie $E_{\text{Wind,ges}}$ zu erwarten.

Aus diesen und weiteren Analysen mit dem vereinfachten Energiebilanzansatz wurden im Projekt die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

■ Die Reduzierung des Wärmeverbrauchs im Wohngebäudebestand ist von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der Klimaschutzziele. Die Rolle des verbesserten Wärmeschutzes liegt nicht nur darin, den Energieeinsatz dort zu minimieren, wo noch fossile Energieträger zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Vielmehr geht es auch darum, angesichts bestehender Potenzialgrenzen bei allen regenerativen Energieträgern den Weg für die Erreichung hoher Deckungsanteile dieser Energiequellen freizumachen.

■ Angesichts enger Potenzialgrenzen der Biomasse werden auch die Solar- und vor allem die Windenergie für die Gebäude-Wärmeversorgung benötigt. Damit diese aber überhaupt wirksam eingesetzt werden können, muss ein möglichst hoher Anteil der Heizsysteme zunächst einmal überhaupt die Fähigkeit besitzen, diese beiden Energiequellen zu nutzen. Im Hinblick auf die Windenergie sind daher möglichst hohe Anteile von elektrischen Wärmepumpen im Bestand anzustreben, wobei nicht nur monovalente, sondern auch auf kleinere Wärmepumpenleistungen ausgelegte bivalente (mit ergänzenden Heizkesseln ausgestattete) Systeme geeignet sind. Diese Ergebnisse gelten unabhängig davon, ob die Wärmeversorgung über Einzelhausheizungen oder Wärmenetze erfolgt.

Weiterführende Untersuchungen

Im Forschungsvorhaben wurden in ergänzenden Untersuchungen weitere Randbedingungen der künftigen Wohngebäude-Wärmeversorgung behandelt. Daraus resultierten insbesondere die folgenden Erkenntnisse:

■ Bei noch ehrgeizigeren Klimaschutzvorgaben (95 % Emissionsminderung gegenüber 1990) und geringeren Biomassepotenzialen (25 TWh/a) erscheinen die Ziele im Wohngebäudebestand nur erreichbar, wenn weitere „Zukunftstechnologien“ mitberücksichtigt werden. Insbesondere sind dies synthetische, aus Wind- und Solarenergie erzeugte Brennstoffe. Diese Option steht aber auf absehbare Zeit noch nicht zur Verfügung und weist außerdem Effizienz- und Kostennachteile gegenüber der direkten Nutzung von Solar- und Windstrom für die Wärmeversorgung auf. Eine robuste Klimaschutzstrategie sollte daher zunächst auf die bereits verfügbaren Technologien setzen, parallel aber möglichst schnell auch die Zukunftstechnologien marktfähig machen.

■ Die Notwendigkeit, in erheblichem Umfang Solar- und Windstrom für die Wärmeversorgung zu nutzen und hierfür in großem Maßstab elektrische Wärmepumpen einzusetzen, lässt sich auch dann begründen, wenn man die Simulationsrechnungen nicht wie oben dargestellt auf den Wohngebäude-sektor einschränkt, sondern auf den gesamten elektrischen Energiesektor ausdehnt. Im Forschungsprojekt erfolgte diese Analyse mithilfe eines vereinfachten Modellansatzes für den zeitlichen Verlauf des Energiebedarfs im Stromsektor.

■ Durch die verstärkte Nutzung elektrischer Wärmepumpen sind keine neuen Schwierigkeiten grundsätzlicher Art für die elektrische Energieversorgung zu erwarten. Sehr hohe Lastspitzen an den kältesten Wintertagen können durch den Einsatz bivalenter Wärmepumpensysteme vermieden werden. Neue Lösungen müssen allerdings gefunden werden, um die fluktuierende Wind- und Sonnenergie optimal zu nutzen. Aus Sicht der Informationstechnik sind hier entsprechende Maßnahmen notwendig, aber keine prinzipiellen Hindernisse zu erwarten: Gemäß dem in der Simulation verwendeten „Merit-Order“-Konzept erscheint im einfachsten Fall ein einziges zeitabhängiges Steuer- bzw. Preissignal ausreichend, das in den Heizsystemen vor Ort automatisch zur Festlegung des Betriebspunkts verarbeitet wird und insbesondere den aktuell verfügbaren Wind- und Solarstromanteil im Strommix widerspiegelt. Offene Fragen bestehen dagegen bezüglich des konkreten Mechanismus der Preisbildung für ein solches Signal. Dabei ist zu beachten, dass in zukünftigen Heizsystemen mit hoher Flexibilität bezüglich des elektrischen Energie-

einsatzes (also z. B. bivalenten Wärmepumpen) eine ständige wirtschaftliche Konkurrenzsituation zwischen der Inanspruchnahme von elektrischer Energie und Brennstoffen besteht, die zu jedem Zeitpunkt des Jahres im Sinne des Klimaschutzes möglichst optimal auszutarieren ist. Bei der Diskussion über Reformen des elektrischen Energiemarktes ist also immer auch das Zusammenspiel mit dem zukünftigen Wärmemarkt zu berücksichtigen.

Literatur

- [1] Diefenbach, N.; Großklos, M.; Grafe, M.; Müller, A.; Born, R.; Ruppert, H.; Graf, K.-M.; Krzikalla, N.: Modellentwicklung zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage im Wohngebäude-sektor. IWU, Darmstadt 2017.
- [2] Diefenbach, N.; Großklos, M.; Müller, A.; Grafe, M.; Swiderek, S.; Ruppert, H.; Graf, K.-M.; Krzikalla, N.: Analyse der Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäude-sektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050. IWU, Darmstadt 2019.
- [3] Großklos, M.; Diefenbach, N.; Grafe, M.; Müller, A.; Swiderek, S.; Ruppert, H.; Graf, K.-M.; Krzikalla, N.: Zukunftsfähige Neubauten als Baustein für einen klimaneutralen Gebäudebestand 2050. IWU, Darmstadt 2019.
- [4] Diefenbach, N.; Loga, T.; Stein, B.: Szenarienanalysen und Monitoringkonzepte im Hinblick auf die langfristigen Klimaschutzziele im deutschen Wohngebäudebestand. IWU, Darmstadt 2015.
- [5] Diefenbach, N.; Cischinsky, H.: Was ist eigentlich die energetische Sanierungsrate? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 65. Jg. (2015) Heft 7, S. 51-53.

*Dr. N. Diefenbach, M. Großklos, A. Müller, M. Grafe und S. Swiderek, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt
n.diefenbach@iwu.de
m.grossklos@iwu.de*

Das Forschungsvorhaben wurde vom Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im Förderschwerpunkt En:Sys durchgeführt. Für spezielle Fragestellungen zur elektrischen Energiewirtschaft waren die Hochschule Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, sowie das Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung, Aachen, als Projektpartner eingebunden. Die Forschungsergebnisse sind in drei Berichten veröffentlicht [1-3].