

2.11 Querschnittsanalyse der Beispielgebäude

Martin Ploß + Andreas Peter

In der Querschnittsanalyse werden zunächst die Energiekonzepte der Projekte anhand der eingesetzten Komponenten dargestellt (siehe Tabelle 1). Bei der Projektauswahl wurde darauf geachtet, möglichst unterschiedliche Konzepte zu berücksichtigen. In Kapitel 2.11.2 werden wichtige Kennwerte wie mittlere U-Werte, gemessene Energieverbräuche und PV-Stromerzeugung sowie Treibhausgasemissionen dargestellt und untereinander sowie mit den in Kapitel 1.15 genannten Anforderungswerten verglichen. Als Grundlage für diesen Vergleich wird in Kapitel 2.11.1 untersucht, inwieweit die energetische Qualität von Gebäuden anhand ihres realen Verbrauchs verglichen werden kann.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Konstruktionsarten und Energiekonzepte aller Beispielgebäude

Projekt	Konstruktionsart	Lüftung	Wärmeerzeuger		Wärmeabgabe	Solarthermie	PV Dach	PV Fassade	Batteriespeicher	effiziente Haushaltsgeräte
			Heizung	Warmwasser						
Feldkirch	Ziegel + WDVS	Abluftanlage zentral	Erdreich-Wärmepumpe		Fußbodenheizung	✓	✗	✗	✗	✗
Innsbruck Vögelebichl	Stahlbeton + WDVS	Wärmerückgewinnung zentral	Grundwasser-Wärmepumpe		Fußbodenheizung	✓	✓	✗	✗	✗
Wolfurt A	Holzbau	Wärmerückgewinnung zentral	Grundwasser-Wärmepumpe		Fußbodenheizung	✗	✓	✗	✗	✗
Wolfurt B	Ziegel + WDVS	Wärmerückgewinnung zentral	Grundwasser-Wärmepumpe		Fußbodenheizung	✓	✗	✗	✗	✗
Dafins A	Ziegel + Mineralfaser + Holzschirm	Wärmerückgewinnung wohnungsweise	Erdreich-Wärmepumpe		Fußbodenheizung	✗	✓	✗	✗	✗
Dafins B	Ziegel + Mineralfaser + Holzschirm	Wärmerückgewinnung wohnungsweise	Erdreich-Wärmepumpe	Rücklauf-Wärmepumpe	Fußbodenheizung	✗	✓	✗	✗	✗
Frankfurt	Hybrid	Wärmerückgewinnung wohnungsweise	Abwasserkanal-Wärmepumpe		Fußbodenheizung	✗	✓	✓	✓	✓
Langenegg	Hybrid	Wärmerückgewinnung wohnungsweise	Erdreich-Wärmepumpe		Fußbodenheizung	✓	✓	✗	✗	✗
Innsbruck An der Lan	Stahlbeton + WDVS	Wärmerückgewinnung zentral	el. direkt (elektrischer Radiator)	el. direkt (Boiler)	el. direkt (elektrischer Radiator)	✗	✗	✓	✓	✗
München Eugen	Holzbau	Wärmerückgewinnung wohnungsweise	Fernwärme		Fußbodenheizung	✗	✗	✗	✗	✗
München Domagk	Hybrid	Wärmerückgewinnung zentral	Fernwärme		Heizkörper	✗	✓	✗	✗	✗
Köln	Ziegel dämmstoffgefüllt	Wärmerückgewinnung wohnungsweise	Pelletkessel		Luftheizung	✓	✗	✗	✗	✗

Wie die Abbildung zeigt, wurden die Beispielgebäude in vier verschiedenen Grundkonstruktionen errichtet. Bis auf eine Ausnahme mit zentraler Abluftanlage verfügen alle Gebäude über ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung, eingesetzt werden sowohl gebäudezentrale, als auch wohnungsweise Geräte.

Die Wärme wird vor allem durch Wärmepumpen bzw. Fernwärme, in je einem Fall direktelektrisch und durch einen Pelletkessel bereitgestellt. In den meisten Gebäuden erfolgt die Wärmebereitstellung für Heizung und Warmwasser über ein gemeinsames System, in einem Gebäude wird das Warmwasser über wohnungsweise Rücklauf-Wärmepumpen dezentral bereit, in einem weiteren direktelektrisch.

Zur Wärmeverteilung werden meist Zweileiter- oder Vierleiter-Systeme mit wohnungsweisen Frischwasserstationen eingesetzt¹, in einigen Projekten kommt jedoch auch das klassische Vierleiter-System mit Zirkulation zum Einsatz (siehe Kapitel 3.8). Die Wärmeabgabe erfolgt im überwiegenden Teil durch Fußbodenheizungen, nur in einzelnen Projekten werden Heizkörper eingesetzt. Ein Projekt wird über ein Luftheizsystem mit wohnungsweiser Nachheizung der Zuluft – ergänzt um einige Heizkörper – versorgt.

Nur ein Projekt mit Fernwärmeversorgung verfügt über kein aktiv-solares System, ansonsten werden Solarthermie- und/oder PV-Anlagen eingesetzt. Während die Thermieanlagen tendenziell in den älteren Projekten der Baujahre 2012 bis 2016 eingesetzt wurden, dominieren in den jüngeren Projekten PV-Anlagen. Mieterstrommodelle zur Nutzung des PV-Stroms auch für den Haushaltsstrom – in einem Fall auch für Mobilität – werden nur in den neueren Projekten eingesetzt, da diese Möglichkeit rechtlich noch nicht lange besteht.

Die PV-Anlagen sind sehr unterschiedlich dimensioniert, bis auf zwei Projekte kommen reine Dach-Anlagen zum Einsatz, im Projekt in Frankfurt wird eine Anlage über die gesamte Dachfläche mit einer größtmöglich dimensionierten Anlage in der Südfassade sowie einem großen Batteriespeicher kombiniert. Das Projekt Innsbruck An der Lan verfügt über eine große Fassaden-PV und einen Batteriespeicher.

Nur im Projekt Frankfurt gehören effiziente Haushaltsgroßgeräte zur Wohnungsausstattung. Die Investitionskosten der Küche mit sehr effizienten Haushalts-Großgeräten wird als Teil der Kaltmiete abgerechnet, die Kosten für den Haushaltsstrom sind im Energiekostenbudget mit wohnungsgrößenabhängigem Budget enthalten (Darstellung des Konzepts des Energiekostenbudgets: siehe Kapitel 1.6).

2.11.1 Ist die Bewertung nach dem Verbrauch aussagekräftig?

In der wissenschaftlichen Literatur zum Thema energieeffiziente Gebäude finden sich in den letzten Jahren vermehrt Studien, in denen ein so genannter „performance-gap“ konstatiert wird, d.h. eine Diskrepanz zwischen vorausberechnetem Energiebedarf und tatsächlichem Verbrauch (siehe Kapitel 3.2). In vielen dieser Studien wird als Ursache für den Mehrverbrauch das Nutzerverhalten genannt. Vielfach wird postuliert, das Nutzerverhalten sei nicht voraussehbar, daher stießen Energiebedarfsberechnungen an ihre Grenzen und energieeffizientes Bauen ließe sich nicht vorausplanen. Wäre das Nutzerverhalten tatsächlich eine so dominante und unvorhersehbare Einflussgröße, so wäre eine Bewertung nach dem realen Verbrauch nicht aussagekräftig.

Wie Detailauswertungen vieler gemessener Gebäude zeigen, kann der mittlere reale Verbrauch für viele Gebäudetypen jedoch sehr wohl mit hoher Genauigkeit vorausberechnet werden, wenn validierte Berechnungsverfahren und realistische Nutzungsrandbedingungen verwendet werden. Einige Beispiele für die sehr gute Übereinstimmung zwischen berechnetem Bedarf und realem Verbrauch sind in Abbildung 2 dargestellt.

¹ Das Vierleitersystem mit wohnungsweisen Frischwasserstationen (siehe Kapitel 3.8.2.2) wird auch als Zwei- + Zweileitersystem bezeichnet.

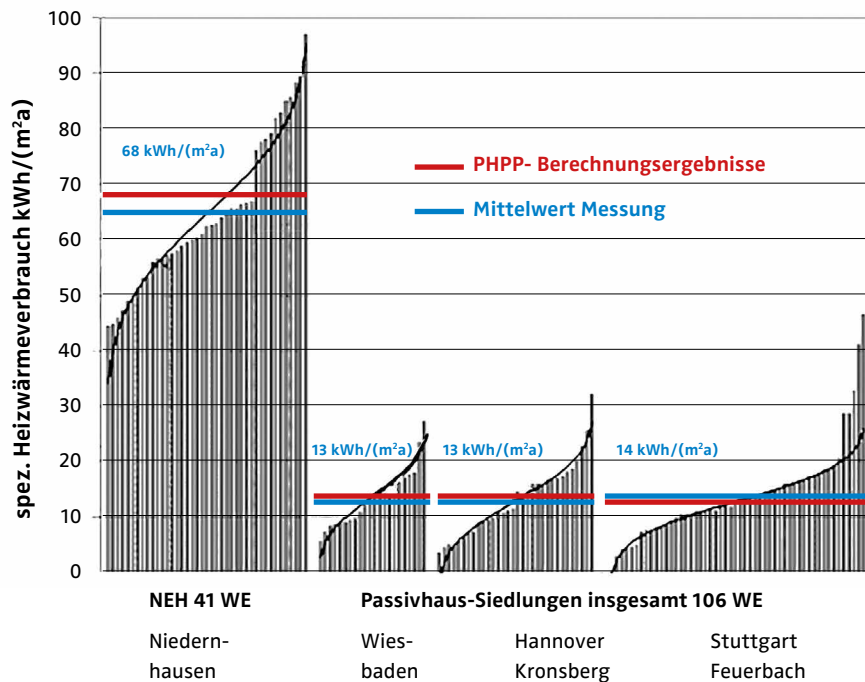


Abbildung 1: Schwankungsbreite und mittlerer gemessener Heizwärmeverbrauch im Vergleich zum berechneten Heizwärmebedarf (Peper 2015)

Wie die Abbildung zeigt, schwankt der Heizwärmeverbrauch einzelner, identischer Wohnungen aufgrund des individuellen Nutzerverhaltens sowohl in Niedrigenergie- (NEH) als auch in Passivhaussiedlungen in jeweils identischen Wohneinheiten sehr stark. Im Mittel der identischen Wohnungen ergibt sich jedoch eine sehr gute Übereinstimmung mit dem vorausgerechneten Bedarf.

Dies bedeutet, dass sich der reale Verbrauch in Gebäudetypen, deren mittleres Nutzerverhalten sich gut voraussagen lässt, als Maßstab für die energetische Qualität geeignet ist. Solche Gebäudetypen sind beispielsweise Mehrfamilienhäuser, Reihenhaussiedlungen, Bürogebäude mit Standardnutzung sowie Schulen und Kindergärten.

Was ist beim Vergleich von Verbrauchsdaten von Mehrfamilienhäusern zu beachten?

Sollen flächenspezifische Verbrauchsdaten verschiedener Gebäude aussagekräftig verglichen und bewertet werden, so sind einige Randbedingungen zu vereinheitlichen. Einige dieser Randbedingungen und Konventionen sind nachfolgend beschrieben und deren Einfluss quantifiziert.

› Berücksichtigte Energieanwendungen

Sollen Energieverbräuche verglichen werden, so ist vorab zu klären, welche Anwendungen berücksichtigt werden sollen.

In diesem Buch werden die Verbräuche wie folgt differenziert

- › Endenergieverbrauch_{Heizung + Warmwasser}
- › Endenergieverbrauch_{Hilfsstrom}
- › Endenergieverbrauch_{Allgemeinstrom}
- › Endenergieverbrauch_{Haushaltsstrom}

Zusätzlich werden die Erträge von PV-Anlagen in unterschiedlichem Detaillierungsgrad dargestellt.

› Bezugsflächen

Die in Kapitel 2.11.2 dargestellten flächenspezifischen Verbräuche sind – wenn nicht anders angegeben – auf den m^2 Wohnnutzfläche bezogen, da diese Größe (in Österreich) auch bei der Heizkostenabrechnung verwendet wird.²

Durch diesen Flächenbezug liegen die flächenspezifischen Werte je nach Projekt um etwa 5 % bis 15 % über denen bei Bezug auf die Energiebezugsfläche nach PHPP und um 20 % bis 50 %, meist zwischen 30 % bis 40 % über denen bei Bezug auf die BGF gemäß Österreichischem Energieausweis. Die verschiedenen Flächen der Projekte sind – soweit sie ermittelt werden konnten – in den Projektbeschreibungen aufgeführt.

Die in Kapitel 2.11.2 dargestellten PV-Erträge wurden auf die überbaute Fläche (ÜFL) bezogen.

› Gebäudestandort und langjährige Mittelwerte des Klimas

Der Einfluss des Standortklimas auf Heizwärmebedarf, Heizlast und Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Alle Werte wurden mit den in PHPP Version 9.6 hinterlegten Klimadaten der dargestellten Standorte ermittelt³.

Die Werte beziehen sich auf die Ausführungsvariante des KliNaWo-Gebäudes in Feldkirch (Kapitel 2.1). Die Berechnungen wurden als Verbrauchsprognoseberechnungen mit $22,5\text{ °C}$ Raumlufttemperatur, einem im Vergleich zum PHPP Standardwert um 30 % erhöhten Pro-Kopf-Warmwasserbedarf und mit einer zusätzlichen Verschattung im Winter von 10 % durchgeführt. Alle anderen Randbedingungen wurden für alle Standorte identisch angenommen. Die Werte beziehen sich auf die Energiebezugsfläche nach PHPP.

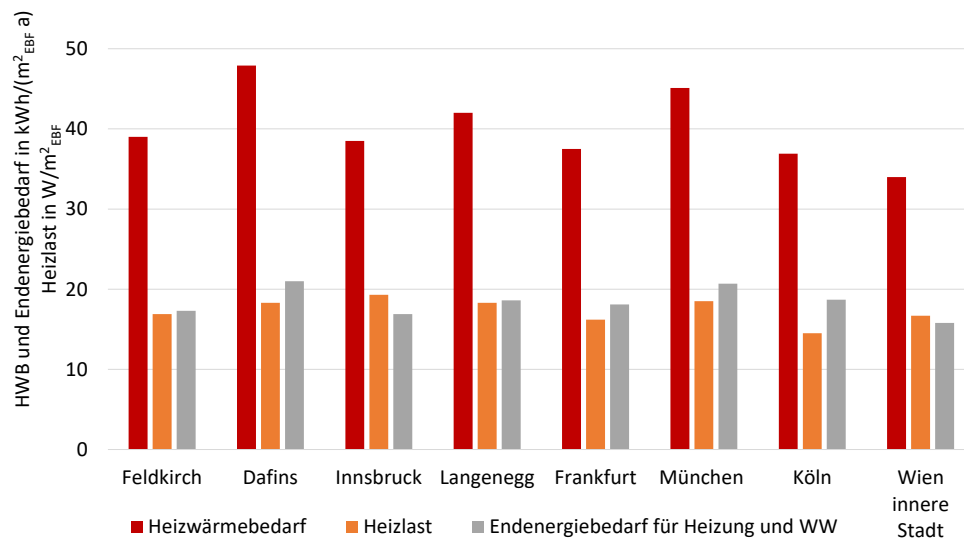


Abbildung 2: Einfluss des langjährigen, mittleren Standortklimas auf Heizwärmebedarf, Heizlast und Endenergiebedarf_{Heiz+WW} gemäß Verbrauchsprognoseberechnung mit PHPP

Wie die Abbildung zeigt, ist der Einfluss des Standortklimas auf die drei dargestellten Kennwerte nur mäßig. Lediglich die Werte für Dafins (790 m Meereshöhe²) und München liegen etwas höher.

Dies bedeutet, dass die realen Energieverbräuche der in Kapitel 2 dargestellten Gebäude in erster Näherung gut miteinander verglichen werden können. Bei Gebäuden südlich des Alpenhauptkamms oder in sehr kalten Lagen wären die Abweichungen deutlich größer.

² In Deutschland und Österreich werden unterschiedliche Flächenbezugsmaße verwendet, dabei werden einige identische Begriffe abweichend definiert, so dass für den Vergleich in diesem Buch eine gemeinsame Bezugsgröße festgelegt werden musste. Einige der gebräuchlichen Flächenbezugsmaße sind im Glossar erläutert.

³ Die Werte für Langenegg und Dafins wurden aus den Werten der nächstgelegenen Klimastation mit Höhenkorrektur ermittelt.

› Wetterdaten im Messjahr

Die folgende Abbildung verdeutlicht den Einfluss des Messjahres auf den Endenergieverbrauch_{Heiz+WW}. Die Grafik stellt den Verbrauch von vier Neubauten (N), vier umfassenden Sanierungen (S) und fünf teil- oder unsanierten Gebäuden (A) für die Jahre 2009 bis 2015 dar. Zusätzlich ist der Verbrauch des Projekts KliNaWo über vier Jahre dargestellt.

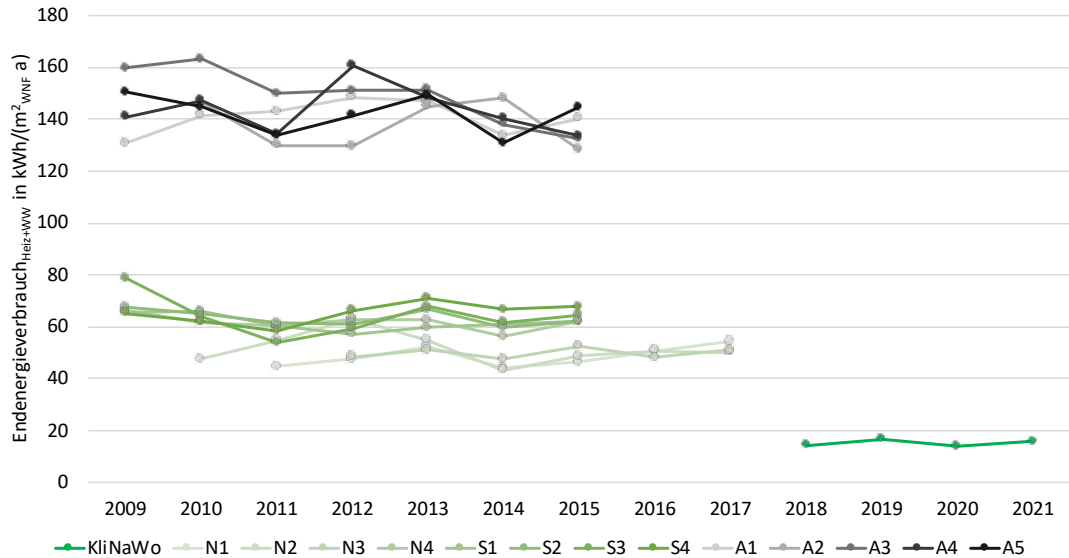


Abbildung 3: Einfluss der jährlichen Wetterschwankungen auf den spezifischen Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser von 13 Mehrfamilienhäusern (Ploß 2018)

Wie zu erkennen ist, schwanken die Jahreswerte des spezifischen Endenergieverbrauchs aufgrund der jährlich unterschiedlichen Außenlufttemperatur und Globalstrahlung. Die Schwankungen sind jedoch weder für die un- oder teilsanierten Gebäude, noch für die energetisch deutlich besseren Neubauten oder umfassend sanierten Gebäude sehr stark. Vergleiche zwischen verschiedenen Gebäuden sollten falls möglich auf Basis mehrjährig gemittelter Werte durchgeführt werden. Liegen nur Verbrauchsdaten für einzelne Jahre vor, so können diese klimakorrigiert werden.

› Raumlufttemperatur

Der Einfluss der mittleren Raumlufttemperatur in der Heizperiode auf den Heizwärmebedarf ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Einfluss der mittleren Raumlufttemperatur während der Heizperiode auf den PHPP-Heizwärmebedarf; Dargestellt am Beispiel des MFH Langenegg-Unterstein

Raumlufttemperatur in °C	HWB _{PHPP} in kWh/(m ² _{ZEBF} a)	Veränderung in kWh/(m ² _{ZEBF} a)	% des Ausgangswertes
17	8,5	-5,5	61
18	10,2	-3,8	73
19	12,1	-1,9	86
20	14	0	100
21	16,2	2,2	116
22	18,5	4,5	132
23	21,1	7,1	151
24	23,9	9,9	171

Wie zu erkennen, verändert sich der Heizwärmebedarf des Beispielgebäudes im Passivhausniveau um etwa 12 bis 20 % pro Grad Raumluft-Temperaturdifferenz im Mittel der Heizperiode. Während der prozentuale Mehrbedarf pro Grad höherer Raumlufttemperatur in energetisch hochwertigen Gebäuden höher ist als in schlechteren Gebäuden, ist der absolute Mehrbedarf deutlich geringer. Hocheffiziente Gebäude sind damit robuster bezüglich der vom Nutzer gewünschten individuellen Raumtemperatur.

Da aus einer Vielzahl von Forschungsprojekten bekannt ist, dass die mittlere Raumlufttemperatur in der Heizperiode in effizienten Gebäuden meist zwischen 21,5 und 23,5 °C liegt, wird empfohlen, in Verbrauchsprognoseberechnungen einen Wert in diesem Bereich anzunehmen. Die in diesem Buch dargestellten Verbrauchsprognoseberechnungen wurden mit 22,5 °C durchgeführt.

Zur Interpretation von Verbrauchsdaten ist es hilfreich, wenn Daten zur mittleren, realen Raumlufttemperatur in der Heizperiode vorliegen.

› **Belegungsdichte**

Heizwärmebedarf und vor allem Warmwasserbedarf sind abhängig von der Belegungsdichte, d.h. der Pro Kopf-Wohnfläche. Die mittlere Belegungsdichte hängt u.a. vom Wohnungsmix im Mehrfamilienhaus ab, sie differiert außerdem zwischen gemeinnützigem Wohnbau (typische Werte liegen zwischen 30 m²/Person und 35 m²/Person) und frei finanziertem Wohnbau (typische Werte zwischen 40 m²/Person und 50 m²/Person, oft auch noch höhere Pro-Kopf Flächen).

› **WW-Bedarf pro Person**

Der Pro-Kopf-Warmwasserbedarf ist individuell sehr unterschiedlich, der Mittelwert in Mehrfamilienhäusern kann jedoch relativ gut abgeschätzt werden. Typische Werte liegen zwischen dem PHPP-Standardwert von 25 Litern (60 °C) pro Person und Tag und etwa 35 Litern pro Person und Tag.

› **Lüftungsverhalten**

Auch das Lüftungsverhalten der Bewohner beeinflusst den Energieverbrauch. Da der Luftwechsel über Fensterlüftung nur schwer quantifizierbar ist, ist dieser Einfluss eine der am schwierigsten abzuschätzenden Randbedingungen bei der Interpretation von Verbrauchsdaten.

› **Verschattung des Gebäudes**

Eine wichtige Einflussgröße auf den Energieverbrauch ist die Verschattung des Gebäudes durch Topographie, Vegetation, Nachbargebäude und Eigenverschattung. Der Einfluss der Verschattung kann sowohl in PHPP als auch im Energieausweis detailliert beschrieben und quantifiziert werden.

Da der Einfluss der Verschattung rechnerisch gut abgebildet werden kann, kann er bei der Interpretation gemessener Energieverbräuche gut berücksichtigt werden.

› **Temporäre Verschattung durch die Nutzer**

Schwerer zu quantifizieren ist der Einfluss des Nutzers durch den Einsatz beweglicher Verschattungseinrichtungen wie Jalousien oder Rollläden. Es liegt nahe, dass derartige Verschattungseinrichtungen auch im Winter häufig verwendet werden. Der Effekt temporärer Verschattungseinrichtungen wird in Energiebedarfsberechnungen meist überhaupt nicht oder nur zur Abschätzung der sommerlichen Überhitzung berücksichtigt. Aus Sicht des Autors ist die suboptimale Nutzung gerade in Gebäuden mit großen Fensterflächenanteilen und/oder in stark verdichteten Lagen einer der Hauptfaktoren, die zu erhöhten Energieverbräuchen führen. In den Verbrauchsprognoseberechnungen für die im Buch vorgestellten Projekte wurde daher eine zusätzliche Verschattung im Winter von 10 % angenommen. In Studien aus der Schweiz wurden noch etwas höhere mittlere Verschattungen ermittelt (siehe Kapitel 3.2).

Resumé

Verbrauchsdaten von MFH sind zur Bewertung der energetischen Qualität geeignet, da das mittlere Nutzerverhalten der Bewohner von Mehrfamilienhäusern hinreichend genau vorhergesagt werden kann (siehe Abbildung 2).

Voraussetzung für die Interpretation von Verbrauchsdaten sind Verbrauchsprognoseberechnungen, in denen Randbedingungen wie das mittlere Standortklima, die Verschattung durch Topographie, Nachbargebäude, Belegungsdichte, das mittlere Benutzerverhalten usw. realitätsnah beschrieben werden.

Ist dies der Fall und werden validierte Berechnungsverfahren wie PHPP verwendet, können viele mögliche Gründe für Soll-Ist-Abweichungen ex post analysiert werden (Klimakorrektur, Korrektur der mittleren Raumlufttemperatur, abweichende Bewohnerzahl...). Es verbleiben nur wenige „Störgrößen“ wie die Nutzung temporärer Verschattungseinrichtungen oder die reale Luftwechselrate, die rechnerisch, ohne detaillierte Messungen nur schwer quantifiziert werden können.

2.11.2 Vergleich der energetischen Kennwerte sowie der Verbräuche und PV-Erträge der Projekte

In Abbildung 4 ist die Kompaktheit der Gebäude anhand des Verhältnisses der thermischen Hüllfläche A zur Energiebezugsfläche (EBF) dargestellt.

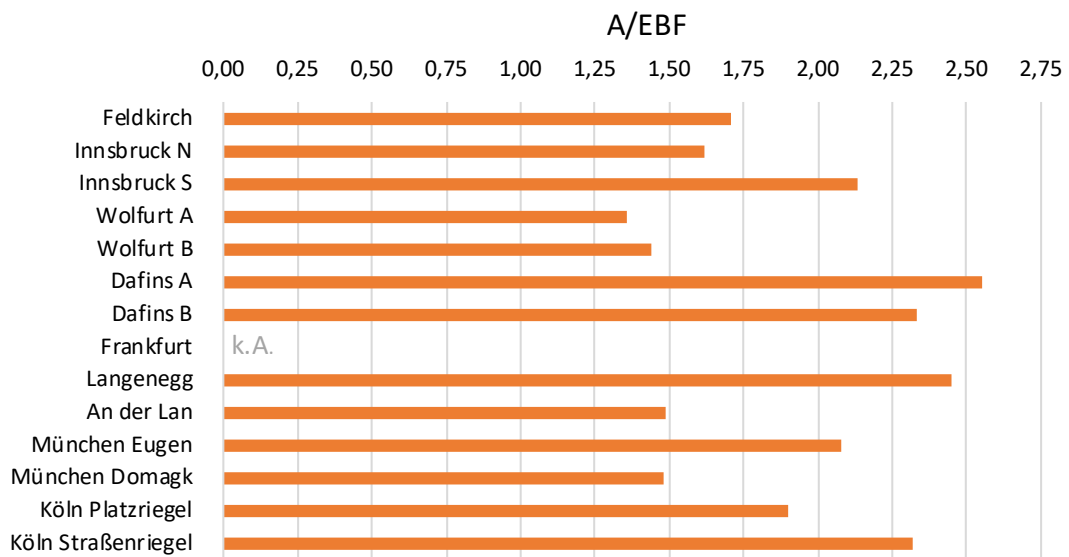


Abbildung 4: Kompaktheit der Gebäude (Verhältnis A/EBF). Für die Projekte Innsbruck Vögelebichl, Wolfurt, Dafins und Köln sind die Werte der jeweils zwei Gebäude separat angegeben.

Die Kompaktheit der Gebäude, ausgedrückt durch das Verhältnis der Hüllfläche A zur Energiebezugsfläche_{EBF} liegt zwischen 1,36 im Projekt Wolfurt A und 2,55 im Projekt Dafins A. Im deutlich kleineren und niedrigeren Projekt in Dafins müssen also pro m² Energiebezugsfläche etwa 1,2 pro m² mehr Hüllfläche errichtet und finanziert werden. Dieser beträchtliche Unterschied wirkt sich sowohl auf das zum Erreichen eines bestimmten Energieniveaus erforderlichen Wärmeschutzniveaus, als auch auf die Investitionskosten aus.

Nimmt man die mittleren Kosten der Bauteile der thermischen Hülle (gewichtete Kosten der Bauteile Außenwand, Fenster, Dach und Kellerdecke) mit $350 \text{ EUR/m}^2_{\text{Bauteilfläche}}$ an, so entspricht der Unterschied in der Kompaktheit der Projekte einem Kostenunterschied in Höhe von 420 EUR/m^2 Energiebezugsfläche. Dieser Wert soll nur Größenordnungen verdeutlichen und aufzeigen, welchen Kosteneinfluss Entscheidungen von Kommunen in Form baurechtlicher Festsetzungen wie der Baunutzungszahl (AT) bzw. der Grundflächen- und Geschossflächenzahl (DE) sowie der maximalen Geschosshöhe haben.

Abbildung 5 zeigt eine Gegenüberstellung der mittleren U-Werte der opaken Bauteile der Gebäudehülle inkl. der Wärmebrücken.

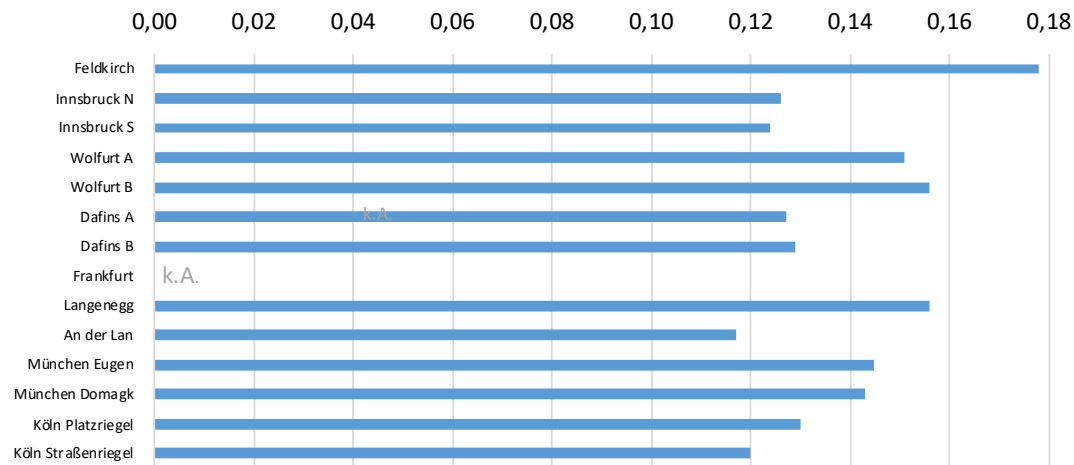


Abbildung 5: mittlerer U-Wert der opaken Bauteile der thermischen Gebäudehülle inkl. Wärmebrücken⁴. Für die Projekte Innsbruck Vögelebichl, Wolfurt, Dafins und Köln sind die Werte der jeweils zwei Gebäude separat angegeben.

Die mittleren U-Werte der opaken Bauteile der Gebäudehülle liegen – inkl. Wärmebrücken – in einem Bereich von etwa $0,12$ bis $0,18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Alle Gebäude wurden damit in einem Wärmeschutzniveau errichtet, das weit über den gesetzlichen Mindestanforderungen liegt und in etwa Passivhausniveau entspricht.

Wie das Projekt in Köln zeigt, sind sehr gute mittlere U-Werte der thermischen Gebäudehülle auch mit $49/50 \text{ cm}$ dicken monolithischen Ziegelkonstruktionen mit integrierter Dämmung möglich.

Abbildung 6 zeigt die gemessenen Heizwärmeverbände der Projekte im Vergleich zu den unter PHPP-Standardrandbedingungen (20 °C ...) und in der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung ($22,5 \text{ °C}$...) berechneten Werten⁵. Für die Projekte mit wissenschaftlichem Monitoring ist zusätzlich die mittlere Raumlufttemperatur in der Heizperiode (Oktober bis März) dargestellt. Die Verbrauchswerte sind nicht klimakorrigiert. Eine Einordnung des Einflusses des Standortklimas auf Heizwärmebedarf, Heizlast und Endenergiebedarf für Heizung findet sich in Kapitel 2.11.1.

⁴ Wert für Projekt An der Lan ohne Wärmebrücken.

⁵ Der Verbrauchsprognosewert für das Projekt Frankfurt Speicherstraße wurde abweichend nach DIN 18599 und für eine mittlere Raumlufttemperatur von $22,0 \text{ °C}$ berechnet.

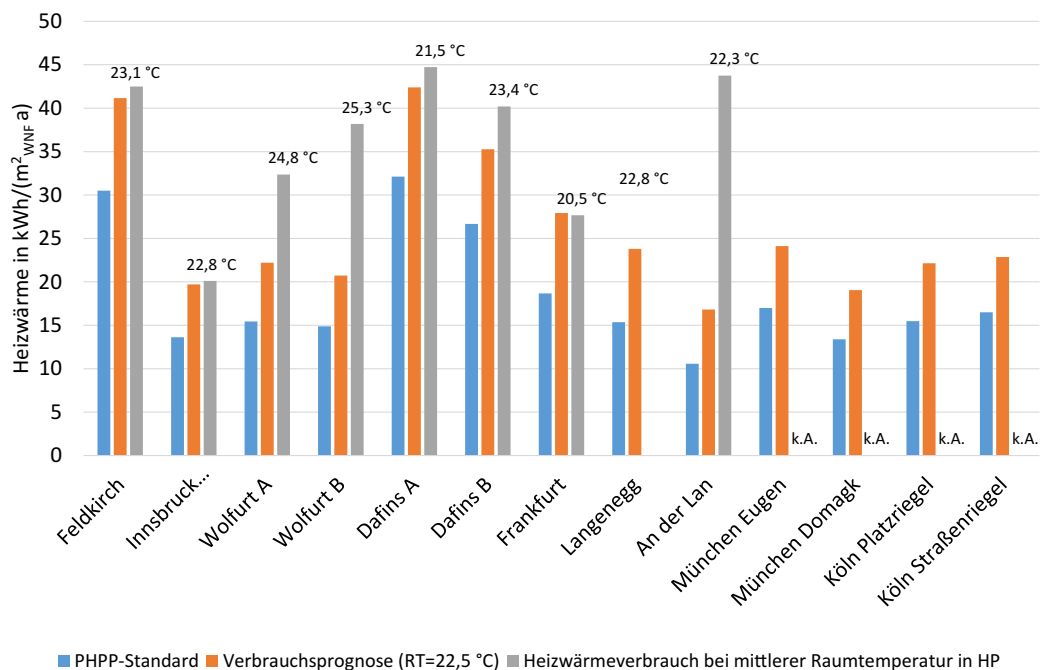


Abbildung 6: spezifischer Heizwärmeverbrauch der Projekte (graue Säulen) im Vergleich zum spezifischen Heizwärmebedarf_{PHPP} der Projekte unter Standardrandbedingungen (blau) und in der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung mit 22,5 °C (rot)

Der mit **PHPP-Standardrandbedingungen** berechnete spezifische Heizwärmebedarf liegt für den Großteil der Projekte zwischen etwa 12 kWh/(m²_{WNF} a) und 16 kWh/(m²_{WNF} a). Diese Projekte erreichen damit den Grenzwert für Passivhäuser von 15 kWh/(m²_{EBF} a). Für das Projekt Innsbruck An der Lan wird ein Wert von 10,6 kWh/(m²_{WNF} a) ausgewiesen, in der Berechnung sind jedoch die Wärmebrücken nicht erfasst.

Die Werte beider Gebäude des Projekts in Dafins liegen mit 26,7 kWh/(m²_{WNF} a) und 32,1 kWh/(m²_{WNF} a) trotz sehr guter Hüllqualität höher, da das Projekt deutlich kleiner und weniger kompakt ist und auf knapp 800 m Meereshöhe liegt.

Der Wert des KliNaWo-Gebäudes in Feldkirch liegt bei 30,5 kWh/(m²_{WNF} a). Das Gebäude würde mit Wärmerückgewinnung den Passivhaus-Grenzwert von 15 kWh/(m²_{EBF} a) erreichen. Da es jedoch mit Abluftanlage ausgeführt wurde, liegt der Heizwärmebedarf bei gleicher mittlerer Luftwechsellrate von 0,3 h⁻¹ um etwa 13-15 kWh/(m²_{WNF} a) höher.

Wird der Heizwärmebedarf als **Verbrauchsprognoseberechnung** mit veränderten Randbedingungen ermittelt, so liegt der rechnerische Heizwärmebedarf um etwa 6 kWh/(m²_{WNF} a) bis 11 kWh/(m²_{WNF} a) über dem Wert mit Standard-Randbedingungen. Das Ausmaß der Erhöhung des rechnerischen Heizwärmebedarfs in der Verbrauchsprognoseberechnung ist u.a. vom Standortklima sowie vom Fensterflächenanteil abhängig.

Die **gemessenen Heizwärmeverbräuche** der Projekte Innsbruck Vögelebichl und KliNaWo in Feldkirch stimmen mit 20,8 kWh/(m²_{WNF} a) und 42,5 kWh/(m²_{WNF} a) auf etwa 1 kWh/(m²_{WNF} a) mit den Werten der Verbrauchsprognoseberechnung überein.

Auch der Verbrauch des Projekts in Frankfurt entspricht mit 27,7 kWh/(m²_{WNF} a) sehr gut der Verbrauchsprognose.

In den beiden Gebäuden in Wolfurt liegen die Verbräuche mit 32,4 kWh/(m²_{WNF} a) bzw. 38,2 kWh/(m²_{WNF} a) deutlich über der Verbrauchsprognose. Hauptgrund sind die stark erhöhten mittleren Raumlufftemperaturen im Winter von 24,8 °C bzw. 25,3 °C.

Die Verbräuche der beiden Gebäude in Dafins liegen im ersten Betriebsjahr bei 40,2 kWh/(m²_{WNF} a) bzw. 44,7 kWh/(m²_{WNF} a) und damit um 2,3 kWh/(m²_{WNF} a) bis 4,9 kWh/(m²_{WNF} a) über dem in der Verbrauchsprognose ermittelten Wert.

Die mittleren Raumlufthtemperaturen der messtechnisch begleiteten Projekte liegen in der Heizperiode zwischen 20,5 °C und 25,3 °C, in den meisten Projekten bei etwa 22 °C bis 23,5 °C. In diesem Wertebereich liegen auch die mittleren Raumlufthtemperaturen des Großteils anderer messtechnisch begleiteter Mehrfamilienhausprojekte.

Die aus den gemessenen Energiemengen zurückgerechneten **Pro-Kopf-Warmwasserverbräuche** (60 °C) der Projekte in Feldkirch, Wolfurt und Dafins liegen in vier Gebäuden in der Heizperiode zwischen 20,7 l/(Pers.d) und 24,2 l/(Pers.d), in einem Projekt bei 31,6 l/(Pers.d).

Abbildung 7 zeigt den gemessenen Endenergieverbrauch der Gebäude für Heizung und Warmwasser.

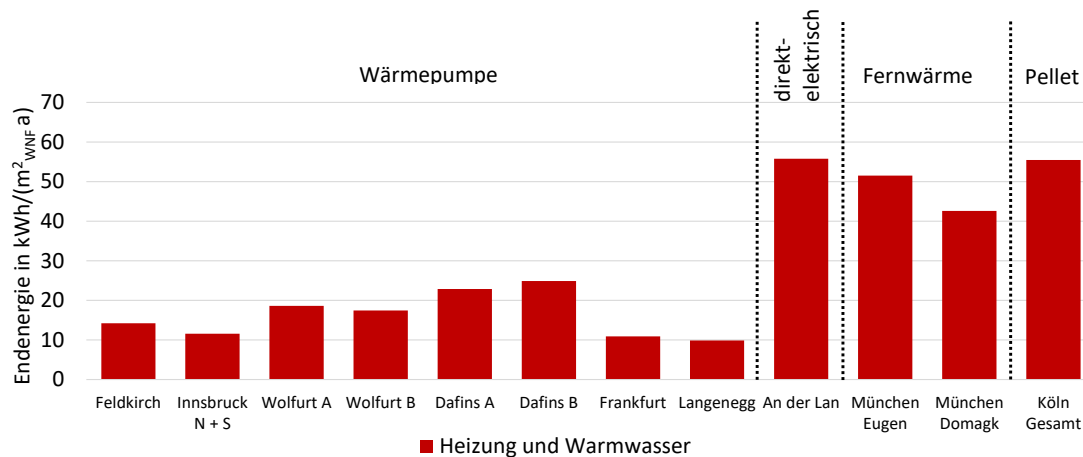


Abbildung 7: spezifischer, gemessener Endenergieverbrauch_{Heiz+WW} aller Projekte in kWh/(m²_{WNF} a)

Der gemessene, spezifische Endenergieverbrauch von 6 der 8 wärmepumpenbeheizten Projekte liegt zwischen 9,9 kWh/(m²_{WNF} a) und 18,6 kWh/(m²_{WNF} a). Die beiden kleinen, in strengerem Klima liegenden und mit hohen Raumlufthtemperaturen betriebenen Gebäude in Dafins liegen im ersten Betriebsjahr mit 22,9 kWh/(m²_{WNF} a) bzw. 24,9 kWh/(m²_{WNF} a) etwas höher. Nach Optimierung der Wärmeversorgungssysteme ist damit zu rechnen, dass ab dem zweiten Jahr niedrigere Werte erreicht werden. Die o. g. Werte der wärmepumpenbeheizten Gebäude enthalten je nach Zählerstruktur nur den Kompressorstrom, in einigen Projekten auch einen Teil des Hilfsstroms, der auf den Wärmepumpenzähler läuft.

Der Verbrauch des Projekts Innsbruck An der Lan, in dem sowohl die Heizwärme als auch das Warmwasser direktelektrisch bereit wird, liegt mit knapp 56 kWh/(m²_{WNF} a) erheblich höher als die Verbräuche der wärmepumpenversorgten Gebäude. Das Gebäude ist wegen seiner besonderen Nutzung, die zu hohen Pro-Kopf-Flächen führt, nur bedingt mit den anderen Projekten vergleichbar.

Die Verbräuche der beiden fernwärmeversorgten Projekte in München liegen bei 42,6 kWh/(m²_{WNF} a) bzw. 51,5 kWh/(m²_{WNF} a), der des pelletversorgten Gebäudes in Köln bei 55,4 kWh/(m²_{WNF} a). Der Wert des pelletbeheizten Projekts enthält im Gegensatz zur Fernwärme die Verluste des Wärmeerzeugers. Die Verbräuche der fernwärme- und biomasseversorgten Gebäude liegen merklich unter den Verbrauchsprognosewerten. Die Endenergieverbräuche der fernwärme- und biomasseversorgten Beispielgebäude für Heizung und Warmwasser liegen damit um etwa 35 bis 55 % unter dem in Kapitel 1.2 dargestellten üblichen Verbrauch von Neubauten.

Abbildung 8 zeigt den Endenergieverbrauch der wärmepumpenversorgten Gebäude sowie des direktelektrisch beheizten Gebäudes An der Lan in Innsbruck und der fernwärme- bzw. pelletversorgten Gebäude für Heizung und Warmwasser sowie Hilfsstrom (Pumpen, Ventilatoren...).

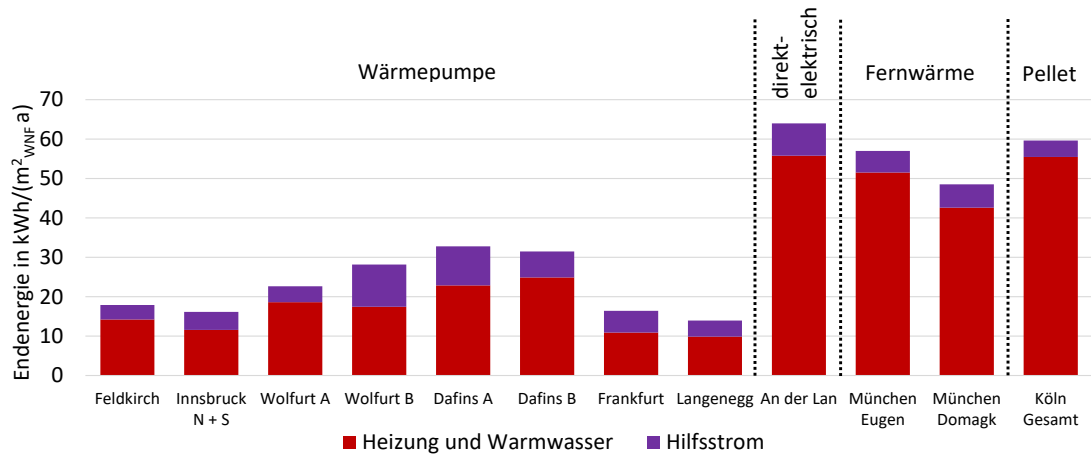


Abbildung 8 spezifischer Endenergieverbrauch_{Heiz+WW +Hilf}

Der spezifische Endenergieverbrauch der wärmepumpenversorgten Projekte in Langenegg, Innsbruck (Vögelebichl), Frankfurt und Feldkirch und liegen zwischen 13,9 kWh/(m²_{WNF} a) und 17,9 kWh/(m²_{WNF} a). Die Gebäude in Wolfurt haben im ersten Betriebsjahr Verbräuche von 22,7 kWh/(m²_{WNF} a) bzw. 28,2 kWh/(m²_{WNF} a). Die Werte der beiden Gebäude in Dafins liegen im ersten Betriebsjahr bei 32,8 kWh/(m²_{WNF} a) bzw. 31,5 kWh/(m²_{WNF} a). Das Projekt An der Lan mit direktelektrischer Wärmeversorgung liegt bei 64 kWh/(m²_{WNF} a) um den Faktor 3,6 bis 4,6 höher als die vier besten Projekte mit Wärmepumpe. Die Werte des Hilfsstromverbrauchs der wärmepumpenversorgten Gebäude liegen zwischen 3,7 kWh/(m²_{WNF} a) bis 10,7 kWh/(m²_{WNF} a).

Abbildung 9 zeigt den Endenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Allgemeinstrom (Beleuchtung Allgemeinbereiche, Keller und Tiefgarage, Lift,...) sowie Haushaltsstrom. In Projekten, in denen der Allgemein- und der Haushaltsstrom nicht messtechnisch erfasst wurde, wurden die auch in der Verbrauchsprognoseberechnung angenommenen Werte von 3,5 kWh/(m²_{EBF} a) bzw. 22 kWh/(m²_{EBF} a) angesetzt. Beide Werte wurden projektspezifisch von der Energiebezugsfläche auf die Wohnfläche umgerechnet.

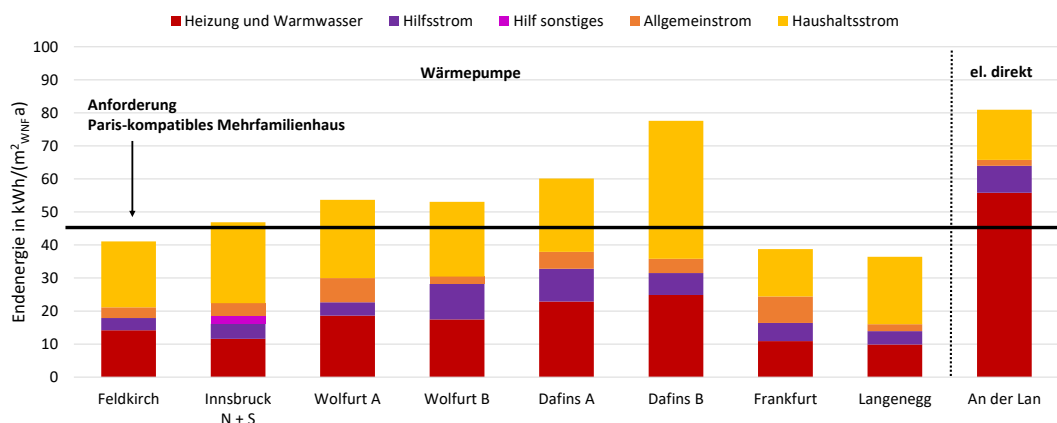


Abbildung 9: spezifischer Endenergieverbrauch der strombeheizten Gebäude in Summe aller Anwendungen; Allgemein- und Haushaltsstrom Innsbruck: Defaultwerte, da nicht messtechnisch erfasst.

Die Projekte in Frankfurt, Langenegg und Feldkich haben Gesamt-Stromverbräuche für alle Anwendungen in Höhe von $36,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ bis $41,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ und erreichen damit den in Kapitel 1.15 genannten Verbrauchs-Anforderungswert von $45 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ für Paris-kompatible, wärmepumpenversorgte Mehrfamilienhäuser (horizontale Linie). Die beiden Gebäude des Projekts Innsbruck Vögelebichl liegen wegen der vergleichsweise hohen Annahme für den nicht gemessenen Haushaltsstrom minimal über dem Anforderungswert, beide Gebäude in Wolfurt lagen im ersten Jahr knapp über der Verbrauchs-Anforderung.

Die beiden Gebäude in Dafins liegen deutlich über dem Anforderungswert, wurden aber mit großen PV-Anlagen ausgestattet und können daher einen Teil des höheren Stromverbrauchs vor Ort decken. Dieser selbst genutzte Teil des PV-Stroms ist in Abbildung 10 nicht berücksichtigt sondern wird in Abbildung 12 dargestellt. Abbildung 10 verdeutlicht, dass die Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs ein unverzichtbarer Bestandteil des Energiekonzepts hocheffizienter Gebäude sein sollte. Der Anteil des Haushaltsstromverbrauchs kann in optimierten, Wärmepumpenversorgten Gebäuden etwa die Hälfte des Gesamt-Stromverbrauchs ausmachen.

Wie groß die Effizienzpotentiale sind, zeigt das Projekt in Frankfurt: in diesem Gebäude werden sehr effiziente Haushalts-Großgeräte mit vermietet und über ein Energiekostenbudget abgerechnet (siehe Kapitel 1.6). Der mittlere Haushaltsstrom der 74 Wohneinheiten liegt bei $14,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$, während er in den Projekten in Feldkich, Wolfurt A und B sowie Dafins A im Bereich von $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ bis $23,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ liegt.

Durch das Abrechnungsmodell mit Energiekostenbudget wird das Investor-Nutzer-Dilemma durchbrochen, da der Investor seine höheren Kosten – auch für die Haushalts-Großgeräte – umlegen kann. Der Mieter profitiert ebenfalls, da er in einem ganzheitlich optimierten Gebäude deutlich niedrigere Energiekosten hat. Wie groß ein verbrauchserhöhender Einfluss der Nutzer und der Geräteausstattung sein kann, verdeutlicht das Projekt Dafins B, in dem zwei der sechs Mieter extrem hohe Haushaltsstromverbräuche haben, so dass der Mittelwert des Gebäudes bei $41,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ liegt.

Abbildung 10 zeigt den spezifischen PV-Jahresertrag der Projekte. Der Wert ist wie der Anforderungswert an Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser auf die überbaute Fläche (ÜFL) bezogen. Neben dem gemessenen Ertrag ist für die Projekte auch der prognostizierte Ertrag für eine Variante PV_{max} dargestellt. Für diese Variante wurden die Flachdächer zu 60 % der Fläche mit PV belegt. Für die Beispielgebäude zeigt sich diese Auslegung als umsetzbar, auch wenn Abstände zur Attika etc. eingehalten werden. Für das Projekt Langenegg mit Satteldach wurde für die Variante PV_{max} 80 % der Fläche des Süddachs angenommen. Die Zusatzvarianten mit vergrößerter PV-Fläche wurden untersucht, da die meist mehrere Jahre alten Projekte i.d.R. über relativ kleine PV-Anlagen verfügen. Angesichts der erweiterten rechtlichen Möglichkeiten zur Nutzung der PV-Erträge in Mehrfamilienhäusern („Mieterstrommodell“) und der deutlich gesunkenen PV-Preise könnten die Gebäude heute mit weit größeren Anlagen ausgeführt werden. Die zusätzlichen Werte für die Varianten PV_{max} sollen dieses PV-Potenzial aufzeigen.

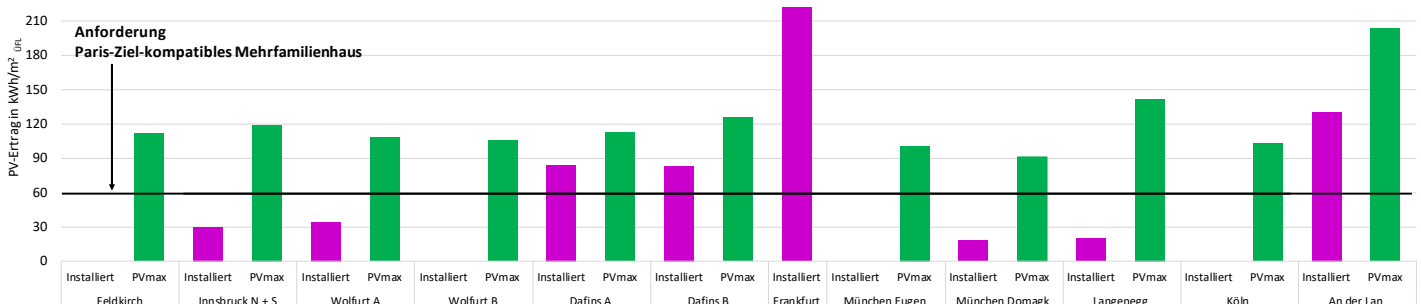


Abbildung 10: spezifischer Jahresertrag der PV-Anlagen der realisierten Varianten sowie je einer Variante mit maximaler PV-Dachfläche (Bezug auf die überbaute Fläche)

Das Projekt Innsbruck An der Lan mit großer Fassaden-PV kommt auf einen gemessenen Ertrag von 130 kWh/(m²_{ÜFL} a) und erreicht damit mehr als das Doppelte der Anforderung an Paris-kompatible Gebäude von 60 kWh/(m²_{ÜFL} a). Die Variante PV_{max} könnte einen Ertrag von etwa 204 kWh/(m²_{ÜFL} a) erreichen.

Auch die beiden Gebäude in Dafins liegen mit gemessenen spezifischen Erträgen von 83 kWh/(m²_{ÜFL} a) bzw. 84 kWh/(m²_{ÜFL} a) deutlich über dem Anforderungswert.

Das Projekt in Frankfurt mit vollständig belegtem, flachen Pultdach und vollständig belegter Südfassade kommt auf einen spezifischen Ertrag von 249 kWh/(m²_{ÜFL} a).

Die übrigen Gebäude haben deutlich kleinere oder gar keine PV-Anlagen. Die Varianten PV_{max} erreichen auf den Flachdachgebäuden etwa 100 kWh/(m²_{ÜFL} a), auf dem Satteldachgebäude etwa 142 kWh/(m²_{ÜFL} a).

Abbildung 11 zeigt den schon in Abbildung 11 dargestellten Verbrauch der stromversorgten Gebäude für die Anwendungen Heizung und Warmwasser, Hilfs-, Allgemein- und Haushaltsstrom. Zusätzlich wird als zweite Säule für jedes Projekt die Bereitstellung des Verbrauchs dargestellt, dabei wird zwischen Netzbezug Strom und PV-Eigennutzung unterschieden. In einer dritten Säule pro Projekt wird die PV-Netzeinspeisung dargestellt. Die schwarze Linie bei 35 kWh/(m²_{WNF}a) stellt den Anforderungswert für den Netzbezug dar, der von Paris-kompatiblen MFH nicht überschritten werden sollte.

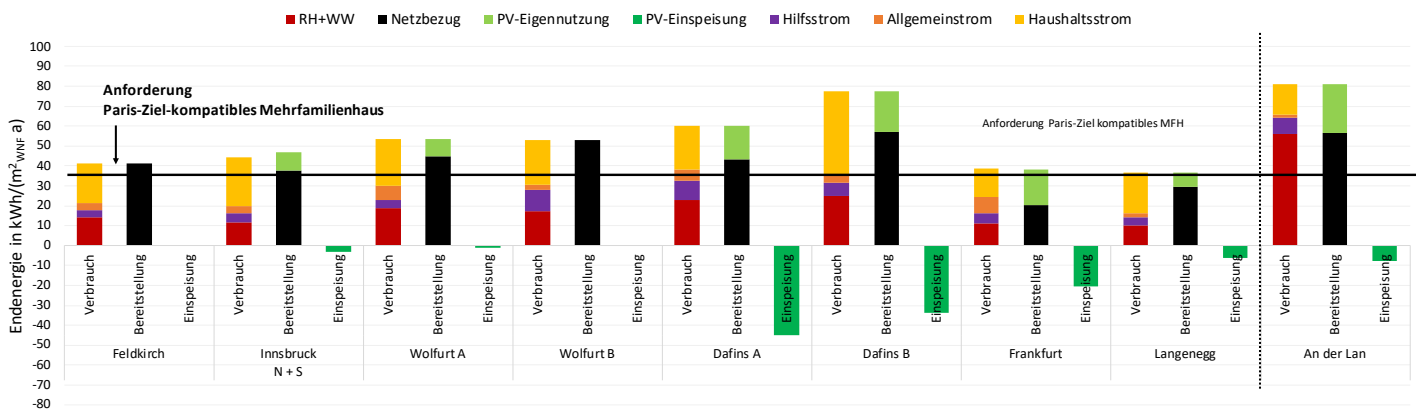


Abbildung 11: spezifischer Endenergieverbrauch in Summe aller Anwendungen; Bereitstellung durch Netzbezug und PV-Eigennutzung sowie PV-Einspeisung der stromversorgten Mehrfamilienhäuser

Den bei Weitem niedrigsten Strom-Netzbezug hat das Projekt in Frankfurt mit 21 kWh/(m²_{WNF} a). Das Projekt erreicht diesen Wert dank einer Kombination aus sehr hohem Wärmeschutz der Hülle, Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung, einer sehr effizienten Abwasser-Wärmepumpe, sehr effizienten Haushaltsgeräten und der bei Weitem größten PV-Anlage (gesamte Fläche des Dachs und der opaken Teile der Südfassade). Auch das Projekt in Langenegg erreicht mit einem Netzbezug von 29 kWh/(m²_{WNF} a) den Anforderungswert für Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser.

Die Projekte Innsbruck Vögelebichl, KliNaWo und Wolfurt A liegen bei einem Netzbezug Strom von 37 kWh/(m²_{WNF} a), 41 kWh/(m²_{WNF} a) und 44 kWh/(m²_{WNF} a), das Gebäude Dafins A bei 43 kWh/(m²_{WNF} a) und damit knapp über dem Anforderungswert für Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser.

Die Gebäude Wolfurt B und Dafins B erreichen im ersten Betriebsjahr 53 kWh/(m²_{WNF} a) und 57 kWh/(m²_{WNF} a). Hauptgrund für den vergleichsweise hohen Wert des Projekts Dafins B ist der weitaus höhere Haushaltsstromverbrauch.

Das direktelektrisch beheizte Gebäude Innsbruck An der Lan erreicht einen Netzbezug von $57 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$. Wegen der atypischen Nutzung mit einer beheizten pro Kopf-Wohnfläche von $58 \text{ m}^2/\text{Person}$ sind die Werte des Warmwasser- und des Haushaltsstromverbrauchs weit niedriger als in den übrigen Gebäuden. Bei vergleichbarer Nutzung hätte das Projekt deutlich höhere Verbräuche.

Die höchste auf die Wohnnutzfläche bezogene, spezifische PV-Einspeisung haben die beiden Gebäude in Dafins mit $45 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ und $34 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$.

Abbildung 12 zeigt die gleichen Werte wie Abbildung 13, jedoch als Verbrauchsprognosewerte für die Variante jedes Gebäudes mit maximaler PV-Fläche auf dem Dach.

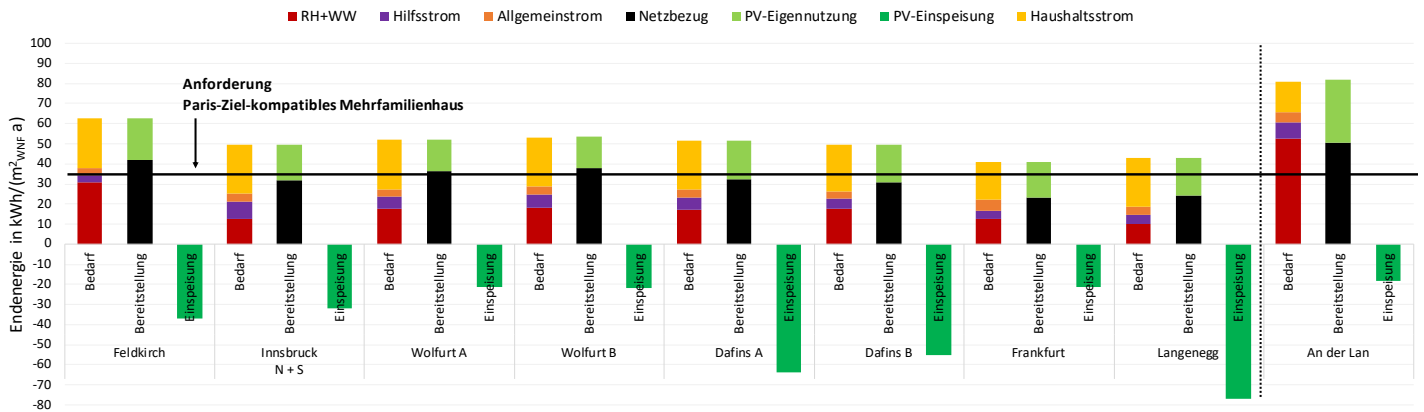


Abbildung 12: spezifischer Endenergiebedarf der Varianten PV_{max} in Summe aller Anwendungen gemäß Verbrauchsprognoseberechnung; Bereitstellung durch Netzbezug und PV-Eigennutzung sowie PV-Einspeisung der stromversorgten Gebäude; Projekt Frankfurt nicht dargestellt, da schon in der Realisierungsvariante die maximale PV-Fläche umgesetzt wurde

Wie die Abbildung verdeutlicht, erreichen alle Gebäude außer KliNaWo, Wolfurt A und An der Lan den Anforderungswert für Paris-kompatible Gebäude von $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$, wenn die Solarpotenziale auf dem Dach weitestgehend ausgenutzt werden.

Es zeigt sich, dass das KliNaWo Gebäude einen relativ hohen Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser hätte, wenn die Variante PV_{max} ohne die große Solarthermie der realisierten Variante ausgeführt würde. Um den Anforderungswert für Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser von $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ zu erreichen, könnte das Gebäude mit sehr effizienten Haushaltsgeräten und/oder mit einer Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung ausgestattet werden.

Die höchsten auf die Wohnfläche bezogenen, spezifischen Netzeinspeisungen haben die beiden Gebäude in Dafins mit $64 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$ und $56 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}} \text{ a})$.

Abbildung 13 zeigt die Treibhausgasemissionen der Gebäude, für die monatsweise Messwerte des Netzbezugs Strom vorliegen.

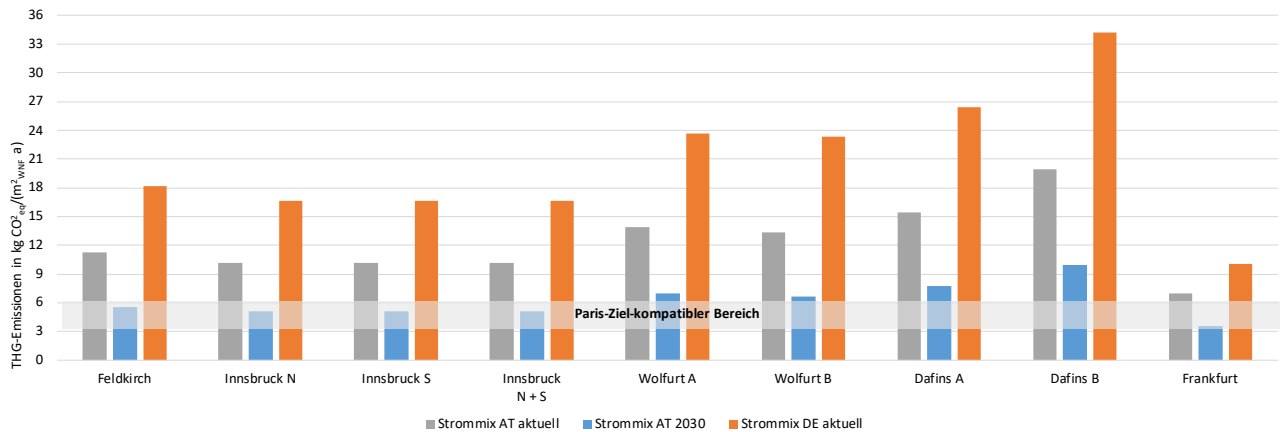


Abbildung 13: spezifische Treibhausgasemissionen der wärmepumpenbeheizten Gebäude, für die monatsweise Messerte des Netzbezugs Strom vorliegen

Wie die Abbildung zeigt, liegen die Treibhausgasemissionen aller Gebäude deutlich über den Paris-kompatiblen Emissionen von 3,13 kg/(m²_{WNF}·a) bis 6,25 kg/(m²_{WNF}·a), wenn der aktuelle deutsche Strommix unterstellt wird (rote Balken).

Wird der aktuelle Verbraucherstrommix Österreichs unterstellt (graue Balken), so erreicht das Projekt in Frankfurt mit 7 kg/(m²_{WNF}·a) fast den Paris-kompatiblen Wert.

Mit dem Verbraucherstrommix Österreichs im Jahr 2030 (bei Umsetzung der aktuellen Ausbauziele lt. Regierungsprogramm zu 2/3) entsprechen die Projekte in Frankfurt, Innsbruck und Feldkirch dem Paris-kompatiblen Wert während ihn die Gebäude Wolfurt A und B sowie Dafins A noch knapp verfehlen (blaue Balken). Das Gebäude Dafins B verfehlt den Wert aufgrund des sehr hohen Haushaltsstromverbrauchs deutlich. Durch den Austausch der Haushaltsgeräte können jedoch auch die drei letztgenannten Projekte schon im Jahr 2030 den Paris-kompatiblen Bereich erreichen.

Resumé

Die Querschnittsanalyse der untersuchten Beispielgebäude zeigt, dass die in Kapitel 1.15 beschriebenen Anforderungen an Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser schon heute erreicht werden können. Die meisten der vorgestellten Gebäude erreichen die Anforderungen oder erreichen die Anforderungen spätestens mit dem für etwa 2030 zu erwartenden Verbraucherstrommix.

Alle Gebäude könnten heute, drei bis 10 Jahre nach Errichtung und in Kenntniss der Anforderungswerte mit kleineren Optimierungen in der Auslegung und im Betrieb so verändert werden, dass sie die Anforderungswerte erreichen.

Dazu wären teilweise nur Betriebsoptimierungen notwendig (z.B. regelungstechnische Optimierungen in den Projekten Dafins und Wolfurt), zum Teil aber auch Änderungen in der Konzeption: so könnte etwa das KliNaWo-Gebäude mit einer zentralen Wärmerückgewinnung für die Abluft ausgestattet werden und in den meisten Projekten sollten die PV-Anlagen größer dimensioniert werden.

Außerdem zeigt der Vergleich die Bedeutung effizienter Haushaltsgeräte: der Energieverbrauch der Beispielgebäude für Heizung, Warmwasser und Hilfsstrom ist so niedrig, dass er nur etwa 38 % bis 55 % des Gesamt-Stromverbrauchs der wärmepumpenbeheizten Gebäude ausmacht. Die Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs ist daher eine Aufgabe von zentraler Bedeutung. Wie weit diese Reduktion gehen kann, zeigt das Projekt in Frankfurt, dessen Haushaltsstromverbrauch aufgrund der Ausstattung aller Wohnungen mit hocheffizienten Elektrogeräten mit $14,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}}\cdot\text{a})$ weit niedriger liegt als der aller anderen Projekte.

Wie die Querschnittsanalyse zeigt, kann der Hilfsstromverbrauch auf sehr niedrige Werte reduziert werden. In einigen Projekten gelang dies bislang noch nicht vollständig, das Thema des Hilfsstromverbrauchs sollte daher in der Planung, bei der Inbetriebnahme und bei der Optimierung im Betrieb eine wichtigere Rolle spielen als bislang üblich.