

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen der energetischen Gebäudesanierung

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses	5
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	15
2 Reduktionsziele und Erfassung von Reduktion und Wirtschaftlichkeit	17
2.1 Endenergie, Primärenergie und THG-Emissionen.....	17
2.2 Reduktionsziele der Bundesregierung	18
2.3 Erfassung der Endenergie für einzelne Gebäude	18
2.3.1 Energieverbrauch und -bedarf.....	18
2.3.2 Energy Performance Gap.....	19
2.3.3 Energieeffizienzmaße für Heizungen.....	19
2.3.4 Wärmeverlust von Gebäuden.....	20
2.4 Wirtschaftlichkeitsabschätzungen.....	20
2.4.1 Kosten-Nutzen-Betrachtung aus der Wohngebäudeeigentümersperspektive	21
2.4.2 Vollkosten, energiebedingte Mehrkosten, Jahreskosten, CO ₂ -Vermeidungskosten	21
2.4.3 Volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Betrachtungen.....	22

	Seite
3	
Wohngebäudebestand und Maßnahmen an Gebäudetechnik und Gebäudehülle	23
3.1 Wohngebäudebestand und Typgebäude.....	23
3.1.1 Wohngebäudebestand	23
3.1.2 Repräsentative Typgebäude	23
3.2 Bestand und Maßnahmen an der Gebäudetechnik	25
3.2.1 Hauptwärmeerzeuger	25
3.2.2 Zusatzherzeuger, Qualitätssicherung, Betriebsoptimierung, Peripherie	28
3.3 Maßnahmen an der Gebäudehülle.....	28
4	
Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit für das einzelne Gebäude.....	30
4.1 Energie- und THG-Einsparung durch Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle	30
4.1.1 Austausch des Hauptwärmeerzeugers.....	30
4.1.2 Einbindung zusätzlicher Erzeuger und Technologien sowie Anpassung der Peripherie	34
4.1.3 Qualitätssicherung und Systemoptimierung	38
4.1.4 Integration von digitalen, intelligenten und vernetzten Technologien im Gebäude	38
4.1.5 Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle	40
4.2 Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle	42
4.2.1 Austausch des Hauptwärmeerzeugers.....	43
4.2.2 Einbindung zusätzlicher Erzeuger und Lüftungsanlage sowie Anpassung der Peripherie	46
4.2.3 Qualitätssicherung und Systemoptimierung	51
4.2.4 Integration von digitalen, intelligenten und vernetzten Technologien in den Gebäudebestand	51
4.2.5 Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle	52
4.3 Gegenüberstellung der Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit.....	55
5	
Beiträge der Maßnahmen zur Zielerreichung der Energie- und Klimapolitik	61
5.1 Szenariostudien.....	61
5.1.1 Überblick	61
5.1.2 Elektro- und Technologiemitpfade	63

	Seite
5.2	Ausgangspunkte und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung..... 63
5.2.1	Entwicklung der Wohngebäude und verfügbaren Wohnflächen..... 63
5.2.2	Entwicklung der Energiepreise 63
5.2.3	Verbreitung der Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) 65
5.2.4	Entwicklung der Peripherie und Zusatzerzeuger 67
5.2.5	Entwicklung des Sanierungsverhaltens bezogen auf die Gebäudehülle 70
5.3	Mögliche zukünftige Einspareffekte in Deutschland..... 74
5.3.1	Vorbemerkungen 74
5.3.2	Anteile der Heiztechnologien am Energieverbrauch und den THG-Emissionen 75
5.3.3	Anteile der Energieträger und Anwendungsbereiche am Energieverbrauch..... 78
5.3.4	Emissionsreduktionen für einen beschleunigten Elektropfad 81
5.4	Wirtschaftlichkeit der Entwicklungspfade..... 82
6	Handlungsoptionen 84
6.1	Sanierungsanforderungen und Förderung..... 84
6.2	Energieverbrauchsmonitoring..... 84
6.3	Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung..... 85
6.4	Energiepreise 86
7	Literatur 87
7.1	In Auftrag gegebenes Gutachten..... 87
7.2	Weitere Literatur..... 87
8	Anhang 95
8.1	Abbildungen..... 95
8.2	Tabellen 99

Vorwort des Ausschusses

Der Energieverbrauch im Gebäudebereich speist sich nach wie vor zum größten Teil aus den fossilen Energiequellen Gas und Öl. Viele Heizungen in deutschen Wohngebäuden sind älter als 20 Jahre und aus energetischer Sicht austauschbedürftig. Auch wenn ein Trend hin zur Energieeinsparung zu verzeichnen ist, werden vorhandene Energieeinsparpotenziale nicht ausgeschöpft.

Das energiepolitische Zieldreieck mit seinen Eckpunkten Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit ist in seiner Bedeutung heute aktueller denn je: Steigende Energiepreise für Heizen, Strom und Warmwasserbereitung stellen immer mehr Haushalte und Unternehmen vor hohe Herausforderungen. Der Klimawandel wird auch in Deutschland durch steigende Durchschnittstemperaturen und Extremwetterereignisse spürbar; die hervorgerufenen Schäden nehmen zu. Und der Krieg in der Ukraine hat nicht zuletzt auch die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen in den Blickpunkt von Politik und Öffentlichkeit gerückt.

Zwar ist ein Bewusstsein für die Notwendigkeit von Energiesparmaßnahmen und eine Dekarbonisierung im Gebäudesektor in weiten Teilen der Bevölkerung vorhanden. Allerdings sind diese Maßnahmen im Gebäudebereich in der Regel mit hohen Investitionskosten verbunden, die sich nur in sehr langen Zeiträumen amortisieren. Hier kann die Politik fördernd und gestaltend ansetzen.

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag – auf Initiative des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung – das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit einer Untersuchung zu Energiesparpotenzialen im Gebäudesektor beauftragt. Erhoben werden sollte, welche Einsparungen an Energie und Treibhausgasemissionen mit einer Erneuerung der Gebäudetechnik (vor allem dem Erwerb einer neuen Heizung) und mit einer Gebäudesanierung erzielt werden können. Diesen Fragen wird im resultierenden Bericht des TAB nicht nur aus der Perspektive der einzelnen Wohngebäudeeigentümer nachgegangen, sondern auch in Form einer Betrachtung der gesamtwirtschaftlichen Effekte in Deutschland. Berücksichtigt wurde in der Analyse eine Vielzahl von Technologien, wie Heizkessel, Wärmepumpen, Solarthermie- und Photovoltaikanlagen und auch energieeffiziente Lüftungssysteme. Deren Potenziale werden in ihrem Zusammenwirken mit Sanierungen der Gebäudehülle und Maßnahmen der Qualitätssicherung sowie unter Berücksichtigung maßgeblicher Rahmendaten zum Gebäudebestand, zu den Emissionen und den anfallenden Kosten analysiert und diskutiert.

Als Resultat liegen verlässliche Resultate und Erkenntnisse für Energieeffizienz- und Dekarbonisierungsmaßnahmen für Gebäude vor, die Privathaushalten und Gebäudewirtschaft gleichermaßen zugutekommen können. Die vorliegenden Erkenntnisse können darüber hinaus den aktuellen gesetzgeberischen Initiativen des Deutschen Bundestages zur weiteren Ausgestaltung von Maßnahmen der Gebäudesanierung an der Schnittstelle von Energieeffizienz und Klimaschutz dienen.

Berlin, den 6. April 2022

Kai Gehring
Vorsitzender

Dr. Holger Becker
Berichtersteller

Lars Rohwer
Berichtersteller

Laura Kraft
Berichterstellerin

Prof. Dr. Stephan Seiter
Berichtersteller

**Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Kaufmann**
Berichtersteller

Ralph Lenkert
Berichtersteller

Lydia Illge
Norbert Krauß

**Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen
der energetischen Gebäudesanierung**

Endbericht zum TA-Projekt

»Energiespareffekte im Gebäudesektor«

TAB-Arbeitsbericht Nr. 200

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Zusammenfassung

Aus energie- und klimapolitischer Sicht kommt der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) im Gebäudebereich hohe Bedeutung zu. Insbesondere im Wohngebäudebestand werden hohe Einspareffekte gesehen. Um hier Investitionsmittel und Fördergelder wirksam und effizient einzusetzen sowie einen unterstützenden politischen Rahmen zu geben, bedarf es robuster und realistischer Daten bezüglich der erzielbaren Energieeinspar- und THG-Minderungen, d. h. im Wesentlichen Minderungen an CO₂-Emissionen, die aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe resultieren.

Mit dem vorliegenden TAB-Arbeitsbericht wird aufgezeigt, welche Einsparungen mit den unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudetechnik (vor allem Heizungen) und der Gebäudehülle erzielt werden. Dabei wird herausgestellt, unter welchen politisch gestaltbaren Rahmenbedingungen die jeweiligen Effekte auftreten (können). Um den Fragen nach den Einspareffekten und der Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen wissenschaftlich nachzugehen, werden zwei Perspektiven eingenommen: Zum einen die Mikroperspektive, also die Perspektive der Gebäudeeigentümer/innen. Diese stellen die (potenziellen) Investoren in mehr oder weniger energie- und treibhausgassparende Technologien und Sanierungsmaßnahmen dar und treffen unter den gegebenen Rahmenbedingungen ihre Investitionsentscheidungen. Zum anderen die Makroperspektive, bei der die Einspareffekte bei Energie und Treibhausgasen aus einer übergeordneten Perspektive betrachtet werden, die sich auf Deutschland bezieht. Hierbei handelt es sich u. a. um die Perspektive von Politikentscheider/innen, die Förderprogramme für Heiztechnologien und Sanierungsmaßnahmen initiieren und ausgestalten oder auch mittels Steuern und anderer Politikinstrumente die zukünftigen Energiepreise prägen. Aus einer Makroperspektive wird auch aufgezeigt, inwieweit (und unter welchen Bedingungen) die energie- und klimapolitischen Ziele mit den betrachteten Sanierungsmaßnahmen erreichbar erscheinen.

Betrachtete Technologien und Sanierungsmaßnahmen

Der aktuelle Bestand an Heizkesseln in den Wohngebäuden in Deutschland wird überwiegend mit Erdgas und Heizöl betrieben. Weitere Wärmeerzeuger sind Wärmepumpensysteme, die in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen haben. Sie verbrauchen neben Umweltenergie (z. B. Erdwärme) oder Abwärme auch stets Strom. Technologien, die im Kontext der energetischen Gebäudeverbesserung ebenfalls zum Einsatz kommen, sind Solarthermie- und Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen), die Wärme und Strom bereitstellen können, sowie Lüftungsanlagen mit einer Wärmerückgewinnung. Letztere führen bei angepasster Nutzung und mit Qualitätssicherung in Planung und Ausführung zu weniger Wärmeverlusten als eine manuelle Fensterlüftung und nutzen die in der Abluft enthaltene Wärme zur teilweisen Deckung des Wärmebedarfs der Räume.

Die energetischen Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle können in die Dämmung der Außenwand, der obersten Geschossdecke, des Daches, der Kellerdecke und der Bodenplatte sowie den Austausch der Fenster unterteilt werden. Ziel der energetischen Sanierungsmaßnahmen ist es, Wärmeverluste über die verschiedenen Teile der Gebäudehülle zu reduzieren. Wie hoch diese Verluste ausfallen, hängt von der Beschaffenheit der Gebäudehülle, den Umweltbedingungen und den Flächengrößen ab. Die größten Wärmeverluste treten bei gleichem Sanierungsgrad an Außenwänden auf, gefolgt vom Dach bzw. der obersten Geschossdecke.

Einen besonderen Einfluss auf die Einspareffekte hat die Qualitätssicherung bei baulichen Maßnahmen, die beispielsweise der Behebung bzw. Vermeidung von Mängeln (z. Wärmebrücken und Luftdichtheit) dienen. Zur Qualitätssicherung bezogen auf Heiz-, Kühlungs- und Lüftungstechnologien gehören beispielsweise der hydraulische Abgleich (Optimierung der Wasservolumenströme in Heizungsrohren und an Heizflächen) und die optimierte Systemtemperatur von Heizungsanlagen.

Ursachen von Abweichungen bei den ermittelten Einspareffekten einzelner Gebäude und deren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit

Untersuchungen haben gezeigt, dass die realisierten Einsparungen (Energie, Kosten, Emissionen) im Durchschnitt etwa 30 % niedriger ausfallen als die bilanzierten Einsparpotenziale. Diese Abweichung wird u. a. auf die stan-

dardisierten Annahmen zum Nutzungsverhalten in den Normen und Verordnungen bei der Bilanzierung zurückgeführt, die das reale Nutzungsverhalten nicht adäquat abbilden. So liegen den Bilanzen z. B. mit 19 bis 20 °C zu niedrig gewählte mittlere Raumtemperaturen zugrunde. Auch fehlende Daten zum tatsächlichen Gebäudezustand und zur Effizienz der Anlagentechnik (aufgrund eines nicht ausreichenden Datenmonitorings) führen dazu, dass die Bilanzierungen die Realität nicht treffsicher abbilden.

Bei den eingesetzten Gebäudetechnologien und der Ausführung der Sanierungsmaßnahmen tragen Mängel sowie ein suboptimaler Betrieb der Gebäudetechnik zu einer Überschätzung der Energieeinsparpotenziale bei. Infolgedessen kann eine Sanierungsmaßnahme unwirtschaftlich oder weniger wirtschaftlich werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass sich die verschiedenen Einflussfaktoren gegenseitig aufheben.

Mikroperspektive: Energieeinsparungen und Emissionsminderungen durch den Einsatz von Heiztechnologien und Gebäudesanierungsmaßnahmen

Die nachfolgend zusammengefassten Ergebnisse beziehen sich auf typisierte Durchschnittsgebäude. Die Abweichungen können im Einzelfall beträchtlich sein.

Große Energieeinsparpotenziale weisen der Wechsel von mit Erdgas und Heizöl betriebenen Heizkesseln zu Wärmepumpen sowie die energetischen Sanierungsmaßnahmen der Außenwand, der obersten Geschossdecke und des Daches auf. Je nach Ausgangszustand des Gebäudes können bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus durch die Sanierung der Außenwand die jährlichen Energieverluste (und in gleichem Ausmaß die THG-Emissionen) um bis zu 40 % reduziert werden. Geringfügig niedriger fallen die Einsparungen mit bis zu 36 % bei Mehrfamilienhäusern aus. Bei einer Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. des Daches können immerhin noch Einsparpotenziale von bis zu 30 % bei Ein- bzw. Zweifamilienhäusern und bis zu 22 % bei Mehrfamilienhäusern erzielt werden.

Bei den Gebäudetechnologien lassen sich deutliche Emissionsminderungen durch einen Wechsel zu nachwachsenden organischen Brennstoffen, z. B. Stückholz oder Holzpellets, erzielen. So führt ein Wechsel von einem mit Heizöl betriebenen Kessel zu einem Holzkessel im Durchschnitt zu THG-Emissionsminderungen von 94 %. Aufgrund im Durchschnitt schlechterer Jahresnutzungsgrade von Holzheizkesseln resultieren in der Regel aber Energiemehrverbräuche. Außerdem ist das Biomassepotenzial nachwachsender Bäume begrenzt und es fallen Feinstaubemissionen bei der Holzverbrennung an. Durch den Technologiewechsel zu Wärmepumpen lassen sich Energieeinsparungen von etwa 60 bis 75 % erzielen. Die Emissionsminderungen fallen mit 15 bis 60 % geringer aus, weil der Stromverbrauch der Wärmepumpen angesichts des aktuellen Strommix in Deutschland (zu dem Kohle noch nennenswert beiträgt) relativ hohe THG-Emissionen verursacht. Durch eine Eigenstromnutzung aus einer PV-Anlage können die strombezogenen Emissionen gänzlich vermieden werden. Wie hoch die Einspareffekte durch einen Wechsel zu Holzkesseln oder Wärmepumpen sind, hängt auch vom Gebäudezustand ab. Je besser die Dämmung des Wohngebäudes ist, desto geringere absolute Einsparwerte ergeben sich aus den genannten Prozentzahlen. Auch die Kostenwirtschaftlichkeit der Heiztechnologien ist vom Gebäudezustand abhängig. So machen erst ein hinreichend hoher Sanierungszustand der Gebäudehülle und insbesondere eine Fußbodenheizung eine Wärmepumpe wirtschaftlich, um so den (kostenintensiven) Strombedarf gering zu halten.

Weitere Energieeinsparungen können durch Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Systemoptimierung bei Wärmeerzeugern und Sanierungsmaßnahmen erzielt werden. Die Höhe der Energieeinsparungen durch Maßnahmen der Qualitätssicherung ist vor allem vom Ausgangszustand des Systems (typischerweise vor allem der Heizung inklusive aller dazugehörigen Bestandteile zur Wärmeverteilung und Regelung) abhängig. Bei Wärmeerzeugern können mit einer Systemoptimierung in einem durchschnittlichen Wohngebäude 6 bis 18 % Energieeinsparung erzielt werden. Zu den Systemoptimierungsmaßnahmen an Rohrleitungen und Heizkörpern (Peripherie) zählen z. B. der hydraulische Abgleich sowie ein möglicher Wechsel von Heizkörpern zu Flächenheizungen. Während bei einem hydraulischen Abgleich Energieeinsparungen von etwa 2 bis 20 % erzielt werden können, führt ein Wechsel von Heizkörpern zu Flächenheizung nicht zwangsläufig zu Einsparungen. Hier können sogar steigende Energieverbräuche auftreten.

Digitale, intelligente und vernetzte Lösungen (Smartbuilding, Smarthome) werden zunehmend nicht nur im Neubau, sondern auch im Rahmen von energetischen Wohngebäudesanierungen eingesetzt. Aktuell handelt es sich jedoch um eine Nische. Die bisherige Datenlage auf Einzelgebäudeebene ist gegenwärtig nicht ausreichend für eine belastbare Abschätzung der Energieeinspareffekte und -potenziale. Die vorliegenden Erfahrungen und Ergebnisse deuten darauf hin, dass Energieeinspareffekte ebenso wie erhöhte Verbräuche möglich sind. Differenziert nach den Verbrauchsbereichen Wärme- und Haushaltsstrom deuten sich aufseiten des Heizwärmeverbrauchs

potenziell größere Nettoeinspareffekte an. Für den Stromverbrauch ist das Bild nicht eindeutig. Offen bleibt auch, ob die aufgezeigten Energieeinsparungen dauerhaft erhalten bleiben (Langzeitwirkung) oder ob sie sich mit der Zeit verringern.

Wirtschaftlichkeit und Kosten-Nutzen-Relation von Technologien und Sanierungsmaßnahmen

Ob und in welchem Umfang Technologien eingesetzt und Sanierungsmaßnahmen umgesetzt werden, wird durch gesetzliche Vorgaben und unterschiedliche Motive bzw. Anlässe der Investoren beeinflusst. Anlässe und Motive können z. B. ohnehin anstehende Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen, das Leisten eines Beitrags zum Klimaschutz, eine Wertsteigerung der Immobilie oder die Steigerung der Behaglichkeit sein. Sanierungsmaßnahmen werden dann als wirtschaftlich eingeordnet, wenn die Energiekosteneinsparungen (Heizkosten) über einen zuvor festgelegten Zeitraum die Investitionskosten zuzüglich Wartungs- und Betriebskosten übersteigen und somit diese refinanzieren (positives Kosten-Nutzen-Verhältnis).

Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Technologien und Sanierungsmaßnahmen zeigen, dass der Austausch eines Heizkessels vor Ablauf seiner Lebensdauer meist nicht wirtschaftlich ist (ausgenommen sehr alte ineffiziente Wärmeerzeuger). Der zeitlich vorgezogene Ersatz eines alten Hauptwärmeerzeugers (Annahme eines durchschnittlichen Heizkessels für fossile Brennstoffe) durch einen modernen Heizkessel führt in der Regel zu geringen bis moderaten Einsparungen bei den Energiekosten, wodurch sich die Investitionskosten nicht refinanzieren (im Vergleich zum Beibehalten des alten Heizkessels). Erfolgt mit Austausch des Hauptwärmeerzeugers auch ein Energieträgerwechsel, dann ist auch entscheidend, ob der Energiepreis des neuen Energieträgers höher ist als der des ursprünglichen Energieträgers. Insbesondere bei einem Austausch eines Heizkessels durch eine Wärmepumpe und dem damit verbundenen Energieträgerwechsel zu Strom konnte unter den Marktbedingungen (Energiepreise) im Jahr 2020 vielfach keine Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Bei einem durchschnittlichen Gebäude konnten jährlich Mehrkosten in Höhe von 4 bis 14 Euro/m² resultieren. Durch den Einsatz einer PV-Anlage in Verbindung mit einer Wärmepumpe kann die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert werden. Insgesamt weisen die Untersuchungen darauf hin, dass der Einsatz einer PV-Anlage meist ökonomisch vorteilhaft ist. Vorteile sind die vermiedenen Stromkosten und die Vergütung des in das öffentliche Stromnetz eingespeisten Stroms. Auch die dezentrale elektrische Trinkwarmwasserversorgung in Bestandsgebäuden wird erst mit der Einbindung einer PV-Anlage wirtschaftlich.

Die Bereitstellung solarer Wärme durch Solarthermieanlagen ist hingegen meist nicht wirtschaftlich (und bietet nicht die Flexibilität der Energienutzung wie bei Strom aus der PV-Anlage). Zudem sind Solarthermieanlagen in der Nutzung wartungsaufwendiger. Aufgrund der Flächenkonkurrenz ist die Einbindung von Solarthermie gegen die Nutzung von PV-Anlagen abzuwägen.

Ein Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ist aus wirtschaftlicher Sicht im Gebäudebestand derzeit nicht wirtschaftlich, da der Einbau aufwendige und kostenintensive bauliche Maßnahmen erfordert. Der Einbau einer Lüftungsanlage dürfte daher vorrangig eine Maßnahme beim Neubau bleiben.

Aus Gebäudeeigentümersicht sind Maßnahmen zur Qualitätssicherung und zur Systemoptimierung grundsätzlich von Interesse. Qualitätssichernde Maßnahmen bei der Planung und Ausführung beim Austausch von technischen Anlagen sowie bei baulichen Sanierungsmaßnahmen bedeuten in der Regel geringe bis moderate Investitionsmehrkosten, die jedoch zu relevanten Energieeinsparungen führen und somit wirtschaftlich sind. Darüber hinaus können hierdurch Mängel und Schäden vermieden werden, die möglicherweise zukünftig mit weiteren Kosten verbunden sind.

Systemoptimierende Maßnahmen tragen dazu bei, das Heizungs- und Trinkwarmwassersystem zu verbessern, und können, z. B. durch einen hydraulischen Abgleich, zu einer Reduzierung der Betriebskosten beitragen. Auch eine Betriebsoptimierung des Hauptwärmeerzeugers, z. B. durch eine Anpassung der Systemtemperatur, kann zu Kostenersparnissen führen. Beide Maßnahmen können bzw. sollen regelmäßig ausgeführt werden, die anfallenden Kosten sind eher gering.

Die Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle ist hingegen häufig kostenintensiv. Dennoch können sie wirtschaftlich vorteilhaft sein. Von wirtschaftlichem Interesse können insbesondere die Sanierung der obersten Geschossdecke und des Daches sowie die Dämmung der Kellerdecke und der Außenwand sein. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme sind der Ausgangszustand des Gebäudes und der Zeitpunkt der Maßnahme (in Bezug auf die Lebensdauer von Gebäudeteilen). Für die Dämmung der obersten Geschossdecke können z. B. jährliche Kostenersparungen von bis zu 2,50 Euro/m² erzielt werden. Hingegen nicht

wirtschaftlich ist bei einem durchschnittlichen Wohngebäude der vorzeitige Austausch bzw. die Erneuerung von noch funktionstüchtigen Fenstern aus rein energetischer Motivation. Die Gründe liegen im (durchschnittlich relativ guten) Ausgangszustand der Fenster, die zu einem relativ geringen Einspareffekt führen, und in den (relativ hohen) Kosten des Fenstertausches. Hier reichen die finanziellen Mehrbelastungen von etwa jährlich 1 bis 4 Euro/m².

Makroperspektive: Zukunftsszenarien für die Erreichung der politischen Einsparziele im Wohngebäudesektor in Deutschland

Wie die Einsparziele der Bundesregierung und das Ziel des Übereinkommens von Paris (Pariser Klimaabkommen) erreicht werden können, wird in wissenschaftlichen Studien anhand von Zukunftsszenarien berechnet. Welche Technologien und Maßnahmen zukünftig am *wirksamsten* sind, d. h. maßgeblich zur Zielerreichung beitragen können bzw. werden, und (quasi als Voraussetzung für ihre praktische Wirksamkeit) welche Technologien und Maßnahmen hinreichend *wirtschaftlich* sein werden, ist stark von den Rahmenbedingungen und auch von dem zugrunde gelegten Einspar- bzw. Reduktionsziel abhängig.

Die Annahmen in wissenschaftlichen Studien über die zukünftige Entwicklung der Bevölkerungszahl und Anzahl an Wohngebäuden sind uneinheitlich. Dass die Wohnfläche pro Person weiterhin ansteigen wird, ist eine überwiegend geteilte Einschätzung. Insgesamt wird von einem *Nettogesamtwachstum an Wohnfläche* ausgegangen. Dies stellt eine zusätzliche Herausforderung an die Einsparbemühungen bei Energie und THG-Emissionen im Wohnbereich dar.

Die zukünftigen *Energiepreise* bestimmen die zukünftigen Energieverbräuche und THG-Emissionen maßgeblich. Unsicherheiten bestehen in den Studien u. a. hinsichtlich der Energiepreisentwicklung für Fernwärme und Strom. Ausschlaggebend für die zukünftige Entwicklung der Preise für elektrische Energie sind staatlich gestaltete Rahmenbedingungen wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz¹ (EEG), die Höhe der Energiesteuern und die zukünftigen Netznutzungsentgelte im Stromsektor.

In den wissenschaftlichen Szenariostudien wird deutlich, dass das Ziel einer weitgehenden Klimaneutralität Deutschlands Raum für mehr oder weniger klimaschonende Entwicklungspfade des Wohngebäudesektors (und der gesamten Wirtschaft) bietet, je nachdem, welche Zwischenziele gesteckt werden. Eine Orientierung des Reduktionsziels an einem *Emissionsbudget* für den Zeitraum bis 2045 würde das politische Ziel stärker an die *Klimawirkung* koppeln.

In den Studien werden außerdem zwei Arten von Pfaden für die zukünftige Entwicklung beschrieben: Bei *Elektropfaden* liegt der Schwerpunkt auf den Ausbau gebäudenaher Photovoltaik und Wärmepumpen sowie vorrangig auf Stromdirektnutzung, eher dezentrale Speicherung sowie künstliche Gase und Gaskraftwerke zur Strombereitstellung in Dunkelflauten bzw. Spitzenzeiten. Dagegen wird bei den *Technologiemixpfaden* auf den Beibehalt vorhandener Gasnetzstrukturen sowie auf den Ausbau von Fernwärme bzw. Kraft-Wärme-Kopplung und die vorrangige Nutzung synthetischer (künstlicher) Gase (überwiegend als Importe) auf der Basis von Power to X (PtX; mittels [Überschuss-]Strom hergestelltes synthetisches Gas oder Öl) fokussiert. Dadurch wäre der Erhalt der stofflichen Energiewirtschaft ebenso wie eine zukünftige Nutzung der aktuell dominierenden Heiztechnologien möglich. Für die Gebäude bliebe die grobe Versorgungsstruktur dann fast erhalten. Der notwendige Ausbau der regenerativen Energiewirtschaft müsste deutlich höher als bei Elektropfadszenarien sein (mehr Photovoltaik und Windkraft), weil die Erzeugung und Lieferung regenerativer Gase sehr viel verlustbehafteter ist als die des regenerativen Stroms.

Übergreifend gilt: Der Ausbau von regenerativen Energiequellen ist in allen Szenarien notwendig. Unterschiede gibt es aber dahingehend, ob die Energiequellen als Teil der Energiewirtschaft betrachtet/kategorisiert werden (überwiegend zentrale Aufbereitung der regenerativen Energien und dann Lieferung als PtX oder Fernwärme) oder als Teil des Sektors Gebäude (überwiegend dezentrale Aufbereitung und Nutzung).

Elektropfadszenarien sind vor allem durch einen Anstieg bei (elektrisch betriebenen) Wärmepumpen charakterisiert. Der angenommene enorme Marktzuwachs würde maßgebliche Kapazitätserweiterungen auf der Herstellerseite erfordern. Erforderlich wären außerdem eine ausreichende Qualifikation der Fachunternehmen, abgestimmte Maßnahmen bzw. Systeme zur Qualitätssicherung sowie der Ausbau von Kapazitäten zur Erschließung von Umgebungsluft bzw. von Erdreich als Wärmequellen. Charakteristisch für Elektropfadszenarien ist auch,

¹ Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2021)

dass im Rahmen von zahlreichen Sanierungen (mehr als der Hälfte) eine PV-Anlage installiert wird, ausgehend von der Annahme, dass die Selbstnutzung des Stroms (infolge des Anstiegs an Wärmepumpen im Bestand) wirtschaftlicher wird. Der Einbau einer PV-Anlage kann nicht nur im Zusammenhang mit einer Dachsanierung, sondern auch im Zuge einer Außenwanddämmung oder eines Fenstertausches (unter Einsatz transparenter Solarzellen) erfolgen, sofern eine hinreichende Sonneneinstrahlung gegeben ist.

Für die zukünftige Sanierungsrate wird – im Sinne einer erforderlichen Größenordnung zur Erreichung der politischen Zielsetzungen – in mehreren Studien eine Verdopplung von derzeit 1 % (entspricht jährlich ungefähr 190.000 Sanierungen an der Gebäudehülle) auf zukünftig 2 % pro Jahr angenommen. Da die (bisher bereits politisch angestrebte) Erhöhung der Sanierungsrate bis zur Gegenwart nicht realisiert wurde und auch für die Zukunft als eher unwahrscheinlich bzw. schwer erreichbar eingeschätzt wird (auch aus Wirtschaftlichkeitserwägungen), können (alternativ oder zusätzlich) auch erhöhte Qualitätsstufen bei Sanierungsmaßnahmen umgesetzt werden (Verbesserung der Sanierungstiefe).

Ob eine Steigerung der energetischen Sanierungsaktivitäten über die Erhöhung der Sanierungsrate oder -tiefe oder eine Kombination beider Ansätze angenommen bzw. angestrebt wird, impliziert unterschiedliche Handlungsoptionen für die Politik. Die Sanierungsrate lässt sich grundsätzlich mit staatlichen Förderprogrammen (z. B. Investitionszuschüssen) steigern und führt dann zu vorgezogenen Sanierungen. Die Sanierungstiefe lässt sich durch gesetzliche Anforderungen (bessere Standards) erhöhen und zusätzlich auch durch die Ausgestaltung von Förderprogrammen (Anforderungen für die Förderung) steigern.

Handlungsoptionen für die Politik

Die staatlich gesetzten Rahmenbedingungen haben einen maßgeblichen Einfluss darauf, welche Energieeinsparungen und THG-Reduktionen im Bereich der energetischen Wohngebäudesanierung erreicht werden können. Mit den Rahmenbedingungen wird auch beeinflusst, welche Gebäudetechnologien zukünftig für Gebäudeeigentümer/innen wirtschaftlich sind (und dementsprechend nachgefragt werden) und in welchem Ausmaß sich energetische Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (langfristig) aus der Gebäudeeigentümersperspektive lohnen. Um hinreichend wirksam und (langfristig) kostengünstig zu einem energieeffizienten und klimaneutralen Wohngebäudebestand beizutragen (und so die gesteckten Energie- und Klimaziele zu erfüllen), lassen sich die folgenden Handlungsoptionen aus der vorliegenden Untersuchung ableiten:

- › Die *Anforderungen an die Sanierung* seitens der Gesetzgebung und der Förderung könnten zeitnah deutlich gesteigert werden (Best Practice) u. a. bezogen auf die Dämm-, Luftdichtheits-, Lüftungs-, Heizungs-, Beleuchtungsqualität.
- › *Verbrauchsbasierte Monitoringdatensätze* (d. h. Energieanalyse aus dem Verbrauch), beispielsweise monatlich erfasst) können eine belastbare Datengrundlage für zukünftige Evaluierungen und Anpassungen von Verordnungen und Förderprogrammen bieten. Hierdurch ließen sich theoretische Erfolgskontrollen durch realistischere Erfolgskontrollen auch im Rahmen geförderter individueller Sanierungsfahrpläne ablösen.
- › *Förderprogramme und -konditionen* könnten von einer *Einsparung an CO₂ abhängig* gemacht werden. Alternativ könnten Einzelanforderungen etabliert werden, für die eine CO₂-Einsparungswirkung bekannt und anerkannt ist (analog dem Neubaustandard »Effizienzhaus 55 nach Referenzwerten« der Kreditanstalt für Wiederaufbau). Eine Option wäre auch, die Höhe von Fördermitteln für Investitionen nicht nur an ihren Investitionskosten auszurichten, sondern zusätzlich auch ihre Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂, d. h. den äquivalenten CO₂-Preis, zu berücksichtigen.
- › Ein durch Anreize gefördertes oder verpflichtendes verbrauchsbasiertes *Erfolgsmonitoring* bei der Umsetzung von *geförderten Sanierungsmaßnahmen*, welches die Nutzungsphase einschließt, kann eine Datenbasis für wissenschaftliche Analysen, politische Entscheidungen und zur Aufklärung von Bewohner/innen sowie Eigentümer/innen schaffen.
- › Ermöglicher für die Bereitstellung nutzerbezogener Energieverbrauchsdaten sind *digitale, intelligente und vernetzte Technologien* (Smartmeter, Apps etc.), die zeitnah das Verbrauchsverhalten zurückspiegeln und ggf. Hinweise zu Verbesserungen liefern.

- › Eine zeitnahe Klärung von offenen Fragen des *Datenschutzes* und der Datenhoheit unterstützt die praktische Umsetzung und breite Anwendung des Monitorings (Messung, Erfassung, Speicherung und Bereitstellung von Monitoringdaten).
- › Die *Qualitätssicherung* könnte noch stärker in die *Ausgestaltung von Förderprogrammen*, aber auch der *Regulierung über das Gebäudeenergiegesetz²* (GEG) einbezogen werden: zum einen bezogen auf die Planung und Umsetzung (Gebäudedichtheitsmessung, Wärmebrückenoptimierung, hydraulischer Abgleich etc.), zum anderen bezogen auf die vorbereitenden Maßnahmen (z. B. Einbau von Zählern).
- › *Qualitätssicherung* könnte *verpflichtend* als Teil der Planung vorgeschrieben werden (Aufnahme in das GEG), beispielsweise bezogen auf das luftdichte und wärmebrückenarme Bauen bei baulichen Maßnahmen im Bestand sowie den Wärmeschutz. Auch Maßnahmen wie der hydraulische Abgleich bzw. eine Optimierung von Heizungsanlagen könnten im Gebäudebestand verpflichtend sein.
- › Durch eine *veränderte Preisbildung für fossile Energieträger und Strom* könnte sich die Wirtschaftlichkeit von vielen der im vorliegenden Bericht aufgezeigten energetischen und klimafreundlichen Sanierungen entscheidend verbessern bzw. eine Wirtschaftlichkeit überhaupt erst möglich gemacht werden. Die Energiepreise beeinflussen maßgeblich die Wirksamkeit der Förderprogramme für energetische und klimafreundliche Sanierungen im Wohngebäudebereich und ergänzen die Förderprogramme (potenziell) als wirksames politisches Steuerungsinstrument. Durch eine Veränderung der Energiepreise, insbesondere bei den fossilen Energieträgern Erdgas und Heizöl, können hauptsächlich Wärmepumpen deutlich bessere Kosten-Nutzen-Relationen erreichen und durch ihren Einsatz deutlich höhere THG-Emissionseinsparungen erzielt werden. Eine stärkere Kopplung der Energiepreise an die THG-Emissionen könnte außerdem dazu beitragen, dass mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien die Strompreise deutlich geringer ausfallen würden (als gegenwärtig)

² Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG); seit 11/2020 in Kraft

1 Einleitung

Informationsbedarf zu Energieeinsparungen und THG-Emissionsreduktionen in Wohngebäuden

Gut ein Drittel des Endenergieverbrauchs in Deutschland fällt im Gebäudesektor an, davon mehr als 60 % in Wohngebäuden. Viele Wohngebäude wurden vor dem Inkrafttreten der Wärmeschutzverordnung³ (WärmeschutzV) im Jahr 1979 errichtet und haben einen besonders hohen Energieverbrauch (dena 2021). Vor allem im Bestand von Wohngebäuden werden daher hohe Einsparpotenziale für Energie und THG-Emissionen gesehen. 2020 deckten erneuerbare Energien rund 15 % des Wärme- und Kälteenergiebedarfs in Deutschland ab (UBA 2021c). Da ein großer Teil der verbrauchten Energie aus fossilen Quellen stammt, bedeuten Energieeinsparungen (z. B. durch Effizienzsteigerungen) gleichzeitig auch Reduzierungen von THG-Emissionen. Die Emissionen lassen sich außerdem durch einen Wechsel bei den Heiztechnologien hin zu erneuerbaren Energiequellen reduzieren.

Vor diesem Hintergrund stehen Wohngebäudeeigentümer/innen bei einem geplanten Ersatz alter Heizungen vor der Entscheidung, welche Heiz- und ggf. auch Kühlungs- und Lüftungstechnologien sie zukünftig nutzen wollen. Zu überlegen ist auch, inwieweit es sinnvoll sein könnte, bereits vor Ablauf der Lebensdauer einer Heizungsanlage in ein neues Heiz- oder Klimatisierungssystem zu investieren. Hinzu kommen anstehende (oder eventuell auch zeitlich vorgezogene) Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle, für die zu entscheiden ist, in welcher energetischen Qualität sie sinnvoll durchzuführen sind.

Um in diesem Kontext Investitionsmittel und Fördergelder effizient und wirksam einzusetzen, benötigen Wohngebäudeeigentümer/innen und Politikentscheider/innen robuste und realistische Informationen zum Einsparpotenzial und zur Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Gebäudetechnologien und energetischer Sanierungsmaßnahmen. (z. B. Wärmepumpen, Photovoltaik, Solarthermie, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, digitale Anlagensteuerung und -regelung, Fenstertausch, Fassadendämmung). In der Realität liegen die tatsächlichen Einsparungen im konkreten Einzelfall nämlich teils erheblich unter den errechneten Potenzialen und auch die Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit von Gebäudetechnologien und Sanierungsmaßnahmen sind teils unterschiedlich (Henger/Voigtländer 2012; Simons 2012). Die Abweichungen gehen u. a. darauf zurück, dass die Energieverbräuche von alten Gebäuden aus unterschiedlichen Gründen teils überschätzt werden, während die Verbräuche von Neubauten teilweise unterschätzt werden (BBSR 2019; dena 2019a; Jagnow/Wolff 2020, S. 66).

Auch die in wissenschaftlichen Studien und Gutachten ermittelten Ergebnisse zu Energieeinsparungen und THG-Emissionsreduktionen in Deutschland weichen zum Teil deutlich voneinander ab. Ein Grund dafür ist, dass auf unterschiedliche Daten zurückgegriffen wird bzw. verschiedene Annahmen in die jeweiligen Berechnungen eingeflossen sind (Jagnow/Wolff 2020, S. 362 ff.). Für alle Betrachtungsebenen gilt außerdem, dass der Effekt einzelner energetischer Sanierungsmaßnahmen auf den Energieverbrauch und den Ausstoß von Treibhausgasen vielfältigen Einflussfaktoren und Wechselwirkungen unterliegt. Die Komplexität erhöht sich weiter, wenn Maßnahmenpakete betrachtet werden. Hieraus resultieren zusätzliche Herausforderungen bei den Einsparberechnungen.

Gegenstand, Ziel und Aufbau des Berichts

Das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) wurde vom Deutschen Bundestag beauftragt, im Rahmen des TA-Projekts »Energiespareffekte im Gebäudesektor« die Effekte von Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden hinsichtlich einer Einsparung von Energie und THG-Emissionen zu untersuchen und im Zuge dessen auch Schlussfolgerungen für Büro- und Verwaltungsgebäude abzuleiten. Gegenstand der Untersuchung sollten sein:

- › Technologien der Hauptwärmeerzeuger (Wärmepumpen, Erdgas- und Heizölkessel einschließlich Hybridheizung aus Kessel und Wärmepumpe, Holzkessel, Wärmenetze und Kraft-Wärme-Kopplung),

³ Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV); seit 1/2002 außer Kraft

- › Technologien der Zusatzerzeuger (Lüftung mit Wärmerückgewinnung, Photovoltaik, Solarthermie),
- › Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (Dämmmaßnahmen, Fenstertausch) sowie
- › Maßnahmen zur Qualitätssicherung (im Sinne einer energetischen Optimierung) in allen zuvor genannten Kategorien (z. B. hydraulischer Abgleich, optimale Raumtemperaturregelung, Dämmung von Rohren, passende Pumpen).

Der Untersuchungsfokus liegt auf den (errechneten und tatsächlich realisierten) Energieeinspareffekten sowie dem Kosten-Nutzen-Verhältnis (Energie- bzw. THG-Effizienz) der Technologien und Sanierungsmaßnahmen. Dabei werden auch das Ausmaß und die Ursachen von Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Einspareffekten (Bedarfs-Verbrauchs-Verhältnis) eruiert und diskutiert, um auf dieser Basis Möglichkeiten für eine stärker harmonisierte, transparente und realitätsbasierte Bewertung der Technologien und Sanierungsmaßnahmen aufzuzeigen. Ziel ist es, auf dieser Grundlage Handlungsoptionen für wirksame Politikmaßnahmen abzuleiten.

Der Bericht ist folgendermaßen gegliedert: Zu Beginn werden begriffliche Grundlagen zum Verständnis der präsentierten Ergebnisse geschaffen und der erforderliche Untersuchungsrahmen abgesteckt (Kap. 2) und es wird ein Überblick über die Wohngebäude in Deutschland und die Sanierungsmaßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle gegeben (Kap. 3). Im Anschluss daran werden für ausgewählte Technologien und Sanierungsmaßnahmen Energieeinspar- und THG-Minderungspotenziale sowie Kosten-Nutzen-Relationen präsentiert (Kap. 4). Die gesammelten Erkenntnisse auf der Gebäudeebene bilden die Grundlage für die anschließende Makroperspektive auf Einspareffekte für Energie und THG-Emissionen im Wohngebäudesektor in Deutschland (Kap. 5). Abschließend werden Handlungsansätze für politische Maßnahmen und die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen benannt, um die Einsparung von Energie und THG-Emissionen im Wohngebäudesektor in Deutschland wirksam zu unterstützen (Kap. 6).

Gutachten und Danksagung

Im Auftrag des Deutschen Bundestages wurde ein Gutachten erstellt:

- › Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen der energetischen Gebäudesanierung. Prof. Kati Jagnow und Prof. Dieter Wolff (Bietergemeinschaft), Braunschweig

Dieses Gutachten bildete neben eigenen Recherchen, Literaturauswertungen und Analysen eine wichtige Basis für den vorliegenden Bericht. Aus ihm wurden Informationen, Abbildungen, Tabellen und Textteile entnommen, überarbeitet, neu zusammengestellt, ergänzt und synthetisiert. Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Verdichtung des Materials liegt bei der Verfasserin und dem Verfasser dieses Berichts. Der Gutachterin und dem Gutachter sei für ihre sehr umfangreiche Arbeit und ihre Diskussionsbereitschaft herzlich gedankt.

Ebenfalls in das Gutachten eingeflossen sind die Ergebnisse eines virtuellen Workshops »Energiespareffekte und -potenziale einer vernetzten, intelligenten Steuerung von haustechnischen Anlagen im Ergebnis von Gebäudesanierungen im Wohnbereich«, der im Oktober 2020 mit Vertreter/innen von Forschungseinrichtungen sowie beratungs- und umsetzungsorientierten Institutionen stattfand. Dank für eine anregende Fachdiskussion geht an Anne-Caroline Erbstößer (Technologiestiftung Berlin), Anton Barckhausen (adelphi), Prof. Kati Jagnow (Hochschule Magdeburg-Stendal), Laurenz Hermann (co2online), Markus Offermann (Guidehouse), Martina Schmitt (dena), Dr. Severin Beucker (borderstep) sowie Prof. Thorsten Schneiders und Tobias Rehm (beide Technische Hochschule Köln).

Dank gebührt auch den Kolleg/innen Britta Oertel, Dr. Arnold Sauter und Dr. Christoph Revermann für die kritische Begleitung der Erstellung dieses Berichts sowie ebenso Brigitta-Ulrike Goelsdorf und Carmen Dienhardt für die Durchsicht und Korrektur des Manuskripts sowie die Erstellung des Endlayouts.

2 Reduktionsziele und Erfassung von Reduktion und Wirtschaftlichkeit

In diesem Kapitel werden zentrale Begriffe und Konzepte erläutert, die den Untersuchungen zur Energieeinsparung und Reduktion der THG-Emissionen im Wohngebäudesektor zugrunde liegen und somit für das Verständnis und die Einordnung der hier präsentierten Ergebnisse hilfreich sind. Es wird auf die Erfassung der Energieeinsparung und THG-Emissionen (Kap. 2.1), die bundespolitischen Zielsetzungen (Kap. 2.2), Herausforderungen bei der Endenergieerfassung (Kap. 2.3) und der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle eingegangen (Kap. 2.4).

2.1 Endenergie, Primärenergie und THG-Emissionen

Die Begriffe Endenergie, Primärenergie und THG-Emissionen werden vielfach in den Einspar- und Reduktionszielen der Bundesregierung und in den zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen und Statistiken zu den Einspareffekten im Gebäudesektor verwendet.

Als *Endenergie* wird die Energie bezeichnet, die direkt beim Verbraucher ankommt und benötigt wird, um z. B. ein Gebäude zu beheizen, Warmwasser zur Verfügung zu stellen oder elektrische Geräte zu betreiben. Beispiele sind Brennstoffe (z. B. Heizöl) und elektrische Energie (Strom). Im Unterschied dazu bezeichnet *Primärenergie* die aus den genutzten natürlichen Quellen (z. B. Erdöl, Windkraft, Sonnenenergie) zur Verfügung stehende Energie. Endenergie wird in der Regel aus Primärenergie gewonnen. Für diesen Umwandlungsprozess wird zusätzliche Energie benötigt. Je nach Art der natürlichen Energiequelle und der Umwandlungstechnologie fällt der Energiebedarf für den Umwandlungsprozess unterschiedlich hoch aus. Außerdem kann ein weiterer Energiebedarf für die Förderung des Energierohstoffs und für den Energietransport auftreten. Die Menge an verbrauchter Primärenergie (z. B. einer Volkswirtschaft) ist daher größtenteils deutlich höher als die Menge an verbrauchter Endenergie (co2online o. J.a u. o. J.b). So lag der Endenergieverbrauch Deutschlands 2019 bei rund 2.500 TWh, während der Primärenergieverbrauch im gleichen Jahr rund 3.600 TWh betrug (UBA 2020 u. 2021b).

Es gibt verschiedene Berechnungsansätze, um den Primärenergieverbrauch auf Basis des Endenergieverbrauchs mithilfe eines Umrechnungsfaktors (Primärenergiefaktor) zu berechnen. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Ansätze (und damit die Höhe des Primärenergiefaktors) dahingehend, wie viele Vorleistungen entlang der Wertschöpfungskette in die Berechnung einbezogen werden. So wird im Globalen Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS) des Instituts für angewandte Ökologie e.V. auch der Aufwand für die Förderung und den Transport der Energieträger außerhalb der Landesgrenzen berücksichtigt, während dies in den Statistiken der Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen e.V. (AGEB) nicht der Fall ist (Jagnow/Wolff 2020, S. 71). Die unterschiedlichen Definitionen für die Primärenergie (nach GEMIS oder AGEB) machen es notwendig, stets zu prüfen, welcher Definition eine wissenschaftliche Studie oder ein politisches Dokument folgt. Außerdem wird die Energiemenge für End- und Primärenergie (in der wissenschaftlichen Literatur und auch in der Praxis) mit unterschiedlichen Einheiten erfasst. Häufig genutzt werden Joule (z. B. Megajoule – MJ, Terajoule – TJ) oder Wattstunden (z. B. Kilowattstunden – kWh, Megawattstunden – MWh, Terawattstunden – TWh). Für Primärenergie werden gelegentlich auch Ölmengen in Kilogramm (kg) oder Tonnen (t) oder andere quellenbezogene Einheiten angegeben.

Anthropogene, d. h. menschengemachte, *Treibhausgasemissionen* (THG-Emissionen) beziehen sich auf die Treibhausgase, welche direkte Auswirkungen auf den Klimawandel haben und für den Großteil der Erderwärmung verantwortlich gemacht werden: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), Perfluorkohlenwasserstoffe (PFKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆). Die Emissionen werden in Tonnen (t) oder Megatonnen (Mt) CO₂-Äquivalente angegeben (OECD 2016). Die vermiedenen THG-Emissionen lassen sich mittels Emissionsfaktoren aus der Primär- oder auch Endenergieeinsparung (z. B. für Strom) errechnen. Die THG-Emissionsfaktoren sind abhängig von der eingesetzten Energiequelle bzw. dem Mix aus eingesetzten Energiequellen (z. B. zur Stromerzeugung in Deutschland). Generell werden entweder die gesamten THG-Emissionen oder die reinen CO₂-Emissionen ermittelt. In

beiden Fällen können die vorgelagerten Prozesse als Vorkette entlang der Wertschöpfung einbezogen oder nicht berücksichtigt werden (letzteres direkte Emissionen) (Bettgenhäuser/Boermans 2011, S. 37).

2.2 Reduktionsziele der Bundesregierung

Die Bundesregierung orientiert sich am globalen Leitbild der THG-Neutralität und an den europäischen Klimaschutzzielen. Mit dem »Klimaschutzplan 2050« (BMU 2016) hat sie eine langfristige Strategie beschlossen, die eine weitgehende THG-Neutralität bis 2050 zum Ziel hat. Mit dem »Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan« (BMWi 2019) und dem »Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050« (BMU 2019a) wurden Zielvorgaben festgeschrieben, um die Langfristziele des Klimaschutzplans 2050 zu erreichen. Demnach sollten die THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber 1990 gemindert werden. Für den Gebäudesektor (der in diesem Bericht mit dem Wohngebäudesektor in Teilen betrachtet wird) wurde für 2030 das Ziel von weniger als 72 Mt. CO₂-Äquivalente formuliert, während die THG-Emissionen für 2050 nahe null liegen müssten (BMU 2018). Mit der Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) im Juni 2021 sind die Reduktionsziele wie folgt: Bis 2030 sollen die THG-Emissionen nun um 65 % (anstelle der zuvor erwähnten 55 %) gemindert werden. Außerdem soll die Klimaneutralität nun bereits 2045 erreicht werden (anstatt 2050, wie zuvor erwähnt) (Bundesregierung 2021).

Als »Beitrag zum globalen Klimaschutz und um die deutsche Wirtschaft zukunftsfähig zu gestalten«, sollen in Deutschland alle Wirtschaftssektoren bis 2050 nahezu vollständig »dekarbonisiert« werden. Das heißt, es sollen zunehmend kohlenstoffarme bzw. kohlenstofffreie Energieträger für wirtschaftliches Handeln genutzt werden (BMU 2018). Der Anteil erneuerbarer Energien (gemessen am Bruttoendenergieverbrauch) soll 2030 auf rund 30 % erhöht werden. Im Bereich Wärme und Kälte (ein Großteil des Endenergieverbrauchs entfällt auf den Gebäudesektor) soll dieser Anteil 2030 bei 27 % liegen. Die Nutzung erneuerbarer Energien in der Wärme- und Kälteversorgung soll u. a. mittels einer weiteren Verbreitung von auf erneuerbaren Energien basierenden Heiztechnologien in den Gebäuden und einer Umstellung auf eine zunehmend dekarbonisierte Fernwärme erreicht werden (BMWi 2019).

Mit Blick auf eine *effiziente Energienutzung* wurde im »Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan Deutschlands« (BMWi 2019, S. 55) das Ziel eines Primärenergieverbrauchs des Gebäudesektors für nicht erneuerbare Energiequellen in Höhe von 2.000 PJ im Jahr 2030 festgeschrieben (2008 lag er bei mehr als 4.000 PJ).

2.3 Erfassung der Endenergie für einzelne Gebäude

2.3.1 Energieverbrauch und -bedarf

Der Begriff *Energieverbrauch* hat sich umgangssprachlich etabliert, um die Menge an elektrischer und thermischer Energie zu beschreiben, die z. B. für die Beheizung, Kühlung und Beleuchtung im Gebäudebestand oder für den Betrieb elektronischer Geräte eingesetzt wurde bzw. benötigt wird. In der Energie- und Wohnungswirtschaft sowie in der Wissenschaft wird hingegen zwischen den Begriffen Energieverbrauch und Energiebedarf unterschieden (Jagnow/Wolff 2020, S. 444 f.). Der *Energieverbrauch* steht hier für eine *gemessene* Energiemenge. Er stellt somit einen real erfassten Aufwand dar. Beispielsweise erfassen Messdienstleister den Heizenergieverbrauch von Haushalten und berechnen auf dieser Basis die anfallenden Heizkosten. Der Energieverbrauch wird durch die real vorliegenden, individuellen Eigenschaften des Bauwerks, dessen Nutzung und Anlagentechnik sowie die lokalen Klimabedingungen beeinflusst.

Dagegen bezeichnet der *Energiebedarf* eine mittels mathematischer Formeln *berechnete* Energiemenge. Er stellt einen theoretischen, bilanzierten Aufwand dar und wird durch die getroffenen Annahmen zu Bauwerk, Nutzungsverhalten, eingesetzter Technik etc. sowie durch die hinterlegten Berechnungsformeln beeinflusst. Die Berechnung des Energiebedarfs dient vorrangig dazu, die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen entsprechend der Energieeinsparverordnung⁴ (EnEV) bzw. dem Gebäudeenergiegesetz nachzuweisen. Darüber hinaus bilden

⁴ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV); seit 10/2020 außer Kraft

die standardisierten Bilanzierungen den Nachweis für mögliche Finanzierungskredite der KfW (2021a, 2021b u. 2021c).

2.3.2 Energy Performance Gap

Als Energy Performance Gap (Energieleistungslücke) wird die Differenz zwischen dem berechneten Energiebedarf und dem gemessenen Energieverbrauch von Gebäuden bezeichnet. Er geht auf Unterschiede zwischen den realen Umständen einerseits und den getroffenen Annahmen andererseits zurück. Derartige Abweichungen haben zu der Kritik geführt, dass energetische Sanierungsmaßnahmen zwar theoretisch wirtschaftlich sind, in der Praxis aber nicht zwangsläufig zu einer hinreichenden Kostenreduktion führen (Enseling/Hacke 2020; Simons 2012).

Differenzen können beispielsweise auftreten, wenn die Annahmen zum Wärmeverlust durch Wände, Fenster, Decken etc. oder die Annahmen zur Effizienz der Heizungsanlage nicht der Realität im konkreten Fall entsprechen. Aber auch eine fehlerhafte Ausführung bei der Sanierung kann zu Abweichungen zwischen errechnetem Energiebedarf und dem realen Energieverbrauch führen. Denkbar ist darüber hinaus, dass Annahmen zu den lokalen Witterungsbedingungen für den Standort des Sanierungsobjekts von den realen Bedingungen abweichen. Zum Energy Performance Gap kann auch beitragen, dass die einer Berechnung zugrunde liegenden Algorithmen die realen Prozesse nur bedingt abbilden (können) (Perch-Nielsen et al. 2019).

Einem von den Berechnungsannahmen abweichenden Nutzungsverhalten der Bewohner/innen wird ein hoher Einfluss auf den Energy Performance Gap zugeschrieben (BBSR 2019; Knissel et al. 2006). Aspekte des Nutzungsverhaltens, beispielsweise die Wahl der Raum- bzw. Wohlfühltemperatur, das Lüftungs- und Heizverhalten (z. B. Teilbeheizung), sind seit Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (BBSR 2019; Cali et al. 2016; Deutscher et al. 1999; Jagnow/Wolff 2020, S. 328 f.; Loga et al. 2003).

In Untersuchungen wird bezogen auf einen mittleren Heizwärmebedarf der Einfluss der Raumtemperatur mit -21 bis 43 % angegeben. Der Einfluss des Lüftungsverhaltens wird mit -17 bis 25 % und der einer Teilbeheizung mit -13 bis 0 % angegeben. Insgesamt ergibt sich hieraus eine Gesamtbandbreite aller Einflüsse in Höhe von -35 bis 79 % (Deutscher et al. 1999). Diese Bandbreite verdeutlicht, dass der reale Energieverbrauch bis zu 35 % unter dem berechneten Bedarf liegen oder auch bis zu rund 80 % höher ausfallen könnte, als dies der berechnete Energiebedarf annehmen ließe. Eine Auswertung zahlreicher Studien legt nahe, dass der (reale) Energieverbrauch besonders stark unter dem (errechneten) Energiebedarf liegt, wenn Gebäude einen niedrigen energetischen Zustand haben (z. B. weil sie besonders alt sind). Der geringere Energieverbrauch wird u. a. auf die bereits erwähnte Teilbeheizung und temporäre Leerstände zurückgeführt (Jochum et al. 2015, S. 58 ff.).

Insbesondere nach energetischen Sanierungen wurden Unterschiede zwischen dem berechneten Bedarf nach der Sanierung und dem danach tatsächlich gemessenen Energieverbrauch beobachtet. Als Grund für diese Abweichungen wird mehrheitlich das Nutzungsverhalten der Bewohner/innen angeführt. So führt beispielsweise die Erhöhung der Innenraumtemperatur um 1 °C zu einem Anstieg des Endenergieverbrauchs um bis zu 20%. Beispielsweise wurde gezeigt, dass Bewohner/innen nach einer Sanierung höhere Raumtemperaturen wählten als zuvor. Eine solche Verhaltensänderung wird auch als Reboundeffekt bezeichnet (Hoffmann/Geissler 2017).

Um den Energy Performance Gap gering zu halten oder gänzlich zu vermeiden, wurden in wissenschaftlichen Untersuchungen Formelableitungen und Korrekturfaktoren erarbeitet, mit deren Hilfe eine statistische Angleichung von Energiebedarf und -verbrauch möglich ist (Jagnow/Wolff 2020, S. 442 ff.). Bezogen auf eine größere Stichprobe können durch die Korrekturfaktoren realistischere Energiebedarfe ermittelt werden. Im Einzelfall hingegen sind diese Korrekturfaktoren nur eingeschränkt anwendbar.

2.3.3 Energieeffizienzmaße für Heizungen

Die Effizienz eines Heizkessels kann mit seinem *Nutzungsgrad* angegeben werden. Er stellt in Anlehnung an einen Wirkungsgrad die generierte Heizwärmemenge ins Verhältnis zur aufgewendeten Brennstoffenergiemenge (beide gemessen in kWh). Während der Wirkungsgrad eines Heizkessels seine Effizienz in einem (z. B. dem optimalen) Betriebszustand abbildet, kann der Nutzungsgrad als mittlerer Wirkungsgrad eines Jahres interpretiert werden. Es gibt unterschiedliche Varianten des Nutzungsgrads, die verschiedenen Zwecken dienen und zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. So gibt der Normnutzungsgrad die Effizienz von Heizkesseln an, die auf einem

Prüfstand betrieben wurden. Er dient dem Vergleich unterschiedlicher Heizkessel unter (theoretischen) Normbedingungen. Im vorliegenden Bericht wird der *mittlere brennwertbezogene Jahresnutzungsgrad* zugrunde gelegt. Er stellt ein Effizienzmaß für den realen Betrieb eines Heizkessels dar. Berücksichtigt werden nicht nur Kessel-, Stillstand- und Abgasverluste. Auch die Betriebsführung und die Dimensionierung des Wärmeerzeugers beeinflussen den Jahresnutzungsgrad. Ein überdimensionierter Wärmeerzeuger führt beispielsweise zu einem schlechteren Jahresnutzungsgrad. Da die individuellen Betriebsbedingungen von Heizkesseln stark variieren, ist der Jahresnutzungsgrad nicht zum direkten Effizienzvergleich von unterschiedlichen Heizkesseln geeignet (Baunetzwissen o.J.). Der mittlere brennwertbezogene Jahresnutzungsgrad für Gasbrennwertkessel im Bestand liegt bei ca. 0,8 bis 0,9 bzw. 80 bis 90% (Jagnow/Wolff 2020, S.215). In der Praxis und in der Literatur wird nicht immer hinreichend detailliert dargelegt, welches Effizienzmaß für Heizkessel verwendet wurde. Dadurch können Missinterpretationen auftreten.

Ein aussagekräftiger Indikator für die Energieeffizienz von Wärmepumpen ist die *Jahresarbeitszahl*. Auch sie stellt eine Variation eines Wirkungsgrades da. Bezugspunkt (d.h. der betrachtete Energieinput) ist hier der benötigte Strom, mit dessen Hilfe die Wärme generiert wird. Die zur Gewinnung der Wärme verwendete Umweltenergie fließt in den Indikator nicht ein. Die Jahresarbeitszahl für Wärmepumpen beträgt ein Vielfaches von 1, da bezogen auf den genutzten Strom (elektrische Energie) ein Vielfaches an Wärmeenergie bereitgestellt wird. So liegen für Wärmepumpen typische Jahresarbeitszahlen bei 2 bis 4 (Jagnow/Wolff 2020, S.203 f.).

Grundsätzlich können Energieeffizienzen gemessen oder berechnet werden analog dem Energieverbrauch oder -bedarf (Kap. 2.3.1). Anhand der Bezeichnung des jeweiligen Indikators ist aber nicht erkennbar, ob es sich um gemessene oder berechnete Größen handelt. Fehlen entsprechende Zusatzinformationen in Publikationen oder auch Geräteinformationen bzw. werden diese nicht wahrgenommen, sind Missinterpretationen möglich, die z.B. zu Kaufentscheidungen auf einer unrealistischen Basis und entsprechend unrealistischen Erwartungen führen können.

2.3.4 Wärmeverlust von Gebäuden

Der Energiebedarf bzw. -verbrauch von Wohngebäuden wird maßgeblich durch die Wärmedämmung bzw. die Wärmedurchlässigkeit von Gebäudebauteilen beeinflusst. Sie wird anhand des Wärmedurchgangskoeffizienten (in der Bauwirtschaft als U-Wert bezeichnet) erfasst. Er gibt an, wie groß die Wärmeleistung in Watt ist, die durch ein Bauteil (z.B. eine Außenwand) hindurchströmt, wenn (z.B. zwischen beiden Seiten der Wand) ein Temperaturunterschied von 1 Kelvin vorliegt. Zum Vergleich verschiedener Bauteile wird in der Regel eine Fläche von 1 m² herangezogen. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird in Watt je m² und Kelvin (W/[m² K]) angegeben.

Je höher der Wärmedurchgangskoeffizient, desto geringer ist die Dämmwirkung der Baumaterialien, was zu einem höheren Wärmestrom und damit Wärmeverlust führt. Welcher U-Wert als gut einzuschätzen ist, unterscheidet sich für die einzelnen Bauteile eines Gebäudes teils erheblich. Beispielsweise betrug der durchschnittliche U-Wert für Fenster im Gebäudebestand in Deutschland 2016 etwas über 2, während ein als gut eingeschätzter Wert bei 1,3 liegt. Bei Dächern bzw. der oberen Geschossdecke ist die durchschnittliche Dämmwirkung in Deutschland ungefähr um den Faktor 4 höher als bei Fenstern und der U-Wert um diesen Faktor kleiner (Jagnow/Wolff 2020, S. 85).

2.4 Wirtschaftlichkeitsabschätzungen

In Wirtschaftlichkeitsabschätzungen werden Kosten und Nutzen einander gegenübergestellt. Wohngebäudeeigentümer/innen schätzen die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen an Gebäudetechnik oder Gebäudehülle ab, um zu entscheiden, ob sie durchgeführt werden sollen (Mikroperspektive). Volkswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsabschätzungen werden vorgenommen, um auf ihrer Basis Politikentscheidungen zu treffen, beispielsweise über Förderprogramme oder sonstige staatliche Aktivitäten (Makroperspektive). Beide Perspektiven werden nachfolgend erläutert.

2.4.1 Kosten-Nutzen-Betrachtung aus der Wohngebäudeeigentümergeperspektive

Für Wohngebäudeeigentümer/innen, die erwägen, eine Sanierungsmaßnahme an Gebäudetechnik bzw. -hülle durchzuführen, stellt sich die Frage, welche Kosten (in welcher Höhe und zu welchem Zeitpunkt) auftreten und welcher Nutzen diesen Kosten zur Wirtschaftlichkeitsbewertung gegenübersteht. Ein typischer erwarteter Nutzen sind Energiekosteneinsparungen in der Nutzungszeit. Auch vermiedene THG-Emissionen sind für einen Teil der Gebäudeeigentümer/innen ein erwarteter Nutzen. Charakteristisch für Sanierungsmaßnahmen ist, dass sie häufig aus einer Kombination von Gründen bzw. Motiven durchgeführt werden (z. B. indem eine Erneuerung der Heiztechnik den Wohnkomfort verbessern und Energie einsparen soll) und Einzelmaßnahmen miteinander kombinieren können (z. B. indem eine Erneuerung und optische Verbesserung der Gebäudefassade mit einer Fassadendämmung kombiniert werden). Relevant ist auch die Frage, bei wem die Kosten und der Nutzen auftreten (Eigentümer/innen, Mieter/innen) und inwieweit hier ein Kostentransfer (z. B. Kostenüberwälzung auf die Mieter/innen) erfolgen kann (co2online/ IBP 2007; Gossen/Nischan 2014).

Die individuellen Kosten einer Sanierungsmaßnahme erwachsen nicht nur aus der Investition. In der Regel löst sie auch spätere Wartungs- und Reparaturkosten aus. Außerdem wirkt sich die Sanierungsmaßnahme auf die Höhe der zukünftigen Energiekosten aus (beispielsweise kostenmindernd im Vergleich zur Ausgangssituation). Die Energiekosten hängen nicht nur von der (erwarteten) Verbrauchsmenge an Energie, sondern auch vom Energiepreis pro Verbrauchseinheit ab. Der Preis unterscheidet sich je nach genutzter Energiequelle. Die verbrauchte Energiemenge und die gewählte Energiequelle bestimmen außerdem, welche Menge an THG-Emissionen für das Heizen und ggf. Klimatisieren des Gebäudes ausgestoßen wird.

Die Wirtschaftlichkeit von Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen wird durch eine Vielzahl an technikk- bzw. gebäudebezogenen Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen u. a. die technische Lebensdauer der Bauteile und Anlagentechnik, die zu erwartenden Wartungs- und Reparaturkosten, aber auch der Ausgangszustand vor der Sanierung (als Referenzpunkt für die Wirtschaftlichkeitsbewertung) sowie der durch die Maßnahme angestrebte Zustand bzw. die angestrebte Leistung (z. B. Raumtemperatur, Dämmwirkung). Hinzu kommen Einflussfaktoren wie die Preisentwicklung für die verwendeten Energieträger oder auch die Möglichkeit, Fördergelder in Anspruch zu nehmen (Henger/Voigtländer 2012).

2.4.2 Vollkosten, energiebedingte Mehrkosten, Jahreskosten, CO₂-Vermeidungskosten

Ob eine energetische Sanierung aus der Perspektive von Wohngebäudeeigentümer/innen als wirtschaftlich eingeschätzt wird, hängt auch davon ab, ob die Sanierung eine eigenständige Maßnahme darstellt oder ob sie im Rahmen einer ohnehin stattfindenden Sanierung durchgeführt wird. Im ersten Fall sind die gesamten Kosten (*Vollkosten*) der Sanierung ihrem Nutzen gegenüberzustellen, während im zweiten Fall nur die *energiebedingten Mehrkosten* zugrunde gelegt werden. Kosten, die auch bei einer ohnehin stattfindenden Gebäudesanierung aufgetreten wären, werden als *Ohnehin-* bzw. *Sowiesokosten* bezeichnet. Beispiele sind Kosten für die Aufstellung und Miete des Baugerüsts und das abschließende Verputzen des Sockels sowie das Anstreichen der Außenwand. Energiebedingte Mehr- und Sowiesokosten ergeben zusammen die Vollkosten.

In der Realität gibt es einen fließenden Übergang zwischen zusätzlichen und ohnehin stattfindenden energetischen Sanierungen, beispielsweise wenn eine alte, aber noch funktionierende Heizung ersetzt wird oder wenn eine Dämmung an einer alten Fassade mit noch vorhandener Restlebensdauer stattfindet. Unter welchen Bedingungen in Wirtschaftlichkeitsabschätzungen die Vollkosten oder die energiebedingten Mehrkosten angesetzt werden, wird in wissenschaftlichen Studien teils unterschiedlich gehandhabt und kontrovers diskutiert. Vor allem in Makro- und Konzeptstudien werden häufiger die energiebedingten Mehrkosten angesetzt, was zu einer vergleichsweise höheren Wirtschaftlichkeit führt (als bei angesetzten Vollkosten). Hier wird das *Kopplungsprinzip* zugrunde gelegt, bei dem davon ausgegangen wird, dass Maßnahmen zur energetischen Verbesserung in der Regel dann durchgeführt werden, wenn ohnehin eine Maßnahme am betreffenden Bauteil beabsichtigt ist, beispielsweise zur Instandhaltung oder zur Verbesserung des Wohnwertes (Henger/Voigtländer 2012; Jagnow/Wolff 2020, S. 77 f.; Simons 2012).

Da bei investiven Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle einmalig hohe Kosten auftreten und der Nutzen über einen langen Zeitraum gestiftet wird,⁵ werden die Investitionskosten im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsabschätzungen auf die Nutzungsdauer verteilt (jährliche Kapitalkosten). Sie ergeben zusammen mit den jährlichen Energie- und Wartungskosten die *Jahreskosten* (auch als *Jahresgesamtkosten* bezeichnet) und ermöglichen einen Kostenvergleich unterschiedlicher Maßnahmen. Im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Abschätzung für eine Sanierungsmaßnahme werden die Jahresgesamtkosten aller Optionen (einschließlich Fortsetzung des Status quo, sofern eine machbare Option) miteinander verglichen. Typischerweise setzen sich die Jahreskosten für die Fortsetzung des Status quo aus den erwarteten Energie- und Wartungskosten zusammen, während bei einer investiven Maßnahme (Sanierung) die erwarteten Energie- und Wartungskosten zuzüglich der Kapitalkosten ermittelt werden. In der Gegenüberstellung einer betrachteten Option und eines Referenzfalls ergibt sich entweder ein positiver (Kosten der betrachteten Option übersteigen die Kosten des Referenzfalls, z. B. Status-quo-Fortsetzung) oder ein negativer Wert (Kosten der betrachteten Option fallen geringer aus als die Kosten des Referenzfalls, z. B. Status-quo-Fortsetzung).

Um unterschiedliche Optionen, beispielsweise für den Ersatz einer alten Heizung, miteinander zu vergleichen, können die *Kosten der eingesparten Energie* berechnet werden (auch als äquivalenter Energiepreis oder spezifische Gestehungskosten bezeichnet). Sie geben an, wie teuer es ist, eine kWh (meist Endenergie) zu sparen, und ermöglichen einen Wirtschaftlichkeitsvergleich von Sanierungsmaßnahmen (Enseling 2003; Enseling/Hacke 2020; Jagnow/Wolff 2017). Nach der gleichen Logik lassen sich auch die *Kosten der Vermeidung von CO₂-Emissionen* (auch als äquivalenter CO₂-Preis bezeichnet) ermitteln. Sie zeigen an, wie teuer es ist, 1 t CO₂-Äquivalent zu vermeiden (Jagnow/Wolff 2020, S. 493 ff.). Voraussetzung für diese Art von Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist die Zielsetzung der CO₂-Emissionsreduktion als erwarteter Nutzen.

2.4.3 Volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Betrachtungen

Für Politikentscheider/innen stellt sich aus einer Makroperspektive die Frage, welche wohngebäudebezogenen Technologien und Sanierungsmaßnahmen ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis in Deutschland insgesamt haben (Nutzen überwiegt Kosten). Dabei wird als Nutzen typischerweise die Erreichung politischer Ziele angesehen, beispielsweise die Einspar- und Reduktionsziele für Deutschland oder des Ziels einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft. Dem Nutzen werden die Kosten auf der nationalen Ebene gegenübergestellt. Neben den aggregierten Kosten der Wohngebäudeeigentümer/innen gehören zu den relevanten gesellschaftlichen Kosten auch die Aufwendungen für staatliche Maßnahmen wie Förderprogramme.

⁵ Beispielsweise Heizungsaustausch ca. 20 Jahre, Dämmung ca. 30 Jahre und länger.

3 Wohngebäudebestand und Maßnahmen an Gebäudetechnik und Gebäudehülle

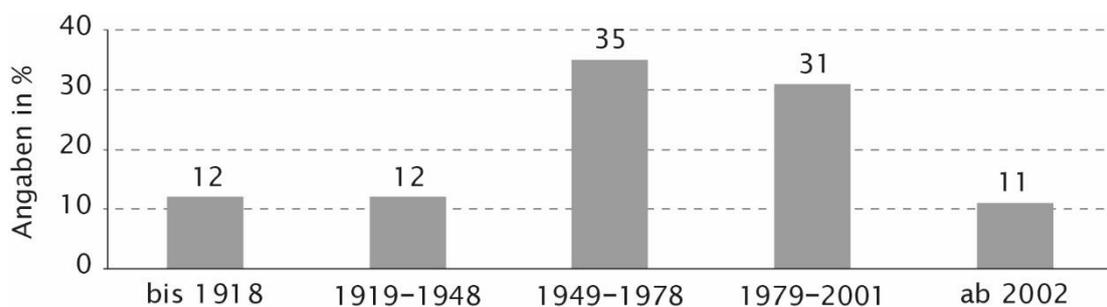
In diesem Kapitel wird ein Überblick über den Wohngebäudebereich, einschließlich der hier untersuchten Gebäudetypen (Kap. 3.1) sowie über die untersuchten Gebäudetechnologien und Sanierungsmaßnahmen gegeben (Kap. 3.2).

3.1 Wohngebäudebestand und Typgebäude

3.1.1 Wohngebäudebestand

In Deutschland gab es 2018 insgesamt 19,05 Mio. Wohngebäude mit rund 40 Mio. Wohneinheiten und einer Gesamtwohnfläche von rund 3,75 Mrd. m². Ein- und Zweifamilienhäuser machen rund 83 % der Wohngebäude aus. Sie enthalten knapp 60 % der Wohnfläche und rund 46 % der Wohneinheiten. Der jeweilige Rest sind überwiegend Mehrfamilienhäuser (DESTATIS 2019b; Jagnow/Wolff 2020, S. 58). Gebäude bis zu einem Baujahr von 1978 machen mehr als die Hälfte des Gebäudebestands aus (Abb. 3.1).

Abb. 3.1 Aufteilung der Wohngebäude nach Baujahresgruppen in Deutschland (Stand 2016)



Eigene Darstellung nach Zahlen aus Cischinsky/Diefenbach 2018

Für eine wirtschaftlich sinnvolle bzw. notwendige Sanierung der Gebäudehülle werden vor allem die Gebäude mit einem Baujahr vor 1978 angesehen, da 1977 die WärmeschutzV in Kraft trat (Jagnow/Wolff 2020, S. 51). Für sie sind besonders hohe Einsparungen zu erwarten, sofern in den vergangenen Jahren keine Sanierung stattgefunden hatte. Die Datenlage zum Stand der Sanierungen im Gebäudebestand ist lückenhaft. Für Fassadendämmungen wird davon ausgegangen, dass sie bei einem Fünftel der Gebäude mit Baujahr vor 1979 stattfanden (UBA 2019).

3.1.2 Repräsentative Typgebäude

Wenn Aussagen über die typischen Einspar- und Wirtschaftlichkeitsergebnisse in Wohngebäuden in Deutschland getroffen werden sollen, werden in wissenschaftlichen Studien und Statistiken repräsentative Typgebäude zugrunde gelegt (DESTATIS 2019b; Loga et al. 2015). Dabei handelt es sich um theoretische Konstrukte, die *durchschnittliche* Eigenschaften für den entsprechenden Gebäudetyp in Deutschland haben. Indem berücksichtigt wird, wie viele Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser es in Deutschland gibt, können außerdem Aussagen zu den Einsparungen und Wirtschaftlichkeitseinschätzungen auf der nationalen Ebene getroffen werden. Nachfolgend werden Typgebäude für die Gruppe der Ein- und Zweifamilienhäuser und die Gruppe der Mehrfamilienhäuser anhand ausgewählter Eigenschaften beschrieben, die jeweils Durchschnittswerte für Deutschland darstellen.

Ende 2018 gab es etwa 15,8 Mio. Ein- bzw. Zweifamilienhäuser in Deutschland (DESTATIS 2019a). Ein für Deutschland repräsentatives Typgebäude für Ein- und Zweifamilienhäuser besitzt im Schnitt 1,2 Wohnungen und rund 142 m² Wohnfläche. Es hat ein Baujahr im Bereich von 1969 bis 1978 und wird von 2,7 Personen bewohnt. Daraus ergeben sich durchschnittlich 52 m² Wohnfläche pro Person. Die Raumhöhe beträgt rund 2,5 m und das entsprechende Luftvolumen 354 m³. Der obere Gebäudeabschluss des theoretischen Typgebäudes besteht zu 53 % aus Dachfläche und zu 47 % aus einer oberen Geschossdecke. Der untere Gebäudeabschluss ist zu 48 % eine Bodenplatte auf dem Erdreich und zu 52 % eine Kellerdecke (Jagnow/Wolff 2020, S. 171 f.). In Abbildung 3.2 wird ein typisches Ein- bzw. Zweifamilienhaus beispielhaft dargestellt.

Als Mehrfamilienhäuser werden alle Gebäude mit mehr als 2 Wohnungen zusammengefasst, die vorrangig einer Wohnnutzung dienen. Im Durchschnitt besitzt ein Mehrfamilienhaus in Deutschland 6,8 Wohnungen mit einer Wohnfläche von etwa 470 m². Hiervon existieren derzeit etwa 3,2 Mio. Objekte in Deutschland (DESTATIS 2019a). Das Baujahr des Typgebäudes für Mehrfamilienhäuser in Deutschland liegt zwischen 1958 und 1968 (Jagnow/Wolff 2020, S. 173 f.). Im gesamten Mehrfamilienhaus wohnen durchschnittlich 12,2 Personen mit im Schnitt 39 m² Wohnfläche pro Person. Mit einer Raumhöhe von 2,5 m beträgt das Luftvolumen 1.175 m³. Der obere Gebäudeabschluss des theoretischen Typgebäudes für Mehrfamilienhäuser besteht zu 40 % aus Dachfläche und zu 60 % aus einer oberen Geschossdecke. Der untere Gebäudeabschluss ist zu 14 % eine Bodenplatte auf dem Erdreich und zu 86 % eine Kellerdecke (Jagnow/Wolff 2020, S. 171 f.). In Abbildung 3.3 wird ein typisches Mehrfamilienhaus beispielhaft dargestellt.

Abb. 3.2 Beispielhaftes Ein- bzw. Zweifamilienhaus



Foto: Kati Jagnow

Abb. 3.3 Beispielhaftes Mehrfamilienhaus



Foto: Kati Jagnow

3.2 Bestand und Maßnahmen an der Gebäudetechnik

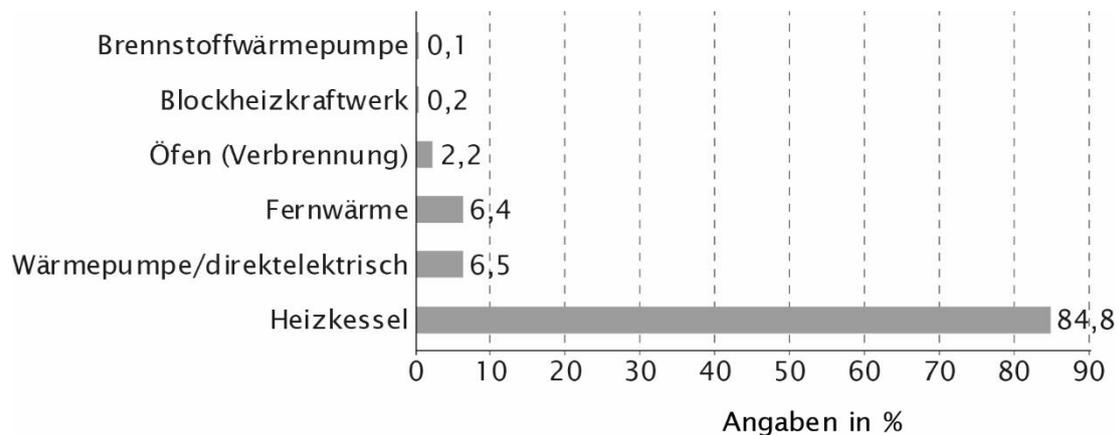
Grundsätzlich können energetische Erneuerungen und Sanierungen im und am Gebäude als Einzelmaßnahme oder als Maßnahmenpaket umgesetzt werden. Ob und in welcher Form sie umgesetzt werden bzw. aus energetischer Sicht oder der Investorenperspektive sinnvoll sind, hängt vom Einzelfall ab, insbesondere von den Wünschen der Eigentümer/innen, den finanziellen Belangen, den spezifischen baulichen Erfordernissen des Gebäudes und den gesetzlichen Vorgaben. Häufig spielen nicht nur energetische Belange eine Rolle. Maßgebliche Reduktionseffekte beim Energieverbrauch bzw. den THG-Emissionen liegen im Austausch bzw. dem Ersatz von Heiztechnik und in der Gebäudesanierung.

3.2.1 Hauptwärmeerzeuger

Bei der Gebäudetechnik stehen die *Hauptwärmeerzeuger* (Heiztechnik) im Vordergrund, da das Heizen in Deutschland mit Abstand den größten Anteil am Energieverbrauch eines Wohngebäudes hat. Ein Hauptwärmeerzeuger ist das Herzstück der Wärmebereitstellung eines Gebäudes – aktuell meist als Heizkessel (für gesamtes Gebäude oder Etagen), seltener als Wärmepumpe (oder Elektroheizung), mittels Fernwärme oder als Einzelraumofen. Noch seltener treten Blockheizkraftwerke und Hybridgeräte als Kombinationen von Heizkessel mit Wärmepumpe auf. So befand sich 2016 in rund 85 % der Wohngebäude in Deutschland ein Heizkessel (Abb. 3.4).⁶

⁶ Wenn die Hauptwärmeerzeuger nicht auf Wohngebäude, sondern auf Wohnungen bezogen werden, fällt der Anteil der Heizkessel mit rund 76 % etwas geringer aus – zugunsten eines höheren Anteils an Fernwärme.

Abb. 3.4 Anteile der Hauptwärmeerzeuger in Wohngebäuden in Deutschland 2016

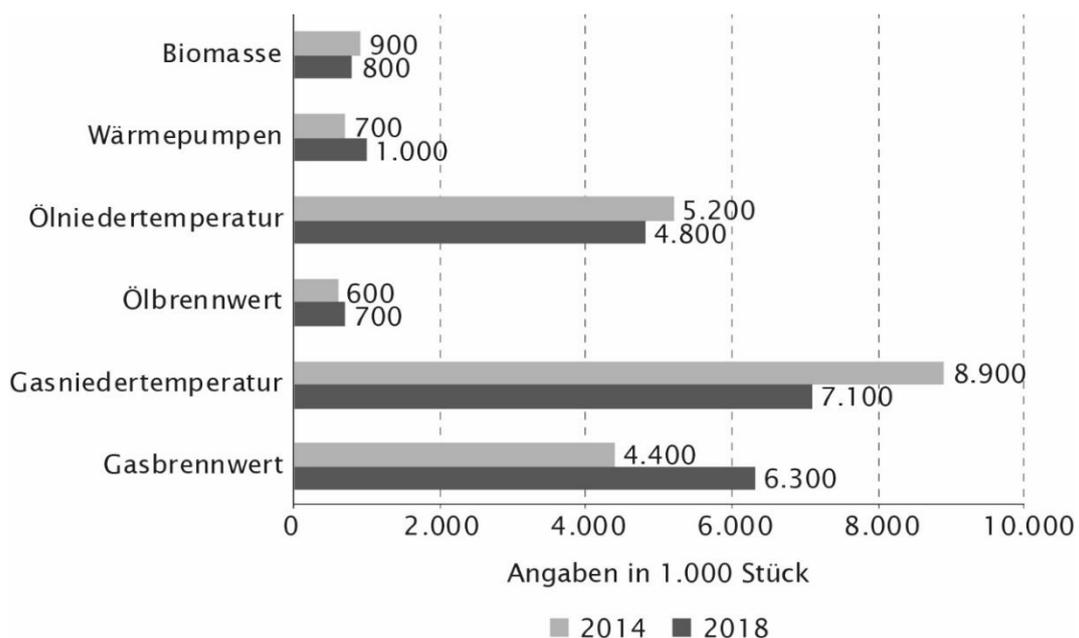


Eigene Darstellung mit Zahlen aus Cischinsky/Diefenbach 2018, S. 81

Sie verteilen sich auf 52% erdgasverbrennende Heizkessel, 27% heizölverbrennende Kessel und 6% sonstige Brennstoffe (wie Holz, Biomasse, Flüssiggas oder Kohle) nutzende Geräte. In Deutschland waren 2018 etwa 20,7 Mio. Wärmeerzeuger in Gebäuden⁷ installiert. Diese Zahl hat sich in den letzten Jahren wenig geändert (BDH 2021; BMWi 2015; dena 2019a).

Bei den Heizkesseln hat sich die Zusammensetzung der Gesamtmenge in Richtung Brennwertechnik verschoben (Abb. 3.5).

Abb. 3.5 Entwicklung des Bestands an zentralen Wärmeerzeugern im Gebäudebestand in Deutschland*



* Gebäude insgesamt, d. h. nicht nur, aber vor allem in Wohngebäuden

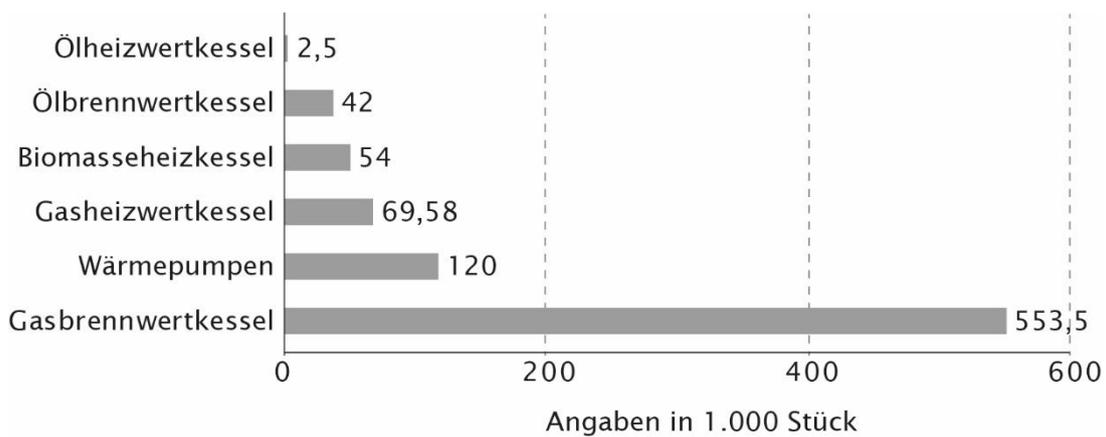
Quelle: nach Jagnow/Wolff 2020, S. 498 basierend auf BDH o. J.; BMWi 2015

⁷ nicht nur, aber vor allem in Wohngebäuden

Die Käufe von Hauptwärmeerzeugern in Deutschland dienen überwiegend dazu, Altgeräte im Bestand zu ersetzen (zum Ende ihrer Lebensdauer oder vorzeitig aus anderen Gründen). Ersatzkäufe machten 2019 rund 85 % des Absatzes aus. Die restlichen rund 15 % fanden im Rahmen von Neubauten statt. 2020 wurden mit großem Abstand am häufigsten Gasbrennwertkessel erworben (zwei Drittel aller Wärmeerzeuger), gefolgt von Wärmepumpen, Gasheizwert-, Biomasse-, Ölbrennwert- und Ölheizwertkesseln (Abb. 3.6).

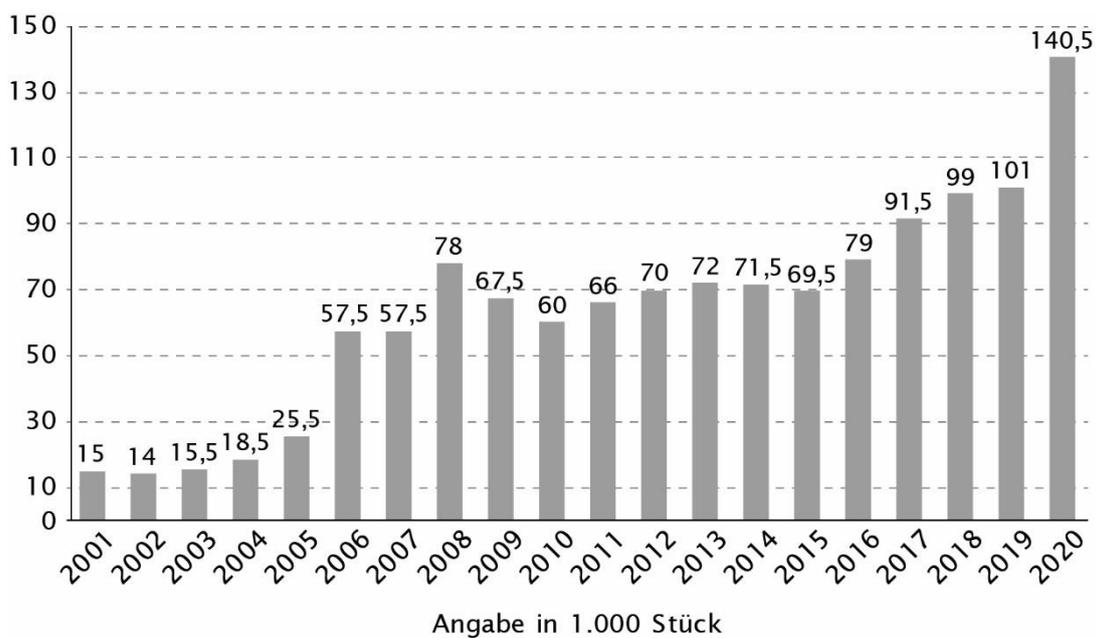
Der Absatzanteil von Wärmepumpen ist seit 2000 (unregelmäßig) angestiegen (Abb. 3.7). 2020 war der Anstieg besonders hoch (BDH 2021). Bezogen auf den Gesamtbestand an Heizungen lag der Anteil von Wärmepumpen 2019 mit 2,4% deutlich niedriger als bei Käufen für Neubauten mit rund einem Drittel Anteil (Jagnow/Wolff 2020, S. 500 f.).

Abb. 3.6 Absatz von Wärmeerzeugern in Deutschland 2020



Eigene Darstellung mit Zahlen aus BDH 2021

Abb. 3.7 Absatz von Wärmepumpen in Deutschland 2001 bis 2020



Eigene Darstellung mit Zahlen aus BWP 2021

Die Marktanteile von Gas- und Ölheizwertkesseln sind kontinuierlich gesunken (dena 2019a; BDH 2021).

Eine weitere Gruppe von Hauptwärmeerzeugern, die aufgrund ihres geringen Anteils an Heizungen in Deutschland als Nischenprodukt bezeichnet werden können, stellen Elektroheizungen dar. Sie werden direkt mit elektrischem Strom betrieben und daher auch als Elektro- bzw. Stromdirektheizungen bezeichnet (Kap. 5.2.3 u. 5.3.2.). Eine Teilgruppe stellen Infrartheizungen dar. In der Vergangenheit wurden Infrartheizungen typischerweise als Zusatzheizungen verwendet. Ein charakteristisches Anwendungsfeld im Wohnbereich sind Elektroheizstrahler zur kurzzeitigen (ggf. zusätzlichen) Beheizung von Räumen oder auch im Außenbereich. Es gibt neben strom- auch gasbetriebene Geräte (die aber eher selten sind). Infrartheizungen werden auch als Hauptwärmeerzeuger beworben, aber nur unter bestimmten Bedingungen empfohlen. Vorteilhaft erscheinen ihre geringen Anschaffungskosten, denen aber relativ hohe Betriebskosten gegenüberstehen.

Wirtschaftlich sind Infrartheizungen daher vor allem in Wohngebäuden mit einem Passivhausstandard (z. B. Neubau), d. h. bei einer sehr guten Dämmung aller Hüllflächen, die zu einem geringen Heizbedarf führt. Einerseits wird aus energetischer Sicht positiv hervorgehoben, dass Infrartheizungen grundsätzlich eine als behaglich empfundene Wärme abgeben und aufgrund dessen eine um ca. 2 °C geringere Wohnraumtemperatur erforderlich ist (als bei Heizkörpern). Andererseits wird einschränkend argumentiert, dass der Wärmekomfort sich primär auf jene Bereiche beschränkt, die im direkten Strahlungsbereich liegen. Infrartheizungen können daher vor allem in schlecht gedämmten Räumen überwiegend zu keiner guten thermischen Behaglichkeit führen (Energieinstitut Vorarlberg 2017). Ein Vergleich von (strombetriebenen) Infrartheizungen mit Wärmepumpen bringt außerdem hervor, dass Wärmepumpen (aufgrund der genutzten Umweltenergie in Verbindung mit Stromnutzung; Kap. 2.3.3 u. 4.1.1) eine deutlich höhere Stromeffizienz besitzen (ca. um den Faktor 3).

3.2.2 Zusatzerzeuger, Qualitätssicherung, Betriebsoptimierung, Peripherie

Auch Maßnahmen an den *Zusatzerzeugertechnologien* können zur Reduktion von Energieverbrauch und THG-Emissionen von Wohngebäuden beitragen, vor allem Solarthermie, Photovoltaik und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Solarthermieanlagen stellen ausschließlich Wärme bereit, die für Trinkwarmwasser bzw. Heizungsunterstützung genutzt werden kann. PV-Anlagen erzeugen elektrische Energie, die zur Deckung des Haushaltsstromverbrauchs oder auch zur Erzeugung von Wärme für Trinkwarmwasser und Heizungsunterstützung dient. Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung stellen Wärme für die Beheizung des Gebäudes bereit. Hierzu nutzen sie die Abwärme, die über die Lüftungsanlage abgeführt wird und per Wärmeübertrager erneut genutzt werden kann.

Rund jedes fünfte Wohngebäude in Deutschland verfügte 2016 über eine Solaranlage. Davon entfielen rund 60 % auf Solarthermie und etwa 40 % auf Photovoltaik. Eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung befand sich in knapp 3 % der Wohngebäude, vor allem in jüngeren Gebäuden (Cischinsky/Diefenbach 2018, S. 91 f.).

Außerdem haben Maßnahmen der *Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung* (vor allem bei Hauptwärmeerzeugern, aber auch des Gesamtsystems, z. B. hydraulischer Abgleich) und energetische *Verbesserungen an der Peripherie* (z. B. Dämmung von Rohrleitungen) einen maßgeblichen Einfluss darauf, inwieweit Einsparpotenziale in der praktischen Umsetzung auch tatsächlich realisiert werden.

3.3 Maßnahmen an der Gebäudehülle

Maßgebliche energetische Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle umfassen

- › die Sanierung der Außenwand,
- › den Austausch der Fenster,
- › die Sanierung des Daches bzw. der obersten Geschossdecke (oberer Gebäudeabschluss) und
- › die Sanierung der Kellerdecke bzw. der Bodenplatte (unterer Gebäudeabschluss).

Wirksame Maßnahme der Qualitätssicherung bei diesen baulichen Maßnahmen sind beispielsweise das Vermeiden von Wärmebrücken und das Erreichen einer möglichst hohen Luftdichtheit.

Anhand der Sanierungsrate wird angegeben, welcher Anteil des Gebäudebestands jährlich energetisch saniert wird. Die Sanierungsrate wird für einzelne Gebäudeteile (z. B. Außenwände) und auch für die Gebäude insgesamt ermittelt. Die Gesamtsanierungsrate stellt einen gewichteten Durchschnitt der Raten für die berücksichtigten Gebäudeteile dar. Die jährliche Sanierungsrate in Deutschland wird seit 2010 unverändert auf rund 1 % des Gebäudebestands geschätzt. Für Außenwände wird eine Sanierungsrate von 0,8 % angegeben, während sie für Dach und obere Geschossdecke auf rund 1,5 % und für Keller und Bodenplatte auf rund 0,3 % geschätzt wird. Für 2017 wird abgeschätzt, dass 36 % der Gebäude mit einem Baujahr bis 1978 (gewichteter Durchschnittswert über alle Bauteile) gedämmt wurden (Cischinsky/Diefenbach 2018; dena 2013, 2017 u. 2019a; Jagnow/Wolff 2020, S. 73 f.).

Eine Bewertung des energetischen Zustands der Wohngebäude in Deutschland ergibt für 2016 folgendes Bild: Eine gute Wärmedämmung durch die Außenwände (typischer Neubaustandard und besser) liegt geschätzt bei rund 30 % der Ein- und Zweifamilienhäuser vor. Bei Fenstern ist dieser Anteil mit 10 % deutlich geringer, während er beim Dach bzw. der obersten Geschossdecke bei rund einem Viertel und bei der Kellerdecke bzw. Bodenplatte bei knapp 40 % liegt (Jagnow/Wolff 2020, S. 84 ff.). Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit für das einzelne Gebäude

In Kapitel 2.3 wurde deutlich, dass der tatsächliche Energiebedarf eines Gebäudes stark von der Ausgangssituation (Sanierungsstand des Gebäudes, ursprünglich vorhandene Heiztechnik, Regelung der Gebäudetechnik) und den individuellen Gegebenheiten (Nutzerverhalten, klimatische Gegebenheiten/Wetter etc.) abhängt. Dementsprechend fallen auch die tatsächlichen Einspareffekte und die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen individuell unterschiedlich aus.

In diesem Kapitel werden verallgemeinerbare Erkenntnisse über die *typischen* Einspareffekte und die jeweilige Wirtschaftlichkeit aufgezeigt, indem entweder auf Spannbreiten verwiesen wird oder indem die Effekte der unterschiedlichen Maßnahmen anhand der in Kapitel 3.1.2 erläuterten durchschnittlichen Gebäude (Typgebäude) in Deutschland miteinander verglichen werden. Dabei werden auch unterschiedliche gebäudetechnische und bauliche Ausgangsbedingungen bzw. Zusatzmaßnahmen betrachtet, um ihren Einfluss auf die Einsparungen darzustellen.

Nachfolgend werden zunächst die Einspareffekte an Energie und Treibhausgasen dargestellt, die von den unterschiedlichen Maßnahmen in einem durchschnittlichen Gebäude ausgelöst werden (Kap. 4.1), um im Anschluss die typische Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen aufzuzeigen (Kap. 4.2) und die Ergebnisse einander zusammenfassend gegenüberzustellen (Kap. 4.3). Die betrachteten Technologien und Sanierungsmaßnahmen beinhalten den Tausch des Hauptwärmeerzeugers, die Einbindung zusätzlicher Erzeuger (wie Photovoltaik) sowie Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle. Hervorgehoben werden dabei die Einflüsse der Qualitätssicherung und Optimierung von Heizungs- und Klimatisierungssystemen sowie der Integration von digitalen, intelligenten und vernetzten Technologien im Gebäude.

4 Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit für das einzelne Gebäude

4.1 Energie- und THG-Einsparung durch Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle

4.1.1 Austausch des Hauptwärmeerzeugers

Gasbrennwertkessel

Sofern Altgeräte durch moderne Heizkessel für fossile Brennstoffe (vor allem Gasbrennwertkessel) ersetzt werden, besitzt das Neugerät eine teils deutlich höhere Effizienz als die Altanlage (vor allem beim Ersatz besonders alter Bestandsgeräte, die noch zahlreich vorhanden sind). Bei einem modernen Gasbrennwertkessel fallen der Energieverbrauch, die Energiekosten und die THG-Emissionen entsprechend geringer aus als bei dem Altgerät. Die resultierenden Einsparungen an Energie und folglich auch THG-Emissionen werden (vor allem je nach Altgerät und Qualitätssicherung bei der Neuanlage) mit 2 bis 30% des Verbrauchs der Altanlage beziffert. Häufig angegebene Werte liegen bei 10 bis 20% (BDEW 2020; co2online 2017a; Lambrecht 2018; Mailach/Oschatz 2017a).

Hinweise auf die tatsächlichen Einsparwirkungen, die auf den Ersatz eines alten Heizkessels durch einen modernen Gasbrennwertkessel zurückgehen, können aus den auf Messungen unter Realbedingungen basierenden Jahresnutzungsgraden der Heizkessel gewonnen werden. So wurden im Rahmen unterschiedlicher wissenschaftlicher Untersuchungen in Wohngebäuden brennwertbezogene Jahresnutzungsgrade zwischen 78 und 97% ermittelt. Für moderne Brennwertkessel werden meist 94 bis 96% angesetzt. Die unterschiedlichen Jahresnutzungsgrade spiegeln nicht nur die Bandbreite der Effizienzen der Heizkessel je nach Alter wider, sondern sie gehen maßgeblich auch darauf zurück, ob Maßnahmen zur Betriebsoptimierung, Qualitätssicherung und Verbesserung der Peripherie (Rohrleitungen etc.) getroffen wurden. Zu den identifizierten Einflussfaktoren gehören u. a. das Vorhandensein eines Überströmventils, die Wärme des Aufstellungsortes für den Heizkessel, die Art der Anlagenregelung (witterungsgeführt vs. Referenzraum), die Heizflächenart (Heizkörper, Fußbodenheizung, Kombination) und der hydraulische Abgleich (Deidert et al. 2012; Jagnow/Wolff 2020, S. 214 ff.; Schulze Darup 2019; VZBV 2011; Wolff et al. 2004).

Wenn ein alter Gaskessel durch einen neuen ersetzt wird, entspricht der Prozentwert für die THG-Emissionseinsparungen dem der Energieeinsparungen. Ein Wechsel von einer Öl- zu einer Gasheizung (sofern ein Anschluss an das Erdgasnetz der Gemeinde möglich ist) bringt eine zusätzliche CO₂-Einsparung mit sich. Der THG-Ausstoß eines Gaskessels liegt ungefähr bei zwei Dritteln des Ausstoßes eines Ölkessels⁸ (Bettgenhäuser/Boermans 2011, S. 10; dena 2019b).

Wärmepumpen

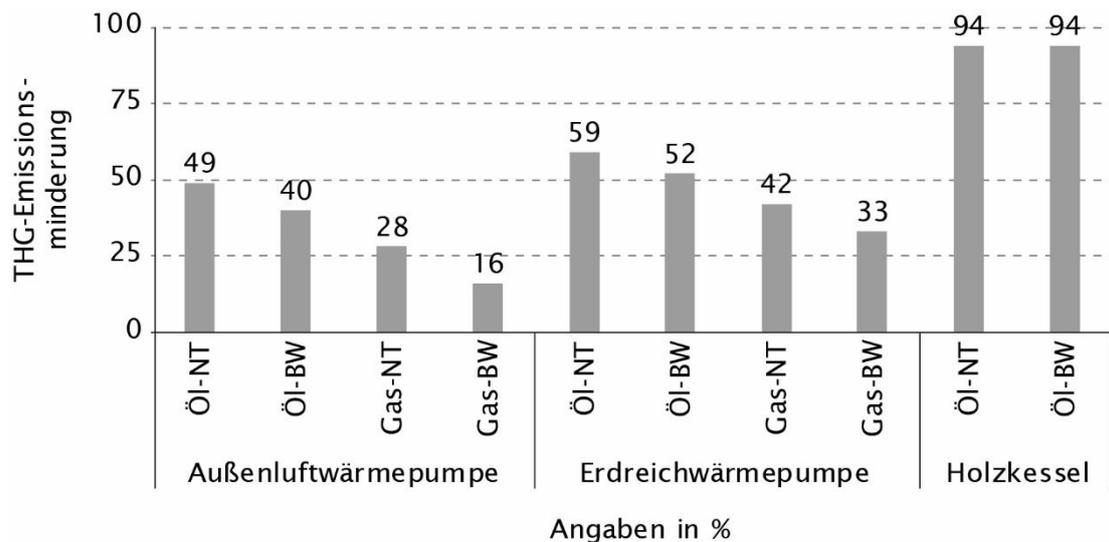
Wärmepumpen nutzen thermische Energie aus der Umgebungsluft (Luft- und Außenluftwärmepumpen), dem Erdreich (Sole- und Erdreichwärmepumpen) oder auch dem Grundwasser (Grundwasserwärmepumpen), um sie mithilfe eines Wärmeübertragers als Heizwärme für Räume bzw. Warmwasser nutzbar zu machen. Warmwasserwärmepumpen bzw. Brauchwasserwärmepumpen nutzen die Raumluft (z. B. des Kellerraums, in dem die Heizung steht), Abluft (aus anderen Räumen) oder Außenluft, um Warmwasser bereitzustellen. Luftwärmepumpen werden seit vielen Jahren am häufigsten erworben (BWP 2021). Wärmepumpen besitzen einen Kompressor, der mit Strom betrieben wird. Sie generieren ein Vielfaches an Wärmeenergie bezogen auf den eingesetzten Strom, da sie die thermische Energie der Umgebung quasi gratis nutzen. Ihre Jahresarbeitszahl lag in Messungen zwischen 1,2

⁸ bei Annahme der gleichen Heizleistung und Gebäude

und 5,4 mit häufigen Werten zwischen 2 und 4. In Studien wurde auch festgestellt, dass die in der Realität gemessenen Verbrauchswerte zu einer Jahresarbeitszahl führten, die rund 20% unter der von genormten Prüfstandmessungen lag (Born et al. 2017; Jagnow/Wolff 2020, S. 204 ff.).

Die Höhe der von einer Wärmepumpe verursachten THG-Emissionen erwächst aus ihrer (Strom-)Effizienz und ist auch abhängig von den Emissionen, die vom genutzten Strom verursacht werden. Der individuelle THG-Reduktionseffekt durch eine Wärmepumpe nimmt zu, je höher der Anteil regenerativer Energien im deutschen Strommix ist. Zum Vergleich: Der deutsche Strommix besaß 2019 aufgrund der Kohleanteile einen höheren CO₂-Emissionsfaktor (408 g/kWh) als die Verbrennung von Erdgas zu Heizzwecken (201 g/kWh bezogen auf den Brennwert). Für 2020 schätzt das Umweltbundesamt (UBA 2021a, S.9, 16), dass sich der CO₂-Emissionsfaktor für Strom im Wesentlichen durch Zubau von Photovoltaik in Deutschland auf 366 g/kWh reduziert hat.

Abb. 4.1 THG-Emissionsminderung durch Austausch eines Heizkessels mit fossilen Brennstoffen durch eine Wärmepumpe oder einen Holzkessel bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus

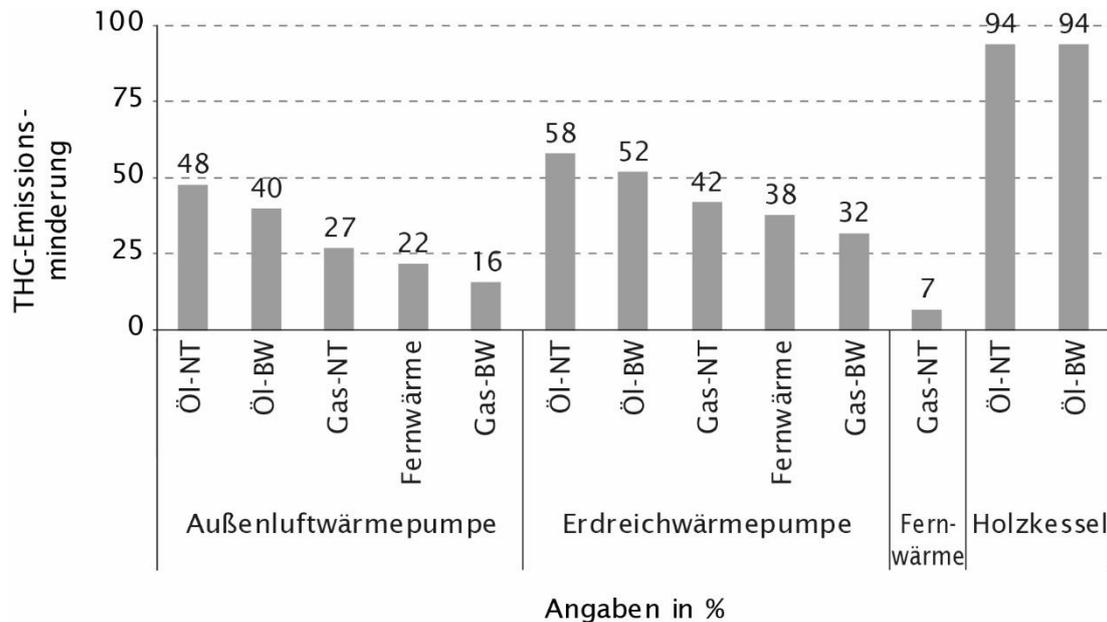


NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 88 ff.

Wenn der Strommix in Deutschland zugrunde gelegt wird, ergeben sich für einen Wechsel von einem typischen Gasbrennwertkessel (Nutzungsgrad 0,93 bzw. 93%) zu einer typischen Außenluftwärmepumpe (Jahresarbeitszahl 2,4) THG-Emissionsminderungen von 16%. Bei einem Wechsel von einem Heizölniedertemperaturkessel (Nutzungsgrad 0,85 bzw. 85%) zu einer Erdreichwärmepumpe (Jahresarbeitszahl 3,0) werden Emissionsminderungen von 59% erreicht. Die prozentualen Einspareffekte liegen bei einem typischen Ein- bzw. Zweifamilienhaus ähnlich hoch wie bei einem typischen Mehrfamilienhaus (Abb. 4.1 u. 4.2) (Jagnow/Wolff 2020, S. 88 ff.; 204 ff.).

Abb. 4.2 THG-Emissionsminderung durch Austausch eines Heizkessels mit fossilen Brennstoffen durch eine Wärmepumpe, Fernwärme oder einen Holzessel bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 88 ff.

Bei Mehrfamilienhäusern wurde auch Fernwärme als Ausgangssituation berücksichtigt, da sie insbesondere in Ostdeutschland und in den Stadtstaaten vermehrt an Fernwärme angeschlossen sind. Ein- bzw. Zweifamilienhäuser sind dagegen nur zu einem sehr geringen Anteil an Nah- bzw. Fernwärmesysteme angeschlossen.

Bei den dargestellten Emissionsminderungen handelt es sich um Orientierungswerte, die auf der Bilanzierung repräsentativer Durchschnittsgebäude beruhen. Die Emissionsminderungen können im Einzelfall deutlich über oder unter den präsentierten Kennwerten liegen. Mit einem zunehmenden Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien verbessern sich die Bedingungen bei einem Einsatz von Elektrowärmepumpen.

Heizungshybridsysteme

In Heizungshybridsystemen besteht die Heizungsanlage aus einem Heizungskessel und einer elektrischen Wärmepumpe. Derartige Hybridssysteme können geschaffen werden, indem der bestehende Wärmeerzeuger komplett ersetzt oder um eine Wärmepumpe ergänzt wird. Ein solches System ist beispielsweise dann von Interesse, wenn der Wärmeerzeuger aktuell erneuert werden soll bzw. muss, während Maßnahmen an der Gebäudehülle erst in 7 bis 10 Jahren anstehen bzw. vorgesehen sind (Jagnow/Wolff 2020, S. 93). Insbesondere bei bisher noch weitestgehend unsanierten Gebäuden, die eine hohe Systemtemperatur bzw. Wärmeleistung benötigen, wären Hybridssysteme eine mögliche Übergangsoption.

Die elektrische Wärmepumpe wird so dimensioniert, dass ihre Wärmeleistung ausreichen würde, wenn das Gebäude einer Sanierung der Gebäudehülle in den nächsten Jahren unterzogen werden würde. Infolge der Sanierung könnte dann der Heizkessel entnommen und das Gebäude ausschließlich über die bereits vorhandene elektrische Wärmepumpe versorgt werden (Jagnow/Wolff 2020, S. 92). Hybridssysteme mit Erdreichwärmepumpe könnten bei Ein- bzw. Zweifamilienhäusern zu Emissionsminderungen von 22 bis 52% und bei Mehrfamilienhäusern von 28 bis 56% erzielen (Jagnow/Wolff 2020, S. 219 f.). Die Nutzung von Hybridssystemen mit einer Außenluftwärmepumpe führt zu geringeren Emissionsminderungen von 7 bis 25% bei Ein- bzw. Zweifamilienhäusern und von 10 bis 29% bei Mehrfamilienhäusern (Jagnow/Wolff 2020, S. 221 f.). Die jeweils höheren Emissionsminderungen können bei Ölheizungen erzielt werden. Wie bei Wärmepumpen gilt auch bei Hybridssystemen,

dass die THG-Emissionsreduktion durch den Heizungswechsel mit einem zunehmenden Anteil erneuerbaren Energien am Strommix höher ausfallen würde.

Holzessel (Biomassekessel)

In Holzesseln können Holzhackschnitzel, Holzreste, Scheitholz oder Holzbriketts (d. h. Presslinge aus Holzpartikeln, bei geringer Größe als Pellets bezeichnet) verbrannt werden. Es gibt Holzheizungen, die manuell bestückt werden (Scheitholz) und solche, deren Bestückung automatisch funktioniert (Pelletheizung). Holzessel besitzen in der Regel eine geringere Energieeffizienz als Heizkessel für fossile Brennstoffe. Der auf Messungen basierende brennwertbezogene Jahresnutzungsgrad lag in Studien zwischen 68 und 88 %. Der Wechsel von einem typischen Ölkessel (Nutzungsgrad 80 bis 88 %) zu einem typischen Holzessel (Nutzungsgrad 70 %) bei einem durchschnittlichen Wohngebäude bringt eine THG-Emissionsminderung von etwa 94 % mit sich (Abb. 4.1 u. 4.2). Hier führt der sehr niedrige Emissionsfaktor für Holz als einem nahezu klimaneutralen Brennstoff zu den hohen Emissionsminderungen bei Treibhausgasen (Jagnow/Wolff 2020, S. 226 f. u. 493).

Holzheizungen verursachen aber auch Feinstaubemissionen (insbesondere ältere Kessel sowie auch in Abhängigkeit vom Wartungszustand der Holzheizung und der Brennstoffqualität des Holzes). Pelletheizungen haben die besten Feinstaubwerte; ihr Anteil an den Holzheizungen ist aber gering (Wenzel et al. 2015). Bezogen auf kleinere Feinstaubpartikel (bis 2,5 µm) liegen die Feinstaubemissionen von Holzheizungen in Deutschland in der Größenordnung der Emissionen aus dem Straßenverkehr (UBA 2018). Das Ausmaß der Feinstaubemissionen wird zum Schutz der menschlichen Gesundheit in der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen⁹ (1. BImSchV) gesetzlich geregelt. Für Holzheizungen weist sie u. a. anlagentypbezogene Staubemissionsgrenzwerte und bauliche Anforderungen an die Ableitung der Abgase aus.

Wärmenetze

Je nach Entfernung der wärmeerzeugenden Anlage und der räumlichen Ausdehnung des Versorgungsnetzes werden Wärmenetze in Nah- und Fernwärmenetze unterteilt. Wärmenetze sind insbesondere in stark verdichteten urbanen Räumen zu finden. Bei der Produktion von Strom wird in der Regel Abwärme genutzt (Kraft-Wärme-Kopplung), um den Brennstoff effizient zu nutzen. Brennstoffe bzw. Energieträger können z. B. Kohle und Erdgas sowie seltener Biomasse und Biogase, Wärmepumpen aber auch Solarthermie sein. Aufgrund dieser Bandbreite an möglichen Energiequellen können auch die THG-Emissionen sehr unterschiedlich ausfallen. Ein Anschluss an ein Wärmenetz stellt für den Bestand der Mehrfamilienhäuser eine Option dar. Entscheidend für die energetische Bewertung von Wärmenetzen sind die Wärmeverluste, die durch den Transport der Wärme in den Rohrleitungen entstehen. Je länger die Transportdistanz ist, desto größer ist auch der Wärmeverlust (Jagnow/Wolff 2020, S. 94).

Darüber hinaus sind Wärmenetze weniger energieeffizient, wenn der Wärmebedarf der angeschlossenen Gebäude aufgrund einer energetischen Sanierung sinkt. Dieser Effekt tritt ein, weil die Bereitstellung einer geringeren Wärmemenge mit – relativ – höheren Wärmeverlusten in den Leitungen einhergeht. Im Ergebnis sinken der absolute Wärmebedarf und gleichzeitig auch der Jahresnutzungsgrad des Wärmenetzes, weil relativ mehr Brennstoffenergie (oder eine andere Primärenergie) aufgebracht werden muss, um eine bestimmte Menge an Wärmeenergie für das Gebäude bereitzustellen.

Die THG-Emissionen durch den Anschluss eines durchschnittlichen Mehrfamilienhauses mit einem guten energetischen Standard an ein klassisches Wärmenetz liegen rund 7 % unter den Emissionen, die bei der Verwendung von Gasniedertemperaturkesseln auftreten (Abb. 4.2). Bei Mehrfamilienhäusern mit einem besseren energetischen Standard bzw. bei Gasbrennwertkesseln lassen sich hingegen keine Emissionsminderungen erzielen (Jagnow/Wolff 2020, S. 233 ff.).

⁹ Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV)

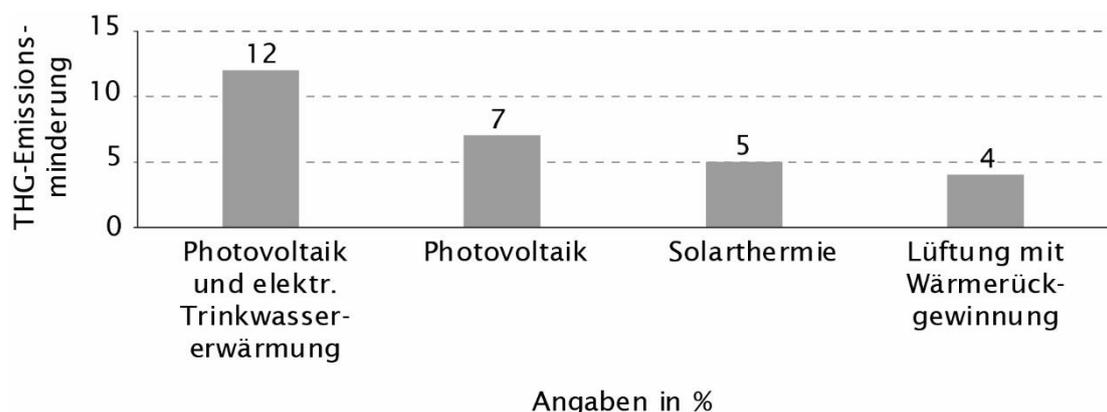
4.1.2 Einbindung zusätzlicher Erzeuger und Technologien sowie Anpassung der Peripherie

Photovoltaik, Solarthermie, Wohnungslüftungsanlagen

Neben Hauptwärmeerzeugern können für die Versorgung der Gebäude auch zusätzliche Erzeuger und Technologien einbezogen werden. Sie können zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs und der Emissionen beitragen. Typische zusätzliche Erzeuger und Technologien, die im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen eingebunden werden, sind Photovoltaik, Solarthermie und Wohnungslüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Rund jedes fünfte Wohngebäude in Deutschland verfügt über eine Solaranlage. Davon entfallen rund 60% auf Solarthermie und etwa 40% auf PV-Anlagen; letztere mit zunehmendem Anteil. Über eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung verfügen mit knapp 3% nur wenige Wohngebäude. Insbesondere Gebäude, die vor 2010 gebaut wurden, besitzen nur in seltenen Fällen eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung (Cischinsky/Diefenbach 2018). Alle drei Systeme haben spezifische Anwendungsgebiete. So stellen Solarthermieanlagen ausschließlich Wärme für Trinkwarmwasser bzw. teilweise Heizungsunterstützung bereit. Die elektrische Energie durch Photovoltaik dient zur Deckung des eigenen Haushaltsstromverbrauchs oder zur Erzeugung von Wärme für Trinkwarmwasser und Heizungsunterstützung. Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung stellen Wärme für die Beheizung des Gebäudes bereit. Hierzu nutzen sie die Abwärme, die über die Lüftungsanlage abgeführt wird und per Wärmeübertrager erneut genutzt werden kann.

Bei einem durchschnittlichen Wohngebäude (Ein- bzw. Zweifamilienhaus, Mehrfamilienhaus) können durch den Einsatz von Solarthermie, Photovoltaik und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung jeweils zwischen 4 und 13% der THG-Emissionen reduziert werden (Abb. 4.3 u. 4.4).

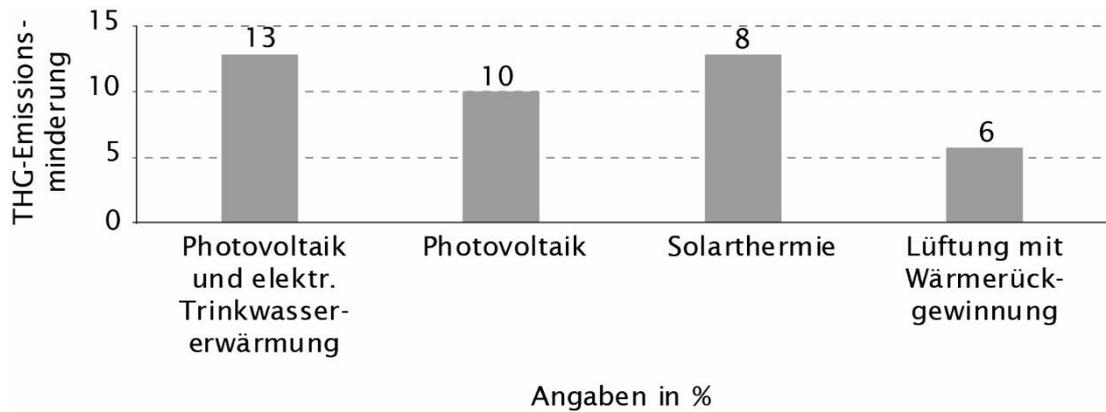
Abb. 4.3 THG-Emissionsminderung durch zusätzliche Erzeuger bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus



Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 97 ff.

Die durch Photovoltaik und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung erzielbaren Emissionsminderungen beziehen sich auf den Einsatz von Wärme und Strom. Noch höhere prozentuale Emissionsminderungen können durch den Einsatz elektrischer Energie aus der PV-Anlage erzielt werden, wenn die betreffenden Gebäude eine elektrische Trinkwassererwärmung aufweisen (Jagnow/Wolff 2020, S. 97 ff.).

Abb. 4.4 THG-Emissionsminderung durch zusätzliche Erzeuger bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus

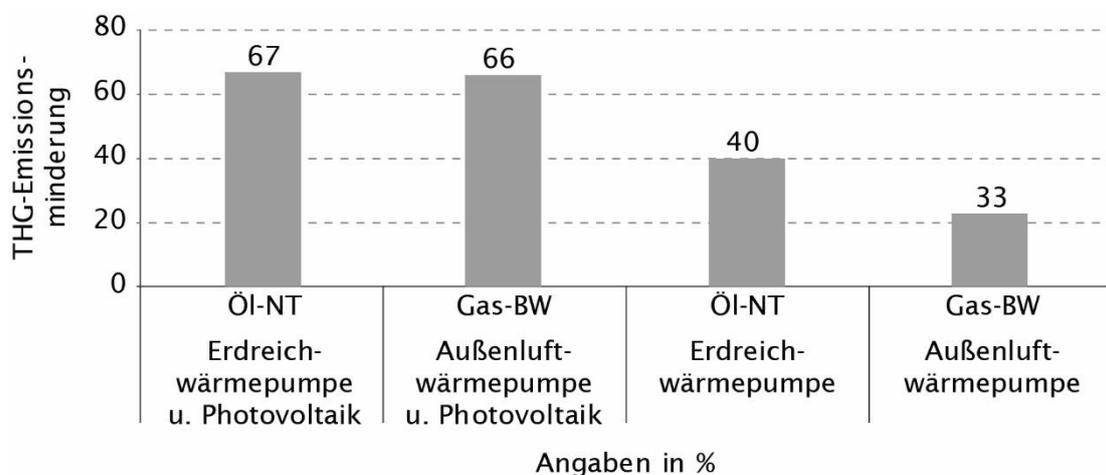


Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S.97 ff.

Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik

Die von einer PV-Anlage bereitgestellte elektrische Energie kann auch für den Betrieb einer elektrischen Wärmepumpe eingesetzt werden. Durch diesen kombinierten Einsatz von PV-Anlage und elektrischer Wärmepumpe lassen sich (im Vergleich zu typischen Heizkesseln für fossile Brennstoffe) Emissionsminderungen von 46 bis 74% erzielen, je nachdem, welche Wärmeerzeuger und Energieträger ersetzt werden (erster und zweiter Balken in Abb. 4.5 bis 4.8). Diese Emissionsreduktionen liegen deutlich über denen, die mit einer Wärmepumpe ohne Photovoltaik erreicht werden (dritter und vierter Balken in Abb. 4.5 bis 4.8). Bei einem typischen Ein- bzw. Zweifamilienhaus sind die prozentualen Minderungen etwas größer als bei einem typischen Mehrfamilienhaus (Jagnow/Wolff 2020, S. 100).

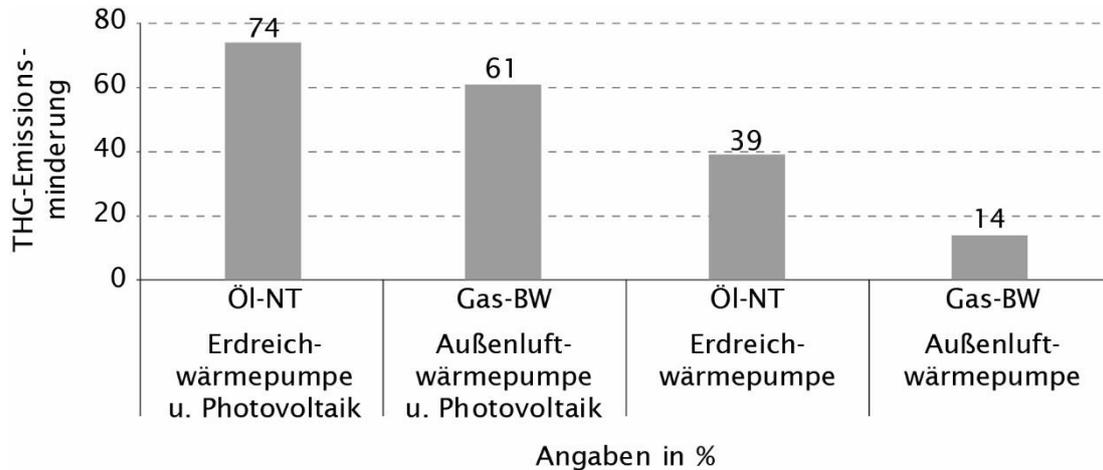
Abb. 4.5 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Ein- und Zweifamilienhaus mit mittlerem Sanierungsstand



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 100

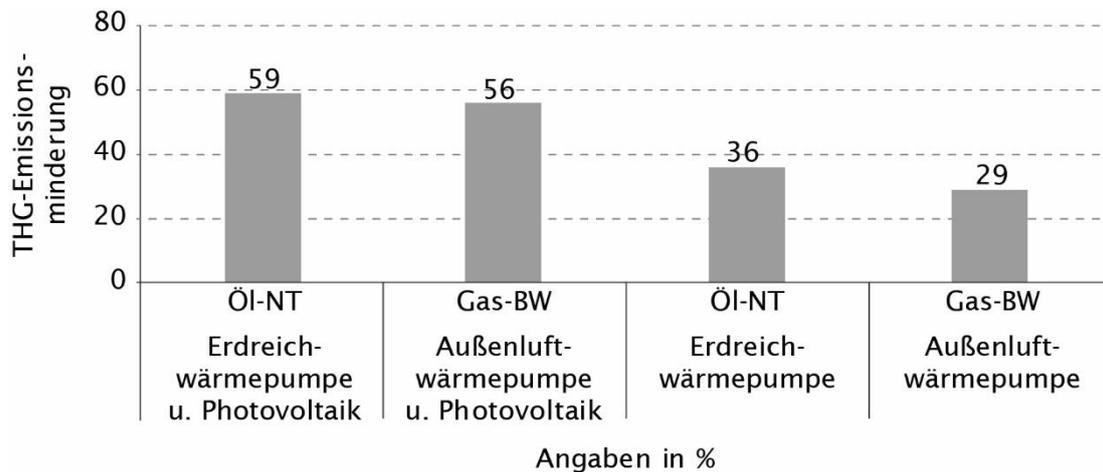
Abb. 4.6 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus mit gutem Sanierungsstand



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 100

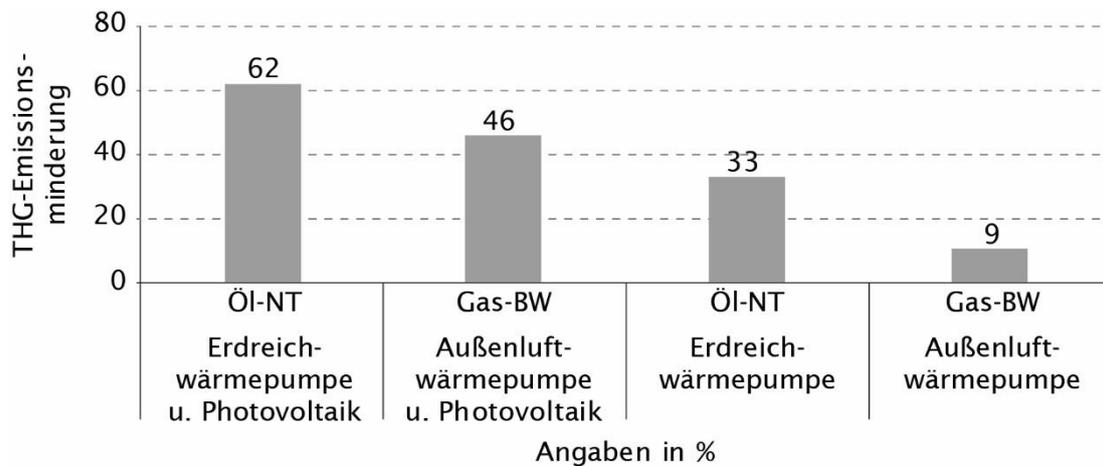
Abb. 4.7 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus mit mittlerem Sanierungsstand



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 100

Abb. 4.8 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus mit gutem Sanierungsstand



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 100

Maßnahmen an Rohr- und Wärmeabgabesystemen

Rohrnetze, die zur Verteilung der Heizwärme und des Trinkwarmwassers dienen, stellen eine potenzielle Schwachstelle im Heizungssystem dar. Hier kommt es darauf an, wo die Rohre verlegt wurden, ob eine Zirkulation für Trinkwarmwasser vorhanden ist und ob bzw. wie gut die Rohre gedämmt sind. So führt ein Wechsel von einem klassischen Zwei-Rohr-System, d. h. getrennt verlegte Rohre für Vor- und Rücklauf, zu einem Rohr-an-Rohr-System mit gemeinsamer Dämmung nach Vorgaben der EnEV zu Einsparungen von bis zu 30 % (Brillinger et al. 2010). Ein Verzicht auf eine Trinkwasserzirkulation in einem typischen Ein- bzw. Zweifamilienhaus (soweit möglich) würde zu Energieeinsparungen und Emissionsminderungen von 6 bis 13 % führen (Jagnow/Wolff 2020, S. 254).

Je nach Dimension und Abmessung des Rohrnetzes bietet sich möglicherweise ein Wechsel von zentralen Trinkwarmwassernetzen zu einer dezentralen Bereitstellung mit elektrisch betriebenen Durchlauferhitzern oder Kleinstspeichern (auch unterstützt durch Photovoltaik) an. Hierdurch entfielen die Wärmeverluste durch den Trinkwarmwassertransport durch die Rohrnetze. Je nach System und Ausgangszustand des Gebäudes können Energieeinsparungen von 4 kWh/m² und Jahr bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus und etwa 13 kWh/m² und Jahr bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus erzielt werden. Denkbar ist aber auch, dass Mehrverbräuche auftreten, beispielsweise bei Gebäuden mit einem guten energetischen Ausgangszustand und einer Außenluftwärmepumpe. Aufgrund des aktuellen Anteils erneuerbarer Energien am Strommix würde ein Umstieg auf eine dezentrale elektrische Erzeugung von Trinkwarmwasser nur zu geringen Emissionsminderungen bei Mehrfamilienhäusern mit Heizungskessel führen (Jagnow/Wolff 2020, S. 257 f.). Höhere Emissionsminderungen ließen sich beispielsweise durch den Einsatz einer PV-Anlage und der Eigenstromnutzung erzielen (Kap. 3.2.2).

Die Dämmung von Heizungsrohrleitungen führt insbesondere dann zu Energieeinsparungen, wenn die Leitungen durch unbeheizte Räume verlaufen. So vermindert eine Dämmung der Leitungsnetze im Keller auf Neubauniveau (Verdopplung der Dämmstärke) die Verluste um 5 kWh/m² bei einem typischen Mehrfamilienhaus und um 15 kWh/m² bei einem typischen Ein- bzw. Zweifamilienhaus. Zudem kann durch eine Rohrdämmung in beheizten Räumen auch die mögliche Problematik einer nicht intendierten Raumerwärmung verringert werden (Jagnow/Wolff 2020, S. 264 f.).

4.1.3 Qualitätssicherung und Systemoptimierung

Bei der Planung und Durchführung von Bau- und Sanierungsmaßnahmen können Mängel auftreten, die zu einer Verschlechterung der energetischen Qualität des Gebäudes führen. So können durch Wärmebrücken und Leckagen (schlechte Luftdichtheit) an der Gebäudehülle zusätzliche Wärmeverluste, aber auch bauliche Schäden (Schimmel- und Feuchtwasserbildung) entstehen. Wärmebrücken sind Bereiche der Gebäudehülle, die eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit und damit einen erhöhten Wärmestrom aufweisen. Wärmebrücken können z. B. an Stellen auftreten, an denen Materialien mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit zusammentreffen; sie entstehen auch bei unterschiedlichen Oberflächenverhältnissen. Typische Beispiele sind nachträglich angebrachte Balkone aus Stahl, Sockelanschlüsse, aber auch Fenster- und Türanschlüsse. Eine detaillierte Erfassung der baulichen Gegebenheiten und eine detaillierte Planung der Sanierungsmaßnahme werden in der Literatur als notwendige Maßnahmen hervorgehoben, um Wärmebrücken und andere bauliche Mängel zu vermeiden (Böhmer/Simon 2015; Schulze Darup 2019). Eine baubegleitende Qualitätsprüfung trägt dazu bei, Mängel bei der Sanierung aufzudecken und bereits vor Abschluss der Maßnahmen zu beheben, da eine nachträgliche Qualitätssicherung für Wärmebrücken und Luftdichtheit kaum umsetzbar ist (Jagnow/Wolff 2020, S. 303).

Anlagen der Gebäudetechnik können bei suboptimaler Einstellung und Betriebsführung zu einer erheblichen Verschlechterung der Systemfunktionalität und Effizienz führen. Dies trifft insbesondere auf den Hauptwärmeerzeuger, den Wärmespeicher, die Wärmeverteilung und Wärmeübergabe sowie auf die Bereitstellung von Trinkwarmwasser zu. Typische Probleme sind überdimensionierte Wärmeerzeuger, zu hohe Systemtemperaturen, fehlerhafte Temperaturfühler, zu viele Drosselungen des Drucks in den Rohrleitungen sowie Nutzungsfehler der Anlagentechnik (BBU 2016). In den Jahren 2017 und 2018 durchgeführte Befragungen zu Wärmepumpen zeigen, dass rund 30 bis 50 % der Anlagen Mängel aufwiesen (Simon et al. 2017; Vorbeck/Weinreuter 2019). Schätzungsweise 80 % der Heizungsanlagen wurden ohne einen fachgerechten hydraulischen Abgleich betrieben (co2online 2017b). Eine Heizungsoptimierung wurde bei jeder dritten Sanierung vorgenommen. Bei der Erneuerung des Wärmeerzeugers wurde in 40 % der Fälle und bei Dämmmaßnahmen in 10 % der Fälle eine Qualitätssicherung durchgeführt (co2online, SENERCon, ISE 2015).

Für eine Qualitätssicherung und Systemoptimierung sind unterschiedliche, teilweise sehr individuelle Aspekte zu berücksichtigen, da jede Bau- und Sanierungsmaßnahme einen Einzelfall darstellt. Daher lassen sich mögliche Einsparpotenziale auch nur vage einschätzen. Eine Systemoptimierung kann bei Wärmeerzeugern in einem durchschnittlichen Wohngebäude zu Effizienzsteigerungen von im Schnitt etwa 6 % (Maßnahmen am Hauptwärmeerzeuger, z. B. Temperaturoptimierung) bis 18 % (Maßnahmen an Heizkörpern, Rohrleitungen etc.) führen (Jagnow/Wolff 2020, S. 302 f.). Je nach Heiztechnologie und Ausgangszustand ist die Spannbreite groß. So zeigte eine Untersuchung zur Qualitätssicherung bei Wärmepumpen Effizienzsteigerungen von rund 50 % auf (Orthjohann/Schreckenber 2012). Für den hydraulischen Abgleich wurden Energieeinsparungen von (je nach Ausgangszustand) 2 bis etwa 20 % ermittelt (Jagnow/Wolff 2020, S. 297 f.; Mailach et al. 2019; Schweikhardt 2017).

Je nach Gebäudezustand und Anlagentechnik ergeben sich in einem (ansonsten) durchschnittlichen Wohngebäude (Ein- bzw. Zweifamilienhaus, Mehrfamilienhaus) unterschiedliche prozentuale Einsparungen an Energie und THG-Emissionen durch Qualitätssicherung und Systemoptimierung. Sie reichen von 10 % (schlechter Gebäudezustand, Ölbrennwertkessel) bis 35 % (bester Gebäudezustand, Außenluftwärmepumpe). Trotz des relativ hohen Prozentsatzes bei besonders guter Ausstattung sind die absoluten Einsparwerte hier geringer, da das Ausgangsniveau bereits ein relativ niedriger Energiebedarf ist (Jagnow/Wolff 2020, S. 101 f.).

4.1.4 Integration von digitalen, intelligenten und vernetzten Technologien im Gebäude

Die zunehmende Digitalisierung in vielen Bereichen des Lebens hat auch zu steigendem Interesse von Politik und Wirtschaft am Thema der smarten Gebäudebetriebsführung geführt. Damit verbunden ist die Erwartung, dass mittels digitaler, intelligenter und vernetzter Technologien zusätzliche Energieeinspar- und THG-Minderungspotenziale im Gebäudebestand erschlossen werden. Energieeinsparungen können zum einen auf eine technische Optimierung zurückgehen, z. B. durch die Installation von smarten Lösungen zur Energiebereitstellung, zum Betrieb einzelner Anlagen oder zur Steuerung des *Gesamtsystems Gebäude*. Zum anderen können die Einsparungen auch durch ein verändertes Verhalten der Nutzer/innen verursacht werden, z. B. aufgrund der Visualisierung von

Messdaten und einer dadurch ausgelösten Reflexion des Verhaltens (Cali et al. 2016; Müller et al. 2017a). Beide Effekte wirken zudem aufeinander ein (Interaktion von Mensch und Technik).

Die Auswertung der zur Verfügung stehenden Literatur und der Diskurs mit Expert/innen auf einem Workshop im Rahmen des TAB-Projekts hat verdeutlicht, dass unter dem Themenkomplex Digitalisierung unterschiedliche Systeme und Technologien sowie Maßnahmen zusammengefasst werden und somit kein klares, einheitliches Verständnis von Digitalisierung im Gebäudebestand vorliegt. Eine eher enge Definition des Begriffs Digitalisierung bezieht sich auf die Nutzung von *digitalen*, *intelligenten* und *vernetzten* Technologien bzw. Systemen (smarte Lösungen). Als intelligent wird dabei angesehen, dass ursprünglich von Menschen getroffene Entscheidungen nunmehr maschinell getroffen werden (z. B. mittels Algorithmen). Eine breitere Definition bezieht Digitalisierung auch auf Verbrauchsdatensvisualisierungen inklusive Auswertung oder auf programmierbare Heizungs-thermostate bzw. ganze Heizsysteme (die es seit Jahrzehnten in der Gebäudetechnik gibt, teils aber in einer relativ nutzerunfreundlichen Form).

Einen Ansatz zur energetischen Optimierung stellen Energiemanagementsysteme dar. Hierbei handelt es sich um technische Systeme, mit denen Anlagen und Komponenten zur Bereitstellung von Wärme, Kälte und die Zufuhr von Frischluft gesteuert werden können. Die Steuerung kann grundsätzlich fast vollständig manuell oder fast vollständig automatisiert erfolgen. Während bei einer mehrheitlich manuellen Steuerung nur kleinere Analysetools und Algorithmen sowie eine Steuerungsoberfläche den Bewohner/innen zur Verfügung stehen, erfolgt die Steuerung bei einem vollautomatisierten System durch umfangreiche und komplexe Analysetools und Algorithmen, die in einer zentralen Steuerungseinheit vor Ort oder per Fernzugriff durch einen Dienstleister zur Verfügung stehen (Erbstößer 2018; Müller et al. 2017a). In der Regel ist bei einem vollautomatisierten Energiemanagementsystem auch ein manueller Eingriff möglich bzw. die Bewohner/innen können beim System Präferenzen (z. B. zur Raumtemperatur) hinterlegen.

Durch die Integration von Sensoren und intelligenten Messinstrumenten (Smartmetering) im Rahmen von Sanierungen ist es möglich, den Energieverbrauch einzelner Wohnungen oder Gebäuden zu erfassen und mittels eines Visualisierungstools (das kann z. B. das Smartphone oder eine andere Technologie sein) den Bewohner/innen den Energieverbrauch aufzuzeigen. Die gemessenen Daten können hierbei direkt vor Ort durch die Instrumente analysiert und aufbereitet werden, oder sie werden an eine Zwischenstelle übermittelt, die diese analysiert, aufbereitet und im Anschluss wieder an den Haushalt übermittelt. Durch diese Visualisierung werden die Bewohner/innen über ihren Energieverbrauch informiert und damit in die Lage versetzt, ihr eigenes Verhalten zu bewerten und ggf. den Verbrauch zu reduzieren und damit auch die finanzielle Belastung zu verringern (Cali et al. 2016; Müller et al. 2017a). Die Integration von intelligenten Messinstrumenten und Visualisierungstools bieten darüber hinaus im Fall einer Sanierung die Option, die ursprünglich durch die Sanierungsmaßnahmen angestrebten Effizienzsteigerungen zu kontrollieren. Hierdurch besteht die Möglichkeit, einzelne Komponenten nachträglich besser aufeinander abzustimmen und Ineffizienzen infolge suboptimaler Einstellungen (z. B. bei der Nachtabstimmung) sowie den Energieverbrauch zu senken.

Im Rahmen mehrerer Untersuchungen werden Kosten- und Energieeinsparpotenziale aufgezeigt. So wurden Einsparungen für Raumwärme bzw. beim Heizwärmeverbrauch von bis zu 10% ermittelt, die auf eine Verbrauchsdatensvisualisierung zurückgehen (Mailach/Oschatz 2017b; Müller et al. 2017b). Durch die Einbindung von Smarthomeanwendungen ließen sich im Bereich Heizwärme bzw. Trinkwarmwasser Einsparungen bis zu 33 bzw. 36% oder im Mittel zwischen 8 und 19% erreichen (Kersken et al. 2018; Mailach/Oschatz 2017b; Schneiders et al. 2018).

Einsparungen beim Stromverbrauch von durchschnittlich 11% wurden auf eine Kombination aus kundenspezifischen Tarifierenzen, intelligenter Messtechnik (Smartmeter) und der Darstellung des Stromverbrauchs in Echtzeit zurückgeführt (Agsten et al. 2012). Eine ähnliche Größenordnung ergab sich mit Einsparungen zwischen 9 und 14% mittels Smarthome (Quack et al. 2019).

Untersuchungen liefern jedoch auch Hinweise darauf, dass durch smarte Lösungen ebenfalls Mehrverbräuche bei Heizwärme auftreten können, die bis zu 19 bzw. 26% reichen (Quack et al. 2019; Schneiders et al. 2018). Sie werden u. a. auf falsche Einstellungen bzw. Handhabungen, aber auch auf Erleichterungen beim Ansteuern der Heizkörper und auf längeres oder intensiveres Heizen aufgrund einer Erwartung von Energieeinsparungen durch Smarthome (Reboundeffekte) zurückgeführt (Schneiders et al. 2018). Die Zuordnung von Energieeinsparungen und Mehrverbräuchen ist jedoch aufgrund der hohen Komplexität des Systems Gebäude, der dazugehörigen Anlagentechnik und dem Nutzungsverhalten nicht immer trennscharf für die einzelnen Technologien und Maßnahmen möglich. Maßgeblichen Einfluss auf den Einspareffekt von digitalen, intelligenten und vernetzten

Technologien haben auch das Nutzungsverhalten und der Automatisierungsgrad. Durch einen hohen Automatisierungsgrad werden z. B. die Eingriffs- und damit die Kontrollmöglichkeiten durch die Bewohner/innen auf das System reduziert.

Neben möglichen Energieeinsparungen tragen digitale, intelligente und vernetzte Technologien auch zu einer zunehmenden Einbindung von erneuerbaren Energien in die Gebäudeenergieversorgung bei (Müller et al. 2017a). So kann durch die automatisierte Steuerung und Betriebsführung die Nutzung von Photovoltaikstrom optimiert werden (Stötzel et al. 2019). Durch die vermehrte Nutzung selbst erzeugten Stroms können smarte Lösungen auch zu einer besseren Netzdienlichkeit (Lastspitzenreduktion, Lastverlagerung, Netzstabilität) beitragen und das Netz entlasten, die Stromkosten reduzieren und umweltschädlichen Netzstrom durch Solarstrom ersetzen (Karg et al. 2014). Wird zur Raum- bzw. Gebäudebeheizung eine elektrische Wärmepumpe verwendet, kann ein Teil des Solarstroms zum Betrieb der Wärmepumpe eingesetzt und so der Bezug von Strom aus dem Netz reduziert werden.

Insgesamt liegen bisher nur wenige quantitative Erkenntnisse zu den Energieeinspareffekten smarter Lösungen im Gebäudebestand vor, insbesondere Langzeiterfahrungen fehlen. Dies ist auch dem Umstand geschuldet, dass smarte Lösungen im Wohngebäudebereich noch eine Nische darstellen. Eingehendere Erfahrungen werden sich hier erst in den nächsten Jahren abzeichnen (sofern eine zunehmende Verbreitung smarter Lösungen eintritt). Die bisher vorliegenden Erfahrungen und Ergebnisse deuten darauf hin, dass Energieeinspareffekte ebenso wie erhöhte Verbräuche möglich sind. Differenziert nach den Verbrauchsbereichen Wärme- und Haushaltsstrom deuten sich aufseiten des Heizwärmeverbrauchs potenziell größere Nettoeinspareffekte an. Für den Stromverbrauch ist das Bild nicht eindeutig. Offen bleibt auch, ob die aufgezeigten Energieeinsparungen dauerhaft erhalten bleiben (Langzeitwirkung) oder ob sie sich mit der Zeit verringern.

4.1.5 Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

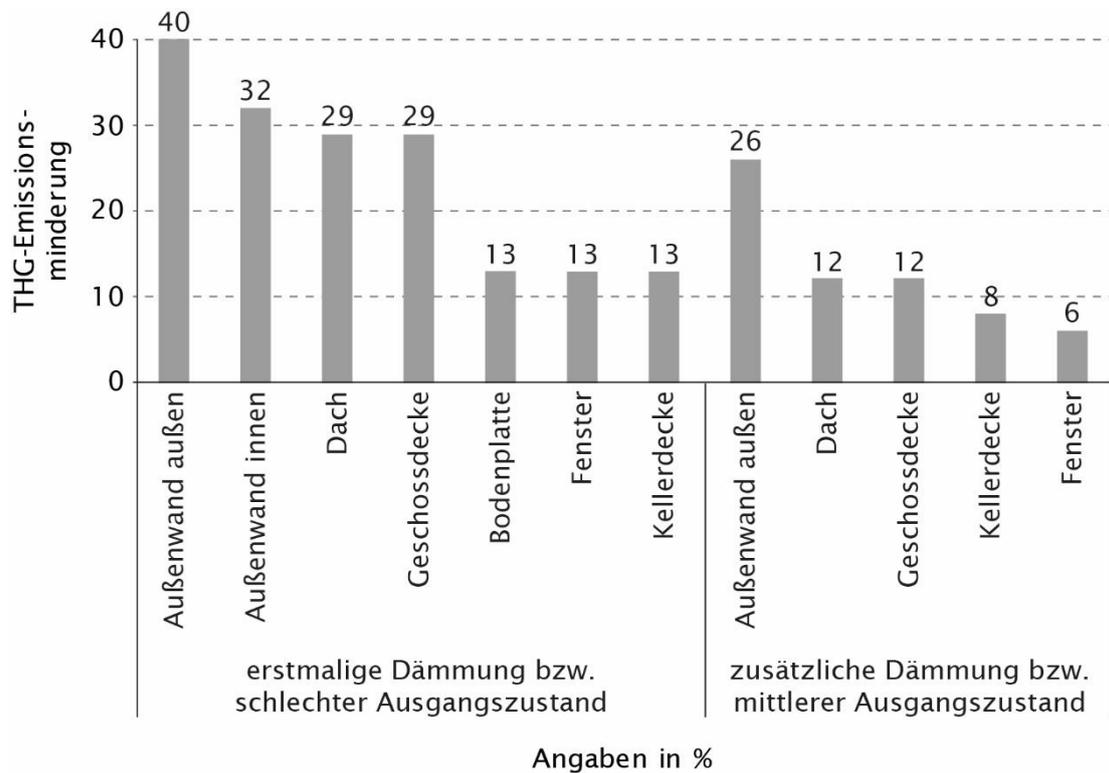
Ein großer Anteil des Wärmeverlusts von Gebäuden wird durch den Temperaturunterschied zwischen dem beheizten Gebäudeinneren und der kälteren Gebäudeumgebungstemperatur verursacht.¹⁰ Durch den Temperaturunterschied wird ein Wärmestrom vom Gebäudeinneren zur Außenluft durch die Gebäudehülle ausgelöst. Dieser Wärmestrom wird mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten (im Bauwesen bezeichnet als U-Wert) angezeigt. Zur Reduzierung der Wärmeverluste wird der Wärmestrom zur Außenluft bzw. an das Erdreich durch Sanierungsmaßnahmen verringert, d. h. der Wärmedurchgangskoeffizient reduziert. Um diesen Effekt zu erreichen, werden Teile der Gebäudehülle mit einer zusätzlichen Dämmung versehen oder im Fall der Fenster ausgetauscht. Zu den häufigsten energetischen Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle gehören die nachfolgenden Maßnahmen:

- › Dämmung der Außenwand von außen und von innen,
- › Dämmung der oberen Geschossdecke und des Daches,
- › Dämmung der Kellerdecke,
- › Dämmung der Bodenplatte und
- › Austausch der Fenster.

Wie hoch die resultierenden Energieeinsparungen und THG-Minderungen sind, ist abhängig vom Bauteil, das saniert bzw. erneuert wird, sowie vom Ausgangs- und Zielzustand des Gebäudes bzw. des sanierten Bauteils. Die Spannbreiten für THG-Emissionsminderungen bei einem repräsentativen Wohngebäude (Ein- bzw. Zweifamilienhaus, Mehrfamilienhaus) in Deutschland liegen für unsanierte Gebäude zwischen 10 und 40 % und bei Gebäuden, die bereits über eine Dämmung bzw. einen mittleren energetischen Ausgangszustand verfügen, zwischen 6 und 26 %. Die größten Emissionsminderungen können bei der Dämmung der Außenwand erzielt werden. Sie reichen von 26 bis 40 % bei Ein- und Zweifamilienhäusern und von 26 bis 36 % bei Mehrfamilienhäusern. Die prozentualen Emissionsminderungen gleicher Sanierungsmaßnahmen liegen bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus geringfügig höher als bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus (Abb. 4.9 u. 4.10).

¹⁰ Weitere Wärmeverluste entstehen bei der Umwandlung des Energieträgers in Wärme und durch das Fensterlüften.

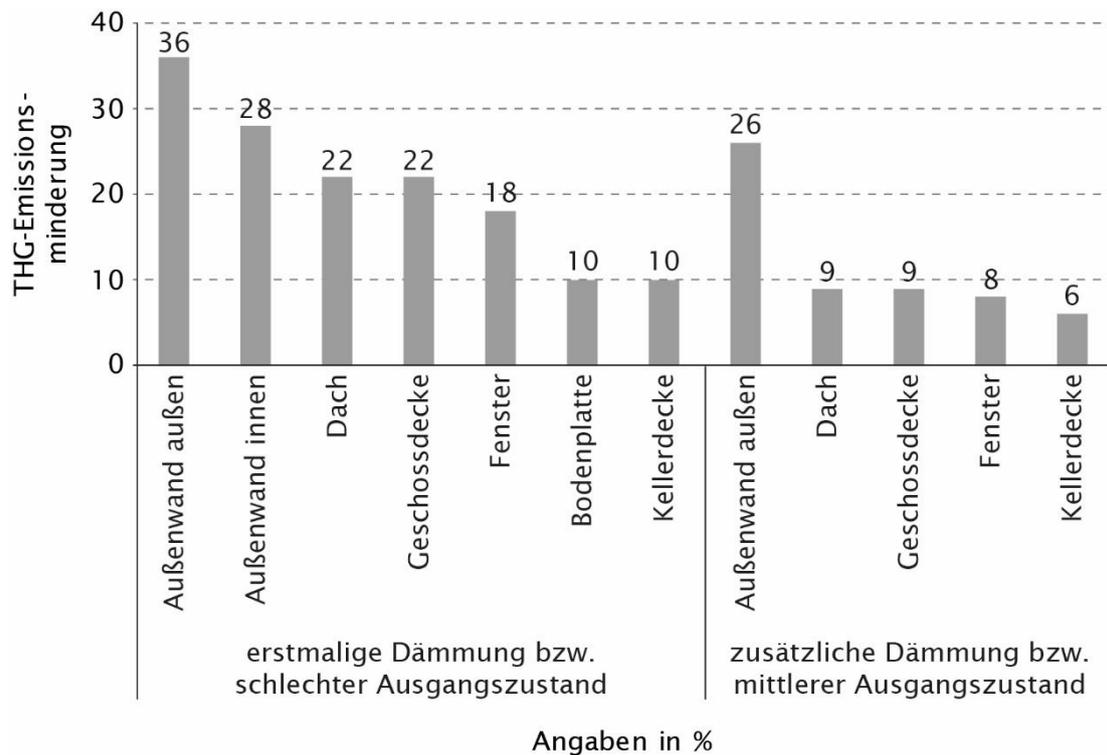
Abb. 4.9 THG-Emissionsminderungen von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus



Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 86

Neben der Sanierung einzelner Bauteile können aber auch mehrere Sanierungsmaßnahmen als Sanierungspaket zusammengefasst und umgesetzt werden. Der Vorteil hierbei ist, dass Arbeiten und Kosten, die bei jeder einzelnen Sanierungsmaßnahme anfallen würden, so nur einmal anfallen. Hierzu gehören z. B. das Aufstellen von Gerüsten, Maler- und Verputzarbeiten. Durch Sanierungspakete sinken insgesamt die Kosten für diese Maßnahmen. Mit Blick auf die THG-Emissionsminderungen sind aufgrund der langen und für einzelne Bauteile unterschiedlichen Lebensdauern der Zeitpunkt der Sanierung und der Umfang der Sanierungsmaßnahmen von zentraler Bedeutung.

Abb. 4.10 THG-Emissionsminderungen von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus



Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 86

4.2 Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle

Nachfolgend werden die Ergebnisse von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen dargestellt, indem die *Jahreskosten* (in Euro/m² und Jahr) einer betrachteten Option und eines Referenzfalls gegenübergestellt werden. Übersteigen die Jahreskosten der betrachteten Option (z. B. Erwerb eines neuen Hauptwärmeerzeugers) die Jahreskosten des Referenzfalls (z. B. Beibehaltung des bisherigen Hauptwärmeerzeugers), ergibt sich eine *positive Kostendifferenz*. Die Maßnahme ist *nicht wirtschaftlich*. Liegen die Jahreskosten der betrachteten Option unter den Jahreskosten des Referenzfalls, ergibt sich eine *negative Kostendifferenz*. Die Maßnahme ist *wirtschaftlich*. Das heißt, die Differenz zwischen den Jahreskosten der Sanierungsmaßnahme und den Jahreskosten des Referenzfalls stellt die jährlichen finanziellen Be- und Entlastungen durch den Einbau des neuen Wärmeerzeugers dar. Ein positiver Wert gibt an, dass jährlich zusätzliche Kosten anfallen. Ein negativer Wert gibt an, dass durch die Sanierungsmaßnahme eine finanzielle Entlastung resultiert.

Außerdem werden die Kapitalkosten der betrachteten Sanierungsmaßnahme den mit ihr ausgelösten Emissionsminderungen gegenübergestellt. Es ergeben sich die *Kosten der Emissionsminderung* bzw. äquivalenter CO₂-Preis, die als Kosten pro vermiedener t CO₂-Äquivalent dargestellt werden.

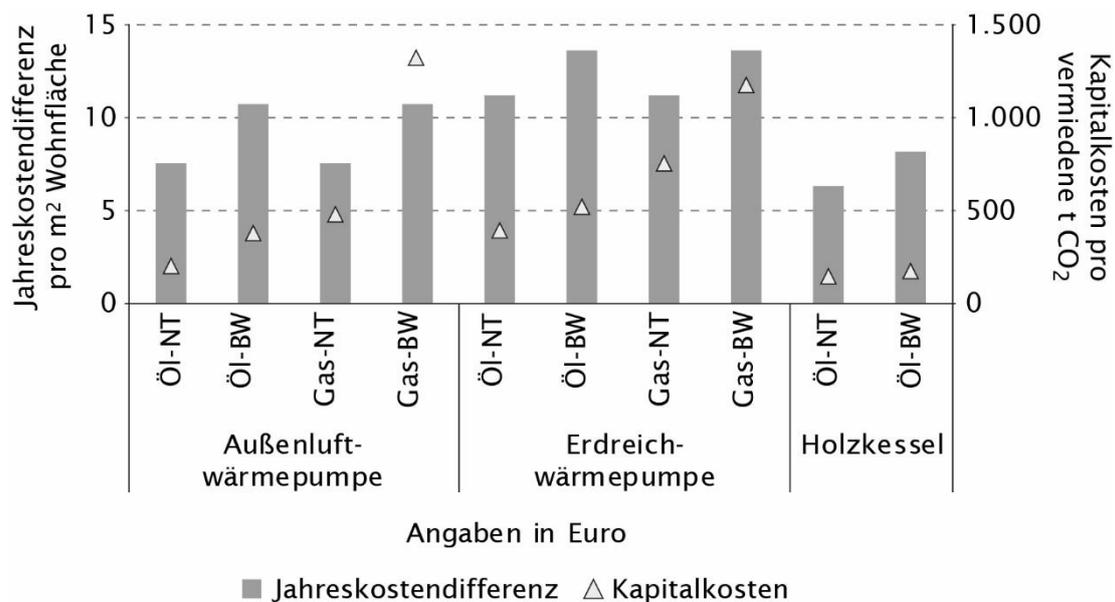
4.2.1 Austausch des Hauptwärmeerzeugers

Erneuerung eines einzelnen Hauptwärmeerzeugers

Hauptwärmeerzeuger werden meist ausgetauscht, wenn sie das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Die deutsche Heizungswirtschaft empfiehlt, Heizkessel nach 20 Jahren auszutauschen. Knapp 40 % der Wärmeerzeuger im Bestand haben dieses Alter erreicht; 24% der Anlagen sind seit mehr als 25 Jahren in Betrieb (BDEW 2019). Der Einbau eines neuen Wärmeerzeugers bietet neben dem Einsatz einer effizienteren Technologie auch die Möglichkeit eines Energieträgerwechsels. Welche Technologie zum Einsatz kommt, ist von mehreren Faktoren abhängig. Hierzu gehören beispielsweise, die technische Realisierbarkeit (z. B. erforderliche Systemtemperatur) und lokale Gegebenheiten (Heizraumgrößen, Beschaffenheit des Erdreichs und verfügbare Fläche) sowie ökonomische Rahmenbedingungen (Investitionskosten und Verfügbarkeit von Finanzmitteln). Die jeweiligen Faktoren werden in der Regel durch die individuellen Gegebenheiten des Einzelobjekts bzw. der Investor/innen beeinflusst. Vor dem Hintergrund dieser individuellen Rahmenbedingungen können die einzelnen Technologien anhand eines Kosten-Nutzen-Ansatzes beurteilt werden. Hierbei werden die Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten den potenziellen Energie- und Kostenersparnissen sowie den Emissionsminderungen gegenübergestellt.

Unter den betrachteten Bedingungen (Gebäudezustand, jeweils gewählte Technologie und Referenzfall, Energiepreise, keine Förderung) weisen alle dargestellten Wärmeerzeugermaßnahmen trotz der Energieeinsparungen eine positive Jahreskostendifferenz auf (Abb. 4.11 u. 4.12). Die Sanierungsmaßnahmen verursachen mehr Kosten als die Beibehaltung des bisherigen Zustands und sind unter den betrachteten Bedingungen unwirtschaftlich.

Abb. 4.11 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für den Einbau von Wärmeerzeugern bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

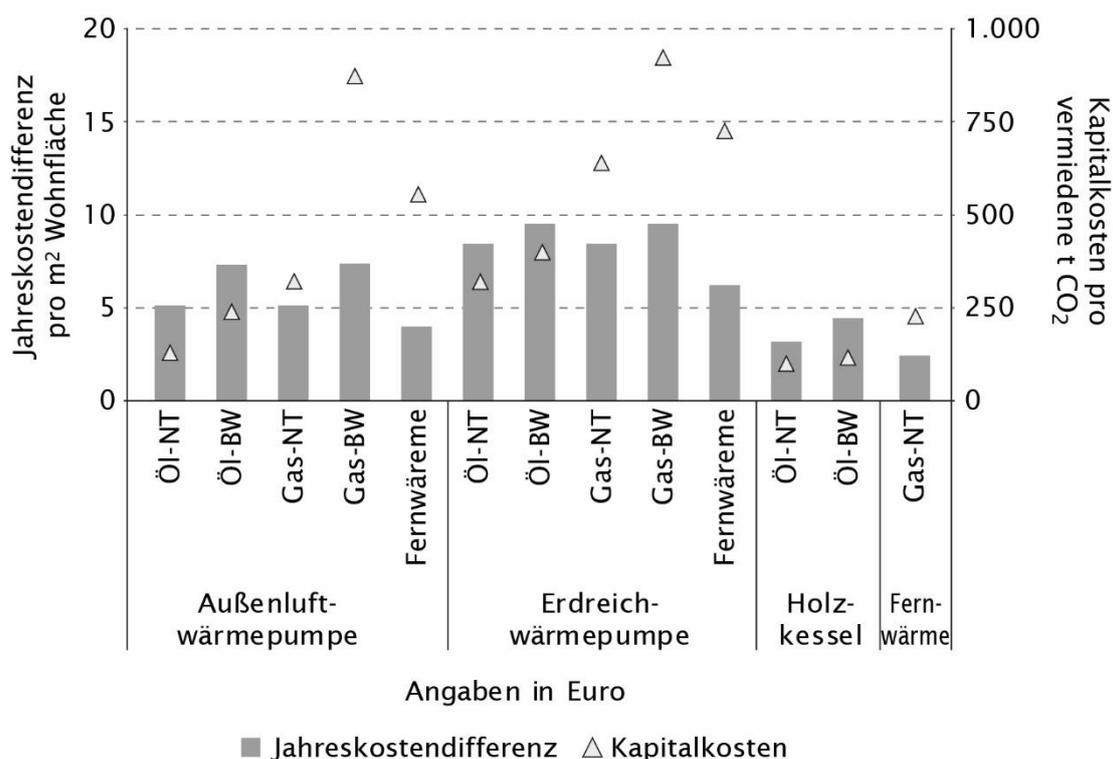
Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 90

Am wenigsten unwirtschaftlich ist der Ersatz eines Gasniedertemperaturkessels durch einen Anschluss an Fernwärme bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus (rechts in Abb. 4.12). Bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus ist der Wechsel von einem mit Heizöl betriebenen Heizkessel hin zu einem Holzessel sowie ein Wechsel zur Außenluftwärmepumpe am wenigsten unwirtschaftlich (Abb. 4.11). Demgegenüber führt

ein Wechsel von gas- oder heizölbetriebenen Brennwertkesseln hin zu Erdreichwärmepumpen bei Ein- bzw. Zweifamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern zu den höchsten Jahreskostendifferenzen. Diese liegen bei etwa 10 und 14 Euro/m².

Ein anderes Bild zeigt sich, wenn die Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂, d.h. die äquivalenten CO₂-Preise, betrachtet werden. Hier schneidet insgesamt ein Wechsel von mit Gas betriebenen Heizkesseln zu den elektrischen Wärmepumpen schlechter ab. Insbesondere die Wechsel hin zu Erdreichwärmepumpen weisen höhere Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ auf. Diese liegen bei einem typischen Mehrfamilienhaus durchweg etwas niedriger als bei einem typischen Ein- bzw. Zweifamilienhaus. Niedrige Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ hingegen könnten durch Holz- bzw. Biomassekessel erzielt werden.

Abb. 4.12 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für den Einbau von Wärmeerzeugern bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

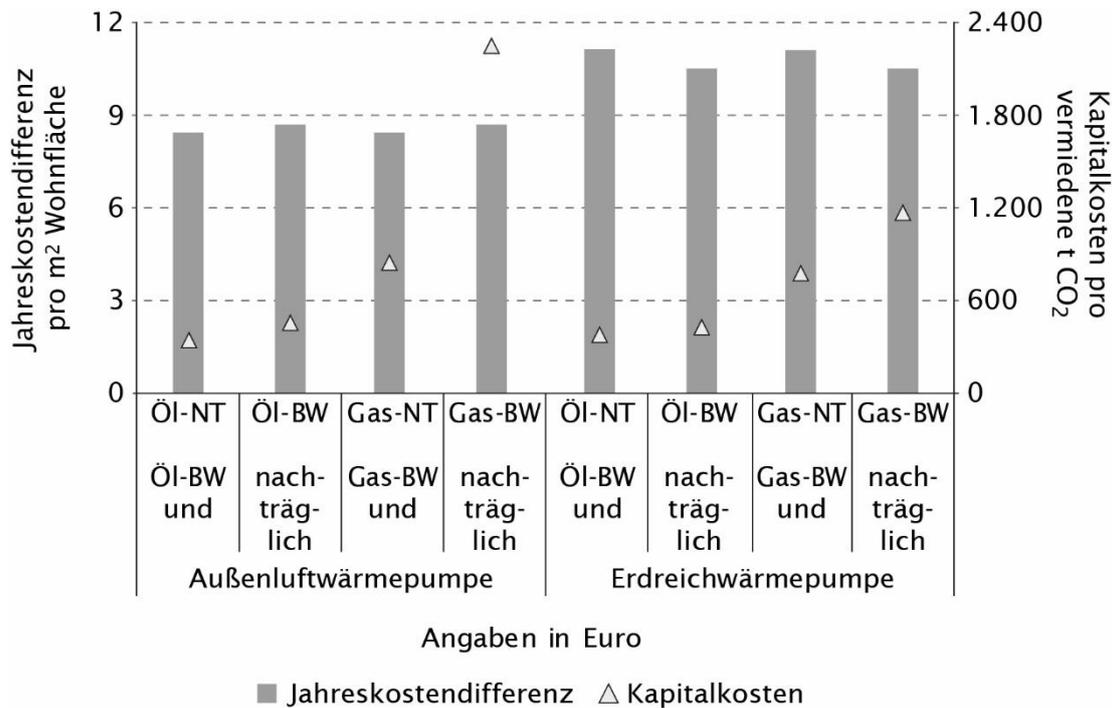
Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 91

Heizungshybridsysteme

Die Kombination von Heizkessel und elektrischer Wärmepumpe als Hybridlösung bietet die Möglichkeit, einen teilweisen Energieträgerwechsel vorzunehmen und damit Emissionsminderungen zu erzielen (Kap. 4.1.1). Ihre Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Abb. 4.13 u. 4.14) ergibt insgesamt ähnliche Größenordnungen wie für die Erneuerung mit einem einzelnen Hauptwärmeerzeuger. Demnach können durch Hybridlösungen wie auch bei der Erneuerung des Hauptwärmeerzeugers keine finanziellen Entlastungen erzielt werden.

Die Jahreskostendifferenzen für Hybridlösungen bewegen sich zwischen etwa 9 und 12 Euro/m². Ihre Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ liegen bei einem typischen Ein- bzw. Zweifamilienhaus zwischen 340 und 2.300 Euro (Abb. 4.13). Bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus zeigt sich ein vergleichbares Bild mit etwas geringeren Werten. Hier liegen die Jahreskosten zwischen 5 und 7 Euro und die Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ zwischen 200 und 1.100 Euro (Abb. 4.14).

Abb. 4.13 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für Heizungshybridssysteme bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus



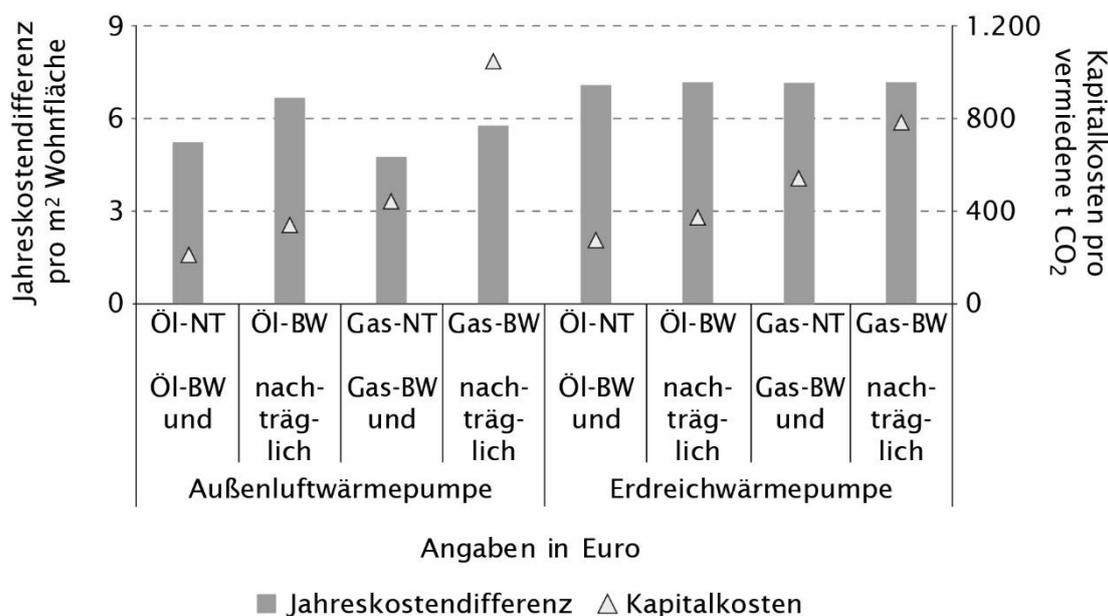
NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 219 ff.

Insgesamt zeigt sich, dass die Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ unter den betrachteten Bedingungen bei Ölhybridlösungen geringer ausfallen als bei Gashybridlösungen. Erdreichwärmepumpen schneiden besser als Außenluftwärmepumpen ab. Besser schneiden die Hybridlösungen bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus ab.¹¹

¹¹ Hierbei kann die später als Alleinerzeuger fungierende Wärmepumpe deutlich kleiner angeschafft werden. Auch wäre der ggf. neu gekaufte Spitzenlastkessel nicht so stark überdimensioniert wie es der Fall ohne Zusatzerzeuger wäre.

Abb. 4.14 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für Hybridlösungen bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 219 ff.

Die dargestellten Wirtschaftlichkeitskennzahlen zeigen, dass die Erneuerung des Hauptwärmeerzeugers bzw. der Aufbau von Hybridlösungen in den betrachteten Fällen nicht wirtschaftlich ist. Niedrige Jahreskostendifferenzen können durch den Wechsel zu Fernwärme erzielt werden. Dies ist jedoch ausschließlich für Mehrfamilienhäuser eine Option und auch nur dann, wenn das Gebäude in einem Gebiet mit bestehender Fernwärme liegt.

Wärmepumpen schneiden insgesamt schlechter ab. So weisen diese häufig die höchsten Jahreskosten und CO₂-Vermeidungskosten auf. Hintergrund ist der hohe Strompreis. Die Einflüsse des Strompreises und des Sanierungszustands bzw. Wärmebedarfs eines Wohngebäudes auf die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe sind so groß, dass eine Förderung der Investitionskosten in einem durchschnittlichen Wohngebäude nicht ausreichen würde, um eine langfristige Wirtschaftlichkeit zu erreichen (Jagnow/Wolff 2020, S. 90 f.). Wenn alle Hauptwärmeerzeuger insgesamt betrachtet werden, üben aber auch die Investitionskosten einen starken Einfluss auf das Kosten-Nutzen-Ergebnis aus. War eine Erneuerung des Hauptwärmeerzeugers ohnehin fällig, liegen die Jahreskosten niedriger, da lediglich die Mehrkosten für die Berechnung der Jahres- und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ berücksichtigt wurden. Wird die Maßnahme jedoch vorgezogen, dann werden die Vollkosten veranschlagt, was die Jahres- und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ erhöht.

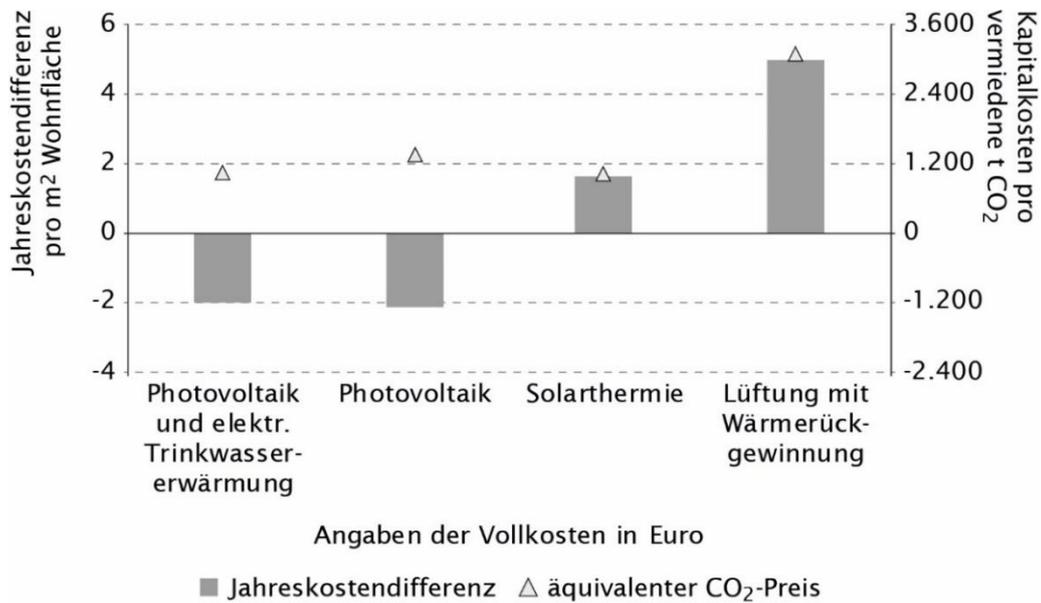
4.2.2 Einbindung zusätzlicher Erzeuger und Lüftungsanlage sowie Anpassung der Peripherie

Einzelbetrachtung der Zusatzerzeuger und Lüftungsanlage

Die Zusatzerzeuger bieten bezüglich der Kosten-Nutzen-Relationen ein uneinheitliches Bild (Abb. 4.15 u. 4.16). Unter den betrachteten Bedingungen (Gebäudezustand, jeweils gewählte Technologie, Energiepreise, keine Förderung) lässt sich durch den Einsatz einer PV-Anlage eine finanzielle Entlastung von etwa 2 Euro/m² bei einem Ein- bzw. Zweifamilienhaus (Abb. 4.15) und etwa 2,5 Euro/m² bei einem Mehrfamilienhaus (Abb. 4.16) erzielen (Jagnow/Wolff 2020, S. 97). Der Einsatz einer Solarthermieanlage für die Bereitstellung von Wärme sowie der

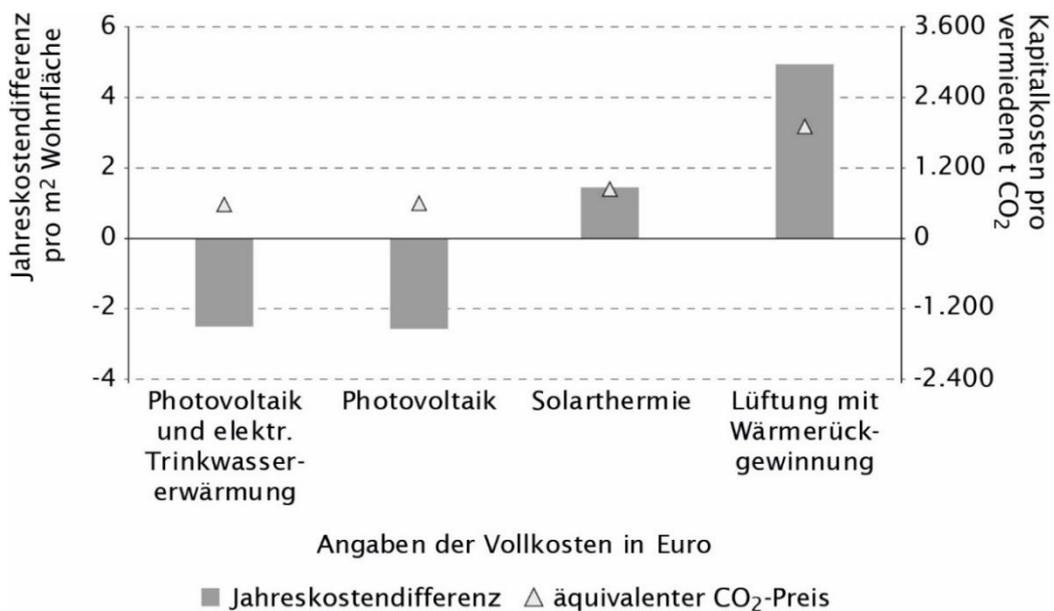
Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung führen zu positiven Jahreskostendifferenzen, also zu unwirtschaftlichen Lösungen. Im Fall der Solarthermie liegen die Jahreskostendifferenzen in beiden Gebäudetypen leicht unterhalb von 2 Euro/m² und bei der Lüftungsanlage bei rund 5 Euro/m².

Abb. 4.15 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ durch zusätzliche Erzeuger und Technologien bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus



Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 97

Abb. 4.16 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ durch zusätzliche Erzeuger und Technologien bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus



Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 97

Bei den Kosten für die Emissionsminderung von 1 t CO₂ liegen der Einsatz einer PV-Anlage und der Einsatz einer Solarthermieanlage in einem Korridor von 500 bis 1.300 Euro. Bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus liegen die Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für die PV-Anlage etwas über und bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus unter den Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für Solarthermie. Der Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung weist mit 2.000 Euro bei Ein- bzw. Zweifamilienhäusern und 3.000 Euro bei Mehrfamilienhäusern je t CO₂ ein relativ ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis auf.

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind aufgrund der hohen baulichen Erfordernisse und hoher Investitionskosten nicht für eine nachträgliche Modernisierung interessant, es sei denn, dass das Gebäude ohnehin in einen Rohbauzustand versetzt wird, sodass die Investitionskosten geringer ausfallen (Jagnow/Wolff 2020, S. 99). Neben den hohen Investitionskosten der Lüftungsanlage führt auch die geringe Emissionsminderung zu hohen Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂.

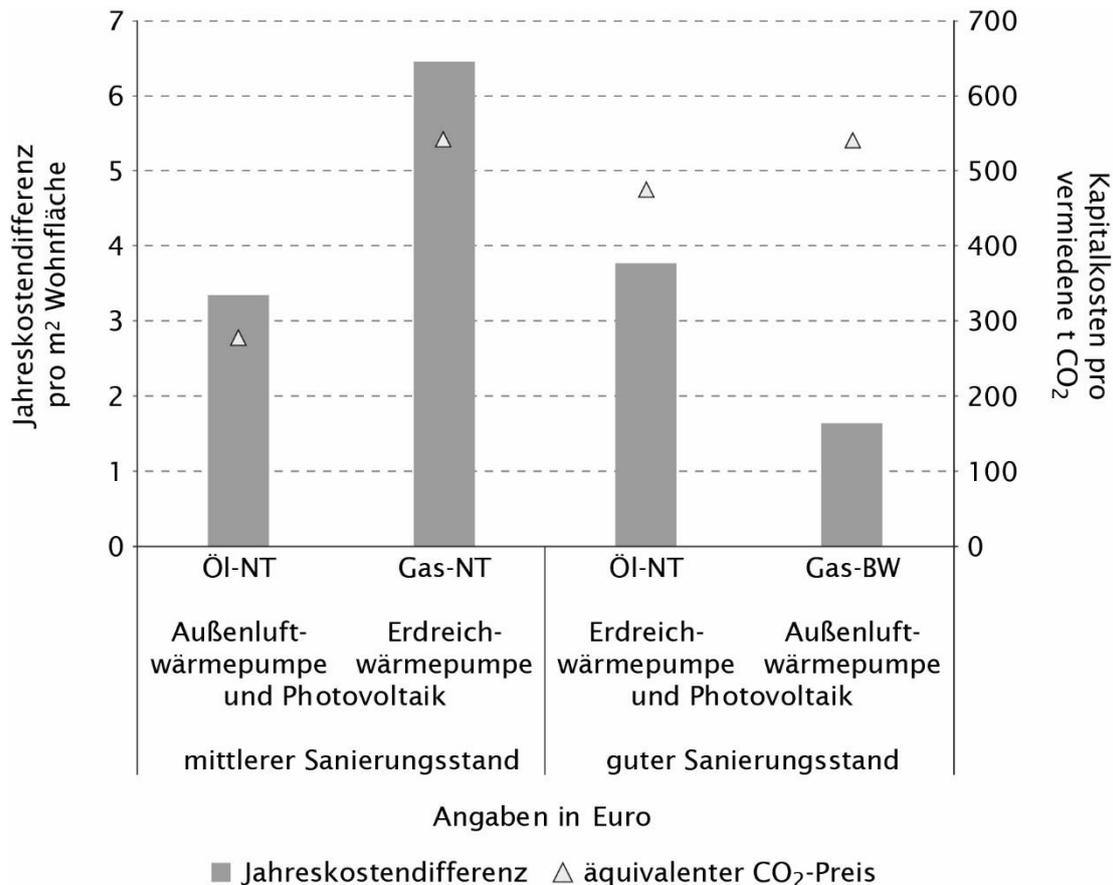
Ausschlaggebend für das positive Kosten-Nutzen-Verhältnis der PV-Anlage, d. h. finanzielle Entlastung im Vergleich zum Referenzfall ohne die Investition, ist die Eigenstromnutzung, wodurch hohe Strompreise und der Emissionsfaktor kompensiert werden können. Wird die Photovoltaik darüber hinaus zur Bereitstellung des Trinkwarmwassers genutzt, können die Emissionen weiter gesenkt werden. Die zusätzlichen Kosten für die elektrische Trinkwarmwasserversorgung liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die zusätzlichen Kostenersparnisse. Daher fällt die finanzielle Entlastung ähnlich hoch aus wie bei Photovoltaik für Wärme und Strom (ohne elektrische Trinkwasserversorgung). Die zusätzlichen Emissionsminderungen führen jedoch gegenüber der Photovoltaiknutzung ohne elektrische Trinkwasserversorgung zu einer Reduzierung der Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂. Dieser Effekt ist bei einem typischen Ein- bzw. Zweifamilienhaus stärker ausgeprägt als bei einem typischen Mehrfamilienhaus (Jagnow/Wolff 2020, S. 287). Aufgrund des erhöhten baulichen Aufwands und der zusätzlichen Kosten für eine Umstellung auf eine elektrische Trinkwarmwasserbereitstellung erscheint es sinnvoll, einen Systemumbau an den Sanierungszyklus der Rohrleitungen zu koppeln, sodass lediglich die Mehrkosten berücksichtigt werden müssen.

Photovoltaik in Kombination mit einer Wärmepumpe

Neben dem Einsatz der Photovoltaik für eine elektrische Trinkwarmwasserbereitung kann der solare Strom auch für den Betrieb einer elektrischen Wärmepumpe eingesetzt werden. Dies wirkt sich insbesondere positiv auf die Betriebskosten der Wärmepumpe aus, da Teile des Stroms aus der eigenen PV-Anlage genutzt werden können. In beiden Wohngebäudetypen sinken durch die Einbindung einer PV-Anlage die Jahreskostendifferenzen der Wärmepumpen erheblich (Abb. 4.17 u. 4.18 und im Vergleich zu Abb. 4.11 u. 4.12). Eine Wirtschaftlichkeit ist in einem durchschnittlichen Wohngebäude dennoch nicht erreicht, die Unwirtschaftlichkeit nimmt lediglich ab.

Gegenüber dem Betrieb einer Erdreichwärmepumpe ohne Photovoltaik sinken die Jahreskosten bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus von 11,80 auf 6,50 Euro und bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus von 8,50 auf 3,30 Euro. Im Fall der Außenluftwärmepumpe sinken die Jahreskosten beim Ein- bzw. Zweifamilienhaus von 7,50 auf 3,40 Euro und beim Mehrfamilienhaus von 5,10 auf 1,10 Euro. Auch die Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ sinken für alle Wärmepumpen und Gebäudetypen ab. Eine Ausnahme bildet der Fall des durchschnittlichen Wohngebäudes mit Außenluftwärmepumpe. Hier führt die Einbindung der PV-Anlage zu einem Anstieg der Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ um etwa 40 % bei beiden Gebäudetypen. Bei einem Ein- bzw. Zweifamilienhaus lassen sich höhere Emissionsminderungen erzielen, weil die PV-Anlage größer dimensioniert und damit ein größerer Anteil des Stroms für die Wärmepumpe genutzt werden kann.

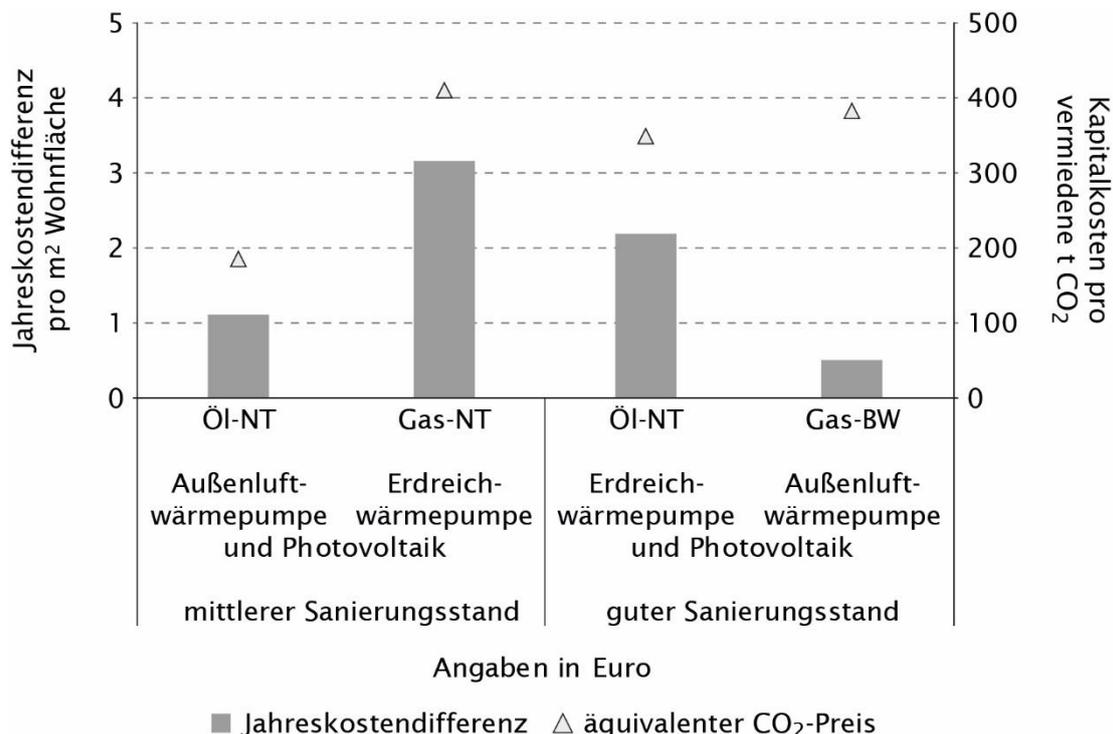
Abb. 4.17 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für Kombinationen aus Photovoltaik und Wärmepumpe bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 100

Abb. 4.18 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für Kombinationen aus Photovoltaik und Wärmepumpe bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus



NT = Niedertemperaturkessel; BW = Brennwertkessel

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 100

Dezentrale Trinkwarmwasserbereitung sowie Flächenheizung

Zwei weitere technologische Optionen stellen der Wechsel von zentralen Trinkwarmwassersystemen mit Zirkulation hin zu einem dezentralen System mit elektrischer Trinkwarmwasserbereitung sowie ein Wechsel von Heizkörpern hin zu Flächenheizungen dar.

Ein Systemwechsel von einer zentralen zu einer dezentralen Trinkwarmwasserversorgung ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Zwar können durch den Wegfall der Zirkulation und die Wärmeverluste durch den Transport des Trinkwarmwassers Kosten eingespart werden (Brillinger et al. 2010), aber dennoch führt ein reines dezentrales System häufig zu steigenden Kosten. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis einer dezentralen Trinkwarmwasserversorgung ist daher ungünstig und führt zu einer finanziellen Mehrbelastung, insbesondere aufgrund der Kosten des Energieträgers Strom.

Bei einem Wechsel von einer zentralen Trinkwarmwasserbereitstellung zu einem dezentralen System mit elektrischen Durchlauferhitzern oder Kleinspeichern zeichnet sich ein wirtschaftlich besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis dann ab, wenn eine PV-Anlage zur Eigenstromnutzung mit eingebunden wird. Dennoch weist die Dezentralisierung der Trinkwarmwasserversorgung auch mit PV-Anlage eine finanzielle Mehrbelastung auf (Jagnow/Wolff 2020, S. 286 f.). Mit Blick auf die Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ führt die Einbindung einer PV-Anlage bei der Dezentralisierung zu einer Reduktion der Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ um 40% (Jagnow/Wolff 2020, S. 287 f.). Sollte der Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix weiter ansteigen, kann auch ohne eine Einbindung einer Photovoltaik im Wohngebäude eine verbesserte Emissionsminderung erzielt werden. Die PV-Anlage kann neben der Stromerzeugung für die Trinkwarmwasserbereitstellung auch weitere elektrische Verbraucher versorgen, wodurch sich Synergieeffekte ergeben und die Kosten-Nutzen-Bilanz positiv beeinflusst wird. Vorteilhaft ist auch die weitgehende Vermeidung der ansonsten eher möglichen Kontamination

mit krankheitsverursachenden Bakterien (insbesondere Legionellen) durch eine dezentrale Bereitstellung von Trinkwarmwasser (Jagnow/Wolff 2020, S. 259).

Ein Wechsel von Heizkörpern hin zu Flächenheizungen (Fußboden- und Wandflächenheizung) im Gebäudebestand erfordert einen rohbauähnlichen Gebäudezustand, was zu hohen Investitionskosten führt. Der Motivationsgrund für einen Wechsel ist daher in der Regel durch Komfortansprüche geprägt, da ein Wechsel nur bedingt zu Energieeinsparungen führt. Auch die Einbindung von elektrischen Wärmepumpen führt nur zu bedingt besseren Kosten-Nutzen-Verhältnissen. Insgesamt stellt die Umstellung von Heizkörpern auf Flächenheizungen vorrangig eine Maßnahme für den Neubau dar und hier insbesondere für den Bereich der Ein- bzw. Zweifamilienhäuser (Jagnow/Wolff 2020, S. 260 f.).

4.2.3 Qualitätssicherung und Systemoptimierung

Die in Kapitel 4.1.3 dargelegten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass durch Maßnahmen der Qualitätssicherung und Systemoptimierung teilweise erhebliche Energieeinsparungen und folglich auch Emissionsminderungen erzielt werden können. Es ergibt sich für die verschiedenen Maßnahmen ein breites Spektrum bei den Kosten-Nutzen-Verhältnissen. Aufgrund der teilweise geringen Datenlage erfolgt die Bewertung der Kosten-Nutzen-Verhältnisse nachfolgend mehrheitlich qualitativ.

Die Qualitätssicherung zur Vermeidung von Wärmebrücken und der Sicherstellung der Luftdichtheit im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen ist angesichts der geringen Kosten, die bei der Planung und Überwachung anfallen, und der resultierenden Energieeinsparungen wirtschaftlich. Nicht wirtschaftlich (ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis) ist eine nachträgliche Qualitätssicherung, da sie nur schwer umsetzbar ist und die resultierenden Energieeinsparungen die zusätzlichen Kosten nicht ausgleichen können. Wirtschaftlichkeit ist folglich nur dann gegeben, wenn die Qualitätssicherung bei der Planung und Umsetzung der Maßnahme berücksichtigt wird (Jagnow/Wolff 2020, S. 303).

Kostenersparnisse lassen sich auch durch Systemoptimierungen erzielen, beispielsweise den hydraulischen Abgleich und den Einbau effizienterer Pumpen. Aufgrund der geringen Investitionskosten wird die Durchführung des hydraulischen Abgleichs als wirtschaftlich eingeordnet (Jagnow/Wolff 2020, S. 303; Mailach et al. 2019).

Aufgrund geringer Investitionskosten ist die Leitungsdämmung im Keller von zugänglichen Leitungen eine wirtschaftliche Maßnahme. Wegen der geringen Investitionsaufwendungen ist die nachträgliche Dämmung ungedämmter Leitungen im unbeheizten Bereich auch ausdrücklich in der vormaligen EnEV bzw. im GEG vorgegeben (Jagnow/Wolff 2020, S. 265). Für die nachträgliche Leitungsdämmung ergeben sich ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis (finanzielle Entlastung bezüglich der Jahreskosten) und niedrige Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂.

4.2.4 Integration von digitalen, intelligenten und vernetzten Technologien in den Gebäudebestand

Für die Einbindung von digitalen, intelligenten und vernetzten Technologien können derzeit aufgrund der geringen Datenlage zu Kosten und Nutzen nur eingeschränkt Aussagen getroffen werden. Die durchgeführten Recherchen sowie ein Workshop mit Expert/innen ermöglichen lediglich qualitative Aussagen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis für die smarten Lösungen. Mit der Einbindung smarterer Lösungen werden – neben der Absicht, Energie einzusparen – Komfortsteigerungen im Wohngebäude verfolgt. Infolgedessen ergibt sich eine Bewertung von Kosten und Nutzen, bei der die Kostenersparnis weniger stark gewichtet wird.

Müller et al. (2017a) kommen zu der qualitativen Einschätzung, dass die digitalen Werkzeuge zur Steigerung der Energieeffizienz durch Visualisierung und Steuerung zu mittleren Kosten für Anschaffung und Betrieb führen (stark abhängig vom gewählten System). Wenn Energieeinsparungen unterstellt werden, könnten Kosteneinsparungen von 0,3 bis 2,6 Euro/m² erzielt werden. Als maßgebliche Einflussfaktoren werden der energetische Ausgangszustand des Gebäudes, die Haushaltsgröße sowie das Nutzungsverhalten angegeben (Kersken et al. 2018). Dies deutet auf ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis hin. Wenn Mehrverbräuche bei Strom und Heizenergie aus den smarten Lösungen resultieren, führen sie zu zusätzlichen Kosten und weisen somit ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis auf. Die (wenigen) Studien deuten auf ein Kosteneinsparpotenzial im Bereich Wärme und Trinkwasser hin. Demgegenüber zeichnet sich für den Haushaltsstromverbrauch ein weniger klares Bild ab. Hier können sowohl steigende als auch sinkende Kosten von den smarten Lösungen ausgelöst werden. Maßgeblich für

die Energie- und Kosteneinsparungen sind die Ausgangslage, die verwendeten Systeme sowie das Nutzungsverhalten nach der Einbindung digitaler, intelligenter und vernetzter Technologien.

4.2.5 Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

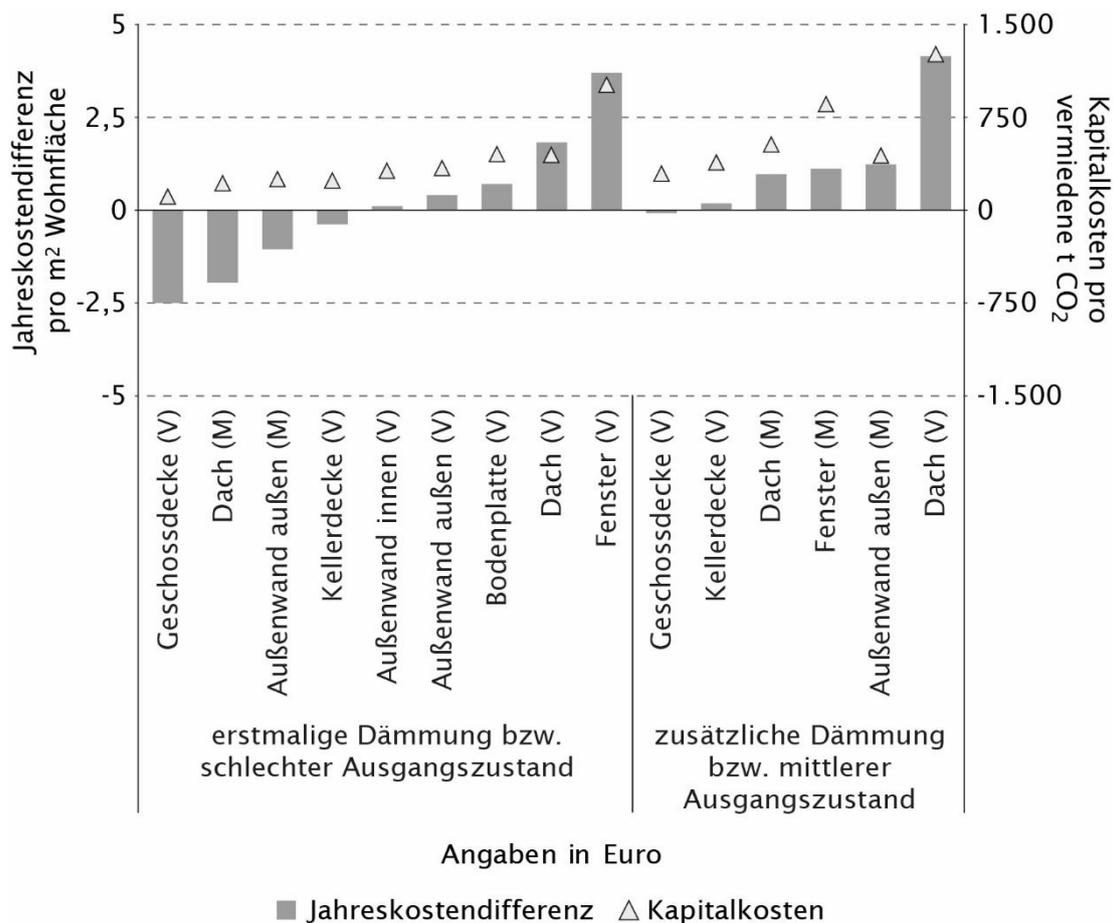
Einzelmaßnahmen

Die Kosten-Nutzen-Betrachtung der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bietet ein breites Spektrum an Resultaten (Abb. 4.19 u. 4.20). Durch Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle können sowohl Kosteneinsparungen als auch zusätzliche finanzielle Belastungen resultieren. Kosteneinsparungen können z. B. bei der Sanierung der obersten Geschossdecke, des Dachs, der Außenwand und der Kellerdecke erzielt werden, wenn es sich um ein bisher unsaniertes Gebäude bzw. ein Gebäude mit schlechtem energetischem Ausgangszustand handelt. Bei Gebäuden, die bereits über eine (geringe) Dämmung verfügen oder die einen mittleren energetischen Ausgangszustand aufweisen, können keine Kosteneinsparungen erzielt werden.

Durchweg schlechtere Kosten-Nutzen-Relationen erzielt der Austausch von Fenstern. Er ist erst nach Ende der Lebenserwartung von etwa 35 Jahren potenziell wirtschaftlich (Jagnow/Wolff 2020, S. 87). Entscheidend für ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis ist, ob es sich um eine Maßnahme handelt, die aufgrund von Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen ohnehin durchgeführt wird, oder ob die Maßnahmen vorgezogen werden, ohne dass es einen Anlass gibt.

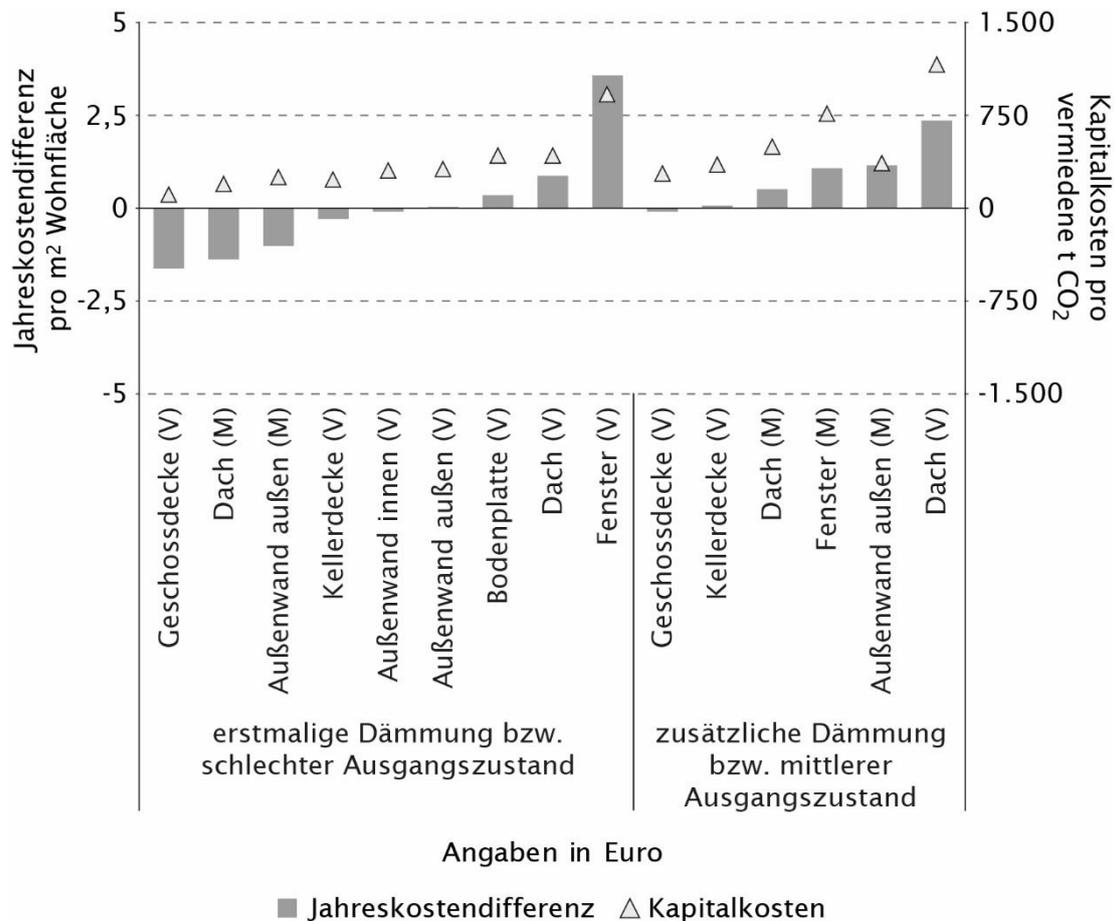
Die Betrachtung der Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ zeigt ein ähnliches Bild wie bei den Jahreskostendifferenzen. Maßnahmen an unsanierten Gebäuden weisen niedrigere Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ auf als an Gebäuden mit besserem energetischem Ausgangszustand. Die Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ bei unsanierten Gebäuden liegen zwischen 100 und 1.000 Euro. Für Gebäude mit einem besseren energetischen Ausgangszustand betragen sie 300 bis 1.300 Euro. Sie liegen bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus durchweg etwas niedriger als bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus.

Abb. 4.19 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem Ein- bzw. Zweifamilienhaus



(V) = Vollkosten; (M) = Mehrkosten

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 86

Abb. 4.20 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂ für Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem Mehrfamilienhaus

(V) = Vollkosten; (M) = Mehrkosten

Eigene Darstellung auf Basis von Jagnow/Wolff 2020, S. 86

Maßnahmenpakete

Werden anstelle von Einzelmaßnahmen Maßnahmenpakete umgesetzt, können bei beiden Gebäudetypen Kosteneinsparungen erzielt werden. Auch hier ist ausschlaggebend, ob die Maßnahmen infolge ohnehin anstehender Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen getätigt werden. Je weniger Maßnahmen innerhalb des Pakets im Zuge einer ohnehin anstehenden Maßnahme umgesetzt werden, desto geringer fällt die Kostenersparnis aus. Von Bedeutung ist auch, welche Maßnahmen zu einem Paket zusammengefasst werden. Enthält ein Paket z. B. auch den Austausch der Fenster, verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit aufgrund der hohen Kosten der Fenster (Jagnow/Wolff 2020, S. 106). Die Umsetzung von Maßnahmenpaketen weist gegenüber einzelnen Sanierungsmaßnahmen in Reihe eine etwas höhere Wirtschaftlichkeit auf. Aus Sicht der Emissionsminderung besitzen Maßnahmenpakete klare Vorteile, da insgesamt höhere Emissionsminderungen erzielt werden (Jagnow/Wolff 2020, S. 103 ff.).

4.3 Gegenüberstellung der Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit

Nachfolgend werden die zentralen Ergebnisse aus den Kapiteln 4.1 und 4.2 zu den Einspareffekten und zur Wirtschaftlichkeit zusammenfassend gegenübergestellt.

Durch den Ersatz des Hauptwärmeerzeugers mit einem *Gasbrennwertkessel* werden in der Regel geringe bis moderate Energieeinsparungen erzielt (und THG-Emissionsreduktionen in der gleichen prozentualen Größenordnung), da der Wirkungsgrad des neuen Kessels den der alten Anlage (je nach Altgerät) in der Größenordnung von im Schnitt 5 bis 10% übersteigt. Eine vorzeitige Erneuerung des Hauptwärmeerzeugers ist nur beim Ersatz besonders ineffizienter Altgeräte, die es durchaus noch im Bestand gibt, wirtschaftlich. Die Wirtschaftlichkeit ergibt sich aber nur bei einer Gesamtbetrachtung über einen Zeitraum von ca. 20 bis 25 Jahren (unter Verwendung des Kapitalwerts der Investition zuzüglich der laufenden Wartungs- und Energiekosten).

Ein Wechsel von einem mit Erdgas oder Heizöl betriebenen Heizkessel zu einer *Wärmepumpe* führt zu hohen Energieeinsparungen (bezogen auf den zuvor verwendeten Brennstoff und den nunmehr verwendeten Strom). Aufgrund der Zusammensetzung des Strommixes in Deutschland schlägt sich diese Energieeinsparung aber nicht in gleicher Weise auf die verursachten THG-Emissionen nieder. Insgesamt kann ein Wechsel von einem mit Erdgas oder Heizöl betriebenen Heizkessel zu einer Wärmepumpe zu einer Emissionsminderung von 15 bis 60% führen. Der Einsatz einer Wärmepumpe zusammen mit einer PV-Anlage zur Eigenstromnutzung führt zu deutlichen Emissionsminderungen. Die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen hängt stark vom Strompreis ab und war 2020 bei durchschnittlichen Wohngebäuden und insbesondere solchen mit einem geringen Sanierungsstand (selbst bei Förderung) eher nicht gegeben (in einzelnen sanierten Gebäuden aber durchaus).

Strom aus einer *PV-Anlage* kann für die Bereitstellung von Wärme, Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom eingesetzt werden. Eine Nutzung des Stroms aus der PV-Anlage für Wärme und Strom kann zu einer Emissionsminderung von 5 bis 10% führen. Wird jedoch die Trinkwarmwasserbereitung dezentralisiert und Strom aus der PV-Anlage auch hierfür genutzt, dann ließen sich zwischen 10 und 15% Emissionsminderungen erzielen. Auch ein Einsatz von *Solarthermie* kann zu Emissionsminderungen von 5 bis 10% beitragen. In Anbetracht der Flächenkonkurrenz von Solarthermie und Photovoltaik zeichnet sich unter Berücksichtigung des flexibleren Einsatzes des erzeugten Stroms ein Vorteil für Photovoltaik ab.

Bei einem Wechsel des Energieträgers von fossilen Brennstoffen zu *Holz* oder *Strom* werden nach Stand des Jahres 2020 die erzielten Energieeinsparungen durch höhere Energiepreise der neuen Energieträger kompensiert. Dies trifft insbesondere auf den Energieträger Strom zu, der einen deutlich höheren Preis hat als Erdgas oder Heizöl. Ein Wechsel zum nachwachsenden Brennstoff Holz führt im Schnitt zu THG-Emissionsminderungen von 94%.

Eine gute Wirtschaftlichkeit erreichen meist Maßnahmen der *Qualitätssicherung* bei der energetischen Sanierung der Gebäudehülle, beispielsweise durch die Vermeidung von Wärmebrücken und die Sicherstellung der Luftdichtheit. Voraussetzung ist, dass die Maßnahme bereits Bestandteil bei der Planung und Ausführung ist. Eine nachträgliche Qualitätssicherung ist hingegen nicht wirtschaftlich. Mit Blick auf die Qualitätssicherung und Systemoptimierung profitieren bei den Hauptwärmeerzeugern vor allem Wärmepumpen. Hier lassen sich hohe Effizienzsteigerungen erreichen. Auch der hydraulische Abgleich stellt eine wirtschaftliche Maßnahme dar. Nicht wirtschaftlich sind der nachträgliche Einbau einer Lüftungsanlage und der Wechsel von Heizkörpern zu Flächenheizungen.

Sanierungsmaßnahmen an der *Gebäudehülle* führen zu einer maßgeblichen prozentualen Reduzierung des Energieverbrauchs und damit einhergehend auch zu einer Emissionsminderung (im selben prozentualen Ausmaß wie die Energieeinsparung). Die Einsparungen liegen zwischen 6 und 40% je nach Maßnahme, Ausgangszustand und Ziel. Für die Dämmung der Außenwand liegen die prozentualen Einsparungen am höchsten. Die absolute Höhe der THG-Emissionsminderung durch Dämmung hängt auch von der verwendeten Heiztechnologie ab. Im Gebäudebestand Deutschlands dominieren Heizkessel für fossile Brennstoffe, die eine unterschiedliche Effizienz besitzen.

Die Außenwanddämmung weist, auch bei Vollkostenansatz, eine hohe Wirtschaftlichkeit auf, insbesondere bei Gebäuden, die bisher nicht ertüchtigt wurden oder einen energetisch schlechten Ausgangszustand aufweisen. Ebenfalls wirtschaftlich ist die Dämmung der obersten Geschossdecke, des Daches, der Kellerdecke und der Außenwand. Erfolgen die Maßnahmen an bereits gedämmten Gebäuden oder Gebäuden mit einem guten energeti-

schen Ausgangszustand, kann ausschließlich die Dämmung der Kellerdecke eine gute Wirtschaftlichkeit erreichen. Niedrige Preise für Erdgas und Heizöl, wie sie 2020 gegeben waren, reduzieren auch die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle.

Die Notwendigkeit einer *Langfristperspektive* ist für fast alle Sanierungsoptionen typisch, die im vorliegenden Bericht dargestellt werden. Einen relevanten Einfluss hat auch der Zeitpunkt der Maßnahme: Werden Technologien bzw. Bauteile vor Ablauf ihrer technischen Lebenserwartung ausgetauscht oder saniert, sind Vollkosten zu veranschlagen, was zu einer Reduzierung der Wirtschaftlichkeit führt. Die Sanierungszyklen von Bauteilen stellen somit einen wichtigen Aspekt bei der Bewertung von Maßnahmen (und Maßnahmenpaketen) dar.

Ebenfalls einen relevanten Einfluss auf die erzielte Energieeinsparung und Wirtschaftlichkeit üben das *Nutzungsverhalten* bzw. die hierzu getroffenen Annahmen bei der Bilanzierung der Ersparnisse aus. Ein Nutzungsverhalten, das von den getroffenen bzw. standardisierten Annahmen abweicht, kann zu zusätzlichen Einsparungen von 35 % oder auch zu einem Mehrverbrauch von bis zu 80 % gegenüber den errechneten Werten führen. Im Durchschnitt konnte hier ein Mehrverbrauch von 30 % beobachtet werden, was Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen hat.

Ein Überblick über zentrale Ergebnisse zu den Einspareffekten und der Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle wird in den Tabellen 4.1 bis 4.3 gegeben. Die Tabellen enthalten auch Handlungsoptionen für die Politik.

Tab. 4.1 Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit der Erneuerung von Hauptwärmeerzeugern in einem durchschnittlichen Wohngebäude 2020*

neue Heiztechnologie	Energieeinsparung/ THG-Reduktion	Kostenwirtschaftlichkeit für Gebäude- eigentümer/innen	Handlungsoptionen für die Politik (Förderung, Rah- menbedingungen)
Erdgasbrennwertkessel	durchschnittlich 5 bis 10%	wirtschaftlich bei besonders ineffizienten Altgeräten	Förderung eines Heizungs- tauschtes bei ineffizienten Altgeräten, da trotz Wirt- schaftlichkeit nicht hinrei- chend durchgeführt
Wärmepumpe	Energieeinsparung: 60 bis 75 %, da Umweltwärme genutzt THG-Reduktion: 15 bis 50 % bei aktuellem Strommix, nahe 100 % bei Ökostrom	nicht wirtschaftlich; aufgrund niedriger Öl-/Gaspreise bzw. hoher Strompreise führt ein Wechsel zu Umweltwärme und Strom zu höheren Betriebskosten; Wirt- schaftlichkeit bei Einbindung von Photovoltaik möglich	Investitionskostenzuschuss von min. 70 bis 80 %; ge- ringerer Strompreis, relativ zu fossilen Brennstoffen, verbessert die Wirtschaft- lichkeit
Hybridheizung (Heiz- kessel fossile Brenn- stoffe u. Wärme- pumpe)	Energieeinsparung: variiert (siehe Erdgaskessel, Wärme- pumpe) THG-Reduktion: 7 bis 56 %	nicht wirtschaftlich; komplexes System erfordert höhere War- tungskosten als solitäre Sys- teme; Strompreis erhöht die Be- triebskosten im Vergleich zu Erdgas/Heizöl	geringerer Strompreis ver- bessert die Wirtschaftlich- keit
Anschluss an Wärme- netz (inklusive Kraft- Wärme-Kopplung)	Energieeinsparung: k. A. THG-Reduktion: 7 %; hohe Wärme-, Umwand- lungs- und Speicherverluste bei alternativen Energiequellen	Umsetzung nur in ausgewählten Regionen/ Städten, typischerweise bei Mehrfamilienhäusern	
Holzessel	Energieeinsparung: keine bzw. gering THG-Reduktion: etwa 95 %	nicht wirtschaftlich, da nur ge- ringe oder keine Energieeinspar- ungen erzielt werden sowie an- gesichts der Brennstoffkosten	Investitionskostenzuschuss von mind. 70 %
Qualitätssicherung, Optimierung der Be- triebsführung	10 bis 35 %	wirtschaftlich; jedoch stark ab- hängig vom Rest der Gebäude- technik; Daueraufgabe	Förderung (Zuschuss), da trotz Wirtschaftlichkeit nicht hinreichend durchge- führt

* Referenzfall (Altgerät): Heizkessel für fossile Brennstoffe (durchschnittliches Bestandsgerät, soweit nicht anders benannt)

Eigene Zusammenstellung basierend auf Jagnow/Wolff 2020

Tab. 4.2 Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit der Einbindung zusätzlicher Erzeuger und Optimierung der Peripherie bei einem durchschnittlichen Wohngebäude 2020

Technologie/ Maßnahmen	Energieeinsparung/ THG-Reduktion	Kostenwirtschaftlichkeit für Gebäudeeigentümer/innen	Handlungsoptionen für die Politik (Förderung, Rah- menbedingungen)
Lüftung mit Wärme- rückgewinnung	Energieeinsparung und Emis- sionsminderung von ca. 5 %	nicht wirtschaftlich aufgrund hoher baulicher Anforderungen in Bestandsgebäuden	90 bis 100 % der Investiti- onskosten erforderlich
Photovoltaik	Emissionsminderung von 5 bis 10 % durch Ersatz des Stroms aus dem Netz	wirtschaftlich, wenn Vergütung des eingespeisten Stroms er- folgt	keine Förderung der Inves- tition erforderlich, u. a. durch Einspeisevergütung
dezentrale Trinkwarm- wasserversorgung mit Photovoltaik	Energieeinsparung und Emis- sionsminderung von 10 bis 15 %	wirtschaftlich, wenn Vergütung des eingespeisten Stroms er- folgt	keine Förderung der Inves- tition erforderlich, u. a. durch Einspeisevergütung
Solarthermie	Energieeinsparung und Emis- sionsminderung von 5 bis 10 %	nicht wirtschaftlich; steht in Konkurrenz (Fläche) zur Photo- voltaik	Investitionskostenzuschuss von 55 bis 60 % erforder- lich; Konkurrenz zu Photo- voltaik
Wechsel von Heizkör- pern zu Flächenheizun- gen	Energieeinsparungen von 2 % bis Mehrverbrauch von bis zu 25 % möglich	nicht wirtschaftlich aufgrund umfangreicher baulicher Maß- nahmen und Kosten	Maßnahme im Bestand un- interessant; vorrangig im Neubau
Einbindung von smar- ten Lösungen (Heiz- wärme und Trink- warmwasser)	Energieeinsparung und Emis- sionsminderung im Durchschnitt von ca. 10 %; Bandbreite von - 26 bis 36 %	Kostenabschätzung schwierig aufgrund geringer Daten; ten- denziell wirtschaftlich; weiterer Forschungsbedarf nötig	weiterer Forschungsbedarf nötig
Einbindung von smar- ten Lösungen (Strom- verbrauch)	Energieeinsparung oder Energiemehrverbrauch etwa von -10 und 10 %; smarte Lösungen benötigen selbst Strom zum Betrieb; hierdurch steigender Verbrauch	Kostenabschätzung schwierig aufgrund geringer Daten; ten- denziell wirtschaftlich	weiterer Forschungsbedarf nötig

Eigene Zusammenstellung basierend auf Jagnow/Wolff 2020; Quack et al. 2019; Schneiders et al. 2018

Tab. 4.3 Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem durchschnittlichen Wohngebäude 2020

Maßnahme	Energieeinsparung/ THG-Reduktion	Kostenwirtschaftlichkeit für Gebäudeeigentümer/innen	Handlungsoptionen für die Politik (Förderung, Rahmenbedingungen)
Dämmung Außenwand	Energieeinsparungen und Emissionsminderung von 20 bis 40%, steigender energetischer Gebäudeausgangszustand führt zu sinkenden Einsparungen	wirtschaftlich, wenn ohnehin Maßnahmen anstehen und bei unsanierten Gebäuden	keine erforderlich; Ausnahme: Nachdämmung (20% der Investitionskosten)
Austausch Fenster	Energieeinsparung und Emissionsminderung von 10 bis 18%	nicht wirtschaftlich; unabhängig, ob im Rahmen von Ohnehinmaßnahmen oder anlasslos	Investitionskostenzuschuss von 20 bis 70%
Dämmung oberste Geschossdecke	Energieeinsparung und Emissionsminderung von 22 bis 29%	wirtschaftlich (Voll- und Mehrkosten)	keine Förderung erforderlich
Dämmung Dach	Energieeinsparung und Emissionsminderung von 22 bis 29%	wirtschaftlich, wenn ohnehin Maßnahmen anstehen	Investitionskostenzuschuss von 20 bis 75%, wenn anlasslos saniert wird
Dämmung Kellerdecke	Energieeinsparung und Emissionsminderung von 10 bis zu 13%	wirtschaftlich; bei Aufdopplung der Dämmung nicht wirtschaftlich ab Wärmeschutzstandard 1984	keine Förderung erforderlich; bei Aufdopplung bis 15% der Investitionskosten
Dämmung Bodenplatte	Energieeinsparung und Emissionsminderung von 10 bis zu 13%	nicht wirtschaftlich; geringer Anreiz aufgrund hoher Lebenserwartung	max. 30% der Investitionskosten
bauliche Qualitätssicherung	Energieeinsparungen abhängig vom Bauteil; hilft Einsparpotenziale der Bauteile zu erschließen	wirtschaftlich; leicht erhöhter Planungsaufwand	keine Förderung erforderlich; Kosten sollten jedoch bei der Planung berücksichtigt werden

Eigene Zusammenstellung basierend auf Jagnow/Wolff 2020

5 Beiträge der Maßnahmen zur Zielerreichung der Energie- und Klimapolitik

In diesem Kapitel wird sich den Einspareffekten und Kosten-Nutzen-Relationen von Technologien und Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle aus einer Makroperspektive, d. h. für Deutschland insgesamt, gewidmet. Betrachtet werden die *möglichen* Beiträge der Technologien (zur Wärmeerzeugung etc.) und Sanierungsmaßnahmen zur Zielerreichung der Energie- und Klimapolitik in Deutschland (Kap. 2.2). Dabei werden die Rahmenbedingungen abgeleitet, die erforderlich sind, um die politischen Ziele zu erreichen.

Ausgangspunkt der Untersuchung sind Szenariostudien (Kap. 5.1). Bei der Auswertung dieser Studien wurden von Jagnow/Wolff (2020) eigene Abschätzungen vorgenommen, die einen unmittelbaren Vergleich der unterschiedlichen Technologien und Sanierungsmaßnahmen ermöglichen. Die zugrunde liegenden Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Gebäudetechnik, der Gebäudesanierungen und der maßgeblichen Rahmenbedingungen, vor allem zur zukünftigen Entwicklung der Energiepreise, werden in Kapitel 5.2 dargelegt. Die möglichen zukünftigen Einspareffekte werden in Kapitel 5.3 ausgewiesen. Das Kapitel schließt mit Ausführungen zur Wirtschaftlichkeit der betrachteten Entwicklungspfade aus einer (Kap. 5.4).

5.1 Szenariostudien

5.1.1 Überblick

Eine Vielzahl an Szenariostudien, die in den vergangenen 10 Jahren erstellt wurden, hat Erkenntnisse zu den Einspareffekten und Kosten-Nutzen-Relationen von energetischen Sanierungsmaßnahmen im Wohngebäudesektor erbracht. Eine Auswahl wird in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Im Zuge der wissenschaftlichen Abschätzungen auf der Makroebene ist stets eine Reihe von Annahmen über zukünftige Entwicklungen zu treffen, die die Ergebnisse stark beeinflussen und zugleich mit einem Maß an Unsicherheit behaftet sind. Dies gilt umso mehr für Abschätzungen, die in die mittlere und ferne Zukunft gerichtet sind (z. B. Energie- und Klimaszenarien mit dem Zeithorizont bis 2050). Gleichzeitig basieren die Zukunftsannahmen auf Handlungsoptionen, die ganz unterschiedliche Konsequenzen (z. B. Zielerreichungsgrade bei der Energie- und Klimapolitik) haben können. Um der Unsicherheit zu begegnen, die mit Zukunftsabschätzungen einhergeht, werden in Makrostudien typischerweise Szenarien entwickelt. Für die einzelnen Szenarien werden unterschiedliche Annahmen getroffen, um einerseits Entwicklungsräume abzustecken, innerhalb derer zukünftige Entwicklungen wahrscheinlich stattfinden, und um andererseits Entwicklungspfade aufzuzeigen, zwischen denen (politische und andere) Entscheidungsträger wählen, um die Zukunft aktiv zu gestalten. Praktisch überschneiden sich beide Kategorien von Annahmen, da die Entwicklungsräume teilweise auch von politischen Rahmenbedingungen abhängig sind.

Tab. 5.1 Auswahl an Szenariostudien zu Einspareffekten an Energie und THG-Emissionen durch Wohngebäudesanierungen in Deutschland

Quelle	Titel	Auftraggeber
Sterchele et al. 2020	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen	Eigenforschung
Ifeu et al. 2018	Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung	AGORA
ewi ER&S et al. 2017	Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor	dena, GEEA
Dena 2018	dena-Leitstudie Integrierte Energiewende	Eigenforschung
Prognos et al. 2020	Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (Teilbericht)	BMWi
Öko-Institut/ ISI 2015	Klimaschutzszenario 2050	BMU
DLR et al. 2012	Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global	BMU
McKinsey 2009	Kosten und Potenziale der Vermeidung von THG-Emissionen in Deutschland	BDI
BCG/prognos 2018	Klimapfade für Deutschland	BDI
Ausfelder et al. 2017	Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems	BMBF

Quelle: nach Jagnow/Wolff 2020, S. 361 ff.

In den Studien werden Szenarien vor allem genutzt, um Entwicklungspfade und entsprechende Handlungsoptionen aufzuzeigen, um die Einspar- und Reduktionsziele der Bundesregierung für Energie und THG-Emissionen erreichen zu können. Mit anderen Worten: Viele der getroffenen Annahmen zur zukünftigen Entwicklung stellen aus der Zielperspektive betrachtet wünschenswerte oder erforderliche Entwicklungen dar. Hier geht es um das Aufzeigen von Ursache-Wirkung-Zusammenhängen zum Zweck der Zukunftsgestaltung. Ein Beispiel sind die Energiepreise. Sie fließen in die Szenarien als Zukunftsannahmen ein und sind politisch gestaltbar. Anhand von Szenarien wird gezeigt, welchen Einfluss unterschiedliche Energiepreise auf die Einspareffekte haben und welche in welcher Höhe dazu führen würden, die Einsparziele zu erreichen.

Betrachtet werden dabei nicht nur die angestrebten Ziele (z. B. weitgehende Klimaneutralität) für einen *Zeitpunkt* (z. B. das Jahr 2050), wie sie von der Bundesregierung formuliert wurden. Berücksichtigt wird auch, wie hoch die jährlichen Energieverbräuche und THG-Emissionen auf dem Weg hin zum Politikziel, d. h. im gesamten *Zeitraum* 2020 bis 2050 ausfallen (kumulative Betrachtung). Diese kumulativen Gesamtreduktionen fallen sehr unterschiedlich aus, je nachdem, ob die (fossilen) Energieverbräuche und THG-Emissionen bereits in den kommenden Jahren stark sinken oder erst gegen Ende der Zeitspanne 2020 bis 2050. Um die Klimaeffekte besser abzubilden, wäre daher eine politische Zielformulierung mit Blick auf die kumulativen Gesamteinsparungen im betrachteten Zeitraum im Sinne eines Emissionsbudgets sinnvoll (Jagnow/Wolff 2020, S. 21; SRU 2020; WBGU 2009).

5.1.2 Elektro- und Technologiemitpfade

In den Szenariostudien finden sich unterschiedliche Zukunftsszenarien zu den eingesetzten Heiztechnologien. Sie lassen sich grob zwei Kategorien von Entwicklungspfaden zuordnen, wobei auch Zwischenlösungen auftreten (dena 2018; Jagnow/Wolff 2020, S. 40):

- › *Elektrifizierungsszenarien (Elektropfade)* legen den Schwerpunkt auf den Ausbau gebäudenaher Photovoltaik und Wärmepumpen sowie vorrangig auf Stromdirektnutzung, eher dezentrale Speicherung sowie synthetische Gase und Gaskraftwerke zur Strombereitstellung in Dunkelflauten bzw. Spitzenzeiten.
- › *Technologiemitpadszenarien (Technologiemitpads)* fokussieren auf den Beibehalt vorhandener Gasnetzstrukturen sowie auf den Ausbau von Fernwärme bzw. Kraft-Wärme-Kopplung und die vorrangige Nutzung synthetischer Gase (überwiegend als Importe).

Beide Entwicklungspfade haben unterschiedliche Implikationen, aber auch Gemeinsamkeiten. So bringen Technologiemitpads beispielsweise mit sich, dass der Fokus auf den Erhalt der stofflichen Energiewirtschaft auf Basis von PtX gesetzt würde (dena 2018). Das X steht entweder für mit (Überschuss-)Strom generierte Wärme (Power to Heat), für hergestelltes synthetisches Gas (Power to Gas) oder für synthetisches Öl bzw. Flüssigbrennstoff (Power to Liquid). Diese Technologien würden eine zukünftige Nutzung der aktuell dominierenden Heiztechnologien auch auf Basis erneuerbarer Energien möglich machen (BMU 2019b; ewi ER&S et al. 2017). Für die Gebäude bliebe die bisherige Energieversorgungsstruktur dann fast vollständig erhalten.

Übergreifend gilt: Der Ausbau von regenerativen Energiequellen ist in allen Studien notwendig. Unterschiede gibt es aber dahingehend, ob die Energiequellen in den Studien als Teil der Energiewirtschaft geführt werden (überwiegend zentrale Aufbereitung der regenerativen Energien und dann Lieferung als PtX oder Fernwärme), oder als Teil des Sektors Gebäude gelten (überwiegend dezentrale Aufbereitung und Nutzung) (Jagnow/Wolff 2020, S. 131).

5.2 Ausgangspunkte und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung

5.2.1 Entwicklung der Wohngebäude und verfügbaren Wohnflächen

Für einen Überblick über den Wohngebäudebestand wird auf Kapitel 3.1.1 verwiesen. Die Annahmen in wissenschaftlichen Studien über die zukünftige Anzahl an Wohngebäuden sind uneinheitlich. Langfristig, d. h. bis 2050, wird teils von mehr Abrissen als Neubauten ausgegangen, teils wird auch ein Überschuss an Neubauten angenommen. Dass die Wohnfläche pro Person weiterhin kontinuierlich ansteigen wird, ist eine überwiegend geteilte Einschätzung. Insgesamt wird von einem Nettogesamtwachstum an Wohnfläche ausgegangen (Jagnow/Wolff 2020, S. 122 f.). Der Zuwachseffekt bei der Wohnfläche stellt eine zusätzliche Herausforderung an die Einsparbemühungen bei Energie und THG-Emissionen im Wohnbereich dar. Wenn der Wohnflächenzuwachs geringer ausfallen würde als erwartet, hätte dies deutliche positive Auswirkungen (relativ zur erwarteten Situation) auf Energie- und THG-Einsparungen (Jagnow/Wolff 2020, S. 419).

5.2.2 Entwicklung der Energiepreise

Da die (aktuellen und von den Gebäudeeigentümer/innen erwarteten) Energiepreise einen Einfluss auf die Wahl des neuen Heizsystems und das energetische Sanierungsverhalten haben, bestimmen sie die zukünftigen Energieverbräuche und THG-Emissionen maßgeblich. Einen starken Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der Strompreise haben neben den Beschaffungskosten auf dem Weltmarkt auch die staatlich gestalteten Rahmenbedingungen wie das EEG, Energiesteuern und die zukünftigen Netznutzungsentgelte im Stromsektor (Wissenschaftliche Dienste 2020). Wenn es darum geht, möglichst realistische Annahmen zu den Energiepreisen (im Sinne von Prognosen) zu treffen, sind diese daher mit relativ großen Unsicherheiten verbunden, insbesondere für Fernwärme und Strom.

In den Szenariostudien gibt es unterschiedliche Annahmen zu den zukünftigen Energiepreisen. So nehmen ewi ER&S et al. (2017) in ihrer Studie im Auftrag der Deutschen Energieagentur (dena) die in Tabelle 5.2 dargestellten Energiepreise für einen Elektro- und einen Technologiempfad an. Charakteristisch sind Anstiege bei Strom, Öl und Gas mit dem Ergebnis, dass Gas 2050 weniger kostet als Öl oder Strom.

Tab. 5.2 Angenommene Energiepreise für Elektro- und Technologiempfade zur Erreichung von Klimaneutralität in Deutschland

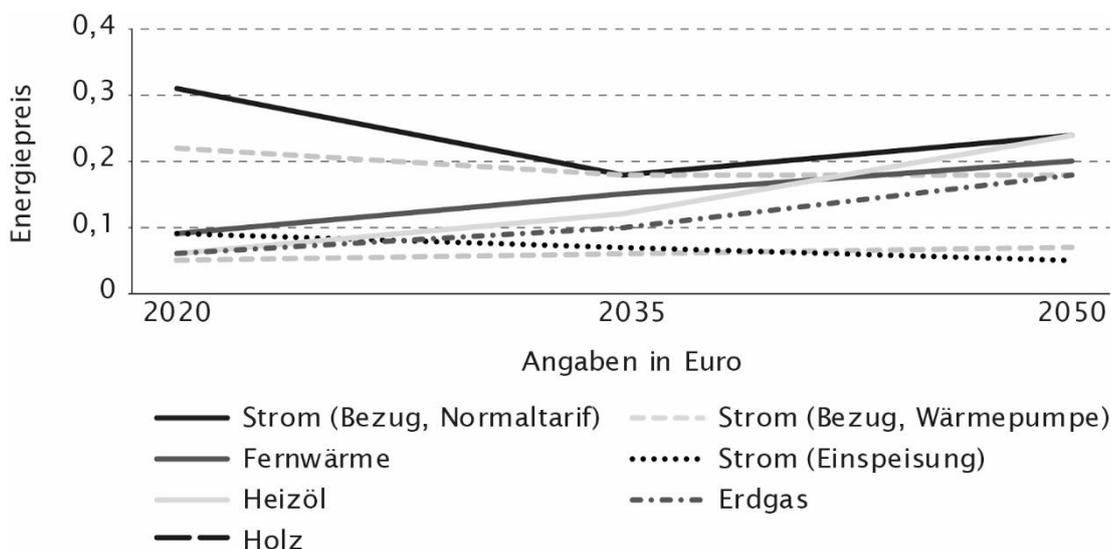
	Großhandelspreise in Eurocent/kWh							
	Elektropfad				Technologiempfad			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Strom	3,6	5,8	7,5	11,9	3,5	5,5	6,5	10,0
Öl	4,1	8,0	8,6	11,2	4,1	8,0	8,5	11,1
Gas	1,8	2,6	3,2	7,3	1,8	2,6	4,5	8,5

Quelle: ewi ER&S et al. 2017, S. 63

Die von Jagnow/Wolff (2020) für einen Elektropfad angenommenen Energiepreise weichen davon ab, indem sie von niedrigeren Stromkosten im Jahr 2050 ausgehen (Abb. 5.1). Ihre Annahmen zur Entwicklung der Energiepreise sind nicht als Prognose, sondern als erforderliche (und vorstellbare) Energiepreise anzusehen, die eine Erreichung der politischen Einsparziele auf dem Elektropfad und eine Wirtschaftlichkeit dieses Pfads möglich machen würden. Damit unterscheiden sie sich von ewi ER&S et al. (2017), die zu dem Schluss kommen, dass der Elektropfad weniger wirtschaftlich wäre als der Technologiempfad.

Die in Abbildung 5.1 dargestellten Energiepreise beruhen auf einem Vorschlag für eine Preisgestaltung, die weitgehend auf den CO₂-Emissionen der einzelnen Energieträger basiert und sich somit von der aktuellen Vorgehensweise bei der Energiepreisbildung unterscheidet (Jagnow/Wolff 2020, S. 13).

Abb. 5.1 Mögliche (politisch gestaltete) Energiepreise, brennwertbezogen (pro kWh), für einen moderaten Elektropfad zur Erreichung von Klimaneutralität in Deutschland



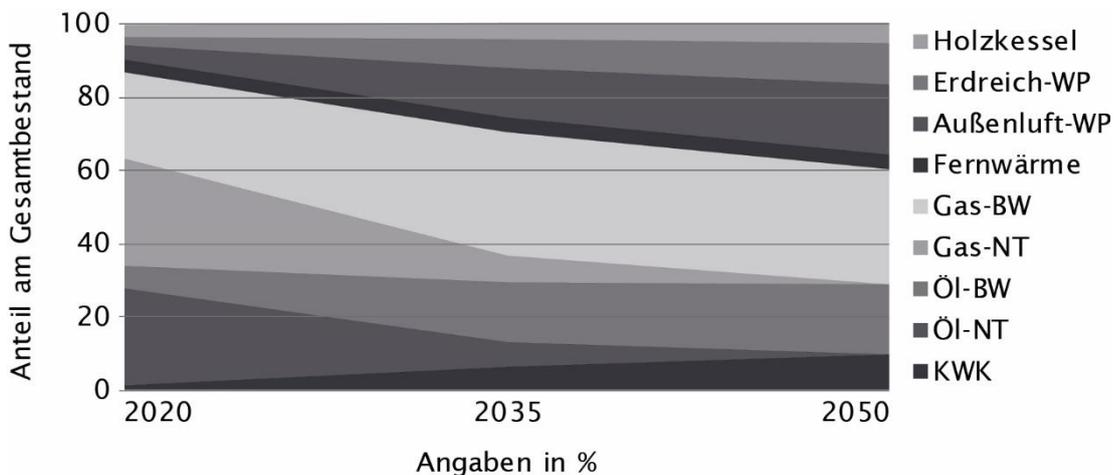
Eigene Darstellung nach Zahlen von Jagnow/Wolff 2020, S. 123 unter Verweis auf IWES/IBP 2017; Sterchele et al. 2020

5.2.3 Verbreitung der Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger)

Die zukünftige Verbreitung der wichtigsten Heiztechnologien für einen Elektro- und einen Technologiemi­xpfad wird anhand der Ergebnisse der Studie von ewi ER&S et al. (2017) beispielhaft verglichen. Typisch für den Technologiemi­xpfad ist, dass Gas- und Ölkessel, die den Bestand an Heiztechnologien 2020 deutlich dominierten, 2050 immer noch rund die Hälfte des Bestands ausmachen würden. Es handelt sich dann ausschließlich um Brennwertkessel. Ein Teil von ihnen würde mit einer solaren Trinkwassererwärmung kombiniert werden. Unterstellt wird hier ein Fortbestand von Heiztechnologien, die aktuell auf fossilen Brennstoffen basieren, aber zunehmend mit (klimafreundlicheren) synthetischen Brennstoffen betrieben werden. Der Anteil von Wärmepumpen insgesamt läge 2050 mit rund 30% ungefähr gleichauf mit den Gasbrennwertkesseln, gefolgt von Ölbrennwertkesseln mit rund einem Fünftel. Hinzu käme ein moderater, aber deutlicher Anstieg von Kraft-Wärme-Kopplung (Abb. 5.2).

Insgesamt erfordert der Technologiemi­xpfad eher moderate Veränderungen bei den Heiztechnologien, die teils auch ohne politische Unterstützung zu erwarten sind (z.B. Wechsel zu Brennwertkesseln), teils aber auch einer politischen Unterstützung oder Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen (Energiepreise) bedürfen (z.B. Wärmepumpen). In dicht besiedelten Räumen nimmt außerdem Fernwärme einen nennenswerten Anteil ein. Ein Großteil der Veränderungen findet nicht bei den Heiztechnologien, sondern im Bereich der Brennstoffe, d. h. im Energiesektor statt.

Abb. 5.2 Mögliche Verbreitung von Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in Ein- und Zweifamilienhäusern (Technologiemi­xpfad)



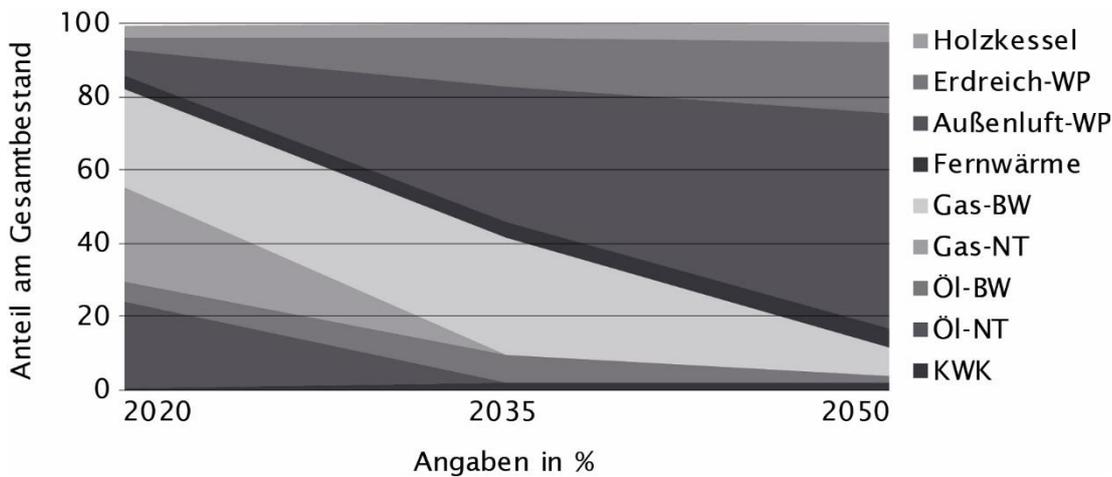
WP = Wärmepumpe; BW = Brennwertkessel; NT = Niedertemperaturkessel; KWK = Kraft-Wärme-Kopplung

Eigene Darstellung in Anlehnung an Jagnow/Wolff 2020 mit Zahlen aus ewi ER&S et al. 2017, S. 38

Im Unterschied zum Technologiemi­xpfad wären bei einem Elektropfad 2050 Wärmepumpen die deutlich dominierende Heiztechnik (in Abb. 5.3 fast 80%), während Brennwertkessel nur noch eine untergeordnete Rolle spielen (im Beispiel mit rund einem Zehntel im Bestand verbleibend).

Ein Beispiel für einen moderaten Elektropfad wird in Abbildung 5.4 zusammengefasst (Jagnow/Wolff 2020, S. 382, Bezug nehmend auf Sterchele et al. 2020, AGORA Energiewende 2020). Dargestellt sind die Wohnflächen, die mit den angegebenen Technologien geheizt würden. Abgebildet wird der gesamte Wohngebäudebereich, der durch Neubau, Abriss und Sanierungen verändert wird. Ersichtlich ist auch hier, dass Wärmepumpen den Heizungsbestand 2050 deutlich dominieren. Sie machen fast zwei Drittel aller Hauptwärmeerzeuger aus. Brennwertkessel (überwiegend Erdgas oder langfristig ein Mix aus Erd- und synthetischem Gas) bleiben mit rund 15% aber ebenfalls in einem nennenswerten Umfang erhalten. Diese Kessel würden, ähnlich wie beim Technologiemi­xpfad, 2050 größtenteils mit synthetischen Brennstoffen betrieben.

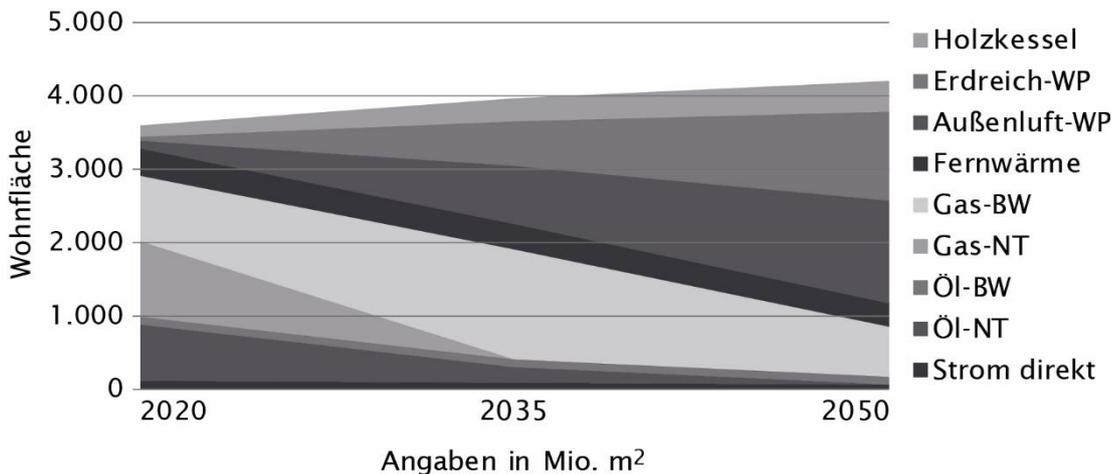
Abb. 5.3 Mögliche Verbreitung von Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in Ein- und Zweifamilienhäusern (Elektropfad)



WP = Wärmepumpe; BW = Brennwertkessel; NT = Niedertemperaturkessel;
 KWK = Kraft-Wärme-Kopplung

Eigene Darstellung in Anlehnung an Jagnow/Wolff 2020 mit Zahlen aus ewi ER&S et al. 2017, S. 37

Abb. 5.4 Mögliche Verbreitung von Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in Wohngebäuden (Gesamtbestand) (moderater Elektropfad)



WP = Wärmepumpe; BW = Brennwertkessel; NT = Niedertemperaturkessel

Quelle: Jagnow/Wolff 2020, S. 382

Die für den moderaten Elektropfad von Jagnow/Wolff (2020) getroffenen Annahmen geben Hinweise auf die praktische (politische) Umsetzung des Entwicklungspfads. Sie werden nachfolgend aufgelistet:

- › Eine grundsätzliche Annahme ist, dass alle Hauptwärmeerzeuger dann ausgetauscht werden, wenn der Tausch entsprechend ihrer Lebensdauer stattfinden würde. Eine übliche Annahme sind Lebensdauern von 25 Jahren (Ausnahme: bei Fernwärme und Stromdirektheizung 40 Jahre) (Jagnow/Wolff 2020, S. 120). Demnach würde kein vorgezogener Austausch aus energetischen Motiven stattfinden.
- › Wenn ein Austausch des Hauptwärmeerzeugers ansteht, wird angenommen, dass er Best Practice ausgeführt wird (Jagnow/Wolff 2020, S. 32).

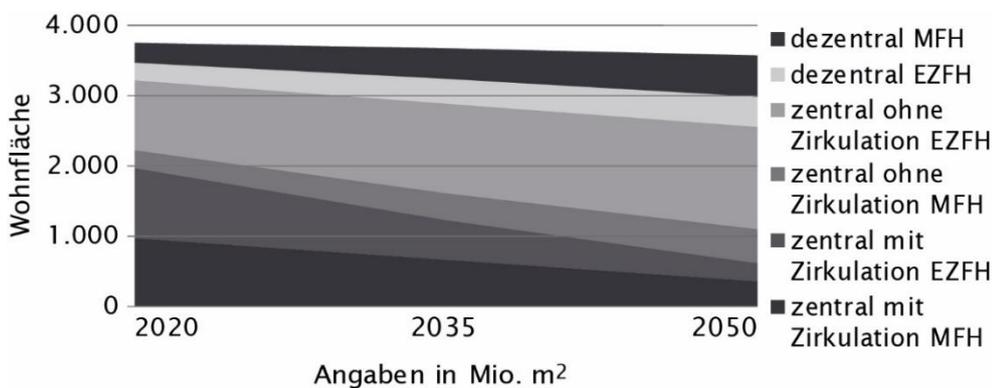
- › In den kommenden Jahren würden zunächst am häufigsten Gasbrennwertkessel eingesetzt – ungefähr bis 2035 mit weiterhin steigender Tendenz, mittel- und langfristig würde ihr Anteil aber deutlich abnehmen.
- › Mittel- und langfristig wären Wärmepumpen die dominierende Heiztechnologie, beginnend mit einem (aktuell) sehr geringen Anteil im Bestand. Bis 2050 würden in jedem Jahr rund 345.000 Wärmepumpen andere zuvor genutzte Heiztechnologien ersetzen. Weitere Wärmepumpen kämen im Zuge von Neubauten und als Ersatz alter Wärmepumpen hinzu. Die Wärmepumpen schließen auch Hybridanlagen ein.
- › Es wird davon ausgegangen, dass die aktuell vorherrschende konventionelle Fernwärme zunehmend durch kalte Fernwärme abgelöst wird, bei der das Warmwasser als Wärmetransporteur im Fernwärmenetz nur noch eine Temperatur von maximal 25 °C besitzt (in der Abbildung dargestellt als Teil der Wärmepumpen).

Der dargestellte Anstieg bei Wärmepumpen (in Ein- und Zweifamilienhäusern vor allem Außenluftgeräte, in Mehrfamilienhäusern auch Erdreichwärmepumpen im Sinne kalter Fernwärme) würde einen enormen Marktzuwachs mit sich bringen und maßgebliche Kapazitätserweiterungen auf der Herstellerseite erfordern. Erforderlich wäre außerdem eine ausreichende Qualifikation der Fachunternehmen, Systeme zur Qualitätssicherung und auch Kapazitäten zur Erschließung von Erdreich als Wärmequelle. Die Flächenverfügbarkeit für Erdreichwärmepumpen und die technische Machbarkeit wurden berücksichtigt (Jagnow/Wolff 2020, S. 382 ff.; Jochum et al. 2017).

5.2.4 Entwicklung der Peripherie und Zusatzerzeuger

Die Entwicklung der Peripherie bezieht sich auf Systeme der Trinkwasserverteilung (z. B. zentral oder dezentral) und der Wärmeübergabe (Heizkörper vs. Fußbodenheizung). Sie ist häufig eng mit den Entscheidungen zu den zukünftigen Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) verbunden. Zusätzliche Erzeuger umfassen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, Solarthermie- und PV-Anlagen. Am Beispiel des moderaten Elektropfad (Jagnow/Wolff 2020) wird nachfolgend ein Überblick über die mögliche bzw. zur Zielerreichung als erforderlich angesehenen Entwicklung der Peripherie und Zusatzerzeuger gegeben (Abb. 5.5 bis 5.10). Dargestellt sind die Wohnflächen, die mit dem genannten System ausgestattet sind.

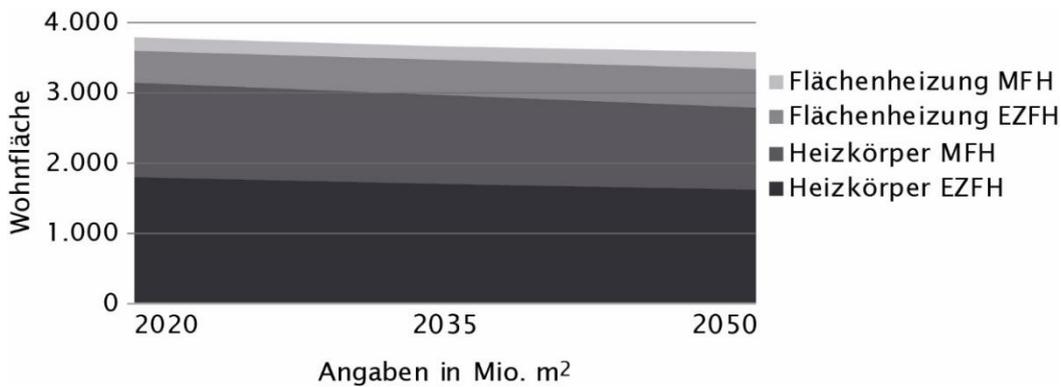
Abb. 5.5 Mögliche Entwicklung der Systeme der Trinkwasserverteilung in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad)



MFH = Mehrfamilienhaus; EZFH = Ein- bzw. Zweifamilienhaus

Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 386

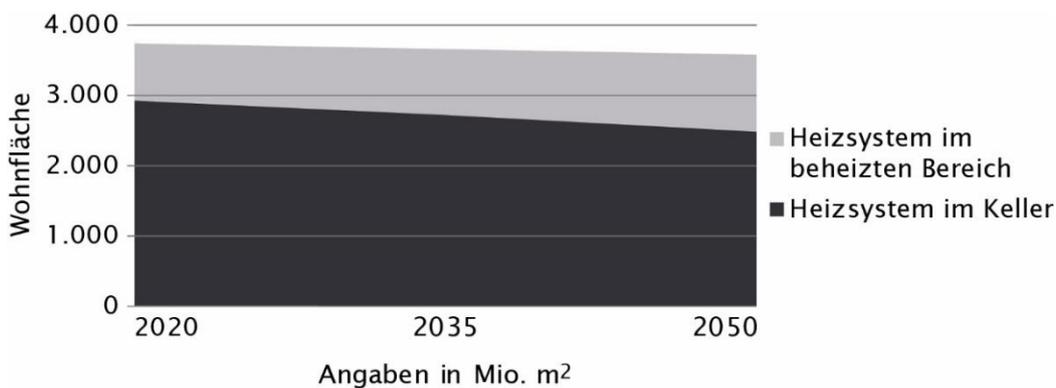
Abb. 5.6 Mögliche Entwicklung der Systeme der Wärmeübergabe in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad)



MFH = Mehrfamilienhaus; EZFH = Ein- bzw. Zweifamilienhaus

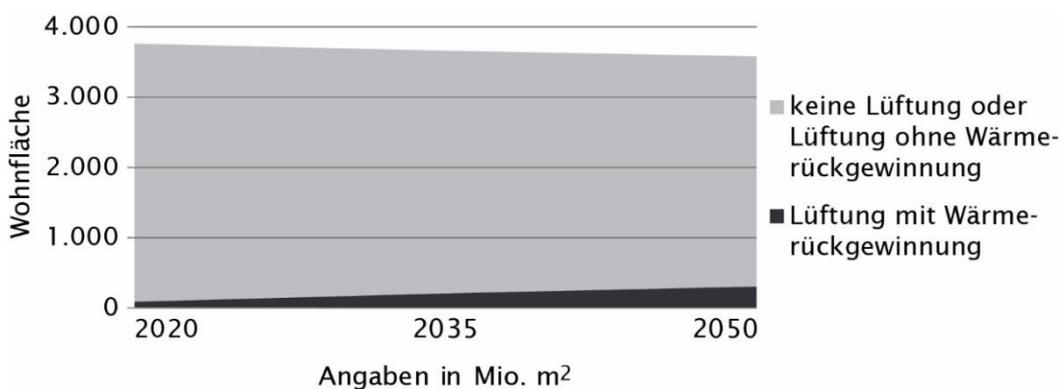
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 386

Abb. 5.7 Mögliche Entwicklung der Lage des Heizsystems in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad)



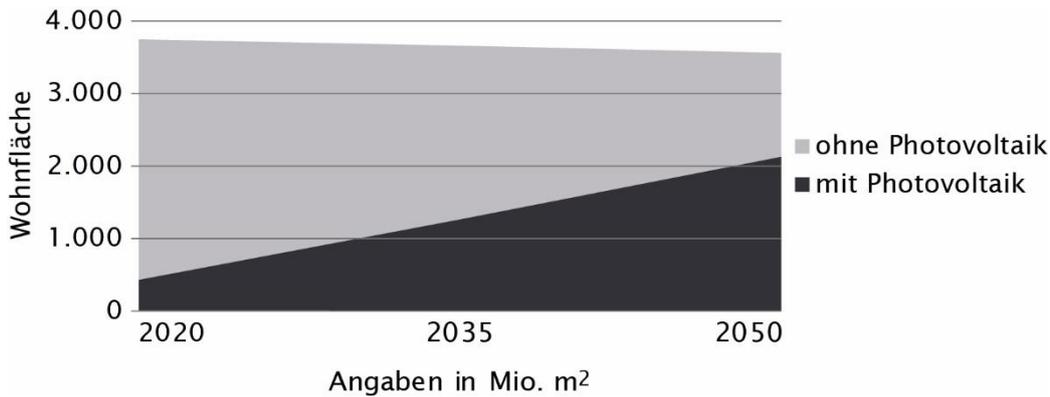
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 387

Abb. 5.8 Mögliche Entwicklung der Lüftungssysteme in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad)



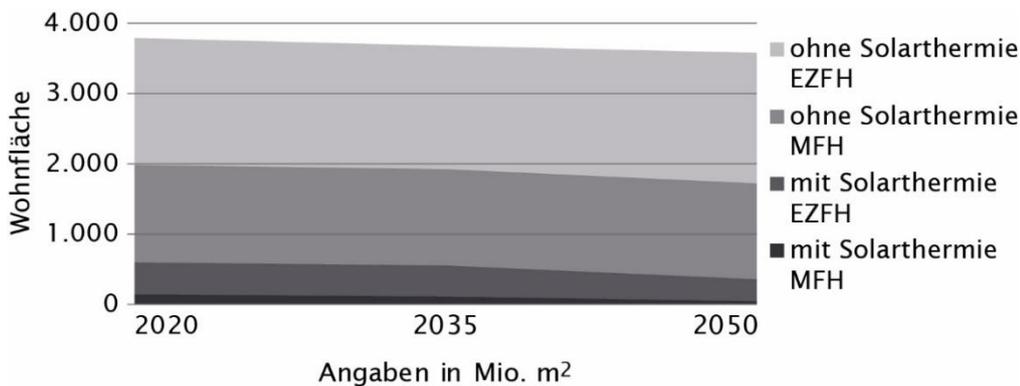
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 391

Abb. 5.9 Mögliche Entwicklung von Photovoltaik in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad)



Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 389

Abb. 5.10 Mögliche Entwicklung von Solarthermie in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad)



EZFH = Ein- bzw. Zweifamilienhaus; MFH = Mehrfamilienhaus

Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 390

Zentrale (mögliche/erforderliche) Veränderungen bis 2050 spezifisch bezogen auf Bestandssanierungen sind dabei (Jagnow/Wolff 2020, S. 388 ff.):

- › *Trinkwassererwärmung:* Die klassischen zentralen Zirkulationssysteme werden auch im Zuge von Sanierungen schrittweise durch zentrale Systeme ohne Zirkulation und durch dezentral-elektrische Systeme ersetzt werden. Die dezentralen Systeme in Mehrfamilienhäusern finden sich künftig in Gebäuden mit ungünstiger Geometrie wieder, um lange Leitungsnetze zu vermeiden. Ein verstärkter Ausbau dezentraler elektrischer Systeme mit Kleinspeichern in Wohnungen bzw. Ein- und Zweifamilienhäusern hängt von politischen Entscheidungen zum EEG bzw. zu Netznutzungsentgelten ab.
- › *Wärmeübergabesysteme:* Das Verhältnis von Wohngebäuden mit Heizkörpern vs. Fußbodenheizung verändert sich aufgrund von Sanierungen eher nicht (da ein Wechsel zur Fußbodenheizung mit einem hohen baulichen Aufwand verbunden ist).
- › *Verteilleitungen im Keller:* Bei der Sanierung des Verteilnetzes im Keller wird davon ausgegangen, dass in einem geringen Teil der Ein- bzw. Zwei- und Mehrfamilienhäuser die Lage des Verteilnetzes geändert und das System in den beheizten Bereich verlegt wird. Somit erscheint eine relativ langsame Verbesserung hin zu der energetisch günstigeren Variante der Leitungen im beheizten Bereich realistisch.

- › *Lüftungen mit Wärmerückgewinnung*: Sie befinden sich aktuell in einem sehr kleinen Anteil der Wohngebäude. Da ihre Errichtung aufwendig ist, werden Sanierungen eher selten als Anlass für eine Installation von Lüftungsanlagen gesehen. Sanierungen tragen daher eher wenig zum (moderaten) Anstieg der Lüftungen mit Wärmerückgewinnung bei.
- › *Photovoltaikanlagen*: Bei mehr als der Hälfte der Sanierungen wird angenommen, dass Gebäudebesitzer eine PV-Anlage erwerben unter der Annahme, dass die Selbstnutzung des Stroms infolge des Anstiegs an Wärmepumpen im Bestand wirtschaftlicher wird. Der Einbau einer PV-Anlage kann im Zusammenhang mit einer Dachsanierung, Außenwanddämmung, einem Fenstertausch oder dem Einbau einer Wärmepumpe erfolgen. Angenommen werden auch unterstützende gesetzliche Rahmenbedingungen für die Mieterstromnutzung.
- › *Solarthermieanlagen*: Es wird davon ausgegangen, dass Sanierungen dazu beitragen, dass die Solarthermienutzung schrittweise sinkt. Als Hauptgrund hierfür wird die Nutzungskonkurrenz mit den universeller einsetzbaren PV-Anlagen angesichts eines begrenzten Dachflächenpotenzials genannt. Zusätzliche Einsatzpotenziale werden darin gesehen, dass in klassischen Fernwärmesystemen (ggf. übergangsweise) Großflächensolarthermie errichtet wird, um fossile Energieträger zu ersetzen. Auch als ergänzende Wärmequelle für Wärmepumpen (Fassadenkollektor, Einspeisung in kalte Nahwärme) ist Solarthermie vorstellbar.

Insgesamt betrachtet wird die Nutzung von Photovoltaik als der (weiterhin) am stärksten wachsende Einzeltechnologiemarkt angesehen. Mit ca. 640.000 Anlagen pro Jahr bis 2035 würde sich der Markt im Vergleich zu den für 2020 erwarteten bzw. realisierten Neuanlagen vervierfachen. Außerdem würde die Installation der PV-Anlagen zusätzliche Kapazitäten im Baugewerbe benötigen (Jagnow/Wolff 2020, S. 388 ff.).

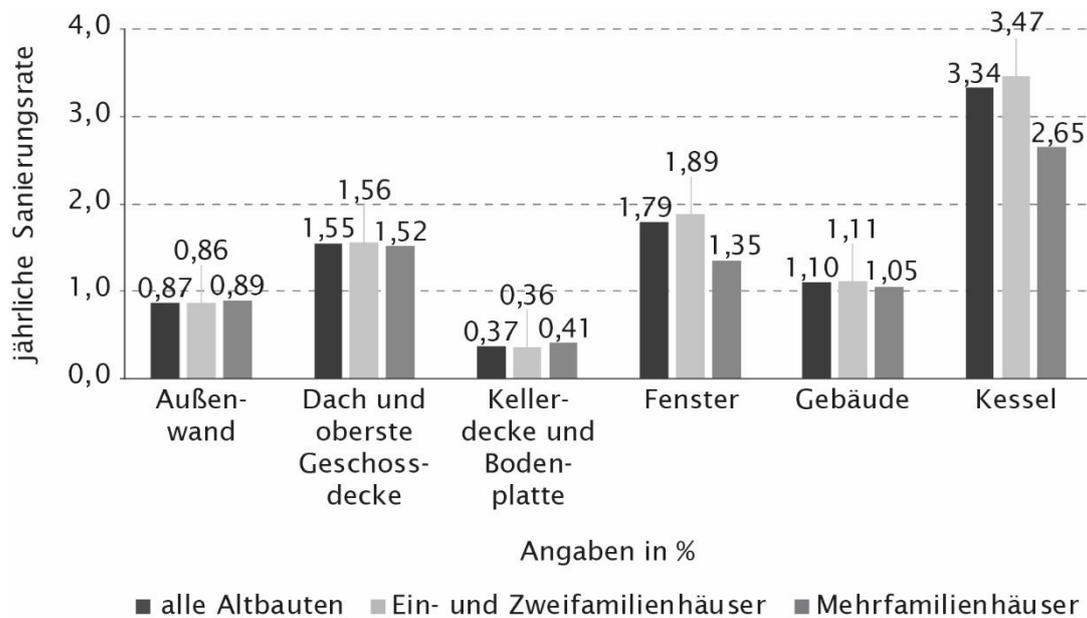
5.2.5 Entwicklung des Sanierungsverhaltens bezogen auf die Gebäudehülle

Unstrittig ist, dass energetische Sanierungen der Gebäudehülle maßgeblich zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele beitragen können. Das Sanierungsverhalten wird anhand der *Sanierungsrate und -tiefe* quantifiziert. Die *Sanierungsrate* wird als die (jährliche) Anzahl von Sanierungen definiert, während die *Sanierungstiefe* die (energetische) Qualität der Sanierungen beschreibt. Die bisherige bzw. aktuelle Sanierungsrate bezogen auf die Gebäudehülle wird in der Literatur mehrheitlich mit 1 % pro Jahr angenommen (Jagnow/Wolff 2020, S. 73). Bezogen auf die rund 19 Mio. Wohngebäude entspricht dies jährlich ungefähr 190.000 Sanierungen an der Gebäudehülle.

Eine empirisch basierte Aufschlüsselung der bisherigen Sanierungsrate auf einzelne Gebäudebestandteile sowie Ein- bzw. Zwei- und Mehrfamilienhäusern zeigt Abbildung 5.11. Für die zukünftige Sanierungsrate wird – im Sinne einer erforderlichen Größenordnung zur Erreichung der politischen Zielsetzungen – in mehreren Studien eine Verdopplung auf 2 % pro Jahr angenommen. Demnach liegt die aktuelle Sanierungsrate deutlich unter dem als (gegenwärtig und zukünftig) erforderlich angesehenen Wert (energetischer Sanierungsstau). Aus rein baulicher Sicht, d. h. mit Blick auf Sanierungserfordernisse ohne Berücksichtigung energetischer Ziele, ist dagegen kein Sanierungsstau an der Gebäudehülle zu verzeichnen (Jagnow/Wolff 2020, S. 571 f.; Simons 2012).

Außer der Sanierungsrate hat auch die die Sanierungstiefe einen Einfluss auf die Erreichung der Energie- und Klimaziele der Bundesregierung in den Szenarien. Die mögliche bzw. erforderliche zukünftige Entwicklung des Sanierungszustands (für die einzelnen Gebäudeteile), die zu einer annähernden Erreichung der Energie- und Klimaziele der Bundesregierung auf dem moderaten Elektropfad (Jagnow/Wolff 2020) führen würde, wird in den Abbildungen 5.12 bis 5.17 illustriert. Dargestellt wird, wie sich das Ausmaß an Wohnflächen mit einem schlechten, mittleren, guten oder besten Sanierungszustand der Außenwände, der obersten Geschossdecke, des Daches, der Kellerdecke, der Bodenplatte und der Fenster bis 2050 verändern könnte.

Abb. 5.11 Jährliche Sanierungsrate der Gebäudehülle in Wohngebäuden bis Baujahr 1978 (2005 bis 2008)



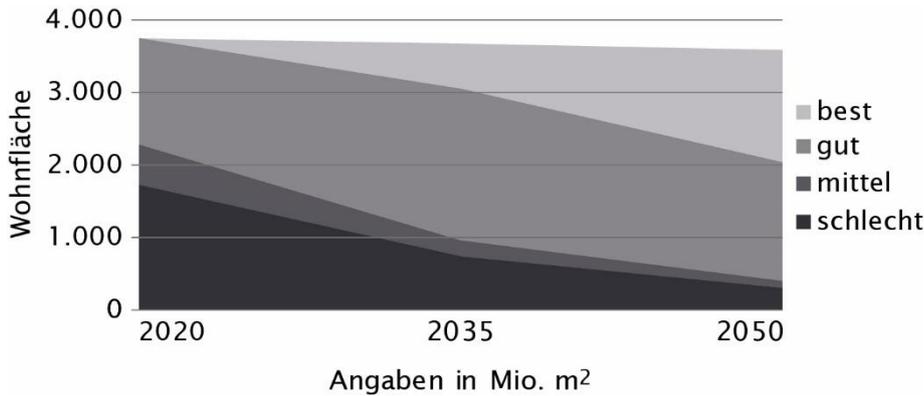
Quelle: Jagnow/Wolff 2020, S. 570 basierend auf Daten aus Simons 2012 und Diefenbach et al. 2010

Im Einzelnen ist erkennbar:

- › Für alle Bauteile wird davon ausgegangen, dass der Anteil an Wohnflächen mit einem guten Sanierungszustand in etwa gleichbleibt, während der Anteil mit bestem Sanierungszustand deutlich ansteigt.
- › Bei den Außenwänden und der obersten Geschosßdecke, aber auch bei Kellerdecken und Bodenplatten würden die meisten Bauteile im Bestand einen guten Sanierungszustand aufweisen.
- › Bei Außenwänden und der obersten Geschosßdecke gäbe es kaum noch Bauteile mit einem mittleren oder schlechten Sanierungszustand, wähen ihr Anteil bei Kellerdecken und Bodenplatten nicht so deutlich sinken würde. Im Ergebnis besäßen 2050 noch ungefähr ein Fünftel der Kellerdecken bzw. ein Viertel der Bodenplatten einen mittleren bis schlechten Sanierungszustand.
- › Bei Dächern und Fenstern gäbe es 2050 nur noch Bauteile mit gutem oder bestem Sanierungszustand (bei Dächern in etwa zu gleichen Teilen, bei Fenstern mit überwiegend bestem Zustand).

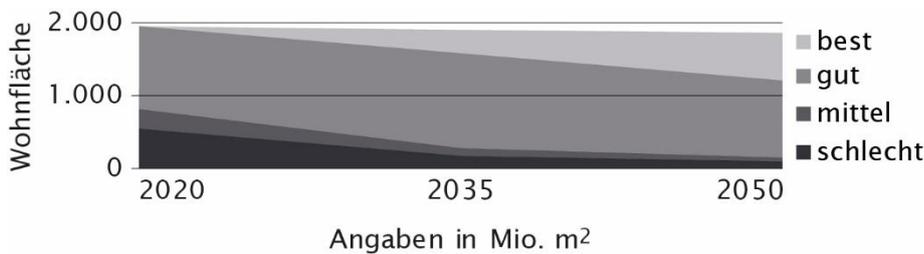
Die Entwicklung orientiert sich an den aktuellen und erwartbaren Standards nach GEG (gefordert) und KfW/BAFA/BEG (gefördert), die sich u. a. auf Passivhäuser (als Beststandard) beziehen. Generell gilt: Eine schnellere Verbesserung ergibt sich bei den Gebäudeteilen mit kürzerer Lebensdauer (Fenster, Außenwand, Dach) bzw. bei solchen mit relativ geringem Aufwand (oberer Gebäudeabschluss, Fenster) (Jagnow/Wolff 2020, S. 381).

Abb. 5.12 Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Außenwände von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)



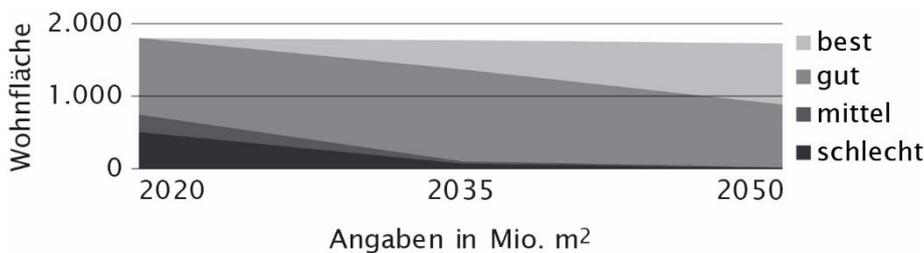
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 375

Abb. 5.13 Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der obersten Geschosdecke von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)



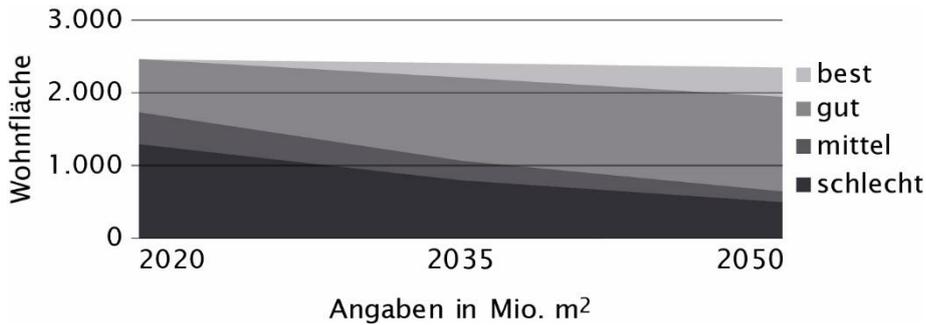
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 376

Abb. 5.14 Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands des Daches von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)



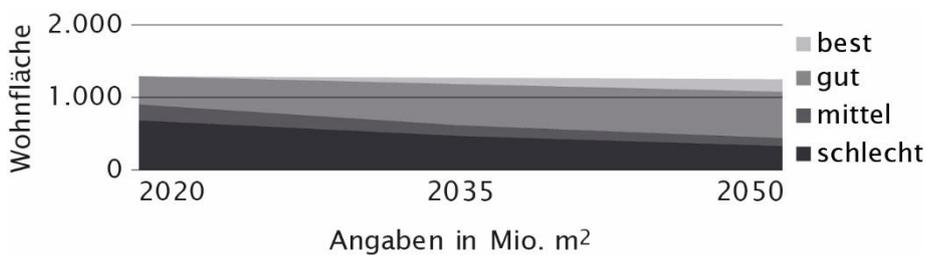
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 377

Abb. 5.15 Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Kellerdecke von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)



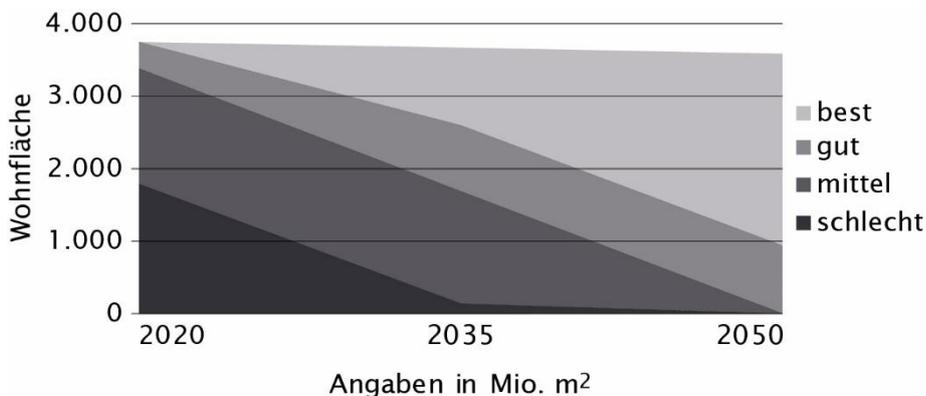
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 378

Abb. 5.16 Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Bodenplatte von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)



Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 379

Abb. 5.17 Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Fenster von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)



Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 380

Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit ist zu beachten, dass vorgezogene bzw. ggf. zusätzliche Sanierungen mit einer energetischen Motivation, die für eine Erhöhung der Sanierungsrate erforderlich wären, die Effizienz der bisherigen Bau- oder Sanierungsmaßnahmen schmälern. Dagegen würde eine hohe bzw. maximale Sanierungsqualität spätere Nachsanierungen vermeiden und so für eine hohe Sanierungseffizienz sorgen (Jagnow/Wolff 2020, S. 575).

Die jeweilige Höhe der Standards ist mit Vor- und Nachteilen verbunden. Weil hohe Standards preiserhöhend wirken, können sie die Investitionsbereitschaft von Eigentümer/innen, vor allem im Mietwohnungsbau, mindern. Relativ geringe Standards (bezogen auf das maximal Mögliche) können dagegen mit sich bringen, dass nach schnellen Erfolgen (billige Teilsanierungen) eine Phase von notwendigen Nachsanierungen erforderlich wird, die dann wiederum weniger wirtschaftlich sind (Jagnow/Wolff 2020, S. 75 ff.).

Ob eine Steigerung der energetischen Sanierungsaktivitäten über die Erhöhung der Sanierungsrate oder -tiefe oder eine Kombination beider Ansätze angenommen wird, impliziert unterschiedliche Handlungsoptionen für die Politik. Die Sanierungsrate lässt sich grundsätzlich mit staatlichen Förderprogrammen (z. B. Investitionszuschüsse) steigern und führt dann zu vorgezogenen Sanierungen. Die Sanierungstiefe lässt sich durch gesetzliche Anforderungen (bessere Standards) und zusätzlich auch durch die Ausgestaltung von Förderprogrammen (Anforderungen für die Förderung) erhöhen. Entsprechend wird die Qualität von Sanierungen auch vom GEG und staatlichen Förderprogrammen (z. B. KfW, BAFA) geprägt (Jagnow/Wolff 2020, S. 75 ff.).

5.3 Mögliche zukünftige Einspareffekte in Deutschland

5.3.1 Vorbemerkungen

Da in den Szenariostudien in der Regel von der Fragestellung ausgegangen wird, ob und auf welche Weise bereits vorhandene politische Zielsetzung erreicht werden können, sind die erwarteten Einsparungen an Energie und THG-Emissionen zwar das rechnerische Ergebnis der Berechnungen bzw. Modellierungen für Szenarien, aber dennoch (als Rahmensetzung) bereits vorab bekannt. Szenarien werden u. a. auch mit Bezug auf die Zielerreichung definiert (beispielsweise in ewi ER&S et al. 2017 für eine 80- und eine 95%ige Erreichung einer Klimaneutralität entsprechend dem klimapolitischen Ziel der Bundesregierung; siehe auch Kapitel 2.2). In einigen Szenariostudien wurden auch die im Pariser Klimaabkommen festgeschriebenen Zielsetzungen zugrunde gelegt, bei denen ein zu vermeidender Temperaturanstieg angestrebt wird und daraus erforderliche THG-Emissionen für Deutschland abgeleitet werden, die über die Ziele der Bundesregierung hinausgehen (Jagnow/Wolff 2020, S. 361 ff.).

Verwiesen sei an dieser Stelle außerdem auf folgende Zusammenhänge, die bereits zuvor beschrieben wurden:

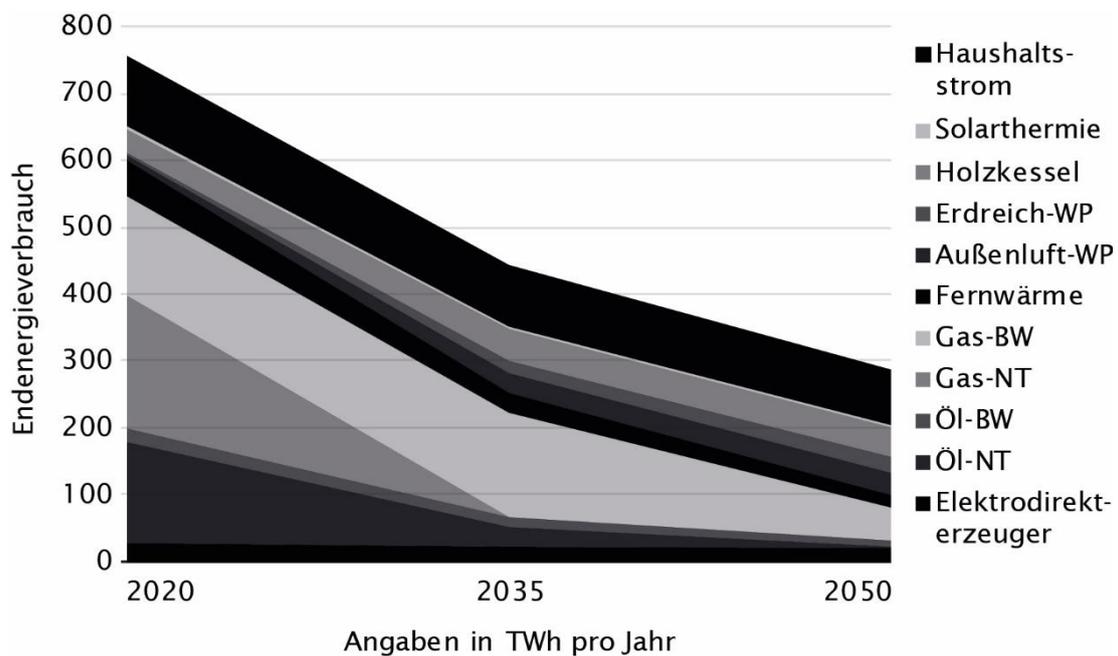
- › Sofern bzw. solange fossile Energiequellen genutzt werden, schlagen sich Energieeinsparungen eins zu eins als THG-Emissionen nieder (Kap. 4.1.1). Insofern können Energiesparziele und -effekte gleichermaßen auch als Klimaschutzziele und -effekte angesehen werden. Je größer der Anteil an erneuerbaren Energiequellen für Deutschland wird, desto stärker entkoppelt sich aber dieser Zusammenhang.
- › Klimarelevant ist nicht nur, wie hoch die THG-Emissionen zu einem bestimmten zukünftigen *Zeitpunkt* ausfallen (wie seitens der Bundesregierung als Ziel formuliert), sondern auch wie hoch die Emissionen im *Zeitraum* bis zur Zielerreichung sind (Kap. 5.1.1). Eine Zielsetzung in Form eines kumulativen Betrags wird auch als *Emissionsbudget* bezeichnet (Jagnow/Wolff 2020, S. 29).

In den Szenariostudien wird übergreifend deutlich, dass unter Fortführung des Status quo die energie- und klimapolitischen Ziele im Gebäudesektor und darüber hinaus nicht erreicht werden können (beispielsweise anhand des Referenzszenarios in ewi ER&S et al. 2017). Am Beispiel des moderaten Elektropfads (Jagnow/Wolff 2020) wird nachfolgend aufgezeigt, welche Anteile die einzelnen Heiztechnologien (Heizkessel, Wärmepumpen etc.) und Energieträger (Heizöl, Erdgas, Strom etc.) am (sinkenden) Energieverbrauch und den (entsprechend sinkenden) THG-Emissionen und somit an einer Erreichung des Klimaschutzziels der Bundesregierung haben können.

5.3.2 Anteile der Heiztechnologien am Energieverbrauch und den THG-Emissionen

Um aufzuzeigen, welchen Anteil die einzelnen Heiztechnologien am aktuellen Energieverbrauch und seiner möglichen Verringerung bis 2050 haben, wird der Endenergieverbrauch für die einzelnen Heiztechnologien (Wärmeerzeuger) in Abbildung 5.18 (ohne Neubau) und Abbildung 5.19 (inklusive Neubau) aufgezeigt. Der sinkende Energieverbrauch spiegelt vor allem das Zusammenspiel von neuen verbrauchsärmeren Heiztechnologien einerseits und Sanierungstätigkeiten an der Gebäudehülle andererseits wider. Besonders auffällig sind die bis 2035 deutlich sinkenden Verbrauchsanteile von Öl- und von Gasniedertemperaturkesseln. Diese Entwicklung wird nach 2035 durch sinkende Verbrauchsanteile der Gasbrennwertkessel abgelöst. Die geringen Verbrauchsanteile sind weitgehend auf sinkende Bestände zurückzuführen (Abb. 5.4). Wärmepumpen nehmen in diesem Zukunftsszenario zwar relativ stark zu, tragen aber mit absolut geringen Zahlen nur wenig zum Gesamtenergieverbrauch bei. Zur Rubrik der Wärmepumpen wird neben gebäudezentralen Geräten mit lokaler Erdwärme und Außenluftnutzung auch das System *kalter Fernwärme* gezählt.

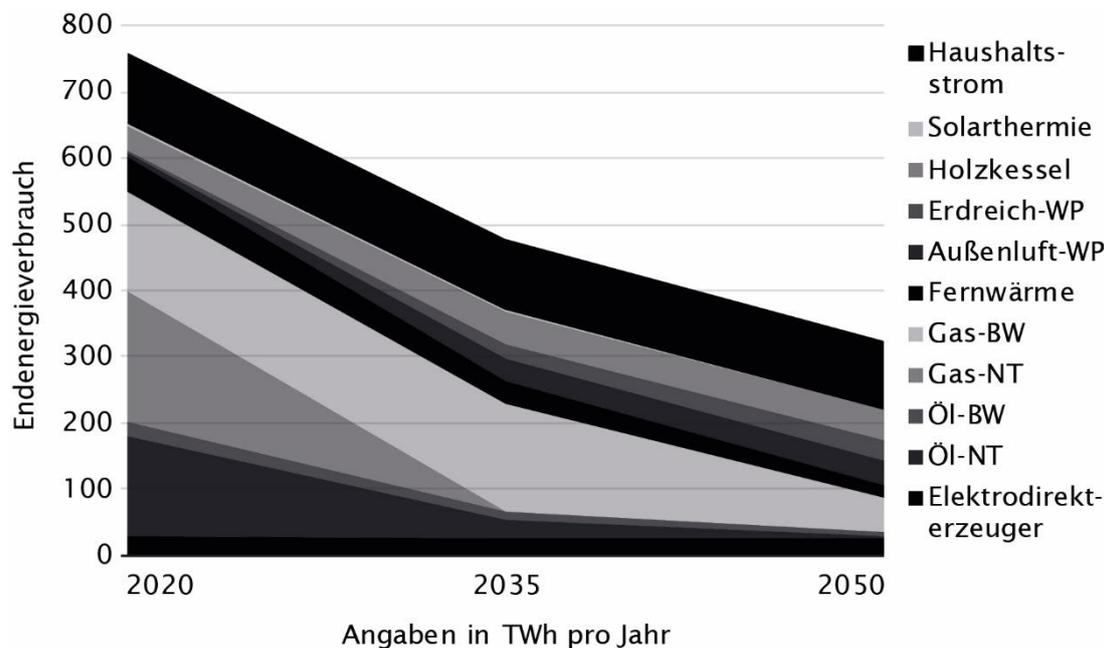
Abb. 5.18 Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms am Endenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (ohne Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)



WP = Wärmepumpe; BW = Brennwertkessel; NT = Niedertemperaturkessel

Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 424 ff.

Abb. 5.19 Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms am Endenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)



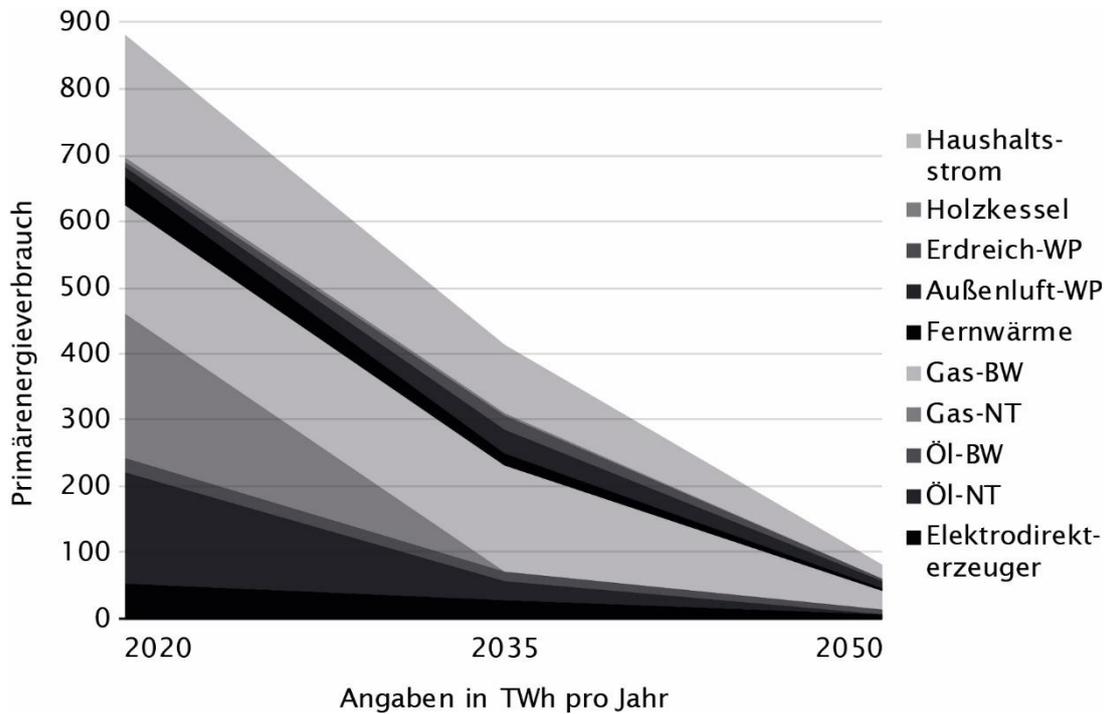
WP = Wärmepumpe; BW = Brennwertkessel; NT = Niedertemperaturkessel

Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 396 ff.

In das Gesamtbild gehört auch, dass der klassische Fernwärmeinsatz auf etwa ein Drittel des heutigen Wertes sinkt. Ursächlich für diese Entwicklung wäre einerseits, dass kalte Fernwärme zum Einsatz käme (abgebildet als Erdreichwärmepumpe) und andererseits, dass die zu versorgenden Gebäude baulich verbessert würden und somit ihr Bedarf sänke. Der Anteil der Direkterzeugung elektrischen Stroms am Gesamtendenergieverbrauch verbleibt im Szenario relativ unverändert. Er steht für einen gleichzeitigen Rückbau von Elektroheizungen und Ausbau der elektrischen Warmwassererzeugung (in Gebäuden mit ungünstigen Verteilnetzen). Die geringen Unterschiede zwischen dem Diagramm für die Sanierung (d. h. ohne Neubau) und dem für den Gesamtbestand an Wohngebäuden (also einschließlich Neubau) machen außerdem deutlich, dass die Sanierung die Entwicklungen im Gesamtbestand maßgeblich prägt.

Wird die Primärenergie betrachtet, d. h. werden die Energiebedarfe der vorgelagerten Wertschöpfungsstufen in der Energiegewinnung mit einbezogen, fallen die Einspareffekte im Zeitverlauf deutlich größer aus als bei der Endenergie (Abb. 5.20). Hauptgrund hierfür ist, dass Umweltenergie (z. B. Sonnenenergie, Erdwärme) bei der Primärenergie nicht mitgezählt wird, da sie als nicht THG-relevant angesehen wird. Im Ergebnis nimmt der Primärenergieverbrauch im betrachteten Szenario im Jahr 2050 nur noch einen geringen Bruchteil des Ausgangswerts aus dem Jahr 2020 ein. Möglich ist dies vor allem durch die weitgehende Ablösung von Heizkesseln, die fossile Brennstoffe verwenden, durch Wärmepumpen, die Umweltwärme oder kalte Fernwärme nutzen, und dadurch, dass benötigter Strom zunehmend auch aus regenerativen Quellen gewonnen werden kann. In Abbildung 5.20 wird dieser Effekt daran erkennbar, dass der Primärenergieverbrauch nicht nur für Öl- und Gaskessel stark sinkt, sondern auch für Wärmepumpen (nach zwischenzeitlich leichtem Anstieg aufgrund eines starken Stückzahlenwachstums), Fernwärme, Elektrodirekterzeuger und Haushaltsstrom deutlich abnimmt.

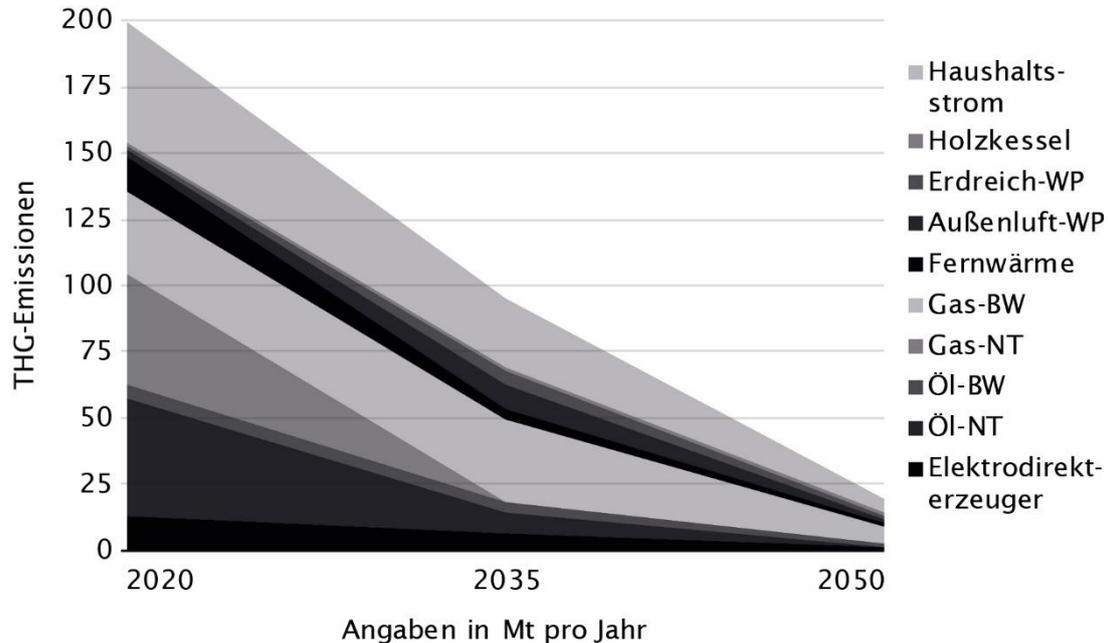
Abb. 5.20 Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms am Primärenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)



WP = Wärmepumpe; BW = Brennwertkessel; NT = Niedertemperaturkessel

Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 401 ff.

Abb. 5.21 Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms an den THG-Emissionen des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)



WP = Wärmepumpe; BW = Brennwertkessel; NT = Niedertemperaturkessel

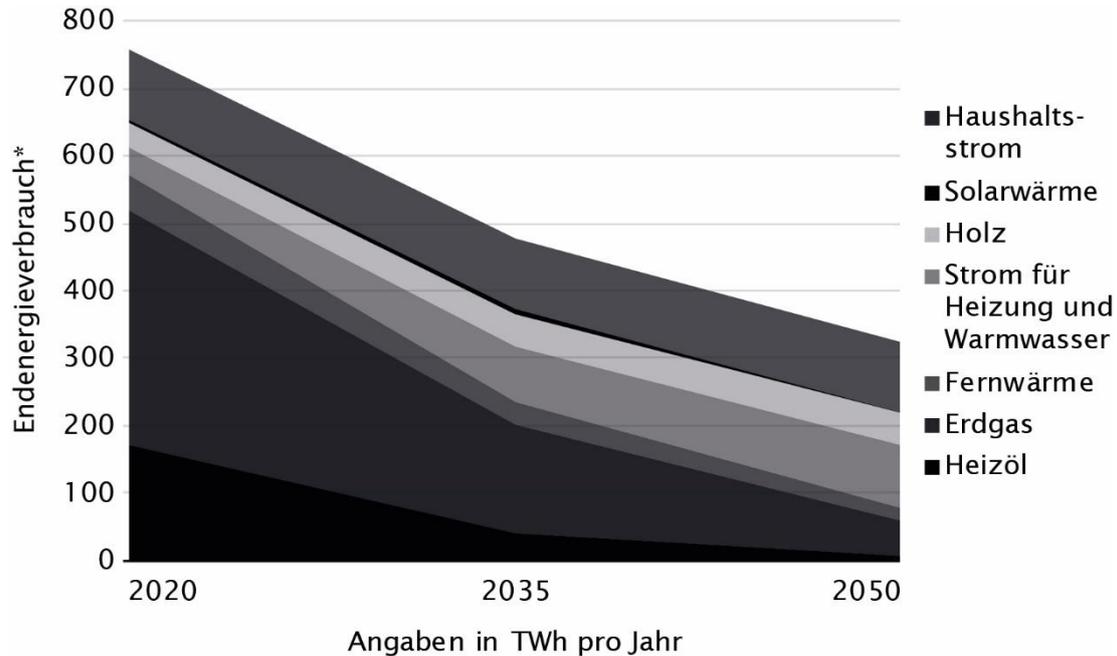
Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 403 ff.

Die Veränderungen bei den THG-Emissionen (Abb. 5.21) folgen dem gleichen Muster wie bei der Primärenergie (mit gleichen Begründungen). Die deutlichen Emissionsreduktionen führen dazu, dass die Zielsetzung einer fast vollständigen Klimaneutralität 2050 annähernd erreicht werden könnte.

5.3.3 Anteile der Energieträger und Anwendungsbereiche am Energieverbrauch

Wenn die Veränderungen bei den Heiztechnologien, der Peripherie und den Zusatzerzeugern sowie die Sanierungsaktivitäten an der Gebäudehülle so stattfinden würden, wie in Kapitel 5.2 ausgeführt, würden sich die Anteile der Energieträger am Gesamtenergiebedarf wie in Abbildung 5.22 dargestellt verändern. Der Gesamtenergiebedarf wäre demnach 2050 ungefähr halb so hoch wie gegenwärtig. Heizöl träte 2050 kaum noch als Energieträger auf, während der Erdgaseinsatz auf einen Bruchteil des heutigen Bedarfs gesunken wäre. Der Bedarf an Strom für Heizung bzw. Warmwasser, d. h. Wärmepumpenstrom und Strom der Elektrodirekterzeugung, würde ausgehend von einem niedrigen heutigen Niveau auf mehr als das Doppelte des heutigen Wertes ansteigen.

Abb. 5.22 Mögliche zukünftige Beiträge der Energieträger und des Stroms zum Endenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)



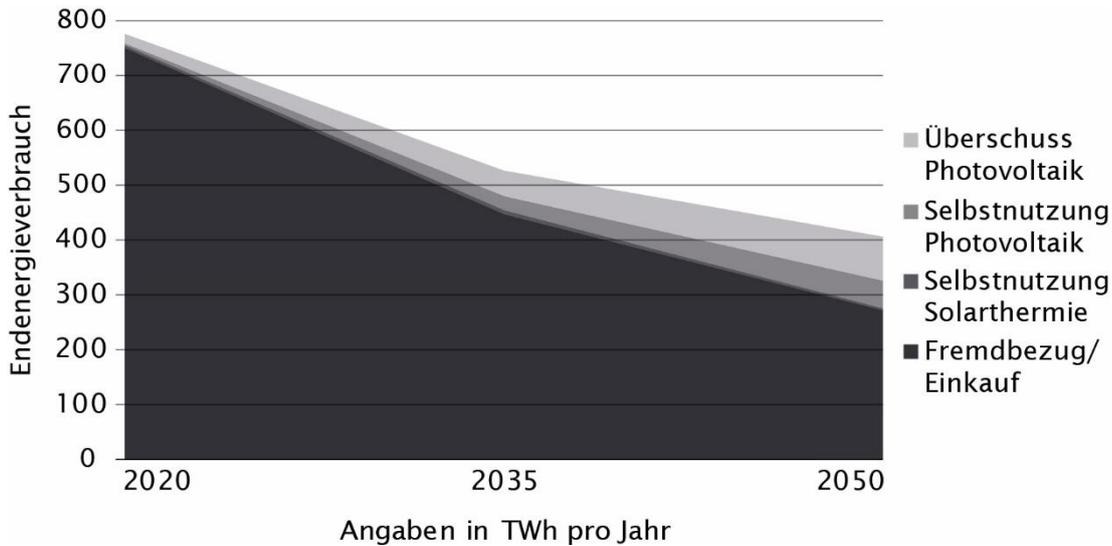
* PV-Stromnutzung unberücksichtigt

Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 397

Der Strom für Heizung bzw. Warmwasser würde nach wie vor zum überwiegenden Teil von den Haushalten eingekauft, während die Eigenerzeugung sukzessive ansteigen würde (Abb. 5.23). PV-Strom würde in einem deutlich größeren Maße in den Wohngebäuden generiert als dort selbst verbraucht werden könnte. Der Überschuss würde in das Stromnetz eingespeist (solange die lokale Stromspeicherung über Batterien nicht abschließend technisch und ökologisch ausgereift ist) (Jagnow/Wolff 2020, S. 397 f.).

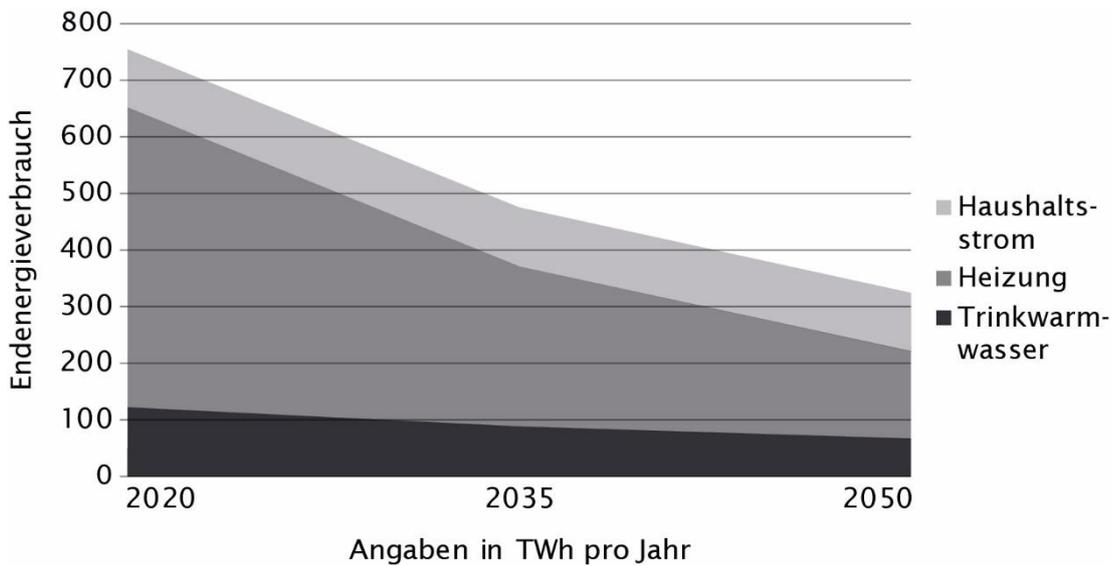
In der Gesamtschau zeigt sich, dass das Heizen aktuell den mit Abstand höchsten Energiebedarf mit sich bringt. Auch 2050 wäre dies noch der Fall, aber in einem weitaus geringeren Maße. Der Energiebedarf für Trinkwarmwasser würde leicht sinken (Abb. 5.24).

Abb. 5.23 Mögliche Entwicklung von Energiefremdbezug und -eigenversorgung für Wärme und Haushaltsstrom des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)



Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 428 ff.

Abb. 5.24 Mögliche Entwicklung des Endenergiebedarfs des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland nach Anwendungsbereichen (moderater Elektropfad)

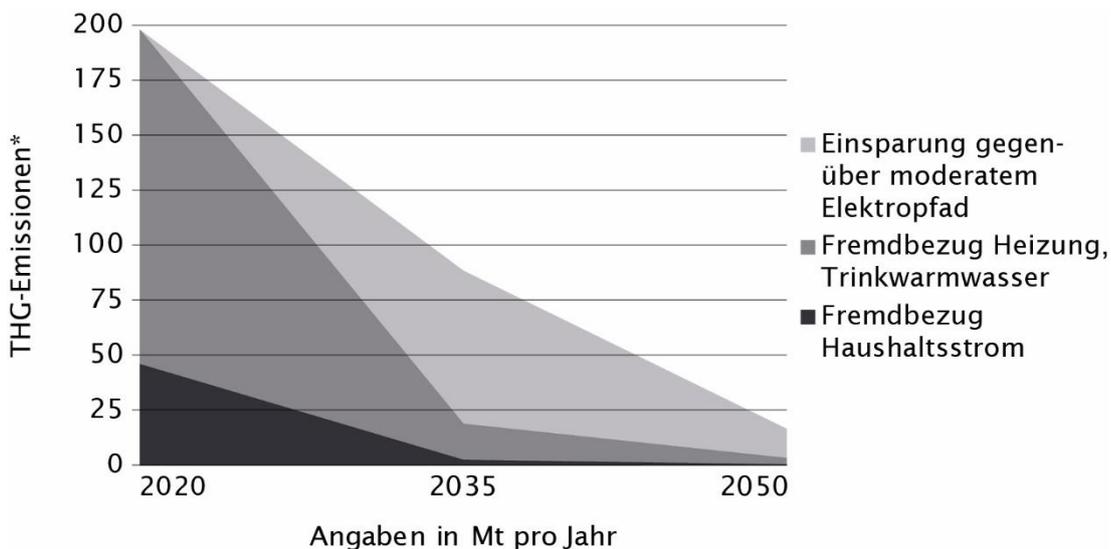


Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. 396

5.3.4 Emissionsreduktionen für einen beschleunigten Elektropfad

In Kapitel 5.3.2 wurde ausgeführt, dass die Zielsetzung einer fast vollständigen Klimaneutralität 2050 mit einem moderaten Elektropfad annähernd erreicht werden könnte. Der Reduktionspfad der THG-Emissionen im Verlauf der Jahre und das daraus resultierende Emissionsbudget deuten aber auch darauf hin, dass die Ziele nach dem Pariser Klimaabkommen so nicht erreicht würden. Hierfür wäre ein noch steilerer und frühzeitigerer Abfall der Emissionen erforderlich, der dann zu einem ähnlichen finalen Wert wie in Abbildung 5.23 für 2050 führen könnte (Jagnow/Wolff 2020, S. 418 f.). Ein solcher beschleunigter Reduktionspfad wird in Abbildung 5.25 dargestellt.

Abb. 5.25 Mögliche Entwicklung der THG-Emissionen des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (beschleunigter Elektropfad)



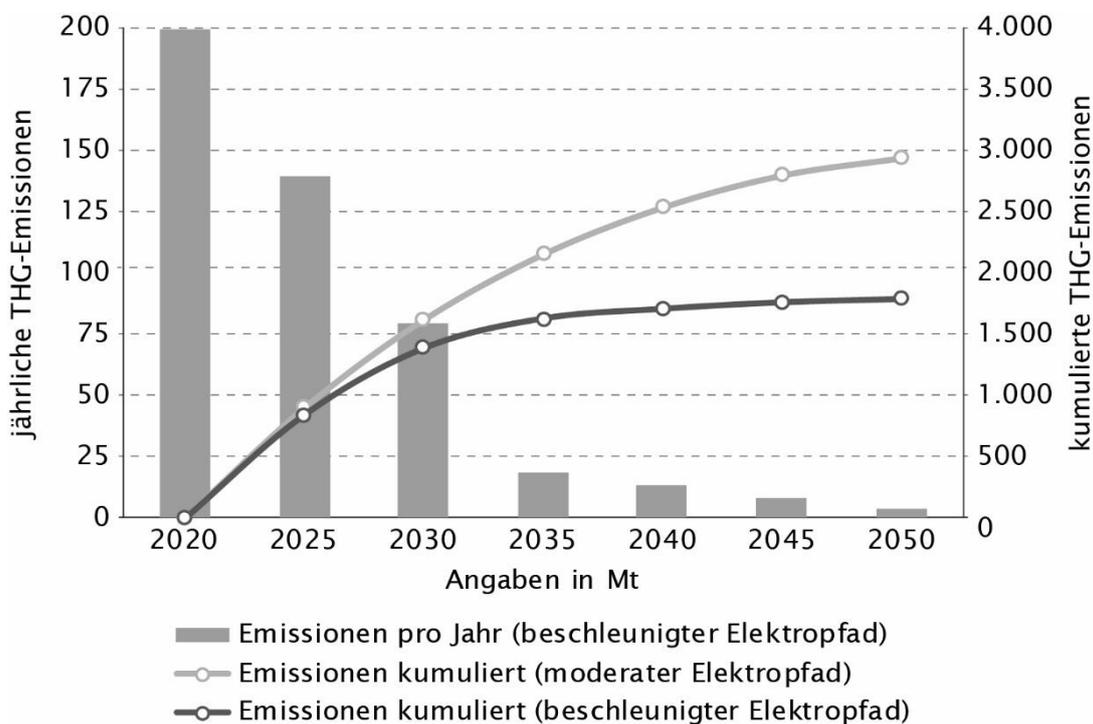
* inklusive Eigenerzeugung durch Photovoltaik

Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. S. 420

Der beschleunigte Elektropfad ermöglicht es, die kumulierten Emissionen, d. h. das Emissionsbudget, auf rund 60 % im Vergleich zum moderaten Elektropfad zu reduzieren (Abb. 5.26). Eine solche THG-Emissionsreduktion könnte mit einer Kombination der folgenden Maßnahmen erreicht werden (Jagnow/Wolff 2020, S. S. 421):

- › gebremstes Wachstum der Pro-Kopf-Wohnfläche;
- › moderate Einsparungen des Pro-Kopf-Wasser- und Haushaltsstromverbrauchs;
- › alle Neubauten: Passivhausniveau: keine fossil befeuerten Kessel, Ausstattung mit Photovoltaik;
- › Sanierung: zu 80% Passivhausniveau, fossil befeuerte Kessel als Hybridanlage mit Wärmepumpe, jährlich 2% aller Wohnbauten mit PV-Anlage ausgestattet;
- › 50%-Beimischung von synthetischen Brennstoffen zum Erdgas (PtX),
- › beschleunigte Umstellung der Energiegewinnung für Strom und Fernwärme auf regenerative Energien.

Abb. 5.26 Mögliche zukünftige THG-Emissionen für Wärme und Haushaltsstrom im Wohngebäudesektor (inklusive Neubau) in Deutschland (beschleunigter und moderater Elektropfad im Vergleich)



Quelle: basierend auf Jagnow/Wolff 2020, S. S. 421

5.4 Wirtschaftlichkeit der Entwicklungspfade

In den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden generell folgende Kosten berücksichtigt:

- › Investitionsausgaben für Gebäudehülle;
- › Investitionsausgaben für Anlagentechnik;
- › Wartungs- und andere fixe Betriebskosten für Heizungsanlagen;
- › Energiekosten.

Die Einschätzungen zur Wirtschaftlichkeit des Elektro- bzw. Technologiemiexpfads erfolgen in den Szenariostudien mit unterschiedlichem Blickwinkel. So wird einerseits argumentiert, dass Technologiemiexpfade zu einer wirtschaftlicheren, d. h. kosteneffizienteren, Erreichung der Einsparziele Deutschlands führen würden als Elektropfade. Begründet wird dies damit, dass die verursachten Mehrkosten gegenüber einem Referenzszenario, welches ausgehend vom Status quo eine Entwicklung ohne weitere politische Eingriffe fortschreibt, aufgrund der hohen *Kapitalkosten für die Gebäudehülle und die Anlagentechnik*, die mit Elektropfaden einhergehen, ungefähr doppelt so hoch ausfallen wie für Technologiemiexpfade. Die hohen zusätzlichen Kosten werden vor allem auf den Wechsel der Heiztechnik hin zu Wärmepumpen und die für einen effizienten Betrieb der Wärmepumpen förderliche bzw. erforderliche Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes zurückgeführt. Diese würden so hoch ausfallen, dass sie die geringeren Energiekosten des Elektropfads, die auf geringere Energieverbräuche zurückgehen im Vergleich zum Referenzszenario und zum Technologiemiexpfad, überkompensieren würden. Umgekehrt würden die erhöhten Energiekosten, die bei Betrachtung des Gesamtzeitraums bis 2050 bei Technologiemiexpfaden aufgrund des zunehmenden Bezugs von synthetischen Brennstoffen auftreten, durch die im Vergleich zu Elektropfaden geringeren Kapitalkosten übertroffen (ewi ER&S et al. 2017, S. S. 43 ff. u. 61 ff.).

Andererseits wird darauf verwiesen, dass der notwendige Ausbau der regenerativen Energiewirtschaft deutlich höher wäre als bei Elektropfaden (mehr Photovoltaik und Windkraft), weil Erzeugung und Lieferung regenerativer Gase sehr viel verlustbehafteter sind als die des regenerativen Stroms. Somit ist für den Transformationspfad von zusätzlichen Kosten für den Energiebereich auszugehen, die ebenfalls im Wirtschaftlichkeitsvergleich zu berücksichtigen wären. Der Elektropfad ist wiederum mit Mehrkosten behaftet, um technische Lösungen für den Umgang mit (saisonalen und anderen) Schwankungen in der Verfügbarkeit der Energiequellen (z. B. Solarthermie, PV-Strom) umzusetzen. Die Wirtschaftlichkeitsbewertung ist auch stark von dem für die Zukunft angenommenen Ausmaß an Gebäudesanierungen abhängig. Je mehr Gebäudesanierungen angenommen werden, desto stärker sinken die Wärmeabnahmen, was dazu führt, dass Netzverluste in einem eher zentral organisierten Energiesystem die Wirtschaftlichkeit stärker beeinträchtigen. In diesem Fall würden die geringeren Investitionskosten von Großanlagen gegenüber einem dezentralen System vieler Kleinanlagen teilweise durch erhöhte Betriebskosten aufgehoben (Jagnow/Wolff 2020, S. 22).

Schließlich werden in den Szenariostudien teils sehr unterschiedliche Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Energiepreise getroffen (Kap. 5.2.2), die aus großen Unsicherheiten bzw. Entwicklungsspielräumen resultieren. Einflussfaktoren auf das Preisniveau sind dabei, in welchem Ausmaß sich die CO₂-Emissionen in den Energiepreisen niederschlagen, inwieweit eine Umgestaltung des EEG (Entlastung der Strompreise) stattfinden wird und wie sich die Energiepreise auf dem Markt entwickeln. Unsicherheiten gibt es auch bezüglich der anzunehmenden Preise für Energieträger, die gegenwärtig noch nicht auf dem Markt sind (z. B. Import-PtX aus Nordafrika). Bezogen auf die Investitionskostenannahmen gibt es ebenfalls Unsicherheiten und Unterschiede in den Szenariostudien mit Blick auf angesetzte Lernkurven, d. h. Preisdegressionen für im Markthochlauf befindliche, relativ neue Produkte. Sie werden teils gar nicht und teils mit bis zu 50 % berücksichtigt (Jagnow/Wolff 2020, S. 30).

6 Handlungsoptionen

Die staatlich gesetzten Rahmenbedingungen haben einen maßgeblichen Einfluss darauf, welche Energieeinsparungen und THG-Reduktionen im Bereich der energetischen Wohngebäudesanierung bis 2050 erreicht werden können. Mit den Rahmenbedingungen wird auch beeinflusst, welche Gebäudetechnologien zukünftig für Gebäudeeigentümer/innen wirtschaftlich sind und dementsprechend nachgefragt werden und in welchem Ausmaß sich energetische Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle (langfristig) aus der Gebäudeeigentümergeperspektive lohnen. Um hinreichend wirksam und (langfristig) kostengünstig zu einem energieeffizienten und klimaneutralen Wohngebäudebestand beizutragen, lassen sich in enger Anlehnung an Jagnow/Wolff (2020, S. 141 ff.) folgende Handlungsoptionen anführen.

6.1 Sanierungsanforderungen und Förderung

Best-Practice-Anforderungen

Ein wirksamer Weg, um die gesteckten Energie- und Klimaziele zu erfüllen, wird darin gesehen, die Anforderungen an die Sanierung seitens der Gesetzgebung und der Förderung zeitnah deutlich zu steigern, beispielsweise bezogen auf die Dämm-, Luftdichtheits-, Lüftungs-, Heizungs- und Beleuchtungsqualität. Wenn für Bestandsmodernisierungen vor allem Best-Practice-Technologien eingesetzt würden, könnten auch ohne eine Verkürzung der (lebensdauerbedingten) Austauschzyklen von Heizungen und sonstigen Sanierungszyklen am Gebäude deutliche Einspareffekte ausgelöst werden. Mit diesem Ansatz würde die Sanierungstiefe maßgeblich vergrößert, während die Sanierungsrate nicht deutlich erhöht werden müsste.

Voraussetzungen für Förderung bzw. Förderhöhe

Förderprogramme und -konditionen könnten von einer Einsparung an CO₂ abhängig gemacht werden. Alternativ könnten Einzelanforderungen etabliert werden, für die eine CO₂-Einsparungswirkung bekannt und anerkannt ist, analog dem Neubaustandard »Effizienzhaus 55 nach Referenzwerten« der KfW. Eine Option wäre es auch, die Höhe von Fördermitteln für Investitionen an ihren Kapitalkosten pro vermiedener t CO₂, d. h. an ihrem äquivalenten CO₂-Preis, auszurichten.

6.2 Energieverbrauchsmonitoring

Erfolgsmonitoring bei Förderung

Ein Erfolgsmonitoring bei der Umsetzung von geförderten Sanierungsmaßnahmen, welches auch die Nutzungsphase einschließt, kann eine Datenbasis für wissenschaftliche Analysen, politische Entscheidungen und zur Aufklärung von Bewohner/innen sowie Eigentümer/innen schaffen, um die Potenziale hinsichtlich Energieeinsparung, Emissionsminderung und Wirtschaftlichkeit verstärkt zu prüfen und transparent zu machen. Denkbar wäre es, einen Teil der Fördermittel für die Sanierung des Gebäudes bzw. der Anlagentechnik an das Monitoring zu knüpfen.

Datengrundlagen für politische Entscheidungen und Wissenschaft

Monitoringdatensätze können eine belastbare Datengrundlage für zukünftige Evaluierungen und Anpassungen von Verordnungen und Förderprogrammen bieten. Konkret können sie zur Analyse des Gebäudebestands und dessen Sanierungsbedarf, zur Ableitung von Förderprogrammen und -konditionen und zur Überarbeitung von Normen und Verordnungen dienen (Grözinger et al. 2015). Hierdurch ließen sich theoretische Erfolgskontrollen durch realistischere Erfolgskontrollen ablösen.

Aus wissenschaftlicher Sicht ließen sich durch die Analyse von besser verfügbaren, umfangreicheren und besser vergleichbaren Monitoringdaten zu den Effekten der Sanierungsmaßnahmen die Problemlagen und Herausforderungen bezogen auf den Wohngebäudebereich besser identifizieren und zielgerichteter untersuchen, um Lösungen zu entwickeln.

Energieanalyse aus dem Verbrauch

Derzeitige Nachweisverfahren für die Inanspruchnahme von Fördermitteln basieren bisher auf berechneten Energiebedarfen (z. B. individueller Sanierungsfahrplan). Eine Erfolgskontrolle der anvisierten Energieeinsparpotenziale ist dadurch nicht hinreichend gegeben. Mögliche Performancelücken lassen sich somit möglicherweise erst durch die erste Nebenkostenabrechnung identifizieren. Eine Lösung bestünde in der Einbeziehung einer Energieanalyse aus dem Verbrauch (beispielsweise monatlich erfasst). Durch die Umstellung auf Verbrauchs- bzw. Erfolgsnachweise könnte der Fördermittelantragsteller nach Fertigstellung der Sanierungsmaßnahme die Energieeffizienz des Gebäudes über gemessene Verbrauchswerte belegen (BBSR 2019; Jagnow/Wolff 2020, S. 16 ff.). Mit einem Energieverbrauchsmonitoring könnten auch verbesserte Grundlagen für die Ausgestaltung der Besteuerung von CO₂-Emissionen geschaffen werden.

Bereitstellung von Informationen für Nutzer/innen und Gebäudeeigentümer/innen

Die Erfassung von Energieverbräuchen (Monitoring) liefert wichtige Informationen zum Verhalten der Nutzer/innen. Wenn das Monitoring transparent ist und mit einer Aufklärung verbunden wird, werden die Bewohner/innen in die Lage versetzt, ihr Handeln und die Funktionsweise des Gebäudes und der Anlagentechnik besser zu verstehen und ggf. ihr Nutzerverhalten energiebewusster bzw. klimafreundlicher zu gestalten (BBSR 2019; Cali et al. 2016; Osterhage 2018). Ermöglicht wird die Bereitstellung nutzerbezogener Energieverbrauchsdaten durch digitale, intelligente und vernetzte Technologien (Smartmeter, Apps etc.), die zeitnah das Verbrauchsverhalten zurückspeigeln und ggf. selbstständig Hinweise zu Verbesserungen liefern. Bei der monatlichen Information von Nutzer/innen über ihren Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser, entsprechend der am 1. Dezember 2021 in Kraft getretenen Änderung der Heizkostenverordnung erforderlich bei fernablesbaren Zählern oder Heizkostenverteilern (BMWi 2021), stehen den erwarteten Energieeinsparungen die Aufwendungen für die monatliche Information gegenüber. Eine Evaluation der Verordnung kann Erkenntnisse über ihre Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit in der Praxis hervorbringen.

Für Eigentümer/innen kann ein Energieverbrauchsmonitoring bessere Informationen für die Berechnung energiebedingter Nebenkosten liefern. Die bereitgestellten Daten können außerdem eine bessere Grundlage für eine optimierte Betriebsführung und gezielte Wartungsarbeiten an der Gebäudetechnik bieten.

Datenschutz

Eine zeitnahe Klärung von offenen Fragen des Datenschutzes und der Datenhoheit unterstützt die praktische Umsetzung und breite Anwendung des Monitorings (Messung, Erfassung, Speicherung und Bereitstellung von Monitoringdaten).

6.3 Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung

Qualitätssicherung könnte verpflichtend als Teil der *Planung vorgeschrieben* werden (Aufnahme in das GEG), beispielsweise bezogen auf das luftdichte und wärmebrückenarme Bauen bei baulichen Maßnahmen im Bestand sowie den Wärmeschutz. Auch Maßnahmen wie der hydraulische Abgleich bzw. eine Optimierung von Heizungsanlagen könnten im Gebäudebestand verpflichtend sein.

Auch in die *Ausgestaltung von Förderprogrammen* könnte die Qualitätssicherung noch intensiver einbezogen werden: zum einen bezogen auf die Planung und Umsetzung (Gebäudedichtheitsmessung, Wärmebrückenoptimierung, hydraulischer Abgleich etc.), und zum anderen bezogen auf die vorbereitenden Maßnahmen (z. B. der Einbau von Zählern).

6.4 Energiepreise

Die Energiepreise werden maßgeblich, aber nicht ausschließlich, durch die Politik gestaltet. Durch eine veränderte Preisgestaltung für fossile Energieträger und Strom würde die Wirtschaftlichkeit von vielen der im hier vorliegenden Bericht aufgezeigten energetischen und klimafreundlichen Sanierungen maßgeblich beeinflusst bzw. eine Wirtschaftlichkeit könnte überhaupt erst erreicht werden. Die Energiepreise beeinflussen auch maßgeblich die Wirksamkeit der Förderprogramme für energetische und klimafreundliche Sanierungen im Wohngebäudebereich und ergänzen die Förderprogramme (potenziell) als wirksames politisches Steuerungsinstrument. Investitionskostenzuschüsse allein können in Bestandsgebäuden (also nicht Neubauten) vielfach die Wirtschaftlichkeit nicht hinreichend steigern, da die Energiekosten im Zuge eines Wechsels zu einem strombasierten Hauptwärmeerzeuger (Wärmepumpen) im Vergleich zu fossilen Brennstoffen deutlich ansteigen. Durch eine Umgestaltung der Energiepreise, insbesondere bei den fossilen Energieträgern Erdgas und Heizöl, könnten Wärmepumpen deutlich bessere Kosten-Nutzen-Relationen und deutlich höhere THG-Emissionseinsparungen erreichen. Eine noch stärkere Kopplung der Energiepreise an die THG-Emissionen der jeweiligen Energieträger könnte außerdem dazu beitragen, dass – bei zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien – die Strompreise deutlich geringer ausfallen würden (als gegenwärtig).

7 Literatur

7.1 In Auftrag gegebenes Gutachten

Jagnow, K.; Wolff, D. (2020): Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen in der energetischen Gebäudesanierung. Braunschweig

7.2 Weitere Literatur

AGORA Energiewende (2020): Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz Deutschlands. Eine Abschätzung der Emissionen 2020. (Hein, F.; Peter, F.; Graichen, P.) https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/_ohne_Projekt/2020-03_Corona_Krise/178_A-EW_Corona-Drop_WEB.pdf (28.3.2022)

Agsten, M.; Bauknecht, D.; Becker, A.; Brinker, W.; Conrads, R.; Diebels, V.; Erge, T.; Feuerhahn, S.; Heinemann, C.; Hermsmeier, J.; Hollinger, R. et al. (2012): Abschlussbericht eTelligence. Neue Energien brauchen neues Denken. EWE AG (Hg.), Oldenburg

Ausfelder, F.; Fishedick, M.; Münch, W.; Sauer, J.; Themann, M.; Drake, F.-D.; Henning, H.-M.; Pittel, K.; Schätzler, K.; Umbach, E.; Wagner, U. et al. (2017): »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München, https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publicationen/PDFs/ESYS_Analyse_Sektorkopplung.pdf (28.3.2022)

Baunetzwissen (o. J.): Wirkungs- und Nutzungsgrade von Kesseln. <https://www.baunetzwissen.de/heizung/fachwissen/heizkessel/wirkungs-und-nutzungsgrade-von-kesseln-161184> (28.3.2022)

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2019): Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen. (Loga, T.; Stein, B.; Hacke, U.; Müller, A.; Großklos, M.). BBSR-Online-Publikation Nr. 04/2019, Bonn, <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2019/bbsr-online-04-2019-dl.pdf> (28.3.2022)

BBU (Verband Berlin-Brandenburgischer Wohnungsunternehmen) (2016): Das BBU-Projekt: ALFA®-Allianz für Anlagenenergieeffizienz. Wirtschaftlich – Sozial verträglich – Ökologisch effizient. BBU-Materialie 06. Berlin, <https://bbu.de/system/files/publications/alfa-handbuch.pdf> (28.3.2022)

BCG (Boston Consulting Group); Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. (Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Kirchner, A.; Kemmler, A.; Wünsch, M.) München u. a. O. https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20180118_bdi_studie_klimapfade_fuer_deutschland_01.pdf (28.3.2022)

BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) (2019): Wie heizt Deutschland 2019? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt. Berlin, https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf (28.3.2022)

BDEW (2020): Erdgas-Brennwertheizung: Stand der Technik. https://www.bdew.de/media/documents/Factsheet_Erdgas-Brennwert_11-2020_ThL0x9W.pdf (28.3.2022)

BDH (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie) (o. J.): 10-Jahres-Verlauf Absatz Wärmeerzeuger Deutschland. https://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Pressegrafiken/10-jahres%20verlauf%20absatz%20w%C3%A4rmeerzeuger.pdf (28.3.2022)

BDH (2021): Marktentwicklung Wärmeerzeuger Deutschland 2011–2020. https://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Pressegrafiken/2021/Marktstruktur_zehn_Jahre_2020_DE.pdf (28.3.2022)

- Bettgenhäuser, K.; Boermans, T. (2011): Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland. UBA (Umweltbundesamt) (Hg.), Dessau-Roßlau, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4070.pdf> (28.3.2022)
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (28.3.2022)
- BMU (2018): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2018. Berlin, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_2018_bf.pdf (15.11.2020)
- BMU (2019a): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1> (28.3.2022)
- BMU (2019b): Was ist Power-to-X? <https://www.bmu.de/media/was-ist-power-to-x-die-technologie-einfach-erklaert/> (28.3.2022)
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2015): Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/zweiter-erfahrungsbericht-erneuerbare-energien-waermegesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=12 (28.3.2022)
- BMWi (2019): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (28.3.2022)
- BMWi (2021): Verordnung über die Änderung der Heizkostenverordnung. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Service/Gesetzesvorhaben/verordnung-ueber-die-aenderung-der-heizkostenverordnung.html> (28.3.2022)
- Böhmer, H.; Simon, J. (2015): Mängel und Schäden bei Einzelmodernisierungsmaßnahmen. Institut für Bauforschung und Bauherren-Schutzbund, Berlin/Hannover, https://www.bsb-ev.de/fileadmin/user_upload/1_Startseite/Politik_und_Presse/Analysen_und_Studien/15_Kurzstudie_IFB_Maengel_bei_Einzelmodernisierungsmassnahmen.pdf (28.3.2022)
- Born, H.; Schimpf-Willenbrink, S.; Lange, H.; Busmann, G.; Bracke, R. (2017): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes. Bestandsaufnahme und Trends. Internationales Geothermiezentrum Bochum, Bochum
- Brillinger, M.; Fritsch, J.; Hussl, V. (2010): Warmwasserbereitung und -verteilung bei Niedrigenergiesanierungen im Wohnungsbau. ME-Consult, Stuttgart
- Bundesregierung (2021): Klimaschutzgesetz 2021. Generationenvertrag für das Klima. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (28.3.2022)
- BWP (Bundesverband Wärmepumpe) (2021): Positives Signal für den Klimaschutz: 40 Prozent Wachstum bei Wärmepumpen, 19.1.2021, <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/positives-signal-fuer-den-klimaschutz-40-prozent-wachstum-bei-waermepumpen/#content> (28.3.2022)
- Cali, D.; Heesen, F.; Osterhage, T.; Streblow, R.; Madlener, R.; Müller, D. (2016): Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen. Begleitforschung EnEff:Stadt (Hg.), Berlin, <https://www.irbnet.de/daten/rswb/16079002602.pdf> (28.3.2022)
- Cischinsky, H.; Diefenbach, N. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. IWU (Institut Wohnen und Umwelt), Darmstadt, https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Daten_erhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf (28.3.2022)
- Co2online (o. J.a): Glossar: Endenergie. <https://www.co2online.de/glossar/de/default/definition/endenergie/> (28.3.2022)

- Co2online (o. J.b): Glossar: Primärenergie. <https://www.co2online.de/glossar/de/default/definition/primaerenergie/> (28.3.2022)
- Co2online (2017a): Brennwertkessel: Kosten und Ersparnis im Vergleich. (Weber, M.) 4.9.2017, <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/brennwertkessel/brennwertkessel-kosten-ersparnis/> (28.3.2022)
- Co2online (2017b): Hydraulischer Abgleich – Daten für Deutschland. (Braun, A.) 3.7.2017, <https://www.co2online.de/energie-sparen/heizenergie-sparen/hydraulischer-abgleich/hydraulischer-abgleich-daten-statistik/> (28.3.2022)
- Co2online; IBP (Fraunhofer-Institut für Bauphysik) (2007): CO₂ Gebäudereport 2007. (Friedrich, M.; Becker, D.; Grondey, A.; Laskowski, F.; Erhorn, H.; Erhorn-Klutzig, H.; Hauser, G.; Sager, C.; Weber, H.) BMVBS (Hg.), Berlin, <http://www.buildup.eu/sites/default/files/content/CO2-Gebaudereport.pdf> (28.3.2022)
- Co2online, SENERCON, ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme) (2015): Wirksam Sanieren: Chancen für den Klimaschutz. Feldtest zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden. (Jahnke, K.; Loitz, T.; Schnorbus, M.; Hennig, P.; Grondey, A.; Reher, C.; Miara, M.; Günther, D.) co2online (Hg.), Berlin, https://www.co2online.de/fileadmin/co2/Multimedia/Broschueren_und_Faltblaetter/co2online-sanierungstest-studie.pdf (28.3.2022)
- Deidert, J.; Jagnow, K.; Wolff, D. (2012): Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme mit großen Solaranlagen; Teil 1: Auswertung von Feldanlagen. Wolfenbüttel
- Dena (Deutsche Energie-Agentur) (2013): dena-Gebäudereport 2012. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin
- Dena (2017): dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin, https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaudereport.pdf (28.3.2022)
- Dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. (Bründlinger, T.; Frank, O.; König, J.; Gründig, D.; Jugel, C.; Kraft, P.; Krieger, O.; Mischinger, S.; Prein, P.; Seidl, H.; Siegemund, S.; Stolte, C.; Teichmann, M.; Wilke, J.; Wolke, M.) Berlin/Köln, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf (28.3.2022)
- Dena (2019a): dena-Gebäudereport kompakt 2019 – Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf (28.3.2022)
- Dena (2019b): Ölheizungen in Deutschland – Hintergründe, Daten, Empfehlungen. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-Factsheet_Oelheizungen_in_Deutschland_Hintergruende_Daten.pdf (28.3.2022)
- Dena (2021): Gebäude. Keine Energiewende ohne Wärmewende. <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/> (28.3.2022)
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt) (2019a): Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen. Fachserie 5 Reihe 3, Wiesbaden
- DESTATIS (2019b): Wohnen in Deutschland – Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html> (28.3.2022)
- Deutscher, P.; Elsberger, M.; Rouvel, L. (1999): Klimaschutz durch Minderung von Treibhausgasemissionen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher durch klimagerechtes Verhalten. Potentialabschätzung mit Hilfe des IKARUS-Instrumentariums: Verhaltensbedingte Auswirkungen auf den Endenergiebedarf zu Raumheizung und Warmwasserbereitung in privaten Haushalten. Anlagenband zum Bericht Band 1. Technische Universität München, München

- Diefenbach, N.; Enseling, A.; von Malottki, C.; Stein, B.; Grafe, M.; Cischinsky, H.; Loga, T.; Hörner, M. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. IWU/Bremer Energieinstitut, Darmstadt/Bremen, http://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht_Datenbasis.pdf (28.3.2022)
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt); IWES (Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme); IFNE (Ingenieurbüro für Neue Energien) (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. (Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; Tena, D. L. de; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; von Oehsen, A.; Schwinn, R.; Pape, C.; Hahn, H.; Wickert, M.; Wenzel, B.) Stuttgart u. a. O. https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf (28.3.2022)
- Enseling, A. (2003): Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparinvestitionen im Gebäudebestand. IWU, Darmstadt
- Enseling, A.; Hacke, U. (2020): Energietechnische Gebäudemodernisierung – (wie) rechnet sich das? Institut Wohnen und Umwelt, Schlaglicht Nr. 1/2020, Darmstadt, https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/schlaglicht/2020_IWU_EnselingEtHacke_Energietechnische-Geb%C3%A4udemodernisierung-Wie-rechnet-sich-das.pdf (28.3.2022)
- Erbstößer, A.-C. (2018): Smart Buildings im Internet der Dinge. Die digitale Zukunft von Gebäuden. Technologiestiftung Berlin, Berlin, https://www.technologiestiftung-berlin.de/fileadmin/user_upload/smart-building-im-internet-der-dinge-studie.pdf (28.3.2022)
- Energieinstitut Vorarlberg (2017): Ratgeber Infrarotheizung. Was Sie vor der Entscheidung für eine Infrarotheizung wissen und beachten sollten. https://www.energieinstitut.at/wp-content/uploads/2018/11/Ratgeber-Infrarotheizung_2019_low_res.pdf (28.3.2022)
- ewi ER&S (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln Energy Research & Scenarios); ITG (Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden); FIW (Forschungsinstitut für Wärmeschutz) (2017): Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor (Hecking, H.; Hennes, O.; Elberg, C.; Frings, C.; Hintermayer, M.; Dominic, L.; Wildgrube, T.; Oschatz, B.; Winiewska, B.; Mailach, B.; Kagerer, F.). dena (Hg.), https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Meldungen/dena_Gebaeuestudie.pdf (28.3.2022)
- Gossen, M.; Nischan, C. (2014): Regionale Differenzen in der Wahrnehmung energetischer Sanierungen. Ergebnisse einer qualitativen Befragung von GebäudeeigentümerInnen zu energetischer Sanierung in zwei unterschiedlichen Regionen. IÖW (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung), Gebäude-Energiewende Arbeitspapier Nr. 1, Berlin, http://www.gebaeude-energiewende.de/data/gebEner/user_upload/Dateien/GEW_AP1_Ergebnisbericht_Interviews_final_141126.pdf (28.3.2022)
- Grözinger, J.; Petersdorff, C.; Dinges, K.; Nabe, C. (2015): Die Rolle von Submetering im Kontext von Energieeffizienz und Smart Meter Rollout. Ecofys, Köln
- Henger, R.; Voigtländer, M. (2012): Energetische Modernisierung des Gebäudebestandes: Herausforderungen für private Eigentümer. Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Köln/Berlin
- Hoffmann, C.; Geissler, A. (2017): Dem Prebound Effekt auf der Spur – Differenzen zwischen dem Heizwärmeverbrauch und dem rechnerisch ermittelten Heizwärmebedarf bei Bestandsgebäuden (Wohnen). In: Bauphysik 39(3), S. 159 ff.
- Ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung); IEE (Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik); Consentec (2018): Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Heat_System_Benefit/143_Heat_System_benefits_WEB.pdf (28.3.2022)

- IWES (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik; IBP (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. (Gerhardt, N.; Sandau, F.; Becker, S.; Scholz, A.; Schumacher, P.; Schmidt, D.) https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf (28.3.2022)
- Jagnow, K.; Wolff, D. (2017): Energiekonzepte. In: Bergmann, P.; Schafhausen, F. (Hg.): Energieversorgung 2020. Berlin
- Jochum, P.; Mellwig, P.; Lempik, J.; Böttcher, S.; Stelter, D.; Krenz, T.; Pehnt, M.; von Oehsen, A.; Blömer, S.; Hertle, H. (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Kurztitel: Anlagenpotential. Beuth Hochschule für Technik, ifeu, Berlin/Heidelberg, https://prof.beuth-hochschule.de/fileadmin/prof/jochum/Downloads/Anlagenpotenzial_Endbericht.pdf (28.3.2022)
- Jochum, P.; Mellwig, P.; Lempik, J.; Kulka, M.; Blachut, T.; Wolff, J.; Wallstab, T.; von Oehsen, A.; Pehnt, M.; Fehr, J.; Fortuniak, A. (2015): Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands. Beuth Hochschule für Technik, ifeu, Berlin/Heidelberg, https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Beuth_ifeu_Daemmbarkeit_des_deutschen_Gebaeudebestands_2015.pdf (28.3.2022)
- Karg, L.; Kleine-Hegemann, K.; Wedler, M.; Jahn, C. (2014): E-Energy Abschlussbericht - Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Evaluation der sechs Leuchtturmprojekte. Bundesdeutscher Arbeitskreis für Umweltbewußtes Management Consult, München/Berlin, https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/ab-gesamt-begleitforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (28.3.2022)
- Kersken, M.; Sinnesbichler, H.; Erhorn, H. (2018): Analyse der Einsparpotenziale durch Smarthome- und intelligente Heizungsregelungen. In: Bauphysik 40(5), S.276 ff.
- KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) (2021a): Merkblatt BEG Wohngebäude Kredit Effizienzhaus. 09/2021, [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000004854_M_261.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000004854_M_261.pdf) (28.3.2022)
- KfW (2021b): Merkblatt BEG Wohngebäude Kredit Einzelmaßnahmen. 09/2021, [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000004856_M_262.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000004856_M_262.pdf) (28.3.2022)
- KfW (2021c): Merkblatt BEG Wohngebäude Zuschuss Effizienzhaus. 09/2021, [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000004858_M_461.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000004858_M_461.pdf) (28.3.2022)
- Knissel, J.; Alles, R.; Born, R.; Loga, T.; Müller, K.; Stercz, V. (2006): Vereinfachte Ermittlung von Primärenergiekennwerten zur Bewertung der wärmetechnischen Beschaffenheit in ökologischen Mietspiegeln. IWU, Darmstadt, https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/wohnen/msp/2006_IWU_KnisselEtAl_Vereinfachte-Ermittlung-von-Prim%C3%A4renergiekennwerten.pdf (28.3.2022)
- Lambrecht, K. (2018): Einsparungen von Endenergie und CO₂ beim Ersetzen alter Heizkessel durch Brennwertkessel. Eine detaillierte Betrachtung von Einsparpotentialen in Abhängigkeit der Ausgangslage. Econsult, https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/20180323_BEE_Gutachten_Einsparungen_von_Endenergie_und_CO2_beim_Ersetzen_alter_Heizkessel_durch_Brennwertkessel.pdf (28.3.2022)
- Loga, T.; Großklos, M.; Knissel, J. (2003): Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten. Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung. IWU, Darmstadt
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. IWU, Darmstadt, https://www.episcope.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf (28.3.2022)

- Mailach, B.; Emmrich, F.; Oschatz, B.; Schinke, L.; Seifert, J. (2019): Energetische Einsparpotentiale und wirtschaftliche Bewertung des hydraulischen Abgleiches für Anlagen der Gebäudeenergie-technik. ITG, Dresden, https://www.hydraulischer-abgleich.de/fileadmin/user_upload/file/Einsparpotenzial_und_Wirtschaftlichkeit_hydraulischer_Abgleich_2019-02-04.pdf (28.3.2022)
- Mailach, B.; Oschatz, B. (2017a): BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2017. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Altbauten. ITG, Dresden, https://www.ggm.com/wp-content/uploads/sites/2/2019/12/BDEW_Heizkostenvergleich_Altbau_2017.pdf (28.3.2022)
- Mailach, B.; Oschatz, B. (2017b): Kurzstudie Energieeinsparungen Digitale Heizung. ITG, Dresden, https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Studien/energieeinsparungen_digitale_heizung_2017_01_12.pdf (28.3.2022)
- McKinsey (2009): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. BDI (Hg.), Düsseldorf, https://bdi.eu/media/presse/publikationen/Publikation_Treibhausgasemissionen_in_Deutschland.pdf (28.3.2022)
- Müller, C.; Barckhausen, A.; Bons, M.; Eder, J.; Hercegfi, A.; Maas, H.; Nabe, C.; Offermann, M.; Scheelhaase, A.; Schmitt, M.; von Rottenburg, N.; Zurhold, R. (2017a): Rolle der Digitalisierung im Gebäudebereich. Eine Analyse von Potenzialen, Hemmnissen, Akteuren und Handlungsoptionen. dena (Hg.), Berlin, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/rolle-der-digitalisierung-im-gebaeudebereich.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (28.3.2022)
- Müller, C.; Nicht, A.; Marcinek, H.; Krieger, O. (2017b): dena-Modellvorhaben: Bewusst heizen, Kosten sparen. Abschlussbericht »Verbrauchsauswertung und Mieterbefragungen in den Heizperioden 2012 bis 2016«. dena (Hg.), Berlin, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9188_Abschlussbereich_dena_Modellvorhaben_Bewusst_heizen_Kosten_sparen.pdf (28.3.2022)
- OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) (2016): Die OECD in Zahlen und Fakten 2015-2016. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/factbook-2015-de.pdf?expires=1605384056&id=id&accname=guest&checksum=7321FD1933D3F120E09BDA0331817D7C> (28.3.2022)
- Öko-Institut; ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Berlin/Karlsruhe, <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf> (28.3.2022)
- Orthjohann, J.; Schreckenber, D. (2012): Qualitätssicherung effizienter Wärmeversorgung. In: BundesBauBlatt 10, S. 42 ff.
- Osterhage, T. (2018): Messdatengestützte Analyse und Interpretation sanierungsbedingter Effizienzsteigerungen im Wohnungsbau. Dissertation, Dortmund, <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/37820> (28.3.2022)
- Perch-Nielsen, S.; von Felten, N.; Müller, M. (2019): Energie Performance Gap in Neubauten. Grundlagen aus der Forschung für die Praxis. EnergieSchweiz (Hg.), Bern, https://www.minergie.ch/media/2019_performance-gap_in_neubauten_ebp.pdf (28.3.2022)
- Prognos; ISI; GWS (Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung); iinas (Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien) (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030. (Kemmler, A.; Kirchner, A.; Maur, A. auf der; Ess, F.; Kreidelmeyer, S.; Piegsa, A.; Spillmann, T.; Wünsch, M.; Ziegenhagen, I.) https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (28.3.2022)
- Quack, D.; Liu, R.; Gröger, J. (2019): Smart Home – Energieverbrauch und Einsparpotenzial der intelligenten Geräte. Öko-Institut e. V. Freiburg/Berlin, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Smarthome-Stromverbrauch.pdf> (28.3.2022)

- Schneiders, T.; Rehm, T.; Hilger, L. (2018): Forschungsstudie SmartHome Rösrath. Feldtest in 120 Haushalten zur Untersuchung von Heizenergie-einsparungen in Bestandsgebäuden. VISE Policy Brief Nr. 2, Köln, https://www.smart-energy.nrw/sites/smartenergy/files/vise_policy_brief_q_3_2018.pdf (28.3.2022)
- Schulze Darup, B. (2019): Kostengünstiger und zukunftsfähiger Geschosswohnungsbau im Quartier. Berlin, https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33119_01-Hauptbericht.pdf (28.3.2022)
- Schweikhardt, F. (2017): Hydraulischer Abgleich und Heizungspumpentausch. Ein Pionierprojekt der Evangelischen Landeskirche in Baden. Karlsruhe, https://www.hydraulischer-abgleich.de/fileadmin/user_upload/Vorlaeufiger_Abschlussbericht_Hydraulischer_Abgleich_und_Pumpentausch_EKIBA.pdf (28.3.2022)
- Simon, J.; Böhmer, H.; Helmbrecht, H. (2017): Umfrage zur Fehlerhäufigkeit bei der Planung und Ausführung von Wärmepumpen. Bauherren-Schutzbund, Berlin, https://www.bsb-ev.de/fileadmin/user_upload/1_Startseite/Politik_und_Presse/Analysen_und_Studien/20171012_Studie_Fehler_Waermepumpen.pdf (28.3.2022)
- Simons, H. (2012): Energetische Sanierung von Ein- und Zweifamilienhäusern. Energetischer Zustand, Sanierungsfortschritte und politische Instrumente. empirica, Berlin
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2020): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020. Berlin, https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html (28.3.2022)
- Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A.; Henning, H.-M. (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Fraunhofer ISE, Freiburg, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf> (28.3.2022)
- Stötzel, M.; Hadler, T.; Britzl, F.; Berndlmaier, T.; Kittlaus, B.; Roesler, K. (2019): Energiemanagement und Steuerung einer PV-Anlage über die Smart-Meter-Gateway Infrastruktur: Ein Proof of Concept der coneva GmbH und Stadtwerke München GmbH. <https://coneva.com/fileadmin/PDFs/coneva-SWM-White-Paper-SMGW-Integration.pdf> (28.3.2022)
- UBA (Umweltbundesamt) (2019): Wohnen und Sanieren. Empirische Wohngebäudedaten seit 2002. Climate Change Nr. 22/2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-23_cc_22-2019_wohnenundsaniieren_hintergrundbericht.pdf (28.3.2022)
- UBA (2018): Feinstaub aus Holzfeuerungen: Luftqualitätsgrenzwerte eingehalten. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/feinstaub-aus-holzfeuerungen> (28.3.2022)
- UBA (2020): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energetragern> (28.3.2022)
- UBA (2021a): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Climate Change 45/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021.pdf (28.3.2022)
- UBA (2021b): Indikator: Primärenergieverbrauch. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-primaeenergieverbrauch#die-wichtigsten-fakten> (28.3.2022)
- UBA (2021c): Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeerzeugung-aus-erneuerbaren-energien> (28.3.2022)
- Vorbeck, L.; Weinreuter, H. (2019): Bundesweite Verbraucherbefragung zum Thema Wärmepumpen. Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, Mainz, https://www.verbraucherzentrale-rlp.de/sites/default/files/2019-07/190710_VZ_Waermepumpenbericht.pdf (28.3.2022)
- VZBV (Verbraucherzentrale Bundesverband) (2011): Die »Aktion Brennwertcheck« der Verbraucherzentralen. Berlin, https://verbraucherzentrale-energieberatung.de/wp-content/uploads/2019/01/2019_aktionbrennwertcheck_langfassung.pdf (28.3.2022)

- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. Berlin, https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/sondergutachten/sg2009/pdf/wbgu_sn2009.pdf (28.3.2022)
- Wenzel, B.; Bruns, E.; Adolf, M.; Ohlhorst, D. (2015): Erneuerbare Energien zur individuellen Wärme- und Kälteerzeugung. Innovationen und Herausforderungen auf dem Weg in den Wärmemarkt. Institut für nachhaltige Energie- und Ressourcennutzung (Hg.), Berlin
- Wissenschaftliche Dienste (2020): Dokumentation. Fragen zur Entwicklung der Netzentgelte im Stromsektor. Deutscher Bundestag, WD 5 – 3000 – 012/20, Berlin
- Wolff, D.; Teuber, P.; weitere (2004): Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln. Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel für Deutsche Bundestiftung Umwelt, Wolfenbüttel

8 Anhang

8.1 Abbildungen

	Seite
Abb. 3.1 Aufteilung der Wohngebäude nach Baujahresgruppen in Deutschland (Stand 2016)	23
Abb. 3.2 Beispielhaftes Ein- bzw. Zweifamilienhaus	24
Abb. 3.3 Beispielhaftes Mehrfamilienhaus	25
Abb. 3.4 Anteile der Hauptwärmeerzeuger in Wohngebäuden in Deutschland 2016	26
Abb. 3.5 Entwicklung des Bestands an zentralen Wärmeerzeugern im Gebäudebestand in Deutschland*	26
Abb. 3.6 Absatz von Wärmeerzeugern in Deutschland 2020	27
Abb. 3.7 Absatz von Wärmepumpen in Deutschland 2001 bis 2020	27
Abb. 4.1 THG-Emissionsminderung durch Austausch eines Heizkessels mit fossilen Brennstoffen durch eine Wärmepumpe oder einen Holzessel bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus	31
Abb. 4.2 THG-Emissionsminderung durch Austausch eines Heizkessels mit fossilen Brennstoffen durch eine Wärmepumpe, Fernwärme oder einen Holzessel bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus	32
Abb. 4.3 THG-Emissionsminderung durch zusätzliche Erzeuger bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus	34
Abb. 4.4 THG-Emissionsminderung durch zusätzliche Erzeuger bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus	35
Abb. 4.5 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Ein- und Zweifamilienhaus mit mittlerem Sanierungsstand	35
Abb. 4.6 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus mit gutem Sanierungsstand	36
Abb. 4.7 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus mit mittlerem Sanierungsstand	36
Abb. 4.8 THG-Emissionsminderung durch Kombination aus Wärmepumpe und Photovoltaik bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus mit gutem Sanierungsstand	37

	Seite
Abb. 4.9 THG-Emissionsminderungen von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus	41
Abb. 4.10 THG-Emissionsminderungen von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus	42
Abb. 4.11 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für den Einbau von Wärmeerzeugern bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus	43
Abb. 4.12 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für den Einbau von Wärmeerzeugern bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus.....	44
Abb. 4.13 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für Heizungshybridsysteme bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus.....	45
Abb. 4.14 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für Hybridlösungen bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus	46
Abb. 4.15 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ durch zusätzliche Erzeuger und Technologien bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus	47
Abb. 4.16 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ durch zusätzliche Erzeuger und Technologien bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus.....	47
Abb. 4.17 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für Kombinationen aus Photovoltaik und Wärmepumpe bei einem durchschnittlichen Ein- bzw. Zweifamilienhaus.....	49
Abb. 4.18 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für Kombinationen aus Photovoltaik und Wärmepumpe bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus.....	50
Abb. 4.19 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem Ein- bzw. Zweifamilienhaus	53
Abb. 4.20 Jahreskostendifferenz und Kapitalkosten pro vermiedener t CO ₂ für Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem Mehrfamilienhaus	54
Abb. 5.1 Mögliche (politisch gestaltete) Energiepreise, brennwertbezogen (pro kWh), für einen moderaten Elektropfad zur Erreichung von Klimaneutralität in Deutschland	64

	Seite
Abb. 5.2	Mögliche Verbreitung von Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in Ein- und Zweifamilienhäusern (Technologiemixpfad) 65
Abb. 5.3	Mögliche Verbreitung von Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in Ein- und Zweifamilienhäusern (Elektropfad)..... 66
Abb. 5.4	Mögliche Verbreitung von Heiztechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in Wohngebäuden (Gesamtbestand) (moderater Elektropfad)..... 66
Abb. 5.5	Mögliche Entwicklung der Systeme der Trinkwasserverteilung in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad)..... 67
Abb. 5.6	Mögliche Entwicklung der Systeme der Wärmeübergabe in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad) 68
Abb. 5.7	Mögliche Entwicklung der Lage des Heizsystems in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad) 68
Abb. 5.8	Mögliche Entwicklung der Lüftungssysteme in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad) 68
Abb. 5.9	Mögliche Entwicklung von Photovoltaik in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad) 69
Abb. 5.10	Mögliche Entwicklung von Solarthermie in Wohngebäuden (nur Sanierung) in Deutschland (moderater Elektropfad) 69
Abb. 5.11	Jährliche Sanierungsrate der Gebäudehülle in Wohngebäuden bis Baujahr 1978 (2005 bis 2008)..... 71
Abb. 5.12	Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Außenwände von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)..... 72
Abb. 5.13	Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der obersten Geschossdecke von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad) 72
Abb. 5.14	Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands des Daches von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)..... 72
Abb. 5.15	Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Kellerdecke von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)..... 73
Abb. 5.16	Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Bodenplatte von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad)..... 73

	Seite	
Abb. 5.17	Mögliche Entwicklung des Sanierungszustands der Fenster von Wohngebäuden (ohne Neubau) in Deutschland, um die Energie- und Klimaziele zu erreichen (moderater Elektropfad).....	73
Abb. 5.18	Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms am Endenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (ohne Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)	75
Abb. 5.19	Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms am Endenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)	76
Abb. 5.20	Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms am Primärenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)	77
Abb. 5.21	Mögliche zukünftige Anteile der Wärmeerzeuger und des Haushaltsstroms an den THG-Emissionen des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)	78
Abb. 5.22	Mögliche zukünftige Beiträge der Energieträger und des Stroms zum Endenergieverbrauch des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)	79
Abb. 5.23	Mögliche Entwicklung von Energiefremdbezug und -eigenversorgung für Wärme und Haushaltsstrom des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (moderater Elektropfad)	80
Abb. 5.24	Mögliche Entwicklung des Endenergiebedarfs des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland nach Anwendungsbereichen (moderater Elektropfad)	80
Abb. 5.25	Mögliche Entwicklung der THG-Emissionen des Wohngebäudesektors (inklusive Neubau) in Deutschland (beschleunigter Elektropfad)	81
Abb. 5.26	Mögliche zukünftige THG-Emissionen für Wärme und Haushaltsstrom im Wohngebäudesektor (inklusive Neubau) in Deutschland (beschleunigter und moderater Elektropfad im Vergleich)	82

8.2 Tabellen

	Seite
Tab. 4.1 Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit der Erneuerung von Hauptwärmeerzeugern in einem durchschnittlichen Wohngebäude 2020*	57
Tab. 4.2 Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit der Einbindung zusätzlicher Erzeuger und Optimierung der Peripherie bei einem durchschnittlichen Wohngebäude 2020	58
Tab. 4.3 Einspareffekte und Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle bei einem durchschnittlichen Wohngebäude 2020.....	59
Tab. 5.1 Auswahl an Szenariostudien zu Einspareffekten an Energie und THG-Emissionen durch Wohngebäudesanierungen in Deutschland.....	62
Tab. 5.2 Angenommene Energiepreise für Elektro- und Technologiemiexpfade zur Erreichung von Klimaneutralität in Deutschland.....	64

