

Projektnummer 23.0805

Auftraggeber Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen
Amt für Bauordnung und Hochbau
Nagelsweg 37/39
20097 Hamburg

Fachingenieur Prof. Dipl.-Ing. (Univ.) Elisabeth Endres
Ingenieurbüro Hausladen GmbH
Feldkirchener Straße 7a
85551 Kirchheim

Titel Präzisierung der Niedertemperaturfähigkeit der Gebäudehülle von Bestandsgebäuden
beim Einsatz von Wärmepumpen

aufgestellt Kirchheim, 27. März 2024

Impressum

VerfasserInnen:

Ingenieurbüro Hausladen GmbH

Prof. Dipl.-Ing. (univ.) Elisabeth Endres

M.Eng. Christian Götz (Projektleitung)

M.Sc. Johanna Graf

Dipl.-Ing. Matthias Schmidt

M.Sc. Korbinian Weng

M.Sc. Nikolaus Wechs

Auftraggeberin und fachliche Koordination:

Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen, Amt für Bauordnung und Hochbau, Hamburg

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
2.	Grundlagen und Methodik	2
3.	Auswahl von Beispielgebäuden	4
4.	Heizlastermittlung, Bauteildefinitionen, Sanierungsvarianten.....	7
5.	Ermittlung der reduzierten Vorlauftemperatur bei Auslegungsbedingungen	11
6.	Grundlagen zur Ermittlung von Jahresarbeitszahlen	14
7.	Berechnungsergebnisse und Diskussion.....	20
8.	Zusammenfassung und Fazit	35
9.	Anlage: Zusammenfassung wesentlicher Rahmenbedingungen.....	38

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesanstalt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BJ	Baujahr
BSW	Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen
COP	Coefficient of Performance
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgeschoss
EH	Effizienzhaus
GEG	Gebäudeenergiegesetz
H_T	Spezifischer Transmissionswärmeverlust
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt
JAZ	Jahresarbeitszahl
K	Kelvin
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kW	Kilowatt
MFH	Mehrfamilienhaus
NT	Niedertemperatur
OG	Obergeschoss
TRY	Testreferenzjahr
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
W	Watt
WSchV	Wärmeschutzverordnung
WSG	Wärmeschutzverglasung

1. Einleitung

Die Sanierung des Gebäudebestands ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für das Gelingen der Wärmewende. Die klimagerechte Transformation des Gebäudesektors erfordert eine flächendeckende Umstellung fossiler Erzeugungsanlagen auf regenerative Systeme. Dabei nehmen Wärmepumpen eine tragende Rolle ein¹. Im Gegensatz zu konventionellen Wärmeerzeugern wie Gas- oder Ölkesseln, lassen sich bei Wärmepumpen durch eine Sanierung i.d.R. zusätzlich erhebliche Effizienzsteigerungen erzielen. Unabhängig von der Wärmeerzeugung verringert sich mit Sanierungsmaßnahmen der Endenergiebedarf und die Heizlast eines Gebäudes im Vergleich zum unsanierten Zustand.

Häufig wird im Diskurs die Niedertemperaturfähigkeit eines Gebäudes für den effizienten Einsatz einer Wärmepumpe vorausgesetzt. In der Literatur² findet sich als Definition von Niedertemperaturfähigkeit (sog. „NT-Ready“) eine Vorlauftemperatur von 55 °C, die einen effizienten Betrieb mit einer Jahresarbeitszahl von >3 ermöglicht. Im Rahmen dieser Studie wird bei Vorlauftemperaturen kleiner oder gleich 55 °C daher von Niedertemperaturfähigkeit gesprochen

Anlässlich der genannten Annahmen zur Niedertemperaturfähigkeit wurde im Rahmen dieser Kurzstudie für die Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen Hamburg (BSW) untersucht, welche Dämmmaßnahmen bzw. Sanierungsstandards typischerweise in bestehenden Wohngebäuden notwendig sind, um einen effizienten Einsatz von Wärmepumpen zu ermöglichen.

¹ Vgl. z.B. Brandes et al.: „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2021

² Vgl. z.B.: Mellwig, P., Pehnt, M., Lempik, J.: „Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien in Gebäudebereich – Kurzfassung“, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, 2021

2. Grundlagen und Methodik

Bei der Wärmeversorgung von Gebäuden wird elektrisch angetriebenen Wärmepumpen eine tragende Rolle zugeordnet. Wärmequellen sind hier typischerweise oberflächennahe Geothermie, Grundwasser oder Außenluft. Da die Umweltquelle Außenluft die geringste Abhängigkeit bezüglich der lokalen Erschließungssituation aufweist und Studienergebnisse damit gut übertragbar sind, wurden in dieser Studie ausschließlich Luft-Wasser-Wärmepumpen betrachtet. Gleichzeitig handelt es sich damit um eine „worst-case“ Betrachtung, da erdgebundene Wärmepumpensysteme aufgrund der im Mittel höheren Quellentemperaturen in der Heizperiode üblicherweise eine höhere Systemeffizienz aufweisen.

Wärmepumpensysteme dienen in Wohngebäuden i.d.R. zur Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser. Die Verbesserung der Gebäudehülle wirkt im Wesentlichen auf die Heizlast und den Heizwärmebedarf von Gebäuden und damit auf die Temperaturniveaus, die für die ausreichende Bereitstellung von Heizwärme notwendig sind. Die Warmwasserbereitung bleibt davon weitestgehend unberührt. Der Energiebedarf sowie Effizienzkennzahlen zur Warmwasserbereitung werden folglich nicht berücksichtigt. Das Vorgehen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

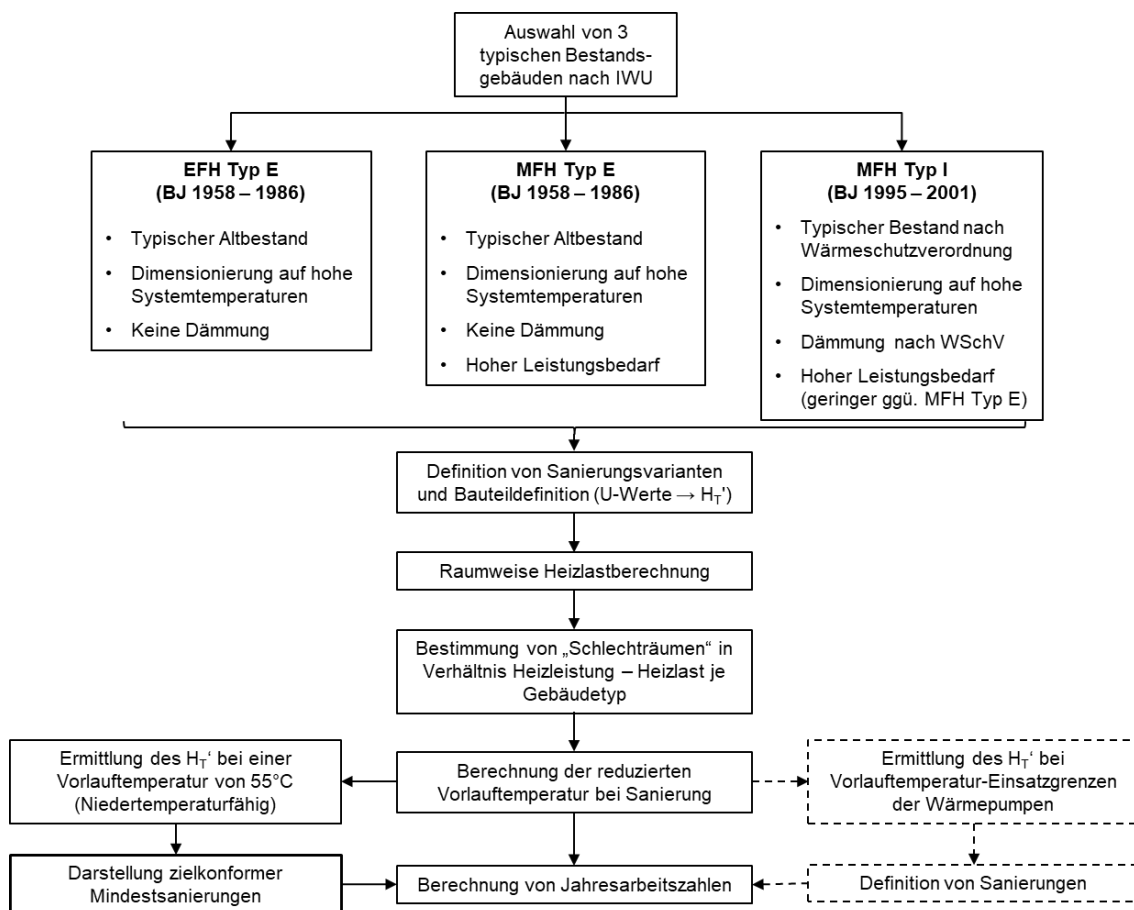


Abbildung 1: Vorgehen zur Ermittlung von Sanierungen zum Erreichen von Niedertemperaturfähigkeit, eigene Darstellung

Zunächst wurden drei Typgebäude aus zwei Baualtersklassen der Klassifizierung des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) identifiziert, die einen Großteil des Wohngebäudebestands in Deutschland repräsentieren oder hinsichtlich Sanierung und Heizungstausch Besonderheiten aufweisen, die einer gesonderten Untersuchung bedürfen (Kapitel 3).

Für die Baualtersklassen wurden U-Werte nach IWU-Typologie angesetzt. Auf Basis dieser Grundlage wurden für den unsanierten Ausgangszustand und Sanierungsvarianten raumweise Heizlasten nach DIN EN 12831 ermittelt (Kapitel 4).

Es ergibt sich je Raum ein Verhältnis aus der installierten Leistung des Heizkörpers zur Heizlast. Dieses ist maßgebend für die Reduzierung der Vorlauftemperatur. Unter Auswahl eines „Schlechtraums“ – derjenige Raum mit dem kleinsten Verhältnis des Heizkörpers zur Heizlast – kann das weitestmögliche Absenken der maximalen Vorlauftemperatur bei Sanierung berechnet werden (Kapitel 5). Auf Basis der Berechnung werden Ziel-Transmissionswärmeverluste zur Erreichung der Niedertemperaturfähigkeit abgeschätzt und korrespondierende Sanierungsvarianten definiert.

Parallel wurde die Analyse von Sanierungsvarianten auf der Basis von aktuellen technischen Einsatzgrenzen von Luft-Wasser-Wärmepumpen durchgeführt.

Ausgehend von der Vorlauftemperatur und unter Berücksichtigung der Effizienzkennzahlen von Beispielwärmepumpen werden Jahresarbeitszahlen berechnet (Kapitel 6).

Abschließend erfolgt eine Diskussion der Studienergebnisse sowie eine Einordnung in den aktuellen Stand des Diskurses.

3. Auswahl von Beispielgebäuden

Um für den Wohngebäudebestand in Deutschland möglichst übertragbare Ergebnisse erarbeiten zu können, wurden drei repräsentative Beispielgebäude definiert. In Anlehnung an die Deutsche Wohngebäudetypologie des IWU wurde mit der Baualtersklasse E (Baujahre 1958 bis 1986) jeweils der häufigste Typ für Ein- und Mehrfamilienhäuser (EFH bzw. MFH) gewählt³. Es handelt sich dabei um den typischen Altbestand ohne Dämmung und mit großen Heizkörperflächen, die üblicherweise auf hohe Systemtemperaturen von 80 Grad Celsius im Vorlauf dimensioniert wurden. Im Unterschied zum Einfamilienhaus weist das Mehrfamilienhaus einen höheren Leistungsbedarf bei einem energetisch günstigeren Verhältnis von Hüllfläche zu Volumen auf.

Für Mehrfamilienhäuser wurde zusätzlich die Baualtersklasse I (Baujahre 1995 bis 2001) betrachtet, um die Gebäude nach der Zeit der Einführung der dritten Iteration der Wärmeschutzverordnung abzubilden. Diese Gebäude zeichnen sich durch eine verbesserte Wärmedämmung sowie energetisch optimierte Fenster, also im Vergleich zum Typ E geringeren Transmissionswärmeverlusten aus. Gleichzeitig wurden die Heizungen in dieser Baualtersklasse weiterhin auf hohe Systemtemperaturen von typischerweise 70°C im Vorlauf ausgelegt. Aufgrund der besser gedämmten Gebäudehülle sind die Heizkörperflächen ggü. dem MFH Typ E entsprechend kleiner dimensioniert.

Beispielgebäude Einfamilienhaus Typ E

Als Beispiel für ein Einfamilienhaus wurde ein Grundriss aus einem Forschungsprojekt von Zukunft Bau⁴ gewählt. Baualterstypisch weist das Gebäude einen annähernd quadratischen Grundriss mit 156 m² Netto-Grundfläche und ein Satteldach auf. Es verfügt über zwei beheizte Wohngeschosse und ist vollständig unterkellert. Keller und Dachboden sind unbeheizt.

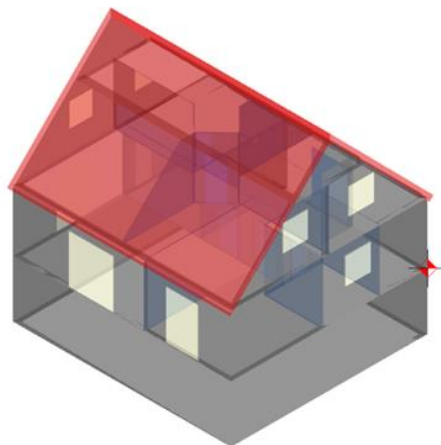


Abbildung 2: Beispielgebäude Einfamilienhaus, eigene Darstellung

³ Institut Wohnen und Umwelt (IWU): „Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz von typischen Wohngebäuden – zweite erweiterte Auflage“, Darmstadt, 2015

⁴ Hartmann et al.: „Fertigstellung eines vereinfachten Verfahrens für Wohngebäude zu DIN V 18599 für die EnEV 2017“, Forschungsprogramm Zukunft Bau, Bonn, 2016

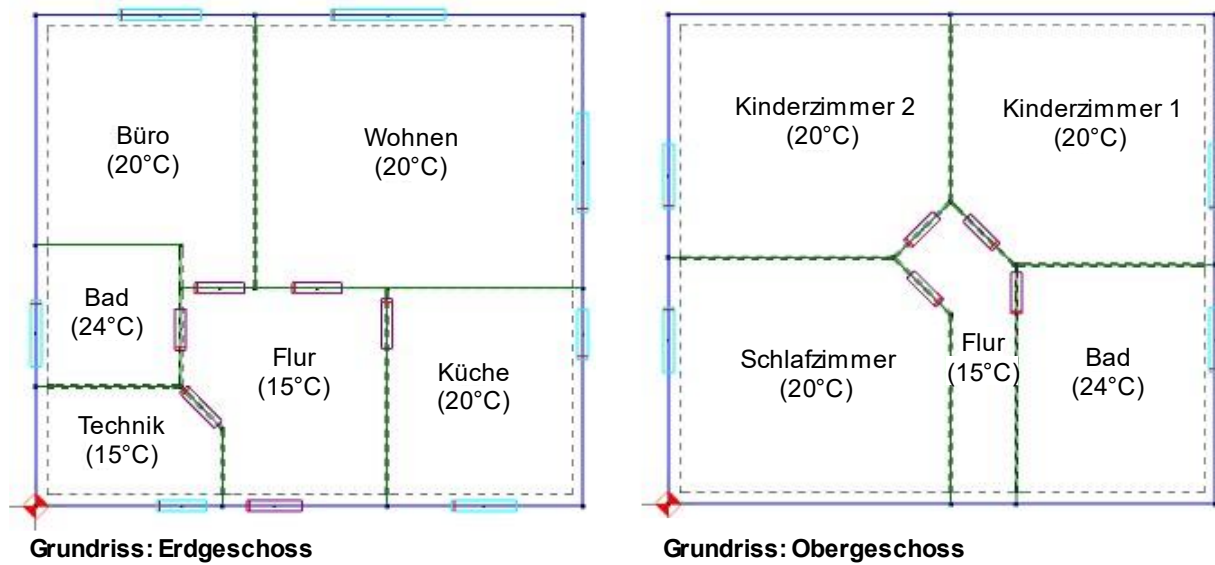


Abbildung 3: Grundriss EFH, eigene Darstellung nach (Hartmann, et al., 2016)

Beispielgebäude Mehrfamilienhaus Typ E bzw. I

Als Beispiel für ein Mehrfamilienhaus des Typs E und I wurde ein dreigeschossiges Gebäude mit 18 Wohneinheiten und einer Netto-Grundfläche von 1.817 m² gewählt (siehe Abbildung 4).

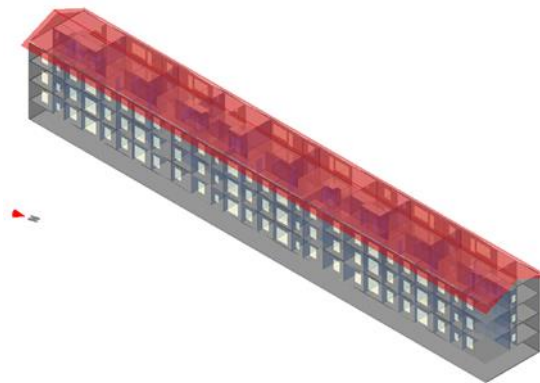


Abbildung 4: Beispielgebäude Mehrfamilienhaus, eigene Darstellung

Es wurde der in Abbildung 5 dargestellte Grundriss angenommen. Dieser ist über die drei Geschosse und in beiden Baualterklassen identisch. Das Untergeschoss und Dachgeschoss wurden im Beispiel als unbeheizt angenommen.

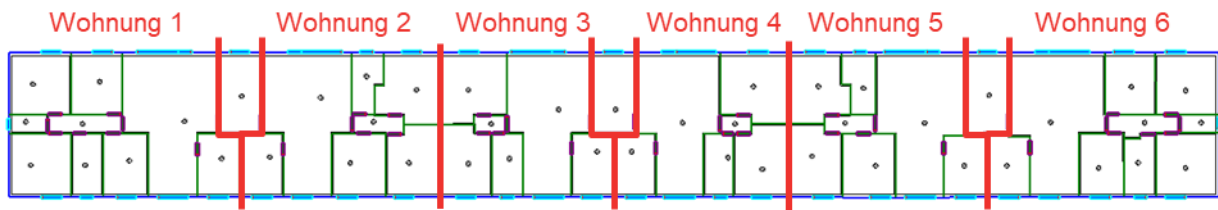


Abbildung 5: Grundriss MFH Erdgeschoss, 1. und 2. Obergeschoss, eigene Darstellung

Abbildung 6 zeigt beispielhaft einen Wohnungsgrundriss aus dem Mehrfamilienhaus.

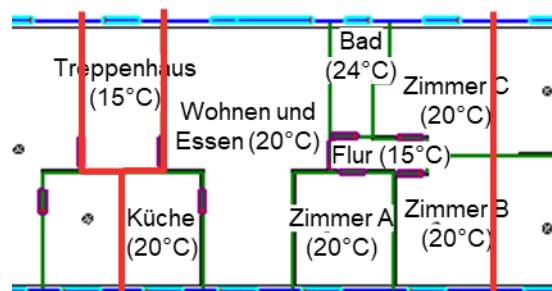


Abbildung 6: Raumaufteilung Beispielwohnung MFH, eigene Darstellung

4. Heizlastermittlung, Bauteildefinitionen, Sanierungsvarianten

Heizlastermittlung nach DIN EN 12831

Für die unsanierten Gebäude und die Sanierungsvarianten werden raumweise Heizlasten ermittelt. Die Berechnung wurde mit der mh-software (Version 7.0.351) auf Grundlage der DIN EN 12831-1:2020 durchgeführt. Wesentliche Annahmen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Parameter zur Berechnung der Heizlast nach DIN EN 12831

Parameter	Wert
Postleitzahl / Ort	14473 / Potsdam
Norm-Auslegungstemperatur Referenzort	-12,6 °C
Aufheizzuschlag (Wiederaufheizung)	Nicht berücksichtigt
Nachbareinheiten	Beheizt (sichergestellte Belegung)
Wärmebrückenzuschlag	0,10 W/m ² ·K (in BEG EH55 mit 0,05 W/m ² ·K)
Luftdurchlässigkeit	Kategorie C (in BEG EH55 mit Kategorie A)

Für die Berechnung wurde der Standort Potsdam gewählt. Die Auslegungsfaktoren liegen näherungsweise im deutschlandweiten Mittel. Potsdam wird zudem als Referenzstandort für normative Schriften wie beispielsweise der DIN EN 18599 oder den Klimafaktoren des Deutschen Wetterdiensts (DWD) angewendet. Es kann folglich von einer guten Übertragbarkeit der Studienergebnisse auf nationaler Ebene ausgegangen werden. Mit einer Norm-Auslegungstemperatur von -12,6 °C liegt der Referenzstandort auch im Bereich typischerweise im Süden Deutschlands anzusetzender Parameter⁵.

Der Aufheizzuschlag für die Wiederaufheizung wurde nicht berücksichtigt, da bei der Wohnnutzung der Normalbetrieb als typischer Betriebsfall vorausgesetzt werden kann. Die Heizlast fällt dadurch etwas geringer aus. Der Berechnungsvorgang entspricht der gängigen Praxis bei der Planung von Wohngebäuden, da im realen Betrieb nur von einer geringfügigen Nachtabsenkung auszugehen ist.

⁵ Bundesverband Wärmepumpe e.V.: „Klimakarte“, verfügbar unter www.waermepumpe.de/normen-technik/klimakarte/, Zugriff am 20.12.2023

Die Soll-Raumtemperaturen der Innenbereiche wurden entsprechend den Standardwerten der DIN EN 12831 angesetzt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Temperaturen der Innenbereiche nach DIN EN 12831

Nutzung	Innentemperatur
Bad	24 °C
Büro	20 °C
Küche	20 °C
Treppenhaus / Flur	15 °C
Wohnbereich / Zimmer	20 °C

Wärmedurchgangskoeffizienten und Sanierungsvarianten der Bauteile

Die angesetzten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der wesentlichen Bauteile sind in den Tabelle 3 Tabelle 5 angegeben. Die U-Werte in der Spalte „unsaniert“ wurden den Tabellen 2 und 3 aus der „Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand“ entnommen⁶. Diese bilden die Grundlage für die ersten Heizlastberechnungen. Außerdem wurden weitere U-Wert-Kombinationen ermittelt, durch die ausgewählte Sanierungsziele erreicht werden können. Diese sind in den Tabellen Tabelle 3 bis Tabelle 5 in den weiteren Spalten aufgelistet. Als Ziele wurden der gesetzliche Mindeststandard nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) sowie die Förderung des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) im Rahmen der Bundesförderung effizienter Gebäude (BEG)-Einzelmaßnahmen und die Vorgaben der Förderrichtlinie der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) für das BEG-Effizienzhaus (EH) 55 festgelegt.

Die zu erreichenden U-Werte werden im GEG für Sanierungsmaßnahmen konkret vorgegeben. Soll eine Förderung in Anspruch genommen werden, sind die BEG-Einzelmaßnahmen eine niederschwellige Möglichkeit mit dem geringsten Dämmaufwand. Auch hier sind die U-Werte für die einzelnen Bauteile vorgegeben. Die KfW EH55 Variante stellt einen sehr guten Dämmstandard dar, der zwar mit einem hohen Dämmaufwand verbunden, aber dennoch realistisch zu erreichen ist. Für die KfW EH55 Förderung wurde eine mögliche Kombination aus Bauteilvarianten ermittelt, bei der sich die Anforderungen an die Dämmstärken gleichmäßig auf die Bauteile verteilen und Wärmebrücken vermindert werden. Die Dämmstärken in den Sanierungsvarianten wurden beispielhaft mit WLS040 berechnet. Des Weiteren wurde ein Wärmebrückenzuschlag von 0,10 W/m²K angesetzt. Ausnahme bilden hier die Varianten für BEG EH55, für die ein Wärmebrückenzuschlag i.H.v. 0,05 W/m²K angesetzt wurde. Für die Luftdurchlässigkeit wurde die Kategorie C bzw. A bei BEG EH55 angenommen. Nicht aufgeführte Bauteile wie z. B. Haustüren bleiben unsaniert.

⁶ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand, Bundesanzeiger, Berlin, 2020

Tabelle 3: U-Werte des EFH-E in W/m²·K

Bauteil	Unsaniiert	Gesetzlicher Mindeststandard	BAFA-Förderung BEG EM	KfW-Förderung BEG EH55
Außenwand	1,40 W/m ² ·K	0,24 W/m ² ·K (14 cm Dämmung)	0,20 W/m ² ·K (18 cm Dämmung)	0,15 W/m ² ·K (24 cm Dämmung)
Oberste Geschossdecke	2,10 W/m ² ·K	0,24 W/m ² ·K (16 cm Dämmung)	0,14 W/m ² ·K (26 cm Dämmung)	0,13 W/m ² ·K (28 cm Dämmung)
Kellerdecke	1,00 W/m ² ·K	0,30 W/m ² ·K (10 cm Dämmung)	0,25 W/m ² ·K (12 cm Dämmung)	0,20 W/m ² ·K (16 cm Dämmung)
Fenster	2,70 W/m ² ·K	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	0,95 W/m ² ·K (3-WSG)	0,90 W/m ² ·K (3-WSG)

Tabelle 4: U-Werte des MFH-E in W/m²·K

Bauteil	Unsaniiert	Gesetzlicher Mindeststandard	BAFA-Förderung BEG EM	KfW-Förderung BEG EH55
Außenwand	1,40 W/m ² ·K	0,24 W/m ² ·K (14 cm Dämmung)	0,20 W/m ² ·K (18 cm Dämmung)	0,15 W/m ² ·K (24 cm Dämmung)
Oberste Geschossdecke	2,10 W/m ² ·K	0,24 W/m ² ·K (16 cm Dämmung)	0,14 W/m ² ·K (26 cm Dämmung)	0,13 W/m ² ·K (28 cm Dämmung)
Kellerdecke	1,00 W/m ² ·K	0,30 W/m ² ·K (10 cm Dämmung)	0,25 W/m ² ·K (12 cm Dämmung)	0,20 W/m ² ·K (16 cm Dämmung)
Fenster	2,70 W/m ² ·K	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	0,95 W/m ² ·K (3-WSG)	0,90 W/m ² ·K (3-WSG)

Tabelle 5: U-Werte des MFH-I in W/m²·K

Bauteil	Unsaniiert	Gesetzlicher Mindeststandard	BAFA-Förderung BEG EM	KfW-Förderung BEG EH55
Außenwand	0,50 W/m ² ·K	0,24 W/m ² ·K (10 cm Dämmung)	0,20 W/m ² ·K (12 cm Dämmung)	0,15 W/m ² ·K (18 cm Dämmung)
Oberste Geschossdecke	0,30 W/m ² ·K	0,24 W/m ² ·K (4 cm Dämmung)	0,14 W/m ² ·K (16 cm Dämmung)	0,13 W/m ² ·K (18 cm Dämmung)
Kellerdecke	0,60 W/m ² ·K	0,30 W/m ² ·K (8 cm Dämmung)	0,25 W/m ² ·K (10 cm Dämmung)	0,20 W/m ² ·K (14 cm Dämmung)
Fenster	1,90 W/m ² ·K	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	0,95 W/m ² ·K (3-WSG)	0,90 W/m ² ·K (3-WSG)

Die ermittelten Transmissionswärmeverluste der Bauteile sind für die Gebäudetypen differenziert nach Sanierungsstand in Abbildung 7 bis Abbildung 9 dargestellt.

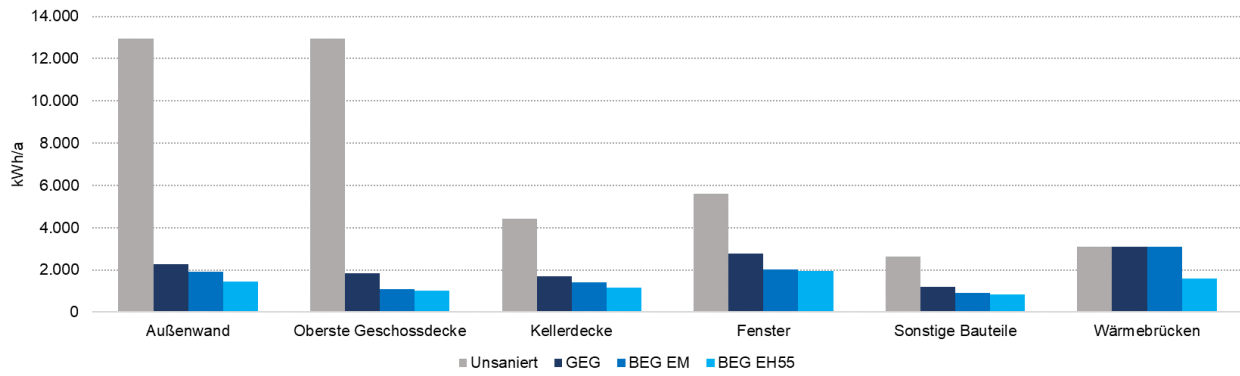


Abbildung 7: Transmissionswärmeverluste je Bauteil - EFH-E, eigene Darstellung

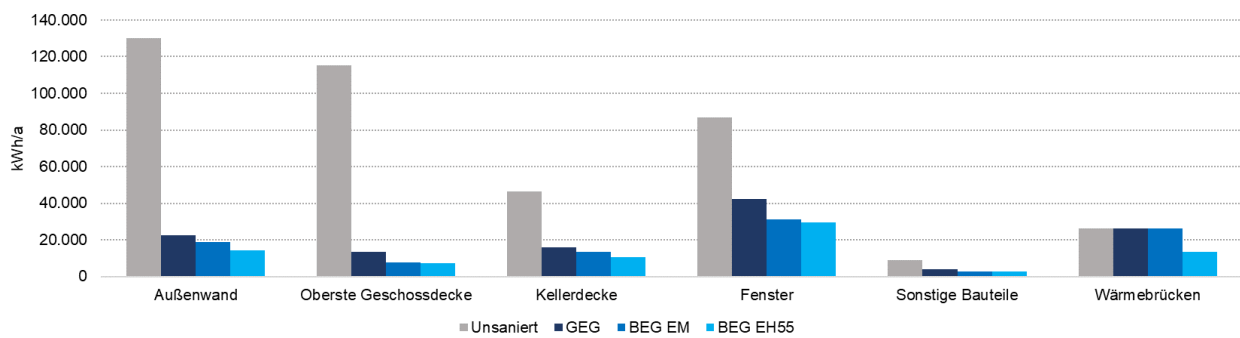


Abbildung 8: Transmissionswärmeverluste je Bauteil - MFH-E, eigene Darstellung

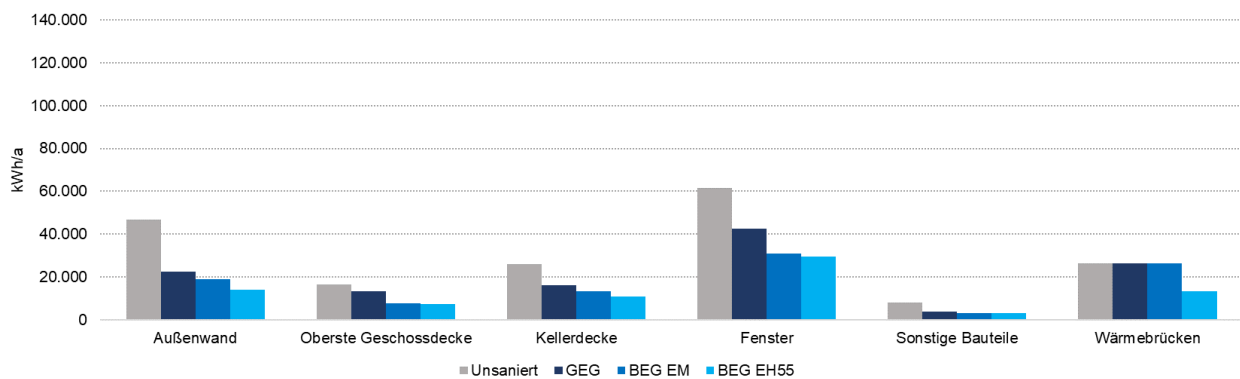


Abbildung 9: Transmissionswärmeverluste je Bauteil - MFH-I, eigene Darstellung

5. Ermittlung der reduzierten Vorlauftemperatur bei Auslegungsbedingungen

Heizleistungen (Heizkörper)

Das Potenzial zur Absenkung der Vorlauftemperatur ergibt sich aus dem Verhältnis von installierter Heizleistung (entspricht der Leistung des Heizkörpers) zur Heizlast. Vereinfachend wurde die Raum-Heizleistung im Rahmen der Studie als Äquivalent der Heizlast des Raums im unsanierten Zustand angenommen. Die Heizkörper sind also im unsanierten Zustand so groß, dass sie exakt die Heizlast bei vorgegebenen Systemtemperaturen abdecken können. Die Auslegungs-Temperaturen in der früheren Gebäudeklasse E wurden mit 80 °C (Vorlauf) und 60 °C (Rücklauf) angesetzt. In der jüngeren Gebäudeklasse I beträgt die Auslegungsvorlauftemperatur 70 °C und die -Rücklauftemperatur 55 °C. Die Heizlasten und die im unsanierten Zustand entsprechend identischen Heizleistungen der Heizkörper (konservativer Ansatz: Überdimensionierung = 0%) sind in Abbildung 10 links dargestellt.

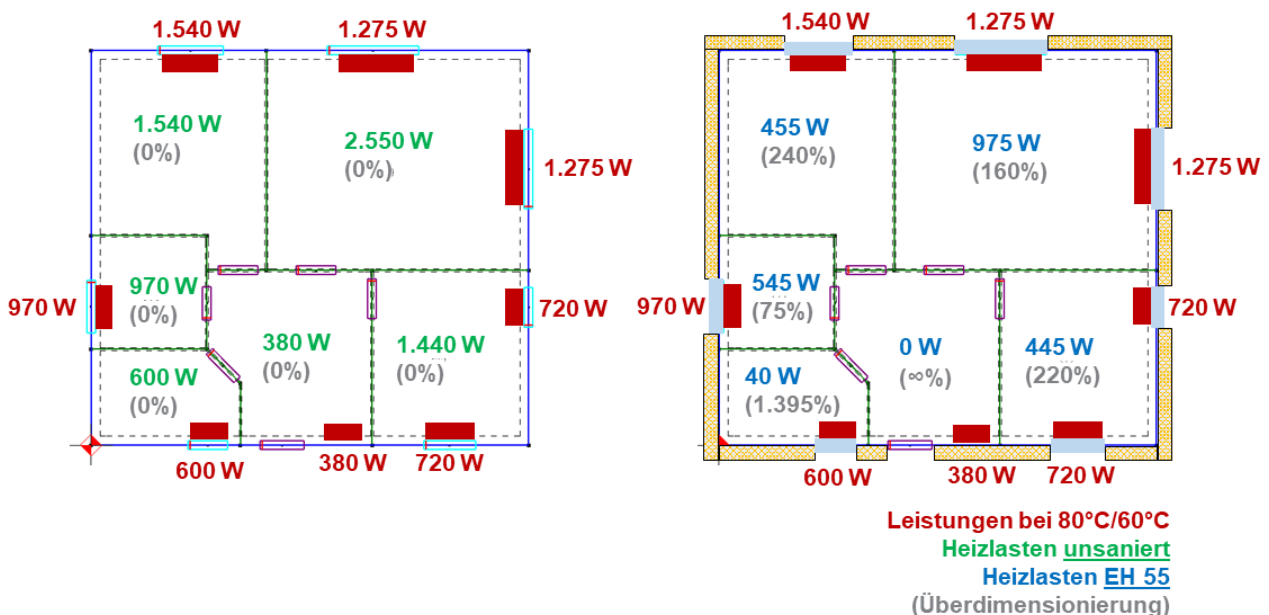


Abbildung 10: Heizlasten und Heizleistungen im unsanierten Zustand (links) und bei einer EH55-Sanierung (rechts), eigene Darstellung nach (Hartmann, et al., 2016)

Eine bauliche Sanierung im Sinne einer Verbesserung der Gebäudehülle führt zu einer geringeren Heizlast. Bei konstant bleibenden Betriebstemperaturen bleiben die Heizleistungen der Heizkörper unverändert. Es ergibt sich eine Überdimensionierung der Heizkörper. Dies ist rechts in Abbildung 10 beispielhaft für die Sanierungsvariante EH 55 dargestellt. Eine Sanierung kann auch dazu führen, dass in einzelnen Räumen kein Heizkörper mehr benötigt wird, da der Raum durch angrenzende Zonen mitbeheizt wird. Dies trifft im in Abbildung 10 auf den Flur unten in der Mitte zu. Da die Raum-Heizlast nach Sanierung 0 W beträgt, jedoch der Heizkörper bestehen bleibt, geht die Überdimensionierung gegen unendlich.

Schlechtraumbestimmung

Die Überdimensionierung als Faktor zwischen Heizleistung bei Auslegungs-Betriebstemperaturen zur Heizlast stellt das Potenzial zur Absenkung der Vorlauftemperatur dar. Diese kann so weit abgesenkt werden, bis die Heizleistung der neuen Heizlast entspricht. Dabei ist der Raum mit der geringsten Überdimensionierung ausschlaggebend für die Systemvorlauftemperatur. Es wurde vorausgesetzt, dass diese Vorlauftemperatur dann für alle Räume gleich ist.

Im Beispiel in Abbildung 10 weist das Bad mit 75 % die geringste Überdimensionierung auf. Da Badezimmer aufgrund der höheren Norm-Temperatur von 24°C (siehe Tabelle 2) kaum eine Vorlauftemperaturreduzierung zulassen, wurde als Prämisse im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass in Badezimmern immer ein zusätzliches elektrisches Zusatzheizsystem installierbar ist. Dabei kann es sich beispielsweise um Infrarotheizkörper handeln. Der Prämisse folgend wird der Raum mit der geringsten Überdimensionierung, der kein Badezimmer ist, nachfolgend als „Schlechtraum“ bezeichnet. Im in Abbildung 10 dargestellten Beispiel (EFH-E) ist der Schlechtraum das Wohnzimmer oben rechts mit einer Überdimensionierung von 160%.

Ermittlung der reduzierten Vorlauftemperatur

Die Vorlauftemperatur lässt sich reduzieren, bis im sanierten Zustand keine Überdimensionierung mehr vorliegt, also die Heizleistung im Schlechtraum der Heizlast entspricht. Die Leistung des Heizkörpers definiert sich über die mittlere Übertemperatur zwischen Heizkörper und Raum. Die mittlere Übertemperatur ist vor allem von der Vor- und der Rücklauftemperatur abhängig. Im ersten Schritt lässt sich mit den aus der Heizlastberechnung bekannten Heizlasten und unter Annahme eines konstanten Massenstroms die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf berechnen.

$$\dot{Q} = \underbrace{\dot{m} \cdot c_p}_c \cdot \underbrace{(T_{VL} - T_{RL})}_{\rightarrow \Delta T \text{ kann für jede Leistung bestimmt werden}}$$

Die Konstante c (Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Massenstrom) wird im Auslegungszustand für die Auslegungs-Heizlast des Schlechtraums bestimmt und bleibt in den Sanierungsvarianten konstant. Für die bekannten Heizlasten bei Sanierung wird die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf berechnet. Da die Heizlast bei Sanierung abnimmt und der Massenstrom konstant bleibt, erfolgt die Leistungsreduzierung über eine Verringerung der Temperaturdifferenz.

Die Berechnung der reduzierten Vorlauftemperatur ($t_{VL,Betrieb}$) erfolgt mit der Heizkörpergleichung. Der Heizkörperexponent „n“ wird mit für Platten- und Rippenheizkörpern typischen 1,25 angenommen.

$$\dot{Q}_{Betrieb} = \dot{Q}_{Norm} \cdot \left[\frac{\frac{t_{VL,Betrieb} - t_{RL,Betrieb}}{\ln\left(\frac{t_{VL,Betrieb} - t_{L,Betrieb}}{t_{RL,Betrieb} - t_{L,Betrieb}}\right)}}{\frac{t_{VL,Auslegung} - t_{RL,Auslegung}}{\ln\left(\frac{t_{VL,Auslegung} - t_{L,Auslegung}}{t_{RL,Auslegung} - t_{L,Auslegung}}\right)}} \right]^n$$

6. Grundlagen zur Ermittlung von Jahresarbeitszahlen

Zur Ermittlung von Jahresarbeitszahlen wurden stündliche Carnot-Leistungszahlen (in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Vorlauftemperatur nach Heizkurve) über einen Außentemperaturgang gebildet, mit einem Carnot-Gütegrad von Beispielwärmepumpen multipliziert und mit der Heizlast der Betriebsstunde gewichtet.

Der Temperaturhub zwischen Außentemperatur als Wärmequelle und dem Heizungsvorlauf als Wärmesenke, bestimmt die Effizienz einer Wärmepumpe maßgeblich. Eine Erhöhung des Temperaturhubs um ein Kelvin mindert die Effizienz um ca. 3%⁷.

Wetterdaten

Zur Bildung einer Jahresarbeitszahl auf Basis stündlicher Leistungszahlen werden lokale Wetterrandbedingungen zugrunde gelegt. Hierzu werden die Daten des ortsgenauen Testreferenzjahres mit dem Bezugszeitraum 2031-2060 (TRY2045) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung verwendet.

Die Testreferenzjahre werden mit einer Auflösung von ca. einem Quadratkilometer erzeugt. Es wird der Datensatz mit den Koordinaten 52,3930°N 13,0955°O (Potsdam) verwendet. Der Einfluss des Ortes und die Höhenabhängigkeit werden dabei berücksichtigt. Die Ortsauswahl ist in Abbildung 11 dargestellt.

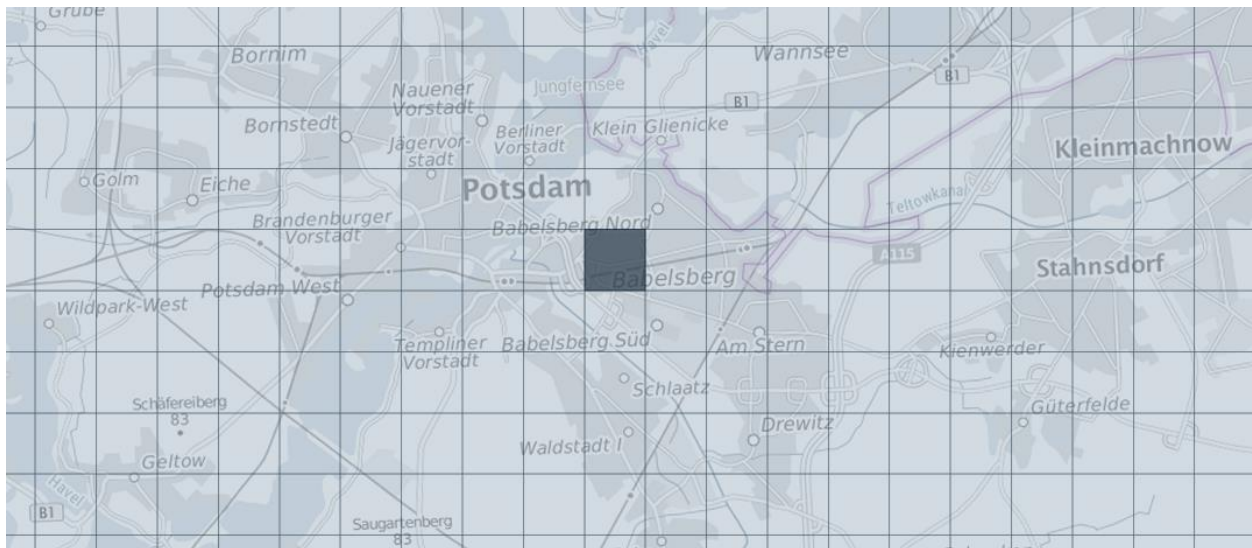


Abbildung 11: Wetterdatensatz TRY 2045 am Standort Potsdam, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Die Berechnungen erfolgen auf Basis von Prognosen für Witterungsverhältnisse eines typischen Zukunftsjahres. Dieses ursprünglich als Zukunftsszenario angesetzte Typ-Jahr entspricht näherungsweise den Witterungsverhältnissen, die bereits heute beobachtet werden und erlaubt damit eine genauere Abschätzung von

⁷ Floß, A., Hofmann, S.: "Optimized integration of storage tanks in heat pump systems and adapted control strategies", Hochschule Biberach, Elsevier, Energy and Buildings, 2015, Seite 1

Lastgängen gegenüber den Standard-Typ-Jahren, die auf Vergangenheitswerten basieren. Der Außentemperaturgang ist in Abbildung 12 dargestellt.

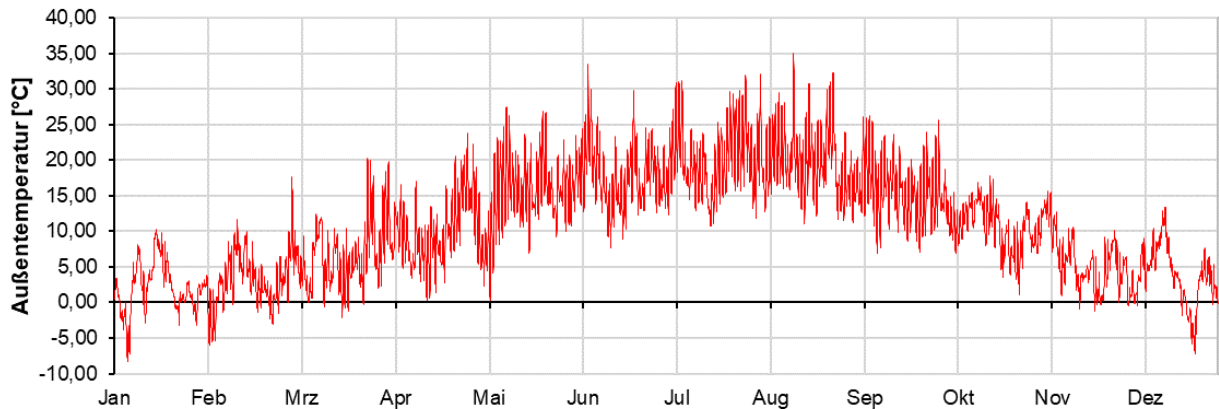


Abbildung 12: Außentemperaturen Potsdam (TRY 2045), eigene Darstellung auf Grundlage Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Lastgang Heizung

Über spezifische Bedarfskennwerte wird in einem vereinfachten Verfahren ein gebäudeseitiger Lastgang auf Nutzenergieebene in Stundenaufösung erstellt. Im Wesentlichen wird der Energiebedarf in Abhängigkeit der Wetterrandbedingungen (Temperatur, Sonneneinstrahlung, etc.) und eines typischen Nutzerprofils auf die Stunden eines Jahres verteilt. Der Lastgang bildet dabei eine „ideale Heizung“ ab, die bei Unterschreiten der Solltemperatur direkt Wärme für den Raum bereitstellt (siehe Abbildung 13).

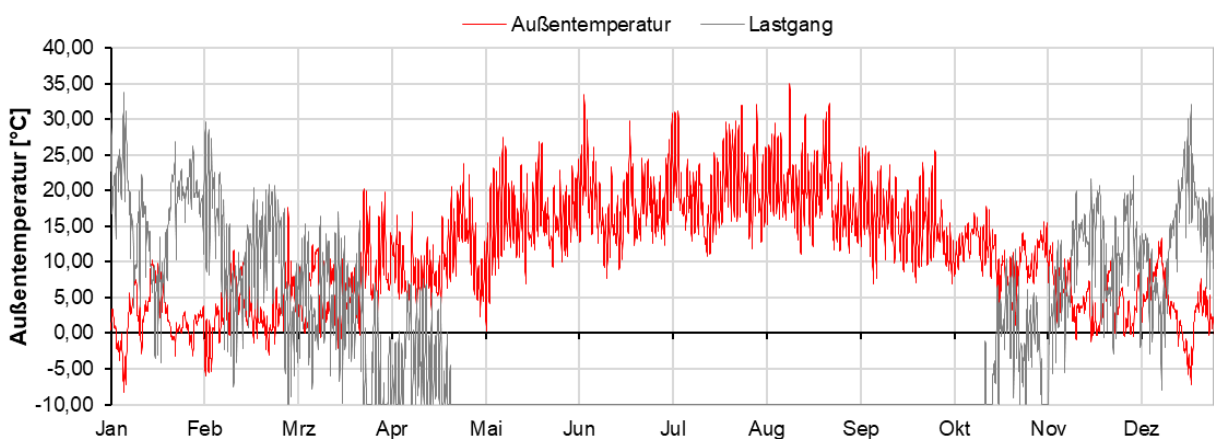


Abbildung 13: Synthetischer Erzeuger-Nutzwärmelastgang (grau) über den Außentemperaturverlauf (rot), eigene Darstellung

Exkurs: Natürliche Kältemittel

In Wärmepumpen eingesetzte Kältemittel können eine hohe Treibhausgaswirkung (GWP) aufweisen. Dabei kann je nach Leistungsklasse von Leckageraten zwischen 1% bis 4% pro Jahr ausgegangen werden.⁸ Auf EU-Ebene wurde mit der F-Gas Verordnung 2024 ein beschleunigter „Phase Down“ fluorierter Kältemittel mit hohem GWP beschlossen⁹. Bis 2050 soll die zur Verfügung stehende Menge an fluorierten Treibhausgasen null betragen. Bis zum Jahr 2030 wird die einsetzbare Menge fluorierter Kältemittel mit hohem GWP durch die Vorgabe einer festgelegten Ausgangsmenge schrittweise verknappt. Bereits existierende stationäre Kälteanlagen mit F-Gasen mit einem GWP über 750 dürfen nur noch bis 2032 mit Frischware gewartet werden. Dabei sind recycelte oder wiederaufbereitete Kältemittel ausgenommen. Ab 2027 dürfen stationäre Kälteanlagen / Wärmepumpen mit einer Leistung bis 50 kW mit F-Gasen mit einem GWP über 150 nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Ab 2030 dürfen stationäre Kälteanlagen / Wärmepumpen mit F-Gasen mit einem GWP über 150 nicht mehr in Verkehr gebracht werden.

Gleichzeitig ist im Rahmen der EU-Chemikalien-Verordnung REACH ein Verbot von Polyfluoralkalysubstanzen (PFAS) geplant¹⁰. Hiervon sind u.a. die zwei Kältemittel mit niedrigem GWP R1234ze und R1234yf betroffen. Bei Letzterem ist zudem die giftige und schwer abbaubare Trifluoressigsäure ein atmosphärisches Abbauprodukt, das bereits vermehrt in Gewässern nachgewiesen wird.¹¹ Es verbleiben damit insbesondere natürliche Kältemittel wie Propan (R290), Ammoniak (R717) oder CO₂ (R744) als zukunftsfähige Kältemittel für ihre jeweiligen Einsatzbereiche. Entsprechend werden im Rahmen dieser Studie Wärmepumpen mit zukunftsfähigen Kältemitteln beleuchtet. Für den Wohngebäudesektor wurde der Fokus auf den Einsatz von Wärmepumpen mit dem Kältemittel Propan gelegt.

Prädiktion von Leistungszahlen über Carnot-Gütegrade

Die Carnot-Leistungszahl bildet das theoretische Effizienzoptimum für den thermodynamischen Prozess der Wärmepumpe ab. Um von diesem Optimum auf eine reale Leistungszahl einer Wärmepumpe zu schließen, werden die Leistungszahlen der einzelnen Stunden, die in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Heizkurve berechnet werden, mit dem Carnot-Gütegrad von ausgewählten Beispielwärmepumpen multipliziert. Hierfür wurde der in Abbildung 13 dargestellte Lastgang zu Grunde gelegt. Der Carnot-Gütegrad ergibt sich aus dem Abgleich eines Leistungspunktes (COP) aus dem Datenblatt der Wärmepumpe mit der für den

⁸ Vgl. Ökobaudat Quellen-Datensatz: „Construction_Tabelle 50_Leckageraten_Entsorgungsverluste und Lebensdauern von Kältemitteln“, 2019

⁹ Umweltbundesamt (UBA): „EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase“, 2023, verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase#aktuelles, abgerufen am 21.12.2023

¹⁰ EU-Kommission: „Chemicals Strategy“, 2023, environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy_en, abgerufen am 21.12.2023

¹¹ Umweltbundesamt (UBA): „Auf umweltfreundliche Kältemittel umsteigen“, 2022, verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/themen/auf-umweltfreundliche-kaeltemittel-umsteigen, abgerufen am 20.12.2023

korrespondierenden Temperaturhub ermittelten Carnot-Leistungszahl und kann dadurch auch als Vergleichsgrundlage für alternative Wärmepumpen dienen.

Folglich dient der COP im angegebenen Betriebspunkt ausschließlich der Ermittlung des Carnot-Gütegrads (Maß der Effizienz ggü. dem idealen Carnot-Prozess). Dieser liegt i.d.R. zwischen 0,4 und 0,6¹². Niedrige Gütegrade zeigen eine geringere Effizienz der Wärmepumpe und demnach einen konservativen Ansatz.

Die in Tabelle 6 aufgeführten Gütegrade wurden mit Betriebspunkten aus Datenblättern typischer Wärmepumpen ermittelt. Für die leistungsstärkere Wärmepumpe wurden Betriebspunkte einer vorliegenden Anlagendimensionierung angesetzt. Die Wahl des Betriebspunkts zur Ermittlung des Gütegrads ist hinreichend vernachlässigbar. Vorteilhaft ist ein Betriebspunkt nahe dem häufigsten Betriebsfall. Dabei ist insbesondere die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Außenluft) und Wärmesenke (Heizwasser) von Relevanz.

Da sich der COP auf die Temperatur der Quellen- bzw. Senkenseite bezieht, werden die Grädigkeiten der Quellen- und Senkenseite berücksichtigt. Um den aktuellen Stand der Technik abzubilden, wurden ausschließlich Wärmepumpen mit invertergeregelten Verdichtern betrachtet.

Tabelle 6: Effizienzkennzahlen von Beispielwärmepumpen

Wärmepumpe	Leistungsbereich	COP	Kältemittel	Carnot-Gütegrad	Maximale Vorlauftemperatur
Höchste Effizienz	4-16 kW, Einfamilienhaus	3,83 (A-7/W35)	Propan (R290)	0,52	70 °C
Durchschnittliche Effizienz	3-11 kW, Einfamilienhaus	2,97 (A-7/W35)	Propan (R290)	0,41 ¹³	70 °C
Niedrige Effizienz	7-16 kW, Einfamilienhaus	2,80 (A-7/W35)	R410A (F-Gas)	0,38	58 °C
Durchschnittliche Effizienz	Bis 160 kW Mehrfamilienhaus	2,5 ¹⁴ (A-15/W40)	Propan (R290)	0,44	60 °C (ohne Booster)

Für das Einfamilienhaus wurden die Berechnungen standardmäßig mit der Wärmepumpe mit durchschnittlicher Effizienz durchgeführt. Die Wärmepumpen mit niedriger und höchster Effizienz wurden für Vergleichsrechnungen herangezogen. Für die Mehrfamilienhäuser wurde ausschließlich mit den Kennwerten einer

¹² Vgl. Arpagaus, C.; Hochtemperatur-Wärmepumpen, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2018, ISBN 978-3-8007-4550-0

¹³ Für dieselbe Leistungsklasse der Wärmepumpe ergeben sich für die weiteren Betriebspunkte A2/W35, A7/W35 und A-7/W55 höhere Carnot-Gütegrade (0,43, 0,47, 0,43). Der Punkt A-7/W35 ist folglich konservativ gewählt. Der Carnot-Gütegrad ist im jeweiligen Betriebspunkt u.a. abhängig von der Bauart des Verdichters.

¹⁴ Bei Wärmepumpen in dieser Leistungsklasse handelt es sich oftmals um Einzelanfertigungen. Der hier angegebene Betriebspunkt / COP wurde einer Anlagendimensionierung aus einem konkreten Bauvorhaben entnommen

Wärmepumpe mit mittlerer Effizienz gerechnet. Für Leistungen, die über die Werte der Tabelle hinausgehen, wird von einer Kaskadierung mehrerer Wärmepumpen des gleichen Typs ausgegangen.

Als Einsatzgrenze für einen monovalenten Betrieb einer Wärmepumpe im EFH wurde in nachfolgenden Berechnungen eine maximale Vorlauftemperatur von 70 °C angesetzt. Für die Mehrfamilienhäuser wurde die Grenze zum monovalenten und einstufigen Betrieb der Wärmepumpe mit 60 °C definiert. Diese Temperaturgrenzwerte bilden den aktuellen Stand der Technik und die zum Zeitpunkt der Berichtserstellung auf dem Markt verfügbaren Aggregate im jeweiligen Leistungsbereich ab. Für diese Grenzen wurden dezidiert Sanierungsszenarien erarbeitet.

Um Vorlauftemperaturen oberhalb der maximalen Vorlauftemperatur der derzeit am Markt verfügbaren Geräte abzubilden, wird im Einfamilienhaus ein Heizstab (Leistungszahl = 1) eingesetzt. Im Mehrfamilienhaus erfolgt die Bereitstellung von hohen Temperaturen mit einer Booster-Wärmepumpe in Kaskade mit Reihenschaltung. Um dies abzubilden wird eine zusätzliche Grädigkeit von 5 Kelvin angenommen. Dies resultiert in einem dann geringeren Carnot-Gütegrad von 0,41 statt 0,44 (vergleiche Tabelle 6).

Heizkurve

Die Carnot-Leistungszahl wird mit den Parametern Quell- (Außentemperatur) und Senkentemperatur (Vorlauftemperatur) berechnet. Für die Berechnung der außentemperaturabhängigen Systemeffizienz in den verschiedenen Betriebspunkten über ein Jahr wurde eine lineare Heizkurve hinterlegt. Diese wurde über die Fixpunkte Norm-Außentemperatur / reduzierte Vorlauftemperatur und 20°C Außentemperatur / 20°C Vorlauftemperatur gebildet (siehe Abbildung 14). Der Endpunkt bei 20°C/20°C wurde gewählt um die Heizkurve bei einer Heizgrenztemperatur von 15 °C abzubilden. In der Theorie kann mit zunehmendem Sanierungsgrad auch die Heizgrenztemperatur abgesenkt werden. In der Praxis wird in der Regel standardmäßig eine Heizgrenztemperatur von 15 °C hinterlegt¹⁵. In den verschiedenen Sanierungsstufen wurde daher keine Absenkung der Heizgrenztemperatur berücksichtigt. Folglich handelt es sich auch in diesem Kontext um eine „worst-case“ Betrachtung. Die Einsparpotenziale liegen theoretisch höher.

Bei Außentemperaturen kleiner oder gleich der Norm-Außentemperatur wird die reduzierte Vorlauftemperatur (vgl. S.12) angenommen. Für höhere Temperaturen berechnet sich die Vorlauftemperatur mit der Funktion der Heizkurve. Die Heizkurven des EFH-E sind beispielhaft in Abbildung 14 für die verschiedenen Sanierungsvarianten dargestellt. Abtauverluste wurden entsprechend aktueller Studienergebnisse vereinfacht mit einem pauschalen Faktor von 15% angesetzt.

¹⁵ Vgl. hierzu Albers, K et. Alii.: „Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik“, Hochschule Esslingen, 79. Auflage, 2019/2020, Seite 1395

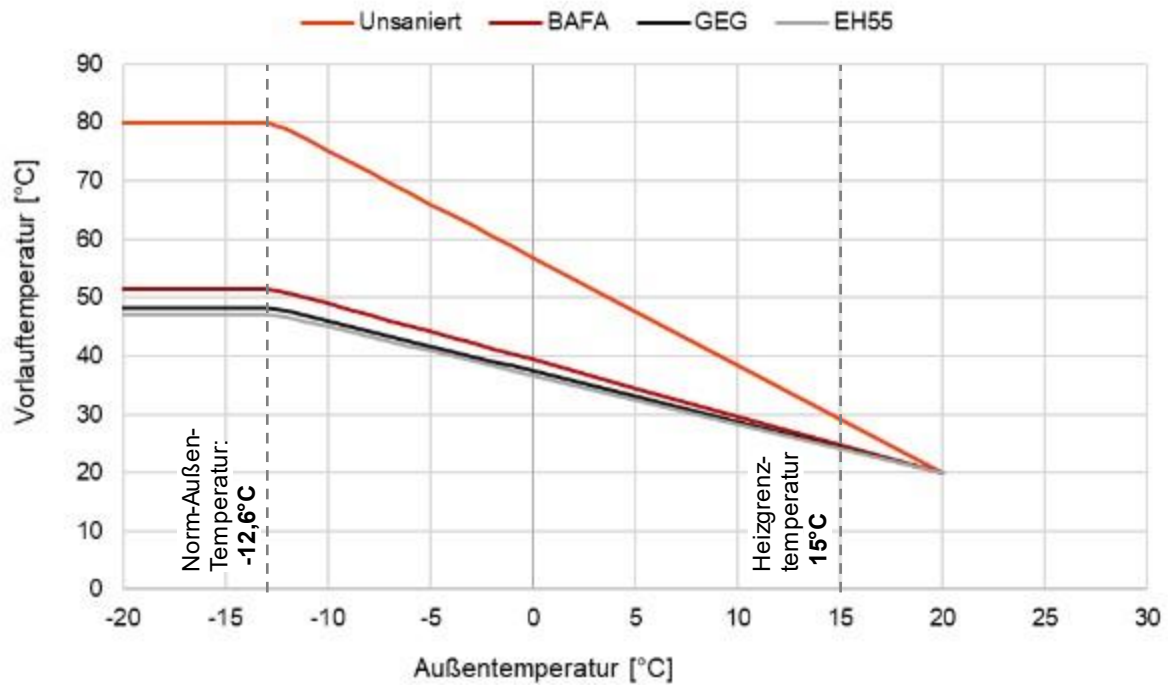


Abbildung 14: Außentemperaturgeführte Heizkurven am Beispiel EFH-E, eigene Darstellung

7. Berechnungsergebnisse und Diskussion

Schlechtraumbestimmung

Der Schlechtraum des EFH-E wurde bereits in Abbildung 10 mit dem Wohnraum im Erdgeschoss identifiziert. Die Schlechräume des MFH-E und des MFH-I sind in Abbildung 15 oben bzw. unten gekennzeichnet. Im MFH-E befindet sich der Schlechtraum im 1. Obergeschoss (OG) in Wohnung 5 und somit im „Kern“ des Gebäudes. In diesem Raum ist die Heizlast im unsanierten Zustand im Vergleich zu anderen Räumen verhältnismäßig gering. Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle wirken in Räumen mit einem hohen Flächenanteil an oberster Geschossdecke, Außenwand und Kellerdecke stärker. Andere Wohn- und Essräume im selben Stockwerk weisen ähnlich niedrige Heizlasten auf.

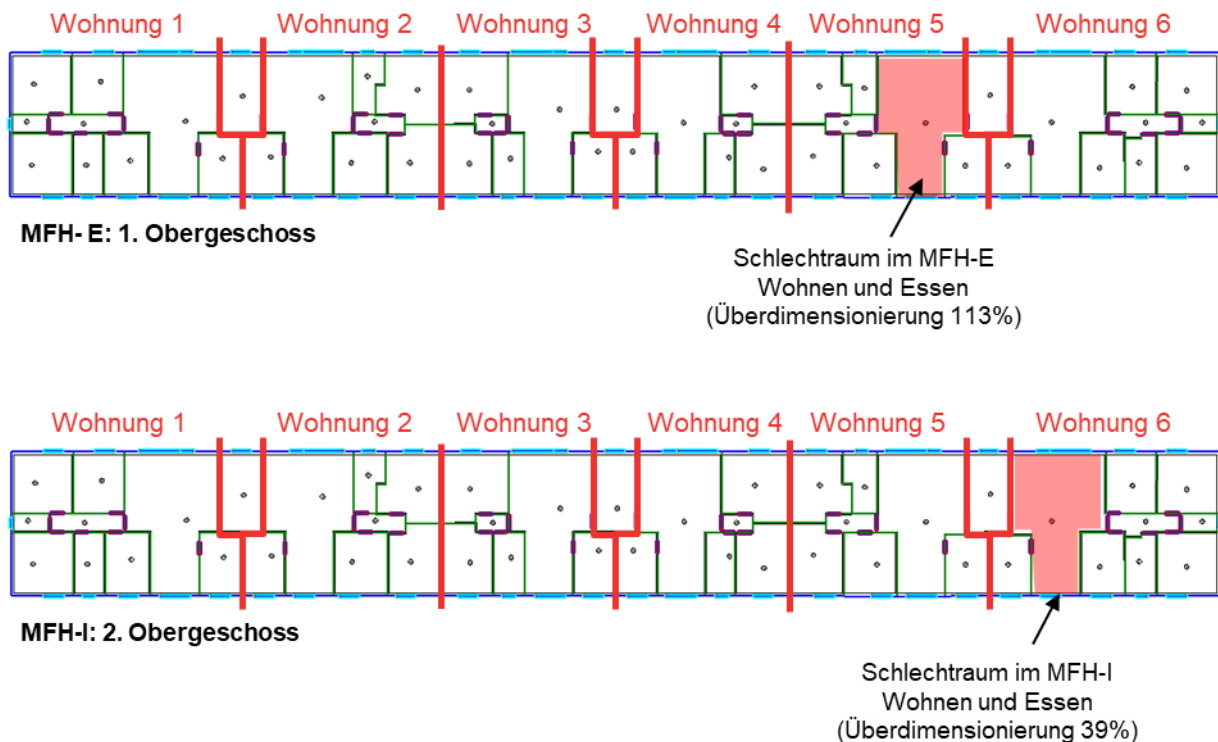


Abbildung 15: Schlechräume in MFH-E und MFH-I, eigene Darstellung

Der Schlechtraum des MFH-I liegt im 2. OG. Auch hier verhalten sich die weiteren Räume desselben Typs im Stockwerk ähnlich. Da der Wärmeübergang an der obersten Geschossdecke bei Sanierungsmaßnahmen aufgrund der im Bestand recht guten Hülle relativ betrachtet weniger optimiert wird, befindet sich der Schlechtraum hier nicht mehr im 1. Obergeschoss, sondern im obersten Stockwerk.

Heizlasten der Schlechräume

Tabelle 7 können die Heizlasten der Schlechräume in Abhängigkeit des Sanierungsstands entnommen werden. Die resultierende Überdimensionierung der bestehenden Heizkörper gegenüber der jeweiligen Heizlast ist jeweils in Klammern aufgeführt.

Tabelle 7: Heizlasten der Schlechträume

Gebäude, Stockwerk, Raum	Unsaniert (inst. Heizleistung)	Gesetzlicher Mindeststandard	BAFA-Förderung BEG EM	KfW-Förderung BEG EH55
EFH-E, EG, Wohnzimmer	2.550 W	1.176 W (117%)	1.036 W (146%)	975 W (160%)
MFH-E, 1.OG, Wohnen und Essen	2.520 W	1.407 W (79%)	1.272 W (98%)	1.183 W (113%)
MFH-I, 2.OG, Wohnen- und Essen	2.495 W	2.125 W (17%)	1.927 W (29%)	1.792 W (39%)

Einfamilienhaus Typ E - Vorlauftemperaturen und Jahresarbeitszahlen

Zunächst wurde das EHF-E betrachtet. Mit zunehmender Sanierung, also abnehmendem spezifischen Transmissionswärmeverlust H'_{τ} , wird die maximal notwendige Vorlauftemperatur reduziert. In Abbildung 16 sind die maximalen Vorlauftemperaturen (bei Norm-Außentemperatur) des EFH-E für das unsanierte Gebäude und die Sanierungsvarianten GEG, BAFA und EH 55 dargestellt. Das Verhalten lässt sich annähernd mit einer exponentiellen Abnahme der Vorlauftemperatur mit Abnahme des H'_{τ} abbilden.

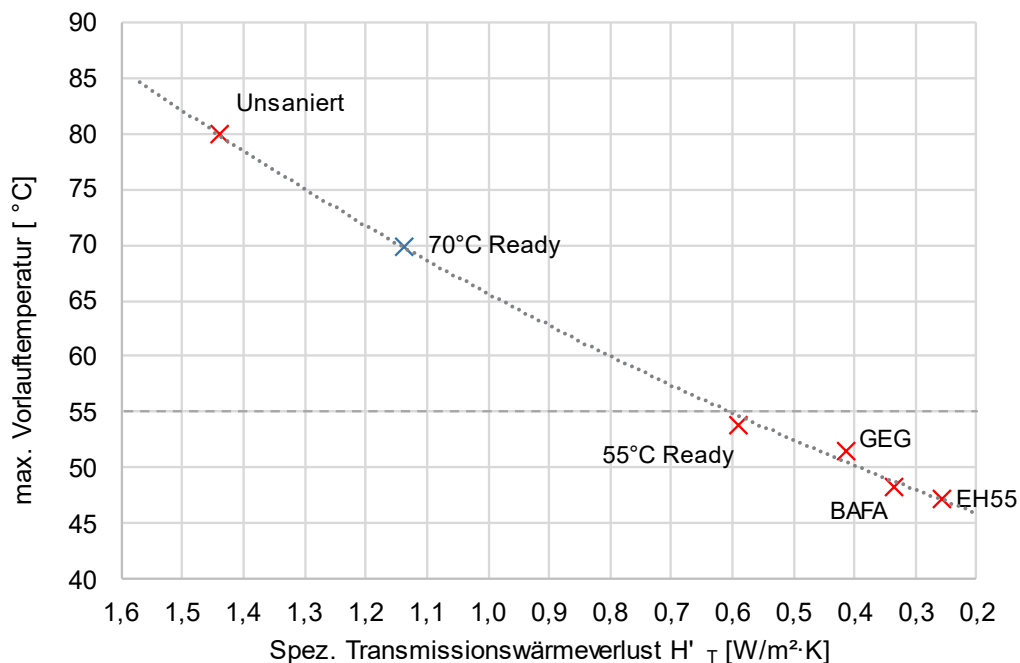


Abbildung 16: Resultierende Vorlauftemperaturen in Sanierungsvarianten EFH-E, eigene Darstellung

Eine Sanierung auf den GEG-Standard ermöglicht eine Vorlauftemperaturabsenkung um 28 °C auf unter 52 °C. Mit den weitergehenden Sanierungen auf BAFA- Einzelmaßnahmenförderung und EH55 Standard sind mit maximalen Vorlauftemperaturen von 48 °C bzw. 47 °C nur unwesentlich geringere Vorlauftemperaturreduzierungen im Vergleich zur GEG-Sanierung erreichbar.

Zusätzlich sind in Abbildung 16 die Fälle 70 °C-Ready und 55 °C-Ready dargestellt. Die Variante 55 °C-Ready greift die einleitend definierte Temperaturgrenze von 55 °C für Niedertemperaturfähigkeit auf. Diese ist bei einem H'_T von 0,59 W/m²·K erreicht. Die Einsatzgrenze zum alleinigen Betrieb der Wärmepumpe (Wegfall des Heizstabs) liegt bei den heute auf dem Markt verfügbaren Aggregaten in diesem Leistungsbereich bei einer Vorlauftemperatur von 70 °C. Diese ist bereits bei einem H'_T von 1,15 W/m²·K erreicht. Die spezifischen Transmissionswärmeverluste dieser Sanierungsvarianten sind beispielsweise mit den in Tabelle 8 für 55 °C und in Tabelle 9 für 70 °C dargestellten Dämmmaßnahmen erreichbar. Die Variante „Minstdämmung“ in Tabelle 8 stellt dabei den in den Berechnungen zu Grunde gelegten Sanierungsfall dar, in dem alle Außenbauteile so optimiert werden, dass der H'_T von 0,59 W/m²·K knapp erreicht wird. Die weiteren Varianten erreichen den identischen H'_T durch den Fokus auf andere Bauteile. Für das Erreichen einer Vorlauftemperatur von 70 °C reichen Eingriffe an wenigen Bauteilen aus.

Tabelle 8: U-Werte zum Erreichen einer Vorlauftemperatur von 55°C im EFH-E

Bauteil	GEG (Vergleichswert)	55 °C-Ready (Ohne Kellerdecke)	55 °C-Ready (Minstdämmung)	55 °C-Ready (Ohne Fenster)
Außenwand	0,24 W/m ² ·K (14 cm)	0,20 W/m ² ·K (18 cm)	0,35 W/m ² ·K (10 cm)	0,20 W/m ² ·K (18 cm)
Oberste Geschossdecke	0,24 W/m ² ·K (16 cm)	0,14 W/m ² ·K (26 cm)	0,35 W/m ² ·K (10 cm)	0,14 W/m ² ·K (26 cm)
Kellerdecke	0,30 W/m ² ·K (10 cm)	Keine Sanierung	0,45 W/m ² ·K (5 cm)	0,25 W/m ² ·K (12 cm)
Fenster	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	0,95 W/m ² ·K (3-WSG)	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	Keine Sanierung

Tabelle 9: U-Werte zum Erreichen einer Vorlauftemperatur von 70°C im EFH-E

Bauteil	GEG (Vergleichswert)	70 °C-Ready (Wand & Fenster)	70 °C-Ready (Oberste Geschossdecke)
Außenwand	0,24 W/m ² ·K (14 cm)	0,50 W/m ² ·K (6 cm)	Keine Sanierung
Oberste Geschossdecke	0,24 W/m ² ·K (16 cm)	Keine Sanierung	0,50 W/m ² ·K (6 cm)
Kellerdecke	0,30 W/m ² ·K (10 cm)	Keine Sanierung	Keine Sanierung
Fenster	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	Keine Sanierung

Hier und auch folgend wurden die Dämmstärken in den Sanierungsvarianten beispielhaft mit WLS040 berechnet. Dies entspricht einer durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit. Des Weiteren wurde ein

Wärmebrückenzuschlag von $0,10 \text{ W/m}^2\text{-K}$ bei allen Varianten angesetzt. Als Luftdurchlässigkeit wurde Kategorie C angenommen. Es handelt sich um Annahmen, die für ein Bestandsgebäude realistisch umsetzbar sind. Nicht aufgeführte Bauteile wie z. B. Haustüren bleiben unsaniert. Grundsätzlich wären theoretisch unzählige weitere U-Wert-Kombinationen möglich; die hier gewählten erscheinen dem Ersteller realistisch und sinnvoll.

Wie bereits in Abbildung 16 dargestellt, besteht ein Zusammenhang zwischen dem spezifischen Transmissionswärmeverlust und der Vorlauftemperatur. Die Vorlauftemperatur ist in Zusammenhang mit der Heizkurve wiederum maßgebend für die Jahresarbeitszahl. Nachfolgend ist auf der Abszisse (X-Achse) stellvertretend für den spezifischen Transmissionswärmeverlust die maximale Vorlauftemperatur dargestellt.

Die Ergebnisse der Berechnungen für das EFH-E sind in Abbildung 17 dargestellt. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf eine Wärmepumpe mit durchschnittlicher Effizienz. Mit Abnahme der maximal notwendigen Vorlauftemperatur erhöht sich die Jahresarbeitszahl. Folglich führt die deutliche Vorlauftemperaturabsenkung bei einer Sanierung auf GEG-Standard zu einer Verbesserung der Jahresarbeitszahl um über 1 (von 2,75 zu 3,75). Die Jahresarbeitszahlen bei den noch umfassenderen Sanierungen BAFA und EH 55 liegen bei 3,90 und 3,95.

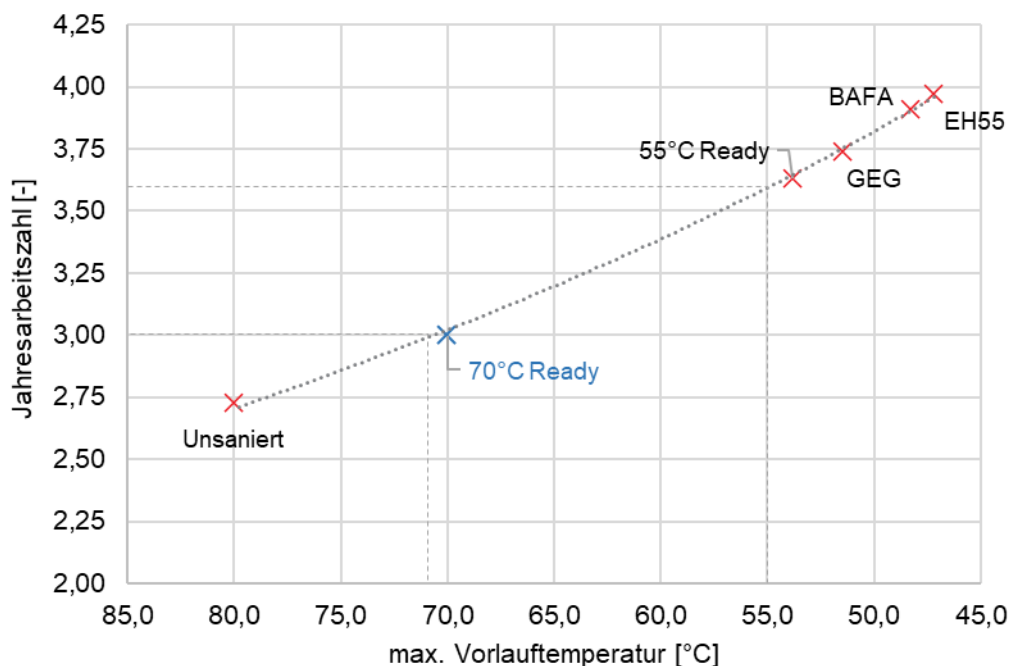


Abbildung 17: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei Vorlauftemperaturabsenkung im EFH-E, eigene Darstellung

Im unsanierten Zustand wird die Wärmepumpe bei hohen Vorlauftemperaturen durch einen Heizstab unterstützt. Bei einer maximalen Vorlauftemperatur von $70 \text{ }^\circ\text{C}$, der aktuellen technischen Grenze für den alleinigen Einsatz der Wärmepumpe im EFH, beträgt die Jahresarbeitszahl 3,00. Wird eine Sanierung zum Erreichen von Niedertemperaturfähigkeit ($55 \text{ }^\circ\text{C Ready}$) durchgeführt, lässt sich eine Jahresarbeitszahl von 3,65 erreichen.

Ein Heizstab stellt einen sinnvollen Spitzenlasterzeuger dar, der für hohe, aber sehr selten auftretende Lastspitzen vorgehalten wird. Beispielweise besteht bereits eine Diskrepanz zwischen der Norm-Außentemperatur von $-12,6\text{ °C}$ und der minimalen Außentemperatur im Temperaturprofil von $-8,3\text{ °C}$, d.h. bei einer Einsatzgrenze für den Heizstab von $-8,3\text{ °C}$ würde dieser faktisch nicht betrieben werden. Die Auswirkung des Heizstabs auf die Jahresarbeitszahl ist aufgrund der sehr geringen Betriebszeit während niedrigster Außentemperaturen, die ohnehin zu einem ineffizienteren Betrieb der Wärmepumpe führen, gering. Mit sukzessiver Sanierung kann der Heizstab, bzw. auch andere Zusatzsysteme entfallen.

Der bivalente Betrieb von Wärmepumpe und Heizstab wird in Abbildung 18 verdeutlicht. Die Abbildung zeigt den Heizleistungs-Bedarf (rot) und den elektrischen Leistungsbedarf der Wärmepumpe (grau) sowie des Heizstabs (grün) für Außentemperaturen von -10 °C bis 20 °C . Auf der Sekundärachse ist die Leistungszahl in der Kombination aus Wärmepumpe und Heizstab aufgetragen. Die Abbildung bezieht sich auf die Wärmepumpe mit niedriger Effizienz (Tabelle 6) und das unsanierte EFH-E, da der Heizstab in diesem Fall die größte Leistung bereitstellt. Um eine praxisnahe Leistungsdimensionierung abzubilden, wurde angenommen, dass Temperaturhübe zwischen Außentemperatur und Vorlauftemperatur bis einschließlich 58 °C allein von der Wärmepumpe bereitgestellt werden. Übersteigt der Temperaturhub 58 °C wird der verbleibende Temperaturhub über den Heizstab geleistet.

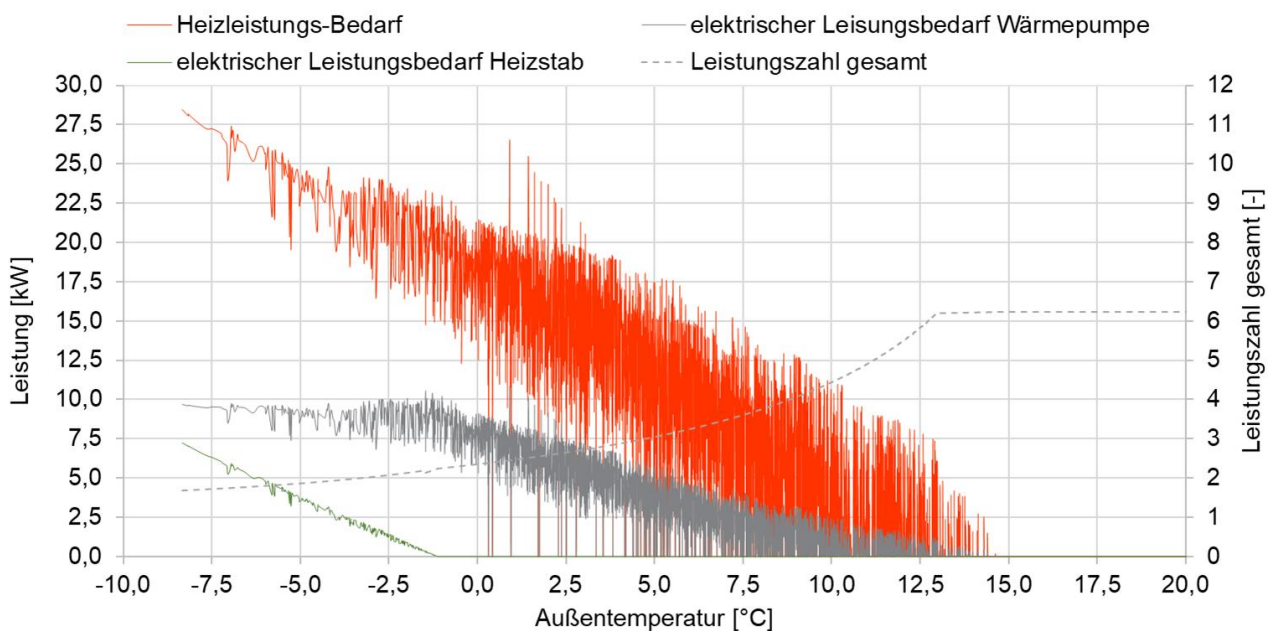


Abbildung 18: Bivalenter Wärmepumpenbetrieb mit Heizstab am Beispiel EFH-E unsaniert

In der Abbildung wird ersichtlich, dass die Wärmepumpe ab einer Außentemperatur von ca. -1 °C unterstützt wird. Bei niedrigeren Temperaturen nimmt die elektrische Leistungsaufnahme des Heizstabs linear zu, während die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe stagniert. Bei höheren Außentemperaturen erfolgt die Wärmeerzeugung ausschließlich mit der Wärmepumpe.

Die Jahresarbeitszahl steigt mit steigender Außentemperatur exponentiell. Dies ist auf die gleichzeitig sinkende Vorlauftemperatur nach Heizkurve (Senktemperatur) und die steigende Außentemperatur

zurückzuführen (Quelltemperatur). Ab Einsatz des Heizstabs ist kein deutlicher Sprung erkennbar, d.h. im Vergleich zu einer monovalenten Betriebsweise werden keine erheblich schlechteren Jahresarbeitszahlen erzielt.

Im Vergleich zu nachfolgend berechneten Kennwerten erscheinen die hier dargestellten Arbeitszahlen von beispielsweise ca. 2,5 bei einer Außentemperatur von 0 °C vergleichsweise niedrig. Dies ist auf die hier ange-setzte Wärmepumpe mit im Marktvergleich geringer Effizienz und die ungünstigen Betriebsbedingungen beim unsanierten EFH-E zurückzuführen.

In Abhängigkeit von der ausgewählten Wärmepumpe ergibt sich eine Spannweite für die Effizienz von derzeit am Markt verfügbaren Wärmepumpen. In Abbildung 19 ist diese beispielhaft auf Basis der Kennzahlen von aktuell verfügbaren Aggregaten dargestellt.

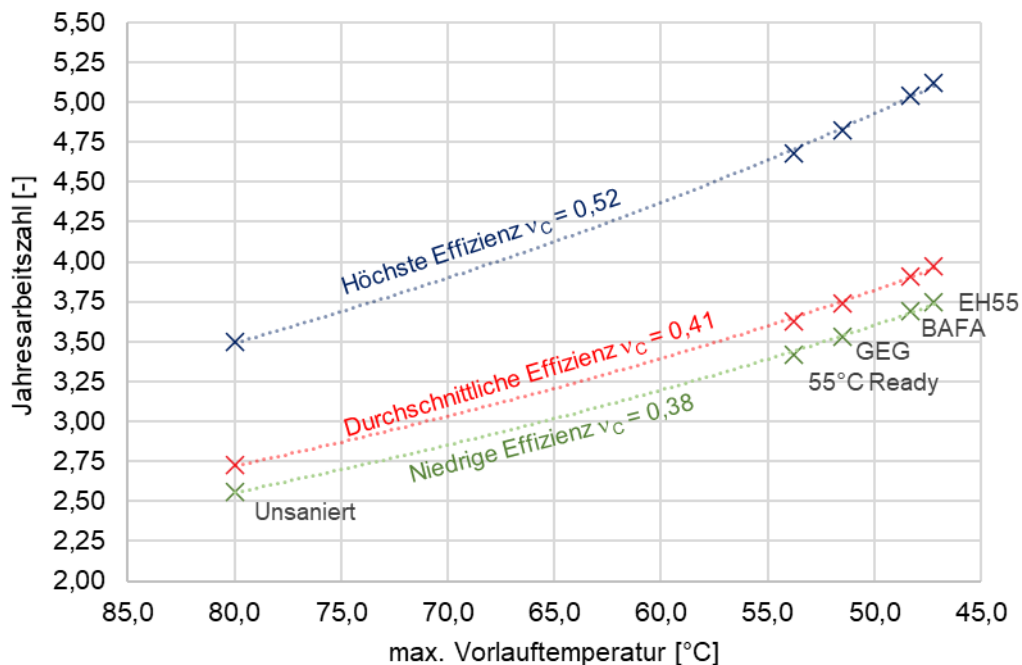


Abbildung 19: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei verschiedenen Vorlauftemperaturen für unterschiedlich effiziente Wärmepumpen am Beispiel des EHF-E, eigene Darstellung

Während die Jahresarbeitszahl im unsanierten Zustand bei einer Wärmepumpe mit niedriger Effizienz bei 2,55 liegt, lässt sich mit einer Wärmepumpe der höchsten Effizienz im selben Betriebspunkt bereits eine Jahresarbeitszahl von 3,50 erreichen. Dies ist auf den besseren COP (genauer: Carnot-Gütegrad) und höhere Temperatureinsatzgrenzen zurückzuführen.

Mehrfamilienhaus Typ E - Vorlauftemperaturen und Jahresarbeitszahlen

Nachfolgend werden in Abbildung 20 die Vorlauftemperaturen bei Norm-Auslegungstemperatur für die Sanierungsvarianten des MFH-E dargestellt. Analog zum EFH-E gilt, dass durch eine zunehmende Sanierung (geringerer spezifischer Transmissionswärmeverlust H'_T) die maximal notwendige Vorlauftemperatur deutlich reduziert werden kann. Im ungedämmten MFH-E wird die schlechte Dämmung durch hohe Heizleistungen kompensiert. Die bei Sanierung im Verhältnis zu den Heizlasten hohen Heizleistungen ermöglichen eine deutliche Reduzierung der Vorlauftemperatur.

Bei Sanierung auf GEG-Standard ($H'_T = 0,45 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) resultiert eine Vorlauftemperatur von unter $57 \text{ }^\circ\text{C}$. Die 55°C -Grenze wird mit einer BAFA-Sanierung ($H'_T = 0,35 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, Vorlauftemperatur = $54 \text{ }^\circ\text{C}$) und bei einer Sanierung auf EH-55 Standard ($H'_T = 0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; Vorlauftemperatur = $52 \text{ }^\circ\text{C}$) unterschritten.

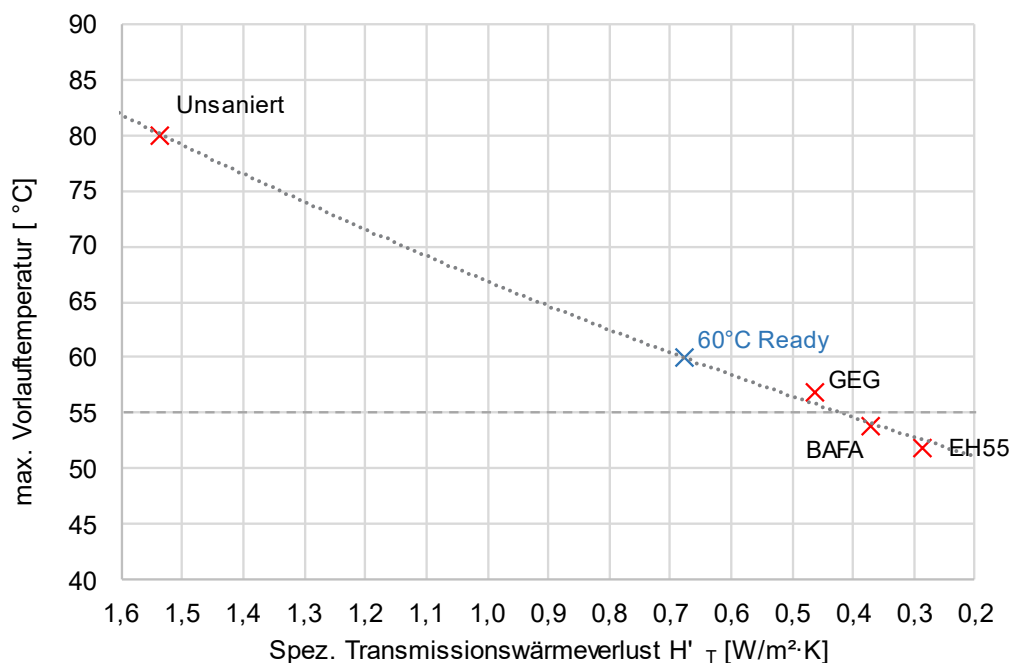


Abbildung 20: Resultierende Vorlauftemperaturen in Sanierungsvarianten MFH-E, eigene Darstellung

Bei den im Vergleich zum EFH höheren Leistungen wird die Grenze zum alleinigen Einsatz einer einstufigen Wärmepumpe bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ in Anlehnung an Tabelle 6 angenommen. Unterhalb der $60 \text{ }^\circ\text{C}$ Grenze entfällt die Booster-Wärmepumpe als zweite Stufe. Um dies abzubilden, wird der synthetische Sanierungsfall $60 \text{ }^\circ\text{C}$ -Ready eingeführt, für den sich aus der Trendlinie ein spezifischer Transmissionswärmeverlust von $0,68 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ergibt. Dazu sind in Tabelle 10 beispielhaft Maßnahmen dargestellt.

Tabelle 10: U-Werte zum Erreichen einer Vorlauftemperatur von 60 °C im MFH-E

Bauteil	GEG (Vergleichswert)	60 °C-Ready (Ohne Kellerdecke)	60 °C-Ready (Ohne Fenster)
Außenwand	0,24 W/m ² ·K (14 cm)	0,35 W/m ² ·K (10 cm)	0,24 W/m ² ·K (14 cm)
Oberste Geschossdecke	0,24 W/m ² ·K (16 cm)	0,50 W/m ² ·K (6 cm)	0,20 W/m ² ·K (18 cm)
Kellerdecke	0,30 W/m ² ·K (10 cm)	Keine Sanierung	0,45 W/m ² ·K (5 cm)
Fenster	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	1,30 W/m ² ·K (2-WSG)	Keine Sanierung

In Abbildung 21 sind die ermittelten Jahresarbeitszahlen für das MFH-E dargestellt. Analog zum EFH ist auch hier bereits bei einer Sanierung auf GEG eine deutliche Verbesserung der Jahresarbeitszahl von 2,75 auf 3,80 möglich. Mit Sanierungen auf BAFA bzw. EH 55 Standard lassen sich Jahresarbeitszahlen von 3,95 bis 4,05 erreichen.

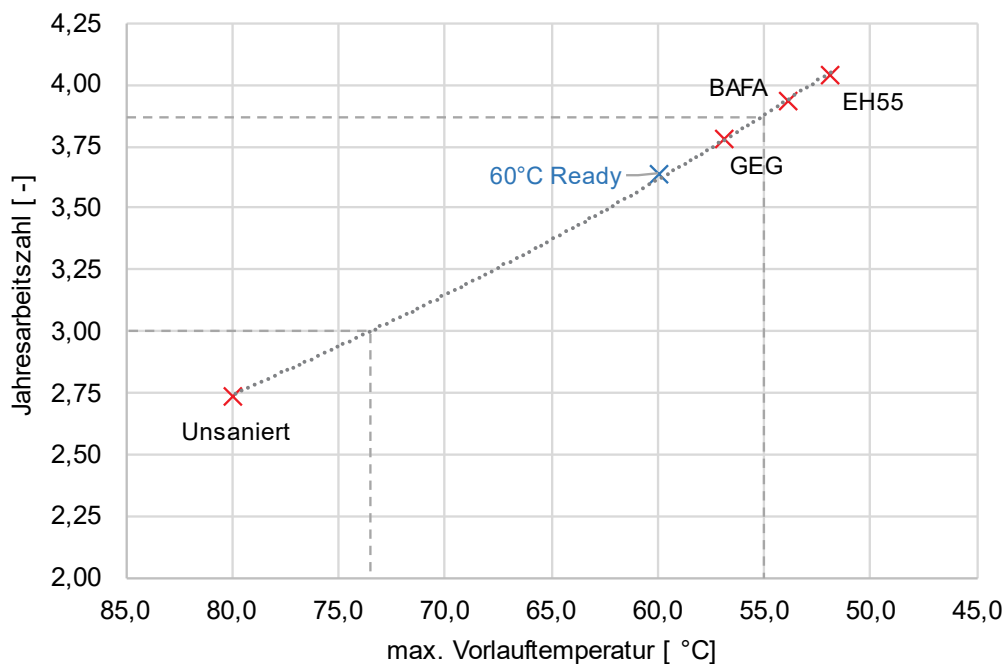


Abbildung 21: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei Vorlauftemperaturabsenkung im MFH-E, eigene Darstellung

Im unsanierten Zustand werden hohe Vorlauftemperaturen zweistufig erreicht, weshalb die Jahresarbeitszahl aufgrund der zusätzlichen Grädigkeit geringer ist. Bei einer 60 °C Ready Sanierung, also der Grenze für einen einstufigen Einsatz einer Wärmepumpe in diesem Leistungsbereich, liegt die Jahresarbeitszahl bei 3,65. Bei einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C liegt die Jahresarbeitszahl bei 3,90.

Mehrfamilienhaus Typ I - Vorlauftemperaturen und Jahresarbeitszahlen

Im MFH-I liegen die spezifischen Transmissionswärmeverluste im Vergleich zum MFH-E bereits im unsanierten Zustand deutlich niedriger. Da die Heizleistung über die Heizlast im unsanierten Zustand berechnet wurde, ist auch diese im MFH-I deutlich geringer. Die bereits im Ausgangszustand vorhandene Dämmung resultiert in geringeren Heizleistungen (kleineren Heizkörpern) bei hohen Vorlauftemperaturen. Mit 70 °C liegt diese noch 10 °C höher als analog beim selben H'_T im MFH-E. Die Vorlauftemperaturen (bei Norm-Auslegungstemperatur) der Sanierungsvarianten für das MFH-I sind in Abbildung 22 dargestellt.

Während die 60 °C Grenze zum alleinigen Einsatz einer Wärmepumpe annähernd bei BAFA-Sanierung erreicht ist, ist die 55 °C Grenze auch bei einer umfassenden EH 55 Sanierung mit 58 °C nicht erreicht. Sanierungen wirken sich auch hier stark auf die Vorlauftemperaturen aus, dennoch ist die Wirksamkeit im Vergleich zum MFH-E geringer.

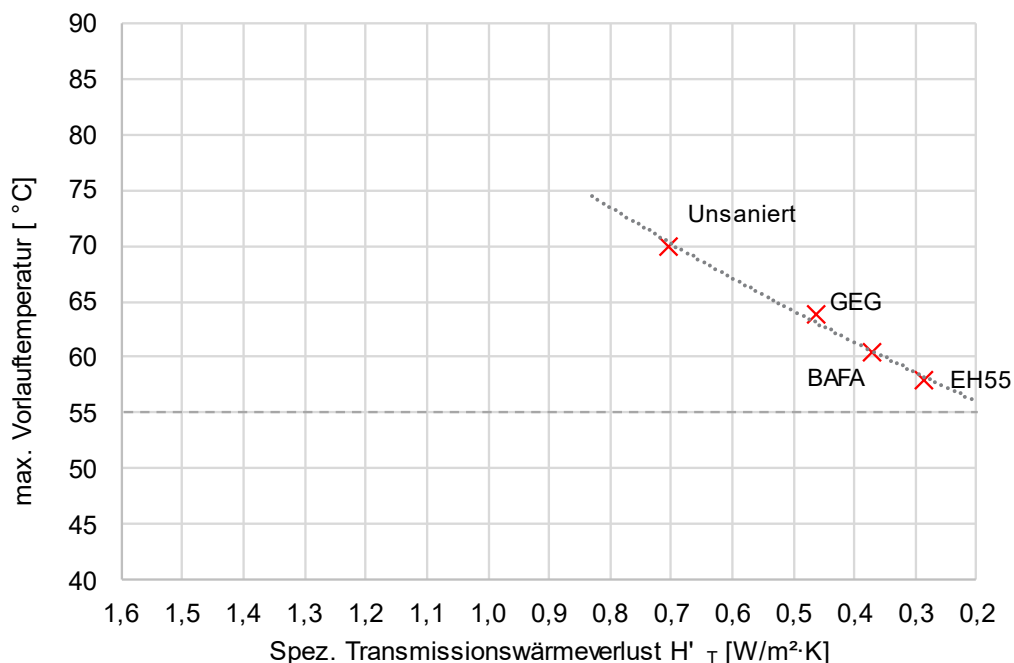


Abbildung 22: Resultierende Vorlauftemperaturen in Sanierungsvarianten MFH-I, eigene Darstellung

In Abbildung 23 sind die Jahresarbeitszahlen für das MFH-I dargestellt. Im Vergleich zum MFH-E sind diese im unsanierten Zustand mit 3,00 um 0,30 besser. Die Steigerung der Jahresarbeitszahl bzw. die Wirksamkeit einer Sanierung auf GEG-Standard ist hingegen aufgrund der bei gleichem Dämmstandard geringeren Heizleistung geringer. Im GEG-Standard liegt die Jahresarbeitszahl im MFH-I bei 3,50, also unter der des MFH-E bei gleicher Dämmung.

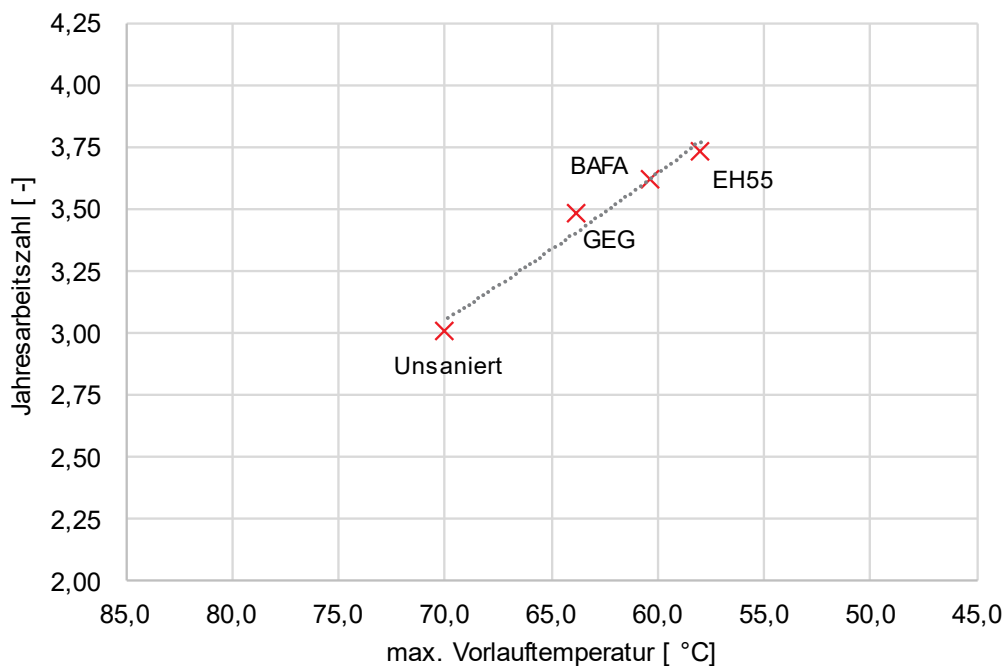


Abbildung 23: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei Vorlauftemperaturabsenkung im MFH-I, eigene Darstellung

Während die Jahresarbeitszahl bereits im unsanierten Zustand über 3 liegt, liegt die Vorlauftemperatur auch bei einer umfassenden EH55 Dämmung über 55 °C.

Im Vergleich zum MFH-E ist der Transmissionswärmeverlust beim MFH-I im unsanierten Zustand geringer. Dennoch ist die Effizienz der Wärmeerzeugung aufgrund der geringeren installierten Heizleistung (kleinere Heizkörper) bei Sanierung schlechter. Das maßgebliche Verhältnis von Heizleistung zu Heizlast ist im MFH-I aufgrund der kleineren Heizleistung hin zu geringerer Effizienz verschoben. Der wesentliche Hebel zur Effizienzsteigerung liegt folglich in der Vergrößerung der Heizflächen (Heizkörper).

Exkurs: Grundlegende Prämissen für den effizienten Betrieb von Wärmepumpen

In Feldstudien der jüngeren Vergangenheit lagen die gemessenen Jahresarbeitszahlen teils deutlich unterhalb der hier theoretisch ermittelten Kennwerte¹⁶. Ursächlich hierfür ist insbesondere, dass es sich bei den bestehenden Wärmepumpen in der Regel noch um ältere, ineffizientere und teils noch nicht invertergeregelte Aggregate mit niedrigeren maximalen Vorlauftemperaturen handelt, die noch nicht mit natürlichen Kältemitteln betrieben werden. Zudem ist zum Erreichen guter Jahresarbeitszahlen eine korrekte hydraulische Einbindung sowie Parametrierung der Regelung entscheidend. Auf Folgendes ist dabei besonders Rücksicht zu nehmen:

- Der Temperaturhub ist möglichst gering zu halten (angepasste Herzkurve)

¹⁶ Vgl. z.B. Günther et al.: „WPSmart im Bestand“, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2020

- Die Leistungsregelung der Wärmepumpe sollte nicht, wie derzeit in der Praxis häufig üblich, auf Basis einer konstanten Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf erfolgen – stattdessen sollte der Leistungsbedarf rechnerisch auf Basis des gemessenen Massenstroms, der gemessenen Rücklauf-temperatur und der Soll-Vorlauf-temperatur ermittelt werden
- Wenn zwei Wärmepumpen in Verbindung mit Heizkörpern eingesetzt werden, ist es vorteilhaft die Wärmepumpen in Reihe und nicht parallel zu verschalten – Heizkörper haben im Auslegungsfall meist eine Spreizung von 15 – 20 K zwischen Vor- und Rücklauf. Wärmepumpen schaffen, aufgrund ihres Mindestmassenstroms eine Spreizung von ca. 5 K bei Maximalleistung. Wenn zwei Wärmepumpen in Reihe verschaltet werden, kann eine Spreizung von 10 K erreicht werden. Bei paralleler Verschaltung wären hier nur 5 K möglich. Daher sind die Massenströme auf der Wärmepumpenseite und der Verbraucherseite bei Reihenschaltung besser aufeinander abgestimmt
- Der Mindestmassenstrom der Wärmepumpe ist bei der Planung und Auslegung im Kontext der Verbrauchereinheit zu beachten
- Eine Einrohrheizung ist aufgrund des konstanten Massenstroms auf der Verbraucherseite gut geeignet für den Einsatz von Wärmepumpen – der Massenstrom über den Pufferspeicher ist konstant und dient damit als gute Dimensionierungsgrundlage

Exkurs: Niedertemperaturfähigkeit durch Heizleistungs-Anpassung

In den oben beschriebenen Analysen zur Effizienz der Wärmeerzeugung wurde die installierte Heizleistung als konstant angenommen. Das für die Vorlauftemperatur maßgebliche Verhältnis von Heizleistung zu Heizlast wird darin durch Verringerung der Heizlast in Form von Dämmmaßnahmen beeinflusst. Das Verhältnis kann allerdings auch durch eine Vergrößerung der Heizleistung in Form eines Heizkörperaustauschs oder durch eine Kombination aus Heizleistungserweiterung und Heizlastverringerung (Dämmung und Heizkörperaustausch) angepasst werden. So würde sich auch im MFH-I die Niedertemperaturfähigkeit erreichen lassen. Generell ist der Heizkörperaustausch auch in den anderen Gebäudetypen möglich. Da sich in den weiteren Gebäudetypen geringe maximale Vorlauftemperaturen allerdings bereits durch geringfügige Dämmmaßnahmen auch ohne einen Heizkörperaustausch erreichen lassen, ist die Option des Heizkörperaustauschs primär für den Typ MFH-I von Relevanz. Größere Heizleistungen bei gleichbleibender Vorlauftemperatur können durch eine Vergrößerung der Heizfläche (größere Heizkörper) oder/und durch erzwungene Konvektion (z.B. Ventilatorkonvektoren) erreicht werden.

In Abbildung 24 ist die Heizlast des Schlechtraums mit einer roten Säule und die Heizleistung der Bestands-Heizkörper bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C mit einer grauen Säule für die verschiedene Sanierungsvarianten dargestellt. Die Differenz zwischen Heizlast und Heizleistung zeigt die erforderliche Leistungserweiterung des Heizkörpers bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C auf, die zur Deckung der Heizlast notwendig ist.

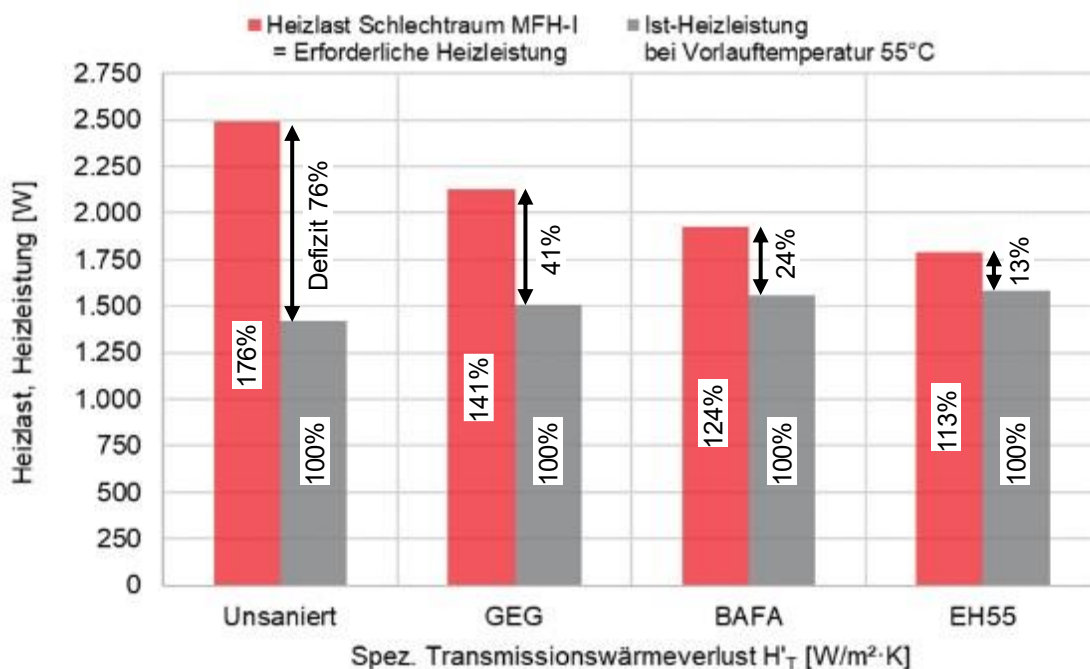


Abbildung 24: Erforderliche Heizleistungen im MFH-I für Niedertemperaturfähigkeit, eigene Darstellung

Die Heizlast des Raums nimmt mit zunehmender Sanierung ab, während gegensätzlich die Heizleistung bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C steigt. Der Anstieg der Heizleistung ist auf höhere Rücklauftemperaturen zurückzuführen, die sich bei konstanten Massenströmen ergeben und zu einer höheren Mitteltemperatur

führen (vgl. Kapitel 5). Um die Heizlasten der Räume im unsanierten MFH-I bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C abzudecken, ist die Heizleistung um 76% zu erweitern. Wird zusätzlich auch die Gebäudehülle optimiert, sind die Heizleistungen um 41% (GEG), 24% (BAFA) bzw. 13% (EH55) zu erweitern. Die Erweiterung von Heizleistungen wurde beispielhaft am Gebäudetyp MFH-I bewertet, stellt aber eine über alle Gebäudetypen global gültige Maßnahme zur Reduktion der Vorlauftemperatur dar. Die Jahresarbeitszahl bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C beträgt 3,90.

Exkurs: Erzeuger-Nutzenergie

Abgesehen von der Effizienzsteigerung der Wärmepumpe hat eine Verbesserung der Gebäudehülle eine absolute Reduktion der Heizlast sowie des Erzeuger-Nutzenergiebedarfs zur Folge. Die Erzeuger-Nutzenergie ist die Energie, die nach Umwandlungsprozessen vom Erzeuger dem Heizsystem zugeführt wird. Verluste im Gebäude sind damit berücksichtigt. In den Abbildungen 25 bis 27 ist dieser Zusammenhang für alle drei Beispieltypen und die drei ursprünglichen Sanierungsvarianten dargestellt.

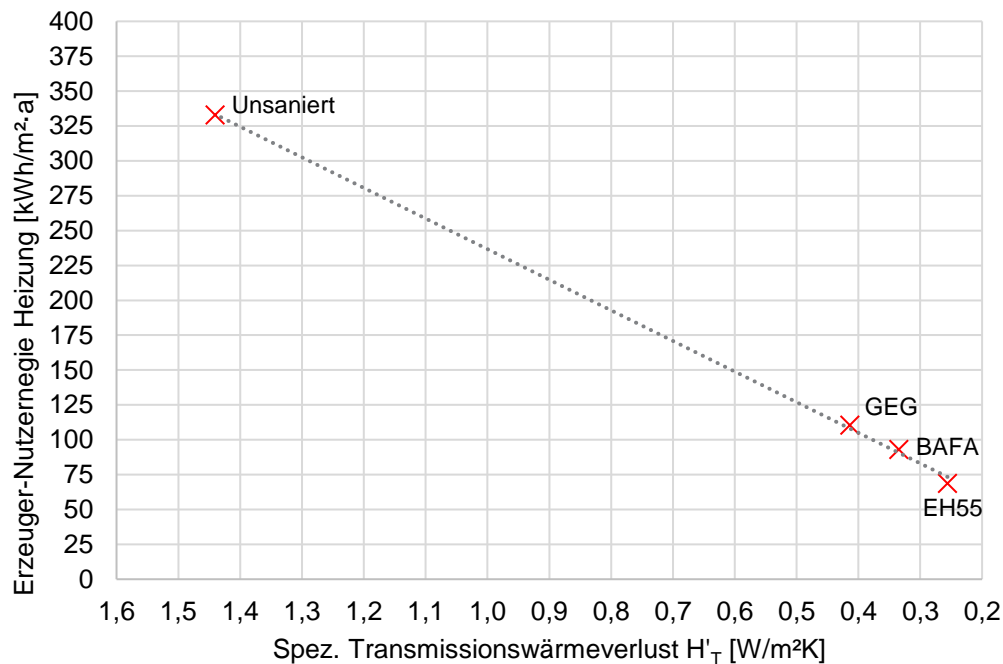


Abbildung 25: Erzeuger-Nutzenergie im Sanierungsverlauf beim EFH-E, eigene Darstellung

Das EFH-E hat im unsanierten Zustand ein H_T von 1,45 W/m²K und einen spezifischen Erzeuger-Nutzenergiebedarf von 333 kWh/a·m². Dieser sinkt mit zunehmender Sanierung der Gebäudehülle annähernd linear ab. Nach der Sanierung nach GEG liegt H_T bei 0,40 W/m²K und der Erzeuger-Nutzenergiebedarf bei 111 kWh/a·m², nach den BAFA-Einzelmaßnahmen bei 0,35 W/m²K bzw. 93 kWh/a·m² und beim EH55 Standard bei 0,25 W/m²K bzw. 69 kWh/a·m².

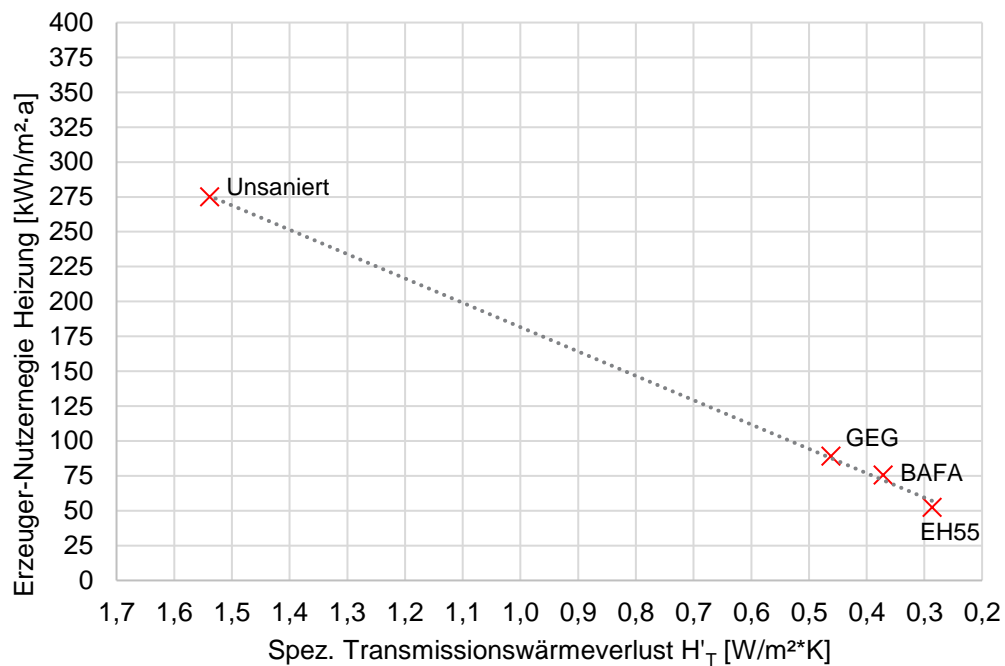


Abbildung 26: Erzeuger-Nutzenergie im Sanierungsverlauf beim MFH-E, eigene Darstellung

Obwohl das MFH-E im Vergleich zum EFH-E im unsanierten Zustand einen etwas schlechteren H'_T -Wert von $1,54 \text{ W/m}^2\text{K}$ hat, weist es aufgrund des besseren A/V-Verhältnisses einen geringeren spezifischen Erzeuger-nutzenergiebedarf von $275 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$ auf. Nach der Sanierung nach GEG liegt H'_T bei $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ und der Erzeuger-Nutzenergiebedarf bei $89 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$, nach den BAFA-Einzelmaßnahmen bei $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ bzw. $76 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$ und beim EH55 Standard bei $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ bzw. $52 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$.



Abbildung 27: Erzeuger-Nutzenergie im Sanierungsverlauf beim MFH-I, eigene Darstellung

Der Verlauf beim Beispielgebäude MFH-I ist identisch zu dem des MFH-E in Abbildung 26. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass der unsanierte Zustand bereits besser gedämmt ist und der Startwert für H_T dementsprechend bei $0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für den Erzeuger-Nutzenergiebedarf bei $129 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$ liegt.

Abbildung 28 zeigt, dass in der Folge der Reduktion des Erzeuger-Nutzenergiebedarfs durch Sanierungsmaßnahmen auch der Endenergiebedarf signifikant absinkt. Im hier betrachteten Fall der Nutzung einer Wärmepumpe entspricht der Endenergiebedarf dem Strombedarf. Dieser ergibt sich aus dem Quotienten aus Erzeuger-Nutzenergiebedarf und der Jahresarbeitszahl. Der Strombedarf ist ausschlaggebend für die Emissionen im Betrieb, für den Primärenergiebedarf und damit korrelierend dem Flächenbedarf zur Bereitstellung von regenerativem Strom sowie den Betriebskosten.

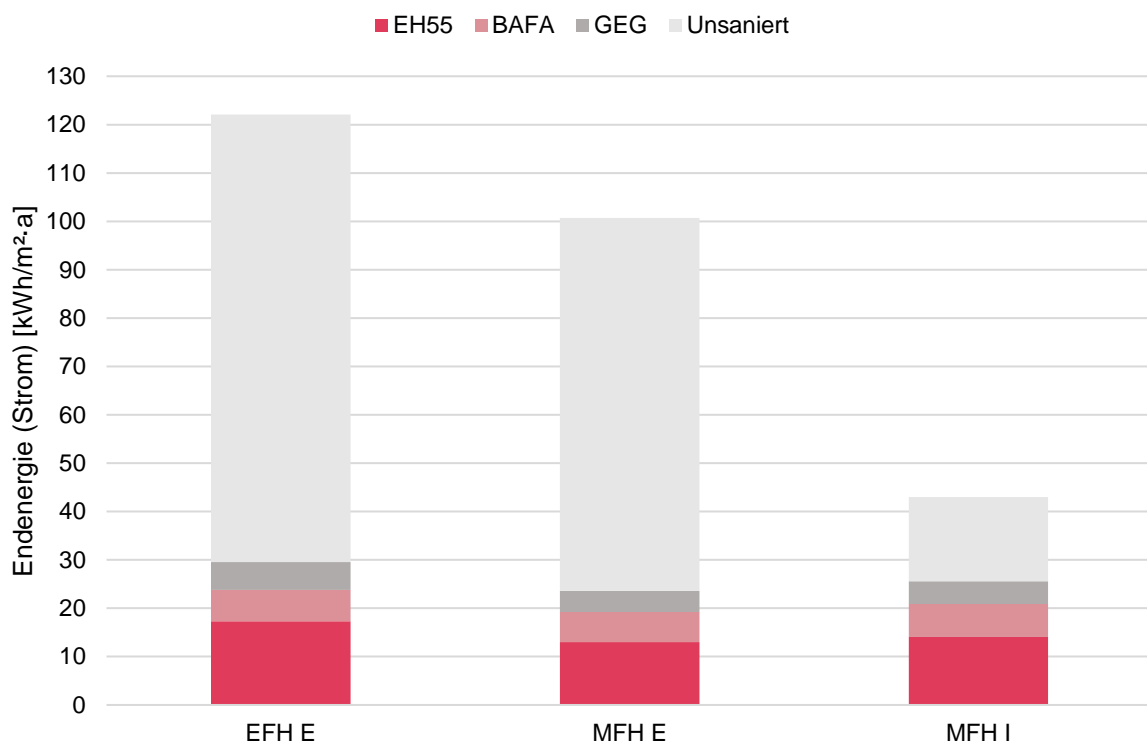


Abbildung 28: Vergleich Endenergiebedarf MFH-E und MFH-I, eigene Darstellung

Im EFH-E und MFH-E sind bereits die Sanierungen auf den GEG-Standard hochwirksam und führen zu einer Reduzierung des Endenergiebedarfs um ca. 75%. Auch im MFH-I lässt sich mit einer Sanierung auf GEG-Standard eine deutliche Reduzierung um ca. die Hälfte des Strombedarfs erreichen. Aufgrund der höheren Effizienz durch die größeren Heizkörperflächen ist der Endenergiebedarf bei der Sanierung auf GEG-Standard im MFH-E im Vergleich zum MFH-I etwas geringer.

8. Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Kurzstudie wurde untersucht, welche Sanierungsstandards im Wohngebäudebestand notwendig sind, um den Einsatz von Wärmepumpen zu ermöglichen. Die Analyse erfolgte anhand ausgewählter Typgebäude mit Luft-Wasser-Wärmepumpen, um eine möglichst gute Übertragbarkeit zu gewährleisten. Dabei wurde zwischen Einfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern differenziert. Mit den Baualterklassen E und I der IWU-Typologie wurde eine große Bandbreite des deutschen Gebäudebestands abgebildet. Mit dem Typ I wurden zudem Gebäude berücksichtigt, die aufgrund relativ kleiner Heizkörper als problematisch für das Erreichen einer Niedertemperaturfähigkeit betrachtet werden können.

Mit den heute auf dem Markt verfügbaren Wärmepumpen ergeben sich jedoch neue Einsatzgrenzen. Im kleineren Leistungsbereich können Luft-Wasser-Wärmepumpen bereits hohe Vorlauftemperaturen von 70°C effizient abdecken. Im größeren Leistungsbereich sind Luft-Wasser-Wärmepumpen ab Auslegungs-Temperaturen von 60 °C für die Raumwärmeversorgung ohne Kaskadierung einsetzbar. In diesen Leistungs- und Temperaturbereichen weisen Geräte auf dem heutigen Stand der Technik bereits hohe Effizienzen auf, sodass der Sanierungsbedarf im Kontext des effizienten Betriebs von Wärmepumpen sinkt. Selbst Luft-Wasser-Wärmepumpen mit durchschnittlicher Effizienz erreichen bereits bei Auslegungs-Vorlauftemperaturen von 70 °C eine Jahresarbeitszahl von 3 – bezogen auf den Raumwärmebedarf. Der bislang in der Literatur übliche Kennwert von 55 °C als Grenzwert für den effizienten Einsatz von Wärmepumpen ist damit grundsätzlich zu hinterfragen. Insbesondere hinsichtlich mangelnder Sanierungsraten in den letzten 20 Jahren ergibt sich mit den heute verfügbaren Aggregaten die Möglichkeit den Gebäudesektor auf eine regenerative Versorgung umzustellen und die THG-Emissionen sowie den Primärenergiebedarf im Gebäudesektor deutlich zu reduzieren.

In der Studie konnte festgestellt werden, dass bereits in unsanierten Gebäuden und ohne Maßnahmen an der Gebäudehülle die Installation einer Wärmepumpe grundsätzlich möglich ist. In diesen Fällen ist die Kombination mit einem Zusatzsystem oder eine gezielte Vergrößerung ausgewählter Heizkörper notwendig. Als Zusatzsystem kann bei kleineren Leistungen (EFH) ein Heizstab eingesetzt werden. Bei größeren Leistungen (MFH) ist eine Booster-Wärmepumpe zu favorisieren. Maßnahmen an der Gebäudehülle müssen folglich nicht zwangsläufig vor einem Heizungstausch stattfinden. Für die Gebäudeeigentümer eröffnet sich damit in den untersuchten Varianten regelhaft die Option den Wechsel des Heizsystems zu priorisieren und somit die Klimaneutralität schneller zu erreichen. Bauteilsanierungen können dann erfolgen, wenn die Bauteile abgängig sind.

Unter Berücksichtigung einer Heizkurve und konstanten Massenströmen ergeben sich im Bestand ohne Sanierungsmaßnahmen Jahresarbeitszahlen von 2,7 (EFH-E und MFH-E, Auslegungs-Vorlauftemperatur: 80°C) und 3,0 (MFH-I, Auslegungs-Vorlauftemperatur: 70°C).

Trotz der neuen Möglichkeiten ist die Sanierung der Gebäudehülle grundsätzlich weiterhin sinnvoll. Nicht nur, da mit ersten Sanierungsmaßnahmen bereits die Auslegungs-Vorlauftemperatur deutlich abnimmt und folglich die Systemeffizienz signifikant steigt, sondern insbesondere, da der Primärenergiebedarf und damit der Flächenbedarf für die Erzeugung regenerativen Stroms in Deutschland insgesamt deutlich reduziert werden kann.

Darüber hinaus wird im größeren Leistungsbereich der elektrische Leistungsbedarf von Wärmepumpen durch Sanierung reduziert. Hausanschlüsse von Bestandsbauten im Einzelnen sowie Stromleitungen im Allgemeinen sind für den flächendeckenden Betrieb von Wärmepumpen nicht immer ausreichend dimensioniert. Steht die notwendige Leistung nicht rechtzeitig in ausreichendem Maße zur Verfügung, kann dies zu einem Hemmnis bei der Umsetzung der Wärmewende werden. Essenziell sind in diesem Kontext auch effiziente Ansätze zum Lastmanagement.

Des Weiteren kann in Gebäuden, in denen der Ausgangszustand aufgrund eines späteren Baualters bereits gedämmt ist, oder aufgrund einer bereits durchgeführten Sanierung bereits gedämmt wurde, der Tausch ausgewählter Heizkörper in den Räumen mit der geringsten Überdimensionierung sinnvoll sein. Abgesehen von der hier behandelten Umstellung fossiler Systeme auf Wärmepumpen, kann der teilweise Heizkörpertausch auch relevant für die Niedertemperaturfähigkeit von Gebäuden bei einer netzgebundenen Wärmeversorgung mit niedrigeren Systemtemperaturen sein (Fern-/Nahwärmeanschluss).

Zusammengefasst können folgende Erkenntnisse für die Transformation des Gebäudebestands übertragen werden:

- **Die bislang übliche Temperaturgrenze von 55 °C für den effizienten Einsatz von Wärmepumpen entspricht nicht mehr dem Stand der Technik** – für Einfamilienhäuser gilt bei Aggregaten mit dem natürlichen Kältemittel Propan eine Auslegungs-Temperatur von 70 °C als Schwellenwert für den alleinigen Einsatz einer Wärmepumpe – für Mehrfamilienhäuser, bzw. den größeren Leistungsbereich, liegt der Schwellenwert für den alleinigen Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Booster bei 60 °C – Es lassen sich jeweils Jahresarbeitszahlen über 3 erreichen
- **In bestehenden Wohngebäuden ist** deshalb unabhängig vom Baujahr bereits ohne Sanierungsmaßnahmen **der Einbau von Wärmepumpen möglich** – dann aber ggf. mit zusätzlichem Heizsystem (z.B. Heizstab, Booster-Wärmepumpe)
- **Geringfügige Sanierungsmaßnahmen haben bereits erheblichen Einfluss auf die Auslegungsvorlauftemperatur und damit die Effizienz von Wärmepumpen** – mit der Sanierung auf GEG-Mindeststandard sind auch mit ineffizienteren Aggregaten **Jahresarbeitszahlen über 3** realistisch – da viele bestehende Wohngebäude bereits (anteilig) saniert wurden, ist bereits heute der Einbau von Wärmepumpen ohne Zusatzsystem und mit hohen Jahresarbeitszahlen möglich
- Eine Sanierung über den GEG-Mindeststandard oder die BAFA BEG EM Förderung hinaus bringt hinsichtlich des Betriebs von Wärmepumpen nur noch geringe Effizienzvorteile – **erste Maßnahmen weisen das höchste Kosten/Nutzen Verhältnis** auf
- **Ungedämmte Wohngebäude früheren Baujahrs** mit großen Heizkörpern **erlauben eine höhere „Sanierungseffizienz“** ggü. Neubauten mit kleineren Heizkörpern, die typischerweise ebenfalls mit hohen Temperaturen dimensioniert wurden
- **In Gebäuden neueren Baujahrs** (siehe das hier untersuchte MFH TYP I) **sind maximale Vorlauftemperaturen unterhalb 55 °C nur mit erhöhtem Aufwand erreichbar** – es sind mindestens die

kritischsten Heizkörper durch größere Heizkörper oder z.B. Konvektor-Heizkörper zu ersetzen, eine weitere Optimierung der Wärmedämmung kann ggf. ebenfalls erforderlich werden

- **Ausschlaggebend** für die mögliche Vorlauftemperaturabsenkung und in der Folge die Erhöhung der Jahresarbeitszahl **ist das Verhältnis der installierten Heizleistung (Heizkörper) zur Heizlast** – es ergeben sich dadurch gebäudespezifische Grenzwerte
- **Bei der Bewertung und Definition von Sanierungsanforderungen** im Kontext der Effizienz von Wärmepumpen **sind neben der maximalen Vorlauftemperatur auch eine Heizkurve und der Betrieb mit konstanten Massenströmen zu berücksichtigen** – beides wirkt stark auf die notwendige maximale und mittlere Vorlauftemperatur
- Die im Rahmen dieser Studie erarbeiteten Erkenntnisse wurden als „**worst-case**“ **Betrachtung ausschließlich für Luft-Wasser-Wärmepumpen** durchgeführt – **bei Sole-Wasser-Wärmepumpen** (Geothermie, Grundwasser) **sind bereits heute de facto keine Temperatur- und Leistungsgrenzen gesetzt** – die Systemeffizienz (JAZ) verschiebt sich bei diesen Quellen aufgrund der während der Heizperiode geringeren Spreizung zwischen Wärmequelle und -senke nach oben, der Sanierungsbedarf nach unten
- **Werden zuerst Wärmepumpen eingebaut und erst später saniert, kann der Endenergiebedarf bereits kurzfristig durch den Einbau der Wärmepumpe deutlich reduziert werden.** Dabei sind bei der Planung der Heizungsanlage spätere Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle zu berücksichtigen

9. Anlage: Zusammenfassung wesentlicher Rahmenbedingungen

- Untersuchungsrahmen: ein Einfamilienhaus EHF Typ E (Baujahre 1958 bis 1986), ein Mehrfamilienhaus MFH Typ E, ein Mehrfamilienhaus MFH Typ I (Baujahre 1995 bis 2001) nach IWU-Typologie, um den nach IWU häufigsten Gebäudetyp (Typ E), bereits gedämmte Gebäude neueren Datums (Typ I) sowie verschiedene Größenordnungen in der Heizlast zu berücksichtigen.
- Bereits heute können Wärmepumpen flächendeckend in unsanierten Gebäuden als Hybridanlage eingesetzt werden. Das Zusatz-Heizsystem, das i.d.R. elektrisch (Heizstab, Booster-Wärmepumpe), bei Bedarf aber auch gasbasiert, ausgeführt werden kann, ergänzt die Wärmepumpe bei niedrigsten Außentemperaturen, die sehr selten auftreten. D.h. das Zusatz-Heizsystem dient vor allem als Leistungsvorhaltung, erzeugt allerdings nur einen geringen Anteil an Wärme.
- In der Vergangenheit wurden im Bestand bereits häufig (geringfügige) Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, so dass vielerorts Wärmepumpen auch ohne zusätzliche Sanierungen monovalent und, unter Beibehaltung der Bestands-Heizkörper, effizient eingesetzt werden können
- In Einfamilienhäusern können Luft-Wasser-Wärmepumpen bereits bis zu einer maximalen Vorlauftemperatur von einschließlich 70°C effizient monovalent eingesetzt werden – diese maximale Vorlauftemperatur wird in Bestandsgebäuden vor den ersten Wärmeschutzverordnungen bereits mit geringfügigen Maßnahmen an der Gebäudehülle erreicht (Größenordnung „schlechter“ EH 100) – Einfamilienhäuser, die nach den ersten Wärmeschutzverordnungen errichtet wurden, sind bereits auf 70 °C ausgelegt, so dass hier ohne Maßnahmen monovalente Systeme eingesetzt werden können
- In Mehrfamilienhäusern können derzeit auf dem Markt verfügbare Luft-Wasser-Wärmepumpen bis zu einer maximalen Vorlauftemperatur von einschließlich 60 °C effizient monovalent eingesetzt werden – diese maximale Vorlauftemperatur wird in Bestandsgebäuden vor den ersten Wärmeschutzverordnungen bereits mit geringfügigen Maßnahmen an der Gebäudehülle erreicht (Größenordnung „schlechter“ EH 100) – Mehrfamilienhäuser, die nach den ersten Wärmeschutzverordnungen errichtet wurden, müssten umfangreicher an der Gebäudehülle saniert werden, um maximale Vorlauftemperaturen von 60 °C und damit monovalente Anlagen zu ermöglichen, da diese Gebäude regelmäßig mit kleineren Heizkörpern ausgestattet sind (Größenordnung BAFA-Förderung). Alternativ bzw. ergänzend zur Hüllsanierung kann auch ein Austausch von einem oder mehreren Heizkörpern ausreichend sein.
- Im Zuge der Auslegung von Wärmepumpensystemen sollte immer geprüft werden, ob die Erhöhung der Heizleistung in Schlechträumen (z.B. Erweiterung der Heizflächen, Zusatzsysteme) zusätzliche Vorlauftemperaturabsenkungen ermöglichen – dies kann beispielsweise im Zuge des förderrelevanten hydraulischen Abgleichs erfolgen
- Der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Vorlauftemperatur ist möglichst niedrig zu halten, die Heizkurve ist im Zuge von Sanierungen entsprechend anzupassen
- Es werden invertiergeregelte, stufenlos modulierbare Luft-Wasser-Wärmepumpen auf dem aktuellen Stand der Technik mit natürlichen Kältemitteln vorausgesetzt
- Die Leistungsregelung der Wärmepumpen sollte nicht mit einer konstanten Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf erfolgen, sondern der Leistungsbedarf rechnerisch auf Basis des gemessenen Massenstroms, der gemessenen Rücklauftemperatur und der Soll-Vorlauftemperatur ermittelt werden
- Die Untersuchung erfolgte als worst-case Betrachtung mit Luft-Wasser-Wärmepumpen mit der Umweltquelle für Wärmepumpen, die im Vergleich die geringste Effizienz aufweist. Ebenfalls wurde mit der statischen Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 eine Heizlast zu Grunde gelegt, die keine inneren Gewinne berücksichtigt. Im Betrieb sind daher i.d.R. geringere Vorlauftemperaturen notwendig und eine höhere Effizienz erreichbar.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen zur Ermittlung von Sanierungen zum Erreichen von Niedertemperaturfähigkeit	2
Abbildung 2: Beispielgebäude Einfamilienhaus	4
Abbildung 3: Grundriss EFH	5
Abbildung 4: Beispielgebäude Mehrfamilienhaus	5
Abbildung 5: Grundriss MFH Erdgeschoss, 1. und 2. Obergeschoss	6
Abbildung 6: Raumaufteilung Beispielwohnung MFH	6
Abbildung 7: Transmissionswärmeverluste je Bauteil - EFH-E	10
Abbildung 8: Transmissionswärmeverluste je Bauteil - MFH-E	10
Abbildung 9: Transmissionswärmeverluste je Bauteil - MFH-I	10
Abbildung 10: Heizlasten und Heizleistungen im unsanierten Zustand und bei einer EH55-Sanierung	11
Abbildung 11: Wetterdatensatz TRY 2045 am Standort Potsdam	14
Abbildung 12: Außentemperaturen Potsdam (TRY 2045)	15
Abbildung 13: Synthetischer Erzeuger-Nutzwärmelastgang über den Außentemperaturverlauf	15
Abbildung 14: Außentemperaturgeführte Heizkurven am Beispiel EFH-E	19
Abbildung 15: Schlechträume in MFH-E und MFH-I	20
Abbildung 16: Resultierende Vorlauftemperaturen in Sanierungsvarianten EFH-E	21
Abbildung 17: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei Vorlauftemperaturabsenkung im EFH-E	23
Abbildung 18: Bivalenter Wärmepumpenbetrieb mit Heizstab am Beispiel EFH-E unsaniert	24
Abbildung 19: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei verschiedenen Vorlauftemperaturen für unterschiedlich effiziente Wärmepumpen am Beispiel des EHF-E	25
Abbildung 20: Resultierende Vorlauftemperaturen in Sanierungsvarianten MFH-E	26
Abbildung 21: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei Vorlauftemperaturabsenkung im MFH-E	27
Abbildung 22: Resultierende Vorlauftemperaturen in Sanierungsvarianten MFH-I	28
Abbildung 23: Resultierende Jahresarbeitszahlen bei Vorlauftemperaturabsenkung im MFH-I	29
Abbildung 24: Erforderliche Heizleistungen im MFH-I für Niedertemperaturfähigkeit	31
Abbildung 25: Erzeuger-Nutzenergie im Sanierungsverlauf beim EFH-E	32
Abbildung 26: Erzeuger-Nutzenergie im Sanierungsverlauf beim MFH-E	33
Abbildung 27: Erzeuger-Nutzenergie im Sanierungsverlauf beim MFH-I	33
Abbildung 28: Vergleich Endenergiebedarf MFH-E und MFH-I	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter zur Berechnung der Heizlast nach DIN EN 12831	7
Tabelle 2: Temperaturen der Innenbereiche nach DIN EN 12831	8
Tabelle 3: U-Werte des EFH-E in $W/m^2 \cdot K$	9
Tabelle 4: U-Werte des MFH-E in $W/m^2 \cdot K$	9
Tabelle 5: U-Werte des MFH-I in $W/m^2 \cdot K$	9
Tabelle 6: Effizienzkennzahlen von Beispielwärmepumpen	17
Tabelle 7: Heizlasten der Schlechträume	21
Tabelle 8: U-Werte zum Erreichen einer Vorlauftemperatur von $55^{\circ}C$ im EFH-E	22
Tabelle 9: U-Werte zum Erreichen einer Vorlauftemperatur von $70^{\circ}C$ im EFH-E	22
Tabelle 10: U-Werte zum Erreichen einer Vorlauftemperatur von $60^{\circ}C$ im MFH-E	27