

SüdSan

Sozialverträgliche und klimazielfunktionale Sanierung
zweier Mehrfamilienhäuser als Modell für die Sanierung
der Südtiroler-Siedlung Bludenz

Themendokumentation

**Best Practice: Reale Verbräuche nach der
Sanierung von Mehrfamilienhäusern**

Best Practice: Reale Verbräuche nach der Sanierung von Mehrfamilienhäusern

Darmstadt / Dornbirn, April 2024

Marc Großklos, Institut Wohnen und Umwelt (IWU)

Stefan Swiderek, Institut Wohnen und Umwelt (IWU)

Martin Ploß, Energieinstitut Vorarlberg (EIV)

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU)

Rheinstraße 65, 64295 Darmstadt

Herausgeber:

Energieinstitut Vorarlberg, Fachbereich Energieeffizientes Bauen

CAMPUS V, Stadtstraße 33

6850 Dornbirn, Österreich

Tel. +43 (0)5572 / 31 202-0

info@energieinstitut.at

Zusammenfassung

Die Wärmedämmung der Gebäudehülle stellt einen entscheidenden Baustein für die energetische Sanierung von Gebäuden dar. Ob die Wärmedämmung auch vor dem Hintergrund des Nutzerverhaltens zu einer nennenswerten Reduktion des Heizenergieverbrauchs führt, wird dabei manchmal in Frage gestellt. In diesem Bericht werden Untersuchungen zum Energieverbrauch gedämmter Gebäude analysiert und mit den berechneten Bedarfswerten verglichen, um die realen Verbräuche und die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch beziffern zu können.

In einer Untersuchung des Forschungsprojekts MOBASY wurden Energieverbräuche von 211 Mehrfamilienhäusern in Deutschland in Abhängigkeit von ihrer energetischen Qualität („Wärmegüte“) eingeordnet. Es zeigte sich, dass die Verbräuche der gedämmten Gebäude deutlich niedriger liegen als die der ungedämmten Häuser – dass Wärmedämmung somit zu niedrigeren Verbräuchen führt. Auch die Streuung der Verbrauchswerte innerhalb der hohen Wärmegüteklassen ist geringer als bei den schlecht gedämmten Gebäuden, so dass deren Verbrauch absolut gesehen bei gut gedämmten Gebäuden weniger stark schwankt.

Die Abweichungen zwischen dem berechneten Bedarf und dem gemessenen Heizenergieverbrauch hängen u. a. vom Berechnungsverfahren und vom energetischen Standard des Gebäudes ab. Hierfür wurde beispielhaft ein Kalibrierungsverfahren vorgestellt, das eine Kalibrierung von Bedarfswerten nach der deutschen DIN V 4108-6 & DIN V4701-10 auf gemessene Verbräuche erlaubt. Die Ergebnisse der Kalibrierung wurden durch eine weitere Studie mit 927 Mehrfamilienhäusern (und 1.652 Einfamilienhäusern) aus Deutschland grundsätzlich bestätigt. Absolut sind die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch bei sehr guten energetischen Standards mit maximal ca. $8,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ immer noch gering. Kapitel 2 schließt mit weiteren Vergleichen zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten aus der dena-Effizienzhaus-Datenbank.

Ein Fokus dieses Berichts liegt auf besonders hochwertigen Best-Practice-Sanierungen, die bezüglich des Endenergiebedarf für Heizung sowie des Gesamt-Endenergiebedarfs ausgewertet wurden. Bei der Auswertung von 35 Modernisierungen mit Passivhaus-Komponenten in Hessen lag der gemessene Heizwärmeverbrauch mit $24,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ im Mittel nur ca. $3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ über dem Bedarfswert nach Standardrandbedingungen. Zusätzlich wurden 21 Sanierungsprojekte mit sehr hohem energetischem Standard querausgewertet, für die ein detailliertes wissenschaftliches Monitoring durchgeführt worden war.

Bei den Gebäuden, die bereits vollsaniert waren und mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket bilanziert wurden, liegen die Abweichungen zwischen Heizwärmebedarf und -verbrauch im Mittel bei $3,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Bei Gebäuden, die nach der deutschen Energieeinsparverordnung

(EnEV) bilanziert wurden (der energetische Standard der ausgewerteten Gebäude ist deutlich besser als die EnEV-Anforderungen), liegen Heizwärmebedarf und -verbrauch teilweise weiter auseinander und sie schwanken auch stärker nach oben und nach unten. Trotz der nur geringen Überschreitung der Bedarfswerte für Heizwärme liegen die gemessenen Raumtemperaturen zwischen 21,5 und 23 °C und damit deutlich über den Standard-Randbedingungen von 20 °C.

Bei der Auswertung des Endenergieverbrauchs für Wärme für Heizung und Warmwasser von 8 sanierten Gebäuden lagen die Gebäude mit Gasversorgung zwischen 48 und 61 kWh/(m²_{Wfl}*a), bei Nah-/Fernwärme zwischen 47 und 50 kWh/(m²_{Wfl}*a) und mit Wärmepumpen (Strom) bei ca. 14 kWh/(m²_{Wfl}*a). Besitzen die wärmepumpenbeheizten Gebäude gleichzeitig entsprechend große PV-Anlagen, so können diese bei Gebäuden bis ca. 4 Stockwerke den Jahresenergiebedarf in Summe aller Energieanwendungen bilanziell decken (Net-Zero-Bilanz). Die PV-Stromerzeugung reicht jedoch nicht für eine Deckung des Energiebedarfs im Winter aus, die Deckungsgrade lagen bei einem Projekt zwischen 11 % im Dezember und 57 % im September.

Bei den Effizienzhaus Plus-Gebäuden (überwiegend Neubauten) wurde Endenergie inklusive eines pauschalen Ansatzes für den Haushaltsstrom bilanziert. Hier traten sowohl geringere Verbräuche wie auch deutliche Überschreitungen des Bedarfswertes auf. Die Auswertung hat aber auch gezeigt, dass bei der Auswertung auf Endenergieebene – besonders wenn die Gebäude wie hier überwiegend mit Wärmepumpen versorgt werden – es schwer ist, die Einflüsse von Gebäudehülle, Nutzerverhalten und Anlagentechnik voneinander zu trennen.

Eine Querauswertung von verschiedenen Passivhaus-Neubauten zeigte geringe Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch bei Einfamilienhäusern (106 Gebäude). Bei einer Auswertung der Passivhaus-Siedlung Heidelberg Bahnstadt (2.268 Wohneinheiten) lag die Abweichung zwischen Heizwärmebedarf und -verbrauch mit ca. 3 kWh/(m²*a) in einem ähnlichen Bereich wie bei Mehrfamilienhaus-Sanierungen im Passivhaus-Standard. Die Endenergieverbräuche der Baufelder in der Bahnstadt (Fernwärmeversorgung) lagen im Mittel bei 51,7 kWh/(m²*a), die Baufelder mit den niedrigsten Werten erreichten 40 kWh/(m²*a), die höchsten Endenergieverbräuche lagen bei 70 kWh/(m²*a).

Insgesamt kann aus den Auswertungen gefolgert werden, dass durch eine hochwertige energetische Sanierung im Mittel die berechneten Werte für den Heizwärmebedarf mit ca. ±3 kWh/(m²*a) nahezu erreicht werden.

Inhalt

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	6
2 Verbrauchskennwerte von Mehrfamilienhäusern.....	7
2.1 Verbrauchskennwerte von drei Wohnungsunternehmen	7
2.1.1 Ableitung einer Kalibrierungsfunktion für Bedarfswerte	11
2.2 Vergleich von Bedarf und Verbrauch unterschiedlicher Gebäudegrößen	12
2.3 Auswertung der Effizienzhaus-Datenbank der dena	15
3 Verbrauchskennwerte besonders energieeffizienter Gebäude	17
3.1 Energieverbräuche von Best-Practice Modernisierungen	17
3.1.1 Heizwärmeverbrauch - Förderprogramm Passivhaus im Bestand in Hessen	17
3.1.2 Heizwärmeverbrauch - Querauswertung von Best Practice-Einzelprojekten	18
3.1.3 Endenergieverbrauch _{Heizung+WW} sowie Endenergieverbrauch _{gesamt} und Netzbezug _{gesamt} monoelektrisch betriebener Mehrfamilienhaus-Sanierungen	21
3.2 Best-Practice-Beispiele im Neubau in Deutschland.....	25
3.2.1 Effizienzhaus Plus.....	25
3.2.2 Querauswertung Passivhäuser	28
3.2.3 Heidelberg „Bahnstadt“	28
Abkürzungen	30
Abbildungen	31
Tabellen.....	32
Literatur.....	32

1 Einleitung

Der energetischen Verbesserung des Gebäudebestandes kommt zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen eine große Bedeutung zu, da die Wärmeversorgung von Gebäuden mit 11,7 % einen wichtigen Anteil an den Gesamtemissionen in Österreich¹ ausmacht [1]. Die Umsetzung ist jedoch aufgrund der Vielfalt und Kleinteiligkeit des Gebäudebestandes komplex und aufwändig. Bei Einfamilienhäusern fällt diese Aufgabe einer großen Anzahl an Eigentümer*innen zu, die für ihr individuelles Gebäude praktikable, bezahlbare und wirtschaftliche Lösungen finden müssen. Der Vorteil in dieser Gruppe der Selbstnutzer besteht darin, dass der Nutzen einer energetischen Sanierung – wie Energiekosteneinsparung, Komfortsteigerung und Wertsteigerung der Immobilien – direkt beim Investor anfällt.

Mehrfamilienhäuser befinden sich zu einem großen Teil in der Hand weniger Eigentümer, wie beispielsweise Wohnungsunternehmen, die ihre Bestände professionell verwalten. Die Gebäude wurden oft mehrfach in ähnlicher Art errichtet, so dass Sanierungskonzepte prinzipiell auf eine größere Anzahl von Einzelgebäude übertragen werden können, was die Sanierungsplanung vereinfacht.

Jedoch besteht das sogenannte Investor-Nutzer-Dilemma: Der Eigentümer investiert in die Sanierung, während die Mieter von den Energiekosteneinsparungen profitieren. Wenn vor diesem Hintergrund die Nettokaltmieten warmmieten-neutral angehoben werden, um die Investitionen finanzieren zu können, ist es entscheidend, dass die tatsächlich erzielten Energieeinsparungen den Erwartungen entsprechen. Davon hängt die Investitionsbereitschaft der Wohnungswirtschaft genauso ab wie die Akzeptanz der Mieterschaft für die Energiewende.

Eine verbreitete Aussage im Zusammenhang mit der energetischen Sanierung ist, dass der Nutzer durch sein Energienutzungsverhalten die möglichen Einsparungen zunichtemache (oft als „energy performance gap“ bezeichnet; dieser enthält jedoch auch weitere Einflussfaktoren wie z. B. Effizienz der Anlagentechnik, Betriebsführung oder Witterungseinfluss).

In diesem Bericht werden Verbrauchsdaten von sanierten Mehrfamilienhäusern sowohl aus „Standardsanierungen“ als auch aus energetisch ambitionierteren Projekten zusammengetragen und mit den berechneten Bedarfswerten verglichen. Zur Erklärung der Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch wird eine Kalibrierungsfunktion vorgestellt, die die nach Norm

¹ Der Wert von 11,7% entspricht den direkten Emissionen an Gebäuden; die Emissionen durch Nutzung von Fernwärme und Strom für Wärmepumpen und elektrische Direkt-Heizsysteme ist nicht enthalten.

berechneten Energiebedarfe an die mittleren realen Verbräuche anpasst. Zudem wird das Thema der Unsicherheiten bei Bedarfsberechnungen kurz behandelt.

Ziel des Berichts ist es, Erfahrungen mit dem Erfolg energetischer Sanierungen zusammenzutragen, insbesondere hinsichtlich der Verbrauchsreduktion durch unterschiedliche energetische Standards.

2 Verbrauchskennwerte von Mehrfamilienhäusern

In diesem Kapitel werden Auswertungen des Endenergieverbrauchs für Heizung sowie des Endenergieverbrauchs für Heizung und Warmwasserbereitung (Heizung+WW) von unsanierten und von sanierten Mehrfamilienhäusern aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen. Diese Werte werden anschließend mit den berechneten Bedarfswerten verglichen.

2.1 Verbrauchskennwerte von drei Wohnungsunternehmen

Eine systematische Auswertung der Energieverbräuche von drei Wohnungsunternehmen findet sich im Forschungsprojekt MOBASY [2]. Hier wurden auf Basis von 108 Datensätzen (Gebäudeblöcken) von 211 Mehrfamilienhäusern (Hauseingängen) mit insgesamt 2.405 Wohnungen die Verbräuche ausgewertet und dem energetischen Zustand der Gebäudehülle („Wärmegüteklasse“) gegenübergestellt [3]. Die Stichprobe umfasst überwiegend Altbauten in unterschiedlichen Sanierungszuständen, aber auch einige Neubauten. Alle Gebäude besitzen eine brennstoff- bzw. fernwärmebasierte Wärmeversorgung, d. h. Wärmepumpen sind nicht in der Stichprobe enthalten.

Die Wärmegüteklassen sind von A+ bis G eingeteilt, wobei diese Einteilung keinen Bezug zu den Energieeffizienzklassen im Energieausweis besitzt. Diese Wärmegüteklassen wurden für die Dämmung, die Fensterqualität und die Art der Lüftung statistisch ausgewertet.

Abbildung 1 zeigt, dass der mittlere gemessene Endenergieverbrauch für die Heizung von der Wärmegüteklasse abhängt. Je dicker die Dämmung der Gebäudehülle (orange Säulen), desto niedriger liegt der gemessene Endenergieverbrauch für die Heizung (rote Säulen). Nahezu ungedämmte Gebäude der Klassen E und F erreichen einen Endenergieverbrauch_{Heizung} von ca. $140 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ². Gebäude mit einem mittleren Dämmniveau von ca. 16 cm und zweifach Wärmeschutzverglasung, wie sie in den vergangenen Jahren häufig umgesetzt wurden, erreichen Werte von ca. $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Klassen B und C). Bei Gebäuden mit einer mittleren Dämmdicke von ca. 30 cm, dreifach Wärmeschutzverglasung und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung liegt der Endenergieverbrauch_{Heizung} im Mittel bei ca. $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Klassen

² Die Bezugsfläche ist hier die beheizte Wohnfläche

Richtlinie 6 in Österreich die Einhaltung der gesetzlichen Mindestanforderungen dokumentieren sollen und nicht zur Prognose von Verbräuchen gedacht sind.

Um einen Vergleich von Verbrauchs- und Bedarfswerten bei einer großen Anzahl von Gebäuden durchführen zu können, für die nicht immer alle bauphysikalischen Randbedingungen bekannt sind, wurde im Projekt MOBASY ein einfaches physikalisches Modell entwickelt. Dieses Modell ermöglicht es, unbekannte Eingangsgrößen in die Energiebilanz des Gebäudes auf Basis von empirisch abgeleiteten Mittelwerten zu schätzen. Das Werkzeug ist damit unter anderem für die Erstellung von Benchmarks für Gebäudebestände sowie für die Portfolioanalyse einsetzbar.

Als Nutzungsrandbedingungen wurden realistische Werte zugrunde gelegt, auch die Klimadaten des entsprechenden Standorts und Jahres wurden verwendet. Damit kann der Erwartungswert des Energieverbrauchs berechnet werden. Da die Randbedingungen und Schätzwerte ungenau sein können, wurde gleichzeitig eine Unsicherheitsbetrachtung auf Basis des Fehlerfortpflanzungsgesetzes durchgeführt.

In Abbildung 2 sind die Verbrauchskennwerte über den Energiebedarf der Realbilanz aufgetragen [4]. Die einzelnen Datenpunkte zeigen eine erhebliche Streuung. Die Mittelwerte jeder Bedarfsklasse (braune Punkte) liegen bei geringen Verbräuchen etwa auf der Winkelhalbierenden. Dies bedeutet, dass in diesen Fällen der berechnete Bedarf und der tatsächliche Verbrauch gut übereinstimmen. Bei Gebäuden mit schlechtem energetischem Standard zeigen die Ergebnisse jedoch, dass die tatsächlichen Verbräuche bis zu 20 % unter den berechneten Bedarfswerten liegen.

Zusätzlich sind in der Abbildung auch die mittleren Unsicherheiten der Bedarfsberechnung (grüne Balken) dargestellt. Diese liegen bei energetisch schlechten Gebäuden absolut deutlich höher als bei sehr guten Gebäuden.

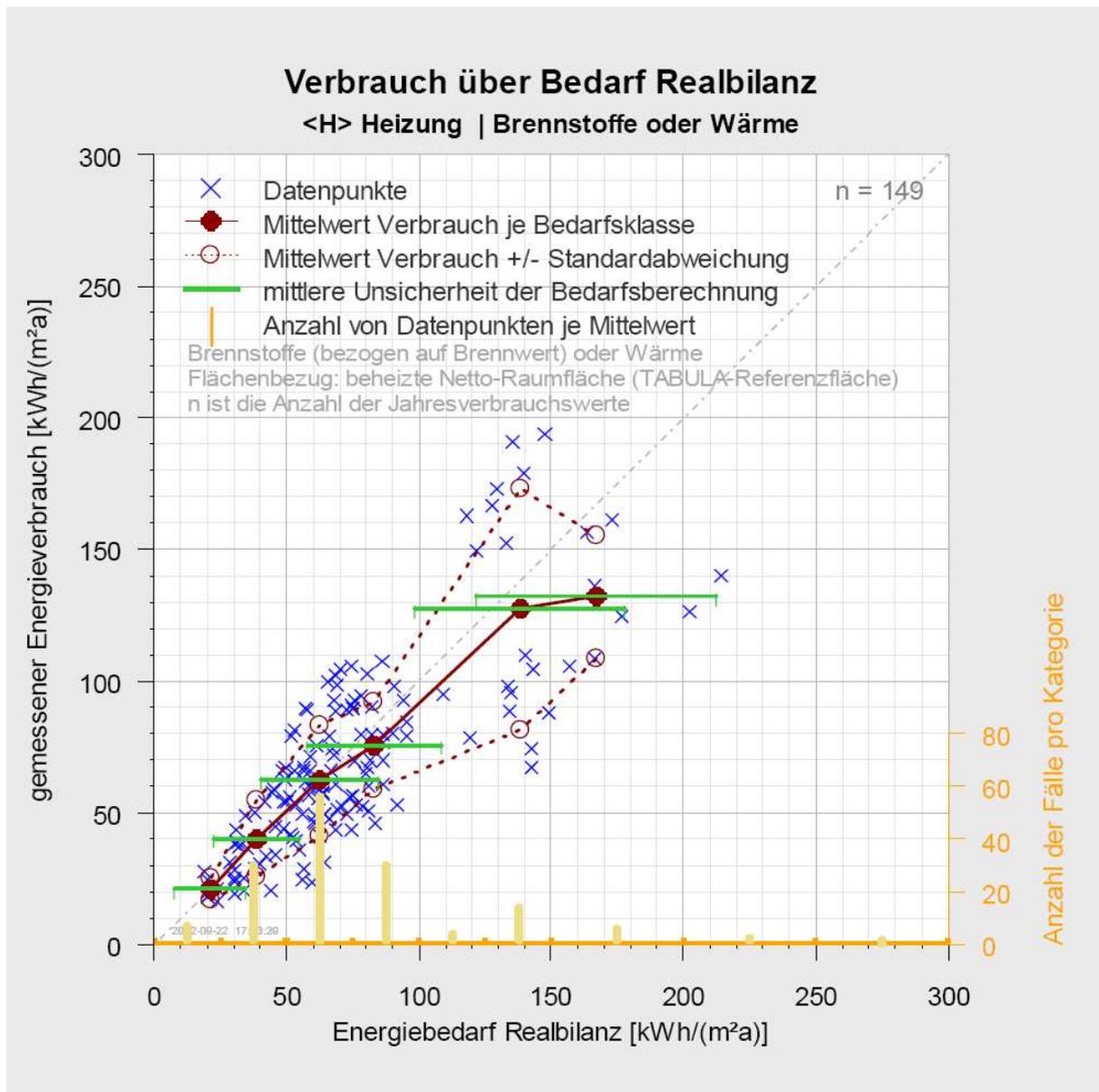
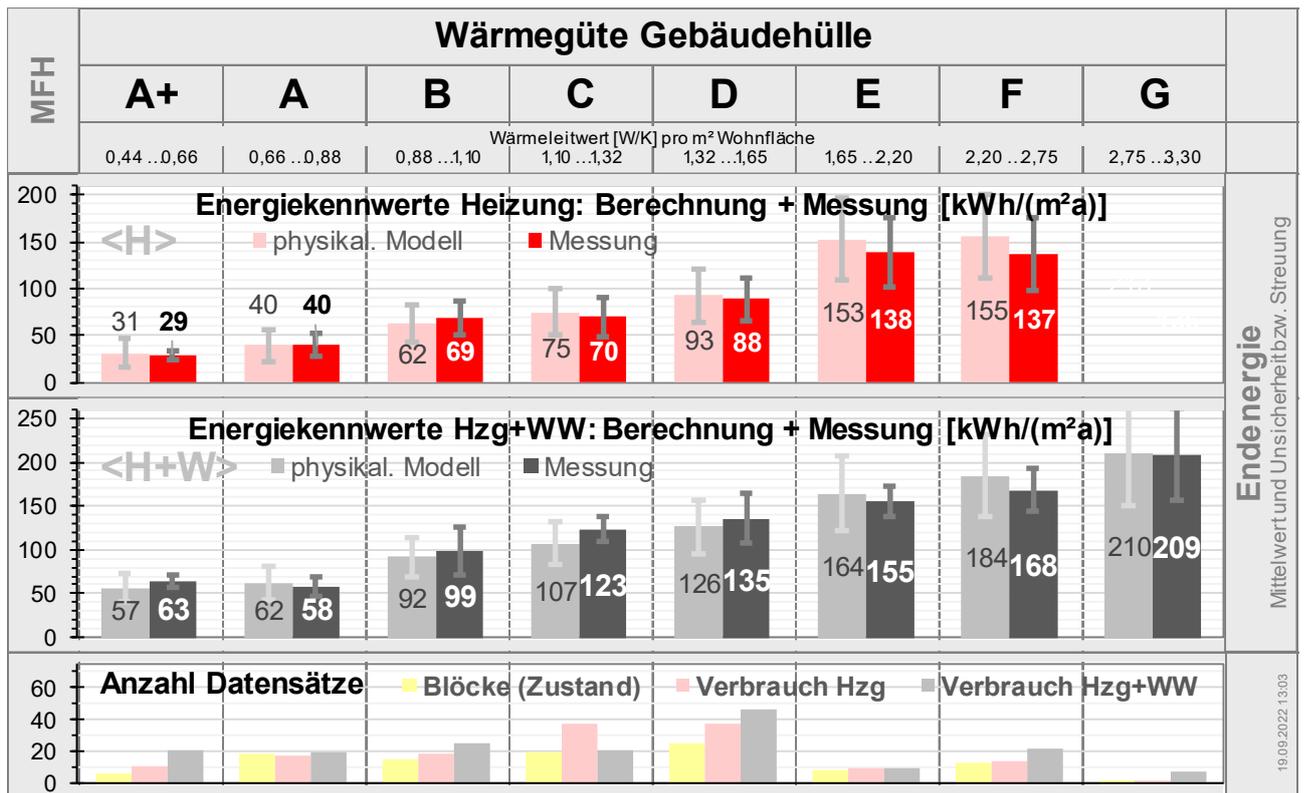


Abbildung 2: Gemessener Energieverbrauch aufgetragen über dem berechneten Energiebedarf (Vergleichswerte Realbilanz) für den Bilanzraum <H> „Heizung“ (Quelle: [4])

Abbildung 3 zeigt, dass gemessener Energieverbrauch und der Erwartungswert des Energieverbrauchs für die verschiedenen Wärmegüteklassen recht gut übereinstimmen. Die Streuung des gemessenen Verbrauchs entspricht ungefähr der mittleren Unsicherheit (Erwartungsbereich) des Bedarfswertes. Damit stimmen Theorie und Praxis im Mittel gut überein.



MOBASY-Mehrfamilienhaus-Stichprobe; Endenergie: Brennstoffe (bezogen auf Brennwert) oder Fernwärme; gemessener Verbrauch: Mittelwert und Standardabweichung je Klasse, witterungsbereinigt auf Durchschnittsklima am Standort; physikalisches Modell: Mittelwert und mittlere Unsicherheit des berechneten Bedarfs (Realbilanz, Durchschnittsklima am Standort); Energiekennwerte bezogen auf beheizte Wohnfläche; Wärmeleitwert Gebäude [W/K] = Wärmetransferkoeffizient Transmission + Lüftung (rechnerische Wärmeverluste je Grad Temperaturdifferenz zwischen innen und außen)

Abbildung 3: Verbrauchsbenchmarks und Prognosewerte des physikalischen Modells aus der MOBASY-Realbilanz (Erwartungswert und Erwartungsbereich) Flächenbezug: beheizte Wohnfläche (Quelle: [3])

2.1.1 Ableitung einer Kalibrierungsfunktion für Bedarfswerte

Für die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch kann eine empirische Kalibrierungsfunktion abgeleitet werden. Diese Kalibrierung gilt jedoch immer nur für die jeweilige Norm der Bedarfsberechnung. In [5] wurde für die deutsche DIN V 4108-6 & DIN V 4701-10 folgende Kalibrierungsfunktion für den Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser entwickelt:

Regelfall ($q_{del,h+w,c} > 66 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{a})$):

$$\hat{q}_{del,h+w,m} = 33 + \hat{f}_{cal,h} * (q_{del,h+w,c} - 33)$$

mit

$\hat{q}_{del,h+w,m}$ Schätzwert für den Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser, bezogen auf die beheizte Wohnfläche

$\hat{f}_{cal,h}$	Kalibrierungsfaktor Endenergie Heizung (Schätzfunktion, abhängig vom Norm-Energiebedarf)
$q_{del,h+w,c}$	berechneter Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser, bezogen auf die beheizte Wohnfläche (Norm-Energiebedarf)

Der Kalibrierungsfaktor $\hat{f}_{cal,h}$ berechnet sich wie folgt:

$$\hat{f}_{cal,h} = \max\left(-0,2 + \frac{1,3}{1 + \frac{q_{del,h+w,c}}{550}}; 0,4\right)$$

Für den Sonderfall eines sehr niedrigen Energiebedarfs ($q_{del,h+w,c} < 66 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{a})$):

$$\hat{q}_{del,h+w,m} = 33 + \hat{f}_{cal,h} * (q_{del,h+w,c} - 33)$$

mit

$$\hat{f}_{cal,h} = -0,2 + \frac{1,3}{1 + \frac{0,5 * q_{del,h,c}}{550}}$$

Bezugsgröße ist jeweils der Brennwert. In [5] sind auch Ansätze für die Festlegung von Spannen sowie eine Anpassung an die DIN V 18599 vorgeschlagen.

Mit der vorgeschlagenen Kalibrierungsfunktion können aus Bedarfswerten mittlere Verbrauchswerte abgeschätzt werden.

In [5], [6] und [7] wurden auch mehrere Analysen von Verbrauchswerten kleinerer und größerer Gebäudebestände querausgewertet.

Gebäude mit einem Heizwärmeverbrauch/-bedarf von deutlich unter $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{a})$ bzw. Analysen, die auch hocheffiziente Gebäude beinhalten, wurden in Kapitel 0 berücksichtigt.

2.2 Vergleich von Bedarf und Verbrauch unterschiedlicher Gebäudegrößen

Die ARGE e.V. hat 2021 bei insgesamt 2.579 Wohngebäuden Bedarf und Verbrauch ausgewertet. In der Stichprobe waren 1.652 Ein- und Zweifamilienhäuser und 927 Mehrfamilienhäuser enthalten [7]. Der Bedarfswert wurde nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 berechnet, die Verbrauchswerte sind Endenergieverbräuche für Heizung und Warmwasserbereitung.

Der energetische Standard der Gebäude in der Stichprobe variiert stark:

- Unsanierte Einfamilienhäuser: Endenergiebedarf von 351 bis $400 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{A}_N * \text{a})$

- Hocheffiziente Mehrfamilienhäuser: Endenergiebedarf kleiner 25 kWh/(m²A_N*a)

Die Flächenangaben beziehen sich auf die Gebäudenutzfläche A_N nach dem deutschen Gebäudeenergiegesetz. Diese Nutzfläche ist je nach Gebäudetyp (Ein- oder Mehrfamilienhaus) etwa 20 bis 30 % größer als die beheizte Wohnfläche. Dadurch sind die spezifischen Kennwerte kleiner, wenn sie auf die Gebäudenutzfläche A_N bezogen werden, im Vergleich zu einer Bezugnahme auf die beheizte Wohnfläche. Die Energiemengen für die Heizung wurden witterungsbereinigt, um die Vergleichbarkeit der Verbrauchsdaten zu gewährleisten.

Abbildung 4 zeigt für Ein- und Zweifamilienhäuser das Verhältnis von Endenergieverbrauch zu Endenergiebedarf auf der Y-Achse (bei dem Wert 1 sind Verbrauch und Bedarf gleich hoch) und den Endenergiebedarf auf der X-Achse. In Abbildung 5 ist dieser Zusammenhang für Mehrfamilienhäuser dargestellt. Die Streuung ist im gesamten Wertebereich sehr groß und die Einzelwerte für den Verbrauch liegen sowohl unter als auch über dem Bedarfswert. In den Abbildungen sind die Mittelwerte sowie die Streubreiten eingetragen. Bei den Gebäuden mit geringem Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser bis ca. 70 kWh/(m²A_N*a) liegen die Verbrauchswerte im Mittel zwischen 1 und 31 % über dem berechneten Bedarfswert.

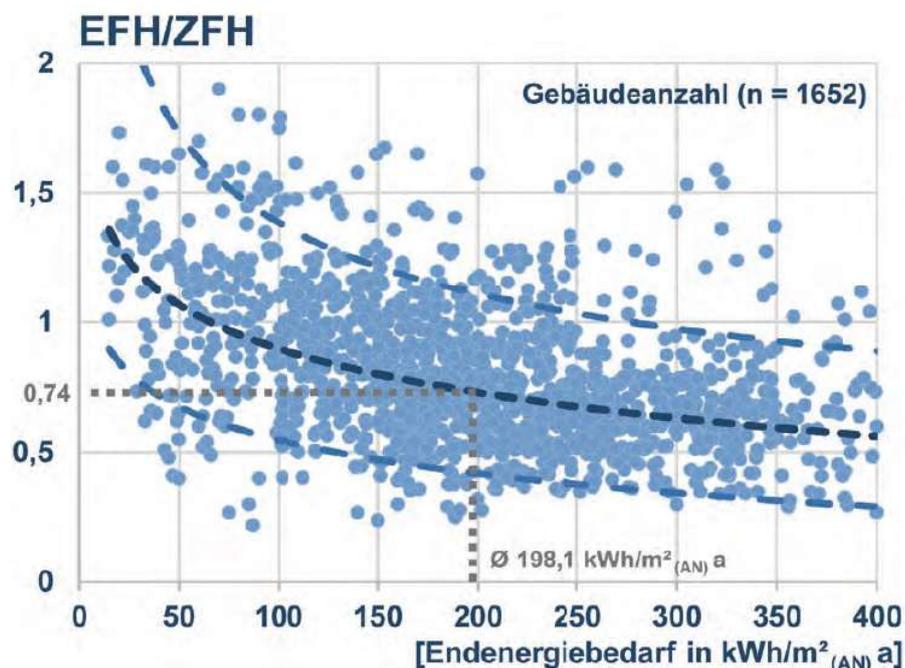


Abbildung 4: Verhältnis von Endenergieverbrauch_{Heizung+WW} und Endenergiebedarf_{Heizung+WW} nach DIN V 4108-6 und DIN V4701-10 (Y-Achse) in Abhängigkeit des Endenergiebedarf_{Heizung+WW} (X-Achse) für 1.652 Ein- und Zweifamilienhäuser (Quelle: [7])

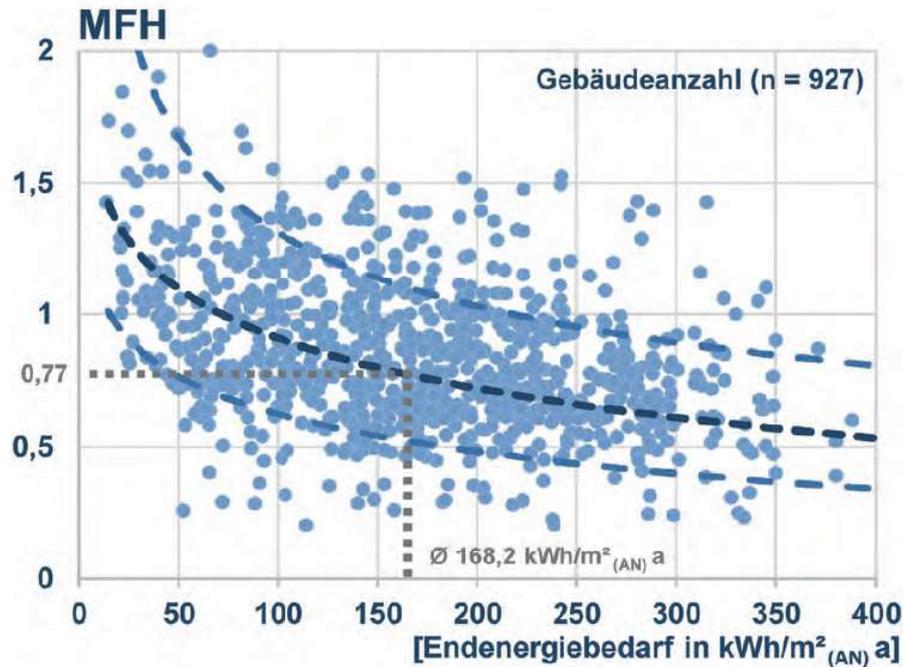


Abbildung 5: Verhältnis von Endenergieverbrauch_{Heizung+WW} und Endenergiebedarf_{Heizung+WW} nach DIN V 4108-6 und DIN V4701-10 (Y-Achse) in Abhängigkeit des Endenergiebedarf_{Heizung+WW} (X-Achse) für 927 Mehrfamilienhäuser (Quelle: [7])

Betrachtet man die absolute Überschreitung an den oberen Klassengrenzen, so liegt der gemessene Verbrauch zwischen $0,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{A}_N \cdot \text{a})$ (EFH/ZFH bei $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{A}_N \cdot \text{a})$) und $8,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{A}_N \cdot \text{a})$ (MFH bei $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{A}_N \cdot \text{a})$) über dem Bedarfswert (siehe Abbildung 6).

In Anbetracht der Tatsache, dass das verwendete Berechnungsverfahren (DIN V 4108-6/4701-10) nicht für Gebäude mit sehr niedrigem Heizwärmebedarf konzipiert war (z. B. Randbedingung für innere Wärmequellen und Ausnutzung von Solarstrahlung), sind die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch zwar vorhanden, führen im Mittel aber nicht zu einer komplett abweichenden Bewertung der Effizienz der Gebäude.

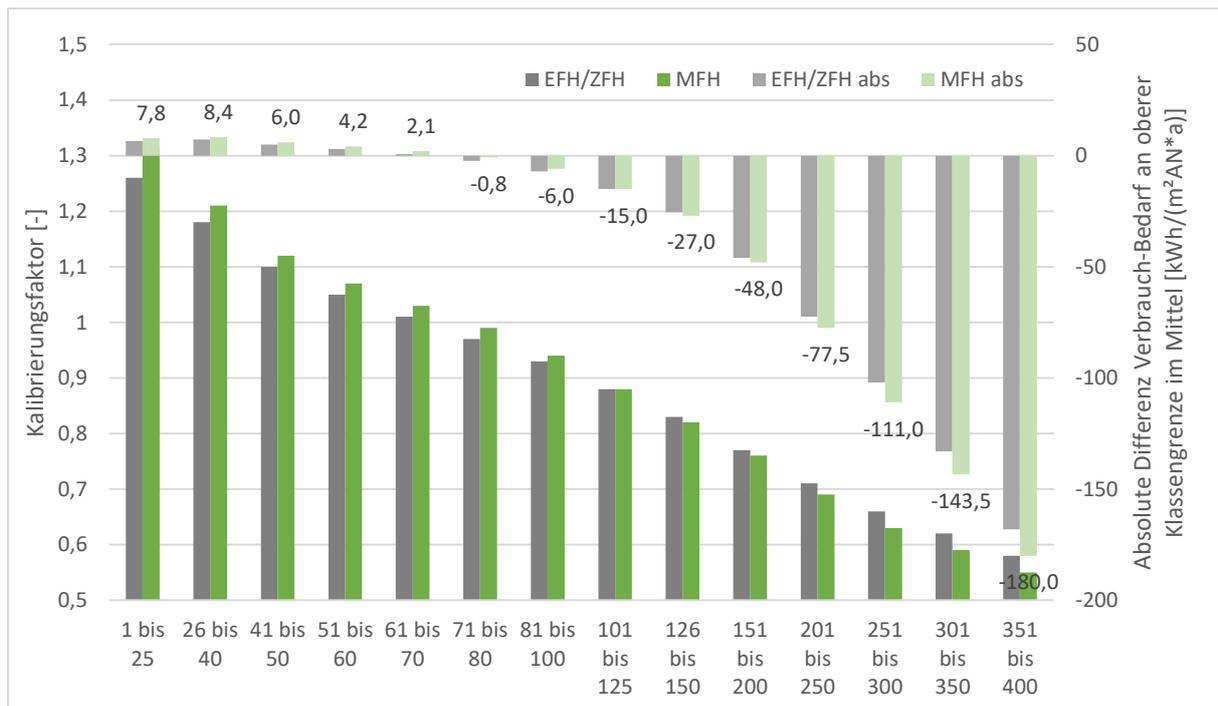


Abbildung 6: Kalibrierungsfaktor Bedarf-Verbrauch (Endenergie_{Heizung+WW}) und absolute Veränderung an der oberen Klassengrenze (Quelle: eigene Auswertung und Darstellung nach [7])

2.3 Auswertung der Effizienzhaus-Datenbank der dena

Im Jahr 2016 konnten für 121 energieeffiziente Gebäude ($H'T \leq 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) in der Effizienzhaus-Datenbank der Deutschen Energie-Agentur (dena) neben den Bedarfswerten auch Verbrauchswerte erhoben ausgewertet werden. Neben Neubauten (50 EFH/ZFH und 7 MFH) wurden auch insgesamt 84 Modernisierungen ausgewertet (59 EFH/ZFH und 25 MFH). Bei den Mehrfamilienhäusern besaßen 15 Gebäude 3 bis 6 Wohneinheiten und 10 Gebäude 7 und mehr Wohneinheiten. Für die Beheizung ist eine große Bandbreite an Systemen vorhanden, auch Elektro-Wärmepumpen. Die von den Eigentümern gelieferten Abrechnungen wurden nach einer Plausibilisierung und Anpassungen für Leerstand sowie abweichende Abrechnungszeiträume klimabereinigt und auf die Gebäudenutzfläche A_N bezogen. Bei Gebäuden mit Wärmepumpen wurde der Haushaltsstrom mit einem pauschalen Wert aus den Abrechnungen des Stromverbrauchs heraus gerechnet, wenn kein separater Stromzähler für die Wärmepumpe vorhanden war. Bei nicht-strombasierten Anlagensystemen wurde ein Anteil für die Hilfsenergie von dem Bedarfswert abgezogen (nach EnEV/GEG beinhaltet der Endenergiebedarf neben dem Gesamtwärmebedarf auch die Hilfsenergie, die Auswertung erfolgte aber ohne Hilfsenergie).

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs von Endenergiebedarf und -verbrauch. Auch hier wurde der Endenergiebedarf nach den gesetzlichen Vorgaben in Deutschland (EnEV) berechnet.

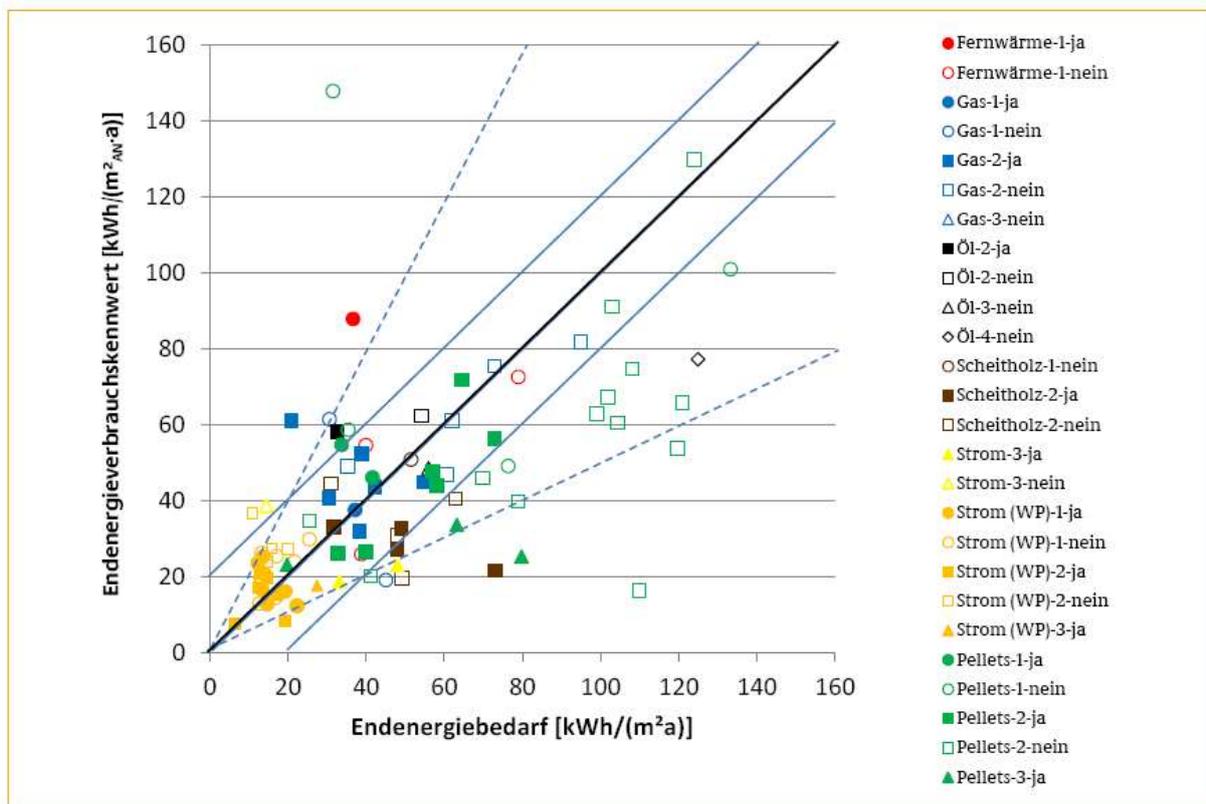


Abbildung 7: Endenergieverbrauchswerte_{Heizung+WW} gegenüber Endenergiebedarfswerten_{Heizung+WW} (Quelle: [8])

Im Mittel lag der Endenergiebedarf_{Heizung+WW} nicht-strombasierter Heizsysteme bei 52,9 und der Endenergieverbrauch_{Heizung+WW} bei 47,8 kWh/(m²A_N*a). Bei strombasierten Heizsystemen lagen Endenergiebedarf_{Heizung+WW} mit 19,0 und Endenergieverbrauch mit 18,2 kWh/(m²A_N*a) im Mittel nur geringfügig auseinander.

Für 30 Gebäude lagen auch Verbrauchswerte vor Modernisierung vor. Bei strombasierten Heizsystemen (N=7) konnte durch die Modernisierung der Endenergieverbrauch von 180,5 auf 19,0 kWh/(m²A_N*a) (-89 %) reduziert werden, bei nicht-strombasierten Heizsystemen (N=26) von 185,1 auf 54 kWh/(m²A_N*a) (-71%).

3 Verbrauchskennwerte besonders energieeffizienter Gebäude

In diesem Kapitel sollen energetisch besonders hochwertige Sanierungen wie EnerPHit [9] oder vergleichbare Standards betrachtet werden.

3.1 Energieverbräuche von Best-Practice Modernisierungen

In den letzten Jahren wurden einige Best Practice-Modernisierungen durchgeführt, bei denen die Konzepte, die Bedarfskennwerte und auch Verbrauchsdaten dokumentiert wurden.

In den Unterabschnitten 3.1.1 und 3.1.2 werden die gemessenen Heizwärmeverbräuche mit den berechneten Werten des Heizwärmebedarfs verglichen.

In Unterabschnitt 3.1.3 wird die energetische Performance ambitionierter Sanierungen anhand des Indikators „Endenergieverbrauch Heizung + Warmwasser“ analysiert. Für einige Projekte wird zusätzlich der Endenergieverbrauch in Summe aller Anwendungen betrachtet. Bei wärmepumpenbeheizten Sanierungen werden zusätzlich der Eigennutzungsgrad der PV-Erzeugung, der resultierende Netzbezug und die Einspeisung von PV-Strom untersucht.

Während die Auswertungen im Hinblick auf den Heizwärmeverbrauch Rückschlüsse auf die Qualität der Gebäudehülle und die Wirkung der Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung ermöglichen, werden die Werte des Endenergieverbrauchs für Heizung und Warmwasser auch durch die Effizienz der eingesetzten Wärmeversorgungssysteme beeinflusst.

3.1.1 Heizwärmeverbrauch - Förderprogramm Passivhaus im Bestand in Hessen

Im Bundesland Hessen gibt es ein Förderprogramm zur energetischen Modernisierung zum Passivhaus im Bestand. Bis 2017 wurden insgesamt 70 Gebäude gefördert, darunter 38 kleine Wohngebäude, 26 große Wohngebäude und 6 Nichtwohngebäude. Von diesen Projekten konnten 35 hinsichtlich ihrer Verbräuche ausgewertet werden (siehe Abbildung 8) [10]. Eine detaillierte Verteilung nach Gebäudegrößen und -arten ist nicht dokumentiert.

Einige Gebäude haben ihre Heizwärmeverbräuche deutlich unter dem Bedarfswert gehalten, während bei anderen erhebliche Überschreitungen des Bedarfswerts zu verzeichnen sind. Der gemessene Endenergieverbrauch für Heizung lag im Mittel bei $24,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, während der Bedarfswert gemäß Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) im Mittel bei $21,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ liegt. Somit lag der gemessene Verbrauch etwa $3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ über dem Bedarfswert. Als Bezugsfläche wurde hier die Wohnfläche nach der deutschen Wohnflächenverordnung verwendet, die innerhalb der thermischen Hülle liegt.

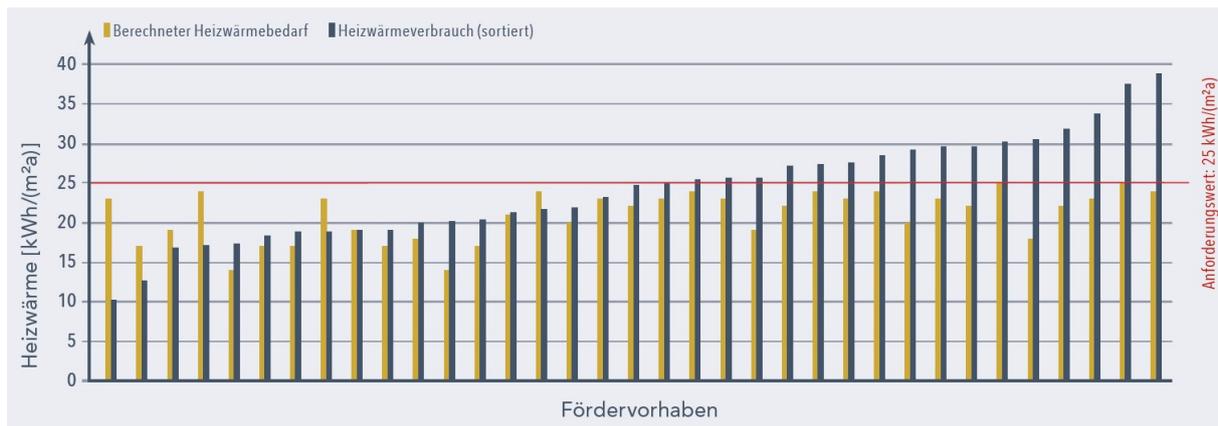


Abbildung 8: Heizwärmeverbrauch und -bedarf (nach PHPP) von 35 Gebäuden des Förderprogramms "Modernisierung zum Passivhaus im Bestand" des Landes Hessen (Quelle: [10])

3.1.2 Heizwärmeverbrauch - Querauswertung von Best Practice-Einzelprojekten

Im folgenden Abschnitt werden die Verbrauchsdaten einzelner Best Practice-Sanierungen bei Mehrfamilienhäusern aus Deutschland zusammengetragen und miteinander verglichen. Der energetische Standard orientiert sich meist am Passivhaus-Standard (z. B. Sanierung mit Passivhaus-Komponenten), das Bilanzverfahren für den Heizenergiebedarf ist zum Teil das PHPP, zum Teil die deutsche DIN V 4108-6 (EnEV). Die Bezugsfläche ist in der Regel die Energiebezugsfläche (EBF) nach PHPP, bei den Projekten Karlsruhe-Rintheim und Neu-Ulm lag diese nicht vor, so dass hier die ca. 25 % größere Gebäudenutzfläche A_N verwendet wurde. Es werden der Heizwärmebedarf sowie der Heizwärmeverbrauch ausgewertet, wobei bei letzterem unterstellt wird, dass der in der Wohnung gemessene Wärmeverbrauch für die Beheizung dem Heizwärmeverbrauch entspricht (Verteilverluste innerhalb der Wohnung sind damit ggf. dem Heizwärmebedarf zugerechnet). Die ausgewerteten Projekte sind in Tabelle 1 dokumentiert. Bei den Gebäuden in Innsbruck wurden die Sanierungsmaßnahmen teilweise noch nicht vollständig umgesetzt; aus diesem Grund wurden diese Gebäude getrennt untersucht.

In Abbildung 9 sind für diese Gebäude die berechneten Heizwärmebedarfe mit Standardrandbedingungen, der Heizwärmebedarf mit angepassten Randbedingungen³, die gemessenen Heizwärmeverbräuche im ersten und zweiten Messjahr sowie die absolute Differenz zwischen 1. Messjahr und Heizwärmebedarf mit Standardrandbedingungen dargestellt. Die Werte sind differenziert nach dem Bilanzverfahren: links PHPP, rechts EnEV bzw. DIN V 4108-6.

³ z.B. unter Berücksichtigung des lokalen Klimas im ersten Messjahr, der tatsächlichen Raumtemperatur sowie weiteren Einflussfaktoren, die von den verschiedenen Forschern berücksichtigt wurden

Tabelle 1: Übersicht der ausgewerteten Sanierungsprojekte

Ort	Bezeichnung	Jahr	Verfahren	EBF [m ²]	q _{H, Standard} [kWh/(m ² a)]	Quelle
Hofheim	Wilhelmstraße	2006	EnEV			[11]
Frankfurt a.M.	Tevesstraße 4er	2006	PHPP	1788	17,3	[12], [13]
Frankfurt a.M.	Tevesstraße 6er	2006	PHPP	2885	17,4	[12], [13]
Nürnberg	Jean-Paul-Platz	2002	PHPP	1117	27,4	[14]
Ludwigshafen	PHiB	2006	PHPP	750	19,8	[15]
Ludwigshafen	NEH	2006	PHPP	750	50,3	[15]
Karlsruhe	Rintheim R2+R3	2011	EnEV	?	18 / 12	[16]
Frankfurt a.M.	Rotlintstraße	2011	PHPP	5382	24,9	[17]
Innsbruck	8 MFH-Projekte	2016-2019	PHPP	40.881	10,3 – 51,6	[18]
Darmstadt	PHSP	2019	PHPP	1688	20,4	[19]
Gießen	Schwarzlachweg	2019	PHPP	723	15	[20]
Neu-Ulm	EffizienzhausPlus1	2016	EnEV	787	8,6	[21]
Neu-Ulm	EffizienzhausPlus1	2015	EnEV	765	17,9	[21]
Berlin	degewo Zukunftshaus		EnEV	3955	15 / 16,5	[22]

Die Differenz zwischen Bedarf (blau) und Verbrauch (grün) liegt bei den bereits vollständig sanierten PHPP-Projekten mit Ausnahme des NEH-Projekts in Ludwigshafen⁴ im Mittel um 3,8 kWh/(m²a) über dem Bedarfswert mit Standardrandbedingungen (grüne Punkte). Somit fällt die Überschreitung sehr gering aus. Die Projekte in Innsbruck wurden teilweise wohnungsweise saniert, so dass zum Zeitpunkt der Auswertungen nur ein Teil der Wohnungen vollständig den Zielzustand erreicht hatte, wodurch die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch hier größer ausfallen. Bei den Projekten, die nach EnEV bilanziert wurden, gibt es deutliche Ausreißer sowohl nach oben (höherer Verbrauch) als auch nach unten (geringere

⁴ Hier ist keine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, sondern nur ein Abluftventilator im Badezimmer vorhanden

Verbrauch). In wieweit dies mit dem Berechnungsverfahren zusammenhängt oder durch projektspezifische Besonderheiten verursacht wird, kann hier nicht allgemeingültig abgeleitet werden.

Vergleicht man die gemessenen Verbräuche (grün) mit den angepassten Bedarfswerten (blau schraffiert), verringert sich die Differenz zwischen Bedarf und Verbrauch tendenziell leicht, die Aussage ändert sich aber nicht grundsätzlich.

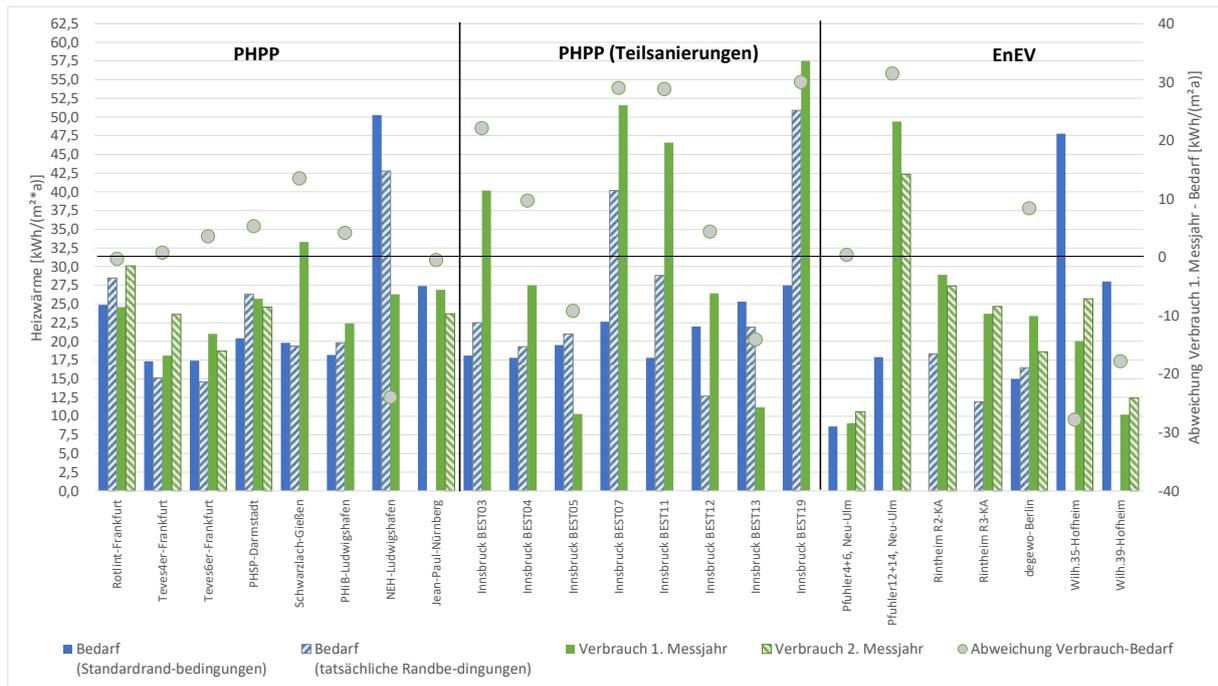


Abbildung 9: Heizwärmebedarf mit Standardrandbedingungen (blau), Heizwärmebedarf mit angepassten Randbedingungen (Klima, Raumtemperatur, ...) (blau schraffiert) und Heizwärmeverbrauch für das erste und zweite Messjahr (grün, bzw. Grün schraffiert) von 23 hocheffizient sanierten Gebäuden sowie absolute Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch im ersten Messjahr (Punkte)

Einen wichtigen Einflussfaktor auf den Heizwärmeverbrauch stellt die Raumtemperatur in den Wohnungen dar. In [19] wurden für verschiedene Projekte der Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und Heizwärmeverbrauch dargestellt. Es zeigt sich, dass die gemessenen Raumtemperaturen der hocheffizienten Sanierungen mit niedrigen Heizwärmeverbräuchen im Bereich zwischen 21,5 und 23 °C liegen. Obwohl diese Temperaturen über den Standardansätzen von PHPP und EnEV liegen, werden dennoch sehr geringe Heizwärmeverbräuche erreicht.

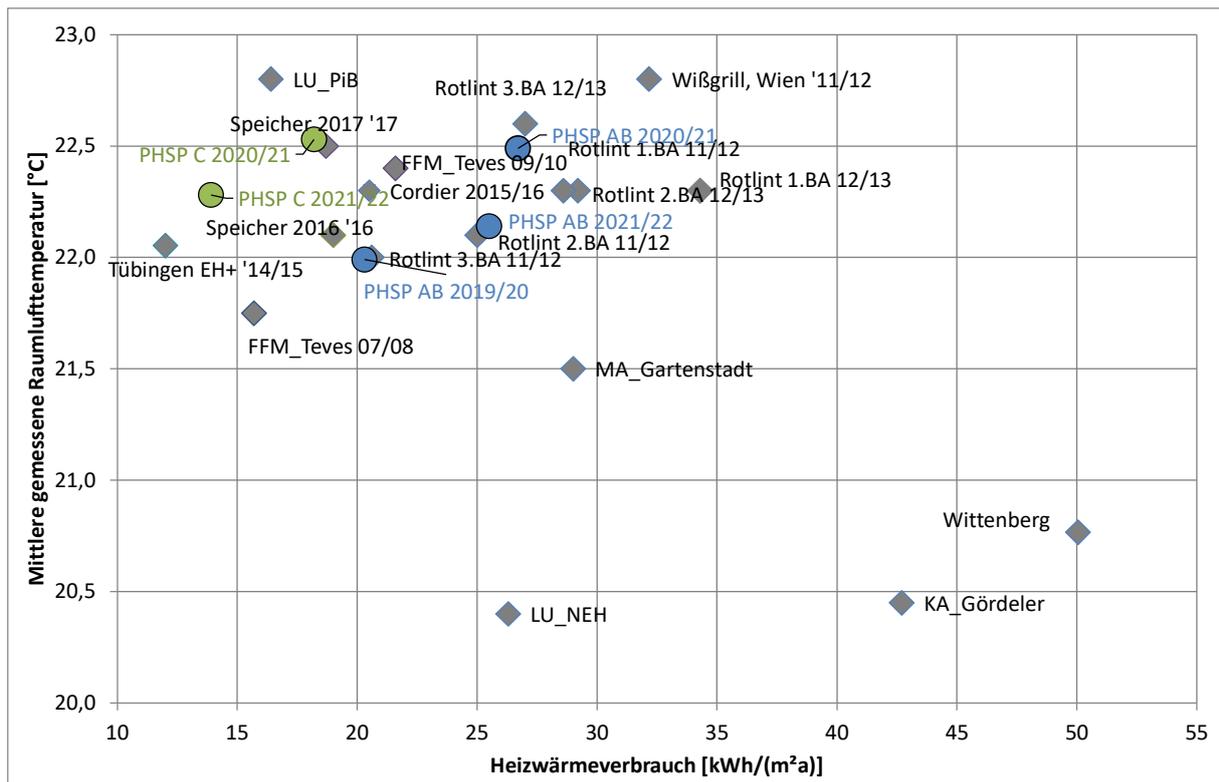


Abbildung 10: Auswertung unterschiedlicher energieeffizienter Gebäude: gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit des gemessenen Heizwärmeverbrauchs (Quelle: [19])

3.1.3 Endenergieverbrauch_{Heizung+WW} sowie Endenergieverbrauch_{gesamt} und Netzbezug_{gesamt} monoelektrisch betriebener Mehrfamilienhaus-Sanierungen

In Abbildung 11 sind die gemessenen Verbräuche ambitionierter Sanierungen von Mehrfamilienhäusern im deutschsprachigen Raum dargestellt, die mit Erdgas oder mit Nah-/ Fernwärme beheizt werden. Zum Teil handelt es sich um Gebäude, deren Energieverbräuche im Rahmen wissenschaftlicher Messungen detailliert erfasst wurden und deren Heizwärmeverbrauch schon in Unterabschnitt 3.1.2 dargestellt wurde. Für den anderen Teil der Projekte liegen – zum Teil über viele Jahre – die abgerechneten Verbräuche vor. Zum Vergleich wird der mittlere Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser von Mehrfamilienhäusern in Deutschland dargestellt.

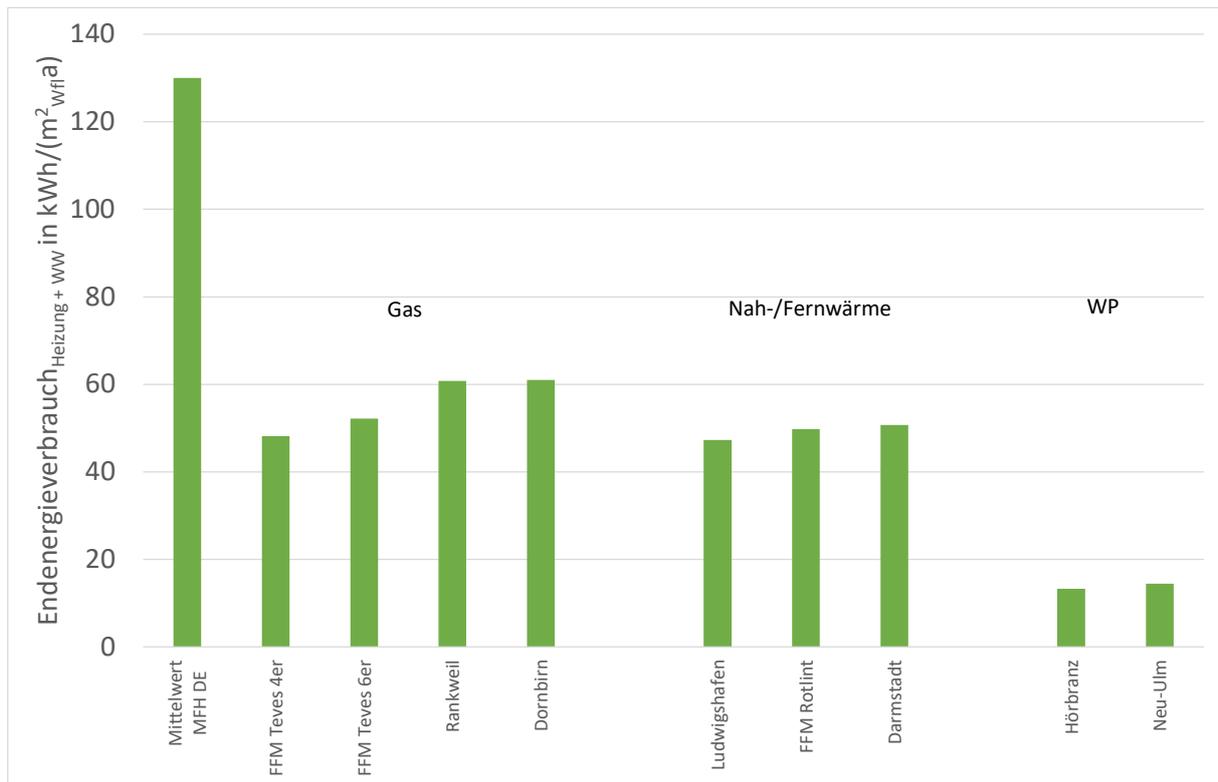


Abbildung 11: Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser bei hocheffizienten Sanierungen von Mehrfamilienhäusern (Quelle: [19])

Der mittlere Verbrauch von Mehrfamilienhäusern in Deutschland wird in verschiedenen Studien mit etwa $130 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WFl}} \text{a})$ angegeben ([23]). Die genannten Werte beruhen auf den Auswertungen einer hohen Anzahl an Verbrauchsabrechnungen. Sie enthalten Verbräuche von Neubauten sowie von teilsanierten Gebäuden, in verschiedenen Standards umfassend sanierten Gebäuden sowie von unsanierten Mehrfamilienhäusern. Als Verbräuche der schlechtesten 2 % des Bestandes werden in [23] etwa 280 bis $320 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WFl}} \text{a})$ genannt.

Die gemessenen Endenergieverbräuche für Heizung und Warmwasser der dargestellten gasbeheizten Sanierungsprojekte liegen im Bereich von 48 bis $61 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WFl}} \text{a})$, die der Sanierungen mit Nah- oder Fernwärmeversorgung bei 47 bis $51 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WFl}} \text{a})$.

Die dargestellten Messwerte zeigen, dass der mittlere Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser um etwa 55 bis 65 % gegenüber dem mittleren Verbrauch reduziert werden kann. (Im Vergleich zu unsanierten Bestandsgebäuden würde die Einsparung noch deutlich höher ausfallen)

Während die älteren der dargestellten energetisch hochwertigen Sanierungen vor etwa 15 Jahren mit Gas-Brennwertkesseln ausgestattet wurden, werden in neueren Sanierungsprojekten weit häufiger Wärmepumpen eingesetzt. In Projekten, bei denen die hohe Effizienz

(Standards Passivhaus bzw. EnerPhit) mit Wärmepumpen für Heizung und Warmwasser kombiniert wird, können Endenergieverbräuche für Heizung und Warmwasser von etwa 13 bis 14 kWh/(m²_{WNF}a) erreicht werden, wie in Abbildung 11 dargestellt. Zur Einordnung dieser sehr niedrigen Verbräuche muss allerdings angemerkt werden, dass es sich in beiden Projekten um eher kleine Mehrfamilienhäuser handelt, in denen die Verteilverluste für die Warmwasserbereitung eine geringere Rolle spielen als in größeren Gebäuden.

Abbildung 12 zeigt für einige wärmepumpenbeheizte Mehrfamilienhaus-Sanierungen den spezifischen Gesamt-Endenergieverbrauch in Summe aller Anwendungen inklusive Haushaltsstrom sowie die spezifische PV-Stromerzeugung.

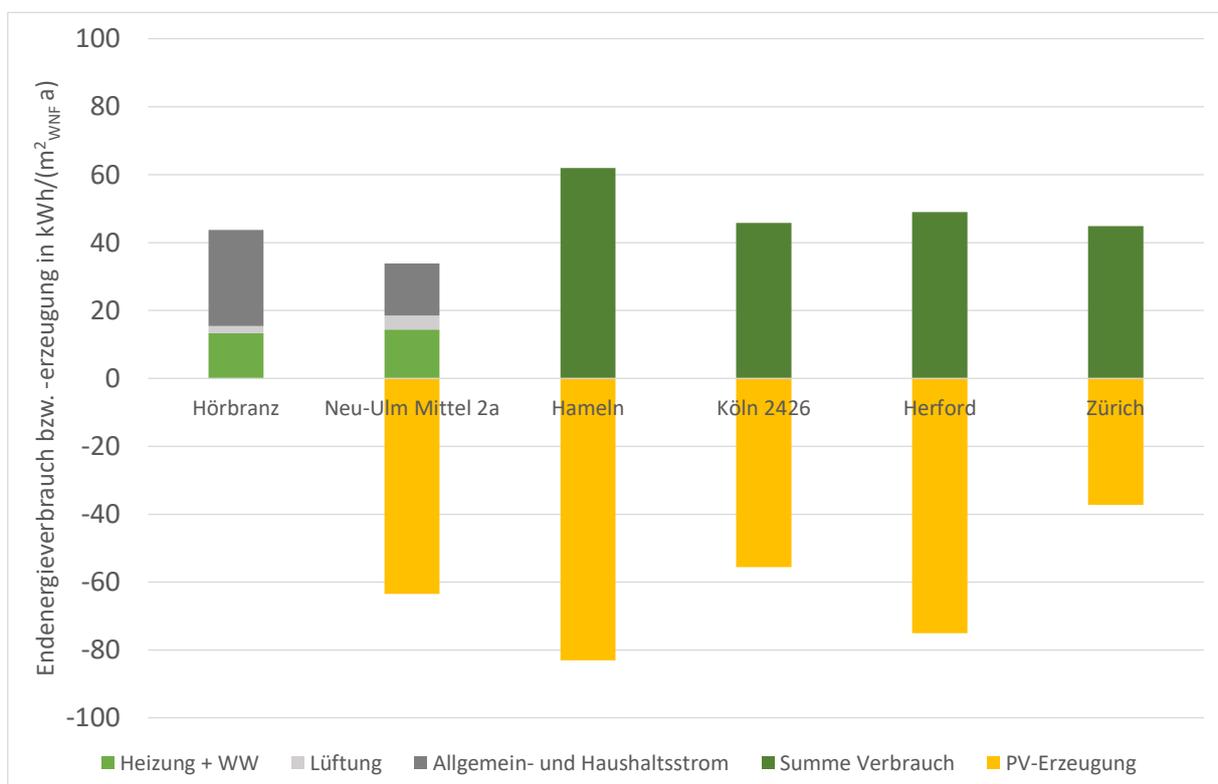


Abbildung 12: Spezifischer Endenergieverbrauch gesamt hocheffizienter Sanierungen von Mehrfamilienhäusern sowie spezifische PV-Stromerzeugung in kWh/(m²_{WNF} a) (Quelle: [19])

Wie Abbildung 12 verdeutlicht, liegt der spezifische Gesamtverbrauch der dargestellten sanierten, wärmepumpenbeheizten Mehrfamilienhäuser in Summe aller Energieanwendungen zwischen 34 und 62 kWh/(m²_{WNF} a). Dieser Wert entspricht in etwa dem Doppelten des mittleren Haushaltsstromverbrauchs in Deutschland und Österreich.

In den niedrigeren Gebäuden in Hameln (2 Geschosse), Neu-Ulm (2 + DG) und Herford (3 Geschosse) gelingt es in der Jahresbilanz, den gesamten Stromverbrauch der Gebäude durch die PV-Ertrag rechnerisch auszugleichen („Net-Zero-Bilanz“, gelber Balken).

Im viergeschossigen Projekt in Köln gelingt aufgrund der nochmals verbesserten Hüllqualität (Passivhausstandard bzw. KfW 40) ebenfalls, Net-Zero in der Jahresbilanz zu erreichen. Im

sechsgeschossigen Projekt in Zürich ist dies trotz höchster Effizienz nicht möglich: Der (sehr geringe) Gesamtverbrauch der sechs Geschosse liegt höher als der Jahresertrag der PV auf dem Dach und an den Fassaden.

Die Abhängigkeit von der Geschossigkeit ist eine der Schwächen der Net-Zero-Jahresbilanz. Eine weitere Schwäche ist die Gleichsetzung von Stromverbrauch und Stromerzeugung, ohne die fehlende Gleichzeitigkeit zu berücksichtigen. Abbildung 13 verdeutlicht dies am Beispiel des energetisch sehr hochwertigen Projekts 2426 in Köln. Dennoch kann der Net-Zero-Ansatz einen Anreiz für Hauseigentümer oder Investoren sein, die PV-Flächen zu maximieren und damit den aus Klimaschutzgründen erforderlichen PV-Ausbau auf bereits bebauten Flächen zu unterstützen.



Abbildung 13: Monatsbilanz des Gesamt-Stromverbrauchs in Summe aller Anwendungen und des PV-Ertrags für das Projekt 2426 in Köln - Monitoringjahr 2023 (Quelle: [24])

Aufgrund seiner hervorragenden energetischen Qualität (Passivhausstandard, KfW40) erreicht das Gebäude mit vier Vollgeschoßen 2023 einen Jahresüberschuss an PV-Strom in Höhe von 19 % des Verbrauchs. Dennoch kann trotz des minimierten Stromverbrauchs und der sehr großen, auf beiden Seiten des Satteldachs angeordneten PV-Anlage im Winter nur ein sehr kleiner Teil des Stromverbrauchs durch die PV-Anlage gedeckt werden.

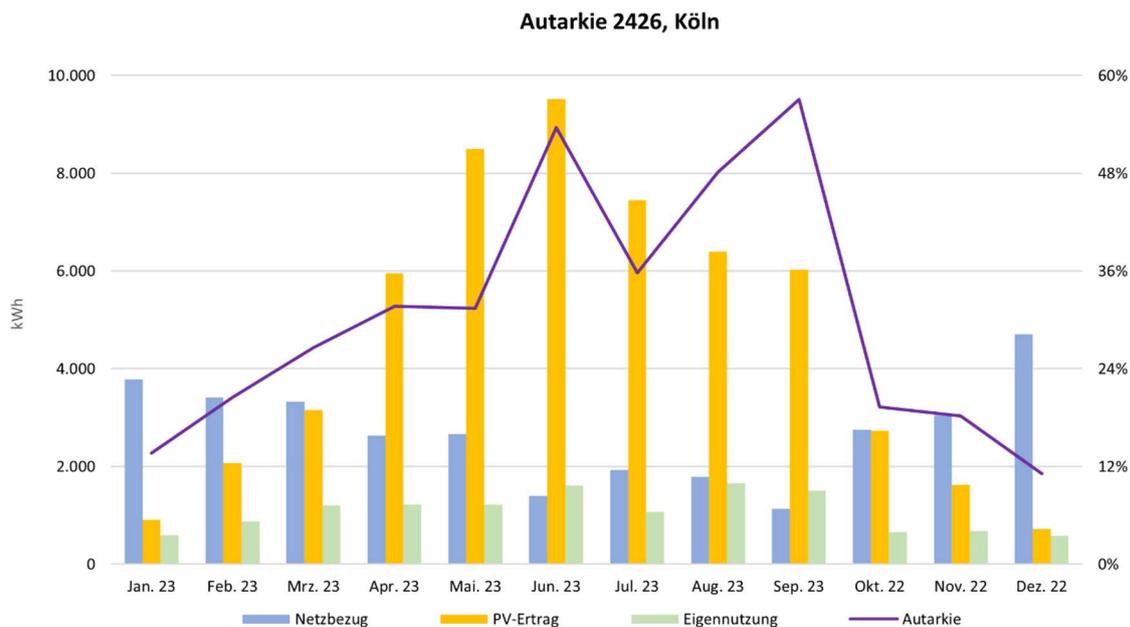


Abbildung 14: Monatswerte des PV-Ertrags, der PV-Eigennutzung, des Netzbezugs sowie des Autarkiegrades für das Projekt 2426 in Köln (Quelle: [25])

Die monatlichen Autarkiegrade liegen zwischen 11 % im Dezember und 57 % im September (Abbildung 14). Ganzjährig wurde etwa 23 % des PV-Stroms im Gebäude selbst genutzt. Dies entspricht etwa 28,5 % des Endenergieverbrauchs von $45,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFA}})$. Nach Abzug des eigengenutzten Anteils des PV-Ertrags verbleibt ein spezifischer Netzbezug von $32,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFA}})$ – nur etwas mehr, als der durchschnittliche Haushaltsstromverbrauch in Deutschland und Österreich.

3.2 Best-Practice-Beispiele im Neubau in Deutschland

Für den Neubau existieren eine Reihe von Untersuchungen besonders energieeffizienter Gebäude im Passivhaus-Standard oder im Effizienzhaus Plus Standard. Im Folgenden werden einige dieser Neubauprojekte kurz beschrieben, um die Auswertung der sanierten Gebäude zu ergänzen.

3.2.1 Effizienzhaus Plus

Das deutsche Bundesbauministerium förderte in den Jahren 2011 bis 2020 die Errichtung und das Monitoring von Gebäuden, die ihren Jahresendenergieverbrauch, beispielsweise über PV-Anlagen, in der Jahresbilanz decken und somit eine ausgeglichene oder sogar positive Energiebilanz aufweisen [26]. Die Bilanzierung erfolgte nach den damals gültigen Normen (EnEV) mit einigen spezifischen Anpassungen, wie der Berücksichtigung des Haushaltsstroms durch einen pauschalen Zuschlag von $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ beheizte NGF}^*a)$. Als Bezugsfläche wurde die beheizte Nettogrundfläche verwendet. 85 Prozent der Gebäude sind mit Wärmepumpen ausgestattet, während die restlichen Gebäude Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen, Nahwärme,

elektrische Direktheizungen oder saisonale Speicher nutzen [27]. Für die Gebäudehülle wurden keine speziellen Anforderungen definiert und die meisten Gebäude überschreiten die Anforderungen an den Passivhaus-Standard.

Abbildung 15 zeigt den Vergleich zwischen dem vorausgerechneten Bedarfswert für die Endenergie und den tatsächlichen Verbrauchswerten aus zwei Messperioden im realen Betrieb für Ein- und Zweifamilienhäuser. In Abbildung 16 sind die entsprechenden Ergebnisse für Mehrfamilienhäuser dargestellt.

Besonders im ersten Messjahr traten bei einigen Gebäuden deutliche Abweichungen zwischen Endenergiebedarf und -verbrauch auf. Diese Abweichungen wurden häufig durch nicht korrekt eingestellte oder nicht einwandfrei funktionierende Anlagentechnik verursacht. Zudem muss berücksichtigt werden, dass neben der Anlagentechnik auch der pauschale Ansatz für den Haushaltsstrombedarf eine zusätzliche „Unbekannte“ in Form des Nutzerverhaltens mit sich bringt.

Die Erfahrungen aus dem Programm Effizienzhaus Plus zeigen, dass Gebäude mit einer ausgeglichenen Jahresbilanz besonders im Ein- und Zweifamilienhausbereich möglich sind (diese Ergebnisse werden hier nicht dargestellt). Allerdings gestaltet sich die Auswertung der Endenergieverbräuche als schwierig, da die unterschiedlichen Einflüsse von Nutzern und der Anlagentechnik nicht immer eindeutig voneinander getrennt werden können. Aus diesem Grund wurde in den Unterabschnitten 3.1.1 und 3.1.2 der Heizwärmeverbrauch isoliert betrachtet, obwohl für die Abrechnung der Endenergieverbrauch am Zähler relevant ist.

Bei den Gebäuden in Neu-Ulm handelt es sich um modernisierte Mehrfamilienhauszeilen, die auch in die Auswertung in Unterabschnitt 3.1.2 aufgenommen wurden.

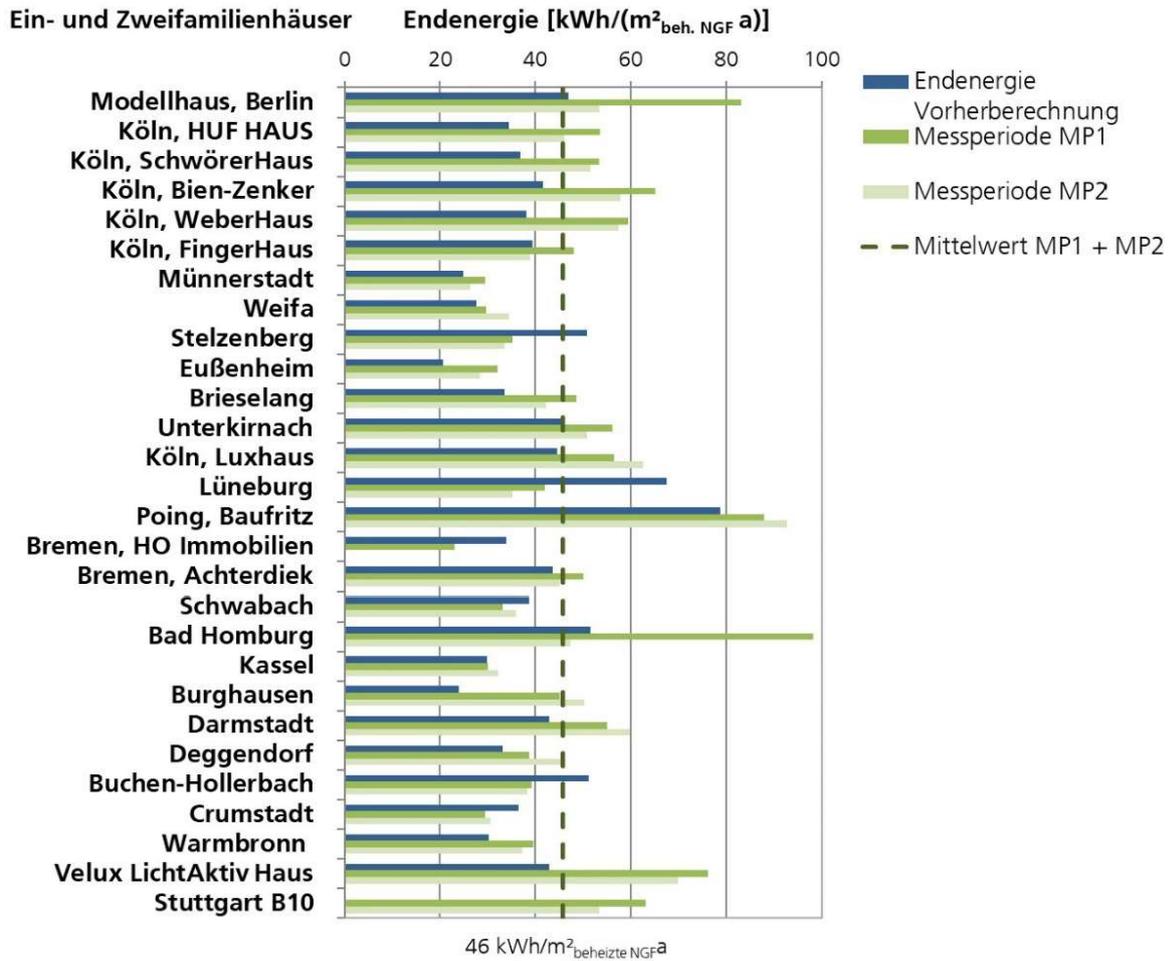
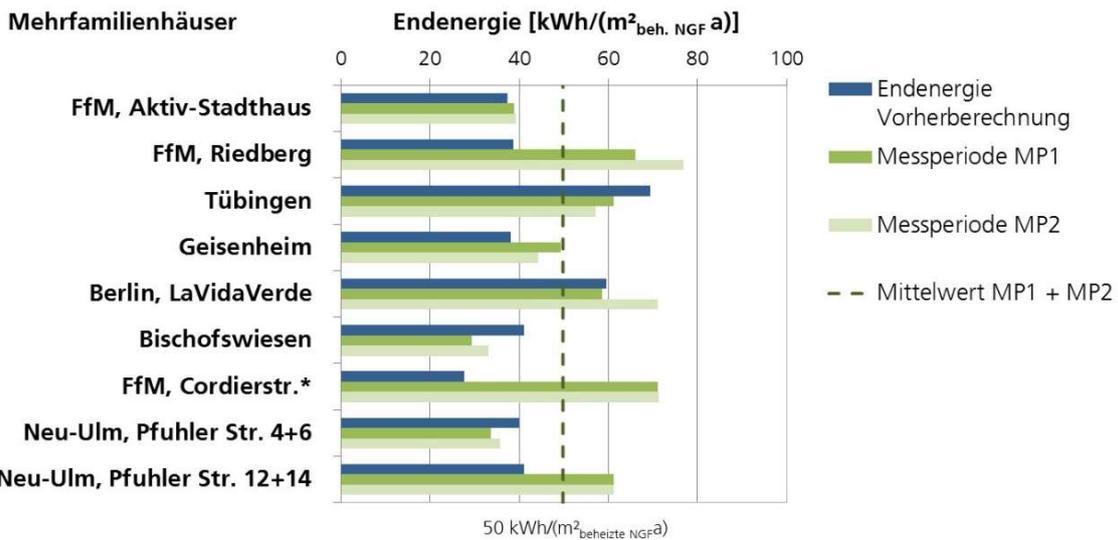


Abbildung 15: Vorausberechnung und Messwerte Endenergieverbrauch in Summe aller Energieanwendungen für 2 Messperioden von Ein- und Zweifamilienhäusern (Quelle: [27])



*zum Zeitpunkt der Antragstellung gültige Berechnungsverfahren liefert vollständige Verrechnung Endenergiebedarf BHKW

Abbildung 16: Vorausberechnung und Messwerte Endenergieverbrauch in Summe aller Energieanwendungen für 2 Messperioden von Ein- und Mehrfamilienhäusern (Quelle: [27])

3.2.2 Querauswertung Passivhäuser

Im Jahr 2015 wurden die Energieverbräuche einiger Neubauprojekte im Passivhaus-Standard vom Passivhaus Institut ausgewertet [28]. Der Fokus lag auf dem Heizwärmeverbrauch, zur Kennwertbildung wurde die Energiebezugsfläche nach PHPP verwendet.

Abbildung 17 zeigt den Heizwärmebedarf und den gemessenen Verbrauch für insgesamt 126 Wohneinheiten. Bei Projekten mit mehreren Messjahren wurde der höhere Wert verwendet. Alle Projekte haben den vorausberechneten Bedarf erreicht oder sogar unterschritten. Es ist jedoch zu beachten, dass mit Ausnahme des Projekts Frankfurt-Grempstraße alle anderen Projekte Reihen- oder Einfamilienhäuser umfassen, bei denen mit einer stärkeren Teilbeheizung zu rechnen ist, was den Verbrauch reduzieren kann.

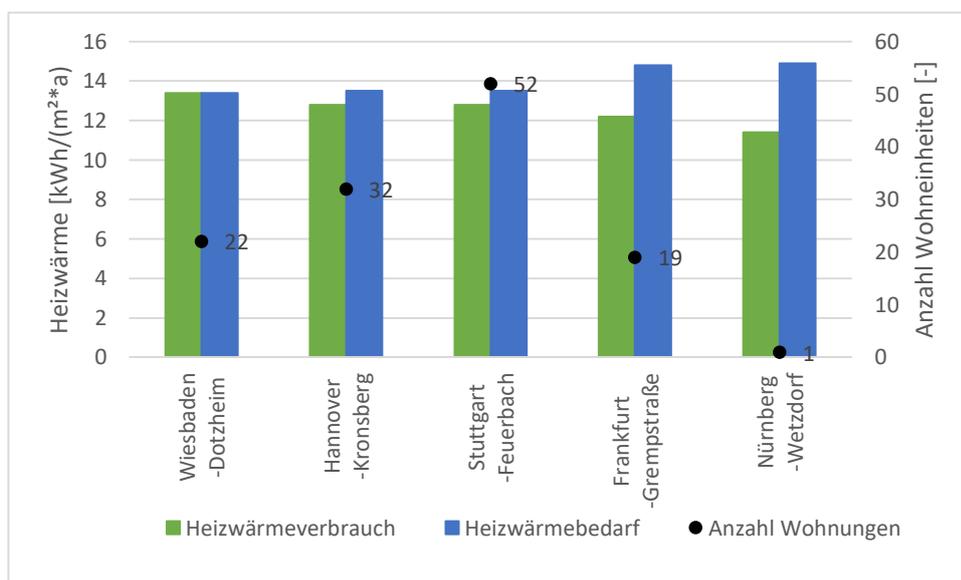


Abbildung 17: Vergleich von Heizwärmebedarf und mittlerem Heizwärmeverbrauch verschiedener Passivhaus-Neubauten (Quelle: eigene Darstellung nach [28])

Die Sanierungsvorhaben in [28] wurden in Unterabschnitt 3.1.2 berücksichtigt.

3.2.3 Heidelberg „Bahnstadt“

In der „Bahnstadt“ in Heidelberg wurde ein komplettes Stadtquartier im Passivhaus-Standard neu errichtet. Für die insgesamt 2.268 Wohneinheiten und 31 Gewerbeeinheiten lag der Heizwärmeverbrauch⁵ im Mittel über 5 Messjahre bei 18,3 kWh/(m²_{EBF}*a) [29]. Die Heizwärmeverbräuche der einzelnen Baufelder reichen von 12,4 bis 29,6 kWh/(m²_{EBF}*a) (siehe Abbildung 18). Der Bedarfswert beziehungsweise Sollwert für die Baugenehmigung in diesem Quartier

⁵ Zur Ermittlung des Heizwärmeverbrauchs wurde der sommerliche Endenergieverbrauch als Sockelbetrag für Warmwasserbereitung, Verteilverluste und Rampenheizung bestimmt, dann auf das gesamte Jahr hochgerechnet und schließlich vom Endenergieverbrauch für das gesamte Jahr abgezogen. Eine Witterungsbereinigung wurde nicht durchgeführt.

betrug $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$. Somit lag der Heizwärmeverbrauch nur etwa $3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ über dem Anforderungswert. Der Gesamtwärmeverbrauch aller Baufelder lag im Mittel bei $51,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$, wobei die besten Baufelder bei $45 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ lagen, so dass die Verbrauchswerte als sehr niedrig eingestuft werden können (Abbildung 19).

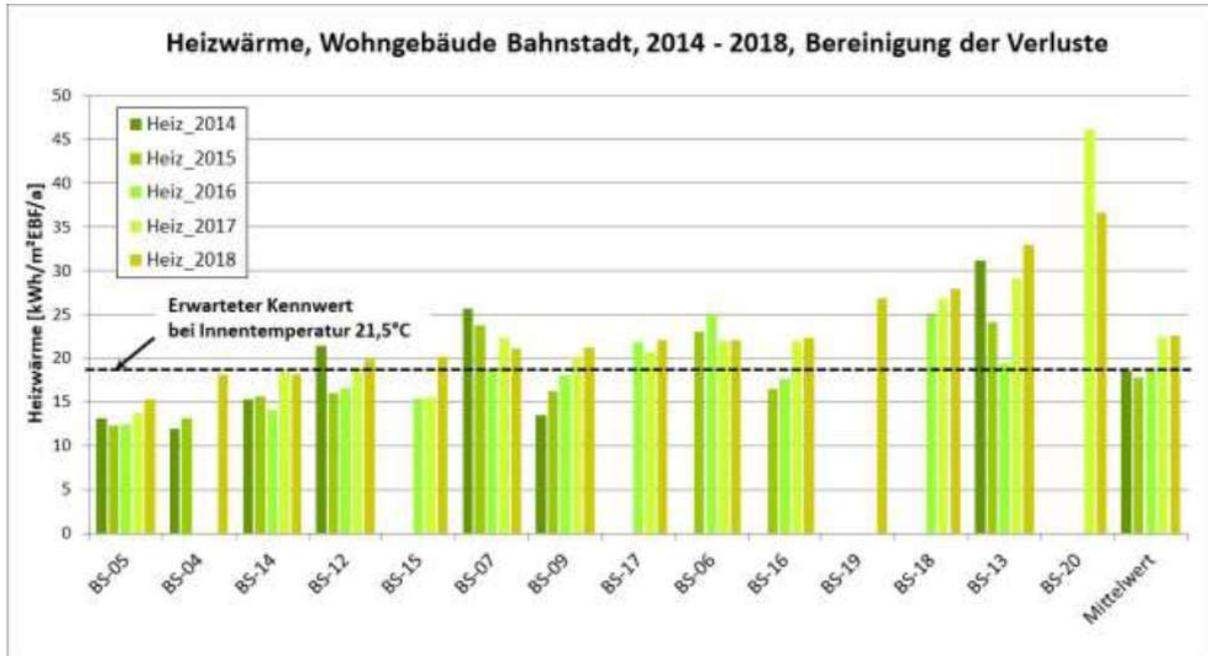


Abbildung 18: Heizwärmeverbrauch (siehe Fußnote 5) der verschiedenen Baufelder (Quelle: [29])

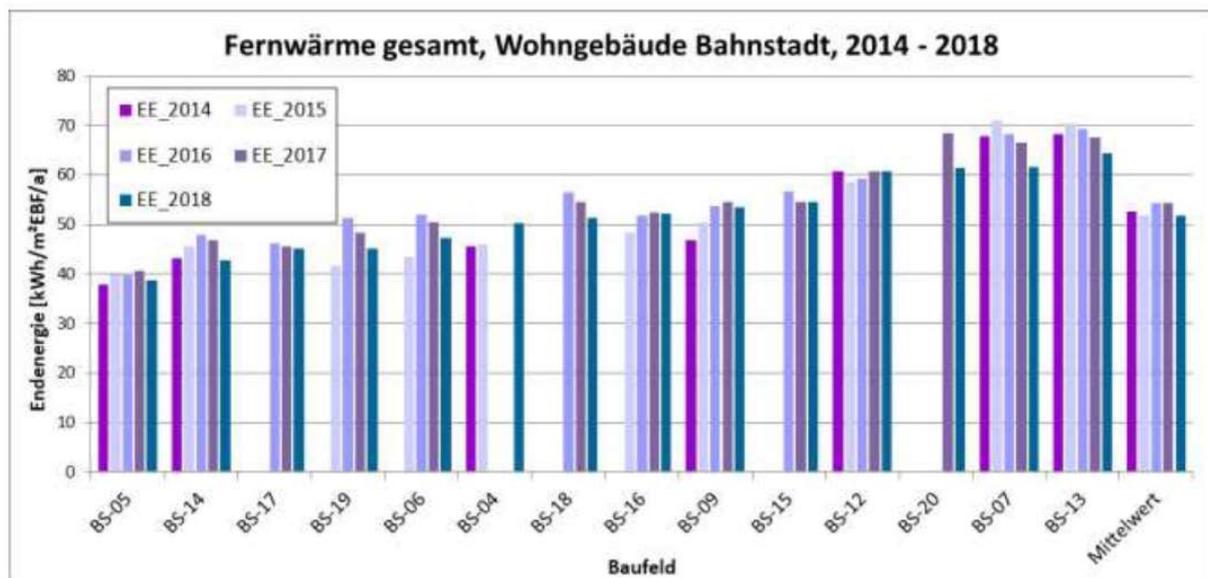


Abbildung 19: Gesamtverbrauch Fernwärme für Heizung und Warmwasserbereitung der verschiedenen Baufelder (Quelle: [29])

Abkürzungen

A _N	Gebäudenutzfläche nach EnEV/GEG
BGF	Brutto-Grundfläche
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBF	Energiebezugsfläche (nach PHPP)
EFH	Einfamilienhaus
EnerPHit	Sanierungsstandard mit Passivhauskomponenten
EnEV	Energieeinsparverordnung (gesetzliche Mindestanforderungen in Deutschland bis 2019)
GEG	Gebäudeenergiegesetz (gesetzliche Mindestanforderungen in Deutschland seit 2020)
H'T	spezifischer Transmissionswärmetransferkoeffizient (entspricht ungefähr dem mittleren U-Wert der Gebäudehülle)
MFH	Mehrfamilienhaus
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik (gesetzliche Mindestanforderungen in Österreich)
q _H	Heizwärmebedarfs
PHPP	Passivhaus-Projektierungs-Paket
PV	Photovoltaik
ZFH	Zweifamilienhaus

Abbildungen

Abbildung 1: Statistische Auswertung der Zustands- und Verbrauchsdaten der 108 Gebäude, gruppiert nach Wärmegüte-Klassen. Mehrfamilienhäuser mit konventioneller Wärmeversorgung (Fernwärme, fossile Brennstoffe), die Verbrauchsangaben beziehen sich auf die beheizte Wohnfläche.....	8
Abbildung 2: Gemessener Energieverbrauch aufgetragen über dem berechneten Energiebedarf (Vergleichswerte Realbilanz) für den Bilanzraum <H> „Heizung“	10
Abbildung 3: Verbrauchsbenchmarks und Prognosewerte des physikalischen Modells aus der MOBASY-Realbilanz (Erwartungswert und Erwartungsbereich) Flächenbezug: beheizte Wohnfläche11	
Abbildung 4: Verhältnis von Endenergieverbrauch _{Heizung+WW} und Endenergiebedarf _{Heizung+WW} nach DIN V 4108-6 und DIN V4701-10 (Y-Achse) in Abhängigkeit des Endenergiebedarf _{Heizung+WW} (X-Achse) für 1.652 Ein- und Zweifamilienhäuser	13
Abbildung 5: Verhältnis von Endenergieverbrauch _{Heizung+WW} und Endenergiebedarf _{Heizung+WW} nach DIN V 4108-6 und DIN V4701-10 (Y-Achse) in Abhängigkeit des Endenergiebedarf _{Heizung+WW} (X-Achse) für 927 Mehrfamilienhäuser	14
Abbildung 6: Kalibrierungsfaktor Bedarf-Verbrauch (Endenergie _{Heizung+WW}) und absolute Veränderung an der oberen Klassengrenze (Quelle: eigene Auswertung und Darstellung nach [7])	15
Abbildung 7: Endenergieverbrauchswerte _{Heizung+WW} gegenüber Endenergiebedarfswerten _{Heizung+WW} ..	16
Abbildung 8: Heizwärmeverbrauch und -bedarf (nach PHPP) von 35 Gebäuden des Förderprogramms “Modernisierung zum Passivhaus im Bestand” des Landes Hessen	18
Abbildung 9: Heizwärmebedarf mit Standardrandbedingungen (blau), Heizwärmebedarf mit angepassten Randbedingungen (Klima, Raumtemperatur, ...) (blau schraffiert) und Heizwärmeverbrauch für das erste und zweite Messjahr (grün, bzw. Grün schraffiert) von 23 hocheffizient sanierten Gebäuden sowie absolute Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch im ersten Messjahr (Punkte)	20
Abbildung 10: Auswertung unterschiedlicher energieeffizienter Gebäude: gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit des gemessenen Heizwärmeverbrauchs	21
Abbildung 11: Endenergieverbrauch _{Heizung+WW} hocheffizienter Sanierungen von Mehrfamilienhäusern22	
Abbildung 12: Spezifischer Endenergieverbrauch _{gesamt} hocheffizienter Sanierungen von Mehrfamilienhäusern sowie spezifische PV-Stromerzeugung in kWh/(m ² _{WNF} a)	23
Abbildung 13: Monatsbilanz des Gesamt-Stromverbrauchs in Summe aller Anwendungen und des PV-Ertrags für das Projekt 2426 in Köln - Monitoringjahr 2023	24
Abbildung 14: Monatswerte des PV-Ertrags, der PV-Eigennutzung, des Netzbezugs sowie des Autarkiegrades für das Projekt 2426 in Köln	25
Abbildung 15: Vorausberechnung und Messwerte Endenergieverbrauch in Summe aller Energieanwendungen für 2 Messperioden von Ein- und Zweifamilienhäusern	27
Abbildung 16: Vorausberechnung und Messwerte Endenergieverbrauch in Summe aller Energieanwendungen für 2 Messperioden von Ein- und Mehrfamilienhäusern	27
Abbildung 17: Vergleich von Heizwärmebedarf und mittlerem Heizwärmeverbrauch verschiedener Passivhaus-Neubauten (Quelle: eigene Darstellung nach [28])	28
Abbildung 18: Heizwärmeverbrauch der verschiedenen Baufelder	29
Abbildung 19: Gesamtverbrauch Fernwärme für Heizung und Warmwasserbereitung der verschiedenen Baufelder	29

Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der ausgewerteten Sanierungsprojekte 19

Literatur

- [1] „Klimaschutzbericht 2023 - Barrierefreie Zusammenfassung“, Umweltbundesamt, Wien, REP-0871, 2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0871bfz.pdf>. [Zugegriffen: 10. Januar 2024]
- [2] „Modellierung der Bandbreiten und systematischen Abhängigkeiten des Energieverbrauchs zur Anwendung im Verbrauchscontrolling von Wohngebäudebeständen (MOBASY)“. Institut Wohnen und Umwelt GmbH. Verfügbar unter: <https://www.iwu.de/forschung/energie/mobasy/>. [Zugegriffen: 9. Januar 2024]
- [3] T. Loga, G. Behem, S. Swiderek, und B. Stein, *Verbrauchsbenchmarks für unterschiedliche Dämmstandards bei vermieteten Mehrfamilienhäusern*. in MOBASY-Teilbericht. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2022. Verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/mobasy/2022_IWU_Loga-EtAl_Verbrauchsbenchmarks-Daemmstandards_MOBASY.pdf. [Zugegriffen: 9. Januar 2024]
- [4] T. Loga und B. Stein, „Zusammenhang Energieverbrauch und Dämmstandard bei Mehrfamilienhäusern“, gehalten auf der 14. EffizienzTagung Bauen + Modernisieren, Hannover: energie+umwelt zentrum (euz), Nov. 2022. Verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/mobasy/2022_EffizienzTagung_Loga-Stein_Zusammenhang-Energieverbrauch-und-Daemmstandard-bei-MFH.pdf. [Zugegriffen: 10. Januar 2024]
- [5] T. Loga u. a., „Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen“, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.), 04/2019, März 2019.
- [6] T. Loga, S. Swiderek, und M. Grafe, „Modellprojekt Verbrauchsbenchmarks - Soll-/Ist-Vergleich des Energieverbrauchs zur Evaluierung und Steigerung der Effizienz von Energiesparmaßnahmen im Praxisalltag eines Wohnungsunternehmens“, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, Juni 2019. Verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/prj/2019_IWU_LogaSwiderekGrafe_ModellprojektEnergieverbrauchsbenchmarks_NHW.pdf
- [7] T. Gniechwitz und D. Walberg, „Energiebedarf und tatsächlicher Energieverbrauch bei Wohngebäuden“, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Keil, 24–2021, Mai 2021.
- [8] U. Bigalke und H. Marcinek, „Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude. Teil 1“, Deutsche Energie-Agentur (dena), Berlin, Juni 2016. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9164_dena-Studie_Auswertung_von_Verbrauchskennwerten_energieeffizienter_Wohngebaeude.pdf. [Zugegriffen: 14. Februar 2024]
- [9] „EnerPHit: Energiestandard für die Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten“. Passivhaus Institut. Verfügbar unter: <https://passipedia.de/zertifizierung/enerphit>. [Zugegriffen: 9. Januar 2024]
- [10] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung [Hrsg.], „Modernisierung zum Passivhaus im Bestand - Konzepte der Altbaumodernisierung mit Passivhauskomponenten. Realisierte Beispiele aus dem hessischen Förderprogramm“.

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, August 2017.

- [11] M. Großklos u. a., „Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim Endbericht Gesamtvorhaben“, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, Okt. 2008. Verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/hofheim/Endbericht_gesamt.pdf. [Zugegriffen: 26. Februar 2024]
- [12] S. Peper, J. Grove-Smith, und W. Feist, „Sanierung mit Passivhauskomponenten Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M.“, Passivhaus Institut, Darmstadt, Feb. 2009. Verfügbar unter: https://passiv.de/downloads/05_tevesstrasse_messtechnische-begleitung.pdf. [Zugegriffen: 26. Februar 2024]
- [13] S. Peper, J. Schnieders, und W. Feist, „Monitoring Altbausanierung zum Passivhaus Verbrauch × Raumluftqualität × Kellerfeuchte Messtechnische Untersuchungen an den Sanierungsbauten Tevesstraße Frankfurt a.M.“, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juli 2011. Verfügbar unter: https://passiv.de/downloads/05_tevesstrasse_monitoring.pdf. [Zugegriffen: 26. Februar 2024]
- [14] „Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg – energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10“, 2005. Verfügbar unter: https://passiv.de/downloads/05_sanierung_jean-paul-platz.pdf. [Zugegriffen: 10. Januar 2024]
- [15] S. Peper und W. Feist, „Gebäudesanierung ‚Passivhaus im Bestand‘ in Ludwigshafen / Mundenheim Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge“, Passivhaus Institut, Darmstadt, Dez. 2008. Verfügbar unter: https://passiv.de/downloads/05_sanierung_phib.pdf. [Zugegriffen: 10. Januar 2024]
- [16] D. Müller, T. Osterhage, D. Cali, und L. für G. R. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, „Auswirkungen des Reboundeffekts bei der Sanierung von Bestandsgebäuden: Abschlussbericht: EnEff:Stadt: Forschung für die energieeffiziente Stadt“, Aachen, 2016. doi: 10.2314/GBV:867468777
- [17] M. Großklos, *Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116 - 128 in Frankfurt a. M. 2: Teilbericht Dokumentation der Bauphase*. Darmstadt, 2011.
- [18] S. Peper und M. C. Failla, „VERGLEICH GEMESSENER UND BERECHNETER ENERGIEBEDARFSWERTE UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE Innsbruck“, Passivhaus Institut, Darmstadt, D5.22 ANNEX Task 5.7, Juni 2021.
- [19] M. Großklos, A. Müller, G. Behem, B. Stein, T. Loga, und S. Swiderek, „PassivhausSozialPlus - Gesamtbericht Modellprojekt zum klimaneutralen Bauen und zur Minimierung der Nebenkosten im sozialen Wohnungsbau“, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, Okt. 2023. Verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/mobasy/2023_IWU_Grossklos-Et-AI_MOBASY-PassivhausSozialPlus-Gesamtbericht.pdf
- [20] S. Peper, J. Schnieders, und W. Hasper, „Messdatenauswertung zu einem mit Passivhauskomponenten sanierten Mehrfamilienhaus und Anwendung eines validierten Gebäudesimulationsverfahrens zur Identifikation des Einflusses von Gebäudehülle, Haustechnik und Nutzung Projektendbericht (Teil II)“, Passivhaus Institut, Darmstadt, März 2023. Verfügbar unter: https://passiv.de/downloads/05_altbausanierung_giesen_IEA_Annex_71_endbericht_2023.pdf. [Zugegriffen: 10. Januar 2024]
- [21] C. C. Lorz und C. van Treeck, „Endbericht Modellvorhaben Effizienzhäuser Plus im Altbau Energetisches Monitoring der Effizienzhäuser Plus im Altbau Pfuher Str. 4+6 und 12+14 in Neu-Ulm“, Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Aachen, AZ 10.08.81-13.01, Dez. 2018. Verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/weitere/ktf/effizienzhaus-plus-altbau/01_Start.html?pos=3

- [22] F. Sick, S. Dietz, und F. Werder, „Monitoring degewo Zukunftshaus in Berlin – Sanierung eines Zeilenhochhauses mit energetischen Zielen lokaler regenerativer Energiebedarfsdeckung für den Gebäudebetrieb – Forschungsfokus: Übertragbarkeit“, Berlin, Schlussbericht FKz 03ET1343A, Okt. 2020.
- [23] „Techem Verbrauchskennwerte 2022“, Techem Energy Services GmbH, Eschborn. Verfügbar unter: <https://www.techem.com/content/dam/techem/downloads/techem-com/vkw-studie/23-44-001%20VKW%202022%20Leseversion.pdf.coredownload.in-line.pdf>. [Zugegriffen: 4. April 2024]
- [24] „Energiesprung 2426“. Verfügbar unter: <https://www.zeller-koelmel.eu/projekte/energiesprung-2426.html>. [Zugegriffen: 18. April 2024]
- [25] M. Kölmel, B. Bilger, und I. Kuhl, „BAUKASTEN ENERGIESPRONG Planungshandbuch zum seriellen Umbau von Wohngebäuden zu Net-Zero-Häusern“, Zeller Kölmel Architekten GmbH, Köln, Dez. 2023.
- [26] „Förderprogramm Effizienzhaus Plus“. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Verfügbar unter: <https://www.zukunftbau.de/programme/effizienzhaus-plus>. [Zugegriffen: 15. Februar 2024]
- [27] H. Erhorn, A. Bergmann, und H. Erhorn-Klutig, „Effizienzhaus Plus Begleitforschung und Querauswertung von Modellvorhaben (Phase 3) Abschlussbericht Teil 1: Wohngebäude“, Fraunhofer IBP, Stuttgart, IBP-Bericht WB 209/2020, Sep. 2020.
- [28] S. Peper und W. Feist, „Die Energieeffizienz des Passivhaus-Standards: Messungen bestätigen die Erwartungen in der Praxis“, Passivhaus Institut, Darmstadt, Sep. 2015. Verfügbar unter: https://passiv.de/downloads/05_messergebnisse_zum_energieverbrauch_von_passivhaeusern.pdf. [Zugegriffen: 15. Februar 2024]
- [29] W. Orlik, „Energie-Monitoring der Jahre 2014 bis 2018 für die Wohngebäude im Passivhaus-Stadtteil Heidelberg-Bahnstadt“, Klimaschutz- und Energie-Beratungsagentur Heidelberg – Rhein-Neckar-Kreis gGmbH, Nov. 2019. Verfügbar unter: https://www.heidelberg-bahnstadt.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E1430605692/heidelberg/Objekt-datenbank/Bahnstadt/heidelberg-bahnstadt.de/Pdf/2021_Energie-Monitoring-2014-2018%20in%20der%20Passivhaussiedlung%20Bahnstadt%20_KliBA.pdf. [Zugegriffen: 15. Februar 2024]