

Heizungstechnologien im Gebäude: Ein Beitrag zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und Klimawirksamkeit

HEIZUNGSTECHNOLOGIEN IM GEBÄUDE: EIN BEITRAG ZUR BEWERTUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT UND KLIMAWIRKSAMKEIT

Autoren: Robert Meyer, Charlotte Senkpiel, Judith Heilig, Jessica Berneiser, Verena Fluri, Gregor Gorbach, Sebastian Herkel, Christoph Kost

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE
Heidenhofstr. 2
79110 Freiburg

+49 761 4588-0

robert.meyer@ise.fraunhofer.de
charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

www.ise.fraunhofer.de

Inhalt

1	Zentrale Aussagen	4
2	Hintergrund und Ziel	7
2.1	Ziel der Studie	7
2.2	Hintergrund	7
3	Methode und Praxisbeispiele des Heizkostenvergleichs.....	10
3.1	Wie können Heizkosten miteinander verglichen werden?	10
3.2	Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger	11
3.3	Aktuelle Förderbedingungen	13
3.4	Nutzung von Eigenstrom aus Photovoltaikanlagen	15
4	Kosten und Emissionen von Heiztechnologien im Vergleich	17
4.1	Zentrale Ergebnisse	17
4.2	Fallbeispiel Altbau	18
4.3	Fallbeispiel Neubau	23
4.4	Die Rolle des CO ₂ -Preises	30
4.5	Förderung und CO ₂ -Vermeidung.....	32
5	Exkurs Wasserstoff	33
6	Fazit.....	37
	Literaturverzeichnis.....	38
	Anhang.....	40

Für ein Gelingen der Energiewende spielt der Wärmesektor eine entscheidende Rolle, was der heutige Endenergieverbrauch unterstreicht. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland insgesamt 2.514 TWh Endenergie verbraucht. Auf den Bereich »Raumwärme« und »Warmwasser« entfielen dabei 792 TWh – das entspricht 31,5 %. Der Großteil des Endenergieverbrauchs für »Raumwärme« und »Warmwasser« fällt mit 560 TWh dabei im Bereich privater Haushalte an, weshalb der Fokus dieser Untersuchung auf dem Wohngebäudesektor liegt. Von den 560 TWh wurden 93 TWh, d.h. 16,8 % durch erneuerbare Energien bereitgestellt (BMWi 2021b). Um die Energiewende auch bei der Gebäudewärmeversorgung zu realisieren, sind die nächsten Jahre entscheidend, da bei den Lebenszeiten der verschiedenen Heiztechnologien vor dem Jahr 2045 in der Regel nur noch eine Neuinvestition getätigt wird. Die Entscheidung für eine neue Heiztechnologie ist durch die zunehmende Anzahl an Technologieoptionen und zusätzlichen Entscheidungsparametern, beispielsweise die Entwicklung der zukünftigen CO₂-Bepreisung oder sich schnell ändernder CO₂-Äquivalente (CO₂-äq) von Energieträgern komplexer geworden. Aktuelle Regelwerke wie das Gebäudeenergiegesetz (GEG) antizipieren mit ihren Rahmenbedingungen diese Entwicklungen noch nicht.

Das Fraunhofer ISE möchte mit dieser Studie einen transparenten Wirtschaftlichkeitsvergleich im Lichte sich verändernder Randbedingungen durchführen und eine Entscheidungshilfe zur Hand geben. Dabei muss eine Balance zwischen Realitätsnähe und Verallgemeinerung bzw. Übersichtlichkeit gefunden werden. Diese Studie kann daher nicht jeden Einzelfall oder aktuelle konjunkturbedingte Entwicklungen abdecken, sondern soll vielmehr Trends und deren Auswirkungen auf die verschiedenen Technologieoptionen darstellen. Die Daten und Ergebnisse dieser Studie können daher als Grundlage zur Entscheidungsfindung dienen oder ein Ausgangspunkt für eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung von realen technischen Lösungen sein. Die Kostenannahmen beruhen im Wesentlichen auf den von Mailach und Oschatz (2021a) für den BDEW ermittelten Heizkostenvergleichen.

Die Kernaussagen der Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. **Ziel dieser Studie ist ein transparenter Vergleich der verschiedenen Technologieoptionen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Klimawirkung.**
 - Der vorliegende Vergleich verwendet heutige Investitionen in Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern im Alt- und Neubau und bezieht eine potentielle zukünftige Entwicklung im deutschen Energie- bzw. Wärmesystem in Richtung Klimaneutralität mit ein.
 - Herkömmliche Heizkostenvergleiche arbeiten häufig mit heutigen Preisen von Energieträgern und deren Besteuerung sowie mit statischen CO₂-Emissionen bzw. CO₂-Intensitäten, insbesondere beim Bezug von Strom.
 - Eine fehlende Berücksichtigung von zukünftigen Entwicklungen dieser Entscheidungsparameter beim Vergleich der verschiedenen Heiztechnologien kann zu Investitionsentscheidungen führen, die in Zukunft unerwartete Mehrkosten für den Investor oder Nutzer verursachen.
2. **Durch eine umfassende Berücksichtigung der Entwicklung der CO₂-Emissionen zeigt sich auch im Altbau, dass die direkte Elektrifizierung**

des Heizsystems oder die Nutzung von Fernwärme zu den geringsten Emissionen der betrachteten Heizsysteme führt

Zentrale Aussagen

- Durch den Umbau der Stromversorgung und den stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien wird die CO₂-Intensität des deutschen Strommix sinken. Daher werden die CO₂-Emissionen aller Wärmepumpen basierten Heiztechnologien reduziert und langfristig deutlich emissionsärmer als Erdgas basierte Lösungen sein.
- Auch die Reduzierung des Erdgasanteils durch eine Beimischung von Wasserstoff oder biogenen Anteilen wird die Emissionen nicht in einem Maße reduzieren, dass Gase bei der Wärmebereitstellung mit Strom im Hinblick auf die Emissionen konkurrieren können.
- Die CO₂-Intensität netzgebundener Wärmeversorgung kann durch die Nutzung von Abwärme, Geothermie und Solarthermie sowie den Einsatz von Großwärmepumpen deutlich gesenkt werden. Bei entsprechender Nutzung dieser Wärmequellen ist die Fernwärme eine Alternative und wichtiger Baustein bei der Wärmeversorgung von Gebäuden, insbesondere in verdichteten Siedlungsräumen.

3. Der zukünftige CO₂-Preis spielt vor allem im Altbaubereich eine entscheidende Rolle. Bei der Wärmeversorgung von Neubauten hat der CO₂-Preis dagegen einen schwächeren Einfluss auf die ökonomisch günstigste Heizlösung.

- In Altbauten ist die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Heiztechnologien wesentlich vom CO₂-Preis (sowie weiteren Fördermechanismen) abhängig. Bei den aktuell zu erwarteten CO₂-Preisentwicklungen ist der Einsatz von Wärmepumpen in Einfamilienhäusern ökonomisch sinnvoll.
- Bei Neubauten hat der zukünftige CO₂-Preis einen schwächeren Einfluss auf die wirtschaftlichste Heiztechnologie, da Verbräuche geringer sind als im Altbau und Technologien auf Basis erneuerbarer Energien bereits etabliert und auch bei aktuellen CO₂-Preisen kostengünstiger sind.

4. Eine elektrifizierte Wärmeversorgung, beispielsweise durch Wärmepumpen, lässt sich durch einen Einbau eines Photovoltaiksystems auf dem Dach noch wirtschaftlicher darstellen.

- Durch einen hohen Anteil Eigenstromnutzung in der Wärmeversorgung besteht die Möglichkeit, günstigen und CO₂-freien Strom zu nutzen. Durch die sehr niedrigen Stromgestehungskosten von PV-Anlagen gegenüber dem Strompreis bei Netzbezug erhöht sich hierdurch die Wirtschaftlichkeit in der Jahresbilanz, auch wenn der Eigenstromanteil stark saisonal geprägt ist.

5. In Mehrfamilienhäusern im Altbau bestehen derzeit noch die größten wirtschaftlichen Hemmnisse für eine günstige und CO₂-arme Wärmeversorgung.

- In Mehrfamilienhäusern ist der Austausch der Heizsysteme tendenziell komplexer.
- Die Anforderungen an Heiztemperaturen sind im un- und teilsanierten Altbau höher und damit die Anforderungen an das Heizungssystem größer. Dies kann zu höheren Bedarfs- und Investitionskosten führen.

6. Im Neubau von Einfamilienhäusern ist die Wärmepumpe bereits Standard. Andere Lösungen werden es in Zukunft in diesem Segment schwer haben.

- Die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen wird im Neubau durch Förderanreize für den Effizienzstandard sowie durch die geringen Betriebskosten hervorgehoben.
- Meistens sind PV-Anlagen ebenfalls Standard und unterstützen die Wirtschaftlichkeit positiv.

7. Die Berechnungen beruhen auf Annahmen, die mit Unsicherheiten behaftet sind.

- Die Kostenannahmen unterliegen dabei nicht nur der zeitlichen Unsicherheit, sondern können auch regional sehr unterschiedlich sein (bspw. auf Grund des lokalen Angebots an Handwerksbetrieben).
- Es gilt zu beachten, dass die exakte Vorhersage von langfristigen Trends unmöglich ist. Allerdings erlaubt diese Studie eine Analyse der Wirtschaftlichkeit und Klimawirksamkeit auf Basis der angenommenen Werte.

8. Es wird vorgeschlagen, dass bestehende Berechnungsgrundlagen und Berechnungshilfen für die Emissionsbewertung und Wirtschaftlichkeitsberechnung von Heizungssystemen dahingehend geändert werden, dass mittlere, während der technischen Lebensdauer zu erwartende CO₂-Äquivalente für die unterschiedlichen Energieträger verwendet werden und erwartbare Kostensteigerungen von Energieträgern (z.B. durch eine CO₂-Bepreisung) berücksichtigt werden.

2.1

Ziel der Studie

Wenn heute eine Investition (Neukauf, Austausch) in ein Heizsystem stattfindet, wird dieses Heizsystem in den meisten Fällen über Jahrzehnte eingesetzt und betrieben. Das bedeutet, dass neben den heute anfallenden Kosten für den Kauf und Installation die zukünftigen Betriebskosten einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer getätigten Investition haben. Gleichwohl werden mit jeder Entscheidung längerfristig CO₂-Emissionen durch die Wahl des Heizsystems und dem damit verbundenen Energieträger festgelegt. Die zukünftigen Entwicklungen in Bezug auf Kosten und auch CO₂-Intensität (CO₂-Emissionen des verwendeten Strom-, Gas- und Fernwärmemix) sind mit Unsicherheiten behaftet. Die betroffenen Akteure stehen trotzdem vor der Herausforderung, heute Investitionsentscheidungen hinsichtlich eines Kaufs oder Erneuerung eines Heizsystems zu treffen.

Die vorliegende Studie soll daher Transparenz in die Beurteilung unterschiedlicher Heizsysteme und deren Betrieb hinsichtlich Wirtschaftlichkeit sowie Klimawirksamkeit geben. Hierzu werden die Methode der Berechnung der Heizkosten sowie die getroffenen Annahmen nachvollziehbar dargestellt. Verschiedene Heizsysteme werden für unterschiedlichen Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Klimawirksamkeit berechnet und miteinander verglichen. Zusätzlich werden für die einflussreichsten Parameter Sensitivitäten gerechnet.

Die Studie richtet sich an eine breite Zielgruppe wie die interessierte Fachöffentlichkeit, betroffene Akteure und politische Entscheidungsträger und adressiert die folgenden Fragestellungen:

1. Wie kann ein transparenter Vergleich der Technologieoptionen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und CO₂-Emissionen berechnet werden und ist dieser für Investitionsentscheidungen ein geeignetes Maß?
2. Welchen Einfluss haben die Entwicklungen der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen auf die Wirtschaftlichkeit und die CO₂-Emissionen unterschiedlicher Wärmeversorgungsoptionen?
3. Welchen Einfluss haben die Entwicklungen der CO₂-Intensitäten des Strom-, Gas- und Fernwärmemix auf die Wirtschaftlichkeit und die CO₂-Emissionen unterschiedlicher Wärmeversorgungsoptionen?
4. Welche Technologiekombinationen sind unter den getroffenen Annahmen aus ökonomischer und ökologischer Perspektive für die Wärmeversorgung eines Wohngebäudes sinnvoll?
5. Sind klimakompatible Heiztechnologien auch ohne politischen Einfluss wie Förderungen, Anreize, Preispolitik wirtschaftlich abbildbar?

2.2

Hintergrund

Klimaneutralität ist politisches Ziel in Deutschland. Im Zuge dessen soll auch die Wärmewende hin zu Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 abgeschlossen sein. Da heutige Entscheidungen im Wärmebereich aufgrund ihrer Langfristigkeit die Zukunft direkt beeinflussen, ist eine Neuorientierung in der Wärmeversorgung und die Beschleunigung der Sanierungsmaßnahmen in allen Gebäudekategorien erforderlich.

Eine zielkompatible Wärmewende in Bezug auf Heizsysteme in Wohngebäuden bedeutet, dass ein Energieträgerwechsel weg von Erdgas und Öl hin zu klimaneutralen Energieträgern wie Erneuerbarem Strom (für Wärmepumpen) und Fernwärme (erzeugt aus klimaneutralen Erzeugungseinheiten wie Biomasse, Solarthermie, Abwärme und Wärmepumpen) stattfinden muss. Nur so kann die Wärme CO₂-neutral bereitgestellt werden. Angesichts des großen Bedarfs an klimaneutralen stofflichen Energieträgern in anderen Sektoren wie der Industrie, der Luftfahrt und dem Güterverkehr kann davon ausgegangen werden, dass synthetische Energieträger wie Wasserstoff für den Wärmebereich nur in geringem Maße zur Verfügung stehen und auch keine kostenoptimale Lösung darstellen. Abbildung 1 zeigt eine Möglichkeit auf, wie der Energieträgerwechsel mit dem Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 erfolgen kann.

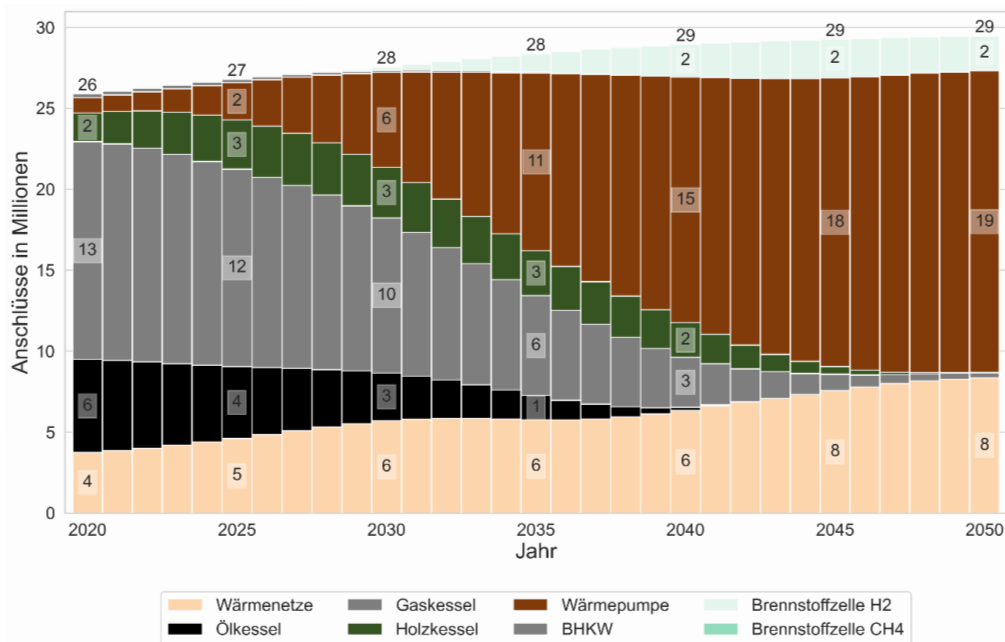


Abbildung 1: Mögliche Entwicklung der Heizsysteme bis 2050 (Berechnet mit dem Energiesystemmodell REMod des Fraunhofer ISE, Quelle: Steinbach et al. (2021))

Zudem ist es für eine erfolgreiche Wärmewende essenziell, den Wärmeverbrauch durch energetische Sanierung und effiziente Wärmebereitstellung drastisch zu reduzieren. Daher ist die Wahl eines Heizsystems immer auch zu einem gewissen Maße an das Gebäude und dessen energetischen Effizienzstandard gekoppelt. Weiterhin ist festzuhalten, dass ein solches Zielsystem nicht einfach vorgegeben werden kann, sondern die Wärmewende von zahlreichen Einzelinvestitionsentscheidungen in jedem Haushalt abhängig ist.

Im Jahr 2019 musste ein Privathaushalt im Schnitt 941 € für Raumwärme und Warmwasser aufwenden, verglichen mit 290 € für Prozesswärme (Kochen) und 483 € für Licht/Sonstiges (BMW 2021b). Das entspricht mehr als 50 % der finanziellen Aufwendungen für Energie im Haushalt (ohne Kraftstoffe für Verkehr). Die Entscheidung über ein Heizsystem ist somit im Haushalt finanziell und im Hinblick auf die damit verbundenen Emissionen von großer Relevanz. Der wichtigste Entscheidungsfaktor ist immer noch die Wirtschaftlichkeit der Anlage, jedoch gewinnen ökologische bzw. klimafreundliche Aspekte zunehmend an Wert. Diese Analyse und Gegenüberstellung von verschiedenen Heizsystemen soll eine Entscheidungshilfe in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Klimawirksamkeit darstellen.

Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wird in dieser Analyse - anders als in aktuellen Veröffentlichungen, normativen Grundlagen und Berechnungen für

Förderentscheidungen - die komplette Betriebsdauer in Bezug auf die anfallenden Kosten als auch CO₂-Emissionen berücksichtigt.

Hintergrund und Ziel

3.1

Wie können Heizkosten miteinander verglichen werden?

Eine Investition in ein Heizsystem ist eine langfristige Entscheidung, die von vielen Parametern beeinflusst wird. Da eine solche Investition in der Regel auf mindestens 20 Jahre ausgelegt ist, ist es wichtig, in einem Heizkostenvergleich auch Kosten und Preise zu berücksichtigen, die im Laufe dieser 20 Jahre aufkommen. So sind manche Heiztechnologien trotz heute noch hoher Investitionskosten über den Lebenszyklus betrachtet kostengünstiger als andere Systeme mit geringen Investitionskosten, da durch höhere Effizienzen und unterschiedliche Entwicklungen von Brennstoffkosten insgesamt geringere Kosten im Verbrauch anfallen. Darüber hinaus unterscheiden sich die Technologien in ihren CO₂-Emissionen. Die Nutzung regenerativer Energiequellen verursacht hierbei typischerweise deutlich geringere CO₂-Emissionen und ist entsprechend weniger klimaschädlich als Technologien, die Erdöl oder Erdgas verbrennen und somit CO₂-Emissionen in die Atmosphäre abgeben. Zusätzlich kann ein Vergleich auch existierende Förderungen berücksichtigen, die die Wirtschaftlichkeit einer Heizungsart beeinflussen können.

Aufgrund von Klimaschutzmaßnahmen und -zielen ist davon auszugehen, dass sich entscheidende Einflussparameter auf die Kosten (wie z.B. CO₂-Preise und damit indirekt die Brennstoffpreise) und Emissionsintensität (z.B. von Strom und Fernwärme) in den nächsten 20 Jahren signifikant verändern werden. Um also Heizkosten verschiedener Systeme miteinander vergleichen zu können, sollten folgende Punkte bei einem Heizkostenvergleich mit betrachtet werden:

Die Entwicklung der Energieträgerpreise inklusive des CO₂-Preises in den nächsten 20 Jahren:

Um die CO₂-Emissionen in Richtung Klimaneutralität zu senken, wird in Deutschland das Instrument der CO₂-Bepreisung angewendet. Seit 2021 gilt in Deutschland ein CO₂-Preis für fossile Brennstoffe von 25 €/t CO₂. Dieser wird bis 2025 schrittweise auf 55 €/t CO₂ angehoben. Durch die ambitionierte Zielstellung der Klimaneutralität Deutschlands bis 2045 wird erwartet, dass der CO₂-Preis in den kommenden Jahren ansteigt. Dies wird zu einem Preisanstieg aller fossilen Energieträger führen, da diese mit einem CO₂-Preis beaufschlagt werden. Da die verbrauchsgebundenen Kosten in den meisten Heizsystemen einen wichtigen Teil der Gesamtkosten ausmachen, müssen die Energieträgerpreise und der darin enthaltene CO₂-Preis über die komplette Nutzungsdauer des Heizsystems mit einbezogen werden. Zur Berücksichtigung des Preisanstiegs wird im Kapitel 4.1 bis 4.3 ein Preispfad angenommen, der neben den bekannten CO₂-Preisen zwischen den Jahren 2021 und 2025 einen CO₂-Preis von 220 €/t im Jahr 2040 unterstellt. Zwischen 2026 und 2040 erfolgt eine lineare Interpolation.

Bilanzierung PV-Einspeisung bei THG-Faktoren:

Bei der zunehmenden Nutzung von eigenem PV-Strom fallen keine CO₂-Emissionen durch den Bezug von Brennstoffen oder Netzstrom an. Wird dieser Strom für den Betrieb einer Heiztechnologie verwendet, kann dieser unterschiedlich in die CO₂-Bilanz einfließen. Dazu wird in einem Fall nur der tatsächlich für das Heizen eingesetzte Strom bilanziert und in einem anderen Fall auch der darüber hinaus ins Netz eingespeiste PV-Strom mitbilanziert.

Für diesen Heizkostenvergleich werden die Methodik (Berechnungen zum Energiebedarf auf Basis der DIN V 18599:2018-09) und Zahlenwerte der im April 2021

erschienenen Heizkostenvergleiche „Neubau 2021“ und „Altbau 2021“ des BDEW herangezogen und erweitert bzw. ersetzt (Mailach und Oschatz 2021b, 2021a). Ermittelt werden die Heizkosten für ausgewählte Heizsysteme für ein Einfamilienhaus (EFH) und ein Mehrfamilienhaus mit sechs Parteien (MFH). Zahlen und Annahmen können dem Anhang entnommen werden. Abweichend von der Methodik des BDEW werden aus oben genannten Gründen in diesem Heizkostenvergleich prognostizierte THG-Emissionen über 20 Jahre auf Basis des Mittelwerts der spezifischen Emissionen der Energieträger aus Szenarien mit einbezogen. Darüber hinaus werden CO₂-Preispfade sowie Preispfade für Brennstoffe, Strom und Fernwärme über 20 Jahre angenommen. Mithilfe eines preisdynamischen Barwertfaktors, dem die gleichen Annahmen wie im BDEW-Heizkostenvergleich zugrunde gelegt sind (Kalkulationszinssatz: 2 %; Preisänderungsfaktor: 0 %; Betrachtungszeitraum: 20 Jahre), wird aus den Preispfaden ein äquivalenter, heute anzusetzender Preis abgeleitet. Aus den oben beschriebenen Annahmen ergibt sich eine durchschnittliche jährliche CO₂-Preisteigerung von 12,3 %, woraus sich ein preisdynamischer Barwertfaktor von 56,8 berechnet. Multipliziert mit dem Annuitätsfaktor der angenommen Randbedingungen (von 0,061) und dem CO₂-Preis im Jahr der Investition von 25 €/t, ergibt sich ein mittlerer anzulegender CO₂-Preis bei einer Betrachtung über die nächsten 20 Jahren von 86,92 €/t, der in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 verwendet wird. In Kapitel 4.4 erfolgt eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich dieses Werts.

Zusätzlich zur ökonomischen Bewertung der Heizsysteme erfolgt eine ökologische Betrachtung anhand von THG-Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 3.2). Bei der Bewertung wird hinsichtlich der Anrechnung des Eigenverbrauchs aus PV-Anlagen unterschieden: Einerseits wird nur der für Wärmeversorgung eigenverbrauchte PV-Strom in der THG-Bilanz berücksichtigt (in Anlehnung an das GEG¹), andererseits erfolgt auch eine vollumfängliche Berücksichtigung des eingespeisten PV-Stroms.

3.2

Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger

Zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen wird grundlegend die Formel Aktivitätsrate multipliziert mit dem Emissionsfaktor² verwendet. Hierbei wird jedoch differenziert, welche Emissionen betrachtet werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick zu der Nutzung von Treibhausgasfaktoren im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) sowie dem Gebäudeenergiegesetz (GEG). Innerhalb der Berichterstattung des Klimaschutzgesetzes, die sich an den Prinzipien der nationalen Klimaberichterstattung orientiert (nationaler Inventarbericht), werden bei der Berichterstattung gemäß Territorial-, Quell-, und Absatzprinzip lediglich die Emissionen betrachtet, die bei der Verbrennung vor Ort entstehen (direkte Emissionen, keine Vorketten). Die Emissionen, die durch die Nutzung von Strom (z.B. in Wärmepumpen) oder Fernwärme (an Fernwärmeanschlüssen) entstehen, werden in der Bilanzierung des KSG dem Energiewirtschaftssektor und nicht dem Gebäudesektor zugerechnet. Die Emissionen biogener Kraftstoffe werden nur nachrichtlich berichtet und werden dementsprechend in der Bilanz und in dem Abgleich der Einhaltung der Sektorenziele nicht mit aufgeführt.

Im Rahmen der Bepreisung von CO₂ gemäß Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) werden Standardemissionsfaktoren zu Grunde gelegt, die in der Emissionsberichterstattungsverordnung (EbEV2022) definiert sind. Der Emissionsfaktor biogener Brennstoffe

¹ Abweichend von der GEG-Methodik wurden hier eigene Quoten für den Eigenverbrauch und die Solarerzeugung, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, ermittelt und angesetzt.

² Parameter zur Angabe, wieviel Kohlendioxid je Energiemenge eines Brennstoffs bei der vollständigen Umsetzung mit Sauerstoff emittiert werden kann (siehe Nationaler Inventarbericht und den darin enthaltenen Daten für 2018)

wird bei Erfüllung der Nachhaltigkeitsanforderungen gemäß Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung oder der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung mit Null angenommen. Vorketten werden im Rahmen des BEHG nicht berücksichtigt. Die Emissionen beziehen sich allein auf die CO₂-Emissionen (keine THG-Äquivalente). Im Gebäudesektor fällt der CO₂-Preis für die Verbrennung fossiler Energieträger an, während die Be-
preisung von CO₂ bei der Strombereitstellung dem europäischen Emissionshandelssystem (ETS) unterliegt. In Deutschland werden 82 % der Fernwärme gekoppelt bereitgestellt (Wärme als Beiprodukt der Strombereitstellung). Es wird angenommen, dass die Emissionen der Fernwärme vollständig dem Emissionshandel unterliegen und somit keine Kosten durch den CO₂-Preis im Rahmen des BEHG anfallen.

Methode und Praxisbeispiele
des Heizkostenvergleichs

Tabelle 1: Übersicht über die Verwendung von Treibhausgasfaktoren im Klimaschutzgesetz (KSG), dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) sowie dem Gebäudeenergiegesetz (GEG)

	Strom/ Fernwärme	Biogene Brennstoffe	Vorket- ten	THG- Äquiva- lente
KSG (Treibhausgasminderungsziel Gebäudesektor)	Bilanzierung im Sektor Energiewirtschaft	Nur nachrichtlich berichtet	Nein	Ja
BEHG (CO₂-Preis)	Über ETS	Null (Bio-energieanteil)	Nein	Nur CO ₂
GEG (Energieausweise)	Ja	Ja	Ja	Ja

Im GEG ist geregelt, welche Emissionsfaktoren für die Ausweisung der Treibhausgasemissionen im Gebäudebetrieb angesetzt werden. Im Gegensatz zum KSG und dem BEHG werden hier die Vorketten berücksichtigt, sodass die Emissionsfaktoren über denen des KSG und BEHG liegen. Für den Vergleich der Treibhausgasemissionen zwischen den Technologien wird in dieser Analyse der Ansatz gemäß GEG angewandt, sodass alle Emissionen inklusive Vorketten aufgeführt werden.

Der CO₂-Preis wird im Rahmen dieser Studie explizit für Gaskessel genutzt. Hierfür wird der in der EbEV ausgewiesene Faktor von 0,056 t CO₂/GJ (201,6 t CO₂/kWh) über die Lebensdauer konstant angenommen. Für die Berechnung der Emissionen wird der Ansatz laut GEG angewandt, in dem die Vorketten berücksichtigt werden. Beimischungen von Biogas, synthetischen Energieträgern (Wasserstoff (H₂) oder Methan (CH₄)) in das Erdgasnetz werden im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet. Eine Analyse der Verwendung von Heiztechnologien mit Wasserstoff wird in Kapitel 5 diskutiert.

Für die Betrachtung der THG-Emissionen durch Wärmepumpen (Strombezug) werden als Ausgangswert für das Jahr 2020 die Stromemissionen von 470 g CO₂-äq/kWh¹ inklusive Vorketten aus der Statistik des Umweltbundesamtes für das Jahr 2019 angenommen. Dieser Wert liegt bereits deutlich niedriger als der des GEG für den durchschnittlichen Strommix (560 g CO₂-äq/kWh). Somit kann der GEG-Wert als konservative Annahme interpretiert werden. Für die zukünftige Entwicklung wird das Zielszenario der Studie „Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Steinbach et al. 2021) zugrunde gelegt, in dem angenommen wird, dass bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität des Energiesystems (Industrie, Gebäude, Verkehr und Energiewirtschaft) erreicht wird (und im Jahr 2030 eine Reduktion der THG-Emissionen um 65 % gegenüber 1990 stattfindet).

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7>

Im Rahmen der Szenarienrechnungen werden nur die CO₂-Emissionen bestimmt, so- dass in einem vereinfachten Ansatz der heutige prozentuale Anteil der Emissionen der Vorketten an den Treibhausgasemissionen auf den zukünftigen Strommix übertragen wird. Der CO₂-Preis des ETS für Strom und Fernwärme ist außerdem im Strompreis bzw. Fernwärmepreis sowie deren Prognosen implizit berücksichtigt. Für die Bewertung der Kraftwärmekopplung wird abweichend vom geltenden GEG für 2020 die Carnot- Methode zur Allokation der CO₂-Emissionen auf die Koppelprodukte Wärme und Strom angewandt, für die Jahre nach 2020 aus den Szenarien abgeleitet.

Methode und Praxisbeispiele
des Heizkostenvergleichs

Grundsätzlich ist dabei zu beachten, dass das Zielszenario, was hier als Referenz zu Grunde liegt, einen normativen Ansatz verfolgt, in dem die Klimaschutzziele gemäß der bis der bis zum Juni 2021 gültigen Version des KSG bis zum Jahr 2050 erreicht wer- den. Dieser Ansatz grenzt sich deutlich von Trendszenarien ab, wie zum Beispiel dem Klimaschuttszenario (NECP) oder den Politiksznarien, die einen simulativen Ansatz ver- folgen und die Wirkung aktueller oder zukünftiger Maßnahmen quantifizieren. An die- ser Stelle ist grundsätzlich anzumerken, dass es bisher keine Richtlinie für die Annahme zukünftiger Emissionsfaktoren gibt, deren es jedoch für einen transparenten und fairen Technologievergleich bedarf. Zusammenfassend kann die Annahme der zukünftigen Emissionsfaktoren für den Strommix sowie Nah- und Fernwärme im Vergleich zu Trendszenarien als optimistisch eingestuft werden, jedoch im Sinne der Erfüllung der Klimaschutzziele als im notwendigen Bereich der Zielerfüllung. Das bedeutet, dass die Werte in Tabelle 2 in den Jahren 2030 und 2040 auf einer Dekarbonisierung des Strommix (inklusive eines fast abgeschlossenen Kohleausstiegs im Jahr 2030) und der Fernwärme (durch Nutzung von Erneuerbaren Energien, Abwärme und Wärmepum- pen) basieren.

Tabelle 2: Angenommene Treibhausgasemissionsfaktoren für die Berechnung des CO₂-Preises so- wie den verursachten THG-Emissionen

Energieträger	Einheit	Verursachte Emissionen		
		2020	2030	2040
Erdgas	CO ₂ /kWh _{th}	201,6 (H _i); 182 (H _s)	201,6 (H _i); 182 (H _s)	201,6 (H _i); 182 (H _s)
Erdgas (inkl. Vorketten)	CO ₂ -äq/kWh _{th}	240 (H _i) (GEG)	240 (H _i)	240 (H _i)
Strommix (Klimaneutralität 2050)	CO ₂ -äq/kWh _{el}	470 ¹	141	13
Nah/ Fernwärme	CO ₂ -äq/kWh _{th}	180 ²	172	56

3.3

Aktuelle Förderbedingungen

Es existiert eine Reihe an Förderprogrammen, mittels derer energetische Sanierungen und Modernisierungen von Heizungssystemen sowie Anlagen im Neubau staatlich be- zuschusst werden. Mit dem Klimapaket der Bundesregierung wurde die Förderung für

¹ Annahme ist, dass die Werte von 2019 den Werten von 2020 entsprechen. Quelle der Werte 2019: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7>

² Entspricht in Anlehnung an Mailach und Oschatz (2021a) dem THG-Emissionswert für Nah-/Fernwärme aus mit Gas bzw. flüssigen Brennstoffen befeuerten KWK, mit einem Deckungsanteil der KWK an der Wärme- erzeugung von mindestens 70 Prozent.

effiziente, erneuerbare Heiztechniken erweitert und ist nun prozentual von der Höhe der förderfähigen Kosten abhängig. Wohnungseigentümer können Kosten entweder steuerlich absetzen oder eine Förderung (durch direkten Investitionszuschuss oder zinsverbilligten Förderkredit mit Tilgungszuschuss) in Anspruch nehmen.

Als förderfähig werden alle Kosten zur Installation der Anlage bezeichnet (Anschaffungskosten der Heiztechnik, Montage, Entsorgung der alten Heizsysteme, Erschließungskosten wie bspw. Sonden-Bohrungen für die Errichtung von Wärmepumpenanlagen inkl. verschuldensunabhängiger Versicherung, etc.). Im Falle einer Installation einer Gas-Hybridheizung fallen dementsprechend auch die Kosten für den Hausanschluss an das Gasnetz sowie Kosten für Abbau und Entsorgung eines Ölkessels unter förderfähige Maßnahmen. Darüber hinaus können Kosten für Beratungs-, Planungs- und Baubegleitungsmaßnahmen angerechnet werden (BAFA 2020).

Altbau

Das ehemalige Förderprogramm „Heizen mit Erneuerbaren Energien“ ist Ende des Jahres 2020 ausgelaufen – eine Förderung Erneuerbarer Heiztechniken findet nun über die Bundesförderung für effiziente Gebäude als Einzelmaßnahme (BEG EM) im Altbau statt (BAFA 2021a). Das förderfähige Mindestinvestitionsvolumen bei Anlagen zur Wärmeerzeugung beträgt dabei 2000 € (brutto), der Höchstbetrag der förderfähigen Kosten 60.000 € pro Wohneinheit und Kalenderjahr (BMWi 2021c).

Tabelle 3: Übersicht aktuelle BEG-Fördersätze für Einzelmaßnahmen (Stand August 2021)

Heizungsanlage	Fördersatz Altbau (mit Austausch Ölheizung)
Gas-Hybridheizung ¹⁾	30 % (40 %)
Solarthermieanlage	30 % (30 %)
Wärmepumpenanlage	35 % (45 %)
Biomasseanlage ²⁾	35 % (45 %)
Erneuerbare-Energien-Hybridheizung ^{2), 3)}	35 % (45 %)
Gas-Brennwertheizungen „Renewable Ready“ ⁴⁾	20 %
Anschluss an ein Gebäude-/ Wärmenetz mit mind. 25 % EE	30 % (40 %)
Anschluss an ein Gebäude-/ Wärmenetz mit mind. 55 % EE	35 % (45 %)

Anmerkungen. ¹⁾Kombination Gas-Brennwertkessel mit EE-Komponenten (Wärmepumpe, Biomasse, Solarthermie); ²⁾zusätzlich 5 % Förderbonus möglich bei Einhaltung des Emissionsgrenzwertes für Feinstaub von max. 2,5 mg/m³; ³⁾Kombination aus Solarthermie, Biomasseanlage und/ oder Wärmepumpe; ⁴⁾Einbindung von EE muss innerhalb von 2 Jahren erfolgen (Umwandlung in Gas-Hybrid); Quellen: (BAFA 2021b; BMWi 2020b)

In diesem Vergleich der Kostenstruktur verschiedener Heiztechnologie-Optionen im Altbau werden folgende Fördermöglichkeiten berücksichtigt: Gas-Hybridheizung (Gas-Brennwertkessel + solare Wärmeerzeugung) und Wärmepumpenanlagen (Luft-Wasser-WP, Sole-Wasser-WP, Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage + PV-Anlage, Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage + PV-Anlage + eSpeicher).

Dabei wird jeweils nur die Option ohne den Austausch einer bestehenden Ölheizung verwendet. In allen Fällen wird jedoch die Förderung für den Posten „Heizflächen/geringinvestive Maßnahmen“ in Höhe von 20 % der Kosten als Teil der förderfähigen Heizungsoptimierung berücksichtigt. Im Einklang mit dem Heizkostenvergleich des

BDEW wird unterstellt, dass Nah- und Fernwärmenetze derzeit zu geringe EE-Quoten für eine Förderung aufweisen und deshalb keinen zusätzlichen Zuschuss erhalten.

Methode und Praxisbeispiele
des Heizkostenvergleichs

Neubau

Im Bereich Neubau erhalten Gebäude, die den Mindestanforderungen des GEG entsprechen keine Förderung. Neubauten, die Effizienzhaus 55 Niveau erreichen, können einen (Tilgungs-) Zuschuss in Höhe von 15 % von maximal 150.000 € förderfähigen Kosten je Wohneinheit erhalten (BEG WG - Neubau). Dies entspricht bis zu 18.000 € je Wohneinheit (KfW 2021). Gebäude, die die Effizienzhaus 55 Erneuerbare-Energien-Klasse (oder Nachhaltigkeits-Klasse) erreichen, erhalten 2,5 % zusätzliche Förderung bei förderfähigen Kosten von maximal 150.000 €. Dies entspricht bis zu 26.250 € pro Wohneinheit, also einer Erhöhung um 8.250 € pro Wohneinheit gegenüber der Grundförderung des Effizienzhauses 55 (KfW, 2021). Die Erneuerbare-Energien-Klasse kann erreicht werden, indem mindestens 55 % des Gebäudeenergiebedarfs durch erneuerbare Energien im Wärmeversorgungssystem gedeckt werden.

In den hier getätigten Berechnungen, die auf denen des BDEW Heizkostenvergleichs basieren, wird die Grundförderung für effiziente Wohnneubauten („BEG WG“) nicht berücksichtigt, da sie unabhängig von den betrachteten Heiztechnologien erfolgt bzw. für alle Optionen bezogen werden kann. Nur die zusätzliche Förderung, die durch Erreichen der „Erneuerbaren-Energien-Klasse“ gewährt wird, ist bei den entsprechenden Technologien berücksichtigt. Da bei Inanspruchnahme der Effizienzhausförderung (für die EE-Klasse) die Überschusseinspeisung von nicht selbst verbrauchtem PV-Strom nicht nach EEG vergütet wird, erfolgt in den Daten des BDEW eine Einspeisevergütung lediglich beim baulichen Mindestwärmeschutz sowie im Bereich Altbau und Fördermaßnahmen nach der BEG - EM.

3.4

Nutzung von Eigenstrom aus Photovoltaikanlagen

Die hier im Bericht angenommen Eigenverbrauchsquoten für die unterschiedlichen Anwendungsfälle sind in Tabelle 4 dargestellt. Für den Stromverbrauch für elektrische Verbraucher im Einfamilienhaus wird angenommen, dass dieses durchschnittlich von drei Personen bewohnt ist. Der Stromverbrauch für die Heiztechnologien ist aus dem BDEW-Heizkostenvergleich übernommen. Im Fall des Mehrfamilienhauses ist der Strombedarf für die Zirkulationspumpe im Stromverbrauch für die Heizwärme enthalten. Daher wird für die elektrischen Verbraucher der durchschnittliche Verbrauch eines drei-Personen-Haushaltes im Mehrfamilienhaus angenommen (2500 kWh/Jahr) (Wagener und Weißbach 2021).

Die installierte Photovoltaikleistung wird ebenfalls aus dem BDEW-Heizkostenvergleich übernommen. Für das Einfamilienhaus sind dies 7,3 kW_p, für das Mehrfamilienhaus 18 kW_p. Für die Fälle mit Batterie wird angenommen, dass die Batteriekapazität in kWh der PV-Anlagenleistung in kW_p entspricht. Die Eigenverbrauchsquoten für Haushaltsstrom und Wärmetechnologien werden anhand von Weniger et al. (2014) abgeschätzt. Für Mehrfamilienhäuser wird angenommen, dass Photovoltaikstrom nur für Allgemeinstrom, also Heizstrom genutzt wird. Für die Photovoltaikeinstrahlung wurde mit 940 kWh/kW_p ein deutschlandweit durchschnittlicher Wert angenommen, der sich aus den Zahlen der Bruttostromerzeugung und installierten Kapazität gem. BMWi (2021a) ergibt.

Tabelle 4: Stromverbrauch, PV- und Batterieleistung sowie Eigenverbrauchsquoten für die Anwendungsfälle mit Photovoltaikanlage

Gebäudetyp	Altbau			Neubau					
	EFH	EFH	MFH	EFH	EFH	EFH	EFH	EFH	MFH
Anwendungsfall	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + eSpeicher	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE ¹ + Abluftanlage	Sole-Wasser-WP + PV-Anlage + eSpeicher + Abluftanlage	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + Abluftanlage	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE + Abluftanlage	RLT-Kompaktgerät + PV-Anlage + Zu-/Abluftanlage mit WRG	Sole-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE + Abluftanlage
Stromverbrauch elektrische Verbraucher (kWh)	2500	2500	0	2500	2500	2500	2500	2500	0
Stromverbrauch Heizung (kWh)	10754	10754	23843	6618	4945	5194	5438	4098	14264
Stromverbrauch gesamt (kWh)	13254	13254	23843	9118	7445	7694	7938	6598	14264
Installierte Leistung PV (kW _p)	7,3	7,3	18	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	18
Installierte Kapazität Batteriespeicher (kWh)	0	7.3	0	0	7.3	0	0	0	0
Eigenverbrauch Haushaltsstrom (%)	6	10	0	5	12	4	5	9	0
Eigenverbrauch WP (%)	40	68	36	28	48	26	27	19	25
Eigenverbrauch gesamt (%)	46	78	36	33	60	30	32	28	25

Direkt verbrauchter PV-Strom ersetzt die Kosten für den Strombezug von Haushalts- oder Wärmepumpenstrom. Bei der Berechnung wird hier analog zum BDEW-Verfahren vorgegangen. Ersetzter Haushaltsstrom wird als Einsparung mit dem Haushaltsstrompreis berechnet, wohingegen der Wärmepumpentarif für Direktverbrauch für den Betrieb der Wärmepumpen bzw. Zirkulationspumpe genutzt wird. Die Annahmen für die Höhe des Haushaltsstrompreis und des Wärmepumpentarifs können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Die Einspeisevergütung für Photovoltaikanlagen beträgt für Anlagen bis 10 kW_p 7,47 ct/kWh, für Anlagen bis 40 kW_p 7,25 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2021). Da die Strommengen anteilig vergütet werden ergibt sich für eine Anlage mit 18 kW_p Leistung eine Einspeisevergütung von 7,37 ct/kWh.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Eigenstromverbräuche werden im folgenden Kapitel dargestellt.

¹ E-DLE=Elektro-Durchlauferhitzer

4

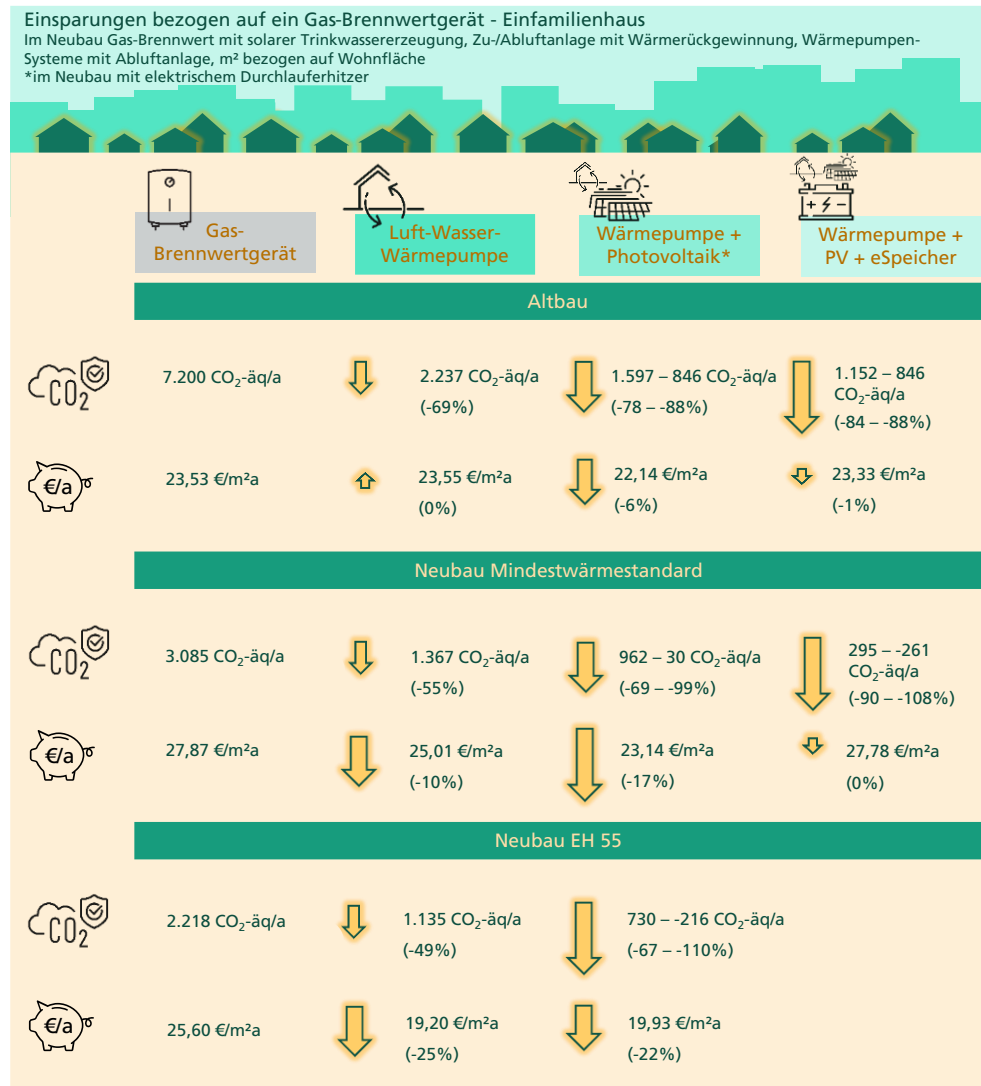
Kosten und Emissionen von Heiztechnologien im Vergleich

Kosten und Emissionen von
Heiztechnologien im Vergleich

4.1

Zentrale Ergebnisse

Die vorliegende Studie kommt zu dem Schluss, dass bei Berücksichtigung der aktuellen Förderung und bei einem unterstellten langfristigen Anstieg der CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe die Vollkosten der Wärmeversorgung in kleinen Gebäuden für alle verglichenen Systeme beim Einsatz von elektrischen Luft-Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit PV günstiger sind als Systeme mit Gas-Brennwertgeräten. In unsanierten Mehrfamilienhäusern werden durch die aktuelle Förderung vergleichbare Kosten mit Gas-Brennwertgeräten für alle betrachteten Wärmepumpensysteme mit PV erreicht. Dasselbe gilt für elektrische Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne PV-Nutzung im unsanierten Einfamilienhaus. Nicht nur die Kosten, sondern auch die Treibhausgasbilanz der betrachteten Wärmepumpensysteme kann durch die zusätzliche Installation einer PV-Anlage deutlich verbessert werden.



Kosten und Emissionen von Heiztechnologien im Vergleich

Abbildung 2: Grafik zur Darstellung der Kosten- und THG-Einsparungen der verglichenen gas- und strombasierten Heizsysteme

4.2

Fallbeispiel Altbau

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Heizkostenvergleichs für das Fallbeispiel des Altbaus dargestellt. Für EFH und MFH wurden (teils) unterschiedliche Heizsysteme betrachtet. Für eine Investition in eine neue Heiztechnologie in einem Altbau-EFH werden folgende sieben Systeme betrachtet:

- Gas Brennwertgerät (Gas-BW-Gerät)
- Gas Brennwertgerät mit solarer Heizungsunterstützung und Trinkwassererwärmung (Gas-BW-Gerät / solare HeizU + solare TWE)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe (Luft-Wasser-WP)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaik-Anlage (Luft-Wasser-WP + PV-Anlage)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaik-Anlage und Stromspeicher (Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + eSpeicher)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe, (Sole-Wasser-WP)

- Anschluss an ein Nah-/Fernwärmenetz (Nah-/Fernwärme)

Eine Beschreibung der Gebäude findet sich im Anhang der BDEW-Heizkostenvergleiche 2021 (Mailach und Oschatz 2021a, 2021b). Die dort angenommenen und hier verwendeten Wohnflächen für quadratmeterbezogenen Angaben sind 150 m² für das Einfamilienhaus und 500 m² für das Mehrfamilienhaus. Alle Daten zu den verschiedenen Heizsystemen, deren Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren sowie Kosten für Installation und Betrieb finden sich in Kapitel 3 und im Anhang dieser Studie.

Im Folgenden werden die Begriffe verbrauchsgebundene und bedarfsgebundene Kosten synonym verwendet und bezeichnen Ausgaben für Brennstoff, Strom bzw. Fernwärme. Betriebsgebundene Kosten fallen für Wartung und Instandhaltung an. Kapitalgebundene Kosten bezeichnen die Ausgaben für die initiale Investitionen (also Planung, Kauf und Installation) und deren Finanzierung.

Unter Annuität werden die durchschnittlichen jährlichen Ausgaben, zusammengesetzt aus den verschiedenen Kostenarten verstanden.

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils in einer Balkendarstellung die Annuitäten über 20 Jahre für die beschriebenen Heizsysteme (Skala in € auf linker y-Achse). Die Balken setzen sich aus verbrauchs-, kapital- und betriebsgebundene Kosten sowie die Kosten der CO₂-Bepreisung zusammen. Die Förderung ist separat durch eine schraffierte Fläche ausgewiesen. Hierdurch wird deutlich, wie die Förderung die jährlichen Annuitäten senkt. Für jede Heiztechnologie sind außerdem mittels punktueller Darstellung die jährlichen THG-Emissionen als Vor-Ort-Wert und unter Anrechnung von eingespeisten PV-Strommengen bezogen auf die rechte y-Achse angegeben (Zur Erläuterung der verschiedenen Bilanzierungsansätze siehe Kapitel 3.1 »Bilanzierung PV-Einspeisung bei THG-Faktoren«). Die Variante der hundertprozentigen Anrechnung des PV-Stroms ist deshalb mit aufgezeigt, da auch die Investitionen der PV-Anlage in voller Höhe bilanziert werden. So kann nicht nur die Klimawirksamkeit des Teils des Stroms, der für Wärme aufgewendet wird, berücksichtigt werden, sondern der gesamte erzeugte Strom der PV-Anlage.

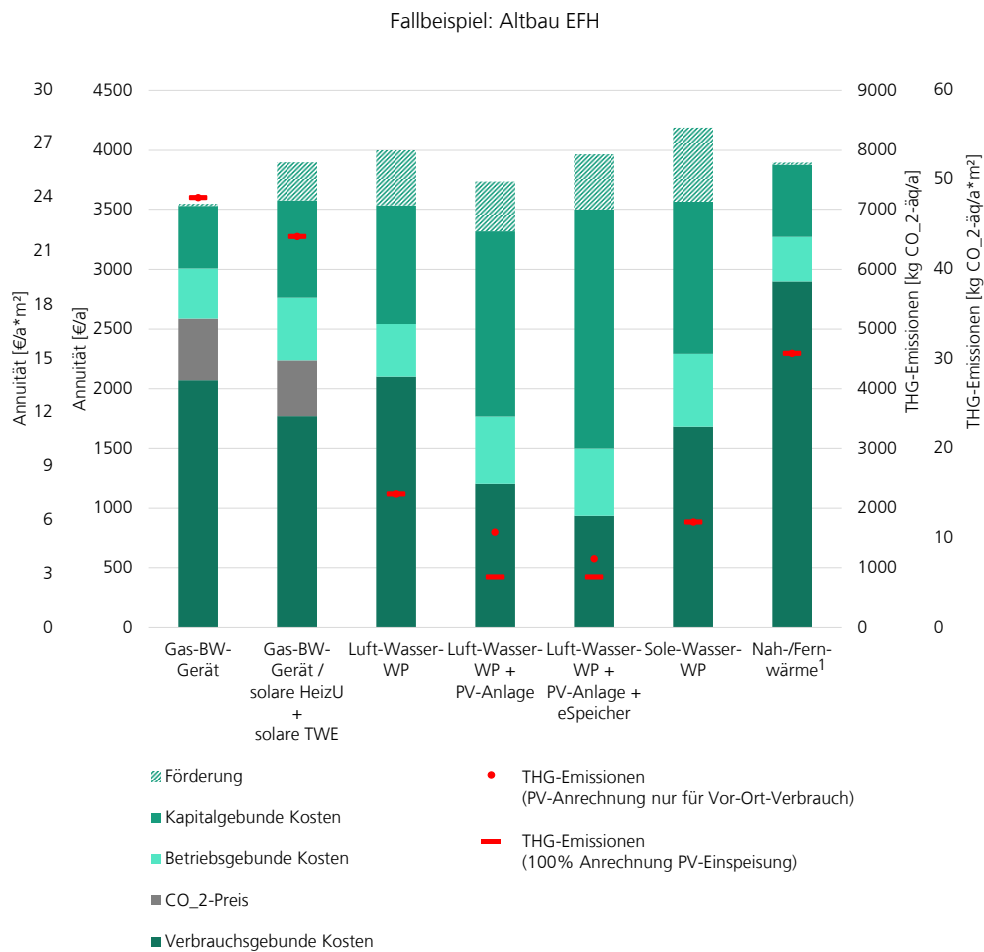


Abbildung 3: Heizkostenvergleich Altbau EFH¹

Das Referenzsystem mit Gas-Brennwertgerät weist abzüglich der Förderung eine Annuität von 3530 €/a auf und führt zu einer jährlichen Emission von Treibhausgasen von 7200 kg CO₂-äq. Der Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer angenommenen Jahresarbeitszahl von 2,8 (im Mittel für Raumwärme und Trinkwarmwasser) weist unter den hier betrachteten Voraussetzungen in Summe die gleichen jährlichen Kosten auf. Kombiniert man die Wärmepumpe mit einer PV-Anlage, verringert der weitaus geringere Stromverbrauch aus dem Netz die jährlichen Kosten um 209 € (6 %). Zudem sind die THG-Emissionen ohne PV-Anlage mit 2237 kg CO₂-äq um 69 % geringer, mit PV-Anlage sogar um 78 % bzw. um 88 % bei einer hundertprozentigen Anrechnung des PV-Stroms.

Ein System bestehend aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaik-Anlage und Stromspeicher weist um 30 € geringere Jahreskosten als das Referenzsystem auf bei einer Reduktion der Emissionen um 84 % (88 % bei einer hundertprozentigen Anrechnung des PV-Stroms).

¹ Hinweis zu Nah-/Fernwärme: Hier wurden die Annahmen von Mailach und Oschatz (2021a) hinsichtlich der Kosten und hinsichtlich der THG-Emissionen im Startjahr (siehe Kapitel 3.2) übernommen. Da Nah-/Fernwärme durch deutlich kleinere Netzinfrastrukturen als bei den anderen Technologien stärker lokal geprägt ist, können Emissionswerte und Kosten eine sehr große Bandbreite einnehmen und bei Einsatz entsprechender erneuerbarer Wärmequellen und Abwärme auch deutlich geringere Emissionen als dargestellt bewirken.

Wird das Gas-Brennwertgerät mit einer solaren Heizunterstützung und Trinkwassererwärmung kombiniert erhöhen sich die jährlichen Kosten um 46 € (1,3 %). Die THG-Emissionen sinken dabei um 9 %.

Der Einsatz einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer angenommenen Jahresarbeitszahl von 3,6 (im Mittel für Raumwärme und Trinkwarmwasser) ist mit jährlichen Kosten von 3564 € (incl. Förderung) nur knapp 1 % teurer als ein Gas-Brennwertgerät, bei um 71 % geringeren THG-Emissionen.

Ein Anschluss ans Wärmenetz ist rund 75 % teurer als ein Gas-Brennwertgerät. Bei letzterem wird jedoch auch keine Förderung unterstellt aufgrund eines gering angenommen erneuerbaren Anteils. Aus ökologischer Sicht ist jedoch auch dieses Heizsystem dem Gas-Brennwertgerät vorzuziehen, da ein Anschluss ans Wärmenetz um 36 % geringere THG-Emissionen aufweist.

Beim Mehrfamilienhaus stellt sich der ökologische Vergleich ähnlich dar, der ökonomische Vergleich führt jedoch zu anderen Ergebnissen.

Für eine Investition in ein neues Heizsystem in einem Altbau-MFH werden folgende sieben Systeme betrachtet:

- Gas Brennwertgerät (Gas-BW-Gerät)
- Gas Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung (Gas-BW-Gerät + solare TWE)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe (Luft-Wasser-WP)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaik-Anlage (Luft-Wasser-WP + PV-Anlage)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe (Sole-Wasser-WP)
- Luft-Wasser-Sorptions-Gas-Wärmepumpe (Luft-Wasser-Sorptions-Gas-WP)
- Anschluss an ein Nah-/Fernwärmenetz (Nah-/Fernwärme)

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für den Fall Altbau Mehrfamilienhaus. Im Fall des Systems mit PV-Anlage im MFH wurde angenommen, dass der Strom vor Ort nur in der Wärmepumpe eingesetzt wird und keine Nutzung in den Wohnungen, z.B. als Mieterstrom erfolgt, sodass die verbleibende Strommenge ins Netz eingespeist wird.

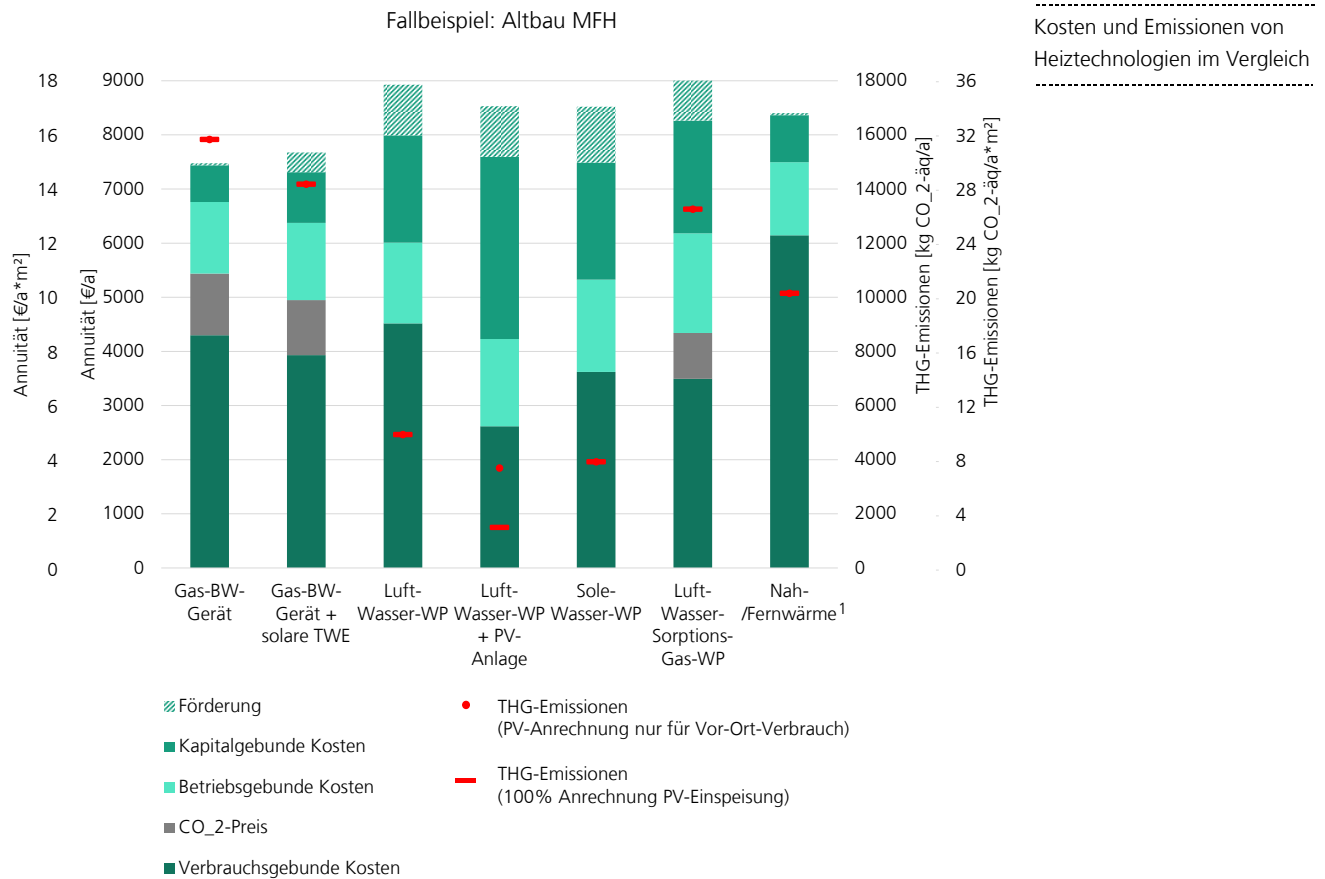


Abbildung 4: Heizkostenvergleich Altbau MFH¹

Eine Investition in das Referenzsystem Gas-Brennwertgerät weist abzüglich der Förderung eine Annuität von 7437 €/a auf und führt zu einer jährlichen Emission von Treibhausgasen von 15828 kg CO₂-äq/a. Dank der Förderung wird der Einsatz einer unterstützenden solaren Trinkwassererwärmung um 126 € pro Jahr günstiger, bei um 10 % geringeren THG-Emissionen.

Die anderen analysierten Heizsysteme weisen leicht höhere Kosten als das Gas-Brennwertgerät auf. Die strombasierten Anwendungen haben jedoch deutlich geringere THG-Emissionen als das Referenzsystem: Bei um lediglich 0,6 % höheren Kosten verursacht der Einsatz einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer JAZ von 3,8 um 75 % geringere Emissionen. Bezogen auf das Gas-Brennwertgerät stößt eine Luft-Wasser-Wärmepumpe 69 % weniger THG-Emissionen aus, in Kombination mit PV-Anlage sogar 77 %, bzw. 91 % bei hundertprozentiger Anrechnung des PV-Stroms. Der Einsatz einer Luft-Wasser-Sorptions-Gas-WP ist unter den verglichenen Alternativen die teuerste, mit einer Reduktion der THG-Emissionen von nur 16 %. Ein Anschluss ans Wärmenetz senkt die Emissionen analog zum EFH auf 36 %.

¹ Hinweis zu Nah-/Fernwärme: Hier wurden die Annahmen von Mailach und Oschatz (2021a) hinsichtlich der Kosten und hinsichtlich der THG-Emissionen im Startjahr (siehe Kapitel 3.2) übernommen. Da Nah-/Fernwärme durch deutlich kleinere Netzinfrastrukturen als bei den anderen Technologien stärker lokal geprägt ist, können Emissionswerte und Kosten eine sehr große Bandbreite einnehmen und bei Einsatz entsprechender erneuerbarer Wärmequellen und Abwärme auch deutlich geringere Emissionen als dargestellt bewirken.

4.3

Fallbeispiel Neubau

Bei Neubauten wird zwischen zwei Wärmeschutzniveaus unterschieden, dem Mindestwärmeschutz nach GEG und Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55 (EH 55). Zunächst werden die Ergebnisse für beide Wärmeschutzniveaus im EFH dargestellt. Für eine Investition in ein neues Heizsystem in einem Neubau-EFH mit Mindestwärmestandard werden folgende fünf Systeme betrachtet:

- Gas Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu-/Abluftanlage mit WRG)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Abluftanlage (Luft-Wasser-WP + Abluftanlage)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage, elektrischem Durchlauferhitzer und Abluftanlage (Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE + Abluftanlage)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage, Stromspeicher und Abluftanlage (Sole-Wasser-WP + PV-Anlage + eSpeicher + Abluftanlage)
- Anschluss an ein Nah-/Fernwärmenetz und Abluftanlage (Nah-/Fernwärme + Abluftanlage)

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse für den Neubau-EFH mit Mindestwärmeschutz nach GEG für die fünf verschiedenen Systeme.

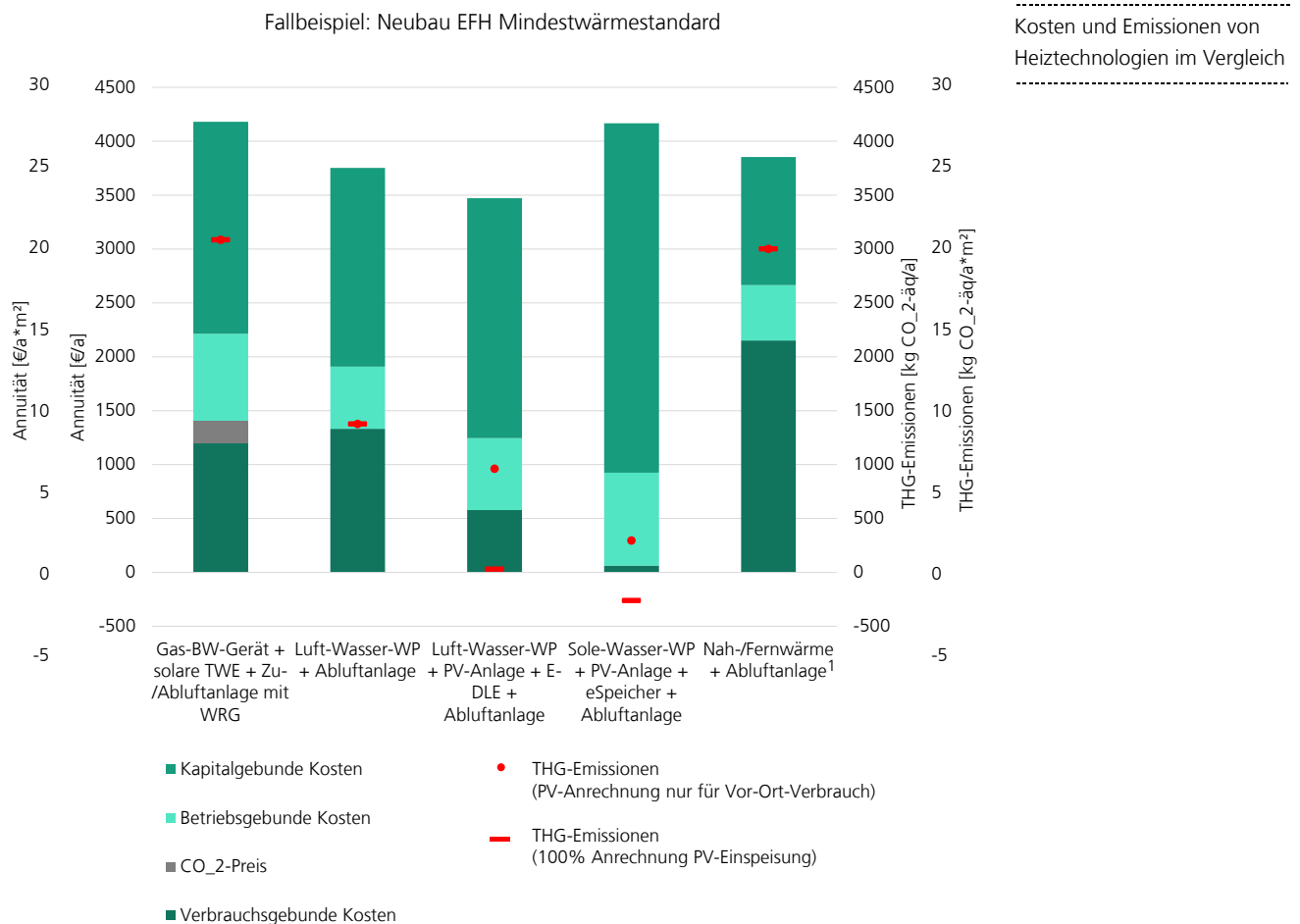


Abbildung 5: Heizkostenvergleich Neubau EFH Mindestwärmestandard¹

Beim Neubau eines EFH mit Mindestwärmestandard betragen die Investitionen in das Gas-Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung über 20 Jahre 4180 € pro Jahr². Für Heizsysteme gibt es beim Neubau mit Mindestwärmestandard keine finanzielle Förderung. Trotzdem sind unter den hier vorausgesetzten Bedingungen alle alternativ betrachteten Heizsystem günstiger als das Gas-Brennwertsystem. Ein Anschluss ans Wärmenetz bringt jährliche Einsparungen von 327 € (knapp 8 %) und 3 % weniger THG-Emissionen mit sich.

Eine Investition in eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (JAZ 3,1) mit Abluftanlage führt zu einer Reduktion der jährlichen Kosten um 428 € (10 %) und der THG-Emissionen um 55 %. Mit Photovoltaikanlage und elektrischem Durchlauferhitzer reduzieren sich die Kosten sogar um 709 € (17 %) und die THG-Emissionen um 69 %, bzw. 99 % bei hundertprozentiger Anrechnung des PV-Stroms.

¹ Hinweis zu Nah-/Fernwärme: Hier wurden die Annahmen von Mailach und Oschatz (2021b) hinsichtlich der Kosten und hinsichtlich der THG-Emissionen im Startjahr (siehe Kapitel 3.2) übernommen. Da Nah-/Fernwärme durch deutlich kleinere Netzinfrastrukturen als bei den anderen Technologien stärker lokal geprägt ist, können Emissionswerte und Kosten eine sehr große Bandbreite einnehmen und bei Einsatz entsprechender erneuerbarer Wärmequellen und Abwärme auch deutlich geringere Emissionen als dargestellt bewirken.

² Die höheren angenommenen Kosten im Neubau gegenüber dem Altbau kommen vor allem dadurch zustande, dass neben der Lüftungsanlage auch sämtliche Investitionen für die Installation der Wärmeübergabe und das Leitungssystem berücksichtigt werden, welches im Altbau entfällt oder deutlich geringere Kosten aufweist.

Fügt man der PV-Anlage einen Stromspeicher hinzu, ist das Heizsystem immer noch minimal günstiger als das Gas-Brennwertgerät (14 € pro Jahr), weist aber die geringsten THG-Emissionen aus: Im Vergleich zum Gas-Brennwertsystem sinken die Emissionen um 90 %, bzw. um 108 % bei hundertprozentiger Anrechnung des PV-Stroms. Das bedeutet, dass in der Jahresbilanz die gesamte zum Heizen benötigte Strommenge durch die PV-Anlage erzeugt wird. Es wird dennoch Strom aus dem Netz bezogen. Grund hierfür ist die zeitliche Versetzung des erzeugten PV-Stroms und des Strombedarfs zum Heizen.

Wird auch der ins Netz eingespeiste Strom angerechnet, ergibt sich eine positive THG-Bilanz für das Heizsystem. Das kann damit begründet werden, dass der CO₂-neutral erzeugte Strom aus der PV-Anlage im Netz die gleiche Menge konventionellen Strommix verdrängt.

Die nahezu identische Höhe der kapitalgebunden Kosten beim Gassystem (Gasbrennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung) und bei dem einfachen Luftwärmepumpensystem (Luftwärmepumpe und Abluftanlage) sind vor allem durch die Kosten der solaren Trinkwassererwärmung und der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zu erklären, die nur beim Gassystem eingesetzt werden müssen, um bei identischer Außenhülle die primärenergetischen Neubauanforderungen zu erreichen. Selbiges gilt auch bei der Betrachtung für das Fallbeispiel des Effizienzhaus-55-Standards.

Für eine Investition in ein neues Heizsystem in einem Neubau-EFH mit Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55 werden folgende sechs Systeme betrachtet:

- Gas Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu-/Abluftanlage mit WRG Luft-Wasser-WP + Abluftanlage)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage und Abluftanlage (Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + Abluftanlage)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage, elektrischem Durchlauferhitzer und Abluftanlage (Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE + Abluftanlage)
- Raumluftheiztechnisches Kompaktgerät mit Photovoltaikanlage und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (RLT-Kompaktgerät + PV-Anlage + Zu-/Abluftanlage mit WRG)
- Anschluss an ein Nah-/Fernwärmenetz und Abluftanlage (Nah-/Fernwärme + Abluftanlage)

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse für den Neubau-EFH mit Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55 für die fünf verschiedenen Systeme.

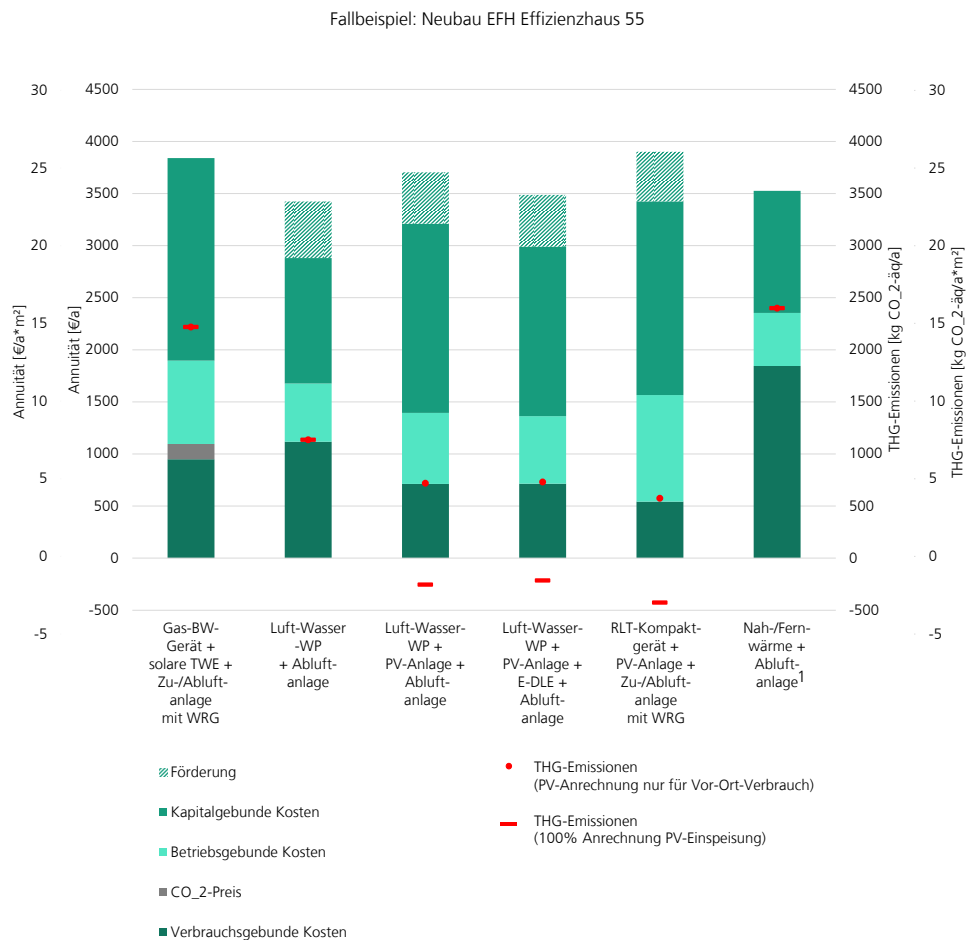


Abbildung 6: Heizkostenvergleich Neubau EFH EH 55¹. Anmerkung: Die hier verrechnete Förderung basiert auf den Förderkonditionen bei Erreichen der Erneuerbare-Energien-Klasse, welche über die Grundförderung des EH 55 Standards hinausgeht.

Beim Neubau eines EFH mit Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55 betragen die Investitionen in das Gas-Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung 3840 € pro Jahr über 20 Jahre hinweg. Vor allem aufgrund der geringen verbrauchsgebundenen Kosten sind bei einem Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55 auch ohne Förderung alle betrachteten Heizsysteme günstiger als das Gas-Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Am kostengünstigsten ist der Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Abluftanlage mit 2880 € pro Jahr (960 € bzw. über 25 % weniger als das Referenzsystem) und THG-Emissionen, die um 49 % geringer sind als beim Referenzsystem. Die geringsten THG-Emissionen erzeugt das raumluftechnische Kompaktgerät mit Photovoltaikanlage und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Hier sind die Emissionen um 74 % geringer als beim Gas-

¹ Hinweis zu Nah-/Fernwärme: Hier wurden die Annahmen von Mailach und Oschatz (2021b) hinsichtlich der Kosten und hinsichtlich der THG-Emissionen im Startjahr (siehe Kapitel 3.2) übernommen. Da Nah-/Fernwärme durch deutlich kleinere Netzinfrastrukturen als bei den anderen Technologien stärker lokal geprägt ist, können Emissionswerte und Kosten eine sehr große Bandbreite einnehmen und bei Einsatz entsprechender erneuerbarer Wärmequellen und Abwärme auch deutlich geringere Emissionen als dargestellt bewirken.

Brennwertgeräts mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit WRG, bzw. 119 % bei hundertprozentiger Anrechnung des PV-Stroms.

Kosten und Emissionen von
Heiztechnologien im Vergleich

Neubau Mehrfamilienhaus

Für eine Investition in ein neues Heizsystem in einem Neubau-MFH mit Mindestwärme-standard werden folgende drei Systeme betrachtet:

- Gas Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu-/Abluftanlage mit WRG)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage, elektrischem Durchlauferhitzer und Abluftanlage (Sole-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE + Abluftanlage)
- Anschluss an ein Nah-/Fernwärmenetz und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Nah-/Fernwärme + Zu-/Abluftanlage mit WRG)

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse für ein Neubau Mehrfamilienhaus mit Mindestwärme-standard nach GEG.

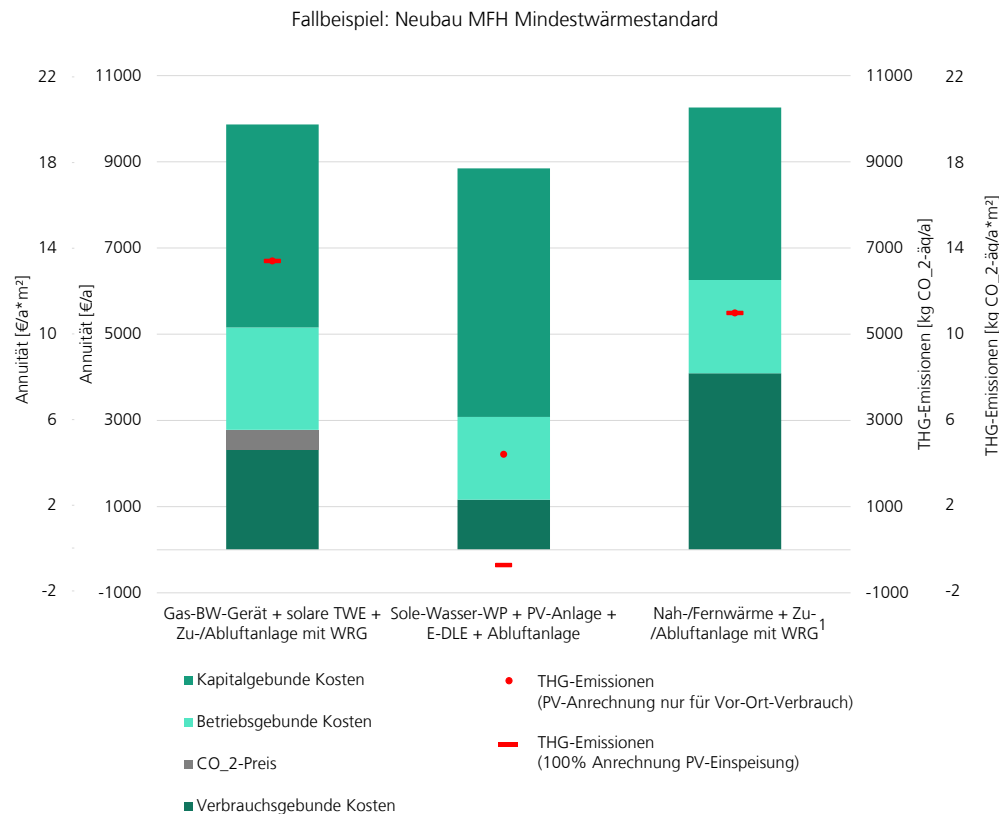


Abbildung 7: Heizkostenvergleich Neubau MFH Mindestwärmestandard¹

Beim Neubau eines MFH mit Mindestwärmestandard betragen die Investitionen in das Gas-Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit

¹ Hinweis zu Nah-/Fernwärme: Hier wurden die Annahmen von Mailach und Oschatz (2021b) hinsichtlich der Kosten und hinsichtlich der THG-Emissionen im Startjahr (siehe Kapitel 3.2) übernommen. Da Nah-/Fernwärme durch deutlich kleinere Netzinfrastrukturen als bei den anderen Technologien stärker lokal geprägt ist, können Emissionswerte und Kosten eine sehr große Bandbreite einnehmen und bei Einsatz entsprechender erneuerbarer Wärmequellen und Abwärme auch deutlich geringere Emissionen als dargestellt bewirken.

Wärmerückgewinnung über 20 Jahre 9867 € pro Jahr. Hier lassen sich mit dem Einsatz einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage, elektrischem Durchlauferhitzer und Abluftanlage 1020 € pro Jahr einsparen (gut 10 %). Zudem sind die THG-Emissionen um 67 % geringer (105 % bei hundertprozentiger Anrechnung des PV-Stroms). Beim Anschluss ans Wärmenetz und Einsatz einer und Zu-/Abluftanlage mit WRG steigen die Kosten um 393 € pro Jahr (knapp 4 %), die THG-Emissionen sinken jedoch um 18 %.

Kosten und Emissionen von
Heiztechnologien im Vergleich

Für eine Investition in ein neues Heizsystem in einem Neubau-MFH mit Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55 werden folgende drei Systeme betrachtet:

- Gas Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu-/Abluftanlage mit WRG)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Abluftanlage (Luft-Wasser-WP + Abluftanlage)
- Anschluss an ein Nah-/Fernwärmenetz und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Nah-/Fernwärme + Zu-/Abluftanlage mit WRG)

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse für ein Neubau Mehrfamilienhaus mit Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55.

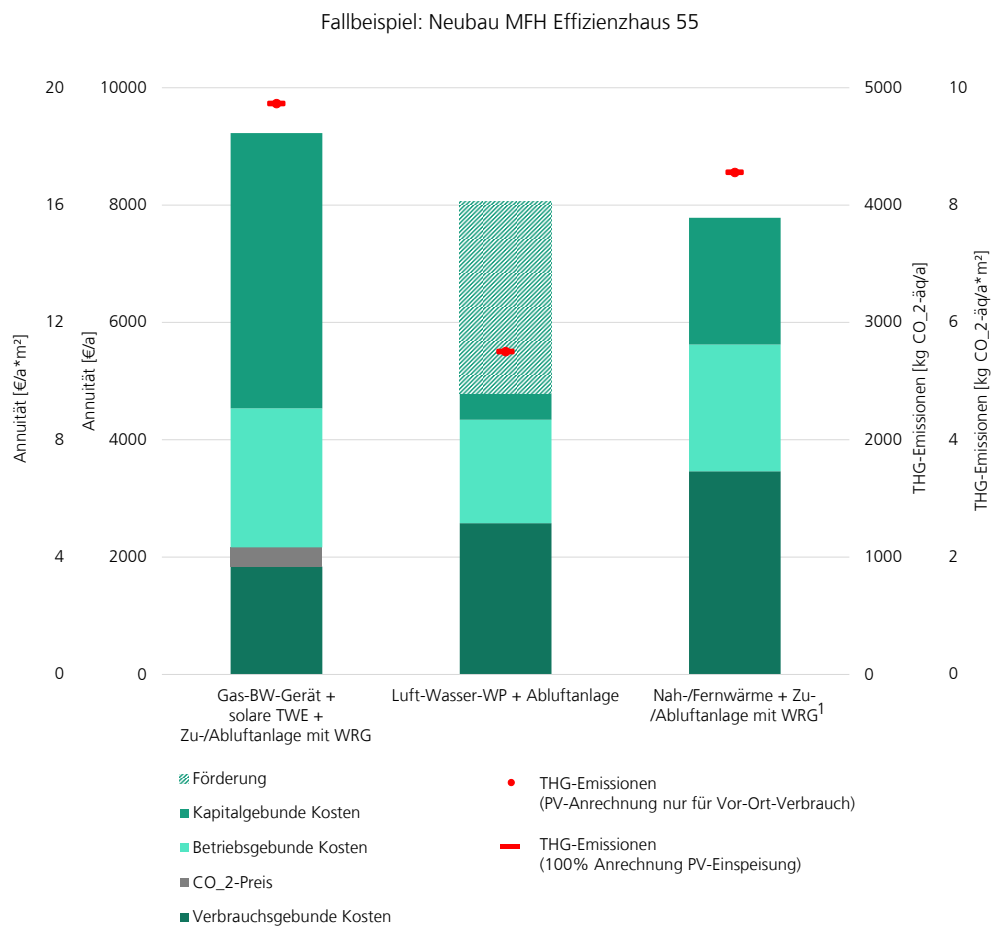


Abbildung 8: Heizkostenvergleich Neubau MFH EH 55¹

Beim Neubau eines MFH mit Wärmeschutz nach Effizienzhaus-Niveau 55 betragen die Investitionen in das Gas-Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung 9227 € pro Jahr über 20 Jahre hinweg. Der Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Abluftanlage beträgt dank der geringen kapitalgebundenen Kosten und der hohen Förderung mit 4797 € pro Jahr nur gut die Hälfte des Referenzsystems bei um 43 % niedrigeren THG-Emissionen. Auch beim Anschluss ans Wärmenetz und Einsatz einer und Zu-/Abluftanlage mit WRG sinken die Kosten im Vergleich zum Gas-Brennwertgeräts mit solarer Trinkwassererwärmung und Zu-/Abluftanlage mit WRG² um 1444 € pro Jahr (gut 15 %), die THG-Emissionen um 12 %.

¹ Hinweis zu Nah-/Fernwärme: Hier wurden die Annahmen von Mailach und Oschatz (2021b) hinsichtlich der Kosten und hinsichtlich der THG-Emissionen im Startjahr (siehe Kapitel 3.2) übernommen. Da Nah-/Fernwärme durch deutlich kleinere Netzinfrastrukturen als bei den anderen Technologien stärker lokal geprägt ist, können Emissionswerte und Kosten eine sehr große Bandbreite einnehmen und bei Einsatz entsprechender erneuerbarer Wärmequellen und Abwärme auch deutlich geringere Emissionen als dargestellt bewirken.

² Die Systemkombination wurde hier in Analogie zum BDEW Heizkostenvergleich Neubau aufgenommen. In Realität ist jedoch fraglich, ob im Neubaubereich Fernwärmenetze mit so hohen Primärenergiefaktoren auftreten, dass der Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage zur Erreichung des Effizienzhaus 55 Standards notwendig ist.

4.4

Die Rolle des CO₂-Preises

Im Altbau EFH hat der CO₂-Preis einen entscheidenden Einfluss auf die wirtschaftlichste Heizoption. Ohne einen CO₂-Preis ist die Gas-BW-Lösung die wirtschaftlich günstigste Heiztechnologie. Ab einem diskontierten CO₂-Preis von 51,78 €/t und unter Berücksichtigung der aktuellen Förderung, ist die „Luft-Wasser-WP + PV-Anlage“ Kombination die wirtschaftlich günstigste Lösung (3.321 €/a). Ab einem diskontierten CO₂-Preis von 87,42 €/t ist, wieder unter Berücksichtigung der aktuellen Förderung, eine Luft-Wasser-WP auch ohne PV-Anlage günstiger als eine reine Gas-BW-Lösung. Ein diskontierter CO₂-Preis von 87,42 €/t entspricht bspw. einem CO₂-Preis von 55 €/t in 2025, 110 €/t in 2030 und 222 €/t in 2040. Tabelle 3 vergleicht die Gas-BW Lösungen mit den verschiedenen Technologieoptionen und gibt an ab welchem diskontierten CO₂-Preis die jeweilige Heiztechnologie günstiger ist als die Gas-BW Lösungen.

Tabelle 5: Einfluss des CO₂-Preises auf die günstigste Lösung bei Altbau EFH

Heizsystem		CO ₂ -Preis (€/t) ab dem das Heizsys- tem (linke Seite) günsti- ger ist als ein Gas-BW-Ge- rät	CO ₂ -Preis (€/t) ab dem das Heizsys- tem (linke Seite) günstiger ist als ein Gas-BW-Gerät / solare HeizU + solare TWE
Gas-BW-Gerät / solare HeizU + solare TWE		171,31	-
Luft-Wasser-WP		87,42	78,84
Luft-Wasser-WP + PV-Anlage		51,78	39,55
Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + eSpeicher		81,80	72,64
Sole-Wasser-WP		92,76	84,73
Nah-/Fernwärme		145,54	143,08

... ist günstiger als... ab einem
diskontierten CO₂-Preis [€/t] von
:

Der zukünftige CO₂-Preis unterliegt aktuell noch hohen Unsicherheiten. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der CO₂-Preis zukünftig deutlich über 50 € pro Tonne CO₂ liegen wird. Unter diesen Voraussetzungen ist die Installation einer Luftwärmepumpe und einer PV-Anlage eine robuste Heizlösung im Altbau EFH.

Auch im Altbau MFH hat der CO₂-Preis einen entscheidenden Einfluss auf die jeweils kostengünstigste Heizungstechnologie. Wie schon beim Altbau EFH ist die „Gas-BW“ Lösung die günstigste Option, sofern kein CO₂-Preis angenommen wird. Ab einem diskontierten CO₂-Preis von 90,77 €/t CO₂ ist die „Sole-Wasser WP“ Lösung günstiger. Tabelle 4 gibt einen Überblick, ab wann die jeweiligen Technologien günstiger sind als die Gas-BW Optionen.

Tabelle 6: Einfluss des CO₂-Preises auf die günstigste Lösung bei Altbau MFH

Kosten und Emissionen von
Heiztechnologien im Vergleich

Heizsystem		CO ₂ -Preis (€/t) ab dem das Heizsys- tem (linke Seite) günsti- ger ist als ein Gas-BW-Ge- rät	CO ₂ -Preis (€/t) ab dem das Heizsys- tem (linke Seite) günstiger ist als ein Gas-BW-Gerät / solare HeizU + solare TWE
Gas-BW-Gerät + solare TWE	... ist günstiger als... ab einem diskontierten CO ₂ -Preis [€/t] von	ist auch ohne CO ₂ -Preis günstiger	-
Luft-Wasser-WP		129,15	145,06
Luft-Wasser-WP + PV-Anlage		98,99	111,25
Sole-Wasser-WP		90,77	102,04
Luft-Wasser-Sorptions-Gas-WP		330,56	569,42
Nah-/Fernwärme		157,49	176,81

Auch bei Altbau MFH sollte, unter Berücksichtigung der aktuellen Unsicherheiten bezüglich des zukünftigen CO₂-Preises, ein Wechsel auf Wärmepumpenlösungen in Betracht gezogen werden.

Im Gegensatz zum Altbaubereich hat der CO₂-Preis bei Neubauten weder bei EFH noch bei MFH einen Einfluss auf die kostenoptimale Technologievariante. Die kostengünstigste Lösung ist im Neubau maßgeblich von den kapitalgebundenen und verbrauchsgebundenen Kosten abhängig.

Der CO₂-Preis hat allerdings einen Einfluss auf die nach Kosten sortierte Technologiereihenfolge für Gebäude nach Mindestwärmestandard. Bei EFH ist ab einem diskontierten CO₂-Preis von 81,28 €/t CO₂ die „Luft-Wasser-WP + PV + eSpeicher“ Lösung günstiger als eine „Gas-BWK + solare TWE+WRG“ Lösung. Bei MFH ist ab einem diskontierten CO₂-Preis von 161,68 €/t CO₂ die Nah-/ Fernwärmeversorgung günstiger als die Gas-BW-Lösung. Tabelle 5 fasst den Einfluss des CO₂-Preises auf Neubauten zusammen.

Tabelle 7: Einfluss des CO₂-Preises bei Neubauten

Einfluss des CO ₂ - Preises auf...	Neubau			
	EFH		MFH	
	Mindest- wärme- standard	EH 55	Mindestwärme- standard	EH 55
... die kosten-güns- tigste Lösung	CO ₂ -Preis hat keinen Einfluss Günstigste Lö- sung ist immer die „Luft-Was- ser-WP + PV-An- lage + E-DLE + Abluftanlage“	CO ₂ -Preis hat keinen Einfluss Günstigste Lösung ist die „Luft- Wasser- WP + Ab- luftan- lage“	CO ₂ -Preis hat kei- nen Einfluss Günstigste Lösung ist die „Sole-Was- ser-WP + PV-An- lage + E-DLE + Ab- luftanlage“	CO ₂ -Preis hat keinen Einfluss Günstigste Lösung ist die Luft- Wasser-WP + Abluftan- lage
... die sortierte Technologie-reihen- folge nach Kosten	Ab einem dis- kontierten CO ₂ - Preis von 81,28 €/t ist „Luft- Wasser-WP + PV + eSpeicher“ Lö- sung günstiger als „Gas-BWK + solare TWE+WRG“	CO ₂ -Preis hat keinen Einfluss Die Rei- henfolge ist robust bei einer Variation des CO ₂ - Preises.	Ab einem diskon- tierten CO ₂ -Preis von 161,68 €/t ist die Nah-/ Fernwär- meversorgung günstiger als die „Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu-/ Abluftanlage mit WRG“	CO ₂ -Preis hat keinen Einfluss Die Reihen- folge ist ro- bust bei ei- ner Varia- tion des CO ₂ -Preises.

4.5 Förderung und CO₂-Vermeidung

In der Analyse der Fallbeispiele im Altbau konnte eine Wirtschaftlichkeit und eine Klimawirksamkeit bei Einfamilienhäusern für die Wärmepumpensysteme gezeigt werden. Grund hierfür ist teilweise die existierende Investitionsförderung für die CO₂-ärmeren Systeme gegenüber einem Gasbrennwertsystem. Bei einer Analyse der Fördereffizienz als Quotient der Förderung durch die CO₂-Einsparung werden Werte zwischen 50 und 100 €/t CO₂-äq erzielt. Das bedeutet, dass durch die Förderung CO₂-Vermeidungskosten von unter 100 €/t CO₂-äq erzielt werden können. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass zusätzlich auf Seiten des Gasbrennwertgeräts ein CO₂-Preis berücksichtigt wurde.

Bei Mehrfamilienhäusern wurden auch Kostennachteile für die Wärmepumpensysteme festgestellt. Allerdings bei geringen Mehrkosten und erheblichen CO₂-Einsparungen. Bildet man hier nun einen Quotienten aus CO₂-Einsparungen und Mehrkosten erhält man einen Wert von unter 50 €/t CO₂-äq. Dies bedeutet, dass hier Vermeidungskosten von unter 50 €/t CO₂-äq auftreten oder eine geringe weitere Förderung zu einer Wirtschaftlichkeit auch dieser Fälle führt.

Im Neubau entfällt diese Analyse, da die Wärmepumpensysteme grundsätzlich wirtschaftlicher sind bei geringeren CO₂-Emissionen als das Standardsysteme bestehend aus Gasbrennwert und Solarthermie.

In der jüngeren Vergangenheit wird dem Wasserstoff für die Transformation des Energiesystems zunehmend Bedeutung zugemessen. Für viele Einsatzbereiche, wie z.B. der Industrie und dem Schwerlastverkehr, wird die Notwendigkeit des Einsatzes von Wasserstoff bis 2050 unter anderem in der nationalen Wasserstoffstrategie deutlich (BMWi 2020a). Die Lage hinsichtlich der Rolle im Gebäudesektor ist jedoch weniger eindeutig aufgrund existierender technologischer Alternativen zur Wasserstoffnutzung wie z.B. durch den Einsatz von Wärmepumpen, grüner Fernwärme und ambitionierten Dämmmaßnahmen. Aus diesem Grund wurde die Wasserstoffnutzung in diesem Heizkostenvergleich als Beimischung ins bestehende Erdgasnetz oder als reines Wasserstoffnetz nicht betrachtet. Im Folgenden soll jedoch ein kurzer Exkurs auf mögliche perspektivische Kosten aus Gebäudeeigentümersicht für eine klimaneutrale Wärmeversorgung gegeben werden. Die Betrachtungen beruhen auf der Analyse „Die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor: Vergleich technischer Möglichkeiten und Kosten defossilisierter Optionen der Wärmeerzeugung“ von Meyer et al. (2021), wo sich eine detaillierte Beschreibung der Annahmen und Ergebnisse finden. Die folgenden fünf Versorgungsvarianten werden in der Analyse betrachtet:

- I. Versorgung durch eine elektrische Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Strom aus in Deutschland erzeugten erneuerbaren Energien
- II. Versorgung durch einen Wasserstoffbrennstoffkessel mit grünem Wasserstoff aus in Deutschland erzeugten erneuerbaren Energien
- III. Versorgung durch einen Wasserstoffbrennstoffkessel mit grünem Wasserstoff aus importiertem Wasserstoff aus der MENA-Region
- IV. Versorgung durch eine Brennstoffzelle mit grünem Wasserstoff aus in Deutschland erzeugten erneuerbaren Energien
- V. Versorgung durch eine Brennstoffzelle mit grünem Wasserstoff aus importiertem Wasserstoff aus der MENA-Region

Eine Wasserstoffbeimischung ins Erdgasnetz wird nicht betrachtet, da diese ohne signifikanten Netz- und Geräteumbau nur einen geringen Klimaschutzbeitrag (max. 7 %) gegenüber bestehenden Erdgaskesseln leisten kann und somit nicht klimaneutral ist. Ebenso werden Wasserstoffbrücken wie z.B. blauer Wasserstoff nicht betrachtet.

Weiterhin werden zwei verschiedene Anwendungsfälle betrachtet:

- Einsatz in einem Bestandsgebäude mit einem Nutzwärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser von 150 kWh/m²a (installierte Leistung: 15,8 kW_{th})¹
- Einsatz in einem Neubau mit einem Nutzwärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser von 60 kWh/m²a (installierte Leistung: 9,0 kW_{th})²

Bei dem Kostenvergleich, der nach VDI 2067 durchgeführt wurde, sind perspektivische Kosten für Investitionen, Betrieb (d.h. Wartung und Instandhaltung) und Verbrauch für das Jahr 2030 unterstellt. Bei den Investitionskosten sind Kostensenkungen, wo diese zu erwarten sind, wie z.B. bei der Brennstoffzelle und der Wärmepumpe, angenommen. Bei den Verbrauchskosten werden Annahmen zu den erwarteten Entwicklungen

¹ Zum Vergleich: Der Nutzwärmebedarf im Fallbeispiel Altbau EFH (Gas BW-Gerät) beträgt 132 kWh/m²a, bei einer installierten Leistung von 10 kW

² Zum Vergleich: Der Nutzwärmebedarf im Fallbeispiel Neubau EFH EH 55 (Luft-WP + Abluftanlage) beträgt 75 kWh/m²a, bei einer installierten Leistung von 8,7 kW

der Gestehungs-, Netz- und Transportkosten für die jeweilige Versorgungsoption unterstellt. Umlagen und Steuern sind in den folgenden Ergebnissen aufgrund ihrer starken regulatorischen Abhängigkeit nicht berücksichtigt. In Meyer et al. (2021) findet sich auch eine Darstellung von Ergebnissen unter der Annahme, dass Steuern und Umlagen in aktueller Höhe fortgeschrieben werden. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Annahmen (u.a. auch hinsichtlich der Fallbeispiele) sollen die folgenden Ergebnisse nicht als eine zu erwartende Fortschreibung/Prognose der aktuellen Versorgungskosten gesehen werden. Sie liefern aber einen Vergleich der Versorgungsoptionen untereinander.

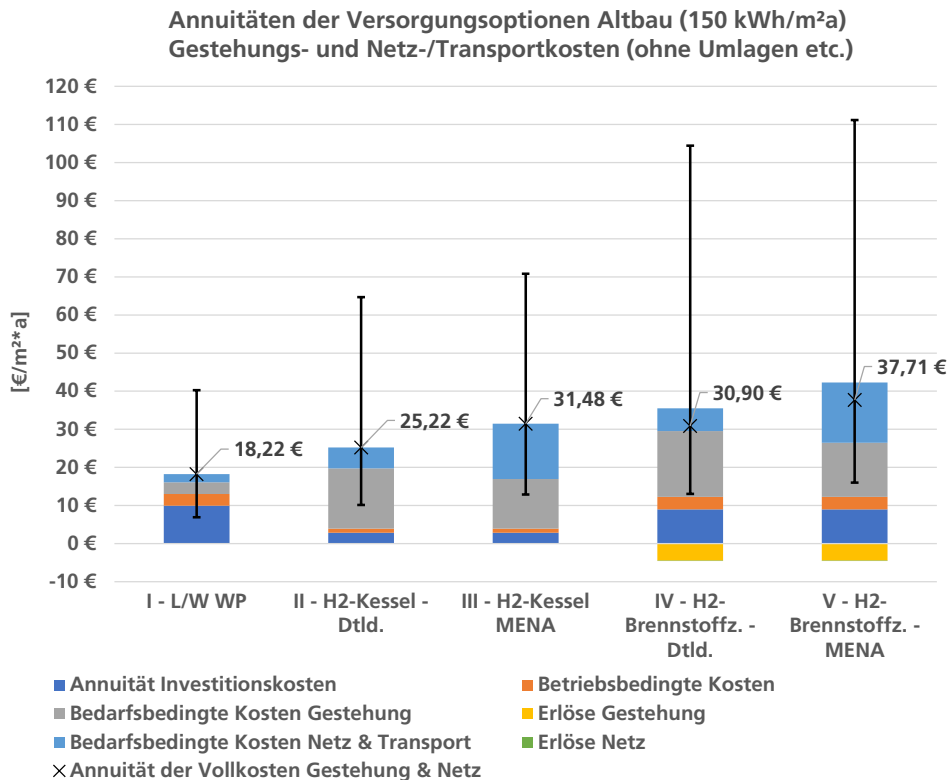


Abbildung 9: Vergleich der jährlichen Kosten unterschiedlicher Wärmerzeuger eines unsanierten Gebäudes (Wärmebedarf: 150 kWh/m²a), Bezugsjahr 2030. Steuern, Umlagen und Förderungen bleiben unberücksichtigt. (Quelle: Meyer et al. (2021))

Es zeigt sich in Abbildung 9, dass mit den angenommenen Kosten und Kennwerten der Systeme die Luft-Wasser-Wärmepumpe zu den geringsten jährlichen Kosten in Höhe von 18,22 €/m²a im Altbau führt. An zweiter Stelle folgt der mit in Deutschland produziertem Wasserstoff gefeuerte Wasserstoffkessel. Jedoch ist diese Versorgungsvariante bereits mehr als 35 % teurer als die Versorgung durch die Luft-Wasser-Wärmepumpe. Das nächstgünstigste System ist das System mit Versorgung durch die Brennstoffzelle mit in Deutschland produziertem Wasserstoff, welches jedoch bereits ca. 70 % teurer als das Luft-Wärmepumpensystem ist. Ähnliche Kosten weist der Wasserstoffkessel gespeist mit Wasserstoff aus der MENA-Region auf.

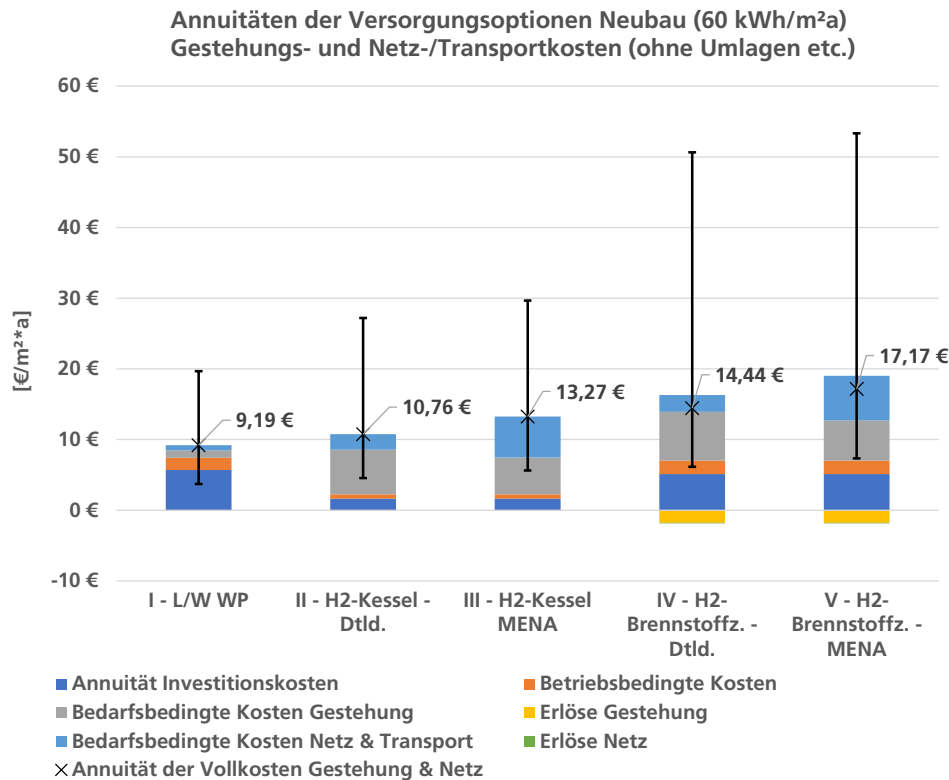


Abbildung 10: Vergleich der jährlichen Kosten unterschiedlicher Wärmerzeuger eines Neubaus bzw. sanierten Gebäudes (Wärmebedarf: 60 kWh/m²a), Bezugsjahr 2030. Steuern, Umlagen und Förderungen bleiben unberücksichtigt. (Quelle: Meyer et al. (2021))

Im Fallbeispiel des Neubaus in Abbildung 10 zeigt sich, dass die jährlichen Vollkosten etwa halb so hoch sind wie im unsanierten Altbau. Die Kosten für das Wasserstoffkesselsystem mit Nutzung von Wasserstoff aus Deutschland sind rund 15 % teurer als das Wärmepumpensystem. Grund für die geringeren Kostenunterschiede als im Altbau sind die deutlich geringeren bedarfsabhängigen Kosten infolge des geringeren Wärmebedarfs bei allen Versorgungsvarianten, die jedoch bei den weniger effizienten Systemen einen größeren Einfluss haben. Dem wirkt der - im Vergleich zum Altbau - effizientere Betrieb der Wärmepumpe entgegen.

Deutlich wird anhand der dargestellten Unsicherheiten der Wärmegestehungskosten¹ (durch die „Whisker“, d.h. die schwarzen vertikalen Striche), dass diese in allen Fällen sehr groß sind. Die Unsicherheiten im Fall der Wärmepumpe sind aufgrund ihrer hohen Effizienz und den damit verbundenen verhältnismäßig geringen bedarfsbedingten Kosten für Stromgestehung und Transport am geringsten. Auf der anderen Seite bestehen bei der Brennstoffzelle sehr große Unsicherheiten. Diese sind neben den hohen bedarfsabhängigen Kosten auch damit zu begründen, dass die Entwicklung der Investitionskosten bis 2030 und darüber hinaus mit großer Unsicherheit wegen den angenommenen Lernraten behaftet ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass aus Endnutzersicht langfristig die dezentrale Verbrennung von Wasserstoff in Gebäuden, wenn die Kosten für den Aufbau und Betrieb der Infrastruktur mitberücksichtigt werden, keine ökonomischen Vorteile gegenüber einer direkten Stromnutzung in Wärmepumpen haben. Dies gilt insbesondere im Altbau, wo im Diskurs oftmals der Vorteil der Wasserstoffnutzung aufgrund von bestehenden

¹ bedingt durch eine große Bandbreite der Annahmen zur Berechnung der Kosten

Gasanschlüssen und der vermeintlich schlechten Effizienz der Wärmepumpen betont wird. Annähernde Kostenparität der Versorgung kann nur im Neubau erreicht werden, wenn lokal in Deutschland erzeugter grüner Wasserstoff verwendet wird. Es ist aufgrund der hohen Nachfrage nach Wasserstoff in anderen Sektoren, in denen es weniger Alternativen zur Wasserstoffnutzung als im Gebäudebereich gibt, jedoch fragwürdig, ob der - aufgrund von EE-Ausbaubeschränkungen - knappe, national erzeugte Wasserstoff flächendeckend im Gebäudesektor eingesetzt werden kann.

In Niedrigenergiehäusern erscheint die Wasserstoffnutzung noch eher rentabel als im Altbau. Insbesondere im Neubau setzen sich jedoch bereits jetzt flächendeckend Wärmepumpen als meistverbaute Technologie durch. Weiterhin wurde auch nicht die Option der Kombination Wärmepumpe und Photovoltaik betrachtet, welche sich aufgrund ihres erzielbaren Eigenverbrauchs bereits heute teilweise als kostengünstigste Versorgungslösung darstellt (vgl. Kapitel 4), die aber stark von der aktuellen Regulatorik abhängt.

Energiesystemanalysen zeigen, dass der Wasserstoff jedoch eine wichtigere Rolle haben könnte für den Einsatz in KWK-Anlagen, die ihre Wärme in Fern- und Nahwärmenetze einspeisen (vgl. Meyer et al. (2021)). Außerdem kann bei der Wasserstoffproduktion in Deutschland die Abwärme aus der Elektrolyse in Wärmenetze eingespeist werden und so langfristig einen Beitrag zur Defossilisierung der Fernwärme leisten, vorausgesetzt die Elektrolyse erfolgt in hinreichender räumlicher Nähe zu den Verbrauchern.

6 Fazit

Fazit

Die Wahl eines geeigneten Heizungssystems ist von vielen Faktoren abhängig: Nutzung und energetischer Qualität des Gebäudes, Dimensionierung des vorhandenen Übergabesystems, verfügbare Energieträger und nicht zuletzt investitions-, wartungs- und verbrauchbedingten Kosten. Eine wichtige Rolle spielen auch die erfolgte Beratung durch Handwerk oder Energieberater sowie gesetzliche Anforderungen aus dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) und mögliche Förderungen. Heizungen sind langlebige Investitionsgüter, mit ihrer Wahl werden Verbrauchskosten auf einen Zeitraum von in der Regel zwanzig Jahren und mehr festgelegt. Dementsprechend sollten auch die in diesem Zeitraum zu erwartenden Randbedingungen Grundlage einer Investitionsentscheidung sein.

Die vorliegende Studie kommt zu dem Schluss, dass bei Berücksichtigung der aktuellen Förderung, der aktuell gültigen Regelungen zu Umlagen, Gebühren und Steuern bei allen Energieträgern und einer erwartbaren CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe die Vollkosten der Wärmeversorgung in kleinen Gebäuden für die verglichenen Systeme mit signifikant niedrigen Treibhausgas-Emissionen, wie Luft-Wasser und Sole-Wasser-Wärmepumpen, günstiger oder höchstens gleich teuer sind wie Systeme mit Gas-Brennwertgeräten. In unsanierten Mehrfamilienhäusern werden durch die aktuelle Förderung vergleichbare Kosten für alle Systeme erreicht. Bei strombasierten Systemen mit Wärmepumpen kann die Wirtschaftlichkeit und die THG-Bilanz durch die zusätzliche Installation einer PV-Anlage deutlich verbessert werden.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass die der aktuellen Beratungs- und Förderpraxis zugrunde liegenden Rahmenbedingungen der Berechnungsverfahren für THG-Emissionen und der damit verbundenen Anteile an den Verbrauchskosten angepasst werden sollten. Ein möglicher, hier vorgeschlagener methodischer Ansatz ist die Vorgabe von mittleren, während der technischen Lebensdauer zu erwartenden, CO₂-Äquivalenten für die unterschiedlichen Energieträger. Betroffen hiervon wären insbesondere Strom (mit schnell steigenden Anteilen CO₂-armer Erzeugung) und Fernwärme. Außerdem sollten Pfade für die Entwicklung der CO₂-Bepreisung hinterlegt und bei der Kostenbetrachtung berücksichtigt werden, auch wenn sie mit Unsicherheiten behaftet sind. Hierfür wäre eine einheitliche, mit wichtigen Akteuren abgestimmte Vorgabe durch den Gesetzgeber wünschenswert, die dann auch von Genehmigungsbehörden, in öffentlichen Planungsverfahren und von Beratern anzuwenden wäre.

Literaturverzeichnis

BAFA (Hg.) (2020): Merkblatt zu den förderfähigen Kosten. Heizen mit Erneuerbaren Energien. Eschborn. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ee_merkblatt_foerderfaehige_kosten.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 25.10.2021.

BAFA (Hg.) (2021a): Förderprogramm im Überblick. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Foerderprogramm_im_Ueberblick/foerderprogramm_im_ueberblick_node.html, zuletzt geprüft am 20.08.2021.

BAFA (Hg.) (2021b): Förderübersicht: Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG). Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg_em_foerderuebersicht.html?nn=15129584, zuletzt geprüft am 20.08.2021.

BMWi (Hg.) (2020a): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin.

BMWi (Hg.) (2020b): Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM). Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/F/foerderrichtlinie-beg-em.html>, zuletzt aktualisiert am 17.12.2020, zuletzt geprüft am 25.10.2021.

BMWi (Hg.) (2021a): Zeitreihen zur Entwicklung erneuerbarer Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energie-Statistik. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020-excel.xlsx;jsessionid=00317182F5FB77206464AF51B7DE9986?__blob=publicationFile&v=27, zuletzt geprüft am 25.10.2021.

BMWi (Hg.) (2021b): Gesamtausgabe der Energiedaten. Datensammlung des BMWi. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, zuletzt geprüft am 25.10.2021.

BMWi (Hg.) (2021c): Antworten auf häufig gestellte Fragen zur BEG (FAQ). Online verfügbar unter <https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEF/Redaktion/DE/FAQ/FAQ-Uebersicht/BEG/faq-bundesfoerderung-fuer-effiziente-gebaeude.html>, zuletzt geprüft am 20.08.2021.

Bundesnetzagentur (Hg.) (2021): EEG-Registerdaten und Fördersätze. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html, zuletzt geprüft am 20.08.2021.

KfW (Hg.) (2021): Die neue Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) ersetzt die bisherige Förderung. Online verfügbar unter <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Bundesf%C3%B6rderung-f%C3%BCr-effiziente-Geb%C3%A4ude/>, zuletzt geprüft am 20.08.2021.

Mailach, Bettina; Oschatz, Bert (2021a): BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2021. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Altbauten. ITG Institut für Technischen Gebäudeausrüstung Dresden. Dresden.

Mailach, Bettina; Oschatz, Bert (2021b): BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2021. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Neubauten. ITG Institut für Technischen Gebäudeausrüstung Dresden. Dresden.

Meyer, Robert; Herkel, Sebastian; Kost, Christoph (2021): Die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor: Vergleich technischer Möglichkeiten und Kosten defossilisierter

Optionen der Wärmeerzeugung. Ariadne-Analyse. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

Steinbach, Jan; Deurer, Jana; Senkpiel, Charlotte; Brandes, Julian; Heilig, Judith; Berneiser, Jessica; Kost, Christoph (2021): Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050. BBSR- Online-Publikation. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

Wagener, Laura; Weißbach, Anne (2021): Stromverbrauch im Haushalt. Hg. v. co2online gGmbH, zuletzt geprüft am 20.08.2021.

Weniger, Johannes; Tjaden, Tjarko; Quaschnig, Volker (2014): Sizing of Residential PV Battery Systems. In: *Energy Procedia* 46, S. 78–87. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.01.160.

Acknowledgement: Die durchgeführten Arbeiten zur Erstellung dieser Studie wurden durch die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Kopernikus-Forschungsprojekts ARIADNE: Evidenzbasiertes Assessment für die Gestaltung der deutschen Energiewende (Förderkennzeichen: 03SFK5D0) ermöglicht.

Anhang

Genaue Angaben zu den Gebäuden und Heizsystemen (Wohnfläche, Jahresheizlast, Anlagenkonfiguration, etc.) sowie zur Methodik können dem BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2021 und dem BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2021 entnommen werden. Hier sind die abweichenden Daten zu PV-Einspeisung und TGH-Emissionen aufgelistet, sowie die sich ergebenden Gesamtkosten.

Altbau EFH		Gas-BW-Ge- rät	Gas-BW-Ge- rät / solare HeizU + so- lare TWE	Luft-Was- ser-WP	Luft-Was- ser-WP + PV-Anlage	Luft-Was- ser-WP + PV-Anlage + eSpeicher	Sole-Was- ser-WP	Nah-/ Fern- wärme
Photovoltaik	PV-Ertrag (kWh _{el})				6862	6862		
	Vor-Ort-Verbrauch Heizstrom (kWh _{el})				2745	4654		
	Vor-Ort-Verbrauch Haushaltsstrom (kWh _{el})				412	698		
Verbrauchsgebundene Kosten	Arbeitspreis 1.WE (€/kWh)	0,06	0,06	0,18	0,18	0,18	0,18	0,07
	Arbeitspreis Hilfsenergie (€/kWh)	0,30	0,30	0,18	0,18	0,18	0,18	0,30
	Arbeitspreis Haushaltsstrom (€/kWh)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Stromvergütung/eingesparte Strombezugs- kosten (€/a)				-898	-1165		
	Jahresgesamtkosten Verbrauch ohne CO ₂ - Preis (€/a)	2072	1770	2102	1204	936	1682	2899
	Mittlerer CO ₂ -Preis (€/t)	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92
	CO ₂ -Preis (€/a)	516	468	0	0	0	0	0
Gesamtkosten	Jahresgesamtkosten ohne Förderung (€/a)	3547	3898	4000	3735	3966	4184	3896
	Jahresgesamtkosten mit Förderung (€/a)	3530	3576	3533	3321	3499	3564	3879
Emissionen	CO ₂ -Emissionen* (kg)	5936	5385					
	THG-Emissionen, 100 % Anrechnung PV-Ein- speisung (kg_CO ₂ -äq/a) **	7200	6553	2237	846	846	1767	4593
	THG-Emissionen, PV-Anrechnung nur für Vor-Ort-Verbrauch (kg_CO ₂ -äq/a) **	7200	6553	2237	1597	1152	1767	4593

* ohne Vorketten, heizwertbezogen (H_i), ohne Strom

** inkl. Vorketten und Äquivalenten

Altbau MFH		Gas-BW-Ge- rät	Gas-BW-Ge- rät + solare TWE	Luft-Was- ser-WP	Luft-Was- ser-WP + PV-Anlage	Sole-Was- ser-WP	Luft-Was- ser-Sorpti- ons-Gas-WP	Nah-/Fern- wärme
Photovoltaik	PV-Ertrag (kWh _{el})				16920			
	Vor-Ort-Verbrauch Heizstrom (kWh _{el})				6091			
	Vor-Ort-Verbrauch Haushaltsstrom (kWh _{el})				0			
Verbrauchsgebunde Kosten	Arbeitspreis 1.WE (€/kWh)	0,06	0,06	0,18	0,18	0,18	0,06	0,07
	Arbeitspreis Hilfsenergie (€/kWh)	0,30	0,30	0,18	0,18	0,18	0,28	0,30
	Arbeitspreis Haushaltsstrom (€/kWh)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Stromvergütung/eingesparte Strombezugs- kosten (€/a)				-1902			
	Jahresgesamtkosten Verbrauch ohne CO ₂ - Preis (€/a)	4298	3930	4518	2617	3620	3494	6145
	Mittlerer CO ₂ -Preis (€/t)	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92
	CO ₂ -Preis (€/a)	1.140	1.017	0	0	0	846	0
Gesamtkosten	Jahresgesamtkosten ohne Förderung (€/a)	7476	7674	8925	8530	8520	9248	8401
	Jahresgesamtkosten mit Förderung (€/a)	7437	7310	7990	7595	7487	8261	8362
Emissionen	CO ₂ -Emissionen* (kg)	13114	11701				9731	
	THG-Emissionen, 100 % Anrechnung PV-Ein- speisung (kg_CO ₂ -äq/a) **	15828	14173	4923	1494	3918	13253	10146
	THG-Emissionen, PV-Anrechnung nur für Vor-Ort-Verbrauch (kg_CO ₂ -äq/a) **	15828	14173	4923	3688	3918	13253	10146

* ohne Vorketten, heizwertbezogen (H_i), ohne Strom

** inkl. Vorketten und Äquivalenten

Neubau EFH Mindestwärmeschutz		Gas-BWK + solare TWE+WRG	Luft-Wasser-WP	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE + Abluftanlage	Sole-Wasser-WP + PV-Anlage + eSpeicher + Abluftanlage	Nah-/Fernwärme + Abluftanlage
Photovoltaik	PV-Ertrag (kWh _{el})			6862	6862	
	Vor-Ort-Verbrauch Heizstrom (kWh _{el})			1921	3294	
	Vor-Ort-Verbrauch Haushaltsstrom (kWh _{el})			343	823	
Verbrauchsgebundene Kosten	Arbeitspreis 1.WE (€/kWh)	0,06	0,18	0,18	0,18	0,07
	Arbeitspreis Hilfsenergie (€/kWh)	0,30	0,18	0,18	0,18	0,30
	Arbeitspreis Haushaltsstrom (€/kWh)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Stromvergütung/eingesparte Strombezugskosten (€/a)			-794	-1049	
	Jahresgesamtkosten Verbrauch ohne CO ₂ -Preis (€/a)	1199	1333	578	64	2151
	Mittlerer CO ₂ -Preis (€/t)	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92
	CO ₂ -Preis (€/a)	208	0	0	0	0
Gesamtkosten	Jahresgesamtkosten ohne Förderung (€/a)	4180	3752	3471	4167	3853
	Jahresgesamtkosten mit Förderung (€/a)	4180	3752	3471	4167	3853
Emissionen	CO ₂ -Emissionen* (kg)	2399				
	THG-Emissionen, 100 % Anrechnung PV-Einspeisung (kg_CO ₂ -äq/a) **	3085	1376	30	-261	3001
	THG-Emissionen, PV-Anrechnung nur für Vor-Ort-Verbrauch (kg_CO ₂ -äq/a) **	3085	1376	962	295	3001

* ohne Vorketten, heizwertbezogen (H_i), ohne Strom

** inkl. Vorketten und Äquivalenten

Neubau EFH Effizienzhaus 55		Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu-/Abluft-anlage mit WRG	Luft-Wasser-WP + Abluft-anlage	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + Abluft-anlage	Luft-Wasser-WP + PV-Anlage + E-DLE + Abluft-anlage	RLT-Kompaktgerät + PV-Anlage + Zu-/Abluft-anlage mit WRG	Nah-/Fernwärme + Abluft-anlage
Photovoltaik	PV-Ertrag* (kWh _{el})			6862	6862	6862	
	Vor-Ort-Verbrauch Heizstrom (kWh _{el})			1784	1853	1304	
	Vor-Ort-Verbrauch Haushaltsstrom (kWh _{el})			274	343	618	
Verbrauchsgebundene Kosten	Arbeitspreis 1.WE (€/kWh)	0,06	0,18	0,18	0,18	0,18	0,07
	Arbeitspreis Hilfsenergie (€/kWh)	0,30	0,18	0,18	0,18	0,18	0,30
	Arbeitspreis Haushaltsstrom (€/kWh)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Stromvergütung/eingesparte Strombezugskosten (€/a)			-406	-439	-422	
	Jahresgesamtkosten Verbrauch ohne CO ₂ -Preis (€/a)	949	1117	712	714	542	1844
	Mittlerer CO ₂ -Preis (€/t)	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92	86,92
	CO ₂ -Preis (€/a)	147	0	0	0	0	0
Gesamtkosten	Jahresgesamtkosten ohne Förderung (€/a)	3840	3423	3704	3487	3901	3525
	Jahresgesamtkosten mit Förderung (€/a)	3840	2880	3210	2990	3425	3525
Emissionen	CO ₂ -Emissionen** (kg)	1693					
	THG-Emissionen, 100 % Anrechnung PV-Einspeisung (kg_CO ₂ -äq/a) ***	2218	1135	-256	-216	-428	2399
	THG-Emissionen, PV-Anrechnung nur für Vor-Ort-Verbrauch (kg_CO ₂ -äq/a) ***	2218	1135	718	730	573	2399

* aufgrund der Förderung als Effizienzklasse wird keine EEG-Vergütung für den eingespeisten Strom angenommen

** ohne Vorketten, heizwertbezogen (H_i), ohne Strom

*** inkl. Vorketten und Äquivalenten

Neubau MFH Mindestwärmeschutz		Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu-/ Abluftan- lage mit WRG	Sole-Wasser- WP + PV-An- lage + E-DLE + Abluftanlage	Nah-/Fern- wärme + Zu-/ Abluftanlage mit WRG
Photovoltaik	PV-Ertrag (kWh _{el})		16920	
	Vor-Ort-Verbrauch Heizstrom (kWh _{el})		4230	
	Vor-Ort-Verbrauch Haushaltsstrom (kWh _{el})		0	
Verbrauchsgebundene Kosten	Arbeitspreis 1.WE (€/kWh)	0,06	0,18	0,07
	Arbeitspreis Hilfsenergie (€/kWh)	0,30	0,18	0,30
	Arbeitspreis Haushaltsstrom (€/kWh)	0,30	0,30	0,30
	Stromvergütung/eingesparte Strombezugs- kosten (€/a)		-1702	
	Jahresgesamtkosten Verbrauch ohne CO ₂ - Preis (€/a)	2325	1163	4093
	Mittlerer CO ₂ -Preis (€/t)	86,92	86,92	86,92
	CO ₂ -Preis (€/a)	457	0	0
Gesamtkosten	Jahresgesamtkosten ohne Förderung (€/a)	9867	8847	10260
	Jahresgesamtkosten mit Förderung (€/a)	9867	8847	10260
Emissionen	CO ₂ -Emissionen* (kg)	5261		
	THG-Emissionen, 100 % Anrechnung PV-Ein- speisung (kg_CO ₂ -äq/a) **	6700	-357	5492
	THG-Emissionen, PV-Anrechnung nur für Vor-Ort-Verbrauch (kg_CO ₂ -äq/a) **	6700	2214	5492

* ohne Vorketten, heizwertbezogen (H_i), ohne Strom

** inkl. Vorketten und Äquivalenten

Neubau MFH Effizienzhaus 55		Gas-BW-Gerät + solare TWE + Zu- /Abluftanlage mit WRG	Luft-Wasser-WP + Abluftanlage	Nah-/Fernwärme + Zu-/ Abluftan- lage mit WRG
Photovoltaik	PV-Ertrag (kWh _{el})			
	Vor-Ort-Verbrauch Heizstrom (kWh _{el})			
	Vor-Ort-Verbrauch Haushaltsstrom (kWh _{el})			
Verbrauchsgebundene Kosten	Arbeitspreis 1.WE (€/kWh)	0,06	0,18	0,07
	Arbeitspreis Hilfsenergie (€/kWh)	0,30	0,18	0,30
	Arbeitspreis Haushaltsstrom (€/kWh)	0,30	0,30	0,30
	Stromvergütung/eingesparte Strombezugs- kosten (€/a)			
	Jahresgesamtkosten Verbrauch ohne CO ₂ - Preis (€/a)	1838	2578	3463
	Mittlerer CO ₂ -Preis (€/t)	86,92	86,92	86,92
	CO ₂ -Preis (€/a)	327	0	0
Gesamtkosten	Jahresgesamtkosten ohne Förderung (€/a)	9227	8059	7783
	Jahresgesamtkosten mit Förderung (€/a)	9227	4797	7783
Emissionen	CO ₂ -Emissionen* (kg)	3762		
	THG-Emissionen, 100 % Anrechnung PV-Ein- speisung (kg_CO ₂ -äq/a) **	4865	2751	4278
	THG-Emissionen, PV-Anrechnung nur für Vor-Ort-Verbrauch (kg_CO ₂ -äq/a) **	4865	2751	4278

* ohne Vorketten, heizwertbezogen (H_i), ohne Strom

** inkl. Vorketten und Äquivalenten