

Rheinstraße 65 64295 Darmstadt Germany

Fon: +49 (0)6151 2904-0 Fax: +49 (0)6151 2904-97

info@iwu.de www.iwu.de

Recherchen und Analysen zur Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden mit Wärmepumpen

Zwischenbericht (Arbeitspapier) für das Forschungsvorhaben "Wärmepumpen-Praxis im hessischen Wohngebäudebestand"

Stand vom 11.05.2023

Diese Untersuchung wurde durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen gefördert



Titel: Recherchen und Analysen zur Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden mit Wärmepumpen

Zwischenbericht (Arbeitspapier) für das Forschungsvorhaben "Wärmepumpen-Praxis im hessischen Wohngebäudebestand"

Autoren:

Marc Großklos Guillaume Behem Nikolaus Diefenbach Stefan Swiderek

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Darmstadt, 11.05.2023

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) Rheinstraße 65 64295 Darmstadt Germany

Telefon +49 (0)6151 2904-0 Fax +49 (0)6151 2904-97

Internet www.iwu.de



Inhalt

Zι	Zusammenfassung	1
1	1 Einleitung	7
2	2 Literaturrecherche zum Wärmepumpeneinsatz in Bestandsgebä	uden 9
	2.1 Voraussetzungen für den Einsatz von Wärmepumpen in Best	andsgebäuden9
	2.2 Felduntersuchungen	10
	2.2.1 WPSmart im Bestand und LowEx-Bestand	10
	2.2.2 Feldmessungen in der Schweiz	
	2.2.3 Erfahrungen aus weiteren Felderhebungen	
	2.3 Planungsempfehlung	15
	2.3.1 Heizlast	
	2.3.2 Auslegungstemperaturen in Hessen	
	2.3.3 Heizflächen, Hydraulik, Vorlauftemperaturen	
	2.3.5 Pufferspeicher	
	2.3.6 Trinkwasserbereitung	
	2.3.7 Hydraulischer Abgleich	
	2.3.8 Betriebsoptimierung und Fehlersuche	28
3	3 Analyse von Versorgungsvarianten für Einzelgebäude	30
	3.1 Randbedingungen	30
	3.2 Ein- und Zweifamilienhäuser	31
	3.2.1 Darstellung der Varianten	31
	3.2.2 Simulationsergebnisse	33
	3.2.2.1 Einfluss der Hydraulik-Schaltung	33
	3.2.2.2 Einfluss der maximalen Vorlauftemperatur im System M1.	36
	3.2.2.3 Einfluss der Photovoltaik-Erzeugung im System M1	36
	3.2.2.4 Einfluss der Größe der PV-Anlage im System M1	40
	3.2.2.5 Einfluss von Speichergröße und PV-Anlagengröße im Syste	em M1, komplett saniert41
	3.2.2.6 Einfluss der Wärmequelle im System M1	41
	3.2.2.7 Einfluss der Nachtabsenkung im System M1	
	3.3 Mehrfamilienhäuser	
	3.3.1 Darstellung der Varianten	
	3.3.2 Simulationsergebnisse	
	3.3.2.1 Einfluss der Hydraulik	47
	3.3.2.2 Einfluss der PV-Erzeugung	
	3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse	
4	4 Bewertung von Wärmepumpen für Bestandsgebäude im Rahme	n der elektrischen
4	Energieversorgung	
	4.1 Hintergrund und Zielsetzung	56
	4.2 Modellansätze	57
	4.3 Ergebnisse der Basisanalysen	
	4.4 Weitergehende Untersuchungen	

	4.4.1	Durchschnittlicher Treibhausgas-Emissionsfaktor als Bewertungsalternative	66
	4.4.2	Konsequenzen für die Bewertung direktelektrischer Wärmeversorgungssysteme	68
	4.4.3	Rolle der Wärmespeicher	70
5	Wärmepu	umpen im individuellen Sanierungsfahrplan (iSFP)	71
	5.1 Beur	teilung der Wärmepumpentauglichkeit eines Gebäudes im Rahmen eines iSFP	73
	5.2 Schlu	ıssfolgerung	75
6	Literatur	verzeichnis	76
Αı	nhang A Hä	iufigkeit unterschiedlicher Außentemperaturen in Hessen	81
Αı	nhang B Be	schreibung der Modellgebäude	82
Aı	nhang C Ke	nngrößen für die Simulationen	93
۸,	ahang D St	ockhriafa Hydraulik	0.4



Zusammenfassung

Wärmepumpen können einen wichtigen Beitrag zu einer überwiegend regenerativen Wärmeversorgung von Gebäuden spielen. Während sie im Neubau bereits das verbreiteste Heizsystem sind, sind die Voraussetzungen für einen energieeffizienten Einbau in Bestandsgebäuden aber in der Regel schlechter. Es wird empfohlen, zuerst das Gebäude vollständig zu dämmen, bevor eine Wärmepumpe eingebaut wird. Allerdings sind zwei wesentliche Aspekte dabei zu beachten:

- Eine energetische Komplettsanierung ist teuer; ökonomisch sinnvoller ist ein an den ohnehin erforderlichen Austauschzyklus angepasstes Vorgehen. Dabei werden die Gebäudeteile energetisch saniert, deren Lebensende erreicht ist oder bei denen "Ohnehin"-Maßnahmen erforderlich sind (z. B. neuer Anstrich der Außenwand). Dadurch werden die energiebedingten Mehrkosten minimiert, aber ein kompletter Sanierungszyklus eines Gebäudes dauert viele Jahre.
- Wenn die alte Heizungsanlage defekt ist, muss in der Regel schnell gehandelt werden. Wenn bei einem solchen Heizungsaustausch wieder (ausschließlich) ein fossiles Heizsystem eingebaut wird, dann ist die Chance für den Umstieg auf eine regenerative Wärmeversorgung für ca. 2 Jahrzehnte vertan (Lebensdauer der Heizungsanlage).

Vor dem Hintergrund der Anforderungen beim Klimaschutz müssen aber schnell deutliche Schritte zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Emissionen erreicht werden. Somit müssen angepasste Lösungen für den Einbau gefunden werden, auch wenn die Randbedingungen nicht ideal sind. Wenn bei einem erforderlichen Austausch der Heizungsanlage dies berücksichtigt wird, können durch den zeitweisen Weiterbetrieb von Teilen des alten Systems Kosten eingespart werden und Hauseigentümer können sich (in begrenztem Umfang) auch Zeit für die Umsetzung weiterer Maßnahmen verschaffen.

In einem vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen geförderten Forschungsprojekt haben sich die Autoren mit der Frage beschäftigt, wie Wärmepumpen in Bestandsgebäuden eingesetzt werden können, ohne dass eine Komplettsanierung der Gebäudehülle vorliegt. In diesem Zwischenbericht werden erste Ergebnisse der Untersuchungen zum Wärmepumpeneinsatz in Bestandsgebäuden dokumentiert.

Eine Analyse der deutschsprachigen Literatur zeigte, dass im Rahmen von Feldversuchen in Deutschland und in der Schweiz sowohl die Eignung von Wärmepumpen für Bestandsgebäude dokumentiert werden konnte, wie auch eine deutliche Verbesserung der gemessenen Jahresarbeitszahlen im Vergleich zu älteren Feldmessungen festzustellen ist. Allerdings sind bei diesen Untersuchungen nur in Ausnahmefällen un- bzw. nur geringfügig sanierte Gebäude untersucht worden und der Schwerpunkt der Felduntersuchungen lag bei Einfamilien- oder kleinen Mehrfamilienhäusern. Mehrfamilienhäuser besitzen aufgrund der besonderen Anforderungen an die Warmwasserbereitung zusätzliche Herausforderungen an die technischen Konzepte.

Für die Nachrüstung von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden ist die maximale Vorlauftemperatur und damit die Bestimmung der Heizlast und der vorhandenen Auslegung der Heizflächen von großer Bedeutung. Dafür müssen die Gebäudehülle mit ihren U-Werten sowie die Bauart und Größe der vorhandenen Heizflächen aufgenommen werden, wofür aber nicht immer Daten vorliegen oder bei einer Vor-Ort-Begehung einfach zugänglich sind. Hier gilt es zukünftig weitere Vereinfachungen zu entwickeln, mit denen die Handwerker passgenaue Auslegungen ohne hohen Rechenaufwand vornehmen können. Von den meisten Autoren werden maximale Vorlauftemperaturen von ca. 55 °C im Auslegungspunkt als Obergrenze für den effizienten Einsatz einer Wärmepumpe angegeben. Die Auswertung von 34 Wetterstationen in Hessen zeigt, dass die Norm-Auslegungstemperatur in den letzten Jahren selten erreicht wurde und die maximale Vorlauftemperatur für den Auslegungspunkt damit nur sehr selten auftritt. Wenn die vorhandenen Heizflächen nicht ausreichen und damit eine niedrige Vorlauftemperatur verhindern, stehen unterschiedliche technische Möglichkeiten für eine Anpassung zur Verfügung (z. B. Heizkörpertausch, zusätzliche Heizflächen, ...). In diesem



Zusammenhang spielt auch der hydraulische Abgleich von Wärmeverteilung und Heizflächen eine wichtige Rolle, um niedrige Vorlauftemperaturen in der Praxis zu erreichen.

Die Warmwasserbereitung kann besondere Anforderungen an die Wärmepumpe und die Anlagentechnik stellen, besonders bei größeren Gebäuden. Hier gibt es Lösungen sowohl für die zentrale Warmwasserversorgung als auch für dezentrale wohnungsweise Lösungen, die auch die höheren rechtlichen Anforderungen bei Mehrfamilienhäusern erfüllen. Hier sind beispielsweise außen liegende Wärmetauscher für die Weiterverwendung von Bestandsspeichern oder Frischwasserstationen zu nennen. In diesem Bericht werden für Mehrfamilienhäuser unterschiedliche Varianten der Warmwasserbereitung untersucht und bewertet (siehe weiter unten).

Versorgungsvarianten für Einzelgebäude

Um den Einfluss von mono- und bivalenter Betriebsweise bei verschiedenen hydraulischen Einbindungen der Wärmepumpe sowie unterschiedlichen energetischen Standards der Gebäude zu untersuchen, wurde für je ein Einfamilien- und ein Mehrfamilienhaus unterschiedliche Versorgungsvarianten und Hydrauliken mit der Software Polysun dynamisch simuliert. Dabei wurden die Modellgebäude im unsanierten, in zwei teilsanierten und im komplett sanierten Zustand betrachtet. Das Sanierungsniveau orientiert sich an Standards, wie sie in der Vergangenheit umgesetzt wurden. Die Wärmepumpe wurde in der Regel so dimensioniert, dass sie im komplett sanierten Zustand des Gebäudes die Wärmeversorgung vollständig (monovalent) übernehmen kann. Wenn das Gebäude noch nicht komplett saniert ist, wird die Wärmepumpe zuvor entweder monoenergetisch (mit zusätzlichem Heizstab) oder bivalent mit dem alten Öl-Kessel als Spitzenlasterzeuger betrieben. Dabei wurde unterstellt, dass das Gebäude vollständig über Heizkörper beheizt wird und die Vorlauftemperatur im komplett sanierten Zustand bei maximal 55 °C liegt. Als Wärmepumpe wurde ein modernes und vergleichsweise effizientes Modell mit einem COP_{A2W35} von 4,0 in den Simulationen angesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die erste Wahl bei der Sanierungsentscheidung immer die Dämmung der Gebäudehülle sein sollte, da sie zu signifikanten Endenergie- und Treibhausgaseinsparungen führen. Wenn dies kurzfristig nicht umsetzbar ist, stehen anlagentechnische Möglichkeiten zur Verfügung, bis der nächste Schritt bei der Gebäudedämmung angegangen werden kann.

Im Einfamilienhaus erreicht die Außenluft-Wärmepumpe bei den bivalenten Varianten hohe Jahresarbeitszahlen von ca. 3,5 – weitgehend unabhängig vom Dämmniveau und auch die verschiedenen Hydrauliken besitzen keine großen Auswirkungen auf die Jahresarbeitszahl. Bei einer monoenergetischen Versorgung inklusive Heizstab spielt der Dämmstandard der Gebäudehülle bei der gewählten Dimensionierung dagegen eine wichtige Rolle. Je besser die Gebäudehülle gedämmt ist, desto seltener wird der Heizstab benötigt und umso effizienter ist das Gesamtsystem. Wenn Dach und Kellerdecke gedämmt und die Fenster erneuert wurden (Teilsanierungszustand TS2, monoenergetisch) kann die Wärmepumpe gute Jahresarbeitszahlen von über 3,1 erreichen. Bei den monoenergetischen Varianten sind ein getrennter Puffer- und Trinkwasserspeicher effizienter als ein Kombispeicher.

Im unsanierten Zustand erreicht eine bivalente Wärmepumpe im Vergleich zum alleinigen Betrieb des alten Ölkessels zumindest eine Halbierung der Treibhausgas-Emissionen. Je besser die Gebäudehülle gedämmt ist, desto höher fällt die Einsparung im Vergleich zur Situation ohne Wärmepumpe aus. Bei monoenergetischen Varianten steigt die Effizienz mit besserer Gebäudehülle deutlich und ab Teilsanierung TS2 kann sie etwa gleichwertig oder der bivalenten Variante sogar überlegen sein. Dann liegt die Treibhausgas-Emissionen der Wärmepumpe nur noch bei ca. 40 % des alten Ölkessels ohne Wärmepumpe (bei identischem Standard der Gebäudehülle).

Bei der Untersuchung des Einflusses der Vorlauftemperatur ergeben sich Verbesserungen der Jahresarbeitszahl um etwa 0,1 pro 5 K Temperaturreduzierung bei der Vorlauftemperatur, wenn Dach, Fenster und Kellerdecke gedämmt sind oder 0,07 K je 5 K Temperaturreduzierung, wenn nur Dach und Fenster gedämmt/getauscht wurden.



Photovoltaik-Anlagen auf dem Gebäude können einen Teil des für den Betrieb der Wärmepumpe benötigten elektrischen Stroms liefern. Vor diesem Hintergrund wurde der Einfluss unterschiedlicher Regelstrategien bei der Nutzung des PV-Stroms verglichen:

- ohne Optimierung,
- Warmwasserbereitung nur tagsüber,
- eine Taganhebung von 10 K im Pufferspeicher und um 2 K bei der Raumtemperatur, kombiniert mit Warmwasserbereitung nur tagsüber sowie
- eine intelligente Anhebung der Speichertemperaturen mit der SG-Ready-Schnittstelle in Abhängigkeit von den vorhandenen PV-Überschüssen.

Auch hier zeigte sich, dass die Autarkiegrade, also der Teil des benötigten Stroms im Gebäude (inklusive Haushaltsstrom), der von der PV-Anlage gedeckt werden kann, von maximal 20 % im unsanierten Originalzustand auf 39 % beim komplett sanierten Gebäude ansteigen. Außerdem steigen die Autarkiegrade bei besser gedämmter Gebäudehülle. Die Taganhebung kann, wenn überhaupt, nur beim komplett modernisierten Gebäude empfohlen werden, da die Wärmeverluste bei Teilsanierung zu hoch wären und der Netzbezug ansteigen würde. Wird beim Einfamilienhaus die PV-Anlage über die normalerweise angesetzten 8 kW_P hinaus auf ca. 1 kW_P pro MWh Stromverbrauch vergrößert, so erhöht sich der Autarkiegrad nur geringfügig. Generell trägt eine PV-Anlage dazu bei, die Treibhausgasemissionen des Systems zu reduzieren, insbesondere wenn sie intelligent gesteuert wird.

Eine Vergrößerung des Puffer- oder Trinkwasserspeichervolumens verringert den Netzbezug bei den zwei untersuchten PV-Anlagengrößen (8 bzw. 16 kW_P) nur um 4 bis 6 %, so dass insgesamt die Speichergröße in der hier untersuchten Spanne zwischen 300 und 1.200 Litern je Speicher nur einen geringen Einfluss auf den Netzbezug und den Autarkiegrad besitzen (eine Verkleinerung der Speicher wurde weiter unten betrachtet).

Wie zu erwarten schneiden beim Vergleich von Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen Letztere bei der Jahresarbeitszahl besser ab. Je schlechter das Gebäude gedämmt ist, desto größer fällt der Effizienzvorsprung der Wärmequelle Erdreich aus. Erdreich-Wärmepumpen würden sich aus Effizienzgründen somit besonders bei un- oder teilsanierten Gebäuden anbieten, allerdings kann das Erdreich nicht überall als Wärmequelle genutzt werden.

Betrachtet man den Einfluss einer Nachtabsenkung auf die Jahresarbeitszahl und den Stromverbrauch, so ergeben sich bei 2 K Absenkung im teilsanierten Zustand (TS1, Dach und Fenster) und 1 K beim komplett sanierten Gebäude die deutlichsten Verbesserungen. Wird noch weiter abgesenkt, sind kaum noch Effizienzfortschritte zu erwarten.

Beim Mehrfamilienhaus spielt die Warmwasserbereitung aufgrund der normalerweise benötigten hohen Temperaturen von 60 °C eine wichtige Rolle beim Einsatz von Wärmepumpen. Hier wurden je eine monound bivalente Variante in vier Sanierungszuständen sowie je eine zentrale und eine dezentrale Variante für die Warmwasserbereitung betrachtet.

Wie auch schon beim Einfamilienhaus spielt hier die Dämmung der Gebäudehülle eine entscheidende Rolle auf die Energieeffizienz. Innerhalb eines Sanierungszustandes erreichte die bivalente Wärmepumpe mit zentraler Warmwasserbereitung (BZ1) immer die höchsten Jahresarbeitszahlen, die im Bereich von 3,0 lagen. Damit bietet sich die bivalente Wärmepumpe auch für schlechtere energetische Standards an. Geringere Treibhausgasemissionen werden jedoch mit dem monoenergetischen Betrieb bei dezentraler Warmwasserbereitung über Frischwasserstationen in den Wohnungen erreicht (MD1), da bei dieser Kombination geringere Warmwassertemperaturen bereitgestellt und die Verluste durch die Warmwasserzirkulation reduziert werden. Bei monoenergetischem Betrieb und zentraler Warmwasserbereitung (MZ1) spielt bei der gewählten Dimensionierung der Wärmepumpe auf den komplett sanierten Zustand der energetische Standard der Gebäudehülle eine wichtige Rolle, denn sie erreicht erst bei besser gedämmter Gebäudehülle vergleichbare Jahresarbeitszahlen wie bei der bivalenten Variante BZ1. Die dezentrale Warmwasserbereitung mit



direktelektrischen Boilern in den Wohnungen in Kombination mit einer monoenergetischen Betriebsweise der Wärmepumpe (MD2) schneidet aufgrund der hohen Stromverbräuche für die Warmwasserbereitung im Gesamtsystem sowohl bei Jahresarbeitszahl als auch bei den Treibhausgasemissionen immer deutlich schlechter ab, als die anderen untersuchten Varianten und ist aus diesem Grund nicht empfehlenswert.

Im Mehrfamilienhaus sind die verfügbaren Dachflächen für PV-Anlagen in der Regel stärker begrenzt als beim Einfamilienhaus. Mit einer PV-Anlage von 14 kW_P konnten im Gebäude mit zentraler Warmwasserbereitung und monoenergetischer Betriebsweise (MZ1) ohne weitere Optimierung Autarkiegrade von 7 % erreicht werden. Mit einer intelligenten Regelung konnten die Autarkiegrade auf 9% im unsanierten Zustand und auf 13 % beim komplett sanierten Gebäude erhöht werden. Die Auswirkungen der intelligenten Regelung sind somit geringer als beim Einfamilienhaus. Ist die PV-Anlage 36 kWp groß, so kann beim komplett sanierten Gebäude der Autarkiegrad auf bis zu 32 % erhöht werden. Allerdings würde für diese Anlagengröße das Dach des Modellgebäudes nicht ausreichen (weitere Flächen könnten an der Fassade oder auf Nebengebäuden genutzt werden). Wird die Wärmepumpe monoenergetisch betrieben und die Warmwasserbereitung erfolgt über Elektroboiler in den Wohnungen direktelektrisch (MD2), dann werden mit einer 14 kW_P PV-Anlage Autarkiegrade von ca. 5 % ohne und bis zu 10 % mit Optimierung erreicht – die Ergebnisse liegen somit noch niedriger als bei MZ1. Würden die Elektroboiler in ihrem Volumen verdoppelt (von 150 auf 300 l, also eine für Mehrfamilienhaus-Wohnungen eher unübliche Größe), so könnte der Autarkiegrad von 10 auf 28 % gesteigert werden. Beim Vergleich von MZ1 und MD2 zeigt sich, dass die dezentrale direktelektrische Variante bei gleicher PV-Anlagengröße bei den Treibhausgasemissionen immer schlechter abschneidet, so dass sie aus ökologischer Sicht nicht empfohlen werden kann.

Insgesamt zeigt sich, dass für beide untersuchten Modellgebäude Lösungen entwickelt werden konnten, wie abhängig vom aktuellen Zustand der Gebäudehülle bereits ohne vorangegangene vollständige Sanierung der Gebäudehülle auf eine Wärmepumpe umgerüstet werden kann, wenn dies in eine langfristige Sanierungsstrategie eingebettet wird. Dafür wurde die Wärmepumpe auf den zukünftigen sanierten Zustand des Gebäudes ausgelegt. Würden die weiteren Sanierungsschritte nicht umgesetzt, würde dies langfristig höhere Energieverbräuche, höhere Kosten für den Eigentümer und höhere Treibhausgasemissionen bedeuten. Denn die Wärmedämmung zur Reduktion des Energiebedarfs und der Umstieg auf ein regeneratives Heizungssystem müssen beide umgesetzt werden.

Bewertung von Wärmepumpen im Rahmen der elektrischen Energieversorgung

Weiterhin wurde in diesem Bericht der Einfluss von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden auf die elektrische Energieversorgung in Deutschland und die im Gesamtsystem erreichbaren Treibhausgaseinsparungen untersucht. Dabei spielte die Nutzung des zeitlich schwankenden Angebots an Solar- und insbesondere Windstrom eine wichtige Rolle. Windstrom besitzt für die Wärmeversorgung von Gebäuden eine große Bedeutung, da die Erzeugung im Jahresverlauf gut mit dem Wärmebedarf korrespondiert.

Betrachtet wurde das Jahr 2030 mit dem bis dahin von der Bundesregierung angestrebte Ausbau an erneuerbarer Stromerzeugung. Die energetischen Standards der Gebäudehülle orientieren sich an den bis 2030 erreichbaren Fortschritten im Vergleich zur aktuellen Situation und unterstellen keine weitgehende energetische Modernisierung des Gesamtbestandes (für 25 % der Gebäude wurden eine nicht modernisierte Gebäudehülle angesetzt, bei 50 % eine Teilmodernisierung, Rest Vollmodernisierung ohne/mit Lüftungswärmerückgewinnung). Damit ergab sich ein mittlerer Wärmeverbrauch der Gebäude für Heizung, Warmwasserbereitung und Verteilverluste von 136 kWh/(m²·a). Für die Heizungsmodernisierung wurde für 2030 ein Anteil von 15 % der Anlagen des Gesamtbestandes betrachtet, die bis zu diesem Zeitpunkt aufgrund bisheriger Sanierungsraten in etwa ausgetauscht werden. Diese Anlagen wurden entweder als Referenzsystem mit Ölbzw. Erdgaskessel oder als mono- bzw. bivalente Wärmepumpen berechnet. Bei den Wärmepumpen wurde eine Variante mit hohem COP (4,0) und eine mit eher niedrigem Wert (3,0) untersucht.



Das verwendete Simulationsmodell berechnet mit stündlicher Auflösung das regional verteilte Angebot an Solar- und Windstrom, den Einsatz fossiler Erdgas-Kraftwerke, wenn die erneuerbare Erzeugung nicht ausreicht, sowie den Wärmebedarf der Wohngebäude für unterschiedliche Standorte in Deutschland (hier wurden drei Standorte verwendet). Über vereinfachte Ansätze wurden die Flexibilitätsoptionen im elektrischen Energiesystem sowie nicht nutzbare Stromüberschüsse berücksichtigt. Für die Regelung der Wärmepumpen wurde unterstellt, dass diese bei aktuell auftretenden Solar- und Windstromüberschüssen im elektrischen Energiesystem auch Pufferspeicher in den Gebäuden in begrenztem Umfang aufheizen können und somit eine Optimierung auf das Angebot an erneuerbaren Energien erfolgt.

Die Basisanalysen betrachten bei den Referenzvarianten mit fossilen Heizkesseln und Wärmepumpen für das Jahr 2030 den gleichen Ausbauzustand bei Solar- und Windstrom. Dabei ergaben sich deutliche Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen bei den Varianten mit Wärmepumpen, unabhängig davon ob diese monooder bivalent betrieben werden. Ein Unterschied ergab sich aber in Abhängigkeit der Effizienz der Wärmepumpe. Ist das Referenzsystem Heizöl, so erreicht die effizientere Wärmepumpe im monovalenten Betrieb Treibhausgaseinsparungen von 62 %, als bivalente Anlage mit einem Heizöl-Spitzenlastkessel (SLK) liegen die Einsparungen bei 56 %. Wird mit Erdgas verglichen, so liegt die Emissionsminderung bei maximal 49 %. Bei der weniger effizienten Wärmepumpe weißt die bivalente Variante mit Wärmepumpe und Erdgas-SLK niedrigere Treibhausgasemissionen auf als die monovalente Variante.

In einer weiteren Betrachtung wurde unterstellt, dass der Zubau bei Solar- und Windenergie zum Teil "Hand in Hand" mit dem Zubau der Wärmepumpen erfolgt, so dass bei Einsatz von Wärmepumpenheizungen im Gesamtsystem mehr regenerativer Strom zur Verfügung steht als bei Einsatz von Heizkesseln. Durch diese Betrachtungsweise ergeben sich noch größere Treibhausgasminderungen für die Wärmepumpenheizungen (63 bis 82 % im Vergleich zu Heizöl bzw. 53 bis 76 % im Vergleich zu Erdgas) und mono- und bivalente Wärmepumpen sind weiterhin weitgehend gleichwertig.

Da die Bewertung der Stromerzeugung eine wichtige Rolle für die sich ergebende Treibhausgasminderung spielt, wurde das bisher dargestellte, auf einer Simulation der Wirkung der Wärmepumpen im gesamten elektrischen Energiesystems basierende Verfahren mit dem Pauschalansatz eines mittleren jährlichen Strom-Emissionsfaktors für das Jahr 2030 verglichen, so wie er ähnlich in aktuell gängigen Bilanzverfahren eingesetzt wird. Mit diesem zweiten Ansatz schnitten monovalente Wärmepumpen deutlich günstiger ab (etwa Halbierung der Emissionen), bei bivalenten Systemen zeigten sich dagegen nur geringe Veränderungen. Die Bewertung der Treibhausgasemissionen der Heizsysteme hängt offenbar vom Kontext ab. Die Gründe und Konsequenzen werden im Folgenden näher erläutert:

Das Ergebnis, dass bei der Simulation des Gesamtsystems die bivalenten Varianten trotz des Brennstoffverbrauchs im Gebäude fast gleichwertig oder z. T. sogar günstiger abschneiden als die monovalente Variante, die keine fossilen Brennstoffe (lokal) einsetzt, liegt darin begründet, dass auch bei monovalenten Wärmepumpen ein Brennstoffverbrauch in den Kraftwerken entsteht, wenn die Solar- und Windstromerzeugung nicht ausreicht. Dieser Brennstoffverbrauch und die damit verbunden Emissionen werden in der traditionellen (jährlichen) Bilanzierung mit pauschalem Emissionsfaktor auf alle Stromverbraucher verteilt und nicht dem eigentlichen Verursacher, also den monovalenten Wärmepumpen, zugewiesen. Somit scheint der pauschale Bewertungsansatz für den Vergleich von mono- und bivalenten Wärmepumpen nicht geeignet.

Wendet man die beiden Bilanzierungsansätze (Simulation des Gesamtsystems bzw. mittlerer jährlicher Emissionsfaktoren) im Vergleich auf eine direktelektrische Beheizung der Gebäude an, so zeigen sich die Unterschiede besonders deutlich. Während die direktelektrische Beheizung bei Jahresmittelwerten für die Emissionsfaktoren deutlich besser abschneidet als das Referenzsystem (Erdgas oder Heizöl), zeigt sich bei Bewertung im Gesamtsystem das gegenteilige Ergebnis: Hier ergeben sich für die direktelektrische Wärmeerzeuger deutlich höhere Emissionen als beim als beim Referenzsystem. Diese Beispielbetrachtung zeigt, dass der pauschale Ansatz mittlerer Emissionsfaktoren bei der Stromerzeugung für die Bewertung elektrischer Wärmeversorgungssysteme zu gravierenden Fehleinschätzungen bezüglich der tatsächlichen Auswirkungen und des Nutzens dieser Systeme bei der Reduktion des Brennstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen führen



kann. Auf eine differenzierte Analyse und Bewertung der tatsächlichen Auswirkungen dieser Form der Wärmeerzeugung im Gesamtsystem kann daher nicht verzichtet werden.

Schließlich wurde der Einfluss der zur Pufferung von Solar- und Windstromüberschüssen eingesetzten Wärmespeicher in den Gebäuden ausgewertet. Eine Halbierung der Speichervolumina von 300 auf 150 Liter in den Ein-/Zweifamilienhäusern und von 800 auf 400 Litern in den Mehrfamilienhäusern führte zu 9 % höheren Emissionen, ein Verzicht auf die Speicher ließ die Emissionen um 23 % ansteigen. Somit kann der Wärmespeicherung eine relevante Rolle bei der Optimierung der Nutzung erneuerbarer Energie im Gebäude zugemessen werden. Damit diese Potenziale genutzt werden können, müssten zukünftig zeitabhängige Strompreise bzw. Steuersignale angeboten werden. Für die Nutzung von selbst erzeugtem PV-Strom kann eine angepasste Regelstrategie aber bereits heute eingesetzt werden. Hier stellen Wärmespeicher kostengünstigere Speichermöglichkeiten zur Verfügung als elektrische Energiespeicher.

Wärmepumpen im individuellen Sanierungsfahrplan

Der individuelle Sanierungsfahrplan (iSFP), der im Rahmen der Bundesförderung Energieeffiziente Gebäude (BEG) gefördert wird, bringt geeignete Schritte für die Gebäudesanierung in einen sinnvollen zeitlichen Zusammenhang. Er stellt eine Säule des in diesem Bericht untersuchten Vorgehens mit vorgezogenem Heizungsaustausch vor einer umfassenden Sanierung der Gebäudehülle dar. Im iSFP können die Maßnahmen geplant werden, die nach dem Einbau einer Wärmepumpe in ein teilsaniertes Gebäude folgen sollen und müssen damit der Energieverbrauch und damit auch die Treibhausgasemissionen weiter reduziert werden. Allerdings werden im iSFP die Heizflächen bisher noch nicht generell berücksichtigt. Deswegen wird vorgeschlagen, die vorhandenen Heizflächen im Rahmen der Gebäudebegehung mit aufzunehmen und im iSFP zu dokumentieren, damit die maximal übertragbare Heizleistung bei einer reduzierten Vorlauftemperatur von 55 °C bekannt sind. Generell ist zu empfehlen, vereinfachte praxisorientierte Verfahren zur raumweisen Ermittlung der Heizleistung und Auslegung der Heizflächen zu entwickeln.



1 Einleitung

Zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudebestand müssen die Energieverbräuche der Gebäude durch energetische Modernisierung minimiert und durch den Umstieg von fossilen auf regenerative Energieträger dekarbonisiert werden [Langfristszenarien 2021]. Parallel zur Bundesebene hat vor diesem Hintergrund die Hessische Landesregierung mit der Novelle des Hessischen Energiegesetzes im Jahr 2022 die klimapolitischen Ziele überarbeitet und strebt an, bis zum Jahr 2045 den Endenergieverbrauch von Strom und Wärme zu 100 % aus erneuerbaren Quellen zu decken [HEG 2022]. Zusätzlich soll u. a. die jährliche energetische Sanierungsquote im Gebäudebestand auf 2,5 bis 3 % erhöht und bei Windenergie 2 % und bei Photovoltaik 1 % der Landesfläche genutzt werden.

Bei der Dekarbonisierung des Wärmebedarfs stellen Wärmepumpen eine wichtige Technologie zur Verfügung, um regenerativen Strom – der im Winter hauptsächlich mit Windenergie erneuerbar produziert werden kann – für die Beheizung von Gebäuden effizient zu nutzen [Diefenbach et al. 2019]. Vor diesem Hintergrund ist geplant, dass ab 2024 Heizungsanlagen zu 65 % mit erneuerbaren Energien betrieben werden sollen [GEG 2023]. Wärmepumpen können diese Anforderungen erfüllen und bilden einen wichtigen Baustein im Konzept der Bundesregierung.

Zwar dominieren Wärmepumpen in Neubauten (in Hessen stellten sie 2021 54 % bei den Hauptwärmeerzeugern [HMWEVW 2022]), im Gesamtbestand liegt ihr Anteil auf Bundesebene bei den Neuinstallationen nur bei 17 % [BMWK 2022]. Immerhin ist hier ein starker Anstieg bei der Heizungsmodernisierung zu verzeichnen, denn in früheren Jahren spielten Wärmepumpen auch hier kaum eine Rolle (vgl. [Cischinsky, Diefenbach 2018, Kap. 3.3.2]). Ab 2024 ist nun gemäß den Zielen der Bundesregierung der Einbau von 500.000 Wärmepumpen pro Jahr geplant, der Großteil in Bestandsgebäuden [BMWK 2022].

In Altbauten bestehen aber Hemmnisse bei der Installation von Wärmepumpen. Die Eignung von älteren Gebäuden abhängig vom Sanierungszustand, die optimale Hydraulik und Wärmeübergabe sowie die Anforderungen für einen effizienten Betrieb sind nicht umfassend geklärt und teilweise umstritten. In einem Gerichtsurteil [OLG Rostock 2016] wurde ein Heizungsbauer zur Demontage und Rückerstattung der Kosten einer Wärmepumpenheizung in einem ungedämmten Einfamilienhaus Baujahr 1926/27 mit Gussradiatoren verurteilt, da sich die versprochene Energiekosteneinsparung nicht eingestellt hat. Der Einbau einer Wärmepumpe in ein solches Gebäude stellte nach Auffassung des Gerichts ein Mangel dar. Somit bestehen neben technischen Fragen und juristische Unsicherheiten.

Grundsätzlich ist zu empfehlen, dass das Gebäude zuerst energetisch modernisiert wird, bevor eine Wärmepumpenanlage eingebaut wird. Durch dieses "Efficiency First" wird der Energiebedarf minimiert und die Wärmepumpe kann auf den geringeren Wärmebedarf dimensioniert werden, so dass sie kostengünstiger und
nach zukünftigen Sanierungsmaßnahmen nicht überdimensioniert ist, was langfristig zu einem ineffizienten
Betrieb mit höherem Energieverbrauch und höheren Energiekosten führen würde.

Allerdings besitzen Komponenten der Anlagentechnik andere Erneuerungszyklen als die Bauteile der Gebäudehülle, d. h. sie müssen häufiger ausgetauscht werden. Damit stehen Hausbesitzer öfters vor der Frage, welches Heizsystem sie einbauen sollen, als vor der Frage ob z. B. die Fassade erneuert und gedämmt werden muss. Gerade Gebäude der 1980er und 1990er Jahre haben oft noch eine intakte Gebäudehülle, gleichzeitig aber ein stark veraltetes Heizungssystem.

Vor diesem Hintergrund sollen in diesem Zwischenbericht Konzepte für un- oder teilsanierte Bestandsgebäude untersucht werden, wenn keine vollständige Sanierung der Hülle aktuell möglich ist. Wesentliche Ansätze sind die Einbettung in einen Sanierungsfahrplan und bivalente Anlagen. Bei der Einbettung in einen individuellen Sanierungsfahrplan wird untersucht, welche Schritte bei der Sanierung der Gebäudehülle in nächster Zeit umsetzbar sind und die Wärmepumpe wird dann auf den zukünftigen Endzustand dimensioniert, so dass die Dekarbonisierung des Heizungssystems sofort angegangen werden kann. Die bivalenten Konzepte besitzen weiterhin einen (alten) fossilen Spitzenlasterzeuger und setzen die Wärmepumpe in ihrem



optimalen Betriebsbereich ein, so dass ein wesentlicher Teil des Wärmebedarfs effizient von ihr zur Verfügung gestellt werden kann.

Bei den Untersuchungen wurden einerseits die Perspektive der Gebäudeeigentümer bzw. des Einzelgebäudes zugrunde gelegt, andererseits auch die möglichen Einsparungen unter Berücksichtigung der regenerativen Energieerzeugung im Energiesystem im Jahr 2030 betrachtet.

Der vorliegende Bericht dokumentiert einen Zwischenstand der Untersuchungen des IWU zum Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden und wird bis zum Projektende noch ergänzt bzw. erweitert.

In Kapitel 2 wird der Stand der Literatur zum Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden zusammengefasst, in Kapitel 3 werden die Ergebnisse von Simulationen zum Einsatz von Wärmepumpen in Beispielgebäuden bei Ein- und Mehrfamilienhäusern dokumentiert. Kapitel 4 befasst sich mit der Bewertung von Wärmepumpen für Bestandsgebäude im Rahmen der elektrischen Energieversorgung. In einem Überblick auf den individuellen Sanierungsfahrplan wird in Kapitel 5 die Einbindung der Wärmepumpe in die zukünftig geplanten Sanierungsschritte beschrieben.

Die bisherigen Projektergebnisse sind auch in die Erstellung einer separaten Informationsbroschüre eingeflossen, die sich aktuell noch im Entwurfsstadium befindet (Information für Hauseigentümer: Wärmepumpen für bestehende Wohngebäude, Institut Wohnen und Umwelt, Stand März 2023).

Parallel zu den hier dokumentierten Untersuchungen wird im Rahmen dieses Projekts auch eine Felduntersuchung zu Wärmepumpen in Bestandsgebäuden in Hessen durchgeführt, bei der die Effizienz der Anlagen untersucht wird. Die Ergebnisse der Felduntersuchung werden – wie auch die ökonomischen Untersuchungen – im Endbericht dokumentiert werden.



2 Literaturrecherche zum Wärmepumpeneinsatz in Bestandsgebäuden

In diesem Kapitel werden wichtige Erkenntnisse aus der Literatur zum Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden zusammengefasst. Die Darstellung fokussiert sich auf den deutschsprachigen Raum, kann aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

2.1 Voraussetzungen für den Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden

In der Vergangenheit wurde der Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden nur dann empfohlen, wenn das Gebäude vollständig energetisch modernisiert wurde und möglichst eine Flächenheizung zur Wärmeübergabe vorhanden ist. Zentrale Einflussgröße ist hier die Vorlauftemperatur im Heizkreis. Mittlerweile können Wärmepumpen auch bei höheren Vorlauftemperaturen, wie sie für eine typische Wärmeabgabe durch Heizkörper erforderlich ist, noch eine gute Effizienz erreichen, auch wenn die Effizienz systembedingt mit zunehmender Differenz zwischen Senken- und Quellentemperatur abnimmt.

Über die maximalen Vorlauftemperaturen, bis zu denen ein Einsatz in Bestandsgebäuden empfohlen wird, gibt es unterschiedliche Angaben. Aus dem Feldtest des Fraunhofer-ISE wurde eine Einsatzgrenze von ca. 48 °C abgeleitet [Günter et al. 2020] – hier wird die verbrauchsgewichtete mittlere Systemtemperatur angegeben und somit nicht die maximale Vorlauftemperatur, wie bei den folgenden Angaben. Die Studie zu NT-Ready [Mellwig et al. 2021] nennt 55 °C ("darüber weniger sinnvoll") und auch Hersteller empfehlen Vorlauftemperaturen bis 55 °C (z. B. [Weishaupt 2015]). Vergleichbare Empfehlungen wurden auch in Österreich publiziert [Schlader 2014]. In [VdZ 2023] wird dagegen eine obere Grenze, die den Einsatz von Wärmepumpen ausschließt, von ca. 60 °C genannt. [Seifert 2023] empfiehlt den Einsatz bis zu Vorlauftemperaturen 48 °C, hält bei hohen Öl-/Gaspreisen im Vergleich zum Strompreis noch 55 °C ökologisch und ökonomisch für vertretbar. Es herrscht somit eine gewisse Bandbreite an Empfehlungen bezüglich der maximalen Vorlauftemperatur. Gleichzeitig empfiehlt Miara in [Tagesschau 2022] einen maximalen Heizwärmebedarf von 150 kWh/m²-a. In [DUH 2021] wird generell eine Vollsanierung des Gebäudes vor Einbau einer Wärmepumpe empfohlen. Ist dies nicht möglich, sollte der Heizwärmebedarf durch Teilsanierungen auf ca. 120 kWh/(m²-a) reduziert werden. Dennoch wird die maximale Vorlauftemperatur bei Norm-Auslegungstemperatur meist als entscheidendes Kriterium für den Einsatz einer Wärmepumpe genannt.

Für die Höhe der Vorlauftemperatur ist die Dimensionierung der Heizflächen verantwortlich, die in jedem Gebäude unterschiedlich sein kann. Zudem hat sich die nötige Vorlauftemperatur durch ggf. bereits durchgeführte (Teil-)Sanierungsmaßnahmen verändert. In [Jagnow 2004] wird eine Untersuchung von 31 Ein- und 14 Mehrfamilienhäusern aus dem Jahr 2003 zitiert, bei der u. a. die Überdimensionierung der Heizkörper in den Gebäuden detailliert bestimmt wurde. Bei beiden Haustypen lag die Überdimensionierung ca. bei dem Faktor 2 (Spanne zwischen 1,2 und 4,9).

Die Bedeutung der Vorlauftemperatur für die Effizienz von Wärmepumpen wurde u. a. in [Mellwig et al. 2021] untersucht. Auf Basis von je zwei Einfamilien- und zwei Mehrfamilienhäusern wurden die tatsächlich vorhandenen Heizflächen erhoben und die möglichen minimalen Vorlauftemperaturen abhängig vom energetischen Standard betrachtet. Dabei wurde das Ziel einer Vorlauftemperatur von 55 °C bei dem einem Einfamilienhaus entweder durch eine Teilsanierung oder den Austausch der fünf ungünstigsten Heizkörper erreicht, beim anderen mussten die fünf ungünstigsten Heizkörper getauscht und eine Dämmung der gesamten Hüllfläche aufgebracht werden. Bei den beiden Mehrfamilienhäusern war eine weitgehende Modernisierung erforderlich, kombiniert mit dem Austausch von einem Drittel der Heizkörper.

Die maximale Vorlauftemperatur wird in [Holm et al. 2023] ebenfalls in Abhängigkeit vom Grad der Überdimensionierung der Heizkörper dargestellt. 120 % Überdimensionierung erlauben eine Absenkung der Vorlauftemperatur von 70 °C auf 60 °C, mit 220 % Überdimensionierung können Vorlauftemperaturen von 50 °C unterschritten werden. Ob das Platzangebot für einen Austausch und die Vergrößerung des Heizkörpers vor



Ort ausreicht, ist dann ein wichtiger Faktor. Weiterhin muss der Volumenstrom in den Heizkreisen beachtet werden, damit die maximale Strömungsgeschwindigkeit in den Rohrleitungen nicht überschritten wird, wenn aufgrund der geringeren Temperaturspreizung der Volumenstrom ansteigt. Für die Anbindeleitungen von 10 und 12 mm wird bei Normheizlast die maximale Fließgeschwindigkeit in Bestandsgebäuden in der Regel überschritten, ab 15 mm sollten die Grenzwerte bei allen energetischen Standards eingehalten werden. Da dieser Volumenstrom nur bei Normheizlast auftritt, ist die Überschreitung der Strömungsgeschwindigkeit kein Ausschlusskriterium für den Einsatz von Wärmepumpen.

Die Bedeutung einer Kopplung von Wärmepumpen und Wärmeschutz wird von [Holm et al. 2023] herausgestellt, da sich Synergien im Gebäude (Senkung des Wärmebedarfs und Steigerung der Wärmepumpen-Effizienz), bei den Energiekosten (auch zur Abpufferung von Energiepreissteigerungen) sowie im Energiesystem ergeben (Senkung der elektrischen Last, geringerer Zubau erneuerbarer Energien erforderlich). In verschiedenen Modellrechnungen wurden dort die Jahresarbeitszahl und die Energiekosten in Abhängigkeit der Effizienzklasse des Gebäudes untersucht. Beim Einfamilienhaus ergaben sich mit Energiekostenansätzen aus dem Jahr 2022 ab Effizienzklasse G höhere Heizkosten mit einer Wärmepumpe als bei einem Gaskessel, bei einer Wohnung in einem Mehrfamilienhaus war die Wärmepumpe immer günstiger. Werden aber die mittleren Energiekosten der Jahre 2013-2021 berücksichtigt, so konnten höchstens die besten Effizienzklassen (A+, A) mit der Gasheizung konkurrieren.

2.2 Felduntersuchungen

2.2.1 WPSmart im Bestand und LowEx-Bestand

In den letzten Jahren wurden auch Feldtest von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden durchgeführt. In Deutschland ist hier vor allem das Projekt WPSmart im Bestand zu nennen [Günther et al. 2020]. Hier wurden für die Jahre 2018/19 insgesamt 53 Bestandsgebäude bezüglich ihrer Effizienz analysiert.

Es wurden 29 Gebäude mit Außenluft-Wärmepumpen untersucht, die für die Beheizung und Warmwasserbereitung gemeinsam eingesetzt wurden. Die gemessenen Jahresarbeitszahlen ("JAZ3" inklusive Heizstab) lagen zwischen 2,5 und 4,6 – im Mittel wurden eine JAZ von 3,1 erreicht (Bild 1 rechts). Zusätzlich wurden 12 Erdreich-Wärmepumpen vermessen, deren JAZ zwischen 1,8 und 4,7 lagen. Im Mittel wurde hier ein Wert von 4,0 erreicht.

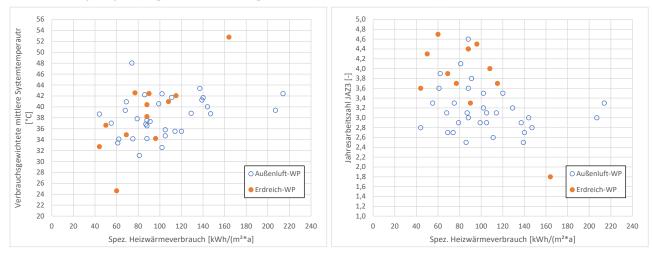
Der Zusammenhang von Heizwärmeverbrauch und mittlerer Systemtemperatur (gewichtete Mitteltemperatur für Heizung und Warmwasserbereitung) sowie der Jahresarbeitszahl ist in Bild 1 zu sehen. Im linken Bild sind die gewichteten mittleren Systemtemperaturen in Abhängigkeit des Verbrauchskennwertes dargestellt. Bei den Erdreich-Wärmepumpen (orangene Punkte) fallen zwei Gebäude auf, die sehr hohe bzw. sehr niedrige Systemtemperaturen aufweisen. Das Gebäude mit nur 24,6 °C Systemtemperatur besitzt eine Fußbodenheizung und ist komplett modernisiert. Dadurch erreicht es sehr hohe Jahresarbeitszahlen von 4,7 (Bild 1 rechts). Das Gebäude mit einem Heizwärmeverbrauch von 164 kWh/(m²·a) ist ein Mehrfamilienhaus mit vier Wohneinheiten aus dem Jahr 1989, das teilweise Heizkörper, teilweise Fußbodenheizung besitzt und bei dem eine Wärmepumpe mit vergleichsweise schlechter Leistungszahl (COP) eingesetzt wurde. Die mittlere Systemtemperatur lag bei 52,8 °C und die Jahresarbeitszahl bei 1,8. Alle anderen Erdreich-Wärmepumpen liegen in einem Bereich mit Systemtemperaturen zwischen 32 und 42 °C und Jahresarbeitszahlen zwischen 3,3 und 4,5.

Bei den Außenluft-Wärmepumpen (blaue Kreise) liegen überwiegend ähnliche Systemtemperaturen wie bei der Wärmequelle Erdreich vor, aber auch hier gibt es Ausnahmen. Das Gebäude mit 48 °C Systemtemperatur und einem Heizwärmeverbrauch von 74 kWh/(m²·a) wurde 1992 errichtet und besitzt eine bivalente Heizung mit Außenluft-Wärmepumpe und Gasbrennwertkessel sowie Heizkörper. Hier ist der Anteil der Trinkwassererwärmung am gesamten Wärmeverbrauch mit 28 % vergleichsweise hoch. Bei den Gebäuden jeweils ganz rechts mit Heizwärmeverbräuchen von 207 bzw. 214 kWh/(m²·a) handelt es sich um Vorkriegsbauten in un-



bzw. nur teilsaniertem Zustand. Beim dem einen Gebäude wurden zusammen mit dem Einbau der Wärmepumpe Gebläsekonvektoren montiert, beim anderen werden die Räume neben Heizköpern auf 35 % der Fläche mit Fußbodenheizung beheizt. Die resultierenden Jahresarbeitszahlen fallen mit 3,0 bzw. 3,3 vergleichsweise hoch aus.

Bild 1: Verbrauchsgewichtete mittlere Systemtemperaturen (links) und Jahresarbeitszahl (rechts) in Abhängigkeit des spezifischen Heizwärmeverbrauchs von 32 Außenluft- und 12 Erdreich-Wärmepumpen (eigene Auswertungen nach [Günther et al. 2020])



Die Messungen zeigten, dass die verbrauchsgewichteten mittleren Systemtemperaturen entscheidend für die Effizienz der Anlagen sind. Diese lagen bei 36,9 °C für die Außenluft-Wärmepumpen und 37,8 °C für die Erdreich-Wärmepumpen. Weitere Einflussgrößen auf die Effizienz der Anlagen waren u. a. die Norm-Leistungszahlen, die Energieverbräuche der Wärmequellenantriebe und der Anteil der Warmwasserbereitung am Gesamtwärmeverbrauch.

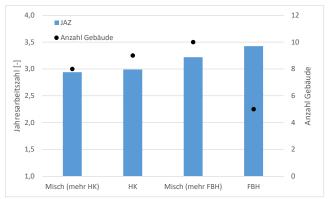
Die Heizstäbe spielten bei den vermessenen Außenluft-Wärmepumpen eine untergeordnete Rolle (ca. 1,9 % bezogen auf die Verdichterarbeit). Tendenziell wurden Heizstäbe eher bei ungeregelten Anlagen genutzt, bei Erdreich-Wärmepumpen wurde ein vorhandener Heizstab nur bei 20 % der Anlagen überhaupt genutzt, der Heizstabanteil war eher gering. Die Norm-Leistungszahlen A2/W35 bzw. B0/W35 der Wärmepumpen sind im Laufe der Zeit tendenziell angestiegen, besitzen aber bei gleichem Einbaujahr eine hohe Streuung (z. B. beim Einbaujahr 2014 zwischen 3,2 und 4,3 bei Außenluft-Wärmepumpen, wobei unterschiedliche Verdichter-Regelungen eingesetzt wurden).

Bei zahlreichen Gebäuden erfolgte die Wärmeübergabe über Fußbodenheizungen oder Mischsystemen aus Fußbodenheizung und Heizkörpern. Allerdings finden sich auch Gebäude, die ausschließlich über Heizkörper beheizt werden.



Bild 2 zeigt für die Gebäude mit Außenluft-Wärmepumpe die mittleren Jahresarbeitszahlen je nach Wärmeübergabe. Gebäude, die über ein Mischsystem aus Heizkörpern und Fußbodenheizung beheizt werden, wobei die Heizkörper überwiegen "Misch (mehr HK)" erreichen mit 2,9 die niedrigsten Jahresarbeitszahlen dicht gefolgt von den Gebäuden, die ausschließlich über Heizkörper beheizt werden "HK", die im Mittel eine JAZ von 3,0 erreichten. Überwiegt bei den Mischsystemen die Fußbodenheizung "Misch (mehr FBH)", so wurde eine JAZ von 3,2 erreicht und reine Fußbodenheizungen "FBH" lagen bei 3,4. Zusätzlich ist in Bild 2 die Anzahl der Gebäude mit angegeben, die in die Mittelwertbildung eingegangen sind. Die Auswertung zeigt, dass im Mittel die Differenz der

Bild 2: Mittlere Jahresarbeitszahlen der Gebäude mit Außenluft-Wärmepumpe in Abhängigkeit der Wärmeübergabe (eigene Auswertung nach [Günther et al. 2020])



JAZ zwischen Gebäuden mit ausschließlich Heizkörpern und solche mit ausschließlich Fußbodenheizung bei 0,4 lag. Somit zeigt sich ein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Heizsystemen (entsprechend auch bei den Heizkreistemperaturen). Dieser Unterschied ist jedoch nicht so groß, dass Heizkörper als Wärmeübergabe bei Bestandsgebäuden mit Wärmepumpen nicht in Frage kommen würden. Die Unterschiede der Leistungszahlen (COP bzw. SCOP) der verschiedenen Wärmepumpen ist größer als der Einfluss durch die Wärmeabgabe, sodass ungünstige Randbedingungen durch die Auswahl der Wärmepumpen teilweise kompensiert werden können.

Insgesamt zeigt die Untersuchung von [Günther et al. 2020], dass neben der energetischen Qualität des Gebäudes (nicht das Baujahr) vor allem die Wärmeübergabe, d. h. Fußbodenheizung, Heizkörper oder spezielle Wärmepumpen-Heizkörper für die Effizienz verantwortlich sind. Zusätzlich – das wird auch in der Studie betont – spielen auch die Parametrierung und Überwachung der Anlage eine wichtige Rolle.

Im Verbundvorhaben LowEx im Bestand [Bongs et al. 2022] wurden neben konzeptionellen Untersuchungen auch einige Mehrfamilienhäuser messtechnisch untersucht und ausgewertet. Zum Zeitpunkt der Erstellung des Endberichts lag jedoch nur bei wenigen Projekten Messergebnisse vor, so dass hier keine Ergebnisse einer größeren Auswertung zitiert werden können.

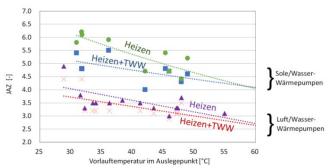


2.2.2 Feldmessungen in der Schweiz

In der Schweiz wurde eine Reihe von Wärmepumpen über mehrere Jahre messtechnisch untersucht, darunter auch 21 Anlagen in Bestandsgebäuden, von denen aber nur 5 Gebäude ausschließlich über Heizkörper beheizt werden [Berthold et al. 2022].

In diesem Feldtest wurden auch die Jahresarbeitszahlen in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur ausgewertet, siehe Bild 3 [Berthold et al. 2020]. Bei den Außenluft-Wärmepumpen ergab sich bei 35 °C Vorlauftemperatur im Auslegungsfall eine Jahresarbeitszahl von 3,55 und ein Absinken um 0,18 Punkte bei der JAZ je 5 K Anstieg der Vorlauftemperatur, so dass sich bei 55 °C Vorlauftemperatur eine JAZ von 2,8 ergab. Bei Erdreichwärmepumpen (Sole) ergab sich bei 35 °C eine JAZ von 4,95 und 4,25 bei 55 °C. Die Veränderung der JAZ mit steigender Vorlauftemperatur (Geradensteigung) ist für beide Wärmepumpenarten nahezu identisch. Die JAZ beinhaltet nach [Bert-

Bild 3: Effizienz von Luft/Wasser und Sole/Wasser-Wärmepumpen in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur [Berthold et al. 2020]



hold et al. 2022] die Wärmepumpe, die Quellenpumpe und die Regelung, aber nicht den Heizstab. Dies ist eine abweichende Bilanzgrenze zu [Günther et al. 2020] in Kapitel 2.2.1, da dort die "JAZ3" inklusive Heizstab angegeben wurde. Wertet man die Außenluft-Wärmepumpen nach [Günther et al. 2020] in gleicher Weise aus, so sinkt die JAZ (inklusive Heizstab) um ca. 0,4 je 5 K Anstieg bei der Vorlauftemperatur und somit etwa doppelt so stark wie beim Feldtest in der Schweiz, der den Heizstab bei den Werten in Bild 3 nicht berücksichtigt hat. Allerdings wird in [Berthold et al. 2020] darauf hingewiesen, dass bei den untersuchten Anlagen kein Heizstabbetrieb zur Heizungsunterstützung auftrat, jedoch für die Warmwasserbereitung, so dass inklusive Warmwasserbereitung die JAZ (in dieser Veröffentlichung "Wärmenutzungsgrad" genannt) um 0,2 bis 0,3 Punkte tiefer liegt. Auch damit reduzieren sich die Werte für die JAZ beim Schweizer Feldtest bei vergleichbaren Bilanzgrenzen mit ansteigenden Vorlauftemperaturen deutlich weniger als bei der Untersuchung nach [Günther et al. 2020].

In [Berthold et al. 2020] wird darauf hingewiesen, dass Erdreich(Sole)-Wärmepumpen aufgrund ihrer höheren Jahresarbeitszahl besonders gut für die Sanierung von Gebäuden geeignet sind und auch gegenüber modernen hocheffizienten Außenluftwärmepumpen einen Effizienzvorteil von ca. 30 % besitzen.

Bei der Auswertung der Objekte im Bestand [Berthold et al. 2021a] zeigte sich, dass 70 % des Wärmebedarfs bei Temperaturen zwischen 0 und 10 °C auftreten und Frosttemperaturen nur 15 % des Wärmebedarfs ausmachen. Bei den gemäßigten Temperaturen über 0 °C werden aber auch mit Radiatoren bereits deutlich niedrigere Vorlauftemperaturen von ca. 40 °C erreicht, was sich positiv auf die Effizienz auswirkt. Deswegen komme es auf die Effizienz in der Übergangszeit an. Gleichzeitig wurde eine Reihe von Objekten identifiziert, bei denen entweder keine oder eine sehr hohe Heizgrenztemperatur von 20 °C eingestellt war. Durch eine Absenkung auf 16 °C Heizgrenztemperatur konnten 2-3 % eingespart werden. In dem Beitrag wird die Bedeutung einer bedarfsgerechten Dimensionierung betont und zugleich vermutet, dass bei leistungsgeregelten Wärmepumpen die genaue Auslegung der Wärmepumpe ggf. vernachlässigt wird.

Von Zirkulationsleitungen wird im Einfamilienhaus abgeraten (hier wurde in einem Gebäude Zirkulationsverluste von 3,35 kWh pro Tag gemessen [Berthold et al. 2021b]), nicht nur bei vorhandenen Schwerkraftzirkulationen wird ein thermischer Siphon als Auftriebsbremse empfohlen, zusätzlich auch zwischen Wärmepumpe und Pufferspeicher.

Als genereller Punkt zur Vermeidung von Installationsfehlern bei Wärmepumpen wird eine einfache Hydraulik mit geringer Komplexität genannt [Berthold et al. 2021b]. Bei Sole-Anlagen sollte der Verzicht auf einen Pufferspeicher geprüft werden – was bei Außenluft-Anlagen wegen der erforderlichen Abtauung ggf. nicht



möglich ist. Für Pufferspeicher wird die Einbindung über ein T-Stück empfohlen. Der Vorlauf von der Wärmepumpe, der Abgang zum Verbraucherkreis und der Pufferspeicher sind dann außerhalb des Puffers an ein T-Stück angeschlossen, wodurch die Durchmischung des Speichers vermindert wird und gleichzeitig das Temperaturniveau der Wärmepumpe direkt genutzt werden kann. Weiterhin wird die Bedeutung des hydraulischen Abgleichs herausgehoben. Zusätzlich bieten die Reglereinstellungen und auch die Betriebszeiten der Heizkreis- und Quellenpumpen Optimierungspotenzial. Bei leistungsmodulierenden Wärmepumpen ist eine konstant betriebene Umwälzpumpe ungeeignet, da der erforderliche Volumenstrom abhängig von der aktuellen Last variiert.

Besonders bei Sanierungen sollte auf den Einbau von Schlamm- und Magnetitabscheidern geachtet werden. Die Leitungen zwischen Trinkwasserspeicher und Wärmepumpe sollten außerdem möglichst kurz ausgeführt werden, da diese bei jeder Nachladung neu aufgewärmt werden müssen. Aus diesem Grund sollte die Nachladung auch nicht zu oft durchgeführt werden. Das kann durch geeignete Reglereinstellungen (ausreichend große Hysterese) und die Positionierung des Fühlers am Speicher eingestellt werden (nicht zu tief). Gerade wenn die Trinkwasserspeicher überdimensioniert sind, sollten zwei Nachladungen pro Tag ausreichen. Wird ein Heizstab für die Legionellenfreihaltung eingesetzt, sollte die Wärmepumpe dennoch immer bis zu ihrer maximalen Temperatur eingesetzt werden, da sie dann immer noch effizienter arbeitet als der Heizstab. Erst danach kommt dieser zum Einsatz. Bei Außenluft-Wärmepumpen, die im Keller eingebaut werden, muss außerdem darauf geachtet werden, dass keine Luftkurzschlüsse zwischen Ansaugung und Ausblasluft entstehen.

2.2.3 Erfahrungen aus weiteren Felderhebungen

Im Bundesland Hessen wurde in den Jahren 1996 bis 2003 ein Feldversuch mit verschiedenen Elektrowärmepumpen in Niedrigenergiehäusern durchgeführt [Gertec 2003]. Eine Querauswertung der Ergebnisse ist in
[Diefenbach et al. 2005] zu finden. Obwohl damals Neubauten mit Fußboden- oder großzügig dimensionierter Radiatorheizung untersucht wurden, lieferten die Monitoringergebnisse vergleichsweise niedrige Jahresarbeitszahlen. In den Gebäuden in Königstein, die außerdem über thermische Solaranlagen verfügten, lagen
die JAZ im vierjährigen Mittel zwischen 2,4 und 3,3 bei Gebäuden mit Erdsonden als Wärmequelle, im Mittel
über die vier Gebäude und die vier Messjahre lag die JAZ bei 2,87. Bereits damals zeigte sich die Bedeutung
der Überprüfung und Nachjustierung der Anlagen. Bei vier Gebäuden in Offenbach mit Abluft-Wärmepumpen lagen die JAZ im Mittel über 3 Jahre bei 2,0 inklusive Heizstab bzw. 3,5 ohne Heizstab. Der Heizstab war
hier für 31 % der Wärmeversorgung und damit für das unbefriedigende Gesamtergebnis der Abluftwärmepumpen-Systeme verantwortlich. Insgesamt wurde in [Diefenbach et al. 2005] bei geeigneten Randbedingungen grundsätzlich das Potenzial von Energieeinsparungen durch Wärmepumpen gesehen. Bei der Beurteilung der Ergebnisse aus den damaligen Feldtests muss außerdem berücksichtigt werden, dass inzwischen
mehr als 20 Jahre Zeit der Weiterentwicklung verstrichen sind.

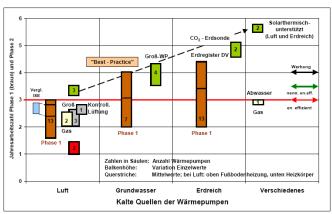
Ähnlich sind die Untersuchungen in Baden-Württemberg [Auer, Schote 2008] und [Auer, Schote 2014] einzuordnen. Hier wurden überwiegend Neubauten oder energetisch modernisierte Bestandsgebäude über mehrere Jahre vermessen und ausgewertet. Bei den insgesamt 33 "normalen" Anlagen ohne besondere Konzepte [Auer, Schote 2008] wurden bei Erdreich-Wärmepumpen im Mittel eine JAZ von 3,4 ermittelt, unter Berücksichtigung der Speicherverluste Werte von 3,1. Die Grundwasser-Wärmepumpen lagen etwa 0,2 Punkte darunter. Gebäude mit Außenluft-Wärmepumpen und Fußbodenheizung erreichten nur JAZ von 2,8 bzw. 2,4 unter Berücksichtigung der Speicherverluste mit Heizkörpern zur Wärmeübergabe wurden nur 2,2 erreicht.



In der zweiten Phase wurden 20 weitere Wärmepumpen mit neueren Anlagen und innovativen Konzepten wie CO₂-Erdsonden oder Direktverdampfer-Anlagen betrachtet [Auer, Schote 2014]. Die verschiedenen Außenluft-Wärmepumpen wiesen weiterhin eine große Streuung auf und nur drei Anlagen erreichten eine JAZ über 3,0. Die Ergebnisse der beiden Messphasen sind in Bild 4 zu sehen.

Neben den Messergebnissen wurden auch Empfehlungen für zukünftige Projekte im Bericht dokumentiert. Die Anlagentechnik soll eine geringe Komplexität aufweisen (wenige Energiequellen, wenige Pumpen und Stellventile), möglichste variable Verdichterleistungen besitzen, die

Bild 4: Ergebnisse der Messungen aus [Auer, Schote 2014]



Quellenseite soll großzügig dimensioniert werden und auf Heizungspufferspeicher oder Kombispeicher soll möglichst verzichtet werden. Von Wärmepumpen in unsanierten Altbauten wurde abgeraten, da die Vorlauftemperaturen nicht über 35 °C liegen sollen, was aus Sicht der Autoren auch den Einsatz von Heizkörpern ausschloss.

2.3 Planungsempfehlung

Im Gegensatz zu Heizsystemen mit fossilen Kesseln reagiert die Wärmepumpe viel sensibler auf Systemabweichung [Seifert 2019]. Aus diesem Grund sind im Folgenden weitere Planungsempfehlungen aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen. Sollten sie sich im Detail ggf. widersprechen, so spiegelt dies die Auffassung der jeweiligen Autoren wider.

2.3.1 Heizlast

Entscheidend für die Effizienz einer Wärmepumpe sind niedrige Systemtemperaturen und die Dimensionierung der Anlage.

In der Literatur werden als wichtige Einflussgröße für die Effizienz der Wärmepumpe die Quellen- und die Vorlauftemperatur genannt. [Schenk 2020a] konkretisiert, dass die Mitteltemperatur zwischen Vor- und Rücklauf die Effizienz entscheidend beeinflusst.

Monovalente Systeme, die zu klein ausgelegt sind, erhöhen den Heizstabanteil an der Wärmeversorgung und damit die Betriebskosten. Bei zu groß ausgelegten Systemen steigen die Investitionskosten deutlich an, außerdem taktet die Wärmepumpe verstärkt, wodurch die Effizienz und die Lebensdauer sinken. Eine Auslegung nach dem bisherigen Verbrauch ist riskant, da eine Reihe von unbekannten Einflussfaktoren (z. B. Warmwasseranteil, tatsächliche Effizienz der Bestandsanlage) das Ergebnis beeinflussen. Es sollte immer eine Heizlastberechnung nach [DIN/TS 12831] erfolgen. Ältere Ansätze, wie das HEA-Verfahren für grobe Abschätzung der Heizlast nach DIN 4701, sollten nur für erste Einschätzung der benötigten Anlage verwendet werden [Stiebel-Eltron 2021].

Eine Herausforderung sind die anzusetzenden U-Werte des Bestandsgebäudes, über die oft keine oder nur unvollständige Informationen vorliegen. Gebäudetypologien wie in [Loga et al. 2015] oder [Optimus 2005] können dem Planer hier Hilfestellungen bieten. Aber auch die Länge und der Dämmstandard der Heizleitungen muss in der Regel abgeschätzt werden. Zur Einschätzung der Heizleistung für Lüftung kann im Altbau grob mit 20 W/m² nach [Recknagel 2009] gerechnet werden.



Aus Erfahrungen kann die Wärmepumpe häufig auf ca. 60 % der max. Heizlast ausgelegt werden, da niedrige Außentemperaturen selten auftreten. Dies ist aber riskant für Planer, da sie bei Streitigkeiten für eine normgerechte Dimensionierung verantwortlich sind [Schenk 2020a]. Gerade bei Teillasten spielt auch die Zeit eine Rolle, bis die Wärmepumpe ihre Nennleistung erreicht. Diese Zeitspanne kann zwischen 1 und 9 min liegen [Schenk 2020a]. Wenn die Wärmepumpe auch die Warmwasserbereitung übernehmen soll, so ist hierfür ein Zuschlag auf die Heizleistung hinzuzurechnen [DIN EN 12831-3] bzw. [DIN 4708]. Als grobe Größenordnung können 0,1 bis 0,3 kW je Person berücksichtigt werden.

Bei vielen Wärmepumpen-Reglern wird die Heizkurve auf die Rücklaufsolltemperatur eingestellt und nicht auf die Vorlauftemperatur. Bei Fußbodenheizungen bedeutet dies Temperaturen von 30 °C, bei Heizkörpern maximal 45 °C. In der Praxis ist die Heizkurve oft um 10 K zu hoch eingestellt [Schenk 2020a]. Bei der Inbetriebnahme wird empfohlen, mit einer hohen Heizkurve zu beginnen und dann schrittweise zu reduzieren, bis die benötigte Heizlast gerade noch gedeckt wird. Dieses Vorgehen erhöht jedoch den Zeitaufwand für den Installateur.

2.3.2 Auslegungstemperaturen in Hessen

Die Norm-Auslegungstemperaturen, nach denen Heizungsanlagen ausgelegt werden, variierten in den verschiedenen Regionen Hessens. Bild 5 zeigt eine Übersichtskarte auf Basis der Angaben in der [DIN/TS 12831-1]. Die Norm-Auslegungstemperaturen liegen zwischen -8,2 °C (PLZ 60306) und -13,3 °C (PLZ 36129). Die ungewichtete Verteilung der Norm-Außentemperaturen ist in Bild 6 dargestellt. Am Häufigsten treten die Norm-Außentemperaturen zwischen -10 °C und -11,5 °C auf. Der Mittelwert für die Norm-Auslegungstemperatur aller Postleitzahlregionen in Hessen liegt bei -10,95 °C.



Bild 5: Landkarte von Hessen mit den Norm-Auslegungstemperaturen nach Postleitzahlregionen (eigene Darstellung nach [DIN/TS 12831-1])

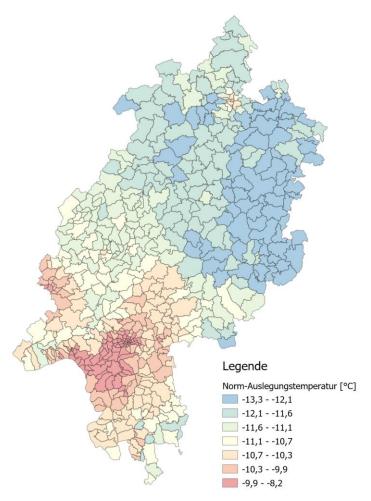
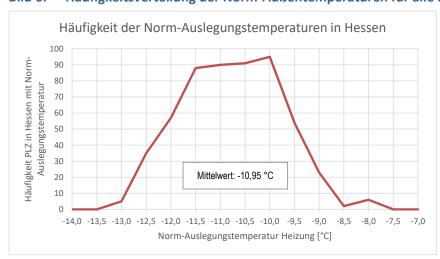


Bild 6: Häufigkeitsverteilung der Norm-Außentemperaturen für alle Postleitzahlen in Hessen



Die Norm-Auslegungstemperatur der DIN/TS12831-1 repräsentiert den niedrigsten 2-Tagesmittelwert der Außentemperatur, die innerhalb von 20 Jahren mindesten 10 Mal aufgetreten ist. In Tabelle 1 ist für die Jahre 2000 bis 2020 für eine Außentemperatur von -10 °C dargestellt, wie häufig diese Temperatur für 34



Wetterstationen des Deutschen-Wetterdienstes (DWD) in Hessen aufgetreten ist. Die Grenztemperatur von -10 °C liegt im Bereich der meisten Postleitzahlbereiche in Hessen. Man erkennt, dass wärmere Jahre (grün) mit einer geringen Anzahl an Tagen und kältere Jahre (rot) mit vielen Tagen unter -10 °C. Insbesondere die Jahre 2009 und 2012 waren kälter, die Jahre 2013-2015 und 2019-2020 waren wärmer, da eine Außentemperatur von -10 °C im Tagesmittel nie aufgetreten ist. Insgesamt kann man aus der Darstellung ableiten, dass Außentemperaturen in der Nähe der Norm-Auslegungstemperaturen in den letzten Jahren selten waren.

Im Anhang A sind die gleichen Stationen mit den Häufigkeiten von Außentemperaturen von unter -5 °C (Tabelle 11) und unter 0 °C (Tabelle 12) dargestellt. Diese beiden Darstellungen können bei der Einschätzung von bivalenten Betriebsweisen an den entsprechenden Bivalenzpunkten helfen.

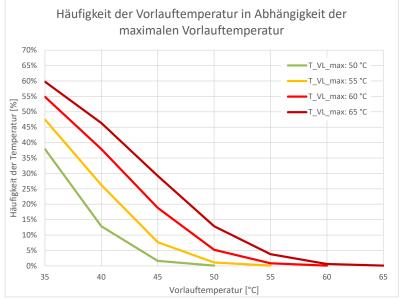
Tabelle 1: Anzahl der Tage mit mittleren Außentemperaturen unter -10 °C für DWD-Wetterstationen in Hessen

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Alsfeld	0	1	2	2	0	1	0	0	0	7	1	0	7	0	0	0	0	1	1	0	0
Burgwald	0	0	2	2	0	1	0	0	0	7	2	0	7	0	0	0	2	1	1	0	0
Cölbe, Kr. Marb								0	0	7	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Darmstadt	0	0	2	0	0	0	0	0	0	6	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Dillenburg	0	1	2	1	0	0	0	0	0	5	1	0	5	0	0	0	0	1	0	0	0
Eschwege	0	0	2	1	0	0	0	0	0	6	2	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Frankfurt-Main	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Frankfurt-Westend	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Fritzlar		0	2	1	0	0	0	0	0	7	2	0			0	0	0	0	0	0	0
Fulda	0	1	4	2	0	1	0	0	0	8	2								0	0	0
Geisenheim	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Gießen-Wettenberg	0	0	2	0	0	0	0	0	0	6	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Gilserberg	0	0	1	1	0	0	0	0	0	7	2	0	7	0			2	2	1	0	0
Gründau	0	0	1						0	3	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Bad Hersfeld	0	0	2	2	0	0	0	0	0	7	3	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Löhnberg	0	1	2	0	0	0	0	0	0	7	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Michelstadt	0	0	2	1	0	0	0	0	0	3	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
Michelstadt	0	0	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
Bad Nauheim	0					0	0	0	0	5	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Neukirchen	0	0	1	3	0	0	0	0	0	5	3	0	10	0	0	0	0	1	1	0	0
Neu-Ulrichstein													7	0	0	0	0	0	1	0	0
Oberzent-Beerfelden	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Offenbach							0	0	0	6	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Runkel-Ennerich						0	0	0	0	6	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Schaafheim	0	0	2	1	0	0	0	0	0	6	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Schauenburg															0	0	0	0	1	0	0
Schlüchtern	0	1	2	2	0	0	0	0	0	8	4	0	8	0	0	0	1	1	0	0	0
Schotten	0	0	1	0			0	0	0	5	0	0	6	0	0	0	0	1	0	0	0
Sontra	0	0	2	2	0	1	0	0	0	7	3	0	7	0	0	0	1	1	0	0	0
Tann				2	0	1	0	0	0	8	3	0	12	0	-	0	2	2	2	0	0
Twistetal	0	2	2	3	0	0	0	0	0	3	1	0	7	0		0	0	0	1	0	0
Waldems	·			·		0	0	0	0	3	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Wesertal	0	0	2	2	0	0	0	0	0	7	0	0	7	0	-	0	0	0	0	0	0
Wiesbaden	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Berechnet man für alle diese 34 Stationen eine Heizkurve für maximale Vorlauftemperaturen von 50/55/60/65 °C, so ergibt sich im Mittel der Stationen die Häufigkeit von Tagen mit der jeweils erreichten tagesmittleren Vorlauftemperatur im Heizsystem in Bild 7. Die Tageswerte der Vorlauftemperatur sind auf der x-Achse, ihre Häufigkeit auf der y-Achse aufgetragen. Berechnet wurden die Heizkurven mit einem Heizkörper-Exponenten von 1,3 (ohne Parallelverschiebung) und für maximale Vorlauftemperaturen von 50/55/60/65 °C. Bei einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C liegt nur bei ca. 7 % der Tage die Vorlauftemperatur über 45 °C und nur an 2 % der Tage bei Vorlauftemperaturen über 50 °C. Zwar ist an diesen Tagen der Heizwärmebedarf am höchsten, insgesamt muss die Wärmepumpe nur an wenigen Tagen in einem für die Effizienz ungünstigen Temperaturbereichen betrieben werden.







2.3.3 Heizflächen, Hydraulik, Vorlauftemperaturen

Die Wärmeabgabeleistung der Heizflächen im Raum entscheidet über die Vorlauftemperatur und damit die Effizienz der Wärmepumpe. Wenn die vorhandenen Heizkörper teilweise nicht geeignet sind, besteht die Möglichkeit einen Teil zu ersetzen oder durch weitere Heizflächen zu ergänzen. Die unterschiedlichen Systeme besitzen unterschiedliche Eigenschaften (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Systeme zur Wärmeübergabe im Raum für Wärmepumpen im Altbau

	Niedrige					
	Vorlauf-	schnell	Flächen frei	Eignung für	Druck-	
	temperatur	regelbar	nutzbar	Nachrüstung	verluste	Hilfsenergie
Heizkörper konventionell						
Niedertemperatur-Heizkörper						
Konvektoren						
Fußbodenheizung						
Wandheizung						
Deckenheizung						

Legende

gut geeignet bedingt geeignet weniger geeignet



Die bestehenden **Heizkörper** können teilweise durch größere (Länge, Breite) ersetzt werden, häufig bleibt aber nur der Tausch gegen einen anderen Typ mit einer größeren Anzahl an Heizplatten oder Konvektorblechen. Bild 8 zeigt die Systematik der Flachheizkörper, wobei die erste Zahl die Anzahl der Heizplatten und die zweite Zahl die Anzahl der Konvektorbleche angibt. Glieder- oder Rippenheizkörper besitzen in der Regel eine geringere Wärmeübertragungsleistung als Flachheizkörper, je installierter Fläche und sie benötigen höhere Vorlauftemperaturen.

Bild 8: Beispiele für unterschiedliche Typen bei Flachheizkörpern

10	11	21	22	32	33
	ממממממממממממממ				

Niedertemperatur-Heizkörper bestehen oft aus Aluminium und besitzen eine höhere Wärmeabgabeleistung bei gleicher Vorlauftemperatur. Sie werden teilweise auch als Wärmepumpen-Heizkörper bezeichnet.

Konvektoren in der Nachrüstung sind entweder Niedertemperatur-Heizkörper oder konventionelle Heizkörper, die zur Unterstützung der Wärmeabgabe Ventilatoren einsetzen. Teilweise können die Ventilatoren auch nachgerüstet werden. Konvektoren benötigen in der Regel eine Spannungsversorgung für die Ventilatoren und können zusätzliche Geräusche verursachen – dies ist besonders bei Schlafräumen zu beachten. Manche Geräte besitzen eine Regelung, die die Ventilatoren nach dem Leistungsbedarf des Raumes steuern, so dass diese in der Regel in der kleinsten Stufe arbeiten.

Fußbodenheizungen ermöglichen sehr niedrige Systemtemperaturen, sind aber in Bestandsgebäuden seltener zu finden. Im Zuge von Sanierungsmaßnahmen können auch Fußbodenheizungen nachgerüstet werden (Trockensysteme oder Einfräsen in den Bestandsfußboden). Der Aufwand ist jedoch höher, so dass eine Nachrüstung seltener in Gebäuden ohne Komplettmodernisierung stattfindet.

Wandheizungen können die vorhandenen Heizkörper unterstützen und liefern wie andere Flächenheizungen, ein hohes Komfortniveau. Allerdings dürfen die Flächen mit Wandheizung nicht z. B. durch Schränke verstellt werden und es müssen auch Vorkehrungen gegen das versehentliche Anbohren der Heizleitungen in der Wand getroffen werden. Da hier u. a. Bestandsgebäude mit geringem Wärmeschutz betrachtet werden, ist jedoch zu beachten, dass bei einer Montage auf Außenwänden oder Flächen gegen unbeheizt der Mindestwärmeschutz nach [DIN EN 1264-4] eingehalten wird. Für Außenwände sind dort Wärmedurchlasswiderstände zwischen 1,25 (m²K)/W zu unbeheizten Räumen und 2,00 (m²K)/W bei Außenwänden mit einer Auslegungs-Außentemperatur von -15 °C einzuhalten (U-Wert unter 0,5 W/(m²-K)), um die Wärmeverluste nach außen zu

Bild 9: Beispiele für eine Wandheizungen



Foto: www.sanha.com



begrenzen¹. Werden diese Werte nicht erreicht, so sind zusätzliche Innendämmungen vorzusehen, was die Aufbaudicke vergrößert. Zusätzlich müssen die Feuchtebelastung der Außenwand und die Feuchtebilanz durch eine Innendämmung beachtet werden ([SBZ 2020]). Alternativ kann die Wandheizung auch an Innenwänden angebracht werden.

Bei **Deckenheizungen** kann in der Regel ein Großteil der Raumdeckenfläche für die Beheizung genutzt werden. Auch sie darf nicht z. B. beim Anbringen einer Lampe beschädigt werden. Wie bei Wandheizungen, ist ein Mindestwärmeschutz gegen ungeheizte Räume erforderlich. Bei Deckenheizungen ist die Strahlungsasymmetrie zu berücksichtigen, um ein komfortables Raumklima zu gewährleisten. Kaltluftabfall an kalten Fensterflächen kann durch sie kaum kompensiert werden. Aus diesem Grund wird sie nur bei einem U-Wert der Außenwände unter 1,0 W/(m²·K) bzw. Heizleistungen von maximal 40 W/m² empfohlen [Zürich 2012].

Bei der Untersuchung der Frage, welche Vorlauftemperatur mit der vorhandenen Wärmeübergabe erreicht werden können, müssen die Heizkörper aller Räume sowie deren hydraulische Einbindung analysiert werden. Dazu sollte eine raumweise Heizlastberechnung nach [DIN/TS 12831-1] erfolgen. Daraus ergibt sich ein Leistungsbedarf je qm. Kritische Räume besitzen dann einen größeren Anteil der Heizkörperlänge am Raumumfang.

In der Vergangenheit wurden Heizkörper nicht exakt berechnet, sondern nur grob dimensioniert. Durch Teilsanierungen (z. B. Fensteraustausch) kann sich der Wärmebedarf reduziert haben, so dass der Überdimensionsierungsfaktor zunimmt (siehe auch Kapitel 2.1). Überdimensionierungen können auch durch einen Aufheizzuschlag entstanden sein, der mit 15 % berücksichtigt werden durfte [Wolff, Jagnow 2007].

Die Wärmeleistung eines Heizkörpers wird hauptsächlich durch die Vor- und Rücklauftemperatur und die Raumtemperatur bestimmt. Weichen diese Randbedingungen von den Normbedingungen ab, mit denen die Leistung der Heizkörper bestimmt wurden (75 °C /65 °C /20 °C), so verändert sich die tatsächliche Wärmeleistung. Zur Umrechnung kann die folgende Formel verwendet werden [Recknagel 2009]:

$$\Phi = \Phi_{Norm} * \left(\frac{\Delta\Theta_{ln}}{49,83}\right)^n$$

mit

 Φ tatsächliche Wärmeleistung des Heizkörpers [W] Φ_{Norm} Norm-Wärmeleistung des Heizkörpers [W] $\Delta\Theta_{In}$ logarithmisch gemittelte Übertemperatur [K]

$$\Delta\Theta_{ln} = \frac{\Theta_V - \Theta_R}{ln\frac{\Theta_V - \Theta_L}{\Theta_R - \Theta_L}}$$

mit

 $egin{array}{ll} \Theta_V & & \mbox{Vorlauftemperatur} \ \Theta_R & \mbox{Rücklauftemperatur} \ \Theta_L & \mbox{Raumlufttemperatur} \end{array}$

Für die angestrebten Vorlauftemperaturen von maximal 55 °C bedeutet dies, dass sich die Heizkörperleistung bei 20 °C Raumtemperatur auf 51,1 % reduziert, bei 22 °C auf 46,6 % und bei 24 °C auf 42,2 % (jeweils bei 10 K Temperaturspreizung) (siehe Bild 10). Das bedeutet umgekehrt, dass bei einer Überdimensionierung um den Faktor 2 die alten Heizkörper bei 20 °C Raumtemperatur weiterhin genutzt werden könnten.

¹ Abgesehen von diesen Minimalvorgaben ist natürlich eine wesentlich bessere Dämmung der Wände vor Einsatz einer Wandheizung sehr zu empfehlen.



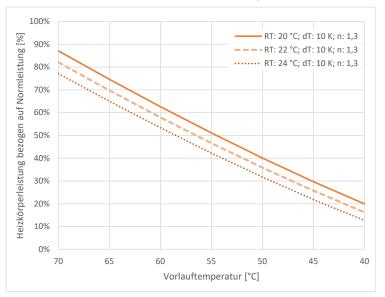


Bild 10: Reduktion der Wärmeabgabe eines Heizkörpers bei 10 K Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf bei unterschiedlichen Raumtemperaturen

Weitere Einflussfaktoren auf die Wärmeleistung sind der Massenstrom, die Anschlussart, die Einbausituation (z. B. in einer Nische oder mit einer Fensterbank darüber) oder Vorhänge oder Verkleidungen, die jeweils die effektive Wärmeabgabe beeinträchtigen.

Ist der Heizkörper mit dem Vorlauf oben und dem Rücklauf unten angeschlossen, so erreicht er in einem Bereich von 80 % bis über 200 % relativ zu seinem Normmassenstrom die angegebene Leistung. Ist der Vorlauf unten angeschlossen, so reduziert sich die tatsächliche Leistung abhängig vom Massenstrom um mindestens 10 % (Bild 11).

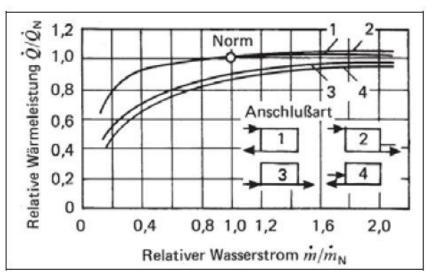


Bild 11: Veränderung der Wärmeleistung des Heizkörpers in Abhängigkeit von Anschlussart und Massestrom [Wolff, Jagnow 2007]

Durch den Einbau in einer Fensternische mit einer Fensterbank darüber reduziert sich die Wärmeabgabe eines Plattenheizkörpers abhängig vom Heizkörpertyp und Abstand zur Fensterbank um ca. 2 bis 20 % (höhere Werte bei Heizkörpern mit mehreren Platten und geringem Abstand zur Fensterbank). Bei modernen Flachheizkörpern mit Seitenverkleidung fällt diese Leistungsminderung etwas geringer aus [Recknagel 2009].



Wenn aber der Abstand zur Fensterbank nahezu null ist, dann schneiden seitlich verkleidete Kompaktheiz-körper ungünstiger ab [Schlapmann 2002]. Außerdem spielt der Abstand des Heizkörpers zur Wand eine Rolle, wenn dieser unter 3 cm liegt. Zu geringer Abstand zum Fußboden muss bei Abständen unter 5 cm berücksichtigt werden. Ein Vorhang kann die Wärmeabgabe um ca. 10 % vermindern und gleichzeitig die Temperaturspreizung im System verkleinern – eine Heizkörperverkleidung um bis zu 15 % [IB Junge]. Schließlich kann die Leistungsabgabe des Heizkörpers vermindert sein, wenn dieser nicht mit Heizkörperlack, sondern mit einer Farbe mit geringem Emissionsfaktor gestrichen wurde [Schlapmann 2002].

Heizkörper benötigen einen Mindestvolumenstrom, der je nach Art zwischen 15 und 30 % ihres Nennvolumenstroms liegt [Zürich 2012]. Da bei einer Absenkung der Vorlauftemperatur aber der Volumenstrom tendenziell erhöht wird, stellt der Mindestvolumenstrom in der Regel kein Problem beim Umstieg auf eine Wärmepumpe dar. Dagegen ist die Frage, wie hoch der Massenstrom und damit der Druckverlust in den Steigsträngen ansteigt, durchaus eine relevante Frage. In [Zürich 2012] werden Druckverluste von über ca. 150 Pa/m als hydraulisch und schalltechnisch ungünstig eingestuft. Diese Druckverluste werden – je nach Randbedingungen – z. B. bei Systemtemperaturen unter 40 °C im Vorlauf und 32 °C im Rücklauf erreicht. Wird der maximale Druckverlust überschritten, so sollte dieser Strangabschnitt ersetzt werden. In vielen Fällen wird eine solche Maßnahme aber nicht erforderlich sein.

Einrohrheizungen erschweren die Einbindungen einer Wärmepumpe in eine Heizungsanlage, da hier im Teillastbetrieb sich Vor- und Rücklauftemperaturen kaum unterscheiden. Eine Absenkung der Vorlauftemperaturen führt dann zu sehr großen Heizkörperflächen. Weiterhin sind Einrohrheizungen nur schlecht regelbar. Ggf. können die Stränge getrennt geregelt werden, sodass die Temperaturspreizung etwa gleich gehalten werden kann.

Ist im Bestand eine Fußbodenheizung vorhanden, so ist eine Systemtrennung zwischen FB-Heizkreis und Wärmepumpe wichtig, da Ablagerungen sonst in den Wärmeerzeuger getragen werden können und den zuverlässigen Betrieb der Wärmepumpe beeinträchtigen [Stiebel-Eltron 2021].

Mit einem Test bei kalten Außentemperaturen kann die minimale Vorlauftemperatur abgeschätzt werden. Dazu werden alle Heizkörperthermostate im Gebäude vollständig geöffnet und die Vorlauftemperatur wird schrittweise abgesenkt bis die Sollraumtemperatur gerade nicht mehr erreicht wird. Damit hat man den Einsatzbereich der vorhandenen Heizkörper eingegrenzt. Da die Außentemperatur aber selten konstant bei Temperaturen unter null Grad verbleibt, kann dieser Test nur eine grobe Einschätzung der möglichen minimalen Vorlauftemperatur liefern.

2.3.4 Wärmequellen

Bei Bestandsgebäuden kann die Erschließung möglicher Wärmequellen (z. B. Außenluft, Erdreich, Grundwasser, Sonnenenergie, Latentwärmespeicher, ...) durch bauliche, technische oder ordnungsrechtliche Restriktionen eingeschränkt sein. Insbesondere bei kleinen Grundstücken oder grundsätzlich bei Mehrfamilienhäusern können die Wärmequellen entweder nicht oder aufgrund des höheren Energiebedarfs nur für Teile der benötigten Wärmeleistung genutzt werden.

In [Vollmer et al. 2019] wurde die Quellenverfügbarkeit speziell im deutschen Mehrfamilienhausbestand untersucht. Bei Reihenhaussiedlungen ist in der Regel ausreichend Platz für monoenergetische Luft- oder Erdsonden- Wärmepumpen. Bei bivalenten Anlagen sind hier sogar teilweise Erdkollektoren möglich. Bei Blockrandbebauung können in der Regel Außenluft-Wärmepumpen eingesetzt werden, Erdsonden sind durch die Grundstücksgröße, Bodenart und Bivalenzpunkt begrenzt. Im Innenstadtbereich sind die Grundstücke meist zu klein für die Wärmequellen Luft und Erdreich. Mit Schallschutzhauben oder eine Aufstellung im Dachbereich können hier Außenluft-Wärmepumpen meist eingesetzt werden. Im Innenstadtbereich können PVT-Systeme (siehe unten) oder kalte Fern-/Nahwärmenetze eine Option darstellen. Außerdem kann Abwasserwärme an einigen Stellen in innerstädtischen Gebieten genutzt werden, auch wenn hier enge Grenzen bezüglich der maximalen Temperaturabsenkung und der kontinuierlich verfügbaren Abwasservolumenströme beachtet werden müssen.



Gerade bei begrenzten Quellenpotenzialen bieten sich bivalente Lösungen an, wenn mit der Wärmepumpe mehr als die Hälfte der benötigten Wärme bereitgestellt werden können. Ein Beispiel kann die Nutzung von Erdwärme sein, wenn auf dem Grundstück nur eine begrenzte Anzahl an Sonden gebohrt werden kann. Beim Volumenstrom auf der Wärmequellenseite ist zu beachten, dass die Temperaturspreizung ein Optimum bei Erdwärmekollektoren von ca. 6 K besitzt. Bei Erdsonden mit 3 K Spreizung resultiert ein hoher Volumenstrom und damit bessere Turbulenz und besserer Wärmeentzug [Schenk 2020a]. Bei Sole-Wärmepumpen sind die Hilfsaggregate oft zu groß dimensioniert, was die Effizienz verschlechtert [Schenk 2020a].

Sonnenenergie kann mit unterschiedlichen Systemen in Verbindung mit Wärmepumpen eingesetzt werden. Flachkollektoren können als Wärmequelle für die Wärmepumpe oder zur direkten Warmwassererzeugung genutzt werden. Nicht abgedeckte Solarabsorber(-matten oder -rohre) auf dem Dach können der Wärmepumpe Niedertemperaturwärme als Quelle bereitstellen. Schließlich werden Kombinationen von PV-Modulen und thermischen Sonnenkollektoren (PVT-Kollektor) eingesetzt, um auf der gleichen Dachfläche sowohl elektrische wie auch thermische Energie zu gewinnen. Speziell mit Kollektoren, die mit PV-Modulen kombiniert sind (PVT) steht eine geräuschlose Wärmequelle für kleinere Gebäude zur Verfügung. Im Neubaubereich werden diese PVT-Kollektoren bei Einfamilienhäusern für die monovalente bzw. monoenergetische Wärmeversorgung bis ca. -12 °C eingesetzt [Solink 2020]. Dabei muss die Wärmepumpe minimale Soletemperaturen von ca. -15 °C erlauben. Je nach Dachneigung und Orientierung werden 3,3 bis 4,2 m² Kollektorfläche pro kW Heizleistung benötigt. Bivalente Anlagen für den Altbau können auf ca. 50 % der Leistung (somit ca. 80 % der Energie) ausgelegt werden. Aufgrund der geringen Temperaturspreizung von 3 - 4 K werden große Leitungsdurchmesser benötigt. Sowohl auf dem Dach als auch im Gebäude ist auf eine geeignete, geschlossenzellige Dämmung bzw. gedämmte Rohrschellen zu achten.

Bei Nutzung der Sonnenenergie bieten sich in der Regel PVT-Anlagen an, da der erzeugte Strom einerseits teilweise in der Wärmepumpe eingesetzt (siehe Kapitel 3), andererseits aber auch für den Haushaltsstrom genutzt werden kann und Überschüsse – im Gegensatz zur Solarthermie – auch ins Netz eingespeist werden können.

2.3.5 Pufferspeicher

Pufferspeicher sind im Anlagenkonzept mit Wärmepumpe von Bedeutung, wenn:

- Kreise mit unterschiedlichem Mindestvolumenstrom hydraulisch entkoppelt werden müssen
- Abschaltzeiten durch den Netzbetreiber überbrückt werden müssen
- als Energiequelle für die Abtauung im Winter bei Außenluft-Wärmepumpen (je nach Konzept)
- bei einstufigen Wärmepumpen zum Lastausgleich sowie zur Reduzierung der Takthäufigkeit
- zur Aufnahme von Überschüssen z. B. der eigenen PV-Anlage
- perspektivisch auch zur Nutzung von Überschüssen an erneuerbaren Energien im Stromnetz (siehe Kapitel 4)

Parallelspeicher sind sehr stabil und werden von 80 % Hersteller empfohlen. Sie haben aber auch Nachteile, da immer eine höhere Temperatur geliefert werden muss als die geforderten Sollwerte [Schenk 2020a]. Im Puffer mischen sich die Temperaturen (bei Vor- und Rücklauf), deswegen sind sehr geringe Geschwindigkeiten im Zu-/Abstrom wichtig. Auch hydraulische Weichen besitzen die Gefahr, dass die Vor- und Rückläufe vermischt werden. [Schenk 2020a] stellt fest, dass durch Speicher bis zu 20 % Energie vergeudet werden können.

Effizienter sind aus dieser Perspektive Puffer als Reihenspeicher im Rücklauf. Hier tritt keine Mischung auf und der Puffer wird auf der niedrigsten möglichen Temperatur betrieben, so dass die Wärmeverluste verringert werden. [Schenk 2020a] gibt an, dass Rücklauf-Reihenpuffer um 18 % besser als Parallelspeicher abschneiden, viele Hersteller aber keine Reihenspeicher akzeptieren. Bei Reihenpuffern ist ein Überströmventil erforderlich, um den Mindestvolumenstrom der Wärmepumpe sicherzustellen. Pufferspeicher sollten ein Mindestvolumen von 10 Liter je kW Heizleistung aufweisen.



Die bisher genannten Auslegungsgrundsätze (Rücklauf-Speicher mit relativ kleinem Volumen) sind allerdings ausschließlich auf die Optimierung der Wärmepumpen-Arbeitszahl ausgerichtet. Für die zusätzliche Aufnahme von Überschüssen aus der regenerativen Stromerzeugung (durch die eigene PV-Anlage oder zukünftig aus dem Stromnetz) sind gegebenenfalls andere Lösungen (z. B Parallelspeicher oder Reihenspeicher im Vorlauf mit größerem Volumen) günstiger.

Kombispeicher für Heizkreis und Trinkwasserbereitung sind aufgrund der kaum zu vermeidenden Mischvorgängen im Allgemeinen eher ungünstiger als getrennte Speicher. Hier gibt es jedoch auch Ausführungen mit Trennblechen oder speziell gestalteten Ein- und Auslaufstutzen, so dass die Durchmischung begrenzt wird.

Zur Vermeidung von Fehlströmungen sollten thermische Auftriebsbremsen in Form von U-Bögen an die warmen Anschlüsse montiert werden.

2.3.6 Trinkwasserbereitung

Die Trinkwarmwasserbereitung (TWWB) besitzt einen großen Einfluss auf die Effizienz einer Wärmepumpe, wenn diese für Heizung und TWWB eingesetzt wird, da die Warmwassertemperaturen in der Regel ganzjährig höher liegen als die Temperaturen im Heizkreis. Aus diesem Grund ist hier ein besonderes Augenmerk auf die TWWB zu richten, damit die hygienischen Anforderungen eingehalten werden und die TWWB möglichst effizient erfolgen kann.

Rechtliche Anforderungen

Bei der Trinkwasserbereitung wird in der [DVGW W551] zwischen Klein- und Großanlagen unterschieden. Diese Einordnung ist auch bei Auslegung einer Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen von Bedeutung.

Um **Kleinanlagen** handelt es sich entweder bei Ein- oder Zweifamilienhäusern oder wenn der Trinkwarmwasserspeicher ein Volumen von bis zu 400 Liter besitzt und der Wasserinhalt zwischen Austritt des Trinkwarmwasserbereiters und der Zapfstelle maximal 3 Liter beträgt. Bei solchen Kleinanlagen sollten Temperaturen unter 50 °C vermieden werden und die Anlage muss in der Lage sein, 60 °C bereitzustellen, so dass die regelmäßige Erwärmung auf 60 °C möglich ist.

Bei allen anderen Anlagen (Mehrfamilienhaus, > 400 Liter im TWW-Speicher, Volumen in TWW-Leitung > 3 Liter) handelt es sich um eine **Großanlage**. Diese müssen 60 °C am Speicheraustritt gewährleisten und der Temperaturabfall in der Zirkulationsleitung bis zum Wiedereintritt in den TWW-Speicher darf maximal 5 K betragen.

Als **Anlagen ohne Anforderungen** gelten dezentrale Frischwasser- oder Wohnungsstationen, die in der Nähe der Zapfstellen montiert sind und bei denen das Warmwasservolumen bis zur Zapfstelle kleiner als 3 Liter ist. Zentrale Frischwasserstationen fallen aus diesem Grund in der Regel <u>nicht</u> in die Kategorie "Anlage ohne Anforderung".

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Trinkwasser – besonders wenn es erwärmt ist – nicht längere Zeit auf Temperaturen zwischen 25 und 45 °C gehalten werden sollte.

Neben der [DVGW W551] sind noch weitere Normen und Richtlinien bei der Planung zu berücksichtigen, eine Übersicht findet sich z. B. in [Geberit 2019]. Auch in der Schweiz wird die Legionellen-Prävention in unterschiedlichen relevanten Normen / Richtlinien mit voneinander abweichenden Regelungen geregelt. [FWS 2022] empfiehlt mit dem Hauseigentümer die anzuwendende Norm festzulegen, dem Hauseigentümer die Überwachung und Einstellung der Temperaturen zu übertragen und den Warmwassererwärmer mindestens einmal wöchentlich für mindestens eine Stunde in den Morgenstunden auf mindestens 60 °C zu erwärmen. Bezüglich der Wärmepumpen wird festgestellt, dass diese in der Regel Vorlauftemperaturen von 60 bis 65 °C am Wärmepumpenaustritt besitzen, die erreichbaren Trinkwassertemperaturen je nach Wärmetauscherfläche nur bei 53 - 55 °C liegen und somit Anforderungen an die Trinkwassererwärmung, die denen von Großanlagen in Deutschland vergleichbar sind, in der Praxis kaum erfüllt werden können.



Trinkwasserbereitung mit Wärmepumpen

Eine Übersicht der Konzepte zur Trinkwasserbereitung findet sich in [BWP TWW 2023], die in Tabelle 3 zusammengefasst ist. Frischwassersysteme mit Speicher haben den Vorteil, dass das Wasser am Anfang sehr stark abgekühlt wird und die Wärmepumpe damit auf einem niedrigen Temperaturniveau arbeiten kann. Eine Grädigkeit von nur 2 K ist bei manchen Herstellern ohne nennenswerte Mehrkosten erhältlich, so dass auch die maximale Vorlauftemperatur nur geringfügig über der Warmwassersolltemperatur liegen muss, was besonders für Mehrfamilienhäuser günstig ist ([Schenk 2020a]). Der Autor geht also anders als [FWS 2022] im vorherigen Absatz davon aus, dass bei geeigneter Dimensionierung der Systeme deutlich geringere Temperaturdifferenzen zwischen der Wärmepumpen-Vorlauftemperatur und der Trinkwarmwassertemperatur erreicht werden können. Beim Einsatz von mehreren Wärmepumpen sollten Heiz- und WW-Kreise getrennt betrieben werden, statt Mischer einzusetzen, damit Heizwärme und Trinkwasserwärme möglichst nicht gemischt werden [Schenk 2020b].

Tabelle 3: Vergleich unterschiedlicher Speichersysteme für die Warmwasserbereitung

	Innenliegender Wärmetauscher *	Außenliegender Wärmetauscher	Frischwasserstation mit Pufferspeicher	Kombispeicher
Vorteile	 erprobtes, häufig angewandtes System einfach in der Umsetzung 	 Nutzung vorhandener Speicher hohe WP-Leistung nutzbar bei guter Planung: geringe Grädigkeit hoher COP in der Anfangsphase 	 Hygiene (es wird kein Trink- wasser bevorratet) Hohe Effizienz gute Speichernut- zung hohe WP-Leistung nutzbar bei guter Planung: geringe Grädigkeit 	 gemeinsame Nutzung des Speichervolumens geringere Platzbedarf mit Heißgasauskopplung (hohes Temperaturniveau) kombinierbar
Nach- teile	 Wärmeübertra- gung geringer 	 zusätzliche Pumpe erforderlich 	 großer Einfluss der Rücklauftempera- tur 	 höhere Kosten Gefahr von Durchmischung und damit Effizienzverlust

^{*} Entweder als Pufferspeicher (mit Heizungswasser) oder als Trinkwasserspeicher mit innen liegendem Wärmetauscher

Bei einer Untersuchung von [Schenk 20020b] zeigte sich, dass die Nutzung von zentralen Frischwassersystemen die Arbeitszahl der Wärmepumpe um ca. 0,2 höher liegt als bei Trinkwasserspeichern mit innenliegendem Glattrohr-Wärmetauscher.

Für Mehrfamilienhäuser mit zentraler Frischwasserstation stellt sich die Frage, wie der Zirkulationsrücklauf eingebunden wird. Dieser kann entweder beim Kaltwasserzulauf erfolgen – dann muss der Rücklauf in den Pufferspeicher in den oberen Bereich mit einem 3-Wege-Ventil erfolgen, das aber Reaktions- und Stellzeiten besitzt und damit die Schichtung stören kann. Effizienter ist die Lösung, wenn der Zirkulationsrücklauf über eine eigene, kleinere Frischwasserstation direkt in den oberen Speicherbereich eingebunden wird – hier liegen die Kosten aber höher. Für die Vorlaufeinführung empfiehlt [Schenk 2020b] diese auf maximal 30 % der Speicherhöhe anzuschließen. Zur Minimierung der Durchmischung kann entweder ein großer Durchmesser (= geringere Fließgeschwindigkeit) für den Speicheranschluss gewählt werden oder Speicher mit Verteileinbauten. Bei der Regelung der Frischwasserstation hat sich eine Proportionalregelung des Volumenstroms



oder der Rücklauftemperatur bewährt, eine Regelung der Vorlauftemperatur empfiehlt [Schenk 2020b] nicht.

Eine weitere Möglichkeit für die Warmwasserbereitung im Mehrfamilienhaus stellt eine separate Hochtemperaturwärmepumpe dar, die nur für den Warmwasseranteil ausgelegt wird. Hierfür werden spezielle Kältemittel verwendet. Zusätzlich können spezielle Speicher mit Koax-Gegenstrom-Wärmetauscher eine gute Effizienz bieten, jedoch sind die Kosten dieser Speicher höher und Ansteuerung ist anspruchsvoller.

Eine Option ist auch der Einsatz von speziellen Trinkwasser-Wärmepumpen. Besaßen diese früher eine schlechte Effizienz [Auer, Schote 2014], so hat sich deren Effizienz mittlerweile wohl deutlich verbessert [Berthold et al. 2022] und [Schenk 2020b] und sie erreichen mittlerweile COP-Wert bis 3.

Weitere, bisher weniger verbreitete Systeme zur Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen sind Rücklauf-Wärmepumpen, die den Rücklauf des Heizkreises einer Fußbodenheizung als Wärmequelle für die Warmwasserbereitung nutzen. Hier muss aber beim Einsatz in Gebäuden mit Radiatoren auf die maximale Quellentemperatur der Wärmepumpe geachtet werden. In Mehrfamilienhäusern können auch Kompaktgeräte mit einem Sole-Bus eine effiziente Option darstellen, da die Verteilverluste durch die WW-Bereitung direkt in der Wohnung minimiert werden. Allerdings liegen die Kosten dieser Lösung höher (Wärmepumpen in jeder Wohnung) und solche Lösungen befinden sich noch in der Erprobungsphase.

Alternativ können zur Warmwasserbereitung im Mehrfamilienhaus auch dezentrale wohnungsweise angeordnete Frischwasserstationen eingesetzt werden. Wenn die Leitungslänge nach der Frischwasserstation geringer als 3 Liter ist, gibt es keine Temperaturanforderungen und die Zapftemperatur kann auf ein üblicherweise benötigtes Niveau von ca. 45-50 °C eingestellt werden. Damit steigt die Effizienz der Wärmepumpe,
die Anlage hat hygienische Vorteile und die regelmäßigen Überprüfungen auf Legionellen können entfallen.
Bei der Planung und Montage ist auf eine sorgfältige Einstellung der Überströmventile an den Frischwasserstationen bzw. am Ende eines Stranges zu achten: sind diese zu hoch eingestellt (kurze Zeiten bis zum Erreichen der Zapftemperatur), wird viel nicht abgekühltes Wasser in den Rücklauf geleitet und die Effizienz der
Anlage sinkt wieder. In Bestandsgebäuden ist die Umrüstung auf dezentrale Frischwasserstationen jedoch
aufwändig, da Änderungen in jeder Wohnung vorgenommen werden müssen.

Neben der Nutzung als Wärmequelle (siehe Kapitel 2.3.4) kann Sonnenenergie mit thermischen Kollektoren auch direkt zur Warmwasserbereitung genutzt werden. Die Einbindung von solarthermischer Wärme in einen Pufferspeicher zur direkten Nutzung kann einen Teil des Wärmebedarfs decken. Gleichzeitig konkurriert sie aber mit der Wärmepumpe um die Nutzung des niedrigen Temperaturniveaus unten im Speicher, so dass neben den zusätzlichen Kosten der solarthermischen Anlage sich auch die Effizienz der Wärmepumpe verschlechtern kann [Schenk 2020b]. Wird Solarthermie als Wärmequelle für Wärmepumpe genutzt, kann die Effizienz einer Außenluft-Wärmepumpe ansteigen.

Praxishinweise zu TWW-Speichern

Da Wärmepumpen mit niedrigen Temperaturen bei gleichzeitig geringer Temperaturspreizung arbeiten sollen, liegt der Volumenstrom höher. Dies ist bei der Dimensionierung der Wärmetauscher im Trinkwarmwasserspeicher von Bedeutung. Die Wärmetauscherfläche sollte 0,25 m² je kW Heizleistung der Wärmepumpe betragen [Seifert 2019]. Es sollen Wärmetauscher bis ca. 6 m² verfügbar sein, so dass max. ca. 25 kW damit übertragen werden können und es gibt häufig keine Tauscherflächen im oberen Bereich des Speichers. Die Tauscherfläche in vorhandenen Trinkwasserspeichern ist teilweise nicht bekannt, so dass oft vorhandene Speicher weiter nicht genutzt werden können. Grundsätzlich eignen sich Glattrohr-Wärmetauscher besser als Rippenwärmetauscher, da sich die Rippen leichter mit Ablagerungen zusetzen und damit ihre Übertragungsleistung im Laufe der Zeit abnimmt. Bei einem bestehenden TWW-Speicher hat ein externer Wärmetauscher, der unten in den Speicher eingebunden wird den Vorteil, dass der Wärmepumpe über längere Zeit niedrige Temperaturen zur Verfügung stehen [Schenk 20020b].

In einem Einfamilienhaus sollte der TWW-Speicher nicht kleiner als 300 Liter gewählt werden, im Mehrfamilienhaus mit mehr als 10 Personen etwa 30 Liter Speichervolumen pro Person [Schenk 2020b].



Die Lade-/Entladepumpen sollten darüber hinaus kurze Vor- und Nachlaufzeiten aufweisen ([Schenk 20020a]).

2.3.7 Hydraulischer Abgleich

Der hydraulische Abgleich bildet gerade bei Heizungsanlagen mit Wärmepumpen eine wichtige Voraussetzung für einen energieeffizienten Betrieb und niedrige Heizkosten. Wird er nicht durchgeführt, so können die Heizkörper ungleichmäßig durchströmt werden, so dass

- der erwartete Komfort nicht erreicht wird (thermisch, akustisch),
- die Vorlauftemperatur zur Versorgung ungünstig gelegener Heizkörper erhöht werden muss
- oder die nutzbare Temperaturspreizung durch überversorgte Heizkörper abnimmt (hydraulischer Kurzschluss).

Der hydraulische Abgleich ist mittlerweile Voraussetzung für die Inanspruchnahme von Fördermitteln. Um ihn durchführen zu können, muss eine raumweise Heizlastberechnung nach [DIN/TS 12831-1] sowie eine Rohrnetzberechnung durchgeführt werden. Dazu sind Daten zu den Heizkörpern, Pläne über das Rohrnetz (bei größeren Gebäuden) sowie Informationen über den Zustand der Rohrleitungen erforderlich. Diese Informationen sind häufig nicht vollständig vorhanden.

Bei Bestandsgebäuden gibt es nach [VdZ 2022] zwei Verfahren für den hydraulischen Abgleich: Verfahren A nicht so gut geeignet, da nur grobe Annahmen zur Raumheizlast getroffen werden [Scheithauer 2021] und wird vom VdZ auch nicht für Gebäude mit Wärmepumpenheizung empfohlen. Bei Verfahren B wird eine vereinfachte raumweise Heizlast bestimmt und es fließen Annahmen zu Rohrlängen und Rohrdimensionen ein. Größere Heizungsanlagen sollten dabei in kleinere Teilanlagen zoniert werden [Scheithauer 2021]. Zum Abgleich bei Bestandsheizkörpern sind diese ggf. mit einstellbaren Thermostatventilen oder regelbaren Rücklaufverschraubungen nachzurüsten und dann entsprechend den Berechnungen einzustellen. Gegebenenfalls ist eine Nachrüstung der Ventile aber schwierig oder teuer, so dass auch der komplette Austausch geprüft werden sollte.

Zu berücksichtigen ist, dass der hydraulische Abgleich für den Auslegungsfall (Volllast) durchgeführt wird. In der Regel wird die Heizungsanlage aber in Teillast betrieben. Damit der Abgleich auch dann gut funktioniert, können voreinstellbare Heizkörperventile mit interner Differenzdruckregelung eingesetzt werden, bei denen der Volumenstrom an die Teillast angepasst wird [Schlobach 2017]. Die Temperaturdifferenz im Auslegungsfall sollte auf 10 bis 15 K bei Heizkörpern oder 5 bis 7 K bei Fußbodenheizungen eingestellt werden [Seifert 2023].

Ein hydraulischer Abgleich ist auch bei ausgedehnten Warmwassernetzen im Mehrfamilienhaus erforderlich, um die korrekte Durchströmung aller Teilstränge und somit einen hygienischen Betrieb zu gewährleisten.

2.3.8 Betriebsoptimierung und Fehlersuche

Je einfacher die Hydraulik der Anlage geplant wird, desto zuverlässiger kann die Wärmepumpenanlage betrieben werden. Aufwändige Hydrauliken mit 3- oder 4-Wege-Ventilen erhöhen die Komplexität und erschweren die Fehlersuche.

Gleichzeitig sind Rückschlagklappen eine häufige Fehlerquelle in Heizungsanlagen. Deren korrekte Funktion kann nicht ohne Weiteres ohne Demontage geprüft werden. Als bewegliche Teile in der Heizungshydraulik sind sie Schmutz, mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Metallische inline Rückschlagklappen sind hier häufig besser geeignet als Ausführungen in Kunststoff [Schenk 2020a]. Um Fehlströmungen dennoch zu erfassen, sind Temperatursensoren in der Nähe der Klappen hilfreich, in kleinen Anlagen kann dies bei schlechten Effizienzen auch temporär mit Anlegefühlern gemessen werden.

Als deutlich zuverlässiger haben sich 3-Wege-Ventile herausgestellt, die über die Lebensdauer dicht sind – im Gegensatz zu Rückschlagklappen. Allerdings kann es bei deren Einsatz zu Hochdruckstörungen kommen, wenn die Wärmepumpe läuft und das 3-Wege-Ventil im Nulldurchgang den Mindestvolumenstrom der



Wärmepumpe unterbricht [Schenk 2020a]. Die Ansteuerung von Heizkreis und TWW-Bereitung kann über ein Dreiwege-Ventil (mit einer Pumpe) oder zwei Rückschlagklappen mit zwei Pumpen erfolgen. Erfahrungen aus verschiedenen Projekten zeigen, dass bei der Installation eines Drei-Wege-Ventils leicht Fehler auftreten können (z. B. Laufrichtung des Ventils). Langfristig ist diese Lösung aber zuverlässiger als die Verwendung von Rückschlagklappen [Schenk 2020b].

Um eine ausgeglichene Regelung zu erreichen, empfiehlt [Schenk 2020a], den Temperaturfühler am Puffer in der Mitte zu positionieren, da dann eine Wasserreserve von ca. 150 l vorhanden ist.



3 Analyse von Versorgungsvarianten für Einzelgebäude

Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten, wie Wärmepumpen in Bestandsgebäuden eingesetzt werden können. Im folgenden Kapitel werden für zwei Beispielgebäude unterschiedliche Hydrauliken, der Einfluss der Vorlauftemperatur, von PV-Anlagen, Wärmequellen und thermischen Speichern genauer untersucht.

3.1 Randbedingungen

Um unterschiedliche Versorgungsvarianten mit Wärmepumpen für Einzelgebäude, sowohl Einfamilien- als auch Mehrfamilienhäuser im Bestand zu untersuchen, wurden verschiedene Systeme mithilfe der Software Polysun (Vela Solaris) simuliert und analysiert. Das dynamische Gebäudemodell wurde verwendet, um Jahressimulationen basierend auf der Heizlast des Gebäudes, der Geometrie, dem Glasanteil der Fassade sowie internen Wärmegewinnen durchzuführen. Eine Normaußentemperatur von -11 °C, ermittelt als hessischer Mittelwert basierend auf verschiedenen Standorten (siehe Kapitel 2.3.2), wurde für die Simulationen verwendet und Wetterdaten aus Meteonorm (Standard Test-Referenz-Jahr) wurden genutzt. Es wurden zwei Gebäudemodelle (Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus) in verschiedenen Sanierungszuständen simuliert:

- Altbau unsaniert (Original),
- Teilsanierung mit Dachdämmung und Fenstertausch (TS1),
- Teilsanierung mit Dach- und Kellerdeckendämmung sowie Fenstertausch (TS2),
- Vollsanierungszustand mit Dach-, Kellerdecke-, Außenwanddämmung und Fenstertausch (Komplett)

Um die Wärmepumpe zu dimensionieren, wurde zunächst die Heizleistung des Gebäudes nach dem vereinfachten Verfahren der DIN 12831 Beiblatt 2 mithilfe der Software ZUB Helena berechnet. Dabei wurde in Anlehnung an Hersteller-Planungshandbücher ein Leistungszuschlag von 0,25 kW pro Person für die Warmwasserbereitstellung berücksichtigt. Die Wärmepumpe wurde so dimensioniert, dass sie einen monovalenten Betrieb im Vollsanierungszustand ermöglicht². Für den Teilsanierungszustand und den Originalzustand ist dann ein zweiter Wärmeerzeuger erforderlich. Hier wurden monoenergetische (mit zusätzlichem Heizstab) bzw. bivalente Wärmepumpensysteme simuliert.

Die Sperrzeiten des Energieversorgers wurden bei der Dimensionierung der Wärmepumpe nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Sperrzeiten würde laut [Wagnitz 2022] dazu führen, dass die Wärmepumpe die gleiche Wärmemenge in kürzerer Zeit bereitstellen müsste. Bei monoenergetischen Systemen würde der Heizstab (HS) früher im Betrieb genommen, was zu einer sinkenden Gesamteffizienz führen würde. Das Viessmann Planungshandbuch geht allerdings davon aus, dass der Effekt auf die Dimensionierung einer Wärmepumpe eher geringfügig ist: "Bei den in Deutschland herrschenden klimatischen Bedingungen hat es sich in der Praxis bewährt, bei Sperrzeiten bis zu 2 Stunden pro Tag keine Zuschläge auf die Leistung der Wärmepumpe vorzunehmen, sie also nur auf Basis der Heizlast des Gebäudes auszulegen. Damit ist es zwar theoretisch möglich, dass nicht alle Räume des Gebäudes durchgehend auf Zieltemperatur gehalten werden können, bei üblichem Heizbetrieb in Wohngebäuden ist dies jedoch sehr unwahrscheinlich." [Viessmann 2011]

Im Rahmen der Simulationen wurden nur die Bestandsheizkörper als Wärmeübergabe modelliert. Da in Polysun die Wärmeübergabe vereinfacht simuliert wird, war eine raumweise Betrachtung der Heizlast nicht möglich.

30

² Die Wärmepumpe kann natürlich auch auf den aktuellen Sanierungszustand (monovalent) ausgelegt werden. Dieser Fall wurde hier jedoch nicht untersucht.



3.2 Ein- und Zweifamilienhäuser

3.2.1 Darstellung der Varianten

Das betrachtete Gebäude aus der Baualtersklasse 1958 – 1968 basiert auf dem EFH E aus der deutschen Wohngebäudetypologie [Loga et al. 2015]. Im Ist-Zustand wird das Haus mit einem 20 kW Öl-Niedertemperaturkessel beheizt. Es wurden vier Gebäudemodelle simuliert, die jeweils den oben genannten Sanierungszustand (Original, TS1, TS2 und Komplett) abbilden. Bild 12 zeigt die U-Werte, die spezifische Heizlast und die Wärmebrückenzuschläge für das EFH-Modell in Abhängigkeit vom Sanierungszustand (alle Kenndaten des Gebäudes sind in Anhang B dokumentiert). Die U-Werte der Varianten TS1, TS2 und komplett wurden als bereits in der Vergangenheit durchgeführte Sanierungen angesetzt, so dass die Standards zum Teil eher schwach erscheinen und nicht zwingend die Anforderungen einer BEG³-Sanierung erfüllen.

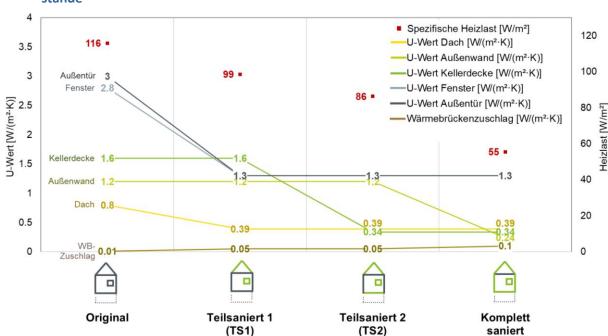


Bild 12: U-Werte, spezifische Heizlast und Wärmebrückenzuschläge für die untersuchten Gebäudezustände

Um die Effizienz der verschiedenen Wärmepumpensysteme in unterschiedlichen Kontexten zu untersuchen, wurden verschiedene Hydraulik-Varianten entwickelt und simuliert. Es handelte sich dabei um einen iterativen Prozess, währenddessen Anpassungen und Optimierungen vorgenommen wurden. Polysun ermöglicht nicht die Modellierung aller möglichen Hydraulik-Schaltungen, da zu komplexe Systeme zu Fehlermeldungen führen können, obwohl sie praktisch realisierbar sind. Die Schemata der verschiedenen monovalenten Varianten (gekennzeichnet durch den Buchstaben "M") und bivalenten Varianten (gekennzeichnet durch den Buchstaben "B") sind in Tabelle 4 dargestellt. Bei einigen Fällen konnten Software-Vorlagen übernommen und angepasst werden (Systeme M1, M2 und B2), während in anderen Fällen neue Hydraulik-Schemata entwickelt werden mussten (B1, B3, B4). In den bivalenten Varianten wurde der Kessel über eine hydraulische Weiche ins System eingebunden (das I-förmige Element, das in den Schemata dargestellt ist). In allen Systemen wurden 18 Radiatoren mit je 1 kW (berechnet bei 70 °C Vor- und 60 °C Rücklauftemperatur) für die Bestandsheizkörper verwendet. Die Soll-Innenraumtemperatur wurde auf 21 °C eingestellt. Die Wärme-

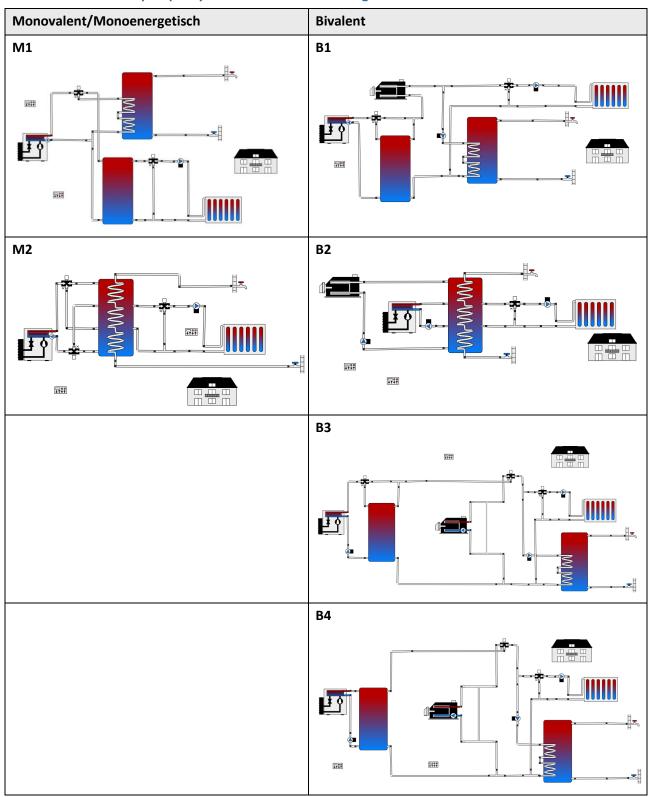
-

³ Bundesförderung für energieeffiziente Gebäude, siehe https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente Gebaeude/effiziente ge-baeude node.html



pumpe hat eine Heizleistung von 7,4 kW bei A2/W35 und einen COP_{A2/W35} von 4,03. Bei 55 °C Vorlauftemperatur und 7 °C Außentemperatur verringert sich der COP auf 3,37.

Tabelle 4: Schematische Darstellung der untersuchten Hydraulik-Varianten für monovalente und bivalente Wärmepumpensysteme für das EFH-Modellgebäude





Bei den bivalenten Systemen wird die Wärmepumpe während der kältesten Jahreszeiten durch den Kessel unterstützt. Hier wurde ein Parallelbetrieb untersucht, bei dem der Kessel eingeschaltet wird, sobald eine bestimmte Außentemperatur unterschritten wird (der Bivalenzpunkt "BP"), während die Wärmepumpe weiterläuft. Es wurde auch ein Parallelbetrieb bei den monoenergetischen Varianten mit Heizstabunterstützung untersucht. Die bivalenten Systeme wurden so geregelt, dass der Warmwasserbedarf im Sommer vollständig durch die Wärmepumpe gedeckt wird. In allen Systemen wurde eine Vorrangschaltung für Trinkwarmwasser implementiert.

Um das System möglichst effizient zu betreiben, sollte die TWW-Temperatur so gering wie möglich gehalten werden, während gleichzeitig die Anforderungen hinsichtlich des Legionellenschutzes erfüllt werden müssen. Laut dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) vermehren sich Legionellen bei Warmwassertemperaturen zwischen 25 °C bis ca. 45 °C sehr gut. Um Legionellenbefall bei Kleinanlagen ohne Zirkulation und mit geringem Leitungsvolumen zu vermeiden, muss eine Betriebstemperatur von 50 °C eingehalten werden [DVGW 2022].

Die Heizungs-Vorlauftemperatur wurde außentemperaturabhängig über eine Heizkurve geregelt, die durch eine programmierbare Steuerung implementiert wurde. Die Heizkurven wurden vereinfacht durch zwei Geraden mit drei Parametern modelliert (siehe Bild 13). Eine Steilheit von -1,2 und 55 °C als maximale Vorlauftemperatur wurden ausgewählt, wobei die Außentemperatur, bei der die maximale Vorlauftemperatur erreicht wird, je nach Betriebsweise unterschiedlich gewählt wurde. Für bivalente Systeme wurde der Bivalenzpunkt als Referenz genommen, während für monovalente Systeme, sofern nicht anders spezifiziert, die Norm-Außentemperatur von -11 °C verwendet wurde. Folgende Bivalenzpunkte wurden anhand der Leistungskennlinie der Wärmepumpe und der Gebäude-Heizlast ermittelt: -1 °C im Originalzustand, -2 °C bei TS1 und -4 °C bei TS2. Falls der Heizwärmebedarf bei diesen Bivalenzpunkten nicht erreicht wurde, wurde er iterativ um 1 K erhöht, bis der Bedarf gedeckt werden konnte. Diese Anpassung war jedoch nur in wenigen Fällen erforderlich. In allen Systemen wurde eine Hysterese implementiert, um ein zu häufiges Einschalten der Wärmepumpe zu vermeiden (weitere Details zur Regelung können in den hydraulischen Steckbriefen im Anhang D gefunden werden). Als Beispiel ist in Bild 13 die Heizkurve für ein bivalentes System mit Bivalenzpunkt -2 °C dargestellt.

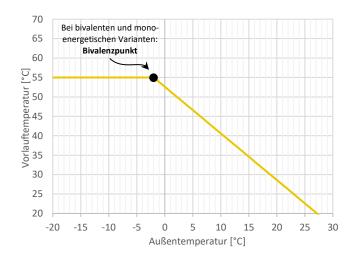


Bild 13: Regelung der Heizkreistemperatur über eine Heizkurve, Beispieldarstellung

3.2.2 Simulationsergebnisse

3.2.2.1 Einfluss der Hydraulik-Schaltung

Im ersten Schritt wurden verschiedene hydraulische Einbindungen für die Wärmepumpe untersucht. Die Simulationsergebnisse für unterschiedliche Sanierungszustände sind in Bild 14 zusammengefasst. Die



verwendeten Bivalenzpunkte (BP) sind ebenfalls dargestellt. Die Wärmepumpe wurde so dimensioniert, dass sie im Vollsanierungszustand monovalent betrieben werden kann.

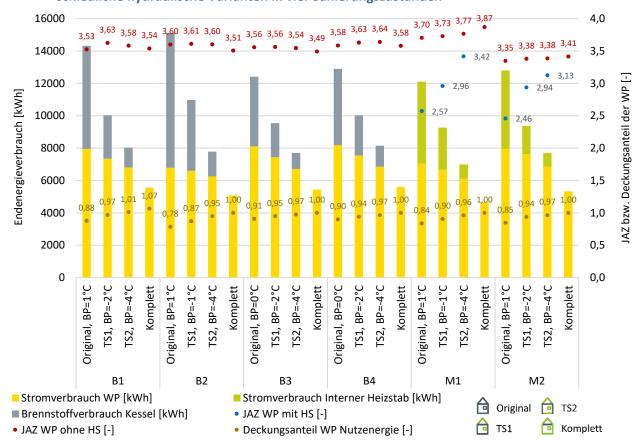


Bild 14: Endenergieverbrauch, JAZ_{WP} und JAZ_{WP+HS} und Deckungsanteil der Wärmepumpe für unterschiedliche hydraulische Varianten in vier Sanierungszuständen

Folgende Erkenntnisse können aus diesen Ergebnissen abgeleitet werden:

- Die Ergebnisse zeigen, dass die Sanierung der Gebäudehülle zu signifikanten Endenergieeinsparungen führt (im Diagramm sind die Endenergien für Brennstoff und elektrischen Strom ohne Gewichtungsfaktoren addiert).
- In den bivalenten Systemen wird die Wärmepumpe während der kältesten Jahreszeit vom Kessel unterstützt. Dies führt dazu, dass bei B1 bis B4 hohe JAZ_{WP}-Werte zwischen 3,49 und 3,64 erreicht werden, mit wenig Sensitivität zum Dämmniveau.
- Beim Vergleich zwischen den bivalenten Hydrauliken zeigt die Variante B3 niedrigere Endenergieverbräuche als die anderen Hydraulik-Varianten, für alle vier Sanierungszustände. Allerdings bleiben die Unterschiede zwischen den bivalenten Hydrauliken generell relativ gering.



- Bei den monoenergetischen bzw. monovalenten Varianten steigt der JAZ_{WP+HS} bei besser gedämmter Gebäudehülle, da der Heizstab seltener genutzt wird. Im Originalzustand und im ersten Teilsanierungszustand (TS1) werden JAZ_{WP+HS}-Werte unterhalb von 3,1 erreicht, was einen relativ ineffizienten Betrieb der Wärmepumpe⁴ kennzeichnet. Ab dem zweiten Teilsanierungszustand werden jedoch JAZ_{WP+HS}-Werte von 3,42 bzw. 3,13 erreicht, was relativ effizient ist. Das System M1 funktioniert energiesparender und effizienter als M2.
- Bei besser gedämmten Gebäuden steigt der Deckungsanteil der Wärmepumpe (bezogen auf die Nutzenergie). Im System B1 werden Deckungsanteile von über 1 erreicht. Dies liegt daran, dass durch den in Reihe geschalteten Kessel Stillstandverluste entstehen, wenn warmes Wasser durch den kalten Kessel durchströmt die Wärmepumpe muss diese zusätzlichen Verluste kompensieren. Um dieses spezifische Problem bei der Hydraulik B1 zu vermeiden, sollte eine Bypass-Schaltung vor dem Kessel vorgesehen werden.

Eine Auswertung der Varianten im Hinblick auf Treibhausgas-Emissionen (THG) und Effizienz ist in Bild 15 dargestellt. Dort werden die Wärmepumpen-Varianten mit den Varianten verglichen, die von einem Kessel beheizt werden. Die ökologische Bewertung erfolgte auf der Grundlage der Emissionsfaktoren, die im Anhang C zusammengefasst sind.

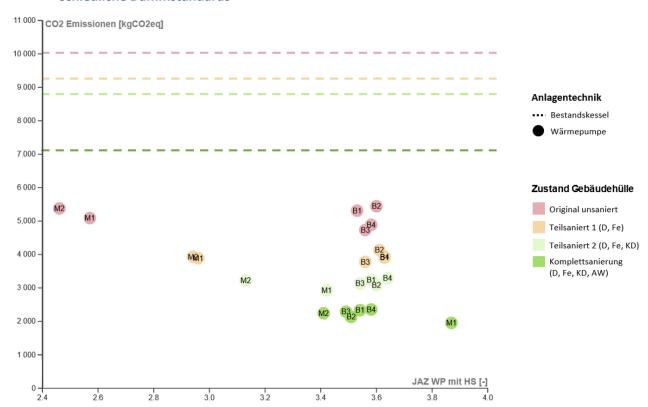


Bild 15: THG-Emissionen und WP-Effizienz für unterschiedliche hydraulische Einbindungen und unterschiedliche Dämmstandards

Die Ergebnisse zeigen, dass jede Verbesserung der Gebäudehülle THG-Einsparungen mit sich bringt. Im Vergleich zum Ist-Zustand mit reiner fossiler Heizung erlaubt der Einbau einer bivalenten Wärmepumpe ohne Verbesserung der Gebäudehülle ca. eine Halbierung der THG-Emissionen. Hier wird auch deutlich, dass eine

_

⁴ Je höher die JAZ, desto effizienter arbeitet die WP. Typischerweise liegen die JAZ bei Luft-WP im Bestand zwischen 2,5 und 3,7, mit einem Durchschnitt von 3,1 [Günther et al. 2020]. Ab einer JAZ von 3,1 wird hier die Wärmepumpe als relativ effizient bewertet.



Verbesserung der Gebäudehülle die Effizienz der monoenergetischen Varianten stark fördert, während die Effizienzen der bivalenten Varianten stabil auf einem hohen Niveau bleiben. Im Originalzustand und TS1 sind also bivalenten Systeme sinnvoller als monoenergetischen Systeme. Erst ab TS2 ist der monoenergetische Betrieb der WP mit Heizstab aus Sicht der Emissionen und der Effizienz sinnvoll. Durch die Verwendung eines Kombispeichers anstelle von zwei getrennten Speichern (Puffer- und TWW-Speicher) weist das System M2 immer leicht höhere Emissionen und schlechtere JAZ_{WP+HS} als M1 auf.

3.2.2.2 Einfluss der maximalen Vorlauftemperatur im System M1

Um den Einfluss der maximalen Vorlauftemperatur auf die Systemeffizienz zu bewerten, wurde sie auf 60 °C angehoben und schrittweise reduziert, bis das Gebäude nicht mehr auf die Solltemperatur von 21 °C beheizt werden konnte. Das System M1 wurde in den Teilsanierungszuständen TS1 (Dach und Fenster saniert) und TS2 (Dach, Fenster und Kellerdecke saniert) berücksichtigt. In TS1 konnte die Temperatur bis 46 °C reduziert werden und bei TS2 bis 45 °C. Unterhalb dieser Systemtemperaturen konnte das Gebäude nicht auf 21 °C geheizt werden (Bild 16).

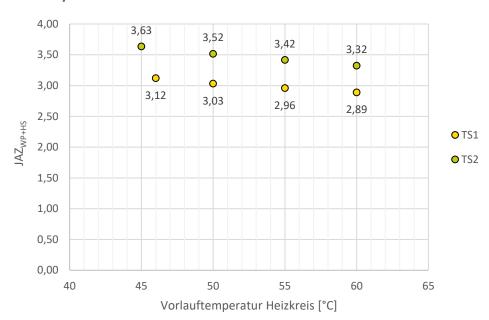


Bild 16: Entwicklung der Jahresarbeitszahl in Abhängigkeit der maximalen Vorlauftemperatur des Heizkreises im System M1

Eine Reduktion der Vorlauftemperatur führt zu Stromeinsparungen und erhöht die Effizienz. Je besser das Gebäude gedämmt ist, desto höher ist die Effizienzsteigerung durch eine Reduktion der Vorlauftemperatur. Beim TS2 erhöht sich der JAZ_{WP+HS} um etwa 0,1 pro 5K Temperaturreduzierung, beim TS1 um etwa 0,07 pro 5K. Wenn die Vorlauftemperatur im Heizkreis reduziert wird, können im monoenergetischen Betrieb schon ab TS1 JAZ_{WP+HS}-Werte von über 3,1 erreicht werden, was dafür spricht, dass die WP bereits mit Heizstab effizient eingesetzt werden kann, sobald Dach und Fenster saniert sind. Da in diesen Modellanalysen keine raumweise Wärmeübergabe betrachtet wurde, kann es jedoch in der Praxis vorkommen, dass einzelne Heizkörper für solch niedrigere Vorlauftemperaturen unterdimensioniert sind und beim Einbau einer WP ausgetauscht werden müssen.

3.2.2.3 Einfluss der Photovoltaik-Erzeugung im System M1

Um die Möglichkeiten zur Nutzung des Stroms einer eigenen PV-Anlage zu untersuchen, wurde eine 8 kWp Photovoltaik-Anlage (PV) mit einer Neigung von 45° und Südausrichtung für das EFH modelliert. Um die PV-Anlage und den Eigenverbrauch der Wärmepumpe realistisch in der Simulation zu berücksichtigen, wurde



ein typisches Profil für den Haushaltsstromverbrauch (HH-Strom) in Höhe von 3.500 kWh integriert. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Regelungsstrategien zu untersuchen, wurden zunächst Simulationen ohne PV-Optimierung durchgeführt und anschließend drei Regelungsstrategien verglichen: TWW-Bereitstellung nur tagsüber, Erhöhung der Puffer- und Raumtemperatur tagsüber ("Taganhebung") sowie eine intelligente Regelung. Für die letzten beiden Regelungsstrategien wurden die Polysun-Vorlagen von Prof. Dr. D. Zogg (Smart Energy Engineering GmbH) verwendet [Zogg 2022] und für diese Studie angepasst. Die Funktionsweise der Regelungsstrategien bzw. die durchgeführten Anpassungen der Vorlagen sind in den folgenden Abschnitten erläutert.

Keine Optimierung

In dieser Variante wurde keine Optimierung vorgenommen. Heizung und TWW-Bereitstellung erfolgten unabhängig von der Photovoltaik-Erzeugung. Wie bei den Varianten ohne PV wurde ein 300-Liter-Pufferspeicher und ein 200-Liter-TWW-Speicher verwendet.

TWW nur Tagsüber

Mit dieser einfachen Regelung findet die TWW-Bereitstellung nur zwischen 9 und 16 Uhr statt. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass PV-Strom für die TWW-Bereitstellung genutzt wird, mit vergleichsweise geringem technischem Aufwand. Wie bei den Varianten ohne PV wurde ein 300-Liter-Pufferspeicher und ein 200-Liter-TWW-Speicher verwendet.

Taganhebung

In dieser Variante werden tagsüber die Solltemperatur des Pufferspeichers sowie die Raumtemperatur im Gebäude um 10 K bzw. 2 K angehoben, um das Gebäude als Wärmespeicher zu nutzen und den PV-Eigenverbrauch zu erhöhen. Die Regelung ist tagsüber aktiv, unabhängig von der Photovoltaik-Erzeugung. Die TWW-Bereitstellung findet ebenfalls nur tagsüber statt. Es wurden größere Puffer- und TWW-Speicher als in den Basis-Varianten verwendet (500 Liter bzw. 300 Liter), um einen stärkeren Effekt der Taganhebung zu erzielen.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Effektivität dieser Regelung von der Wärmekapazität des Gebäudes abhängt. Je höher die Wärmekapazität, desto besser kann thermische Energie gespeichert werden. In dieser Studie wurde generell eine niedrige Kapazität von 50 Wh/(m²·K) verwendet, was einer eher leichten Bauweise entspricht. Bei den ersten Simulationen von Gebäuden mit Taganhebung hat sich jedoch gezeigt, dass diese Kapazität zu gering war, um Wärme effektiv zu speichern. Die Taganhebung führte in diesen Fällen zu höheren CO₂-Emissionen als die nicht optimierte Variante. Um das Potenzial der Taganhebung zu untersuchen, wurde die Kapazität auf 208 Wh/(m²·K) erhöht (Wert aus der Vorlage), was einem Massivbau entspricht. Außerdem wurde die Taganhebung nur bei einer Komplettsanierung durchgeführt, nicht bei einer Teilsanierung oder im Originalzustand. Die ersten Simulationsdurchläufe haben gezeigt, dass trotz des erhöhten PV-Eigenverbrauchs die Taganhebung bei diesen Effizienzstandards den Effekt hatte, den Netzbezug und die CO₂-Emissionen des Systems zu erhöhen. Aus diesem Grund war die Umsetzung dieser Regelung nicht mehr vorteilhaft⁵.

Intelligente Regelung mit Speicherüberhöhung:

In dieser Regelung nach dem SG-Ready-Standard werden bei einem Überschuss an Photovoltaik-Leistung die Temperaturen im Pufferspeicher und im TWW-Speicher angehoben. Im Gegensatz zur Taganhebung wird hier die Raumtemperatur des Gebäudes nicht beeinflusst.

Im Rahmen des SG-Ready-Standards werden die folgenden Betriebszustände definiert:

⁵ Davon abgesehen wäre bei einem solchen Ansatz auch noch die Frage der Nutzerakzeptanz zu untersuchen.



- SG-Ready Stufe 0: WP gesperrt, kein Betrieb
- SG-Ready Stufe 1: WP freigegeben, Normalbetrieb
- SG-Ready Stufe 2: WP erh
 ö
 hter Betrieb, Wunschbetrieb
- SG-Ready Stufe 3: WP erhöhter Betrieb, Zwangsbetrieb

Zogg erklärt, dass die höchste Stufe "Zwangsbetrieb" bei Wärmepumpen in der Praxis nicht immer verwendbar ist, um Schäden an Verdichtern zu vermeiden. Daher müssen Mindeststillstandszeiten definiert werden. Außerdem dürfen die Speicher nicht weiter aufgeladen werden, wenn sie bereits am oberen Sollwert sind. Aus diesen Gründen wurde Stufe 3 nicht in das Modell aufgenommen, sondern nur die Betriebszustände 0 bis 2. Es wurden größere Puffer- und TWW-Speicher als in den Basisvarianten verwendet (500 Liter bzw. 300 Liter), um einen stärkeren Effekt der intelligenten Regelung zu erzielen.

Die Regelung funktioniert folgendermaßen: Solange der Überschuss an Photovoltaik-Leistung (PV-Leistung minus Bedarf an Haushaltsstrom) unter einem bestimmten Schwellenwert liegt (2 kW beim Pufferspeicher, 3 kW beim TWW-Speicher), arbeitet die Wärmepumpe im Normalbetrieb (Stufe 1). Wird der Schwellenwert überschritten, wird die Wärmepumpe im erhöhten Betrieb (Stufe 2) gefahren: Die Soll-Temperaturen im Puffer- und im TWW-Speicher werden angehoben.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen des Wärmepumpensystems M1 mit PV für verschiedene Sanierungszustände und Regelstrategien sind in Bild 17 dargestellt. Im Anhang C wurde ausführlich beschrieben, wie die Größen Autarkiegrad und Eigenverbrauchsverhältnis berechnet wurden. Im Gegensatz zu den anderen Ergebnissen in dieser Studie wurde hier nicht nur der Stromverbrauch der Wärmepumpe, sondern auch der Haushaltsstromverbrauch von 3.500 kWh pro Jahr berücksichtigt.



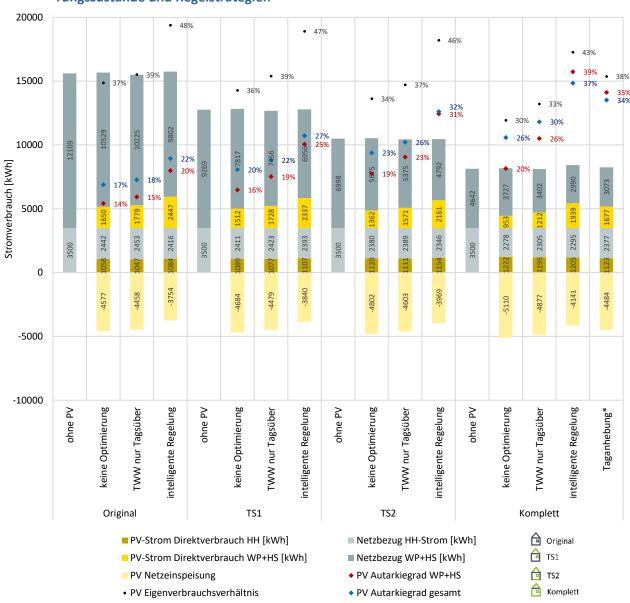


Bild 17: Auswirkungen der PV-Stromerzeugung auf den Stromverbrauch für unterschiedliche Sanierungszustände und Regelstrategien

*Die Taganhebung würde nur bei schwere bis mittel-schwere Bauweise optimal funktionieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine bessere Dämmung des Gebäudes zu höheren Autarkiegraden führt: von maximal 20 % Autarkie für die WP im Originalzustand bis zu fast dem Doppelten (39 %) im vollsanierten Zustand. Eine intelligente Regelung bringt umso mehr Vorteile, je besser die Gebäudehülle gedämmt ist. Im Vergleich zu einer nicht optimierten Anlage erhöht sich der Autarkiegrad der WP durch Nutzung der intelligenten Regelung im Originalzustand um 6 %, während im vollsanierten Zustand eine Erhöhung von 19 % durch die intelligente Regelung ermöglicht wird. Bei der Komplettsanierung führt die Regelstrategie "Taganhebung" zu einem höheren Autarkiegrad als die Strategie "TWW nur tagsüber", aber zu einem leicht geringeren Autarkiegrad als die intelligente Regelung. Simulationstests haben gezeigt, dass die Taganhebung bei Teilsanierung zu einem höheren Netzbezug führt als das nicht optimierte System. Dies liegt an den höheren Wärmeverlusten durch die Gebäudehülle aufgrund der angehobenen Innenraumtemperaturen. Die Taganhebung scheint also vor allem bei gut gedämmten, massiven Gebäuden sinnvoll zu sein, aber nicht bei teilweise sanierten Gebäuden.



Die Analyse der jährlichen THG-Emissionen zeigt vor allem die signifikante Reduktion der Emissionen durch die Dämmung der Gebäudehülle (Bild 18). Obwohl die THG-Einsparungen durch die Nutzung von PV-Strom bei allen Sanierungszuständen in absoluten Größenordnungen vergleichbar sind, steigen sie im Verhältnis zu den Gesamtemissionen mit besser gedämmten Gebäudehüllen: Im Originalzustand können durch die Nutzung von PV-Strom 18 % der Emissionen eingespart werden, während bei Vollsanierung Einsparungen von 30 % erreicht werden können.



Bild 18: Jährliche THG-Emissionen im System M1 mit PV (ohne Betrachtung der Netzeinspeisung)

*Die Taganhebung würde nur bei schwere bis mittel-schwere Bauweise optimal funktionieren

3.2.2.4 Einfluss der Größe der PV-Anlage im System M1

Um den Einfluss der Größe der PV-Anlage auf den Autarkiegrad zu untersuchen, wurde einerseits das System M1 für verschiedene Sanierungszustände mit einer 8 kWp-Anlage simuliert (siehe letztes Kapitel). Andererseits wurden die vier Sanierungsvarianten mit einer PV-Anlage verglichen, deren Größe bei ca. 1 kWp pro MWh Stromverbrauch liegt. Bei dieser Größe kann man typischerweise Autarkiegrade von ca. 30 % erwarten [Weniger et al. 2013]. Dabei wurde die intelligente Regelung implementiert.

Wie erwartet führt eine größere PV-Anlage zu höheren Autarkiegraden (Tabelle 5). Im Originalzustand, bei dem die PV-Anlage doppelt so groß gewählt ist, steigt der Autarkiegrad um 6 %. Bei TS1 und TS2 steigt der Autarkiegrad der WP um 5 bzw. 4 %. Eine Vergrößerung der PV-Anlage führt in diesem Fall nur zu einer geringen Erhöhung des Autarkiegrades.



Tabelle 5: Einfluss der PV-Leistung auf den Autarkiegrad für verschiedene Sanierungszustände

Zustand Gebäu- dehülle	PV Leistung [kWp]	Stromverbrauch gesamt, inkl. HH-Strom [kWh]	PV Strom- erzeugung [kWh]	PV Eigenver- brauchs- verhältnis [-]	PV Autarkiegrad gesamt [%]	PV Autarkiegrad WP [%]
Original	8	15805	7284	0,48	22 %	20 %
Original	16	15872	14109	0,32	28 %	26 %
TS1 (D, Fe)	8	12847	7284	0,47	27 %	25 %
TS1 (D, Fe)	12,8	12958	11278	0,36	31 %	30 %
TS2 (D, Fe, KD)	8	10509	7284	0,46	32 %	31 %
TS2 (D, Fe, KD)	10,8	10590	9879	0,38	35 %	35 %
Komplett	8	8468	7284	0,43	37 %	39 %
Komplett	8,8	8486	7757	0,41	38 %	40 %

3.2.2.5 Einfluss von Speichergröße und PV-Anlagengröße im System M1, komplett saniert

Die Größe der Pufferspeicher und des TWW-Speichers wurde im System M1 (komplett saniert) variiert, wobei die intelligente PV-Regelung eingesetzt wurde. Dabei wurden sowohl eine 8 kWp- als auch eine 16 kWp-PV-Anlage untersucht.

Bei Verwendung einer 8 kWp PV-Anlage können durch Vergrößerung des Speichers maximal 4 % höhere Autarkiegrade erreicht werden (Tabelle 6 oben links). Der Netzbezug zeigt nur sehr geringe Änderungen (Tabelle 6 oben rechts). Bei Verwendung einer 16 kWp PV-Anlage kann die Autarkie um maximal 6 % erhöht werden (Tabelle 6 unten links) und der Netzbezug kann dadurch um wenige Prozentpunkte reduziert werden (Tabelle 6 unten rechts). Insgesamt hat die Speichergröße also nur einen geringen Einfluss auf den Autarkiegrad und den Netzbezug.

Tabelle 6: Einfluss von Speichergröße und PV-Anlagengröße im System M1

Autarkiegrad		Volumen TWW-Speicher [L]				
WP, 8kWp		300	500	800	1000	1200
27	300	0.37	0.38	0.38	0.39	0.39
Put er [500	0.38	0.39	0.40	0.40	0.40
Volumen Puf- Volumen Puf- J000 1000 1200		0.39	0.39	0.40	0.41	0.41
olur	1000	0.39	0.40	0.40	0.40	0.41
> 4	1200	0.39	0.40	0.40	0.40	0.41

Netzbezug,		Volumen TWW-Speicher [L]					
8 kWp		300	500	800	1000	1200	
۴- ایا	300	5401	5377	5420	5387	5409	
F 500		5366	5344	5375	5356	5379	
Volumen Purf- ferspeicher [L] 800 1000 1300		5339	5338	5352	5333	5364	
olur	1000	5345	5332	5353	5349	5361	
e <	1200	5346	5331	5352	5369	5356	

Autarkiegrad			Volumen TWW-Speicher [L]					
WP, 16kWp		300	500	800	1000	1200		
	300	0.46	0.47	0.48	0.49	0.49		
olumen Puffer- speicher [L]	500	0.48	0.49	0.50	0.50	0.50		
en f	800	0.50	0.50	0.51	0.52	0.52		
Volumen speich	1000	0.50	0.50	0.51	0.52	0.52		
0/	1200	0.50	0.51	0.51	0.52	0.52		

Netzbezug,		Volumen TWW-Speicher [L]					
16 kWp		300	500	800	1000	1200	
er-	300	4835	4810	4825	4785	4791	
Puffer er [L]	500	4762	4746	4735	4726	4742	
	800	4695	4696	4716	4682	4690	
Volumen Pu speicher [1000	4706	4680	4688	4664	4681	
9 "	1200	4718	4677	4682	4672	4682	

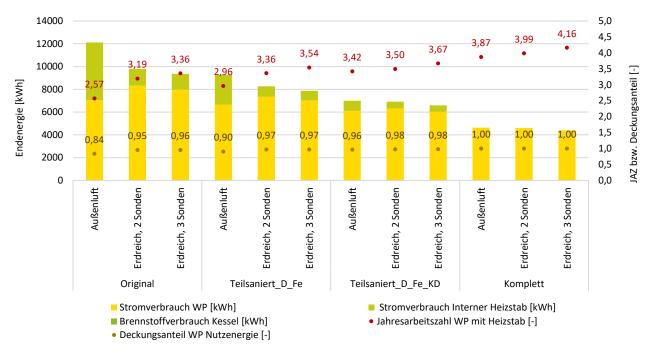
3.2.2.6 Einfluss der Wärmequelle im System M1

Um der Einfluss der Wärmequelle zu untersuchen, wurde eine Sole-Wärmepumpe mit Erdsonden simuliert und mit der Außenluft-Wärmepumpe verglichen. Es wurden zwei bzw. drei Doppel-U-Sonden mit einer Tiefe von jeweils 80 Meter berücksichtig. Erdreich-Wärmepumpen ermöglichen eine höhere Effizienz, größere



Stromeinsparungen (Bild 19) und geringere THG-Emissionen (Bild 20) im Vergleich zu Luft-Wärmepumpen. Durch die Verwendung von drei Sonden statt zwei kann ebenfalls eine höhere Effizienz erzielt werden. Hier muss allerdings die Quellenverfügbarkeit geprüft werden.

Bild 19: Einfluss der Wärmequelle auf die Effizienz der Wärmepumpe bei verschiedenen Sanierungszuständen





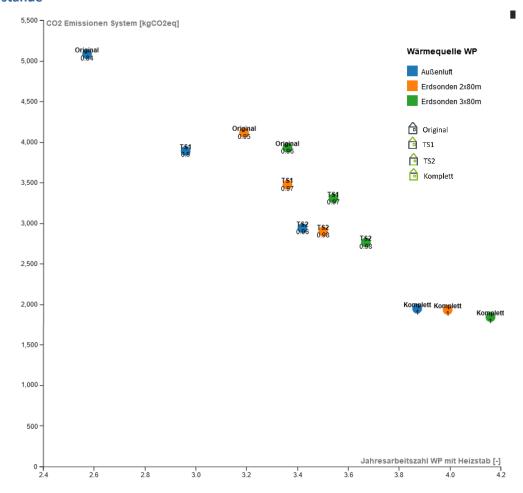


Bild 20: Vergleich der CO₂-Emissionen und Effizienz für verschiedene Wärmequellen und Sanierungszustände

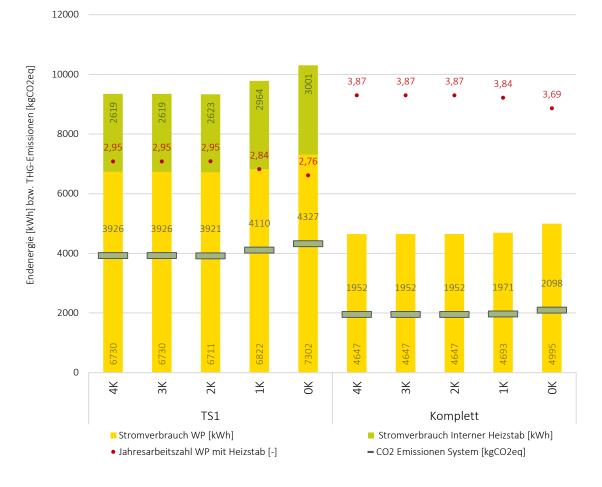
3.2.2.7 Einfluss der Nachtabsenkung im System M1

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Nachtabsenkung auf die Effizienz und THG-Emissionen wurde die Tages-Solltemperatur wie zuvor auf 21 °C eingestellt und die Nachtabsenkung zwischen 0K und 4K variiert. Das bedeutet, dass die Soll-Innenraumtemperatur nachts zwischen 17 °C und 21 °C eingestellt wurde. Die Ergebnisse sind in Bild 21 zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Nachtabsenkung die Stromverbräuche und THG-Emissionen sinken und die Effizienz steigt. Die deutlichste Verbesserung der ökologischen Vorteile sind bei einer Nachtabsenkung von bis zu 2K in TS1 oder bis zu 1K im Vollsanierungszustand zu beobachten. Bei einer höheren Nachtabsenkung sind kaum weitere THG-Einsparungen oder Effizienzfortschritte festzustellen.



Bild 21: Einfluss der Nachtabsenkung auf die Effizienz der Wärmepumpe und des Stromverbrauchs bei verschiedenen Sanierungszuständen im System M1





3.3 Mehrfamilienhäuser

3.3.1 Darstellung der Varianten

Das betrachtete Gebäude ist ein typisches Mehrfamilienhaus aus den 1960er Jahren (MFH E aus der Wohngebäudetypologie, Baualtersklasse 1958 – 1968 [Loga et al. 2015]), das im Ist-Zustand mit einem 70 kW Öl-Niedertemperaturkessel beheizt wird. Das MFH-Modell besteht aus 8 Wohneinheiten über 4 Etagen mit insgesamt 21 Bewohnern. Es wurden vier Sanierungszustände untersucht: unsaniert (Original), teilsaniert mit saniertem Dach und Fenstern (TS1), teilsaniert mit zusätzlicher Dämmung der Kellerdecke (TS2) und komplett saniert mit zusätzlicher Dämmung der Außenwände (Komplett). Die Haupt-Kenndaten des Gebäudes sind im Anhang B dargestellt. Die U-Werte, die für die Simulationen verwendet wurden, sind in Tabelle 7 aufgeführt.

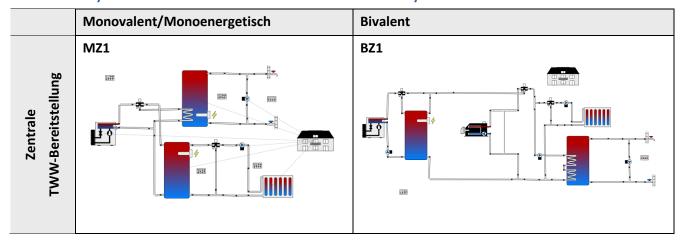
Tabelle 7: U-Werte für die vier Sanierungszustände für das MFH-Modell

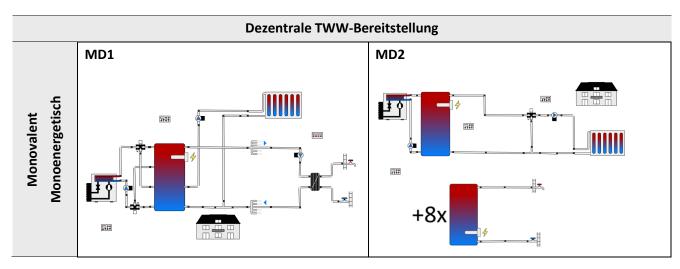
	Original	Teil 1	Teil 2	Komplett
U-Wert Dach [W/(m²•K)]	0.6	0.4	0.4	0.4
U-Wert Außenwand [W/(m²•K)]	1.2	1.2	1.2	0.24
U-Wert Kellerdecke [W/(m²•K)]	1.6	1.6	0.34	0.34
U-Wert Fenster [W/(m²•K)]	3	1.3	1.3	1.3
U-Wert Außentüre [W/(m²•K)]	3	1.3	1.3	1.3
Spezifische Heizlast ohne TWW [W/m²]	80	69	62	41

Tabelle 8 zeigt die verschiedenen hydraulischen Einbindungen der Wärmepumpe, die für das MFH-Modell untersucht wurden. Es wurde zwischen monovalenten (Buchstabe "M") und bivalenten (Buchstabe "B") Systemen unterschieden sowie zwischen Systemen mit zentraler (Buchstabe "Z") oder dezentraler (Buchstabe "D") TWW-Bereitstellung. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Hydrauliken, einschließlich der Regelstrategie sowie der Vor- und Nachteile, ist im Anhang D zu finden. Die Wärmepumpe hat eine Heizleistung von 30,6 kW bei A2/W35 und einen COP_{A2/W35} von 3,8. Bei 55 °C Vorlauftemperatur und 7 °C Außentemperatur verringert sich der COP auf 3.



Tabelle 8: Hydraulik-Varianten für monovalente und bivalente Systeme für das MFH-Modell







3.3.2 Simulationsergebnisse

3.3.2.1 Einfluss der Hydraulik

Die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Hydraulikvarianten aus Tabelle 8 werden in diesem Abschnitt in Bild 22 und Bild 23 dargestellt. Bei der Bewertung der THG-Emissionen auf Bild 23 muss beachtet werden, dass die y-Achse aus Gründen der Lesbarkeit nicht bei 0 beginnt, sondern bei 6000 kgCO₂eq. Dies führt zu einer verzerrten Darstellung der tatsächlichen Höhe der Emissionen und kann zu einer Überbetonung von Emissionsdifferenzen führen. Die ökologische Bewertung erfolgte auf der Grundlage der Emissionsfaktoren, die im Anhang C zusammengefasst sind.

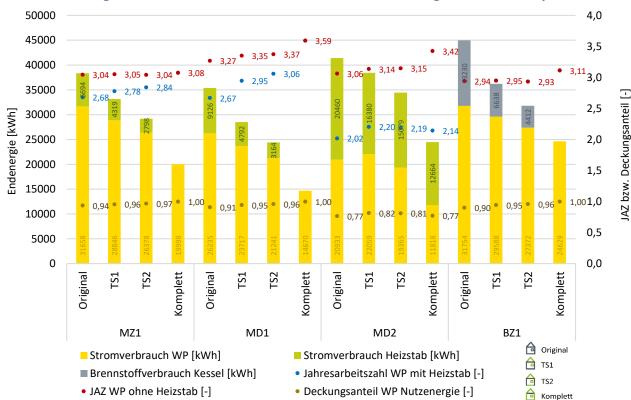


Bild 22: Endenergie und JAZ im MFH-Modell für verschiedene Sanierungszustände und Hydrauliken



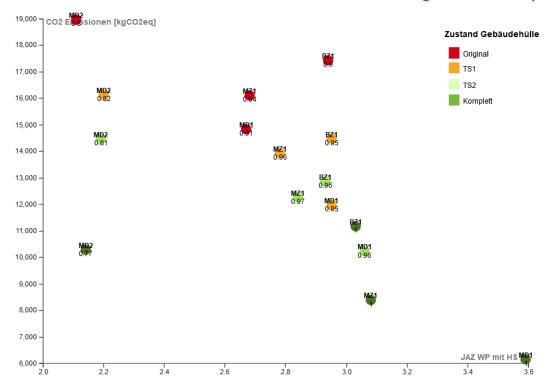


Bild 23: THG-Emissionen und JAZ im MFH-Modell für verschiedene Sanierungszustände und Hydrauliken

Wie beim EFH führt auch bei allen MFH-Varianten eine Dämmung der Gebäudehülle zu Endenergieeinsparungen und erhöhter Effizienz. Die bivalente Variante BZ1 weist Arbeitszahlen von knapp 3 auf, was für einen sinnvollen Betrieb der Wärmepumpe in wenig gedämmten Gebäuden spricht. Die Variante MD2 weist aufgrund des hohen Stromverbrauchs durch die direktelektrische TWW-Bereitstellung in den E-Boilern die schlechteste Effizienz auf und verursacht zudem die höchsten THG-Emissionen, weshalb sie nicht zu empfehlen ist. Die Variante MD1 mit Frischwasserstationen in den Wohnungen hat aufgrund der niedrigeren TWW-Temperaturen und der Abwesenheit von Wärmeverlusten durch die Warmwasserzirkulation die höchste Effizienz und die niedrigsten Emissionen. Bei MZ1 und MD1 kann eine deutliche Steigerung der Effizienz beobachtet werden, wenn der Dämmstandard verbessert wird. Für MZ1 muss das Gebäude vollständig saniert sein, um die Wärmepumpe effizient betreiben zu können, während bei MD1 die Wärmepumpe bereits ab TS2 (das heißt, sobald Dach, Fenster und Kellerdecke saniert sind) effizient betrieben werden kann.

3.3.2.2 Einfluss der PV-Erzeugung

Im EFH-Modell wurden für die PV-Erzeugung die Regelstrategien "TWW nur tagsüber", "intelligente Regelung" und "Taganhebung" untersucht (siehe Abschnitt 3.2.2.3). Die Regelstrategie "Taganhebung" wurde für das MFH-Modell nicht untersucht, da sie nur unter bestimmten Bedingungen (massive Bauweise und große Speicher) funktioniert. Bei der Regelung "TWW nur tagsüber" gibt es für das MFH-Modell eine Schwierigkeit: Wenn 60 °C TWW nur tagsüber bereitgestellt wird, kann nicht über die ganze Nacht hinweg eine Rücklauftemperatur von 55 °C im Pufferspeicher garantiert werden. Eine mögliche Regelstrategie wäre, bei den monoenergetischen Varianten den Heizstab nur tagsüber zu betreiben – die Wärmepumpe wird bei Bedarf kontinuierlich betrieben. Diese Strategie hat jedoch nur einen geringen Effekt (eine Reduktion des Netzbezugs von weniger als 1 % bei MZ1 Original) im Vergleich zum System ohne PV-Optimierung. Daher wurde diese Regelstrategie "TWW nur tagsüber" im MFH-Modell nicht weiter untersucht und es wurde nur die intelligente Regelstrategie verwendet.

In diesem Abschnitt werden zwei Hydraulik-Varianten mit PV untersucht. Zum einen die Variante MZ1, die bei der praktischen Umsetzung die einfachste Variante darstellt, da die Bestandskomponenten für die



Wärmeverteilung und -übergabe weiterverwendet werden können, ohne dass neue Komponenten in den Wohnungen installiert werden müssen (wie z. B. Frischwasserstationen, wie es bei MD1 der Fall ist). Zum anderen wird die Variante MD2 mit Elektro-Boilern (E-Boiler) in den Wohnungen untersucht. Dabei stellt sich die Frage, inwiefern die hohen Stromverbräuche durch die direktelektrische TWW-Bereitstellung durch PV gedeckt werden können. Es wurde eine 14 kWp PV-Anlage mit 35° Neigung und Südausrichtung untersucht. Ein jährlicher Haushaltsstromverbrauch von 16.000 kWh wurde bei den Varianten mit PV zusätzlich berücksichtig. Die Ergebnisse sind in Bild 24 und Bild 25 zusammengefasst. Es wurden die Auswirkungen von PV auf die vier verschiedenen Sanierungszustände untersucht, sowohl ohne Optimierung als auch mit intelligenter Regelung. Zusätzlich wurde bei einem komplett sanierten Zustand der Effekt einer größeren PV-Anlage untersucht (36 kWp, was ca. 1 kWp pro MWh Stromverbrauch entspricht) und bei MD2 wurden die Auswirkungen einer Vergrößerung des E-Boiler-Volumens analysiert. Bei PV-Überschüssen wurde die maximale TWW-Temperatur auf 65 °C angehoben.

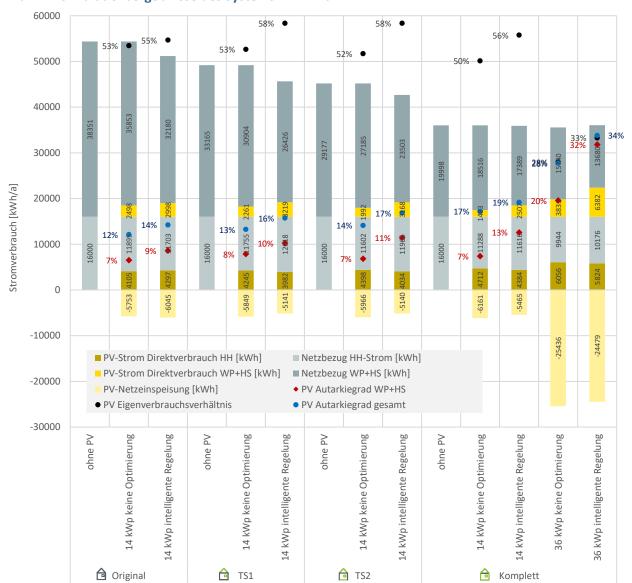


Bild 24: Simulationsergebnisse des Systems MZ1 mit PV

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die Dämmung der Gebäudehülle nur geringen Einfluss auf den Autarkiegrad der Wärmepumpe hat.



Die Autarkiegrade sind bei einer 14 kWp-Anlage relativ gering (bis zu 13 %), verglichen mit den Ergebnissen für EFH, bei denen PV-Autarkiegrade von bis zu 39 % erreicht werden (siehe Abschnitt 3.2.2.3). Dies liegt einerseits daran, dass die PV-Anlage im MFH relativ betrachtet kleiner dimensioniert ist als im EFH. Dies gilt sowohl in Bezug auf die beheizte Wohnfläche mit 23 Wp/mwfl² beim MFH und 58 Wp/mwfl² beim EFH, als auch in Bezug auf die Personenbelegung mit 0,7 kWp/Person beim MFH und 2 kWp/Person beim EFH. Mit einer größeren PV-Anlage von 36 kWp (was 1,7 kWp/Person bzw. 59 Wp/mwfl² entspricht) würde der Autarkiegrad der Wärmepumpe auf 32 % erhöht werden. Allerdings würde eine 36 kWp PV-Anlage mehr Fläche benötigen, als an Dachfläche des Gebäudes zur Verfügung steht und sollte daher eher als hypothetisches Beispiel betrachtet werden, um den Einfluss auf den Autarkiegrad zu untersuchen (obwohl es auch möglich wäre, benachbarte Flächen wie Parkplätze oder andere Bereiche mit PV-Anlagen auszustatten).

Bei 14 kWp-Anlagen zeigt die intelligente Regelung im Vergleich zu nicht-optimierten Systemen nur eine geringe Wirkung auf den Autarkiegrad der Wärmepumpe. Im Fall des EFH konnte die intelligente Regelung den Autarkiegrad der Wärmepumpe um bis zu 19 Prozentpunkte im Vergleich zum System ohne Optimierung erhöhen. Bei MFH sind es maximal 6 Prozentpunkte. Ein Grund dafür könnten neben der wie erwähnt kleineren Dimensionierung der Solarstromanlage (relativ zur Wohnfläche) auch die hohen TWW-Temperaturen von 60 °C sein, die erreicht werden müssen. Die intelligente Regelung nutzt PV-Überschüsse, um die Speichertemperaturen anzuheben und Wärme zu speichern. Die Wärmepumpe kann jedoch nur Temperaturen bis zu maximal 65 °C bereitstellen, was die Wirkung der Temperaturanhebung stark einschränkt. Es besteht die Möglichkeit, bei PV-Überschüssen die Temperatur mithilfe eines Heizstabes zu erhöhen. Allerdings hat sich in Testsimulationen gezeigt, dass dieser Einfluss auf den Autarkiegrad gering ist.

Auf Bild 25 werden die Stromverbräuche und Autarkiegrade beim System MD2 mit dezentralen E-Boilern in den Wohnungen zusammengefasst.



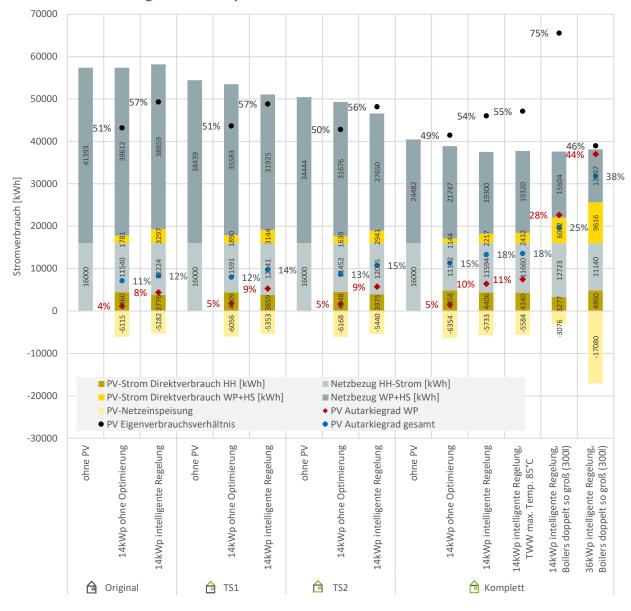


Bild 25: Simulationsergebnisse des Systems MD2 mit PV

Wie bei MZ1 zeigen die Ergebnisse, dass die Dämmung der Gebäudehülle nur einen geringen Einfluss auf den Autarkiegrad von WP+HS hat und dass die Autarkiegrade bei 14 kWp PV-Anlagen im Allgemeinen leicht geringer sind als bei MZ1. Wenn die Erhöhung der TWW-Temperatur bei PV-Überschüssen statt auf 65 °C wie im Standardfall auf 85 °C erfolgt, können kaum Verbesserungen im Autarkiegrad festgestellt werden. Durch die Verwendung von 300 l E-Boilern anstelle von 150 l kann der Autarkiegrad signifikant von 10 % auf 28 % gesteigert werden. Der Grund dafür ist, dass mehr warmes Wasser bei PV-Überschüssen bereitgestellt und gespeichert werden kann. Wenn die PV-Anlage zusätzlich auf 36 kWp erweitert wird, kann ein besonders hoher Autarkiegrad von 44 % für WP+HS erreicht werden. Allerdings steigt der Platzbedarf in den Wohnungen bei der angesetzten Größe der Speicher deutlich an.

In Bild 26 ist eine ökologische Auswertung der Varianten MZ1 und MD2 mit PV zusammengefasst, die in Bild 24 und Bild 25 untersucht wurden. Dabei wurde die Netzeinspeisung nicht als Gutschrift berücksichtigt.



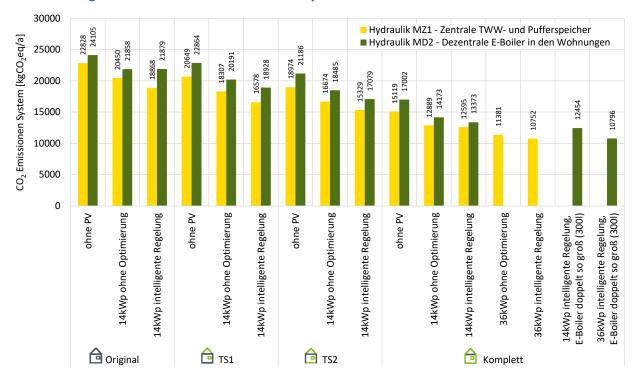


Bild 26: Vergleich der CO₂-Emissionen von den Systemen MZ1 und MD2 mit PV

Der Vergleich der THG-Emissionen zeigt, dass bei 14 kWp PV-Anlagen die Variante MD2 immer höhere THG-Emissionen aufweist als MZ1. Nur bei einer 36 kWp PV-Anlage und großen E-Boilern nähern sich die THG-Emissionen von MD2 und MZ1 an. Zusammenfassend kann man sagen, dass Variante MZ1 aus energetischer Sicht und beim Blick auf die THG-Emissionen gegenüber Variante MD2 bevorzugt werden sollte, da die Emissionen geringer sind. Dies gilt auch bei einer Kombination mit PV. In dem Fall, dass bereits E-Boiler im Bestand vorhanden sind und keine Leitungen für eine zentrale Warmwasserverteilung vorhanden sind, kann die Variante MD2 aus wirtschaftlicher Sicht interessant sein. In Kombination mit PV verursacht sie jedoch bis zu 10 % höhere Emissionen als Variante MZ1.



3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Einfamilienhaus (EFH)

Durch die Dämmung der Gebäudehülle können die Endenergieverbräuche und die THG-Emissionen bei allen Varianten reduziert werden. Durch besser gedämmte Bauteile erhöht sich außerdem bei den monoenergetischen und monovalenten Varianten die Effizienz der Wärmepumpe. Deshalb empfiehlt es sich immer, die Gebäudehülle energetisch zu sanieren.

Der effiziente Betrieb einer Wärmepumpe hängt in erster Linie von der Betriebsweise ab, ob monovalent, monoenergetisch oder bivalent, und nur in geringem Maße von der detaillierten Hydraulik. Bei den bivalenten Varianten waren nämlich nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Hydrauliken (B1 bis B4) festzustellen. Bei den monoenergetischen bzw. monovalenten Varianten wurde festgestellt, dass die Variante M2 mit Kombispeicher generell leicht höhere Endenergieverbräuche und geringere Effizienz als die Variante M1 mit getrennte TWW- und -Puffer-Speicher hatte.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmepumpe sinnvoll (effizient und emissionsarm) in teilsanierten Gebäuden betrieben werden kann. Sobald Dach und Fenster saniert sind (TS1) und die maximale Vorlauftemperatur unterhalb von 50 °C reduziert wird, kann die Wärmepumpe im monoenergetischen Betrieb für dieses Modellgebäude bereits Jahresarbeitszahlen von über 3 erreichen (M1), wie in Anschnitt 3.2.2.2 dargestellt.

Die Wärmepumpe kann im bivalenten Betrieb effizient arbeiten, unabhängig vom Sanierungszustand des Gebäudes. Dies eröffnet weitere Möglichkeiten für Sanierungsszenarien, bei denen ein frühzeitiger Einbau der Wärmepumpe verschiedene Vorteile bietet. Um dies zu verdeutlichen, werden in Bild 27 fiktive Sanierungsszenarien für ein typisches ölbeheiztes EFH aus den 1960er Jahren dargestellt, wobei die Entwicklung der jährlichen THG-Emissionen im Laufe der Zeit veranschaulicht wird.

Sanierung eines Einfamilienhauses aus den 60er Jahren Szenario 1: Erstmal sanieren, dann WP <u>a</u> 4 4 Szenario 2: Lock-in Jährliche CO₂-Emissionen [kgCO2eq] Szenario 3: Frühzeitiger Einbau WP lährliche CO₂-Emissionen [kgCO2eq 合 ⇧ 46 Lock-in ⇧ Szenario 1: Erstmal sanieren, dann WP 0 [• 2020 2025 2030 2035 2040 2045 2020 2025 2030 2035 2040 2045

Bild 27: Beispielhafte Sanierungsszenarien für ein EFH aus den 1960er Jahren

Ein typisches Sanierungsszenario (Szenario 1) würde zunächst eine schrittweise Sanierung der Gebäudehülle vorsehen und dann den alten Ölkessel durch eine monovalent betriebene Wärmepumpe ersetzen. Obwohl diese Strategie sinnvoll und wichtig ist, hat sie den Nachteil, dass Lock-in-Effekte auftreten können, wie im Szenario 2 dargestellt. In diesem Szenario würde der alte Öl-Niedertemperaturkessel im Jahr 2024 ausfallen und sofort durch einen neuen Öl-Brennwertkessel ersetzt werden müssen. Obwohl die schrittweise Sanierung der Gebäudehülle in den folgenden Jahren fortgesetzt wird, bleiben die Emissionen bis zum Jahr 2045



auf einem hohen Niveau aufgrund der langen Lebensdauer des Kessels. Basierend auf den Simulationsergebnissen wäre ein drittes Szenario denkbar, bei dem die Wärmepumpe frühzeitig eingebaut und im bivalenten Betrieb mit dem Bestandskessel betrieben wird. Dies hätte den Vorteil, dass einerseits die Emissionen sofort durch die Wärmepumpe gesenkt würden (Deckungsanteil der Wärmepumpe von bis zu 91 % bei gleichzeitig guter JAZ, laut Simulationsergebnissen). Andererseits könnte im Falle eines Ausfalls des alten Ölkessels auf den monoenergetischen Betrieb umgestellt und die schrittweise Sanierung der Gebäudehülle fortgesetzt werden. Dies würde den Vorteil haben, Lock-In-Effekte einer Erneuerung des fossilen Kessels zu vermeiden und die THG-Emissionen schneller senken zu können als im typischen Szenario 1.

Eine PV-Anlage kann sinnvoll mit einem Wärmepumpen-System kombiniert werden und trägt auch dazu bei, die Emissionen zu reduzieren. Bei den untersuchten teilsanierten Zuständen konnten Autarkiegrade für die Wärmepumpe in Höhe von 25 % bis 31 % (bei TS1 bzw. TS2) erreicht werden. Je höher der Energiestandard des Gebäudes, desto höher der Autarkiegrad und damit desto niedriger der Netzbezug und die THG-Emissionen.

Mehrfamilienhaus (MFH)

Ähnlich wie bei EFH können durch die Dämmung der Gebäudehülle auch bei allen MFH-Varianten der Endenergieverbrauch und die Emissionen gesenkt werden. Energetische Sanierungen der Gebäudehülle sind daher immer sinnvoll und empfehlenswert.

Bei MFH hat die Hydraulik einen wichtigen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei zentraler TWW-Bereitstellung (MZ1 und BZ1) müssen nämlich 60 °C im TWW-Speicher eingehalten werden und es muss eine Zirkulation vorgesehen werden, die Wärmeverluste verursacht. Bei dezentraler TWW-Bereitstellung mit E-Boilern in den Wohnungen (MD2) führt die direkte elektrische TWW-Bereitstellung zu höheren Stromverbräuchen. Im System mit Frischwasserstationen in den Wohnungen (MD1) können die TWW-Temperaturen auf 50 °C reduziert werden, was den Energieverbrauch reduziert und die Effizienz erhöht. In Tabelle 9 wird eine zusammenfassende Auswertung dieser Varianten hinsichtlich der Effizienz und der THG-Emissionen dargestellt. An dieser Stelle wird daran erinnert, dass die untersuchten Systeme so ausgelegt wurden, dass ein monovalenter Betrieb der Wärmepumpe im Vollsanierungszustand ermöglicht wurde und dass in den Zuständen Original und Teilsanierung die Wärmepumpe durch einen Heizstab bzw. Kessel unterstützt wird.

Tabelle 9: Bewertung der Varianten bezogen auf Effizienz und THG-Emissionen in Abhängigkeit des Sanierungszustands, die Wärmepumpe ist für den Vollsanierungszustand dimensioniert

		Zustand Ge	bäudehülle	
	 Original	습 TS1	∱ TS2	<u>6</u> Komplett
MZ1 – Zentrale TWW-Bereitstellung, monovalent	monoenergetisch	monoenergetisch	monoenergetisch	monovalent
BZ1 – Zentrale TWW-Bereitstellung, bivalent	bivalent	bivalent	bivalent	bivalent
MD1 – Dezentrale FWS in den Wohnungen, monovalent	monoenergetisch	monoenergetisch	monoenergetisch	monovalent
MD2 – Dezentrale E-Boilers in den Wohnungen, monovalent	monoenergetisch	monoenergetisch	monoenergetisch	monovalent

Legende				
	Nicht empfehlenswert			
	Empfehlenswert unter bestimmten Bedingungen			
	Empfehlenswert			
	Monovalenter Betrieb: die WP deckt den Wärmebedarf allein			
Begriffe	Monoenergetischer Betrieb: der Heizstab unterstützt die WP in den kältesten Jahreszeiten			
	Bivalenter Betrieb: der Kessel unterstützt die WP in den kältesten Jahreszeiten			



Im bivalenten Betrieb werden JAZ von knapp 3 unabhängig vom Zustand der Gebäudehülle erreicht. Dies würde, ähnlich wie beim EFH, dafür sprechen, dass die Wärmepumpe im unsanierten Zustand bivalent als Teil eines langfristigen Sanierungsfahrplans Richtung Vollsanierung eingesetzt werden kann. Sobald die Gebäudehülle gut genug gedämmt ist, könnte vom bivalenten auf den monovalenten Betrieb umgestiegen werden. Eine weitere mögliche Sanierungsstrategie bei bivalenten Systemen wäre auch in vollsanierten Gebäuden langfristig bivalent mit Kesseln zu arbeiten, die mit synthetischen Gasen versorgt werden (daher die Bezeichnung "Empfehlenswert unter bestimmten Bedingungen"). Das hätte Vorteile für das gesamte Energiesystem. Solche bivalenten Varianten im Vollsanierungszustand wurden hier nicht simuliert, aber sie werden im nächsten Kapitel 4 genauer untersucht.

Bei dem System mit Frischwasserstationen in den Wohnungen (MD1) kann die Wärmepumpe schon im zweiten teilsanierten Zustand (TS2) effizient monoenergetisch arbeiten, sobald das Dach, die Fenster und die Kellerdecke saniert sind. Aufgrund des niedrigen Energieverbrauchs und der hohen Effizienz ist dieses System besonders empfehlenswert, obwohl der Einbau von Frischwasserstationen in den Wohnungen im Vergleich zur Variante MZ1, die die Bestands-Verteilleitungen verwendet, mit einem höheren Aufwand verbunden ist.

Die Variante MD2 mit E-Boilern in den Wohnungen ist aufgrund des hohen Stromverbrauchs und der geringen Gesamteffizienz nicht zu empfehlen, auch unter Berücksichtigung der PV-Strom-Nutzung.

Die Nutzung von PV-Strom trägt bei allen Varianten dazu bei, die Emissionen zu reduzieren, aber die Autarkiegrade, die bei MFH erreicht werden, sind niedriger als bei EFH. Dies liegt unter anderem daran, dass bei MFH aufgrund der Gebäudegeometrie weniger PV-Fläche pro beheizte Wohnfläche zur Verfügung steht als bei EFH. Außerdem wird im Rahmen der intelligenten PV-Regelung eine Anhebung der Speichertemperatur bei PV-Überschüssen durchgeführt. Wenn jedoch die TWW-Speichertemperatur 60 °C beträgt und gleichzeitig die maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe auf 65 °C begrenzt ist, gibt es nur wenig Spielraum, diese intelligente Regelung anzuwenden.

Die Farbverläufe, die die Bewertung der Varianten in Tabelle 9 darstellen, zeigen die Schwierigkeit einen genauen Punkt für den Einbau einer Wärmepumpe sinnvoll zu definieren. Im Einzelfall spielen die individuellen Randbedingungen des Gebäudes eine wichtige Rolle. Erst auf Basis dieser Eingangsdaten könnte man eine feiner aufgelöste Betrachtung durchführen (zusätzliche Teilsanierungszustände, Variation der maximalen Vorlauftemperatur). Eine detaillierte Auswertung der raumweisen Heizlast und der individuellen Heizkörper würde wichtige Eingangsdaten für die weitere Betrachtung anderer Wärmequellen oder eine Dimensionierung der Wärmepumpe basierend z. B. auf einem Teilsanierungszustand liefern und nicht nur bezogen auf dem Vollsanierungszustand, wie hier durchgerechnet.



4 Bewertung von Wärmepumpen für Bestandsgebäude im Rahmen der elektrischen Energieversorgung

4.1 Hintergrund und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden Analysen mit einem Simulationsmodell des IWU durchgeführt, welches das zeitliche Zusammenspiel des schwankenden Energieangebots erneuerbarer Energiequellen (insbesondere von Solar- und Windstrom) mit der Wohngebäude-Wärmeversorgung berücksichtigt [Diefenbach et al. 2017]. Das Ziel der Untersuchungen liegt darin, die Wirkung eines starken Zubaus elektrischer Wärmepumpen im Wohngebäudebestand im Kontext des gesamten elektrischen Energiesystems zu bewerten.

Betrachtet wird die Situation im Jahr 2030 unter der Annahme, dass die Ziele der Bundesregierung zum Ausbau von Photovoltaik und Windenergie erreicht werden. In den Simulationsrechnungen wird – in vereinfachter Weise – neben der Wohngebäude-Wärmeversorgung der gesamte Stromverbrauch und die Stromerzeugung in Deutschland mitberücksichtigt. Vor diesem Hintergrund wird untersucht, welchen Beitrag elektrische Wärmepumpen in Bestandsgebäuden zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen leisten können.

Eine solche Analyse mit Blick auf das zeitliche Zusammenwirken von Energieangebot und -nachfrage im Gesamtsystem erscheint vor allem aus zwei Gründen sinnvoll und notwendig:

- Die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien, insbesondere Windenergie (aufgrund des gegenüber der Solarenergie für die Gebäudeheizung günstigeren jahreszeitlichen Verlaufs) ist von entscheidender Bedeutung, damit die Wärmepumpe ihre Rolle als Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ausspielen kann. Im elektrischen Energiesystem gibt es aber noch weitere konkurrierende Stromverbraucher, so dass sich die tatsächliche Wirkung der Wärmepumpenheizung zur Treibhausgasminderung erst in der Gesamtanalyse klären lässt.
- Eine Betrachtung der Wirkung im Gesamtsystem ist insbesondere für den Vergleich von monovalenten (bzw. monoenergetischen) und bivalenten Wärmepumpensystemen notwendig. Auf den ersten Blick erscheinen monovalente Systeme überlegen, da in den Gebäuden keine Brennstoffe mehr eingesetzt werden und sich die Stromwirtschaft insgesamt schon auf einem Dekarbonisierungspfad mit stetiger Abnahme der Treibhausgasemissionen befindet. Demgegenüber benötigen bivalente Systeme weiterhin Brennstoffe⁶. Bei genauerer Betrachtung ist allerdings zu berücksichtigen, dass auch im elektrischen Energiesystem brennstoffbetriebene Kraftwerke zum zeitlichen Ausgleich des regenerativen Energieangebots und der Energienachfrage benötigt werden. Dies gilt insbesondere bei Einsatz monovalenter Wärmepumpen, während die Aufgabe bei bivalenten Systemen auch durch den begleitenden Heizkessel übernommen werden kann. Weder im einen noch im anderen Fall ist also ein kompletter Verzicht auf Brennstoffeinsatz möglich.

In einem früheren Forschungsprojekt des IWU wurden derartige Fragen im Grundsatz bereits untersucht [Diefenbach et al. 2019]. Dabei wurde gezeigt, dass

 bei ausreichendem Ausbau der Solar- und Windenergie trotz konkurrierender Stromverbraucher entsprechende regenerativ erzeugte Strommengen auch für die Nutzung in Wärmepumpen zur Verfügung stehen und außerdem

⁶ Die Frage einer Dekarbonisierung der Brennstoffe – also insbesondere der Übergang zu Wasserstoff oder anderen synthetischen, aus Wind- und Sonnenenergie hergestellten Energieträgern - wird hier nicht näher betrachtet. Dies geschieht unter der vereinfachenden Annahme, dass auf diesem Weg, auf dem zunächst einmal überhaupt die ersten Schritte in Richtung einer großtechnischen Umsetzung gegangen werden müssen, kurzfristig bis 2030 noch keine entscheidenden Beiträge im Bereich Strom/Wärme erwartet werden können. Längerfristig erscheint ein solcher Entwicklungspfad angesichts begrenzter Biomasse-Potentiale und fehlender Alternativen für die saisonale Speicherung von Sonnen- und Windenergie allerdings unverzichtbar, um eine vollständig auf erneuerbaren Quellen basierende Energieversorgung zu erreichen [EEGZ EB1, Langfristszenarien BMWK].



 monovalente und bivalente Systeme im Hinblick auf die Einsparung von Brennstoffen und die Minderung der Treibhausgasemissionen im Gesamtsystem als weitgehend gleichwertig angesehen werden können.

Die damaligen Untersuchungen bezogen sich allerdings auf die langfristige Perspektive des Klimaschutzes im Jahr 2050 – seinerzeit noch mit dem Ziel einer Emissionsminderung von 80 – 95 % (gegenüber 1990). Dementsprechend wurden auch deutliche Fortschritte bei der energetischen Modernisierung der Bestandsgebäude angenommen, nicht zuletzt bezüglich des Wärmeschutzes und der Minderung des Heizwärmebedarfs.

Für die vorliegenden Untersuchungen wird dagegen die Situation des Jahres 2030 betrachtet und damit ein zeitlicher Horizont aufgespannt, der für Hauseigentümer, die jetzt vor der Entscheidung über eine Heizungsmodernisierung stehen, eher greifbar ist und hinsichtlich Nutzungsdauer heute installierter Anlagen eher angemessen erscheint. Für den Heizwärmebedarf der Gebäude, in denen in den nächsten Jahren elektrische Wärmepumpen eingebaut werden, werden also Wärmeschutzstandards angenommen, die die aktuelle Situation der Gebäude mit den bis 2030 realistisch erscheinenden Wärmeschutz-Fortschritten berücksichtigen, also noch keine weitgehende energetische Modernisierung des Gesamtbestands voraussetzen.

4.2 Modellansätze

Das Simulationsmodell wertet den Strom- und Wärmeverbrauch sowie die Strom- und Wärmeerzeugung in Stundenschritten für ein Jahr aus (s. Übersichtsdarstellung in Bild 28). Dabei wird insbesondere die Wetter- und Zeitabhängigkeit des Sonnen- und Windenergieangebots sowie des Energiebedarfs berücksichtigt. Es werden unterschiedliche Gebäude mit unterschiedlichen Wärmeschutzstandards und Heizsystemen an unterschiedlichen Standorten betrachtet⁷. Brennstoffbetriebene Kraftwerke und Wärmeversorgungssysteme mit flexibler Stromnutzung (insbesondere bivalente Wärmepumpen) werden so eingesetzt, dass der Brennstoffverbrauch im Gesamtsystem in jedem Zeitschritt minimiert wird. Darüber hinaus werden Strom- und Wärmespeicher eingesetzt, um überschüssige Mengen fluktuierender Solar- und Windenergie aufnehmen und zu günstigeren Zeitpunkten wieder abgeben zu können. Verbleibende Überschüsse verlassen ungenutzt (ohne Gutschrift) die Bilanzgrenze. Diese Betrachtung ist gleichwertig mit einer Vermeidung dieser Überschüsse durch Abregelung der Photovoltaik- und Windkraftanlagen.

⁷ Die Untersuchungen wurden hier wie in [Diefenbach et al. 2019] auf drei Gebäude-Standorte beschränkt. Vergleichsanalysen im früheren Projekt hatten gezeigt, dass sich durch diese Vereinfachung keine wesentlichen Änderungen gegenüber einer größeren Standortzahl ergeben. Hinsichtlich der Wetterdaten zur Solar- und Windstromerzeugung wurde eine größere Anzahl deutschlandweit verteilter Stationen berücksichtigt.



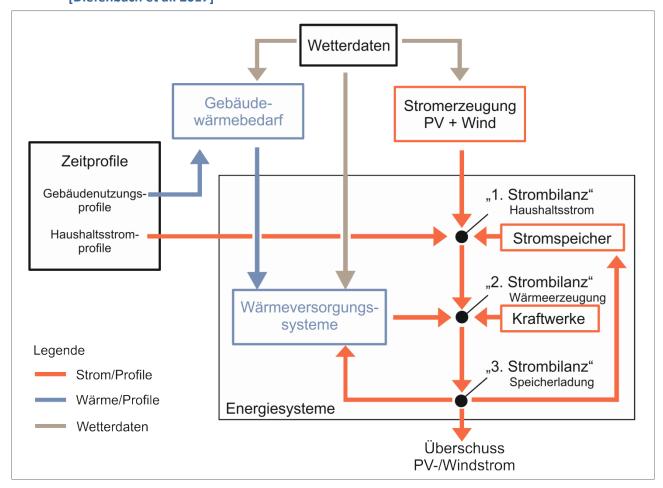


Bild 28: Prinzipdarstellung der Programmodule und des Informationsflusses im IWU-Simulationsmodell [Diefenbach et al. 2017]

Einige zentrale Rahmendaten der Analyse für das Jahr 2030 orientieren sich an den BMWK-Langfristszenarien⁸. Die neueren T45-Szenarien gehen hier gemäß den aktuellen Zielen der Bundesregierung von einer kompletten Dekarbonisierung der deutschen Energieversorgung bis 2045 aus. Das IWU-Modell kann diese komplexen Szenarien – die neben einer expliziten Modellierung verschiedener inländischer Energieverbraucher auch den Export und Import im europäischen Stromverbund berücksichtigten – nicht im Detail nachvollziehen. Angestrebt wird aber eine zwar vergröberte, aber plausible Abbildung und Übertragung wesentlicher Rahmenbedingungen für die vorliegenden Untersuchungen. Dazu werden Zwischenergebnisse der BMWK-Langfristszenarien für das Jahr 2030 betrachtet und – nicht exakt aber in der entsprechenden Größenordnung – für die Modellrechnungen übernommen. Bezüglich der Solar- und Windstromerzeugung wird in den Langfristszenarien vorausgesetzt, dass entsprechende Ziele der Bundesregierung für das Jahr 2030 eingehalten werden, so dass ca. 200 TWh/a Photovoltaikstrom und 380 TWh/a an Windstrom zur Verfügung stehen. Entsprechende Werte (mit Anteilen von 71 % Onshore und 29 % Offshore für die Windenergieerzeugung) werden auch für die hier durchgeführten Modellanalysen angesetzt.

58

⁸ Siehe https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/. Die im vorliegenden Projekt verwendeten Szenariendaten wurden im März / April 2023 unter Verwendung des "Szenario Explorers" von der Webseite heruntergeladen. In der Regel wurde das voreingestellte Szenario T45-Strom zugrunde gelegt. In diesem, aber auch in den weiteren Szenarien, spielen wachsende Wärmepumpenanteile eine wichtige Rolle beim Umbau der Wärmeversorgung. Eine genauere Aufschlüsselung nach Wohn- und Nichtwohngebäuden liegt dabei nicht vor, so dass an dieser Stelle keine präzisen Orientierungswerte für die Untersuchungen speziell im Wohngebäudesektor gegeben sind.



Die gesamte Stromerzeugung liegt in den BMWK-Szenarien im Jahr 2030 deutlich über 700 TWh/a (z. B. 725 TWh im Szenario T45-Strom bzw. 774 TWh/a im Szenario T45-Redeff). Dementsprechend wurde auch in den Analysen im vorliegenden Projekt diese Größenordnung bei der Stromerzeugung und beim Stromverbrauch eingestellt. Für alle Stromverbraucher außer der Wohngebäude-Wärmeerzeugung wurde ein Basiswert zu 690 TWh/a angenommen. Der zusätzliche Bedarf für Wärmepumpen liegt je nach Untersuchungsvariante in der Größenordnung von ca. 30 – 40 TWh/a⁹.

Als Wetterdaten wurden wie in [Diefenbach et al. 2019] die Werte des Jahres 2012 angesetzt, das im mehrjährigen Vergleich als eher kälter mit leicht überdurchschnittlichen Heizwärmeverbräuchen einzuordnen ist. Der zeitliche Verlauf der Wärmenachfrage in den Wohngebäuden wird im Modell in Stundenschritten für die verschiedenen Gebäude und Standorte berechnet. Auch der Hilfsstromverbrauch der Wärmerzeugung und der Haushaltsstromverbrauch werden im Modell auf Basis des angenommenen Nutzerverhaltens der Haushalte modelliert.

Für den restlichen Strombedarf, der in dieser Betrachtung das Gros des Gesamtverbrauchs ausmacht, wird der zeitliche Verlauf des entsprechenden Verbrauchs im Jahr 2012 angenommen (Näheres s. [Diefenbach et al. 2019, Kap. 6.1]. Dies stellt in zweifacher Hinsicht eine deutliche Vereinfachung dar: Zum einen können Besonderheiten im Zeitprofil eines zukünftigen elektrischen Energiesystems (z. B. zunehmende Anteile der "Elektromobilität") auf diese Weise nicht berücksichtigt werden. Zum anderen – und das ist hier wahrscheinlich noch wichtiger – können im IWU-Modell Flexibilitäten für die Nutzung der volatilen Solar- und Windenergie außerhalb der detailliert modellierten Wohngebäude-Wärmeversorgung nicht explizit abgebildet werden. Dazu gehören auch Flexibilitäten aufgrund des Exports und Imports im europäischen Stromverbund sowie eine in den Langfristszenarien bereits 2030 in geringem Umfang stattfindende inländische Produktion von Wasserstoff.

Um diesem Problem zu begegnen, wurde hier eine Ersatzbetrachtung angewendet: Die Kapazität der elektrischen Energiespeicher im IWU-Modell wurde so groß gewählt, dass der Anteil des nicht nutzbaren, d. h. durch Abregelung quasi vernichteten Anteils der Solar- und Windstromproduktion in den IWU-Modellrechnungen abgesenkt wird und am Ende mit etwas mehr als 20 TWh ungefähr so groß ausfällt wie im BMWK-Szenario T45-Strom¹⁰. Auf diese Weise ist also gewährleistet, dass in der Gesamtbetrachtung die vorhandenen Flexibilitäten einer zeitabhängigen Stromnutzung in beiden Szenarienansätzen (BMWK-Szenario und IWU-Modell) ausreichend groß sind, um im Jahr 2030 die fluktuierende Solar- und Windstrommenge – bis auf den abgeregelten Restbetrag in der genannten Größenordnung von 20 TWh – weitgehend nutzen zu können.

Hinsichtlich der restlichen Stromerzeugung, die weitgehend durch brennstoffbetriebene Kraftwerke erfolgt, wird in den Analysen mit dem IWU-Modell auf eine differenzierte Betrachtung verzichtet. Für die einfache Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird angenommen, dass die restliche Stromerzeugung ausschließlich in Erdgas-Kraftwerken erfolgt. Dabei wird eine Leistung von 65 GW durch effiziente (GuD-)Kraftwerke mit einem Wirkungsgrad von 54 % erzeugt. Für die verbleibende Leistung, die je nach Untersuchungsvariante schwankt, werden Gasturbinen-Spitzenlastkraftwerke mit einem Wirkungsgrad von 37 % eingesetzt. Die vereinfachte Betrachtung ist dadurch gerechtfertigt, dass es in den Untersuchungen nicht um eine Ermittlung und

⁹ Unter pauschaler Annahme eines Verteilungsnutzungsgrads von 94 % im IWU-Modell liegt die notwendige Stromerzeugung (bei Netzeinspeisung) entsprechend etwas höher.

Diese Angabe bezieht sich – da der Zubau von Wärmepumpen auch in den BMWK-Szenarien eine wesentliche Rolle spielt – in den IWU-Modellrechnungen auf die Untersuchungsvariante mit monovalenten Wärmepumpen bei der Bestandsmodernisierung. Im BMWK-Szenario "T45-Strom" beläuft sich die Abregelung auf 21 TWh, in den entsprechenden IWU-Modellrechnungen auf 22 bis 24 TWh (je nach Wärmepumpeneffizienz). Um dies zu erreichen, wurde in den IWU-Modellanalysen eine Gesamt-Stromspeicherkapazität von 300 GWh angesetzt. Diese ist wie gesagt nicht als tatsächlich installierte Speichergröße anzusehen, sondern dient als Ersatz-Betrachtung, um zusätzliche Flexibilitäten im Stromsystem angemessen im Modell berücksichtigen zu können. In diesem Zusammenhang ist noch darauf hinzuweisen, dass Stromspeicher im IWU-Modell nicht lokal verortet sind, sondern "systemdienlich" (den Brennstoffeinsatz minimierend) für das gesamte Energiesystem eingesetzt werden. Die Wärmespeicher werden dagegen, da sie nicht über ein zentrales Energienetz miteinander verbunden sind, den jeweiligen Gebäuden zugeordnet.



Bewertung der Treibhausgasemissionen in der deutschen Stromwirtschaft geht. Vielmehr werden im Sinne einer Differenzbetrachtung die Auswirkungen von unterschiedlichen Heizsystemen bei der Modernisierung von Bestandsgebäuden untersucht. Es handelt sich also um eine – gemessen am Gesamt-Stromverbrauch – relativ kleine Störung des Gesamtsystems und um deren Auswirkungen auf die Nutzung von Solar- und Windstrom und den veränderten Einsatz konventioneller Kraftwerke. Die ausschließliche Berücksichtigung von Erdgas-Kraftwerken im Rahmen dieser Differenzbetrachtung erscheint sinnvoll, da erstens gerade diese für einen flexiblen Lastausgleich im Stromsystem geeignet sind und zweitens mit Erdgas den gleichen Energieträger verwenden, der auch die Hauptlast bei der Wohngebäude-Wärmeversorgung darstellt: Insbesondere bei Ersatz von Erdgas-Kesseln durch Wärmepumpen wird der Einsatz dieses Energieträgers also nur örtlich von den Gebäuden in die Kraftwerke verschoben¹¹.

In den Modellrechnungen wird konkret die Frage untersucht, welche Auswirkungen der Einsatz unterschiedlicher Wärmeversorgungssysteme bei der Modernisierung der Heizungen im Gesamtsystem hat. Insbesondere werden Heizkessel (Erdgas / Heizöl) und Wärmepumpen (monovalent/bivalent) verglichen. Der in den Analysen betrachtete Anteil der Heizsysteme, die bis 2030 modernisiert werden, wird zu 15 % des Gesamtbestands angesetzt, d. h. 15 % aller Bestandsgebäude und der entsprechende Anteil der Bestands-Wohnfläche sind betroffen. Da die Modernisierungsraten von Heizsystemen bei Austausch des Haupt-Wärmeerzeugers in der Vergangenheit in der Größenordnung von 3 % pro Jahr lagen [Cischinsky, Diefenbach 2018], entspricht dies also rechnerisch den innerhalb von fünf Jahren modernisierten Heizsystemen, oder – wenn man davon ausgeht, dass nicht alle Gebäude mit Wärmepumpen ausgestattet werden – einem Wärmepumpen-Anteil von mehr als 70 % bei der Heizungsmodernisierung über einen Betrachtungszeitraum von sieben Jahren (2024-2030).

Für die restlichen Bestandsgebäude wird eine Standard-Wärmeerzeugung mit Heizkesseln (Erdgas bzw. Heizöl) angenommen. Diese Gebäude erzeugen ihre Wärme also unabhängig vom elektrischen Energiesystem und sind daher von der untersuchten "Systemstörung" in der Stromwirtschaft, die bei Einsatz von Wärmepumpen im Modernisierungsfall auftritt, nicht betroffen¹².

Als Bestandsgebäude werden hier die Wohngebäude mit Baujahr bis 2009 bezeichnet. In den Modellrechnungen für das vorliegende Projekt wurden für diese Gebäude vier energetische Standards betrachtet, die bereits in den früheren Modellrechnungen für das Jahr 2050 verwendet wurden (unmodernisiert / teilmodernisiert / vollmodernisiert ohne Lüftungswärmerückgewinnung / vollmodernisiert mit Lüftungswärmerückgewinnung, vgl. hierzu [Diefenbach et al. 2019, Anhang A]). Der Gesamtwärmeverbrauch für Heizung und Warmwasserbereitung (inklusive Verteilverlusten) beläuft sich auf 188 / 133 / 93 / 79 kWh/(m²·a) (gemittelt über alle Gebäude, Ein- und Mehrfamilienhäuser, an den betrachteten Standorten mit Wetterdaten 2012). Für die Bestandsgebäude im Jahr 2030 wurde hier eine anteilige Verteilung der vier Modernisierungsstandards von 25 % / 50 % / 20 % / 5 % angenommen und damit ein deutlich höherer Anteil unmodernisierter bzw. teilmodernisierter Gebäude als in den früheren Modellanalysen für das Jahr 2050 in [Diefenbach et al. 2019]. Der mittlere Wärmeverbrauch der Bestandsgebäude (Baujahre bis 2009) im Jahr 2030 beläuft sich

¹¹ Auch die Frage, ob in geringem Umfang im Jahr 2030 noch Kohle zur Stromerzeugung eingesetzt wird oder – eher im Einklang mit der vereinfachenden Beschränkung auf Erdgas-Kraftwerke – ein früherer Ausstieg stattfindet, spielt für den hier intendierten, auf der geschilderten Differenzbetrachtung beruhenden grundsätzlichen Vergleich unterschiedlicher Heizsystemvarianten keine wesentliche Rolle. Auch ist die genaue Festlegung des Referenzjahrs nicht entscheidend. Beispielsweise wäre es denkbar, dass sich der Ausbau von Wind-/Solarstrom und Wärmepumpen in der Realität gegenüber den hier getroffenen Annahmen verzögert. In diesem Fall wäre es aber plausibel anzunehmen, dass die hier untersuchte Situation dann in ähnlicher Weise womöglich einige Jahre später erreicht würde.

¹² Im Unterschied dazu wird für den Neubau der Jahre bis 2030 generell der Einsatz von monovalenten Wärmepumpen in 85 % der Fälle angenommen (Rest: Heizkessel). Dieser Ansatz gilt in allen Untersuchungsvarianten gleichermaßen, so dass der Neubau mit seinen Wärmepumpen zwar im Rahmen der zeitabhängigen Simulationsrechnungen im Gesamtsystem explizit mitberücksichtigt wird, in allen Untersuchungsvarianten aber in seiner Struktur unverändert bleibt.



damit auf 136 kWh/(m²·a) und liegt in der Größenordnung früherer Szenarienergebnisse des IWU für das Jahr 2030 (vgl. [Diefenbach et al. 2015]¹³).

Als Wärmeversorgungssysteme werden reine Heizkessel (als Referenzfall), monovalente und bivalente Wärmepumpen untersucht. Die bivalenten Wärmepumpen sind auf 35 % der Gebäude-Heizleistung ausgelegt. Die Leistungszahl (COP) der Wärmepumpen wird, anders als in den detaillierteren Simulationen in Kapitel 3, mit einem vereinfachten Modellansatz ermittelt:

$$COP = \gamma^*COP_C = \gamma^* T_V/(T_V-T_Q)$$

Dabei ist COP_C die idealisierte Leistungszahl gemäß dem Carnot-Prozess und γ der als konstant angenommene Gütegrad. T_V und T_Q sind die von der Wärmepumpe erzeugte Vorlauftemperatur bzw. die Quellentemperatur der Wärmepumpe (Angaben in Kelvin). Es wurden Außenluft-Wärmepumpen unterschiedlicher Effizienz betrachtet:

WP (+): effiziente Wärmepumpe ($\gamma = 0.43$)

WP (-): weniger effiziente Wärmepumpe ($\gamma = 0.32$)

Der Zahlenwert von γ wurde im Fall der effizienten Wärmepumpe WP (+) durch Vergleich der Carnot-Leistungszahl mit der tatsächlichen Leistungszahl der Wärmepumpe aus Kapitel 3 an einem festen Betriebspunkt, nämlich bei T_V = 35 °C (ca. 308 K) und T_Q = 2 °C, festgelegt. Hier ergibt sich laut Herstellerdaten eine Leistungszahl von ca. 4,0. Für die weniger effiziente Wärmepumpe WP (-) wurde eine Leistungszahl von 3,0 im gleichen Betriebspunkt angenommen.

In den Modellrechnungen wurde davon ausgegangen, dass mit den Wärmepumpen maximal eine Vorlauftemperatur von 60 °C erreicht werden kann. Dies entspricht auch der angenommenen Vorlauftemperatur für die Warmwasser-Erzeugung. Als maximale (Auslegungs-)Vorlauftemperatur der Gebäudeheizung werden für alle Gebäudestandards 55 °C angesetzt.

Bei Einsatz von Wärmepumpen (monovalent oder bivalent) wurde angenommen, dass Pufferspeicher installiert sind, die der Aufnahme von aus Wind- und Solarstromüberschüssen produzierter Wärme dienen. Außerdem wurde angenommen, dass für diesen Zweck in den Speichern immer auch zusätzliche Heizstäbe vorhanden sind. Die Speichergröße wurde zu 400 Litern in Ein-/Zweifamilienhäusern und 800 Litern in Mehrfamilienhäusern angesetzt. Die maximal erreichbare Speichertemperatur wurde zu 80 °C angenommen (bis maximal 60 °C auch durch Wärmepumpen, darüber hinaus nur noch durch Heizstäbe erreichbar).

Für Erdgas-Brennwertkessel (als alleinige Wärmeerzeuger) wurde von einem Wirkungsgrad in Höhe von 95 % ausgegangen¹⁴. Bei Verwendung von Ölkesseln oder von begleitenden Gaskesseln (bei bivalenten Wärmepumpen) wurden 90 % angesetzt.

4.3 Ergebnisse der Basisanalysen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellrechnungen für die im vorigen Kapitel 4.2 beschriebenen "Basisansätze" im Jahr 2030 dargestellt. Darüberhinausgehende Fragestellungen werden in Kapitel 4.4 untersucht.

Im Referenzfall erfolgt die Wärmeversorgung aller Bestandsgebäude durch Heizkessel, so dass Brennstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen in diesen Fällen eindeutig zu den Gebäuden zugeordnet werden und

¹³ Bei den Modellrechnungen im Projekt EPISCOPE ergaben sich für die Szenarien "Basis" bzw. "Langsam" 129 kWh/(m²-a) bzw. 136 kWh/(m²-a) (vgl. [Diefenbach et al. 2015], Umrechnung der Zahlenwerte im Anhang S.65/66 auf wohnflächenbezogene werte). Als Wohnfläche der Bestandsgebäude (mit Baujahren bis 2009) waren 3,35 Mrd. m² angenommen worden, in den aktuellen Modellrechnungen wird – in sehr grober Anlehnung an Rahmendaten aus den BMWK-Langfristszenarien bezüglich Gesamtwohnflächen und Abrissraten - ein etwas höherer Wert von 3,51 Mrd. m² angenommen.

¹⁴ Angaben zu Brennstoffverbräuchen bzw. Wirkungsgraden beziehen sich im vorliegenden Kapitel auf den (unteren) Heizwert.



auch die auf die Wohnfläche bezogenen Treibhausgasemissionen als Referenzwerte angegeben werden können¹⁵.

Für die weiteren Untersuchungsvarianten werden in dem von Heizungsmodernisierungen betroffenen Anteil von 15 % des Gebäudebestands auch Wärmepumpen eingesetzt. Dadurch wird der Brennstoffeinsatz in den Gebäuden vermindert, aber bei der Stromproduktion (da der Bedarf der Wärmepumpen nicht zu jedem Zeitpunkt durch Wind- und Solarenergie gedeckt werden kann) erhöht. Die Berechnungen wurden so durchgeführt, dass die modernisierten 15 % der Gebäude immer mit einem einheitlichen Wärmeversorgungssystem ausgestattet wurden.

In der Realität würden sowohl im Bestand als auch nach der Modernisierung verschiedene Systeme auftreten, z. B. monovalente Wärmepumpen nicht bei allen Heizungsmodernisierungen gleichzeitig eingesetzt werden und im Fall bivalenter Wärmepumpen die vor der Modernisierung verwendeten Brennstoffe (Erdgas bzw. Heizöl) in der Regel auf die bivalenten Systeme übergehen. Die Betrachtung einheitlicher Heizsysteme in unterschiedlichen Untersuchungsvarianten erscheint aber im vorliegenden Kontext sinnvoll und angemessen, da hier ein prinzipieller Vergleich der verschiedenen Systemtypen und keine Beschreibung der weiteren Entwicklung im Wohngebäudebestand in Form eines "Mischszenarios" angestrebt wird.

Die Veränderung der Treibhausgasemissionen im Gesamtsystem wurde für die jeweiligen Untersuchungsvarianten ermittelt und die Differenz (die dem Einfluss der veränderten Heizsysteme zuzurechnen ist) auf die modernisierte Wohnfläche heruntergebrochen. Die auf diese Weise berechneten Treibhausgas-Minderungen pro Wohnfläche können von den wohnflächenbezogenen Treibhausgasemissionen des jeweiligen Referenzfalls subtrahiert werden. Auf diese Weise erhält man – gemäß dem hier gewählten Ansatz einer Differenzbetrachtung im Gesamtsystem – die wohnflächenbezogenen Emissionen für die modernisierten Heizsysteme mit Wärmepumpe.

In den Untersuchungen wird zunächst eine konstante Photovoltaik- und Windstromproduktion im Untersuchungsjahr angenommen (200 TWh Solarstrom bzw. 380 TWh Windstrom bei Einspeisung ins Stromnetz). Das bedeutet, dass diese regenerativen Strommengen nicht nur bei Einsatz der Wärmepumpen, sondern auch bereits in den Referenzfällen mit Kesselheizung dem gesamten elektrischen Energiesystem zur Verfügung stehen. Für diesen Fall zeigt Bild 29 die Untersuchungsergebnisse.

62

¹⁵ Als äquivalente Treibhausgas-Emissionsfaktoren wurden 0,246 kg/kWh beim Erdgas und 0,311 kg/kWh beim Heizöl angesetzt.



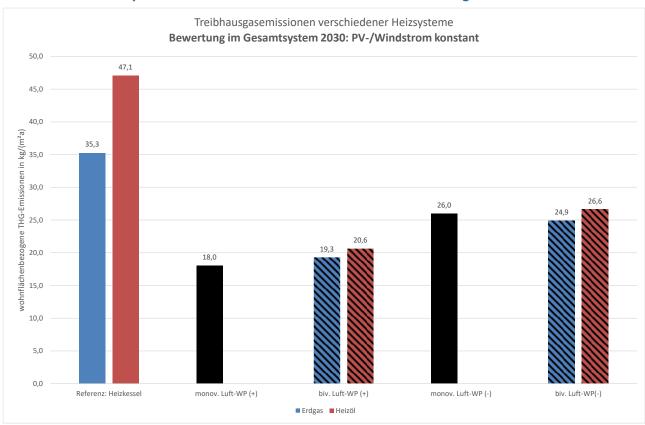


Bild 29: Wohnflächenbezogene Treibhausgasemissionen bei der Heizungsmodernisierung: Bewertung im Gesamtsystem 2030 mit konstanten Solar- und Windstrommengen

Die beiden Balken links zeigen die spezifischen Treibhausgasemissionen der Wohngebäude mit Heizungsmodernisierung im Referenzfall mit Heizkesseln an. Blaue Balken stehen hier generell für die Verwendung von Erdgas, rote für Heizöl. Die Treibhausgas-Emissionen (äquivalente CO₂-Emissionen) belaufen sich auf 35,3 bzw. 47,1 kg/m²a.

Die folgenden drei Balken (schwarz für die monovalente Außenluft-Wärmepumpe, schwarz-blau bzw. schwarz-rot für die bivalenten Varianten mit Gas- bzw. Ölkessel) geben die jeweiligen Ergebnisse für die effiziente Wärmepumpe WP (+) wieder: Die spezifischen Emissionen betragen hier nur noch 18,0 bis 20,6 kg/m²a. Die monovalente Lösung ist dabei unabhängig von der (vorherigen) Verfügbarkeit von Erdgas bzw. Heizöl und daher nur als ein einziger Balken dargestellt¹6.

Die Resultate für die weniger effiziente Wärmepumpe WP (-) sind in den letzten drei Balken dargestellt. Hier liegen die errechneten Treibhausgasemissionen zwischen 24,9 und 26,6 kg/m²a.

Insgesamt ist zu festzustellen, dass die erreichten Emissionswerte primär von der Wärmepumpeneffizienz (+) bzw. (-), aber nur wenig von der Systemkonfiguration (monovalent oder bivalent) abhängen.

Bei etwas genauerem Hinsehen ist festzustellen, dass bei vorhandenem Energieträger Erdgas im Fall der effizienten Wärmepumpe (+) die monovalente Lösung, im Fall der weniger effizienten Wärmepumpe (-) die

¹⁶ Die Differenzbetrachtung im Gesamtsystem führt hier gegenüber den beiden Referenzfällen (Erdgas bzw. Heizöl) am Ende zu dem gleichen Endergebnis. Zwar hängt die wohnflächenbezogene Treibhausreduktion der jeweiligen Untersuchungsvariante vom Referenzfall (Gas- bzw. Ölkessel) ab, nicht aber der am Ende ermittelte Wert der wohnflächenbezogenen Treibhausgasemissionen: So ist bei Betrachtung von Heizöl die Emissionsminderung größer als bei Erdgas. Aber auch die Referenzemissionen sind dementsprechend höher, so dass schließlich für beide Differenzanalysen (egal ob gegenüber dem Referenzfall Gas oder Öl) die gleichen wohnflächenbezogenen Emissionswerte resultieren.



bivalente Lösung etwas besser abschneidet. Offenbar macht sich hier im bivalenten System die Option, in Zeiten ohne ausreichendes Solar- bzw. Windstromangebot und mit ungünstiger Leistungszahl der Wärmepumpe ersatzweise den Heizkessel statt der Wärmepumpe zu verwenden, beim weniger effizienten Wärmepumpensystem positiv bemerkbar.

Im Fall des Energieträgers Heizöl ist generell die monovalente Lösung günstiger: Hierfür ist offenbar ausschlaggebend, dass der ursprüngliche, durch einen höheren Emissionsfaktor gekennzeichnete Brennstoff Heizöl (in den Gebäuden) komplett durch den Brennstoff Erdgas (in Kraftwerken) ersetzt wird¹⁷.

Bei Betrachtung der Emissionsreduktion durch Wärmepumpensysteme im Vergleich zum Heizkesseleinsatz ist der jeweils passende Referenzfall (Erdgas bzw. Heizöl) zu beachten. Beim Heizöl liegen die prozentualen Emissionsminderungen generell am höchsten: Im Fall der effizienten Wärmepumpe (+) wird auch mit dem bivalenten System eine Triebhausgasminderung von 56 % erreicht (20,6 gegenüber 47,1 kg/m²a). Im Fall der monovalenten Wärmepumpe sind es sogar 62 %. Bei Verfügbarkeit von Erdgas liegt die Emissionsminderung dagegen maximal bei 49 % (monovalente Variante: 18,0 gegenüber 35,3 kg/m²a).

Die bisher dargestellten Untersuchungen sind durch die Annahme gekennzeichnet, dass die insgesamt verfügbare Solar- und Windstrommenge in allen Untersuchungsfällen – also auch in der Referenzbetrachtung ohne Wärmepumpen – gleich groß ist. Es wird hier also davon ausgegangen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung unabhängig von der Entwicklung auf der Nachfrageseite, d. h. von der Höhe des Strombedarfs erfolgt. Dieser Ansatz mag vor dem Hintergrund definierter Ausbauziele der Bundesregierung für 2030 durchaus sinnvoll erscheinen.

Generell und langfristig gesehen ist aber auch ein anderer Ansatz plausibel: Der Zubau von Stromerzeugungsanlagen, insbesondere von Photovoltaik- und Windkraftsystemen, wird sich immer auch an der Höhe der Stromnachfrage orientieren. Anders ausgedrückt: Die Erzeugung und die Nutzung regenerativer Energien müssen quasi "Hand in Hand" gehen, so dass auch ein Teil des Solar- und Windstromzubaus mit seinem Verwendungszweck, nämlich dem Zubau von elektrischen Wärmepumpen, im Zusammenhang gesehen werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird in weiteren Modellrechnungen angenommen, dass das vollständige Volumen der Solar- und Windstromerzeugung (200 bzw. 380 TWh/a) erst mit dem Zubau der (monovalenten oder bivalenten) Wärmepumpen erreicht wird. Im Referenzfall mit reiner Heizkessel-Wärmeerzeugung wird dagegen von einem reduzierten Volumen von 195 TWh/a an Solar- und 365 TWh/a an Windstrom ausgegangen. Dabei handelt es sich um einen Ad-Hoc-Ansatz¹⁸, der aber aus folgenden Gründen in seiner Größenordnung sinnvoll erscheint: Durch die Reduzierung der Solar- und Windstrommengen wird im Referenzfall ein ähnliches Niveau für die notwendige Abregelung erreicht wie in den Fällen mit Wärmepumpe (dort mit dem ursprünglichen höheren Ansatz für den Photovoltaik- und Windstrom). Außerdem entspricht der Anteil der Photovoltaik und Windkraft an der gesamten Stromerzeugung im Referenzfall nun den mit Wärmepumpen erreichten Werten¹⁹.

Die Ergebnisse der auf diese Weise durchgeführten Untersuchung mit einem anteiligen Zubau der Photovoltaik und Windkraft gegenüber dem Referenzfall bei Einsatz von Wärmepumpen sind in Bild 30 dargestellt.

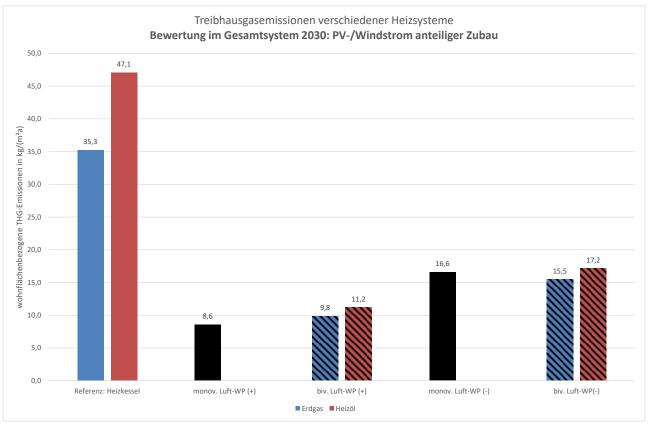
¹⁷ Die insbesondere durch den Krieg in der Ukraine aktuell aufgeworfene Frage der Versorgungssicherheit beim Erdgas wird im vorliegenden Projekt nicht in die Bewertung einbezogen.

¹⁸ Der prozentuale Zubau von Windkraft ist hier mit ca. 4 % (380 gegenüber 365 TWh/a) aufgrund des besseren zeitlichen Zusammenspiels von Erzeugung und Verbrauch bei Windkraft und Wärmepumpen höher angenommen als bei der Photovoltaik mit ca. 2,5 % (200 gegenüber 195 TWh/a): Wärmepumpen "passen" sozusagen aufgrund der winterlichen Spitze des Wärmebedarfs besser zur Windkraft als zur Photovoltaik (vgl. [Diefenbach et al. 2019]).

¹⁹ Ohne Reduzierung der Solar- und Windstromerzeugung müssen im Referenzfall rund 33 TWh der Produktion abgeregelt werden. Nach der Reduzierung liegt das Ergebnis mit ca. 25-26 TWh deutlich näher an den Werten, die bei höherem Photovoltaik- und Windkraftzubau in den Fällen mit Wärmepumpeneinsatz erreicht werden (zwischen 24 TWh in den monovalenten und 22-23 TWh in den bivalenten Varianten). Im Fall WP (+) sinkt Anteil der Wind-/Solarstromnutzung im Referenzfall von 73,8 % auf 72,1 % und entspricht damit der monovalenten Variante mit höherem Photovoltaik-/Windstromvolumen (ebenfalls 72,1 %). In den bivalenten Varianten werden mit rund 72,5 % etwas höhere Werte erreicht.



Bild 30: Wohnflächenbezogene Treibhausgasemissionen bei der Heizungsmodernisierung: Bewertung im Gesamtsystem 2030 mit anteiligem Zubau des Solar- und Windstroms bei Wärmepumpennutzung



Gegenüber der ursprünglichen Untersuchung in Bild 29 ist zu erkennen, dass nun durch die Verknüpfung eines Teils der zugebauten Photovoltaik und Windkraft mit den Wärmepumpen noch einmal deutlich größere Treibhausgasminderungen und entsprechend niedrigere Emissionswerte für die Fälle mit Wärmepumpenheizung erreicht werden. Das frühere Ergebnis, dass monovalente und bivalente Lösungen bei gleicher Wärmepumpeneffizienz nur geringe Unterschiede aufweisen, also im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen etwa gleichwertig sind, bleibt auch in dieser Betrachtung bestehen.

Neben den resultierenden Treibhausgasemissionen sind als ergänzende Information auch die erreichten Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpensysteme von Interesse (hier ohne Berücksichtigung von Hilfsstromverbräuchen). Es ergibt sich für die effiziente Wärmepumpe WP (+) im monovalenten Fall eine Jahresarbeitszahl von ca. 3,4, in den beiden bivalenten Fällen 3,7 (mit Erdgas) bzw. 3,6 (mit Heizöl). Inklusive elektrischer Heizstäbe liegen die Werte bei 2,8 (monovalent und bivalent mit Erdgas) bzw. bei 2,7 (bivalent mit Heizöl). Bei der weniger effizienten Wärmepumpe WP (-) liegen die Jahresarbeitszahlen im monovalenten Betrieb bei 2,6, im bivalenten Fall bei 2,9 bzw. 2,8. Inklusive der elektrischen Heizstäbe ergeben sich in allen Varianten Werte im Bereich von etwa 2,3.

Generell ist zu beachten, dass bei dem angewendeten Regelungskonzept Wärmepumpen und Heizstäbe auch für die momentane Nutzung von Solar- und Windstromüberschüssen in Wärmespeichern aktiviert werden, also gegebenenfalls häufiger und in solchen Zeiten auch mit niedriger Erzeugungseffizienz betrieben werden, als dies bei einer "herkömmlichen", d. h. einer primär auf die momentane Deckung des Wärmebedarfs ausgerichteten Betriebsweise (mit Verwendung der Außentemperatur als Führungsgröße im bivalenten Betrieb) der Fall wäre. Vor dem Hintergrund der hohen Solar- und Windstromanteile in der elektrischen Energieversorgung ergeben sich so selbst im Fall der auf den ersten Blick vielleicht "bescheiden" erscheinenden



Jahresarbeitszahlen von 2,3 für die Kombination ineffiziente Wärmepumpe / Heizstäbe noch die in den Abbildungen dokumentierten deutlichen Treibhausgasminderungen gegenüber den Referenzsystemen.

4.4 Weitergehende Untersuchungen

4.4.1 Durchschnittlicher Treibhausgas-Emissionsfaktor als Bewertungsalternative

Die Kapitel 4.3 dokumentierten Analysen zeigen die Wirkung der neuen Heizsysteme im Gesamtkontext einer zukünftigen Energiewirtschaft. Eine solche Untersuchung erfordert spezielle Berechnungen mit einem relativ komplexen Simulationsprogramm, welches das Zusammenspiel von Energieangebot und die Nachfrage in kleinen Zeitschritten (hier: Stundenschritten) berücksichtigen muss. Darüber hinaus wurde eine besondere Art der Differenzbetrachtung zur Bewertung der Treibhausgasemissionen durchgeführt, d. h. die durch unterschiedliche "Störungen" des Gesamtsystems mit unterschiedlichen Heizsystemen resultierenden Differenzen im Brennstoffeinsatz und den Treibhausgasemissionen wurden den jeweiligen Heizsystemen zugeordnet und in entsprechende spezifische Treibhausgas-Emissionswerte umgerechnet.

Eine solche Analyse erfordert also einen relativ großen Aufwand, und darüber hinaus sind grundsätzlich auch andere Möglichkeiten der Emissionsbewertung denkbar. Insbesondere werden häufig in wissenschaftlichen Untersuchungen, aber auch in der praktischen Anwendung der energetischen Bilanzierung (z. B. zum Nachweis von Gebäudestandards im Rahmen von Energieausweis, Gebäude-Energie-Gesetz oder der Förderung von Effizienzhausstandards) durchschnittliche Treibhausgas-Emissionsfaktoren einer aktuellen oder zukünftigen deutschen Stromwirtschaft verwendet. Dies gilt auch für die im vorliegenden Bericht in Kapitel 3 durchgeführten Analysen.

Vor diesem Hintergrund sollen hier zum Vergleich auch die Ergebnisse einen solchen einfacheren Bewertungsansatzes analysiert werden. Hierzu wird der mittlere jährliche Emissionsfaktor der im Modell betrachteten, auf Erdgas-, Solar- und Windkraftwerken basierenden Stromerzeugung ermittelt und als generelle Bewertungsgröße für Stromanwendungen interpretiert. Dieser Wert, der hier je nach Untersuchungsfall in einem engen Bereich von ca. 0,125 und 0,138 kg/kWh liegt²⁰, wird also für die Bewertung der in den Wärmepumpen verbrauchten elektrischen Energie herangezogen. Bei den bivalenten Wärmepumpen kommen dann noch die in den begleitenden Heizkesseln durch Erdgas bzw. Heizöl verursachten Emissionsmengen hinzu. In den Referenzfällen mit reiner Gas- bzw. Ölheizung ergeben sich dagegen weiterhin keine Veränderungen gegenüber den vorherigen Betrachtungen. Die Ergebnisse dieses zusätzlichen Bewertungsansatzes sind in Bild 31 dokumentiert.

66

²⁰ Aufgrund dieses engen Ergebnisintervalls kann man sagen, dass die Bewertung, die hier noch auf den individuellen Emissionsfaktoren der jeweiligen Untersuchungsfaktoren basiert, vereinfachend und damit weitgehend unabhängig von komplexen Modellanalysen auch unter Ansatz eines identischen Emissionsfaktors von z.B. 0,13 kg/kWh durchgeführt werden könnte und dann zu ähnlichen Ergebnissen kommen würde.



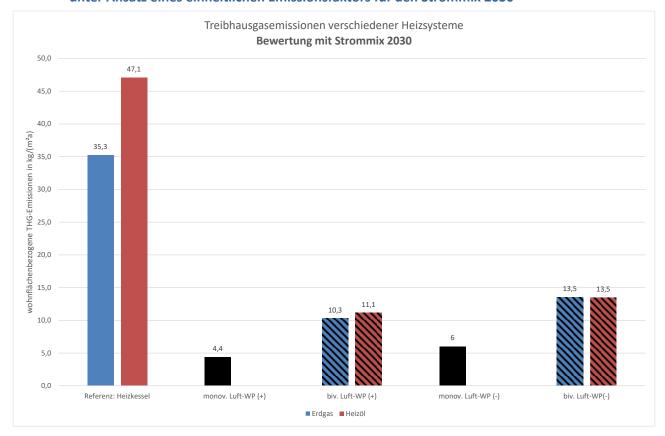


Bild 31: Wohnflächenbezogene Treibhausgasemissionen bei der Heizungsmodernisierung: Bewertung unter Ansatz eines einheitlichen Emissionsfaktors für den Strommix 2030

Im Vergleich mit den vorangehenden Betrachtungen ist festzustellen, dass die Bewertung speziell der monovalenten Wärmepumpen noch einmal deutlich günstiger ausfällt. Gegenüber den bivalenten Wärmepumpen ergeben sich für die monovalenten Systeme nur noch knapp halb so hohe Treibhausgasemissionen.

Dieses Ergebnis erfordert eine genauere Betrachtung: Einerseits ist festzustellen, dass die Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Heizsysteme offenbar vom Kontext, also von den gewählten Bewertungsmaßstäben, abhängig ist. Generell sind unterschiedliche Bewertungsansätze denkbar und es kann nicht unbedingt von einem "Richtig" oder "Falsch" gesprochen werden – das zeigen bereits die unterschiedlichen Ergebnisse in Bild 30 gegenüber Bild 29. Andererseits erklären sich die Unterschiede dort allerdings in sehr transparenter und verständlicher Weise durch verschiedene Annahmen bezüglich des Zubaus von erneuerbaren Energien im Stromsektor. Die abweichenden Ergebnisse der dritten Betrachtung gemäß Bild 31 sind in ihrer Ursache erst einmal unklar und – wie im Folgenden gezeigt werden soll – erscheinen für den Vergleich unterschiedlicher Wärmepumpensysteme nicht sachgerecht. Um dies zu begründen, muss das Zustandekommen der unterschiedlichen Ergebnisse näher erläutert werden:

Das (weitgehend) gleiche Abschneiden der monovalenten und bivalenten Wärmepumpen in der Gesamtbilanz ist dadurch zu erklären, dass insgesamt etwa gleich viel Brennstoff (Erdgas) verbraucht wird. In den bivalenten Systemen wird das Erdgas vor Ort in den Gebäuden eingesetzt, bei den monovalenten Systemen findet ein entsprechend hoher Mehrverbrauch im Rahmen der Stromerzeugung mit Erdgas-Kraftwerken statt. Der Gesamt-Effekt auf die Treibhausgasemissionen ist aber (ungefähr) gleich. Vor diesem Hintergrund erscheint es plausibel, dass der in den Kraftwerken auftretende Erdgas-Mehrverbrauch in der monovalenten Wärmepumpenvariante, der offensichtlich mit dieser Systemkonfiguration ursächlich verbunden ist und für den Zweck der Gebäudeheizung benötigt wird, auch tatsächlich direkt den Gebäuden bzw. ihrer Wärmeversorgung zugeordnet wird.



Ganz anders ist die Zuordnung bei Betrachtung eines mittleren Strommixes: Dies gilt noch nicht so sehr für den Fall der bivalenten Systeme, denn wird hier der vor Ort in den Gebäuden stattfindende Brennstoffverbrauch ebenfalls direkt der Gebäude-Wärmeversorgung zugerechnet. Ein entscheidender Unterschied liegt aber in der Behandlung der monovalenten Systeme: Der durch diese Systeme verursachte Brennstoff-Mehrverbrauch findet zwar ebenfalls in der Bilanz Berücksichtigung, nämlich bei Ermittlung des mittleren Treibhausgasemissionsfaktors für den Strommix. Dieser verschlechtert sich entsprechend, d. h. der Emissionsfaktor steigt. Da es sich um einen mittleren Faktor für den gesamten Strommix handelt, wird er aber dem gesamten Elektrizitätssektor zugeordnet, d. h. für alle Verbraucher elektrischer Energie ergeben sich nun rechnerisch höherer Treibhausgasemissionen – nicht nur für die monovalenten Wärmepumpen, die die Mehremissionen eigentlich verursacht haben. Der Brennstoffmehrverbrauch und die damit zusammenhängenden Treibhausgasemissionen werden sozusagen "vergemeinschaftet". Da der Anteil der betrachteten Wärmepumpen am gesamten Stromverbrauch relativ gering ist, fällt auch nur ein geringer Anteil der Mehremissionen auf die eigentlichen Verursacher zurück. Für einen sachgerechten Vergleich monovalenter und bivalenter Systeme erscheint ein solcher Bewertungsansatz also nicht geeignet²¹.

Die bei monovalenten Wärmepumpen auftretende Verschiebung des elektrischen Brennstoffverbrauchs von den Gebäuden in das elektrische Energiesystem hat weitere Effekte, die in [Diefenbach et al. 2017, s. dort insbesondere Kap. 3.4 und Kap. 8] untersucht wurden: Der elektrische Leistungsbedarf an kalten Wintertagen steigt stark an, d. h. es werden in erheblichem Umfang ein Netzausbau auf der Verteilnetzebene und zusätzliche Spitzenlast-Kraftwerke benötigt. Beim Vergleich monovalenter und bivalenter Systeme im Rahmen einer wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung wäre dieser Mehraufwand mit den entsprechenden Mehrkosten bivalenter Systeme (zusätzlicher Heizkessel im Gebäude) zu verrechnen. Grobe Abschätzungen in [Diefenbach et al. 2017], Kap. 7.2] für ein zukünftiges Energiesystem zeigen angesichts bestehender Unsicherheiten bei den Kostenansätzen keine eindeutigen Vorteile monovalenter bzw. bivalenter Systeme.

4.4.2 Konsequenzen für die Bewertung direktelektrischer Wärmeversorgungssysteme

In weitaus stärkerem Umfang als bei monovalenten Wärmepumpen würden die in Kapitel 4.4.1 behandelten Rückwirkungen einer Verlagerung des Brennstoffeinsatzes von den Gebäuden ins Stromsystem bei direktelektrischen Systemen zu Buche schlagen. Dies gilt auch für das geschilderte Bewertungsproblem der "Vergemeinschaftung" der Emissionen bei Betrachtung durchschnittlicher Emissionsfaktoren für den Strommix. Vor diesem Hintergrund wurde hier eine Ad-Hoc-Untersuchung durchgeführt, bei der die monovalente Wärmepumpe durch ein direktelektrisches Heizsystem (Wirkungsgrad 100 %) ersetzt wurde²². Dabei wurden zwei Bewertungsansätze verwendet:

68

²¹ Man kann den Ansatz dahingehend weiter auszudifferenzieren, dass nicht mehr ein jahresdurchschnittlicher Wert für den Treibhausgasemissionsfaktor verwendet wird, sondern vielmehr zeitabhängige Emissionsfaktoren ermittelt werden (Treibhausgasemissionen dividiert durch Stromerzeugung im jeweiligen Zeitschritt). Diese werden dann den Stromverbrauchern (insbesondere also den Wärmepumpen) entsprechend dem tatsächlichen Zeitverlauf ihres jeweiligen Stromverbrauchs zugeordnet. Ein solcher Ansatz wurde in Stundenschritten für den Fall der effizienten monovalenten und der bivalenten Wärmepumpe mit Erdgaskessel durchgeführt. Die Auswirkungen sind aber relativ gering: Die wohnflächenbezogenen Emissionen erhöhen sich im Fall der monovalenten Wärmepumpe von 4,4 kg/m²a (vgl. Bild 31) auf 5,2 kg/m²a. Im Fall der bivalenten Wärmepumpe sinken sie von 10,3 auf 9,9 kg/m²a. Durch die differenziertere Betrachtung wird also offensichtlich der aus Sicht der Emissionen ungünstigere zeitliche Verlauf des monovalenten Wärmepumpen-Strombedarfs besser abgebildet. Der Gesamtvergleich monovalenter und bivalenter Systeme (ca. "Faktor 2" zwischen den spezifischen Emissionen) ändert sich aber nicht grundsätzlich, denn das Problem der Umlage der durch die monovalenten Wärmepumpen verursachten Mehremissionen auf alle Stromverbraucher bleibt weiterhin bestehen.

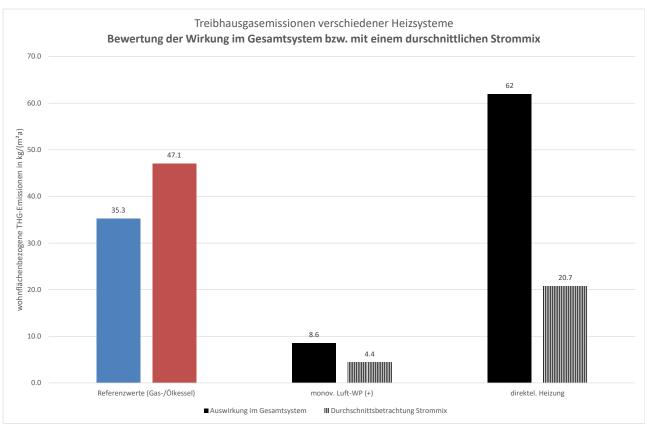
²² Auch hier wurden die gleichen Wärmespeicher wie im Fall der Wärmepumpen und die gleichen Regelungsmechanismen zur Ausnutzung des Solar- und Windstroms angenommen.



- Ansatz "Wirkung im Gesamtsystem": Bewertung im Gesamtsystem 2030 mit Zubau von Photovoltaik und Windkraft (wie für die Wärmepumpen in Bild 30)²³
- Ansatz "Durchschnittsbetrachtung Strommix": Anwendung eines durchschnittlichen Emissionsfaktors für den Strommix (wie in Bild 31).

Als Vergleichswerte für die spezifischen Emissionen der effizienten monovalenten Wärmepumpe sind damit einerseits der Wert 8,6 kg/m²a aus Bild 30 und andererseits der Wert 4,4 kg/m²a aus Bild 31 heranzuziehen. Das Ergebnis der Analysen ist in Bild 32 im Vergleich zu den Referenz-Heizsystemen (Erdgas- bzw. Heizölkessel) dargestellt.

Bild 32: Wohnflächenbezogene Treibhausgasemissionen bei der Heizungsmodernisierung inklusive einer direktelektrischen Beheizung: Bewertung im Gesamtsystem bzw. unter Ansatz eines durchschnittlichen Emissionsfaktors für den Strommix



Die Abbildung zeigt erhebliche Differenzen zwischen den beiden Ansätzen zur Bewertung der Heizsysteme. Im Fall der monovalenten Wärmepumpe wirken sich diese zwar relativ gesehen stark aus (ca. "Faktor 2" zwischen 8,6 und 4,4 kg/m²a) und verzerren wie oben geschildert im Fall der Durchschnittsbetrachtung den Vergleich mit den (hier nicht dargestellten) bivalenten Systemen. Insgesamt ergeben sich aber trotz der

Anteils aufgrund ineffizienter Stromnutzung erscheint damit aber noch nicht plausibel begründbar.

führlichere Diskussion in [Diefenbach et al. 2019, insbesondere Kap. 6]). Die Annahme einer (beliebigen) Vergrößerung dieses

69

²³ Dieser Zubauansatz fällt auch für die direktelektrische Wärmeerzeugung günstiger aus als der ursprüngliche Ansatz einer konstanten Solar- und Windstrommenge. Man könnte grundsätzlich erwägen, diesen Zubau stärker als im Fall der Wärmepumpen anzunehmen, da ja auch der Stromverbrauch der direktelektrischen Wärmeerzeugung größer ist. Auf einen solchen Ansatz wurde hier aber verzichtet, da auf lange Sicht die heimischen Potentiale insbesondere der Windkraft als eine begrenzende Größe anzusehen sind (vgl. [Diefenbach et al. 2019]). Vor diesem Hintergrund ist es zwar immer noch gerechtfertigt anzunehmen, dass ein angemessener Anteil der Solar- und Windenergie auch für die Wohngebäude-Wärmeversorgung zur Verfügung stehen wird (s. aus-



Unterschiede immerhin in beiden Ansätzen weitgehende Treibhausgasminderungen gegenüber den Referenzfällen mit Gas- bzw. Ölheizung.

Weitaus gravierender sind die Unterschiede, die sich im Fall der direktelektrischen Heizung zeigen. Die beiden Bewertungsansätze liegen hier um den "Faktor 3" auseinander (62 gegenüber 20,7 kg/m²a) und zwar absolut auf viel höherem Niveau. Dadurch ergibt sich eine vollständig verschiedene Bewertung des ökologischen Nutzens: Während bei der Betrachtung im Gesamtsystem die direktelektrische Heizung noch erheblich schlechter abschneidet als die Wärmeversorgung durch Ölkessel (62 gegenüber 47,1 kg/m²a), ergeben sich bei Ansatz eines durchschnittlichen Emissionsfaktors für den Strommix deutliche Vorteile sogar gegenüber der Erdgasheizung (20,7 gegenüber 35,3 kg/m²a).

Diese Beispielbetrachtung zeigt, dass der pauschale Ansatz mittlerer Emissionsfaktoren bei der Stromerzeugung für die Bewertung elektrischer Wärmeversorgungssysteme zu gravierenden Fehleinschätzungen bezüglich der tatsächlichen Auswirkungen und des Nutzens dieser Systeme bei der Reduktion des Brennstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im Gesamtsystem führen kann. Dies gilt in besonderem Maße für den Fall der (im Vergleich zu Wärmepumpen) sehr ineffizienten direktelektrischen Systeme. Auf eine differenzierte Analyse und Bewertung der tatsächlichen Auswirkungen dieser Form der Wärmeerzeugung im Gesamtsystem kann daher nicht verzichtet werden.

4.4.3 Rolle der Wärmespeicher

Die Untersuchungen zu den Wärmepumpen sind dadurch gekennzeichnet, dass im Jahr 2030 mit bereits sehr hohen Anteilen von Solar- und Windstrom im elektrischen Energiesystem eine möglichst weitgehende und sinnvolle Nutzung der erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs von Energieangebot und Nachfrage angestrebt ist. Vor diesem Hintergrund wurde in den Untersuchungen, auch im Fall der monovalenten Systeme generell angenommen, dass gleichzeitig mit den Wärmepumpen auch Wärmespeicher eingebaut werden. Diese sind darüber hinaus noch mit elektrischen Heizstäben ausgestattet, in denen annahmegemäß Solar- und Windstromüberschüsse im elektrischen Energiesystem zur Erzeugung von Temperaturen oberhalb der von den Modell-Wärmepumpen erreichbaren 60 °C bis zu maximal 80 °C genutzt werden können.

Vor diesem Hintergrund wurden hier mit der effizienten monovalenten Wärmepumpe WP (+) noch Untersuchungen für den Fall einer Halbierung des Speichervolumens und für einen vollständigen Verzicht auf Wärmespeicherung durchgeführt. Dabei wurde der ursprüngliche Bewertungsansatz im Gesamtsystem mit konstanten Solar- und Windstrommengen (also ohne Zubau) betrachtet. Im Ergebnis zeigt sich für den Fall der Halbierung der Speichervolumina eine Zunahme der Treibhausgasemissionen in den betrachteten Wohngebäuden um 9 %. Bei vollständigem Verzicht auf Wärmespeicherung beträgt der Zuwachs 23 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die gezielte Wärmespeicherung eine relevante Rolle zur Optimierung der Nutzung volatiler erneuerbarer Energiequellen leisten kann. Es erscheint plausibel anzunehmen, dass dies durch Wärmespeicher absehbar auch zukünftig einfacher und kostengünstiger erfolgen kann als durch einen zusätzlichen, speziell auf die Wärmenutzung ausgerichteten erhöhten Zubau von Stromspeichern. Die Empfehlung, bereits heute beim Einbau von Wärmepumpen Wärmespeicher vorzusehen (auch wenn für die flexible Solarund Windstromnutzung bisher noch keine entsprechenden zeitabhängigen Preis- bzw. Steuersignale existieren) erscheint dadurch gerechtfertigt. Zumindest gilt dies in solchen Fällen, in denen eine solche flexible Nutzung aufgrund einer eigenen Photovoltaikanlage mit einer entsprechend angepassten Regelung heute schon realisiert kann (siehe Kapitel 3.2.2.5). Hinsichtlich des Platzbedarfs der Wärmespeicher müssen im Gebäudebestand sicherlich immer auch die örtlichen Verhältnisse berücksichtigt werden. In den vorliegenden Untersuchungen waren wie oben geschildert "handhabbar" erscheinende Speichervolumina (400 Liter im Ein-/Zweifamilienhaus, 800 Liter im Mehrfamilienhaus) angesetzt worden.



5 Wärmepumpen im individuellen Sanierungsfahrplan (iSFP)

Ziel einer Gebäudesanierung ist die Senkung des Energieverbrauchs eines Gebäudes, um so die Treibhausgasemissionen des Gebäudes zu minimieren. Aus der Erkenntnis, dass viele Sanierungen in Einzelschritten durchgeführt werden, ist das Beratungswerkzeug individueller Sanierungsfahrplan (iSFP) entstanden.

Der individuelle Sanierungsfahrplan ist ein Instrument, um die Sanierung von Gebäuden in einzelnen Schritten zu koordinieren und zu optimieren. Ziel der Schritt-für-Schritt-Sanierung ist durch das Bestmöglich-Prinzip einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Nach dem Merkblatt zum iSFP bedeutet das Bestmöglich-Prinzip, dass alle Optionen zur Senkung des Primärenergiebedarfs nach Möglichkeit berücksichtigt werden [BAFA 2021]. Dazu werden Maßnahmenvorschläge zur Energieeffizienzverbesserung an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik unter Einbeziehung von erneuerbaren Energien im Bericht gefordert.

Vorschläge zur Optimierung von Bauteilen der Gebäudehülle sind nötig, wenn der U-Wert des Bauteils im Ist-Zustand nicht den Anforderungen des GEG (Bauteilkennwerte Einzelmaßnahmen) genügt. Sanierungsvorschläge für die Anlagentechnik werden gefordert, wenn diese älter als 10 Jahre ist. Vorschläge zur Nutzung von erneuerbaren Energien sind nötig, wenn diese bisher noch nicht genutzt werden.

Ziel eines iSFP ist es, für das Gebäude eine Effizienzhausstufe nach den Vorgaben der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) zu erreichen. Die Sanierungsmaßnahmen sind im Bericht so zu gliedern, dass sie aufeinander aufbauen.

Um die Sanierung / Sanierungsberatung anzureizen, werden für das Vorliegen eines iSFP zusätzliche Boni bei der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) vergeben. Liegt für ein Gebäude ein iSFP vor und werden Einzelmaßnahmen am Gebäude umgesetzt, kann ein Förderbonus von 5 % für einige Maßnahmen gewährt werden.

Im Rahmen des iSFP werden die Gebäudehülle und die Anlagentechnik detailliert betrachtet und mithilfe eines einfach verständlichen Farbcodes vom rot bis grün bewertet. In Bild 33 sind die Symbole und Kategorien dargestellt.



Bild 33: Zu bewertende Gebäudekomponenten im iSFP [dena 2021]

	Gebäudekomponenten											
Gebäudehü	ille	Anlagentech	hnik	Qualitätssicherung								
	Komponenten:		Komponenten:									
	Wände, inklusive Kellerwänden		Heizung	verbessert	Wärmebrücken							
	Dach, oberer Gebäudeabschluss		Warmwasserbereitung	verbessert	Luftdichtheit							
	Fenster, inklusive Dachflächenfenstern		Warme- und Warmwasser- verteilung, inklusive Speiche- rung und Obergabe									
	Boden, unterer Gebäudeabschluss	a □	Lüftung									

Tabelle 3: Komponentenzuordnung im iSFP

Die Bewertung der Gebäudehülle erfolgt über die U-Werte der Bauteile, je geringer der U-Wert, desto besser die Bewertung des Bauteils (Bild 34). Die hellgrüne Kategorie definiert in diesem System die GEG Mindestanforderung an Einzelbauteile.

Bild 34: Farbklassen und Klassengrenzen für Bauteilkomponenten der Gebäudehülle im iSFP [dena 2021]

Farbklasse	Wände, inklusive Kellerwänden	Dach, oberer Gebäudeabschluss	Fenster, inklusive Dachflächenfenstern	Boden, unterer Gebäudeabschluss		
		U _{m,BT} in W/(m²-l	()			
	≤ 0,15	≤ 0,12	$U_{W,m} \le 0.80$ $U_{g,m}/g \le 0.60$	≤ 0,20		
	≤ 0,20	≤ 0,14	U _{w,m} ≤ 0,95	≤ 0,25		
	≤ 0,24	≤ 0,24	U _{w,m} ≤ 1,30	≤ 0,30		
	≤ 0,35	≤ 0,30	U _{w,m} ≤ 1,70	≤ 0,40		
	≤ 0,50	≤ 0,50	U _{w,m} ≤ 2,10	≤ 0,50		
	≤ 0,80	≤ 0,80	U _{w,m} ≤ 2,70	≤ 0,80		
	> 0,80	> 0,80	U _{w,m} >2,70	> 0,80		

Tabelle 5: Farbklassen und Klassengrenzen für Bauteilkomponenten der Gebäudehülle

Die Bewertung der Heizung und der Warmwasserbereitung erfolgt über die Effizienzzahl $e_{g,p}$ die beschreibt, wie viele Kilowattstunden Primärenergie vom Wärmeerzeuger benötigt werden, um eine Kilowattstunde Wärme an das Verteilsystem abzugeben (Bild 35). Die hellgrüne Klasse bezeichnet hier eine moderne, mit



fossilem Brennstoff betriebene Heizung mit anteiliger Nutzung erneuerbarer Energien z. B. einen Öl- oder Gas-Brennwert-Kessel mit thermischer Solaranlage zur Unterstützung der Warmwasserbereitung.

Bild 35: Klassengrenzen Wärmeerzeuger und Warmwasserbereitung im iSFP [dena 2021]

Farbklasse im iSFP	Effizienzzahl e g,p	Beschreibung für Kunden
	[-]	
	< 0,4	Hohe Effizienz / überwiegend erneuerbare Energieträger
	< 0,7	Hohe Effizienz / erneuerbare und fossile Energieträger
	< 1,0	Moderne Wärmeerzeuger mit fossilen Energieträgern und zusätzlich erneuerbaren Energien
	< 1,1	Moderne Wärmeerzeuger mit fossilen Energieträgern
	< 1,2	Wärmeerzeuger mit fossilen Energieträgern
	< 1,3	Mindestanforderung an neue Heizkessel
	< 1,5	Nicht mehr zeitgemäße Technik
	< 1,6	Ineffiziente Wärmeerzeuger
	> 1,6	Ineffiziente Wärmeerzeuger mit sehr hohen Verlusten

Tabelle 6: Klassengrenzen Wärmeerzeugung und Warmwasserbereitung

Bei der Bewertung der Wärmeversorgung werden die einzelnen Komponenten der Heizungsanlage wie die Speicherverluste des Heizungspufferspeichers, die Rohrleitungsdämmung, die Heizungspumpen, die Wärme- übergabe mit Ventilen und die Vorlauftemperaturen der Verteilung betrachtet. Für die Warmwasserbereitung gehen der Brauchwasserspeicher, die Brauchwasser-Rohrleitungsdämmung und die Brauchwasserpumpen mit ein. Diese 8 Punkte werden als arithmetisches Mittel und somit gleichwertig gewertet, Komponenten die nicht vorhanden sind, werden nicht berücksichtigt.

Die Reihenfolge der einzelnen Sanierungsschritte wird vom Energieberater in Absprache mit dem Gebäudebesitzer abgestimmt und kann individuell sehr unterschiedlich sein. Zudem ist es zum Erreichen des Förderzuschusses nicht nötig, die Reihenfolge der Maßnahmen entsprechend dem iSFP umzusetzen. Werden z. B. an der Fassade aber erste Putzschäden festgestellt, dann könnte eine Fassadendämmung vor einer ursprünglich zuvor geplanten Dachsanierung durchgeführt werden.

Sinnvoll ist es in der Regel erst die Gebäudehülle zu sanieren, um dann in einem späteren Schritt eine an den geringen Energieverbrauch des Gebäudes angepasst Heizungsanlage einzubauen. Ist jedoch die Heizungsanlage schon älter und besteht die Gefahr eines plötzlichen Totalausfalls der Anlage, ist ggf. diese Maßnahmen vorzuziehen.

5.1 Beurteilung der Wärmepumpentauglichkeit eines Gebäudes im Rahmen eines iSFP

Die Voraussetzungen für den Einsatz einer Wärmepumpe wurden schon in Kapitel 2.1 beschrieben. Die wichtigste Kenngröße für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe ist die maximale Vorlauftemperatur des Heizsystems. Hier kann der Wert von 55 °C, der als max. Vorlauftemperatur im Normauslegungsfall nicht überschritten werden sollte und auch z. B. von [Mellwig et al. 2021] sowie von vielen Herstellern genannt



wird, angesetzt werden. Es sind zwar auch Wärmepumpen verfügbar, die höhere Temperaturen bereitstellen können, dies geht jedoch in der Regel mit einer geringeren Effizienz einher.

Für die Erstellung eines iSFP werden viele Daten des Gebäudes und der Anlagentechnik aufgenommen und beurteilt. Aus den detaillierten Berechnungsergebnissen kann in der Regel auch die Heizlast des Gebäudes im Ausgangszustand und nach den Sanierungsschritten entnommen werden.

Um für das Gebäude abschätzen zu können, ob eine Beheizung mit einer Vorlauftemperatur von max. 55 °C mit der bestehenden Anlagentechnik möglich wäre, fehlen jedoch die detaillierten Angaben den Wärme-übertragungsflächen bzw. der Heizkörper. Bei einer vorhandenen Fußbodenheizung stellt sich die Fragen nicht, jedoch bei den in Bestandsbauten weitverbreiteten Heizkörpern. Im Projekt wurde für das Mustergebäude eine Tabelle mit den entsprechenden Angaben erstellt. In Tabelle 10 sind die verwendeten Heizkörper mit den Heizleistungen bei einer Auslegung von 70/55/20 °C und 55/45/20 °C für das Muster-EFH aufgelistet. Aus der Summe kann dann die durch diese Heizkörper übertragbare Wärmemenge entnommen werden. Bei 70/55/20 können die Heizkörper 19,7 kW Heizleistung abgeben, bei 55/45/20 noch 12,1 kW. Durch den Vergleich der maximal übertragbaren Heizleistung der Heizkörper mit der Heizlast des Gebäudes für die einzelnen Sanierungsschritte kann man abschätzen, ab welchem Sanierungsschritt das Gebäude mit 55 °C über die vorhandenen Heizkörper beheizbar ist.

Tabelle 10: Mustergebäude EFH Heizflächen

Raum	Heizkörper Typ	Länge	Höhe	Heizleistung in [W]	bei Auslegung
		[mm]	[mm]	70/55/20	55/45/20
EG					
Wohnzimmer	Typ 21	2200	600	2.394	1.501
	Typ 21	1400	600	1.523	819
Esszimmer	Typ 21	1100	600	1.306	750
	Typ 21	1800	600	1.959	1.228
Büro	Typ 21	1800	600	1.959	1.228
Flur	Kein HK				
Küche	Typ 21	1800	600	1.959	1.228
WC mit Vor-					
raum	Typ 21	400	900	578	361
Treppenhaus	Typ 21	600	900	867	541
OG					
Eltern	Typ 21	1100	600	1.306	750
	Typ 21	1000	600	1.088	682
Sohn	Typ 21	1800	600	1.959	1.228
Gast	Typ 21	1800	600	1.959	1.228
Bad	Typ 21	600	900	867	541
Flur mit					
Treppenhaus	Kein HK				
		Summe Leist	ung [W]	19.724	12.085

Diese Auswertung berücksichtigt noch nicht, ob in jedem einzelnen Raum die vorhandenen Heizkörper bei einem Betrieb mit 55 °C Vorlauftemperatur ausreichen, um den einzelnen Raum zu beheizen. Dazu muss eine raumweise Heizlastberechnung durchgeführt werden. Jedoch kann alleine durch die einfache Aufnahme und Bewertung der vorhandenen Heizkörper schon eine erste Einschätzung über eine Eignung des Heizsystems für den Einsatz von Wärmepumpen erfolgen.



Sinkt durch einen Sanierungsschritt im Sanierungsfahrplan die Heizlast des Gebäudes unter die übertragbare Heizleistung der Heizkörper im Auslegungspunkt 55/45/20 (in Tabelle 10 Beispielsweise 12 kW) ist die Beheizung prinzipiell mit einer Wärmepumpe möglich.

5.2 Schlussfolgerung

Mit den im individuellen Sanierungsfahrplan (iSFP) vorgegebenen Schritten kann die Eignung eines Gebäudes für den Einsatz einer Wärmepumpe nicht direkt abgelesen werden. Für die Wärmewende im Gebäudebereich wäre es daher sinnvoll, den iSFP so zu erweitern, dass die maximal möglichen Heizleistungen der vorhandenen Heizflächen ausgewiesen werden. Dazu müssen die vorhandenen Heizkörper / -flächen im Rahmen des Ortstermins ebenfalls aufgenommen und die übertragbare Heizleistung bei einer Auslegung für einen Wärmepumpenbetrieb (55/45/20) ermittelt werden. Die Ausweisung der "NT-Readiness" kann wie von [Mellwig et al. 2021] als eigener Sanierungsschritt ausgewiesen werden oder auch als Overlay-Icon, wie es schon bei Einsatz von erneuerbaren Energien und bei Photovoltaikanlagen verwendet wird, dargestellt werden. Für ein Overlay-Icon würde sprechen, dass ein Teil der Bestandsgebäude schon die Voraussetzungen erfüllt und ggf. kein Sanierungsschritt nötig ist. Alle Gebäude, die überwiegend mit wassergeführten Flächenheizungen beheizt werden, sollten Vorlauftemperaturen von 55 °C oder niedriger erreichen. Darüber hinaus auch Bestandsgebäude mit stark überdimensionierten Heizkörpern oder bei denen schon einzelne Sanierungsmaßnahmen umgesetzt wurden.

Die Abbildung einer "NT-Readiness" im iSFP würde den Gebäudeeigentümern eine wichtige Information zu Ihrem Gebäude liefen und bei der Wahl eines neuen Heizungssystems unterstützen. Auch die Heizungsinstallateure könnten auf Informationen zugreifen, die hilfreich bei der Auslegung, Angebotserstellung und Beratung der Gebäudebesitzer sind. Gleiches gilt für die Bafa Vor-Ort-Beratung, auch hier sollte im Bericht die "NT-Readiness" mit den zugehörigen Daten ergänzt werden.

Ein erheblicher zeitlicher Aufwand bei der detaillierten Planung einer Heizungserneuerung mit Wärmepumpe stellen die raumweise Heizlastberechnung und der hydraulische Abgleich dar. Für den iSFP und die Vor-Ort-Beratung wird bereits die Gebäudehülle mit ihren Abmaßen und U-Werten erfasst, sodass der Zusatzaufwand beim Energieberater für eine raumweise Heizlastberechnung geringer ist als bei dem Handwerker, der die Daten neu erheben sowie eingeben muss und mit der Bestimmung von U-Werten der Gebäudehülle von Bestandsgebäuden nicht vertraut ist. Hier könnte die Zusammenarbeit von Energieberatern zur raumweisen Heizlastberechnung und Heizungsbauern sowie standardisierte Software-Schnittstellen zum Austausch der Gebäudedaten den Ablauf vereinfachen und Kosten eingespart werden. BIM-Konzepte müssten in die unterschiedlichen Softwareprodukte aufgenommen – aber für kleine Wohngebäude ggf. auch vereinfacht werden, damit diese in der Praxis auch Anwendung finden.



6 Literaturverzeichnis

- [Auer, Schote 2008] Auer, F.; Schote, H.: Schlussbericht Zweijähriger Feldtest Elektro-Wärmepumpen am Oberrhein. Lokale Agenda 21 Lahr – Gruppe Energie, Lahr, 2008
- [Auer, Schote 2014] Auer, F.; Schote, H.: Feldtest Wärmepumpen: Wärme aus der Umwelt auch gut für die Umwelt?. Lokale Agenda 21 Lahr – Gruppe Energie, Lahr, 2014
- [BAFA 2021] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Bafa): Energieberatung für Wohngebäude. Merkblatt für die Erstellung eines Beratungsberichts / individuellen Sanierungsfahrplans (Stand 04.11.2021). Eschborn, 2021. Url: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ebw merkblatt erstellung beratungsbericht.pdf; jsessio-nid=47A6F5F28D24E2304B9EA8CFB40B74E8.intranet251? blob=publicationFile&v=2, abgerufen am 24.04.2023
- [Berthold et al. 2020] Berthold, M.; Prinzing, M.; Eschmann, M.; Bertsch, S.: Wie gut sind aktuelle Wärmepumpen im Feld?. Planer+installateur 11/12 2020, CH Media, Aarau, 2020
- [Berthold et al. 2021a] Berthold, M.; Prinzing, M.; Eschmann, M.; Bertsch, S.: Wärmepumpen als Ersatz fossiler Heizungen in Bestandsgebäuden. Planer+installateur 02 2021, CH Media, Aarau, 2021
- [Berthold et al. 2021b] Berthold, M.; Prinzing, M.; Eschmann, M.; Bertsch, S.: Typische Installationsfehler Wärmepumpenanlagen. Planer+installateur 08 2021, CH Media, Aarau, 2021
- [Berthold et al. 2022] Berthold, M.; Uhlmann, M.; Bertsch, S.; Eschmann, M.: Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2021/22. EnergieSchweiz, Ittigen, 2022
- [BMWK 2022] Breites Bündnis will mindestens 500.000 neue Wärmepumpen pro Jahr. Pressemitteilung, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz vom 29.06.022. Url: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/06/20220629-breites-buendnis-will-mindestens-500000-neue-waermepumpen-pro-jahr.html, abgerufen am 20.04.2023
- [Bongs et al. 2022] Bongs, C.; Wapler, J.; Dinkel, A.; Miara, M.; Auerswald, S.: LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden. Abschlussbericht. ISE, KIT, INATECH, Freiburg/Karlsruhe, 2022. Url: http://www.lowex-bestand.de/wp-content/uploads/2023/03/Abschlussbericht LiB.pdf, abgerufen am 24.01.2023
- [BWP TWW 2023] Leitfaden Trinkwassererwärmung. Bundesverband Wärmepumpe, Berlin, 2023 Url:

 https://www.waermepumpe.de/verband/publikationen/fachpublikationen/?tx_bcpageflip_pi1%5Baction%5D=show&tx_bcpageflip_pi1%5Bbook%5D=93&tx_bcpageflip_pi1%5Bcontroller%5D=Book&type=1107386203&cHash=82c417dfbdb9e0c26738f14827262993, abgerufen
 am 22.03.2023
- [Cischinsky, Diefenbach 2018] Cischinsky, H.; Diefenbach, N.; Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2018. Url: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/ge-baeudebestand/2018 IWU CischinskyEtDiefenbach Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf, abgerufen am 20.04.2023
- [dena 2021] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): Handbuch für Energieberaterinnen und Energieberater Anleitung zur Erstellung des individuellen Sanierungsfahrplanes. Berlin, 2021. Url: https://www.ge-baeudeforum.de/fileadmin/gebaeudeforum/Downloads/iSFP-Publikation/iSFP-Handbuch-21-12.pdf, abgerufen am 24.04.2023
- [Diefenbach et al. 2005] Diefenbach, N.; Loga, T.; Born, R.: Wärmeversorgung für Niedrigenergiehäuser Erfahrungen und Perspektiven. IWU, Darmstadt, 2005
- [Diefenbach et al. 2015] Diefenbach, N.; Loga, T.; Stein, B.: Szenarienanalysen und Monitoringkonzepte im Hinblick auf die langfristigen Klimaschutzziele im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2015. Url: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebe-stand/episcope/2015 IWU DiefenbachEtAl Szenarienanalysen-und-Monitoringkonzepte.pdf, abgerufen am 25.04.2023



- [Diefenbach et al. 2017] Diefenbach, N.; Großklos, M.; Grafe, M.; Müller, A.; Born, R.: Modellentwicklung zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage im Wohngebäudesektor. Zwischenbericht. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2017. Url: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/prj/EE-GebaeudeZukunft Zwischenbericht.pdf, abgerufen am 17.02.2022
- [Diefenbach et al. 2019] Diefenbach, N.; Großklos, M.; Müller, A.; Grafe, M.; Swiderek, S.: Analyse der Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäudesektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050. Endbericht Teil 1. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2019. Url: https://www.iwu.de/fileadmin/publi-kationen/gebaeudebestand/prj/EEGebaeudeZukunft_Endbericht_Teil_1.pdf, abgerufen am 17.02.2022
- [DIN 4708] Deutsches Institut für Normung (DIN): Zentrale Wassererwärmungsanlagen; Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden Teil 2. April 1994, Beuth Verlag, Berlin, 1994.
- [DIN 12831-3] Deutsches Institut für Normung (DIN): Energetische Bewertung von Gebäuden Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast Teil 3: Trinkwassererwärmungsanlagen, Heizlast und Bedarfsbestimmung, Module M8-2, M8-3; Deutsche Fassung EN 12831-3:2017. September 2017, Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [DIN/TS 12831-1] Deutsches Institut für Normung (DIN): Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast Teil 1: Nationale Ergänzung zur DIN EN 12831-1. April 2020, Beuth Verlag, Berlin, 2020.
- [DIN EN 1264-4] Deutsches Institut für Normung (DIN): Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung Teil 4: Installation; Deutsche Fassung EN 1264-4:202. August 2021, Beuth Verlag, Berlin, 2021.
- [DUH 2021] Factsheet 3 zum Planungsleitfaden: das eigene Wärmepumpen-Projekt erfolgreich umsetzen.

 Deutsche Umwelthilfe/HEATY, Berlin/Königstein, 2021. Url: https://www.duh.de/fileadmin/u-ser-upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/W%C3%A4rmepumpen/DUH Facts-heet_W%C3%A4rmepumpen_22_12_21_final.pdf, abgerufen 19.04.2023
- [DVGW W551] Arbeitsblatt W551: Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen, Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW), Bonn, 2004
- [DVGW 2022] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.: "Energieeinsparungen im Warmwasserbereich in Trinkwasserinstallationen geht das? Kurzüberblick Regelwerk und Ergebnisse des Online-Diskurses "Energieeinsparung und Warmwasser in Trinkwasser-Installationen", 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/energie-sparen-warmwasser-dvgw-langfassung.pdf
- [FWS 2022] Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz: Empfehlung LegionellenPrävention". Stand 28.04.2022. URL: https://www.fws.ch/wp-content/uploads/2022/09/220428-FWS-Normen-Technik-Legionellen.pdf, abgerufen am 14.02.2023
- [Geberit 2020] Kompetenzbroschüre Trinkwasserhygiene. Planung, Ausführung und Betrieb von Trinkwasserinstallationen. Geberit, Pfullendorf, 2020. Url: https://oxomi.com/p/2024769/catalog/kb-trinkwasserhygiene, abgerufen am 24.04.2023
- [GEG 2023] Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes und zur Änderung der Heizkostenverordnung sowie zur Änderung der Kehr- und Überprüfungsordnung vom 03.04.2023. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023. Url: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/20230331-referentenentwurf-2-geg-no-velle.pdf? blob=publicationFile&v=4, abgerufen am 12.04.2023
- [Gertec 2003] GERTEC: Elektro-Wärmepumpen und andere Heizungssysteme für NiedrigEnergie-Wohngebäude Endbericht zur Phase III; GERTEC GmbH Ingenieurgesellschaft, Essen 2003
- [Günther et al. 2020] Günther, D.; Wapler, J.; Langner. R.; Helming, S.; Miara, M.; Firscher, D.; Zimmermann, D. Wolf, T.: Wärmepumpen in Bestandsgebäuden Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPSmart im Bestand", Version 2.1 vom 23.07.2020, Fraunhofer ISE, Freiburg, 2020



[HEG 2022] Gesetz zur Änderung des Hessischen Energiegesetzes und der Hessischen Bauordnung, vom

22.11.2022. Url: https://www.rv.hessenrecht.hessen.de/bshe/document/VB-HE-AD-GVBI2022-

36-571, abgerufen am 20.04.2022

[HMWEVW 2022] Energiewende in Hessen – Monitoringbericht 2022. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Ener-

gie, Verkehr und Wohnen (HMWEVW, Wiesbaden, 2022

[Holm et al. 2023] Holm, Andreas; Mellwig, Peter; Pehnt, Martin: Wärmeschutz und Wärmepump – warum beides

zusammengehört. Studie im Auftrag des Verbandes für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V.,

München, Berlin, Heidelberg, 2023

[IB Junge] Internetseite des Ingenieurbüro Jung zu Heizungsübergabe. URL: https://www.ing-büro-

junge.de/html/fussbodenheizung.html#Leistungsminderung, abgerufen:08.02.2023

[Jagnow 2004] Jagnow, K.: Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssiche-

rungsmaßnahmen in der Heizungstechnik. Dissertation an der Universität Dortmund, 2004. Url: https://www.delta-q.de/wp-content/uploads/2021/12/dissertation kati jagnow.pdf, abgerufen

am 17.10.2022

[Langfristszenarien 2021] Autorenkollektiv: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutsch-

land 3. Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin, 2021. Url: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS Kurzbericht fi-

nal v5.pdf, abgerufen am 29.04.2023

[Loga et al. 2015] Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R.: Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte

Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), 2015. Url: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebe-stand/episcope/2015 IWU LogaEtAl Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf, abgerufen

am 16.06.2022

[Loga et al. 2020] Loga, T.; Swiderek, S.; Grafe, M.: Modellprojekt Energieverbrauchsbenchmarks. Soll-/Ist-Vergleich

des Energieverbrauchs zur Evaluierung und Steigerung der Effizienz von Energiesparmaßnahmen im Praxisalltag eines Wohnungsunternehmens. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2020. Url: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/pri/2019 IWU LogaSwiderekGrafe ModellprojektEnergieverbrauchsbenchmarks NHW.pdf, abgerufen am 27.04.2023

[Mellwig et al. 2021] Mellwig, P.; Pehnt, M.; Lempik, J.: Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien im Ge-

bäudebereich. Ifeu, Heidelberg 2021. URL: https://www.ifeu.de/projekt/energieeffizienz-als-tuer-oeffner-fuer-energien-im-gebaeudebereich/, abgerufen am 02.03.2023

[OLG Rostock 2016] Oberlandesgericht Rostock: Rücktritt vom Werkvertrag: Mangelhaftigkeit der Leistung bei Einbau

einer Wärmepumpenheizung in einen ungedämmtes Altbau; OLG Rostock vom 01.11.2016 - 4 U 37/15. URL: https://www.landesrecht-mv.de/bsmv/document/KORE503852018, abgerufen am

13.02.2023

[Optimus 2005] Jagnow, K.; Wolff, D.: OPTIMUS - Handbuch zur Bestimmung von Außenbauteilen. Url:

https://www.delta-q.de/wp-content/uploads/Bauteilhandbuch.pdf, abgerufen am 25.04.2023

[Recknagel 2009] Recknagel, Sprenger, Schramek [Hrsg.]: Taschenbuch für Heizung+Klimatechnik. 74. Auflage,

Oldenbourg Industrieverlag, München, 2009

[SBZ 2020] "Wandheizung an Außenwänden Teil 3 - SBZ", 2. Dezember 2020. Url: https://www.sbz-on-

<u>line.de/heizung/wandheizung-aussenwaenden-0</u>, zugegriffen 11. April 2022

[Scheithauer 2021] Scheithauer, B.: Hydraulischer Abgleich. Der Leitfaden für die Praxis. Denn weniger ist mehr –

sachlich, logisch und verständlich. Url: https://www.hydraulischer-abgleich.de/fileadmin/u-ser-upload/file/Leitfaden hydraulischer Abgleich 202104.pdf, abgerufen am 19.01.2023

[Schenk 2020a] Schenk, W.: Trinkwasser: Effizienz und hygienische Trinkwarmwasserbereitung auch mit Wärme-

pumpenanlagen, Teil 1. Aktionskreis Energie, 26.11.2020. URL https://www.y-

outube.com/watch?v=cRIIBMfAl4U, abgerufen am 13.02.2023

[Schenk 2020b] Schenk, W.: Trinkwasser: Effizienz und hygienische Trinkwarmwasserbereitung auch mit Wärme-

pumpenanlagen, Teil 2. Aktionskreis Energie, 26.11.2020. URL https://www.y-

outube.com/watch?v=kCq-6McMkgw, abgerufen am 13.02.2023

[Zürich 2012]



[Schlader 2014] Schlader, W.: Empfehlungen und Tipps für eine effiziente Wärmepumpenanlage. Energieinstitut Vorarlberg, 2014. Url: https://www.energieinstitut.at/tools/machvier/doc/EmpfehlungenGespaechInstallateur.pdf, abgerufen am 15.04.2023 [Schlapmann 2002] Schlapmann, D.: Verkelidung, Anschlussart und Einbausituation bei Flachheizkörpern - Auswirkungen auf die Wärmeleistung. In: SBZ 24/2002 [Schlobach 2017] Schlobach, M.: Automatischer hydraulischer Abgleich - Alles Quatsch?!. Url: https://www.haustechnikverstehen.de/automatischer-hydraulischer-abgleich-alles-quatsch/, abgerufen am 20.04.2023 [Seifert 2019] Seifert, H.-J.: Effizienter Betrieb von Wärmepumpenanlagen. VDE Verlag, Berlin/Offenbach, 2019 [Seifert 2023] Seifert, H.-J.: Wärmepumpen für Heizung und Warmwasser. Stiftung Warentest, Berlin, 2023 [Solink 2020] Leibfried, U.; Asenbeck, S.; Rioff, U.: Hocheffiziente, auf intelligenter Verknüpfung von PVT- und Wärmepumpentechnik basierende Wärmeversorgung für Gebäudebestand und Neubau. Schlussbericht zum DBU-Förderprojekt SOLINK, Lörrach, Riederich, Stuttgart, 2020. [Stiebel-Eltron 2021] Stiebel-Eltron: Erfolgreich sanieren mit der Wärmepumpe. Online-Seminar, 22.10.2021 [Tagesschau 2022] Tagesschau: Wärmepumpe auch ohne Sanierung möglich. Stand 21.11.2022 19:21 Uhr. Url: https://www.tagesschau.de/wirtschaft/waermepumpe-109.html, abgerufen am 11.04.0223 [VdZ 2022] Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand. Fachregel. VdZ – Wirtschaftsvereinigung Gebäude und Energie e.V., Berlin, 2022. Url: https://files.vdzev.de/pdfs/fachregel/Fachregel Hydraulischer Abgleich.pdf, abgerufen am 28.03.2023 [VdZ 2023] Umstieg auf die Wärmepumpe - Leitfaden für den Fachhandwerker. VdZ - Wirtschaftsvereinigung Gebäude und Energie e.V., Berlin, 2023. Url: https://files.vdzev.de/pdfs/umsteigen-auf-diewaermepumpe/VdZ Waermepumpen WEB Einzelseiten.pdf, abgerufen am 20.04.2023 Viessmann Deutschland GmbH: Planungshandbuch Wärmepumpen, 2011. [Online]. Verfügbar [Viessmann 2011] unter: https://www.viessmann.de/content/dam/vi-brands/DE/PDF/Planungshandbuch/phwaermepumpen.pdf/ jcr content/renditions/original.media file.download attachment.file/phwaermepumpen.pdf, abgerufen am 29.04.2023 [Vollmer et al. 2019] Vollmer, R.; Wapler, J.; Hess, S.: Quellen-Verfügbarkeit für Wärmepumpen-Systeme in Mehrfamilienhäusern im Bestand. Projekt LowEx-Bestand Analayse- Bericht zu AP 2.1. ISE, INATECH, Freiburg, 2019. Url: http://www.lowex-bestand.de/wp-content/uploads/2022/02/Abschlussberichtzu-AP-2.1 rv sh.pdf, abgerufen am 29.04.2023 [Wagnitz 2022] Wagnitz, M.: So schneidet die Wärmepumpe im Realitäts-Check ab. haustec.de, 10. Dezember 2022. https://www.haustec.de/heizung/waermepumpen/waermepumpe-im-realitaets-check-jaztheorie-und-praxis, abgerufen am 24. März 2023 [Weishaupt 2015] Weishaupt: Planungs- und Installationshandbuch. Weishaupt, XX, 2015. Url: https://aktionskreisenergie.de/wp-content/uploads/2015-09-Planungshandbuch-W%C3%A4rmepumpen.pdf, abgerufen am 28.04.2023 [Weniger et al. 2013] Weniger, J.; Quaschning, V.; Tjaden, T.: Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen. 2013. Url: https://www.volker-quaschning.de/artikel/2013-06-Dimensionierung-PV-Speicher/index.php, abgerufen am 29.04.203 [Wolff, Jagnow 2007] Wolff, D.; Jagnow, K.: Heizflächenauslegung bei Heizkörperheizungen. Wolfenbüttel/Wernigerode. 2007. Url: http://www.bosy-online.de/hydraulischer abgleich/heizflaechenauslegung recknagel.pdf [Zogg 2022] Zogg, D.: Anleitung zu den Polysun-Vorlagen «Wärmepumpen mit Photovoltaik-Optimierung». Smart Energy Engineering GmbH, 2022. Abgerufen am 26.04.2023. Url: https://smart-energyengineering.ch/wp-content/uploads/2022/09/20220830 PolySun Anleitung PV-WP Regler.pdf, abgerufen am 25.04.2023

Niedertemperatur Wärmeverteilsysteme – Systemevaluation für Instandsetzungen und Neubau-

ten. Schlussbericht. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Zürich, März 2012



[Zürich 2014]

Wärmepumpen für die Instandsetzung – Systemevaluation für die Instandsetzung. Schlussbericht. Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Zürich, August 2014



Anhang A Häufigkeit unterschiedlicher Außentemperaturen in Hessen

Tabelle 11: Anzahl der Tage mit mittleren Außentemperaturen unter -5 °C für DWD-Wetterstationen in Hessen

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Alsfeld	4	5	12	10	3	8	13	4	2	17	27	7	15	11	0	0	6	11	6	5	0
Burgwald	3	5	10	12	2	5	13	3	2	19	28	8	15	12	0	0	6	11	8	5	0
Cölbe, Kr. Marb								3	2	17	19	3	15	1	0	0	3	10	4	3	0
Darmstadt	2	4	9	6	0	5	9	3	1	12	10	1	13	0	1	0	2	5	3	3	0
Dillenburg	4	7	9	9	2	6	8	3	2	16	20	6	15	8	1	0	3	11	5	4	0
Eschwege	4	4	8	7	2	3	10	1	1	14	25	4	14	8	1	0	6	7	5	3	0
Frankfurt-Main	2	2	7	4	0	2	3	2	0	10	7	1	12	0	0	0	1	3	2	1	0
Frankfurt-Westend	1	2	5	3	0	0	1	0	0	10	7	0	12	0	0	0	1	2	2	0	0
Fritzlar		5	10	6	1	4	9	2	2	16	25	3			0	0	6	7	5	3	0
Fulda	5	7	11	14	6	8	12	3	2	17	27								5	5	0
Geisenheim	2	0	5	3	0	2	3	2	0	9	7	0	11	0	0	0	1	2	2	0	0
Gießen-Wettenberg	3	5	9	5	1	3	7	1	1	15	18	4	14	1	0	0	3	5	4	2	0
Gilserberg	4	8	12	11	3	10	14	5	2	20	34	7	16	18			7	12	8	5	0
Gründau	4	4	9						0	10	19	3	14	2	1	0	3	3	4	1	0
Bad Hersfeld	6	6	14	15	4	5	13	3	2	16	26	6	15	11	0	0	6	9	6	4	0
Löhnberg	4	4	10	5	3	5	9	2	1	18	21	3	15	2	1	0	3	10	4	3	0
Michelstadt	3	4	7	6	0	5	9	3	0	11	10	2	13	0	1	0	3	8	3	2	0
Michelstadt	4	5	13	15	4	15	13	5	1	14	31	9	15	10	1	0	3	11	7	4	0
Bad Nauheim	3					1	4	1	0	12	11	1	13	0	0	0	1	3	3	1	0
Neukirchen	4	8	15	19	5	14	15	5	4	14	44	9	17	27	1	1	6	10	11	6	0
Neu-Ulrichstein													15	13	1	0	4	7	7	4	0
Oberzent-Beerfelden	4	5	13	11	2	11	7	4	0	12	28	6	15	8	2	0	4	10	6	4	0
Offenbach							5	1	0	11	10	1	12	0	0	0	1	4	3	2	0
Runkel-Ennerich						3	6	3	0	12	16	1	13	2	0	0	2	7	3	2	0
Schaafheim	3	4	6	6	0	5	10	1	1	13	9	1	13	1	0	0	2	6	3	2	0
Schauenburg															0	0	4	6	7	4	0
Schlüchtern	3	7	9	6	2	6	10	3	2	16	25	7	14	4	0	0	7	10	3	3	0
Schotten	3	6	12	6			10	2	1	12	17	6	15	4	1	0	4	8	5	3	0
Sontra	5	5	12	9	5	8	15	3	1	18	31	7	16	14	1	0	7	10	6	5	0
Tann				18	4	12	18	5	2	16	36	9	14	17	1	1	7	12	11	6	0
Twistetal	3	8	9	15	3	5	12	2	2	15	28	6	15	15	0	0	3	9	7	5	0
Waldems						6	4	2	0	9	24	3	14	7	1	0	2	6	7	3	0
Wesertal	3	3	9	7	2	3	11	2	2	14	28	2	14	6	0	0	6	5	6	4	0
Wiesbaden	3	3	8	6	0	4	6	2	0	11	16	3	14	2	0	0	2	3	3	1	0

Tabelle 12: Anzahl der Tage mit mittleren Außentemperaturen unter 0 °C für DWD-Wetterstationen in Hessen

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Alsfeld	25	47	34	53	57	51	61	19	33	47	79	29	38	56	14	23	30	35	34	19	12
Burgwald	20	36	28	50	53	41	59	19	35	50	78	30	37	60	11	25	32	34	36	18	11
Cölbe, Kr. Marb								17	28	42	74	24	34	48	9	13	26	27	30	17	9
Darmstadt	11	27	25	35	33	44	41	18	20	40	63	23	34	40	7	12	19	27	29	15	10
Dillenburg	24	44	30	50	48	49	55	20	37	48	75	25	37	57	9	20	34	34	35	17	12
Eschwege	16	31	26	42	29	41	47	17	20	43	78	27	30	46	14	11	22	28	29	13	7
Frankfurt-Main	9	22	25	30	28	39	38	16	16	32	60	18	27	32	2	8	16	24	22	12	4
Frankfurt-Westend	9	17	21	26	17	28	27	13	9	30	60	13	23	29	2	7	13	21	20	8	3
Fritzlar		37	27	43	38	43	45	16	22	40	76	26			10	17	25	28	30	15	9
Fulda	21	43	31	50	49	51	49	19	33	45	79								34	17	8
Geisenheim	9	16	24	25	21	35	34	16	13	34	58	15	25	30	2	5	13	19	19	11	4
Gießen-Wettenberg	16	31	26	36	38	45	49	19	28	43	73	23	34	50	6	14	24	30	33	16	10
Gilserberg	25	51	35	54	24	59	71	26	44	54	84	37	43	62			35	38	38	20	13
Gründau	10	33	25						24	42	76	29	36	49	9	15	23	31	34	16	9
Bad Hersfeld	24	52	34	51	55	51	62	20	28	46	79	29	38	54	15	21	29	33	37	15	9
Löhnberg	22	39	31	48	44	44	46	19	33	45	72	34	36	52	4	17	26	30	35	17	13
Michelstadt	10	32	24	37	35	49	44	19	22	39	65	25	33	41	6	12	18	28	32	16	8
Michelstadt	25	51	34	52	64	67	63	26	34	51	82	37	41	56	12	33	31	43	41	26	20
Bad Nauheim	11					40	40	18	14	36	67	20	30	38	3	9	18	24	28	13	6
Neukirchen	38	60	38	55	72	67	73	32	49	55	87	43	49	79	19	42	48	47	55	28	22
Neu-Ulrichstein													41	63	13	29	33	40	41	21	16
Oberzent-Beerfelden	23	50	32	47	57	68	60	26	37	50	82	34	41	55	8	34	27	41	43	23	15
Offenbach							41	17	17	34	63	21	30	32	3	11	16	24	24	11	8
Runkel-Ennerich						42	43	19	22	39	67	25	31	39	2	9	20	26	28	13	10
Schaafheim	10	31	24	36	37	43	41	18	16	38	61	21	29	36	2	10	19	23	24	11	6
Schauenburg															13	21	33	35	37	16	12
Schlüchtern	13	33	30	49	18	53	53	20	29	48	75	29	36	49	10	19	28	31	33	19	13
Schotten	20	40	30	44			53	20	36	38	71	30	38	52	10	26	27	31	37	19	13
Sontra	21	43	30	49	48	48	58	18	27	46	81	31	39	58	15	22	34	32	37	18	10
Tann				50	58	53	63	20	33	49	80	33	41	65	17	26	35	38	36	19	14
Twistetal	20	42	32	48	53	49	57	18	27	47	79	28	36	59	10	20	31	28	36	18	8
Waldems						50	56	23	30	38	81	29	38	57	8	23	23	34	33	19	15
Wesertal	15	36	28	43	39	46	50	16	18	40	79	25	30	53	13	13	26	24	32	14	7
Wiesbaden	14	30	30	37	41	46	52	21	25	43	72	27	31	45	3	17	20	33	30	18	10



Anhang B Beschreibung der Modellgebäude

Die Modellgebäude bilden die Grundlage für die Variantenberechnungen in Kapitel 3 und auch zukünftig für die ökonomische Bewertung verschiedener Ausführungsvarianten.

Warmwasserbedarf Modelgebäude

Als Ansatz wurde ein Warmwasserbedarf von 30 l/Person und Tag angenommen. Um die Annahme zu überprüfen wurde auf Daten aus dem Forschungsvorhaben "Modellprojekt Energieverbrauchsbenchmarks" [Loga et al. 2020, S. 44] verwendet. In dem Projekt wurden Verbrauchsdaten von Mehrfamilienhäusern ausgewertet. Dazu lagen auch die Daten zu den Warmwasserzapfmengen vor. Es wurden die Mittelwerte von 14 Hauseingängen von dem von Baualter und Struktur (4 Geschosse, zwei WE pro Etage und Hauseingang) sehr ähnlichen MFH Modellgebäude gebildet und mit dem gewählten Wert von 30 l/Person und Tag und 21 Bewohnern verglichen.

In Tabelle 13 sind die Werte gegenübergestellt. Es können nur die Wohnflächenbezogenen Warmwasserverbräuche verglichen werden, da die Belegungsdaten der Gebäude nicht vorlagen. In den realen Gebäuden variiert der Verbrauch zwischen 255 und 545 l/m²·a über eine hohe Bandbreite, der Mittelwerte der 14 Hauseingänge stimmt jedoch sehr gut mit den Modellannahmen von 381 l/(m²·a) überein. Auch die mittlere Wohnfläche der Gebäude ist mit nur einer minimalen Abweichung fast identisch. Wert von 30 l/(m²·a) als Tagesverbrauch einer Person wurde so auch beim EFH für die Anlagenauslegung angesetzt.

Tabelle 13: Warmwasserbedarf MFH Modellgebäude und Vergleich mit realen Gebäudedaten

		Gemessene WW-Zapfmenge
Straße und Hausnummer	Wohnfläche	pro m² Wohnfläche
	[m²]	Liter/(m²·a)
Zeppelinstraße 26	630	545
Zeppelinstraße 28	630	437
Zeppelinstraße 30	630	532
Zeppelinstraße 22	730	336
Zeppelinstraße 24	730	325
Zeppelinstraße 18	730	476
Zeppelinstraße 20	730	425
Zeppelinstraße 10	509	255
Zeppelinstraße 12	508	293
Zeppelinstraße 14	509	256
Zeppelinstraße 16	508	341
Schlagfeldstraße 41	603	481
Schlagfeldstraße 43	490	271
Schlagfeldstraße 45	490	342
Mittelwerte	602	380
Modellgebäude	603	381



Einfamilienhaus (EFH)

Das Modellgebäude des Einfamilienhauses wurde der Gebäudetypologie [Loga et al. 2015] entnommen. Es handelt sich um das EFH E aus der Baualtersklasse 1958 – 1968. Für das Gebäude lagen ausreichende Planunterlagen vor. In den folgenden Tabellen sind die im Projekt verwendeten Gebäudedaten dargestellt.

Tabelle 14: EFH Modellgebäude Gebäudegrunddaten

Gebäudegrunddaten	Einheit	
Baujahr	[a]	1960
Art des Hauses		Einfamilienhaus
Randbedingungen		freistehend
Bauweise		massiv
Anzahl Wohneinheiten	[-]	1
Anzahl Bewohner	[-]	4
Art der Nutzung		Wohnen
Soll-Raumlufttemperatur	[°C]	20
WW-Verbrauch (@60 °C)	[l/d]	120
Auslegungsaußentemperatur	[°C]	-11
Höhenlage	[m über NN]	287
Bodenbeschaffenheit (für WP Auslegung)		Rheinisches Schiefergebirge, Grauwacke
Wohnfläche beheizt	[m²]	137,5
Gebäudenutzfläche A _N	[m²]	160,9
Äußeres Hüllvolumen Ve	[m³]	553,0
Nettovolumen V	[m³]	502,9
Mittlere Geschosshöhe	[m]	2,75
Nutzung Keller		unbeheizt
Nutzung Dachgeschoss		ausgebaut

Tabelle 15: EFH Modellgebäude Flächen Außenhülle

Flächen Außenhülle	Einheit	
Fläche Dach	[m²]	100,6
Fläche oberste Geschossdecke	[m²]	48,3
Fläche Außenwand Süd	[m²]	30,8
Fläche Außenwand Ost	[m²]	39,5
Fläche Außenwand Nord	[m²]	34,5
Fläche Außenwand West	[m²]	36,3
Fläche Fenster Süd	[m²]	6,3
Fläche Fenster Ost	[m²]	5,7
Fläche Fenster Nord	[m²]	6,2
Fläche Fenster West	[m²]	8,9
Fläche Eingangstür	[m²]	2,1
Fläche Kellerdecke	[m²]	115,8



Tabelle 16: Modellgebäude Anlagentechnik Istzustand

Anlagentechnik Istzustand	Einheit	
Art Wärmeübergabe		Flachheizkörper
Anzahl/Größe der Heizkörper		Tabelle 19: EFH Heizkörper im Bestand
Typ HK Baujahr 90' Jahre		Flach-HK Typ 21
Kesseltyp (mono-/bivalente Systeme)		NT-Ölkessel 90' / Öl-BW-Kessel 2009
Brennstoffversorgung		3 x 1.500 l Öltanks
Leitungslängen Heizung- und Warmwasser-Verteilung		
Heizungsverteilung horizontal (außerhalb thermischer Hülle)	[m]	39
Heizungsverteilung vertikal (in thermischer Hülle Außenwand)	[m]	25
Heizungsverteilung Anbindeleitungen (in thermischer Hülle, AW)	[m]	37
WW-Verteilung horizontal (außerhalb thermischer Hülle)	[m]	14,6
WW-Verteilung vertikale Steigstränge (in thermischer Hülle)	[m]	6,1
WW-Verteilung Stichleitungen (in thermischer Hülle)	[m]	12,1
WW-Bereitung		TW-Speicher, Zirkulation
Systemtemperatur bisher	[°C]	70/55 °C
Dämmung der Heizungs- und Warmwasser-Verteilung	sind identisch	
Dämmung der Verteilleitungen		mäßig gedämmt 10 mm (U-Wert 0,4 W/m²·K)
Dämmung der Steigleitungen		Schutzschlauch 5 mm (U-Wert 0,6 W/m²·K)
Dämmung der Anbindeleitungen		Schutzschlauch 5 mm (U-Wert 0,6 W/m²·K)
Lüftung		Fensterlüftung



Tabelle 17: EFH Modellgebäude U-Werte der Sanierungsvarianten

Sanierungsvarianten		Original	Teil	Komplett
U-Wert Dach	$[W/(m^2 \cdot K)]$	0,8	0,39	0,39
U-Wert Dach oberste Geschossdecke	$[W/(m^2 \cdot K)]$	0,8	0,4	0,4
U-Wert Außenwand	$[W/(m^2 \cdot K)]$	1,2	1,2	0,24
U-Wert Innenwand und Innentüren/ Wohnungseingangstüren	[W/(m²·K)]	1,4	1,4	1,4
U-Wert Fenster	$[W/(m^2 \cdot K)]$	2,8	1,3	1,3
U-Wert Kellerdecke	$[W/(m^2 \cdot K)]$	1,6	1,6	0,34
U-Wert Zwischengeschossdecke (in der therm. Hülle)	[W/(m²·K)]	1,4	1,4	1,4
U-Wert Haus-Eingangstüren	$[W/(m^2 \cdot K)]$	3	1,3	1,3
Wärmebrückenzuschlag	$[W/(m^2 \cdot K)]$	0,01	0,05	0,1
Daten Modernisierungen			Fenster 2010, Dach 2006	Fenster 2010, Dach 2006, Kellerdecke 1999, Außenwand 2010

Tabelle 18: EFH Modellgebäude Flächen für Heizlastberechnung

	Fußboden-		Außenwand-		Deckenflä-	
	fläche gegen	Fenster-	flächen ohne	Innenwand-	che gegen	
Raum	UG	fläche	Fenster *	fläche	OG	Dachflächen
EG	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]
Wohnzimmer	25,2	7,4	22,8	22,8	25,2	6,7
Esszimmer	22,4	4,1	20,3	24,4	22,4	
Büro	13,9	2,5	18,0	19,4	13,9	
Flur	6,4		0,0		6,4	
Küche	15,0	2,5	17,5	19,9	15,0	
WC mit Vorraum						
u. Kammer	15,5	1,2	3,8	20,0	15,5	
Treppenhaus	5,0	2,1	3,9		0,0	
Summe Flächen						
EG	103,4	19,9	86,4	106,5	98,4	6,7
			Außen-			
			wandfläche		Dachflä-	
	Fußboden	Fensterflä-	ohne Fens-	Innenwand-	chen** (ohne	
Raum	gegen EG	che	ter *	fläche	Fenster)	
OG	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	
Eltern	26,4	3,1	10,0	14,7	38,2	_
Sohn	17,9	2,5	10,4	11,0	19,6	
Gast	11,4	2,0		11,0	21,3	
Bad	4,3	1,0		9,8	8,9	
Flur mit Trep-						
penhaus	8,4	1,0		29,4	18,6	
Summe Flächen						
OG	68,5	9,7	20,4	76,0	106,5	



^{*} Außenwandflächen Innenmaße

Tabelle 19: EFH Heizkörper im Bestand

Heizkörperausstattung									
Heizkörpertyp	Flachheizkörper Typ 21		Heizleistung He	eizkörper					
Raum	Länge	Höhe	70/55/20	55/45/20	Bemerkung				
	[mm]	[mm]	[W]	[W]					
EG									
Wohnzimmer	2200	600	2394	1501					
Wohnzimmer	1400	600	1523	819					
Esszimmer	1100	600	1306	750					
Esszimmer	1800	600	1959	1228					
Büro	1800	600	1959	1228					
Flur					kein HK				
Küche	1800	600	1959	1228					
WC mit Vorraum	400	900	578	361	im WC hinter Tür				
Treppenhaus	600	900	867	541	An der Innenwand zum				
					Büro mit Ablage drüber				
OG									
Eltern	1100	600	1306	750					
Eltern	1000	600	1088	682	weiterer HK an der Au-				
					ßenwand am Balkon				
Sohn	1800	600	1959	1228					
Gast	1800	600	1959	1228					
Bad	600	900	867	541	Hinter Tür Innenwand				
Flur mit Treppen-					kein HK				
haus									
Summe Leistung	[W]		19.724	12.085					

^{**}Gaubenwände, Abseiten, oberster Geschossdecke, Dachschrägen werden als Dach angesetzt



Mehrfamilienhaus (MFH)

Das Modellgebäude des Mehrfamilienhauses wurde aus der Gebäudetypologie [Loga et al. 2015] das MFH E aus der Baualtersklasse 1958 – 1968 entnommen. In der Typologie besteht das MFH aus mehreren Hauseingängen bzw. Blöcken. Für das Modellgebäude wird nur ein Hauseingang des Gebäudes verwendet, für den vollständige Plandaten vorlagen. Das Modelgebäude umfasst 4 Geschosse mit jeweils zwei Wohneinheiten. In den folgenden Tabellen sind die im Projekt verwendeten Gebäudedaten dargestellt.

Tabelle 20: MFH Modellgebäude Gebäudegrunddaten

Gebäudegrunddaten	Einheit	
Baujahr	[a]	1960
Art des Hauses		MFH (4 Etagen)
Randbedingungen		einseitig angebaut (Ost)
Bauweise		massiv
Anzahl Wohneinheiten	[-]	8
Anzahl Bewohner	[-]	21
Art der Nutzung		Wohnen
Soll-Raumlufttemperatur	[°C]	21
WW-Verbrauch (@60 °C)	[l/d]	630
Auslegungsaußentemperatur	[°C]	-11
Höhenlage	[m über NN]	287
Bodenbeschaffenheit (für WP Auslegung)		Rheinisches Schieferge- birge, Grauwacke
Wohnfläche beheizt	[m²]	603
Gebäudenutzfläche A _N	[m²]	722,3
Nettogrundfläche A _{NGF}	[m²]	666
Äußeres Hüllvolumen Ve	[m³]	2.257,2
Nettovolumen	[m³]	1.805,8
Mittlere Geschosshöhe	[m]	2,75
Nutzung Keller		unbeheizt
Nutzung Dachgeschoss		unbeheizt



Tabelle 21: MFH Modellgebäude Flächen Außenhülle

Flächen Außenhülle	Einheit	
Fläche Dach	[m²]	-
Fläche oberste Geschossdecke	[m²]	194,7
Fläche Außenwand Süd	[m²]	143,0
Fläche Außenwand Ost	[m²]	38,3
Fläche Gebäudetrennwand Ost	[m²]	90,2
Fläche Außenwand Nord	[m²]	157,9
Fläche Außenwand West	[m²]	117,8
Fläche Fenster Süd	[m²]	61,0
Fläche Fenster Ost	[m²]	4,6
Fläche Fenster Nord	[m²]	48,4
Fläche Fenster West	[m²]	16,4
Fläche Eingangstür	[m²]	2,3
Fläche Tür Hintereingang Nord	[m²]	1,7
Fläche Kellerdecke	[m²]	194,7



Tabelle 22: MFH Modellgebäude Anlagentechnik Istzustand

Anlagentechnik Istzustand	Einheit	
Art Wärmeübergabe		Flachheizkörper
Anzahl/Größe der Heizkörper		Tabelle Heizkörper
Typ HK Baujahr 90' Jahre		Flach-HK Typ 21
Kesseltyp (mono- /bivalente System)		NT-Ölkessel 90' / Öl-BW- Kessel 2009
Brennstoffversorgung:		10.000 l Öltank
Leitungslängen Hzg und WW-Verteilung		
Heizungsverteilung horizontal (außerhalb thermischer Hülle)	[m]	122
Heizungsverteilung vertikal (in thermischer Hülle Außenwand)	[m]	180
Heizungsverteilung Anbindeleitungen (in thermischer Hülle, AW)	[m]	55,2
WW-Verteilung horizontal (außerhalb thermischer Hülle)	[m]	37
WW-Verteilung vertikale Steigstränge (in thermischer Hülle)	[m]	54
WW-Verteilung Stichleitungen (in thermischer Hülle)	[m]	46
WW-Bereitung		TW-Speicher, Zirkulation
Systemtemperatur bisher	[°C]	70/55 °C
Dämmung der Heizungs- und WW-Verteilung sind identisch		
Dämmung der Verteilleitungen		mäßig gedämmt 10 mm (U-Wert 0,4 W/m²·K)
Dämmung der Steigleitungen		Schutzschlauch 5 mm (U-Wert 0,6 W/m²·K)
Dämmung der Anbindeleitungen		Schutzschlauch 5 mm (U-Wert 0,6 W/m²·K)
Lüftung		Fensterlüftung



Tabelle 23: MFH Modellgebäude U-Werte der Sanierungsvarianten

Sanierungsvarianten		Original	Teil	Komplett
U-Wert Dach	$[W/(m^2 \cdot K)]$			
U-Wert Dach oberste Geschoss- decke	[W/(m²·K)]	0,6	0,4	0,4
U-Wert Außenwand	$[W/(m^2 \cdot K)]$	1,2	1,2	0,24
U-Wert Innenwand und Innentüren/ Wohnungseingangstüren	[W/(m²·K)]	1,4	1,4	1,4
U-Wert Fenster	$[W/(m^2 \cdot K)]$	3	1,3	1,3
U-Wert Kellerdecke	$[W/(m^2 \cdot K)]$	1,6	1,6	0,34
U-Wert Zwischengeschossdecke (in der therm. Hülle)	[W/(m²·K)]	1,4	1,4	1,4
U-Wert Haus-Eingangstüren	$[W/(m^2 \cdot K)]$	3	1,3	1,3
Wärmebrückenzuschlag	$[W/(m^2 \cdot K)]$	0,01	0,05	0,1
Datum Modernisierungen			Fenster 2010, Dach 2006	Fenster 2010, Dach 2006, Kellerdecke 1999, Außenwand 2010

Die Wohnungen im EG und 1-3 OG unterscheiden sich teilweise leicht, daher sind die Räume unterschieden farblich markiert: EG in rosa und 1-3 OG in orange. Die anderen Räume sind auf allen Etagen identisch. Raumflächentabellen zur detaillierten Heizlastberechnung und für den hydraulischen Abgleich.

Tabelle 24: MFH Modellgebäude Flächen Wohnungen I (West) für Heizlastberechnung

Raum	Wohn- fläche	Fenster- flächen	Außenwand (o. Fenster)	Innen- wand	Innenwand zum Trep- penhaus*	Decken- fläche	Fußboden- fläche
	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]
Wohnung I (West)							
1-3 OG Wohnzimmer	22,41	6,0	18,4	24,4		22,4	22,4
EG Wohnzimmer	22,41	7,9	19,0	21,9		22,4	22,4
SZ	15,09	6,4	17,9	19,9		15,1	15,1
Küche	7,26	1,6	5,7	21,7		7,3	7,3
Bad	4,02	1,6	1,8	19,1		4,0	4,0
WC	1,51	0,2	2,0	8,2	4,4	1,5	1,5
1-3 OG Zimmer klein	10,18	2,4	5,4	24,7		10,2	10,2
1-3 OG Zimmer groß	12,62	2,4	4,8	25,6	4,1	12,6	12,6
EG Zimmer	16,74	3,1	7,8	22,2	11,3	16,7	16,7
1-3 OG Flur inkl. Kammer ohne Hzg.	10,56	0,0	0,0	37,3	6,6	10,6	10,6
EG OG Flur inkl. Kam- mer ohne Hzg.	9,5	0,0	0,0	37,3	6,6	9,5	9,5
Fläche Wohnung I EG	76,53						
Fläche Wohnung I 1-3 OG	83,65						



Tabelle 25: MFH Modellgebäude Flächen Wohnungen II (Ost) für Heizlastberechnung

Raum	Wohn- fläche	Fenster- flächen	Außenwand (o. Fenster)	Innen- wand	Innenwand zum Trep- penhaus*	Decken- fläche	Fußboden- fläche
	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]
Wohnung II (Ost)							
1- 3 OG WZ	19,49	5,9	9,1	30,0		19,5	19,5
EG WZ	19,49	4,4	10,6	20,0	10,0	19,5	19,5
SZ	16,45	2,4	18,2	20,7		16,5	16,5
Küche	7,26	1,6	4,4	13,8	7,8	7,3	7,3
Bad	4,78	1,6	2,5	19,8		4,8	4,8
Zimmer	12,67	2,2	16,8	25,4		12,7	12,7
Flur inkl. Kammer	8,27	0,0	0,0	36,2	5,3	8,3	8,3
Fläche Wohnung II	68,92						
Summe Wohnfläche Gesamt	603,16						

^{*}Treppenhaus in der thermischen Hülle aber ohne Heizkörper

91



Tabelle 26: MFH Heizkörper im Bestand

Heizkörperausstattung								
	leizkörpertyp Flachheizkörper Typ 21							
Raum	Länge	Höhe	Heizleistung Heiz- körper in [W]		Bemerkung			
	[mm]	[mm]	70/55/20	55/45/20				
Wohnung I (West)								
1-3 OG Wohnzimmer	2200	300	1381	874				
EG Wohnzimmer	2200	300	1381	874				
EG - 3 OG SZ	1400	600	1523	955				
EG - 3 OG Küche	1000	600	1088	682				
EG - 3 OG Bad	400	900	578	361	An der Wand zum Flur			
EG - 3 OG WC					Ohne Heizkörper			
1-3 OG Zimmer klein	1400	600	1523	955				
1-3 OG Zimmer groß	1400	600	1523	955				
EG Zimmer	1000	600	1088	682	Unter jedem Fenster ein HK in 1,0 m			
EG Zimmer	1000	600	1088	682	Unter jedem Fenster ein HK in 1,0 m			
1-3 OG Flur inkl. Kammer	1000	600	1088	682	HK an der Wand zur Kammer			
EG OG Flur inkl. Kammer	1000	600	1088	682	HK an der Wand zur Kammer			
Heizkörperleistung Wohnung I EG	Summe [W]	Leistung	7.834	4.918				
Heizkörperleistung Wohnung I 1-3 OG	Summe [W]	Leistung	8.704	5.464				
Wohnung II (Ost)								
WZ	2200	300	1381	874				
SZ	1400	600	1523	955				
Küche	1000	600	1088	682				
Bad	400	900	578	361	An der Wand zum Steigschacht o. Flur			
Zimmer	1400	600	1523	955				
Flur inkl. Kammer	1000	600	1088	682	HK an der Wand zum Steigschacht/Küche/Bad			
Heizkörperleistung Wohnung II	Summe Leistung [W]		7.181	4.509				
Summe Heizkörperleistung Gebäude	Summe [kW]	Summe Leistung		39,3				



Anhang C Kenngrößen für die Simulationen

Folgende Ausgangsdaten wurden auf Basis der Simulationsergebnisse berechnet, um die Systemeffizienz und CO₂-Emissionen zu bewerten.

JAZ der Wärmepumpe ohne Heizstab:

$$JAZ_{WP}[-] = \frac{Nutzenergie WP [kWh]}{Stromverbrauch WP [kWh]}$$

JAZ der Wärmepumpe mit Heizstab:

$$JAZ_{WP+HS}[-] = \frac{Nutzenergie \ WP \ und \ HS \ [kWh]}{Stromverbrauch \ WP \ [kWh] + Stromverbrauch \ HS \ [kWh]}$$

JAZ des Systems:

$$JAZ_{System}[-] = \frac{Nutzenergie \ WP \ [kWh] + Nutzenergie \ HS \ [kWh] + Nutzenergie \ Kessel \ [kWh]}{Stromverbrauch \ WP \ [kWh] + Stromverbrauch \ HS \ [kWh] + Brennstoffverbrauch \ Kessel \ [kWh]}$$

Deckungsanteil der Wärmepumpe:

$$d \ [-] = \frac{\textit{Nutzenergie WP [kWh]}}{\textit{Nutzenergie Kessel [kWh]} + \textit{Nutzenergie HS [kWh]} + \textit{Nutzenergie WP [kWh]}}$$

JAZ_{WP+HS} entspricht die Definition des "AZ3" nach [Günther et al. 2020].

Tabelle 27: Kenngrößen zur Bewertung der Varianten mit Photovoltaik-Anlage

Eigenverbrauch	$ extit{PV Eigenverbrauchsverh\"{a}ltnis} \ [\%] = rac{ extit{PV Eigenverbrauch} \ [kWh]}{ extit{PV Ertrag} \ [kWh]}$
Einspeiseanteil	PV Einspeiseanteil [%] = $\frac{PV \ Netzeinspeisung \ [kWh]}{PV \ Ertrag \ [kWh]}$
Autarkiegrad	$Autarkiegrad [\%] = \frac{PV \ Eigenverbrauch \ gesamt \ [kWh]}{Stromverbrauch \ gesamt \ [kWh]}$
Autarkiegrad der Wärmepumpe	$Autarkiegrad\ WP\ [\%] = \frac{PV\ Eigenverbrauch\ f\"{u}r\ WP\ und\ HS\ [kWh]}{Stromverbrauch\ f\"{u}r\ WP\ und\ HS\ gesamt\ [kWh]}$

Tabelle 28: Emissionsfaktoren, die für die Berechnung der Treibhausgasemissionen verwendet wurden

	Emissionsfaktoren [gCO₂eq/kWh]	Quelle
Strommix 2021	420	https://www.umweltbundes- amt.de/themen/co2-emissionen-pro-ki- lowattstunde-strom-steigen
Heizöl	310	https://www.iwu.de/filead-
PV Strom	60	min/tools/kea/kea.pdf



Anhang D Steckbriefe Hydraulik

Variante	M1
Gebäudetyp	EFH
Schema	
Eigenschaften	In M1 kann die Wärmepumpe entweder in den Pufferspeicher (300 l) oder in den TWW-Speicher (200 l) einspeisen. Der Heizkreis-Mischer passt die Vorlauftemperatur an die Heizkurventemperatur an.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von ±5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist so dimensioniert, dass sie im Vollsanierungszustand monovalent betrieben wird. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird der interne Heizstab der Wärmepumpe genutzt (9 kW), um diese bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Dank der beiden Speicher kann die Wärmepumpe je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Temperaturniveaus arbeiten. Der Pufferspeicher wird im Sommer nicht betrieben, was die Effizienz erhöht.
Nachteile	Aufgrund der beiden Speicher gibt es einen höheren Platzbedarf im Keller.



Variante	M2				
Gebäudetyp	EFH				
Schema					
Eigenschaften	In M2 speist die Wärmepumpe über eine Umschaltladung in den 600 l Kombi-Speicher ein. Der Heizkreis-Mischer passt die Vorlauftemperatur an die Heizkurventemperatur an. TWW wird über einen Spiral-Wärmetauscher bereitgestellt. Dank der Umschaltladung kann die Wärmepumpe entweder in den oberen Teil des Kombispeichers (für TWW-Bereitstellung) oder den unteren Teil (für den Heizungsbetrieb) einspeisen.				
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von ±5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist so dimensioniert, dass sie im Vollsanierungszustand monovalent betrieben wird. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird der interne Heizstab der Wärmepumpe genutzt (9 kW), um diese bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen. 				
Vorteile	Platzsparend durch den Kombispeicher.				
Nachteile	Das große Volumen des Kombispeichers wird das ganze Jahr aufgrund der TWW-Bereitstellung erwärmt, was zu Wärmeverlusten führen kann. Außerdem besteht die Gefahr, dass die Speicherschichtung nicht ideal aufrechterhalten werden kann, was durch das verwendete Simulationsprogramm nicht untersucht werden kann.				

95



Variante	B1
Gebäudetyp	EFH
Schema	
Eigenschaften	Im System B1 wird der Kessel in Reihe hinter der Wärmepumpe geschaltet. Die Wärmepumpe kann entweder in den Pufferspeicher oder den TWW-Speicher einspeisen. Der Heizkreis-Mischer sorgt für eine Anpassung der Vorlauftemperatur an die Heizkurventemperatur. Das System umfasst einen 300 Liter Pufferspeicher sowie einen 200 Liter TWW-Speicher.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von +5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist für den Vollsanierungszustand ausgelegt. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird der Kessel parallel betrieben, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Erhöhung der Effizienz der Wärmepumpe durch Kesselunterstützung während der kältesten Jahreszeiten. Dank der beiden Speicher kann die Wärmepumpe mit differenzierten Temperaturniveaus arbeiten. Der Pufferspeicher wird im Sommer nicht betrieben, was die Effizienz erhöht.
Nachteile	Die Unterbringung von zwei Speichern und zwei Wärmeerzeugern benötigt einen höheren Platzbedarf im Keller. Außerdem ist das System relativ komplex und dadurch anfälliger für Betriebsfehler. Der in Reihe geschalteter Kessel kann ohne Bypass-Schaltung zu Standby-Verlusten führen. Der fossil-gefeuerte Kessel könnte zu hohen THG-Emissionen führen.



Variante	B2
Gebäudetyp	EFH
Schema	
Eigenschaften	In das System B2 speisen Wärmepumpe und Kessel in einen 600-Liter-Kombispeicher ein. Der Heizkreis-Mischer passt die Vorlauftemperatur entsprechend der Heizkurventemperatur an.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von +5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist für den Vollsanierungszustand ausgelegt. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird der Kessel parallel betrieben, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Platzsparend im Vergleich zu anderen bivalenten Varianten, da nur ein Speicher benötigt wird. Erhöhung der Effizienz der Wärmepumpe durch Kesselunterstützung während der kältesten Jahreszeiten.
Nachteile	Das große Volumen des Kombispeichers wird das ganze Jahr aufgrund der TWW-Bereitstellung erwärmt, was zu zusätzlich höheren Wärmeverlusten führen kann. Der fossil-gefeuerte Kessel könnte zu hohen THG-Emissionen führen.



Variante	B3
Gebäudetyp	EFH
Schema	
Eigenschaften	In B3 sind Wärmepumpe und Kessel parallelgeschaltet. Die WP kann entweder im TWW-Speicher oder im Pufferspeicher einspeisen. Zur hydraulischen Trennung des Kessels wird eine 20-Liter-hydraulische Weiche verwendet (das I-förmige Element, das auf dem Schema mit dem Kessel verbunden ist). Der Heizkreis-Mischer passt die Vorlauftemperatur an die Heizkurventemperatur an. Der Pufferspeicher fasst 300 Liter, der TWW-Speicher 200 Liter. Durch das 3-Wege-Ventil kann die Wärmepumpe die Verbraucher direkt versorgen, ohne durch den Puffer zu strömen. Dadurch kann das Temperaturniveau der Wärmepumpe ohne Verluste genutzt werden.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von +5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist für den Vollsanierungszustand ausgelegt. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird der Kessel parallel betrieben, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Erhöhung der Effizienz der Wärmepumpe durch Kesselunterstützung während der kältesten Jahreszeiten. Dank der beiden Speicher kann die Wärmepumpe mit differenzierten Temperaturniveaus arbeiten. Der Pufferspeicher wird im Sommer nicht betrieben, was die Effizienz erhöht.
Nachteile	Die Unterbringung von zwei Speichern und zwei Wärmeerzeugern benötigt einen höheren Platzbedarf im Keller. Außerdem ist das System relativ komplex und dadurch anfälliger für Betriebsfehler. Der fossil-gefeuerte Kessel könnte zu hohen THG-Emissionen führen.



Variante	B4
Gebäudetyp	EFH
Schema	
Eigenschaften	In B4 kann die Wärmepumpe nur in den Pufferspeicher einspeisen. Zur hydraulischen Trennung des Kessels wird eine 20-Liter-hydraulische Weiche verwendet (das I-förmige Element, das auf dem Schema mit dem Kessel verbunden ist). Der Heizkreis-Mischer passt die Vorlauftemperatur an die Heizkurventemperatur an. Der Pufferspeicher fasst 150 Liter, der TWW-Speicher 200 Liter. Im Unterschied zu B3 speist die Wärmepumpe immer in den Puffer ein.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von +5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist für den Vollsanierungszustand ausgelegt. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird der Kessel parallel betrieben, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Erhöhung der Effizienz der Wärmepumpe durch Kesselunterstützung während der kältesten Jahreszeiten.
Nachteile	Die Unterbringung von zwei Speichern und zwei Wärmeerzeugern benötigt einen höheren Platzbedarf im Keller. Außerdem ist das System relativ komplex und dadurch anfälliger für Betriebsfehler. Der Pufferspeicher wird im Sommer betrieben, obwohl keine Heizleistung benötigt wird. Der fossil-gefeuerte Kessel könnte zu hohen THG-Emissionen führen.

99



Variante	MZ1
Gebäudetyp	MFH
Schema	
Eigenschaften	In diesem System wird das Trinkwasser zentral bereitgestellt. Eine Ausgangstemperatur von 60 °C wird am 500 l Trinkwasserspeicher sichergestellt und eine Warmwasserzirkulation sorgt dafür, dass am Zirkulationsrücklauf eine Temperatur von 55 °C eingehalten wird. Ein 800 l Pufferspeicher versorgt den Heizkreis mit Heizungswasser. Der Heizkreis-Mischer passt die Vorlauftemperatur an die Heizkurventemperatur an.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 60 °C beibehalten, mit einer Hysterese von -2K und +5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist so dimensioniert, dass sie im Vollsanierungszustand monovalent betrieben wird. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen werden Heizstäbe (16 bzw. 6 kW) im Puffer- und im Trinkwasserspeicher eingeschaltet, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Bei der Sanierung können die bestehende Verteilung und TWW-Übergabe weiterverwendet werden. Dank der beiden Speicher kann die Wärmepumpe mit differenzierten Temperaturniveaus arbeiten. Der Pufferspeicher wird im Sommer nicht betrieben, was die Effizienz erhöht.
Nachteile	Durch die zentrale TWW-Bereitstellung werden hohe Temperaturen von 60 °C im Speicher erforderlich, was zu einer verringerten Effizienz der Wärmepumpe führen kann. Außerdem treten aufgrund der Warmwasserzirkulation zusätzliche Wärmeverluste auf.



Variante	MD1	
Gebäu- detyp	MFH	
Schema	x8 x8	
Eigen- schaften	In diesem System wird das Trinkwarmwasser dezentral über Frischwasserstationen in den acht Wohnungen bereitgestellt. Ein 800 I Pufferspeicher mit einem 14 kW Heizstab versorgt den Heizkreis und die Frischwasserstationen mit Heizungswasser. Dank der Umschaltladung kann die Wärmepumpe entweder in den oberen Teil des Speichers (für TWW-Bereitstellung) oder den unteren Teil (für den Heizungsbetrieb) einspeisen.	
Rege- lung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im Puffer-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von -5 K. Es gibt eine Warmwasser-Vorrangschaltung. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist so dimensioniert, dass sie im Vollsanierungszustand monovalent betrieben wird. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird ein Heizstab (14 kW) im Speicher eingeschaltet, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen. 	
Vorteile	Platzsparend, da keine TWW-Speicher im Keller benötigt werden. Durch die Verwendung von dezentralen Frischwasserstationen können im Vergleich zu einem zentralen System die maximalen Temperaturen im Speicher reduziert werden. Keine Wärmeverluste durch TWW-Zirkulation.	
Nach- teile	Die Installation von Frischwasserstationen in den Wohnungen kann bei einer Sanierung aufwändig sein. Weiterhin müssen die Rohrquerschnitte zur Anbindung der Wohnungen geeignet sein. Das große Volumen des Speichers wird das ganze Jahr aufgrund der TWW-Bereitstellung erwärmt, was zu Wärmeverlusten führen kann.	



Variante	MD2
Gebäudetyp	MFH
Schema	+8x
Eigenschaften	In diesem System wird das Trinkwasser dezentral und direktelektrisch über acht 150- Liter-E-Boiler in den Wohnungen bereitgestellt. Ein 700-Liter-Pufferspeicher versorgt den Heizkreislauf mit Heizungswasser. Der Heizkreis-Mischer passt die Vorlauftempe- ratur an die Heizkurventemperatur an.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: In den TWW-Speicher wird eine Temperatur von 50 °C beibehalten, mit einer Hysterese von -5 K. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist so dimensioniert, dass sie im Vollsanierungszustand monovalent betrieben wird. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird ein Heizstab (14 kW) im Pufferspeicher eingeschaltet, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Es entstehen keine Wärmeverluste durch Warmwasserleitungen bzw. Warmwasserzirkulation zwischen dem Keller und der Zapfstelle. Das System verfügt über eine unkomplizierte Hydraulik.
Nachteile	Der Stromverbrauch bei der direktelektrischen TWW-Bereitstellung ist höher als bei der TWW-Bereitstellung durch die Wärmepumpe. Die Installation von E-Boiler in den Wohnungen kann bei einer Sanierung aufwändig sein.



Variante	BZ1
Gebäude- typ	MFH
Schema	
Eigen- schaften	In diesem System wird das TWW zentral bereitgestellt. Es ist mit einem 500-Liter-Trinkwasserspeicher und einer Warmwasserzirkulation ausgestattet. Ein 700-Liter-Pufferspeicher versorgt den Heizkreislauf mit Heizungswasser.
Regelung	 Wenn nicht anders spezifiziert, wurde die Regelung wie folgt eingestellt: Heizung: Die Regelung erfolgt über die Heizkurve mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C und einer Hysterese von +5 K. TWW: Im TWW-Speicher wird eine Temperatur von 60 °C beibehalten, mit einer Hysterese von +5 K. 21 °C ist die Soll-Innenraumtemperatur mit einer 4 K Nachtabsenkung. Die Wärmepumpe ist für den Vollsanierungszustand ausgelegt. Bei teilsanierten und unsanierten Zuständen wird der Kessel parallel betrieben, um die Wärmepumpe bei niedrigen Außentemperaturen zu unterstützen.
Vorteile	Dank der beiden Speicher kann die Wärmepumpe mit differenzierten Temperaturniveaus arbeiten. Der Pufferspeicher wird im Sommer nicht betrieben, was die Effizienz erhöht.
Nachteile	Durch die zentrale TWW-Bereitstellung sind hohe Temperaturen von 60 °C im Speicher erforderlich, was zu einer verringerten Effizienz der Wärmepumpe führen kann. Darüber hinaus treten aufgrund der Warmwasserzirkulation zusätzliche Wärmeverluste auf. Die Unterbringung von zwei Speichern und zwei Wärmeerzeugern benötigt einen höheren Platzbedarf im Keller. Außerdem ist das System relativ komplex und dadurch anfälliger für Betriebsfehler. Der fossilbefeuerte Kessel könnte zu hohen Emissionen führen.