

18-TEILIGE SERIE

WÄRMEPUMPEN: DEINE FRAGEN JETZT BEANTWORTET

12/18

Heiztechnologien im Vergleich: Eine systematische Bewertung

Author: Dr.-Ing. Marek Miara, erschienen am 02.02.2026

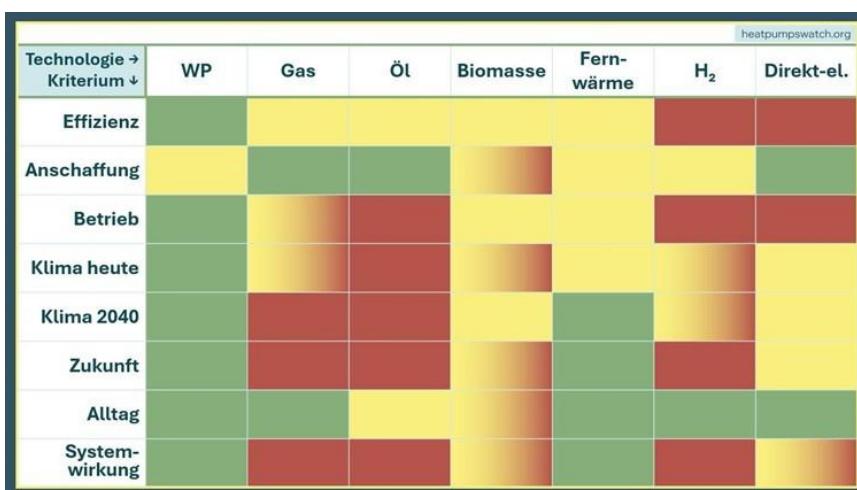


Abbildung 1 – Bewertungsmatrix (siehe S.2 „Die Bewertungsmatrix“)

1

Noch nie war der richtige Weg beim Heizungstausch so klar. Es braucht keine heroischen Maßnahmen, um gleichzeitig gut fürs Klima und die eigene Ökonomie zu handeln – es reicht, pragmatisch zu wählen.

Die Wahl eines Heizsystems gehört zu den folgenreichsten Entscheidungen, die ein Haushalt treffen kann. Eine neue Heizung läuft typischerweise 15 bis 20 Jahre. In dieser Zeit summieren sich die Energiekosten auf 30.000 bis 60.000 Euro, und die kumulierten CO₂-Emissionen können je nach Technologie zwischen 30 und 80 Tonnen pro Haushalt betragen – das entspricht etwa 1.500 bis 4.000 Bäumen, die gepflanzt und 20 Jahre wachsen müssten, um diese Menge zu kompensieren. Die Entscheidung, die heute getroffen wird, wirkt also bis etwa 2045 – dem Jahr, in dem Deutschland klimaneutral sein soll.

Der deutsche Heizungsmarkt befindet sich in einem Umbruch. Die aktuellen Zahlen des Bundesverbands der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) zeigen eine deutliche Verschiebung: 2025 wurden erstmals mehr Wärmepumpen (299.000 Geräte, +55%) als Gaskessel (229.000 Geräte, -36%) verkauft. Der Absatz von Ölheizkesseln ging um 74% auf nur noch 22.500 Geräte zurück. Insgesamt wurden 627.000 Wärmeerzeuger abgesetzt – der niedrigste Stand seit 15 Jahren.¹

Diese Entwicklung hat viele Gründe – politische Rahmenbedingungen, Förderprogramme, steigende CO₂-Preise. Aber vielleicht zeigt sich hier auch einfach etwas Grundlegendes: Wenn Menschen vor einer wichtigen Entscheidung stehen und sich die Optionen genau ansehen, wählen sie oft die pragmatischste Lösung. Eine Lösung, die wirtschaftlich sinnvoll ist, die Zukunftssicherheit bietet und gleichzeitig gut fürs Klima ist.

Die Bewertungsmatrix

Die vorgestellte Matrix bewertet sieben Heiztechnologien anhand von acht Kriterien. Die Farbskala reicht von grün über gelb bis rot.

sehr gut / unproblematisch	problematisch / nicht empfohlen
akzeptabel / mit Einschränkungen	zusätzliche Differenzierung

Erläuterung der Bewertungskriterien

Effizienz

2

Das Kriterium Effizienz beschreibt, wie viel nutzbare Wärme aus einer eingesetzten Energieeinheit gewonnen wird.

Die Wärmepumpen nutzen die Umgebungswärme und erzeugen damit aus einer Kilowattstunde (kWh) Strom typischerweise 3 bis 5 kWh Wärme. Die realen Effizienzen im Alltag wurden ausführlich in Folge 2 dieser Serie beschrieben.²

Effizienz: Wie viel Wärme wird aus einer Einheit Energie gewonnen?

Brennwertkessel für Gas und Öl erreichen Wirkungsgrade von 90 bis 98% bezogen auf den Brennwert. Pelletkessel liegen bei 85 bis 95%. Direktelektrische Heizungen haben definitionsgemäß einen Wirkungsgrad von 100% (COP = 1), was nach viel klingen mag, sie damit aber zur **ineffizientesten** Nutzung von Strom für Heizzwecke macht.

Wasserstoff als Energieträger für Heizzwecke ist besonders ineffizient: Zunächst muss grüner Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt werden (Wirkungsgrad ~70%), dann transportiert und gespeichert (weitere Verluste), und schließlich im Kessel verbrannt werden (Wirkungsgrad ~90%). In der Gesamtkette werden so 5–8-mal mehr erneuerbare Energie benötigt als bei direkter Nutzung in einer Wärmepumpe.³ **Diese physikalische Realität macht Wasserstoff für Wohngebäude systemisch ungeeignet.**

Investitionskosten

Die Investitionskosten umfassen Anschaffung, Installation und notwendige Peripherie.

Investitionskosten: Was kostet es einmalig zu Beginn?

Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe kostet inklusive Installation typischerweise 25.000 bis 35.000 €, eine Sole-Wärmepumpe mit Erdsondenbohrung 35.000 bis 45.000 €. Gasbrennwertkessel liegen bei 8.000 bis 15.000 €, Pelletkessel bei 18.000 bis

30.000 € inklusive Lagerraum. Direktelektrische Systeme sind mit 3.000 bis 8.000 € am günstigsten in der Anschaffung

Diese Preisspannen dienen der Orientierung. Die tatsächlichen Kosten können je nach individueller Situation auch außerhalb dieser Bereiche liegen. Die genannten Preise beziehen sich auf den deutschen Markt – in anderen Ländern sind die Kosten für Wärmepumpen meist niedriger.

Die staatliche Förderung (BEG) reduziert die Investitionskosten für Wärmepumpen und Biomasse-Heizungen um 30 bis 70%, abhängig von Einkommen und Zusatzkriterien. Für fossile Systeme gibt es keine Förderung mehr.

Betriebskosten

Die Betriebskosten umfassen Energie, Wartung und absehbare Entwicklungen wie CO₂-Bepreisung.

Die Betriebskosten unterscheiden sich erheblich zwischen den Technologien. Laut Heizspiegel für Deutschland 2025 lagen die durchschnittlichen jährlichen Heizkosten für eine 70-m²-Wohnung im Abrechnungsjahr 2024 bei etwa 1.030 € für Erdgas, 1.030 € für Heizöl, 1.225 € für Fernwärme, 680 € für Wärmepumpen und 615 € für Holzpellets. Bei einem typischen Einfamilienhaus mit 20.000 kWh Wärmebedarf (entspricht etwa 140 m²) ergeben sich proportional höhere Kosten: Eine Wärmepumpe (JAZ 3,5, Wärmepumpentarif 25 ct/kWh) verursacht etwa 1.400 € jährlich, ein Gaskessel (12 ct/kWh inkl. CO₂-Preis) etwa 2.600 €, ein Ölkessel etwa 3.000 €. Die CO₂-Kosten werden bis zur Einführung des EU Emissionshandelssystems 2 (ETS II) 2027 weiter steigen.^{4,5,6,7}

3

*Betriebskosten:
Was sind die
laufenden
Kosten?*

Für eine individuelle Berechnung mit den eigenen Daten können Hausbesitzer den kostenfreien Betriebskosten-Rechner auf heatpumpswatch.org nutzen.

Wartungskosten unterscheiden sich ebenfalls: Wärmepumpen benötigen wenig Wartung (50–150 €/Jahr), Gaskessel erfordern jährliche Wartung und Schornsteinfegergebühren (200–350 €/Jahr), Pelletkessel haben den höchsten Wartungsaufwand (300–500 €/Jahr).

Die Betriebskosten für Wasserstoff sind derzeit nicht absehbar, dürften aber deutlich über denen von Erdgas.

Klimawirkung heute

Die tatsächlichen Treibhausgasemissionen beim heutigen Strommix (Deutschland 2024: ca. 55% erneuerbar).

Pelletheizungen werden bilanziell oft als klimaneutral gewertet, emittieren aber durch Verbrennung, Transport und Aufbereitung etwa 20–80 g CO₂/kWh.⁸ Wichtiger ist: Die Klimaneutralität von Biomasse gilt nur langfristig – das beim Verbrennen freigesetzte CO₂ ist sofort in der Atmosphäre, während die Wiederbindung durch nachwachsende Bäume 20–80 Jahre dauert. In der kritischen Zeitspanne bis 2030 und 2040 wirkt Biomasse-Verbrennung daher nicht klimaneutral.⁹

*Klimawirkung:
Inwiefern wird das
Klima beeinflusst,
sowohl heute als
auch in mittlerer
Zukunft?*

Die CO₂-Intensität von Strom schwankt im Tages- und Jahresverlauf erheblich. Bei hoher Einspeisung erneuerbarer Energien kann der Betrieb einer Wärmepumpe nahezu emissionsfrei sein.

Klimawirkung 2040

Vereinbarkeit mit dem Energiesystem 2040 (80–90% erneuerbare Stromerzeugung nach deutschen Klimazielen).

Bei 80% Erneuerbaren-Anteil im Strommix sinkt die CO₂-Intensität einer Wärmepumpe auf unter 30 g CO₂/kWh – ein Niveau, das mit Klimaneutralität vereinbar ist.¹⁰ Fossile Brennstoffe haben hingegen konstante Emissionsfaktoren, die sich nicht durch Systemveränderungen reduzieren lassen.

Fernwärme kann bei konsequenter Dekarbonisierung (Großwärmepumpen, Abwärme, Solarthermie) ebenfalls sehr niedrige Emissionen erreichen. Die Bewertung hängt stark von der lokalen Erzeugungsstruktur ab.

Zukunftssicherheit

Zukunftssicherheit: Ist die Investition auch in 15–25 Jahren noch regulatorisch, wirtschaftlich und systemisch sinnvoll?

4

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) schreibt ab 2024 für Neubauten in Neubaugebieten 65% erneuerbare Energien vor.¹¹ Bestehende fossile Heizungen dürfen noch maximal bis 2044 betrieben werden. Neue Ölheizungen sind faktisch verboten, neue Gasheizungen nur noch mit Auflagen installierbar.

Zukunfts-
sicherheit: Bleibt
die Investition
eine gute Idee?

H₂-ready-Kessel versprechen eine spätere Umstellung auf Wasserstoff. Eine Meta-Analyse von 54 unabhängigen Studien kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass Wasserstoff für Wohngebäude weder kosteneffizient noch klimapolitisch sinnvoll ist.¹²

Ein oft unterschätzter Aspekt der Zukunftssicherheit ist die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern. Während Öl und Gas aus politisch instabilen Regionen importiert werden müssen, kann der Strom für Wärmepumpen zunehmend lokal aus Wind und Sonne erzeugt werden. Die geopolitischen Konflikte um fossile Energieträger dürften sich in den kommenden Jahrzehnten eher verschärfen – die Energiewende macht Europa unabhängiger.

Alltagstauglichkeit

Zuverlässigkeit, Komfort und Wartungsaufwand im alltäglichen Betrieb.

Gaskessel und Fernwärme bieten den höchsten Komfort: wenig Platzbedarf, keine manuelle Brennstoffbeschickung, geringe Geräuschentwicklung. Wärmepumpen sind ähnlich komfortabel, erfordern aber ein Außengerät (Schallschutz beachten). Pelletheizungen benötigen Lagerraum und regelmäßige Ascheentleerung.

Alltags-
tauglichkeit: Wie
groß ist der
Aufwand im
Alltag, wie
problemanfällig
die Technologie?

Moderne Wärmepumpen arbeiten mit 35–55 dB(A) am Außengerät – vergleichbar mit einem Kühlschrank oder leiser Unterhaltung. Bei korrekter Aufstellung und Einhaltung der Abstandsregeln ist dies in der Regel unproblematisch.

System & Netze

Integration in das Gesamtsystem aus Strom-, Wärme- und Gasnetzen bei millionenfacher Anwendung.

Wärmepumpen erhöhen zwar den Strombedarf, können aber durch intelligente Steuerung zur Netzstabilisierung beitragen. Das Stromnetz ist für weiteren Ausbau konzipiert. Gasnetze hingegen schrumpfen absehbar, was zu steigenden Netzentgelten für verbleibende Nutzer führt.

Für grünen Wasserstoff im Gebäudebereich wären fünf bis acht Mal mehr erneuerbare Stromerzeugung nötig als bei direkter Elektrifizierung mit Wärmepumpen – eine systemisch kaum tragfähige Option.¹³ Der geplante Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur fokussiert sich auf industrielle Anwendungen – Wohngebiete sind in der Wasserstoff-Netzplanung nicht vorgesehen.

*System & Netze:
Wie verhält sich
die Technologie
zum Gas-, Wärme-
, und / oder
Stromnetz?*

Die Technologien im Überblick

Wärmepumpe

Die Wärmepumpe schneidet in der Bewertungsmatrix in 7 von 8 Kriterien mit Grün ab und ist damit die pragmatischste und vorteilhafteste Lösung für die meisten Haushalte.

5

Bei der Effizienz erreicht sie mit Abstand die besten. Die Investitionskosten liegen zwar über fossilen Systemen, werden aber durch niedrigere Betriebskosten und Förderung kompensiert. Bei den Betriebskosten überzeugt die Wärmepumpe bereits heute und der Vorteil wächst mit steigenden CO₂-Preisen weiter.

Die Klimawirkung ist sowohl heute als auch 2040 überragend – mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien sinken die Emissionen weiter. Die Zukunftssicherheit ist maximal: keine regulatorischen Risiken, keine Abhängigkeit von fossilen Importen, vollständig kompatibel mit dem zukünftigen Energiesystem.

In der Alltagstauglichkeit steht die Wärmepumpe Gas und Fernwärme kaum nach – moderner Komfort ohne manuelle Eingriffe. Bei der Systemwirkung trägt sie zur Netzstabilisierung bei, statt schrumpfende Gasnetze zu belasten.

Diese Bewertung gilt grundsätzlich für alle elektrischen Heizsysteme: Je grüner der Strommix wird, desto besser wird ihre Klimabilanz – während fossile Systeme immer dieselben direkten Emissionen verursachen.

Gasheizung

Gasbrennwertkessel erreichen Wirkungsgrade von 90–98% und sind ausgereift und komfortabel.

In der Bewertung zeigt sich ein differenziertes Bild: Bei Investitionskosten und Alltagstauglichkeit schneidet Gas gut ab. In den Zukunftskriterien (Klimawirkung 2040, Zukunftssicherheit, System & Netze) fällt die Bewertung jedoch negativ aus.

Die Gründe liegen in der Systemlogik: Erdgas emittiert bei der Verbrennung etwa 200 g CO₂/kWh – ein Wert, der sich nicht durch technische Verbesserungen reduzieren lässt. Steigende CO₂-Preise erhöhen kontinuierlich die Betriebskosten. Mit dem regulatorisch erzwungenen Schrumpfen der Gasnetze steigen die Netzentgelte für verbleibende Nutzer.

Ölheizung

Ölbrennwertkessel funktionieren ähnlich wie Gaskessel, emittieren aber mit 260–320 g/kWh noch mehr CO₂.

In der Bewertung erhält die Ölheizung in vier von acht Kriterien eine rote Bewertung. Die niedrigen Investitionskosten werden durch hohe Betriebskosten und geringe Zukunftssicherheit aufgewogen.

Der massive Absatzrückgang (–74% im Jahr 2025) spiegelt diese Bewertung wider. Neuinstallationen von Ölheizungen sind seit 2024 faktisch nicht mehr möglich; bestehende Anlagen dürfen noch bis maximal 2044 betrieben werden. Für Gebäude, die derzeit noch mit Öl heizen, stellt sich die Frage nach dem optimalen Umstiegszeitpunkt.

Biomasse (Pellets)

6

Pelletheizungen verbrennen gepresste Holzspäne und werden bilanziell als klimaneutral gewertet, da das verbrannte Holz beim Wachstum CO₂ gebunden hat. Die Realität ist differenzierter.

Für kurzfristige Klimaziele ist dies problematisch. Hinzu kommen Emissionen durch Ernte und Transport. Als breit skalierbare Lösung scheidet Biomasse aufgrund begrenzter Ressourcen aus.

Die Bewertung fällt entsprechend gemischt aus. Biomasse eignet sich vor allem für Anwendungen, in denen lokale Reststoffe (Sägewerksabfälle, Waldrestholz) verfügbar sind und keine Flächenkonkurrenz entsteht. Als breit skalierbare Lösung für den gesamten Gebäudebestand scheidet sie aufgrund begrenzter Ressourcen aus.

Praktische Aspekte: Pelletkessel benötigen Lagerraum (ca. 6–8 m² für einen Jahresvorrat) und regelmäßige Wartung einschließlich Ascheentleerung. Der Komfort liegt unter dem von Gas oder Wärmepumpe.

Fernwärme

Fernwärme ist nicht direkt vergleichbar – entscheidend ist der externe Wärmeerzeuger, nicht das Gerät im Haus. Die Hausübergabestation ist kompakt und wartungsarm – die Komplexität liegt im Netz.

Die Klimabewertung von Fernwärme hängt stark von der Erzeugungsstruktur ab. Traditionelle Netze nutzen oft Kraft-Wärme-Kopplung mit Gas oder Kohle. Moderne Netze setzen zunehmend auf Großwärmepumpen, Abwärme aus Industrie und Rechenzentren sowie Solarthermie. Bei konsequenter Dekarbonisierung können Emissionsreduktionen von 64–70% gegenüber fossilen Netzen erreicht werden.¹⁴

Systemisch bietet Fernwärme Vorteile: Großwärmepumpen können durch ihre Leistung viele Häuser auf einmal versorgen, zentrale Speicher können Lastspitzen abfedern, und die Integration verschiedener Wärmequellen (Abwärme, Geothermie) ist einfacher.

Die Einschränkung: Fernwärme setzt ein Netz voraus – entweder ein bestehendes oder den Neubau der Infrastruktur. Dieser Netzausbau ist jedoch für die Wärmewende in dicht bebauten Gebieten notwendig und sinnvoll. In Quartieren mit dichter Bebauung kann Fernwärme sogar die bessere Option gegenüber dezentralen Wärmepumpen sein, da sie effizienter zu erschließen ist und zentrale Großwärmepumpen oder andere Wärmequellen nutzen kann. Die Investitionsentscheidung liegt bei der Kommune oder dem Netzbetreiber, nicht beim einzelnen Hausbesitzer.

H₂-ready-Heizungen

H₂-ready-Gaskessel können nach technischen Anpassungen (Hardware und Software) auf Wasserstoff umgestellt werden. Derzeit laufen sie mit fossilem Gas.

Die wissenschaftliche Evidenz ist eindeutig: Wasserstoff für Wohngebäude ist weder effizient noch wirtschaftlich. Der Strombedarf liegt fünf bis acht Mal höher als bei Wärmepumpen.¹⁵

Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff im Gebäudebereich ist zudem höchst unsicher. Die begrenzte Menge wird voraussichtlich in Industrie, Luftfahrt und Schifffahrt eingesetzt, wo keine Elektrifizierungsalternativen existieren.

H₂-ready-Kessel können als eine Art Beruhigungspille verstanden werden: Sie ermöglichen den Einbau eines fossilen Systems mit dem Versprechen einer späteren Umstellung. Dieses Versprechen ist nach aktuellem Kenntnisstand jedoch nicht einlösbar. Die Bewertung fällt entsprechend kritisch aus.

Direktelektrische Heizungen

Direktelektrische Heizungen wandeln Strom unmittelbar in Wärme (COP = 1). Verglichen mit Wärmepumpen (COP 3–4) bedeutet dies drei bis vier Mal höheren Stromverbrauch und entsprechend hohe Betriebskosten. Dies führt zu hohen Betriebskosten und erheblichen Lastspitzen im Stromnetz. Direktelektrische Systeme haben allerdings ihre Berechtigung bei der Warmwasserbereitung in bestimmten Anwendungen – etwa als Durchlauferhitzer in selten genutzten Räumen oder als dezentrale Ergänzung.

Sinnvoll in Nischen: Passivhäuser, selten genutzte Räume, Warmwasserbereitung in dezentralen Anwendungen. Als Hauptheizsystem ungeeignet.

Ergänzende Technologien

Dieser Vergleich konzentriert sich auf die Hauptheizsysteme. Ergänzende Technologien wie Solarthermie oder Photovoltaik wurden nicht einzeln bewertet, da sie allein nicht den vollständigen Heizbedarf decken können.

Sie sind jedoch sinnvolle Ergänzungen zu mehreren der beschriebenen Systeme und können die Effizienz und Wirtschaftlichkeit deutlich verbessern. Hybridanlagen, die verschiedene Technologien kombinieren, wurden in einem früheren Artikel dieser Serie ausführlich beschrieben.

Zusammenfassung

Die systematische Bewertung zeigt ein klares Bild: Wärmepumpen und – wo verfügbar – dekarbonisierte Fernwärme schneiden in der Gesamtbetrachtung am besten ab. Fossile Systeme verlieren in den Zukunftskriterien deutlich, auch wenn sie bei Investitionskosten und Alltagstauglichkeit noch Vorteile haben.

Dieses Ergebnis entspricht dem wissenschaftlichen Konsens. Die analysierten Studien nationaler und internationaler Forschungsinstitute, Universitäten und Energieagenturen kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis: Für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors sind Wärmepumpen und dekarbonisierte Fernwärme die Hauptlösungen.

Die Analyse zeigt: Die beste Lösung fürs Klima, für die Unabhängigkeit von fossilen Importen und für das Energiesystem der Zukunft ist gleichzeitig die pragmatischste für die Endnutzer. Das macht den Umstieg leichter.

8 Jeder Haushalt kann aus eigenen Gründen seine Entscheidung treffen – aber es ist ermutigend zu sehen, dass die vernünftigste Wahl für die individuelle Situation so oft auch die beste für das Gemeinwohl ist.

Wärmepumpen und dekarbonisierte Fernwärme sind die klimafreundlichsten, zukunftsähigsten und zugleich pragmatischsten Heizlösungen für Haushalte.

Was die Bewertung nicht leisten kann

Diese Analyse bietet eine systematische Orientierung auf Basis wissenschaftlicher Evidenz. Für die allermeisten Haushalte führt sie zu einer klaren Empfehlung: Wärmepumpe oder – wo verfügbar – dekarbonisierte Fernwärme. Die konkrete Umsetzung erfordert natürlich eine Beratung vor Ort. Faktoren wie der genaue Gebäudezustand, das vorhandene Heizsystem, bauliche Gegebenheiten und persönliche Prioritäten spielen eine Rolle. Aber die grundsätzliche Richtung ist klar.

¹ Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH): Absatzstatistik Wärmeerzeuger 2025. Pressemitteilung vom 1. Februar 2026.

² Fraunhofer ISE: Wärmepumpen in Bestandsgebäuden – Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt WPsmart im Bestand. Freiburg, 2020. / WP-QS Bestand: Feldtest 2022–2024.

³ Rosenow, J. et al.: Is heating homes with hydrogen sustainable? A meta-review of 54 studies. Cell Reports Sustainability, 2023.

⁴ co2online gGmbH: Heizspiegel für Deutschland 2025 – Vergleichswerte für das Abrechnungsjahr 2024. <https://www.heizspiegel.de/heizkosten-pruefen/heizspiegel/> (Zugriff: Februar 2026).

⁵ Naumann, G.; Schropp, E.; Gaderer, M.: Life Cycle Assessment of an Air-Source Heat Pump and a Condensing Gas Boiler. *Procedia CIRP*, 105, 351–356, 2022.

⁶ Naumann, G.; Schropp, E.; Gaderer, M.: Environmental, economic, and eco-efficiency assessment of residential heating systems. *Journal of Building Engineering*, 98, 111074, 2024.

⁷ EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln: A heated debate – The future cost-efficiency of climate-neutral heating technologies. Working Paper, 2024.

⁸ Aslan, K. et al.: A Comparative Environmental Assessment of Heat Pumps and Gas Boilers. *MDPI Energies*, 14(11), 3027, 2021.

⁹ IPCC AR6 Working Group III, Chapter 9: Buildings. Cambridge University Press, 2023.

¹⁰ Fraunhofer ISE: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Bundesländer im Transformationsprozess. REMod-Studie, 2024.

¹¹ Gebäudeenergiegesetz (GEG) in der Fassung vom 1. Januar 2024.

¹² Rosenow, J. et al.: Is heating homes with hydrogen sustainable? A meta-review of 54 studies. *Cell Reports Sustainability*, 2023.

¹³ IEA – International Energy Agency: The Future of Heat Pumps. *World Energy Outlook Special Report*, Paris, 2022.

¹⁴ Bianchi, M. et al.: Decarbonization of district heating – A systematic review of carbon footprint and key mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 2025.

¹⁵ Ueckerdt, F. et al.: Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 11, 384–393, 2021.