

Wärmepumpe und KWK

Konkurrenz oder eine sinnvolle Kombination?

Für das Gelingen der Wärmewende und des von Klimaschutzminister Robert Habeck eingeforderten Wärmepumpenhochlaufs gilt es mannigfaltige Herausforderungen zu lösen. Welche Chancen in diesem Zusammenhang eine Kombination von Wärmepumpe und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) eröffnet, wird im folgenden Beitrag erörtert.

TEXT: Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas

Das Ziel ist ambitioniert: 500 000 neu installierte Wärmepumpen pro Jahr ab 2024 – diese Vorgabe hat Bundesminister Robert Habeck beim Wärmepumpengipfel am 16. 11. 2022 erneut formuliert, und er hat dabei unterstrichen, dass er diese Zahl für umsetzbar hält. Damit soll erreicht werden, dass im Jahr 2030 etwa sechs Millionen Wärmepumpen in Deutschland verbaut sind [1], was als tragende Säule im Rahmen der Transformation des Energiesystems im Bereich Wärmeversorgung, kurz, der Wärmewende, angesehen wird. Dahinter steht die Prämisse, dass der elektrische Strom, der zum Antrieb der Wärmepumpen erforderlich ist, zunehmend auf Basis erneuerbarer Energien bereitgestellt wird. Dem entsprechend werden die Ausbauziele für PV und Windkraftanlagen deutlich angehoben. Ziel ist es, bis 2030 80 Prozent der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu bestreiten, wobei der erhöhte Bedarf für Wärmepumpen und die E-Mobilität im Rahmen der Sektorenkopplung bereits eingerechnet ist. Konkret geht man von einem Strombedarf von rund 600 TWh in 2030 aus [2], was einer Stei-

gerung von etwa 20 Prozent gegenüber dem Wert von 2021 entspricht.

Im Hinblick auf die konkrete Umsetzung des verstärkten Einsatzes von Wärmepumpen sind jedoch weitere Fragen wie folgt zu beantworten:

1. Wird der geplante Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung sowohl mit dem Wärmepumpenzubau schritthalten als auch regional ausgewogen erfolgen können – Stichwort: Ausgleich zwischen Nord- und Süddeutschland?
2. Werden die Verteilnetze in der Lage sein, die erforderlichen elektrischen Energieströme den Wärmepumpen sowie einer parallel aufzubauenden Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zuzuleiten?
3. Können Bestandsgebäude mit Blick auf die erforderlichen Heizleistungen und Vorlauftemperaturen mittels einer Wärmepumpe ausreichend und effizient beheizt werden?

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, dass die Kombination von Wärmepumpen und KWK-Geräten eine sehr gute Möglichkeit bietet, diese Fragen im Sinne der Erreichung des eingangs genannten Ziels zur verstärkten Verbreitung von Wärmepumpen positiv zu beantworten.

Hybride Heizungsanlagen: Wärmepumpe und KWK

Der mit der letzten Frage berührte Aspekt des Einsatzes von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden wird bereits in dem im Juli 2022 von der Bundesregierung vorgestellten Konzept zum Einsatz von 65 Prozent erneuerbaren Energien beim Austausch der Heizungsanlage ab dem 1. 1. 2024 [3] thematisiert. Hier wird konkret das Konzept der „Hybridheizung“ vorgeschlagen für ein Gebäude, das „bis zu einer energetischen Sanierung noch einen höheren Heizbedarf hat, der insbesondere in Spitzenzeiten schwierig mit der Wärmepumpe gedeckt werden kann.“ (Zitat aus [3]). Generell wird hier unter einer Hybridheizung eine Anlage verstanden, die aus zwei Wärmeerzeugern besteht, wobei der erste Erzeuger Wärme auf Basis erneuerbarer Energien bereitstellt und mindestens 65 Prozent des Wärmebedarfs deckt. Der Restbedarf kann durch einen zweiten Erzeuger erbracht werden, der mit konventionellen Brennstoffen betrieben werden kann.

Vorzugsweise, und im Einklang mit dem eingangs formulierten Ziel, sollte es sich bei dem ersten Erzeuger um eine

Wärmepumpe handeln, wie auch aus dem zuvor aufgeführten Zitat deutlich wird. Im Hinblick auf die Auswahl des zweiten Wärmeerzeugers, ist gerade in Bezug auf die drei aufgeworfenen Fragen, der Einsatz eines KWK-Gerätes besonders prädestiniert. KWK-Geräte sind in der Lage höhere Vorlauftemperaturen bereitzustellen. Zudem können sie die zusätzlich benötigte Wärme zu Spitzenzeiten auch bei niedrigen Außentemperaturen liefern (ad Frage 3). KWK-Geräte können dezentral eingesetzt werden und auf diese Weise mit dem neben der Wärme erzeugten elektrischen Strom die Verteilnetze stützen und damit den Strom erzeugen, der für die Wärmepumpen und Ladesäulen in einem Quartier benötigt wird (ad Frage 2). In Verbindung mit Energiespeichern, beispielsweise dem für den Betrieb von KWK-Geräten und Wärmepumpen ohnehin benötigten Pufferspeicher, können KWK-Geräte flexibel betrieben werden und so die fluktuierende Stromerzeugung aus PV und Windkraftanlagen komplementär ergänzen und damit zur Senkung der Residuallast beitragen (ad Frage 1).

Diese Überlegungen lassen eine hybride Heizungsanlage bestehend aus Wärmepumpe und KWK-Gerät überaus interessant erscheinen. Es ist deshalb angebracht, sich mit dieser Anlagenkombination näher auseinanderzusetzen. Mit Blick auf die praktische Anwendung und Umsetzung wird zudem eine PV-Anlage in die folgenden Ausführungen eingeschlossen. So lässt sich der Wärmepumpenstrom idealtypisch im Sommer aus der PV-Anlage, und im Winter, wenn auch die zusätzliche Wärme benötigt wird, mit dem KWK-Gerät bereitstellen. Die Ergebnisse einer ersten überblicksartigen Betrachtung für eine derartige Anlagenkombination werden im Folgenden in Bezug auf erreichbare Deckungsgrade, CO₂-Emissionen und dergleichen mehr, vorgestellt und diskutiert.

Wärmedeckung

Als Grundvoraussetzung wird angenommen, dass die von der Wärmepumpe benötigte Strommenge 1:1 von PV-Anlage und Wärmepumpe erzeugt wird. Es besteht kein Strommangel und es gibt keinen Überschussstrom. Daraus wird sofort klar, dass es sich hier zunächst um eine bilanzielle Betrachtung auf der Basis von Energiemengen handelt; das heißt, es ist noch nicht sichergestellt, dass auch die momentanen elektrischen Leistungen kongruent

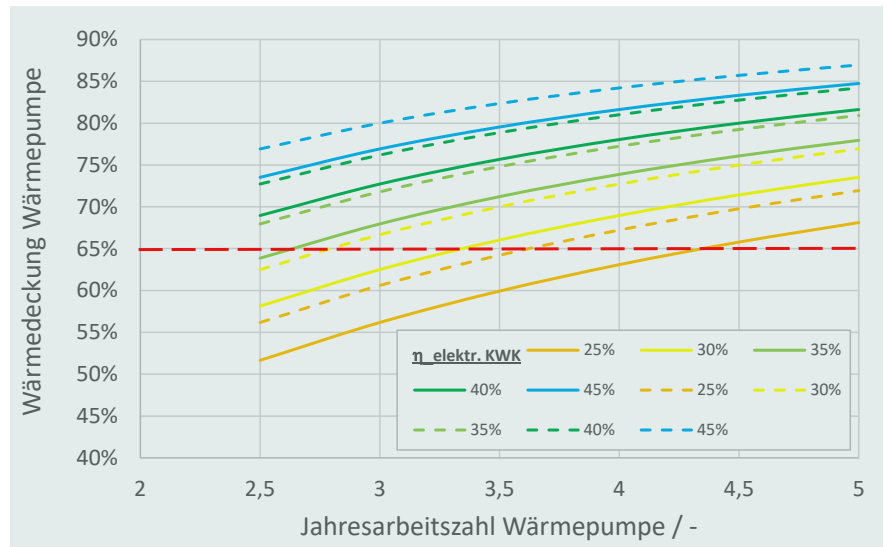


Bild 1: Wärmedeckung durch die Wärmepumpe in der hybriden Heizungsanlage in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und des elektrischen Wirkungsgrades des KWK-Gerätes (durchgezogene Kurven: 10 Prozent PV-Strom zum Antrieb der Wärmepumpe; gestrichelte Kurven: 25 Prozent PV-Strom zum Antrieb der Wärmepumpe; rot-gestrichelte Kurve: Grenzkurve für 65 Prozent Wärmedeckung durch die Wärmepumpe). Weitere Randbedingungen: Gesamtwirkungsgrad des KWK-Gerätes: 90 Prozent; die Reststromdeckung für die Wärmepumpe entspricht der Stromerzeugung des KWK-Gerätes. Grafik: Thomas

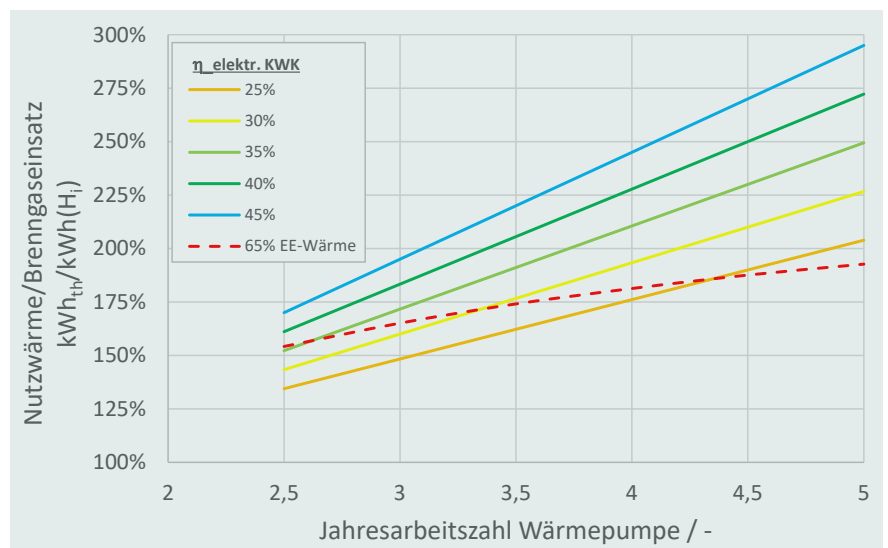


Bild 2: Verhältnis der von der hybriden Heizungsanlage insgesamt bereitgestellten Nutzwärme zur aufgewandten Brenngasenergie für das KWK-Gerät (auch Wärmeverhältnis oder Heizleistungszahl) in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und des elektrischen Wirkungsgrades des KWK-Gerätes (rot-gestrichelte Kurve: Grenzkurve für 65 Prozent Wärmedeckung durch die Wärmepumpe). Weitere Randbedingungen: Gesamtwirkungsgrad des KWK-Gerätes: 90 Prozent; Anteil PV-Strom zum Betrieb der Wärmepumpe: 10 Prozent; die Reststromdeckung für die Wärmepumpe entspricht der Stromerzeugung des KWK-Gerätes. Grafik: Thomas

sind. Diese Anpassung muss im Nachgang zum Beispiel durch den Einsatz von zusätzlichen elektrischen Speichern erfolgen. Dennoch können auf dieser Basis erste Erkenntnisse zu einer derartigen hybriden Heizungsanlage abgeleitet werden.

In diesem Rahmen zeigt **Bild 1** den Anteil der Wärmedeckung durch die Wärmepumpe in Abhängigkeit ihrer Jahresarbeitszahl, des elektrischen Wirkungsgra-

des des KWK-Gerätes und des Anteils an PV-Strom. Als weitere Randbedingung wird angenommen, dass der Gesamtwirkungsgrad des KWK-Gerätes konstant bei 90 Prozent liegt. Die durchgezogenen Linien sind mit einem Anteil PV-Strom von zehn Prozent, und die gestrichelten Linien mit 25 Prozent, berechnet. Die waagerechte, rot-gestrichelte Linie markiert die 65 Prozent-Grenze, das heißt, den

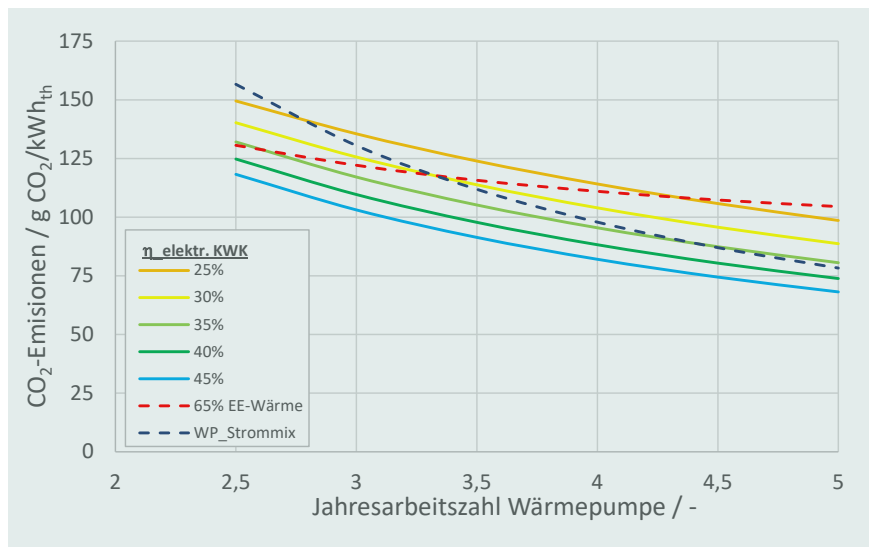


Bild 3: Spezifische CO₂-Emissionen der hybriden Heizungsanlage in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und des elektrischen Wirkungsgrades des KWK-Gerätes (rot-gestrichelte Kurve: Grenzcurve für 65 Prozent Wärmedeckung durch die Wärmepumpe; schwarz-gestrichelte Kurve: CO₂-Emissionen bei vollständiger Wärmedeckung durch eine Wärmepumpe mit dem Strommix berechnet). Weitere Randbedingungen: Gesamtwirkungsgrad des KWK-Gerätes: 90 Prozent; Anteil PV-Strom zum Betrieb der Wärmepumpe: 10 Prozent; die Reststromdeckung für die Wärmepumpe entspricht der Stromerzeugung des KWK-Gerätes. Grafik: Thomas

Anteil an der Wärmedeckung, den die Wärmepumpe nach dem zuvor erwähnten 65 Prozent-Konzept der Bundesregierung mindestens erbringen muss.

Es ist erkennbar, dass die 65 Prozent-Grenze für die Wärmedeckung durch die Wärmepumpe im betrachteten Variationsbereich in den meisten Fällen erreicht und auch überschritten werden kann. So wird diese Grenze beispielsweise für eine Luftwärmepumpe mit JAZ = 3 erreicht, wenn der elektrische Wirkungsgrad des KWK-Gerätes bei mindestens 32 Prozent liegt und der PV-Stromanteil zehn Prozent beträgt (durchgezogene Kurven). Bei einem PV-Stromanteil von 25 Prozent (gestrichelte Kurven) reicht bereits ein elektrischer Wirkungsgrad des KWK-Gerätes von rund 28,5 Prozent aus. Für eine erdreich-gekoppelte Wärmepumpe mit JAZ = 4 sind dafür schon elektrische Wirkungsgrade von 26,5 Prozent (zehn Prozent PV-Strom) und 23,7 Prozent (25 Prozent PV-Strom) genügend. Als generelle Trends sind festzumachen, dass der Anteil der Wärmedeckung durch die Wärmepumpe mit steigender Jahresarbeitszahl ebenso wie mit steigendem elektrischem Wirkungsgrad des KWK-Gerätes und steigendem PV-Stromanteil zunimmt. Hintergrund dafür sind die zunehmende Effizienz der Wärmepumpe sowie die bei höheren elektrischen Wirkungsgraden verringerte Wärmeabgabe des KWK-Gerätes.

Zu den in Bild 1 dargestellten Ergebnissen ist abschließend anzumerken, dass diese auf einer rein energetischen Betrachtung basieren. Das heißt, die Temperaturlage des jeweiligen Heizsystems stellt keine Einschränkung dar. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass bei Systemen mit hohen Vor- und Rücklauftemperaturen die Wärmedeckung durch die Wärmepumpe geringer ausfallen kann, da das BHKW dann nicht nur zur Deckung des Restwärmes, sondern auch zur Erreichung der geforderten Vorlauftemperaturen eingesetzt werden muss.

Nutzungsgrad

Hält man jedoch die zuvor formulierte Prämisse aufrecht, gemäß der der Strombedarf der Wärmepumpe durch das BHKW gedeckt wird, verbleibt allein der Brennstoffeinsatz für das KWK-Gerät als äußere Energiezufuhr, und es resultiert kein Stromüberschuss. Auf diese Weise verwandelt das KWK-Gerät die klassisch elektrisch getriebene Wärmepumpe in ein thermisch angetriebenes Aggregat. Der Nutzungsgrad derartiger Anlagen berechnet sich aus der bereitgestellten Wärmemenge bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergiemenge. Diese Größe, die auch als Wärmeverhältnis oder Heizleistungszahl bezeichnet wird, ist in **Bild 2** wiederum über der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und dem elektri-

schen Wirkungsgrad des KWK-Gerätes aufgetragen.

Zur Verdeutlichung der Darstellung sind die Kurven nur für einen PV-Stromanteil von zehn Prozent dargestellt. Dies ist mit Blick auf den Nutzungsgrad die konservativere Variante, das heißt, bei einem PV-Stromanteil von 25 Prozent stellen sich höhere Nutzungsgrade ein. Aber auch bei zehn Prozent PV-Stromanteil liegen die erreichbaren Nutzungsgrade in dem betrachteten Variationsbereich gemäß Bild 2 mit 135 und 295 Prozent bei attraktiv hohen Werten. Die gestrichelte rote Linie markiert wiederum die Grenze, an der die Wärmedeckung durch die Wärmepumpe genau 65 Prozent beträgt. Es ist zu erkennen, dass der Nutzungsgrad an dieser Grenze zwischen 154 Prozent (bei einer JAZ der Wärmepumpe von 2,5) und 193 Prozent (bei JAZ = 5) variiert. Zum Vergleich: Gasabsorptionswärmepumpen erreichen gemäß Übersicht der ASUE [4] Heizleistungszahlen, die dem hier verwendeten Nutzungsgrad bis auf die Angabe als Dezimalzahl vergleichbar ist, zwischen 1,5 und 1,74 und damit in gleicher Größenordnung.

CO₂-Emissionen

Abschließend werden die spezifischen CO₂-Emissionen der vorgeschlagenen hybriden Heizungsanlage bestehend aus Wärmepumpe und KWK-Gerät betrachtet. Dabei wird nach wie vor davon ausgegangen, dass das KWK-Gerät genau die Menge elektrischer Energie erzeugt, die von der Wärmepumpe benötigt wird. Somit stellt Erdgas als Brennstoff für das KWK-Gerät die einzige Primärenergiequelle dar. Diese wird gemäß [5] mit einem CO₂-Äquivalent von 202 g/kWh(Hi) bewertet. **Bild 3** zeigt die spezifischen CO₂-Emissionen wiederum über der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe aufgetragen und in Abhängigkeit des elektrischen Wirkungsgrades des KWK-Gerätes. Die CO₂-Emissionen sind auf die bereitgestellte Wärmemenge bezogen, und es sind wiederum nur die Werte für einen PV-Stromanteil von zehn Prozent dargestellt. Bei höheren Werten für den PV-Stromanteil fallen die CO₂-Emissionen naturgemäß und leicht nachvollziehbar geringer aus.

Aus dem Diagramm lässt sich ablesen, dass die spezifischen CO₂-Emissionen der hybriden Heizungsanlage bei den betrachteten Jahresarbeitszahlen und elektrischen Wirkungsgraden für das KWK-Gerät im

Bereich zwischen 150 und 68 g/kWh_{th} liegen. Betrachtet man die Grenzkurve, auf der die 65 prozentige Wärmedeckung durch die Wärmepumpe gegeben ist (rot gestrichelte Kurve), variieren die Werte zwischen 131 g/kWh_{th} bei JAZ = 2,5 und 105 g/kWh_{th} bei JAZ = 5.

Vergleicht man diese Zahlen mit den spezifischen CO₂-Emissionen eines Erdgaskessels mit einem Nutzungsgrad von 95 Prozent und dem oben genannten CO₂-Äquivalent für Erdgas, so ergeben sich CO₂-Einsparungen in Höhe von 38 bis 51 Prozent. Das heißt, durch die hybride Heizungsanlage bestehend aus Wärmepumpe und KWK-Anlage lassen sich die CO₂-Emissionen um knapp die Hälfte reduzieren. Führt man den Vergleich zum reinen Wärmepumpenbetrieb auf Basis des CO₂-Äquivalents des aktuellen Strommixes in Höhe von 435 g/kWh_{el}¹⁾, und dem angenommenen PV-Stromanteil von zehn Prozent (gebäudenah erzeugt), so ergibt sich die schwarz gestrichelte Kurve. Wie zu erkennen ist, liegen die Werte zwischen 157 g/kWh_{th} für Wärmepumpen mit einer Jahresarbeitszahl von 2,5, und 78 g/kWh_{th} bei einer JAZ = 5, und damit insgesamt im betrachteten Variationsbereich der hybriden Heizungsanlage.

Fazit

Insbesondere im Hinblick auf die dezentrale Bereitstellung von elektrischer Energie wird vorgeschlagen, den von der Bundesregierung verfolgten massiven Einsatz von Wärmepumpen zur Gebäudebeheizung mit einem ebenso deutlichen Ausbau von dezentralen KWK-Geräten zu flankieren. Auf diese Weise kann sowohl einer Überlastung der elektrischen Verteilnetze begegnet, als auch die erforderliche Residuallast in Zeiten verminderter regenerativer Stromerzeugung bereitgestellt werden. Darüber hinaus kann das KWK-Gerät die Wärmepumpe bei der Erreichung der gerade bei Bestandsgebäuden erforderlichen höheren Vorlauftemperaturen unterstützen und damit sicherstellen, dass Wärmepumpen auch in diesem Bereich flächendeckend einsetzbar sind.

Die zuvor beschriebenen Berechnungen haben gezeigt, dass unter der Voraussetzung, dass das KWK-Gerät genau die Strommenge liefert, die von der Wärmepumpe benötigt wird, das von der Bundesregierung für hybride Heizungsanlagen angepeilte Ziel einer 65 prozentigen Wärmedeckung durch die Wärmepumpe in

weiten Bereichen im Hinblick auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und den elektrischen Wirkungsgrad des KWK-Gerätes erreichbar ist (Bild 1). Auf die Einschränkung dieser Aussage im Hinblick auf die Heizkreistemperaturen ist hingewiesen worden. Dennoch lassen sich mit einem derartigen Hybridsystem CO₂-Einsparungen gegenüber einem konventionellen Erdgaskessel von bis zu 50 Prozent erreichen. Diese Einsparungen sind in etwa gleichzusetzen mit dem Betrieb einer Wärmepumpe zur vollständigen Deckung des Wärmebedarfs bei Ansatz des CO₂-Äquivalents für den aktuellen Strommix.

Dem mag man entgegenhalten, dass dieser Wert für den Strommix durch den Zubau von PV- und Windkraftanlagen zukünftig absinken wird, was den reinen Wärmepumpenbetrieb im Hinblick auf die CO₂-Emissionen besserstellen würde. Dazu sei zum einen gesagt, das KWK-Anlagen perspektivisch auf den Betrieb mit grünen Gasen wie Biomethan, und mittel- bis langfristig, auf Wasserstoff umgestellt werden. Damit sinken die CO₂-Emissionen dieser Technologie ebenfalls ab. Zum anderen sei erwähnt, dass es auch Stimmen gibt, die fordern, den für Wärmepumpen eingesetzten elektrischen Strom mit dem CO₂-Äquivalent für den Verdrängungsmix in Höhe von 860 g/kWh_{el}²⁾ zu bewerten, was die Werte für die CO₂-Emissionen dieser Technologie deutlich in die Höhe schnellen ließe. Hintergrund ist dabei die Überlegung, dass der von den Wärmepumpen zusätzlich zum Gesamtverbrauch erforderliche elektrische Strom die Residuallast erhöht, und deshalb vorwiegend von konventionellen Kraftwerken bereitgestellt werden muss. Dabei ist unter anderem zu berücksichtigen, dass der Wärmepumpenstrom primär in den Wintermonaten benötigt wird und damit in einer Zeit mit generell geringer regenerativer Stromerzeugung mittels PV-Anlagen.

Dieser Sachverhalt lässt sich an dieser Stelle nicht auflösen, denn er hängt stark vom zukünftigen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung einerseits, und der Verbreitungsdynamik der Wärmepumpen andererseits ab. Letztere kann jedoch durch die Kombination mit der KWK erheblich beschleunigt werden, indem die eingangs aufgeworfenen Fragen zur Deckung der Residuallast, zur Stützung der elektrischen Verteilnetze und zur Bereitstellung ausreichend hoher Vorlauftempe-

raturen in Bestandsgebäuden positiv und damit im Sinne der Wärmepumpe beantwortet werden können. Damit kommt der dezentralen KWK eine wichtige Rolle bei der aktuellen und zeitnahen Umsetzung des von der Bundesregierung im Sinne des Klimaschutzes geforderten verstärkten Wärmepumpenzubaus zu. ■

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Eckpunktpapier zur Diskussion der Beschleunigung des Wärmepumpenhochlaufs – Vorhaben und Maßnahmen zum 2. Wärmepumpen-Gipfel, 16.11.2022, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/2-waermepumpen-gipfel-eckpunktpapier.html>
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Überblickspapier Osterpaket, 6.4.2022, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=12
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: 65 Prozent erneuerbare Energien beim Einbau von neuen Heizungen ab 2024, 14.7.2022, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/65-prozent-erneuerbare-energien-beim-einbau-von-neuen-heizungen-ab-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [4] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) e. V.: Marktübersicht Gaswärmepumpen 2020, Dezember 2020.
- [5] Umweltbundesamt: CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe, Reihe Climate Change, 27/2016, Juni 2016.

F U B N O T E N

- 1) gemäß Umweltbundesamt, CO₂-Emissionsfaktor für den Inlandsverbrauch für 2021 (geschätzt) vom März 2022, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-steigen>
- 2) gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) vom 8. August 2020



Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas

ist Wissenschaftlicher Leiter des Reutlingen Research Institute (RRI), der Hochschule Reutlingen. Lehrgebiete: Thermodynamik und Wärmeübertragung.
Foto: Autor