

Wohnbauforschung Dafins V 182

Endbericht 2022



Dornbirn, Dezember 2022



Wohnbauforschung Dafins V182

Endbericht 2022

Dornbirn, Dezember 2022

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Dr. Tobias Hatt M.Eng., Energieinstitut Vorarlberg

Dipl.-Ing. Arch. Martin Ploß, Energieinstitut Vorarlberg

Energieeffizientes Bauen

Energieinstitut Vorarlberg

CAMPUS V, Stadtstraße 33

6850 Dornbirn, Österreich

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

info@energieinstitut.at

Zusammenfassung

Nachdem es gelungen ist den Heizwärmeverbrauch in hocheffizienten Mehrfamilienhäusern deutlich zu reduzieren, rückt der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung stärker in den Fokus. Durch den stärkeren Einsatz von Wärmepumpen auch im Mehrfamilienhaus ist es ebenfalls beim Warmwasser effizienzsteigernd das Temperaturniveau zu senken. Je niedriger dieses ist, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe. Dem entgegen stehen aber Hygieneanforderungen wie die Legionellenprophylaxe. Deshalb werden Alternativen zum klassischen 4-Leiter System gesucht. In wärmepumpenbeheizten Gebäuden spielen PV-Anlagen eine größere Rolle, da tendenziell mehr Strom selbst genutzt werden kann. Durch gesetzliche Änderungen ist seit 2018 die Eigennutzung von PV-Strom in Mehrfamilienhäusern leichter möglich.

Ziel des Wohnbauforschungsprojekts Dafins ist es, verschiedene Wärmeverteilsysteme als effiziente Alternative zum 4-Leiter System zu optimieren, wirtschaftlich zu bewerten und in der Praxis zu testen. Darüber hinaus soll der Einsatz von PV-Anlagen verschiedener Größen und Orientierungen unter den veränderten rechtlichen Randbedingungen untersucht werden.

Die Konzepte werden an zwei nahezu identischen kleinen Mehrfamilienhäusern mit je sechs Wohneinheiten untersucht und umgesetzt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorgängerprojekte sind beide Gebäude in sehr guten Hüllqualitäten mit Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung ausgeführt, da sich dies über den Lebenszyklus als kostenoptimal erwiesen hat. Die Konzepte werden in einem ersten Schritt in dynamischen Gebäude und Anlagensimulationen optimiert. Die Auswahl der Realisierungsvarianten erfolgt unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten. Seit der Fertigstellung der beiden Gebäude im Oktober 2020 werden Energieverbräuche und die wichtigsten Behaglichkeitsparameter messtechnisch erfasst. Auf Grundlage der Monitoringdaten erfolgt seitdem eine schrittweise Optimierung im Betrieb.

Wie die Monitoringergebnisse zeigen, gehören beide Gebäude zu den effizientesten wärmepumpenbeheizten Mehrfamilienhäusern Österreichs. Haus A ist ein jahresbilanzielles Plusenergiegebäude, d.h. der gesamte Stromverbrauch inklusive Haushaltsstrom kann in der Jahresbilanz durch den erzeugten Strom der PV-Anlage gedeckt werden. Es zeigt sich aber an Haus B, dass der vom Bauherrn und Planern nicht beeinflussbare Haushaltsstromverbrauch den überwiegenden Anteil des Gesamtstromverbrauchs ausmachen kann so dass der erzeugte PV-Strom auch jahresbilanziell nicht ausreicht, das Gebäude zu versorgen.

Während in den Vorgängerprojekten KliNaWo und Wolfurt die seit längerem bekannten Wärmeverteilsysteme 4-Leiter, 2-Leiter und 2+2-Leiter umgesetzt wurden, wurde im Haus B in Dafins erstmals in einem Wohnbauforschungsprojekt in Vorarlberg das neuentwickelte System

mit wohnungsweisen Brauchwasserwärmepumpen erprobt. Dieses System nutzt die Fußbodenheizung als Wärmequelle und verspricht deshalb eine hohe Effizienz bei der Warmwasserbereitung. Um dies zu bewerten muss aber das Gesamtsystem inklusive der zentralen Wärmepumpe betrachtet werden, da diese auch in der Kaskade eingebunden ist und somit auch Energie für die Warmwasserbereitung zur Verfügung stellen muss.

Wie das zweijährige Monitoring zeigt, erreicht das System mit den wohnungsweisen Brauchwasserwärmepumpen nach den beschriebenen Optimierungen die prognostizierte hohe Effizienz. Das System scheint bei normaler Belegung daher aus energetischer Sicht eine gute Lösung zu sein, bei sehr hohem Warmwasserbedarf, z.B. bei sehr dicht belegten Wohnungen kann das System aber wie andere dezentrale Boilerlösungen durch den begrenzten Speicherinhalt an seine Grenzen kommen, bzw. die Effizienz durch Einsatz eines E-Heizstabes abnehmen. Das in Haus A installierte 2+2-Leiter System konnte im Projekt Dafins in den ersten beiden Jahren auf der Warmwasserseite noch nicht die prognostizierte Effizienz erreichen. Im Gegensatz zu Haus B wurde das System in Haus A noch nicht zur Gänze optimiert, aber die im Januar 2022 gesetzten Maßnahmen zeigen erste Erfolge. Es wird aber immer noch von einem zu hohen Durchfluss in den zapffreien Zeiten ausgegangen. Kann dieser noch durch geänderte Einstellungen der Frischwasserstationen und der Pumpe reduziert werden, so sinken Verteilverluste und Pumpenstromverbrauch. Diese Änderungen wurden Anfang 2023 durchgeführt und scheinen vielversprechend. Mit diesen Änderungen wird erwartet, dass 2023 auch Haus A den prognostizierten Werten entspricht.

Sowohl bezüglich der Investitionskosten als auch der Lebenszykluskosten sind die beiden verglichenen System ähnlich zu bewerten. Langzeiterfahrungen zu Ersatzinvestitionen und Wartung liegen in dem Projekt nicht vor, deshalb kann hierzu keine Aussage getroffen werden. Es kann aber festgehalten werden, dass bei beiden Systemen ein Nutzereingriff bei den Einstellungen die Effizienz deutlich verschlechtern kann.

Die prognostizierten PV-Erträge wurden im ersten Jahr erreicht, im zweiten Messjahr sogar mit über 1000 kWh/kW_p deutlich übertroffen. Die mit 5 kW_p pro Wohneinheit sehr großen Anlagen sind als reine Einspeiseanlagen in allen Varianten wirtschaftlich darstellbar und werfen Renditen ab. Beim Mieterstrommodell können sie sich nicht zur Gänze nur über die Überschusseinspeisung refinanzieren. Zur wirtschaftlichen Darstellung muss ein Teil der Investitionskosten über die Miete umgelegt werden oder der Strom an die Mieter verkauft werden, aber deutlich unter Marktpreis. Beispielhaft bei Umlegung über die Miete wäre dies eine Mieterhöhung von 22 Cent/(m²mon) bei einer gleichzeitigen Stromkostensparnis und Senkung der Betriebskosten für die Mieter von 38 Cent/(m²mon). Mit OeMAG Förderung ist die Anlage

immer wirtschaftlich darstellbar. Einzige Hürde scheint, mit oder ohne Förderung, der bürokratische Aufwand zu sein.

Zusammenfassend können die im Projekt bearbeiteten Forschungsfragen wie folgt beantwortet werden. Die ausführlichen Erklärungen sind im Langtext zu finden.

1. Können mit einem Wärmeversorgungskonzept mit wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen (Kaskaden-WW-Wärmepumpen) und zentraler Wärmepumpe für die Beheizung ähnlich niedrige reale Energieverbräuche erreicht werden, wie mit optimierten Systemen mit zentraler Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser?
 - *Beide Systeme wurden in den Gebäuden verglichen und erreichen beide sehr niedrige Verbräuche für Heizung und Warmwasser.*
2. Sind die Investitions- und Lebenszykluskosten des Systems mit wohnungsweisen Kaskaden-WW-Wärmepumpen konkurrenzfähig mit denen optimierter Systeme mit zentraler Wärmepumpe für Heizung und Warmwasserbereitung?
 - *Die Investitions- und Lebenszykluskosten beider Systeme sind in den untersuchten kleinen MFH sehr ähnlich.*
3. Kann die sommerliche Behaglichkeit durch die Kühlfunktion des Systems mit Kaskaden-WW-Wärmepumpen verbessert werden und wie viel sommerliche Überschusswärme aus dem Raum kann das System zur Erwärmung des Warmwassers nutzen?
 - *Der Kühleffekt konnte erst nach Optimierung im Jahr 2022 untersucht werden. Die zentrale Wärmepumpe läuft von Juni bis August nur in minimalem Umfang, was darauf schließen lässt, dass die dezentralen Wärmepumpen dem Gebäude als Quelle Wärme entziehen.*
4. Wie gelingt es, die rechtlichen Möglichkeiten des EIWOG neu umzusetzen und Mieterstrommodelle zur Nutzung der PV-Erträge anzubieten?
 - *Das Projekt zeigt, dass sehr große PV-Anlagen im MFH mit dem Mieterstrommodell wirtschaftlich betrieben werden können. Der bürokratische Aufwand sollte noch gesenkt werden.*
5. Welches der beiden untersuchten Systeme eignet sich besser zur Nutzung von Erträgen gebäudeintegrierter PV-Anlagen?
 - *Mit dem Mieterstrommodell sind beide Systeme sehr gut für die PV-Nutzung geeignet. Zur Erhöhung des sommerlichen Eigennutzungsgrads könnten beide Systeme noch optimiert werden.*
6. Können die beiden zu untersuchenden Haustechnikkonzepte aus Sicht des Stromversorgers und des Mieters gleichermaßen vorteilhaft durch Contracting-Modelle umgesetzt werden?

- *Contracting-Modelle werden eher für das zentrale System angeboten und nicht für wohnungsweise Systeme. Dieser Punkt wurde nicht näher untersucht, da die Finanzierung und Betrieb der Anlage auch ohne Contracting wirtschaftlich möglich war.*

Inhalt

Zusammenfassung.....	3
1 Projektbeschreibung	9
1.1 Ausgangslage	9
1.2 Projektinhalt und Ziele.....	11
1.3 Forschungsfragen	11
1.4 Vorgehensweise	12
1.5 Energie- und ökologische Kriterien.....	13
2 Energetische Optimierung mit dynamischer Gebäudesimulation.....	14
2.1 Dynamische Gebäudesimulation, was ist das?	14
2.2 Lastprofile	16
2.3 Belegung der Wohnungen.....	18
2.4 Haushaltsstrombedarf	20
2.5 Warmwasserbedarf	22
3 Variantenuntersuchung durch dynamische Gebäudesimulation	22
3.1 Untersuchte Varianten	22
3.2 Varianten der PV-Anlagen.....	24
4 Investitionskosten	26
4.1 Heizung/Sanitär	26
4.2 Lüftung.....	27
4.3 PV-Anlage.....	27
5 Wirtschaftlichkeit	28
5.1 Annahmen und Randbedingungen.....	28
5.2 Heizung und Sanitär.....	29
5.3 Lüftung.....	30
5.4 PV Anlage und Mieterstrommodell	30
6 Beschreibung der Ausführungsvarianten beider Gebäude	35
6.1 Konstruktion und Hüllqualität.....	36
6.2 Energierelevante Haustechnik – Haus A.....	37
6.3 Energierelevante Haustechnik – Haus B.....	39

7	Messergebnisse 2021	40
7.1	Außenlufttemperaturen 2021	40
7.2	Energetische Performance – Haus A 2021	42
7.3	Energetische Performance – Haus B 2021	44
7.4	PV-Anlage und Mieterstrom 2021	46
8	Optimierung und Messergebnisse 2022	48
8.1	Optimierung Wärmeversorgung Haus A 2022	48
8.2	Optimierung Wärmeversorgung Haus B 2022	48
8.3	Außenlufttemperaturen 2022.....	50
8.4	Energetische Performance – Haus A 2022	51
8.5	Energetische Performance – Haus B 2022	52
8.6	PV-Anlage und Eigenstromnutzung 2022.....	54
8.7	Optimierungspotenzial für 2023.....	59
9	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	60
9.1	Einordnung der Gebäude	60
9.2	Warmwasserversorgung	61
9.3	PV-Stromerzeugung und Mieterstrommodell.....	62
	Abbildungen	64
	Tabellen.....	66
	Literatur.....	67

1 Projektbeschreibung

1.1 Ausgangslage

Die Errichtung energieeffizienter, Klimaziel-kompatibler und dabei leistbarer Wohngebäude ist eine der zentralen Herausforderungen der Wohnungsbaupolitik. Das Land Vorarlberg unterstützt daher im Rahmen der Wohnbauforschung seit einigen Jahren Neubau- und Sanierungsprojekte, in denen die Themen Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit in der Praxis untersucht werden. Da der Anteil der Mehrfamilienhäuser im Neubau steigt, sind Mehrfamilienhausprojekte ein Schwerpunkt der Wohnbauforschung. Wegen der wachsenden Bedeutung des gemeinnützigen Wohnbaus und der Erfahrung der gemeinnützigen Bauvereinigungen mit dem Bau effizienter Wohngebäude bieten sich deren Projekte zur Durchführung derartiger Modellvorhaben an.

Das in diesem Bericht dargestellte Projekt der Alpenländische Gemeinnützige WohnbauGmbH baut auf den Erkenntnissen von zwei Projekten auf, die mit Unterstützung des Landes durchgeführt wurden:

- Modellvorhaben KliNaWo (VOGEWOSI) [1]
- Wohnbauforschungsprojekt Wolfurt (Wohnbauselbsthilfe + Rhomberg) [2]

Der Schwerpunkt des 2013 gestarteten, vom Land Vorarlberg kofinanzierten Projekts **KliNaWo** lag auf dem Thema Kosten und Wirtschaftlichkeit hocheffizienter Gebäude. Dazu wurden 60.000 mögliche Ausführungsvarianten in unterschiedlichen Konstruktionsarten, mit unterschiedlichen Wärmeversorgungs-, Lüftungs- und Solarkonzepten sowie in unterschiedlichen Energieniveaus geplant und in modularen Ausschreibungen bepreist. Für alle Varianten wurden Energiebedarf und Lebenszykluskosten bestimmt. Ausgeführt wurde die Variante mit den niedrigsten Lebenszykluskosten. Die Realisierungsvariante wurde im Oktober 2017 fertiggestellt und bezogen, das Monitoring der Energieverbräuche und der Behaglichkeit läuft seit Ende 2017.

Im Modellvorhaben **KliNaWo**, konnte aufgezeigt werden, dass

- hocheffiziente Gebäude zu Baukosten deutlich unterhalb der Kostengrenzen der Wohnbauförderung Vorarlberg errichtet werden können
- der reale Verbrauch der Gebäude in Verbrauchsprognoseberechnungen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann
- die abgerechneten, investiven Mehrkosten hocheffizienter Mehrfamilienhäuser gegenüber architektonisch identischen Gebäuden nach den Mindestanforderungen der Bau-technikverordnung Vorarlberg bei etwa 70% verringertem realem Energieverbrauch nur etwa 3 bis 6% der Bauwerkskosten betragen

- die investiven Mehrkosten der hocheffizienten Gebäudevarianten im Lebenszyklus durch die geringeren Energiekosten mehr als ausgeglichen werden
- die Kostenoptima des Energiebedarfs bei weit höheren Gebäudequalitäten liegen, als in aktuellen Anforderungen der OIB Richtlinie 6 und der Bautechnikverordnung Vorarlberg beschrieben
- sehr hohe Energieeffizienz in Gebäuden unterschiedlicher Konstruktionsart und mit verschiedenen Wärmeversorgungskonzepten wirtschaftlich erreicht werden kann
- die energetisch-wirtschaftliche Optimierung durch Lebenszyklusberechnungen ein sinnvolles Planungsinstrument ist, durch das die Wirtschaftlichkeit im Lebenszyklus gesteigert werden kann

Im Ende 2017 begonnenen Wohnbauforschungsprojekt **Wolfurt-Lerchenstraße**, das auf den Erkenntnissen des Projekts KliNaWo aufbaut, lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung haustechnischer Lösungen. Für die zwei von der Wohnbauselbsthilfe und der Rhomberg Bau GmbH errichteten Baukörper wurden mehr als 30 Varianten der Wärme- und Energieversorgung detailliert untersucht. In beiden Gebäuden wurden zentrale, wärmepumpenbasierte Wärmeversorgungssysteme realisiert, die Gebäude unterscheiden sich durch ihr Wärmeverteilungssystem und durch das eingesetzte Solarsystem. Das Projekt **Wolfurt-Lerchenstraße** zeigt, dass

- wärmepumpenbasierte Wärmeversorgungssysteme unter den Randbedingungen in Westösterreich (Verhältnis Strompreis zu Preis Biomasse und Fossile) schon vor der Energiekrise des Jahres 2022 wirtschaftlich waren
- die als Varianten untersuchten dezentralen, elektrischen Warmwasserbereitungssysteme (ohne Wärmepumpe) energetisch und hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen nicht die Qualität erreichen, wie die zentralen Systeme mit Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser und auch in Punkto Wirtschaftlichkeit nicht vorteilhaft sind
- die Verteilverluste zentraler Wärmeversorgungssysteme mit verschiedenen Konzepten kostengünstig reduziert werden können

In dem in diesem Bericht beschriebenen Projekt der Alpenländische Gemeinnützige WohnbauGmbH in **Dafins** sollen die Erkenntnisse aus beiden Vorprojekten zusammengeführt und auf die neuen rechtlichen Randbedingungen zur Nutzung von PV-Strom in Mehrfamilienhäusern abgestimmt werden.

Ziel ist es, im Quervergleich der drei Modellvorhaben Erkenntnisse zu Kosten, Wirtschaftlichkeit, realem Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Behaglichkeit zu erlangen und auf dieser Basis auf breiter Basis wirtschaftliche und energieeffiziente Gebäude errichten zu können.

1.2 Projektinhalt und Ziele

Das Projekt in Dafins besteht aus zwei architektonisch fast identischen Gebäuden mit je 6 Wohneinheiten.

Inhalt des Wohnbauforschungsprojekts ist der Praxisvergleich unterschiedlicher Energiekonzepte für hocheffiziente, ökologische und wirtschaftlich zu betreibende Mehrfamilienhäuser.

Projektziele sind

- Geringer Energiebedarf im Lebenszyklus
- Geringe Lebenszykluskosten für Errichtung, Wartung und Betrieb sowie für Energie
- Vergleich eines neuen Wärmeversorgungskonzepts, das die Beheizung durch eine zentrale Sole-Wärmepumpe mit der wohnungsweisen Warmwasserbereitung in Warmwasser-Wärmepumpen kombiniert (Kaskaden-Warmwasser-Wärmepumpen, System ovum) mit einem System mit zentraler Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser in Kombination mit einer PV-Anlage
- Energetisch-wirtschaftliche Optimierung dachintegrierter PV-Anlagen vor allem unter Berücksichtigung der Nutzung von PV-Strom nach den 2017 geschaffenen rechtlichen Möglichkeiten des EIWOG neu (Mieterstrommodelle)

1.3 Forschungsfragen

Schwerpunkte des Projekts sind die folgenden Forschungsfragen:

1. Können mit einem Wärmeversorgungskonzept mit wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen (Kaskaden-WW-Wärmepumpen) und zentraler Wärmepumpe für die Beheizung ähnlich niedrige reale Energieverbräuche erreicht werden, wie mit optimierten Systemen mit zentraler Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser?
2. Sind die Investitions- und Lebenszykluskosten des Systems mit wohnungsweisen Kaskaden-WW-Wärmepumpen konkurrenzfähig mit denen optimierter Systeme mit zentraler Wärmepumpe für Heizung und Warmwasserbereitung?
3. Kann die sommerliche Behaglichkeit durch die Kühlfunktion des Systems mit Kaskaden-WW-Wärmepumpen verbessert werden und wie viel sommerliche Überschusswärme aus dem Raum kann das System zur Erwärmung des Warmwassers nutzen?
4. Wie gelingt es, die rechtlichen Möglichkeiten des EIWOG neu umzusetzen und Mieterstrommodelle zur Nutzung der PV-Erträge anzubieten?
5. Welches der beiden untersuchten Systeme eignet sich besser zur Nutzung von Erträgen gebäudeintegrierter PV-Anlagen?
6. Können die beiden zu untersuchenden Haustechnikkonzepte aus Sicht des Stromversorgers und des Mieters gleichermaßen vorteilhaft durch Contracting-Modelle umgesetzt werden?

1.4 Vorgehensweise

Das Projekt wird aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Modellvorhabens KliNaWo sowie Wolfurt-Lerchenstraße und mit den in diesen Projekten entwickelten Planungsinstrumenten energetisch-wirtschaftlich optimiert. Dazu werden unterschiedliche Ausführungsvarianten von zwei verschiedenen Energieversorgungssystemen geplant, optimiert und ausgeschrieben.

Die wirtschaftliche, energetische und ökologische Optimierung erfolgt in den folgenden, aufeinander aufbauenden Schritten:

- Optimierung des architektonischen Entwurfs durch minimalinvasive Veränderungen (Fensterflächen und –orientierung sowie Lüftungskonzept (Lage der Lüftungsgeräte und Ausgestaltung des Verteilnetzes), Lage der zentralen Wärmepumpe und der wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen, Flächen für aktiv-solare Systemen,
- Optimierung der Gebäudehülle: Beide Gebäude werden in der gleichen Konstruktion und in der gleichen Hüllqualität errichtet, um die unterschiedlichen Haustechnikkonzepte vergleichen zu können. Zur energetisch-wirtschaftlichen Optimierung der Gebäudehülle werden zwei unterschiedliche Hüllqualitäten (BTV und Passivhaus) untersucht.
- Vergleich zweier wärmepumpenbasierter Wärmeversorgungskonzepte in mehreren Ausführungsvarianten:
 - a. Zentrale Sole-Wärmepumpe mit energetisch-wirtschaftlich optimiertem Verteilsystem für Heizung und Warmwasser in Kombination mit PV-Anlagen unterschiedlicher Größen (kostenoptimale Lösung im Projekt Wolfurt)
 - b. Kaskaden-Warmwasser-Wärmepumpen (System ovum) mit Kombination aus zentraler Sole-Wärmepumpe für die Beheizung mit wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen in Kombination mit PV-Anlagen unterschiedlicher Größen
- Optimierung des Lüftungssystems:
 - a. Vergleich verschiedener Systeme zur Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung mit Abluftsystemen
 - b. Überprüfung der Wohnungsgrundrisse auf die Anwendbarkeit einer kostensparenden Kaskadenlüftung

Zu untersuchende Varianten

In der nachfolgenden Auflistung sind untersuchten Gebäudevarianten beschrieben:

Tabelle 1: Auflistung zu untersuchende Gebäudevarianten:

Gebäudehülle opak:	BTV Mindestanforderung / Passivhausniveau
Fenster:	3-fach Verglasung mittel / 3-fach Verglasung optimiert / Passivhausfenster
Lüftung:	Komfortlüftung mit WRG / Abluft
Wärmeerzeugung:	zentrale Sole-WP für Heizung und Warmwasser / System ovum mit zentraler Sole-WP für Heizung und wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen
Wärmeverteilung	Zwei + Zweileiter mit Wohnungsstationen (für zentrale WP) / Zweileiter nur Heizung bzw. Kühlung für System ovum
Wärmeabgabe:	Fußbodenheizung
PV-Anlage:	keine PV / kleine PV / PV mittlerer Größe / PV maximale Größe
Haushaltsgeräte	Normalausstattung / Ausstattung mit marktbesten Großgeräten

Die Entscheidung über die zu realisierenden Konzepte fällt auf der Grundlage der Lebenszykluskosten und der energetischen Gebäudequalität. Als Kriterium für die energetische Qualität wird der Endenergiebedarf für die verschiedenen Anwendungen herangezogen. Zusätzlich wird die Erzeugung von PV-Strom und der Anteil des eigengenutzten PV-Stroms bewertet. Als Betrachtungszeitraum für die Wirtschaftlichkeitskalkulationen werden 50 Jahre gewählt. Die technischen Lebensdauern werden für einzelne Bauteile und Haustechnikkomponenten differenziert festgelegt, Restwerte und Ersatzinvestitionen werden berücksichtigt.

Ziele im Bereich Mobilität:

- attraktive Radabstellanlagen in Anlehnung an Broschüre Land – inkl. Ladeinfrastruktur für E-Bikes, Platz für Kikis,....
- Ladeinfrastruktur für E-Autos (einfach nachrüstbar)

1.5 Energie- und ökologische Kriterien

Die Ausführungsvarianten werden nach den Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der Wohnbauförderung 2018 und der Energieförderung Vorarlberg ausgewählt.

Für beide Baukörper werden die folgenden PHPP-Energiekennwerte bei Norm-Randbedingungen (Raumlufttemperatur 20°C etc.) angestrebt:

- HWB ca. 15 kWh/(m²_{EBFA})
- Endenergiebedarf Heizung + Warmwasser ca. 10-12 kWh/(m²_{EBFA})
- Endenergiebedarf Hilfsstrom Haustechnik inkl. Lüftung: 3-6 kWh/(m²_{EBFA})
- Endenergiebedarf (Haushaltsstrom): 15-18 kWh/(m²_{EBFA})

Die Energiekennwerte der untersuchten Varianten werden in einem ersten Schritt durch PHPP-Berechnungen bestimmt (Schwerpunkt Gebäudehülle und Lüftung, grobe Abbildung der Wärmeversorgung); in einem zweiten Schritt werden verschiedene Wärmeversorgungsvarianten durch gekoppelte dynamische Gebäude- und Anlagensimulationen (IDA ICE) detaillierter untersucht. Der Schwerpunkt der dynamischen Simulationen liegt auf der Abbildung der Wärmeversorgungssysteme, da das neue System mit wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen (Kaskaden-WW-Wärmepumpen) und zentraler Wärmepumpe für die Beheizung weder in Energieausweisberechnungen noch in PHPP hinreichend genau abzubilden ist.

Die Berechnungen werden nicht nur mit Norm-Randbedingungen, sondern auch mit realistischen Randbedingungen als so genannte Verbrauchsprognoseberechnungen durchgeführt (Raumlufttemperatur Winter 22°C bzw. 22,5°C statt 20°, etwas höherer pro-Kopf-Warmwasserbedarf etc.). Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden die Ergebnisse der Verbrauchsprognoseberechnungen verwendet.

2 Energetische Optimierung mit dynamischer Gebäudesimulation

2.1 Dynamische Gebäudesimulation, was ist das?

Die energetische Voroptimierung erfolgt mit dem quasi-stationären Rechenverfahren des PHPP. Hier werden monatsweise Gebäudeenergiebilanzen aufgestellt und dann in Kennwerten für ein Jahr zusammengefasst. Dieses Verfahren ist validiert und liefert bei realistisch gewählten Randbedingungen realitätsnahe Aussagen zum jährlichen Energiebedarf für Raumheizung, Kühlung, Warmwasser, Hilfsstrom und Haushaltsstrom.

Will man Energiebilanzen zeitlich und räumlich höher aufgelöst darstellen und die Haustechniksysteme mit ihren Regelstrategien detaillierter abbilden, ist eine dynamische Gebäude- und Anlagensimulation sinnvoll. Im Vergleich zu vereinfachten Verfahren wird das Gebäude in Zonen unterteilt, die aus ganzen Wohnungen oder aus einzelnen Zimmern bestehen können. Diese Eingabe erfolgt bei den meisten Programmen in Form eines dreidimensionalen Gebäudemodells wie es in Abbildung 1 dargestellt ist. Ebenfalls erfasst werden die Nachbargebäude und gegebenenfalls auch Berge, welche das Gebäude verschatten können.



Abbildung 1: Dreidimensionales Gebäudemodell Dafins V182 Haus B mit dem verschattenden Nachbargebäude aus der Software IDA ICE.

Außer der räumlich höheren Auflösung erfolgt die Berechnung auch zeitlich höher aufgelöst. Je nach Verfahren und Detaillierungsgrad erfolgt dies in stündlichen, minütlichen oder gar sekundlichen Intervallen. Dies bedeutet, dass bei jedem Intervall eine Energiebilanz erstellt wird. Hohe zeitliche Auflösungen sind auch bei der Darstellung von Regelungen in der detaillierten Abbildung der Haustechnik nötig. So wie das Gebäude in kleinere Einheiten untergliedert wird, kann auch die Haustechnik in die einzelnen Komponenten wie Wärmeerzeuger, Speicher, Verteilung, Pumpen, Lüftung, Regelung, Abgabesysteme und weitere unterteilt werden. So kann z.B. die Trägheit und Speichermasse des Estrichs bei einer Fußbodenheizung berücksichtigt werden.

In dieser Studie wird das Gebäude mit dem dynamischen Simulationsprogramm IDA Indoor Climate and Energy in der Version 4.8 abgebildet und berechnet. IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) ein Simulationswerkzeug für die Betriebsoptimierung von Gebäuden. Das Gebäude, die Anlagentechnik und deren Regelung werden möglichst exakt abgebildet, wodurch ein minimaler Energieverbrauch bei optimiertem thermischen Komfort für die Gebäudenutzer erreicht werden kann. Eine, wenn auch schon etwas ältere Gegenüberstellung von Simulationsprogrammen findet sich in [3].

Ähnlich wie bei stationären Rechenverfahren müssen auch für die Gebäudesimulation Randbedingungen definiert werden. Die wichtigsten dieser Randbedingungen für die Simulation des Projekts in Dafins sind nachfolgend zusammengefasst:

- Klimadaten des Standorts in Dafins. Die Klimadaten wurden mit dem Programm Meteororm generiert, verwendet wurden die Daten für die neuere Periode, die Horizontverschattung durch die Topographie wurde im Klimadatensatz berücksichtigt.

- Raumtemperatur im Heizfall etwa 22°C.
- Bedarfsgerechter Luftwechsel durch Komfortlüftung (0,30 1/h) mit Wärmerückgewinnung mit automatischem Bypass für den Sommerbetrieb.
- Zusätzliche Fensterlüftung im Winter durch „Fehlnutzung“.
- Zusätzliche Fensterlüftung im Sommer durch Öffnen der Fenster modelliert.
- Verschattung durch außenliegende Raffstore im Winter durch „Fehlnutzung“ bei einigen Fenstern.
- Verschattung durch außenliegende Raffstore im Sommer.
- Raumnutzungsbedingungen in Anlehnung an die Nutzungsprofile nach SIA 2024:2015 [4].
- Haushaltsstrombedarf und Warmwasserbedarf werden nachfolgend in einem eigenen Kapitel behandelt.

In einem ersten Schritt werden der Baukörper und die Hülle im Hinblick auf den Sommerkomfort und die Heizlast untersucht. Hierfür wird das Gebäude geometrisch exakt beschrieben, die Nachbarbebauungen als Verschattungsquelle eingegeben und die Nutzungsrandbedingungen festgelegt. Die Fenster werden modelliert und mit einem beweglichen Verschattungssystem versehen. Die Haustechnik wird in diesem ersten Schritt noch vereinfacht als raumweise ideale Heiz- und Kühlelemente dargestellt. Diese idealen Elemente reagieren immer ohne Verzögerung mit der benötigten Leistung damit die Innenraumbedingungen auf ihren Sollwerten gehalten werden. Reale Wärmeversorgungssysteme reagieren meist träge und können oft auch nicht die benötigte Leistung zu jedem Moment bereitstellen. Zur Analyse des Sommerkomforts und zur Heizlastabschätzung, bzw. zur Bestimmung der kritischen Wohnungen genügt der Detaillierungsgrad mit den idealen Elementen. Bei der Untersuchung der Haustechnikvarianten wird dann die Haustechnik detailliert abgebildet.

2.2 Lastprofile

Mit unterschiedlicher Belegung der Wohnungen ändern sich im Normalfall der Haushaltsstrombedarf und der Warmwasserbedarf. Für eine jahresbilanzielle Betrachtung, wie sie vielen Rechenverfahren, z.B. auch dem Energieausweis zugrunde liegt, genügt meist ein Jahressummenwert für den Haushaltsstrom und Warmwasserverbrauch über das gesamte Gebäude. Will man Aussagen zu unterschiedlichen Wohnungen, Gleichzeitigkeiten oder Lastverläufen treffen, müssen auch der Haushaltsstrom und der Warmwasserbedarf räumlich und zeitlich feiner aufgelöst abgebildet werden. Da für das untersuchte Gebäude auch Varianten berücksichtigt werden, in denen ein Teil des selbsterzeugten PV-Stroms im Gebäude und zwar auch zur Deckung des Haushaltsstrombedarfs und des Bedarfes für die Warmwasserbereitung genutzt

werden soll, ist die realistische Beschreibung des zu erwartenden Nutzerverhaltens durch individuelle Nutzerprofile sehr wichtig. Nur so kann die Gleichzeitigkeit von Strombedarf und PV-Stromerzeugung und damit der Eigennutzungsgrad realistisch abgeschätzt werden. Diese Auflösung variiert je nach Gebäude, Haustechnik und gewünschter Aussagekraft. Ein Beispiel hierzu wäre die Betrachtung von dezentralen elektrischen Kleinspeichern in Mehrfamilienhäusern. Hier beeinflusst das Nutzerverhalten die Warmwassermenge und somit den Strombedarf des Kleinspeichers zum Wiederaufheizen. Da aber in der Realität nicht in allen Wohnungen gleichzeitig geduscht werden wird, werden auch nicht alle Kleinspeicher gleichzeitig das Stromnetz belasten, sondern je nach Nutzerverhalten je nach Wohnung unterschiedlich. Damit dieses Phänomen genauer untersucht werden kann, werden für die einzelnen Wohnungen individuelle Lastprofile für den Haushaltsstrom und das Warmwasser benötigt. Diese Lastprofile müssen zeitlich hochaufgelöst sein, also mindestens stündlich, besser 15-minütig oder noch feiner. Nachfolgend wird beschrieben, welche Lastprofile für den Haushaltsstrom und das Warmwasser in der Simulation des Projekts in Dafins verwendet wurden. Lastprofile können aus den unterschiedlichsten Quellen stammen, welche Vor- und Nachteile bieten.

- Genormte Lastprofile geben eine gute Näherung über den Durchschnitt sehr vieler Haushalte, aber nicht konkret für einen Haushalt.
- Individuell erzeugte oder real gemessene Lastprofile ermöglichen die Betrachtung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Haushalten in einem Gebäude.
- Individuell erzeugte Lastprofile ermöglichen den Vergleich von verschiedenen Effizienzscenarien bei den Haushaltsgeräten ohne dass das Nutzerverhalten variiert wird. Dies ist bei real gemessenen Lastprofilen nicht ohne weiteres möglich.
- Die zeitliche Auflösung kann bei genormten, gemessenen oder erzeugten Lastprofilen meist variabel gewählt werden.

In dieser Studie wurden aus zwei Gründen synthetisch generierte Lastprofile verwendet. Erstens können so verschiedene Effizienzen bei den Haushaltsgeräten hinterlegt werden und dann deren Auswirkung z.B. auf die PV-Eigennutzung untersucht werden. Zweitens können die Lastprofile so erzeugt werden, dass sie verschiedene Haushaltsstrukturen widerspiegeln. Somit können Gleichzeitigkeiten untersucht werden.

Die Lastprofile wurden mit dem LoadProfileGenerator Version 6.8 von Noah Pflugradt generiert [5]. Dieser Generator bildet Lastprofile anhand des Verhaltens von Personen ab. Der Zusammenhang zwischen Wünschen, Verhalten und Geräten, welche Strom oder Wasser benötigen ist in Abbildung 2 dargestellt. Nähere Infos zu dem Lastprofilgenerator unter <http://load-profilegenerator.de/>.

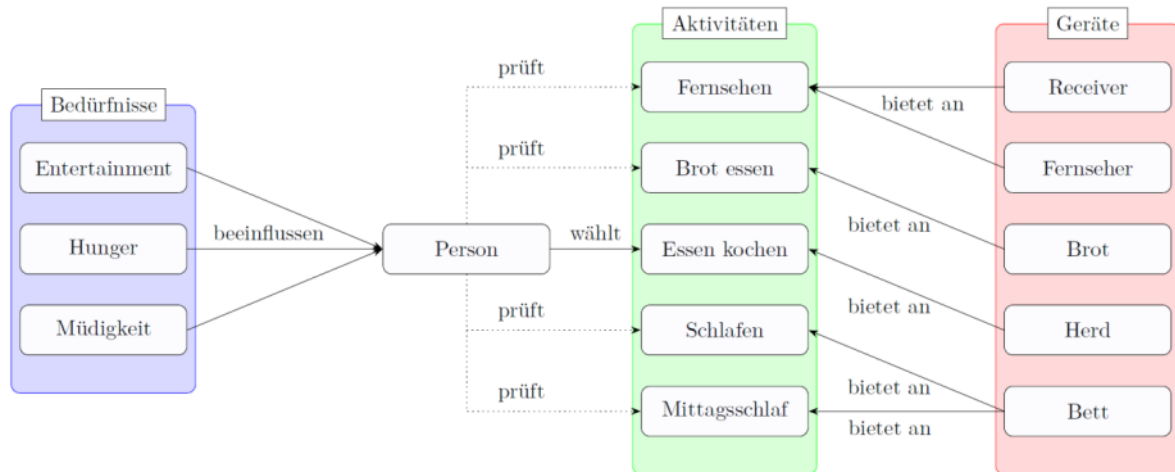


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Wünschen, Verhalten und Geräten, welche Strom oder Wasser benötigen (Quelle: [6, Abb. 4.2])

Die einzelnen Personen werden dann zu Haushalten zusammengesetzt. Die Personen innerhalb eines Haushaltes beeinflussen sich dann auch gegenseitig. So kann innerhalb eines Haushaltes z.B. immer nur eine Person zur selben Zeit duschen. Für das Projekt in Dafins wurden 6 Haushalte aus den 60 vordefinierten der internen Datenbank des LoadProfileGenerator ausgewählt und den einzelnen Wohnungen zugewiesen. Wie diese Auswahl und Zuweisung erfolgt wird im nächsten Kapitel erläutert. Die Lastprofile wurden für den Standort Dafins mit den Feiertagen und Schulferien für Vorarlberg generiert. Der Standort ist vor allem für die Tageslichtverfügbarkeit wichtig, damit der Lastverlauf der künstlichen Beleuchtung berechnet werden kann. Es werden für alle Haushalte Lastprofile für den Haushaltsstrom und das Warmwasser generiert. Die zeitliche Auflösung erfolgt minütlich und so ergeben sich 527.040 Zeitschritte pro Jahr. Die so generierten Lastprofile können dann in der dynamischen Simulation eingebunden werden, so dass der Einfluss der Lastprofile (d.h. des Nutzerverhaltens) auf die verschiedenen Haustechniksysteme berücksichtigt werden kann. Die Lastprofile werden mit drei verschiedenen Geräteausstattungen kombiniert, welche sich in ihrer Energieeffizienz unterscheiden.

2.3 Belegung der Wohnungen

Die Lastprofile werden wohnungsweise variiert, da sich das Nutzerverhalten je nach Situation der Bewohner unterscheidet. Ein Schichtarbeiter, der vor allem nachts außer Haus ist, hat ein anderes Lastprofil als eine alleinerziehende Mutter mit einem Schulkind.

Die 6 Wohnungen im Beispielgebäude haben 3 oder 4 Zimmer mit 74 und 87 m² Nettowohnfläche und sind gemeinnützige Mietwohnungen. Um eine gewisse Heterogenität zu bekommen wurde ein statistischer Haushaltsmix mit den verschiedensten Zusammensetzungen gewählt.

Die Struktur der Haushalte, wie die Haushaltsgrößen wurde aus statistischen Daten für Vorarlberg abgeleitet [7], ebenso wie die Altersstruktur [8], die Geschlechterverteilung [9] und die Arbeitslosigkeit [10]. Anhand der Altersstruktur wurde die Anzahl der Kinder und der Rentner bestimmt. Danach wurden die „typischen“ Haushalte den Wohnungen zugewiesen, wie z.B. eine Familie mit zwei Kindern einer Wohnung mit vier Zimmern. Der Haushaltsmix und die angenommenen Randbedingungen sind in Abbildung 3 dargestellt.

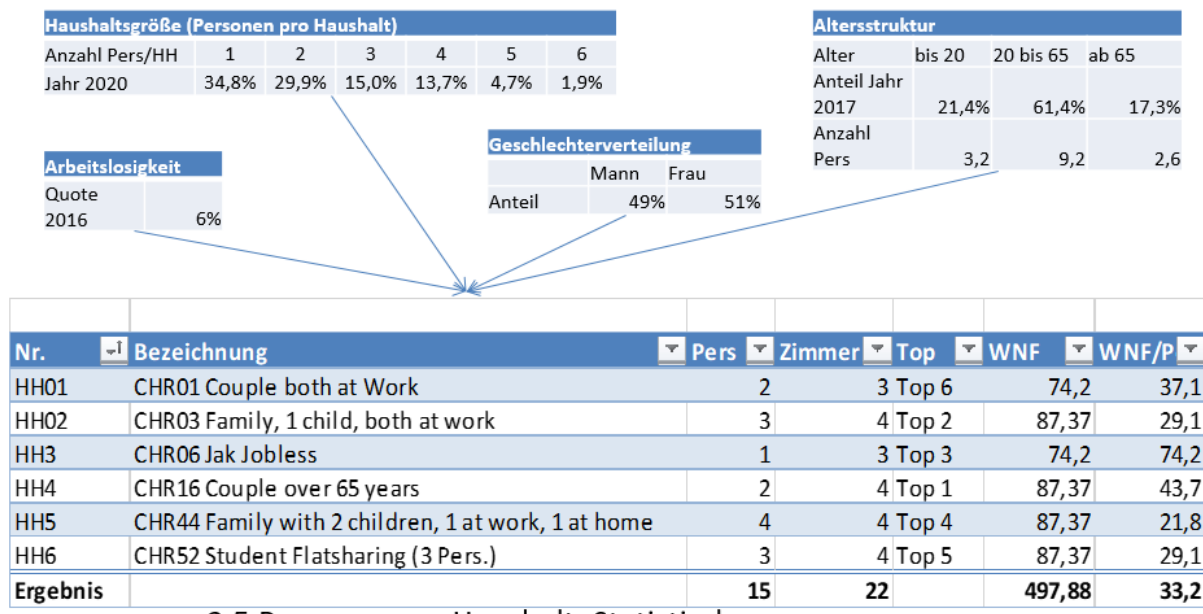


Abbildung 3: Statistische Wohnungsbelegung des Projekts Dafins mit 6 Wohneinheiten und den angenommenen Randbedingungen.

Mit der angenommenen Verteilung wohnen 15 Personen in den 6 Wohnungen und somit 2,5 Personen pro Haushalt. Dies deckt sich in etwa mit den statistischen Daten von 2,3 Personen pro Haushalt. Auch die Wohnfläche pro Person mit 33,2 m²/Pers liegt im Bereich der statistischen Daten. Laut Census 2011 liegt die Wohnfläche pro Person in Wohngebäude mit drei u. mehr Wohnungen bei 36,0 m² für gesamt Österreich wobei Vorarlberg 1,6 m² unter dem Gesamtschnitt liegt [11, Abb. 1.22, 1.25]. Auch andere Quellen liegen in diesem Bereich. Im PHPP [12] sind es 36 m²/Pers, allerdings auf die Energiebezugsfläche bezogen und nach der SIA 2024 [4] sind es 30 m²/Pers, allerdings hier auf die Bruttogeschossfläche bezogen. Im Durchschnitt über alle Wohnungen liegen die Annahmen für die Gebäude in Dafins also im Bereich der statistischen Mittelwerte, die Werte einzelner Wohnungen weichen, wie auch in der Realität, vom Durchschnitt ab. So wurde beispielhaft ein Single einer drei Zimmer Wohnung zugewiesen. Dieser hat dann 74 m² für sich alleine zur Verfügung und liegt somit weit über dem Durchschnitt.

2.4 Haushaltsstrombedarf

Mit der Personenbelegung der Wohnungen ändert sich im Normalfall auch der Haushaltsstrombedarf. Will man Aussagen zu unterschiedlichen Wohnungen, Gleichzeitigkeiten, genauen Lastverläufen oder zur PV-Strom Eigennutzung treffen, muss auch der Haushaltsstrom räumlich und zeitlich aufgelöst abgebildet werden. Somit wird für den Haushaltsstrom ein Lastprofil pro Wohnung und Energieintensität der Haushaltsgeräte erstellt. Im Effizienzniveau „Effizienz“ kommen nur sehr gute Geräte (in etwa A++, LED Beleuchtung) zum Einsatz. Im Standardniveau kommt ein zufällig verteilter Gerätepark zum Einsatz, also eine Mischung aus effizienten, standard- und energieintensiven Geräten. Im Intensivniveau kommen nur ineffiziente Geräte zum Einsatz. Dezentrale elektrische Warmwasserbereitung wird in den Lastprofilen nicht berücksichtigt, ebenso wenig direkt elektrische Raumheizungen. Die Szenarien Effizienz, Standard und Intensiv wurden nach Abgleich mit den Messergebnissen des Projekts KliNaWo [13] sowie zu anderen Mehrfamilienhaus-Projekten auf 18, 25 und 32 kWh/(m²_{EBFa}) normiert. In Abbildung 4 ist die Jahressumme des Haushaltsstrombedarfs der einzelnen Haushalte für die drei Effizienzstufen Effizienz, Standard und Intensiv dargestellt. Die Jahressumme ergibt sich aus der Aufsummierung des minutlichen Lastverlaufes. Man kann hier deutlich das Einsparpotenzial durch effiziente Haushaltsgeräte erkennen.

Nr.	Pers	pro Haushalt in kWh/(HH a)		
		Effizienz	Standard	Intensiv
HH1	2	1.753	2.336	2.932
HH2	3	1.873	2.410	3.175
HH3	1	802	1.306	1.685
HH4	2	1.575	2.089	2.582
HH5	4	2.092	2.921	3.950
HH6	3	1.426	2.162	2.602
Summe	15	9.520	13.224	16.926
Mittelwert	2,5	1.587	2.204	2.821
Mittelwert pro m ² EBF		18	25	32

Abbildung 4: Jährlicher Haushaltsstrombedarf der einzelnen generierten Haushalte für die drei Effizienzstufen Effizienz, Standard, Intensiv in kWh/(HH a).

Der jährliche Haushaltsstrombedarf aus den generierten Lastprofilen liegt zwischen ca. 800 und 3.950 kWh pro Haushalt und Jahr. Zur Einordnung werden diese Werte den Richtwerten der VKW [14] aus Tabelle 2 gegenübergestellt. Hier sieht man, dass die generierten Werte im Bereich der von der VKW publizierten Richtwerte für Mehrfamilienhäuser ohne elektrische

Warmwasserbereitung liegen. Vergleicht man den Mittelwert aus dem generierten Standardprofil von 2.204 kWh mit dem Durchschnittswert der Statistik Austria [15] von 2.875 kWh¹, so sieht man, dass die Annahmen für die Simulation des Projekts Dafins leicht darunter liegen. Unterstellt man, dass bei Neubezug der Wohnungen oft auch neue und effizientere Haushaltsgeräte und Leuchtmittel eingesetzt werden, ist es plausibel, dass die Werte niedriger als der Durchschnitt des Gebäudebestandes in Österreich liegen.

Tabelle 2: Einordnung des Stromverbrauches eines Haushaltes in Abhängigkeit der Personenanzahl für ein Mehrfamilienhaus ohne elektrische Warmwasserbereitung in kWh/a (Quelle: VKW [14]).

Pers	Effizienz	Standard	Intensiv
1	< 600	1.000 – 1.500	> 2.200
2	< 1.100	1.800 – 2.600	> 3.300
3	< 1.800	2.600 – 3.400	> 4.300
4	< 2.100	3.200 – 4.000	> 5.100

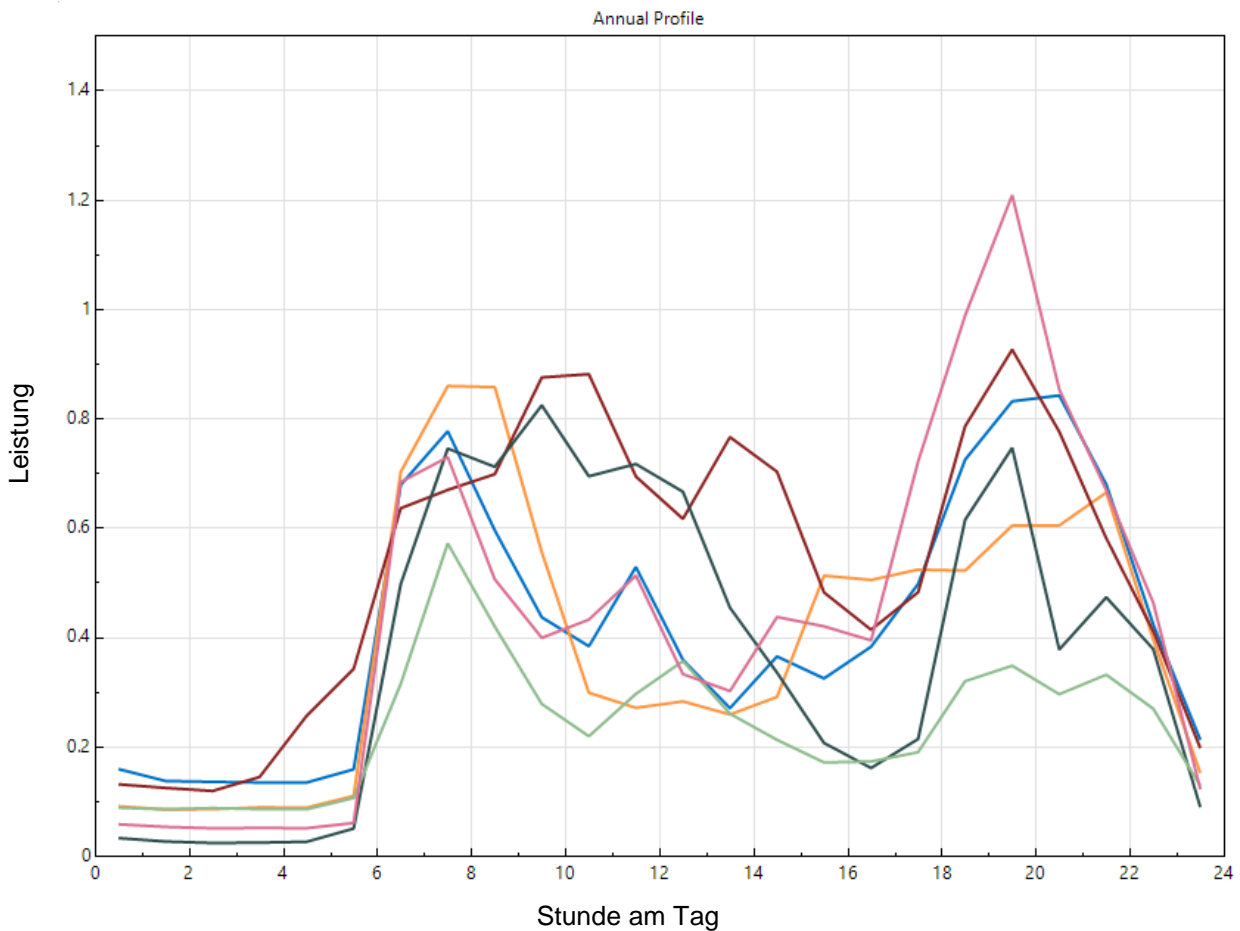


Abbildung 5: Jahresdurchschnittliche tägliche Lastprofile mit den Standardgeräten für die 6 verschiedenen Haushalte (farblich differenziert).

¹ Mittelwert abzüglich Zusatzheizung, Umwälzpumpen, Heizung und Warmwasser

In Abbildung 5 sind die jahresdurchschnittlichen täglichen Verbrauchsprofile mit den Standardgeräten für die 6 verschiedenen Haushalte dargestellt. Man erkennt den tageszeitlichen Verlauf des Verbrauches. In der Nacht gibt es einen Grundverbrauch mit ca. 10-20% und untertags steigen die Verbräuche tendenziell je nach Haushalt mittags und abends an. Man erkennt auch, dass sich die einzelnen Haushalte voneinander deutlich unterscheiden.

2.5 Warmwasserbedarf

Analog zum Haushaltsstrom werden auch für den Warmwasserbedarf Zapfprofile für jede Wohnung generiert. Es werden ebenfalls drei Effizienzscenarien abgebildet. Als unterster Wert wird ein Verbrauch von 25 Liter pro Person und Tag bei 60°C Zapftemperatur angenommen. Im Standardfall sind es 30 Liter und im intensiven Szenario 35 Liter. Diese Werte liegen im Bereich des PHPP Standardwertes von 25 Liter und des Wertes der SIA 2024 für Mehrfamilienhäuser von 35 Liter. Nach der OIB RL-6 sind es in etwa auch 30 Liter.

3 Variantenuntersuchung durch dynamische Gebäudesimulation

3.1 Untersuchte Varianten

In der dynamischen Gebäude- und Anlagensimulation wurden vier Wärmeversorgungsvarianten verglichen. Die zunächst vorgesehene Variante 3 mit Luft-Wärmepumpe, Kaskaden-Warmwasser-Wärmepumpen System ovum und ohne zentralen Speicher wurde nicht berücksichtigt, da sie lt. Hersteller nicht sinnvoll ist. In allen Varianten wurden die in Kapitel 2 dargestellten Randbedingungen angenommen.

Während in drei der Varianten die Lüftung über wohnungsweise Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung erfolgt, wird in Variante 5 der gleiche, hygienisch notwendige Luftwechsel durch eine zentrale Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung gewährleistet.

- Variante 1: **Warmwasser dezentral System Ovum**, Heizung zentral **Sole-WP** (WP IDM) mit Ausgleichsspeicher (Forstner Speicher 400l, 120mm Dämmung) 2-Leiter Verteilsystem für Fußbodenheizung
- Variante 2: **Warmwasser dezentral System Ovum**, Heizung zentral **sehr effiziente Luft-WP** (WP Ovum) mit Ausgleichsspeicher (Forstner Speicher 400l, 120mm Dämmung) 2-Leiter Verteilsystem, Fußbodenheizung
- ~~Variante 3: Warmwasser: System ovum, Heizung Luft-WP (WP Ovum) ohne Speicher, 2-Leiter Verteilsystem Heizung, Fußbodenheizung (nach Auskunft Planer/Hersteller nicht sinnvoll, wird nicht weiterverfolgt)~~

- Variante 4: **Wärmeerzeugung zentral** (für Heizung + Warmwasser) über **Sole-WP** mit Speicher (Forstner Speicher 1000l, 120mm Dämmung), 2+2-Leiter, Warmwasser dezentral über **Wohnungsübergabestationen**, Fußbodenheizung
- Variante 5: /identisch wie 4 aber mit kontinuierlich betriebener **Abluftanlage** die den gleichen hygienisch notwendigen Luftwechsel von $0,3h^{-1}$ fördert, wie die WRG Abluft nur im Bad mit zentraler Abluftanlage, Küche mit Umluft. Zentrale Abluft, weil besser regelbar.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der dynamischen Gebäude- und Anlagensimulationen als Absolutwerte sowie als spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche aufgeführt. In allen Varianten wurde der Haushaltsstrombedarf mit $25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFA}})$, d.h. im Niveau Standard angenommen.

Tabelle 3: Jahreswerte des Energieverbrauchs der untersuchten Varianten nach Anwendung – Absolutwerte (oberer Tabellenteil) sowie spezifische Werte pro m^2 WNF.

	V1 Sole-WP Heiz + ovum + WRG	V2 Luft-WP Heiz + ovum + WRG	V4 Sole-WP zentral Heiz+WW + WRG	V5 Sole-WP zentral Heiz+WW + Abluft
Absolutwerte in kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a
Wärmepumpe Kompressor	3,852	3,580	6,691	9,180
Stromaufnahme 6 Ovum-WP	2,621	2,618		
Summe Heiz + WW	6,473	6,198	6,691	9,180
Hilfsstrom Summe	2,105	2,476	2,522	1,686
Summe Heiz + WW + Hilfsstrom	8,578	8,674	9,213	10,866
Allgemeinstrom	2,231	2,231	2,231	2,231
Haushaltsstrom Standard	13,226	13,226	13,226	13,226
Summe Strom	24,035	24,131	24,670	26,323
	V1 Sole-WP Heiz + ovum + WRG	V2 Luft-WP Heiz + ovum + WRG	V4 Sole-WP zentral Heiz+WW + WRG	V5 Sole-WP zentral Heiz+WW + Abluft
spezifische Werte in $\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}}\text{a})$	$\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}}\text{a})$	$\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}}\text{a})$	$\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}}\text{a})$	$\text{kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNF}}\text{a})$
Wärmepumpe Kompressor	7.8	7.2	13.5	18.5
Stromaufnahme 6 Ovum-WP	5.3	5.3	0.0	0.0
Summe Heiz + WW	13.1	12.5	13.5	18.5
Hilfsstrom Summe	4.2	5.0	5.1	3.4
Summe Heiz + WW + Hilfsstrom	17.3	17.5	18.6	21.9
Allgemeinstrom	4.5	4.5	4.5	4.5
Haushaltsstrom Standard	26.7	26.7	26.7	26.7
		0.0	0.0	0.0
Summe Strom	48.5	48.7	49.7	53.1

Der Endenergiebedarf der Varianten 1, 2 und 4, in denen die wärmepumpenbasierten Wärmeversorgungssysteme mit zentraler bzw. dezentraler Warmwasserbereitung mit einer Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung kombiniert werden, unterscheiden sich nur

geringfügig. Sie liegen inkl. Hilfsstrom zwischen 17,3 und 18,6 kWh/(m²a). Der Bedarf der Variante 5 mit Abluftanlage liegt mit 21,9 kWh/(m²_{WNFA}) um 3,3 kWh/(m²a) über dem mit Wärmerückkgewinnung.

Zur Realisierung wurden die Varianten 1 und 4 ausgewählt.

3.2 Varianten der PV-Anlagen

Mit IDA ICE wurden zunächst vier unterschiedlich dimensionierte Varianten Ost-West-orientierter PV-Anlagen (10° Neigung) sowie drei Größen südorientierter Anlagen auf dem Flachdach von Haus B untersucht. Wegen des gleichmäßigeren Tagesprofils der PV-Erträge und der besseren Nutzbarkeit des Flachdachs wurden für die Ausschreibung nur die vier ost-west-orientierten Varianten in den folgenden Größen berücksichtigt.

- 5,5 kWp (Mindestgröße gemäß Wohnbauförderrichtlinie 2018/19, §10 (6) h))
- 14 kWp
- 30 kWp
- 46 kWp (Vollbelegung des Flachdachs Haus B, ohne Randabstände)

Abbildung 6 zeigt die Jahressgänge der PV-Erträge der vier Anlagen. Die Jahreserträge sind in Tabelle 4 dargestellt.

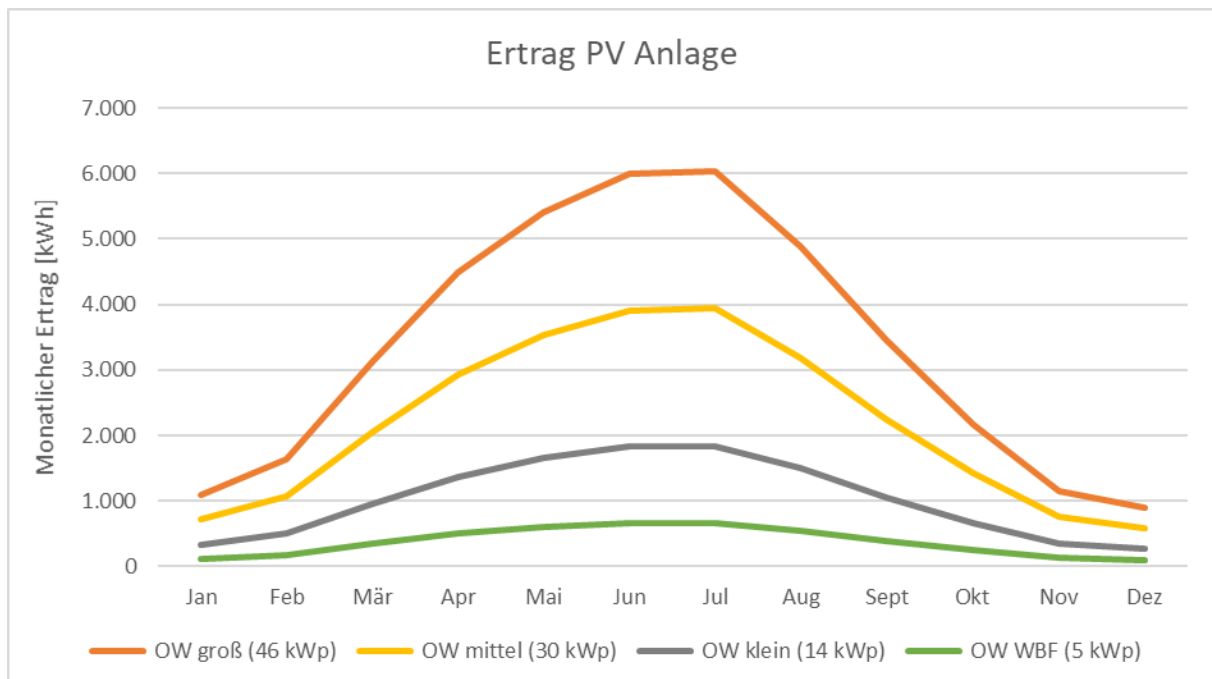


Abbildung 6: Jahressgänge des PV-Ertrags der unterschiedlich dimensionierten Ost-West-orientierten PV-Anlagen (Simulation IDA ICE).

Tabelle 4: Erträge der unterschiedlichen Anlagen

	Jahresertrag in kWh/a	Spezifischer Ertrag in kWh/kWp
Ost-West 5,5 kWp	4.478	880
Ost-West 14 kWp	12.323	
Ost-West 30 kWp	26.330	
Ost-West 36 kWp	40.341	

In Abbildung 7 ist der monatliche Strombedarf der einzelnen Anwendungen dem erzeugten PV-Strom und dem eigengenutzten Anteil für die 30 kWp Anlage gegenübergestellt. Man sieht, dass im Sommer ein hoher Anteil des Verbrauches vom erzeugten Strom direkt im Gebäude gedeckt werden kann und ein großer Teil ins Netz eingespeist wird. Im Winter hingegen wird zwar fast der gesamte PV-Strom im Gebäude verbraucht, dieser genügt aber bei weitem nicht und somit muss Strom aus dem Netz bezogen werden obwohl das Gebäude mit der 30 kWp PV-Anlage jahresbilanziell ein Plusenergiegebäude ist. Autark ist es aber nicht.

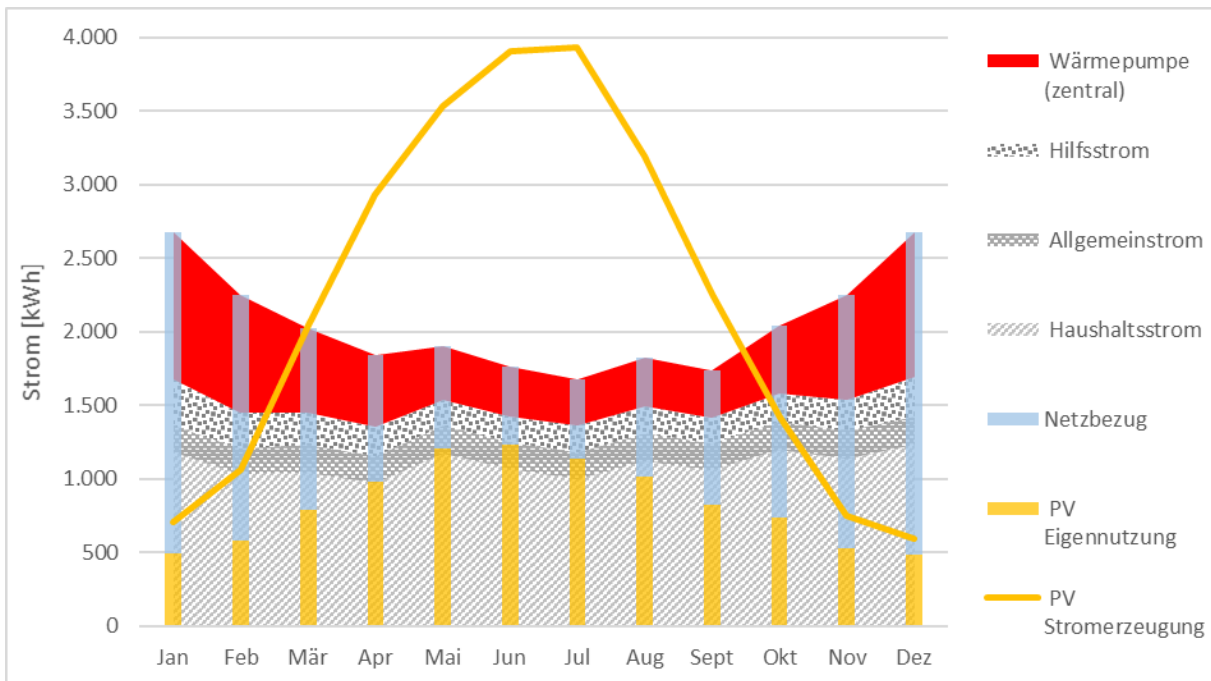


Abbildung 7: Monatlicher Strombedarf der einzelnen Anwendungen gegenübergestellt dem erzeugten PV-Strom und dem eigengenutzten Anteil für die 30 kWp Anlage am Haus A.

4 Investitionskosten

Da die Wirtschaftlichkeit der Gebäudehülle im Niveau Passivhaus bereits im Projekt KliNaWo detailliert nachgewiesen wurde, lag der Fokus der Kostenauswertung und der Wirtschaftlichkeitsberechnungen auf den Varianten zur Wärmeversorgung, zur Lüftung und zur PV-Anlage.

4.1 Heizung/Sanitär

Die Kosten der Gewerke Heizung/Sanitär sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Angebotspreise für die Gewerke Heizung/Sanitär für die Varianten 1, 2 sowie 4 und 5 (netto, spezifische Kosten auf WNF von Haus B bezogen, Preisstand 2019, Region Vorarlberg)

	V4 und V5 zentrale Versorgung Sole- WP	V1 Sole-WP für Heizung + wohnungsweise WP für Warmwasser	V2 Luft-WP für Heizung + wohnungsweise WP für Warmwasser
Sanitäranlagen/Eilegleitungen/Insgemein	63.127	63.127	63.127
Standard-MSR (Siemens DDC-Anlage small)	20.092	20.092	20.092
Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage 3-13 kW	13.066	13.066	
Sonden Sole-WP	18.425	18.425	
Luft-Wasser Wärmepumpenanlage			24.491
Ovum Warmwasser-Wärmepumpen wohnungsweise		19.759	19.759
Wohnungsübergabestationen	9.288		
Warmwasser Verteilung und –speicherung 2-Liter (Differenz zu dezentral)	15.880		
Grundinstallation Heizung (Rest)	42.849	42.849	42.849
Summe Heizung/Sanitär	182.727	177.318	170.318
pro Wohneinheit	30.455	29.553	28.386
pro m ² _{WNF}	368	357	343

Die investiven Kosten der Variante mit zentraler Sole-Wärmepumpe für Heizung in Kombination mit wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen (V1) liegen um 11 EUR/(m²_{WNF}) niedriger als die der Variante, in der die zentrale Sole-Wärmepumpe Heizung und Warmwasserbereitung übernimmt. Die Kosten für die Subvariante mit Luft-WP für die Heizung und wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen liegen nochmals 14 EUR/(m²_{WNF}) niedriger.

4.2 Lüftung

Die Kosten für das Gewerk Lüftung sind in Tabelle 6 am Beispiel des Hauses B dargestellt.

Tabelle 6: Angebotspreise für das Gewerk Lüftung (Angaben netto, exemplarisch für Haus B, Preisstand 2019, Region Vorarlberg)

	WRG wohnungsweise	Abluftanlage zentral ohne WRG
	EUR	EUR
Installation Kompletanlage (außer Ventilatoren)	42.917	20.519
Ventilatoren	1.800	1.800
Summe Lüftung	44.717	22.319
pro Wohneinheit	7.453	3.720
pro m ² _{WNF}	90	45

Die spezifischen Kosten der wohnungsweisen Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung liegen bei etwa 90 EUR/m²_{WNF} und damit etwas niedriger, als für die zentrale Komfortlüftung mit WRG im Projekt KliNaWo (Ausschreibung im Jahr 2015). Die spezifischen Kosten der zentralen Abluftanlage liegen mit 45 EUR/(m²_{WNF}a) leicht über dem Wert aus dem KliNaWo-Projekt.

4.3 PV-Anlage

Die Kosten für die Ost-West-orientierten PV-Anlagen in unterschiedlichen Dimensionierungen sind in Tabelle 7 dargestellt. Untersucht wurden Dach-Anlagen mit Leistungen von 5,5 kW_p (0,92 kW_p pro Wohneinheit) bis 46 kW_p (7,67 kW_p pro Wohneinheit). Dargestellt sind auch Kosten wie der AC-Anschluss, Entkupplungsschutz (für größte Anlage) sowie Netzbereitstellungsentgelt.

Tabelle 7: Angebotspreise für Varianten der Dach-PV-Anlage (exemplarisch für Haus B; Angaben netto, Preisstand 2019, Region VorarlbergIntern: Bezug auf 496 m² Wohnnutzfläche (Haus B)).

	5 kW _p	14 kW _p	30 kW _p	46 kW _p
	EUR	EUR	EUR	EUR
PV Module	2.318	6.123	13.557	20.846
Wechselrichter	1.228	1.946	4.149	6.838
Montage und Untergestell	3.054	2.951	4.829	7.143
Zwischensumme PV	6.600	11.020	22.535	34.827
AC-Anschlussgebühren	2.500	2.500	2.500	2.500
Wandlerrmessschrank	-	-	-	1.300
Entkupplungsschutz				1.300
Netzbereitstellungsentgelt	167	167	167	501
Summe PV	9.267	13.687	25.202	40.428

pro kW_p	1.685	978	840	879
pro Wohneinheit	1.545	2.281	4.200	6.738
pro m ² _{WNF}	19	28	51	82

Die Auswertung der Angebotspreise zeigt eine starke Degression der spezifischen PV-Kosten mit der Anlagengröße: Die spezifischen Kosten der Anlage mit 30 kWp liegen bei etwa 50% der Kosten der 5,5 kWp-Anlage,

Der Vergleich der Angebotspreise für Dafins (Preisstand Ende 2018) mit denen des Projekts KliNaWo (Preisstand Mitte 2015) zeigt, dass die spezifischen PV-Kosten für Anlagen im untersuchten Leistungsbereich um etwa 40 bis 50% gesunken sind.

Die Kosten von PV-Anlagen werden in Vorarlberg als Baukosten für die Wohnbauförderung anerkannt.

5 Wirtschaftlichkeit

Auf Basis der Energiebedarfsberechnungen und der Kostenermittlungen wurden die Lebenszykluskosten von 144 Varianten berechnet, in denen das Wärmeversorgungssystem und die Dimensionierung der PV-Anlage differenziert wurden. Die energetische Qualität der Gebäudehülle wurde in allen Varianten identisch angenommen (Ausführungsvariante in Passivhausqualität).

5.1 Annahmen und Randbedingungen

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden die folgenden Annahmen und Randbedingungen gewählt:

- Betrachtungszeitraum: 30 und 50 Jahre
- Lebensdauern und Wartungskosten nach VDI 2067-1 (2012) oder gemäß Annahmen aus Projekt KliNaWo (siehe Abbildung 8)
- Arbeitspreis Strom (Wärmepumpe): 11,65 ct/kWh (brutto)
- Arbeitspreis Strom (Haushalt): 13,65 ct/kWh (brutto)
- Grundgebühr Zähler WP: 69,40 EUR/a (brutto)
- Grundgebühr Stromzähler: 122,08 EUR/a pro Zählpunkt
- Preissteigerung Arbeitspreis Strom: 1,7% p.a
- Preissteigerung Grundpreis Strom: 3,0% p.a.
- Inflation: 1,7% p.a.
- Bankzinssatz: 3,0% nominal bei 25a Laufzeit
- Kapitalzinssatz: 3,0% nominal
- Energieförderung Vorarlberg wird berücksichtigt, Wohnbauförderung nicht

Investitionskosten der Komponenten	Angesetzte Lebensdauern der Komponenten			Anteil Wartung an Invest der Komponenten			Wartungs- und Instandsetzungskosten		
	Jahre			pro Jahr			pro Jahr		
	V4+5 zentral	V1 dezentral + Sole-WP	V2 dezentral + Luft-WP	V4+5 zentral	V1 dezentral + Sole-WP	V2 dezentral + Luft-WP	V4+5 zentral	V1 dezentral + Sole-WP	V2 dezentral + Luft-WP
Heizung/Sanitär									
DIG 020305 Sanitäranlagen/Einlegeleitungen/Einsgeheim	50	50	50	1,0%	1,0%	1,0%	631	631	631
Standard-HSR (Siemens DDC-Anlage Small)	15	15	15	3,0%	3,0%	3,0%	603	603	603
Sole/Wasser Wärmepumpenanlage 3-13 kW	20	20		2,5%	2,5%		327	327	-
Sonden Sole WP	50	50		1,5%	1,5%		276	276	-
Luft/Wasser Wärmepumpenanlage			18			2,5%	-	-	612
Drum Geräte dezentral		20	20		2,5%	2,5%	-	494	494
Wohnungsübergabestationen	20			2,0%			186	-	-
WW-Verteilung und Speicherung 2-Leiter (Differenz zu dezentral)	50			1,0%			159	-	-
Grundinstallation Heizung (Rest)	50	50	50	1,0%	1,0%	1,0%	428	428	428
Summe Heizung/Sanitär							2 610 €	2 760 €	2 769 €
Lüftung									
Installation Komplettanlage (außer Ventilatoren)	50	50		2,1%	2,8%		910	571	
Ventilatoren	15	15		0,0%	0,0%		-	-	
Summe Lüftung							910 €	571 €	
PV Anlage									
	5 kWp	14 kWp	30 kWp	46 kWp	5 kWp	14 kWp	30 kWp	46 kWp	5 kWp
PV Module	30	30	30	30	1%	1%	1%	1%	23
Wechselrichter	15	15	15	15					-
Montage und Untergestell	30	30	30	30					-
Summe PV									23 €
									61 €
									136 €
									208 €

Abbildung 8: Annahmen für die Lebensdauern der Komponenten sowie für die Wartungskosten

5.2 Heizung und Sanitär

Die Kapitalwerte der verschiedenen Wärmeversorgungsvarianten für Investkosten sowie für betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten (vereinfacht: „Lebenszykluskosten“) sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Heizung/ Sanitär	V4 zentral Sole-WP	V1 dezentral + Sole-WP	V2 dezentral + Luft-WP
Investment	227.444 €	222.035 €	215.035 €
Energieförderung €	- 3.150 €	- 3.150 €	- 3.150 €
Finanzierungskosten	224.294 €	218.885 €	211.885 €
Ersatzinvestition	35.434 €	43.556 €	52.907 €
Restwerte	- 36.641 €	- 37.046 €	- 34.795 €
Instandsetzungskosten	12.794 €	15.346 €	18.131 €
Betriebsgebundenen Zahlungen	75.213 €	74.039 €	71.479 €
Verbrauchsgebundenen Zahlungen	87.684 €	87.067 €	87.443 €
Kapitalwert (gesamt)	398.777 €	401.847 €	407.052 €
<i>pro/WE</i>	<i>66.463 €</i>	<i>66.974 €</i>	<i>67.842 €</i>

Abbildung 9: Kapitalwerte der verschiedenen Wärmeversorgungsvarianten für Investitionskosten sowie für betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten.

Die Kapitalwerte der drei Varianten unterscheiden sich nur geringfügig. Die niedrigsten Werte erreicht die Variante mit zentraler Sole-WP (V4). Die Variante mit Sole-WP für Heizung und dezentrale, wohnungsweise Warmwasser-Wärmepumpen verursacht minimal höhere Kosten. Die Variante mit Luftwärmepumpe hat zwar die niedrigsten Investitionskosten, jedoch die höchsten „Lebenszykluskosten“.

5.3 Lüftung

Die Kapitalwerte der verschiedenen Lüftungsvarianten für Investkosten sowie für betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten (vereinfacht: „Lebenszykluskosten“) sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Verglichen wird eine Variante mit wohnungsweisen Komfortlüftungsanlagen mit WRG (V4) mit einer ansonsten identischen Variante mit einer Abluftanlage mit Nachströmöffnungen in den Außenwänden, die auf den gleichen, hygienisch notwendigen Luftwechsel ausgelegt ist.

Lüftung	V4 zentral Sole-WP; WRG	V5 zentral Sole-WP; Abluft
Investment	227.444 €	205.046 €
Energieförderung €	3.150 €	
Finanzierungskosten	224.294 €	205.046 €
Ersatzinvestition	35.434 €	35.434 €
Restwerte	- 36.641 €	- 32.950 €
Instandsetzungskosten	12.794 €	12.794 €
Betriebsgebundenen Zahlungen	75.213 €	67.012 €
Verbrauchsgebundenen Zahlungen	87.684 €	91.259 €
Kapitalwert (gesamt)	398.777 €	378.595 €
<i>pro/WE</i>	<i>66.463 €</i>	<i>63.099 €</i>

Abbildung 10: Kapitalwerte der Variante mit Sole-WP und Lüftung mit/ohne WRG für Investitionskosten sowie für betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten.

5.4 PV Anlage und Mieterstrommodell

Bisher waren Photovoltaikanlagen zur Stromerzeugung vor allem auf Einfamilienhäusern und nur selten auf Mehrwohnungshäusern zu finden. Gründe hierfür waren neben technischen Herausforderungen vor allem rechtliche Hürden, die es den Bewohnern nahezu unmöglich machten, sich zusammenzuschließen und auf Mehrwohnungshäusern gemeinschaftlich eine Photovoltaikanlage zu errichten, um den Strom selbst zu nutzen. Der Gesetzgeber hat im Sommer 2017 darauf reagiert und mit der „kleinen Ökostromnovelle“ die rechtlichen Voraussetzungen geschaffen. Seitdem ist es möglich, eine Photovoltaikanlage (aber auch beispielsweise Kleinwasserkraft & Blockheizkraftwerke) gemeinschaftlich zu betreiben. Da hierbei neben Wohnungs- und Gebäudeeigentümer auch Mieter angesprochen sind, wird oft auch umgangssprachlich vom „Mieterstrommodell“ gesprochen. So können sich nun etwa Mieter oder Eigentümer von Wohnungen in Mehrwohnungshäusern, aber auch in Bürogebäuden oder Einkaufszentren zusammenschließen, um gemeinsam eine PV-Anlage zu betreiben. All dies wohlgermerkt ist ohne große Änderungen der Elektroinstallationen im Gebäude möglich. Nur die PV-Anlage selbst und geeignete Messgeräte (Smart Meter) sind

notwendig. Der Betreiber/Investor kann auch eine externe Firma oder ein Contractor sein. (<https://www.energieinstitut.at/buerger/haustechnik-energieversorgung/mieterstrom-die-gemeinschaftliche-erzeugungsanlage/>)

Die PV-Anlage kann grundsätzlich als Volleinspeiser oder Überschusseinspeiser betrieben werden. Unterschied ist, dass im ersten Fall der komplette erzeugte Strom ins Netz eingespeist und vergütet wird, im zweiten Fall möglichst viel Strom im Gebäude selbst genutzt wird und nur noch der Überschuss eingespeist wird. Je nach Fall ändert sich auch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Die Ergebnisse fallen eventuell auch anders aus, wenn man die Sicht des Mieters oder des Eigentümers einnimmt. Im Eigenheim ist der Fall klar, denn dort ist der Investor der PV-Anlage meist auch der Nutzer des erzeugten Stroms. Im Mehrfamilienhaus kann es ähnlich sein, wenn die Investitionskosten der Anlage über die Miete umgelegt werden. Falls die Investitionskosten nicht über die Miete umgelegt werden, und der Investor nicht gleich der Nutzer ist, wird die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung differenzierter.

Volleinspeisung, das heißt, der gesamte Strom wird ins Netz eingespeist und vergütet:

1. Eigentümer ist der Investor und **legt** die Kosten **nicht** auf den Mietzins **um**: Volleinspeisung soll die Anlage über die Lebensdauer finanzieren und zusätzlich Rendite abwerfen. Die Mieter profitieren nicht davon. Der Eigentümer profitiert von der Rendite.
2. Eigentümer ist der Investor und **legt** die Kosten auf den Mietzins **um**: Die Erlöse werden dem Nebenkostenkonto des Gebäudes gutgeschrieben. Volleinspeisung soll die Anlage über die Lebensdauer finanzieren und zusätzlich Rendite abwerfen. Die Mieter profitieren von der Rendite. Der Eigentümer bietet eine zusätzliche Infrastruktur, vergleichbar mit einer Solarthermieanlage.

Überschusseinspeisung mit Mieterstrommodell:

1. Eigentümer ist der Investor und **legt** die Kosten **nicht** auf den Mietzins **um**: Soll der Strom den Mietern kostenlos zur Verfügung gestellt werden, müsste sich die Anlage über die Überschusseinspeisung finanzieren, welche der Eigentümer ins Netz einspeist. Alternativ könnte der eigengenutzte Strom den Mietern unter Marktpreis verkauft werden und so die Anlage mitfinanziert werden. Der Eigentümer profitiert von der Rendite und die Mieter von reduzierten Stromkosten.
2. Eigentümer ist der Investor und **legt** die Kosten auf den Mietzins **um**: Die Mieter zahlen etwas höhere Miete, erhalten aber den eigengenutzten Strom der PV-Anlage gratis. Der nicht genutzte Strom wird eingespeist und die Erträge daraus dem Nebenkostenkonto des Gebäudes gutgeschrieben. Die Mieter profitieren durch niedrigere Stromrechnungen und reduzierte Betriebskosten. Der Eigentümer bietet eine zusätzliche Infrastruktur, vergleichbar mit einer Solarthermieanlage.

Dem Wohnbauträger war es in den Gebäuden in Dafins wichtig, die Mieter an dem erzeugten PV Strom teilhaben zu lassen. Deshalb wird untersucht, ob sich die Anlage als Überschusseinspeisung mit Mieterstrommodell wirtschaftlich darstellen lässt. Der erzeugte und eigengenutzte Strom, auch der Allgemeinwendungen wird den Mietern kostenlos zur Verfügung gestellt, der Ertrag aus der Überschusseinspeisung wird dem Nebenkostenkonto des Gebäudes gutgeschrieben und kommt somit auch den Mietern bei der Jahresabrechnung zugute. Die Investitionskosten der Anlage sind in den Baukosten enthalten und werden über den Mietzins auf die Mieter umgelegt. Die Anlage ist vereinfacht gesagt dann wirtschaftlich, wenn die Stromkostensparnis und die Betriebskostenreduktion höher sind, als die auf die Miete umgelegten Investitionskosten.

Die Annahmen und Randbedingungen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der PV-Anlage sind wie folgt (Stand 2019, Anmerkung: Seit 2019 haben sich die Strompreise und Einspeisevergütungen verändert):

- Volleinspeisung;
 - Der gesamte Strom wird eingespeist und mit 5,5 Cent/kWh (brutto)^{*2} vergütet.
 - Eigenverbrauch PV Anlage bei 5-30 kWp ca. 7 €/mon, bei 46 kWp ca. 10 €/mon
- Überschusseinspeisung oder „Mieterstrommodell“
 - Der nicht eigengenutzte Strom wird eingespeist und mit 5,5 Cent/kWh (brutto)* vergütet.
 - Der eigengenutzte Strom „ersetzt“ den Netzbezug und spart somit 13,65 Cent/kWh (brutto).
 - 20 € Einmalzahlung pro Zählerpunkt (20*9 = 180 € einmalig)
 - 0,50 €/mon monatliche Zahlung pro Zählerpunkt (0,50*12*9 = 54 €/a)
 - Messentgelt jährlich 23,04 € (brutto)
 - Eigenverbrauch PV Anlage bei 5-30 kWp ca. 7 €/mon, bei 46 kWp ca. 10 €/mon

Für beide Varianten gilt

- Betrachtungszeitraum 25 Jahre
- Investitionskosten 25.202 € (netto), 30.242 € (brutto)
- Strompreise (brutto): 11,65 Cent/kWh (WP-Tarif); 13,65 Cent/kWh Haushaltsstrom*
- Grundgebühr (brutto): 69,40 € Zähler WP; 122,08 € pro Zählerpunkt*
- Energiepreissteigerung 1,44%
- Kapitalzinssatz 1% real 25 Jahre Laufzeit;
- Förderungen wie OeMAG in der Variante nicht berücksichtigt

² *VKW: <https://www.vkw.at/fotovoltaiik-forderaktion-2019-einspeisevergutung.htm>: Annahme kein Ökostrom

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einer Volleinspeisung und der Überschusseinspeisung aus Sicht des Eigentümers und Mieters (m² Werte sind auf 496 m² WNF bezogen, alle Angaben netto).

	Volleinspeisung	Überschusseinspeisung
Investitionskosten	25.202 € (840 €/kWp)	25.382 € (846 €/kWp)
Investition und Gebühren: Annuität der Anlage unter Berücksichtigung des Restwertes	-1.234 € (- 0,21 €/(m ² mon))	- 1.287 € (- 0,22 €/(m ² mon))
Einspeisung: Annuität der jährlichen Einspeisung	1.450 € (+ 0,24 €/(m ² mon))	897 € (+ 0,15 €/(m ² mon))
Mieter: Jährliche Stromkostensparnis Haushaltsstrom durch kostenlosen PV Strom	0 €	861 € (+ 0,14 €/(m ² mon))
Mieter: Jährliche Betriebskostensparnis ³ durch kostenlosen PV Strom	0 €	511 € (+ 0,09 €/(m ² mon))
Annuität: jährlicher Kapitalwert aus Investitionskosten und Einnahmen (25a)	+ 216 € (+ 0,04 €/(m ² mon))	+982 € (+ 0,16 €/(m ² mon))

In vorheriger Tabelle 8 sieht man eine Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einer Volleinspeisung und der Überschusseinspeisung: Es kann festgehalten werden:

1. Eine Volleinspeisung ist mit oben genannten Randbedingungen noch wirtschaftlich. Die Anlage finanziert sich und wirft Rendite ab. Eine Überschusseinspeisung ist aber ganzheitlich betrachtet die weitaus wirtschaftlichere Lösung (216 € zu 982 € Annuität).
2. Die reine Überschusseinspeisung finanziert die Anlage nicht komplett. Es müssten höhere Mieten erhoben werden, damit die Anlage finanziert ist. Der Mieter könnte sich dann aber bei 0,22 €/(m²mon) höherem Mietzins ca. 0,14 €/(m²mon) Stromkosten sparen und 0,15 + 0,09 = 0,24 €/(m²mon) Betriebskosten. Die effektive monatliche Belastung des Mieters wäre mit PV-Anlage und Mieterstrommodell um 0,16 €/(m²mon) niedriger als ohne.

Somit könnten Finanzierungsmodelle gefunden werden, bei denen sowohl Mieter als auch Vermieter keinen Nachteil, bzw. beide Vorteile haben. Ebenfalls könnte statt einer Mieterhöhung zur PV-finanzierung der erzeugte Strom den Mietern unter Netzbezugspreis zur Verfügung gestellt werden.

Unabhängig von den vorhergehenden Berechnungen wurde für die Gebäude in Dafins eine OeMAG Förderung gewährt. Diese lautete im Planungsjahr so⁴:

³ Allgemeinstrom, Haustechnik, Wärmepumpe

⁴ 408. Verordnung der Bundesministerin für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft über die Festsetzung der Einspeisetarife für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen für die Jahre 2018 und 2019 (Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2018 – ÖSET-VO 2018)

Einspeisetarife für Ökostrom aus Photovoltaikanlagen

§ 6. (1) Die Tarife für die Abnahme elektrischer Energie aus Photovoltaikanlagen mit einer Engpassleistung von über 5 kW_{peak} bis 200 kW_{peak}, die ausschließlich an oder auf einem Gebäude angebracht sind, werden wie folgt festgesetzt:

1. bei Antragstellung und Vertragsabschluss im Jahr 20187,91 Cent/kWh;
2. bei Antragstellung und Vertragsabschluss im Jahr 20197,67 Cent/kWh.

Als Investitionszuschuss für die Errichtung werden zusätzlich 30% der Errichtungskosten (bezogen auf die Engpassleistung der Anlage), höchstens jedoch ein Betrag in Höhe von 250 Euro/kW_{peak} gewährt.

Alle untersuchten Anlagen (5-46 kWp) liegen mit 30% der Errichtungskosten über den 250 €/kWp, deshalb gibt es den Investitionszuschuss von 250 €/kWp (netto) und den Einspeisetarif von 7,67 Cent/kWh (brutto) statt 5,5 Cent/kWh ohne Förderung. Bei dieser Förderung ist es möglich, nach mindestens einem Jahr Laufzeit auf Marktpreis⁵ zu wechseln und auch wieder zurück (Anmerkung: Marktpreis abzüglich der aliquoten Aufwendungen im Mittel 2021 bei 7,51 Cent/kWh, 2022 bei 33,18 Cent/kWh, 1Q 2023 bei 26,61 Cent/kWh).

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einer Volleinspeisung und der Überschusseinspeisung aus Sicht des Eigentümers und Mieters mit Berücksichtigung der OeMAG Förderung (m² Werte sind auf 496 m² WNF bezogen, alle Angaben netto).

	Volleinspeisung	Überschusseinspeisung
Investitionskosten inkl. OeMAG Zuschuss	17.702 € (840-250 €/kWp)	17.882 € (846-250 €/kWp)
Investition und Gebühren: Annuität der Anlage unter Berücksichtigung des Restwertes	- 893 € (- 0,15 €/(m ² mon))	- 946 € (- 0,16 €/(m ² mon))
Einspeisung: Annuität der jährlichen Einspeisung	2.022 € (+ 0,34 €/(m ² mon))	1.252 € (+ 0,21 €/(m ² mon))
Mieter: Jährliche Stromkostensparnis Haushaltsstrom durch kostenlosen PV Strom	0 €	861 € (+ 0,14 €/(m ² mon))
Mieter: Jährliche Betriebskostensparnis ⁶ durch kostenlosen PV Strom	0 €	511 € (+ 0,09 €/(m ² mon))
Annuität: jährlicher Kapitalwert aus Investitionskosten und Einnahmen (25a)	+ 1.129 € (+ 0,19 €/(m ² mon))	+1.678 € (+ 0,28 €/(m ² mon))

Wie in Tabelle 9 zu sehen ist, ist die Anlage in beiden Varianten durch die Förderung immer wirtschaftlich. Der Eigentümer bekommt für die Investition in die Anlage bei Volleinspeisung eine gute Rendite und der Mieter spart sich bei 0,16 €/(m²mon) höherer Miete 0,44 €/(m²mon) an Strom- und Betriebskosten. Der Unterschied zwischen Volleinspeisung und Überschusseinspeisung fällt durch die Förderung geringer aus.

⁵ <https://www.oem-ag.at/de/marktpreis/>

⁶ Allgemeinstrom, Haustechnik, Wärmepumpe

6 Beschreibung der Ausführungsvarianten beider Gebäude

Als Ergebnis der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung und der Variantenstudien zu Wärmeversorgung und PV-Anlage wurden die zwei Gebäude in der gleichen Konstruktionsart und Hüllqualität, mit dem gleichen wohnungsweisen Komfortlüftungssystem mit Wärmerückgewinnung und mit gleich großen PV-Anlagen, jedoch mit unterschiedlichen, wärmepumpenbasierten Wärmeversorgungssystemen errichtet.

Die Gebäude werden seit Fertigstellung im Herbst 2020 durch das Energieinstitut Vorarlberg messtechnisch begleitet. Die Monitoringergebnisse des ersten Messjahres 2021 sind in Teilen im Buch „Low-Cost nZEB, Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser“ publiziert [16].



Abbildung 11: Mehrfamilienhäuser in Dafins. Haus A (links), Haus B (rechts); PV-Anlage, E+1, je 6 Wohnungen. (Foto: Energieinstitut Vorarlberg)

Tabelle 10: Gebäudekenndaten (Haus B in Klammern)

Ort / Seehöhe / Mitteltemperatur Okt-März	Dafins	790m	0,4°C
Flächen (Haus B in Klammer)	BGF: 644m ² (678m ²)	WNF: 4327m ² (496m ²)	PHPP: 482m ² (520m ²)
Überbaute Fläche (PHPP)	320 m ² (325 m ²)		
Anzahl Geschosse und Wohneinheiten	E + 1	6 (6)	
Verhältnis A/V und Verhältnis A/EBF	0,56 (0,56)	2,55 (2,33)	
Anzahl Bewohner und pro-Kopf-Wohnfläche (real)	16 (23)	27,0 m ² (21,6 m ²)	
Bauherr	Alpenländischen Heimstätte- gemeinnützige Wohnungsbau- und SiedlungsgesmbH		
Planung	Architektur: drexel architekten ZT OG, Hohenems HSL: Planungsteam E-Plus, Egg		

⁷ Haus A ohne Gemeinschaftsraum mit 28,1 m² weil als Flächenbezug die Wohnfläche gewählt wurde.

Anmerkung: In der dynamischen Gebäudesimulation wurde die Bewohnerdichte mit 15 Personen angenommen. Dies entspricht einer pro-Kopf-Wohnfläche von etwa 33 m². Tatsächlich wird Haus A von 16 (+7%) Bewohnern, Haus B von 23 (+53%) Bewohnern genutzt, dies ergibt pro-Kopf-Wohnflächen von 27 bzw 21,6 m². Diese merkliche Abweichung von den Annahmen führt zu einer deutlichen Erhöhung des Warmwasser- sowie des Haushaltsstromverbrauchs. Diese korrigierten Annahmen sind in Tabelle 11 gegenübergestellt.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Annahmen in der Berechnung/Simulation und der vereinfacht linear korrigierten Annahmen.

	Annahme	korrigierte Annahmem
Belegung Haus A	15 Pers	16 Pers (+7%)
Belegung Haus B	15 Pers	23 Pers (+53%)
Haushaltsstrombedarf A	25 kWh/(m ² _{WNFA})	26,8 kWh/(m ² _{WNFA}) (+7%)
Haushaltsstrombedarf B	25 kWh/(m ² _{WNFA})	38,25 kWh/(m ² _{WNFA}) (+53%)
Warmwasserbedarf A	30 l/(Pers d) ≈ 450 l/d	30 l/(Pers d) ≈ 480 l/d (+7%)
	22,2 kWh/(m ² _{WNFA})	23,6 kWh/(m ² _{WNFA})
Warmwasserbedarf B	30 l/(Pers d) ≈ 450 l/d	30 l/(Pers d) ≈ 690 l/d (+53%)
	19,3 kWh/(m ² _{WNFA})	29,6 kWh/(m ² _{WNFA})

6.1 Konstruktion und Hüllqualität

Die beiden Baukörper wurden in der gleichen Konstruktionsart (Massivbau mit vorgesetzter gedämmter Holzfassade) im gleichen, sehr guten Hüllniveau (Passivhausniveau) ausgeführt. Die mittleren U-Werte der opaken Bauteile der Gebäudehülle liegen bei 0,127 bzw. 0,129 W/(m²K).

Die Fenster wurden mit IV90 Holzrahmen in Fichte mit einem $U_f=1,03$ W/(m²K) und einer Dreifachverglasung mit $U_g=0,50$ W/(m²K) und einem g-Wert von 0,49 ausgeführt.

Der detailliert ermittelte Wärmebrückenzuschlag der Realisierungsvariante liegt mit 0,005 (A) bzw. 0,011 (B) W/(m²K) bei einem hervorragenden Wert. Der weit überwiegende Teil der Wärmebrücken entsteht - typisch für mineralische Massivbaukonstruktionen - am Übergang von der Kellerdecke zum Mauerwerk der Erdgeschosswände. In Haus A beispielsweise sind die Wärmebrücken gegen Außenluft negativ mit -0,012 W/(mK) und die gegen Bodenplatte/Kellerdecke positiv mit 0,121 W/(mK).

Beide Gebäude erreichten mit 0,22 bzw. 0,23 h⁻¹ hervorragende Werte der Luftdichtheit n₅₀; die Werte liegen bei etwa einem Drittel des Grenzwertes für Passivhäuser.

Der Fensterflächenanteil ist mit 29,4% (Haus A) bzw. 26,1% (Haus B) der PHPP-Energiebezugsfläche großzügig gewählt, aufgrund der Lage des Projekts in fast 800 m Höhe ist aber auch damit keine sommerliche Überhitzung zu erwarten.

Tabelle 12: Energierrelevante Kennwerte der Gebäudehülle

		Haus A	Haus B
U-Wert Außenwand	W/(m ² K)	0,133	0,133
U-Wert Flachdach	W/(m ² K)	0,094	0,094
U-Wert Bodenplatte beheizte Räume	W/(m ² K)	0,133	0,133
U-Wert Decke Außenluft (nach unten)	W/(m ² K)	0,103	0,103
Fenster (U _w -Wert; U _g / g-Wert) Normmaßbezug	W/(m ² K) / -	0,76/0,50/49%	0,76/0,50/49%
Wärmebrückenzuschlag	W/(m ² K)	0,005	0,011
Mittlerer U-Wert inkl. Fenstern (inkl. Wärmebrücken)	W/(m ² K)	0,198	0,199
Mittlerer U-Wert opak (inkl. Wärmebrücken)	W/(m ² K)	0,127	0,129
Messwert der Luftdichtheit n ₅₀	h ⁻¹ @50PA	0,22	0,23
Fensterflächenanteil (Fensterfläche/EBF)	%	29,4	26,1

6.2 Energierrelevante Haustechnik – Haus A

Das Gebäude hat dezentrale, wohnungsweise Komfortlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Die Geräte sind so positioniert, dass sie ohne Zugang zu den einzelnen Wohnungen gewartet werden können, siehe Abbildung 12. Die mittlere Luftwechselrate beträgt 0,3 h⁻¹.



Abbildung 12: Dezentrale wohnungsweise Komfortlüftungsanlagen vom Treppenhaus aus zugänglich (Foto: Energieinstitut Vorarlberg).

Abbildung 13 zeigt das vereinfachte Haustechnikschema mit modulierender Sole-Erdreichwärmepumpe, 1.000-Liter-Speicher (nur für Warmwasser), 2+2-Leitersystem mit 48°-50°C Vorlauftemperatur für die Frischwasserstationen und 30°-35°C für die Fußbodenheizung, welche von der WP direkt versorgt wird. Die Warmwasser Zapftemperatur beträgt etwa 45°C, höhere Temperaturen zur Legionellen-Prävention müssen nicht erreicht werden, da es sich aufgrund der Wohnungsstationen um ein dezentrales System handelt. Das Gebäude verfügt zusätzlich über eine 30kW_p-PV-Anlage mit Nutzung des PV-Stroms für alle Energieanwendungen im Gebäude inkl. Haushaltsstrom. Die Module sind in Ost-West Orientierung ausgerichtet (228 bzw. 48°).

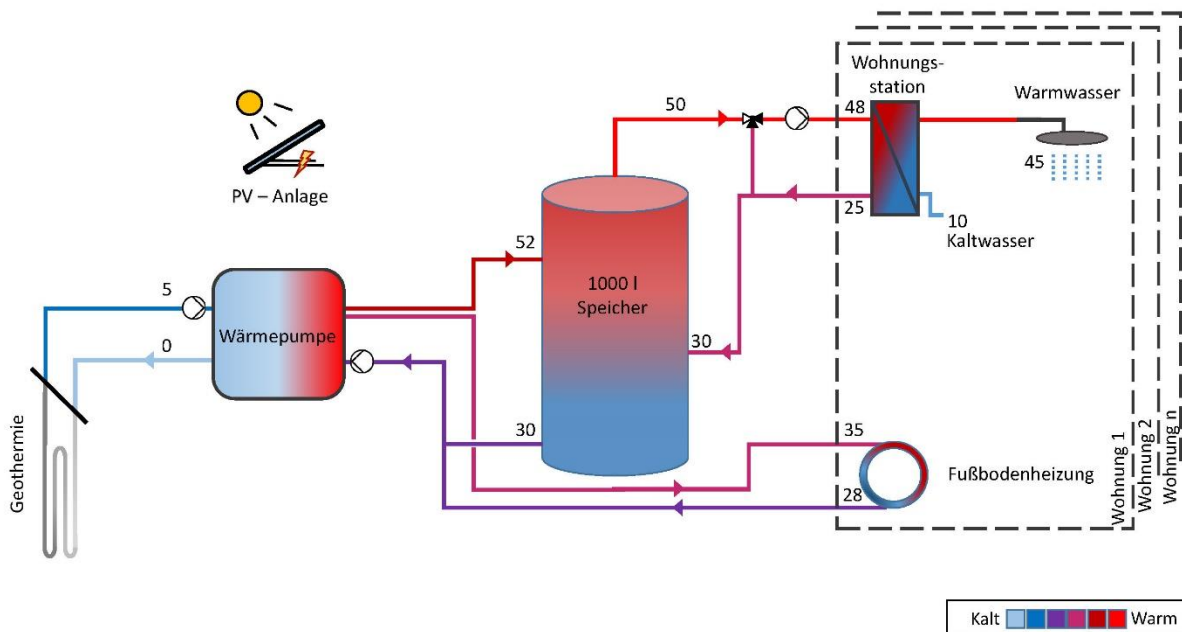


Abbildung 13: Vereinfachtes Haustechnikschema des Projekts Dafins – Haus A mit Sole-Wärmepumpe, 1.000 Liter-Speicher, 2+2-Leiter-Verteilssystem und Fußbodenheizung sowie 30kW_p PV [16].

Tabelle 13: Energierelevante Kennwerte der Haustechniksysteme von Haus A

Lüftungssystem und Luftwechselrate	Wohnungsweise Komfortlüftung mit WRG		0,33 h ⁻¹
Heizlast PHPP (20°)	13,3 W/m ² _{EBF}		
Wärmeerzeuger Heizung und Warmwasser (Typ, absolute und spez. Leistung)	Sole-WP IDM TERRA SWM 3 - 13 HGL	3-13 kW	6,2-27,0 W/m ² _{EBF}
Wärmespeicher Typ, und Größe	Schichtspeicher	1.000 Liter	2,1 Liter/m ² _{EBF}
Wärmeverteilsystem	Vierleiter mit wohnungswesisen Frischwasserstationen		
Wärmeabgabesystem Typ und Temperaturniveau	Fußbodenheizung	35°C/28°C	
Solarthermie Kollektorgöße (Apertur) absolut und spezifisch	-	-	-

PV-Leistung absolut und spezifisch	30 kWp	62 Wp/m ² _{EBF}	94 Wp/m ² _{überbaute Fläche}
Batteriespeicher Kapazität absolut und spezifisch	-	-	-

6.3 Energierelevante Haustechnik – Haus B

Das Gebäude hat dezentrale, wohnungsweise Komfortlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Die Geräte sind so positioniert, dass sie ohne Zugang zu den einzelnen Wohnungen gewartet werden können. Die mittlere Luftwechselrate beträgt 0,3 h⁻¹.

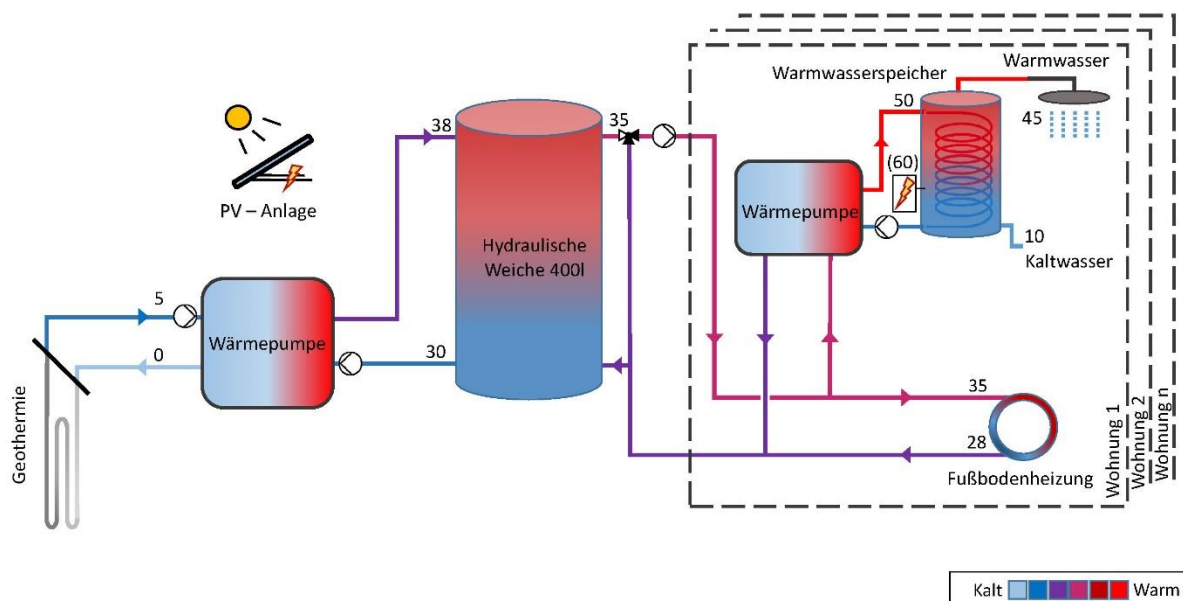


Abbildung 14: Vereinfachtes Haustechnikschema des Projekts Dafins – Haus B mit zentraler Sole-Wärmepumpe für die Heizung, 400 Liter Speicher als hydraulische Weiche, 2-Leiter-System und Fußbodenheizung sowie wohnungswesischen Warmwasser-Wärmepumpenboilern und 30kW_p PV [16].

Abbildung 14 zeigt das vereinfachte Haustechnikschema mit modulierender Sole-Wärmepumpe, Speicher als hydraulische Weiche, 2-Leitersystem mit 30-35°C Vorlauftemperatur für die Fußbodenheizung sowie wohnungswesischen Warmwasser-Wärmepumpenboilern. Diese nutzen als Wärmequelle die Fußbodenheizung, so dass die Wärmepumpen kaskadenartig genutzt werden: Die zentrale Heizungs-Wärmepumpe erwärmt in der Heiz- und Übergangssaison das Wasser im Heizkreis auf 30-35°C, die wohnungswesischen Warmwasser-Wärmepumpen müssen nur einen Temperaturhub von dieser Temperatur auf die Speichertemperatur (150-166 Liter je nach Modell) von etwa 55°C bewältigen. Im Sommer reicht laut Simulation der passive Solarertrag durch die Fenster, der über die Fußbodenheizung für die dezentrale Brauchwasserwärmepumpe nutzbar gemacht wird, als Wärmequelle aus. Zusätzlich kann so eine leichte Raumkühlung erreicht werden. Haus B verfügt wie Haus A über eine 30 kW_p-PV-

Anlage mit Nutzung des PV-Stroms für alle Energieanwendungen im Gebäude inkl. Haushaltsstrom. Die Module sind in Ost-West Orientierung ausgerichtet (228 bzw. 48°).

Tabelle 14: Energierrelevante Kennwerte der Haustechniksysteme von Haus B

Lüftungssystem und Luftwechselrate	Wohnungsweise Komfortlüftung mit WRG	0,3 h ⁻¹	
Heizlast PHPP (20°)	12,3 W/m ² _{EBF}		
Wärmeerzeuger Heizung (Typ absolute und spez. Leistung)	Sole-WP IDM TERRA SWM 3 - 13	3-13 kW	5,7-25,0 W/m ² _{EBF}
Wärmeerzeuger Warmwasser (Typ absolute und spez. Leistung)	Wärmepumpenboiler OVUM XR150 (2021) OPW170 (ab 2022)	1,2 kW	13,8 W/m ² _{EBF}
Wärmespeicher Typ, und Größe	Schichtspeicher als hydraulische Weiche	400 Liter	0,77 Liter/m ² _{EBF}
Wärmeverteilsystem	2-Leiter für FBH		
Wärmeabgabesystem Typ und Temperaturniveau	Fußbodenheizung	35°C/28°C	
Solarthermie Kollektorgroße	-	-	
PV-Leistung absolut und spezifisch	30 kWp	58 Wp/m ² _{EBF}	92 Wp/m ² _{überbaute Fläche}
Batteriespeicher Kapazität	-	-	

7 Messergebnisse 2021

7.1 Außenlufttemperaturen 2021

Der Energieverbrauch eines Gebäudes wird je nach Energiestandard der Gebäudehülle und Haustechnik von den Außentemperaturen beeinflusst. In einem langen kalten Winter wird mehr geheizt als in einem kurzen oder warmen. Deshalb sind nachfolgend die Außentemperaturen für das Messjahr 2021 dargestellt. Da dies das erste Messjahr im Wohnbauforschungsprojekt Dafins ist, werden im Vergleich dazu ein synthetischer Klimadatensatz aus der Software Meteonorm [17] und der Klimadatensatz aus der Software PHPP [18] für Feldkirch mit einer Höhenkorrektur dargestellt. Der synthetische Klimadatensatz wurde auf Datengrundlage der Periode 2000-2009 für die Gebäudesimulation in Stundenschritten, für die PHPP Berechnungen in monatsschritten erzeugt.

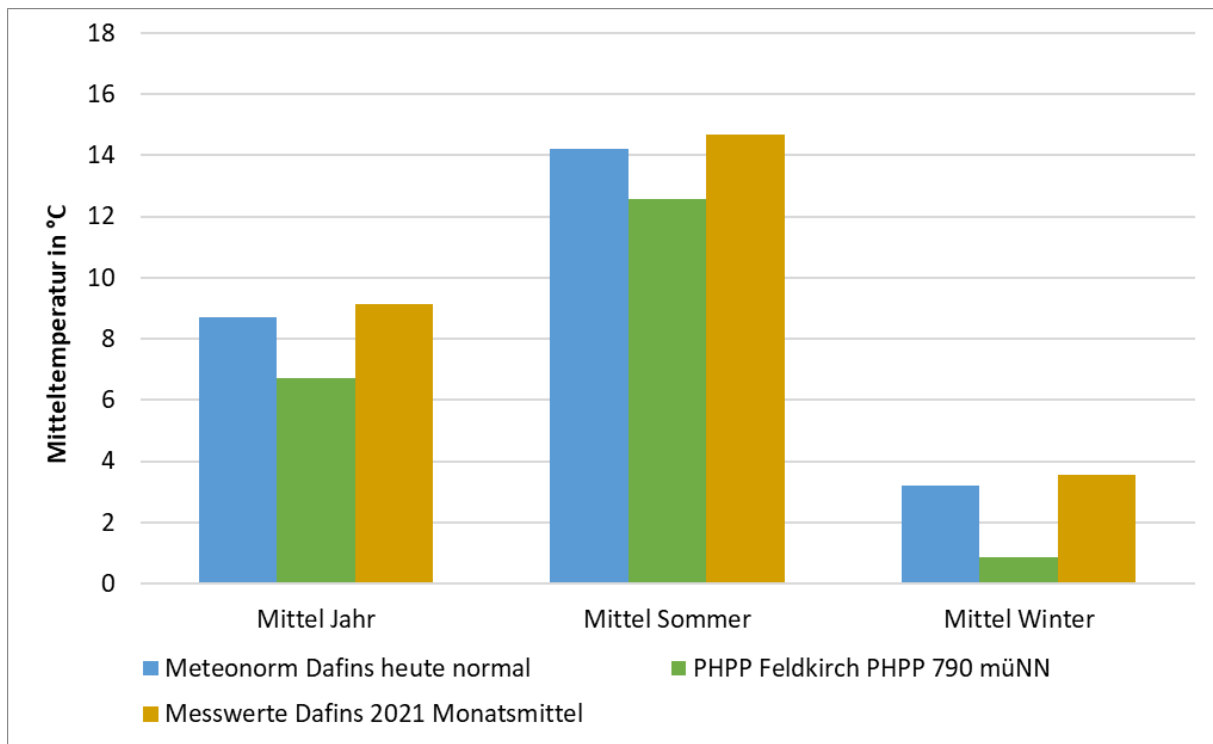


Abbildung 15: Mitteltemperaturen im Vergleich für das gesamte Jahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und das Messjahr 2021.

Wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, stimmen die gemessenen Temperaturen im Jahr 2021 im Jahresschnitt und im Sommer- sowie Winterhalbjahr relativ gut mit den synthetischen Klimadaten (Meteonorm) überein. Die PHPP Klimadaten sind vor allem im Winterhalbjahr 1,5-2°C kälter als die gemessenen oder synthetischen.

In Abbildung 16 sind die Monatsmitteltemperaturen im Vergleich dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und das Messjahr 2021. Die gemessenen Temperaturen weisen erwartungsgemäß größere Schwankungen zwischen den Monaten auf als synthetische Klimadaten, welche Mittelwerte über mehrere Jahre sind. 2021 war z.B. der Monat Mai kälter als der April. In den synthetischen Daten ist dies genau wie zu erwarten wäre andersherum. Die Tendenzen sind aber dieselben wie oben beschrieben. Messung 2021 und synthetischer Datensatz stimmen relativ gut überein, PHPP Daten sind etwas kühler.

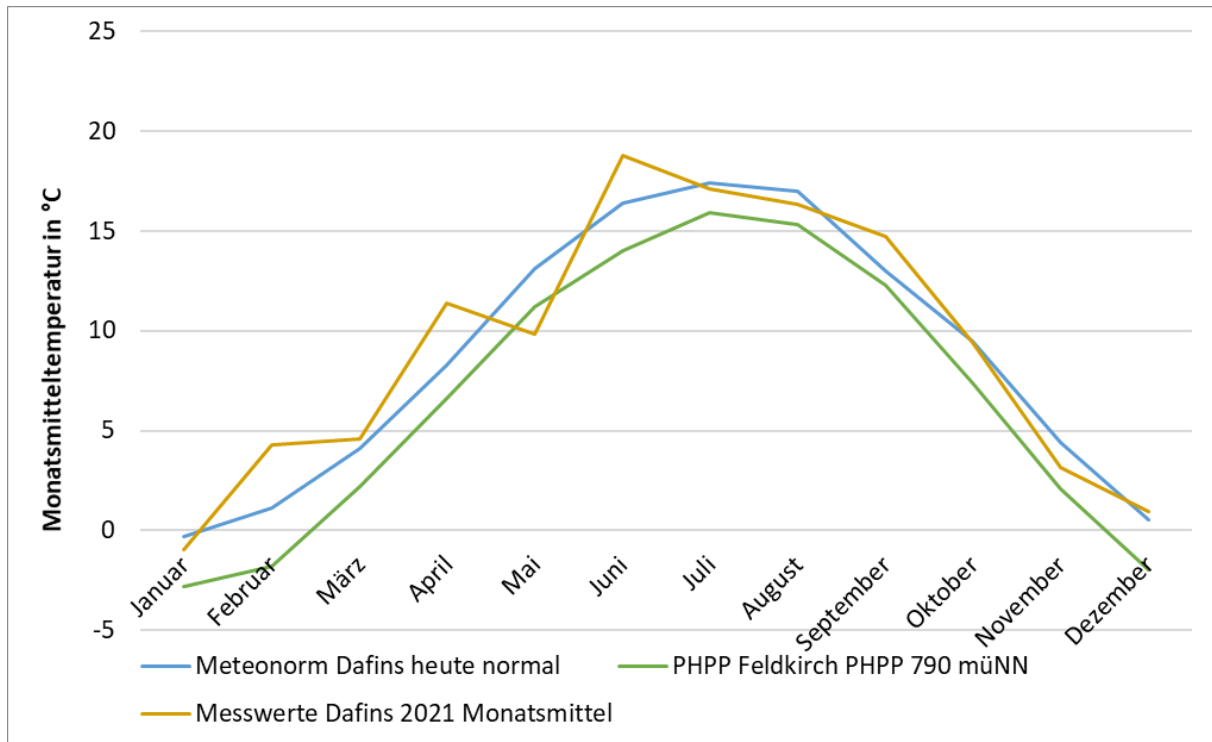


Abbildung 16: Monatsmitteltemperaturen im Vergleich. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und das Messjahr 2021.

7.2 Energetische Performance – Haus A 2021

Beide Gebäude wurden Ende 2020 bezogen, somit ist das nachfolgend dargestellte Messjahr 2021 das erste Betriebsjahr (Text teilweise publiziert in [16]). Wie andere Messprojekte zeigen, ist das erste Messjahr nicht immer repräsentativ, da oft noch, wie auch in Dafins, nachgeregelt oder nachgebessert wird oder auch andere Effekte wie die Restfeuchte aus der Bauphase noch einen Einfluss haben.

Die energetische Performance von Haus A im Jahr 2021 ist in Abbildung 17 in einem Energieflussdiagramm (Sankey) dargestellt. Es sind die auf die **Wohnnutzfläche** von 432 m² bezogenen spezifische Werte angegeben. Die Wärmeströme sind in einem Farbschema von gelb (hohe Temperatur) bis blau (niedrige Temperatur), die Stromverbräuche der einzelnen Anwendungen in grau dargestellt. Die mittlere Raumlufttemperatur während der Heizperiode lag bei 22,5°C.

Der gesamte Strombezug aus dem Netz für alle Anwendungen wie Heizung, Warmwasser, Hilfsstrom, Allgemeinstrom und Haushaltsstrom ist in der Jahresbilanz mit 43,1 kWh/(m²a) unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung niedriger als die Netzeinspeisung mit 45,1 kWh/(m²a). Ohne die PV Eigennutzung wäre der Verbrauch 60,1 kWh/(m²a) und die Erzeugung liegt bei 62,1 kWh/(m²a). Das Gebäude ist somit durch die Effizienzmaßnahmen und die relativ große PV-Anlage ein jahresbilanzielles Plusenergiegebäude.

Der Stromverbrauch der Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser lag bei 22,9 kWh/(m²a), in dem Wert ist der Verbrauch der Sole- und der Heizkreispumpe enthalten, da diese in der Wärmepumpe verbaut sind. Auch die übrigen Verbräuche wie Hilfsstrom für Lüftung (2,6) Allgemeinstrom (5,2) und Haushaltsstrom (22,2 kWh/(m²a)) sind niedrig. Der gesamte Hilfsstrom inkl. Lüftung ist mit 9,9 kWh/(m²a) relativ hoch, hauptsächlich durch die WW-Umwälzpumpe bedingt.

Die Verluste der Warmwasserverteilung sind mit 21,7 kWh/(m²a) im ersten Messjahr noch bedeutend zu hoch, es wurden – ähnlich wie auch in Kapitel 3.8.2.2 in [16] beschrieben - Werte unter 10 kWh/(m²a) erwartet.

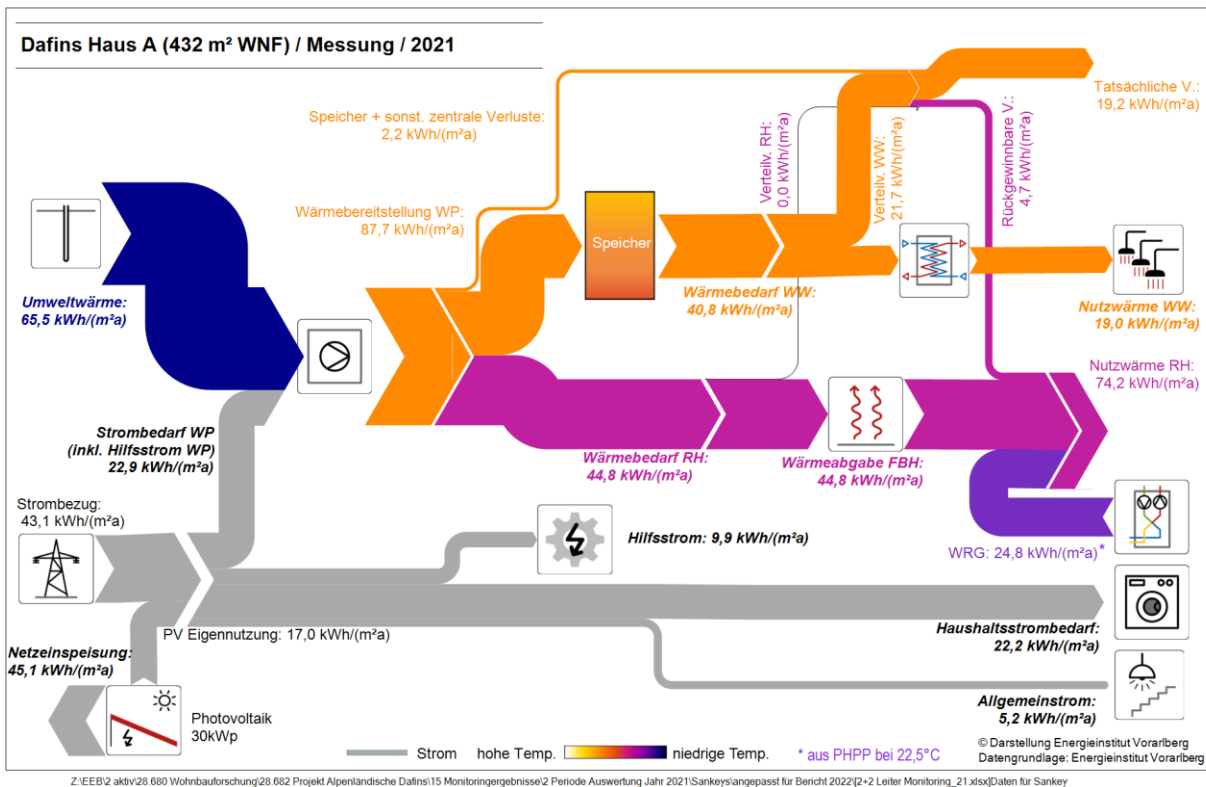


Abbildung 17: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2021 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 432 m² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg).

Die wichtigsten berechneten und gemessenen Energiekennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 15 zusammengestellt, die Werte sind auf die Wohnnutzfläche von 432 m² bezogen. Der im Jahr 2021 gemessene Heizwärmeverbrauch stimmt mit 44,8 kWh/(m²_{WNFA}) gut mit dem in der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung ermittelten Wert von 42,4 kWh/(m²_{WNFA}) überein. Dies ist eine gute Übereinstimmung.

Der gemessene Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser liegt mit 22,9 kWh/(m²_{WNFA}) um 5,7 kWh/(m²_{WNFA}) über dem in der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung ermittelten Wert.

Tabelle 15: Kennwerte Energiebedarf und -verbrauch von Haus A

Heizwärmebedarf PHPP-Standard (20°C)	kWh/(m ² _{WNFA})	32,1
Heizwärmebedarf PHPP -Verbrauchsprognose (22,5°C)	kWh/(m ² _{WNFA})	42,4
Heizwärme verbrauch gemessen (22,5°C)	kWh/(m ² _{WNFA})	44,8
Warmwasserbedarf (PHPP Standard +30%)	l/Pers*d (60°)	32,5
Endenergiebedarf _{Heiz+WW} PHPP-Verbrauchsprognose (22,5° und 32,5 l/Person pro Tag, 10% Zusatzverschattung Winter)	kWh/(m ² _{WNFA})	17,2
Endenergie verbrauch _{Heiz+WW} gemessen	kWh/(m ² _{WNFA})	22,9
PV-Stromerzeugung (PHPP)	kWh/(m ² _{überbaut a})	86,0
PV-Stromerzeugung (gemessen)	kWh/(m ² _{überbaut a})	83,9

7.3 Energetische Performance – Haus B 2021

Die energetische Performance von Haus B im Jahr 2021 ist in Abbildung 18 in einem Energieflussdiagramm (Sankey) dargestellt. Es sind die auf die **Wohnnutzfläche** von 496 m² bezogenen spezifische Werte angegeben. Die Wärmeströme sind in einem Farbschema von gelb (hohe Temperatur) bis blau (niedrige Temperatur), die Stromverbräuche der einzelnen Anwendungen in grau dargestellt.

Die mittlere Raumlufttemperatur während der Heizperiode lag bei 23,4°C und damit deutlich über der Annahme der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung von 22,5°C.

Der gesamte Strombezug aus dem Netz für alle Anwendungen wie Heizung, Warmwasser, Hilfs-, Allgemein- und Haushaltsstrom ist in der Jahresbilanz mit 56,9 kWh/(m²a) höher als die Netzeinspeisung mit 33,6 kWh/(m²a). Ohne die PV Eigennutzung wäre der Verbrauch 77,6 kWh/(m²a) und die Erzeugung liegt bei 54,3 kWh/(m²a). Das Gebäude benötigt also trotz Effizienzmaßnahmen und der relativ großer PV-Anlage jahresbilanziell mehr Strom als es erzeugt. Hauptgrund für den vergleichsweise hohen Verbrauch ist der sehr hohe Haushaltsstromverbrauch, dieser ist mit 41,8 kWh/(m²a) fast doppelt so hoch wie in Haus A. Eine Ursache des hohen flächenspezifischen Haushaltsstromverbrauchs ist die sehr hohe Bewohnerdichte: Haus B wird von 23 Personen bewohnt, Haus A von 16. Die pro-Kopf-Wohnfläche beträgt damit in Haus A 27m², im Haus B sogar nur 21,6 m². Dies führt zu einer Erhöhung des Haushaltsstromverbrauchs im Vergleich zu weniger dicht bewohnten Gebäuden. Der hohe Verbrauch ist aber auch durch schlechte Geräte/intensive Nutzung bedingt und könnte durch effizientere Geräte deutlich verringert werden.

Der Stromverbrauch für Heizung und Warmwasser lag in Summe der zentralen Wärmepumpe sowie der wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpen, bei 24,9 kWh/(m²a) und somit ähnlich wie in Haus A. Die hohe Personenbelegung wirkte sich im ersten Messjahr stark erhöhend

auf den Strombedarf für die Warmwasserbereitung aus: Bei den dezentralen Wärmepumpenboilern kam im Messjahr 2021 zum einen Bauart- und Regelungstechnisch, zum anderen durch den höheren Warmwasserverbrauch aufgrund dichter Belegung der elektrische Heizstab häufiger zum Einsatz. Dieser hat einen Anteil von 3,0 kWh/(m²a) am Gesamtverbrauch für Warmwasser von 12,5 kWh/(m²a).

Die übrigen Verbräuche wie Hilfsstrom (Pumpen, Lüftung) sind mit 6,6 kWh/(m²WNFA) und 4,3 kWh/(m²WNFA) für Allgemiestrom niedrig.

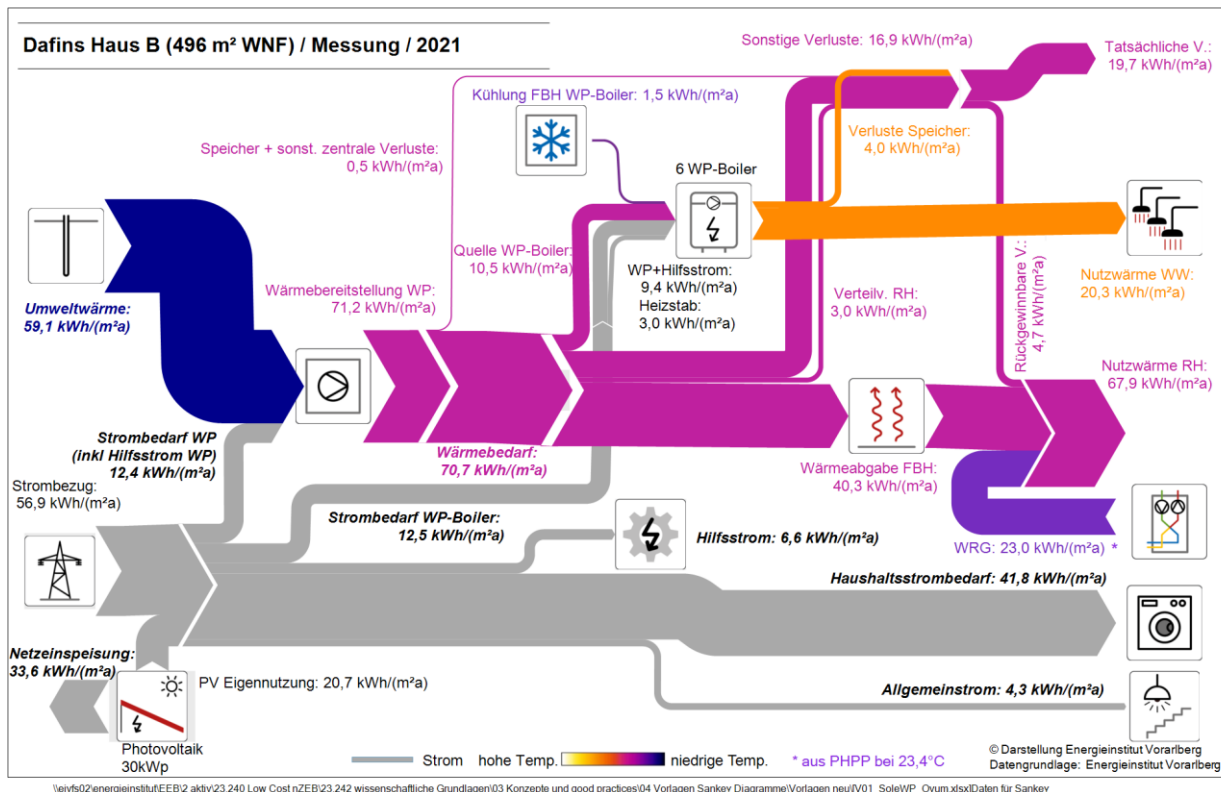


Abbildung 18: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2021 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 496 m² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg).

Es wurden „sonstige“ Verluste von etwa 20 kWh/(m²a) festgestellt, welche hauptsächlich auf eine falsche Einstellung der Regelung, im speziellen der Heizgrenztemperatur zurückzuführen sind. Dadurch bedingt wurde dem Gebäude auch bei sommerlichen Temperaturen Heizenergie zugeführt. Die Regelung wurde im Dezember 2021 angepasst.

Insgesamt hatte Haus B etwas höhere flächenspezifische Energieverbräuche als die meisten im Buch „Low-cost nZEB – Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser“ vorgestellten Beispielprojekte. Berücksichtigt man den deutlich kälteren Projektstandort auf knapp 800m Höhe, die zwangsläufig schlechtere Kompaktheit des mit 6 Wohneinheiten kleinen Gebäudes und die sehr hohe Personenbelegung, sind auch schon die Verbrauchswerte des ersten Jahres gut. Der personenspezifische Verbrauch ist sogar einer der besten aller im Buch untersuchten Projekte.

Die wichtigsten berechneten und gemessenen Energiekennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 16 zusammengestellt, die Werte sind auf die Wohnnutzfläche von 496m² bezogen.

Tabelle 16: Kennwerte Energiebedarf und -verbrauch von Haus B

Heizwärmebedarf PHPP-Standard (20°C)	kWh/(m ² _{WNFA})	26,7
Heizwärmebedarf PHPP -Verbrauchsprognose (22,5°C)	kWh/(m ² _{WNFA})	35,3
Heizwärme verbrauch gemessen (23,4°C)	kWh/(m ² _{WNFA})	40,3
Warmwasserbedarf (PHPP Standard +30%)	l/Pers*d (60°)	32,5
Endenergiebedarf _{Heiz+WW} PHPP-Verbrauchsprognose (22,5° und 32,5 l/Person pro Tag, 10% Zusatzverschattung Winter)	kWh/(m ² _{WNFA})	17,8
Endenergie verbrauch _{Heiz+WW} gemessen	kWh/(m ² _{WNFA})	24,9
PV-Stromerzeugung (PHPP)	kWh/(m ² _{überbaut a})	84,7
PV-Stromerzeugung gemessen	kWh/(m ² _{überbaut a})	82,9

Der gemessene Heizwärmeverbrauch liegt mit 40,3 kWh/(m²_{WNFA}) um 5 kWh/(m²_{WNFA}) höher, als der in der PHPP-Verbrauchsprognose berechnete Wert. Dies ist eine gute Übereinstimmung. Der gemessene Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser liegt mit 24,9 kWh/(m²_{WNFA}) um etwa 7 kWh/(m²_{WNFA}) über dem Wert der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung.

7.4 PV-Anlage und Mieterstrom 2021

Eine Besonderheit bei den beiden Gebäuden in Dafins sind die in Abbildung 19 dargestellten, großen PV-Anlagen auf den Flachdächern. Der Strom, welcher mit diesen erzeugt wird, wird zuerst allen Anwendungen im Gebäude zur Verfügung gestellt, der restliche Überschussstrom wird ins Netz eingespeist. Zu den Anwendungen im Gebäude gehört neben der Wärmepumpe auch der Haushaltsstrom der einzelnen Wohnungen. Dieser wird den Mietern durch die Alpenländische Gemeinnützige WohnbauGmbH kostenlos zur Verfügung gestellt⁸. Dies ist im Rahmen einer gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage nach § 16a EIWOG (2010) seit einigen Jahren auch in Österreich rechtlich möglich, wobei die Umsetzung in der Praxis für den Anlagenbetreiber durchaus noch mit einigen bürokratischen Hürden verbunden ist.

⁸ Standardfall bei gemeinschaftlichen Erzeugungsanlagen ist, dass der Strom den Bewohnern verrechnet wird.



Abbildung 19: PV-Anlagen mit jeweils 30 kWp auf beiden Gebäuden in Dafins (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg).

Haus A erzeugt wie beschrieben über das Jahr gesehen mehr Strom als es verbraucht, ist also ein jahresbilanzielles Plusenergiegebäude. Das Gebäude ist aber nicht autark, denn es bezieht nachts und vor allem im Winter, wenn die PV-Anlage keinen bzw. weniger Strom erzeugt, aber z.B. die Wärmepumpe in Betrieb ist, Strom aus dem Netz. An schönen Sommertagen erzeugt die PV-Anlage weitaus mehr Strom als benötigt und speist diesen ins Netz ein. Wie Abbildung 17 zeigt, werden 26.830 kWh/a Strom erzeugt, also 894 kWh/kWp, davon werden 7.340 kWh/a, also 27%, direkt im Gebäude eigengenutzt, wobei eine der sechs Wohnungen nicht am Modell teilnimmt und deshalb keinen Strom der Anlage bezieht. Die restlichen 19.490 kWh/a werden ins Netz eingespeist. In Haus B ist der Eigennutzungsgrad bei 38%, also in etwa so hoch wie prognostiziert. Der Eigenverbrauch könnte durch Teilnahme aller Wohnungen in Haus A, optimierte Regelstrategien der Wärmepumpe oder durch smarte Haushaltsgeräte etwas erhöht werden. Es zeigt sich aber auch, dass der Eigennutzungsgrad vom Nutzerverhalten und noch stärker davon abhängt wie lange und wann die Bewohner anwesend sind und Stromwendungen nutzen. In beiden Gebäuden ist der jahresdurchschnittlich höchste Stromverbrauch in den Abendstunden gegen 19:00 Uhr. Zu dieser Uhrzeit ist am Standort der PV-Ertrag aber sogar im Sommer nur noch sehr gering. Die gemessene Jahreserzeugung der PV-Anlage im Jahr 2021 lag bei 26.830 kWh/a. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem prognostizierten Ertrag überein: er liegt um 2,3% über der Ertragsprognose mit IDA ICE und um 2,1% unter der Prognose mit PHPP.

Eine genauere Aufschlüsselung der PV-Stromerzeugung und Nutzung, sowie des Mieterstrommodells wurde für das Jahr 2022 im Kapitel 8.6 vorgenommen.

8 Optimierung und Messergebnisse 2022

8.1 Optimierung Wärmeversorgung Haus A 2022

Auf Grundlage der Monitoringdaten und Rückmeldungen der Bewohner wurden zur Optimierung der Wärmeversorgung in Haus A Maßnahmen durchgeführt. Es gab von den Bewohnern keine Rückmeldung zu Problemen mit Warmwassertemperatur oder Menge. Was aber anhand der Monitoringdaten festgestellt werden kann, sind mehr als doppelt so hohe Verteilverluste als aus Berechnungen erwartet. Die Daten zeigen, dass ganzjährig ein konstant sehr hoher Volumenstrom im Vor- und Rücklauf zu den Frischwassersstationen herrscht. Dieser hohe Volumenstrom sollte nur im Moment der Zapfung auftreten und danach durch Schließen eines Thermostatventils in den Stationen auf einen Minimaldurchfluss reduziert werden. In einem ersten Schritt wurden im Januar 2022 die Pumpeinstellungen angepasst. Wie die Messergebnisse zeigen, wurde dadurch eine Reduktion des Hilfsstromverbrauchs um 23% oder 2,3 kWh/(m²a) von 9,9 auf 7,6 kWh/(m²a) erreicht.

Das Problem des zu hohen Durchflusses wurde dadurch aber laut Messdaten 2022 nicht behoben und im Januar 2023 werden die Wohnungsstationen nachjustiert mit der Absicht, den Durchfluss bei Nichtzapfen zu verringern und die Verteilverluste dadurch zu senken.

8.2 Optimierung Wärmeversorgung Haus B 2022

Auf Grundlage der Monitoringdaten und Rückmeldungen der Bewohner wurden zur Optimierung der Wärmeversorgung in Haus B Maßnahmen durchgeführt. Zum einen wurde die Wärmepumpenboiler durch Geräte einer neuen Generation ersetzt, zum anderen wurde die Heizgrenztemperatur und die Heizkurve geändert.

Seit Bezug der Wohnungen klagten vor allem Mieter mit sehr dicht belegten Wohnungen über zu geringe Warmwassermengen, bzw. eine sehr lange Aufheizzeit der Boiler. Zur Sicherstellung der Energieeffizienz wurden im Forschungsvorhaben die zusätzlichen elektrischen Heizstäbe in den Speichern am Beginn deaktiviert. Nach den Rückmeldungen der Mieter wurden diese dann aktiviert und von einigen Mietern auch die maximale Solltemperatur erhöht. Bei der ersten Generation der eingesetzten Wärmepumpenboiler führte dies in Verbindung mit den teilweise dicht belegten Wohnungen dazu, dass die zusätzlichen e-Heizstäbe die Wärmepumpen oft unterstützten und dadurch einen hohen Stromverbrauch erzeugten. Im April 2021 wurden dann 3 der 6 Geräte getauscht und im Dezember 2021 die restlichen drei. Die neue Generation hat mit 166 Litern Volumen, 16 Liter mehr als die alte Generation, außerdem wurde mit zwei Temperatursensoren und einer neuen Regelung an einer Verbesserung der Schalung des Heizstabes gearbeitet. In Abbildung 20 erkennt man die Leistungsaufnahme vor und nach Austausch der Geräte. Vor dem Austausch ist eine hohe Leistungsaufnahme bedingt durch die Aktivierung des Heizstabes zu sehen, nach dem Austausch nur noch eine geringe

Leistungsaufnahme der Wärmepumpe. Nach Tausch sind keine Klagen der Mieter über zu wenig Warmwasser bekannt.

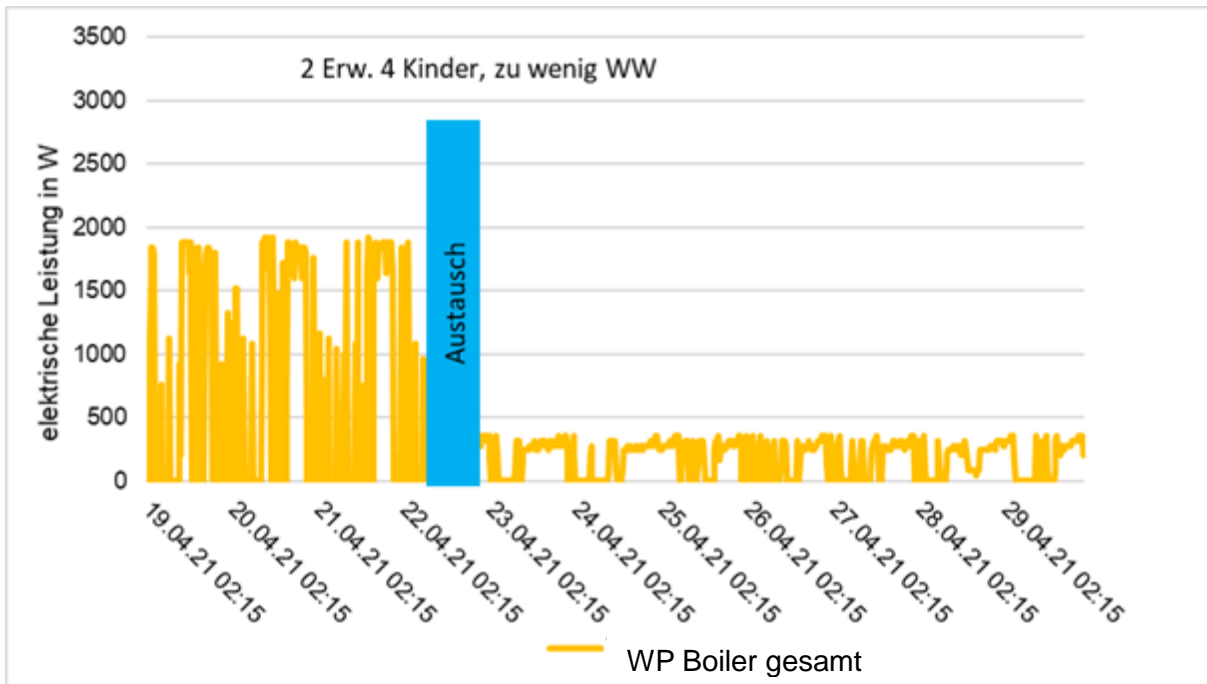


Abbildung 20: Leistungsaufnahme gemessen von und nach Austausch des Wärmepumpenboilers.

Ein zweiter Optimierungsschritt wurde nicht wegen Klagen der Mieter durchgeführt, sondern aufgrund der Ergebnisse der Analysen der Monitoringdaten. Wie in Abbildung 18 gezeigt wird, wurden „sonstige“ Verluste von etwa 20 kWh/(m²a) festgestellt, welche hauptsächlich auf eine falsche Einstellung der Regelung, im speziellen der Heizgrenztemperatur zurückzuführen sind. Dadurch bedingt wurde dem Gebäude auch bei sommerlichen Temperaturen Heizenergie zugeführt. Die Regelung wurde am 13.1.2022 angepasst. Die Heizkurve ist bei -20°C Außenlufttemperatur auf 34°C und bei +10°C Außenlufttemperatur auf 27°C eingestellt. Die Heiz/Kühlschaltung wird durch die Außentemperatur bestimmt. Bei einem Wert von unter 16°C (im 8 Stunden-Mittel), wird die Heizung aktiviert.

8.3 Außenlufttemperaturen 2022

Für das Messjahr 2022 wurden ebenfalls die Außenlufttemperaturen am Standort aufgezeichnet. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Jahr 2022 am Standort 1,5°C wärmer war als das Jahr 2021.

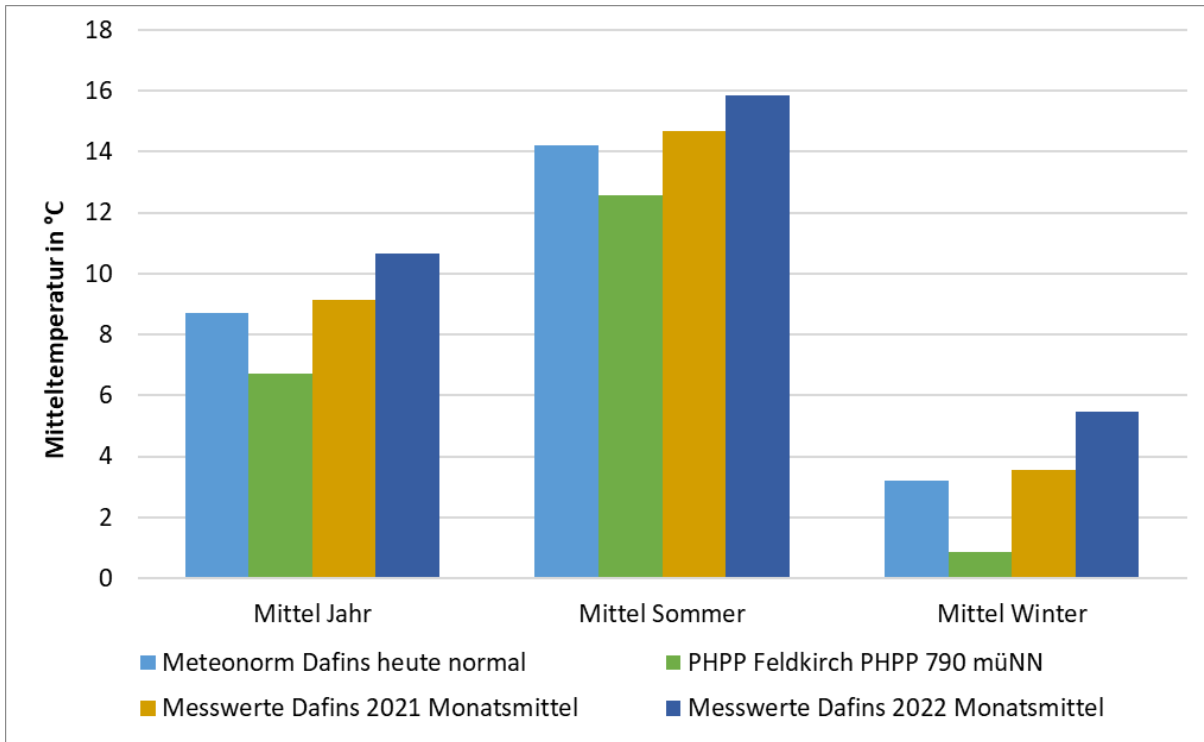


Abbildung 21: Mitteltemperaturen im Vergleich für das gesamte Jahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und die Messjahre 2021 und 2022.

Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, stimmen die gemessenen Temperaturen im Jahr 2021 im Jahresschnitt und im Sommer- sowie Winterhalbjahr relativ gut mit den synthetischen Klimadaten (Meteorolog. Norm) überein. Die PHPP Klimadaten sind vor allem im Winterhalbjahr 1,5-2°C kälter als die gemessenen oder synthetischen. Das Jahr 2022 liegt im Jahresschnitt 1,5°C über 2021, im Winter sogar 1,8°C. Im Winter ist das Jahr 2022 3,6°C wärmer als der PHPP Datensatz für Feldkirch mit der Höhenkorrektur auf 790 müNN.

In Abbildung 22 sind die Monatsmitteltemperaturen im Vergleich dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und die Messjahre 2021 und 2022. Die Tendenzen sind aber dieselben wie oben beschrieben. Messung 2021 und synthetischer Datensatz stimmen relativ gut überein, PHPP Daten sind etwas kühler. Das Messjahr 2022 liegt fast ganzjährig über allen anderen Quellen.

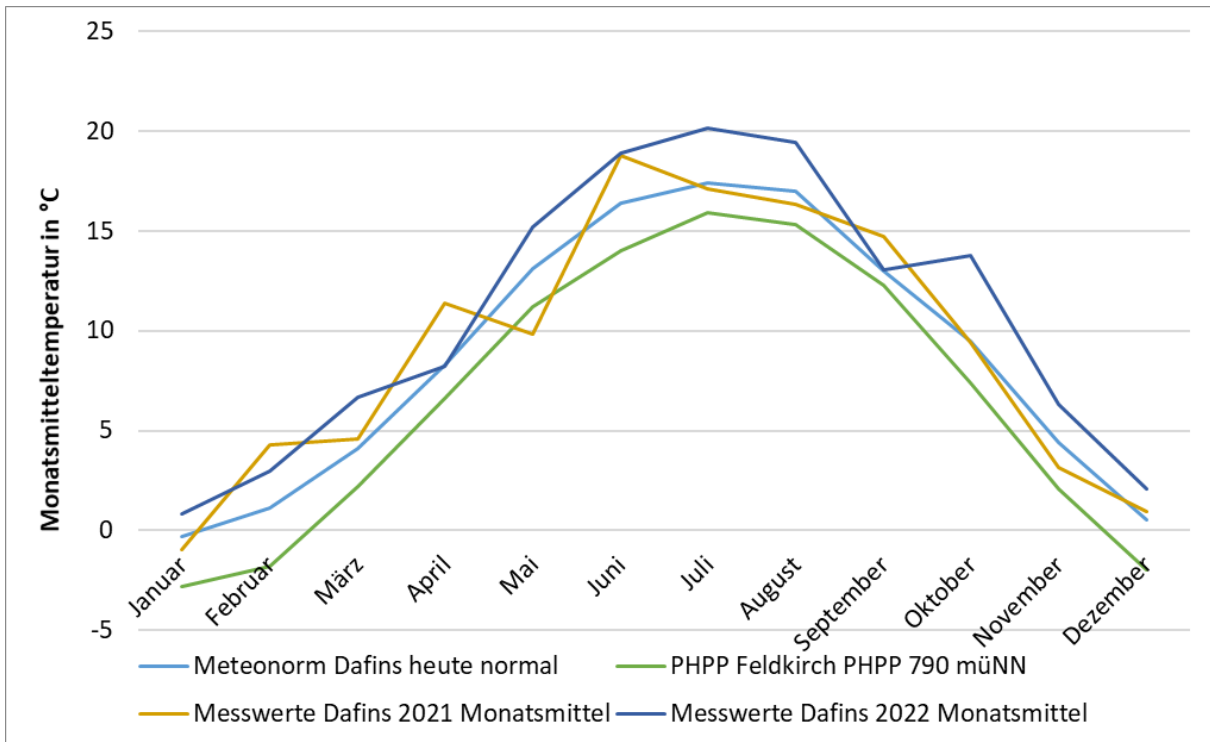


Abbildung 22: Monatsmitteltemperaturen im Vergleich. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und die Messjahre 2021 und 2022.

8.4 Energetische Performance – Haus A 2022

Im Kapitel Außenlufttemperaturen wird gezeigt, dass das Jahr 2022 wärmer war als 2021. Dies zeigt sich auch an der Wärmeabgabe der Fußbodenheizung. Die gemittelte Ablufttemperatur im Winter aller Wohnungen liegt mit 22,2°C in 2022 ähnlich hoch wie 22,5°C in 2021, somit ist die Reduktion der Wärmeabgabe der Fußbodenheizung von 44,8 auf 31,9 kWh/(m²a) hauptsächlich auf das mildere Klima zurückzuführen. Ein kleiner Teil der Verbrauchsreduktion ist auf die geringfügig niedrigeren Raumlufttemperaturen, die Baufeuchte im ersten Jahr und vermutlich auf eine höhere Solarstrahlung im Winter 2022 zurückzuführen. Ein Teil der stärkeren Reduktion des Heizwärmeverbrauchs kann nicht einzelnen Ursachen quantitativ zugeordnet werden. Mögliche Ursache kann auch ein verändertes Nutzerverhalten 2022 durch Lüftung, Raffstore oder Belegung sein.

Der Wärmebedarf für den Warmwasserteil liegt mit Verlusten mit 40,8 und 40,6 kWh/(m²a) in beiden Jahren ähnlich hoch. Die Verluste der Warmwasserverteilung sind mit 21,7 kWh/(m²a) im ersten Messjahr und mit 22,3 kWh/(m²a) im zweiten Messjahr noch bedeutend zu hoch, es wurden – ähnlich wie auch in Kapitel 3.8.2.2 in [16] beschrieben - Werte unter 10 kWh/(m²a) erwartet. Es werden im Jahr 2023 noch Optimierungen an den Wohnungsstationen durchgeführt.

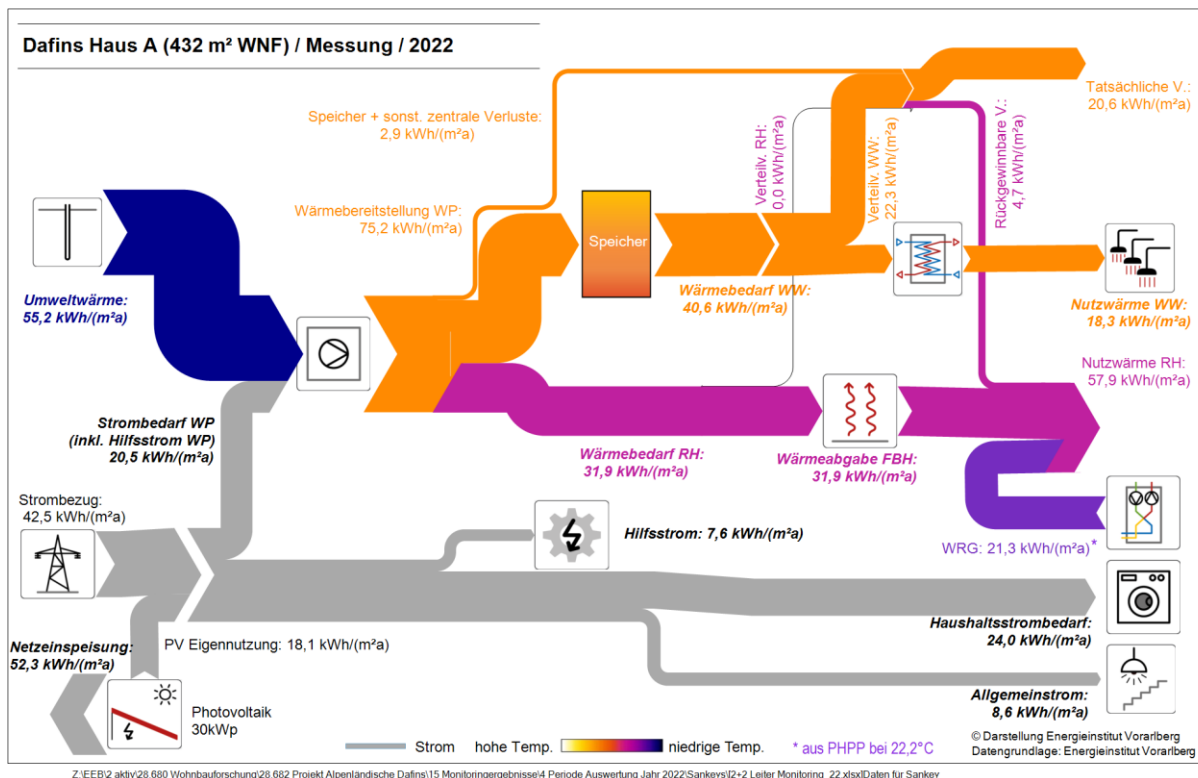


Abbildung 23: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2022 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 432 m² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg).

Durch den niedrigeren Bedarf bei der Raumheizung sinkt der Strombedarf der Wärmepumpe leicht. Wie die Messergebnisse zeigen, wurde durch die andere Einstellung der Warmwasserpumpe eine Reduktion des Hilfsstromverbrauchs um 23% oder 2,3 kWh/(m²a) von 9,9 auf 7,6 kWh/(m²a) erreicht. Der Haushaltsstrombedarf und Allgemeinstrombedarf stieg 2022 hingegen leicht an, so dass der gesamte Stromverbrauch vom Gebäude mit 60,1 und 60,6 kWh/(m²a) 2021 und 2022 relativ konstant bleibt. Die PV-Stromerzeugung war 2022 mit 70,4 statt 62,1 kWh/(m²WNFA) höher als 2021, wodurch auch die PV-Eigennutzung und der Netzverbrauch angestiegen sind. Somit ist der gesamte Strombedarf des Gebäudes auch 2022 jahresbilanziell durch selbst erzeugten PV-Strom gedeckt und es gibt sogar einen Überschuss von 4234 kWh/a. Es ist somit ein jahresbilanzielles Plusenergiegebäude.

8.5 Energetische Performance – Haus B 2022

Im Haus B wurden Anfang 2022 zum einen die Wärmepumpenboiler durch Geräte einer neuen Generation ersetzt, zum anderen wurde die Heizgrenztemperatur und die Heizkurve geändert. Im Kapitel Temperaturen wird gezeigt, dass das Jahr 2022 wärmer war als 2021. Dies zeigt sich an der Wärmeabgabe der Fußbodenheizung. Die gemittelte Ablufttemperatur im Winter aller Wohnungen liegt mit 22,6°C in 2022 niedriger als die 23,4°C in 2021, somit ist die Reduktion der Wärmeabgabe der Fußbodenheizung von 40,3 auf 35,8 kWh/(m²a) hauptsächlich auf das mildere Klima zurückzuführen und ein kleiner Teil auf die niedrigeren Raumlufttempe-

ratoren, die Baufeuchte im ersten Jahr und vermutlich auf eine höhere Solarstrahlung im Winter 2022. Der Nutzereinfluss durch Lüftung, Raffstore oder Belegung ist vermutlich in diesem Gebäude in den beiden Jahren ähnlich gewesen und wirkt sich nicht sehr stark auf die Ergebnisse aus.

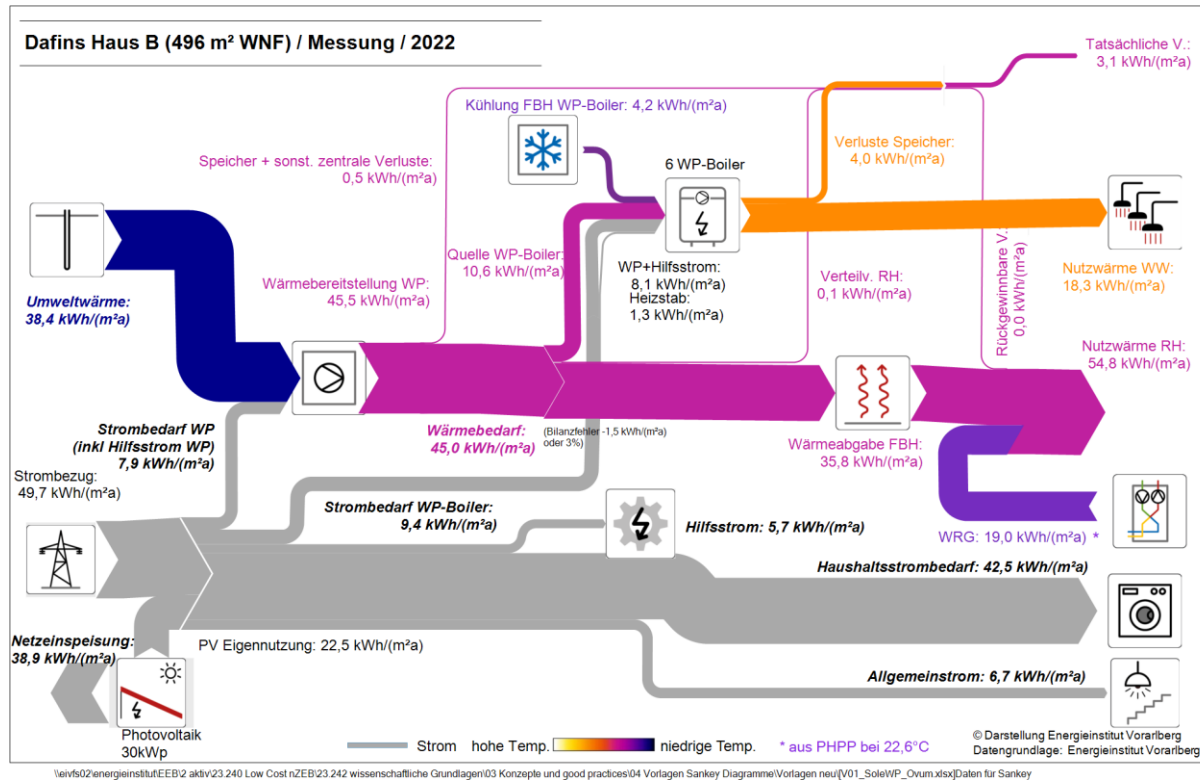


Abbildung 24: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2022 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 496 m² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg).

Anfang 2022 wurden die letzten WP-Boiler getauscht und somit der Strombedarf der dezentralen Warmwasserbereitung noch einmal deutlich gesenkt. Vor allem der Heizstab, der 2021 einen Verbrauch von 3,0 kWh/(m²a) aufwies bei 3 getauschten Geräten ab April 2021, hat 2022 bei allen getauschten Geräten nur noch 1,3 kWh/(m²a) verbraucht. Diese kommen hauptsächlich aus einer Wohnung ab September 2022. Der Warmwasserbedarf und somit der Nutzwärmebedarf Warmwasser ist 2022 etwa 10% niedriger als 2021. Durch den Tausch der Geräte und den niedrigeren Warmwasserbedarf sinkt der Strombedarf für die dezentrale Warmwasserbereitung von 12,5 auf 9,4 kWh/(m²a).

Der zweite Optimierungsschritt, die Justierung der Regelung, verhinderte das ungewollte sommerliche Heizen, welches mit 16,9 kWh/(m²a) im Jahr 2021 verbucht wurde. Diese Energiemenge konnte 2022 komplett eingespart werden und dadurch konnten die dezentralen Brauchwasserwärmepumpen ihr Potenzial der passiven Kühlung erst richtig nützen. Die Kühlung durch die „Fußbodenheizung“ stieg von 1,5 kWh/(m²a) in 2021 auf 4,2 kWh/(m²a) in 2022 an.

Durch den niedrigeren Bedarf bei der Raumheizung und das vermiedene sommerliche Heizen sinkt der Wärmebedarf von 71,2 auf 45,5 kWh/(m²a) und der Strombedarf der Wärmepumpe deutlich von 12,4 auf 7,9 kWh/(m²a). Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ohne Hilfsstrom liegt somit bei sehr guten 5,7. Der Hilfsstromverbrauch ist von 6,6 auf 5,7 kWh/(m²a) gesunken. Haushaltsstrom- und Allgmeinstrombedarf stiegen 2022 hingegen leicht an, so dass der gesamte Stromverbrauch vom Gebäude von 77,6 auf 72,2 kWh/(m²a) in 2022 sank. Der Unterschied von 16% oder 11,6 kWh/(m²a) Mehrverbrauch 2022 von Gebäude B gegenüber Gebäude A liegt nur am höheren Haushaltsstromverbrauch in Haus B. Bei gleichem Haushaltsstromverbrauch beider Gebäude wäre Haus B, trotz dichter Belegung, effizienter als Haus A.

Die PV-Stromerzeugung war 2022 mit 61,4 statt 54,3 kWh/(m²a) höher als 2021, wodurch auch die PV-Eigennutzung und der Netzverbrauch angestiegen sind. Durch den überdurchschnittlich hohen Haushaltsstrombedarf kann die PV Anlage den Strombedarf auch jahresbilanziell nicht decken.

8.6 PV-Anlage und Eigenstromnutzung 2022

Beide Gebäude haben 30 kWp PV Anlagen und diese erzeugten im Jahr 2022 30.413 kWh am Haus A und 30.454 am Haus B. Somit ergibt sich ein sehr guter spezifischer Ertrag von 1.015 kWh/kW_p. Dieser liegt 13% höher als im Jahr 2021. Durch die höhere Erzeugung steigt 2022 auch die Eigennutzung in beiden Gebäuden leicht an. In Haus A nahm im Jahr 2022 eine Wohnung nicht an der gemeinschaftlichen Erzeugeranlage teil, somit ist diese nicht in der Eigenstromnutzung eingeschlossen. Die Eigenstromnutzung ist nach dem dynamischen Aufteilungsmodell vom Netzbetreiber ermittelt und über das EDA-Portal (www.eda.at) übermittelt worden. Beide Gebäude weisen einen sich jahreszeitlich ändernden Strombedarf auf. In den Wintermonaten, wenn Heizung und Beleuchtung zunehmen, ist der Stromverbrauch höher als in den Sommermonaten. Man erkennt in den nachfolgenden zwei Abbildungen, dass der wenige PV-Strom, welcher im Winter erzeugt wird (Nov-Feb) auch fast zur Gänze im Gebäude selbst genutzt wird. Im Sommer hingegen ist die Eigennutzung im Haus A unter 20% und im Haus B bei ca. 30%. Gerade im Winter, wenn der Verbrauch am höchsten ist, liegt der Netzbezug bei über 90%, was bedeutet, dass im Winter die PV Anlage nur einen unwesentlichen Beitrag zur Versorgung liefert. Im Monat Januar lag Schnee auf der Anlage, welcher den Ertrag nochmals verringert. In den Sommermonaten wird zwar generell mehr PV-Strom erzeugt als verbraucht wird, aber eben nicht zur selben Zeit. Strom der z.B. in der Nacht verbraucht wird, muss aus dem Netz bezogen werden und der Strom, welcher mittags von der PV-Anlage erzeugt wird, wird nur zu einem Teil im Gebäude verbraucht, der Rest eingespeist.

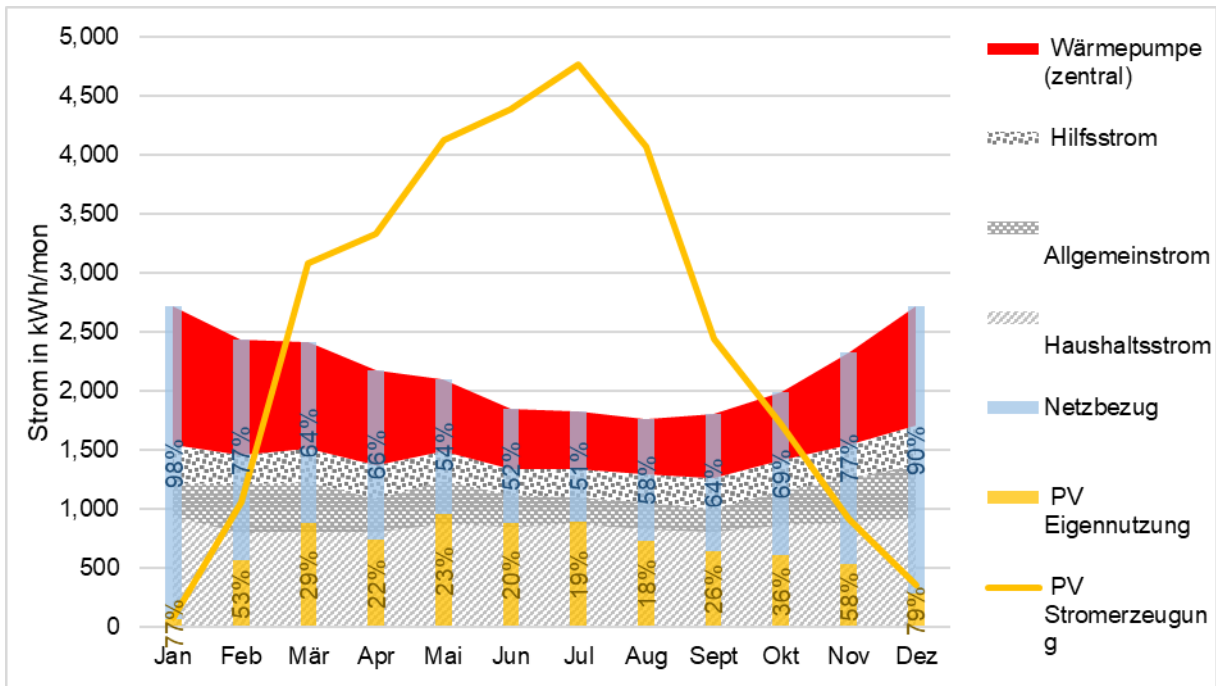


Abbildung 25: Gemessener monatlicher Stromverbrauch der einzelnen Anwendungen gegenübergestellt dem erzeugten PV-Strom und dem eigengenutzten Anteil für die 30 kWp Anlage am Haus A im Jahr 2022 (5 der 6 Wohnungen nahmen an der gemeinschaftlichen Erzeugeranlage teil).⁹

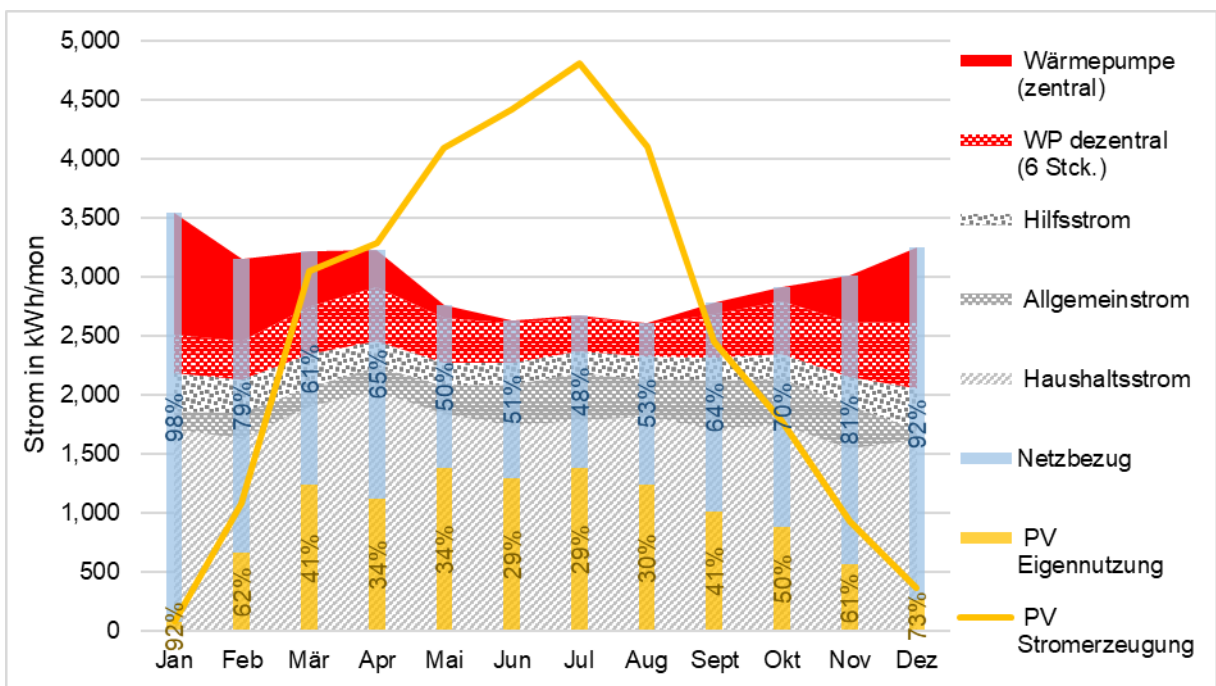


Abbildung 26: Gemessener monatlicher Stromverbrauch der einzelnen Anwendungen gegenübergestellt dem erzeugten PV-Strom und dem eigengenutzten Anteil für die 30 kWp Anlage am Haus B im Jahr 2022.

⁹ Eigennutzungsanteil (in %) = eigengenutzter PV-Strom / erzeugter PV-Strom
 Netzbezug (in %) = Netzbezug / gesamter Strombedarf

Haus B (Abbildung 26) hat einen insgesamt höheren Stromverbrauch, was an dem höheren Haushaltsstromverbrauch liegt. Aufgrund des höheren Verbrauchs ergibt sich auch eine höhere Eigennutzung des PV-Stroms, aber auch ein höherer Netzbezug (absolut, nicht in %). Beim Vergleich der beiden Gebäude sieht man, dass ein hoher Eigennutzungsgrad kein Qualitätskriterium für ein effizientes Gebäude ist. Durch die große PV-Anlage verringert sich aber gerade bei einem stromintensiven Gebäude der Netzbezug deutlich, was wirtschaftliche Vorteile bringt.

Außer der jahreszeitlichen Veränderung von Produktion und Erzeugung gibt es auch eine Veränderung innerhalb eines Tages. In Abbildung 27 ist ein typischer gemittelter Jahresdurchschnittstag im Winter und Sommer für das Jahr 2022 im Haus A mit den Lastkurven aus Erzeugung, Verbrauch und Eigennutzung dargestellt.

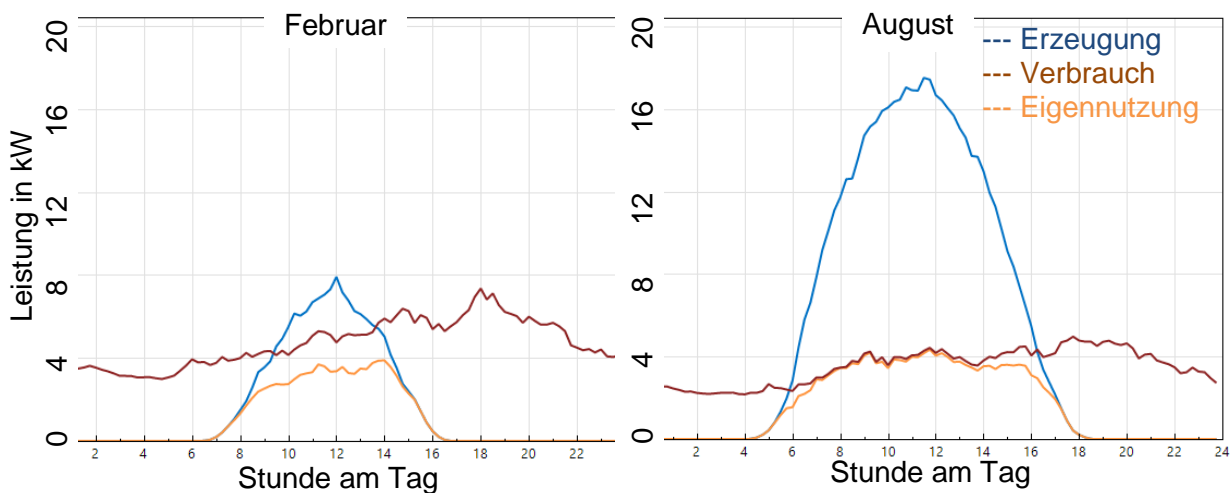


Abbildung 27: typischer gemittelter Jahresdurchschnittstag 2022 mit Lastverlauf aus Erzeugung (blau), Verbrauch (braun) und Eigennutzung (orange) für das Haus A.

Die Erzeugung folgt einem Tagesgang mit Peak am Mittag und Nullpunkten am Morgen und Abend. Der Verbrauch ist eher eine Bandlast, in der Nacht etwas niedriger und am Mittag sowie Abends etwas höher. Aus diesem ergibt sich dann die Eigennutzung des PV-Stroms welcher nur einen Teil des Verbrauchs decken kann, da eine zeitliche Differenz vorliegt. Vor allem im Winter (linke Grafik) macht der eigene PV-Strom nur einen kleinen Teil des Verbrauches aus. Dies verdeutlicht, dass selbst in einem sehr effizienten Gebäude mit großer PV-Anlage im Winter für die Beheizung viel Strom aus dem Netz bezogen werden muss.

Der PV-Strom, welcher direkt im Gebäude genutzt werden kann, hängt vom Lastprofil des jeweiligen Zählpunktes ab. In den Gebäuden wurden die Haushalte, Lüftung, Allgemein, Technik und die Wärmepumpe separat gezählt und somit kann für dies auch die Eigennutzung

ausgewiesen werden. In Tabelle 17 und Tabelle 18 sind diese für Haus A und B dargestellt. Die einzelnen Wohnungen sind aus Datenschutzgründen nicht einzeln dargestellt, sondern nur als aggregierter Wert ausgewiesen. Bei den einzelnen Wohnungen schwankt der Eigendeckungsgrad zwischen 30% und 46%. Allgemein, Technik und Lüftung zwischen 25% und 37%. Die Wärmepumpe im Haus A, welche Heizung und Warmwasser liefert, hat einen Eigendeckungsgrad von 27%, die von Haus B, welche hauptsächlich für die Heizung zuständig ist hingegen nur 13%. Dies liegt vor allem daran, dass im Winter, wenn geheizt wird wenig PV-Strom zur Verfügung steht. Dies sind nur 521 kWh/a von den 11.170 kWh/a eigengenutztem Strom.

Tabelle 17: Zusammenstellung von Verbrauch, Ertrag, Eigendeckung, Netzbezug und Kostenersparnis bzw. Einspeisevergütung für Haus A im Jahr 2022 (Annahmen: Strompreis 0,16 €/kWh; Einspeisevergütung OeMAG 0,0767 €/kWh; ohne Zähler und Grundgebühren (brutto)).

	Verbrauch/ Ertrag	PV Eigen- de- ckung	Eigen- de- ckungs- grad	Netz- bezug	Ersparnis durch Ei- gennutzung	Über- schussein- speisever- gütung
	kWh	kWh	%	kWh	€/a	€/a
Haushalte Haus A	10255	3218	31%	7037	515 €	
Lüftung A	1164	426	37%	738	68 €	
Allgemein A	3697	1077	29%	2620	172 €	
Technik A	2101	655	31%	1446	105 €	
Wärmepumpe A	8849	2394	27%	6455	383 €	
Summe Haus A	26065	7770	30%	18295	1.243 €	
PV-Ertrag A	30382					
Überschussein- speisung A	22612					1.734 €
Gesamtertrag/ Einsparung A					2.978 € Gebäude/a	
					496 € pro Top/a	
					0,57 € pro m ² /mon	

In Haus B sind die dezentralen Brauchwasserwärmepumpen am Zählpunkt der Wohnungen angeklemt, deshalb wird für diese keine separate Eigendeckung des PV-Stroms ausgewiesen. Diese sind im Wert der Haushalte Haus B mit erfasst.

Tabelle 18: Zusammenstellung von Verbrauch, Ertrag, Eigendeckung, Netzbezug und Kostenersparnis bzw. Einspeisevergütung für Haus A im Jahr 2022 (Annahmen: Strompreis 0,16 €/kWh; Einspeisevergütung OeMAG 0,0767 €/kWh; ohne Zähler und Grundgebühren (brutto)).

	Ver- brauch/ Ertrag	PV Ei- gen- de- ckung	Eigen- de- ckungs- grad	Netz- bezug	Ersparnis durch Ei- gennutzung	Über- schussein- speisever- gütung
	kWh	kWh	%	kWh	€/a	€/a
Haushalte Haus B	25744	8770	34%	16974	1.403 €	
Lüftung B	1353	453	33%	900	72 €	
Allgemein B	3320	1060	32%	2261	170 €	
Technik B	1494	367	25%	1127	59 €	
Wärmepumpe B	3910	521	13%	3389	83 €	
Summe Haus B	35820	11170	31%	24650	1.787 €	
PV-Ertrag B	30476					
Überschussein- speisung B	19306					1.481 €
Gesamtertrag/ Einsparung B					3.268 € Gebäude/a	
					545 € pro Top/a	
					0,55 € pro m ² /mon	

Durch die Eigenstromnutzung wurden im Jahr 2022 bei einem angesetzten Strompreis von 0,16 €/kWh in Haus A 1.243 € und in Haus B 1.787 € an Kosten eingespart. Diese Einsparung ist teilweise direkt durch niedrigere Stromrechnungen der Mieter ersichtlich, teilweise durch niedrigere Betriebskosten, verursacht durch die Allgemiestromanwendungen (Lüftung, Allgemein, Technik, Wärmepumpe). Durch die Überschusseinspeisung ergibt sich mit einem angesetzten Einspeisetarif nach OeMAG von 0,0767 €/kWh eine Vergütung von 1.734 € im Haus A und 1.481 € in Haus B. Diese Vergütung wird den Gebäuden auf das Betriebskostenkonto gutgeschrieben und kommt somit auch den Mietern zugute. Zusammengerechnet ergibt sich so eine Betriebskostensparnis von etwa 500 € pro Wohnung für das Jahr 2022 oder 0,55-0,57 €/(m²_{WNF}mon). Bei Investitionskosten (OeMAG Förderung bereits abgezogen) von etwa 18.000 € pro Anlage/Gebäude und grob 3.000 €/a Einsparung/Vergütung wäre die Anlage bereits nach 6 Jahren abgeschrieben (statische Betrachtung ohne Grundgebühren und Wartung). Stand 2023 sind die Strompreise und auch die Einspeisevergütungen nach Marktpreis

höher als die Annahmen, es zeichnet sich auch für die Zukunft ab, dass dies so bleiben wird. Unter diesem Aspekt fällt die Wirtschaftlichkeit der Anlage noch positiver aus.

8.7 Optimierungspotenzial für 2023

Wie in der Gegenüberstellung der Verbräuche 2021 und 2022 der beiden Gebäude gezeigt wurde, kann durch die Optimierungsmaßnahmen eine Verringerung des Strombedarfs erreicht werden. Für das Jahr 2023 werden noch Einsparpotenziale in beiden Gebäuden gesehen. Diese sind:

- Verteilverluste Haus A: Der Durchfluss in den Frischwasserstationen soll bei nichtzapfen gedrosselt werden und somit die hohen Verteilverluste gesenkt werden. Vom 24.1 bis 8.2.2023 wurden die Wohnungsübergabestationen und die Pumpe neu eingestellt. Nach dem Wärmetauscher ist ein Thermostat eingebaut, welcher den Wärmetauscher auf einer bestimmten Temperatur halten soll, damit bei Zapfung sofort Warmwasser aus dem Hahn kommt. Die Solltemperatur war hier in 5 von 6 Wohnungen mit knapp 50°C so hoch eingestellt, dass das Thermostatventil immer voll geöffnet war. Somit wurden 5 von 6 Stationen immer mit vollem Durchfluss durchspült, was zu hohen Temperaturen im Vor- und Rücklauf und hohen Verteilverlusten führt. Außerdem ist so immer ein hoher Volumenstrom vorhanden welcher einen hohen Pumpenstrombedarf induziert. Im Optimierungsschritt wurden die Thermostate auf 35°C eingestellt. Laut Mieter ist die Wartezeit und die Temperatur bei Zapfung zu Beginn etwas länger, aber in einem gut tolerierbaren Bereich. Die Verteilverluste sanken beim Vergleich einer Woche vor und nach Optimierung um 33% und die Stromaufnahme des gesamten Hilfsstroms ohne Lüftung um 66%, wobei in der Woche nach der Optimierung auch weniger Heizbedarf bestand, was sich senkend auf den Hilfsstrombedarf auswirkt. Da die Pumpe nicht gesondert gemessen wird, kann keine dezidierte Einsparung nur des Pumpenstroms ausgegeben werden. Es zeichnet sich also ab, dass die Effizienz der Warmwasserbereitung von Gebäude A im Messjahr 2023 deutlich besser werden wird.
- Haushaltsstrom Haus B: Es wird vorgeschlagen, dass die energieintensiven Haushalte in Haus B eine Stromsparberatung angeboten bekommen. Ob diese angenommen wird, bzw. Erkenntnisse daraus umgesetzt werden können, liegt allerdings nicht im Einflussbereich der Hauseigentümerin. Bei einem Top mit besonders hohem Stromverbrauch findet im Mai 2023 ein Mieterwechsel statt und deshalb wurde vom jetzigen Mieter keine Stromsparberatung gewünscht.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Einordnung der Gebäude

Beide Gebäude erreichten schon im ersten Betriebsjahr niedrige Energieverbräuche, die im zweiten Jahr in Haus B durch Optimierungsmaßnahmen nochmals gesenkt werden konnte. Zur Einordnung sind die flächenspezifischen Verbräuche der ersten beiden Betriebsjahre in Abbildung 28 den Werten anderer sehr effizienter, monoelektrisch versorgter Mehrfamilienhäuser in Österreich und Deutschland gegenübergestellt. Dargestellt sind die flächenspezifischen Verbräuche für alle Energieanwendungen. Beim Vergleich sieht man deutlich den hohen Haushaltsstrombedarf von Haus B.

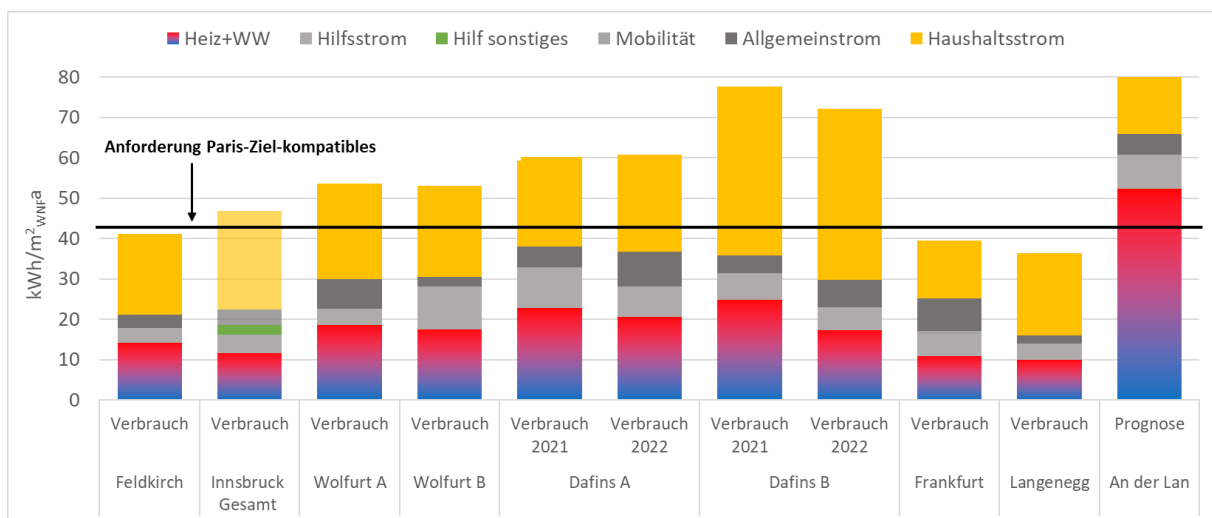


Abbildung 28: Ergebnisse der Gebäude in Dafins 2021 und 2022 im Vergleich zu Ergebnissen aus dem Buch low cost [16] mit den Anforderungen an den Endenergieverbrauch Weg 1 für Paris-kompatible Gebäude.

Trotz ihrer Lage auf fast 800 m Seehöhe und einer sehr dichten Personenbelegung mit entsprechend hohem Warmwasserverbrauch erreichen die beiden Gebäude in Dafins sehr niedrige Verbräuche für Heizung und Warmwasser. Die Werte für 2022 liegen bei 20,5 kWh/(m²_{WNFA}) für Haus A und bei 17,3 kWh/(m²_{WNFA}) für Haus B. Der personenbezogene Verbrauch ist aber unter Berücksichtigung der dichten Belegung vor allem in Haus B sehr niedrig.

Abbildung 29 zeigt für die gleichen Projekte zusätzlich die Bereitstellung des Energieverbrauchs (Netzbezug Strom bzw. Eigennutzung PV-Stromerzeugung) sowie die Einspeisung von PV-Strom ins Netz.

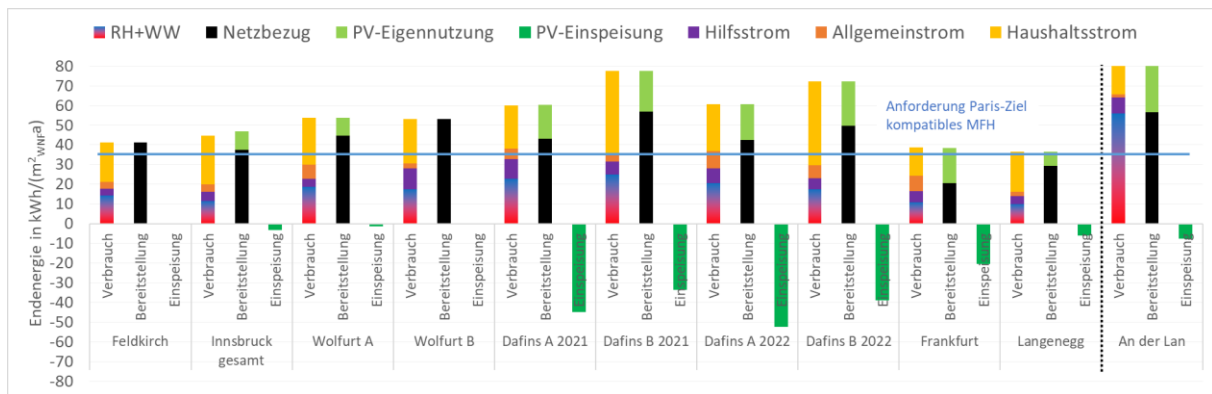


Abbildung 29: Ergebnisse der Gebäude in Dafins 2021 und 2022 im Vergleich zu Ergebnissen aus dem Buch low cost [16] mit den Anforderungen an den Endenergieverbrauch Weg 2 Paris-kompatible Gebäude

Wie die Grafik verdeutlicht, können beide Gebäude in Dafins den notwendigen Netzbezug von Strom durch die Nutzung von PV-Strom deutlich reduzieren. Zusätzlich verfügen sie über die höchste spezifische Netzeinspeisung der dargestellten Gebäude.

Dafins A lag im Messjahr nur knapp über der Anforderung an Paris-kompatible Gebäude (35 kWh/(m²·W_{NFA})) Netzbezug (siehe schwarze Säule im Diagramm). Gelingt es in Haus A die Haustechnik so zu optimieren, dass es den Erwartungen entspricht, sinkt sowohl der Strombedarf der Wärmepumpe als auch der Hilfsstrombedarf.

Dafins B könnte den Wert für Paris-kompatible Gebäude erreichen, wenn die Wohnungen mit sehr effizienten Haushaltsgeräten ausgestattet wären.

9.2 Warmwasserversorgung

Während in den Vorgängerprojekten KliNaWo und Wolfurt die seit längerem bekannten Wärmeverteilsysteme 4-Leiter, 2-Leiter und 2+2-Leiter umgesetzt wurden, wurde im Haus B in Dafins erstmals in einem Wohnbauforschungsprojekt in Vorarlberg das neuentwickelte System mit wohnungsweisen Brauchwasserwärmepumpen erprobt. Dieses System nutzt die Fußbodenheizung als Wärmequelle und verspricht deshalb eine hohe Effizienz bei der Warmwasserbereitung. Um dies zu bewerten muss aber das Gesamtsystem inklusive der zentralen Wärmepumpe betrachtet werden, da diese auch in der Kaskade eingebunden ist und somit auch Energie für die Warmwasserbereitung zur Verfügung stellen muss.

Wie das zweijährige Monitoring zeigt, erreicht das System mit den wohnungsweisen Brauchwasserwärmepumpen nach den beschriebenen Optimierungen die prognostizierte hohe Effizienz. Das System scheint bei normaler Belegung daher aus energetischer Sicht eine gute Lösung zu sein, bei sehr hohem Warmwasserbedarf, z.B. bei sehr dicht belegten Wohnungen

kommt das System aber wie andere dezentrale Boilerlösungen durch den begrenzten Speichereinhalt an seine Grenzen.

Das in Haus A installierte 2+2-Leiter System konnte im Projekt Dafins in den ersten beiden Jahren auf der Warmwasserseite noch nicht die prognostizierte Effizienz erreichen. Im Gegensatz zu Haus B wurde das System in Haus A noch nicht zur Gänze optimiert, aber die gesetzten Maßnahmen im Januar 2022 zeigen erste Erfolge. Es wird aber immer noch von einem zu hohen Durchfluss in den zapffreien Zeiten ausgegangen. Kann dieser noch durch geänderte Einstellungen der Frischwasserstationen und der Pumpe reduziert werden, so sinken Verteilverluste und Pumpenstromverbrauch. Anfang 2023 wurden diese Änderungen durchgeführt und mit diesen wird erwartet, dass 2023 auch Haus A die prognostizierten Werte erreicht.

Sowohl bezüglich der Investitionskosten als auch der Lebenszykluskosten sind die beiden verglichenen System ähnlich zu bewerten. Langzeiterfahrungen zu Ersatzinvestitionen und Wartung liegen in dem Projekt nicht vor, deshalb kann hierzu keine Aussage getroffen werden. Es kann aber festgehalten werden, dass bei beiden Systemen ein Nutzereingriff bei den Einstellungen oder eine fehlende/falsche Einregulierung die Effizienz deutlich verschlechtern kann.

9.3 PV-Stromerzeugung und Mieterstrommodell

Bei den beiden Gebäuden wurden die Dächer annähernd vollflächig mit PV belegt und diese erzeugen, zumindest in Haus A, jahresbilanziell etwas mehr Strom als verbraucht wird. Den Mietern wird der erzeugte Strom vorrangig zur Verfügung gestellt, der Rest eingespeist. Dieses Vorgehen hat Vor- und Nachteile. Die festgestellten Nachteile sind:

- Der Eigentümer/Verwaltung hat einen gewissen Mehraufwand in der Errichtung und Betrieb der PV-Anlage. Vor allem der **bürokratische Mehraufwand** des „Mieterstrommodells“ darf nicht unterschätzt werden und wird als eines der **Haupthindernisse** gesehen.
- Der Errichter oder Eigentümer benötigt verfügbares Kapital für die Investition
- Damit der Vermieter keine Verluste hat, können die Mieter zu einer Finanzierungsbeteiligung über Mietzins, Betriebskosten oder Bepreisung des PV-Stromes herangezogen werden. Die Förderung kann dies aber ausgleichen. Im vorliegenden Fall, wird die Errichtung der PV-Anlage in den Baukosten verbucht und auf den Mietzins umgelegt.

Die festgestellten Vorteile sind:

- Die PV-Anlagen können beim Mieterstrommodell ohne OeMAG Förderung fast vollständig über die Überschusseinspeisung finanziert werden (66% bei 30 kWp). Mit Einspeisevergütungen in Höhe der des Jahres 2022 wahrscheinlich vollständig.

- Bei gewährter OeMAG Förderung (Investitionszuschuss und erhöhter Einspeisetarif) finanziert sich die 30 kWp Anlage bereits über die Überschusseinspeisung aus der PV Gemeinschaftsanlage.
- Der Mieter profitiert in jedem Fall vom Mieterstrommodell, solange er den PV Strom kostenlos oder günstiger als zu Marktkonditionen bekommt und eine eventuell höhere Miete zur Finanzierung der Anlage unter den Einsparungen liegt. In den untersuchten Gebäuden ist dies der Fall.
- Der Vermieter erreicht mit dem Umsetzen des Mieterstrommodells einen Mehrwert für die Mieter und somit auch der Immobilie.
- Durch den vermehrten Ausbau von PV auf Mehrfamilienwohnhäusern wird zur CO₂ Reduktion beigetragen.

Wenn die Anlagen eine OeMAG Förderung erhalten, und/oder die Einspeisevergütung auf dem Stand 2022/2023 liegt, bleibt nur noch der erhöhte bürokratische Aufwand, welcher Eigentümer von der Umsetzung einer solchen Anlage abhalten könnte.

Abbildungen

Abbildung 1: Dreidimensionales Gebäudemodell Dafins V182 Haus B mit dem verschattenden Nachbargebäude aus der Software IDA ICE.	15
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Wünschen, Verhalten und Geräten, welche Strom oder Wasser benötigen (Quelle: [6, Abb. 4.2]).....	18
Abbildung 3: Statistische Wohnungsbelegung des Projekts Dafins mit 6 Wohneinheiten und den angenommenen Randbedingungen.....	19
Abbildung 4: Jährlicher Haushaltsstrombedarf der einzelnen generierten Haushalte für die drei Effizienzniveaus Effizienz, Standard, Intensiv in kWh/(HH a).....	20
Abbildung 5: Jahresdurchschnittliche tägliche Lastprofile mit den Standardgeräten für die 6 verschiedenen Haushalte (farblich differenziert).....	21
Abbildung 6: Jahregänge des PV-Ertrags der unterschiedlich dimensionierten Ost-West-orientierten PV-Anlagen (Simulation IDA ICE).....	24
Abbildung 7: Monatlicher Strombedarf der einzelnen Anwendungen gegenübergestellt dem erzeugten PV-Strom und dem eigengenutzten Anteil für die 30 kWp Anlage am Haus A.	25
Abbildung 8: Annahmen für die Lebensdauern der Komponenten sowie für die Wartungskosten	29
Abbildung 9: Kapitalwerte der verschiedenen Wärmeversorgungsvarianten für Investitionskosten sowie für betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten.....	29
Abbildung 10: Kapitalwerte der Variante mit Sole-WP und Lüftung mit/ohne WRG für Investitionskosten sowie für betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten.....	30
Abbildung 11: Mehrfamilienhäuser in Dafins. Haus A (links), Haus B (rechts); PV-Anlage, E+1, je 6 Wohnungen. (Foto: Energieinstitut Vorarlberg)	35
Abbildung 12: Dezentrale wohnungsweise Komfortlüftungsanlagen vom Treppenhaus aus zugänglich (Foto: Energieinstitut Vorarlberg).....	37
Abbildung 13: Vereinfachtes Haustechnikschema des Projekts Dafins – Haus A mit Sole-Wärmepumpe, 1.000 Liter-Speicher, 2+2-Leiter-Verteilssystem und Fußbodenheizung sowie 30kW _p PV [16].	38
Abbildung 14: Vereinfachtes Haustechnikschema des Projekts Dafins – Haus B mit zentraler Sole-Wärmepumpe für die Heizung, 400 Liter Speicher als hydraulische Weiche, 2-Leiter-System und Fußbodenheizung sowie wohnungsweisen Warmwasser-Wärmepumpenboilern und 30kW _p PV [16].	39
Abbildung 15: Mitteltemperaturen im Vergleich für das gesamte Jahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und das Messjahr 2021.	41

Abbildung 16: Monatsmitteltemperaturen im Vergleich. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und das Messjahr 2021.	42
Abbildung 17: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2021 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 432 m ² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg). ...	43
Abbildung 18: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2021 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 496 m ² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg). ...	45
Abbildung 19: PV-Anlagen mit jeweils 30 kWp auf beiden Gebäuden in Dafins (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg).	47
Abbildung 20: Leistungsaufnahme gemessen von und nach Austausch des Wärmepumpenboilers.	49
Abbildung 21: Mitteltemperaturen im Vergleich für das gesamte Jahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und die Messjahre 2021 und 2022.	50
Abbildung 22: Monatsmitteltemperaturen im Vergleich. Dargestellt für synthetische Klimadaten für den Standort Dafins, PHPP Daten Feldkirch für 790 müNN angepasst und die Messjahre 2021 und 2022.	51
Abbildung 23: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2022 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 432 m ² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg). ...	52
Abbildung 24: Sankey Diagramm: gemessenen Energieflüsse im Jahr 2022 – spezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche von 496 m ² (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg). ...	53
Abbildung 25: Gemessener monatlicher Stromverbrauch der einzelnen Anwendungen gegenübergestellt dem erzeugten PV-Strom und dem eigengenutzten Anteil für die 30 kWp Anlage am Haus A im Jahr 2022 (5 der 6 Wohnungen nahmen an der gemeinschaftlichen Erzeugeranlage teil).	55
Abbildung 26: Gemessener monatlicher Stromverbrauch der einzelnen Anwendungen gegenübergestellt dem erzeugten PV-Strom und dem eigengenutzten Anteil für die 30 kWp Anlage am Haus B im Jahr 2022.	55
Abbildung 27: typischer gemittelter Jahresdurchschnittstag 2022 mit Lastverlauf aus Erzeugung (blau), Verbrauch (braun) und Eigennutzung (orange) für das Haus A.	56
Abbildung 28: Ergebnisse der Gebäude in Dafins 2021 und 2022 im Vergleich zu Ergebnissen aus dem Buch low cost [16] mit den Anforderungen an den Endenergieverbrauch Weg 1 für Paris-kompatible Gebäude.	60
Abbildung 29: Ergebnisse der Gebäude in Dafins 2021 und 2022 im Vergleich zu Ergebnissen aus dem Buch low cost [16] mit den Anforderungen an den Endenergieverbrauch Weg 2 Paris-kompatible Gebäude.	61

Tabellen

Tabelle 1: Auflistung zu untersuchende Gebäudevarianten:.....	13
Tabelle 2: Einordnung des Stromverbrauches eines Haushaltes in Abhängigkeit der Personenanzahl für ein Mehrfamilienhaus ohne elektrische Warmwasserbereitung in kWh/a (Quelle: VKW [14]).	21
Tabelle 3: Jahreswerte des Energieverbrauchs der untersuchten Varianten nach Anwendung – Absolutwerte (oberer Tabellenteil) sowie spezifische Werte pro m ² WNF.....	23
Tabelle 4: Erträge der unterschiedlichen Anlagen	25
Tabelle 5: Angebotspreise für die Gewerke Heizung/Sanitär für die Varianten 1, 2 sowie 4 und 5 (netto, spezifische Kosten auf WNF von Haus B bezogen, Preisstand 2019, Region Vorarlberg	26
Tabelle 6: Angebotspreise für das Gewerk Lüftung (Angaben netto, exemplarisch für Haus B, Preisstand 2019, Region Vorarlberg).....	27
Tabelle 7: Angebotspreise für Varianten der Dach-PV-Anlage (exemplarisch für Haus B; Angaben netto, Preisstand 2019, Region VorarlbergIntern: Bezug auf 496 m ² Wohnnutzfläche (Haus B).....	27
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einer Volleinspeisung und der Überschusseinspeisung aus Sicht des Eigentümers und Mieters (m ² Werte sind auf 496 m ² WNF bezogen, alle Angaben netto).....	33
Tabelle 9: Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einer Volleinspeisung und der Überschusseinspeisung aus Sicht des Eigentümers und Mieters mit Berücksichtigung der OeMAG Förderung (m ² Werte sind auf 496 m ² WNF bezogen, alle Angaben netto).....	34
Tabelle 10: Gebäudekenndaten (Haus B in Klammern).....	35
Tabelle 11: Gegenüberstellung der Annahmen in der Berechnung/Simulation und der vereinfacht linear korrigierten Annahmen.	36
Tabelle 12: Energierrelevante Kennwerte der Gebäudehülle.....	37
Tabelle 13: Energierrelevante Kennwerte der Haustechniksysteme von Haus A	38
Tabelle 14: Energierrelevante Kennwerte der Haustechniksysteme von Haus B	40
Tabelle 15: Kennwerte Energiebedarf und -verbrauch von Haus A	44
Tabelle 16: Kennwerte Energiebedarf und -verbrauch von Haus B	46
Tabelle 17: Zusammenstellung von Verbrauch, Ertrag, Eigendeckung, Netzbezug und Kostenersparnis bzw. Einspeisevergütung für Haus A im Jahr 2022 (Annahmen: Strompreis 0,16 €/kWh; Einspeisevergütung OeMAG 0,0767 €/kWh; ohne Zähler und Grundgebühren (brutto)).	57
Tabelle 18: Zusammenstellung von Verbrauch, Ertrag, Eigendeckung, Netzbezug und Kostenersparnis bzw. Einspeisevergütung für Haus A im Jahr 2022 (Annahmen: Strompreis	

0,16 €/kWh; Einspeisevergütung OeMAG 0,0767 €/kWh; ohne Zähler und Grundgebühren (brutto)).58

Literatur

- [1] Martin Ploss und Tobias Hatt, „Modellvorhaben ‚KliNaWo‘ Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau“, in *Themenband Session 5*, Dornbirn, 2017 [Online]. Verfügbar unter: https://www.energieinstitut.at/pdfviewer/economicum_themenband-5/. [Zugegriffen: 9. Dezember 2020]
- [2] Tobias Hatt und Ferdinand Sigg, „Energetische Optimierung der Energieversorgung hocheffizienter Mehrfamilienhäuser; Varianten der Haustechnik von zwei Mehrfamilienhäusern in Wolfurt.“, in *Themenband Session 6*, Dornbirn, 2017 [Online]. Verfügbar unter: https://www.energieinstitut.at/pdfviewer/economicum_themenband-6/. [Zugegriffen: 9. Dezember 2020]
- [3] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, und B. T. Griffith, „Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs“, *Build. Environ.*, Bd. 43, Nr. 4, S. 661–673, 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.10.027.
- [4] SIA 2024:2015, Hrsg., „Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- [5] Noah Pflugradt, *LoadProfileGenerator*. Chemnitz, 2017 [Online]. Verfügbar unter: <http://loadprofilegenerator.de/impressum/>
- [6] N. D. Pflugradt, „Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten“, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2016 [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-209036>
- [7] Statistik Austria, „Haushaltsprognose 2015: Haushalte 2011-2060 nach Größe und Bundesländern“, Bundesanstalt Statistik Österreich, Wien, Statistik, Dez. 2015.
- [8] Statistik Austria, „Bevölkerungsprognose 2015: Vorausberechnete Bevölkerungsstruktur für Vorarlberg 2014-2075 laut Hauptszenario“, Bundesanstalt Statistik Österreich, Wien, Statistik, Nov. 2015.
- [9] Landesstelle für Statistik, „Bevölkerungsstatistik; Verwaltungszählung vom 31. März 2016“, Amt der Vorarlberger Landesregierung, März 2016 [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vorarlberg.at/pdf/bevoelkerungmaerz2016.pdf>
- [10] „Die wichtigsten Arbeitsmarktkennzahlen 2017“, Arbeitsmarktservice Vorarlberg, Landesgeschäftsstelle, 2017 [Online]. Verfügbar unter: http://www.ams.at/_docs/Uebersichtstabelle_2017.pdf
- [11] Statistik Austria, „Census 2011: Gebäude- und Wohnungszählung, Ergebnisse zu Gebäuden und Wohnungen aus der Registerzählung“, Bundesanstalt Statistik Österreich, Wien, Statistik, 2013 [Online]. Verfügbar unter: http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=073980. [Zugegriffen: 24. Mai 2016]
- [12] Passivhaus Institut, *PHPP 9.2 Passivhausprojektierungspaket*. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2015 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.passiv.de>
- [13] M. Ploss, T. Hatt, C. Schneider, T. Roßkopf, und M. Braun, „Modellvorhaben ‚KliNaWo‘ Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau; Monitoringbericht Juli 2019; Beschreibung der Realisierungsvariante/ abgerechnete Kosten / Ergebnisse Monitoring“, Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn, Juli 2019 [Online]. Verfügbar unter: https://www.energieinstitut.at/wp-content/uploads/2019/08/20190729_KliNaWo_Monitoringbericht.pdf. [Zugegriffen: 21. Januar 2020]
- [14] VKW, „Infoblatt: Stromverbrauch von Haushalten im Vergleich“. Vorarlberger Kraftwerke AG, Februar 2011.
- [15] Statistik Austria, „Durchschnittlicher Stromverbrauch der Haushalte 2012 nach Verbrauchskategorien“, Statistik Austria, Wien, Mai 2013 [Online]. Verfügbar unter:

https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/index.html

- [16] M. Ploss u. a., *Low-Cost nZEB; Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser*. Dornbirn: Eigenverlag, 2022 [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieinstitut.at/pdfviewer/Low-Cost-nZEB-2022/#page=10>. [Zugegriffen: 20. Dezember 2022]
- [17] Meteotest, *Meteonorm*. Bern: Meteotest, 2017 [Online]. Verfügbar unter: www.meteotest.ch
- [18] Passivhaus Institut, *PHPP 10.1 Passivhausprojektierungspaket*. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2021 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.passiv.de>