

## Heizen mit geothermischen Wärmepumpensystemen — Beitrag für einen klimaneutralen Gebäudebestand

**Christiane Lohse und Jens Schuberth**

Umweltbundesamt

**Keywords:** Gebäudesektor, Energieszenarien, Treibhausgasreduktion, Energieeffizienz, Wärmepumpensysteme, Klimaschutz, Umweltverträglichkeit

### Zusammenfassung

Die Klimaneutralität des Gebäudebestands im Jahr 2050 ist notwendig, um die Dekarbonisierung des Energiesystems zu erreichen und damit den Anforderungen des Pariser Klimaabkommens gerecht zu werden. Das bedeutet, dass die Energienachfrage des Gebäudebestandes stark sinken und vollständig durch erneuerbare Energien gedeckt werden muss. Das „GreenEe“-Szenario aus dem Projekt „Ressourcenschonendes und treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ des Umweltbundesamtes und ökonomische Optimierungen des Fraunhofer ISE zeigen, dass in einem Energiesystem aus erneuerbaren Energien hauptsächlich Elektro-Wärmepumpen geeignet sind, den gründlich sanierten Gebäudebestand mit 320 TWh Niedertemperaturwärme zu versorgen. Voraussetzung für eine hohe Effizienz der Wärmepumpen sind eine niedrige Energienachfrage und ertragreiche Wärmequellen. Dazu zählt vor allem das Erdreich, aus dem Wärmepumpen 150 TWh Heizwärme gewinnen können, wie ein GIS-basierter Abgleich zeigt. Alternativen wie Abwasser, Solar-Erdreich- oder -Eisspeicher sind vielversprechende Konzepte und ermöglichen höhere Jahresarbeitszahlen als die Wärmequelle Außenluft. Wenn Wärmepumpensysteme circa 80 Prozent der Heizwärme bereitstellen sollen, sind sie zwingend umweltverträglich einzusetzen. Dazu gehören minimale Lärmemissionen von Luft-Wärmepumpen und klimafreundliche Kältemittel. Eine hohe Energieeffizienz ist erreichbar durch effiziente Geräte, ertragreiche Wärmequellen, korrekte Planung und Installation sowie eine fortlaufende Überwachung der Energieeffizienz im Betrieb. Darüber hinaus sind Boden, Grund- und Trinkwasser beim Einsatz von Erdsonden und -kollektoren vor Beeinträchtigungen zu schützen. Nur so lassen sich absehbare Umweltkonflikte vermeiden und eine breite Akzeptanz der Technik erreichen.

### 1. Einleitung

Der klimaneutrale Gebäudebestand in Deutschland bis zum Jahr 2050 ist ein notwendiges Ziel, um die deutschen Klimaschutzziele zu erreichen. Aus Sicht des Umweltbundesamtes (UBA) ist Klimaneutralität im Gebäudesektor gekennzeichnet durch einen sehr niedrigen Nutzenergiebedarf und eine vollständige Versorgung mit erneuerbaren Energien. Der Wärmeverbrauch der Gebäude hat den zweitgrößten Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland und stagniert auf gleichbleibend hohem Niveau bzw. stieg 2014-2016 sogar an. Der Anteil erneuerbarer Energieträger verharrt seit Jahren bei rund 13% [3]. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Gebäude sind im langfristigen Trend zwar gesunken, jedoch seit 2014 wieder angestiegen [4].

Das UBA hat in Szenarienstudien „Zukünfte“ u.a. dahingehend analysiert, wie die Wärmeversorgung in Deutschland erneuerbar werden kann ([1],[2]). Die Szenarienstudien des Projekts „Ressourcenschonendes und Treibhausgasneutrales Deutschland (RTD)“ des UBA betrachten Treibhausgasneutralität und Ressourcenschutz gemeinsam und integriert. Für die folgenden Überlegungen zur Wärmeversorgung von Gebäuden beziehen wir uns auf das Treibhausgasreduktionsszenario „GreenEe-Szenario“ aus dem RTD Projekt [1]. Das "GreenEe-Szenario" — das in Kap. 3.1

näher beschrieben wird und dessen Wege zur Machbarkeit diskutiert werden (Kap. 3 und 4) — zeigt, dass in einem umgestalteten Energiesystem auf Basis regenerativer Energien der zunehmende Einsatz von Elektrizität im Niedrig-Exergie-Wärmesektor die wichtigste Option ist, um Klimaneutralität im Gebäudebestand ressourcenschonend zu erreichen. Nach dem "GreenEe-Szenario" sind die präferierten Energieversorgungssysteme für den deutlich geringeren Wärmebedarf von Gebäuden neben der leitungsgebundenen Wärme insbesondere Elektrowärmepumpensysteme, die geothermische und andere Wärmequellen der Umgebungswärme nutzen. Da der Primärenergiefaktor von Strom bereits stark gesunken ist und mit dem Ausbau regenerativer Stromerzeugung weiter sinkt, sollten stromangetriebene effiziente Wärmepumpen frühzeitig zum Einsatz kommen, weil sie bereits heute einen positiven Klimaschutzeffekt bewirken.

Nach den Berechnungen der Szenariomodellierung des "GreenEe-Szenario" stellen Wärmepumpen 75 % der Heizwärme in Gebäuden bereit, Fernwärme und KWK-Wärmepumpensysteme decken knapp 23 % ab. Ob diese hohe Marktdurchdringung mit Wärmepumpensystemen tatsächlich erreicht werden kann, hängt eng mit der Frage zusammen, welcher Energieverbrauchsstandard für Gebäude dazu erreicht werden muss. Für diese Validierung vergleichen Lohse, C. & Wagener-Lohse, G. (2018) [5] die Ergebnisse des UBA GreenEe-Szenarios [1], mit den Ergebnissen der Szenariostudie des Fraunhofer ISE [6], die sich auf ökonomische Optimierungen konzentriert. Eine zusammenfassende Darstellung enthält das Kapitel 3.

Darüber hinaus wird sich der hohe Einsatz von Wärmepumpen stark auf die Stromnachfrage auswirken. Diese ist umso höher, je niedriger die Energieeffizienz der Wärmepumpen ist, d. h. je niedriger die Leistungszahlen (COP) bzw. die Jahresarbeitszahlen (JAZ, SCOP) sind. In Altbauten mit hohem spezifischem Energieverbrauch und Vorlauftemperaturen von 55° C oder höher erreichen Luftwärmepumpen nur geringe JAZ, so dass diese keinen positiven Effekt auf die Energieeffizienz haben. Indem wir uns auf die Auswertung (Lohse & Wagener-Lohse [5]) einer Studie des Konsortiums "ifeu / Beuth-Hochschule" [19] beziehen, erläutern wir im Kapitel 4, ob geothermische Wärmepumpensysteme im Gebäudebestand eine mögliche und notwendige Alternative sein können und inwieweit ihre Sonden oder Kollektoren in der Nähe von Gebäuden installiert werden können. Ergänzend zu diesen technischen Potenzialbetrachtungen diskutieren wir im Kapitel 5 die Auswirkungen, die Wärmepumpensysteme auf die Umweltmedien (Wasser, Boden und Luft) haben können, formulieren ökologische Anforderungen und umreißen den nachhaltigen und realisierbaren Handlungs- und Lösungsspielraum für Wärmepumpensysteme als eine Heizungstechnik, die einen wesentlichen Beitrag für einen klimaneutralen Gebäudebestand leisten kann.

## **2. Herausforderung THG-Reduktion im Gebäudebestand**

Deutschland hat im Nationalen Klimaschutzplan (NCAP vom November 2016) [10] das langfristige Klimaschutzziel festgelegt, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80-95 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Gebäude und Individualverkehr müssen somit bis 2050 nahezu treibhausgasneutral sein. Um das Zwischenziel von 55 % THG-Reduktion im Jahr 2030 zu erreichen, müssen Gebäude die direkten Treibhausgasemissionen um 48 Mt CO<sub>2äq</sub> reduzieren, was im Vergleich zu 119 Mt CO<sub>2äq</sub>-Emissionen im Jahr 2014 einer Minderung von 40 % entspricht. Dementsprechend müssen die Treibhausgasemissionen der Gebäude in den nächsten 12 Jahren um 4 Mt pro Jahr gesenkt werden. Um bis 2050 treibhausgasneutral zu sein, muss dieser Weg zwischen 2030 und 2050 mit einer durchschnittlichen Reduktion von 3,5 Mt pro Jahr fortgesetzt werden [5].

Konsequente Energieeinsparungen können den bisher hohen Verbrauch an Endenergie für Heizen und Warmwasser reduzieren. Eine zentrale Maßnahme dazu ist die Sanierung des Gebäudebestands. Wir registrieren jedoch nur jährliche Gebäudesanierungsraten von knapp 1 % und Kesselerneuerungsraten von ca. 3,4 % [8]. Notwendig wäre demgegenüber eine Gebäude-

sanierungsrate von 5,1 % bei 50 % Einsparung von thermischer Energie pro Objekt bzw. 3,8 %, wenn die Einsparung auf 2/3 erhöht wird [5]. Immerhin nutzen fast 50 % der 2017 genehmigten Neubauten erneuerbare Energien als Hauptheizung und 30 % als Zusatzheizung [15], während bestehende Gebäude selbst beim Kesselaustausch oft weiterhin fossile Brennstoffe nutzen. Erneuerbare Wärme aus unterschiedlichen Quellen trug mit 162,2 TWh (12,9 %) zum gesamten Wärmeverbrauch von 1.251 TWh (Raumheizung und -kühlung, Warmwasser, Prozesswärme und -kälte) bei. Nur 12,5 TWh wurden aus oberflächennaher Geothermie und Umweltwärme erzeugt [12]. Insgesamt waren im Jahr 2017 etwa 974.750 Wärmepumpensysteme installiert [13].

### 3. Szenarien für die THG-Reduktion im Gebäudebestand

Um die Anforderungen des Pariser Klimaabkommens zu erfüllen, ist es aus Sicht des Umweltbundesamts erforderlich, dass Deutschland für 2050 ein THG-Minderungsziel von 95 % gegenüber 1990 verbindlich festlegt. Seit einigen Jahren arbeitet das UBA daran, die Frage zu beantworten, wie unter dieser Zielstellung der Transformationspfad für das deutsche Energiesystem aussehen sollte [1][2][16]. In diesem Kapitel stellen wir das so genannte „GreenEe“-Szenario aus dem Projekt „Ressourcenschonendes und treibhausgasneutrales Deutschland“ des UBA vor [1]. Wir diskutieren die technisch-ökologische Umsetzung und führen einen Vergleich des GreenEe-Szenarios [1] mit den ökonomischen Optimierungsrechnungen des ISE [6] durch.

#### 3.1 UBA: Ressourcenschonendes und Treibhausgasneutrales Deutschland 2050 (RTD)

Das Projekt RTD umfasst mehrere Szenarien. Fertig gestellt ist bislang das „GreenEe-Szenario“ (kurz für „Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Energy efficiency“). „Orientierend am Zielszenario ‚Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050‘ [2] liegt der Schwerpunkt des GreenEe-Szenarios darauf, einen ambitionierten und energetisch effizienten Transformationspfad hin zur Treibhausgasneutralität ressourcenschonend dazustellen.“ [1]. Dem Szenario liegen folgende Annahmen über die Lebensbedingungen in Deutschland zugrunde: Das jährliche Wirtschaftswachstum beträgt weiterhin durchschnittlich 0,7%. Es gibt keine wesentlichen Verhaltensänderungen in Richtung alternativer Lebensstile und Konsumgewohnheiten. Nur in der Ernährung werden veränderte Konsummuster unterstellt. Für die Bevölkerungsentwicklung werden die offiziellen Annahmen des Statistischen Bundesamtes herangezogen, d.h. die Bevölkerung geht um fast 12,5 % auf 72,2 Mio. Einwohner zurück. Mit Maßnahmen zur Ressourceneffizienz führt das Szenario bis 2050 zur Minderung der Primär-Rohstoffanspruchnahme (RMC) um knapp 60% gegenüber 2010 [1].

Da nur hohe Energieeinsparungen dazu führen, dass der verbleibende niedrige Endenergiebedarf im Gebäudesektor durch erneuerbare Energien gedeckt werden kann [2], wird in diesem Szenario von hohen energetischen Sanierungsraten ausgegangen, wie in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1. Grundannahmen des GreenEe-Szenarios für den Gebäudesektor (Datenquelle [1])

| Notwendige jährliche Sanierungsrate, um 50 kWh/m <sup>2</sup> Nutzwärmebedarf zu erreichen | Zielkennwert (Nutzwärme) für die Sanierung denkmalgeschützter Gebäude | Mittlerer Nutzwärmebedarf 2050 für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden | Mittlerer Nutzwärmebedarf 2050 für Raumwärme in Nicht-Wohngebäuden |
|--|---|---|--|
| 2,2% - 3,0%  | 120 kWh/m <sup>2</sup>  | 52 kWh/m <sup>2</sup>   | 34 kWh/m <sup>2</sup>  |

Wohngebäude können durch passive Maßnahmen hinreichend kühl gehalten werden, somit werden Klimaanlageanlagen nicht berücksichtigt. Eine treibhausgasneutrale Raumheizung kann durch die direkte Nutzung erneuerbarer Energien wie Solarthermie, oberflächennahe Erdwärme- und Umweltwärme-

oder Fernwärmesysteme erfolgen. Weitere wichtige Annahmen sind: Ab 2020 wird es keine neuen Ölheizungen geben, ab 2030 wird es keine neuen dezentralen Bioenergie-Heizsysteme geben und ab 2040 wird es keine neuen Gasheizungen mehr geben. Bis zum Jahr 2030 muss der Ersatz von Wärmeerzeugungsanlagen verdoppelt werden. Mit diesen Klimaschutzmaßnahmen kann der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser bis 2050 um 59 % gesenkt werden. Das Ergebnis des Szenarios ist, dass die zukünftige Heiztechnik in hohem Maß auf der Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Quellen basieren wird. Wie in Abbildung 1 dargestellt, stellen Wärmepumpensysteme bis zum Zieljahr 2050 dann einen Anteil von 77 % für die Wärmeversorgung bereit, Fernwärme- und KWK-Wärmepumpensysteme fast 23 %.

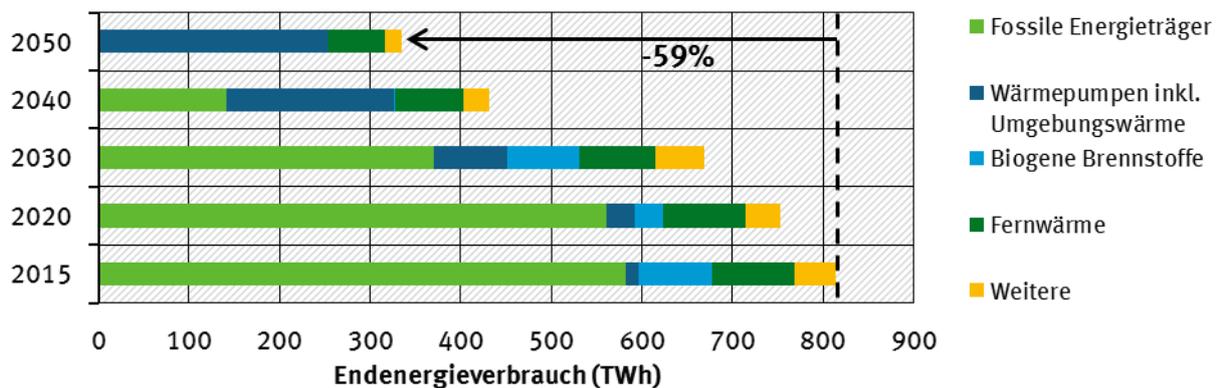


Abb. 1. Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser für den gesamten Gebäudebestand nach Art der Heiztechnik und Energieträger im GreenEe-Szenario des RTD (nach [1], Abb. 2.6)

Die Effizianzorderungen schließen regenerative Wärmeversorgungsstechniken, wie beispielsweise Brennwertkessel mit regenerativem Methan (P-t-G) als Brennstoff nach heutigem Kenntnisstand aus. Denn die Produktion von Methan über die Windenergie und die chemische Reaktion von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> liefert nur 0,58 kWh Methan aus 1 kWh Strom bei zu hohen Kosten. Wärmepumpen mit einer Jahresarbeitszahl von 3,3 können jedoch 3,3 kWh Wärme aus 1 kWh Strom liefern und 0,95 kWh Erdgas ersetzen, woraus sich ein Substitutionsverhältnis von 3,14 ergibt [17]. Die direkte elektrische Nutzung von regenerativem Strom — beispielweise Elektrokessel in Fernwärmenetzen — kann bei niedrigen Kosten immer noch ein Substitutionsverhältnis von 0,91 aufweisen, was Power-to-Gas-Techniken deutlich überlegen ist, aber der elektrischen Wärmepumpe weit unterlegen ist. Damit sind Elektro-Wärmepumpen in einzelnen Häusern und Wärmenetze die präferierten Lösungen für eine emissionsfreie und möglichst effiziente Wärmeversorgung hin zum klimaneutralen Gebäudebestand.

### 3.2 ISE: Ökonomisch optimierte Prospektion bis 2050

Als Vergleichsstudie zum GreenEe-Szenario zogen Lohse & Wagener-Lohse [5] die Ergebnisse der ISE-Studie aus dem Jahr 2015 [6] heran. Diese Studie führt eine ökonomische Optimierungsrechnung für das gesamte deutsche Energiesystem durch. Da der Anteil fluktuierender erneuerbarer Energie weiterhin stark wächst, ist eine Flexibilisierung der Stromerzeugung ebenso notwendig wie ein flexibler Strombedarf. Erhöhte Flexibilität kann nur erreicht werden, wenn neue Stromverbrauchende Anwendungen implementiert werden. Im Gebäudebereich können Verbrennungssysteme wie Kessel nach und nach durch elektrisch betriebene Einheiten wie elektrische Wärmepumpen ersetzt werden.

In allen ISE-Szenarien, die eine THG-Reduktion von 85 % oder 90 % vorsehen, liefern elektrisch angetriebene Wärmepumpen die Niedertemperaturwärme aus oberflächennaher Geothermie oder

anderen Quellen der Umgebungswärme für die Heizsysteme von Gebäuden. Die Berechnungen ergeben, dass ambitioniertere THG-Reduktionen dann wirtschaftlich optimiert dargestellt werden können, wenn der Anteil elektrischer Wärmepumpen zur Wärmeversorgung erhöht wird. Um 90 % Treibhausgasreduktion zu erreichen, ist es auch ökonomisch optimal, wenn 62 % der Gebäude hocheffizient sind, d. h. Passivhausstandard erreichen und die restlichen 38 % vollständig renoviert werden (das entspricht EnEV -25 %). Im 90 % -Szenario sind verbrennungsbasierte Technologien (Gaskessel, Gaswärmepumpe, kleine KWK) nicht mehr relevant. In allen Szenarien des ISE decken solarthermische Systeme einen Teil des Niedrigtemperaturwärmebedarfs in Gebäuden und in der Industrie ab. Der Anteil der Fernwärmesysteme beträgt 15 % bis 20 %. Biomasse wird in allen ISE-Szenarien nicht zur Wärmeversorgung im Gebäudebereich eingesetzt. In dem gesamtwirtschaftlichen Konzept ist es kostengünstiger, die begrenzten Biomasse-Ressourcen für andere Anwendungen als zum Heizen zu verwenden.

### 3.3 Schlussfolgerung

Der Vergleich des GreenEe-Szenarios [1] mit den ökonomischen Optimierungsrechnungen des ISE [6] zeigt, dass auf dem Transformationspfad hin zu einem treibhausgasneutralen Gebäudebestand auch aus ökonomischer Sicht der Einsatz von Elektro-Wärmepumpen präferiert wird und zielführend ist. Die Ergebnisse der ISE-Studie zeigen auch, dass der kosteneffektivste Weg, um Treibhausgasreduktionen von 90 % zu erreichen, der Einsatz von hocheffizienten Erd-Wärmepumpen ist. (Eine ausführlichere Darstellung hierzu siehe [5].) Die ökonomischen Berechnungen machen jedoch auch deutlich, dass der Eintritt in diese Entwicklung unter den aktuellen Randbedingungen — u.a. geschaffen durch zurzeit geltende Finanzierungs- und Governance-Regelungen — nicht stattfinden wird. Das bestätigen weitere Studien (z.B. die Studie des BDH [7]), die verdeutlichen, dass die Erhöhung der Gebäudesanierungsrate effektiver zur Senkung der Treibhausgasemissionen führt als allein die Erhöhung der Austauschrate von Heizsystemen. Demnach ist das Ziel einer ökonomisch effizienten Treibhausgasreduktion im Gebäudesektor dann erreichbar, wenn der rechtliche Rahmen und die wirtschaftlichen Anreize so gesetzt werden, dass Gebäudesanierung und die Substitution fossil betriebener Heizsysteme durch erneuerbar betriebene Heizsysteme mit hoher Energieeffizienz als verknüpfted Maßnahmenpaket umgesetzt werden.

## 4. Anforderung an die Nachhaltigkeit von Wärmepumpensystemen

Wärmepumpensysteme erreichen besonders hohe Leistungszahlen (COP nach DIN EN 14511) und Jahresarbeitszahlen (JAZ nach VDI 4650 oder SCOP nach DIN EN 14825), wenn der Temperaturunterschied zwischen der Wärmequelle (Boden, Wasser, Luft) und der Wärmesenke (Heizsystem, Heizflächen) so niedrig wie möglich ist. Wärmepumpen eignen sich daher besonders für Neubauten mit geringem spezifischen Energieverbrauch und Flächenheizungen mit niedrigen Vorlauftemperaturen. Das Konsortium "ifeu / Beuth-Hochschule" [19] hat Analysen und Berechnungen durchgeführt, um die folgenden Fragen beantworten zu können:

- Unter welchen Bedingungen ist der Einsatz von Wärmepumpen auch in Altbauten möglich? Werden SCOPs erreicht, die sicherstellen, dass das Stromangebot auf Basis regenerativer Energien ausreicht, um den Bedarf für den Antriebsstrom zu decken? (s. Kap. 4.1)
- Welches Potenzial für oberflächennahe geothermische Systeme besteht aufgrund des Platzbedarfs dieser Systeme? Zeigt die GIS-basierte Analyse entsprechende nutzbare Freiräume in städtischen Gebieten? (s. Kap. 4.2)

### 4.1 Effizienzbedingungen für Wärmepumpen im Gebäudebestand

Auf der Nachfrageseite ist das technische Potenzial von Wärmepumpen in bestehenden Gebäuden begrenzt. In alten Gebäuden (Baujahr 1978 und älter) wurde die Raumheizung mit Heizkörpern,

deren Vorlauftemperatur mindestens 70 °C fordert, ausgelegt. Wird die Vorlauftemperatur auf 55 °C abgesenkt, während die ursprüngliche Konstruktion jedoch erhalten bleibt, muss der Heizbedarf um 35 % reduziert werden oder die Heizkörper müssen ausgetauscht werden. Eine Orientierung bezüglich der Abhängigkeit zwischen Vorlauftemperatur und der SCOPs von Wärmepumpen lässt sich aus Messungen des Fraunhofer ISE [20] an Luftwärmepumpen ableiten. Luftwärmepumpen zeigen einen Anstieg der SCOPs von 2,2 auf 2,8, wenn die Vorlauftemperatur von 55 °C auf 40 °C gesenkt wird, was einer Abnahme der Leistungsaufnahme von 21,4 % entspricht.

Das technische Potenzial für Luft-Wärmepumpen im Gebäudebestand hängt von der jeweiligen Gebäudeeffizienz ab. Eine detaillierte Analyse des „ifeu“ [19] (Datenbasis Baumodell GEMOD) identifiziert und quantifiziert die Bestandsgebäude, die eine so geringe Heizlast haben, dass sie für Luft-Wärmepumpen in Frage kommen. Die Entwicklung der Wärmenachfrage, die sich bei ambitioniertem Klimaschutz einstellt, führt in dieser Szenarioanalyse bis zum Jahr 2050 zu einem Zustand, bei dem 85 % aller Altbauten einen Wärmeenergieverbrauch von unter 120 kWh/m<sup>2</sup>a erreichen. Alle Bestandsgebäude mit einem Heizenergiebedarf von bis zu 120 kWh/m<sup>2</sup>a (60 W/m<sup>2</sup>) können dann mit Luft-Wärmepumpen beheizt werden, ohne dass die Heizflächen gewechselt werden. Im schlechtesten Fall erreichen die Luft-Wärmepumpen dann einen SCOP von 1,7. Bei einem Primärenergiefaktor von derzeit 1,8 — ausgehend von einem Anteil von 33 % erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung — für die Betriebsenergie der Wärmepumpen wäre damit keine effizientere Primärenergienutzung gegeben als bei einem fossilbefeuerten NT-Heizkessel. Allerdings sinkt mit steigendem Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung der Primärenergiefaktor stetig und die Primärenergieeffizienz für den Betriebsstrom der Wärmepumpen verbessert sich.

## **4.2 GIS basiertes Ausbaupotential für erdgekoppelte Wärmepumpensysteme**

Da Erdwärmepumpen im Durchschnitt höhere Effizienzwerte (SCOPs) erreichen, wurde ihr räumliches Ausbaupotenzial in Deutschland in einer GIS-basierten Analyse untersucht [19]. Aus den Informationen in Liegenschaftskatastern wurden Gebäudedaten (Art und Anzahl der Gebäudetypen, Wärmeverbrauch, überbaute Fläche etc.) von 3 Millionen Wohnungskomplexen in Deutschland abgeleitet. Sieben Siedlungsdichteklassen wurden gebildet. Auf dieser Datenbasis wurde in erster Näherung die maximale Anzahl von Sondenbohrungen in Deutschland berechnet.

Wasserschutzgebiete gehören zu den Restriktionsgebieten. Die wasserschutzrechtlichen Anforderungen geben die maximal zulässige Bohrtiefe vor. Bodendaten und geophysikalische Daten der geologischen Landesämter wurden in die Berechnungen einbezogen. Ein Ressourcenmanagement der Wärmequelle muss gewährleistet sein, damit sich die Wärmequelle ausreichend regenerieren kann. Diese Anforderungen sind in den technischen Spezifikationen der VDI 4640 geregelt. Die Vorschrift fordert Mindestabstände zwischen Sonden von mindestens 5 m für Sondenlängen von 40 bis 50 m und von mindestens 6 m für Längen zwischen 50 und 100 m. Für die räumliche Analyse wurde angenommen, dass Sondenbohrungen nur auf unversiegelten, unentwickelten Grünflächen durchgeführt werden. Straßen, Zufahrten, Parkplätze, Spielplätze, die Fläche unterhalb von Baumkronen und ähnliche Gebiete wurden als Restriktionszonen für Bohrungen betrachtet.

Die räumlichen Projektionen stellen für den Wärmebedarf der Jahre 2030 bzw. 2050 einen maximalen Deckungsgrad für erdgekoppelte Wärmepumpensysteme von 44% bzw. 74% fest, wenn SCOPs von 5 (2030) bzw. 6 (2050) erreicht werden [19]. Der geringste Abdeckungsgrad liegt in Berlin und Hamburg, der höchste in Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Im Ergebnis können im Jahr 2050 150 TWh durch Erdwärmepumpensysteme bereitgestellt werden, wobei alle Land- und Bodennutzungsbeschränkungen, sowie geophysikalische oder technische Einschränkungen wie Wärmeübertragung, Sondendichte etc. berücksichtigt werden.

### 4.3 Weiterführende, innovative Konzepte von Wärmepumpensystemen

Die Vielfalt an Wärmepumpensystemen ist groß. Am Markt sind Konzepte verfügbar, die über Luft und Erdreich als Wärmequelle hinausgehen. Folgende Beispiele zeigen, wie die Energieeffizienz von Wärmeversorgungssystemen und insbesondere die Effizienz von Wärmepumpensystemen durch Kombination und Nutzung mehrerer Niedertemperaturquellen verbessert werden kann.

(1) Im Zuge der energetischen Sanierung von vier Mehrfamilienhäusern mit 84 Wohnungen in Berlin wurden neben der Ertüchtigung der Gebäudehülle auf KfW-70-Standard sogenannte eTanks errichtet [21]. Überschüssige Solarwärme wird in den 400 m<sup>3</sup> großen Erdspeicher gespeichert und dient Wärmepumpen als Wärmequelle. Dieses System kann den Ertrag an Solarwärme auf 700 kWh/m<sup>2</sup> und den SCOP der Wärmepumpen auf 5,5 erhöhen. Der Heizenergiebedarf von vorher 175 kWh/m<sup>2</sup>a wurde auf nur 23 kWh/m<sup>2</sup>a reduziert. Zur Beheizung und Belüftung des Gebäudes werden 9 kWh/m<sup>2</sup> Endenergie (Strom) benötigt, die eine PV-Anlage von vier mal 14 kW<sub>p</sub> auf erneuerbarer Basis erzeugt.

(2) Eisspeicher-Wärmepumpen nutzen Wärme aus einer unterirdischen, mit Wasser gefüllten Beton-Zisterne als Wärmequelle. Beim Entziehen von Wärme durch die Wärmepumpe gefriert das Wasser; durch den Phasenübergang flüssig-fest kann eine besonders hohe Wärmespeicherdichte erreicht werden (Schmelzenthalpie 333 kJ/kg im Vergleich zur Wärmekapazität 4,2 kJ/kgK). Solar Kollektoren regenerieren das Eis schon bei niedrigen Systemtemperaturen knapp über dem Gefrierpunkt. Das System führt zu hohen Solarerträgen [22].

(3) Ein Projekt der "STAWAG Energie GmbH" in Aachen [23] nutzt als Wärmequelle für fünf Wohnblöcke mit 163 Wohnungen den kommunalen Abwasserkanal mit einer ganzjährig konstanten Abwassertemperatur von 15 °C. Das Abwasser speist zwei zweistufige Wärmepumpen mit einer Heizleistung von je 60 W/m<sup>2</sup>. In den Heizzentralen jedes Mehrfamilienhauses nutzen zusätzliche Luftwärmepumpen die Wärme der Abluft aus den Bädern. Das Heizsystem erreicht insgesamt einen SCOP von 3,6.

Das Beispiel (3) steht stellvertretend für das bisher weitgehend ungenutzte Potenzial an Abwasserwärme. Etwas 5 % des Heizwärmebedarfs könnten in Deutschland damit gedeckt werden. Das ist das Ergebnis eines Abgleichs der räumlichen Verteilung der Wärmenachfrage und dem verfügbaren Abwasseraufkommen [24]. Vor allem in Gebieten mit hoher Wärmedichte und hohem Abwasseraufkommen bieten sich solche Lösungen an. Erste Anlagen wurden schon in den 1980er Jahren errichtet, doch noch immer sind nur einzelne Anlagen zu finden.

### 4.4 Schlussfolgerung

Anhand der dargestellten Studienergebnisse im Kapitel 4.1 und der Beispiele hybrider Systeme mit Wärmepumpen im Kapitel 4.3 haben wir die Bedingungen und Möglichkeiten dargestellt, wie die Energieeffizienz von Wärmepumpensystemen im Gebäudebestand optimiert werden kann. Dass in Altbauten, die einen Heizwärmebedarf von unter 120 kWh/m<sup>2</sup>a haben, eine ausreichende Beheizung mit Luftwärmepumpen sichergestellt ist, hat die Szenariostudie des ifeu [19] gezeigt. Lohse & Wagener-Lohse [5] haben berechnet, dass die Wärmeversorgung von 85% des Gebäudebestands mit Luftwärmepumpen zu einem um 160 TWh höheren Endenergiebedarf (inkl. erneuerbarer Energien) führen würde. Ausgehend von dem unter den genannten Bedingungen niedrigsten resultierenden SCOP der Luftwärmepumpen von 1,7 entspräche das einem Gesamtstrombedarf von 98 TWh. Wirtschaftlich betreiben lassen sich Wärmepumpen mit dieser niedrigen Jahresarbeitszahl nicht [18]. Geothermische Wärmepumpen mit etwa doppelter Energieeffizienz könnten den Strombedarf halbieren. Bei einem Wärmebedarf von 300 TWh im Jahr 2050 und einem durchschnittlichen

Anteil von 60 % Erdwärmepumpen entspräche dies einer Differenz des Strombedarfs von 50 TWh. Mit der GIS-basierten Analyse [19] (Kap. 4.2) konnte der mögliche Deckungsgrad mit erdgekoppelten Wärmepumpensystemen im Raum in erster Näherung quantifiziert werden. Die Berechnungen [19] ergeben eine Abdeckung von 50-60 % für dicht besiedelte Regionen und 60-70 % für dünn besiedelte Regionen. Demnach können in dicht besiedelten Gebieten weniger geothermische Anlagen gebaut werden. Hier ist die energetische Gebäudesanierung eine sehr wichtige Maßnahme, um effiziente Heizsysteme zu errichten. Die Effizienz kann noch gesteigert werden, wenn durch Kombinationen mehrerer Niedertemperatur-Heizsysteme alle verfügbaren Umgebungs-wärmequellen genutzt werden (Kap. 4.3).

## 5. Technische Spezifikationen und Umweltverträglichkeit von Wärmepumpensystemen

Wärmepumpensysteme mit Geothermie und Umweltwärme sind die zentralen Wärmeversorgungstechniken im transformierten Energiesystem mit Strom aus erneuerbaren Energien, um auch bei Gebäuden Treibhausgasneutralität in ressourcenschonender Weise zu erreichen. Um schädliche Auswirkungen auf Klima und Umwelt sowie Konflikte bei der konkurrierenden Nutzung der natürlichen Ressourcen Boden und Wasser zu vermeiden, ist eine nachhaltige, vorausschauende und präventive Planung von Heizsystemen notwendig. Im Folgenden charakterisieren wir den nachhaltigen und realisierbaren Handlungs- und Lösungsspielraum für die technischen Systeme und die ökologischen Anforderungen im Betrieb der Anlagen.

### 5.1 Energieeffizienz

Feldtests aus den vergangenen Jahrzehnten haben gezeigt, dass die Jahresarbeitszahlen (JAZ) von Elektro-Wärmepumpen stark schwanken (Abb. 2). So gibt es einige Anlagen, die eine besonders hohe Energieeffizienz erreichen, während andere mit geringer Energieeffizienz arbeiten. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse von Feldtests jeweils als Mittelwert (Symbole) sowie als Bandbreite (Balken) der festgestellten JAZen. Die JAZen stammen aus mehreren Feldtests. Die Nummer steht jeweils im Diagramm in Klammern. Die Fallzahlen der Feldtests unterscheiden sich stark und sind bei den Quellen angegeben. Die Installation der Wärmepumpen erstreckte sich meist über Zeiträume von vier bis sechs Jahren; die Feldtests sind zum mittleren Zeitpunkt der Installation der Wärmepumpen eingetragen. Die JAZen umfassen, soweit die Angaben ausreichen, die Wärmeerzeugung für Raumwärme und Warmwasserbereitung (ohne Speicherverluste) und die dafür eingesetzte Energie (Wärmepumpe inkl. Hilfsantriebe ohne Heizungsumwälzpumpe) — oft "Erzeuger-Arbeitszahl" genannt. Die Wärmepumpen wurden in Wohngebäuden installiert, hauptsächlich in Einfamilienhäusern. Die Unterscheidung zwischen Neubau und Altbau ist nicht sauber möglich und dient daher ausschließlich der Orientierung. Neubau meint überwiegend Fußbodenheizung mit geringen Vorlauftemperaturen bis 35 °C. Altbau (teilsaniert bis unsaniert) meint überwiegend Heizkörperheizung mit höheren Vorlauftemperaturen im Bereich von etwa 35...55 °C. Vergleichsweise ungünstig fällt die Bilanz von Luft-Wärmepumpen aus, die in Neubauten mittlere JAZen von 2,6 bis 3,3 schaffen, in den schlechtesten Fällen nur 1,5, in den besten Fällen aber auch 4,3 erreichen können. In Altbauten liegen die mittleren Jahresarbeitszahlen von Luft-Wärmepumpen zwischen 2,4 und 2,7. Dagegen schneiden Erd-Wärmepumpen besser ab, mit mittleren JAZen in Neubauten von 3,2 bis 4,3 (gesamte Spannbreite 2,0 bis 5,4) und in Altbauten von 2,9 bis 3,3 (gesamte Spannbreite 2,2 bis 4,2). Die großen Bandbreiten zeigen, dass viele Wärmepumpenanlagen im Betrieb ein großes Optimierungspotenzial haben und dann auch gute JAZen über 4,0 erreichen können.

Den in der Praxis ermittelten Kennwerten kann man die theoretischen Produktkennwerte für die Energieverbrauchskennzeichnung gemäß Verordnung (EU) Nr. 811/2013 gegenüberstellen. Die JAZen wurden mit Anteilen für Raumwärme/Warmwasserbereitung von 80/20 Prozent im Altbau

und 70/30 Prozent im Neubau gemittelt. Die Korrelation mit den Feldtests ist bei einigen Anlagentypen gut, v.a. bei Luftwärmepumpen im Bestand und bei Erdwärmepumpen.

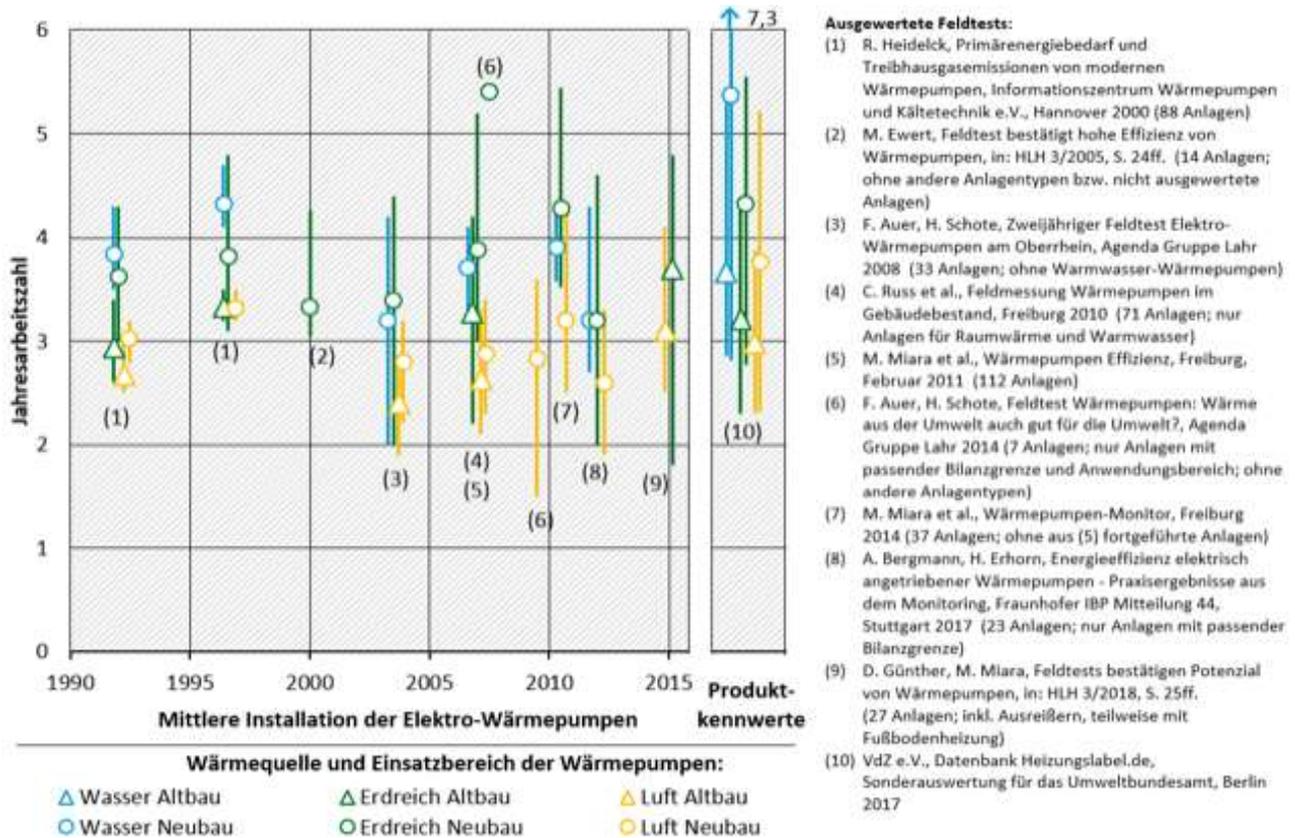


Abb. 2: Jahresarbeitszahlen von Elektro-Wärmepumpen in Feldtests

Entscheidend für den künftigen Erfolg und die Akzeptanz von Wärmepumpen wird eine hohe Energieeffizienz sein, sowohl der auf Prüfständen ermittelte Produktkennwert als auch die im Betrieb gemessene Kenngröße. Die VDI 4645 [25] bildet die Qualitätssicherung bei der Planung, Errichtung und Betrieb ab. Dennoch sind ohne weitere technische Unterstützung weder Verbraucher noch Installateure in der Lage Qualitätsmängel, wie die mangelhafte Energieeffizienz einer Wärmepumpe, zu erkennen (dieser Umstand trifft gleichermaßen auf andere Heiztechniken zu). Es bietet sich daher an, standardmäßig Messtechnik ab Werk einzubauen und die Arbeitszahl im Betrieb zu einer selbsterklärenden, prominent dargestellten „Effizienzanzeige“ weiterzuentwickeln. Oft ist die nötige Messtechnik als Voraussetzung für die Förderung im Marktanreizprogramm bereits integriert, die Grundlage also schon vorhanden.

## 5.2 Lärmemissionen von Luftwärmepumpen

Mit einem jährlichen Zubau von rund 45.000 Luftwärmepumpen entsteht eine neuartige Lärmbelastung in Wohngebieten. Der Lärmpegel von Wärmepumpen liegt geringfügig unter den gesetzlichen Grenzwerten, hat jedoch Lärmspitzen insbesondere in den tiefen Frequenzbändern. Es gibt einfache technische Maßnahmen, die die Geräuschemission von Luftwärmepumpen senken können. Auf der Grundlage eigener Untersuchungen [26] hat das UBA einen "Leitfaden für niederfrequenten Lärm im Wohnbereich" für den praktischen Gebrauch veröffentlicht [27]. Einige Landesministerien

haben Richtlinien für die Installation von Luftwärmepumpen herausgegeben (z.B. [28]), um Störungen zu vermeiden, und die Hersteller haben das Problem aufgegriffen.

### 5.3 Treibhausgasemissionen durch Verwendung von treibhauswirksamen Kältemitteln

Treibhausgasemissionen können auftreten, wenn das Arbeitsfluid der Wärmepumpe entweicht und treibhauswirksame Kältemittel verwendet wurden. Die derzeit noch verwendeten Wärmepumpenfluide R407C, R410A und R134a sind Fluorkohlenwasserstoffe bzw. Mischungen von HFKW, deren Treibhausgaspotenzial das von Kohlendioxid um das bis zu 4.000-fache übersteigt. Um eine Freisetzung dieser Gase in die Atmosphäre zu verhindern, ist neben technischen Maßnahmen eine gezielte Substitution der Stoffe angezeigt. Das UBA empfiehlt natürliche Kältemittel — wie Propan und CO<sub>2</sub> — oder andere klimafreundliche Alternativen einzusetzen. Hersteller passen das Design von Wärmepumpen an alternative Kältemittel an. Die F-Gas-Verordnung (Verordnung (EU) Nr. 517/2014) regelt das Inverkehrbringen und die Verwendung fluorierter Treibhausgase (F-Gase) und verordnet eine schrittweise Reduzierung um insgesamt 79 % bis zum Jahr 2030. Zusammenfassende Informationen zur Anwendung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluoriierte Treibhausgase gibt das UBA auf der Themenseite ‚Umweltvorschriften‘ [29][29].

### 5.4 Bodenschutz, Gewässerschutz und induzierte Temperaturänderungen durch geothermische Systeme

Das Wärmeträgermedium von Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren ist eine frostsichere Mischung aus Wasser und einem Frostschutzkonzentrat auf Glykolbasis, das durch ein geschlossenes Rohrsystem (üblicherweise aus dichtem Polyethylen, PE-HD) zirkuliert. Als Frostschutzmittel dürfen nur Stoffe verwendet werden, die nicht als wassergefährdend eingestuft sind oder deren Gefahrenpotential die Wassergefährdungsklasse 1 (WGK 1) nicht überschreitet. Rohrleitung und Abdichtungsverfüllung, die in den meisten Fällen aus Bentonitsuspension auf Zementbasis besteht, müssen gemäß der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV, 2014) durchgeführt werden. In der Zone III von Wasserschutzgebieten, Mineralquellen oder Mineralwassereinzugsgebieten installierte Erdwärmesonden sollten vorsorglich nur mit Wasser betrieben werden.

Sowohl Bau als auch der Betrieb von Geothermieanlagen führen zu einer physikalischen, chemischen und biologischen Veränderung des Grundwassers. Primäre Ziele der in Europa geltenden Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, Richtlinie/60/EG) sind u.a. die Schaffung eines guten chemischen und quantitativen Zustands des Grundwassers. In Deutschland gilt das Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2010) für den Grundwasserschutz. Es priorisiert die wasserwirtschaftliche Nutzung von Grundwasser für die öffentliche Wasserversorgung, insbesondere die Trinkwassergewinnung. Eine nachhaltige, vorausschauende und vorsorgende Planung von Geothermieanlagen ist daher notwendig, um Nutzungskonflikte mit der öffentlichen Wasserversorgung und der Wasserwirtschaft zu vermeiden. Es gibt jedoch keine genauen gesetzlichen Bestimmungen für die thermischen Auswirkungen auf das Grundwasser durch geothermische Systeme, z.B. in Form von Schwellenwerten. Die Genehmigung durch die zuständigen Behörden basiert auf festgelegten Temperaturgrenzwerten in Leitfäden der Bundesländer und dem technischen Leitfaden VDI-Richtlinie 4640, Teil 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Nach VDI-Richtlinie sollte die Temperaturänderung des Grundwassers  $\pm 6$  K nicht überschreiten. Der Wärmeeintrag ins Grundwasser sollte eine Temperatur über 20° C nicht überschreiten.

Mit der Festsetzung der Temperaturgrenzwerte bzw. -bereiche für induzierte Temperaturänderungen im Grundwasser wurden bisher noch keine wissenschaftlich begründeten Kriterien für eine differenzierte Bewertung des (geo)thermischen Managements aufgestellt. Fachleute fordern, dass

zu berücksichtigen und zu bewerten sei, ob es sich um einen weitgehend natürlichen, um einen bereits thermisch belasteten (z. B. durch urbane Wärmeinseln) oder chemisch modifizierten Grundwasserleiter handelt. Grundsätzlich gilt auch für den Einfluss von Temperaturänderungen durch die Nutzung von Geothermie § 5 Wasserhaushaltsgesetz (WHG), wonach eine schädliche Veränderung der Wasserqualität zu vermeiden ist. Das Gesetz enthält jedoch keine grundlegende Definition des Begriffs "schädliche Veränderung". Darüber hinaus wird Grundwasser im WHG nicht in Abhängigkeit von der Nutzung des Grundwasserleiters definiert, und das Vorsorgeprinzip wird unterschiedlich interpretiert. Weiterhin können thermisch induzierte Prozesse im Grundwasser sowohl zu einer Verschlechterung oder aber Verbesserung der Wasserqualität führen: Degradationsprozesse können die Ausbreitung von Schadstoffen fördern oder aber eine Temperaturerhöhung zu einem Schadstoffabbau führen. Die thermischen Auswirkungen können auch signifikant die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften im Aquifer und die Grundwasserfauna verändern. Hier ist zu prüfen, ob die von den Mikroorganismen katalysierten Prozesse gestört sind oder ob die mit Mikroorganismen und Grundwasserfauna gekoppelten Ökosystemfunktionen erhalten bleiben.

In städtischen Gebieten liegen die Grundwassertemperaturen oft deutlich über dem natürlichen Hintergrund. Eine Abkühlung in Richtung natürlicher Hintergrundtemperaturen durch Wärmeauskopplung zur Gebäudeklimatisierung kann aus ökologischer Sicht durchaus vorteilhaft sein. Das UBA erforscht derzeit den Einfluss induzierter Temperaturänderungen auf die physikalisch-chemische Beschaffenheit des Grundwassers und des Ökosystems Grundwasser. Ziel ist es, Geringfügigkeitsschwellen zu identifizieren, bei denen eine thermische Veränderung keine schädliche Grundwasserveränderung verursacht oder unter denen Veränderungen als tolerierbar eingestuft werden können. Die Leitfrage unserer Untersuchungen ist, wie wir die natürlichen Grundwasserressourcen schützen und gleichzeitig die Nutzung der Geothermie ermöglichen können. Denn die unklare Bewertung von geothermisch induzierten Temperaturänderungen im Grundwasser kann der Ausschöpfung der geothermischen Potenziale entgegenstehen.

## 6. Fazit

Die UBA-Szenarienstudie „GreenEe-Szenario“ und alle zur Validierung der Ergebnisse herangezogenen Studien verdeutlichen, dass Klimaneutralität im Gebäudesektor durch einen sehr niedrigen Nutzenergiebedarf und eine vollständige Versorgung mit erneuerbaren Energien gekennzeichnet ist. Dabei ist die Elektrifizierung im Niedrig-Exergie-Wärmesektor — vorzugsweise mit Elektro-Wärmepumpen — die wichtigste Option, um Klimaneutralität im Gebäudebestand ressourcenschonend zu erreichen. Diese Transformation ist auch unter wirtschaftlichen Optimierungsgesichtspunkten darstellbar. Allerdings verlangsamen die derzeitigen Marktbedingungen dynamische Veränderungen sowohl bei der energetischen Gebäudesanierung als auch beim Ersatz fossiler Kessel. Es gibt demnach unabdingbare Rahmenbedingungen, damit das Heizen mit Wärmepumpensystemen einen nachhaltigen Beitrag für einen klimaneutralen Gebäudebestand darstellen kann.

(1) Die jährliche Gebäudesanierungsrate muss auf 3,8 % bis 5,1 % ansteigen (Kap. 2.). Schon eine moderate energetische Sanierung des Gebäudebestands, bei der 85 % aller Altbauten einen Wärmeenergieverbrauch von unter 120 kWh/m<sup>2</sup>a erreichen, kann Bedingungen schaffen, unter denen Luftwärmepumpen die Umgebungswärme effizient nutzen können. Je weiter der Wärmeenergieverbrauch abgesenkt wird, desto geringer wird die Lastanspruchnahme der Wärmepumpen und der Strombedarfs im Wärmesektor sinkt (Kap. 4.1, 4.4).

(2) Innovative Konzepte, die Wärmepumpen mit anderen erneuerbaren Energietechnologien kombinieren, werden dazu beitragen, den Ertrag oberflächennaher Kollektoren zu verbessern, und die Nutzung von lokal erzeugtem PV-Strom wird direkt zu einer verbesserten Treibhausgasbilanz beitragen. (Kap. 4.3)

- (3) Finanzierungs- und Governance-Initiativen müssen sich auf Wärmepumpensysteme konzentrieren, die eine hohe Energieeffizienz aufweisen. Die Jahresarbeitszahl (JAZ, SCOP) von Wärmepumpen sollte mindestens 3,5 und vorzugsweise 4,0 bis 4,5 betragen. Geothermische Wärmepumpensysteme erreichen im Durchschnitt höhere Effizienzwerte und benötigen weniger Antriebsstrom. Demnach sollte der Zubau von Erdwärmepumpen deutlich ansteigen, sodass der Anteil an Erdwärmesonden über die Hälfte aller Wärmepumpensysteme ausmacht (Kap. 4.2, 4.4).
- (4) Eine räumliche Analyse (räumliches Ausbaupotenzial) hat ergeben, dass erdgekoppelte Wärmepumpensysteme im Jahr 2050 150 TWh Wärme bereitstellen können. Das entspricht 74% des für 2050 berechneten Endenergiebedarfs an Wärme, der mit Wärmepumpen-Heiztechniken erzeugt wird. Auch in dicht besiedelten Regionen ist ein räumlicher Deckungsgrad von 50-60 % gegeben, um die Wärmeversorgung aus geothermischer Umgebungswärme darzustellen. Ökologisch sensible Bereiche sind dabei als Restriktionszonen von der Nutzung ausgeschlossen (Kap. 4.2, 4.4).
- (5) Bei Wärmepumpen sind Effizienzsteigerungen von mindestens 10% und bis zu 50% möglich, wenn die technische Auslegung und Installation des Wärmepumpensystems optimiert wird. Informationen zur Qualitätsoptimierung finden sich in der VDI-Richtlinie 4645, Teil 1. Die Energieeffizienz von Wärmepumpen im Besonderen — wie aller Heizungen im Allgemeinen — muss transparent gemacht werden, um den Betreibern Handlungsbedarf und Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. (Kap. 5.1).
- (6) Technische Innovationen in der Wärmepumpentechnik und Planungskompetenz müssen ebenso auf eine Minimierung von Umweltschäden ausgerichtet sein. Initiativen zur Reduzierung von Geräuschemissionen, zur Umstellung auf F-Gas-freie Arbeitsfluide, zur Vermeidung von Bodenverunreinigungen und Planungsanforderungen für den Trinkwasserschutz sowie zur Begrenzung unzulässig hoher Boden- und Grundwassertemperaturen wurden in Kapitel 5.2, 5.3, 5.4 erläutert.

## Quellenangaben

- [1] GÜNTER, J. et al.: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten, [www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen), Umweltbundesamt, Dessau (2017).
- [2] PURR, K. et al.: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, *Climate Change 07/2014*, Umweltbundesamt, Dessau (2014)
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi, Letzte Aktualisierung: 23.08.2018, [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.html](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.html) (abgerufen am 23.09.2018)
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Energieeffizienz in Zahlen, Berlin (2018)
- [5] LOHSE, C. & WAGENER-LOHSE, G.: Sustainable heat pump systems in a transformed energy system based on renewables, *Proceedings of ECOS 2018*, # 408, The 31th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, June 17-12, 2018, Guimaraes, Portugal (2018)
- [6] HENNING, H.-M. & PALZER, A.: What will the energy transformation cost?, ISE, Freiburg (2015)
- [7] ADOLF, J. et al.: Klimaschutz im Wohnungssektor – Wie heizen wir morgen?, Hamburg, Köln (2013)
- [8] CISCHINSKY, H. et al.: Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016, Darmstadt (2018)
- [9] Statistisches Bundesamt: Mikrozensus 2014, Wiesbaden (2015)
- [10] BMUB, Division KI I1: Climate Action Plan 2050 Germany, Berlin (2016)
- [11] Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, Februar 2018
- [12] AGEE-Stat: Hintergrundpapier (HGP), veröffentlicht 16.03.2018
- [13] BORN, H. et al.: Analyse des Deutschen Wärmepumpenmarktes, Int. Geothermal Centre, Bochum (2017)
- [14] BMWi (Hrsg.): Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin (2016)
- [15] Statistisches Bundesamt: Baugenehmigungen und Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihen ab 1980 – 2017, Wiesbaden (2018)

- [16] KLAUS, T. et al.: Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen, Umweltbundesamt, Dessau (2010)
- [17] PURR, K. et al.: Integration of Power to Gas/Power-to-liquid into the ongoing transformation process, Umweltbundesamt, FG I2.2, Dessau (2016)
- [18] Umweltbundesamt: Umgebungswärme und Wärmepumpen, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen> (abgerufen am 25.9.2018)
- [19] JOCHUM, P. et al.: Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich, Beuth HS / ifeu, Berlin / Heidelberg (2017)
- [20] RUSS, C. et al.: Feldmessungen Wärmepumpen im Gebäudebestand, FhG ISE, Freiburg (2010)
- [21] Umweltbundesamt (Hrsg.): Kurzbeschreibung des Projektes „Energetische Sanierung von vier Gebäuden im Stadtquartier Märkische Scholle“, [https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/2015-06-17\\_internetbeitrag\\_maerkische\\_scholle\\_final.pdf](https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/2015-06-17_internetbeitrag_maerkische_scholle_final.pdf), abgerufen am 25.9.2018
- [22] MINDER, S.: Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren, Schlussbericht EnergieSchweiz, Bern (2014)
- [23] BRINKMANN, J.: Abschlussbericht zum Vorhaben Realisierung einer Abwasserwärmenutzungsanlage im Wiesental Aachen, Aachen (2017) <https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/abgeschlossenes-projekt-stawag-energie-gmbh>
- [24] Fritz, S., Pehnt, M.: Kommunale Abwässer als Potenzial für die Wärmewende?, Heidelberg (2018)
- [25] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4645 Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern – Planung, Errichtung, Betrieb, Düsseldorf (2018)
- [26] FABRIS, C.: German Policy for New Noise Nuisance in Sensitive Areas, *inter.noise 9-12 August 2015*, San Francisco, California USA (2015)
- [27] Umweltbundesamt, FG I 3.4 (Hrsg.): Leitfaden. Tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/tieffrequente-gerauesche-im-wohnumfeld>, (2017)
- [28] MKULNV NRW: Guideline for the installation of air heat pumps, (2016)
- [29] Umweltbundesamt: *UBA.de Themen*, 'Regulation (EU) No. 517/2014 on fluorinated greenhouse gases' <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase#textpart-3> (abgerufen am 11.04.2018)
- [30] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4640-1 Thermische Nutzung des Untergrunds, Düsseldorf (2011)

Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06944 Dessau-Roßlau  
 christiane.lohse@uba.de, jens.schubert@uba.de

Die hier wiedergegebene Meinung muss nicht zwingend mit der Meinung des Umweltbundesamtes übereinstimmen.