



FFE

Wärmepumpen-Fahrplan

Finanzielle Kipppunkte zur Modernisierung mit Wärmepumpen im Wohngebäudebestand

2021

Wärmepumpen-Fahrplan

Finanzielle Kipppunkte zur Modernisierung mit
Wärmepumpen im Wohngebäudebestand

Herausgeber:



Forschungsstelle für
Energiewirtschaft e.V.

Am Blütenanger 71, 80995 München
+49 (0) 89 158121-0

Mail: info@ffe.de

Web: www.ffe.de

Abschlussbericht zum Projekt:

Wärmepumpen-Fahrplan

Finanzielle Kippunkte zur Modernisierung mit Wärmepumpen im
Wohngebäudebestand

Veröffentlicht am:

11.08.2021

FfE-Auftragsnummer:

BWP-01

Bearbeiter/in:

Simon, Greif

Florian, Mayer

Projektpartner:

Bundesverband Wärmepumpe e.V.

Management FfE e.V.

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. R. Corradini

Inhalt

1	Kurzzusammenfassung	5
2	Motivation & Ziel	6
3	Gebäude- und Heizsystembestand	7
3.1	Struktur des Wohngebäudebestands	7
3.2	Wärmeverbrauch und Heizlast	8
3.3	Heizsysteme und CO ₂ -Emissionen	10
4	Modernisierungsoptionen	12
4.1	Ausgangszustand	12
4.2	Modernisierungsmaßnahmen	13
4.3	Systemtemperatur	13
4.4	Quellentemperatur	14
4.5	Jahresarbeitszahl	15
5	Kosten des Technologiewechsels	16
5.1	Kapitalgebundene Kosten	16
5.2	Verbrauchsgebundene Kosten	17
5.3	Betriebsgebundene Kosten	17
6	Kippunkte für den Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudebestand	18
6.1	Szenario A – Geringer CO ₂ -Preis	20
6.2	Szenario B – Mittlerer CO ₂ -Preis	21
6.3	Szenario C – Hoher CO ₂ -Preis	22
6.4	Sensitivitätsanalyse	23
7	Fazit	25
8	Literatur	26
9	Anhang	30

1 Kurzzusammenfassung

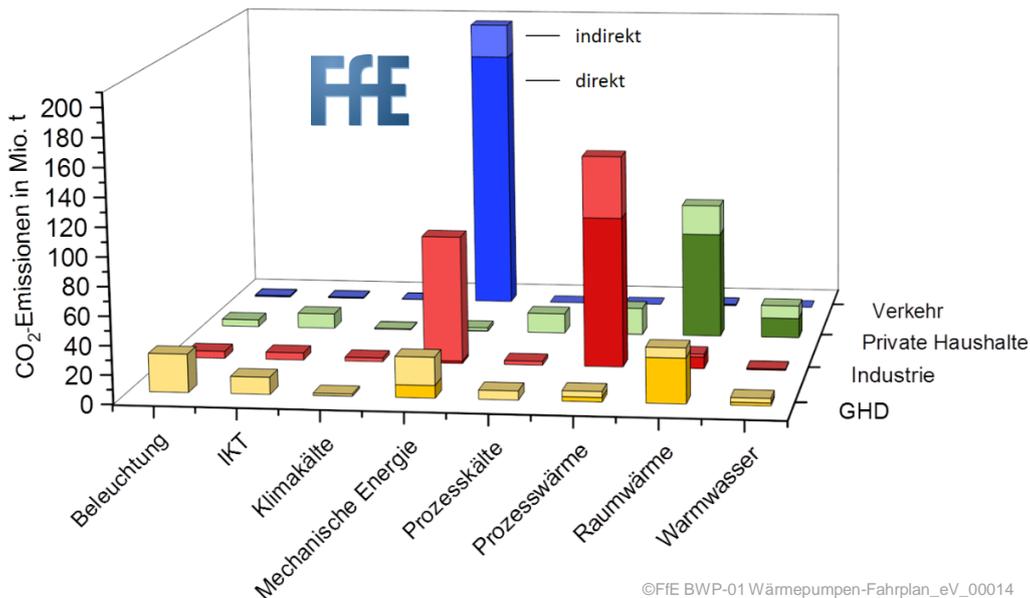
Die Installation von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden ist eine zentrale Maßnahme zur Erreichung der Klimaziele im Gebäudesektor. Hierfür existieren technisch ausgereifte Lösungen, die einen effizienten Betrieb der Wärmepumpen gewährleisten. Die größte Herausforderung ist der Wettbewerbsnachteil gegenüber den Preisen fossiler Energieträger. Ziel der Untersuchungen ist es, bezogen auf die Energiepreise, Kippunkte zu identifizieren, die eine Umstellung von fossil betriebenen Heizungen zu elektrischen Wärmepumpen finanziell attraktiv gestalten. Dabei werden drei Szenarien mit (A) einem geringen CO₂-Preis, (B) einem mittleren CO₂-Preis und (C) einem hohen CO₂-Preis untersucht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der aktuelle Strompreis für Wärmepumpen ein großes Hindernis für die Modernisierung mit Wärmepumpen darstellt. Der Anreiz für eine Transformation ganzer Gebäudeklassen von Gas- und Ölkesseln zu Wärmepumpen ist durch eine deutliche Absenkung des Strompreises erreichbar. Die derzeitige gesetzliche Regelung zur Emissionsbepreisung erzielt hingegen keine ausreichende Lenkungswirkung im Wärmemarkt, solange die Entwicklung des CO₂-Preises für Verbraucher für die Zeit ab dem Jahr 2027 nicht kalkulierbar ist. Aufgrund der langen Transformationszyklen im Wärmemarkt ist ein Abwarten jedoch nicht zielführend. Eine mögliche Weichenstellung für den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen ist daher die Befreiung des Wärmepumpenstromtarifs von der EEG-Umlage. Dies schafft auch im Falle einer moderaten Erhöhung des CO₂-Preises die für den Technologiewechsel zu Wärmepumpe notwendigen finanziellen Anreize sowie Planungssicherheit für Verbraucher. Ohne Reduktion des Wärmepumpentarifs wird eine Transformation erst durch einen sehr hohen CO₂-Preis angereizt, der die Kosten für das Heizen deutlich erhöht. Als notwendige Rahmenbedingung ist die Beibehaltung der Investitionsförderung inklusive Umfeldmaßnahmen zu unterstreichen.

Zum Vorgehen: Aufgrund der heterogenen Struktur des Wärmemarkts wird in dieser Studie ausschließlich der Wohngebäudebestand und die diesbezügliche Beheizungsstruktur analysiert. Das umfassende Gebäudemodell der FfE ermöglicht differenzierte Aussagen zu verschiedenen Gebäudetypen und Baualtersklassen. Vor 1979 errichtete Einfamilienhäuser und mittlere Mehrfamilienhäuser stellen den Großteil des deutschen Wohngebäudebestands dar. Ein weiterer Ausgangspunkt der Studie ist, dass der Großteil dieser Gebäude mit Heizkörpern und entsprechenden Systemtemperaturen ausgestattet ist. Zudem sind in der Mehrzahl Heizöl- oder Erdgaskessel installiert, sodass die Heizungssysteme bislang mit Temperaturen oberhalb der für Wärmepumpen typischen maximal 55 Grad Celsius betrieben werden. So ergeben sich für den Einsatz der Wärmepumpen in diesen Gebäuden verschiedene Modernisierungsvarianten: der Einsatz einer Hochtemperaturwärmepumpe, die Vergrößerung der Heizfläche durch den gezielten Austausch von Heizkörpern oder die Absenkung der Gebäudeheizlast durch Dämmung der Gebäudehülle. Grundsätzlich gilt: Je höher die Investition in Modernisierungsmaßnahmen, desto geringer fallen die Betriebskosten aus. Aus wirtschaftlicher Sicht muss also eine Abwägung von Investitions- und Betriebskosten erfolgen, die sich schließlich in der Identifikation von Kippunkten ausdrückt.

2 Motivation & Ziel

Der Gebäudesektor muss einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen auf dem Weg zur Klimaneutralität erbringen. Im Jahr 2020 verfehlte der Sektor sein Ziel aus dem Klimaschutzgesetz von 120 Millionen Tonnen CO₂ um 2 Millionen Tonnen CO₂ /EFK-01 21/. In Folge des Urteils des Bundesverfassungsgerichts vom 24. März 2021 /STUER-01 21/ wurden die Ziele des Klimaschutzgesetzes erneut verschärft. Dieses sieht nun vor, dass die Emissionen im Gebäudebereich im Jahr 2030 maximal 67 Millionen Tonnen CO₂ betragen dürfen /BMU-02 21/. Der Großteil der Treibhausgasemissionen in Deutschland sind energiebedingte CO₂-Emissionen, die in Abbildung 2-1 nach Anwendung und Sektor differenziert sind.



©FfE BWP-01 Wärmepumpen-Fahrplan_eV_00014

Abbildung 2-1: Energiebedingte CO₂-Emissionen in Deutschland im Jahr 2016 /FFE-69 19/

Eine zentrale Aufgabe ist die Emissionsreduktion der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung. Der Sektor private Haushalte hat hier einen Anteil von rund 70 % der Emissionen. Durch private Haushalte werden jährlich rund 125 Millionen Tonnen CO₂ emittiert. Aufgrund der langen Nutzungsdauern von Gebäuden und Heizsystemen und des limitierten Emissionsbudgets ist der Handlungsspielraum für eine grundlegende Veränderung zeitlich begrenzt. Auf dem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudebestand nehmen elektrische Wärmepumpen eine zentrale Rolle ein (vgl. /FfEE-01 19/ /DENA-116 17/ /FFE-69 19/). In dicht besiedelten Gebieten mit oftmals geringem Platzangebot für die Nutzung Erneuerbarer Energien stellt die Verteilung mittels Wärmenetzen eine sinnvolle Ergänzung dar /AGORA-07 20/ /ISE-07 20/. Die Vorteile der zentralen Wärmeversorgung müssen dabei Nachteile wie aufwendige Installation und Verteilverluste aufwiegen. Aktuell erfolgt die Wärmeversorgung hingegen größtenteils dezentral, sprich separat für jedes einzelne Wohngebäude /DESTATIS-09 19/. Der Einsatz dezentraler Wärmepumpen ermöglicht auch in Bestandsgebäuden einen zeitnah umsetzbaren Technologiewechsel. Derzeit weisen mit fossilen Energieträgern betriebene Heizkessel jedoch in den meisten Fällen geringere Gesamtkosten auf. Die größte Herausforderung für Wärmepumpen in Deutschland ist somit ihre Wettbewerbsfähigkeit bei den Energiepreisen. Im Rahmen dieses Projekts wird der Gebäude- und Heizsystembestand beschrieben, Modernisierungsoptionen aufgezeigt und der Einfluss von CO₂-Preis und Strompreisentlastung auf die Wettbewerbsfähigkeit von Wärmepumpen analysiert. Hierbei werden auf Basis eines Gebäudemodells durchschnittliche Gebäude untersucht. Ziel der Untersuchungen ist es, für diese Typgebäude Kippunkte zu identifizieren, welche eine Umstellung auf elektrische Wärmepumpen finanziell attraktiv gestalten. Gebäude mit günstigeren oder ungünstigeren Voraussetzungen werden durch diese Verallgemeinerung nicht abgebildet.

3 Gebäude- und Heizsystembestand

Um den heterogenen Bestand an Wohngebäuden und Heizsystemen adäquat abzubilden, wird dessen Struktur umfassend analysiert und repräsentative Typgebäude definiert. Diese werden anhand physikalischer Modelle simuliert, um deren Wärmebedarf und deren Heizlast zu beschreiben. Mit Informationen über die aktuell installierten Heizsysteme werden daraus der Endenergiebedarf und die verursachten Emissionen ermittelt.

3.1 Struktur des Wohngebäudebestands

Das Gebäudemodell nach /FFE-69 19/ beschreibt das Mengengerüst der Gebäude und Heizsysteme je Gemeinde in Deutschland. Hierbei wird der heterogene Bestand durch Typgebäude abgebildet, die sich bzgl. des Gebäudetyps, des Baualters und des Sanierungszustands unterscheiden. Hinsichtlich des Gebäudetyps werden die Klassen Einfamilienhaus, mittleres Mehrfamilienhaus mit 3 bis 6 Wohneinheiten sowie großes Mehrfamilienhaus mit mehr als 12 Wohneinheiten differenziert. In der Kategorie Einfamilienhaus sind auch Zweifamilienhäuser, Reihenhäuser und Doppelhäuser enthalten. Die Definition der Baualtersklassen, „vor 1979“, „1979 bis 1995“ und „nach 1995“ basiert auf der historischen Entwicklung der gesetzlichen Vorgaben zum energetischen Gebäudestandard. Der Sanierungszustand ist nach unsaniert, teilsaniert und vollsaniert differenziert. /JC-01 20/

Des Weiteren fließen umfangreiche statistische Daten des Zensus zur regionalen Differenzierung des Gebäudetyps in das Modell ein /DESTATIS-15 13/ /DESTATIS-01 17/. Die Struktur des Wohngebäudebestands im Jahr 2020 ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

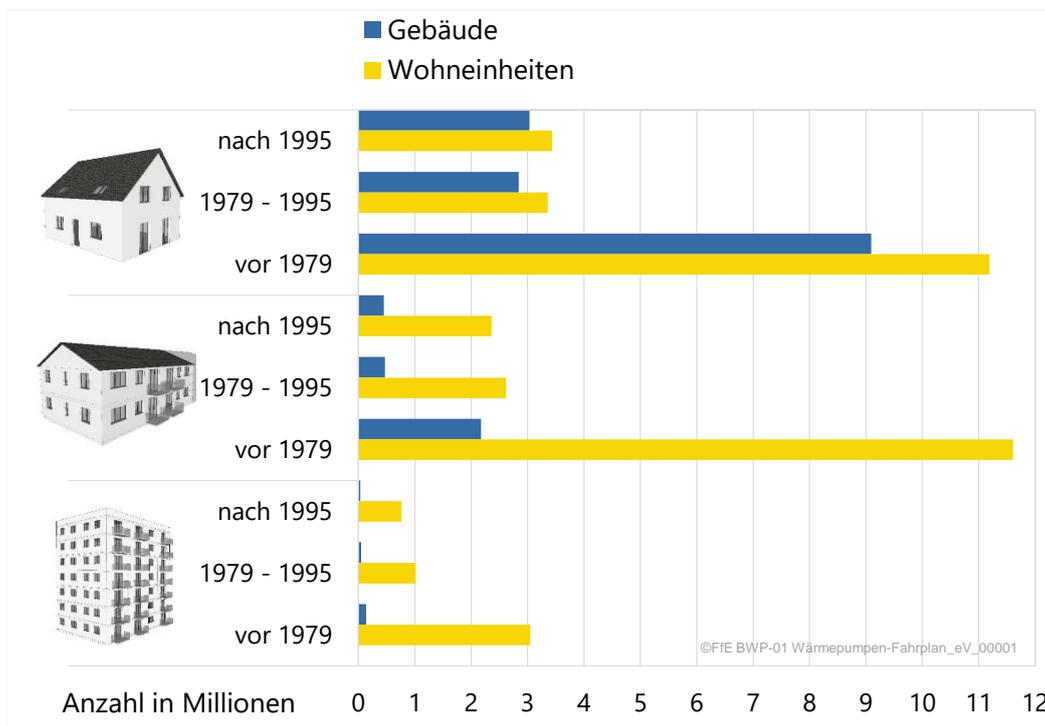


Abbildung 3-1: Struktur des Wohngebäudebestands in Deutschland 2020 /FFE-69 19/

Einfamilienhäuser bilden mit insgesamt 15 Millionen den größten Anteil des Gebäudebestands, wobei knapp 60 % davon vor 1979 errichtet wurden. Die restlichen sechs Millionen Einfamilienhäuser teilen sich annähernd gleichmäßig auf den Zeitraum nach 1995 sowie zwischen 1979 bis 1995 auf. Bei den mittleren Mehrfamilienhäusern wurden knapp über zwei Millionen Häuser mit fast 12 Millionen Wohneinheiten vor 1979 errichtet. Darüber hinaus befinden sich noch circa 210 Tausend große Mehrfamilienhäuser mit knapp fünf Millionen Wohneinheiten im

aktuellen Gebäudebestand. Dementsprechend stellen vor 1979 errichtete Einfamilienhäuser und mittlere Mehrfamilienhäuser den Großteil des deutschen Wohngebäudebestands dar.

In Nichtwohngebäuden variiert der Wärmeverbrauch je nach Nutzung stark z. B. zwischen Büroimmobilien, Handwerksbetrieben und verarbeitender Industrie. Aufgrund der sehr hohen Heterogenität des Nichtwohngebäudebestand sowie dem geringen Anteil am gesamten Gebäudebestand ist dieser nicht Teil der Studie. Für den Einsatz von Wärmepumpen in Bürogebäuden können mittlere bis große Mehrfamilienhäuser als Indikator dienen.

3.2 Wärmeverbrauch und Heizlast

Im Folgenden ist die Methodik zur Modellierung von 32 Typgebäuden zusammengefasst. Diese basiert auf umfassenden Vorarbeiten aus /JC-01 20/. Anhand physikalischer Parameter zur Gebäudehülle und praxisnaher Annahmen zum Nutzerverhalten wird der Wärmebedarf Bottom-Up modelliert und anschließend Top-Down mit der Statistik abgeglichen. Für die Simulation der 32 Typgebäude werden physikalische Modelle erstellt. Hierbei werden die Kategorien Bauteile Wand, Dach, Kellerdecke und Fenster unterschieden. Der Aufbau der Bauteile basiert auf regionaltypischen Daten /ZUB-01 09/ sowie den Beschreibungen der Mustergebäude nach /IWU-01 17/. Die U-Werte für Gebäude vor 1995 basieren auf /IWU-04 12/ während die U-Werte der neuen Baualterklasse denen der IWU Mustergebäude entsprechen. Um praxisnahe Ergebnisse zu erhalten, wurde das Nutzerverhalten (Prebound- und Rebound-Effekt) nach /HILE-01 12/ /SCHROE-01 14/ /BMVBS-05 12/ /UBA-14 17/ berücksichtigt. Mittels Regressionsanalyse der stündlichen Simulationsergebnisse wird eine Abhängigkeit zwischen Heizlast, Außentemperatur und Tageszeit hergestellt. Anhand der Außentemperatur in den 294 Landkreisen und 107 kreisfreien Städten sowie dem Mengengerüst der Typgebäude wird der deutsche Wärmebedarf in Summe bzw. im Mittel berechnet. Das Ergebnis sind Raumwärmebedarf und Heizlast je Typgebäude (vgl. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Wärmeverbrauch und Heizlast je Typgebäude

Gebäude- typ	Baualter	Heizlast in kW	Wärme- verbrauch in MWh/a
Einfamilien- haus	Nach 1995	7.3	15.2
	1979 – 1995	9.6	20.2
	Vor 1979	10.7	24.7
Kleines Mehrfamilien- haus	Nach 1995	16.4	32.3
	1979 – 1995	17.8	41.0
	Vor 1979	21	49.5
Mittleres Mehrfamilien- haus	Nach 1995	30.4	57.7
	1979 – 1995	35.4	75.9
	Vor 1979	37.7	90.1
Großes Mehrfamilien- haus	Nach 1995	74	118.5
	1979 – 1995	88.9	170.2
	Vor 1979	90.5	198.8

Dieser Bottom-Up bestimmte Wärmebedarf wird unter Annahme typischer Nutzungsgrade der Heizsysteme mit der Statistik nach /AGEB-02 13/ abgeglichen. Zudem erfolgt ein Vergleich der stündlichen Charakteristik mit /IFE-01 03/. Es zeigt sich, dass das Modell den Endenergieverbrauch für Raumwärme- und Warmwasser gut abbildet. Neben den Ermittlungen aus /HILE-01 12/, /SCHROE-01 14/, /BMVBS-05 12/ und /UBA-14 17/ bestätigt dies, dass der Wärmeverbrauch bzw. die Heizlast von Bestandsgebäuden in der Praxis im Mittel geringer ausfällt als nach theoretischen Berechnungsmethoden angenommen wird.

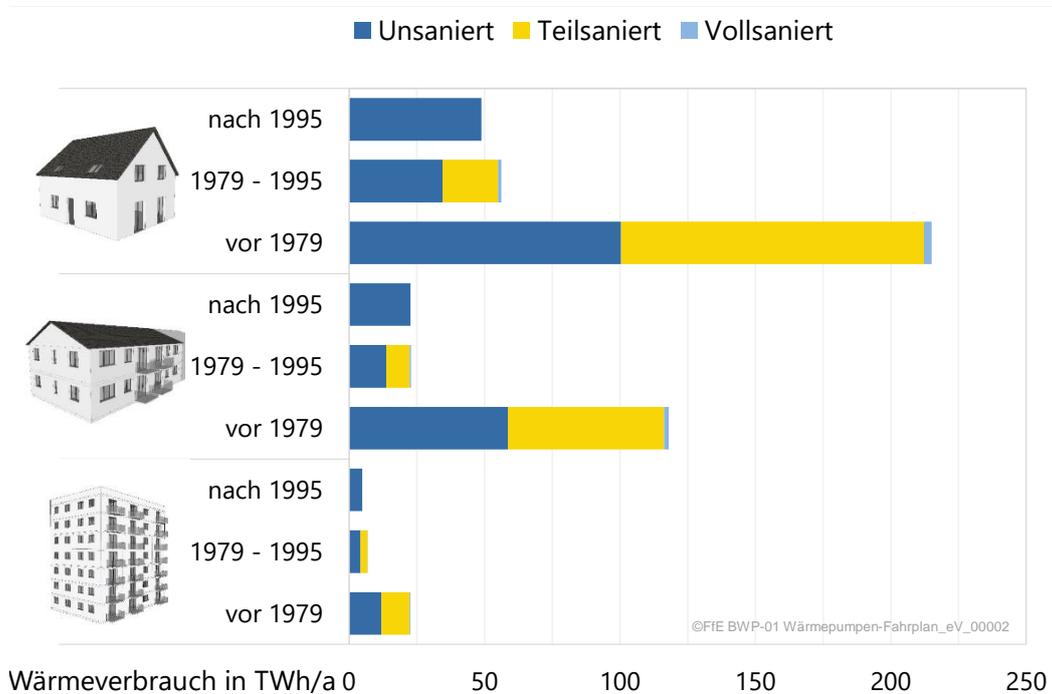


Abbildung 3-2: Wärmeverbrauch je Sanierungszustand /FFE 69 19/

Abbildung 3-2 zeigt den nach Baualtersklasse und Sanierungszustand aufgeschlüsselten Wärmeverbrauch in TWh/a. Aufgrund der hohen Anzahl an Gebäuden, die vor 1979 errichtet wurden (vgl. Kapitel 3.1), sticht diese Klasse bzgl. der Höhe des Wärmeverbrauchs hervor.

3.3 Heizsysteme und CO₂-Emissionen

Die Ermittlung der Anzahl an Heizsystemen sowie die Zuordnung zu den Typgebäuden erfolgt auf Basis der Daten der Mikrozensus-Zusatzerhebung /DESTATIS-01 17/. Um die Technologien und deren Altersstruktur weiter zu differenzieren, werden umfangreiche Datensätze im Modell berücksichtigt (vgl. /BDH-02 15/, /BDH-02 16/, /BAFA-01 14/, /ZIV-01 16/, /BDEW-10 10/, /BDH-02 17/, /GZB-01 10/). Abbildung 3-3 zeigt die Anzahl der Wohngebäude nach Energieträger des Heizsystems. Im Großteil der Gebäude basiert die Wärmeversorgung auf den Energieträgern Heizöl oder Erdgas. Weniger oft sind elektrische Wärmepumpen oder Biomassekessel vorhanden.

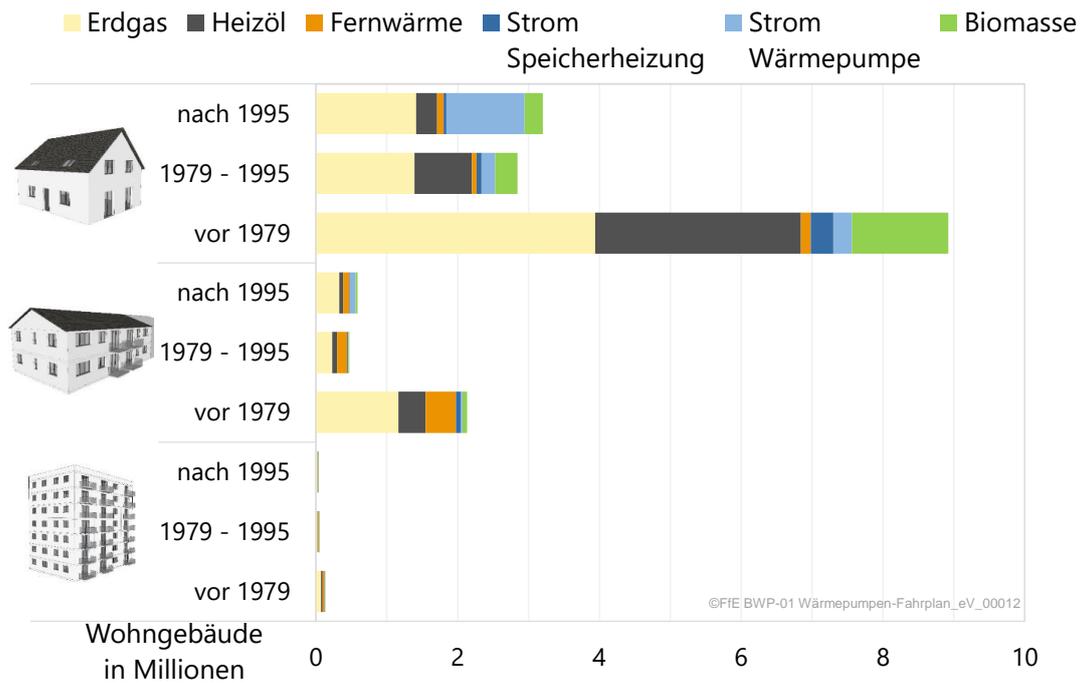


Abbildung 3-3: Anzahl von Wohngebäuden nach Energieträger des Heizsystems im Jahr 2020 /FFE-69 19/

Zur Berechnung der CO₂-Emissionen von strombasierten Heizsystemen sowie Fernwärme wurden die in /FFE-69 19/ ermittelten durchschnittlichen CO₂-Emissionsfaktoren ohne Berücksichtigung der Prozessvorkette verwendet. Im Jahr 2020 liegt dieser Wert für Strom bei 360 g CO₂/kWh und für Fernwärme bei 240 g CO₂/kWh. Der Emissionsfaktor von Erdgas beträgt 198 g CO₂/kWh und der von Heizöl 266 g CO₂/kWh. Abbildung 3-4 zeigt die CO₂-Emissionen der Wärmeversorgung von Wohngebäuden differenziert nach Heizsystem und Typgebäude. Dabei sind Gas- und Ölkessel für den größten Anteil der CO₂-Emissionen verantwortlich.

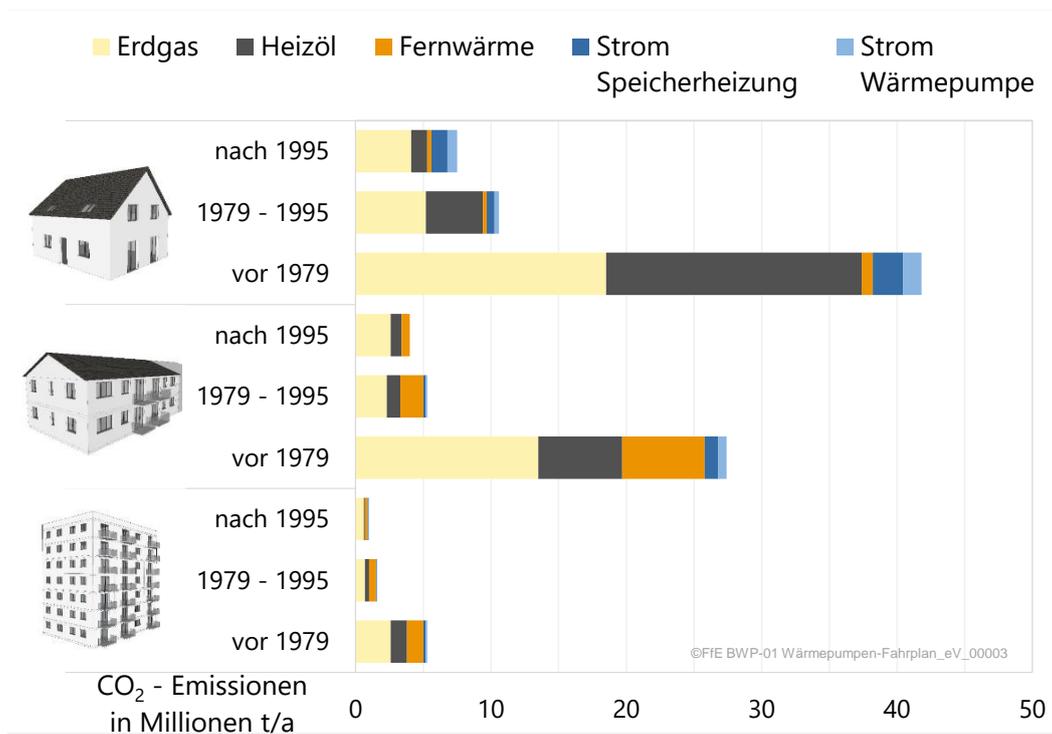


Abbildung 3-4: CO₂ – Emissionen von Heizsystemen in Wohngebäuden im Jahr 2020 /FFE-69 19/

Die Bereitstellung von Raumwärme durch die Verbrennung von Erdgas (48 %) und Heizöl (32 %) stellt den Großteil der Treibhausgasemissionen in privaten Haushalten dar. Der Strom für Haushaltsgeräte z. B. spielt im Vergleich eine sehr untergeordnete Rolle /FFE-03 19/. Nach dem Gebäudeenergiegesetz dürfen ab dem Jahr 2026 keine monovalenten Ölkessel mehr verbaut werden, sofern der Betrieb eines umweltfreundlicheren Heizsystems technisch möglich und ökonomisch zumutbar ist /BMWi-22 20/. Aus diesem Grund und aufgrund der hohen Marktdurchdringung wird als Referenzfall der Wechsel von Gasniedertemperaturkessel zu Gasbrennwertkessel mit Ertüchtigung des Abgassystems angenommen (vgl. /ECON-01 18/).

4 Modernisierungsoptionen

Elektrische Wärmepumpen ermöglichen in Kombination mit einem zunehmenden Anteil Erneuerbarer Energien am Strommix eine effiziente und emissionsarme Wärmebereitstellung. Neben der Wärmequelle spielen das Umfeld, sprich die Gebäudehülle, und das Verteilsystem eine entscheidende Rolle für die Betriebs- und Investitionskosten bzw. den Strombedarf einer Wärmepumpe. Die erreichbare Jahresarbeitszahl hängt dabei maßgeblich von dem Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und -senke ab. Je niedriger das Temperaturniveau, bei dem die Wärme an den Raum abgegeben wird, desto effizienter kann der Betrieb der Wärmepumpe sein. Durch Modernisierungsmaßnahmen, wie den Tausch von Heizkörpern oder die Dämmung des Gebäudes kann die Vorlauftemperatur des Heizsystems sowie der Wärmebedarf des Gebäudes gesenkt werden. Die daraus resultierende Erhöhung der Jahresarbeitszahl und Reduktion der Betriebskosten geht jedoch mit steigenden Investitionskosten einher. Aus wirtschaftlicher Sicht muss eine gezielte Abwägung zwischen Investitions- und Betriebskosten erfolgen. Für Gebäudeeigentümer können zudem weitere Aspekte wie der Beitrag zum Klimaschutz eine zusätzliche Rolle beim Wechsel zu erneuerbaren Heizungssystemen spielen.

4.1 Ausgangszustand

Im Folgenden wird der Ausgangszustand der Heizflächen beschrieben, um darauf aufbauend Systemtemperaturen für die analysierten Typgebäude zu definieren (vgl. Kapitel 4.3) und verschiedene Modernisierungsoptionen zu untersuchen. Abbildung 4-1 basiert auf einer Expertenbefragung und zeigt schematisch die Entwicklung der Auslegungstemperaturen zur Bereitstellung von Raumwärme mittels Zweirohrsystemen.

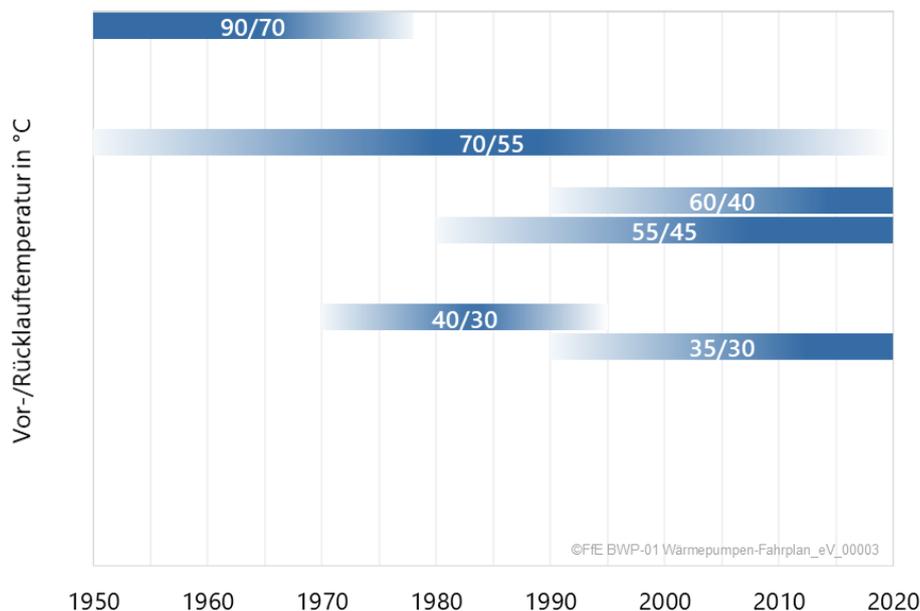


Abbildung 4-1: Schema zur historischen Entwicklung der Systemtemperatur Raumwärme

Für die Auslegung von Heizflächen werden die Vor- und Rücklauftemperatur jeweils für eine standortspezifische Auslegungstemperatur angegeben. Entscheidend für die Systemtemperatur ist der Raum mit der am geringsten dimensionierten Heizfläche. Wie in Abbildung 4-1 dargestellt, waren bis Mitte der 70er Jahre noch Vorlauftemperaturen von bis zu 90 °C verbreitet. Ab Ende der 1970er Jahre wurden aufgrund der ersten Heizanlagenverordnung Heizsysteme ausschließlich auf Temperaturen von 70 °C/55 °C ausgelegt. Im Zuge der Nieder-temperaturtechnik wurden ab Anfang der 1980er Jahre zunehmend Auslegungstemperaturen von 55 °C/45 °C zur

Dimensionierung von Heizflächen angewendet. Seit Anfang der 1990er Jahre wurden vermehrt auch 60 °C/40 °C Auslegungen, welche durch ihre große Temperaturdifferenz für die Brennwerttechnik sehr geeignet sind, verwendet. In jeder Baualtersklasse wurden aus Komfortgründen Anlagen mit niedrigeren Vorlauftemperaturen installiert. Mit der Flächenheizung, welche vereinzelt schon ab den 1970er Jahren verbaut wurde, setzten sich ab Anfang der 1990er Jahre vermehrt auch Auslegungstemperaturen von 35 °C/30 °C durch.

Ausgehend von dem aktuellen Zustand stellt sich in Bestandsgebäuden vielfach die Frage, wie die Systemtemperaturen mit Heizkörpern effektiv reduzierbar sind.

4.2 Modernisierungsmaßnahmen

Der Anteil von Wohngebäuden, die mit Heizkörpern ausgestattet sind, liegt in der Klasse „vor 1979“ mit 96 % deutlich höher als „nach 2005“, wo bei 66 % Flächenheizungen installiert sind /IWU-01 10/. Je nach Ausgangszustand der Gebäudehülle und des Wärmeverteilsystems gibt es unterschiedliche Modernisierungsoptionen für den Einsatz einer elektrischen Wärmepumpe.

Weiterverwendung von Heizkörpern

Insbesondere nach einer Sanierung sind die Heizkörper meist ausreichend groß dimensioniert, um mit Vorlauftemperaturen bis zu 55 °C Wärme an den Raum abzugeben. Häufig genügen geringinvestive Anpassungen, um das hydraulische System für die Wärmepumpe auszulegen. Der Heizkörper mit der geringsten Dimensionierung ist dabei limitierend. Wenn Vorlauftemperaturen von über 60 °C benötigt werden, können spezielle (Hochtemperatur-)Wärmepumpen eingesetzt werden, die auf den Betrieb mit höheren Temperaturen ausgelegt sind.

Tausch von Heizkörpern

Um die Systemtemperatur für einen effizienteren Betrieb der Wärmepumpe zu reduzieren, können gezielt Heizkörper ausgetauscht werden. Durch die oft uneinheitliche Auslegung von Heizflächen in einem Gebäude ist meistens der Ersatz der am geringsten dimensionierten Heizkörper für die relevante Reduktion der Systemtemperatur ausreichend.

Dämmung der Gebäudehülle

Durch die Dämmung der Gebäudehülle kann der Wärmebedarf, die Heizlast und somit indirekt auch die Systemtemperatur reduziert werden. Der verringerte Wärmebedarf sowie die höhere Effizienz der Wärmepumpe führen zu sinkenden Betriebskosten. Die Investitionskosten für die Wärmepumpe reduzieren sich durch eine geringere Heizlast. Die Kosten-Nutzen-Abwägung der Investition in Dämmungsmaßnahmen kann je Gebäude individuell sehr unterschiedlich ausfallen. Neben dem Ausgangszustand spielt u. a. der Investitionszyklus eine wichtige Rolle. Die Dämmung der Bauteile der Gebäudehülle kann eine sinnvolle Ergänzung für den effizienten Betrieb von Wärmepumpen sein. Eine technisch notwendige Voraussetzung für deren Einsatz ist sie nicht.

4.3 Systemtemperatur

Die angesetzten Systemtemperaturen basieren auf den in Kapitel 4.1 beschriebenen Annahmen zur historischen Entwicklung der Heizflächen und den damit verbundenen Auslegungstemperaturen. Demnach weisen Gebäude, die vor 1995 errichtet wurden, beim Einsatz von Wärmepumpen ohne vorherigen Heizkörperaustausch eine Vorlauftemperatur von i.d.R. 70 °C auf. Aus der Praxis zeigt sich zudem, dass Heizkörper oftmals für die Systemtemperaturen 70 °C/55 °C zu groß ausgelegt wurden. Bei diesen Baualtersklassen reicht oftmals der Tausch einzelner Heizkörper, um die Auslegungstemperatur auf 55 °C/45 °C zu reduzieren. Um diese Auslegung zu erreichen, wird angenommen, dass 33 % der Heizkörper ausgetauscht werden müssen. In sanierten oder nach 1995 erbauten Gebäuden wird davon ausgegangen, dass kein Heizkörperaustausch für den Betrieb mit 55 °C/45 °C

nötig ist (vgl. Abbildung 4-1). Eine Einordnung der Annahmen erfolgt durch eine Sensitivitätsanalyse mit 0 %, 66 % bzw. 100 % Anteil zu tauschender Heizkörper.

Während die genannten Systemtemperaturen die Deckung der Heizlast zur Auslegungstemperatur (z. B. am kältesten Tag) gewährleistet, beschreibt die Heizkurve die Abhängigkeit zwischen Außentemperatur und Vorlauf-temperatur. In Abbildung 4-2 ist die Heizkurve beispielhaft für drei verschiedene Heizflächen-Auslegungen visualisiert.

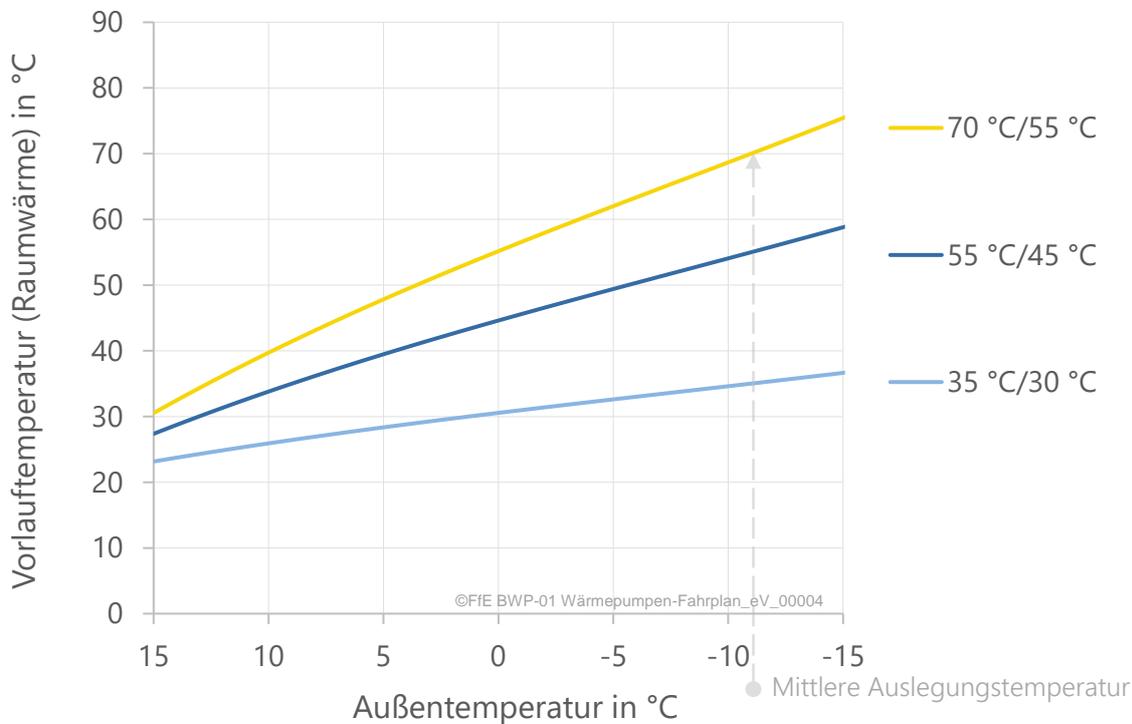


Abbildung 4-2: Systemtemperaturen in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Für die Berücksichtigung der Jahresarbeitszahl in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und -senke wird die übers Jahr mittlere Vorlauftemperatur je Typgebäude ermittelt. Die mittlere Vorlauf-temperatur zur Raumwärmebereitstellung basiert auf der Heizkurve, dem stündlichen Wärmebedarf und der Außentemperatur in 402 Landkreisen. Darüber hinaus wird der Anteil des Trinkwarmwassers sowie dessen Temperatur berücksichtigt (Einfamilienhäuser: 50 °C; Mehrfamilienhäuser: 60 °C). Im Ergebnis liegt die mittlere Vorlauf-temperatur je nach Typgebäude zwischen 42 °C und 45 °C bei einer Auslegungstemperatur von 55 °C/45 °C.

4.4 Quellentemperatur

Als Wärmequellen werden Luft- und Erdwärme analysiert, da diese am weitesten verbreitet sind. Die mittlere Quellentemperatur der Außenluft wird anhand stündlicher Außentemperaturdaten des Jahres 2012 in 402 Landkreisen berechnet. Die Gewichtung erfolgt anhand des stündlichen Wärmeverbrauchs und der Anzahl der Typgebäude. Je nach Typgebäude variiert diese mittlere Außenlufttemperatur von 3,5 bis 4,4 °C. Für die Erdwärme wird von Erdsonden ausgegangen, deren mittlere Soletemperatur 4,9 °C beträgt /ISE-09 20/. Eine Variation der Quellentemperatur der Erdsonde in Abhängigkeit vom Typgebäude ist nicht berücksichtigt.

4.5 Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl beschreibt die Effizienz des Wärmepumpensystems und hat maßgeblich Einfluss auf die verbrauchsgebundenen Kosten. Um praxisnahe Werte anzusetzen, wird das Verhältnis von gemessenen zu maximal erreichbaren Jahresarbeitszahlen analysiert. Dies erfolgt auf Basis von Daten zu monoenergetischen Wärmepumpenanlagen aus einem Feldtest des Projekts /ISE-09 20/. Dabei wird jeweils die Effizienz unter Berücksichtigung des Stromverbrauchs für Verdichter, Heizstab und Solepumpe bzw. Ventilator verwendet. Die maximal mögliche Jahresarbeitszahl wird auf Basis des Carnot-Faktors mit der mittleren Vorlauftemperatur und der Quellentemperatur nach Kapitel 4.3 und 4.4 bestimmt. Die Abhängigkeit von Jahresarbeitszahl und Temperaturdifferenz ermöglicht die Übertragung der Jahresarbeitszahl auf die Systemtemperaturen nach Kapitel 4.3. Die Hälfte der Anlagen des Feldtests wurden in den Jahren 2014 und 2015 installiert und 84 % in den Jahren 2012 bis 2017. Der Entwicklungsfortschritt der Wärmepumpen bis zum Investitionszeitpunkt 2021 wird durch die Berücksichtigung des oberen Quintils der ermittelten Verhältnisse realisiert. Die resultierenden Jahresarbeitszahlen der Systemtemperaturen im Kapitel 4.3 entsprechen weitgehend den mittleren Jahresarbeitszahlen nach /ISE-09 20/ bei höherer Temperaturspreizung (vgl. Abbildung 4-3).

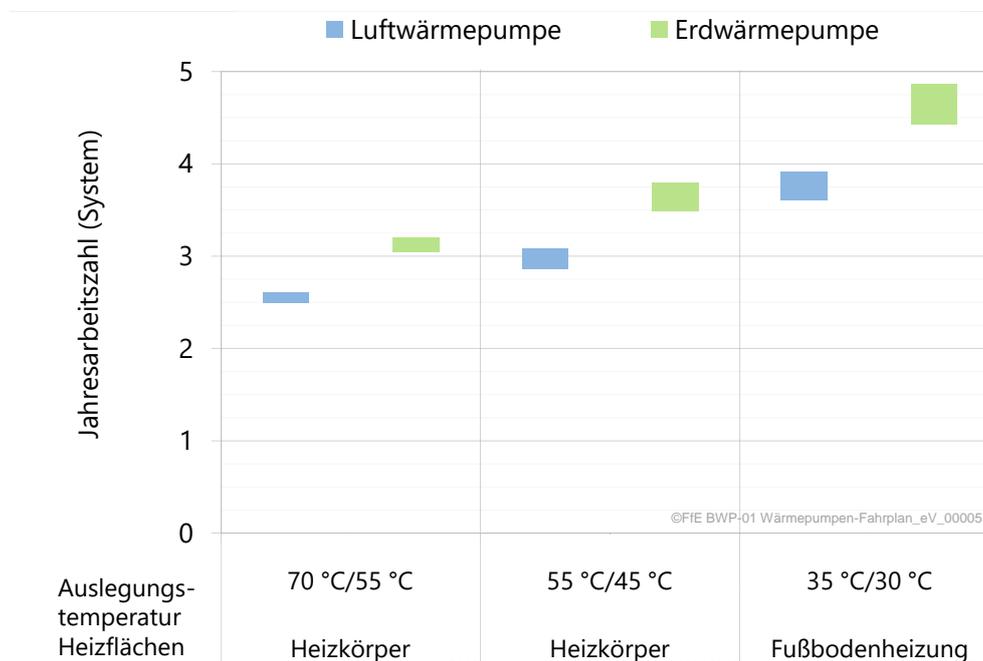


Abbildung 4-3: Angesetzte Jahresarbeitszahl in Abhängigkeit von der Systemtemperatur

Die in Abbildung 4-3 dargestellte Schwankungsbreite zeigt die Unterschiede der Typgebäude bei gleicher Auslegungstemperatur und Wärmequelle. Einerseits variieren der Anteil und die Temperatur der Trinkwarmwasserbereitstellung. Andererseits wird für die Ermittlung der mittleren Vorlauftemperatur je Typgebäude der Standort bzw. das Klima und die Anzahl der repräsentierten Gebäude berücksichtigt. Im Ergebnis weisen ältere Gebäude aufgrund ihres geringeren Trinkwarmwasser-Anteils höhere Jahresarbeitszahlen auf.

5 Kosten des Technologiewechsels

Auf Basis des Wärmebedarfs bzw. der Heizlast (vgl. Kapitel 3.2) und der Jahresarbeitszahl (vgl. Kapitel 4.5) ist im Folgenden die Bewertung der Vollkosten der Wärmeversorgung je Typgebäude beschrieben. Diese erfolgt in Anlehnung an /VDI-06 13/ und differenziert kapitalgebundene, betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten.

5.1 Kapitalgebundene Kosten

Kapitalgebundene Kosten umfassen die einmaligen anfänglichen Ausgaben zur Umstellung auf ein neues Heizsystem und weitere Umfeldmaßnahmen. Als bestehendes Heizsystem wird ein Gasniedertemperaturkessel als die derzeit am weitesten verbreitete Technologie angenommen. Die Kosten für Demontage und Entsorgung der Altanlage bleiben unberücksichtigt, da diese unabhängig von der Modernisierungsoption zu leisten sind. Als Referenz zu den Wärmepumpenanlagen wird ein Gasbrennwertkessel analysiert. Die kapitalgebundenen Kosten sind in die Kategorien Anlage, Heizkörper und Gebäudedämmung unterteilt.

Anlagenkosten

Die Anlagenkosten umfassen Investitionen in:

- Wärmeerzeuger
- Erschließung der Wärmequelle bei Wärmepumpen
- Ertüchtigung des Abgassystems bei Umstellung auf Gasbrennwertkessel
- Planung und Installation inklusive hydraulischer Abgleich

In Abbildung 5-1 sind die verwendeten Kostenfunktionen dargestellt.

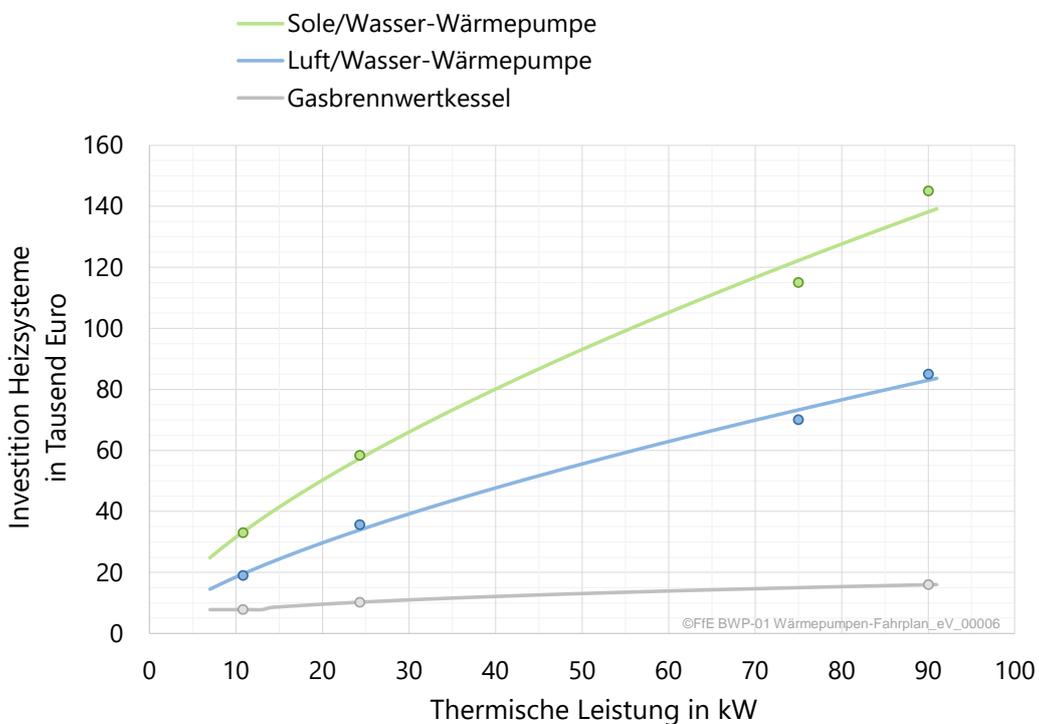


Abbildung 5-1: Gesamte Anlagenkosten nach /BDEW-01 17/ und Expertenbefragungen

Die Anlagenkosten für verschiedene Leistungsgrößen basieren auf /BDEW-01 17/ und Expertenbefragungen. Als Ergebnis einer Regressionsanalyse bildet eine Potenzfunktion diese Werte ab (vgl. Abbildung 5-1).

Heizkörpertausch

Neben dem Heizkörper selbst werden Kosten für Thermostatventile und Rücklaufverschraubungen berücksichtigt. Die Ermittlung erfolgt anhand von Preislisten nach /BUDE-01 19/ in Abhängigkeit von der abzugebenden Heizlast (vgl. Abbildung 5-2).

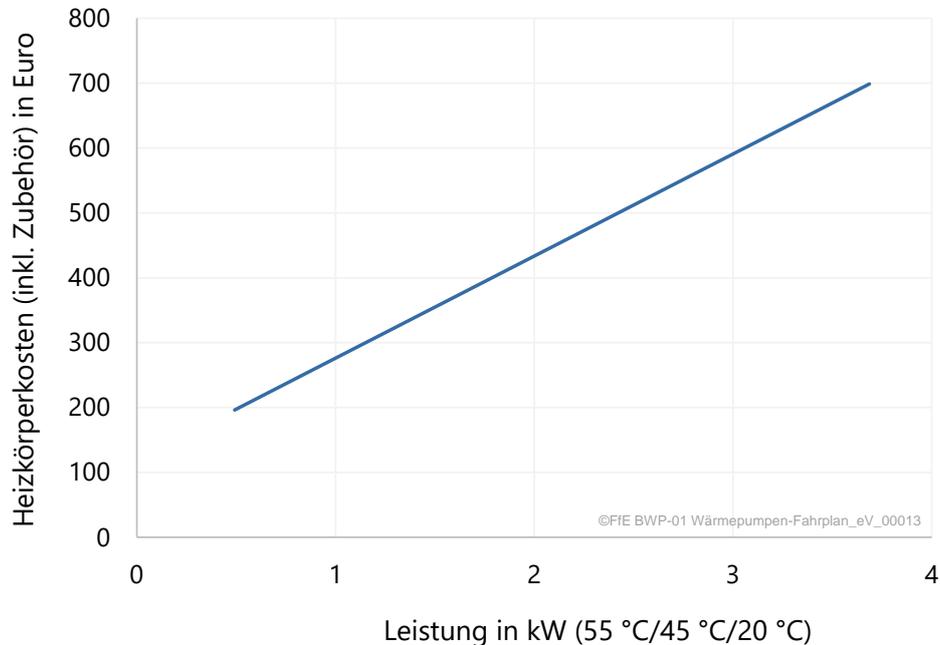


Abbildung 5-2: Kosten für Heizkörper inklusive Thermostatventil und Rücklaufverschraubung /BUDE-01 19/

Die benötigte thermische Leistung basiert auf der Heizlast der Typgebäude und der durchschnittlichen Raumanzahl /DESTATIS-15 13/. Die Dimensionierung der zu installierenden Heizkörper erfolgt für den Auslegungspunkt 55 °C/45 °C. Für den Austausch eines Heizkörpers ist ein Arbeitsaufwand von zwei Stunden je 80 € hinterlegt.

5.2 Verbrauchsgebundene Kosten

Die verbrauchsgebundenen Kosten werden anhand des Wärmeverbrauchs der Typgebäude, der Effizienz der Heizsysteme (vgl. Kapitel 4.5) und der Energieträgerpreise berechnet. Für Erdgas wird ein konstanter Endkundenpreis von 6,31 Ct/kWh nach /BNETZA-25 20/ angesetzt. Zusätzlich ist der CO₂-Preis für fossile Brennstoffe berücksichtigt. Der Strompreis für den Verbrauchsfall Wärmepumpe wird in den Untersuchungen variiert, um den Kippunkt der Wettbewerbsfähigkeit zu ermitteln.

5.3 Betriebsgebundene Kosten

Die betriebsgebundenen Kosten umfassen Ausgaben für Wartung und Reparatur. Nach /VDI-06 13/ betragen diese für Gasbrennwertkessel 1,5 Prozent der Anlagenkosten pro Jahr. Für Wärmepumpen ist in /VDI-06 13/ ebenfalls ein konstanter Wert hinterlegt. Dieser berücksichtigt jedoch nicht die anteilige Degression der Wartungskosten bei größeren Anlagen. Deshalb wird in der Studie ein nach Höhe der Anlagenkosten differenzierter Prozentwert angesetzt. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen bis 10.000 € werden 1,2 % und über 40.000 € 0,3 % angesetzt. Für Sole-Wasser-Wärmepumpen beträgt dieser zwischen 0,5 % und 1,4 % der Anlagenkosten.

6 Kippunkte für den Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudebestand

Die größte Herausforderung für einen flächendeckenden Einsatz von Wärmepumpen ist ihre Wettbewerbsfähigkeit im Umgang mit dem Ungleichgewicht der Energiepreise. Welche Maßnahmen bzw. Anreize sind notwendig, um die Umstellung auf Wärmepumpen finanziell attraktiver zu gestalten? In diesem Kapitel werden Kippunkte identifiziert sowie der Einfluss der Modernisierungsmaßnahmen auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe aufgezeigt.

Kippunkt

Im Folgenden werden je Gebäudetyp die Kippunkte bestimmt, ab welchen der Einsatz von Luft- bzw. Erdwärmepumpen finanziell attraktiv ist. Durch die Variation des CO₂-Preises in drei Szenarien ergeben sich unterschiedliche Kippunkte bezogen auf den Strompreis für den Wärmepumpenbetrieb. Dabei führt ein Anheben des CO₂-Preises dazu, dass sich auch die Kippunkte hin zu höheren Strompreisen verschieben. Bei niedrigeren CO₂-Preisen liegen die Kippunkte hingegen bei niedrigeren Strompreisen (vgl. Abbildung 6-1).

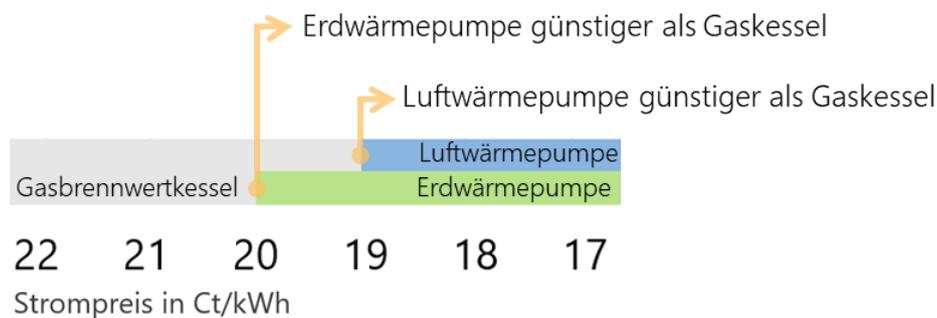


Abbildung 6-1: Schema – Identifikation von Kippunkten

Die jeweiligen Typgebäude stehen für Tausende individuelle Gebäude mit unterschiedlichen Randbedingungen, die (z. B. bezogen auf die Umfeldmaßnahmen) mal vorteilhafter, mal nachteilhafter als der Durchschnitt sind. Die dargestellten Kippunkte sind repräsentative Werte für den Durchschnitt der jeweiligen Gebäudekategorie, sodass es auf beiden Seiten dieser Punkte Fälle gibt, in denen die Umstellung zu Wärmepumpen schon bei höherem Strompreis bzw. erst bei einem niedrigeren Tarif finanziell attraktiv ist. Für die Zielsetzung einer flächendeckenden Transformation ganzer Gebäudeklassen sind daher Energiepreise zu realisieren, welche diesen Kippunkt nicht nur treffen, sondern deutlich überwinden. Als erste Orientierungshilfe dient der mittlere Endkundenpreis des Jahres 2020 in Höhe von 23,6 Ct/kWh /BNETZA-25 20/ sowie der Preis ohne EEG-Umlage in Höhe von 15,6 Ct/kWh. Die genannten Strompreise beziehen sich in der gesamten Analyse auf Wärmepumpentarife, welche nicht mit Haushaltsstromtarifen zu verwechseln sind.

Rahmenbedingungen

Der Vergleich der Gesamtkosten erfolgt auf Basis der in Kapitel 5 beschriebenen Kostenbestandteile und den im Folgenden beschriebenen Annahmen. Der Vergleich erfolgt für den Investitionszeitpunkt 2021 und einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Es ist ein kalkulatorischer Zinssatz von 1 % pro Jahr angesetzt. Als Referenz wird der Wechsel von Gasniedertemperatur auf einen Gasbrennwertkessel mit einem Nutzungsgrad von 92 % (bezogen auf den Brennwert) /ECOINV-01 14/ angenommen. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, wird für Gebäude nach 1995 kein Heizkörperaustausch sowie für vor 1995 errichtete Gebäude ein Anteil auszutauschender Heizkörper von 33 % angenommen. Die Systemtemperatur für den Betrieb der Wärmepumpe liegt somit in allen Fällen bei 55 °C/45 °C. Des Weiteren ist für die Förderung der Wärmepumpe inklusive Umfeldmaßnahmen der Fördersatz von 35 % berücksichtigt /BAFA-02 20/. In einer Sensitivitätsanalyse wird der Anteil auszuwechselnder Heizkörper variiert und bereits teilsanierte Gebäude analysiert.

Szenarien zur Entwicklung des CO₂-Preises

Die aktuelle Regulierung des CO₂-Preises gibt einen definierten Pfad bis zum Jahr 2026 vor. Danach ist eine Preisbildung am Markt vorgesehen /DIE-01 20/. Die mögliche Entwicklung des CO₂-Preises ist in Anlehnung an /EWI-01 19/ durch einen von drei Szenarien aufgespannten Korridor abgebildet (vgl. Abbildung 6-2).

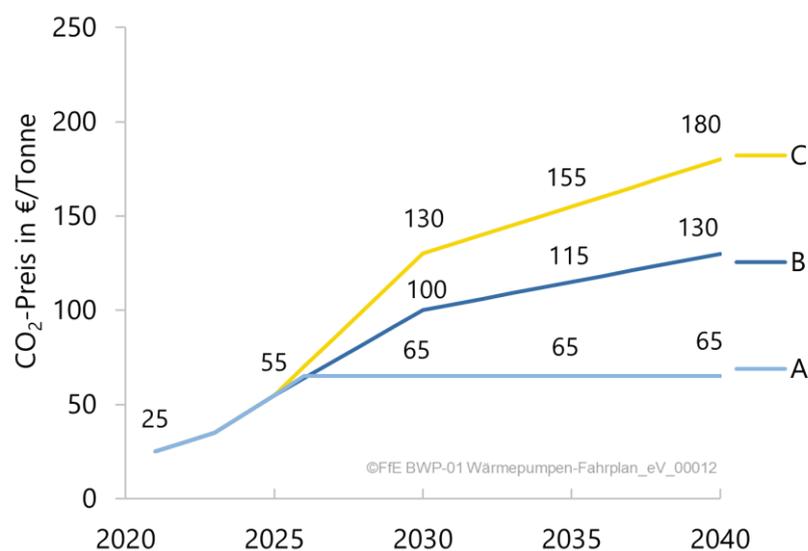


Abbildung 6-2: Szenarien für den CO₂-Preis

Abbildung 6-2 zeigt die drei betrachteten Szenarien für die Entwicklung des CO₂-Preises. Szenario A bildet mit einem Preis von 65 €/t einen auf geringem Niveau stagnierenden CO₂-Preis und damit die untere Grenze des Preiskorridors ab. Szenario B zeigt eine moderate Entwicklung des CO₂-Preises bis zu einer Höhe von 100 €/t im Jahr 2030 auf. Ein starker Anstieg des CO₂-Preises auf 130 €/t im Jahr 2030 ist in Szenario C beschrieben. Dieser Pfad bildet die obere Grenze des aufgespannten Korridors. Ausgehend vom Jahr 2030 erhöht sich der Preis für CO₂-Emissionen in Szenario B jährlich um 3 €/t und in Szenario C um 5 €/t.

6.1 Szenario A – Geringer CO₂-Preis

Szenario A spiegelt die Sicht wieder, welche Verbraucher einnehmen, die eine Steigung des CO₂-Preises ab dem Jahr 2027 nicht antizipieren (vgl. Abbildung 6-2). Aus dieser Perspektive ist ein Anstieg des CO₂-Preises bis auf den aktuell definierten Wert von 65 €/t abschätzbar. Mit diesem konstanten Wert bildet Szenario A den unteren Rand des analysierten CO₂-Preis-Korridors ab.

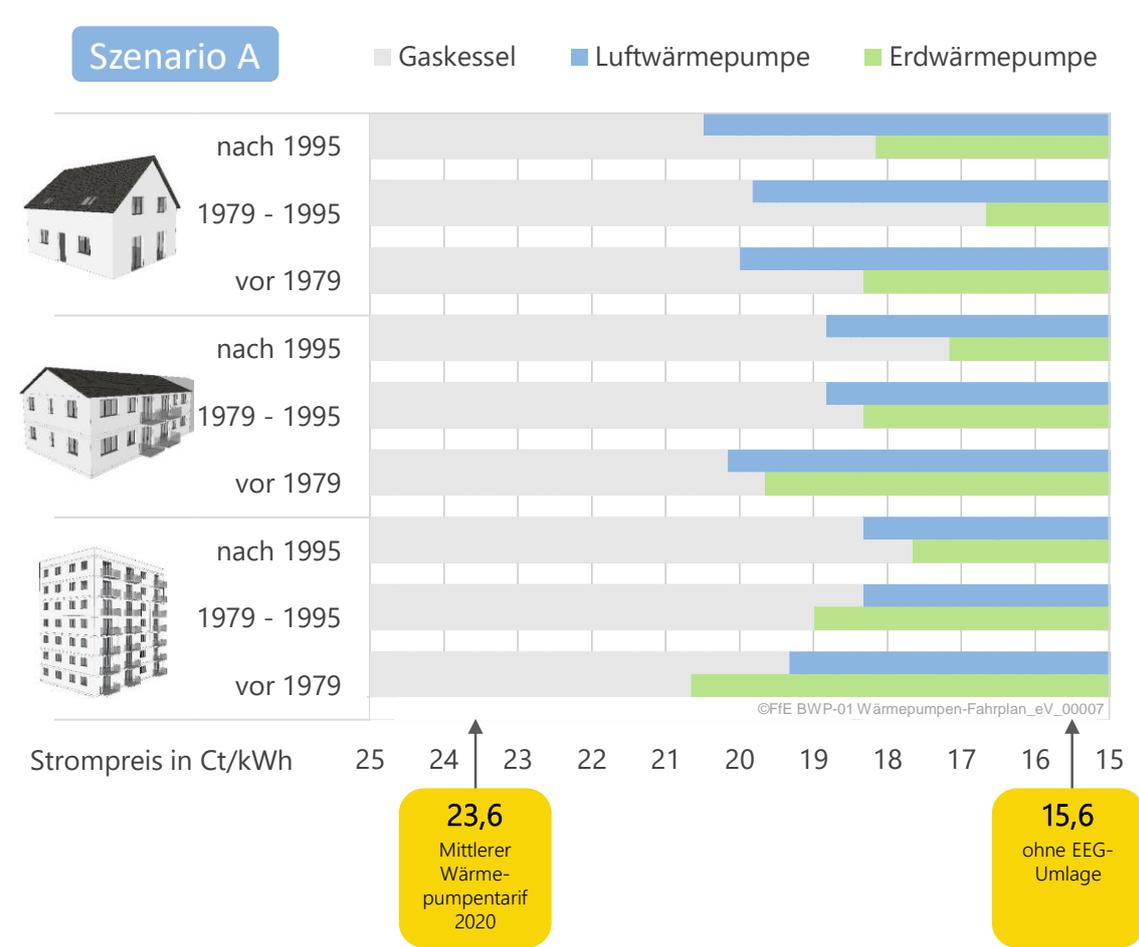


Abbildung 6-3: Kippunkte für Wärmepumpen – Szenario A: 65 €/t CO₂ im Jahr 2030

Abbildung 6-3 zeigt die für Szenario A ermittelten Kippunkte differenziert nach Gebäudetyp und Baualter. Der Strompreis, ab dem die beiden Wärmepumpentypen gegenüber dem Gaskessel für die untersuchten Typgebäude finanziell attraktiver wären, liegt rund 3 bis 7 Ct/kWh unterhalb des aktuellen mittleren Strompreises für Wärmepumpen (23,6 Ct/kWh). Eine Lenkungswirkung ist mit dem aktuellen CO₂-Emissionshandel somit noch nicht gegeben. Positiv gesprochen zeigt die Analyse aber auch, dass sich die Kippunkte bereit durch eine deutliche Absenkung des Strompreises in Höhe der EEG-Umlage überwinden ließen.

Im Binnenverhältnis sind Luftwärmepumpen (blau) tendenziell in Einfamilienhäusern und mittleren Mehrfamilienhäusern attraktiver als Erdwärmepumpen (grün). Umgekehrt ist die Erdwärmepumpe in großen Mehrfamilienhäusern bereits bei höheren Strompreisen im Vorteil gegenüber der Luftwärmepumpe. Große Mehrfamilienhäuser weisen durch einen hohen Anteil an Warmwasser höhere Volllaststunden auf. Dies begünstigt effiziente Technologien wie die Erdwärmesonde.

6.2 Szenario B – Mittlerer CO₂-Preis

In Szenario B steigt der CO₂-Preis bis 2030 auf 100 €/t und bis 2040 auf 130 €/t an (vgl. Abbildung 6-2). Dies stellt für den ab 2026 am freien Markt gebildeten Preis eine moderate Entwicklung innerhalb des analysierten Korridors dar. Voraussetzung für diese Perspektive ist jedoch ein transparenter, planbarer Preispfad, auf dessen Grundlage Verbraucher verlässliche Investitionsentscheidungen treffen können.

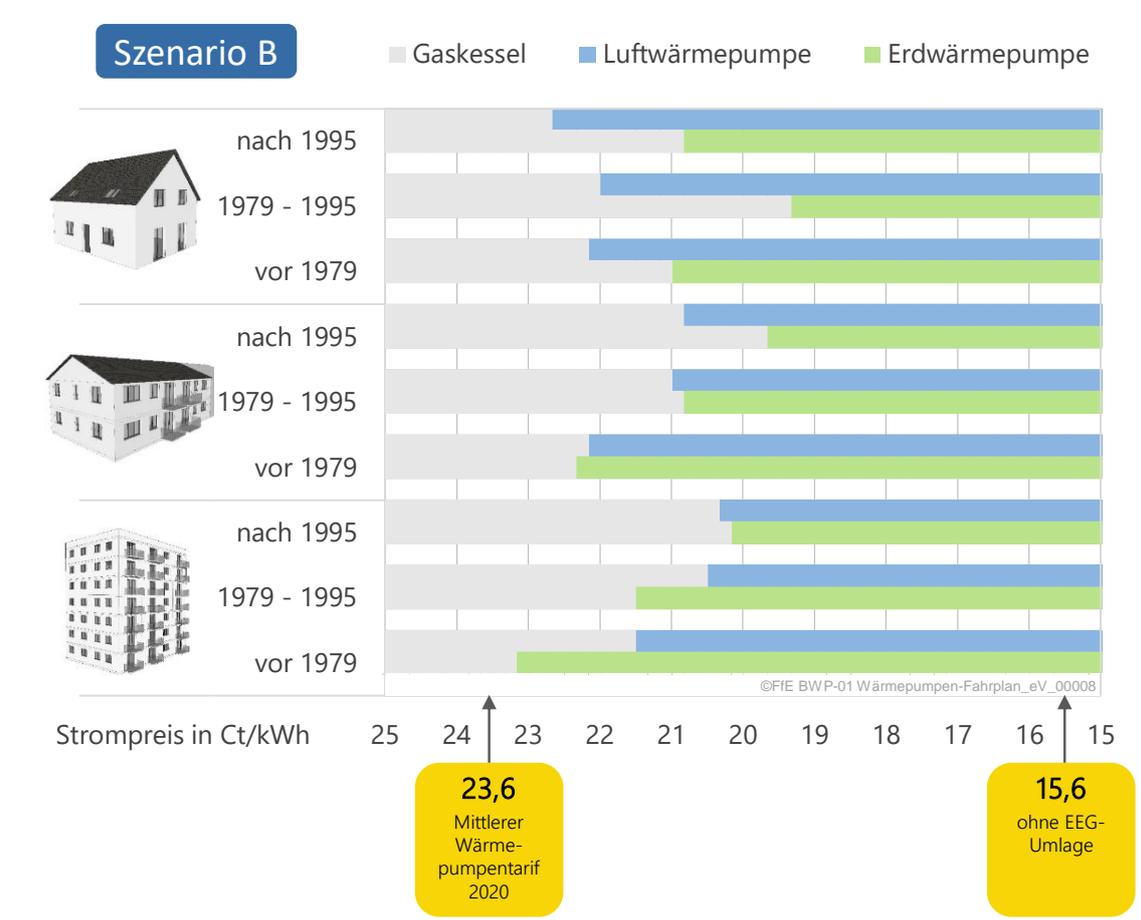


Abbildung 6-4: Kippunkte für Wärmepumpen – Szenario B: 100 €/t CO₂ im Jahr 2030

Im Vergleich zu Szenario A werden Wärmepumpen in Szenario B aufgrund des höheren CO₂-Preises gegenüber dem Gasbrennwertkessel finanziell attraktiver. In Szenario B nähern sich die Kippunkte (vgl. Abbildung 6-4) an den Wärmepumpentarif von 23,6 Ct/kWh an. Eine moderate Steigung des CO₂-Preises wie in diesem Betrachtungsrahmen reicht jedoch alleine nicht aus, um eine flächendeckende Transformation mit Wärmepumpen anzustoßen. Durch eine zusätzliche Absenkung des Strompreises würden hingegen alle Typgebäude ihren jeweiligen Kippunkt überschreiten.

6.3 Szenario C – Hoher CO₂-Preis

Szenario C sieht einen steigenden CO₂-Preis auf 130 €/t bis 2030 vor und stellt damit den oberen Rand des aufgespannten Preiskorridors dar. Die Kosten für eine Wärmeversorgung mit fossilen Energieträgern steigen unter diesen Annahmen also deutlich an.

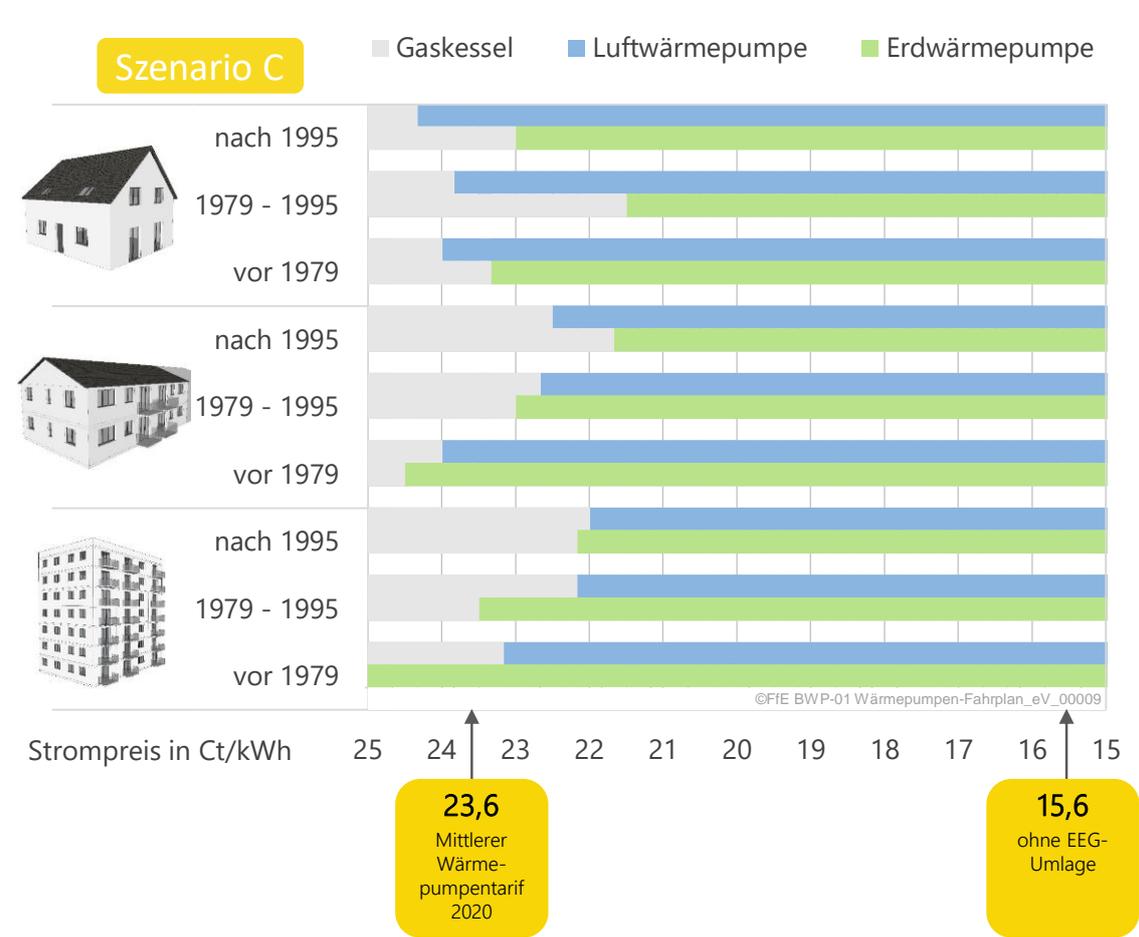


Abbildung 6-5: Kippunkte für Wärmepumpen – Szenario C: 130 €/t CO₂ im Jahr 2030

Durch den in Szenario C abgebildeten CO₂-Preis ist selbst ein Wärmepumpentarif von 23,6 Ct/kWh bereits für einzelne Typgebäude und Wärmequellen finanziell attraktiver als die Referenz. Ab einem mittleren Strompreis unter 21,5 Ct/kWh werden Wärmepumpen großflächig finanziell attraktiv. Dieses Szenario zeigt also: Ohne eine Strompreisentlastung ermöglicht erst ein sehr hoher CO₂-Preis einen flächendeckenden Technologiewechsel.

6.4 Sensitivitätsanalyse

Ergänzend zu den beschriebenen Ergebnissen sind im Folgenden für das CO₂-Preis-Szenario B der Anteil der zu tauschenden Heizkörper und der Sanierungszustand der Gebäude variiert.

Heizkörpertausch

Um Systemtemperaturen von 55 °C/45 °C in Gebäuden mit einem Baualter „vor 1995“ zu realisieren, muss meist das Wärmeverteilsystem angepasst werden. Dazu wird ein Teil der Heizkörper, begonnen mit dem am kleinsten dimensionierten, ausgetauscht. Im Einzelfall kann der Anteil der zu tauschenden Heizkörper, um die maximale Systemtemperatur von 55 °C zu erreichen, stark variieren. Für die Ergebnisse in Kapitel 6 werden Kosten zum Tausch von 33 % der vorhandenen Heizkörper angesetzt. Die Sensitivität dieser Annahme für das Einfamilienhaus ist in Abbildung 6-6 für das CO₂-Preis-Szenario B dargestellt.

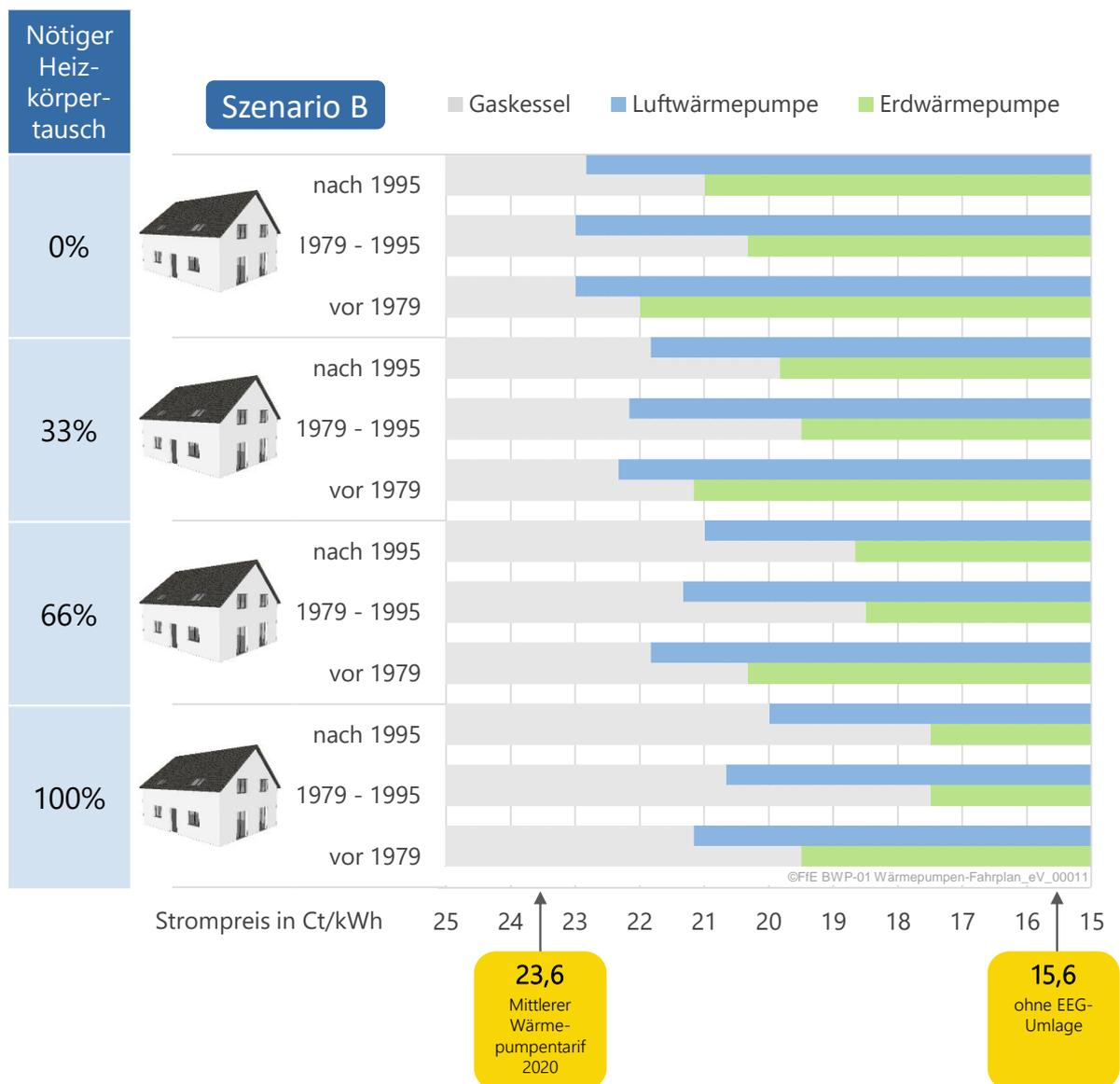


Abbildung 6-6: Kippunkte für Wärmepumpen – Sensitivität Heizkörpertausch (Szenario B)

In Abgrenzung zu Abbildung 6-3 bis Abbildung 6-5 wird der Gebäudetyp in Abbildung 6-6 nicht variiert. Die Variation des Anteils zu tauschender Heizkörper, um eine Dimensionierung von 55 °C/45 °C zu erreichen, bedeutet eine Schwankungsbreite von 2 Ct/kWh. D. h. Gebäude, deren Heizkörper überdimensioniert sind, werden für einen Technologiewechsel finanziell früher attraktiv.

Teilsanierte Gebäude

Je älter Gebäude sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass bereits Maßnahmen zur Gebäudedämmung durchgeführt wurden. Über alle Gebäudekategorien hinweg wurden bereits rund 7,1 Millionen von 18,5 Millionen Wohngebäuden in Deutschland teilsaniert /FFE-69 19/. In alten Einfamilienhäusern wurde bereits bei über der Hälfte aller Gebäude eine Teilsanierung durchgeführt. Diese Gebäude haben einen geringeren Wärmeverbrauch und eine geringere Heizlast als unsanierte Gebäude. Die Vollkosten der Wärmeversorgung reduzieren sich sowohl für Wärmepumpen als auch für die Referenztechnologie. Die Teilsanierung hat einen Einfluss auf den Kippunkt der Wärmepumpen von etwa 0,5 bis 2,0 Ct/kWh (vgl. Abbildung 6-7).

Gebäude der Baualtersklasse „nach 1995“ wurden bisher selten teilsaniert, weshalb dieser Fall nicht analysiert wird. In Abbildung 6-7 sind für die Baualtersklasse „nach 1995“ stattdessen die Ergebnisse der unsanierten Gebäude dargestellt.

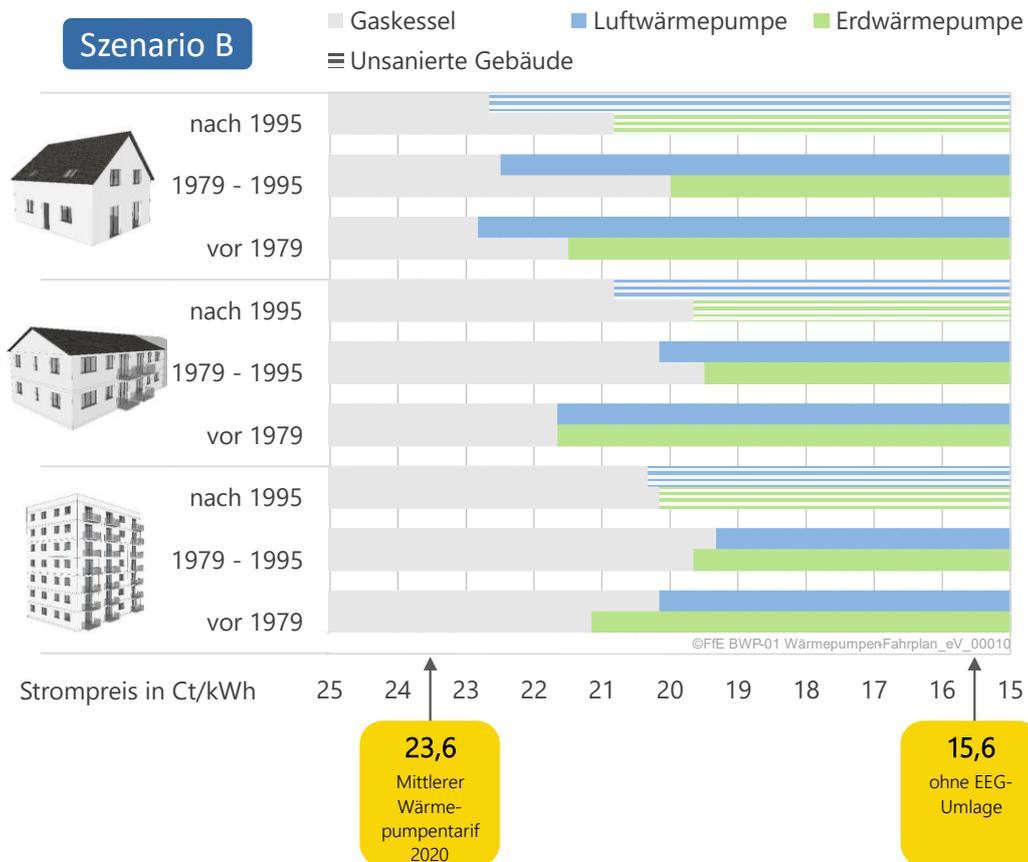


Abbildung 6-7: Kippunkte für Wärmepumpen – Sensitivität teilsanierte Gebäude (Szenario B)

Im Vergleich zu unsanierten Gebäuden (vgl. Abbildung 6-4) verschieben sich die Kippunkte in Abhängigkeit vom Gebäudetyp. In Einfamilienhäusern wird die Wärmepumpe attraktiver, da die Anlagekosten des Gaskessels unter 13 kW konstant sind. In Mehrfamilienhäusern, die bereits teilsaniert wurden, ist hingegen ein niedrigerer Strompreis erforderlich als in unsanierten Mehrfamilienhäusern, um die Investitionskosten im Laufe des Betrachtungszeitraums zu amortisieren.

7 Fazit

Der Technologiewechsel von Heizsystemen mit fossilen Brennstoffen hin zu elektrischen Wärmepumpen ist ein zentraler Baustein zur Erreichung der Klimaziele im Gebäudesektor. Die Studie analysiert die wirtschaftlichen Grundlagen für einen massenfähigen Einsatz von Wärmepumpen im gesamten Gebäudebestand. Auf Basis energetischer Eigenschaften der Gebäudetypen und Baualtersklassen fokussiert sich die Analyse auf wirtschaftliche Kippunkte zugunsten von Wärmepumpen im Vergleich zur Installation von Gasbrennwertkesseln. Der Vergleich erfolgt differenziert nach drei Gebäudetypen, unterteilt in je drei Baualtersklassen. Um die Vollkosten aus Sicht von Gebäudeeigentümern zu bewerten, werden Endkundenpreise sowie Förderungen berücksichtigt. Hierbei entspricht die Höhe der Investitionsförderung den aktuellen Bedingungen der Bundesförderung für effiziente Gebäude. Vor diesem Hintergrund sind die zwei größten Stellhebel des finanziellen Vergleichs der CO₂-Preis und der Wärmepumpentarif. Ab dem Jahr 2027 ist für CO₂ eine Preisbildung am Markt vorgesehen. Um die Lenkungswirkung des CO₂-Preises zu bewerten, wird anhand von drei Szenarien ein Korridor aufgespannt. Szenario A stellt einen stagnierenden Preis von 65 Euro pro Tonne CO₂ dar. In Szenario B steigt dieser auf 100 € im Jahr 2030 und auf 130 € im Jahr 2040. Einen schnelleren Anstieg des CO₂-Preises (180 € in 2040) bildet Szenario C ab. Je Szenario, Typgebäude und Wärmepumpentechnologie wird ein Strompreis (Kippunkt) ermittelt, ab dem die Wärmepumpe geringere Vollkosten als der Gasbrennwertkessel aufweist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die aktuellen Energiepreise einen großflächigen Technologiewechsel vieler Bestandsgebäude hin zu Wärmepumpen noch nicht ausreichend ermöglichen. Zuvorderst besteht über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren große Unsicherheit hinsichtlich der Energiepreisentwicklung. Aus der Sicht der Endkunden sind weder die Höhe der CO₂-Preise ab dem Jahr 2027 noch die in Aussicht gestellten Strompreisentlastungen kalkulierbar. Durch die Wirtschaftlichkeitsanalysen wird zudem deutlich, dass der aktuelle CO₂-Preis in den nächsten Jahren auch aufgrund seiner Höhe keine hinreichende Lenkungswirkung im Wärmemarkt entfaltet (Szenario A). Erst im Zusammenwirken mit einer deutlichen Strompreisentlastung, z.B. in Höhe der EEG-Umlage, werden Kippunkte in der Breite der Gebäudetypen überwunden, und ein massenhafter Wechsel zu Wärmepumpen wirtschaftlich günstiger als der Verbleib bei fossilen Energieträgern. Alternativ würde auch eine moderate Anhebung beim CO₂-Preis und eine entsprechende Transparenz für Verbraucher über die zu erwartenden CO₂-Preise für eine stärkere wirtschaftliche Attraktivität von Wärmepumpen sorgen. Allerdings würden die entsprechenden Kippunkte erst im Zusammenwirken mit einer zusätzlichen Strompreisentlastung überwunden (Szenario B). Ein noch stärkeres Anwachsen des CO₂-Preises würde diese Kippunkte zwar ebenfalls überwinden. Doch wäre dieser Preispfad zugleich mit derartigen Kosteneffekten beim Heizen mit Öl und Gas verbunden, dass eine Kompensation, wie etwa über den Strompreis, ohnehin aus sozioökonomischen Gründen erforderlich wäre (Szenario C). Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde deutlich, dass viele Gebäude nochmals vorteilhaftere Randbedingungen für den Einsatz von Wärmepumpen aufweisen. Das betrifft insbesondere teilsanierte Einfamilienhäuser sowie Modernisierungsfälle, in denen für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb weniger als 33 % der Heizkörper ausgetauscht werden müssen.

8 Literatur

- AGEB-02 13 Ziesing, Hans-Joachim; Rohde, Clemens: Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012. Berlin: AG Energiebilanzen e.V., 2013
- AGORA-07 20 Klimaneutrales Deutschland - In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Berlin: Agora Energiewende, 2020.
- BAFA-01 14 Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), 2014
- BAFA-02 20 Merkblatt zu den förderfähigen Kosten. Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2020.
- BDEW-10 10 Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2010.
- BDEW-01 17 Oschatz, Bert; Mailach, Bettina: BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2017 - Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Altbauten. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., 2017
- BDH-02 15 Gesamtbestand zentrale Wärmeerzeuger 2014 in: http://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Daten_Fakten/BDH_Info_Grafik_Anlagenbestand_2014.pdf (Abgerufen am 10.01.2016). Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie, 2015
- BDH-02 16 10 Jahresverlauf Absatz Wärmeerzeuger Deutschland - Marktentwicklung Wärmeerzeuger 2005-2015. Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V., 2016
- BDH-02 17 10 Jahresverlauf Absatz Wärmeerzeuger Deutschland - Marktentwicklung Wärmeerzeuger 2006-2016 in: <http://www.bdh-koeln.de/presse/daten-fakten.html> (Abruf: 04.10.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6txrNkbDM>). Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V., 2017
- BMU-02 16 Energieeinsparverordnung (EnEV). In: <http://www.bmu.de/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-und-sanieren/energieeinsparverordnung/>. (Abruf am 2018-04-19); Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2016.
- BMU-02 21 Bundes-Klimaschutzgesetz. Ausgefertigt am 2019-12-12, Version vom 2021-07-07; Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2021.
- BMVBS-05 12 Fisch, Norbert et al.: Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden - BMVBS-Online-Publikation, Nr. 11/2012. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2012.
- BMWI-22 20 Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GEG). Ausgefertigt am 2020-08-08; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2020.

- BNETZA-25 20 Monitoringbericht 2020. Bonn: Bundesnetzagentur, 2020.
- BUDE-01 19 Buderus Preisliste - 2019 - Teil 5 - Heizflächen und Fußbodenheizungen. Wetzlar: Buderus, 2019.
- DENA-116 17 Hecking, Harald et al.: Gebäudestudie - Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017.
- DESTATIS-15 13 Zensusdatenbank des Zensus 2011: <https://ergebnisse.zensus2011.de/>; Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2013.
- DESTATIS-01 17 Mikrozensus - Zusatzerhebung 2014 - Sonderauswertung: Bewohnte Wohnungen nach Art der Nutzung, Gebäudegröße, Baujahr und Beheizung - Sammelheizungen disaggregiert. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2017
- DESTATIS-09 19 Mikrozensus - Zusatzerhebung 2018: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2019.
- DIE-01 20 Grundlage für CO₂-Preis steht - Einstieg in CO₂-Bepreisung. In: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/nationaler-emissionshandel-1684508>. (Abruf am 2020-06-10); Berlin: Die Bundesregierung, 2020.
- DIN-02 07 DIN 4701 - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normen e. V., 2007
- DÜSLG-01 55 Wintermonate im Rheinland: Heizperiode von Oktober bis April. In: Monatsschrift für deutsches Recht 1955, 293/rb. Düsseldorf: Landgericht Düsseldorf, 1955.
- ECON-01 18 Lambrecht, Klaus: Einsparungen von Endenergie und CO₂ beim Ersetzen alter Heizkessel durch Brennwertkessel - eine detaillierte Betrachtung von Einsparpotentialen in Abhängigkeit der Ausgangslage. Rottenburg: ECONSULT Lambrecht Jungmann Partnerschaft Physiker und Ingenieur, 2018.
- EFK-01 21 Henning, Hans-Martin et al.: Bericht zur Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020 - Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz. Freiburg: Expertenrat für Klimafragen, 2021.
- EWI-01 19 Wagner, Johannes et al.: Auswirkungen von CO₂-Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor - Im Auftrag der E.ON SE, Kurzstudie Oktober 2019. Köln, Aachen: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (EWI), 2019.
- FFE-03 19 Pichlmaier, Simon et al.: Development of Application-Related Emissions in the Course of the German Energy Transition. In: IEWT 2019 11. Internationale Energiewirtschaftstagung. Wien: TU Wien, 2019.
- FFE-69 19 Fattler, Steffen; Conrad, Jochen; Regett, Anika et al.: Verbundprojekt Dynamis - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. Online: <https://www.ffe.de/dynamis>. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Technische Universität München, 2019.

- FIEE-01 19 Ganal, Irina et al.: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien - Teilbericht. Kassel: Fraunhofer IEE, 2019.
- GZB-01 10 Platt, Michael; Exner, Stepha; Bracke, Rolf: Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends. Bochum: Geothermiezentrum Bochum, 2010
- HILE-01 12 Sunikka-Blank, Minna et al.: Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. Cambridge: Department of Architecture, University of Cambridge, 2012.
- HOFFM-01 17 Hoffmann, Caroline et al.: Dem Prebound Effekt auf der Spur - Differenzen zwischen dem Heizwärmeverbrauch und dem rechnerisch ermittelten Heizwärmebedarf bei Bestandsgebäuden (Wohnen). Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2017.
- IFE-01 03 Hellwig, Mark: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile - Dissertation. München: Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 2003
- ISE-07 20 Strechele, Philip et al.: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2020.
- ISE-09 20 Günther, Danny et al.: Wärmepumpen in Bestandsgebäuden - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPSmart im Bestand". Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020.
- IWU-01 10 Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter: Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 2010
- IWU-04 12 Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus; et al.: TABULA - Scientific Report Germany - Further Development of the German Residential Building Typology. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2012
- IWU-01 17 TABULA WebTool. In: <http://webtool.building-typology.eu/#bm>. (Abruf am 2018-03-03); Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt, 2017.
- JC-01 20 Conrad, Jochen: Modellierung und Bewertung von Maßnahmen zur kosteneffizienten CO₂-Verminderung im Sektor private Haushalte. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München - Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, geprüft von Wagner, Ulrich und Auer, Thomas: München, 2020.
- SCHROE-01 14 Schröder, Franz et al.: Reale Trends des spezifischen Energieverbrauchs und repräsentativer Wohnraumtemperierung bei steigendem Modernisierungsgrad im Wohnungsbestand. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2014.
- STUER-01 21 Fietze, Daniela et al.: Stiftung Spezial #Klimaschutzgesetz - Analyse und Einordnung der Entscheidung des Bundesverfassungsgerichts. Würzburg: Stiftung Umweltenergierecht, 2021.

- UBA-14 17 Kemmler, Andreas et al.: Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014 - Endbericht. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt, 2017.
- VDB-01 03 Münzenberg, Uwe et al.: Luftwechsel im Gebäudebestand - Natürlicher Luftwechsel, Fensterlüftung und die Notwendigkeit von Lüftungskonzepten. Fürth: Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB e.V., 2003.
- VDI-06 13 VDI 2067 - Energieaufwand für die Erzeugung in: VDI-Richtlinien. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013
- ZIV-01 16 Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2016. Sankt Augustin: Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV), 2016
- ZUB-01 09 Klauf, Swen et al.: Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten - 2., berichtigte Version. Kassel: Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., 2009.

9 Anhang

Tabelle 9-1: Datenanhang

Gebäudetyp	Baualter	Energetische Kennzahlen		Anlagentechnik			Heizkörper-tausch in Tausend €	Dämmung in Tausend €	Jahresarbeitszahl					
		Heizlast in kW	Wärmebedarf in MWh/a	Gasbrenn- wertkessel in Tausend €	Erdwärme- pumpe in Tausend €	Luftwärme- pumpe in Tausend €			70 °C/55 °C		55 °C/45 °C			
									Erdwärme- pumpe	Luftwärme- pumpe	Erdwärme- pumpe	Luftwärme- pumpe		
Einfamilien- haus	Nach 1995	7	15	8	26	15	1,3	-	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0
	1979 – 1995	10	20	8	31	18	1,4	29	3,2	2,6	3,2	2,6	3,8	3,1
	Vor 1979	11	25	8	33	19	1,4	56	3,2	2,6	3,2	2,6	3,8	3,1
Kleines Mehrfamilien- haus	Nach 1995	16	32	9	44	26	3	-	3,5	2,9	3,5	2,9	3,5	2,9
	1979 – 1995	18	41	9	46	27	3	71	3,1	2,6	3,1	2,6	3,6	3,0
	Vor 1979	21	50	10	52	31	3,2	124	3,2	2,6	3,2	2,6	3,7	3,1
Mittleres Mehrfamilien- haus	Nach 1995	30	58	11	67	40	5,9	-	3,5	2,9	3,5	2,9	3,5	2,9
	1979 – 1995	35	76	12	74	44	6,1	136	3,1	2,5	3,1	2,5	3,5	2,9
	Vor 1979	38	90	12	77	46	6,2	236	3,1	2,6	3,1	2,6	3,7	3,0
Großes Mehrfamilien- haus	Nach 1995	74	118	15	121	73	14	-	3,5	2,9	3,5	2,9	3,5	2,9
	1979 – 1995	89	170	16	137	82	14,6	322	3,0	2,5	3,0	2,5	3,5	2,9
	Vor 1979	91	199	16	139	83	14,7	559	3,1	2,5	3,1	2,5	3,6	2,9