



economicum

Leistbares und energieeffizientes Wohnen

THEMENBAND SESSION 5

Forschung konkret
Wirtschaftlichkeit und
höchste Energieeffizienz



Energieinstitut Vorarlberg

economicum

Themenband Session 5
vom 3.5.2016

economicum - eine Veranstaltungsreihe des Energieinstitut Vorarlberg

economicum - Struktur

Im Rahmen der 2014 vom Energieinstitut Vorarlberg initiierten Veranstaltungsreihe economicum - leistbares und energieeffizientes Bauen - werden die Aspekte Leistbarkeit und Energieeffizienz für die Hauptzielgruppen der Architekten, Fachplaner, Bau-träger und Energieberater aufbereitet. Die Veranstaltungsreihe besteht aus jährlich zwei Veranstaltungen.

Die Veranstaltungsreihe wurde konzipiert, da die Diskussion um die weitere Entwicklung des Wohnungsbaus in Vorarlberg, Österreich und anderen europäischen Ländern, angesichts der überproportional steigenden Bau- und Wohnkosten stark vom Thema „Leistbarkeit“ geprägt wird und neben Kostentreibern wie den Grundstückspreisen, Baunutzungszahlen, Stellplatzanforderungen, Barrierefreiheit und andere, auch das Thema der Energieeffizienz sehr stark unter Kostenaspekten diskutiert wird.

Wie statistische Auswertungen zeigen, ist vor dem Hintergrund der Kostendiskussion der Trend zur Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden in den letzten drei Jahren zum Erliegen gekommen. Sollen jedoch die internationalen Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens, die EU-Ziele und die regionalen Ziele der Energieautonomie Vorarlberg erreicht werden, so muss die energetische Qualität von Neubauten und Sanierungen weiter gesteigert werden. Dies wird nur möglich sein, wenn es gelingt, den prognostizierten niedrigen Energiebedarf auch in der Praxis zu erreichen und die Mehrkosten so weit zu minimieren, dass energieeffiziente Gebäude wirtschaftlich errichtet und betrieben werden können. Wie beispielhafte Projekte zeigen, ist dies schon heute möglich, die Normalität ist es jedoch noch nicht.

economicum - Ziele

Ziel des economicum ist es daher beispielhafte Projekte, Konzepte und Planungsmethoden vorzustellen und so zu einem Erfahrungsaustausch der Vorarlberger Akteure mit Fachleuten aus anderen Bundesländern und dem Ausland beizutragen.

Im vorliegenden Themenband sind die Inhalte der fünften Session sowie weiterführende Informationen zum Thema aufbereitet.

Aktuelle Informationen finden sich unter:
www.energieinstitut.at/economicum/

Vorwort



Wohnen gehört für die Menschen zum Grundbedürfnis. Über dieses Grundbedürfnis hinaus bedeutet Wohnen und der Besitz von Wohnraum für viele in unserem Land Großzügigkeit, beste Qualität, höchster Komfort durch Lage und Ausstattung. Teilweise ist Wohnraumbeschaffung auch eine finanzielle Absicherung und rutscht ins spekulative Handeln ab. Im Spektrum zwischen den allernötigsten Grundvoraussetzungen und dem gehobenen Segment spielt sich die Diskussion ab, was denn dieses Gut kosten darf und welche Qualität es mindestens haben soll bzw. muss.

Wie bei allen kaufbaren oder mietbaren Gütern hinterlegt jeder Käufer/jede Käuferin seine individuellen Werte. Diese Werte, gepaart mit den finanziellen Möglichkeiten, entscheiden den Wohnungs- bzw. Hauskauf.

Obwohl ein Kaufpreis meist fix ist, ist lange noch nicht klar, was das Wohnen insgesamt über die Jahre kosten wird und ob während der Nutzung das Wohnen „leistbar“ bleiben wird. Da gibt es viele Unbekannte wie Zinsentwicklung, die Einkommensentwicklung, die Familienentwicklung, die Energiekostenentwicklung oder die möglichen Änderungen im Umfeld des Gebäudes. Wer möglichst „sicher“ in die lange Nutzungszeit eines Hauses oder einer Wohnung investieren möchte, sollte jene Risiken, die sich zum Anschaffungszeitpunkt reduzieren lassen, auch zu diesem Zeitpunkt berücksichtigen. Dazu gehört aus Sicht des Energieinstitut Vorarlberg die Qualität der Gebäudehülle, nicht nur aus Komfortgründen sondern auch aus Gründen der langen Nutzungszeit. Denn: je länger ein Erneuerungszyklus eines Elementes ist und je teurer dieses Element ist, umso höher muss die Qualität sein und umso mehr Hirnschmalz ist für die Auswahl aufzuwenden.

Im economicum wird deshalb in viele Bereiche der Gebäudebetrachtung in diese Tiefe vorgestoßen. Es werden Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt und Hilfestellungen für eine erweiterte Wertebildung gegeben. Damit wird die Sache nicht weniger komplex, jedoch der Entscheidungspfad ist nachvollziehbarer und stützt sich auf Fakten. Wir sind überzeugt, dass wir mit diesen Beiträgen eine fundierte Entscheidung unterstützen.

DI Josef Burtscher
Geschäftsführer Energieinstitut Vorarlberg

Session 5 Dienstag, 3. Mai 2016

Tagesordnung

9.00 Begrüßung und Moderation

Helmut Krapmeier

9.15 Bernhofergründe Kuchl:
Vergleich verschiedener Konstruktionsarten
und simulationsgestützte Optimierung
eines Mehrfamilienhauses

Daniel Ruepp

10.00 Diskussion

10.10 Forschungsprojekt KliNaWo:
Ziele, Methodik und wichtigste Ergebnisse

Martin Ploss

10.45 Kaffeepause

11.15 Forschungsprojekt KliNaWo:
Ergebnisse im Detail, Energieeffizienz,
Errichtungs- und Lebenszykluskosten

Tobias Hatt

11.50 Diskussion

12.15 Mittagspause

13.45 Neue Heimat Tirol: Wohnanlage Vögelebichl -
erstes Passivhaus Plus

Elmar Draxl

14.30 Diskussion

15.10 Impulsvortrag und Podiumsdiskussion zu
„Kostengünstige Lösungen für effiziente
und behagliche Lüftung“

Sabine Erber, Elmar Draxl, Christof Drexel

16.00 Veranstaltungsende

Themenband 5

Inhaltsverzeichnis

- 6 **Martin Ploss und Tobias Hatt**
Modellvorhaben KliNaWo -
klimagerechter nachhaltiger Wohnbau
-
- 60 **Rainer Pfluger, Gabriel Rojas, Kristin Bräunlich**
Kostengünstige Komfortlüftung -
Planung, Betrieb und Wartung
-
- 78 **Daniel Ruepp**
Forschungsprojekt Bernhofergründe Kuchl,
simulationsgestützte Optimierung eines
Mehrfamilienhauses
-
- 88 **Elmar Draxl, Engelbert Spiß**
Passivhaus Plus-Wohnbau in Innsbruck,
das Netto-Null-Gebäude am Vögelebichl in Innsbruck
-
- 96 **Rainer Vallentin**
Neue Bewertung von Passivhäusern
gemäß PER-Methode

Modellvorhaben „KliNaWo“

Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau



Martin Ploss

Martin Ploss studierte Architektur und plante zwischen 1995 und 2005 im eigenen interdisziplinären Architektur- und Ingenieurbüro in Kaiserslautern Passivhausprojekte. In Forschungsprojekten analysierte er die energetische Performance und die Wirtschaftlichkeit von Wohngebäuden im Passivhausniveau. Seit 2005 ist er Mitarbeiter des Energieinstitut Vorarlberg, seit 2011 leitet er den Bereich energieeffizientes und ökologisches Bauen.



Tobias Hatt

Nach seiner Lehre als Zimmermann und nachfolgendem Studium des Bauingenieurwesens arbeitete Tobias Hatt fünf Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter an der Universidad del Bio-Bio in Chile, wo er auch zum Thema Passivhäuser in Chile promovierte. Er begleitete auch die Errichtung des ersten Passiv-Wohnhauses in Holzbauweise in Chile und forschte im Bereich des energieeffizienten Bauens und dessen Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten. Seit 2015 arbeitet Tobias Hatt im Bereich energieeffizientes und ökologisches Bauen im Energieinstitut Vorarlberg.

Inhalt

8	Zusammenfassung
<hr/>	
11	1. Ausgangslage
12	1.1 Sind energieeffiziente Wohnungsneubauten energieeffizient?
14	1.2 Sind energieeffiziente Gebäude zu teuer?
15	1.3 Bauliche Mehrkosten versus Lebenszykluskosten
16	1.4 Lebenszykluskosten versus Leistbarkeit
16	1.5 Wirtschaftlichkeit und der Einfluss anderer nicht monetärer Entscheidungsfaktoren
<hr/>	
18	2. Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz in der Praxis - Modellvorhaben „KliNaWo“
18	2.1 Zielsetzung
19	2.2 Vorgehensweise
20	2.3 Energetisch-wirtschaftliche Optimierung des Entwurfs
<hr/>	
24	3. Variantenplanung Konstruktion und Haustechnik
24	3.1 Festlegung der zu untersuchenden Varianten
27	3.2 Energiebedarfsberechnungen
28	3.3 Werkplanung
30	3.4 Ökologische Bewertung der Bauweisen
<hr/>	
32	4. Randbedingungen und Kostenermittlung der Varianten
32	4.1 Modulare Ausschreibung
33	4.2 Heutige Energiepreise und Energiepreissteigerungen
34	4.3 Wartungskosten
36	4.4 Ersatzinvestition für Erneuerung
<hr/>	
37	5. Ergebnisse der Variantenstudie
37	5.1 Bauwerks- und Errichtungskosten des Gebäudes
40	5.2 Kosten von Bauteilen und Haustechnikkomponenten
43	5.3 Lebenszykluskosten des Gebäudes
46	5.4 Die wirtschaftlichsten Varianten
50	5.5 Sensitivitätsanalyse Energiepreissteigerung
<hr/>	
52	6. Auswahl der Variante für den Bau
52	6.1 Zur Realisierung ausgewählte Variante
53	6.2 Einfluss der Konstruktionsart
54	6.3 Wirtschaftlichkeit der Komfortlüftung
<hr/>	
55	7. Zwischenresümee und derzeitiger Stand
55	7.1 Derzeitiger Stand der Realisierung und Ausblick
56	7.2 Beteiligte und Projektfinanzierung
57	7.3 Wichtigste Erkenntnisse
<hr/>	
58	Quellen und Literatur

Modellvorhaben „KliNaWo“

Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau

Das Modellvorhaben KliNaWo wurde als Projekt des Comet-Zentrums ALPS in Innsbruck gefördert. COMET Projekte werden durch die Bundesministerien BMVIT und BMWFV sowie durch das Land Vorarlberg gefördert und durch die FFG abgewickelt.



Zusammenfassung

Zu hohe Mehrkosten, mangelnde Wirtschaftlichkeit und zu hohe reale Verbräuche - unter diesen drei Punkten lässt sich die Hauptkritik am energieeffizienten Bauen zusammenfassen. Mangels nachvollziehbarer Daten wird besonders die Diskussion um Kosten und Wirtschaftlichkeit zum Teil sehr emotional geführt. Angesichts der anhaltenden Diskussion ist der Trend zu höheren energetischen Qualitäten in Österreich wie in Deutschland in den vergangenen Jahren fast zum Erliegen gekommen.

Hauptziel des 2012 von Energieinstitut Vorarlberg, der gemeinnützigen Bauvereinigung VOGEWOSI und der Arbeiterkammer Vorarlberg gestarteten Modellvorhabens „KliNaWo“ (Klimagerechter nachhaltiger Wohnbau)^a ist es daher, die Diskussion zu versachlichen, indem belastbare Daten zu den Mehrkosten energieeffizienter Wohngebäude-Neubauten, zu ihrer Wirtschaftlichkeit und zu den tatsächlichen Energieverbräuchen in einem realen Bauprojekt bestimmt und nachvollziehbar aufbereitet werden.

Zur Projektdurchführung wurde eine Vorgehensweise gewählt, die sich in einem abgeschlossenen Modellvorhaben gut bewährt hat [1] und in den vergangenen Jahren methodisch deutlich weiterentwickelt wurde [2], [3]: Für einen zunächst energetisch-wirtschaftlich optimierten Gebäudeentwurf wird eine Vielzahl an Ausführungsvarianten in unterschiedlichen Energieniveaus und Konstruktionsarten sowie mit unterschiedlichen Haustechnikkonzepten geplant und modular ausgeschrieben. Abbildung 1 zeigt den „KliNaWo“ Baukörper vor und nach der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung des Entwurfs.

^aDas Modellvorhaben KliNaWo wurde als Projekt des Comet-Zentrums ALPS in Innsbruck gefördert. COMET Projekte werden durch die Bundesministerien BMVIT und BMWFV sowie durch das Land Vorarlberg gefördert und durch die FFG abgewickelt.

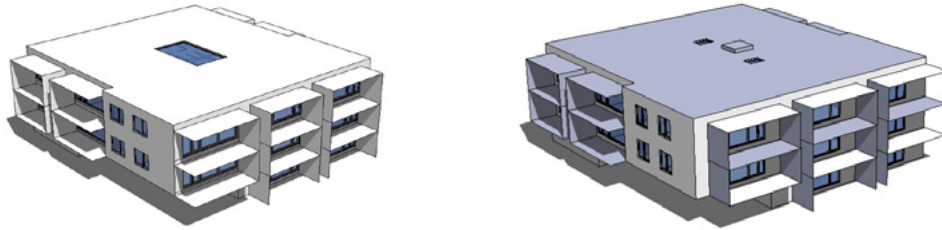


Abbildung 1: Gebäudeentwurf vor (links) und nach der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung; Arch. Walser + Werle, Feldkirch, Darstellung PHI Innsbruck mit designPH.

Obwohl im Rahmen der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung nur kleinere Veränderungen vorgenommen wurden (Verringerung der Fensterflächen, Lage der Wärmeerzeugung und -speicherung sowie des Lüftungsgerätes...), konnten Einsparungen von etwa 50-75 EUR/m²_{WNF} erzielt werden. Für den optimierten Entwurf wurden die in Abbildung 2 dargestellten Ausführungsvarianten geplant und in Bezug auf ihre energetische Qualität, Kosten und Wirtschaftlichkeit verglichen.

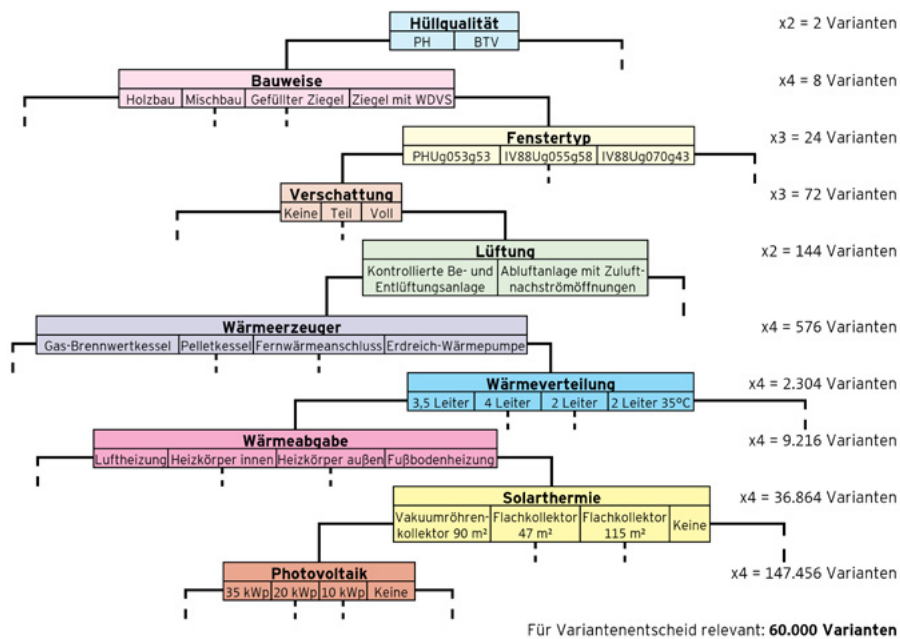


Abbildung 2: Matrix der untersuchten Gebäude- und Haustechnikvarianten

Für alle Varianten werden in automatisierten, Makro-basierten Berechnungen die wichtigsten Energiekennwerte mit validierten Rechenwerkzeugen bestimmt. Auf der Basis der Angebotspreise, der berechneten Energiebedarfe sowie der Kosten für Wartung und Instandhaltung werden für alle Varianten die Lebenszykluskosten (LZK) über einen festgelegten Betrachtungszeitraum ermittelt. Realisiert wird die Variante, mit der ein zuvor definiertes Energieniveau am wirtschaftlichsten erreicht werden kann. Energetische Performance und Behaglichkeit des Gebäudes werden anschließend messtechnisch erfasst und bewertet.

Kostenermittlung und Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen die folgenden Kernergebnisse:

- **Das Energieniveau hat einen geringen Einfluss auf die Bauwerkskosten. Die Energieeffizienz ist kein wesentlicher Kostentreiber am Bau.**
Die Mehrkosten sehr effizienter Varianten, deren Primärenergiebedarf um mehr als 70% unter der Mindestanforderung der Bautechnikverordnung (BTV) liegen, betragen etwa 4 bis 6%. Die im Projekt KliNaWo sehr detailliert ermittelten Mehrkosten stimmen sehr gut mit den Angaben innovativer Bauträger überein. Die Mehrkosten der realisierten Variante liegen bei 3,0% gegenüber der Variante nach BTV.
- **Die kostenoptimalen Varianten haben sehr gute Energiekennwerte**
Die Kostenoptima des Primärenergiebedarfs und der CO₂ Emissionen sind sehr flach ausgeprägt: Der kostenoptimale Bereich des Primärenergiebedarfs_{OIB(2011)} liegt bei etwa 55 bis 88 kWh/m²_{BGF}a (rote Punkte = wirtschaftlichstes Prozent aller 60.000 untersuchten Varianten). Das Kostenoptimum liegt damit bei weniger als der Hälfte des Anforderungswertes des Nationalen Plans für das Jahr 2021. Das Projekt KliNaWo zeigt damit, dass Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit keine entgegengesetzten Strategien sind, sondern sich sehr gut ergänzen können. Kostenoptimale Gebäude können mit unterschiedlichen Energiekonzepten erreicht werden, solange die Hülle sehr effizient ist.

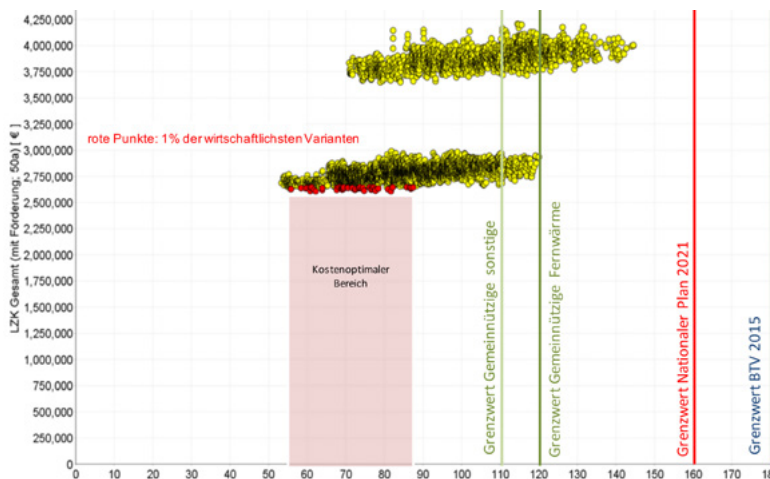


Abbildung 3: Lebenszykluskosten aller Varianten für Gemeinnützige Bauträger (unter Berücksichtigung der WBF für Gemeinnützige und der Energieförderung) über dem Primärenergiebedarf_{OIB(2011)}

- **Die energetisch-wirtschaftliche Optimierung und die Bewertung nach den Lebenszykluskosten hat sich sehr gut bewährt**
Die energetisch-wirtschaftliche Optimierung und die Variantenauswahl nach Lebenszykluskosten hat sich im Projekt KliNaWo als sinnvoll erwiesen und sollte verstärkt als Entscheidungskriterium herangezogen werden. Die neu entwickelten Methoden und Berechnungsverfahren sollten für zukünftige Projekte angepasst und einer breiteren Zielgruppe zugänglich gemacht werden, damit die Bewertung nach Lebenszykluskosten vermehrt zur Anwendung kommt.

1. Ausgangslage

Auf der Grundlage positiver Erfahrungen aus Demonstrations- und Forschungsprojekten wurden die Mindestanforderungen an die energetische Gebäudequalität in Österreich wie in Deutschland und den meisten europäischen Ländern in den letzten 30 Jahren kontinuierlich erhöht.

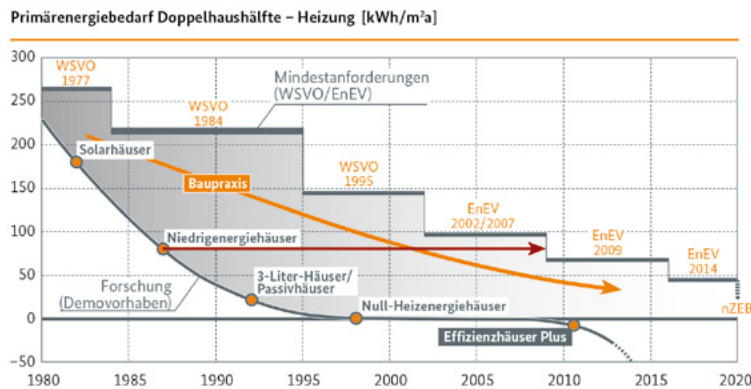


Abbildung 4: Entwicklung des Primärenergiebedarfs bei Erfüllung der Mindestanforderungen an die energetische Qualität von Wohngebäuden im Vergleich zu den Werten von Demovorhaben [5].

Abbildung 4 zeigt exemplarisch am Beispiel Deutschlands den zeitlichen Verlauf des Primärenergiebedarfs (PEB) von Wohngebäuden, die die Mindestanforderungen an die energetische Gebäudequalität erfüllen. Zum Vergleich sind auch die in Demo- und Forschungsvorhaben erreichten Werte und die in der Baupraxis üblicherweise erreichten Energieniveaus dargestellt. Wie zu erkennen, entsprechen die gesetzlichen Mindestanforderungen in etwa den Standards, die ca. 30 bis 40 Jahre zuvor in Demonstrationsvorhaben erfolgreich getestet wurden. Dies bedeutet, dass die heutigen Mindestanforderungen einem Energieniveau entsprechen, das schon vor 30 bis 40 Jahren möglich war und somit veraltet sind.

Die Kritik: kaum Einsparung und viel zu teuer

Kritik an der Verschärfung der energetischen Mindestanforderungen wird schon seit vielen Jahren geäußert, seit etwa 2010 wird die Sinnhaftigkeit weiterer Verschärfungen zunehmend kontroverser diskutiert. Im Zentrum der Kritik stehen zumeist die folgenden Aspekte:

- Überschreitung der berechneten Energiebedarfe im realen Gebäudebetrieb
- Mehrkosten von Energieeffizienzmaßnahmen und mangelnde Wirtschaftlichkeit

Die Diskussion wird in Vorarlberg und Gesamt-Österreich sehr emotional geführt, ein Grund für die Emotionalisierung ist der Mangel an detailliert aufbereiteten, nachvollziehbaren Daten zum Thema Mehrkosten und Wirtschaftlichkeit energieeffizienter Wohngebäude. Ein weiterer Grund sind sehr widersprüchliche Angaben zu ihrem realen Energieverbrauch.

Um die Diskussion um Kosten und Wirtschaftlichkeit energieeffizienter Gebäude zu versachlichen wurde Ende 2012 das Modellvorhaben KliNaWo gestartet. Schwerpunkt des Projekts ist der Vergleich von Varianten unterschiedlicher Energieniveaus zum Bau eines hocheffizienten Mehrfamilienhauses und die Auswahl der zu realisierenden Variante auf der Grundlage der Lebenszykluskosten. Dies bedeutet, dass neben den Investitionskosten auch die Betriebskosten wie Energie-, Wartungs- oder Instandhaltungskosten berücksichtigt werden.

Also die Kosten, welche den Erbauer und Betreiber über die Lebensdauer des Gebäudes erwarten. Energieeffiziente Gebäude sparen im Betrieb Kosten und können so die geringen Mehrkosten ausgleichen und somit im Gesamten wirtschaftlicher sein als ineffiziente Gebäude.

1.1 Sind energieeffiziente Wohnungsneubauten wirklich energieeffizient?

In einer zunehmenden Anzahl an Veröffentlichungen wird in den vergangenen Jahren kritisiert, dass der reale Energieverbrauch hocheffizienter Gebäude deutlich höher sei, als die vorausgerechneten Werte. So kommt etwa eine Studie des Verbandes der gemeinnützigen Bauvereinigungen (gbv) in Österreich zu dem Ergebnis, der reale Energieverbrauch der analysierten hocheffizienten Gebäude liege im Mittel deutlich (wieviel? 2x „deutlich“) über dem berechneten Bedarf während der Verbrauch älterer Gebäude zumeist unter dem vorausgerechneten Wert liege [6]. Der Befund stimmt für die in der gbv-Studie berücksichtigten Gebäude wie auch für andere effiziente Gebäude, die den vorausgerechneten Bedarf nicht erreichen. Der Großteil derartiger Veröffentlichungen hat gemein, dass die realen Energieverbräuche mit den Ergebnissen der Energieausweis-Berechnungen verglichen werden, denen Norm-Nutzungsbedingungen zugrunde liegen und die dezidiert nicht zur Prognose des realen Verbrauchs, sondern zur Klassifizierung von Gebäuden dienen.

Vergleicht man hingegen die realen Verbräuche hocheffizienter Gebäude mit den Werten, die mit validierten Berechnungsverfahren unter Verwendung projektspezifischer, realistischer Randbedingungen ermittelt wurden, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Zahlreiche messtechnisch begleitete Mehrfamilienhaus-Projekte zeigen, dass auch in der Praxis spezifische Endenergieverbräuche_(Heizung+WW) von etwa 35 bis 50 kWh/m²_{WNF}a mit Gas-, Bio- oder Fernwärmeheizung erreicht werden [7]-[9]. Der Endenergieverbrauch_(Heizung+WW) hoch effizienter, wärmepumpenbeheizter Gebäude liegt bei 10 - 15 kWh/m²_{WNF}a [10].

Das in Abbildung 5 dargestellte, derzeit energieeffizienteste Vorarlberger MFH-Projekt mit Wärmepumpe hat einen gemessenen Endenergieverbrauch_(Heizung+WW) von unter 10 kWh/m²_{WNF}a [11]. Dies entspricht 6,7 kWh/m²_{BGF}a.



Abbildung 5: Wohnanlage Langenegg Unterstein, Morscher, Architektur H. Kaufmann

Als weiteres Beispiel für die o.g. Projekte mit sehr niedrigem Energieverbrauch zeigt Abbildung 6 den gemessenen Heizwärmeverbrauch der über 1.200 mit Fernwärme aus einem Biomasse-BHKW beheizten Wohneinheiten der Passivhaussiedlung Bahnstadt Heidelberg.

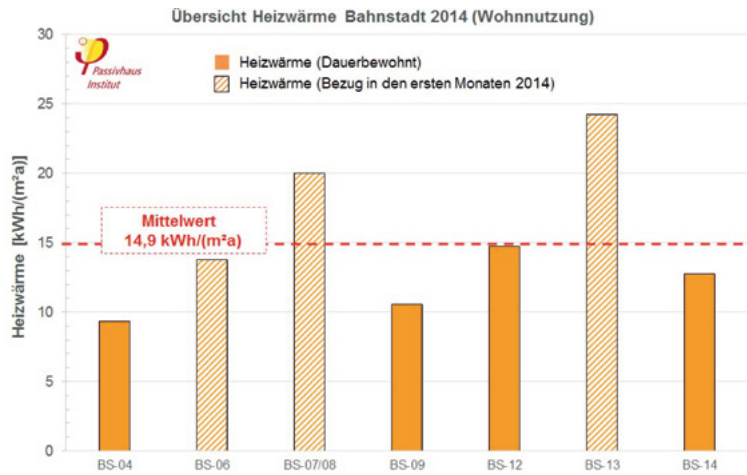


Abbildung 6: Messwerte Heizwärmeverbrauch Passivhaussiedlung Bahnstadt Heidelberg [9]

Der Mittelwert des gemessenen Heizwärmeverbrauchs liegt mit $14,9 \text{ kWh/m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a}$ nur knapp über dem mit dem PHPP vorausgerechneten Heizwärmebedarf.

Der mittlere Endenergieverbrauch $_{(\text{Heizung}+\text{WW})}$ der Siedlung liegt bei etwa $50 \text{ kWh/m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a}$.

Dass die stetige Verschärfung der Mindestanforderungen auch bezogen auf den gesamten Wohngebäudebestand zu niedrigeren Verbräuchen führt, zeigt die folgende Abbildung. Dargestellt sind die gemessenen Energieverbräuche von 110.000 öl- und gasbeheizten Mehrfamilienhäusern in Deutschland. Jeder Punkt repräsentiert den für ein Gebäude gemessenen realen Energieverbrauch. Als Linien sind der Median sowie die 98%, 90% und die 10%-Quantile dargestellt. Bei den Daten handelt es sich um die klimabereinigten Messdaten eines großen Energieverbrauchs-Ableseunternehmens.

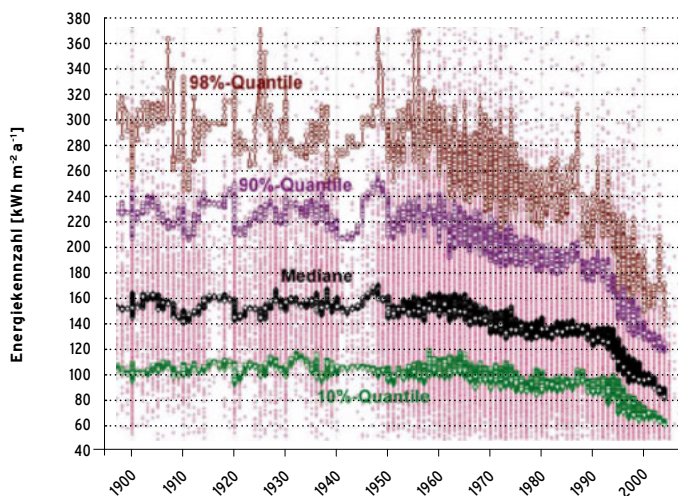


Abbildung 7: gemessene Energieverbräuche von Mehrfamilienhäusern in Deutschland in Abhängigkeit vom Baujahr [12].

Wie zu erkennen ist, liegt der Median der gemessenen Energieverbräuche der Gebäude der Baujahre 1900 bis 1964 bei etwa $155 \text{ kWh/m}^2_{\text{WF}}\text{a}$. Die Werte der Gebäude der Baujahre 1965 bis 1976 sinken auf etwa $145 \text{ kWh/m}^2_{\text{WF}}\text{a}$, 1990 beträgt der Median $136 \text{ kWh/m}^2_{\text{WF}}\text{a}$.

Die stärksten Rückgänge sind etwa 1996 und 2003 zu verzeichnen und damit knapp nach der Verschärfung der energetischen Mindestanforderungen in WSV 95 und erster EnEV. Der Median der 2004 bis 2006 errichteten Gebäude liegt bei $85 \text{ kWh/m}^2_{\text{WF}}\text{a}$. Wie die Grafik ebenfalls zeigt, sinkt die Standardabweichung: lag sie bei Gebäuden der Baujahre bis 1960 noch bei etwa $50 \text{ kWh/m}^2_{\text{WF}}\text{a}$, so liegt sie aktuell bei ca. $25 \text{ kWh/m}^2_{\text{WF}}\text{a}$. Die Abweichungen zwischen den Gebäuden eines Baualters werden geringer. Die dargestellten Beispiele und viele weitere innovative Projekte zeigen, dass der Energiebedarf hocheffizienter Gebäude mit hoher Genauigkeit vorausberechnet werden kann.

1.2 Sind energieeffiziente Gebäude zu teuer?

Während Daten zum realen Energieverbrauch effizienter Gebäude zumindest für eine große Anzahl an Forschungs- und Demonstrationsprojekten vorliegen, sind im gesamten deutschsprachigen Raum nur sehr wenige Studien mit detaillierten, nachvollziehbar aufbereiteten Daten zu den Mehrkosten effizienter Gebäude verfügbar. Unter den wenigen verfügbaren Studien sind zwei unterschiedliche methodische Herangehensweisen vorherrschend:

1. Vergleich einer statistisch signifikanten Anzahl an Gebäuden unterschiedlicher energetischer Niveaus, von denen angenommen werden kann, dass sie bezüglich ihrer sonstigen Ausstattungsmerkmale ähnlich sind (Methodik 1)
2. Vergleich energetisch unterschiedlicher Ausführungsvarianten eines ansonsten identischen Gebäudes (Methodik 2)

Die Ergebnisse einiger Studien nach beiden Herangehensweisen sind nachfolgend zusammengefasst.

a. Studie Österreich (Methodik 1)

Eine Studie des Verbandes der gemeinnützigen Wohnbauvereinigungen (gbv) gibt die mittleren Mehrkosten von 55 Mehrfamilienhausprojekten mit einem Heizwärmebedarf_{OIB} von max. $12 \text{ kWh/m}^2_{\text{BGF}}\text{a}$ gegenüber solchen mit einem Heizwärmebedarf_{OIB} von $31 - 40 \text{ kWh/m}^2_{\text{BGF}}\text{a}$ mit 6,73% an [6]. Die Projekte befinden sich in ganz Österreich, die regionalen Baukostenunterschiede wurden egalisiert.

b. Studie Hamburg (Methodik 1)

Eine Studie zum Kosteneinfluss verschiedener Faktoren auf den geförderten Mietwohnbau in Hamburg kommt zu dem Ergebnis, dass es keinen signifikanten Einfluss des Energieniveaus auf die Baukosten gibt [13]. Untersucht wurden 120 geförderte Mehrfamilienhaus-Projekte aus den Jahren 2011 bis 2014 mit insgesamt 4.800 Wohneinheiten.

c. Studie Arge für zeitgemäßes Bauen (Methodik 2)

In einer u.a. im Auftrag des Bundesverbandes Deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V. (GdW) erstellten Studie der Arge für zeitgemäßes Bauen werden die Kosten von Ausführungsvarianten unterschiedlicher Energieniveaus an einem hypothetischen Muster-Mehrfamilienhauses verglichen [14]. Neben dem Einfluss erhöhter energetischer Anforderungen wird auch der Einfluss anderer Kostentreiber wie Schallschutz, Normen etc. quantifiziert.

Als Kostenquelle nennt die Studie

- Kostenauswertungen und Preisdatenbanken der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.
- Untersuchungsergebnisse aus dem bundesweiten Bauforschungsbereich der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. auf Grundlage von repräsentativen Kostenerhebungen in Zusammenarbeit mit der Wohnungswirtschaft

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, die Ausführung des Gebäudes im Energieniveau EnEV 2014 sei etwa 6,5% teurer als nach WSV0 1995. Für die Ausführung im Standard KfW 40 werden Mehrkosten von 26,3% gegenüber den Mindestanforderungen der EnEV 2014 genannt. Die energetische Qualität von KfW 40 Gebäuden entspricht in etwa der Qualität von Passivhäusern. Die wohnflächenspezifischen Mehrkosten vom Niveau EnEV 2014 zum Niveau KfW 40 werden mit 351 €/m² angegeben. Die Studie wird auch im Bericht der Baukostensenkungskommission des Bundesumweltministeriums zitiert und beeinflusst dessen Ausarbeitungen zum Thema der Mehrkosten energieeffizienter Bauweisen und zu deren Wirtschaftlichkeit maßgeblich [15].

d. Studie Wien (Methodik 2)

In einer Studie über vier detailliert untersuchte, zwischen 2006 und 2010 in Wien errichtete Passivhausprojekte werden die Mehrkosten mit knapp 4 bis 6% gegenüber dem Standard Niedrigenergie angegeben [16]. In der Studie werden auch die Kosteneinflüsse einzelner Bauteile und Haustechnikkomponenten detailliert analysiert.

e. Sonstige Kostenangaben

Die gleiche Größenordnung, etwa 3 - 5% Mehrkosten geben auch innovative Bauträger wie die ABG, Frankfurt, die Neue Heimat Tirol und die Innsbrucker Immobilien GmbH für Ihre Passivhaus-Projekte an. Detaillierte Kostenauswertungen sind für diese Projekte jedoch nicht öffentlich verfügbar.

Wie der Vergleich der dargestellten Studien zeigt, schwanken bereits die Angaben zu den Mehrkosten energieeffizienter Gebäude sehr stark, noch stärker schwanken die Angaben zu Lebenszykluskosten.

1.3 Bauliche Mehrkosten versus Lebenszykluskosten

Die baulichen (Mehr)Kosten energieeffizienter Gebäude sind ein wichtiges Zwischenergebnis bei der Bewertung ihrer Wirtschaftlichkeit, aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsvergleiche sind jedoch nur auf der Basis der Lebenszykluskosten bzw. der Gesamtkosten über einen vorab zu definierenden Betrachtungszeitraum möglich. Für Vergleiche der Wirtschaftlichkeit verschiedener Gebäudeenergieniveaus sind neben den Investitionskosten (z.B. Summe der Errichtungskosten) zumindest die Kosten für Wartung und Instandhaltung sowie die Energiekosten (sowie ggf. die Erträge aus Energieerzeugung, die ins Netz eingespeist werden) zu betrachten. Als Methode eignet sich die Kapitalwertmethode, Restwerte von Bauteilen sollten ebenso berücksichtigt werden wie Ersatzinvestitionen. Zu beachten ist ferner die Differenzierung der Lebensdauern verschiedener Bauteile und Haustechnikkomponenten.

Die Berechnungsmethodik ist in europäischen und österreichischen Normen beschrieben [17], zur Berechnung stehen EDV gestützte tools wie das vom Energieinstitut Vorarlberg entwickelte, Excel-basierte „econ calc“ [18] zur Verfügung.

Die Bedeutung von Lebenszykluskostenberechnungen zeigt sich auch darin, dass diese inzwischen in der Europäischen Gebäuderichtlinie verankert sind [19]. In der Richtlinie und den nachgeordneten Verordnungen ist beschrieben, dass zur Festlegung der nationalen

Mindestanforderungen an die Effizienz von Gebäuden (OIB RL 6, EnEV...) Berechnung des kostenoptimalen Energieniveaus (Lebenszykluskostenberechnungen) durchgeführt werden müssen.

Studien, in denen die Wirtschaftlichkeit hocheffizienter Gebäude im Vergleich zu Gebäuden in üblichem Energieniveau untersucht und nachvollziehbar hergeleitet wird, sind sehr selten und aufgrund der Vielzahl notwendiger Annahmen nur bedingt vergleichbar.

Um belastbare Daten zur Wirtschaftlichkeit von Wohngebäude-Neubauten zu erlangen, wurde das Modellvorhaben KliNaWo durchgeführt.

1.4 Lebenszykluskosten versus Leistbarkeit

Obwohl der Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Energieniveaus auf der Basis der Lebenszykluskosten die betriebswirtschaftliche Realität abbildet, werden nach wie vor häufig Gebäude in suboptimalen Energieniveaus realisiert.

Erster Grund für diese Tatsache ist, dass die in der Anschaffung meist leicht teureren, energieeffizienten Varianten oft nicht leistbar (=finanzierbar) für die Bauherren sind, obwohl sie im Lebenszyklus (bzw. im vordefinierten Betrachtungszeitraum von beispielsweise 30 bis 50 Jahren) zu den niedrigsten Gesamtkosten führen. Dies liegt darin begründet, dass viele Bauherren ihren Finanzierungsrahmen voll ausschöpfen müssen, so dass Banken Mehrkosten für Effizienz in der Regel nicht mehr finanzieren. Ein Weg aus diesem Missstand wäre die Berücksichtigung realistischer Energiekosten bei der Ermittlung der monatlichen Belastung: benötigt ein Kunde in einem effizienten Gebäude pro Monat nur 20 statt 80 €, so kann er den Differenzbetrag zur Tilgung eines höheren Kredits einsetzen. Eine derart veränderte Vorgehensweise bei der Ermittlung der monatlichen Belastung brächte Vorteile für Bank (höherer Kreditbetrag), Kunde (höherwertiges Gebäude zu gleichen Lebenszykluskosten) und Umwelt.

Ein zweiter Grund für die Realisierung suboptimaler energetischer Qualitäten ist das Nutzer-Investor-Dilemma: In Mietwohnungen trägt üblicherweise der Vermieter/Besitzer die Investitions-Mehrkosten höherer energetischer Qualitäten während der Mieter in Form niedrigerer Energiekosten profitiert.

Für hocheffiziente Gebäude wurden inzwischen Modelle erfolgreich getestet, die geeignet sind, das Nutzer-Investor-Dilemma zu beseitigen oder zumindest abzumildern. In einer steigenden Anzahl an Gebäuden werden seit einigen Jahren Warmmiet- oder Flatrate-Modelle umgesetzt, die vor etwa 10 Jahren erstmals an einzelnen Forschungsprojekten getestet wurden [20].

In diesen Projekten wurden Warmmietmodelle für Heizung bzw. Heizung und Warmwasser getestet, inzwischen wurde der Abrechnungsrahmen in Pilotprojekten auf den Haushaltsstrom ausgedehnt. Die Wohnungen wurden dazu vom Investor mit sehr effizienten Geräten ausgestattet. In den Abrechnungsrahmen werden zunehmend auch die Erträge gebäudeintegrierter PV-Anlagen mit einbezogen („Mieterstrom-Modell“) [21], [22]. Einzelne innovative Bauträger wie die ABG Frankfurt setzen derartige Modelle immer häufiger um.

1.5 Wirtschaftlichkeit und der Einfluss anderer nicht monetärer Entscheidungsfaktoren

Kosten und Wirtschaftlichkeit sind ohne Zweifel wichtige Kriterien zur Beurteilung unterschiedlicher Konzepte zum Bau energieeffizienter Gebäude. Da der Schwerpunkt des Modellvorhabens KliNaWo auf diesen Aspekten liegt, stehen sie im Mittelpunkt des Berichts.

Andere, zum Teil schwer monetarisierbare Entscheidungsfaktoren können aber von erheblicher Bedeutung bei der Entscheidung für energieeffiziente Gebäude sein:

- **Gesteigerte thermische Behaglichkeit:** Aufgrund ihres besseren Wärmeschutzes haben energieeffiziente Gebäude höhere Temperaturen der Innenoberflächen von Wänden, Fenstern, Decken und Fußböden. Die empfundene (operative) Temperatur liegt daher bei gleicher Raumlufttemperatur höher, als in Gebäuden mittlerer Qualität.
- **Bessere Raumluftqualität:** Durch Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung ist ein an den hygienischen Anforderungen orientierter, von den Nutzern regelbarer Luftaustausch gewährleistet. Die Raumluftqualität ist dadurch messbar besser als in Gebäuden mit unregelmäßiger Fensterlüftung (CO₂-Gehalt, Schadstoffbelastung).
- **Höhere Versorgungssicherheit:** In Gebäuden hoher energetischer Qualität sinken die Raumlufttemperaturen im Falle eines Heizungsdefekts oder einer Versorgungsunterbrechung deutlich langsamer ab, als in üblichen Gebäuden. Auch in längeren winterlichen Phasen ohne Beheizung bleiben die Raumlufttemperaturen im angenehmen Bereich. Ein niedriger Energiebedarf ist auch Voraussetzung für einen möglichst hohen Autarkiegrad in der Versorgung - etwa bei der Nutzung gebäudeintegrierter PV-Systeme.
- **Geringeres Bauschadensrisiko:** Der sehr gute, lückenlose Wärmeschutz sowie eine gute Luftdichtheit der Gebäudehülle und die regelbare Komfortlüftung mit WRG reduzieren drei der häufigsten Ursachen feuchtebedingter Bauschäden: niedrige Oberflächen-temperaturen im Bereich von Wärmebrücken, konvektiven Feuchtetransport vom Rauminneren durch die Konstruktion nach außen und zu niedrige Luftwechselraten bei ausschließlicher unregelmäßiger Fensterlüftung. Laut einer Studie im Auftrag des Österreichischen Verbandes gemeinnütziger Bauvereinigungen sind in Mietwohnungen zwischen 15 und 18% der Bewohner von Gesundheitsbelastungen durch Feuchtigkeit und Schimmel betroffen [23]. Feuchtebedingte Bauschäden und die damit einhergehenden Gesundheitsbelastungen sind daher kein Randthema, sondern für viele Bewohner sehr bedeutend.

2008	Feuchtigkeit und Schimmel		Gesamt in 1.000
	in 1.000	%	
Gemeindewohnung	110	18%	597
GBV-Mietwohnung	161	15%	1.054
Private Hauptmiete / Untermiete	252	18%	1.374
Hauseigentum	465	12%	3.944
Eigentumswohnung	85	11%	809
Mietfreie Wohnung / Haus	48	10%	462

Abbildung 8: Anteil der Personen mit wohnungsbezogenen Gesundheitsbelastungen (Feuchtigkeit und Schimmel) [23]

- **Höherer Wiederverkaufswert bzw. höheres Mietniveau:** Auch wenn sich der Effekt bisher oft noch nicht nachweisen lässt: energieeffiziente Gebäude haben wegen der niedrigen Energiekosten und der sonstigen dargestellten Vorteile einen tendenziell höheren Wiederverkaufswert als Gebäude in üblichem Energieniveau. Der Einfluss der energetischen Gebäudequalität auf die Miete wurde in Forschungsarbeiten nachgewiesen, so besagt etwa eine Studie des Institut Wohnen und Umwelt, dass die monatliche Nettomiete wärmetechnisch besserer Gebäude um 0,37 €/m² höher liegt, als die von Gebäuden üblicher Qualität [24]. Trotz dieser statistisch abgesicherten Daten wurde der positive Effekt hoher energetischer Qualitäten auf den Wiederverkaufswert bzw. die Miete im KliNaWo-Projekt nicht berücksichtigt.
- **Geringere Treibhausgas-Emissionen:** Hocheffiziente Gebäude mit niedrig-emittierenden Wärmeversorgungssystemen haben weit geringere THG-Emissionen als übliche Gebäude. Die Umweltkosten der Schadstoff-Emissionen können - etwa in Form von Preisaufschlägen auf die THG-Emissionen in Wirtschaftlichkeitsberechnungen berücksichtigt werden. Im KliNaWo-Projekt wurde von dieser Möglichkeit kein Gebrauch gemacht.

2. Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz in der Praxis – Modellvorhaben „KliNaWo“

2.1 Zielsetzung

Angesichts der beschriebenen unbefriedigenden Datenlage zum Thema Kosten und Wirtschaftlichkeit energieeffizienter Wohngebäude startete das Energieinstitut Vorarlberg Ende 2012 das Modellvorhaben „KliNaWo“ (Klimagerechter nachhaltiger Wohnbau). Anlass für das gemeinsam mit der gemeinnützigen Wohnbauvereinigung VOGEWOSI und der Arbeiterkammer Vorarlberg durchgeführte Projekt waren starke Kostensteigerungen für Eigentums- und Mietwohnungen und eine dadurch ausgelöste Diskussion über die Leistbarkeit des Bauens. In vielen Diskussionsbeiträgen wurde die Energieeffizienz als Hauptkostentreiber genannt.

Hauptprojektziel ist es, am Beispiel eines für Vorarlberg typischen Mehrfamilienhauses mit knapp 20 Wohneinheiten in der Praxis zu untersuchen, wie das energetische Gebäudeniveau die Bauwerks- und Errichtungskosten sowie die Wirtschaftlichkeit im Lebenszyklus beeinflusst. Als weiteres Ziel sollen der reale Energieverbrauch sowie wichtige Behaglichkeitsparameter messtechnisch erfasst werden. Neben dem Energieverbrauch im Betrieb wird auch der Primärenergiebedarf für die Herstellung ermittelt.

Es herrscht oft die Meinung, dass Energieeffizienzmaßnahmen bei Gebäuden unwirtschaftlich sind, weil sie am Beginn die Errichtungskosten und somit die Erstinvestitionskosten erhöhen. Bei der Kostenbetrachtung wird die Lebensphase nach Baufertigstellung oft nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Meist werden bei Bauprojekten nur die Investitionskosten der Errichtung des Gebäudes betrachtet und anhand dieser auf die Wirtschaftlichkeit eines Projekts geschlossen. Somit werden die Folgekosten nicht in die Betrachtung aufgenommen. Diese Folgekosten sind aber je nach Variante stark unterschiedlich. Es sind Kosten wie Ersatzinvestitionen, Wartung, Betriebskosten für Heizung, Warmwasser, Hilfsstrom und Haushaltsstrom. Will man die Gesamtwirtschaftlichkeit einer Maßnahme beurteilen, sollte man sämtliche Kosten während des Lebenszyklus des Gebäudes berücksichtigen.

Kostenoptimale Lösungen sind laut der EU-Gebäuderichtlinie [25] Lösungen, welche die niedrigsten Kapitalwerte über den Lebenszyklus des Gebäudes aufweisen. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sollen also sämtliche Kostenkomponenten berücksichtigt werden wie es auch in anderen Studien wie in [2], [26]-[28] beschrieben ist.

In der Praxis stellt es sich oft so dar, dass die Planerin oder der Planer eine Variante ausarbeitet, einen Energieausweis berechnet, eventuell ein Bauteil optimiert um Kriterien zu erfüllen und eine Kostenermittlung durchführt. Auf eine monetäre Beurteilung der Energiekennwerte über den Lebenszyklus wird meist verzichtet, auch wenn dies aufbauend auf den Ergebnissen des Energieausweises ohne allzugroßen Aufwand möglich ist. Die Ermittlung der Investitionskosten verschiedener Varianten hingegen ist meist mit einem erhöhtem Aufwand verbunden, da verschiedene Preise am Markt erhoben werden müssen.

Für den Vergleich einiger weniger Varianten gibt es bereits EDV Hilfsmittel wie z.B. econ calc [18], PHeco im PHPP [29] oder dynamische Simulationsprogramme wie z.B. EnergyPlus [30], mit welchen die Lebenszykluskosten berechnet werden können. Oft ist hierbei die Anzahl der zu berechnenden Varianten stark beschränkt bzw. ist es sehr komplex und zeitaufwändig mehr als eine Handvoll Varianten zu berechnen. Auch die Berücksichtigung nationaler Fördermodelle ist mit den meisten dieser Programme nur bedingt möglich.

Damit man das Optimum oder die Optima an Lösungen findet, welche zu den geringsten Lebenszykluskosten führen, muss oft eine Vielzahl an Varianten gerechnet werden, da sich die verschiedenen Parameter oft gegenseitig beeinflussen und dadurch nicht unabhängig

sind. So kann in einem Neubau in Passivhausstandard mit einer sehr effizienten Hülle z.B. ein kleineres Heizsystem installiert werden als in einem Gebäude im üblichen Energieniveau. Noch komplexer wird es, diese Wechselwirkungen vorherzusagen, wenn zusätzlich die Betriebskosten berücksichtigt werden. Damit man diese Optima gezielt finden kann, werden vor allem im Forschungsbereich die Energiebedarfs- und Lebenszykluskostenberechnungen meist in komplexen Studien automatisiert wie z.B. in Studien von M. Wetter bzw. Y. Zhang [31], [32] beschrieben ist.

2.2 Vorgehensweise

Für das Projekt wurde eine Vorgehensweise gewählt, die sich in Vorgängerprojekten sehr gut bewährt hat [1], [2]: für einen zunächst energetisch-wirtschaftlich optimierten Gebäudeentwurf werden zahlreiche Ausführungsvarianten geplant und ausgeschrieben, die sich bezüglich ihres Energieniveaus, der Konstruktionsart und des Haustechnikkonzepts unterscheiden. Auf der Grundlage der Ausschreibungsergebnisse werden die reinen Baukosten aller Varianten bestimmt und auf der Basis der Energiebedarfsberechnungen ihre voraussichtlichen Energiekosten. Aus diesen Daten sowie unter Berücksichtigung der Wartungs- und Ersatzkosten, der Restwerte und der jeweils anzusetzenden Förderungen können die Lebenszykluskosten aller Varianten ermittelt werden. Realisiert wird jene Variante, für die bei einem definierten, sehr niedrigen Energiebedarf die niedrigsten Lebenszykluskosten ermittelt wurden.

Im Detail wurde für das Projekt „KliNaWo“ die folgende Vorgehensweise gewählt:

- Phase 1: Energetisch-wirtschaftliche Optimierung des Entwurfs
- Phase 2: Variantenplanung Konstruktion und Haustechnik + Energiebedarfsberechnungen
- Phase 3: Modulare Ausschreibung + Variantenauswahl nach Lebenszykluskosten
- Phase 4: Detailoptimierung der zu realisierenden Variante
- Phase 5: Bau (seit April 2016; voraussichtlicher Bezug November 2017)
- Phase 6: Monitoring Energie und Behaglichkeit (2 Jahre)

Nachfolgend werden die Phasen 1 bis 5 beschrieben, der Schwerpunkt liegt aber auf den Phasen 1 bis 3.

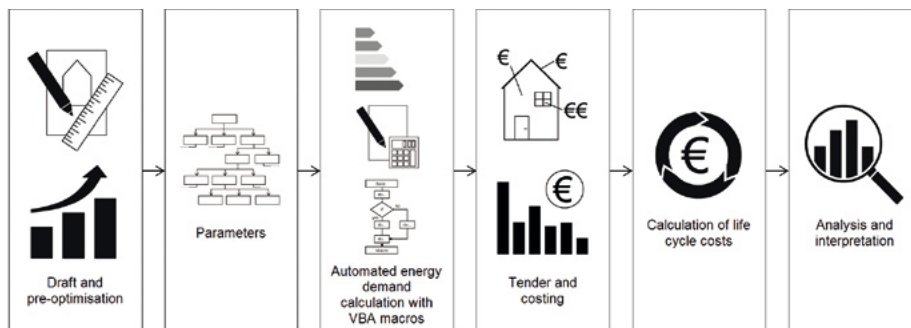


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zum Ermitteln der kostenoptimalen Lösung.

Am Energieinstitut Vorarlberg wurde eine Methode entwickelt, um die Lebenszykluskosten zigtausender Varianten ohne Förderung und mit unterschiedlichen Fördermodellen automatisiert zu berechnen. Die grobe Vorgehensweise, welche vor allem die Phasen 1 bis 3 beschreibt, ist in Abbildung 9 dargestellt:

- Entwurf, erste Voroptimierung und festlegen von Zielgrößen.
- Festlegen der zu variierenden Parameter und ihrer Niveaus z.B. Hüllqualität, Heizsystem, Fenstergröße und -qualität.
- Automatisierte Energiebedarfsberechnungen mit dem PHPP als validierten Rechenkern und VBA Makros.
- Modulare Ausschreibung zur Kostenermittlung jeder variierten Komponente.
- Berechnung der Lebenszykluskosten jeder Variante unter Berücksichtigung der Förderung, Wartung, Ersatzinvestitionen und des Restwertes.
- Auswertung und Ergebnisdarstellung.

2.3 Energetisch-wirtschaftliche Optimierung des Entwurfs

In einem ersten Schritt erfolgen die Definition und das Festlegen der Zielgrößen. Dies bedeutet, dass zwischen den Beteiligten vereinbart wird, welche Ergebnisse erreicht werden sollen, und nach welchen Kriterien optimiert werden soll. Ein Kriterium sind zum Beispiel die Lebenszykluskosten. Man kann beschließen, dass zu 100% nach diesen optimiert werden soll und dann die wirtschaftlichste Variante bauen. Es können aber auch mehrere Kriterien herangezogen werden, wie z.B. die Lebenszykluskosten und die Umweltauswirkung des Gebäudebetriebs. Somit kann dann aus den wirtschaftlichsten Varianten diejenige ausgewählt werden, welche z.B. das geringste globale Erwärmungspotenzial aufweist. Diese Festlegung zu Beginn des Projektes ist sinnvoll, damit alle Beteiligten dieselben Zielgrößen optimieren und es später im weiteren Projektfortschritt zu keinen Konflikten kommt. Im KliNaWo Projekt wurden als Zielgröße eine gute energetische Qualität bei geringen Lebenszykluskosten ausgewählt. Untersucht wurden nur Varianten, die alle gesetzlichen Mindestanforderungen (BTV) erfüllen.

Nach der Definition der Zielgrößen oder parallel dazu erfolgt ein erster architektonischer Entwurf, welcher die Randbedingungen des Auftraggebers berücksichtigt. Dieser Entwurf wird dann durch ein multidisziplinäres Planerteam energetisch-wirtschaftlich optimiert. Die Optimierung erfolgt unter Berücksichtigung der Zielgrößen.

Baufaufgabe im Projekt KliNaWo ist die Errichtung eines Mehrfamilienhauses mit 18 Wohneinheiten (2 und 3 Zimmer-Wohnungen) sowie einem Gemeinschaftsraum. Das Gebäude wird auf einem Grundstück in Feldkirch errichtet, das schon im Besitz der VOGEWOSI war. Aufgrund der örtlichen Situation ergibt sich eine Verdrehung der Gebäudefassaden um etwa 45° aus der Südrichtung, der Grundstückszuschnitt legt einen etwa quadratischen Baukörper nahe.

Abbildung 10 zeigt den Gebäudeentwurf vor und nach der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung.

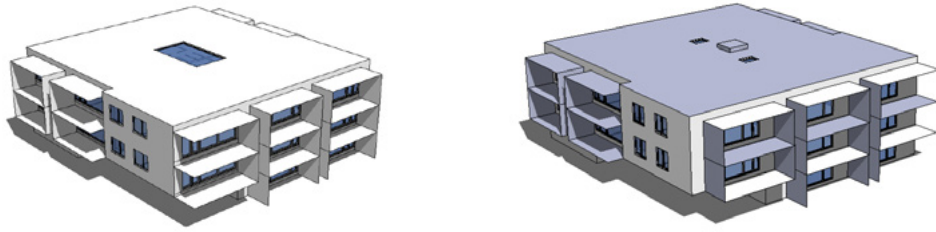


Abbildung 10: Gebäudeentwurf vor (links) und nach der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung; Arch. Walser + Werle, Feldkirch, Darstellung PHI Innsbruck mit designPH.

Der Gebäudeentwurf repräsentiert bezüglich Gestaltung, Geschößzahl (E+2) und Größe typische Mehrfamilienhäuser in Vorarlberg. Wie zu erkennen ist, wurde in der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung nur „minimalinvasiv“ eingegriffen, die wichtigsten Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Entwurf waren:

- Verkleinerung des Fensterflächenanteils
- Verlagerung der Wärmeerzeugung und -speicherung vom Keller in den beheizten Gebäudekern
- Verlagerung des zentralen Lüftungsgerät vom Keller aufs Dach
- Verlagerung eines Teils der Fahrradabstellplätze vom EG in das UG

Die energetisch-wirtschaftliche Optimierung des Entwurfs führt dazu, dass vorgegebene Energieniveaus (z.B. Bautechnikverordnung (BTV), Passivhaus) mit geringeren Dämmstoffdicken und damit günstiger erreicht werden können. Wie dynamische Gebäudesimulationen zeigen, führt die geringfügige Verkleinerung der Fensterflächen nicht nur zu einer Verringerung des Heizwärmebedarfs, sondern auch zu einer Reduktion der Überhitzungsstunden bei heutigem und - besonders wichtig - bei dem ebenfalls untersuchten, deutlich wärmeren Klima des Jahres 2050.

Die Verlagerung der Wärmeerzeugung und Speicherung aus dem Kellergeschoss in den Gebäudekern führt zu einer deutlichen Reduktion der Speicher- und Verteilverluste, die Anordnung des Lüftungsgeräts auf dem Dach senkt die Bauwerkskosten.

Durch die Verlagerung eines Teils der Fahrradabstellplätze vom EG ins UG vergrößert sich die vermietbare Wohnfläche, zusätzlich wird das A/V-Verhältnis minimal verbessert.

Das Ausmaß der Kosteneinsparung wurde in der Entwurfsphase auf Grund von Erfahrungswerten des Bauträgers und Vergleichsdaten der BKI Baukostendatenbank auf etwa 50 bis 75 €/m²_{WNF} abgeschätzt und soll im weiteren Projektverlauf auf Basis der Ausschreibungsergebnisse quantifiziert werden.

Die wichtigsten Kennwerte des Gebäudes sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Bauherr		VOGEWOSI
Standort		Feldkirch-Tosters
Klimadaten für PHPP-Berechnungen		TRY Feldkirch (1994 - 2012)
Wohneinheiten	Anzahl	18 + 1 Gemeinschaftsraum
Tiefgaragen-Stellplätze KFZ	Anzahl	18 + 7 Stellplätze Motorrad
BGF	m ²	1.791
Energiebezugsfläche PHPP	m ²	1.421
WNF	m ²	1.263
Geschosse	Anzahl	E+2
Wohnungstypen	Anzahl Zimmer	2- und 3 Zimmer
Wohnungsgrößen	m ²	53 bis 76
HWB_{OIB (2011)} Mindestanforderung BTV	kWh/m ² _{BGF} a	34 (Grenzwert WBF gemeinnützige liegt bei 25)

Abbildung 11: Kenndaten des Gebäudes "KliNaWo".

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Grundriss des Erdgeschosses und den Schnitt durch das Gebäude. Im Grundriss erkennt man die vier Wohnungen, welche um den Treppenhauuskern angeordnet sind, desweiteren den Gemeinschaftsraum und den Fahrradraum. Im Treppenhauuskern ist neben dem Lift der Haustechnikraum zu erkennen. Dieser wird zweigeschossig ausgeführt und reicht vom EG bis in das 1 OG, damit ein großer Schichtenspeicher im warmen konditionierten Teil des Gebäudes aufgestellt werden kann.

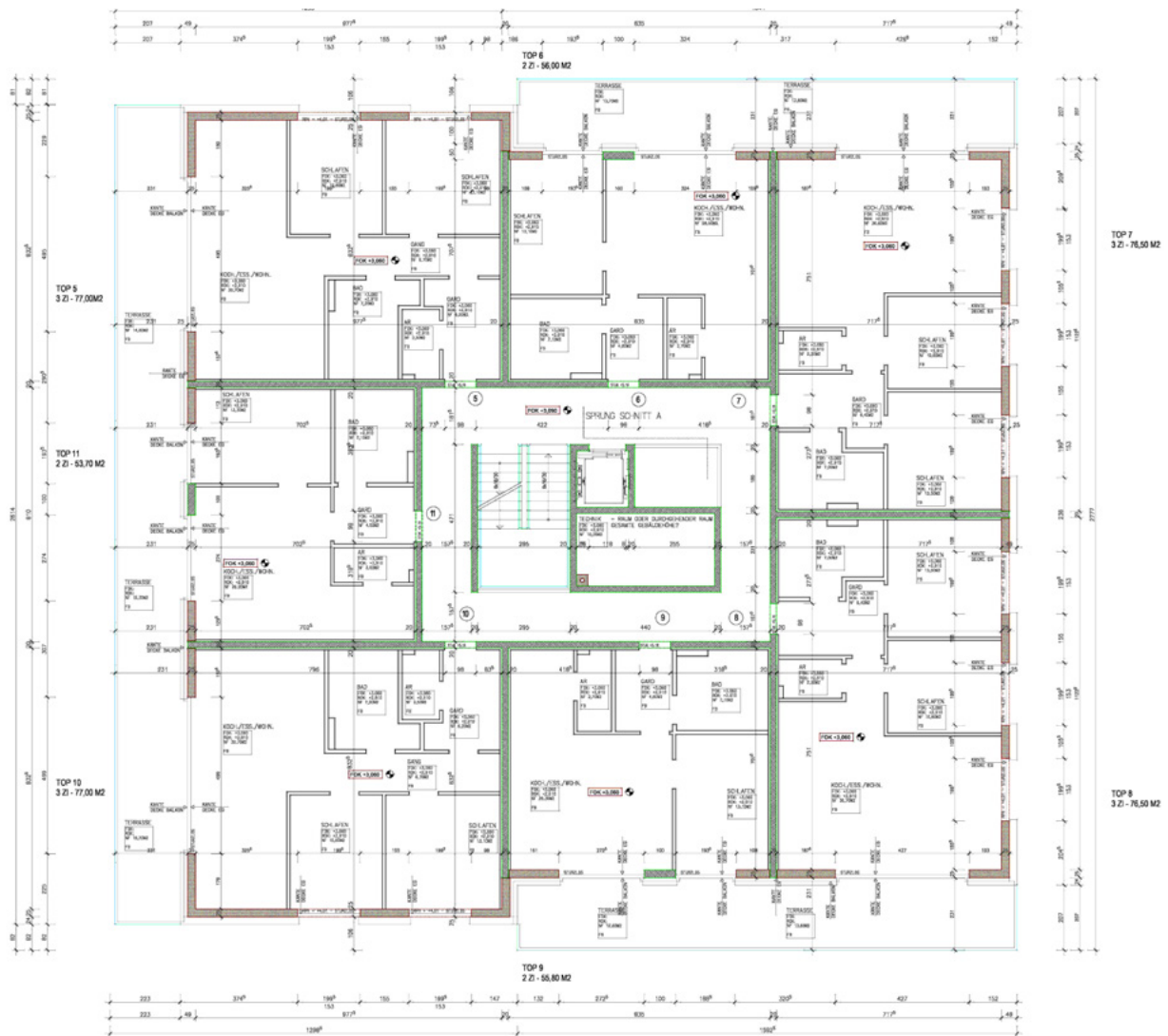


Abbildung 12: Grundriss EG (Quelle: Arch. Walser + Werle, Feldkirch)

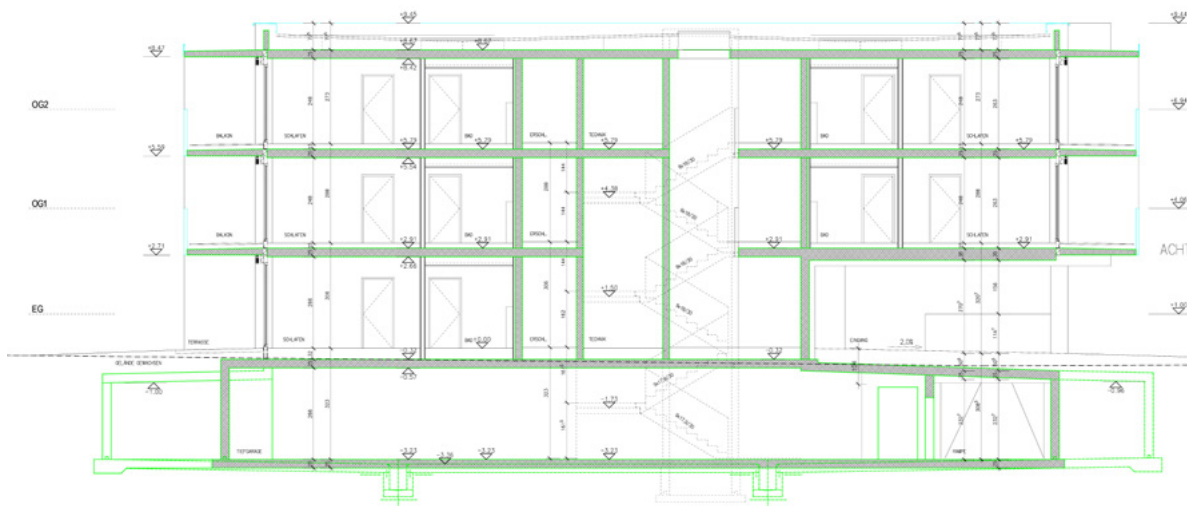


Abbildung 13: Schnitt (Quelle: Arch. Walser + Werle, Feldkirch)

3. Variantenplanung Konstruktion und Haustechnik

3.1 Festlegung der zu untersuchenden Varianten

In der Phase der Projektdefinition wurde festgelegt, dass Gebäudevarianten in den Energie-niveaus Bautechnikverordnung Vorarlberg 2015 (BTV) [33], Passivhaus und Nullenergiehaus untersucht werden - jeweils in unterschiedlichen Konstruktionsarten und mit unterschiedlichen Haustechnikkonzepten. Als Basis für die weitere Projektbearbeitung wurde zu Beginn der Phase 2 die folgende Matrix der zu untersuchenden Varianten ausgearbeitet.

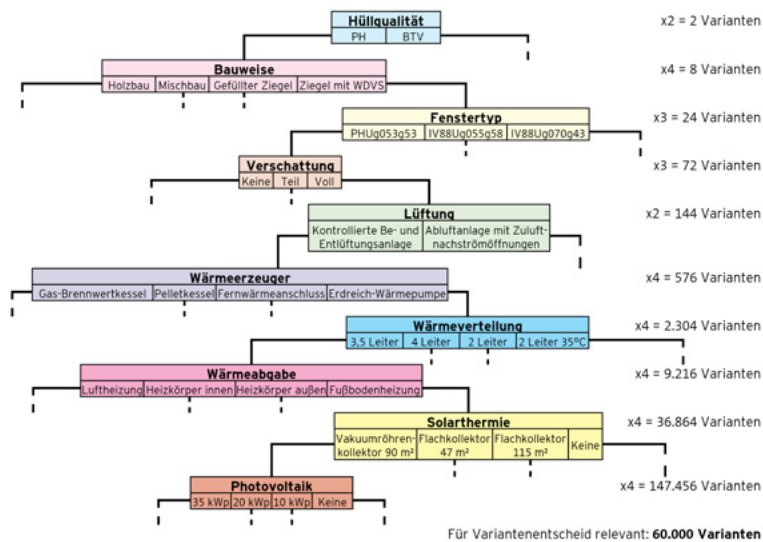


Abbildung 14: Matrix der zu untersuchenden Gebäude- und Haustechnikvarianten

Die einzelnen Komponenten sind wie folgt definiert:

- **Hüllqualität:** BTV 2015 oder Passivhaus
- **Konstruktionsart:**
 1. reiner Holzbau
 2. Mischbau (Tragstruktur STB, Außenwände Holz-Leichtbau)
 3. Außenwände aus dämmstoffgefüllten Ziegeln
 4. Außenwand Ziegel + WDVS
- **Fenstertyp:** Holz oder Holz-Alurahmen mit den folgenden Konfigurationen:
 1. Standard IV88er Rahmen $U_f=1,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit einer sehr guten Verglasung ($U_g=0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$),
 2. Derselbe IV88er Standardrahmen, aber mit einer schlechteren Verglasung ($U_g=0,70 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und
 3. Ein Passivhausrahmen mit einem $U_f=0,88 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit einer sehr guten Verglasung ($U_g=0,53 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

- **Verschattung** mit außenliegendem Sonnenschutz: Hier werden neben der Variante ohne Verschattung zwei weitere geprüft. Zum einen eine Vollverschattung, d.h. alle Fenster bekommen einen außenliegenden Sonnenschutz und die Variante mit Teilverschattung. Hierbei bekommen nur diejenigen Fenster einen Sonnenschutz, bei denen es notwendig ist, sei es wegen hoher Sonneneinstrahlung oder wegen Sichtschutz in den Schlafzimmern.
- **Lüftung:** Es werden zwei Varianten untersucht. Zum einen eine Komfortlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, zum anderen eine reine Abluftanlage mit Zuluftnachströmöffnungen. Bei beiden Varianten soll der hygienisch notwendige Luftwechsel von $0,3 \text{ h}^{-1}$ eingehalten werden. Deshalb wird die Abluftanlage mit einem konstanten Volumenstrom betrieben.
- **Wärmeerzeuger:** Hier werden vier Varianten untersucht:
 1. Sole Erdwärmepumpe,
 2. Gasbrennwertkessel,
 3. Pelletkessel und
 4. Fernwärmeanschluss.
- **Wärmeverteilung:** Auch hier werden vier Varianten untersucht:
 1. Klassisches Vierleiter Verteilsystem mit Warmwasser (WW) Vorlauf und Zirkulation und Heizungsvor- und -rücklauf.
 2. Rohr in Rohr Verteilsystem für WW, das heißt, dass die WW-Zirkulationsleitung als dünnes Rohr im Rohr des WW-Vorlaufs liegt und somit weniger Wärmeverluste erzeugen soll.
 3. Zwei-Leiter-Verteilsystem mit Wohnungsübergabestation und einer Vorlauftemperatur von ca. 50°C und
 4. Dasselbe Zwei-Leiter-System mit Wohnungsübergabestation, jedoch mit einer Vorlauftemperatur von ca. 35°C und einem nachgeschalteten elektrischen Durchlauferhitzer für das Warmwasser.
- **Wärmeabgabe:**
 1. Heizkörper klassisch an den Außenwänden.
 2. Heizkörper, aber an den Innenwänden montiert und somit mit kürzeren Verteilleitungen.
 3. Fußbodenheizung und
 4. Bei den Passivhausvarianten mit Lüftung inkl. Wärmerückgewinnung wird noch die Beheizung mittels Zuluftnacherwärmung untersucht.
- **Solarthermie:** Neben der Variante ohne Solarthermie werden drei Kollektorgößen untersucht. Eine kleine Anlage mit 47 m^2 Flachkollektor, eine mittlere mit 115 m^2 Flachkollektor und eine große Anlage mit 90 m^2 hocheffizientem Vakuumröhrenkollektor. Mit der Anlagengröße wird auch die Speichergröße variiert.
- **Photovoltaik Anlage:** Auch hier werden neben der Variante ohne PV-Anlage drei Anlagengrößen untersucht. Zum einen eine Anlage mit 10 kWp , eine mit 20 kWp und eine mit 35 kWp . Alle Anlagen werden als reine Netzeinspeiseanlagen betrachtet, da aufgrund derzeitiger gesetzlicher Anforderungen nur der Allgemeinstrom für den Eigenverbrauch verwendet werden dürfte.

Aus der dargestellten Matrix ergeben sich theoretisch etwa 147.000 Varianten. Da viele dieser Varianten jedoch technisch nicht möglich/sinnvoll (Beispiel: BTV-Gebäude sind nicht über Luftheizung beheizbar) oder baurechtlich nicht zulässig sind (Beispiel: gasbeheiztes Gebäude ist nicht ohne thermische Solaranlage erlaubt), verblieben für den Variantenentscheid 60.000 realisierbare Varianten.

Bei der Definition der Parameter ist darauf zu achten, welche Zielgröße optimiert werden soll. Sollen die Lebenszykluskosten berechnet und optimiert werden, macht es nur Sinn, Varianten zu berechnen, welche sich in ihrer Erstinvestition und in den Folgekosten unterscheiden. Alle Parameter die für das Bauvorhaben, egal in welcher Variante es ausgeführt wird, gleich bleiben, werden als konstant gesetzt. Bei dem KliNaWo-Projekt wurden vor allem energetisch relevante Bauteile und die Haustechnik variiert sowie solche Bauteile, bei denen unterschiedliche Wartungs- und Instandhaltungskosten auftreten wie z.B. eine Holzfassade versus einer Putzfassade.

Es wurden, im Gegensatz zu anderen Optimierungsansätzen [31], alle möglichen Kombinationen nach der Brute-Force-Methode gebildet und ausgewertet, d.h. alle Niveaus (i) aller Parameter (n) werden miteinander gekreuzt wie in Abbildung 15 rechts dargestellt ist. Somit sich (n^i) Varianten und dadurch den Vorteil, dass man sämtliche Informationen zur Verteilung und Streuung der Ergebnisse erhält. Bei einer herkömmlichen Optimierungsstrategie, welche in der Abbildung links dargestellt ist, werden die Parameter nacheinander und in wenigen Variationen untersucht. Hierbei bekommt man keine Aussage zur Ergebnisrelevanz aller Parameter und über den Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten. Wie später in Abbildung 38 gezeigt wird, liegen die Optima oft sehr dicht beieinander und es gibt eine Vielzahl an Varianten die als wirtschaftlich gleichwertig gelten. Im KliNaWo Projekt ergaben sich rund 147.000 mögliche Kombinationen. Sollen wesentlich mehr Varianten berechnet werden, kann es erforderlich sein, mit Optimierungsverfahren die Anzahl zu reduzieren, damit die Dauer der Berechnungen begrenzt wird.

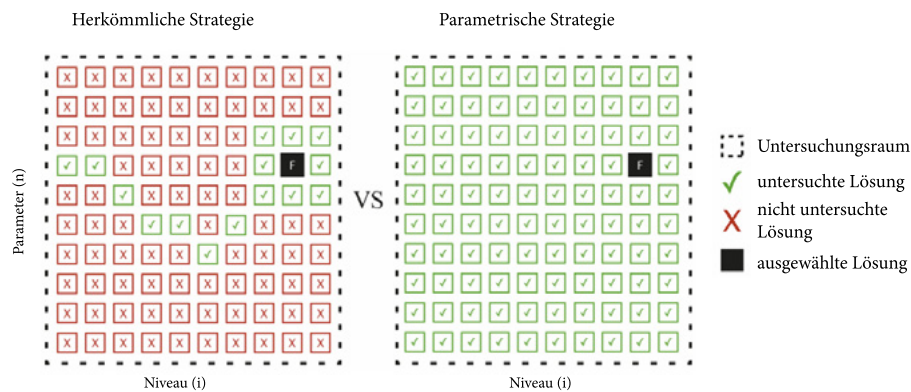


Abbildung 15: Herkömmliche Optimierungsstrategie im Vergleich zum Parameter-Ansatz (Quelle: Eigene Darstellung aufbauend auf [3]).

3.2 Energiebedarfsberechnungen

Die Geometrie des energetisch-wirtschaftlich optimierten Entwurfs wurde mit der Software designPH [34] modelliert und dann an das PHPP übergeben. Das geometrische Modell ist in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16: Gebäudemodellierung zur Geometrieübergabe an das PHPP mit der Software designPH (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg)

Für alle 60.000 theoretisch realisierbaren Varianten wurden in einem ersten Schritt die Energiekennwerte bei Standardannahmen (u.a. Raumlufttemperatur 20°C, Standard-Warmwasserbedarf) mit PHPP [29] automatisiert berechnet. Dazu wurde ein vom Energieinstitut Vorarlberg neu entwickeltes Makro eingesetzt.

Da aus zahlreichen Forschungsprojekten bekannt ist, dass die Raumlufttemperaturen in hocheffizienten Gebäuden meist deutlich über 20°C liegen und dass der flächenspezifische Warmwasserbedarf im gemeinnützigen Wohnbau aufgrund der vergleichsweise dichten Belegung deutlich höher ist als die Norm-Annahmen, wurde für jede Gebäudevariante eine zweite Energiebedarfsberechnung erstellt, in welcher die Raumlufttemperatur mit 22°C und der Warmwasserbedarf 30% über dem PHPP-Standardwert angenommen wurde.

Diese Verbrauchsprognoseberechnungen wurden dann zur Abschätzung der Energiekosten verwendet. Eine Berechnung so vieler Varianten ist mit einem Standard-PC nur möglich, wenn die Berechnung pro Variante nur wenige Sekunden dauert. Dies wird im vorliegenden Modell durch die Verwendung des MS-Excel® basierten PHPPs gewährleistet, welches Energiebilanzen in fast-Echtzeit berechnet. Die Berechnungen wurden durch ein am Energieinstitut Vorarlberg programmiertes VBA-Macro automatisiert, indem die Eingabewerte jeder Variante aus einer Variantentabelle in das PHPP geschrieben werden und dann die Ergebnisse aus dem PHPP wieder zurück in die Variantentabelle geschrieben werden. Somit war es möglich, dass die KliNaWo Varianten in nur 2 Tagen Rechenzeit über ein Wochenende berechnet werden konnten. Dynamische Gebäudesimulationsprogramme, mit denen solche Studien oft durchgeführt werden, benötigen je nach Komplexität des Modells mehrere Stunden für nur eine Variante. Somit ist es auf einem Standard-PC nicht möglich, in einem angemessenen Zeitrahmen, tausende Varianten zu vergleichen. Hier wird dann oft auf cloudbasierte Lösungen zurückgegriffen wie in den Studien von [3], [35] beschrieben ist oder es werden statistische Verfahren angewandt, bei denen nicht alle Varianten berechnet werden müssen.

Zur Justierung der Varianten nach BTV und zur Bestimmung der Fördergelder wurden zusätzlich Berechnungen nach OIB Richtlinie 6, Ausgabe Oktober 2011 [36] durchgeführt. Die OIB-Berechnungen dienen auch dem Vergleich der energetischen Qualität der untersuchten Varianten mit verschiedenen Anforderungsniveaus wie BTV oder dem Nationalem Plan und der Justierung der Fördergelder der Vorarlberger Wohnbauförderung und Vorarlberger Energieförderung.

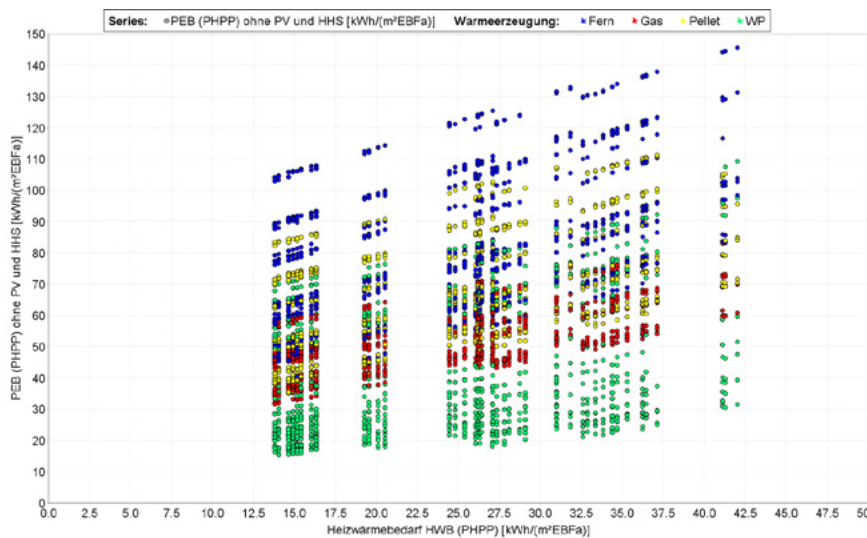


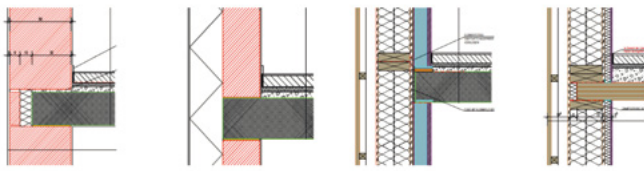
Abbildung 17: Heizwärmebedarf PHPP (20°) und Primärenergiebedarf PHPP ohne Haushaltsstrom und ohne Berücksichtigung von PV-Erzeugung, Berechnung mit Primärenergiefaktoren der OIB RL-6 (2011).

Wie Abbildung 17 zeigt, schwankt der Heizwärmebedarf f_{PHPP} der untersuchten Varianten um den Faktor 3 zwischen 14 und 42 kWh/m²_{EBF}a. Letzter Wert entspricht dem Niveau BTV Vorarlberg und damit einem Heizwärmebedarf von ca. 34 kWh/m²_{BGF}a bei Berechnung nach OIB RL 6 (2011).

Der Primärenergiebedarf f_{PHPP} ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms und etwaiger PV-Erzeugung liegt zwischen etwa 17 und 145 kWh/m²_{EBF}a. Für die PHPP-Berechnungen wurden die österreichischen Primärenergiefaktoren gemäß OIB RL 6 (2011) verwendet. Dargestellt sind die Ergebnisse der Berechnungen mit Normbedingungen (Raumlufttemperatur 20°C, WW-Bedarf Standardwert PHPP). Die niedrigsten Werte des Primärenergiebedarf f_{PHPP} erreichen die Gebäudevarianten mit Wärmepumpe, die höchsten haben die Varianten mit Biomasse-Fernwärme. Letztere haben ebenso wie die Varianten mit Pelletheizung die deutlich niedrigsten CO₂-Emissionen.

3.3 Werkplanung

Der größte Mehraufwand für das Planungsteam und die wissenschaftliche Begleitung entstand durch die Parallelplanung der zahlreichen Varianten in unterschiedlichen Konstruktionsarten, Energieniveaus und mit unterschiedlichen Haustechniksystemen. So wurden vom Architekturbüro acht Werkplanungen erarbeitet - für vier Konstruktionsarten jeweils in den zwei Energieniveaus BTV und Passivhausqualität. Für jede dieser Konstruktionsvarianten wurden 24 Leitdetails gezeichnet.



Massivbau monolithisch	Massivbau WDVS	Mischbau	Holzbau
38er/50er Ziegel	24er Ziegel + 12cm/22cm EPS	34cm/48cm davon 14cm/28cm Holzständerwand	24cm/38cm davon 14cm/28cm Holzständerwand
$U_{AW}=0,177/0,125$	$U_{AW}=0,215/0,124$	$U_{AW}=0,197/0,126$	$U_{AW}=0,215/0,134$
$U_D=0,201/0,093$	$U_D=0,168/0,093$	$U_D=0,168/0,093$	$U_D=0,158/0,082$

Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung der vier Konstruktionsarten und energetischen Kennwerten in den Energieniveaus BTV und Passivhaus.

Damit das Gebäude möglichst genau abgebildet wird, wurden für alle Hüllvarianten die Wärmebrücken berechnet. Dies sind pro Bauweise und Hüllqualität 83 Wärmebrücken. Somit ergeben sich für die vier Bauweisen in den zwei Hüllqualitäten insgesamt 664 berechnete Wärmebrücken. Die Details wurden im Vorfeld optimiert und somit konnte erreicht werden, dass die Gebäudehülle niedrige Wärmebrückenzuschläge hat. Nur der Übergang vom beheizten Gebäudeteil zum Keller und der Tiefgarage konnte nicht ganz wärmebrückenfrei ausgeführt werden. Ebenso sind leichte Einbauwärmebrücken an den Fenstern vorhanden.

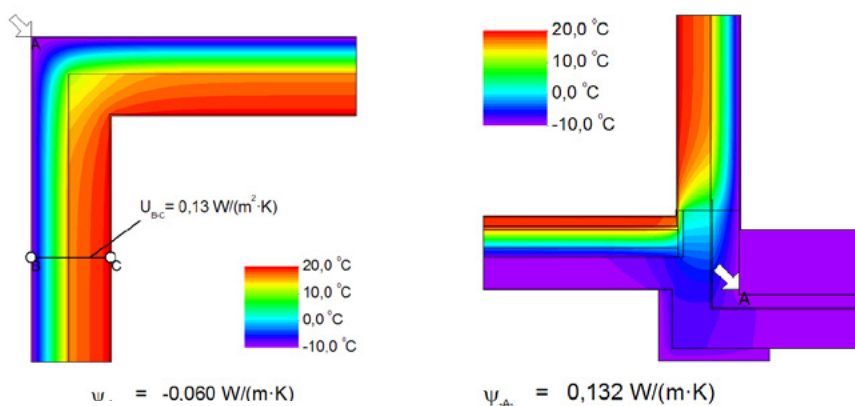


Abbildung 19: Wärmebrückenberechnung und Ergebnisdarstellung einer Außenecke in Ziegelbauweise mit WDVS und der Sockelanschluss zur auskragenden Tiefgarage.

Insgesamt ergibt sich für das Gebäude mit Passivhaushülle in Ziegelbauweise mit WDVS ein U-Wertzuschlag von 0,028 W/(m²K), wobei nur 3% auf die Hülle entfallen (z.B. Abbildung 19 links) und 57% auf den Anschluss zur Tiefgarage und zum Keller (z.B. Abbildung 19 rechts). Die restlichen 40% sind die Einbauwärmebrücken an den Fenstern.



Abbildung 20: Zinnenlösung beim Anschluss der Innenwände auf die kalte Keller-/TG-Decke zur Minimierung der Wärmebrücke.

Damit der Anschluss des EG an das UG nicht noch stärker ins Gewicht fällt, wurden die Innenwände an die Stahlbetondecke mit Zinnen angeschlossen. Das heißt, dass die Stahlbetoninnenwände auf 20 cm breiten Zinnen stehen, die einen Abstand von einem Meter zueinander aufweisen. Zwischen den Zinnen unterbrechen 100 cm XPS-Dämmung die Wärmebrücke. Somit wird diese Wärmebrücke auf ca. ein Fünftel reduziert. Diese Zinnenlösung wird auch bei der Attika angewandt, damit diese entkoppelt wird. Bei den Außenwänden und dem Treppenhaus konnte diese Lösung nicht eingesetzt werden, da diese Wände zur Aussteifung durchgehend verankert sein müssen.

Ein ähnlicher Mehraufwand entstand bei der Planung der Wärmeversorgung - vier verschiedene Wärmeerzeuger in zwei Leistungen, dazu unterschiedliche Wärmevertei- und Abgabesysteme, Speicher, Solarthermie- und PV-Systeme.

3.4 Ökologische Bewertung der Bauweisen

Im Projekt KliNaWo wurden vier verschiedene Bauweisen (Holzbau, Mischbau, Gefüllter Ziegel, Ziegel mit WDVS) untersucht. Um neben dem Gebäudebetrieb auch die Errichtung und die zyklische Erneuerung der Gebäude betrachten zu können, wurden die Gebäude mittels eco2soft (www.baubook.info/eco2soft) erfasst^b. Die ökologische Optimierung der verschiedenen Konstruktionen stand dabei nicht im Vordergrund, deshalb wurde bei allen Bauweisen von der Verwendung konventioneller Materialien ausgegangen.

Die ökologische Gebäudebewertung erfolgt anhand des Oekoindex (OI). Der OI umfasst die ökologischen Kennzahlen für die nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT), das Treibhauspotential (GWP100 Summe) und das Versauerungspotential (AP). Für acht Varianten (zwei Hüllqualitäten, vier Bauweisen) wurde der OI für die Bilanzgrenze 3 (BG3) ermittelt. Zusätzlich zu den im Energieausweis erfassten Bauteilen umfasst die Bewertung damit den Baukörper vollständig (inkl. Tiefgarage, Kellerräume) und berücksichtigt auch die Nutzungsdauer der Materialien.

^bBerechnung Gabriele Rohregger, Firma Spektrum - Zentrum für Umwelttechnik und -management GmbH

Wird der OI BG3 für die Varianten BTV und PH gegenübergestellt zeigt sich wie in Abbildung 21 dargestellt, dass der Materialaufwand für die Hüllqualität PH unter 10% über jenem für die BTV Variante in gleicher Konstruktionsart liegt. Dem Mehraufwand für die Herstellung stehen deutlich größere Reduktionen bezüglich des Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen des Gebäudes im Betrieb gegenüber (vergleiche Abbildungen 17, 42 und 43)

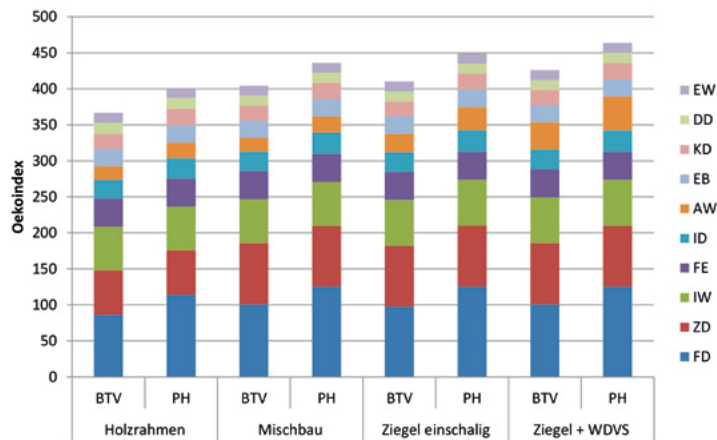


Abbildung 21: OI Index (BG3) für die verschiedenen Varianten (FD...Flachdach, ZD...Zwischendecke, IW...Innenwand, ID...Innendecke, AW...Außenwand, EB...Erdberührter Bodenplatte, KD...Kellerdecke, DD...Decke gegen Außenluft, EW...Erdberührte Wand, FE...Fenster)

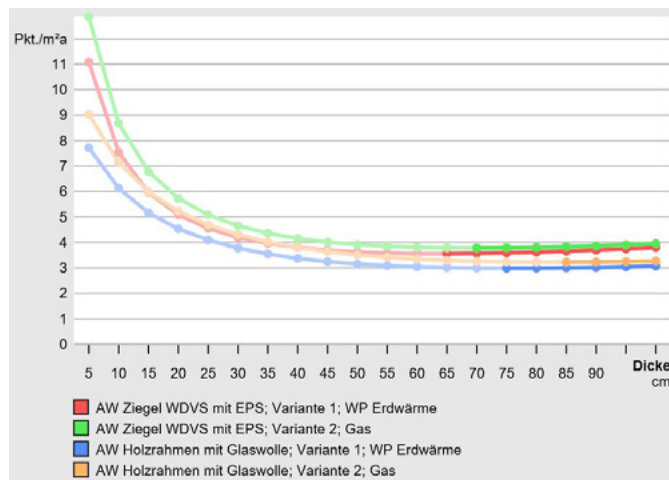


Abbildung 22: Vergleich Oekoindex mit dem baubook Amortisation- und Wirtschaftlichkeitsrechner

Mit dem baubook Amortisation- und Wirtschaftlichkeitsrechner kann der Ressourcenaufwand für die Herstellung und zyklischen Erneuerung der eingesparten Energie gegenübergestellt werden. Abbildung 22 zeigt den Oekoindex (X-Achse) als Summe des Energieverlust durch das Bauteil und des Aufwandes für die Herstellung der verwendeten Materialien in Abhängigkeit der Dämmstärke (x-Achse). Mit zusätzlicher Dämmstärke steigt der Materialaufwand. Gleichzeitig verbessert sich der U-Wert und damit der Energieverlust im Gebäudebetrieb. Bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren liegt die ökologisch optimale Dämmstärke zwischen 65cm (Konstruktion: Ziegel WDVS mit EPS; Energieträger: Erdwärmepumpe) und 85cm (Konstruktion: Holzrahmen mit Glaswolle; Energieträger: Gas). Dabei wird deutlich, dass die im KliNaWo gewählten Dämmstärken ökologisch sinnvoll sind. Mit steigender Effizienz gewinnt allerdings die Betrachtung der verwendeten Materialien und Konstruktionen und damit die gemeinsame Optimierung von Gebäudebetrieb und -errichtung an Bedeutung.

4. Randbedingungen und Kostenermittlung der Varianten

4.1 Modulare Ausschreibung

Um den Aufwand der Bieter bei der Erstellung der Angebote zu minimieren, wurden die Ausschreibungen modular aufgebaut. Die Spezifika des Modellvorhabens - der Vergleich unterschiedlicher Konstruktionsarten und Wärmeversorgungssysteme und die Vergabe nach Lebenszykluskosten wurde in den Vorbemerkungen der Ausschreibung erläutert. Der Rücklauf war in den meisten Gewerken normal. Für das Gewerk Lüftung gingen allerdings nur zwei Angebote ein.



Abbildung 23: Rücklauf der Angebote der modularen Ausschreibung ohne die Haustechnik.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden mit einem vom Energieinstitut Vorarlberg entwickelten tool die Lebenszykluskosten aller 60.000 Varianten berechnet.

Für jede Variante wurden zunächst die Bauwerks- und Errichtungskosten, Energie- und Wartungskosten und darauf aufbauend die Lebenszykluskosten für die folgenden Fälle berechnet:

- ohne Berücksichtigung von Förderungen
- mit Energieförderung Vorarlberg und Wohnbauförderung Vorarlberg für Gemeinnützige
- mit Energieförderung Vorarlberg und Wohnbauförderung Vorarlberg für Private

Als Methode wurde die Kapitalwertmethode gewählt, Restwerte und Ersatzinvestitionen wurden berücksichtigt. Die Annahmen bezüglich der technischen Lebensdauern der Bauteile und Komponenten wurden ebenso gemeinschaftlich festgelegt wie alle anderen Annahmen und Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

Der Betrachtungszeitraum wurde für die gemeinnützigen Bauvereinigungen auf 50 Jahre festgelegt, dies entspricht deren üblichem Finanzierungshorizont. Für private Bauträger wurde der Betrachtungszeitraum auf 35 Jahre festgelegt, dies entspricht der Höchstlaufzeit der Wohnbauförderungskredite. Der Zinssatz für den Bankzins wurde für die Kreditlaufzeit von 25 Jahren auf 3,0% festgelegt, der derzeitige Zinssatz bei 10-jähriger Zinsbindung liegt bei etwa 1,8%.

4.2 Heutige Energiepreise und Energiepreissteigerungen

Im Kapitel 3 wird beschrieben, wie für jede Variante der Energiebedarf berechnet wird. Die Energiekennwerte werden getrennt für Heizung, Warmwasser, Hilfsstrom, Haushaltsstrom und PV-Erzeugung ermittelt, und zwar wie beschrieben mit 22°C Raumtemperatur und einem um 30% erhöhten Warmwasserverbrauch. Der Haushaltsstrombedarf wird für alle Varianten konstant mit 25 kWh/(m²_{EBF}a) angenommen. Anschließend werden anhand dieser Endenergiekennwerte und der zugehörigen Energiepreise die jährlichen Energiekosten jeder Variante ermittelt. Mit diesen jährlichen Kosten werden dann, unter Berücksichtigung der Energiepreissteigerung, die Lebenszykluskosten der Energie berechnet. Die Energiepreise wurden mit dem Stand Juli 2015 ermittelt und im Einvernehmen mit den Projektpartnern festgesetzt und sind in Abbildung 24 dargestellt. Für projektspezifische Angaben wie z.B. das Abrechnungsmodell der Fernwärme wurden bei den Anbietern konkrete Angebote eingeholt. Die Energiepreissteigerung wurde für Haushaltsstrom mit 2,5% p.a. und für alle Energieträger zur Wärmeerzeugung mit 3,5% p.a. angenommen. Um den Einfluss der Preissteigerung zu quantifizieren, wurde diese in einer Sensitivitätsstudie um ± 1% variiert.

Energieträger	Nettopreise	Einheit	Preissteigerung [%]
Pellet	0,042	€/kWh	3,5
Fernwärme	0,069	€/kWh	3,5
Fernwärme Grundgebühr	25.000	€ einmalig	-
Gas Arbeitspreis	0,047	€/kWh	3,5
Gas Grundgebühr	70	€/a (WE)	3,5
Wärmepumpenstrom	0,101	€/kWh	3,5
Wärmepumpenstrom Grundgebühr	52	€/a (WE)	3,5
Haushaltsstrom	0,130	€/kWh	2,5
Haushaltsstrom Grundgebühr	86	€/a (WE)	2,5
PV Einspeisung	0,050 (drei Jahre) 0,025 (ab Jahr 4)	€/kWh	2,5

Abbildung 24: Energiepreise und Energiepreissteigerungen als Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung angegeben in Nettopreisen für den gemeinnützigen Bauträger.

In Abbildung 24 sind die Energiepreise als Nettopreise angegeben um die Betriebskosten für den gemeinnützigen Bauträger zu ermitteln. Für den privaten Bauträger werden die Betriebskosten mit den in Bruttopreisen umgerechneten Energiekosten angegeben und so in der Lebenszykluskostenbetrachtung berücksichtigt.

4.3 Wartungskosten

Damit nachfolgend die Lebenszykluskosten berechnet werden können, müssen alle relevanten Kosten während der Errichtung und des Betriebes berücksichtigt werden. Dies sind neben den Errichtungskosten, den Energiekosten auch die Wartungskosten und die Ersatzinvestitionen zur Erneuerung von Bauteilen. Die Wartungskosten und Wartungsintervalle für alle relevanten Bauteile wurden in vorliegender Studie meist anhand langjähriger von der VOGEWOSI real ermittelter Daten abgeleitet. Diese Wartungskosten sind in diesem Fall für die VOGEWOSI als gemeinnütziger Bauträger gültig, welche die Leistungen meist extern vergibt. Für den privaten Bauherrn, welcher diese Leistungen oft selbst durchführen kann, wie zum Beispiel den Filterwechsel der Lüftungsanlage oder den Anstrich der Fassade, können sich durchaus niedrigere Wartungskosten ergeben.

In Abbildung 25 sind zusammenfassend für die wichtigen Bauteile die Wartungsintervalle und die Wartungskosten, bei heutigem Preisniveau, dargestellt. Bei den Holz-Alu Fenstern müssen z.B. nach 25 Jahren die Dichtungen getauscht und Beschläge eingestellt werden. Dies ergibt alle 25 Jahre Kosten in Höhe von 5 € pro m² Wohnnutzfläche. Bei den Wärmequellen hat die Fernwärme die niedrigsten Wartungskosten von 0,36 €/m²_{WNF} pro Jahr, während sich die höchsten auf 2,40 €/m²_{WNF} pro Jahr bei der Pelletheizung belaufen.

Position	Tätigkeit	Intervall	heutige Kosten (netto)	Einheit
Fenster Holz-Alu	Dichtung tauschen u. Beschläge einstellen	25 a	5,00	€/m ² _{WNF}
Fenster Holz behandelt	Neuanstrich außen	15 a	10,00	€/m ² _{WNF}
	Dichtung tauschen u. Beschläge einstellen	25 a	5,00	€/m ² _{WNF}
Lichtkuppel	Dichtung tauschen u. Beschläge einstellen	15 a	1,00	€/m ² _{WNF}
Sonnenschutz außenliegend	Bänder tauschen	12,5 a	7,00	€/m ² _{WNF}
Lüftungsanlage WRG	Austausch Ventilatoren + Steuerung	15 a	7.500,00	€ pauschal
	Filterwechsel, Brandschutzklappen inspizieren	jährlich	0,72	€/m ² _{WNF} a
	Verteilnetz reinigen	7 a	7,00	€/m ² _{WNF}
Lüftungsanlage Abluft	Austausch Abluftventilatoren (38 Stück)	15 a	150,00	€/Stück
	Zuluftöffnungen und Filter reinigen	jährlich	0,36	€/m ² _{WNF} a
	Verteilnetz reinigen	7 a	5,00	€/m ² _{WNF}
Fernwärme-Übergabestation	Wartung	jährlich	0,36	€/m ² _{WNF} a
Gas-Brennwertkessel	Wartung	jährlich	0,60	€/m ² _{WNF} a
	Kaminreinigung	jährlich	0,24	€/m ² _{WNF} a
Pellet Kessel	Wartung	jährlich	1,20	€/m ² _{WNF} a
	Kaminreinigung	jährlich	1,20	€/m ² _{WNF} a
Erdreich-Wärmepumpe	Wartung	jährlich	0,94	€/m ² _{WNF} a
Thermische Kollektoren	Wartung	jährlich	0,24	€/m ² _{WNF} a
PV-Anlage	Wartung	jährlich	1,0% der Investitionssumme	€/a
	Versicherung	jährlich	10+20 kWp = 100 35 kWp = 140	€/a

Abbildung 25: Zusammenfassung der wichtigsten Wartungskosten und Intervalle.

4.4 Ersatzinvestition für Erneuerung

Eine Ersatzinvestition für die Erneuerung ist immer dann notwendig, wenn die technische Lebensdauer einer Position niedriger ist, als der Betrachtungszeitraum. Dies bedeutet, wenn man ein Gebäude über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren betrachtet und es eine Position mit nur 25 Jahren technischer Lebensdauer gibt, muss diese Position während des Betrachtungszeitraums einmal erneuert werden. Hat diese Position nur eine Lebensdauer von 20 Jahren, muss sie zweimal erneuert werden, hat aber nach Ablauf der 50 Jahre Betrachtungszeitraum noch einen Restwert.

Als Höhe der Ersatzinvestition werden die Mittelwerte der realen Angebotspreise aller Bieter angenommen, da diese den momentanen mittleren Marktpreis widerspiegeln. In Abbildung 26 sind die im Rahmen des Projektes mit den Beteiligten abgestimmten technischen Lebensdauern aufgelistet.

Position	techn. Lebensdauer	Position	techn. Lebensdauer
Außenwand Ziegel	100	Pellet Lager und Förderung	50
Außenwand Holzrahmenbau	100	Erdreich-WP (Sonden)	50
Flachdach Konstruktion STB	100	Pufferspeicher	50
Flachdach Konstruktion Holz	100	Wärmeverteilstrom	50
Kellerdecke / Decke über TG	100	Heizkörper/ Fußbodenheizung	50
Innenwände STB und Leichtbau	100	Fenster Holz behandelt	35
Zwischendecken STB/ Holz	100	Lichtkuppel	30
Innenputz	80	Flachdach Abdichtung	30
hinterlüftete Schalung Nadelholz	70	PV-Module	30
abgehängte Decke	60	Sonnenschutz außenliegend	25
WDVS	50	thermische Solarkollektoren	25
Außenputz Ziegel monolithisch	50	Frischwasserstation	25
Innenverkleidung Gipskarton	50	Fernwärme Übergabestation	20
Fenster Holz-Alu	50	Gas-Brennwertkessel	20
Flachdach Dämmung	50	Pellet-Kessel	20
Lüftungsanlage WRG mit Verteilung	50	Erdreich-Wärmepumpe	20
Lüftungsanlage Abluft mit Verteilung	50	PV Wechselrichter	15

Abbildung 26: Technische Lebensdauer ausgewählter Positionen im Projekt KliNaWo.

5. Ergebnisse der Variantenstudie

5.1 Bauwerks- und Errichtungskosten des Gebäudes

Die aus den Angeboten ermittelten Kosten wurden auf den Ebenen der Bauwerkskosten (ÖNORM B 1801-1, KG 2, 3, 4) [37] bzw. der Errichtungskosten (KG 1-9) verglichen. Die Bauwerkskosten entsprechen den reinen Baukosten (DIN 276, KG 300+400), die Errichtungskosten schließen alle Kostengruppen außer den Grundstückskosten ein.

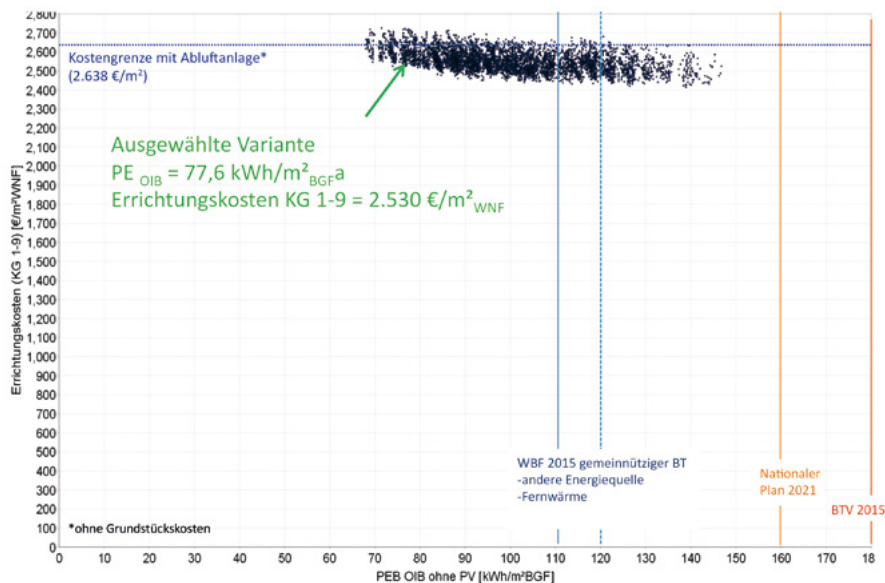


Abbildung 27: Netto-Errichtungskosten (KG 1-9 ÖNORM B 1801-1) der 30.000 Varianten mit Abluftanlage und Kostenobergrenze der Wohnbauförderung für Gemeinnützige über dem $PEB_{OIB(2011)}$

Abbildung 27 zeigt die Netto-Errichtungskosten der 30.000 Varianten mit Abluftanlage im Vergleich zur Kostengrenze gemäß Wohnbauförderung Vorarlberg über dem Primärenergiebedarf $PEB_{OIB(2011)}$. Erkennbar ist, dass 94% aller untersuchten Varianten mit Abluftanlage unter der Kostengrenze der Wohnbauförderung für Gemeinnützige liegen. Diese Kostengrenze gilt in üblichen Wohnbauförderungsprojekten als schwer zu erreichen. Sie wird projektspezifisch bestimmt und liegt für das untersuchte Gebäude bei $2.638 \text{ €/m}^2_{WNF}$ (ohne Komfortlüftung).

Wie die Abbildung 27 zeigt, schwanken die Primärenergiekennwerte $PEB_{OIB(2011)}$ der untersuchten Varianten mit Abluft zwischen etwa 68 und 146 $\text{kWh/m}^2_{BGF a}$. Zum Vergleich: die Werte typischer Passivhäuser liegen bei Berechnung nach OIB RL 6 (2011) bei knapp $80 \text{ kWh/m}^2_{BGF a}$.

Die Primärenergiekennwerte $PEB_{OIB(2011)}$ aller untersuchten Varianten liegen damit deutlich unter dem Grenzwert der BTv von $180 \text{ kWh/m}^2_{BGF a}$ und unter dem im Nationalen Plan [4] für 2021 festgelegten Wert von $160 \text{ kWh/m}^2_{BGF a}$ (Österreichisches Fast-Nullenergiehaus zur Umsetzung der Europäischen Gebäuderichtlinie EPBD).

Trotz der großen Schwankungsbreite des $PEB_{OIB(2011)}$ ist der Einfluss des Energieniveaus auf die Errichtungskosten nur gering.

Abbildung 28 zeigt die Netto-Errichtungskosten der Varianten mit Wärmerückgewinnung über dem Primärenergiebedarf ^{OIB (2011)*}

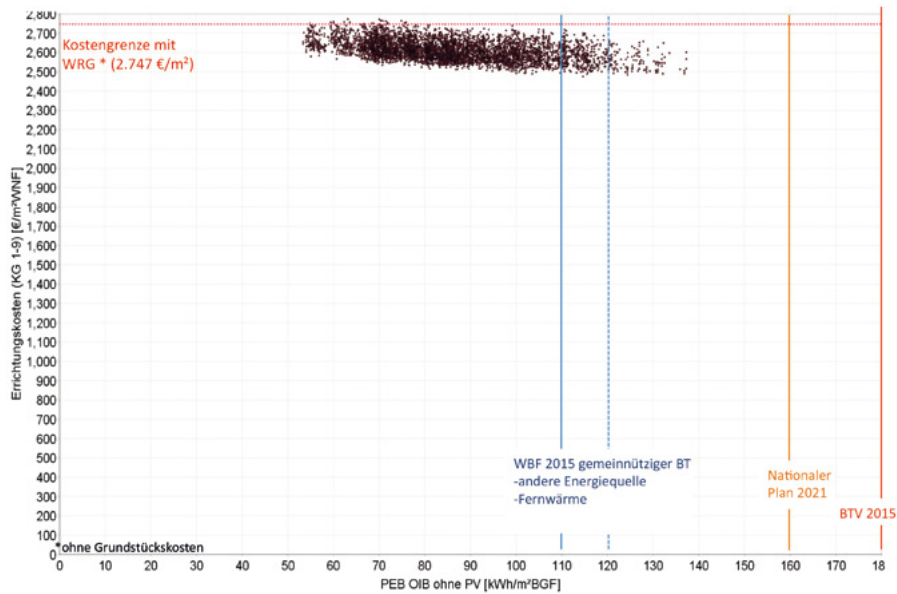


Abbildung 28: Netto-Errichtungskosten (KG 1-9 ÖNORM B 1801-1) der 30.000 Varianten mit Komfortlüftung mit WRG und Kostenobergrenze der Wohnbauförderung für Gemeinnützige über dem PEB ^{OIB (2011)}

Die Primärenergiekennwerte der Varianten mit WRG liegen im Vergleich zu denen mit Abluftanlage um etwa $13 \text{ kWh/m}^2_{\text{BGF}}$ niedriger. Die projektspezifische ermittelte Kostengrenze der Wohnbauförderung liegt für die Varianten mit WRG bei $2.747 \text{ €/m}^2_{\text{WNF}}$. Das Ergebnis zeigt, dass 99% dieser 30.000 Varianten im Projekt KliNaWo diese Kostengrenze unterschreiten.

Die Mehrkosten effizienterer Gebäudevarianten werden in Abbildung 29 auf der Ebene der Bauwerkskosten (ÖNORM B 1801-1, KG 2, 3, 4) exemplarisch für drei Varianten dargestellt. Man sieht die aus den Angebotspreisen ermittelten Netto-Bauwerkskosten für drei Gebäudevarianten mit identischer Konstruktion (Ziegel + WDVS) und identischem Wärmeerzeuger (Sole-Wärmepumpe) in unterschiedlichen Energieniveaus.

Netto-Bauwerkskosten: Bauweise WDVS, Wärmeerzeugung: WP

gem. ÖNorm 1801-1 KG 2-4

WNF = 1.287,1m ²	ausgeführte Variante WDVS vor Optimierung mit Solar		
	Variante BTV ohne Solar	Variante PH WDVS mit Solar	
Konstruktion WDVS (variantenabhängige Kosten)	1.116,3 €/m ² WNF	1.141,2 €/m ² WNF	1.141,2 €/m ² WNF
Fenster IV88 mit sehr guter Verglasung	97,4 €/m ² WNF	97,4 €/m ² WNF	97,4 €/m ² WNF
Sonnenschutz bei Vollverschattung	21,2 €/m ² WNF	22,9 €/m ² WNF	22,9 €/m ² WNF
Heizung (WP mit FBH, 3,5L, PH und ausgeführte Var. mit mittlerer Solaranlage, BTV ohne Solar)	123,8 €/m ² WNF	142,7 €/m ² WNF	158,2 €/m ² WNF
Sanitär	91,4 €/m ² WNF	91,4 €/m ² WNF	91,4 €/m ² WNF
Lüftung (Abluft bei BTV und Lüftung m. WRG bei PH)	31,7 €/m ² WNF	93,3 €/m ² WNF	31,7 €/m ² WNF
Elektro	102,4 €/m ² WNF	106,3 €/m ² WNF	102,4 €/m ² WNF
Sonstige Kosten (für alle Varianten gleich, z.B. Schlosser, Asphalt, Garten, Lift, Bodenbeläge)	328,8 €/m ² WNF	328,8 €/m ² WNF	328,8 €/m ² WNF
Summe Bauwerkskosten	1.912,9 €/m² WNF	2.024,0 €/m² WNF	1.973,9 €/m² WNF
Differenz Bauwerkskosten je m ² WNF		111,0 €/m ² WNF	61,0 €/m ² WNF
Differenz Bauwerkskosten in %		5,8%	3,0%

HWB (PHPP 20°C)	36,2 kWh/m ² a	15,4 kWh/m ² a	28,1 kWh/m ² a
PEB (PHPP 20°C, ohne HH-Strom, ohne PV)	72,0 kWh/m ² a	18,8 kWh/m ² a	22,4 kWh/m ² a
CO ₂ (PHPP 20°C, ohne HH-Strom, ohne PV)	11,5 kg/m ² a	3,0 kg/m ² a	3,6 kg/m ² a

Abbildung 29: Netto-Bauwerkskosten (KG 2 bis 4 ÖNORM B 1801-1) für 3 Varianten mit WDVS und Wärmepumpe.

Die Bauwerkskosten der Variante nach BTV ohne thermische Solaranlage liegen bei 1.913 EUR/m²_{WNF}, die der Passivhausvariante mit 115m² thermischer Solaranlage mit 2.024 EUR/m²_{WNF} um 111 EUR/m²_{WNF} oder 5,8% über dem Referenzwert.

In der Passivhausvariante mit thermischer Solaranlage wird der Primärenergiebedarf_{PHPP} ohne Haushaltsstrom von 72 auf knapp 19 kWh/m²_{EBF} a reduziert.

Die dritte dargestellte Variante hat eine Passivhaus-Gebäudehülle und 115m² thermische Solaranlage und ist mit Abluftanlage statt Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Die Bauwerkskosten dieser Variante liegen bei 1.974 EUR/m²_{WNF} und damit um 3,0% über dem Referenzwert nach BTV und ohne Solaranlage. Der Primärenergiebedarf_{PHPP} liegt mit 22,4 kWh/m²_{EBF} a ebenfalls weit unter dem der Referenzvariante nach BTV.

Fast identische Mehrkosten der hocheffizienten Gebäudevariante gegenüber der BTV-Variante in gleicher Konstruktionsart zeigen sich auch für die Konstruktionen in Holz- und Mischbauweise bzw. in Massivbauweise mit dämmstoffgefülltem 50er Ziegel.

Die im Projekt „KliNaWo“ durch Ausschreibungen bestimmten prozentualen Mehrkosten liegen damit unter den in der Kostenoptimalitätsstudie des Energieinstitut Vorarlberg bestimmten Werten von 6,2 bis 8,8% [28] und unter dem in der Studie des gbv ermittelten Mittelwert von 6,7% [6]. Sie liegen in der Größenordnung der von innovativen Bauträgern wie der Neuen Heimat Tirol, der ABG Frankfurt Holding und der Innsbrucker Immobilien GmbH genannten, jedoch nicht detailliert veröffentlichten, Werten von 3 - 5%.

5.2 Kosten von Bauteilen und Haustechnikkomponenten

Parallel zum Bau des Gebäudes werden derzeit Detailergebnisse auf der Ebene von Bauteilen und Haustechnikkomponenten ausgewertet. Zu beachten ist, dass die dargestellten (Mehr)kosten noch nichts über die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Energie-Einsparmaßnahme aussagen. Sie sollen ausschließlich der Grobermittlung der Mehrkosten in Nachfolgeprojekten dienen.

Flachdach

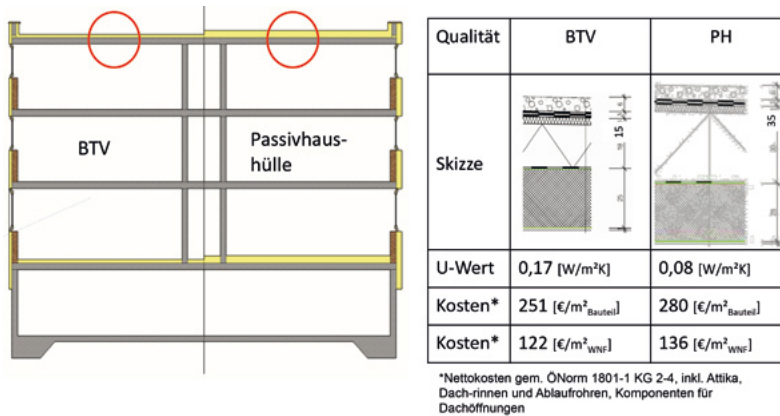


Abbildung 30: Netto-Bauwerkskosten des Bauteils Dach in den Energieniveaus BTV und PH; Kostenangaben pro m² Bauteil und pro m²_{WNF}; inkl. Attika, Dachrinnen und Ablaufrohren und inkl. Komponenten für Dachöffnungen (Flachdach, EPS Gefälledämmung).

Die Kostenauswertungen für das Flachdach ergeben, dass die Mehrkosten der Dämmung in PH-Niveau 35cm EPS gegenüber der Ausführung nach BTV mit 15cm EPS inkl. aller Nebenkosten für Anschlüsse und Dachrinnen 29 €/m² Bauteilfläche betragen. Überschläglich kostet also der cm Mehrdämmung inkl. aller Nebenarbeiten etwa 1,45 €/m² Bauteilfläche.

Auf die Wohnnutzfläche umgelegt, verursacht die 20 cm dickere Dämmung Mehrkosten von 14 €/m²_{WNF}.

Außenwand

Die Kostenauswertungen für die Außenwand in Massivbausweise mit WDVS ergeben, dass die Mehrkosten der Dämmung in PH-Niveau mit 24cm EPS gegenüber der Ausführung nach BTV mit 12 cm EPS etwa 13 €/m² Bauteilfläche betragen. Überschläglich kostet also der cm Mehrdämmung etwa 1,08 €/m² Bauteilfläche.

Auf die Wohnnutzfläche umgelegt verursacht die 12 cm dickere Dämmung Mehrkosten von 6 €/m²_{WNF}.

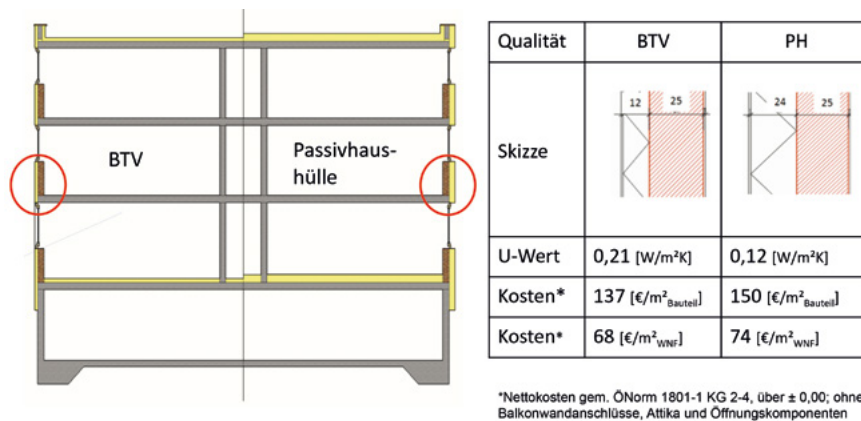


Abbildung 31: Netto-Bauwerkskosten des Bauteils Außenwand in den Energieniveaus BTV und PH; Kostenangaben pro m² Bauteil und pro m²_{WNF}; ohne Balkonanschlüsse, Attika und Öffnungskomponenten (Ziegel massiv + Wärmedämmverbundsystem WDVS).

Lüftung

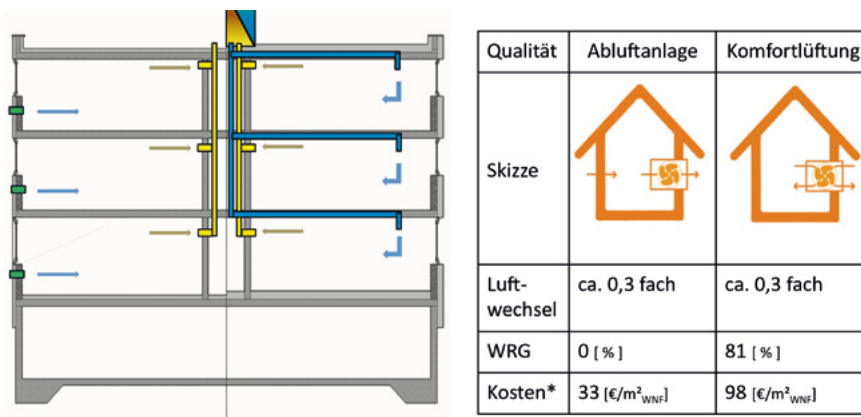


Abbildung 32: Netto-Bauwerkskosten der Lüftung inkl. Elektroinstallationen pro m²_{WNF}

Die Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung wurde zu 98 €/m²_{WNF} angeboten. Dies ist selbst für das Hochpreis-Land Vorarlberg ein vergleichsweise hoher Preis. Wie Auswertungen der Kosten geförderter Komfortlüftungsanlagen zeigen, liegt das übliche Preisniveau im Mehrfamilienhaus auch in Vorarlberg etwas niedriger [38]. In gut optimierten Projekten werden auch in Vorarlberg Kosten von etwa 60 €/m²_{WNF} erreicht [39].

Der angebotene Preis entspricht etwa 6.500 € pro Wohneinheit. Auswertungen der neuen Heimat Tirol und der Innsbrucker Immobilien GmbH zeigen, dass dort Preise von ca. 3.800 bis 4.500 € pro Wohneinheit erzielt werden, da der Markt deutlich größer ist und da die Anlagen aufbauend auf Erfahrungen aus Vorgängerprojekten in vielen Schritten vereinfacht und wirtschaftlich optimiert wurden. Nachteilig für das KliNaWo-Projekt war auch, dass nur zwei Angebote für das Gewerk Lüftung eingingen.

Auch der Angebotspreis von 33 €/m²_{WNF} für die Abluftanlage ist relativ hoch, das übliche Niveau liegt hier bei etwa 20 bis 30 €/m²_{WNF}.

Wärmeerzeuger

	Wärmepumpe incl. Sonden	Pellet	Gas	Fernwärme
BTV Kosten*	84 [€/m ² _{WNF}]	28 [€/m ² _{WNF}]	25 [€/m ² _{WNF}]	33 [€/m ² _{WNF}]
PH Kosten*	71 [€/m ² _{WNF}]	26 [€/m ² _{WNF}]	25 [€/m ² _{WNF}]	33 [€/m ² _{WNF}]

*gem. ÖNorm 1801-1 KG 4, inkl. Elektroanteil

Abbildung 33: Netto-Bauwerkskosten der Wärmeerzeuger inkl. Elektroanteil pro m²_{WNF}

Günstigster Wärmeerzeuger ist der Gas-Brennwertkessel mit 25 €/m²_{WNF}, knapp gefolgt vom Pelletkessel. Der Fernwärmeanschluss ist etwas teurer, da ein Tarifmodell mit Baukostenzuschuss und geringerem Arbeitspreis gewählt wurde. Dieses Tarifmodell ergab für das Bauvorhaben niedrigere Lebenszykluskosten, als das Tarifmodell ohne Betriebskostenzuschuss. Die Investitionskosten der Sole-Wärmepumpe liegen deutlich höher, als die der übrigen Wärmeerzeuger. Zu erkennen ist auch, dass bei der Sole-Wärmepumpe das Energieniveau des Gebäudes einen deutlichen Einfluss auf die Kosten hat: Die Wärmepumpe für die Passivhausvariante ist um 13 €/m²_{WNF} günstiger, als die für die Variante nach Bautechnikverordnung. Hauptgrund ist die günstigere Erschließung der Wärmequelle - die Passivhaus-Variante benötigt eine geringere Sondenlänge.

Wärmeverteilung

4-Leitersystem	Rohr in Rohr Zirkulation (3,5-Leiter)	2-Leiter mit Wohnungs- übergabestation	2-Leiter (35°C) mit Wohnungs- übergabestation und elektrischer Nacherwärmung
12 [€/m ² _{WNF}]	13 [€/m ² _{WNF}]	29 [€/m ² _{WNF}]	34 [€/m ² _{WNF}]

*gem. ÖNorm 1801-1 KG 4, inkl. Elektroanteil

Abbildung 34: Netto-Bauwerkskosten der Wärmeverteilung inkl. Elektro pro m²_{WNF}

Die Wärmeverteilung bewegt sich in zwei Preisgruppen. Das klassische 4-Leitersystem und das Rohr in Rohr Zirkulationssystem bewegen sich bei ca. 12 - 13 €/m²_{WNF} während sich die 2-Leitersysteme aufgrund der Kosten der Wohnungsübergabestationen bei ca. 29 - 34 €/m²_{WNF} einpendeln. Beim Zweileitersystem mit elektrischer Nacherwärmung schlägt diese mit etwa 5 €/m²_{WNF} zu Buche.

Solarthermie

Die größere der beiden Anlagen mit Flachkollektoren weist mit 419 €/m² Aperturfläche um 113 €/m² Aperturfläche niedrigere spezifische Bauwerkskosten auf als die kleinere mit 532 €/m² Aperturfläche. Die Anlage mit Vakuumröhrenkollektor liegt damit mit spezifischen Bauwerkskosten von 658 €/m² Aperturfläche deutlich über denen der Flachkollektoren,

wobei die Vakuumröhrenkollektoren eine höhere Effizienz aufweisen, wodurch wiederum Fläche eingespart werden kann.

Flachkollektor	Flachkollektor	Vakuumkollektor
49 m ²	102 m ²	90 m ²
1.760 l Speicher*	3.550 l Speicher*	5.330 l Speicher*
532 [€/m ² Aperturfläche**]	419 [€/m ² Aperturfläche**]	658 [€/m ² Aperturfläche**]

*bei Pelletheizung ca. 20% größere Speicher
 ** inkl. Speicher, Verrohrung + Regelung

Abbildung 35: Netto-Bauwerkskosten der Solarthermieanlagen inkl. Speicher, Verrohrung und Regelung pro m²_{WNF}

5.3 Lebenszykluskosten des Gebäudes

Mit der Lebenszykluskostenbetrachtung wird versucht ein Gebäude ganzheitlich während der gesamten Lebensdauer zu betrachten. Deshalb wird in dieser Studie eine Lebenszykluskostenbetrachtung durchgeführt um die Wirtschaftlichkeit einzelner Varianten miteinander zu vergleichen. Durch die Auswertung einzelner Parameter in Bezug auf die Kosten lassen sich auch Kostentreiber ermitteln. Es werden in Anlehnung an die (ÖNORM B 1801-4, 2014) und die (VDI 2067 Blatt 1, 2012) [40] folgende Kostenbestandteile berücksichtigt: Gesamtkosten (KG 0-9); Finanzierungskosten (inkl. Förderungen, falls vorhanden); Energiekosten inkl. Grundgebühren, Ersatzinvestitionen, Wartungskosten, Instandsetzung und Restwerten. Andere Folgekosten wie Verwaltung, Versicherung, Reinigung, Sicherheitsdienste, Gebäudedienste und auch der Abbruch werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

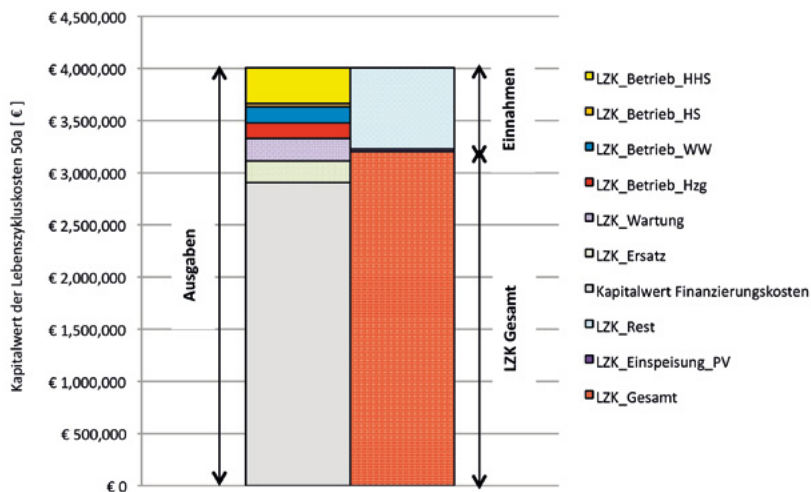


Abbildung 36: Prinzipielle Darstellung der Lebenszykluskosten^c

^c Aus betriebswirtschaftlicher Sicht werden Ausgaben meist mit negativem Vorzeichen dargestellt und Einnahmen positiv. Da in vorliegender Studie nur die Kosten berücksichtigt werden, also ohne Mieteinnahmen, würden sich außer für den Restwert und die PV-Einspeisung durchwegs negative Werte ergeben. Zur leichteren Verständlichkeit werden die Werte positiv dargestellt.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht werden Kosten, die in unterschiedlichen Zeiträumen anfallen anders bewertet. Deshalb werden in der Studie alle berücksichtigten Kosten dynamisch als Kapitalwerte berechnet, d.h. auf einen Referenzzeitpunkt bezogen.

Abbildung 36 ist eine prinzipielle Darstellung der Kapitalwerte über den Lebenszyklus für jene Kostenkomponenten, welche die in der Studie berücksichtigt werden. Die gestapelte Säule auf der linken Seite enthält in grau dargestellt den Kapitalwert der Finanzierung, welcher sich aus den Investitionskosten und den Kreditkosten unter Berücksichtigung der Förderung ergibt. Auf diesen aufgesetzt kommen die Kapitalwerte der Folgekosten wie Ersatzinvestition, Wartung, Heizung (Hzg), Warmwasser (WW), Hilfsstrom (HS) und Haushaltsstrom (HHS).

Die rechte Säule beginnt dann von oben nach unten mit den „Gutschriften“ aus Restwert (Rest) und Einspeisevergütung aus PV-Erzeugung (Einspeisung_PV). Mieteinnahmen bleiben unberücksichtigt. Der nun verbleibende rote Balken ist der Kapitalwert der Lebenszykluskosten (LZK_Gesamt) der betrachteten Variante. Anhand dieses Wertes können nun die Varianten untereinander verglichen und diejenige ausgewählt werden, welche die niedrigsten Lebenszykluskosten aufweisen.

Die Berechnung der Lebenszykluskosten und die Zusammenführung der Ergebnisse erfolgte in der Datenbank MS-Access® unter Berücksichtigung aller Randbedingungen. Die Höhe der Förderung, welche an die Energiekennwerte nach OIB-RL 6 (2011) geknüpft ist, wurde in einem eigenen MS-Excel® Modul ermittelt und ebenfalls über ein VBA-Makro für jede Variante berechnet und danach in der Datenbank zusammengeführt. Die Lebenszykluskosten wurden für das KliNaWo Projekt mit und ohne Berücksichtigung der Förderung berechnet, sowohl für gemeinnützige wie auch für private Bauträger. Berücksichtigt wurden die Förderbedingungen (Wohnbauförderung, Energieförderung) des Jahres 2015 in Vorarlberg.

Wie dargestellt wurde die Entscheidung über die zu realisierende Gebäudevariante nicht auf der Basis der Bauwerks- oder Errichtungskosten, sondern auf Grundlage der Lebenszykluskosten gefällt. Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse der Lebenszyklus- und der Energiebedarfsberechnungen für alle 60.000 Varianten zusammen.

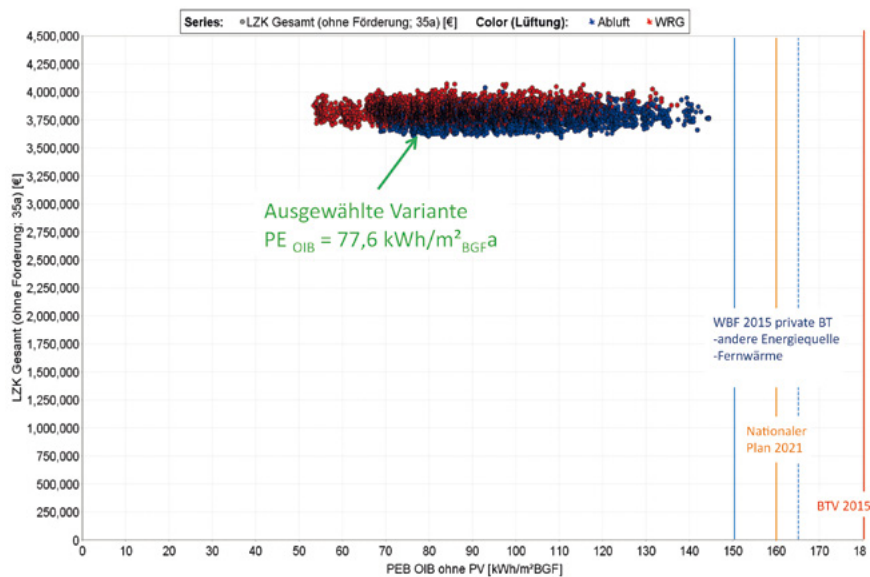


Abbildung 37: Lebenszykluskosten aller Varianten für Private (ohne Berücksichtigung der WBF und ohne Energieförderung) über dem Primärenergiebedarf_{OIB (2011)}

In Abbildung 37 sind die Lebenszykluskosten aller Varianten für Private (ohne Berücksichtigung der WBF und ohne Energieförderung) über dem Primärenergiebedarf $PE_{OIB(2011)}$ dargestellt. Auf der y-Achse sind die Lebenszykluskosten (Investition, Energie, Wartung) aller 60.000 Varianten ohne Berücksichtigung der Wohnbauförderung Vorarlberg und der Energieförderung Vorarlberg dargestellt, auf der x-Achse der Primärenergiebedarf PEB bei Berechnung nach OIB RL 6(2011). Etwaige PV-Gewinne sind in den Primärenergiebedarf nicht eingerechnet. Der Betrachtungszeitraum beträgt 35 Jahre. Die blauen Punkte besitzen nur eine Abluftanlage, während die roten über eine Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung verfügen.

Betrachtet man die Punktwolke der Varianten für den privaten Bauherren ohne Berücksichtigung der Förderung, so fällt auf, dass die Lebenszykluskosten (LZK) bis zu einem sehr niedrigen Wert des $PE_{OIB(2011)}$ fallen und erst bei den sehr effizienten Varianten ansteigen. Das sehr flach ausgeprägte Kostenoptimum liegt in einem Bereich von etwa 75 bis 95 $kWh/m^2_{BGF}a$ und damit bei etwa der Hälfte des im Nationalen Plan Österreichs für 2021 vorgesehenen Grenzwerts von 160 $kWh/m^2_{BGF}a$ [4]. Der $PE_{OIB(2011)}$ typischer Passivhausvarianten liegt zum Vergleich bei knapp 80 $kWh/m^2_{BGF}a$.

Die LZK der Varianten, die einen hohen $PE_{OIB(2011)}$ aufweisen, liegen deutlich über denen der kostenoptimalen Varianten, d.h. die ineffizientesten Varianten sind auch die unwirtschaftlichsten. Ähnliche Verläufe des Kostenoptimums zeigen sich auch für die Betrachtung mit Förderung für die privaten Bauträger: das Kostenoptimum liegt mit der Vorarlberger Wohnbau- und Vorarlberger Energieförderung etwa 10 $kWh/m^2_{BGF}a$ unter den Werten in Abbildung 37.

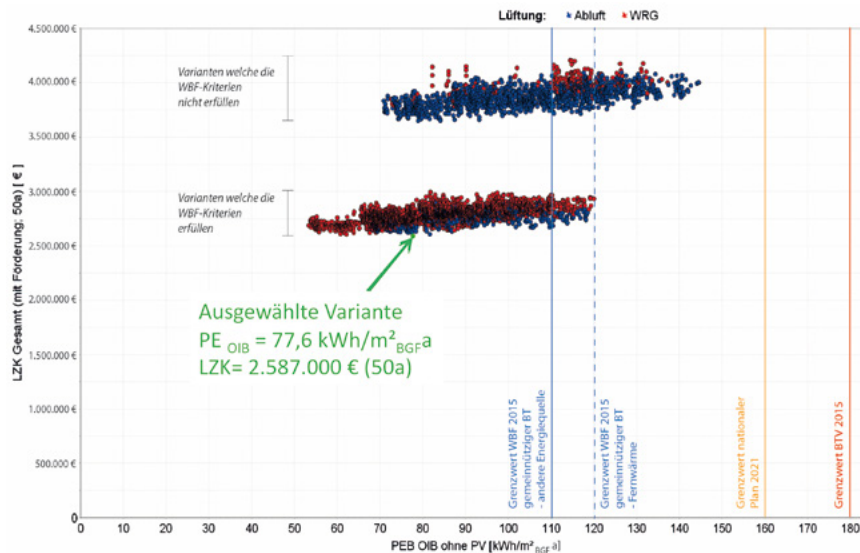


Abbildung 38: Lebenszykluskosten aller Varianten für Gemeinnützige (unter Berücksichtigung der WBF für Gemeinnützige und der Energieförderung) über dem Primärenergiebedarf $PE_{OIB(2011)}$

In Abbildung 38 sind die Lebenszykluskosten aller Varianten für Gemeinnützige (unter Berücksichtigung der Wohnbauförderung Vorarlberg für Gemeinnützige und der Energieförderung Vorarlberg) über dem $PE_{OIB(2011)}$ dargestellt. Auf der y-Achse sind die Lebenszykluskosten (Investition, Energie, Wartung) aller 60.000 Varianten dargestellt, auf der x-Achse der Primärenergiebedarf PEB bei Berechnung nach OIB RL 6(2011). Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre. Die durch blaue Punkte repräsentierten Varianten haben eine Abluftanlage

ge, während die roten über eine Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung verfügen.

In der oberen Punktwolke sind die Varianten ersichtlich, die keine Wohnbauförderung (WBF) erhalten würden, weil sie mindestens eine energetische Anforderung der WBF für Gemeinnützige nicht einhalten, z.B. weil sie einen $HWB_{OIB(2011)}$ von größer $25 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\text{a}$ haben. Da derartige Varianten für die gemeinnützigen Bauvereinigungen wirtschaftlich uninteressant sind und daher nicht gebaut werden, werden die Ergebnisse nicht weiter diskutiert.

Die untere Wolke zeigt die Varianten, die alle energetischen Mindestanforderungen einhalten und damit Wohnbauförderung erhalten. Wie leicht zu erkennen ist, liegen die Lebenszykluskosten der geförderten Varianten deutlich unter denen ohne Förderung.

Der weit überwiegende Teil der Förderung wird nicht nach energetischen oder ökologischen, sondern nach sozialen Kriterien wie verfügbarem Einkommen und Familienstruktur vergeben. Betrachtet man die Punktwolke der geförderten Varianten, so fällt auf, dass die Lebenszykluskosten LZK bis zu einem sehr niedrigen Wert des $PEB_{OIB(2011)}$ fallen. Das sehr flach ausgeprägte Kostenoptimum liegt in einem Bereich von etwa 55 bis $85 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\text{a}$ (Vergleiche auch Abbildung 40) und damit bei mehrheitlich weniger als der Hälfte des im Nationalen Plan Österreichs für 2021 vorgesehenen Grenzwerts von $160 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\text{a}$ [4]. Zum Vergleich: der $PEB_{OIB(2011)}$ typischer Passivhausvarianten liegt bei knapp $80 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\text{a}$.

Die LZK der Varianten, die die Mindestanforderungen der Vorarlberger Wohnbauförderung für Gemeinnützige gerade einhalten (110 bzw. $120 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\text{a}$) liegen je nach eingesetztem Energieträger, deutlich über denen der kostenoptimalen Varianten.

Ähnliche Verläufe des Kostenoptimums zeigen sich auch für die Betrachtung ohne jegliche Förderung. Das Kostenoptimum liegt auch ohne der Vorarlberger Wohnbau- und Vorarlberger Energieförderung nur geringfügig über dem in Abbildung 38 dargestellten Bereich.

5.4 Die wirtschaftlichsten Varianten

Wie schon in Abbildung 29 dargestellt liegen die Mehrkosten einer Variante im Passivhausniveau mit 102 m^2 thermischer Solaranlage um $5,8\%$ über denen jener Variante in gleicher Konstruktionsart (Ziegel + WDVS) und mit gleichem Wärmeversorgungssystem (Sole-WP), jedoch im Energieniveau BTV und ohne thermische Solaranlage. Der PEB_{PHPP} der Passivhaus-Variante (ohne Haushaltsstrom) liegt um 72% unter dem der Variante nach BTV. Trotz der Mehrkosten liegen die Lebenszykluskosten der energetisch besseren Variante schon ohne Berücksichtigung jeglicher Förderung um $1,7\%$ unter denen der energetisch schlechteren. Die Auswahl der Variante nach den Bauwerkskosten führt demnach zu einer Fehlentscheidung, die dem Bauherrn bzw. den künftigen Bewohnern im Lebenszyklus höhere Kosten verursacht. Dies gilt erst recht, wenn Wohnbau- und Energieförderung Vorarlberg berücksichtigt werden. Hier liegen die Lebenszykluskosten der Passivhaus-Variante unter Berücksichtigung der Förderungen bereits unter 30% gegenüber jenen der BTV-Variante.

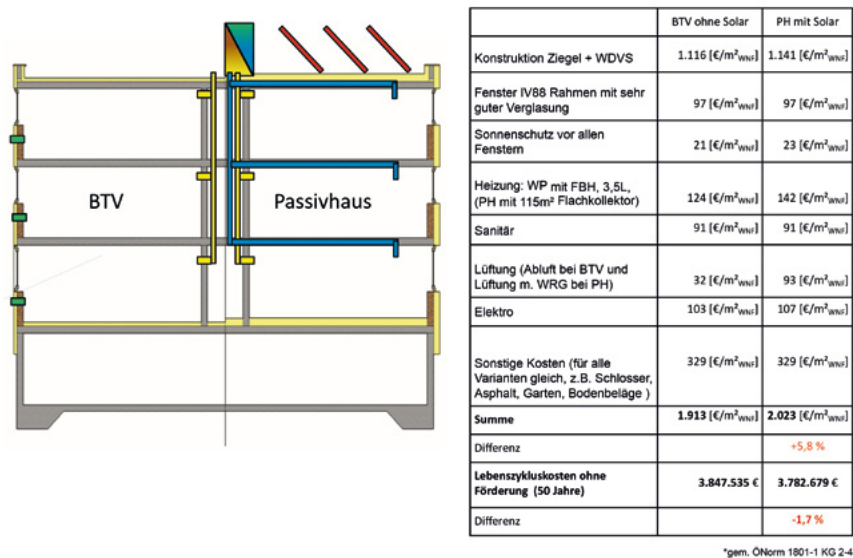


Abbildung 39: Bauwerkskosten nach Grobkostenelementen und Lebenszykluskosten der Varianten BTV ohne Solar und PH mit Solar (beide in Konstruktion Ziegel+WDVS mit WP-Heizung)

In Abbildung 40 sind die Lebenszykluskosten aller Varianten für den gemeinnützigen Bauträger unter Berücksichtigung der Förderungen dargestellt. Wie man dort sieht, gibt es dort kein eindeutiges wirtschaftliches Optimum, sondern einen Bereich der möglichen Optima, so wie es auch in den Leitlinien zur delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [41] beschrieben wird. In vorliegender Studie wird dieser Bereich als die wirtschaftlichsten 1% aller Fälle definiert. Das bedeutet, dass von den 60.000 untersuchten Varianten 600 in diese Gruppe fallen. Diese sind in der Abbildung rot dargestellt und werden nachfolgend genauer analysiert. In der Abbildung überlagern sich viele Punkte, weshalb nicht alle 600 als einzelne Punkte wahrgenommen werden können.

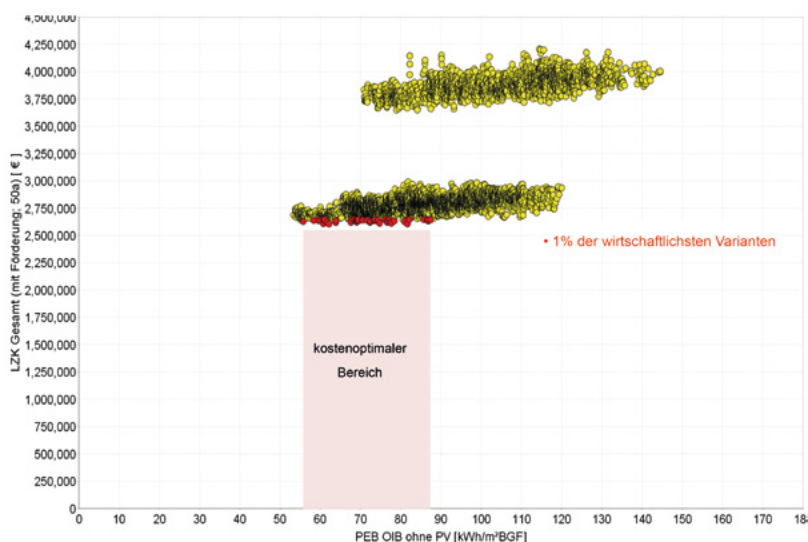


Abbildung 40: Darstellung des 1% der wirtschaftlichsten Varianten im gemeinnützigen Wohnungsbau unter Berücksichtigung der Förderung (rote Punkte)

Im Folgenden wird dieses wirtschaftlichste 1% untersucht, und herausgearbeitet welche Gemeinsamkeiten die Varianten hinsichtlich ihrer Parameterkonfiguration aufweisen. Kann man eindeutige Gemeinsamkeiten feststellen, so können diese zur Variantenfindung herangezogen werden. In Abbildung 41 werden diese Gemeinsamkeiten dargestellt. So sieht man zum Beispiel, dass 100% der wirtschaftlichsten Varianten eine Passivhaushülle haben. Die Gemeinsamkeiten kann man wie folgt zusammenfassen:

- **Gebäudehülle:** sämtliche der wirtschaftlichsten Varianten haben Passivhausqualität
- **Fenster:** 72% der wirtschaftlichsten Varianten haben die marktbeste Verglasung
- **Konstruktion:** Unter den wirtschaftlichsten Varianten ist der Massivbau in allen Ausführungen etwa gleich stark vertreten, also der gedämmte Ziegel, der Ziegel mit Wärmedämmverbundsystem und der Stahlbeton mit Holzfassade. Der Holzbau hätte besser abgeschnitten, wenn der Entwurf von Anfang an auf den Holzbau optimiert worden wäre, insbesondere, wenn man die kürzeren Bauzeiten mitbewerten würde.
- **Lüftung:** Für die Varianten mit hocheffizienter Wärmepumpe ist die Abluftanlage meist wirtschaftlicher, als die Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung. Bei den Varianten mit Fernwärme und Pellets ist aufgrund der höheren Energieeinsparung die Komfortlüftung wirtschaftlicher (in dieser Abbildung nicht dargestellt).
- **Wärmeerzeugung:** 97% der wirtschaftlichsten Varianten verfügen über eine Erdreich-Wärmepumpe.
- **Solarthermie:** Alle wirtschaftlichsten Varianten verfügen über Solarthermie und 70% dieser Varianten über eine Anlage mit 115 m² Flachkollektoren.
- **Fotovoltaik:** Ohne Einspeisevergütung durch die OeMAG ist eine PV-Anlage noch knapp von der Wirtschaftlichkeit entfernt, immerhin 27% der wirtschaftlichsten Varianten verfügen dennoch über eine Anlage mit 10 kWp.

Hüllqualität	PH	100%	BTV	0%		
Konstruktion	Holz	6%	Massiv	41%	Misch	25%
Fenster	IV88Ug055g58	72%	IV88Ug070g43	13%	PHUg053g53	15%
Verschattung	teil	88%	voll	12%		
Lüftung	Abluft	59%	WRG	41%		
Wärmeerzeugung	Fern	3%	WP	97%	Gas	0%
Wärmeverteilung	2leiter	20%	2leiter35°C	4%	3,5leiter	58%
Wärmeabgabe	FBH	45%	HK_außen	20%	HK_innen	23%
Solarthermie	groß	26%	klein	5%	mittel	70%
PV_Strom	0_kWp	50%	10_kWp	27%	20_kWp	19%
					35_kWp	5%

Abbildung 41: Gemeinsamkeiten des 1% der wirtschaftlichsten Varianten im gemeinnützigen Wohnungsbau unter Berücksichtigung der Förderung.

Wie man in Abbildung 40 sieht, gibt es nicht „die eine wirtschaftliche Variante“, sondern eine Vielzahl möglicher Kombinationen, welche alle im wirtschaftlichen Bereich liegen und deshalb als gleichwertig gesehen werden müssen. Für vorliegendes Projekt wurde, ausgehend von den Ergebnissen, folgende Variante ausgewählt, die schlussendlich gebaut wird:

Die Hülle in Passivhausqualität, gebaut aus Ziegel mit einem

- Wärmedämmverbundsystem,
- Fenster mit bester Verglasung,
- Erdreich-Wärmepumpe,
- 115 m² thermische Solaranlage und
- eine Abluftanlage.

Das Energieinstitut Vorarlberg und die Fachplaner würden aus Behaglichkeitsgründen und wegen der nur minimal höheren Kosten die Komfortlüftung bevorzugen, die VOGEWOSI als Bauherrin verspricht sich von der Lösung mit Abluftanlage eine geringere haustechnische Komplexität.

Der Einfluss der Förderung auf das Kostenoptimum wird in Abbildung 42 dargestellt, dabei wird nach der Art des Wärmeversorgungssystems differenziert. Die Abbildung zeigt das Kostenoptimum bezüglich des $PEB_{(OIB\ 2011)}$ differenziert nach dem Wärmeversorgungssystem. Je Energieträger sind drei Säulen dargestellt: die jeweils linke Säule beschreibt das im KliNaWo-Projekt ermittelte Kostenoptimum ohne Förderung, die mittlere das Optimum unter Berücksichtigung der WBF und der Energieförderung. Die jeweils rechte Säule zeigt im Vergleich die Werte des Kostenoptimums, die in einer früheren, theoretischen Studie des Energieinstitut Vorarlberg mit e7 Energie Markt Analyse GmbH ermittelten Werte [28].

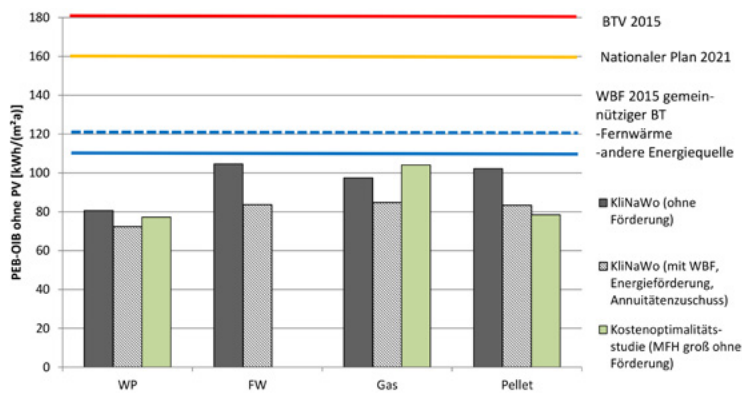


Abbildung 42: Kostenoptima des Primärenergiebedarfs OIB RL-6 (2011) differenziert nach Wärmeversorgungssystem - mit und ohne Berücksichtigung der Förderung

Als Kostenoptimum wurde der Wert definiert, der dem mittleren Primärenergiekennwert $PEB_{(OIB(2011))}$ des 1% der wirtschaftlichsten Varianten eines Energieträgers entspricht.

Ablesebeispiel: Von den 60.000 untersuchten Varianten entfallen auf jedes der vier Wärmeversorgungssysteme 15.000 Varianten. Zur Bestimmung des Kostenoptimums werden für jeden Energieträger die 150 Varianten mit den niedrigsten LZK herangezogen (1% der wirtschaftlichsten Varianten je Energieträger). Als Kostenoptimum wird der Mittelwert des Primärenergiebedarfs $PEB_{(OIB(2011))}$ dieser 150 wirtschaftlichsten Varianten definiert. Der Mittelwert der besten 150 (=1%) Varianten mit WP beträgt ohne Berücksichtigung jeglicher Förderung $80 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\cdot\text{a}$ (linke Säule).

Wie die Darstellung zeigt, liegen die Kostenoptima für alle Wärmeversorgungssysteme schon ohne jegliche Förderung nicht nur deutlich unter dem Grenzwert der BTV Vorarlberg für private Bauträger von $180 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\cdot\text{a}$ und dem Wert des Nationalen Plans von $160 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\cdot\text{a}$ (für das Jahr 2021), sondern auch unter den strengeren Grenzwerten der Wohnbauförderung Vorarlberg von $120 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\cdot\text{a}$ für Biomasse-Fernwärme und $110 \text{ kWh/m}^2_{BGF}\cdot\text{a}$ für alle anderen Energieträger.

Die Berechnungen mit veränderten Randbedingungen für private Bauträger (Betrachtungszeitraum 35 statt 50 Jahre, abweichendes Fördermodell) zeigen sehr ähnliche Ergebnisse. Auch die Annahme etwas stärker oder schwächer steigender Energiepreise (Sensitivitätsstudie mit Veränderung der Preissteigerung um $\pm 1\%$) zeigt fast unveränderte Ergebnisse für das Kostenoptimum bezüglich des $PEB_{(OIB(2011))}$ wie in Kapitel 5.5 beschrieben ist.

In der folgenden Abbildung sind die nach Wärmeversorgungssystem differenzierten Kostenoptima der CO_2 -Emissionen dargestellt.

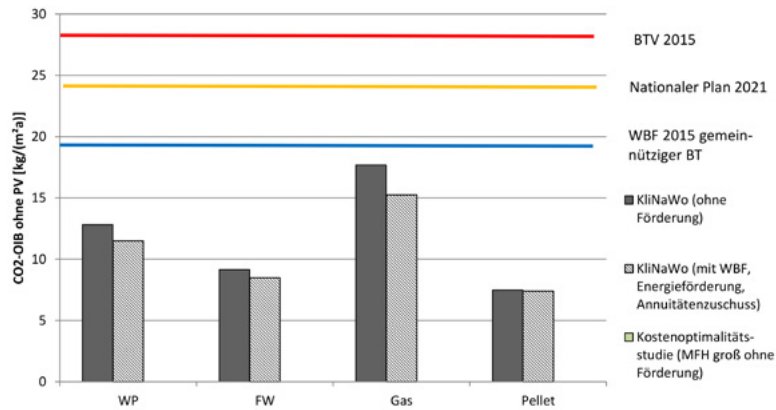


Abbildung 43: Kostentoptima der CO₂-Emissionen_{OIB (2011)} differenziert nach Wärmeversorgungssystem - mit und ohne Berücksichtigung der Förderung

Wie zu erkennen liegen die Kostentoptima mit allen vier Wärmeversorgungssystemen schon ohne jegliche Förderung drastisch unter den Anforderungen der BTV 2015: im Einzelnen liegt das Kostentoptimum für Gas um 37%, für Pellet um 73%, für Fernwärme um 67% und für Wärmepumpen um 54% unter dem Grenzwert nach BTV.

Unter Berücksichtigung der Energie- und der Wohnbauförderung liegen die Kostentoptima der CO₂-Emissionen um 46 bis 74% unter den Mindestanforderungen der BTV 2015.

5.5 Sensitivitätsanalyse Energiepreissteigerung

Im folgenden Unterpunkt wird der Einfluss der Annahmen über den zukünftigen Energiepreis untersucht. Dazu wird die Energiepreissteigerungen um $\pm 1\%$ variiert um den Einfluss auf das Ergebnis zu untersuchen. In Abbildung 44 wird als Ergebnis der Kapitalwert der Lebenszykluskosten als Mittelwert über alle Fälle dargestellt, für die unterschiedlichen Szenarien der Energiepreissteigerung für den gemeinnützigen Wohnbau unter Berücksichtigung der Förderung. Man sieht, dass bei einer Energiepreissteigerung von 1% weniger als angenommen, die Lebenszykluskosten um ca. 5% sinken, während bei einem Anstieg von 1% mehr, die Lebenszykluskosten um 6% ansteigen.

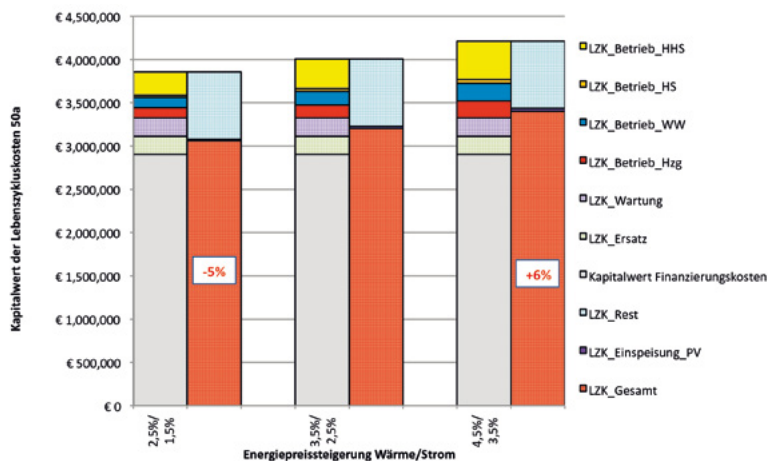


Abbildung 44: Kapitalwert der Lebenszykluskosten als Mittelwert über alle Fälle, dargestellt für die unterschiedlichen Szenarien der Energiepreissteigerung für den gemeinnützigen Wohnbau mit Berücksichtigung der Förderung.

Mit den variierten Energiepreisteigerungen werden dieselben Auswertungen durchgeführt, wie in Kapitel 5.4 beschrieben ist, und untersucht, wie sich die Variationen auf die Ergebnisse auswirken. Es kann festgehalten werden, dass sich am Einfluss der Parameter und den wirtschaftlichsten Varianten keine wesentlichen Änderungen ergeben. Im Allgemeinen ist es so, dass Effizienzmaßnahmen wie eine sehr gute Gebäudehülle oder gute Fenster mit stärker steigenden Energiepreisen wirtschaftlicher werden, aber auch bei schwach ansteigenden Energiepreisen durchaus wirtschaftlich sind wie in Abbildung 45 gezeigt wird. Am Beispiel der Wärmepumpe sieht man, dass diese bei einer schwächeren Energiepreisteigerung bei 77% der wirtschaftlichsten Varianten vorhanden ist, während bei einer um nur 1% stärkeren Energiepreisteigerung bereits 100% der Fälle eine Wärmepumpe haben. Bei der Hüllqualität sieht man, dass die Passivhaushülle immer mit 100% Beteiligung die wirtschaftlichste Lösung ist. Auch bei der solarthermischen Anlage verhält es sich ähnlich. Bei der PV-Anlage ist es so, dass bei einem um 1% höheren Energiepreisanstieg die Anlagen in fast 60% unter den wirtschaftlichsten Varianten vertreten sind.

2,5% Energiepreisteigerung (-1%)

Hüllqualität	BTV	0%	PH	100%		
Konstruktion	Holz	5%	Massiv	44%	Misch	25%
Fenster	IV88Ug070g43	12%	IV88Ug055g58	76%	PHUg053g53	12%
Verschattung	teil	90%	voll	10%		
Lüftung	Abluft	61%	WRG	39%		
Wärmeerzeugung	Fern	23%	WP	77%	Gas	0%
Wärmeverteilung	2leiter	17%	2leiter35°C	4%	3,5leiter	63%
Wärmeabgabe	FBH	40%	HK_außen	21%	HK_innen	24%
Solarthermie	keine	0%	klein	9%	mittel	69%
PV_Strom	0_kWp	61%	10_kWp	25%	20_kWp	12%
					35_kWp	2%

3,5% Energiepreisteigerung (±0%) (Ausgangslage)

Hüllqualität	BTV	0%	PH	100%		
Konstruktion	Holz	6%	Massiv	41%	Misch	25%
Fenster	IV88Ug070g43	13%	IV88Ug055g58	72%	PHUg053g53	15%
Verschattung	teil	88%	voll	12%		
Lüftung	Abluft	59%	WRG	41%		
Wärmeerzeugung	Fern	3%	WP	97%	Gas	0%
Wärmeverteilung	2leiter	20%	2leiter35°C	4%	3,5leiter	58%
Wärmeabgabe	FBH	45%	HK_außen	20%	HK_innen	23%
Solarthermie	keine	0%	klein	5%	mittel	70%
PV_Strom	0_kWp	50%	10_kWp	27%	20_kWp	19%
					35_kWp	5%

4,5% Energiepreisteigerung (+1%)

Hüllqualität	BTV	0%	PH	100%		
Konstruktion	Holz	6%	Massiv	42%	Misch	24%
Fenster	IV88Ug070g43	16%	IV88Ug055g58	68%	PHUg053g53	16%
Verschattung	teil	89%	voll	11%		
Lüftung	Abluft	51%	WRG	49%		
Wärmeerzeugung	Fern	0%	WP	100%	Gas	0%
Wärmeverteilung	2leiter	24%	2leiter35°C	4%	3,5leiter	59%
Wärmeabgabe	FBH	47%	HK_außen	19%	HK_innen	22%
Solarthermie	keine	0%	klein	1%	mittel	72%
PV_Strom	0_kWp	41%	10_kWp	27%	20_kWp	24%
					35_kWp	9%

Abbildung 45: Sensitivitätsanalyse der Energiepreisteigerung und Gemeinsamkeiten des 1% der wirtschaftlichsten Varianten im gemeinnützigen Wohnungsbau unter Berücksichtigung der Förderung (Quelle: Energieinstitut Vorarlberg).

6. Auswahl der Variante für den Bau

6.1 Zur Realisierung ausgewählte Variante

Zur Realisierung wurde die folgende Variante gemeinschaftlich ausgewählt:

- Hülle Passivhausqualität,
- Außenwand Ziegel + Wärmedämmverbundsystem,
- Holz-Alu-Fenster IV 88 mit der besten der untersuchten Verglasungen,
- kontinuierlich betriebene zentrale Abluftanlage, die mit dem gleichen Luftvolumenstrom von ca. $0,3\text{h}^{-1}$ betrieben wird, der für die Komfortlüftung ermittelt wurde,
- effiziente Sole-Wärmepumpe,
- Fußbodenheizung,
- mittlere Solarthermie (Aperturfläche 102 m^2),
- ohne Photovoltaik.

Die Entscheidung für die Variante WDVS fiel, da die VOGEWOSI mit diesem System gute Erfahrungen hat. Einziger strittiger Punkt war die Wahl des Lüftungssystems. Während das Energieinstitut Vorarlberg, die Fachplaner und die Uni Innsbruck aus Komfortgründen und wegen der geringfügig besseren Energiekennwerte für die Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung plädierten, favorisierten der Bauherr VOGEWOSI und die Arbeiterkammer Vorarlberg, die Abluftanlage. Hauptgrund für diese Präferenz war der Wunsch nach einer Vereinfachung des Gesamt-Haustechniksystems und der - wenn auch sehr geringe - Vorteil des Abluftsystems bezüglich der Lebenszykluskosten.

U-Wert Außenwand	W/(m ² K)	0,118
U-Wert Flachdach	W/(m ² K)	0,081
U-Wert Kellerdecke (nicht konditioniert)	W/(m ² K)	0,146
U-Wert Decke Tiefgarage	W/(m ² K)	0,146
Fenster (U_w-Wert; U_g / g-Wert) Normmaßbezug	W/(m ² K) / -	0,75; 0,52/0,53
Wärmebrückenzuschlag	W/(m ² K)	0,028
Luftdichtheit n₅₀	h ⁻¹ _{@50PA}	0,6 projiziert
Luftwechselrate (Abluftsystem)	h ⁻¹	0,3
HWB PHPP bei 20°	kWh/(m ² _{EBF} a)	27
HWB PHPP bei 22°	kWh/(m ² _{EBF} a)	34
Warmwasserbedarf (PHPP Standard +30)	l/Pers*d (60°)	32,5
Aperturfläche Solarthermie (Flachkollektor)	m ²	102,2
Speichergröße Kombispeicher	l	6.700
COP Wärmepumpe WW (B0 / W 55 - 47)	-	2,8
COP Wärmepumpe Heiz (B0 / W35)	-	4,3
Endenergiebedarf Heiz+WW (20° und 25l) ohne Hilfsstrom	kWh/(m ² _{EBF} a)	8,7
Endenergiebedarf Heiz+WW (22° und 32,5l) ohne Hilfsst.	kWh/(m ² _{EBF} a)	10,4

Abbildung 46: Energetische Daten der Ausführungsvariante im Überblick.

6.2 Einfluss der Konstruktionsart

Wie Detailauswertungen zeigen, hat die Konstruktionsart nur einen sehr geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten (LZK). Der größte Anteil der wirtschaftlichsten Varianten verfügt über die Konstruktion in Massivbau mit dämmstoffgefülltem 50er Ziegel; die Lebenszykluskosten (LZK) der Varianten mit anderen Konstruktionsarten (Massiv mit WDVS, Mischbau und Holzbau) liegen jedoch nur minimal höher. Würde man wie in Abbildung 47 dargestellt, etwa die im Vergleich zur Massivbauvariante um 1,2% höheren LZK der Holzbauvariante auf eine monatliche Miete umlegen, so betrüge der Mehrpreis etwa $0,04 \text{ €/m}^2_{\text{WNF}}$ pro Monat.

Während also die Konstruktionsart nur einen minimalen Einfluss auf die Lebenszykluskosten hat, gilt für alle untersuchten Konstruktionen, dass die hocheffizienten Varianten (Hüllqualität Passivhaus) niedrigere LZK als die Varianten nach Mindeststandards (Hüllqualität BTV) haben.

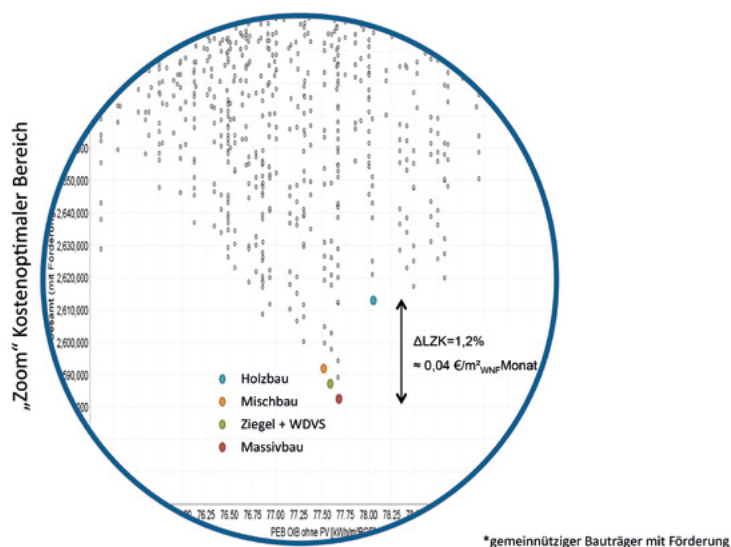


Abbildung 47: Zoom im kostenoptimalen Bereich um den Einfluss der verschiedenen Konstruktionsarten aufzuzeigen.

6.3 Wirtschaftlichkeit der Komfortlüftung

Trotz der vergleichsweise hohen Angebotspreise von $98 \text{ €/m}^2_{\text{WNF}} \cdot \text{a}$ und der Berücksichtigung von Kosten für die Reinigung des kompletten Luftverteilsystems (Ab- und Zuluft - alle 7 Jahre zusätzlich zu den jährlichen Wartungskosten) zeigt die Detailauswertung der LZK der Lüftungssysteme, dass die Komfortlüftung in Kombination mit Fernwärmeheizung und Pelletheizung die geringfügig wirtschaftlichere Variante ist. Bei Wärmepumpen- und Gas-systemen weist die Komfortlüftung nur geringfügig höhere Lebenszykluskosten auf. Die Unterschiede der LZK zwischen Komfortlüftung und Abluftsystem liegen - je nach eingesetztem Wärmeversorgungssystem - zwischen -5.000 und + 5.000 € in 50 Jahren für eine Wohnfläche von 1.263 m^2 . Legt man dies auf die Warmmiete um, so entspricht die Differenz einer Warmmieterhöhung/Reduktion von $1 \text{ ct/m}^2_{\text{WNF}}$ pro Monat. Die höhere Behaglichkeit der Komfortlüftung mit WRG ist damit trotz der vergleichsweise hohen Angebotspreise und der voll berücksichtigten Reinigungskosten fast warmmietneutral.

Zum Vergleich: Während die Komfortlüftung mit WRG im Projekt KliNaWo zu Kosten von etwa 6.500 € pro Wohneinheit angeboten wurde, liegen die Kosten in den Projekten der großen Tiroler Gemeinnützigen derzeit bei etwa 3.800 bis 4.500 € pro Wohneinheit. Den Tiroler Gesellschaften ist es in den vergangenen acht Jahren gelungen, die Kosten der Komfortlüftung durch stetige Optimierungen deutlich zu reduzieren. In ersten Projekten um das Jahr 2009 lagen die Kosten noch bei über 6.000 € pro Wohneinheit.

Auch in Vorarlberg sind deutlich niedrigere Kosten als im Projekt KliNaWo realisierbar: so lagen die Kosten der wohnungsweisen Komfortlüftungen im Projekt Langenegg-Unterstein bei etwa $60 \text{ €/m}^2_{\text{WNF}}$ [39].

7. Zwischenresümee und derzeitiger Stand

7.1 Derzeitiger Stand der Realisierung und Ausblick

Der Realisierung des Gebäudes läuft seit April 2016 und wird voraussichtlich im Herbst 2017 termingerecht abgeschlossen werden. Nach Bezug der Wohnungen startet ein zweijähriges Monitoring der Energieverbräuche sowie der wichtigsten Behaglichkeitsparameter. Nachfolgende Abbildungen zeigen einige Baustellenfotos.



Abbildung 48: Baustellenfotos MFH „KliNaWo“ in Feldkirch-Tosters



Abbildung 49: Baustellenfotos MFH „KliNaWo“ in Feldkirch-Tosters

7.2 Beteiligte und Projektfinanzierung

Bauherr ist die gemeinnützige Bauvereinigung VOGEWOSI, die ebenso wie die Arbeiterkammer Vorarlberg auch Finanzierungspartner des Projekts ist. Der aus dem Forschungsprojekt resultierende Planungsmehraufwand und die wissenschaftliche Begleitung werden als Projekt des Comet-Zentrums ALPS in Innsbruck gefördert. Als weitere Firmenpartner in der zweiten Projektphase konnten die gemeinnützigen Bauvereinigungen Alpenländische Heimstätte, Vorarlberg und Wohnbauselbsthilfe Vorarlberg gewonnen werden. COMET Projekte werden durch die Bundes-Ministerien BMVIT und BMWFW sowie durch das Land Vorarlberg gefördert und durch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Die Hardwarekosten des Monitorings werden vom Land Vorarlberg getragen.

Wissenschaftspartner sind die Universität Innsbruck (Institut für Konstruktion u. Materialwissenschaften - Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen) und das Passivhaus Institut, Standort Innsbruck. Das Forschungsprojekt wird vom Energieinstitut Vorarlberg geleitet.

Die Gebäudeplanung wurde vom folgenden Planungsteam übernommen:

- Architektur: walsler + werle | architekten zt gmbh, Feldkirch
- Planung Haustechnik: Planungsteam e-plus GmbH, Egg
- Bauphysik: Spektrum - Zentrum für Umwelttechnik und -management GmbH, Dornbirn
- Statik: M+G Ingenieure, Feldkirch
- Elektroplanung: ekplan | Elektroplanung, Nenzing

7.3 Wichtigste Erkenntnisse

Energieeffizienz ist wirtschaftlich! Das Vorarlberger Modellprojekt „KliNaWo“ zeigt, dass die Mehrkosten von Effizienzmaßnahmen im Neubau so gering sind, dass hocheffiziente Gebäude im Lebenszyklus die niedrigsten Kosten verursachen. Kostenoptimale Gebäude haben einen etwa halb so hohen Primärenergiekennwert, wie die Mindestanforderungen der BTV. Im Einzelnen kann detailliert zusammengefasst werden:

- Das Energieniveau hat einen geringen Einfluss auf die Bauwerks- und Errichtungskosten. Die Energieeffizienz ist kein wesentlicher Kostentreiber am Bau.
- Die im Projekt KliNaWo sehr detailliert ermittelten Mehrkosten stimmen mit den Angaben innovativer Bauträger überein.
- Die baulichen Mehrkosten im KliNaWo Projekt werden im Lebenszyklus auch ohne jegliche Förderung mehr als kompensiert.
- Die Kostenoptima des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen liegen im Bereich von Passivhäusern.
- Derartige Primärenergiekennwerte können mit unterschiedlichen Energiekonzepten erreicht werden, solange die Hülle sehr effizient ist.
- Die ausgewählte Variante hat Errichtungskosten, die deutlich unter der Kostengrenze der Wohnbauförderung liegen und somit kostengünstiger ist, als die meisten momentan realisierten ähnlichen Gebäude.
- Die Kostenoptima des Primärenergiebedarfes und analog der CO₂ Emissionen sind sehr flach ausgeprägt.
- Die Kostenoptima des Primärenergiebedarfs liegen - auch ohne Förderung - weit unter den derzeitigen [33] und den geplanten [4] Grenzwerten. Somit wird gezeigt, dass Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit keine entgegengesetzten Strategien sind, sondern sich sehr gut ergänzen können.
- Passivhaushülle und hocheffiziente Fenster sind auch ohne Förderung in den meisten Fällen wirtschaftlich. Dies ergibt sich auch aus den langen Lebensdauern dieser Komponenten im Vergleich zur Haustechnik.
- Die Variantenauswahl nach Lebenszykluskosten ist sinnvoll und sollte verstärkt als Entscheidungskriterium herangezogen werden. Somit können zum einen die Betriebskosten für Vermieter, Mieter und Eigentümer gesenkt werden und zum anderen im gemeinnützigen Wohnbau aus Sicht des Landes spätere finanzielle Belastungen, wie zum Beispiel ein Heizkostenzuschuss für die Bewohner vermieden werden.
- Damit die Bewertungen nach Lebenszykluskosten vermehrt zur Anwendung kommt, müssen die gewonnenen Erkenntnisse, vor allem die Methoden und Berechnungsverfahren für zukünftige Projekte angepasst und einer breiteren Zielgruppe zugänglich gemacht werden.
- Fördersysteme sollten idealerweise die Leistbarkeit kostenoptimaler und energieeffizienter Gebäude unterstützen.

8. Quellen und Literatur

- [1] Martin Ploss, Gerrit Horn, und Jens Rieksmeier, „Modellvorhaben Kostengünstige Passivhäuser Kaiserslautern“, Ministerium der Finanzen Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern, Forschungsbericht, 2001 [Online]. Verfügbar unter: http://www.holzbaue-horn.de/pdf/endbericht_kostenguenstige_passivhaeuser_kl.pdf
- [2] T. Hatt, „El estándar ‚Passivhaus‘ en el centro-sur de Chile: Un estudio Parámetro multifactorial“, Universidad del Bio-Bio, Concepción, 2012 [Online]. Verfügbar unter: http://cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2012/hatt_t/html/index-frames.html
- [3] E. Naboni, Y. Zhang, A. Maccarini, E. Hirsch, und D. Lezzi, „Extending the use of parametric simulation in practice through a cloud based online service“, gehalten auf der IBPSA Italy-Conference of International Building Performance Simulation Association, Bozen, Italy, 2013.
- [4] Österreichisches Institut für Bautechnik, „ÖiB Dokument zur Definition des Niedrigenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem ‚Nationalen Plan‘ gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU“. Österreichisches Institut für Bautechnik, 28-März-2014.
- [5] Arnd Rose, Daniel Wöffen, Hans Erhorn, und Antje Bergmann, „Wege zum Effizienzhaus Plus; Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin, dritte Auflage, 2015.
- [6] E. Bauer, „Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit Investitions- und Nutzungskosten in Wohngebäuden gemeinnütziger Bauvereinigungen unter besonderer Berücksichtigung energetischer Aspekte“, Österr. Verband Gemeinnütziger Bauvereinigungen-Revisionsverband Vienna, 2013.
- [7] J. Schnieders, CEPHEUS: wissenschaftliche Begleitung und Auswertung; Endbericht. Passivhaus-Institut, 2001.
- [8] M. Treberspurg, R. Smutny, U. Ertl-Balga, R. Grüner, und C. Neururer, „Nachhaltigkeits-Monitoring ausgewählter Passivhaus-Wohnanlagen in Wien“, Proj. NaMAP Vienna Vienn. Hous. Res. MA 50, 2009.
- [9] Søren Peper, „Monitoring in der Passivhaus Siedlung Bahnstadt Heidelberg; Zwischenbericht 2014“, Passivhaus Institut Dr. Feist, Darmstadt, 2015.
- [10] W. Wagner und F. Mauthner, „Energietechnische und baubiologische Begleituntersuchung der Bauprojekte-Berichtsteil Passivwohnhausanlage Roschegasse“, AEE Inst. Fu R Nachhalt. Technol. Gleisdorf, 2008.
- [11] Energieinstitut Vorarlberg, „Energieverbrauchsauswertungen für das Projekt Langenegg Unterstein“, Dornbirn, 2017.
- [12] M. Greller, F. Schröder, V. Hundt, B. Mundry, und O. Papert, „Universelle Energiekennzahlen für Deutschland-Teil 2: Verbrauchskennzahlentwicklung nach Baualtersklassen“, Bauphysik, Bd. 32, Nr. 1, S. 1-6, 2010.
- [13] Bernd Leutner und Michael Clar, „Analyse des Einflusses der energetischen Standards auf die Baukosten im öffentlich geförderten Wohnungsbau in Hamburg“, Forschung + Beratung für Wohnen Immobilien und Umwelt GmbH, Hamburg, Endbericht, 2016.
- [14] Dietmar Walberg, Timo Gniechwitz, und Michael Halstenberg, „Kostentreiber für den Wohnungsbau Untersuchung und Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Gestehungskosten und auf die aktuelle Kostenentwicklung von Wohnraum in Deutschland“, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel, Bauforschungsbericht Nr. 67, 2015.
- [15] Michael Neitzel, Daniel Dangel, Wiebke Gottschalk, Heike Schröder, Norbert Raschper, und Brigitte Wiblishauser, „Bericht der Baukostensenkungskommission im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen“, Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin, Endbericht, 2015 [Online]. Verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Wohnungswirtschaft/buendnis_baukostensenkungskommission_bf.pdf. [Zugegriffen: 23-Dez-2016]
- [16] H. Schöberl, C. Lang, und S. Handler, „Ermittlung und Evaluierung der baulichen Mehrkosten von Passivhausprojekten“, Proj. Im Rahm. Program. Haus Zuk. Wien, 2011 [Online]. Verfügbar unter: http://www.schoeberlpoell.at/files/projekte/forschung/Endberichte/Passivhaus/endbericht_1163_ermittlung_evaluierung_passivhausprojekte.pdf. [Zugegriffen: 23-Dez-2016]
- [17] Austrian Standards, Energieeffizienz von Gebäuden - Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Energieanlagen in Gebäuden ÖNORM EN 15459: 2008 06 01. .
- [18] Energieinstitut Vorarlberg, Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechner econ calc. Dornbirn: Energieinstitut Vorarlberg, 2016 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.energieinstitut.at/unternehmen/werkzeugkasten/wirtschaftlichkeitsrechner-econ-calc/>
- [19] Amtsblatt der Europäischen Union, Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamteffizienz von Gebäuden (Neufassung)..

- [20] Iris Behr, „Heizkosten im Passivhaus - Warmmiete oder flatrate-Modell - Endbericht“, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Nov. 2008.
- [21] Marc Großklos, Effizienzhaus Plus mit ausschließlich erneuerbarer Energieversorgung. Dornbirn: Energieinstitut Vorarlberg, 2016.
- [22] „Forschung und Praxis - Aktiv Stadthaus in Frankfurt“, Detail Green, Bd. 2/2015.
- [23] Peter Biwald, „Schaffung von public value Zentrale Aspekte und strategische Konsequenzen am Beispiel der gemeinnützigen Wohnungswirtschaft“, KDZ Managementberatungs- und Weiterbildungs GmbH, Wien, Mai 2011.
- [24] J. Knissel et al., „Ökologischer Mietspiegel - Empirische Untersuchung über den möglichen Zusammenhang zwischen der Höhe der Vergleichsmiete und der wärmetechnischen Beschaffenheit des Gebäudes“, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Dezember 2003.
- [25] Europäische Union, „Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“, Amtsbl. Eur. Union Vom, Bd. 18, Nr. 2010, S. 13 - 35, 2010.
- [26] T. Boermans, K. Bettgenhäuser, A. Hermelink, S. Schimschar, und others, „Cost optimal building performance requirements“, Calc. Methodol. Report. Natl. Energy Perform. Requir. Basis Cost Optim. Framew. EPBD“European Counc. Energy Effic. Econ. Swed., 2011 [Online]. Verfügbar unter: http://www.ecofys.com/files/files/cost_optimality-eceereport.pdf. [Zugegriffen: 11-Apr-2016]
- [27] G. Hofer und B. Herzog, „Planungsunterstützende Lebenszykluskostenanalyse für nachhaltige Gebäude“, in Tagungsband e-nova, Pinkafeld, 2011, Bd. 2011 [Online]. Verfügbar unter: http://www.e-sieben.at/de/download/Hofer_Herzog_Planungsuntersttztzende_Lebenszykluskostenanalyse.pdf. [Zugegriffen: 20-Sep-2016]
- [28] M. Ploss, M. Brunn, D. Bachner, K. Leutgöb, und B. Jörg, „Analyse des kostenoptimalen Anforderungsniveaus für Wohnungsneubauten in Vorarlberg“, Energieinstitut Vorarlberg/e7 Energie Markt Analyse, Wien/Dornbirn, Endbericht 29., Nov. 2013.
- [29] Passivhaus Institut, PHPP 9.2 Passivhausprojektierungspaket. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2015 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.passiv.de>
- [30] U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 8.5.0. U.S. Department of Energy, 2016 [Online]. Verfügbar unter: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfmhttp://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm
- [31] M. Wetter, „Simulation-Based Building Energy Optimization“, University of California, Berkeley, 2004.
- [32] Y. Zhang, „Use jEPlus as an efficient building design optimisation tool“, gehalten auf der CIBSE ASHRAE Technical Symposium, London UK, 2012 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.jeplus.org/wiki/lib/exe/fetch.php?media=docs:072v1.pdf>. [Zugegriffen: 26-Aug-2014]
- [33] Vorarlberger Landesregierung, Verordnung der Landesregierung über die technischen Erfordernisse von Bauwerken (Bautechnikverordnung - BTV) mit Änderung 2015. 2014, S. 17 [Online]. Verfügbar unter: www.ris.bka.gv.at
- [34] Passivhaus Institut, designPH. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2015 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.passiv.de>
- [35] N. L. Long, B. L. Ball, K. A. Fleming, und D. L. Macumber, „Scaling Building Energy Modeling Horizontally in the Cloud with OpenStudio“, NREL (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2014 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/1226251>. [Zugegriffen: 12-Aug-2016]
- [36] Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB - Richtlinie 6 2011 Energieeinsparung und Wärmeschutz. 2011 [Online]. Verfügbar unter: <http://www.oib.or.at/oib-richtlinien/richtlinien/2011>
- [37] ÖNORM B 1801-1, Hrsg., „ÖNORM B 1801-1: Kosten im Hoch- und Tiefbau - Kostengliederung“. Austrian Standards, 2009.
- [38] Michael Braun, „Interne Auswertung der Kosten geförderten Komfortlüftungsanlagen in Vorarlberg (nicht veröffentlicht)“, Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn, 2012.
- [39] Morscher, G. und Roskopf, T., „Mehrfamilienwohnhaus Langenegg Unterstein: regionale Lösung für europäische Energieziele“, in economicum Themenband zur Session 4: Best practice: konkret gebaut, gemessen, abgerechnet, Dornbirn, 2015, Bd. session 4.
- [40] VDI 2067 Blatt 1, „VDI 2067 Blatt 1 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung“. Verein Deutscher Ingenieure, Sep-2012.
- [41] EU Commission, „Leitlinien zur delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 der Kommission zur Ergänzung der Richtlinie 2010/31/EU“, EU Eur. Parliam. Counc. Energy Perform. Build., Jän. 2012.



Rainer Pfluger

von 1993 - 98 tätig am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart; 2002 Promotion; 1999 - 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Passivhaus Institut, Darmstadt in den Bereichen Bauphysik, Qualitätssicherung, Altbaumodernisierung und Haustechnik, seit 2008 Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, 2014 Habilitation, Lehrbefugnis für das Fach Bauphysik und Gebäudetechnik, seit 6/2014 assoz. Prof., Projektleiter in zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten mit dem Schwerpunkt Lüftung.



Gabriel Rojas

von 2001 - 2007 Physikstudium auf der Universität Innsbruck, von 2008 - 2011 Entwicklungsingenieur für Abgasnachbehandlung bei GE Jenbacher, seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen der Universität Innsbruck, Lehr- und Forschungstätigkeiten zu bauphysikalischen und speziell lüftungstechnischen Fragestellungen, Promotion 2015 zum Thema Bewertung der Raumluftqualität und von innovativen Lüftungskonzepten.



Kristin Bräunlich

Kristin Bräunlich hat in Glauchau Versorgungs- und Umwelttechnik studiert. Anschließend beschäftigte Sie sich bei der Firma LMC medical components GmGH mit Lüftungskonzepten für Operationssäle in Krankenhäusern. Seit 2010 ist sie Mitarbeiterin am Passivhaus Institut und dort in der Lüftungstechnik, unter anderem im Bereich der Zertifizierung von Lüftungsgeräten als Passivhaus-komponente, tätig.

Kostengünstige Komfortlüftung - Planung, Betrieb und Wartung

Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung im Wohnungsbau - Win-win-Situation für Nutzer und Betreiber

Seit vielen Jahren hat sich die ständige und nutzerunabhängige Lüftung zum Feuchteschutz im Wohnungsbau bewährt, sie stellt praktisch die einzige sichere und funktionsfähige Methode dar, um Bauschäden durch Feuchtigkeit auch bei zeitweiliger Abwesenheit der Bewohner zu vermeiden. Komfortlüftung, also Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) können aber noch mehr - sie sorgen für gesunde, schadstoffarme Raumlufthqualität, bringen die vorerwärmte Zuluft gezielt und ohne Zegerscheinungen in die Aufenthaltsräume ein und können mit rund 90% Wärmerückgewinnung zur Einsparung von Lüftungswärmeverlusten beitragen. Darüber hinaus halten Feinfilter Pollen aus der Außenluft fern und reduzieren die Feinstaubbelastung im Innenraum.

Schalldämpfer sorgen sowohl für den Geräte- als auch den Außenschallschutz, Telefoneschalldämpfer vermeiden die Schallübertragung zwischen den Räumen. Der hohe Komfort und die Nutzerzufriedenheit konnten mittels Fragebögen bei zahlreichen Projekten (siehe z.B. [Knotzer 2015, Wagner 2012]) bestätigt werden.

Für den Bauträger und die Nutzer ergeben sich daraus für Anlagen mit WRG zahlreiche häufig kaum monetär bewertbare Vorzüge, die aber langfristig für die Kauf- oder Mietentscheidung ausschlaggebend sein können:

- Gesundes Wohnen durch sicheren Feuchteschutz, weder Schimmelpilz-Gefahr noch Bauschäden sowie Schadstofffreiheit und hohe Raumlufthqualität
- Keine Geruchsausbreitung von Küche und WC
- Garantierte Zugfreiheit bei der Einbringung vorerwärmter Zuluft spricht für Anlagen mit WRG gegenüber der reinen Abluftanlage mit direktem Eintritt von Kaltluft durch den Außenwandluftdurchlass. Dies schlägt sich unmittelbar in hoher Zufriedenheit der NutzerInnen nieder - indirekt eine Entlastung für den Immobilienbetreiber und eine Wertsteigerung der Immobilie.
- Pollenallergiker können auch im Frühjahr und Sommer frei durchatmen - Feinfilter halten die Pollen aus der Außenluft fern
- Bauten in innerstädtischer Lage auch an stark befahrenen Straßen ermöglichen bei geschlossenen Fenstern hervorragenden Außenschallschutz und bei hochwertigen Außenluftfiltern sogar eine Reduktion der Feinstaubbelastung - eine Aufwertung ansonsten problematischer Immobilienstandorte

Die genannten Vorzüge lassen sich wie gesagt zum Teil nur schwer in Kosten fassen, eine Ausnahme bilden hier evtl. die Schimmelbeseitigungskosten, welche bei Betreibern und Wohnungsbaugesellschaften intern meist sehr genau quantifiziert werden können. In der Arbeit von [Thaler 2010] wird erstmals eine gut belegte Berechnungsgrundlage zur Bewertung von Schimmelbeseitigungskosten geliefert und in die Kalkulation mit 125,48 € pro Jahr und Wohneinheit einbezogen.

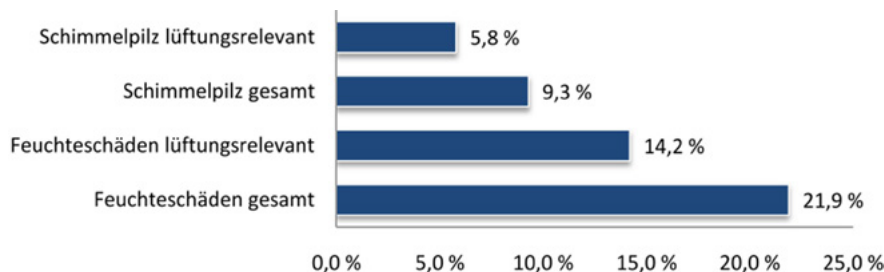


Abbildung 1: Anteil der Wohnungen mit Feuchte- und Schimmelpilzschäden Ergebnisse einer in der Heizperiode 2001/ 2002 durchgeführte Untersuchung von 5.530 Wohnungen in Deutschland, Quelle: [Bischof 2006]

Direkt quantifizierbar und damit monetär bewertbar ist die Reduktion der Lüftungsverluste durch die Wärmerückgewinnung, diese liegt mit ca. 14 kWh/m²a im Bereich des Heizwärmebedarfs eines Passivhauses. Über die reine Heizwärmeeinsparung hinaus erzielt man weitere Einsparungen im Bereich der Investition für kleinere Wärmeerzeuger, ggf. geringere Bevorratungsvolumina für Brennstoffe sowie die Möglichkeit der vereinfachten Heizwärmeverteilung über die Zuluft.

Eine ausführliche Betrachtung der Lebenszykluskosten für Lüftungsanlagen im Wohnungsbau wurde bereits in [Pfluger 2013] durchgeführt. Damals wurde die Wirtschaftlichkeit (je nach gewählter Vergleichsvariante und Annahmen für die Investitionskosten) wenn überhaupt, dann nur knapp erreicht. In den letzten Jahren wurde aber intensiv an der Kostenreduktion der Komponenten und Systeme sowie der Planungsvereinfachung gearbeitet. Damit wird die Wärmerückgewinnung gegenüber reinen Abluftanlagen im Lebenszyklus auch bezüglich der direkt monetarisierbaren Effekte ökonomisch konkurrenzfähig. Neue Geräte und Komponenten sowie wissenschaftliche Erkenntnisse zu fortschrittlichen Konzepten der Luftführung erleichtern die Entscheidung für den Einbau einer Komfortlüftung und sollen in diesem Beitrag erläutert werden.

Wer die Wahl hat, hat die Qual - zentral, dezentral oder raumweise?

Bis heute konnte die Streitfrage der optimalen Systemauswahl nicht eindeutig beantwortet werden, zumindest hinsichtlich der Kosten sind alle Varianten etwa gleichwertig realisierbar, allein die erhöhten Brandschutzanforderungen haben im Wohnungsbau in den letzten Jahren das Pendel weiter in Richtung der dezentraleren Lösungen verschoben. Aus rein ingenieurtechnischer Sicht sollte eine zentrale Anlage deutlich einfacher und damit kostengünstiger errichtet und betrieben werden, weil die Zahl der Einzelteile, insbesondere des Wärmerückgewinnungsgerätes und der Ventilatoren geringer ausfällt. In der Praxis hat sich diese rein technische Sichtweise nicht durchgängig bestätigt, viele Wohnungsbaugesellschaften haben gerade mit dezentralen Lösungen seit vielen Jahren sehr gute Erfahrungen gemacht.

Eine Entscheidung für oder gegen zentrale bzw. dezentrale Anlagen kann nur gemeinsam mit den Bauherrn bzw. Nutzern getroffen werden, neben den Kosten und dem Energiebedarf sind zahlreiche weitere Kriterien wie z.B. die Wartungsfreundlichkeit, Eigentumsverhältnisse etc. abzuwägen. Bezüglich der Begriffsdefinitionen finden sich in der Literatur häufig widersprüchliche Definitionen, in diesem Beitrag soll unter einer **zentralen Anlage** ein Lüftungssystem verstanden werden, welches mit einem Wärmeübertrager mehrere Wohneinheiten versorgt. Unter **dezentralen Anlagen** sind hier Anlagen gemeint, welche wohnungsweise über jeweils einen Wärmeübertrager verfügen. In beiden Fällen ist eine gerichtete Durchströmung, von den Zulufräumen hin zu den Ablufträumen realisierbar. Werden dagegen einzelne Wärmeübertrager für jeden Raum eingesetzt (**raumweise Anlagen**), so wird ca. praktisch die doppelte Zuluftmenge benötigt, weil jeder Raum mit Zu- und Abluft versorgt wird. Neben den genannten drei grundlegenden Anlagenvarianten können auch Mischformen realisiert werden, beispielsweise können kleine Geräte für z.B. einen Abluftraum und ein bzw. zwei Zulufräume eingesetzt werden. So können ggf. Kanäle eingespart werden, allerdings erhöhen sich die Investitionskosten für die Einzelgeräte und die Wartung.

Zentrale Anlagen

Zentrale Anlagen werden häufig im Mietwohnungsbau aufgrund der einfacheren zentralen Wartung bevorzugt, weil für Wartungsarbeiten der Privatbereich der Wohneinheiten nicht betreten werden muss und damit die Terminabsprache mit den BewohnerInnen entfällt. Hierfür wird häufig sogar ein erhöhter Aufwand für die Kanalführung in Kauf genommen, um wartungsbehaftete Bauteile, wie z.B. Brandschutzklappen oder Volumenstromregler außerhalb der Wohneinheiten zugänglich zu machen. Die Notwendigkeit von Brandschutzmaßnahmen führen jedoch sowohl hinsichtlich der Investitionskosten als auch in Bezug auf die Betriebskosten (Wartung, Inspektion) zu erhöhten Kosten, welche bei dezentralen Anlagen entfallen können. Nachfolgende Tabelle stellt weitere Vor- und Nachteile gegenüber.

Vorteile	Nachteile
zentrale Außen-/Fortluftführung spart Wanddurchbrüche in jeder Wohneinheit	Relativ hoher Planungsaufwand (Fachplaner erforderlich), Brandschutzanforderungen sind zu berücksichtigen
In den Wohneinheiten ist kein Platzbedarf für Wärmerückgewinnungsgeräte nötig (vorteilhaft bei Sanierungen)	Relativ hoher Platzbedarf für die Kanalführung (Schächte, Horizontalverteilung etc.)
Schallschutz (Ventilatoren sind außerhalb der Wohneinheiten angeordnet)	Höherer Druckverlust (wird aber z.T. durch höhere Ventilatoreffizienz wieder kompensiert)
Wartung und Filterwechsel kann von der jeweiligen Firma ohne Terminabsprache mit den Bewohnern durchgeführt werden	Höherer Wartungs- und Reinigungsaufwand bei größeren Anlagen aufgrund von Brandschutzkomponenten
Weniger Einzelkomponenten notwendig (Ventilator, Wärmetauscher, Frostschutz, Kondensatablauf etc.)	Lüftungszentrale (relativ hoher baulicher Aufwand) oder sichere Gerätezugänglichkeit (bei Dachaufstellung) nötig
Freie Wahl der Ansaugposition der Außenluft	Wohnungsweise Volumenstromregler erforderlich

Tabelle 1: Vor- und Nachteile zentraler Lüftungsanlagen im Geschosswohnungsbau

Neben den direkten Systemkosten für Gerät und Kanalsystem schlagen insbesondere die baulichen Kosten für den Aufstellraum der Geräte zu Buche. In der Vermeidung von Technikräumen liegt eines der höchsten Einsparpotenziale welches in den letzten Jahren durch innovative Entwicklungen im Wohnungsbau verstärkt genutzt wurde. Aufgrund eines weit verbreiteten Missverständnisses der physikalischen Zusammenhänge, welche sich bis in die Normen und Verordnungen hinein verbreitet hatte, wurde früher Wert auf die Aufstellung der Zentralgeräte innerhalb der wärme gedämmten Gebäudehülle gelegt. Aufgrund der weitgehend symmetrischen Bauweise der WRG-Geräte sind die Wärmeverluste bei Aufstellung

im kalten Bereich weitgehend ident mit denen bei der Aufstellung im warmen Bereich. Verzichtet man auf einen eigenen Technikraum innerhalb der wärmegeämmten Gebäudehülle, spart man nicht nur die hohen Investitionskosten für den umbauten Raum, sondern auch dessen häufig aufwändige schalltechnische Entkoppelung.

„Alternativ bieten sich daher unbeheizte Keller- oder Dachräume an. Dabei kann auch der Vorteil des direkten Außenluftzuganges genutzt werden, lange Leitungswege für Außen- und Fortluft können damit vermieden werden. Noch kostengünstiger fällt die Außenaufstellung mit witterungsgeschützten Gerätegehäusen aus, welche z.B. auf einem Flachdach erfolgen kann. Für die Wartung ist lediglich für einen sicheren Dachzugang zu sorgen, seitliche Wartungsklappen sorgen für den freien Zugang zu allen wartungsbehafteten Bauteilen, insbesondere der Außenluftfilter. Gestalterisch ist darauf zu achten, dass die Geräte möglichst niedrig ausfallen, damit die Geräte von unten nicht eingesehen werden können. Alternativ können sie auch mit Solarpaneelen kombiniert oder anderweitig in die Dachlandschaft integriert werden, insbesondere dann, wenn diese von höheren Nachbargebäuden oder gegenüberliegenden Anhöhen eingesehen werden können. In jedem Fall sind frei verlegt Querverzüge von Lüftungskanälen zu vermeiden, nicht nur aus gestalterischen Gründen, sondern auch zur Vermeidung von Wärmeverlusten. Im optimalen Fall schließen die vertikalen Lüftungsschächte direkt unter dem Gerät an. Bei der Montage wird das Gerät direkt auf diese Kanäle aufgesetzt.“ [DETAIL 01/16]

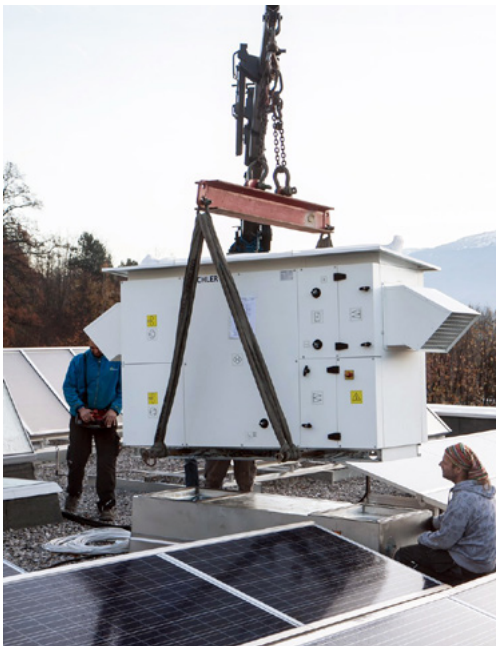


Abbildung 2: Beispiel für Dachaufstellung eines Zentralgerätes im Passivhaus-Neubau, Projekt Vögelebichl (Innsbruck), Bauträger NHT, Gerät Pichlerluft. Geräteaufstellung mittels Teleskopkran (links), Gerät in Aufstellposition direkt über dem Steigschacht (rechts), Bildquelle: Pavel Sevela, Universität Innsbruck

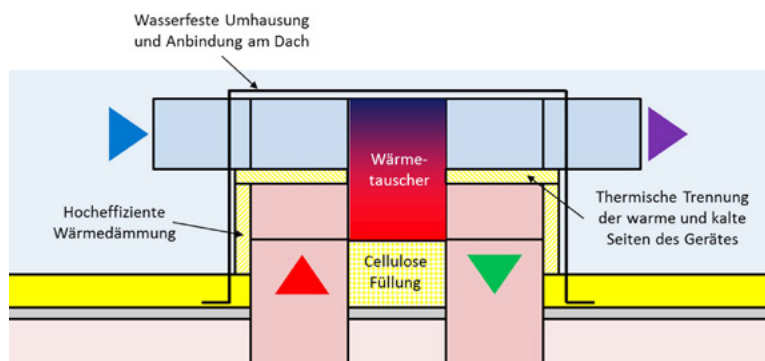


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Anschlusses des Lüftungsgerätes auf dem Dach, direkt über dem Luftschacht.

Dezentrale Anlagen (1 Gerät pro Wohneinheit):

Dezentrale Systeme werden häufig im Eigentumsbereich eingesetzt, weil Filterwechsel und einfache Wartungsarbeiten von den Eigentümern selbst erledigt werden können. Allerdings muss das Wärmerückgewinnungsgerät jeweils innerhalb der Wohneinheit untergebracht und normalerweise je eine Kernlochbohrung für Außen- und Fortluftkanal gesetzt werden. Mittels Koaxialrohr oder halbseitig geteiltem Rohr (siehe Abbildung 4 rechts) kann der Aufwand für die Außenwanddurchführung reduziert werden. Der Platzbedarf für das Gerät selbst kann heute mit besonders flachen Geräten zur Wand- (siehe z.B. Abbildung 4 links) oder Deckenintegration auf ein Minimum reduziert werden. Hier haben neue Geräteentwicklungen sowohl architektonisch ansprechende als auch platzsparende und kostengünstige Lösungen hervorgebracht. Die in Abbildung 5 dargestellten Beispiele stammen aus dem vom Passivhaus Institut im Rahmen der 20. Passivhaustagung verliehenen „Component Award 2016“. Eine komplette Dokumentation inklusive der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu den jeweiligen Einreichungen findet sich in [AWARD 2016]. Beide Geräte können über angeflanschte Kanäle auch Nachbarräume versorgen. Das Gerät von Vaventis, welches im Rahmen des Awards den 2. Preis erhielt, verfügt über einen sogenannten fine-wire-Wärmeübertrager, arbeitet also nicht mit dem klassischen Plattenwärmeübertrager sondern mit feinen Kupferdrähten, welche die Wärme über Wärmeleitung von der warmen Abluft auf die kalte Außenluft übertragen.



Abbildung 4: Vaventis fresh-r (links) und bluMartin freeair100 (rechts)
Quelle: links [AWARD 2016], rechts bluMartin GmbH

Mit nur einer Kernlochbohrung kommt das in Abbildung 5 gezeigte Gerät aus, weil die Außen-/Fortluftführung mit nur einem mittig geteilten Rohr durch die Außenwand geführt wird. Ein Kondensatablauf wird nicht benötigt, weil das Gerät über einen feuchterückgewinnenden Wärmeübertrager verfügt. Auch an dieses Gerät können noch Nachbarräume mittels Kanälen angebunden werden.



Abbildung 5: Zehnder ComfoAir70 (links), Außenansicht (Mitte) und Wandeinbau (rechts) Quelle: Zehnder Group

Tabelle 2 fasst Vor- und Nachteile von dezentralen Systemen zusammen.

Vorteile	Nachteile
Individuelle Regelbarkeit (Volumenstromsteuerung und Balanceabgleich) und Wartung, kurzes Kanalnetz	Außenwanddurchbrüche in jeder Wohneinheit notwendig
Kein Technikraum nötig, Aufstellung in Bad oder Küche bzw. Decken oder Wandintegration möglich	Geräteschallabgabe der dezentralen Geräte im Aufstellraum
Keine Geruchsübertragung zu Nachbarwohnungen durch Leckagen möglich	Platzbedarf für die Einzelgeräte
Geringer Planungsaufwand, standardisierte Lösungen, Vorfertigung möglich	Filter, Frostschutz und Kondensatablauf an jedem Einzelgerät
Keine Brandschutzeinrichtungen erforderlich	Keine freie Wahl der Ansaugposition (problematisch bei Luftansaugung an der Südfassade im Sommer oder Geruchsbelastungen in der Umgebung)

Tabelle 2: Vor- und Nachteile dezentraler Anlagen (ein Gerät pro Wohneinheit)

Raumweise Geräte

In den letzten Jahren haben sich raumweise Geräte insbesondere bei Sanierungsvorhaben im Wohnungsbau stark verbreitet, weil zunächst der Wegfall des Kanalnetzes vorteilhaft erscheint. Wird in jedem Raum ein Gerät mit Wärmerückgewinnung installiert, können zwar tatsächlich Zu- und Abluftkanäle vollständig entfallen, allerdings wird dann jeder Raum mit Zu- und Abluft versorgt. Damit ist keine Mehrfachnutzung der Luft (Kaskadenlüftung) möglich, letztlich muss ca. die doppelte Luftmenge gefördert werden. Darüber hinaus sind Außenwanddurchbrüche in jedem Raum notwendig, Probleme mit Luftschallschutz und Geräteschall sind nicht ausgeschlossen. Gegenüber reinen Abluftanlagen stellen solche Geräte durch ihre Wärmerückgewinnung und damit vorerwärmte Zuluft zwar bereits eine Verbesserung dar, hinsichtlich Komfort (Schall und ggf. Raumluftfeuchte) und Energieeffizienz sowie Außenschallschutz sind sie gegenüber zentralen oder wohnungsweisen Anlagen allerdings deutlichen Einschränkungen unterworfen.

Bei raumweisen Lüftungsgeräten ist hinsichtlich des Gesamtkonzeptes die Belüftung der Flure unklar, weil diese ja eigentlich nicht direkt in das Lüftungskonzept eingebunden sind. Diese werden nur bei geöffneten Zimmertüren quasi „mitbelüftet“. Prinzipiell müssen auch die Ablufträume mit Lüftungssystemen ausgestattet werden. Addiert man die Investitions- und Wartungskosten aller Geräte auf, so fallen die Lebenszykluskosten trotz Wegfall des Kanalnetzes häufig sogar höher aus als im Falle einer klassischen wohnungsweisen WRG-Anlage. Erst durch die Erschließung zumindest eines weiteren Nachbarraumes (siehe vorheriger Abschnitt) mittels kurzer Kanalwege kommen auch solche kleinen Geräte in den Bereich der Wirtschaftlichkeit. Ein Beispiel für solch ein Gerät, welches vollständig wandintegriert verbaut werden kann ist in Abbildung 6 dargestellt, mit dem sich der Hersteller Glen Dimplex GmbH am Component-Award beteiligt hatte. Eine exemplarische Erschließung einer Kleinwohnung mit drei solcher Geräte, davon zwei mit Kanalbindung ist ebenfalls dargestellt.

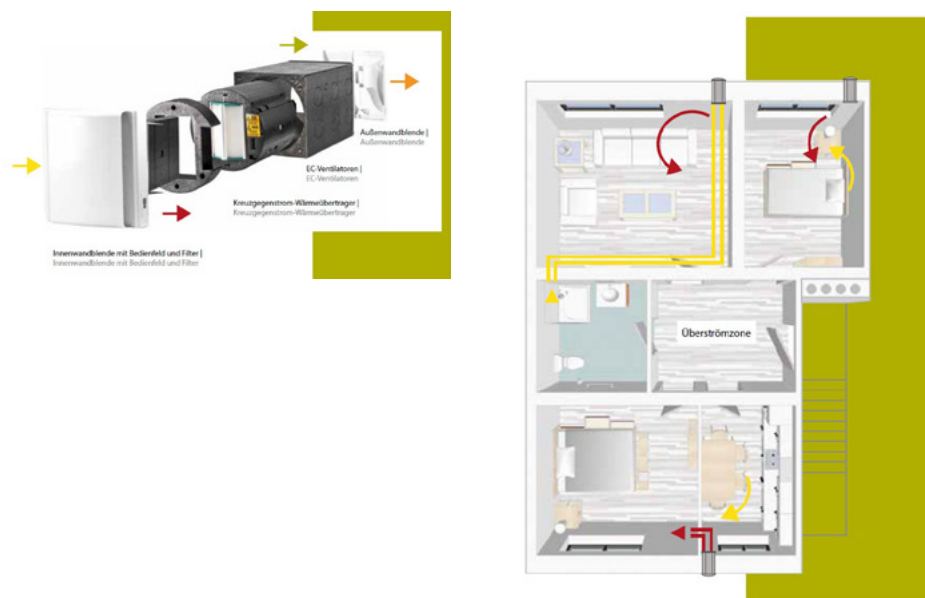


Abbildung 6: Wandintegriertes Gerät Dimplex DL 50 WH2 (83 % WRG, $P_{el}=0,31 \text{ Wh/m}^3$) (links), Exemplarische Erschließung einer Kleinwohnung mit drei Geräten (Quelle [AWARD 2016]) (rechts)

Geräteauswahl und Dimensionierung

In den letzten Jahren sind zahlreiche neue und hocheffiziente Geräte auf den Markt gekommen, inzwischen sind für fast alle Anwendungen in Neubau und Sanierung passende Geräte verfügbar. Auf www.passiv.de findet sich eine breite Palette an qualitätsgeprüften zertifizierten Geräten. Dabei erleichtert die Sortierung nach dem Volumenstrombereich die Auswahl für das jeweilige Bauvorhaben. Nachfolgend werden die Qualitätskriterien erläutert, auf die dabei geachtet werden sollte.

Qualitätskriterien und Zertifizierung - Auswahlhilfen für die Planung

Damit der Heizwärmebedarf des Gebäudes im späteren Betrieb nicht wesentlich von den berechneten Werten abweicht, ist es wichtig, dass die Energiekenndaten der einzelnen Komponenten auch entsprechend realer, praktischer Bedingungen ermittelt werden. Für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind die wesentlichen Energiekenndaten der **Wärmebereitstellungsgrad** und die **elektrische Leistungsaufnahme**.

Bei der Ermittlung des Wärmebereitstellungsgrad ist wichtig, dass das gesamte Gerät (nicht nur der Wärmeübertrager) messtechnisch untersucht wird. Der Wärmebereitstellungsgrad wird entsprechend der Energiebilanz des Gebäudes fortluftseitig gemäß folgender Gleichung ermittelt:

$$\eta_{\text{WRG}} = \frac{\vartheta_{\text{ETA}} - \vartheta_{\text{EHA}} + P_{\text{el}} / (\dot{m} c_p)}{\vartheta_{\text{ETA}} - \vartheta_{\text{ODA}}}$$

Mit ETA Abluft-, EHA Fortluft-, ODA Außenlufttemperatur, P_{el} - elektrische Leistungsaufnahme, c_p Wärmekapazität, \dot{m} Massenstrom

Das heißt Wärmeverluste und Leckagen über das Gerätegehäuse sind bereits berücksichtigt. Damit sich die Investition in eine Wärmerückgewinnungsanlage auch lohnt, werden Wärmebereitstellungsgrade von mehr als 75% (Empfehlung > 80%) gefordert. Damit die Energieeinsparungen durch die Wärmerückgewinnung nicht durch den Stromverbrauch für den Betrieb der Anlage egalisiert werden, muss unbedingt auch die elektrische Leistungsaufnahme begrenzt werden. Die Anforderung liegt hier bei einer spezifischen Leistungsaufnahme für das gesamte Gerät von 0,45 Wh/m³. Durch hocheffiziente Ventilatormotoren, kann der Wert heute schon deutlich unterschritten werden. In der Komponentendatenbank auf www.passiv.de können die Geräte auch nach den o.g. Energiekenndaten sortiert werden.

Darüber hinaus sollte auf folgende weitere Qualitätskriterien geachtet werden:

- **Luftdichtheit:** interne und externe Leckage maximal 3% des mittleren Volumenstroms des Einsatzbereichs. Diese Anforderung wird von allen Passivhauslüftungsanlagen erfüllt.
- **Filter:** Außenluftfilter der Qualität F7 oder besser. Sofern keine Standardgeräteausrüstung, ist dieser meist als optionale Geräteausrüstung oder Zubehör beim Hersteller erhältlich.
- **Schall:** Schalldruckpegel im Aufstellraum max. 35 dB(A), Schalldruckpegel im Wohnraum max. 25 dB(A). Sofern das Gerät selbst die Anforderungen nicht erfüllt, müssen entsprechende Zusatzmaßnahmen (Schalldämpfer, Einhausung) berücksichtigt werden.
- **Frostschutz** für Wärmeübertrager und ein optionales hydraulisches Nachheizregister: Sicherstellung der regulären Gerätefunktion bis zu einer Außenlufttemperatur von -15°C durch eine geräteinterne oder bauseitige Frostschutzeinrichtung.

Wann ist Feuchterückgewinnung bei der Wohnungslüftung sinnvoll?

Je nach Belegungsichte und Nutzungsgewohnheiten (Wäschetrocknen, Zimmerpflanzen, Kochen etc.) reichen die Feuchtequellen normalerweise aus um bei moderater Dimensionierung der Volumenströme (ca. 20 m³/h pro Person) die Raumlufffeuchte im gesundheitlich zuträglichen Bereich (über 30% r.F.) zu halten. Für Gebäude mit geringer Belegungsichte, geringer Feuchtequellen und häufiger Abwesenheit sollte zunächst die Luftmenge entsprechend reduziert bzw. bedarfsgerecht geregelt werden. Wenn auch dann noch dauerhaft zu geringe Raumlufffeuchten auftreten (z.B. mehrere Wochen unter 25% r.F.) kann der Einsatz von Feuchterückgewinnung sinnvoll sein. Heute sind für die Wohnungslüftung sowohl Plattenwärmeübertrager (sog. Rekuperatoren) mit Membrantechnologie als auch Rotationswärmeübertrager (sog. Regeneratoren) verfügbar. Letztere sind aber zur Vermeidung von Geruchsübertragung aus der Küchenabluft nur als wohnungsweise Geräte einzusetzen. Neu hinzugekommen ist in den letzten Jahren eine innovative Technik rekuperativer Wärmeübertrager mit periodischer Umschaltung (Prinzip siehe Abbildung 7). Bei den letztgenannten Systemen kann der Grad der Feuchteübertragung über die Drehzahl des Rotors bzw. die Periodendauer der Umschaltung sogar je nach Bedarf variiert werden.

Je nach Feuchteübertragungsgrad ist „bei der Planung darauf zu achten, dass durch die Feuchterückgewinnung keine überhöhten Feuchten mit dem Risiko von Schimmelbildung im Bereich von Wärmebrücken auftreten“ [Schnieders 2008]. Dadurch könnten höhere Luftwechselraten für Sanierungsobjekte mit unvermeidbaren Wärmebrücken erforderlich werden.

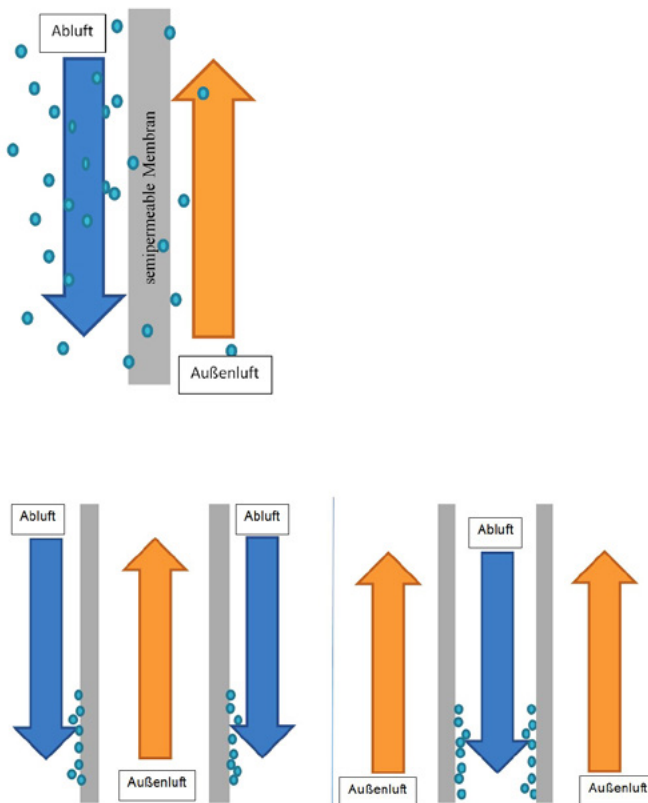


Abbildung 7: Prinzipschaubild der Feuchteübertragung bei Membrantauscher (oben) bzw. zyklisch arbeitender Rekuperator (unten)

Gerätepositionierung in Neubau und Sanierung

Unabhängig davon ob zentrale, dezentrale oder Raumweise Geräte eingesetzt werden sollten diese generell möglichst nahe an der thermischen Gebäudehülle platziert werden, um die wärmegeprägten Kanalabschnitte zu minimieren.

Bei zentralen Geräten ist die Aufstellung im Dachbereich vorteilhaft, weil die Außenluftansaugung auf kurzem Wege und mit guter Luftqualität realisiert werden kann. Dabei sollte aber immer an der Nordfassade angesaugt werden, weil sonst über die Solareinstrahlung vorerwärmte Luft im Sommer zu Überhitzung führen kann. In der Sanierung bietet sich der Dachbodenbereich an, falls dieser Bereich definitiv nicht für Dachausbau oder Dachaufstockung genutzt werden soll. Ansonsten können natürlich Kellerräume als Technikraum genutzt werden. Erfahrungsgemäß ist dann aber ein höherer Aufwand für die Außenluftansaugung und den Fortluftauslass erforderlich. Auch hinsichtlich der architektonischen Gestaltung ist diese Variante weniger vorteilhaft.

Speziell für die Sanierung sind in den letzten Jahren zunehmend platzsparende dezentrale Geräte verfügbar, die in Küche oder Badezimmer in Wand- bzw. Deckenintegration (Prinzip bereits publiziert in [Pfluger 2006]) verbaut werden können. Diese platzsparende Bauweise macht solche Geräte natürlich auch für den Neubau interessant, denn eigene Technik- bzw. Hauswirtschaftsräume kommen heute aus Kostengründen kaum mehr in Frage. Eine eigene vielversprechende Entwicklung stellt hier das von der Universität Innsbruck gemeinsam mit der Fa. FriVent im Rahmen des Forschungsprojektes HeatXFan¹ entwickelte Gerät, welches nur aus einem rotierenden Bauteil für bei Luftströme besteht.

Hygiene, Wartung und Reinigung der Geräte und des Kanalnetzes

Sowohl bei künftigen Betreibern als auch bei potenziellen Nutzern der Komfortlüftung führt die Frage der Wartung und Reinigung immer wieder zu kontroversen und zum Teil unsachlichen Diskussionen. Die folgenden Abschnitte sollen hier Versachlichung und Klarheit schaffen.

Fakt ist, dass Wartung und Filterwechsel einen nicht zu vernachlässigenden Kostenanteil, insbesondere bei raumweisen Systemen darstellen können. In nachfolgendem Diagramm sind die jährlichen Wartungskosten der drei kostengünstigsten Lösungen dargestellt. Im Vergleich dazu sind auch die Referenzkosten des Abluftsystems dargestellt, welches ebenfalls, jedoch deutlich geringere Wartungskosten aufweist.

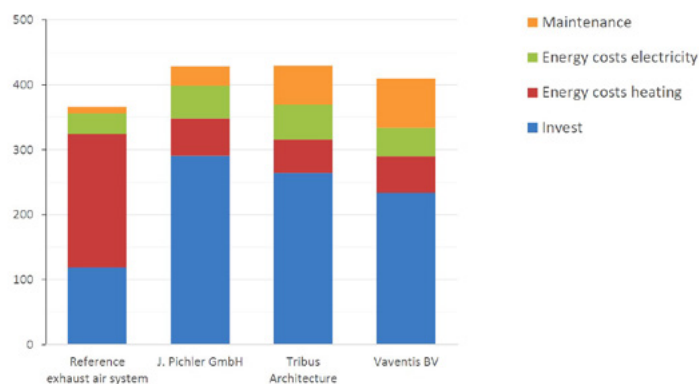


Abbildung 8: Jährliche Kosten pro Wohneinheit (Randbedingungen: Wärmepreis 0,10 €/kWh, Strompreis 0,28 €/kWh, Nutzungszeit 25 Jahre, Realzins 2%), Quelle: [AWARD 2016]

¹ <https://www.uibk.ac.at/bauphysik/forschung/projects/heatxfan/index.html>

Einen Großteil der Kosten stellt der Filterwechsel dar. Häufig werden für die Geräte speziell konfektionierte hochwertige F7 Außenluftfilter eingesetzt, welche aufgrund der geringen Stückzahlen relativ teuer sind. Hier kann der Einsatz von separaten Filterkästen Abhilfe schaffen, welche Standard-Industriefilter oder Filter aus dem KFZ-Bereich (Kabinenluftfilter als Partikel- oder Kombifilter in F7-Qualität) aufnehmen können. Durch die hohen Stückzahlen liegen hier die Stückpreise beim Endabnehmer unter 10 € brutto. Hier werden künftig noch erhebliche Kosteneinsparungen erwartet, die Universität Innsbruck führt auf diesem Gebiet Grundlagenforschung durch und kooperiert mit Herstellern bei der Fertigung geeigneter wärmegeprägter Filterkästen.

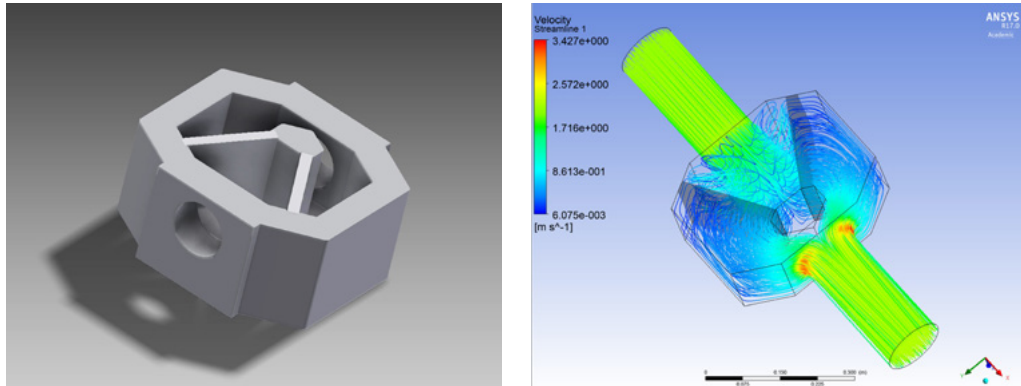


Abbildung 9: Wärmegeprägter Filterkasten für die Aufnahme von Standard-KFZ Kabinenluftfilter (Kombifilter) in F7-Qualität zur Reduktion der Filterkosten (Quelle: Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen, CFD-Simulation im Rahmen einer Bachelorarbeit)

Raumluft und Hygiene

Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung (LCA) im Rahmen des Component Award 2016 wurde mit einer Nutzungszeit für die raumlufttechnischen Komponenten von 25 Jahren gerechnet, weil dies den üblichen Berechnungsverfahren entspricht und damit die Vergleichbarkeit gegeben ist. Es stellt sich jedoch die Frage ob dieser Zeitraum wirklich praxisnah ist und wie sich die Hygiene und Raumluftqualität nach Ablauf dieses Zeitraums ohne Wartungs- und Reinigungsarbeiten darstellt. Aus diesem Grund wurden anlässlich der 25-Jahrfeier zum ersten Passivhaus in Darmstadt Kranichstein umfassende Messungen und Untersuchungen am Lüftungssystem dieses Pioniergebäudes durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Dauerhaftigkeit der Wärmerückgewinnung als auch die Stromeffizienz der Anlage überprüft. Die einzige Ersatzinvestition in diesem Zeitraum bezieht sich auf einen einmaligen Ventilator-tausch in einer von vier Abschnitten der Reihenhauszeile. Alle anderen Bauteile und Kanäle sind noch im Originalzustand und wurden innerhalb der gesamten 25 Jahre nicht gereinigt. Die einzige regelmäßige Wartungsarbeit ist der jährliche Filterwechsel von Außen- und Abluft sowie die Reinigung des Fettkondensationsfilters in der Küche. Um nun die Raumluftqualität und Hygiene im Lüftungssystem sowie in den Räumen zu untersuchen, wurden von der Universität Innsbruck Proben entnommen und am Institut für Mikrobiologie ausgewertet. Darüber hinaus wurden die Kanäle mit einer Spezialkamera inspiziert und die Kamerafahrten aufgezeichnet.

Die Ergebnisse sind im Bericht [Pfluger 2016] dokumentiert. Zusammenfassend wurde festgehalten: „Die Ergebnisse der Hygieneuntersuchung am Lüftungssystem sowie der Raumluft im Gebäude Passivhaus Darmstadt Kranichstein nach einer Betriebszeit von 25 Jahren zeigen keinerlei Hinweise auf erhöhte Keimdichte oder Schimmelbelastung. Obwohl die Anlage im gesamten Betriebszeitraum nie gereinigt wurde, weist sowohl der optische Befund

(Augenschein und Kamerabefahrung) im Zuluftkanalnetz als auch der mikrobiologische Laborbefund einen einwandfreien Hygienezustand auf. Dies ist auf die hohe Wirksamkeit des frontständigen Feinfilters, der regelmäßig gewechselt wurde, zurückzuführen. Der Filterwechselzyklus beträgt hier ein Jahr.“

Neben dem einwandfreien hygienischen Zustand der Anlage wurden auch keine sonstigen Schäden (Korrosion oder sonstige Schadstellen am Kanalsystem oder dem Zentralgerät) festgestellt. Die Annahme über die Nutzungszeit von 25 Jahren in den üblichen LCA-Berechnungen ist daher zumindest für alle unbeweglichen Bauteile zu konservativ, lediglich Verschleißteile wie z.B. die Ventilatoren sollten mit diesen verkürzten Laufzeiten in die Wirtschaftlichkeit eingehen. Damit würde sich die Wirtschaftlichkeit der Lüftungssysteme wesentlich günstiger darstellen, als dies normalerweise rechnerisch der Fall ist. Auf diesen Zusammenhang weist auch [Feist 2016] im Rahmen seines Konferenzbeitrags zur Langlebigkeit des Passivhauses als Schlussfolgerung der Untersuchungen und Messung in Darmstadt Kranichstein hin.

Wartung und Reinigung

Im Gegensatz zu Einfamilienhäusern oder Eigentumswohnungen, bei welchen die Wartung meist von den NutzerInnen selbst übernommen wird, schließt man im Mietwohnungsbau meist Wartungsverträge für die Lüftungssysteme ab, um den störungsfreien und hygienischen Betrieb der Anlage dauerhaft sicherzustellen. Dabei empfiehlt es sich aus Kostengründen, von pauschalen Wartungsverträgen abzusehen, sondern spezifisch auf die Anlagen zugeschnittene Wartungsverträge mit genau festgelegten Tätigkeiten und Intervallen auszuarbeiten. Nur so kann sichergestellt werden, dass keine überhöhten Kosten abgerechnet werden, die aus Standard-Kostensätzen abgeleitet werden, die eigentlich für Klimaanlage entwickelt wurden. Eine reine Lüftungsanlage ist hinsichtlich der Wartung wesentlich günstiger als eine Klimaanlage, weil das System wesentlich einfacher aufgebaut ist und im Zulufttrakt kein Kondensat anfallen kann. Damit ist auch die Frage der Hygiene und Zahl der Reinigungen wesentlich unproblematischer und damit kostengünstiger.

Um solche spezifischen Wartungspläne aufstellen und beauftragen zu können muss eine Liste der notwendigen Arbeiten erstellt werden, diese beschränkt sich i.A. auf folgende Punkte

- Regelmäßiger Filterwechsel der Außenluftfilter (F7 oder besser F8) min. einmal jährlich
- Regelmäßiger Filterwechsel der Abluftfilter (je nach Verschmutzung ca. 2 mal jährlich)
- Inspektion und ggf. Reinigung der Kondensatwanne (gemeinsam mit dem Filterwechsel)
- Regelmäßige Sichtkontrolle des Kanalnetzes, ggf. Reinigung
- Regelmäßige Funktionskontrolle (Ventilatoren, Balanceabgleich, Volumenstromregler, falls vorhanden Brandschutzklappen), diese kann in vielen Fällen heute bereits weitgehend über Fernwartung erledigt werden.

Wie die Hygieneuntersuchung und Inspektion der Lüftungskanäle in Darmstadt Kranichstein nach 25 Betriebsjahren gezeigt hat, ist durch die hohe Filtergüte des Außenluftfilters eine Reinigung der Zuluftkanäle nur äußerst selten notwendig. Je nach Ausführung von Vorlegeteilern an den Abluftelementen setzen sich in Zonen geringer Luftgeschwindigkeit Staubablagerungen ab, welche mittels Reinigung entfernt werden können, wenn dies z.B. zu erhöhtem Druckabfall führen würde. In jedem Fall ist die Anlage so auszuführen, dass jederzeit eine Reinigung aller Kanalabschnitte sowohl im Zu- als auch im Abluftkanalnetz möglich ist. Dies kann i.A. über die Luftdurchlässe erfolgen, vor und nach Hindernissen im Kanal (z.B. Heizregister) sind jedoch separate Wartungsklappen vorzusehen.

Wird die Anlage während der Bauphase sorgfältig abschnittsweise verschlossen (abgedeckt), so können kein Baustaub oder andere Verunreinigungen eindringen, unnötige Kosten für die Reinigung werden damit vermieden. Wurde darauf im Rahmen der Qualitätssicherung nämlich nicht sorgfältig geachtet, muss die Anlage bereits vor der Inbetriebnahme gereinigt werden.

Vereinfachungen und Kostenreduktion durch innovative Komponenten

Volumenstromregler

Die Aufgaben von Volumenstromreglern bei Zentralanlagen im Geschosswohnungsbau liegen im Balanceabgleich (Zuluftvolumenstrom = Abluftvolumenstrom) der jeweiligen Wohneinheit sowie in der Möglichkeit der Volumenstromanpassung an den Bedarf. Letzteres kann von einer manuellen Einstellung bis hin zu einer sensorgesteuerten (CO₂-Steuerung) Bedarfslüftung reichen. Marktgängige Volumenstromregler mit motorischer Klappen- und elektronischer Ansteuerung liegen je nach Hersteller und Ausstattung bei Investitionskosten um 1000 €. Diese verfügen i. A. über eine Volumenstrommessung jeweils in der Abluft und Zuluft mittels Druckdifferenzmessung und stellen den Sollvolumenstrom mittels Motor- und Klappen ein. Aus energetischer Sicht ist dabei ein Balanceabgleich mit einer maximalen Abweichung von +/- 10% anzustreben, bei Überschreitung wirkt sich der dabei entstehende Über- bzw. Unterdruck signifikant auf die Lüftungswärmeverluste der Wohneinheit aus. Aus Kostengründen stellt sich die Frage, ob sich diese Aufgaben auch mit geringerem technischen Aufwand lösen lassen. Sogenannte Zwillingsvolumenstromregler mit nur einem Motor und gekoppelter Achse reduzieren die Kosten bereits beträchtlich, weisen jedoch Einschränkungen bezüglich der möglichen Kanalnetzvarianten auf. Passive Volumenstromregler funktionieren ohne motorische Ansteuerung rein auf Basis von strömungsmechanischen Prinzipien und sind sowohl als Fixvolumenstromregler als auch in einstellbaren Ausführungen verfügbar. Letztere sind notwendig um zumindest das Volumenstromniveau auf die tatsächliche Belegungsichte anpassen zu können. Je nach Hersteller weisen diese jedoch Abweichungen bis zu +/- 20 % aufgrund von Fertigungstoleranzen auf. Werden diese paarweise auf eine gemeinsame Achse montiert, kann der Balanceabgleich durch Verdrehen der Klappenstellung voreingestellt werden. Im EU-Projekt Sinfonia (see <http://www.sinfonia-smartcities.eu/>) werden im Bereich der Sanierung vereinfachte und wartungsarme low-tech System erprobt und umgesetzt, die Universität Innsbruck berät dabei die Haustechnikplaner in der technischen Umsetzung.

Frostschutz

Bei hocheffizienten Lüftungsanlagen mit Gegenstrom-Wärmeübertrager ohne Feuchterückgewinnung kommt es bei geringen Außenlufttemperaturen zur Kondensatbildung im Fortluftbereich des Wärmeübertragers, welches in weiterer Folge zu Frostansatz führt. Bei zentralen Anlagen in Mehrfamilienhäusern wird häufig mit hydraulischen Vorheizregistern gearbeitet, welche die Heizwärme mittels Solekreis und Plattenwärmeübertrager anbinden. Um hohe Investitions- (Pumpe, Ausdehnungsgefäß, Rückschlagklappe etc.), Betriebs- und Wartungskosten zu vermeiden, kann das Heatpipe- (auch Thermosiphon) Prinzip angewendet werden. Im Fall einer Heatpipe wird ein Kältemittel (z.B. Ammoniak oder reines Wasser bei geringem Druck) eingesetzt, welches durch Erwärmung durch das Heizmedium verdampft und die Kondensationswärme an den Außenluftstrom über den berippten Kondensator abgibt. Da die Heatpipe hermetisch geschlossen ist und über keine beweglichen Teile verfügt ist das System wartungsfrei und benötigt keine Hilfsenergie. Dieses System wurde im Projekt low_vent.com [Knotzer 2015] entwickelt und am Laborprüfstand an einem Prototyp erprobt.

Koaxialrohr

Normalerweise müssen zwei Kernlochbohrungen für die Außenwanddurchführung von Außen- und Fortluft gesetzt werden, zur Vermeidung von Rückströmung von Fortluft in die Außenluft mit möglichst großem Abstand (nach Empfehlung EN 13779 min. 2m). Kombinierte Ein- bzw. Auslässe (siehe z. B. Abbildung 10) erlauben die Kanalführung direkt nebeneinander.



Abbildung 10: Kombinierte Außenluftansaugung und Fortluftauslass (Quelle Luftladen.de)

Mit Hilfe eines Koaxialrohres, wie es für die Abgasrohre von Brennwertthermen bereits üblich ist, kommt man mit einer Kernlochbohrung aus. So können Platz und Kosten gespart werden. Die Fortluft wird mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit aus dem Zentralrohr ausgeblasen, die Außenluft wird im Ringspalt wandnah angesaugt [Sibille 2014]. Das Kurzschlussrisiko wurde mit Hilfe einer Visualisierung mit Nebel und mit einer Tracergas Messung für verschiedene Arten von Auslässe analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Kurzschluss weniger als 1% beträgt. Außerdem wurde eine integrierte Frostschutzlösung entwickelt. Eine um das Außenrohr gewickelte Heizfolie (elektrisch versorgt und entsprechend geregelt) verhindert das Vereisen des Koaxialrohres (siehe Abbildung 11).

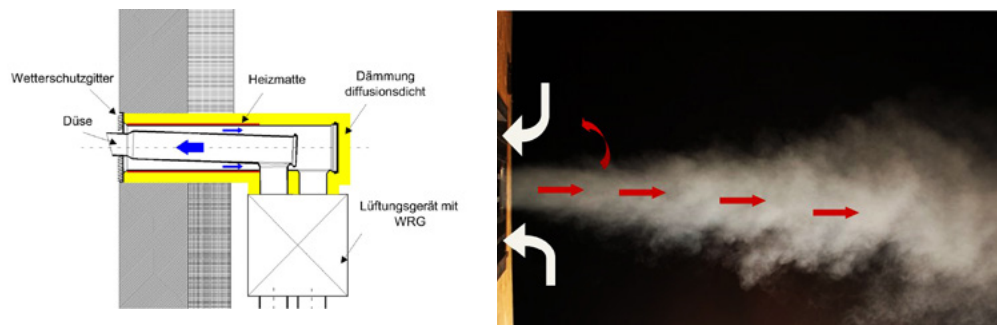


Abbildung 11: Prinzipskizze des Koaxialrohres (links). Nebelversuch zur Visualisierung des Kurzschlussrisikos (rechts).

Vereinfachungen und Kostenreduktion durch innovative Luftführung

Kaskadenlüftung

Das Prinzip der Kaskadenlüftung hat sich zum Standardsystem für die Luftverteilung innerhalb der Wohnungen etabliert. Dabei wird die Zuluft in die Schlafräume bzw. im Wohnzimmer über ein Kanalnetz und die jeweiligen Zuluftauslässe eingebracht. Die Luft strömt über den Flur und wird in den Funktionsräumen (Ablufträume, z.B. Küche, Bad und WC) abgeführt. Für die Luftführung von den Zuluftträumen über die Flure in die Ablufträume müssen Überströmöffnungen zwischen den Räumen (z. B. min. 10 mm hohe Türspalte oder Überströmöffnungen im Türblatt oder in der Türzarge) vorgesehen werden. Dimensionierungshinweise für verschiedene Überströmlösungen findet man unter [Sibille 2013a].

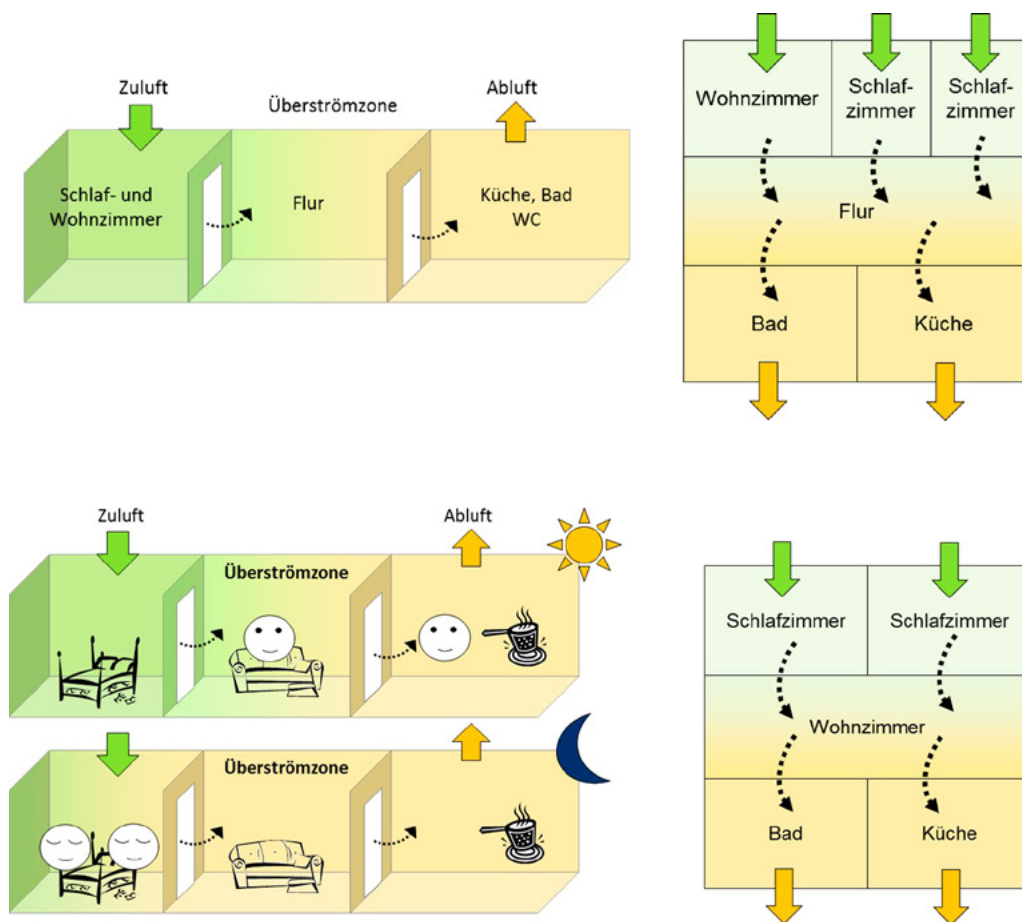


Abbildung 12: Klassische Kaskadenlüftung (oben), erweiterte Kaskadenlüftung (unten)

Bei vielen Grundrissformen ist es jedoch möglich, auf den Zuluftauslass im Wohnzimmer zu verzichten, wenn die Zuluft aus den Schlafzimmern durch das Wohnzimmer überströmen kann. Die sogenannte erweiterte Kaskadenlüftung ermöglicht einerseits eine Vereinfachung des Kanalnetzes (Reduzierung der Investitionskosten um ca. 8 %) und andererseits werden auf Grund des geringeren Gesamtvolumenstroms die Ventilatorstromverbräuche und daher die Betriebskosten um ca. 15 % gesenkt (Forschungsprojekt „Doppelnutzen“, siehe [Sibille 2013b])

Mit Hilfe eines online-tools (siehe [Sibille 2013a]), das auf der Plattform <http://www.phi-ibk.at/luftfuehrung/> abrufbar ist, können Architekten und Planer in wenigen Schritten feststellen, ob ein vorhandener Grundriss für erweiterte Kaskadenlüftung geeignet ist, wie z.B. moderne Grundrisse mit offenem Wohnzimmer.

Aktive Überströmer

Bei der Sanierung oder allgemein um Platz und Kosten zu sparen, können sogenannte aktive Überströmelemente eingesetzt werden. In diesem Fall wird die Zuluft nur in eine Kernzone des Gebäudes, die als Frischluftreservoir genutzt wird (Wohnzimmer oder Flur), gebracht. Durch kleine in der Wand oder in der Tür (schallgedämmt) eingebaute Ventilatoren (aktive Überströmelemente) wird die Luft aus dieser Mischluftzone in die Zulufräume geführt. Die verbrauchte Luft strömt dann z.B. über den Türspalt wieder in die Kernzone und wird wie üblich in den Funktionsräumen abgeführt. Diese Lösung wurde bereits in Sanierungs- und Neubau Projekten installiert. Messungen und Simulationen zeigen, dass eine vergleichbare Luftqualität wie beim üblichen Zonierungskonzept durch einer Erhöhung des Gesamtvolumenstroms um etwa 30 % erreicht werden kann. Der gemessene Schallpegel von bereits am Markt erhältlichen Produkten lag unter 25 dB.

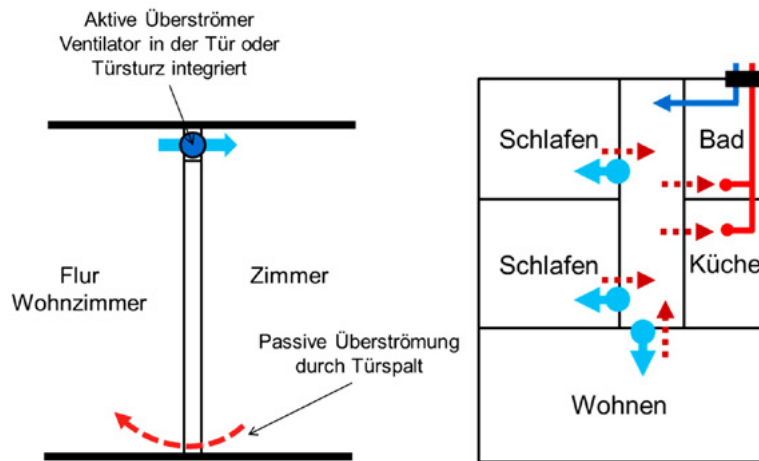


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Funktionsweise von aktiven Überströmelementen.

Fazit und Ausblick

Gesunde Raumlufte, hoher Komfort und Energieeffizienz in Kombination mit fugendichter Bauweise werden mehr und mehr zur Selbstverständlichkeit moderner Neubauten und qualitativ hochwertiger Sanierungen von Bestandsgebäuden. Innovative Geräte und Luftführungskonzepte helfen Kanäle und Kosten einzusparen und damit letztlich auch einfache, kostengünstige und wartungsarme Komfortlüftungen zu realisieren.

Literatur

- [Knotzer 2015] Sibille, E.; Rojas-Kopeinig, G.; Pfluger, R.; Greml, A.; Trojer, A.; Suschek-Berger, J.; Spörk-Dür, M.; Wagner, W.; Knotzer, A.: low_vent.com Konzepte für die „low-tech“ Komfortlüftung in Großvolumigen Wohngebäuden und deren Nutzungskomfort, Publizierbarer Endbericht, Neue Energien 2020, Klima- und Energiefonds, FFG, Endbericht 2015
- [Pfluger 2006] Pfluger, R.: Integration von Lüftungsanlagen - Kern der energetischen Sanierung, Detail 11/2006, S. 1292 - 1298
- [Sibille 2013a] Sibille, E.; Rojas, G.; Pfluger, R.: Planungshinweise für komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte - Erweiterte Kaskadenlüftung, 2013. [Online http://www.passipedia.de/passipedia_de/planung/tools.]
- [Sibille 2013b] Sibille, E.; Rojas-Kopeinig, G., Rothbacher, M.; Pfluger, R.; Malzer H.K.: Komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte für energieeffiziente Wohnbauten „Doppelnutzen“, Nachhaltig wirtschaften, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 37/2013
- [Sibille 2015] Sibille, E.: Optimized Integration of Ventilation with Heat Recovery in Residential Buildings through the Implementation of Innovative Air Distribution Strategies and Pre-fabricated Components, Dissertation, Universität Innsbruck, Fakultät für technische Wissenschaften, Innsbruck, 2015. Dissertation abrufbar unter <http://www.uibk.ac.at/bauphysik/>
- [Sibille 2014] Sibille, E.; Pfluger, R.; Gritzer, F. und Happach, A.: Entwicklung eines Koaxialrohres für die Außen- und Fortluftauslässe einer Lüftungsanlage mit innovativem Frostschutz, in Tagungsband: 18. Int. Passivhaus-Tagung, 2014.
- [Tappler et al. 2014] Tappler, P.; Hutter, H.P.; Hengsberger, H.; Ringer, W.: Lüftung 3.0 - Bewohnergesundheit und Raumluftequalität in neu errichteten, energieeffizienten Wohnhäusern. Vienna: Institut für Baubiologie und Bauökologie. 2014 Retrieved (http://innenraumanalytik.at/pdfs/luftung_2014.pdf).
- [PB 50] Kostengünstige Lüftungslösungen im Wohnungsbau - Systeme mit Wärmerückgewinnung, Protokollband 50 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 2015.
- [Thaler 2010] Diplomarbeit Andreas Thaler: Lebenszykluskosten von Wohnraumlüftungsanlagen im mehrgeschossigen Wohnbau, Diplomarbeit, FH-Kufstein, Facility- und Immobilienmanagement FIM, 7/2010
- [Bischof 2006] Wolfgang Bischof; Sabine Brasche; Thomas Hartmann; Ehrenfried Heinz; Wolfgang Richter (2006): Feuchteschäden und Schimmelpilzbefall in Wohnungen, In: Helmut Künzel; Wolfgang Bischof (Hg.): Fensterlüftung und Raumklima, Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, S. 164 - 173.
- [Pfluger 2013] Pfluger, R. Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung aus ökonomischer Sicht - Lebenszykluskosten und Einsparpotenziale in: Feist, W. und Ebel, W.: Ökonomische Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Protokollband zur 42. Sitzung des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser / Research Group for Cost-effective Passive Houses - Proceedings No. 42; Passive House Institute; Darmstadt 2013
- [DETAIL 01/16] Pfluger, R., Rojas, G., Sibille, E., Oliver K., Bränlich, K.: Komfortlüftung effizient und kostengünstig planen, DETAILgreen 01/2016, S. 52 - 58
- [AWARD 2016] Bränlich, K.: Lüftungskonzepte für die Sanierung, Component Award 2016, Passivhaus Institut Darmstadt 2016
- [Pfluger 2016] Pfluger, R.; Kirchmair, M.: Untersuchung zur Hygiene von Lüftungsanlage und Raumlufte im Passivhaus Darmstadt Kranichstein nach 25 Betriebsjahren
- [Feist 2016] Feist, W.: Passive House - the long-lasting solution, Conference Proceedings, 20th International Passive House Conference, Darmstadt 2016, S. 65 - 81
- [Wagner 2012] Wagner, W. et al. 2012. Forschungsprojekt Passivhauswohnanlage Lodenareal (Final Report). Abgerufen 9.6.2016 https://www.energie-tirol.at/fileadmin/static/sonstiges/51800_Lodenareal_Endbericht_2013.03.13_mb.pdf.
- [Schnieders 2008] Schnieders, Juergen. 2008. Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung. Passivhaus Institut Darmstadt.



Daniel Ruepp

Daniel Ruepp studierte Energie- und Umweltmanagement an der FH Pinkafeld und arbeitete anschließend beim Energieinstitut Vorarlberg und bei AlpS GmbH in Innsbruck. Seit 2015 ist er bei EQUA Solutions AG als Fachingenieur für Gebäudesimulation tätig und doziert an der FH Salzburg in diesem Fachbereich.

Forschungsprojekt Bernhofergründe Kuchl

simulationsgestützte Optimierung eines Mehrfamilienhauses

Einleitung

Die gemeinnützige Wohn- und Siedlungsgenossenschaft „die salzburg“ reg. Gen.m.b.H. plant in Kuchl erstmals ein soziales Wohnbauprojekt mit Bauteilaktivierung (BTA) umzusetzen. Um zusätzliche Planungssicherheit zu erhalten, wird das Projekt im Rahmen eines Forschungsauftrags mit dynamischer Gebäudesimulation begleitet. Diese Planungsbegleitung erfolgt durch die Fachhochschule Salzburg und EQUA Solutions AG als Auftragnehmer. Dieser Beitrag fasst das Projekt, die bisherigen Untersuchungen und erste Empfehlungen zusammen.

Projekthalt & Ziele

Der Bauherr errichtet drei identische Wohngebäude mit je 10 Wohneinheiten (ca. 900 m²BGF) hintereinander angeordnet auf dem gleichen Grundstück in unterschiedlichen Konstruktionsarten (Holz-, Massiv- und Hybridbau). Die Gebäude in Holz- und Massivbau werden mit der bei der Bauherrschaft üblichen Wärmeversorgung (Fernwärme + Radiatoren) ausgestattet. Der Hybridbau wird mit Bauteilaktivierung und einer Grundwasser-Wärmepumpe kombiniert mit Solarthermie versorgt. Das Grundwasser wird im Sommer zum Free-Cooling verwendet. Schwerpunkt des Projekts ist die Untersuchung der Lebenszykluskosten der verschiedenen Konstruktionsarten und der Haustechniksysteme.

Der Baubeginn ist mit Sommer 2017 geplant, derzeit steht das Projekt kurz vor der Einreichung zum Baubescheid. Zum Komfortnachweis werden ausgewählte Wohnungen nach Abschluss der Bauarbeiten 2 Jahre von der Fachhochschule Salzburg gemessen.

In den ersten Projektgesprächen ergaben sich folgende Fragestellungen an die Gebäudesimulation:

- Ist die Hülle des Hybridbaus thermisch ausreichend für den Einsatz von Bauteilaktivierung bei Verzicht auf eine kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) mit Wärmerückgewinnung (WRG)?
- Abschätzung des Komforts in Winter und Sommer, zu erwartender Heizwärmebedarf.
- Identifizierung möglicher problematischer Sachverhalte.
- Vergleich des Sommerkomforts zwischen Massivbau ohne Kühlung und Hybridbau mit Free-Cooling durch das Grundwasser.
- Funktioniert das Haustechniksystem in Bezug auf die Energieflüsse?
- Welche Effizienzverbesserung der Wärmepumpe ist für die Warmwasserbereitung zu erwarten durch die „Vorerwärmung“ der Wärmequelle im Sommer?

Nicht im Untersuchungsrahmen ist ein genauer Vergleich aller verschiedenen Bauweisen enthalten.

Vorgehensweise

Für die Simulation kommt die Software IDA ICE (Indoor Climate and Energy) in der Version 4.7 zur Anwendung. IDA ICE ist ein Programm zur detaillierten dynamischen Simulation von Gebäuden. Es berechnet den korrekten zeitlichen Verlauf von Energieflüssen (dem Raum zu- und abgeführte Wärmeleistung, Primärenergieverbräuche usw.) und von Komfortvariablen (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchte, CO₂-Konzentration) in den vom Anwender definierten Zonen. Dabei stehen die Zonen im Kontakt zu ihrer Umgebung und zu den an sie angrenzenden Räumen und den in ihnen sich befindenden Personen, Geräten und Gegenständen. Somit berechnet IDA ICE die dynamische Wechselwirkung zwischen Gebäude, Klima, Haustechnik und Benutzer.

In der ersten Phase der Untersuchungen wurde ein etwas vereinfachter Vergleich (vor allem beim Sommerkomfort) zwischen Massivbau und Hybridbau durchgeführt in Bezug auf die zu erwartenden Temperaturen und die Übertemperaturgradstunden. Zudem wurde geprüft, ob die Gebäudehülle des Hybridbaus thermisch gut genug ist, um mit der Bauteilaktivierung die Komfortanforderungen im Winter zu erfüllen (oder ob eine Lüftungsanlage erforderlich ist).

Diese erste Phase besteht aus mehreren Teilschritten:

1. Modellierung mit allen bekannten Randbedingungen, Annahmen bei nicht vorliegenden Eingangsdaten
2. Heiz- und Kühllastberechnung zur Dimensionierung der Bauteilaktivierung
3. Jahressimulation „idealisiert“, zur Identifizierung kritischer Zonen und Einschätzung des Wärmebedarfs
4. Modellierung der tatsächlichen Wärmeabgabesysteme, Radiatoren bzw. BTA
5. Simulation der Winterperiode zur Studie des Trägheitsverhaltens der BTA
6. Simulation der Sommerperiode und Untersuchung verschiedener Sommerstrategien

Das Modell in der Geschoßplanansicht (links - Erdgeschoß) und in der 3D-Ansicht (rechts) ist in Abbildung 1 gezeigt, Tabelle 1 enthält die Übersicht der Eingabe-Randbedingungen. Die Zeitpläne für die internen Lasten nach SIA 2024 für Mehrwohngebäude sind in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 1: Geschoßplan und 3D-Ansicht des Gebäudemodells

Tabelle 1: Übersicht der Eingabedaten (spezifische Werte auf Zonenfläche bezogen \approx Nutzfläche)*

Geometrie	Geometrie nach DWG Plänen, Stand März 2016 Wohnungsweise Zonierung + Treppenhaus und Keller (nicht konditioniert) In Summe 12 Zonen pro Gebäude
Klimadaten	Datensätze der ASHRAE für den Standort Salzburg-Flughafen
Verschattung	Umgebende Verschattung aus Google Earth Bauliche Verschattung nach Plänen Keine bewegliche Verschattung
Bauteile	Nach EAW mit U-Werten $\approx 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Außenwand und Dach Decke zu Keller $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ Verglasung $U = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$; g-Wert = 0,5 Fenster U-Wert gesamt: 0,80 - 0,86 $\text{W/m}^2\text{K}$ Wärmebrückenzuschlag Fenstereinbau: 0,05 W/mK
Interne Wärmequellen	Anzahl der Personen: 0,0286 pro m^2 (35 m^2 Wohnfläche pro Person) Geräteleistung: 0,75 W/m^2 Beleuchtung: 1,00 W/m^2 Verteilung nach SIA Zeitplänen
Infiltration	0,4 h^{-1} konstant verteilt auf die Zonen (hygienischer Luftwechsel nach EAW)
Warmwasserbedarf	50 Liter pro Person und Tag bei 21 Personen; mit Verteilungsplan für Morgen- und Abendspitzen

* Randbedingungen werden wenn möglich vereinfacht, manchmal zu Vergleichszwecken an Normvorgaben angepasst. Bei der im aktuellen Planungsstand unsicheren Datenlage (vor allem Bewohneranzahl und Profile) wurde derzeit bewusst darauf verzichtet, zusätzliche Unsicherheiten in das Gesamtsystem einzubringen (wie Vermutungen über den Winddruck oder Lüftungsverhalten). Wann immer Eingabedaten einen gleichbleibenden Effekt auf die Aussagekraft der Ergebnisse zu erwarten lassen, werden sie vereinfacht modelliert. Es gilt die Regel: Nur so genau wie notwendig. Eine spätere Detaillierung bei besserer Datenlage kann immer noch erfolgen.

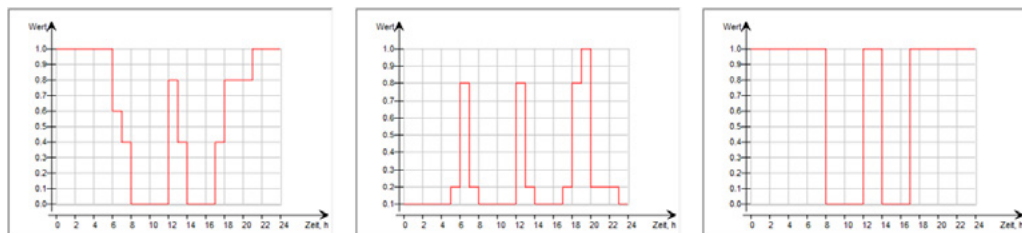


Abbildung 2: Zeitpläne nach SIA 2024 für Personenanwesenheit, Gerätebetrieb und Kunstlicht (v. l. n. r.)

Nach der idealisierten Betrachtung wurden im Hybridbau die Decken der Wohnungen (22 cm Stahlbeton) mit Bauteilaktivierung mit einer Einbautiefe von 8 cm von der Deckenoberfläche ausgestattet. Im Modell des Massivbaus wurden die idealen Abgabeelemente mit wassergeführten Radiatoren ersetzt. Anschließend wurde erneut eine Jahressimulation durchgeführt.

Die zweite Phase beinhaltet die Modellierung und die Simulation der Haustechnik und die Abstimmung der Regelungstechnik. Neben der Analyse der Be- und Entladung des Speichers durch Solarthermie und Wärmepumpe steht in diesem Abschnitt die Untersuchung der Energieflüsse im Vordergrund. Zusätzlich können die Temperaturen, welche sich für die einzelnen Abnehmer (Warmwasser, Heizung und Kühlung) einstellen, aufgezeichnet, analysiert und optimiert werden.

Aufgrund der Übersichtlichkeit wird die Beschreibung des Haustechnikmodells in zwei Teilabschnitte gegliedert. Auf der einen Seite steht die Abnehmerseite, für welche bestimmte Temperaturniveaus und Massenströme definiert sind (Heiz- und Kühllast durch die Zonen, Warmwasser durch Personen*spez. Verbrauch und Temperaturniveau) auf der anderen Seite steht die Erzeugerseite zur Deckung dieses Bedarfs mit Solarthermie und Wärmepumpe, die bestimmte limitierende Parameter aufweisen (Fläche, Effizienz, Leistungsgrenzen, maximal mögliche Temperaturdifferenzen u.Ä.). Durch die Simulation soll das optimale Zusammenspiel von Erzeuger- und Abnehmerseite mit bester Ausnutzung des Speichers gefunden werden.

Abbildung 3 zeigt das Modell der Abnehmerseite (von Speicher an die Zonen bzw. Warmwasserverbrauch). Die gewünschte Temperatur der Warmwasserbereitung liegt bei 60 °C, die angenommene Temperatur des Kaltwassers beträgt 10 °C. Der Massenstrom zu jedem Zeitpunkt ist durch die Anzahl der Personen und den Verteilungszeitplan, der Morgen- und Abendspitzen berücksichtigt, vorgegeben. Die Temperaturniveaus der Bauteilheizung und -kühlung werden mit 35 °C für den Winterfall und 18 °C für den Sommerfall definiert.

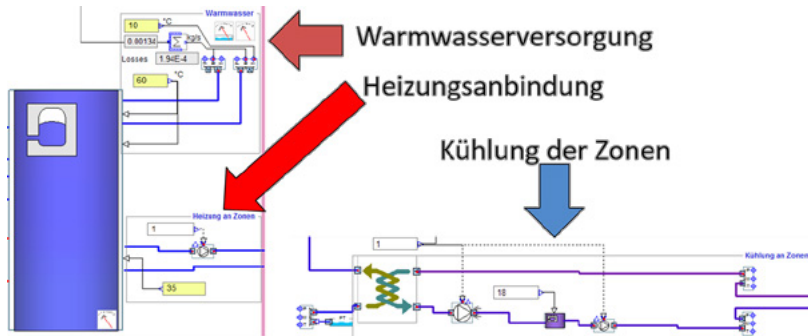


Abbildung 3: Modell der Abnehmerseite

Abbildung 4 zeigt das Modell der Erzeugerseite mit der Solarthermie und dazugehörigen Komponenten sowie der Regelungstechnik. Im unteren Bereich ist die Wärmepumpe (noch ohne Regelung) dargestellt.

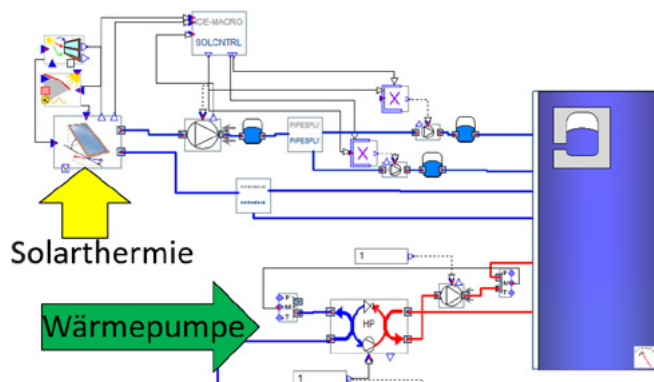


Abbildung 4: Modell der Erzeugerseite bis Speicher

Ergebnisse und Empfehlungen

Im aktuellen Projektstadium (Berichtserstellung 2016) liegen noch keine konkreten Ergebnisse und Empfehlungen zur Haustechnik vor. In diesem Kapitel werden daher ausschließlich die Ergebnisse der Komfortanalyse diskutiert.

Heizlast- und Kühllastberechnung

Bei der Heiz- und Kühllastberechnung werden die Maximalwerte der Wärme- und Kälteabgabe bestimmt. Diese wurden mit folgenden Randbedingungen simuliert:

Heizlastberechnung

- Synthetisches Klima für den 15. Januar mit einer Außentemperaturschwung um die Normtemperatur von -13 °C , ohne interne Wärmequellen, ohne solare Einstrahlung
- Sollwert Heizen = 20 °C , zur Dimensionierung der Radiatoren und Bauteilheizung

Kühllastberechnung

- Design-Daten der ASHRAE, mit internen Wärmequellen
- Sollwert Kühlen = 26 °C , zur Dimensionierung der Bauteilkühlung

Abbildung 5 zeigt die visuelle Darstellung der sich ergebenden Heiz- und Kühllasten für den Hybridbau. In beiden Jahresperioden sind die kritischen Zonen die große Erdgeschoßwohnung und die Wohnungen im 2. Obergeschoß.

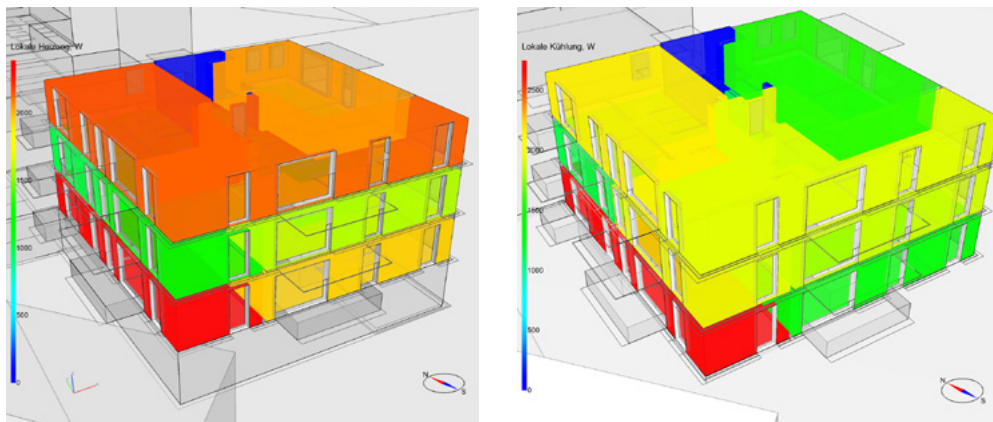


Abbildung 5: Visualisierung der Ergebnisse der Heiz- und Kühllastberechnung für den Hybridbau

Jahressimulation idealisiert

Die Jahressimulation wurde mit dem Klimadatenatz für Salzburg Flughafen der ASHRAE Klimadatenbank durchgeführt. Die Wärmeabgabesysteme in den Zonen wurden idealisiert betrachtet. Der errechnete Heizwärmebedarf liegt bei rund $25 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \cdot \text{a})$. Auffällig ist eine deutlich negative Fensterbilanz während der Heizperiode. Abbildung 6 zeigt den tabellarischen und grafischen Auszug aus IDA ICE für den beheizten Bereich des Gebäudes. Die Ergebnisse für „Fenster&Solar“ zeigen die Netto-Bilanz der Fenster (Gewinne - Verluste), die Spalte „Lokales Heizelement“ entspricht dem erforderlichen Wärmebedarf der Zonen.

Zonengruppe(n) beheizt

kWh (Nur sensibel)									
Monat	Hülle & Wärmebrücken	Innenwände und Massen	Fenster & Solar	Mech. Zuluft	Infiltration & Öffnungen	Personen	Geräte	Kunstlicht	Lokales Heizelement
1	-1491,2	-713,0	-710,7	0,0	-3529,1	710,4	204,7	273,0	5130,1
2	-1289,2	-937,1	-29,4	0,0	-2986,6	648,6	184,9	246,6	-1086,4
3	-1150,8	-1095,8	627,3	0,0	-2822,3	715,5	204,7	273,0	3152,8
4	-768,2	-1069,5	1697,4	0,0	-1888,3	665,8	198,1	264,2	824,8
5	-645,1	-1080,9	2325,2	0,0	-1752,2	585,3	204,7	273,0	6,3
6	-588,0	-1291,6	2200,3	0,0	-1427,5	493,5	198,1	264,2	-0,0
7	-564,4	-893,7	2297,7	0,0	-1768,5	372,9	204,7	273,0	-0,0
8	-527,3	-343,8	1962,8	0,0	-1982,2	331,2	204,7	273,0	0,0
9	-524,5	4,5	1191,6	0,0	-1761,0	552,9	198,1	264,2	-0,0
10	-641,1	-38,3	949,7	0,0	-2025,3	671,9	204,7	273,0	526,2
11	-1121,3	-702,0	-222,2	0,0	-2696,0	696,2	198,1	264,2	3487,7
12	-1455,2	-989,4	941,2	0,0	-3429,8	721,2	204,7	273,0	5404,1
Gesamt	-10746,3	-9171,4	11537,6	0,0	-28068,8	7173,3	2410,3	3214,0	22606,4
In Heizperioden (5018,0 h)	-6904,7	-3967,1	-1534,8	0,0	-17928,4	4275,2	1220,7	1627,6	22606,8
In Kühlperiode (1814,0 h)	-2260,1	-3261,0	8220,7	0,0	-5833,1	1319,4	669,4	892,7	0,0
Übrige Zeit	-1581,5	-1942,3	4851,7	0,0	-4207,3	1578,7	520,2	693,7	-0,4

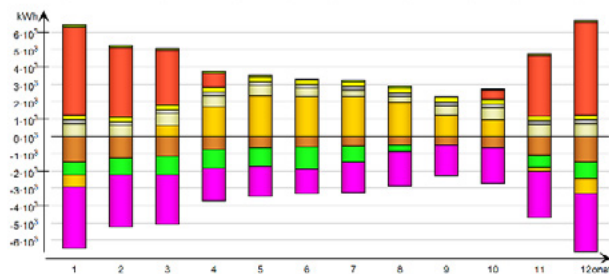


Abbildung 6: Monatliche Energiebilanz des beheizten Gebäudeteils

Während der Jahressimulation zeigten sich im Keller in den Übergangsmontaten deutliche Feuchtespitzen, die zu mehrfachen Taupunktunterschreitungen in der Simulation geführt haben. Dies lässt darauf schließen, dass es im Keller im momentanen Planungsstand zu Sommerkondensationsproblemen kommen wird. Abbildung 7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der relativen Luftfeuchte im Keller mit der errechneten Anzahl der Jahresstunden über 90%.

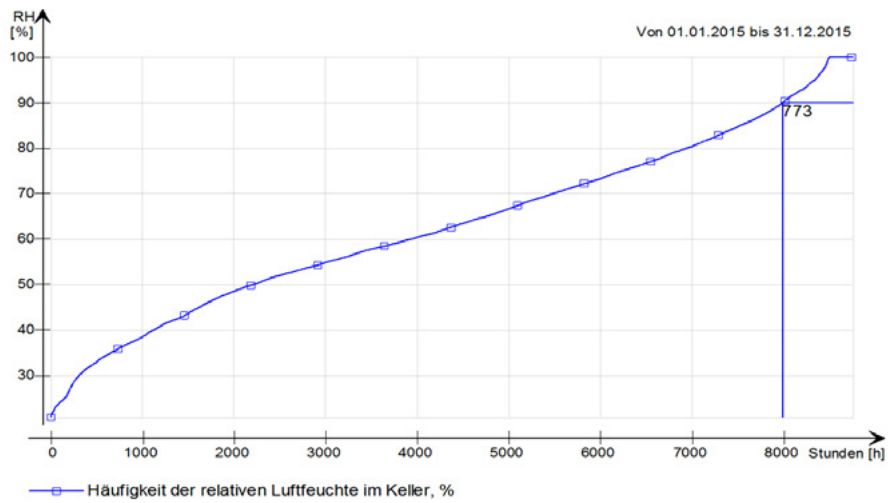


Abbildung 7: Häufigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit im Keller über 90%

Ebenfalls wurde durch die Jahressimulation die Anzahl der Nutzungsstunden mit einer operativen Temperatur über 27 °C analysiert (Abbildung 8). Hier zeigen die Wohnungen in den oberen beiden Geschossen die höchsten Ergebnisse im Hybridbau. Die Vergleichsergebnisse des Massivbaus sind hier, bedingt durch die höhere Masse und die andere Verschattungssituation, deutlich besser. Die kritische Zone im Massivbau ist die kleine Süd-West-seitig gelegene Wohnung im ersten Obergeschoß.

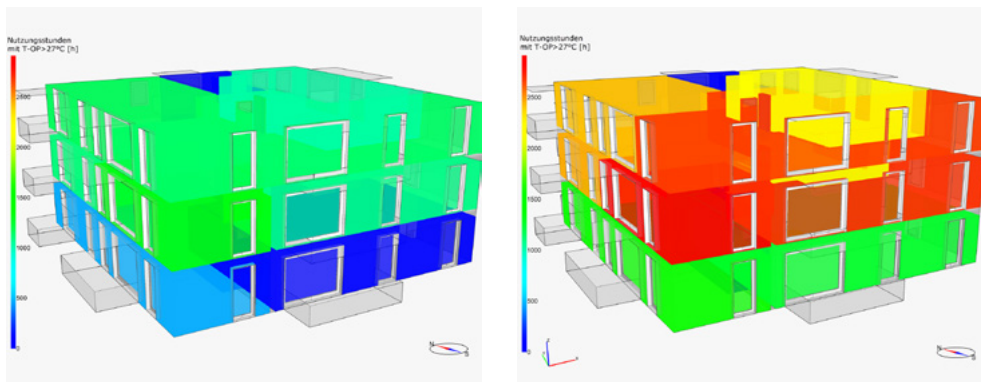


Abbildung 8: Anzahl der Stunden mit einer Temperatur über 27 °C - Massivbau links, Hybridbau rechts

Vergleich von Radiatoren und Bauteilaktivierung im Winter

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der operativen (gefühlten) Temperatur in einer der kritischen Zonen für die erste Februarwoche. Es ist zu sehen, dass die gefühlte Temperatur im Hybridbau höher ist und geringeren Schwankungen unterliegt, unter anderem durch die größeren Wärmeabgabeflächen aber auch durch die erhöhten Oberflächentemperaturen der Decke. Die gefühlten Temperaturen sind bei Einsatz von Radiatoren tendenziell geringer, da diese in erster Linie die Luft erwärmen, während die Bauteilaktivierung einen viel höheren Anteil an Wärmestrahlung liefert.

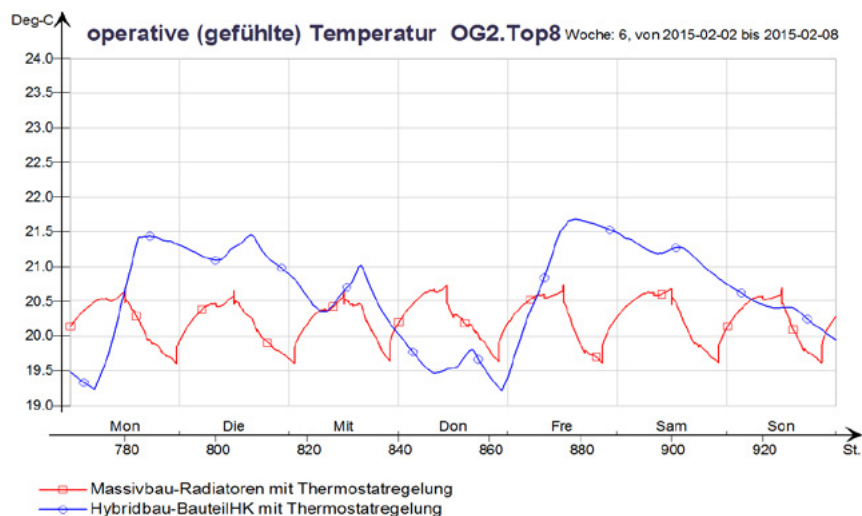


Abbildung 9: Verlauf der operativen Temperatur für Radiatoren und Bauteilaktivierung für eine Februarwoche

Vergleich der Sommerstrategien

Abbildung 10 zeigt den Verlauf der operativen Temperatur für die untersuchten Sommerstrategien der ersten Juliwoche der Simulation. Die rote Kurve markiert den schlechtesten anzunehmenden Fall in dieser Woche, ohne Verschattung und Fensteröffnung. Der Verlauf in Grün zeigt eine Nachtlüftungsstrategie (keine Verschattung) in der die Fenster abends zwei Stunden und morgens eine Stunde lang geöffnet werden, sofern die Innenraumtemperatur über 26 °C liegt. Diese Auskühlung durch die Fensterlüftung ist im Kurvenverlauf deutlich zu erkennen, reicht aber nicht aus, um die Temperaturen auch tagsüber unter 27 °C zu halten. In blau ist der Verlauf mit der Bauteilkühlung gezeigt, mit dieser aktiven Wärmeabfuhr ist es kein Problem, die gewünschte Grenze von 27°C selten bis gar nicht zu überschreiten.

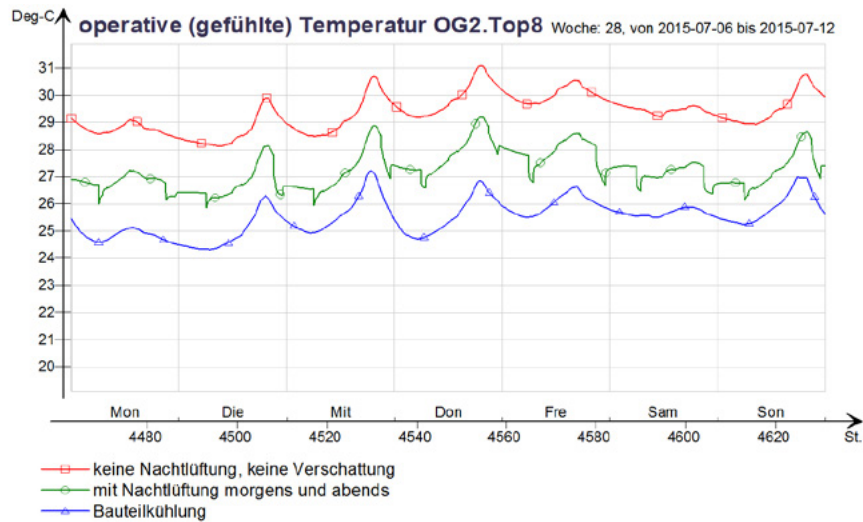


Abbildung 10: Vergleich der operativen Temperatur verschiedener Sommerstrategien

Empfehlungen aus den bisherigen Komfortuntersuchungen

Die Empfehlungen an die Bauherrschaft und das Planungsteam nach den ersten Komfortanalysen beinhalten folgende wichtige Punkte:

- Die Fenster in den Fassaden der sonnenschwachen Ausrichtungen sollten bei architektonischer Vertretbarkeit etwas reduziert werden, da dies die größten Schwachstellen der Gebäudehülle sind.
- Der thermische Komfort kann im Winter auch bei Soll-Raumtemperaturen von 24 °C mit der Bauteilaktivierung erreicht werden. Eine spätere Abbildung eines vereinfachten Benutzerverhaltens sollte simuliert werden, um den zu erwartenden Temperaturabfall unter den Sollwert bei „falschem“ Lüftungsverhalten abschätzen zu können und entsprechende Empfehlungen an die späteren Bewohner ausgesprochen werden können.
- Es sollten Maßnahmen bezüglich der Sommerkondensation diskutiert werden.
- Sollwert der BTA bei Verwendung von Raumthermostaten auf 21 - 22 °C ansetzen.
- Im Holz- und Massivbau sollten Verschattungssysteme für die kritischen Wohnungen vorgesehen werden.
- Der Einsatz einer KWL mit WRG bringt neben besserer Raumluftqualität auch weniger Wärmebedarf, mehr als die Hälfte des Endenergiebedarfs des Gesamtsystems könnte eingespart werden.



Elmar Draxl

Elmar Draxl ist in der Neubauabteilung der Neuen Heimat Tirol als einer von 2 Projektleitern tätig, zuständig für die Bereiche Innsbruck, Oberland und Außerfern. Das Hauptaufgabengebiet liegt in der Projektentwicklung von Wohnungen, Wohn- und Pflegeheimen und auch öffentlichen Nutzungen wie z.B. Kindergärten.



Engelbert Spiß

Nach dem erfolgreichen Abschluss der HTL Innsbruck im Bereich Tiefbau war Engelbert Spiß als Bauleiter tätig. Derzeit absolviert er ein berufsbegleitendes Studium als Diplomingenieur. Seine Tätigkeit als Prokurist und Geschäftsbereichsleiter Neubau und Großinstandsetzung bei der Neuen Heimat Tirol übt er seit 2011 aus. Seit 2008 unterrichtet er an der FH Kufstein und seit 2012 an der Wohnen Plus Akademie in Wien.

Passivhaus Plus-Wohnbau in Innsbruck

1. Das Netto-Null-Gebäude am Vögelebichl in Innsbruck

1.1 Neue Heimat Tirol

Die NEUE HEIMAT TIROL (NHT) ist über die Landesgrenzen hinweg bekannt für fortschrittliche, energiesparende und somit effektive und zeitgemäße Gebäude. Die Anforderungen werden strenger, die Standards höher und die Kunden sparsamer im Ressourcenverbrauch. Die NHT folgt ihrem gesetzlichen Auftrag, langfristig effiziente Gebäude für die Kunden zu errichten, die auch in Zukunft leistungsfähig bleiben. Der gesellschaftliche und technische Wandel wird immer rasanter - die NHT antwortet auf diese Herausforderungen mit dem Netto-Null-Gebäude.

1.2 Innovation trifft Praxis

Innovative Konzepte sind das Gebot der Stunde. So hat sich die NHT dazu entschieden, in Kooperation mit der Innsbrucker Kommunalbetriebe AG (IKB) ein Netto-Null-Gebäude am Vögelebichl im Innsbrucker Stadtteil Kranebitten, in der Nähe des Flughafens, zu errichten (Abbildung 1).



Abbildung 1: Das Netto-Null-Gebäude am Vögelebichl in Innsbruck, Außenaufnahme April 2015

Auf dem dortigen Baurechtsgelände der Innsbrucker Kommunalbetriebe (IKB) entstanden zwei Baukörper mit 26 Mietwohnungen und einer Tiefgarage.

Das Besondere an diesem Bauwerk ist, dass die IKB das Energiekonzept und die NHT das Passivhaus-Konzept mit wissenschaftlicher Begleitung durch die Universität Innsbruck und das Passivhaus Institut weiterentwickelt hat. Ein Netto Null Gebäude zeichnet sich dadurch aus, dass die gesamte Energie für die allgemeine Haustechnik, inklusive Heizung und Warmwasser, bilanziert über das gesamte Jahr, selbst produziert wird; dies stellt natürlich auch einen enormen Mehrwert für die Kunden dar.

2. Projektbeschreibung

Das Projekt wurde in Innsbruck, am Vögelebichl 13 a und 13 b, ausgeführt. Dabei entstanden insgesamt 26 Mietwohnungen.

2.1 Projektdetails

Grundstücksgröße	2.776 m ²
Wohnungszahl	26
Tiefgaragen(TG)-Abstellplätze	27
Wohnnutzfläche	ca. 2.032 m ²
Bruttogeschossfläche ohne TG	ca. 2.970 m ²
Bruttogeschossfläche inkl. TG	ca. 4.463 m ²
Umbauter Raum inkl. TG	ca.14.340 m ²

Die Bauzeit des Projektes belief sich von Dezember 2013 bis April 2015.

Die Gesamtbaukosten beliefen sich auf netto € 4.700.000 inkl. Tiefgarage, Außenanlagen, Honorare, Erschließungskosten und Finanzierungskosten.

Ausgeführt wurde dieser mehrgeschossige Wohnbau von folgendem Team:

NHT	Bauabteilung, Hausverwaltung und Energietechnik
Architekt	Vogl-Fernheim, Innsbruck
Statik	IFS, Innsbruck
Haustechnik	Alpsolar Klimadesign, Innsbruck
Elektroplanung	Büro Lasta, Innsbruck
Energieberatung	Johannes Gstrein, Innsbruck
PHPP	Passivhaus Institut, Innsbruck
Bauphysik	Fiby ZT GmbH, Innsbruck
Vermessung	Ebenbichler, Hall
Geotechnik	Grund & Boden, Absam

2.2 Architektonisches Konzept

Die Wohnanlage Vögelebichl besteht aus zwei klar strukturierten Baukörpern, die durch eine gemeinsame Tiefgarage miteinander verbunden sind. Das nördliche Gebäude hat vier, das südliche drei Obergeschosse. Letzteres ist - den Vorgaben der Flugsicherheit entsprechend - abgetrepppt. Den Wohnungen im zweiten Stock des südlichen Baukörpers sind zusätzlich Terrassen vorgelagert.

Insgesamt verfügt die Wohnanlage Vögelebichl über 26 geräumige, zeitgemäßen Standards entsprechende Mietwohnungen mit einer Nett Nutzfläche von ca. 2.032 m². Sämtliche Wohnungen zeichnen sich durch eine klare räumliche Gliederung aus, die modernen Ansprüchen gerecht wird. Jede Wohnung verfügt nicht nur über eine Terrasse bzw. Loggia, sondern auch über ein eigenes Kellerabteil. Erschlossen werden die Wohneinheiten jeweils durch ein zentral gelegenes Stiegenhaus samt Liftanlage. Der großzügige Kinderspielplatz ist geschützt zwischen den beiden Baukörpern situiert.

Die Gebäude sind fußläufig barrierefrei über eine Rampe erreichbar und zwar sowohl im Süden als auch im Norden, sowie über die Tiefgarage mit Lift. Deren zweispurige Einfahrt findet sich auf der Nordseite der Anlage am Vögelebichl (Lohbach). Die Haupteingänge sind ostseitig auf Erdgeschosshöhe angelegt.

Die Aufschüttung auf öffentlichem Grund hat es ermöglicht, dass die Wohnanlage an die Höttinger Au / Kranebitter-Allee angebunden ist und in Nord-Süd-Richtung durchschritten werden kann.

Um die Passivhaus-Plus-Klasse zu erreichen, wurden auf den Dächern beider Häuser sowohl Photovoltaikanlagen als auch Solarthermiemodule angebracht.

2.3 Haustechnische Anlagenbeschreibung

Um dem Begriff „Netto-Null-Gebäude“ gerecht zu werden, wird der jährliche Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser zu 100 % durch umweltfreundliche und ressourcenschonende Energiegewinnungsanlagen wie Solarthermie, Photovoltaik und Wärmepumpe mit Grundwassernutzung abgedeckt. Die Leistungen und Größen der einzelnen Teilanlagen wurden so gewählt, dass eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Anlageninvestitionskosten und Folgebetriebskosten erreicht wird. Die Innovation besteht aus der Einbindung einer sanften sommerlichen Wohnraumkühlung (mittels Grundwassernutzung) sowie dem Einsatz von Frischwassermodulen bzw. Wohnungsstationen im Niedertemperaturbereich.

Heizung

Energieerzeugung: Eine grundwasserbetriebene Wärmepumpe versorgt die Wohnanlage mit der notwendigen Wärmeenergie zur Abdeckung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfes. Dazu wurde eine 75 m² große thermische Solaranlage Heizungs- und Warmwasserunterstützend eingebunden. Zusätzlich wurde eine 25 kWp starke Photovoltaikanlage am Dach installiert, welche den Jahresstrombedarf der Wärmepumpe und der technischen Hilfsströme abdeckt.

Energieverteilung (Winterbetrieb): 4-Leitersystem bestehend aus Niedertemperatur- (Fußbodenheizung) und Hochtemperaturnetz (Warmwasserbereitung max. 55 °C).

Energieabgabe (Winterbetrieb): Fußbodenheizung, Luftvorwärmung.

Kühlung

Energieerzeugung: Eine effiziente Direktnutzung des Grundwassers sorgt mittels „sanfter Kühlung“ während der warmen Sommermonate für ein angenehmes Raumklima in den Wohnungen.

Energieverteilung (Sommerbetrieb): 4-Leitersystem bestehend aus Kühlwassernetz (Fußbodenkühlung) und Hochtemperaturnetz (Warmwasserbereitung max. 55 °C).

Energieabgabe (Sommerbetrieb): Fußbodenkühlung, Luftkühlung.

Warmwasser

Die Warmwasserbereitung erfolgt dezentral, indem in jeder Wohneinheit das Warmwasser mittels Frischwassermodulen innerhalb der Wohnungsstationen hygienisch im Durchlauf erhitzt wird. Dadurch wird ein hoher Schutz gegen Legionellen erzielt.

Komfortlüftung

Eine Passivhauszertifizierte Komfortlüftungsanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung sorgt für den erforderlichen Luftaustausch der Räume. Es handelt sich dabei um eine reine Be- und Entlüftungsanlage mit geringer Heiz- und Kühlfunktion.

Kenndaten:

Drei zentrale Lüftungsanlagen (effektiver Wärmerückgewinnungsgrad > 82 %)

Aufstellorte: 1 x innerhalb der Dämmhülle, 2 x am Dach mit Einhausung

0,2 - bis 0,4-facher Luftwechsel, wohnungsweise einstellbar

Lüftungsanlage mit Zuluftheizung/-kühlung

Sommernachtlüftungsfunktion (automatischer Sommer-Bypass)

Aufbau der thermischen Hülle und technische Details

Außenwände: U-Wert: 0,11 W/(m²K);

Flachdächer: U-Wert: 0,09 W/(m²K)

Decke zu Keller und Tiefgarage: U-Wert: ca. 0,11 W/(m²K)

Fenster und Fenstertüren aus Kunststoff: U-Wert: 0,82 W/(m²K);

g-Wert Verglasung: 0,51; Dreischeibenverglasung

Jahresheizwärmebedarf: 14.251,60 kWh/m²/a

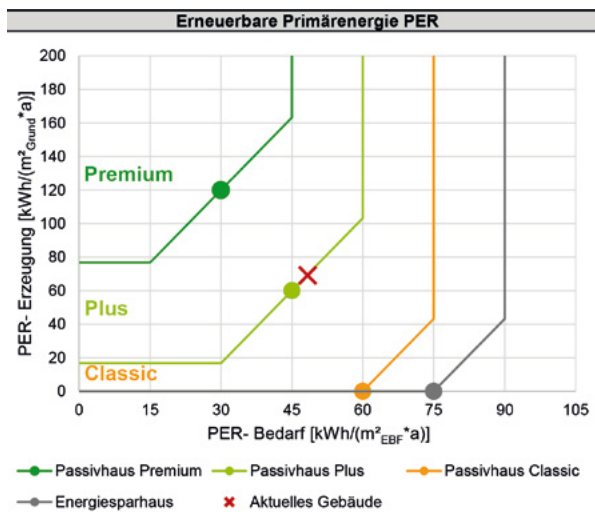
Heizlast: 11 W/m²

Übertemperaturhäufigkeit: 5%

Luftdichtheit: 0,3 n₅₀ 1/h

PER-Kennwert: 69 kWh/m²a

PER Diagramm:



3. Erkenntnis für den zukünftigen mehrgeschossigen Wohnbau - vom Pilotprojekt zum Standard

Der ökologische Nachhaltigkeitskurs der NHT wird ständig weiterentwickelt und stellt eines der wichtigsten Standbeine dar. Es liegt in der Natur der Sache, dass die Entwicklungsschritte hin zu einem Gebäude, das rechnerisch über das Jahr betrachtet keine Fremdenergie benötigt (abgesehen vom individuellen Haushaltsstrom), nicht von heute auf morgen passieren.

Die langjährige einschlägige Erfahrung, die kompetenten Mitarbeiter und das unbedingte Streben nach umsetzbarem Neuem, um so weiterhin leistbaren Wohnraum zu schaffen, sind die Grundpfeiler für die tägliche Arbeit der NHT. Die ersten Erfahrungen in die richtige Richtung wurden bereits Ende der 1990er Jahre mit den ersten Passivhausnahen Gebäuden am Mitterweg in Innsbruck gemacht.

3.1 Kompaktheit und guter Wärmeschutz

Unabdingbar ist es, dass bereits im Zuge der Planung an die Nutzung gedacht wird: Die Bewohner wünschen sich, möglichst unabhängig zu sein in Bezug auf Energie, und wollen gleichzeitig einen Beitrag für die Umwelt leisten. Genau diese Wünsche sind auch in die Planung der Liegenschaft Vögelebichl eingeflossen. Weg vom Verbrauch endlicher Energien - einer der Grundgedanken für dieses innovative Projekt.

3.2 Das Netto-Null-Gebäude spart Energie und Geld!

Jedes Haus hat eine Geschichte und vor allem eine Zukunft. Diese Zukunft für die Gebäude am Vögelebichl stellt sich optimal dar, einerseits für den Kunden der mit moderaten Betriebskosten rechnen darf, andererseits für die Projektbeteiligten, die durch die Errichtung Erfahrung gewonnen und einen wahren Mehrwert geschaffen haben.

Wohnen ist und bleibt ein zentraler Aspekt des Lebens; ein Dach über den Kopf zu haben, ein „Zuhause“, in dem man sich wohlfühlt, Kraft und Energie schöpfen kann und das auch noch leistbar ist, ist nach wie vor von elementarer Bedeutung. Nicht zuletzt auf Grund der Tatsache, dass für genau dieses Dach über dem Kopf rund 25 bis 30 % der Einkünfte investiert werden müssen.

3.3 Schimmelprobleme – sind Probleme von gestern

Leistbares und energiesparendes Wohnen bzw. hocheffiziente Energienutzung unter Einbezug der Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung ermöglichen es heute, neue Wege zu beschreiten. Es sind die Grundprinzipien, Wärmeverluste zu minimieren und Energiegewinne optimal einzusetzen. Die Integration einer kontrollierten Wohnraumbelüftung bringt enorme Vorteile für den Bewohner. Der Luftaustausch findet reguliert statt, wobei individuelle Eingriffe jederzeit möglich sind.

Der Mensch steht im Mittelpunkt: Hinter sämtlichen Bestrebungen der NEUEN HEIMAT TIROL, langfristig leistbare und energieeffiziente Wohnungen zur Verfügung zu stellen, steht das Wohl unserer Kunden. Der Mensch steht somit im Mittelpunkt all unserer Handlungen.



Rainer Vallentin

Rainer Vallentin ist selbstständiger Architekt und Stadtplaner in München mit den Schwerpunkten Holzbau, Baugemeinschaftsprojekte, Passiv- und Nullenergiehäuser. Dissertation 2011 zum Thema „Energieeffizienter Städtebau mit Passivhäusern - Begründung belastbarer Klimaschutzstandards im Wohnungsbau“. Studien und Forschungsarbeiten zu Klimaschutzkonzepten in der Stadtplanung mit Hilfe szenariogestützter Untersuchungen für Quartiere und andere große Gebäudebestände.

Neue Bewertung von Passivhäusern gemäß PER-Methode

1. Ausgangslage

Die Diskussion über angemessene Energiestandards wird derzeit mit neuer Heftigkeit geführt - zumeist in Form einer Gegenüberstellung: Erneuerbare Energie versus Effizienz. Hintergrund ist die EU-Gebäude-Effizienzrichtlinie (EPBD), die unterschiedliche nationale Interpretationen und Ausrichtungen ausdrücklich zulässt. Alle Neubauten sollen ab 2020 als „Nearly-Zero-Energy-Buildings“ ausgeführt werden, für öffentliche Gebäude wird dies bereits ab 2018 gefordert. Die genaue Festlegung der neuen nationalen Standards soll auf Grundlage von Kostenoptimalitätsstudien erfolgen.

Im Zuge dieser Auseinandersetzung ist das gut begründete Passivhauskonzept in die Defensive geraten und sieht sich immer neuen Angriffen ausgesetzt. Als Antwort auf die Herausforderungen der Energiewende hat nun das Passivhaus Institut seinerseits ein neues Bewertungsmodell für den Primärenergieaufwand entwickelt das hier in seinen Grundzügen dargestellt werden soll.

2. Das Bewertungsverfahren von Passivhäusern (PHPP)

Die Projektierung und Zertifizierung von Passivhäusern erfolgt über das sog. PHPP (Passivhaus-Projektierungs-Paket), ein Excel-basiertes Rechentool und Planungswerkzeug mit einer Vielzahl von Tabellenblättern. Das Berechnungsverfahren wurde 1998 von Wolfgang Feist entwickelt und seitdem regelmäßig vom Passivhaus Institut gepflegt und weiterentwickelt.

Es basiert auf vereinfachten Energiebilanzen, die in Anlehnung an europäische Normen (z.B. EN 832 bzw. EN ISO 13790) konzipiert sind. Die Rechenansätze wurden detailliert über Vergleiche von Messungen und dynamischen Simulationen (sog. Mess-Sim-Vergleiche) von Einzelkomponenten, Einzelgebäuden und Siedlungen validiert.

Anders als in vielen nationalen Berechnungsverfahren wird besonderer Wert darauf gelegt, die physikalischen Vorgänge sowie die Klima- und Nutzungsrandbedingungen möglichst realitätsnah zu bestimmen. Dadurch ergeben sich in der Praxis sehr gute Übereinstimmungen zwischen den energetischen Rechen- und Verbrauchswerten. Das ist nicht nur für die Projektierung im engeren Sinne wichtig (z.B. um die Funktionsfähigkeit des Heiz- bzw. Kühlkonzeptes sicher zu stellen und Fehloptimierungen zu vermeiden), sondern bildet darüber hinaus die Basis für verlässliche Wirtschaftlichkeitsberechnungen und für spätere Kontrollen (z.B. der haustechnischen Systeme in der Nachsorgephase nach Bezug des Gebäudes).

Für Passivhäuser gelten strenge Grenzwerte zum Jahres-Heizwärmebedarf ($\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) und zur Heizlast ($\leq 10 \text{ W/m}^2$) bzw. den analogen gleichlautenden Grenzwerten zum Kühlbedarf und zur Kühllast. Zusätzlich werden Anforderungen an den Primärenergiebedarf, die Luftdichtigkeit ($n_{50} \leq 0,6 \text{ l/h}$) und die Überhitzungshäufigkeiten ($h_{(j, > 26\text{C})} \leq 10\%$) gestellt.

Das PHPP ist im Gegensatz zu vielen „Black-Box-Systemen“ ein offenes Rechentool, in dem man selber Anpassungen und Ergänzungen vornehmen kann. Die meisten der verwendeten Algorithmen und Formeln sind sichtbar (oder können sichtbar gemacht werden). Damit sind die Rechenvorgänge transparent und nachvollziehbar. Das Anwendungsspektrum ist im Laufe der Zeit immer umfassender geworden (große Vielfalt an Gebäudetypen, Nutzungen, Klimastandorten). In der Summe stellt das PHPP eines der besten derzeit verfügbaren Energiebilanzierungsprogramme dar. Es ist nicht nur für Passivhäuser, sondern ebenso für Niedrigenergie-, Null- und Plusenergiehäuser geeignet. Seit der Einführung des sog. „EnerPhit-Standards“ (vgl. [Feist 2012]) kann das PHPP auch für die Projektierung von energetischen Modernisierungen im Bestand verwendet werden.

2.1 Bisherige Primärenergetische Bewertung im PHPP

Der Passivhausstandard war eines der ersten Energiekonzepte, in dem eine Primärenergiebewertung eingeführt wurde. Als Indikator wurde die nicht-erneuerbare Primärenergie gewählt, weil diese als Leitgröße für Umweltbelastungen und Ressourceninanspruchnahme am besten geeignet erschien (vgl. [Feist 1998], S. VIII/3 ff.):

- Für die wichtigsten Energieträger ist der spezifische Primärenergieaufwand relativ gut bekannt. Die Literaturgrößen unterscheiden sich nicht allzu sehr.
- Es besteht eine große Richtungssicherheit hinsichtlich der Beurteilung der energetisch bedingten Treibhausgasemissionen durch Gebäude in der Betriebsphase.
- Die nicht-erneuerbare Primärenergie ist ferner eine gute Näherungsgröße für die externen (umweltbezogenen und sozialen) Kosten und die Ressourcen-Inanspruchnahme knapper Güter. Durch die Berücksichtigung der Vorketten kann der Effizienzansatz dann auch das vorgelagerte Energiesystem mit umfassen.
- Im Hinblick auf sonstige Umweltbelastungen (Versauerung, Stickoxide, radioaktive Abfälle, Flächeninanspruchnahme) ist jedoch keine Richtungssicherheit vorhanden. Hier können nur Ökobilanzen zu genaueren Aussagen und Bewertungen führen. Allerdings ist hier generell die Datenqualität zu den energetischen Prozessketten von geringerer Qualität.

Der Grenzwert für erneuerbare Primärenergie wurde so gewählt, dass der spezifische Primärenergieeinsatz einer Passivhaus-Wohneinheit nicht höher liegt, als für den Haushaltsstromverbrauch eines durchschnittlichen Haushalts alleine. Dadurch ist das Passivhaus auch auf ökologischer Ebene als Effizienzkonzept begründet.

Trotz des vergleichsweise strengen Primärenergiegrenzwerts haben die bislang realisierten Passivhäuser aufgezeigt, dass bei angemessener Stromeffizienz sehr viele Versorgungslösungen für die Heizsysteme möglich sind. Ursächlich hierfür sind die hohen sonstigen Effizienzanforderungen (z.B. bei Heiz- und Kühllast, Heizwärmebedarf). In der Praxis waren für Passivhäuser nur ganz wenige Wärmeversorgungsvarianten ausgeschlossen, die ökologisch bzw. ökonomisch besonders problematisch sind, z.B. eine ausschließlich direktelektrische Beheizung und Warmwasserbereitung bei Wohngebäuden.

2.2 Aus welchen Gründen ist die bisherige Primärenergiebewertung reformbedürftig?

Es existieren mehrere Gründe, warum die Aussagefähigkeit der bisherigen Primärenergiebewertung geringer und künftig immer mehr in Frage gestellt wird:

- Eine Nichtberücksichtigung der erneuerbaren Anteile der Primärenergie hat u.U. zur Folge, dass mangelnde Effizienz durch erneuerbare Energien ausgeglichen wird. Besonders fatal ist dies bei Biomasseheizungen, weil dann ein wertvoller, speicherfähiger Energieträger in ineffizienten Systemen gebunden wird und für sinnvollere bzw. strategisch wichtige Anwendungen nicht mehr zur Verfügung steht.
- Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien ändert sich derzeit die Struktur der Energieerzeugung. Besondere Dynamik weist hierbei die Bereitstellung von Strom auf. In Deutschland liegt der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung inzwischen bei über 30%. Deswegen wurden im PHPP die Primärenergiefaktoren (nicht-erneuerbar) f_p für Strom von 3,0 (1998) über 2,7 (2004) über zwischenzeitlich 2,6 auf nunmehr 2,4 (2015) reduziert. Derzeit wird überlegt, den f_p -Wert für Strom entsprechend der aktuellen Absenkung in der deutschen Energieeinsparverordnung [EnEV 2016] auf 1,8 abzusenken. Dieser Wert wurde nun in der aktuellsten Fassung des PHPP (Version 9.6.a) übernommen.
- Weil die Primärenergiefaktoren immer nur eine „Momentaufnahme“ darstellen
- Soll der Anteil erneuerbarer Stromerzeugung über ca. 50 % ansteigen, wird es unvermeidlich, Überschussstrom aus Windkraft oder Fotovoltaik zwischenzuspeichern. Der Aufwand für zusätzliche Pumpspeicherwerke oder eine erst noch aufzubauende saisonale Speicherung müsste dann in die Primärenergiebewertung Eingang finden.

Die genannten Punkte haben zur Konsequenz, dass die Primärenergiebewertung von Gebäuden früher oder später grundlegend zu überarbeiten ist.

2.3 Die neue PER-Bewertung als Gedankenexperiment

Die PER-Bewertung hat (PER= Primärenergie Erneuerbar / Primary Energy Renewable) den Charakter eines Gedankenexperiments (vgl. [Bertram 2012]).

Im Falle der PER-Bewertung geht es um das Durchdenken der Konsequenzen einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung im Hinblick auf die künftigen energetischen Anforderungen an Gebäude. Es handelt sich um ein „finales Szenario“, in dem das künftig Wünschenswerte vorweg genommen wird, um dann Maßstab einer neuen Bewertung zu werden. Das PER-System basiert einerseits auf einem kontrafaktischen Szenario, weil die Realität der heutigen „Energiewelt“ immer noch dominant auf fossilen Energieträgern und Kernkraft gestützt ist. Es ist derzeit nicht absehbar bis wann die Transformation hin zu einer dominant erneuerbaren Energieversorgung Wirklichkeit werden könnte (frühestens wohl 2050 - 70). Andererseits kann das PER-Modell als Zielszenario interpretiert werden, weil die eingeleitete Energiewende und die jüngsten Klimaschutzvereinbarungen in Paris zumindest einen internationalen Willen aufzeigen, langfristig eine Energieversorgung ohne fossile Energieträger anzustreben. Allerdings ist es ein Szenario im Endzustand oder besser: ein Szenario ohne Weg. Der steinige Weg der Transformation der Energiesysteme wird darin konsequent ausgeblendet.

Der Vorteil dieses Gedankenexperiments besteht darin, dass spekulativen Annahmen (z.B. zur Entwicklung der Heiz- und Stromerzeugungsstruktur, der Nutzflächen, der Bevölkerung und der Wirtschaft), die bei den üblichen Transformations-Szenarien unvermeidlich zu treffen sind, nicht mehr notwendig sind. Es ist nun möglich, sich auf das Wesentliche zu konzentrieren.

rieren: Wie kann eine 100%-erneuerbare Energieversorgung funktionieren? Welche neuen Randbedingungen herrschen dort? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Gebäude und deren Versorgungssysteme?

3. Grundzüge des PER-Modells

Dieser Abschnitt basiert wesentlich auf der Veröffentlichung von Jessica Grove-Smith und Wolfgang Feist „Nachhaltigkeitsbewertung mit PER“ [Grove-Smith / Feist 2015], fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen und erläutert sie mit ergänzenden Abbildungen aus dem entsprechenden Vortrag auf der Passivhaustagung 2015.

Im Gegensatz zur bisherigen Primärenergiebewertung von Passivhäusern (nicht erneuerbare Primärenergie zum Zeitpunkt der Gebäudeerstellung) wird ab der PHPP-Version 9 ein vollständig anderer Ansatz verfolgt, indem künftig nur die erneuerbare Primärenergie bewertet wird, die bei einer 100% erneuerbaren Energieversorgung notwendig wäre (daher auch der Name: PER = Primary Energy Renewable).

Das setzt voraus, dass zunächst eine vollständig erneuerbare Energieversorgung in ihren Konsequenzen durchdacht und abgebildet wird. Das neue Energiesystem ist auf die Stromerzeugung fokussiert. Das liegt daran, dass Brennstoffe bis auf die verschiedenen Bioenergien (z.B. Holz, Energiepflanzen, Biogas, Pflanzenöle) keine Rolle mehr spielen. Tiefengeothermie wird aus ungenannten Gründen nicht betrachtet. Aus Vereinfachungsgründen wird eine kombinierte Erzeugung aus Wasser- und Windkraft sowie Fotovoltaik modelliert.

Biomasse spielt eine Sonderrolle als speicherbarer jedoch nur begrenzt verfügbarer Energieträger, der sowohl zur Wärme-, als auch zur Stromerzeugung eingesetzt werden kann.

Solarthermie und Fernwärme werden gemäß den konkreten Randbedingungen in die PER-Bewertung mit je eigenen Berechnungsansätzen integriert. Fossile Brennstoffe werden über erneuerbare Energieträger, die sie ersetzen könnten, abgebildet.

3.1 Notwendigkeit einer Energiespeicherstruktur

Weil in einer 100% erneuerbaren „Energiewelt“ Strombedarf und -erzeugung nicht deckungsgleich erfolgen können, ist immer davon auszugehen, dass auf verschiedenen Zeitskalen ein Ausgleich über eine Zwischenspeicherung stattfinden muss. Hintergrund ist, dass bei der Stromversorgung die Erzeugung zeitgleich dem Bedarf folgen muss:

1. Auf einer extremen Kurzzeitebene (Millisekunden bis Minuten) geht es vor allem um die Netzstabilität und Kurzschlussfähigkeit. Bei der heutigen fossilen Stromerzeugung wird dies durch die Schwungmasse von Generatoren und Turbinen geleistet. Bei einer ausschließlich erneuerbaren Erzeugung sind hierfür eben Windrotoren (die jedoch bei Windflauten für diese Systemdienstleistung ausfallen) vermutlich weitere separate Komponenten notwendig, z.B. große Schwungradspeicher.
2. Auf einer Zeitebene von mehreren Minuten bis Stunden sind sog. Kurzzeitspeicher erforderlich, um das Auseinanderfallen von Bedarf und Erzeugung im Tagesverlauf auszugleichen. Eine hierfür typische Technologie stellen Pumpspeicherkraftwerke dar. Weitere Speichertechnologien stellen Batterien (Elektromobile, gebäudeintegrierte Batterien in Verbindung mit PV-Anlagen), Druckluftspeicher und die bereits erwähnten Schwungradspeicher dar (vgl. [Feist 2013], S. 619).
3. Auf mittlerer bis saisonaler Zeitebene sind sog. Langzeitspeicher notwendig, die die Aufgabe haben, das grundsätzliche Erzeugungsdefizit erneuerbarer Systeme in Phasen mit geringem Wind- und/oder Solarstromangebot auszugleichen. Derartige Perioden

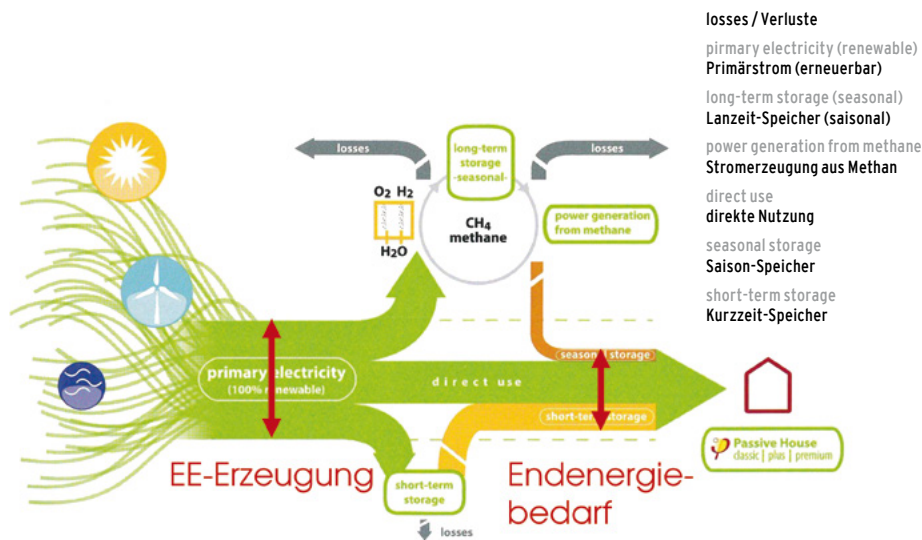
können wetterabhängig im ganzen Jahresverlauf stattfinden. Von besonderer Bedeutung ist hier in Mittel- und Nordeuropa jedoch der Kernwinter (sog. „Winterlücke“), weil hier regelmäßig ein Erzeugungsdefizit während mehrerer Wochen auftritt.

Während Punkt 1 bislang kaum Beachtung findet, ist Punkt 2 bereits heute wichtiger Bestandteil der Stromerzeugung. Mit Zunahme der erneuerbaren Anteile steigen auch die Ansprüche an die Kurzzeitspeicherung. Ein großes und gut vermaschtes Stromnetz erleichtert die Aufgaben des Lastausgleichs erheblich. Daher stellt auch der europäische Netzausbau eine Option dar. Der saisonalen Speicherung (Punkt 3) kommt in einer 100% erneuerbaren Energieversorgung künftig eine strategische Bedeutung zu, die zwar zunehmend erkannt wird, jedoch technologisch noch ganz am Anfang steht.

Der Aufbau der Speicherkapazitäten müsste bei einer Fortsetzung der erneuerbaren Stromerzeugung wie bisher in Deutschland spätestens ab 2030/40 erfolgen. Welche Kombination der Lösungsansätze sich hierbei als sinnvoll erweisen wird, ist unsicher. Dies ist vermutlich der am schwierigsten umzusetzende Teil der Energiewende, auch weil eine wirtschaftliche Tragfähigkeit einer saisonalen Energiespeicherung derzeit nicht absehbar ist. Eine Langzeitspeicherung ist aber ab einem Anteil von ca. 50% regenerativer Stromerzeugung notwendig. Es ist vergleichsweise einfach zu erkennen, dass es in jedem Fall sinnvoller und deutlich wirtschaftlicher wäre, über eine konsequente Effizienzstrategie den Aufwand für Zwischenspeicherung zunächst auf das unverzichtbare Maß zu reduzieren. Das genau ist der Ansatz des PER-Systems, wie es vom Passivhaus-Institut entwickelt wurde.

Im PER-Modell wird aus Gründen der besseren Übersicht ein zweistufiges Modell angewendet. Folglich wird im PER-System unterschieden zwischen:

- dem direkt nutzbaren erneuerbaren Strom,
- dem Energieanteil, der den Weg über eine Kurzzeitspeicherung nimmt und
- dem Energieanteil, der aus saisonalen Speichern stammt.



$$\text{PER-Faktor} = \text{EE-Erzeugung} / \text{Endenergiebedarf}$$

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer 100%-erneuerbaren Energieversorgung, wie sie dem PER-Verfahren zugrunde liegt. Die Energieflüsse sind differenziert nach Direktnutzung, Kurzzeit- und Langzeitspeicherung. Der PER-Faktor des Gesamtsystems ist definiert als das Verhältnis zwischen erzeugter Primärenergie inklusive aller Verluste (links) zu der abgenommenen Endenergie (rechts) Quelle: [Grove-Smith 2015] und [Grove-Smith/Feist 2015], S. 286.

Der Primärenergieaufwand wird im sog. PER-Faktor ausgedrückt. Dieser ist als Quotient zwischen der insgesamt erzeugten erneuerbaren Energie und der bezogenen Endenergie definiert und weist die Einheit $\text{kWh}_{\text{PER}}/\text{kWh}_{\text{EE}}$ auf. Genauer gesagt bezeichnet der PER-Faktor den gesamten Energieaufwand, der für jede zusätzliche Endenenergieeinheit Strom für die jeweilige Anwendung in einem erneuerbaren Energiesystem aufzubringen wäre.

3.2 Kombination von Last- und Erzeugungsprofilen

Um innerhalb des PER-Systems eine Dimensionierung des künftigen Energiesystems vorzunehmen, werden Last- und Erzeugungsprofile aufeinander abgestimmt. Um nicht das ganze Energiesystem modellieren zu müssen, wird exemplarisch nur die Energieversorgung des Gebäudeparks mit stromgestützten Systemen betrachtet. Es handelt sich um ein stark idealisiertes Modell das den Vorteil besitzt, die grundlegenden Randbedingungen und gegenseitigen Abhängigkeiten deutlich hervortreten zu lassen und damit nachvollziehbar zu sein.

Auf der Erzeugungseite wird folgendermaßen vorgegangen:

- a. Den Sockelbeitrag liefert die regional verfügbare Wasserkraft. Bei dieser ist eine gewisse jahreszeitliche Abhängigkeit vorhanden (höhere Produktion im Frühjahr, geringere Produktion im Herbst und Winter)
- b. Solarstrom (PV) und Windkraft werden so ausgelegt, dass sie auf der Jahresebene den fehlenden Bedarf inklusive der notwendigen Speicher- und Ausspeichervorgänge bereitstellen. Das Angebot unterliegt starken Schwankungen. Systematisch finden sich diese im Tagesverlauf und auf jahreszeitlicher Ebene (Solar) bzw. wetterbedingt (Solar + Wind). Um eine aufwandsoptimale Ausgestaltung des Energiesystems zu finden, werden diese Betrachtungen bei verschiedenen Mischungsverhältnissen (Solar+Wind) durchgeführt.
- c. Durch den Abgleich mit dem Lastprofil wird deutlich, zu welchen Zeiten Kurz- und Langzeitspeicherung notwendig wäre bzw. wann Überschüsse vorhanden sind, um die Kurz- und Langzeitspeicher zu laden.

Je nach Klimastandort variiert das Erzeuger- und Lastprofil. In den nördlichen und mittleren Breiten ist der Energiebedarf im Winter am höchsten (zusätzlicher Heizbedarf) und zugleich die Stromerzeugung (PV, Wasserkraft) am geringsten. Wegen der vorhandenen Winterlücke entsteht hier ein relevanter Bedarf an saisonaler Speicherung zusätzlich zu dem Energieaufwand für Kurzzeitspeicherung. In den Subtropen und Tropen ist der Energiebedarf im Sommer am höchsten (Kühlbedarf). Der notwendige Beitrag für Kurzzeitspeicherung liegt hier zumeist höher als der für saisonale Speicherung.

Zudem kann sich regional der sinnvolle (aufwandsoptimale) erneuerbare Energiemix unterscheiden (Schwerpunkte der Wasserkraft im Gebirge, der Windkraft an den Küsten, des Solarstroms in Wüsten). Ein ausgebautes Stromnetz hat hier die Aufgabe einen Ausgleich zwischen diesen kleinräumigen, regionalen und nationalen Erzeugungs-Schwerpunkten herzustellen.

Im PER-System wird der erneuerbare Primärenergieaufwand standortbezogen erhoben. Das kann nur iterativ erfolgen, weil die aufwandsoptimale Kombination von Erzeugungsanlagen, dem Einsatz von Kurz- und Langzeitspeichern regional unterschiedlich ausfällt. Zur Ermittlung des Erzeugungsprofils werden ausgehend von der grundlastfähigen Wasserkraft zunächst zwei Extreme (nur Wind keine Fotovoltaik; nur Fotovoltaik kein Wind) und zusätzlich vier Zwischenzustände modelliert. Für jedes der betrachteten Lastprofile wird dann die je günstigste Kombination ermittelt und daraus der anwendungsbezogene PER-Faktor bestimmt.

Neben den netzgebundenen Kurzzeitspeichern (z.B. Pumpspeicherwerke, Schwungrad- und Druckluftspeichern, Batterien) werden warmwasserseitig Wärmespeicher sowie für Heizen und Kühlen die Speichermassen in den Gebäuden als Speichersysteme angesetzt.

Die saisonale Speicherung wird im PER-Modell über die power-to-gas-Technologie abgebildet. Diese ist zwar mit hohen Verlusten verbunden, jedoch universell einsetzbar.

Die PER-Faktoren wurden vom Passivhaus-Institut für 700 (!) Standorte auf der ganzen Welt berechnet, dabei werden vor allem auch substanzielle Unterschiede bei Erzeugungs- und Lastprofilen zwischen den Klimazonen deutlich. Die entsprechenden Datensätze sind im PHPP ab Version 9 hinterlegt.

3.3 PER-Faktoren

Ähnlich, wie bei der üblichen Primärenergiebewertung, werden auch im PER-Modell auf Endenergieeinheiten bezogene Primärenergiefaktoren bestimmt. Diese werden als PER-Faktoren bezeichnet. Sie bezeichnen das Verhältnis von aufzuwendender Primärenergie aus erneuerbaren Energieträgern zur eingesetzten Endenergie einer bestimmten Energiedienstleistung.

Der Clou der neuen PER-Faktoren besteht nun darin, dass diese abhängig von der jeweiligen Energiedienstleistung und deren zeitlicher Bedarfsstruktur bestimmt werden. Dadurch wird dem Umstand Rechnung getragen, dass das Verhältnis von direkt nutzbaren / kurzzeitgespeicherten / langzeitgespeicherten Energien vor allem von der Anwendung abhängig ist.

- Heizung: der Schwerpunkt der Energienutzung liegt im Kernwinter. Hier ist ein relevanter Anteil über saisonal gespeicherte Energie zu leisten, die PER-Faktoren sind vergleichsweise hoch.
- Kühlung/Entfeuchtung: die Energienutzung findet vor allem tagsüber im Sommer statt: hier ist eine hohe Übereinstimmung zwischen solarem Strahlungsangebot und Energiebedarf vorhanden. Dadurch ist der Anteil der Direktnutzung sehr hoch. Die PER-Faktoren liegen nahe 1,0.
- Warmwasser / Haushaltsstrom: hier ist die Energienutzung ganzjährig gleichmäßig strukturiert mit ausgeprägten Spitzen am Morgen, mittags und abends. Der Anteil der Direktnutzung ist beträchtlich, jedoch sind hier immer gewisse Bedarfsanteile über Kurz- und Langzeitspeicherung zu decken. Die PER-Faktoren liegen im mittleren Bereich.

Bezogen auf diese unterschiedlichen Nutzungstypen werden vom Passivhaus-Institut der primärenergetische Aufwand bei einer 100%-erneuerbaren Energieversorgung ermittelt, indem der unterschiedliche Aufwand für Zwischenspeicherung für die betrachtete Energiedienstleistung an dem jeweiligen Standort bestimmt wird. Daraus ergeben sich neue Primärenergiefaktoren auf der Basis des PER-Systems (f_{PER}), die sich z.T. erheblich von den bisherigen Primärenergiefaktoren auf der Basis nicht erneuerbarer Primärenergie (f_p) unterscheiden:

Energieträger	Primärenergiefaktor f_p (nicht erneuerbar) $\text{kWh}_{PE}/\text{kWh}_{EE}$	PER-Faktor f_{PER} (erneuerbar) $\text{kWh}_{PER}/\text{kWh}_{EE}$	GWP-Faktor f_{GWP} (CO_2 -Äquivalente) $\text{kg}/\text{kWh}_{EE}$
Heizöl	1,1	2,30	0,321
Erdgas/Flüssiggas	1,1	1,75	0,253
EE-Methan (Windgas)	k.A.	1,75	k.A.
Biomasse	0,2	1,1	0,05
Fernwärme (70% KWK)	0,7	0,85/1,39/1,01	-0,070
Strom für Heizung	2,4 (1,8)	1,8	0,644 (0,532)
Strom für Warmwasser	2,4 (1,8)	1,3	0,644 (0,532)
Haushaltsstrom	2,4 (1,8)	1,3	0,644 (0,532)
Strom für Kühlung und Entfeuchtung	2,4 (1,8)	1,1 bzw. 1,15	0,644 (0,532)
PV-Strom	1,9 (Gutschrift)	1,0 (Erzeugung)	0,134
Therm. Solaranlage	0,0	0,2 - 0,6 (Bedarf)* 1,0 (Erzeugung) PER-Bedarf = PER-Erzeugung*	0,045

Tabelle 1: Vergleich von Primärenergiefaktoren, PER-Faktoren und CO_2 -Äquivalent-Faktoren für Deutschland.

Die Werte in Klammern gelten ab der noch nicht veröffentlichten Version 9.3 ab 2016 und berücksichtigen die künftig geringeren CO_2 -Emissionen der deutschen Stromerzeugung. Quelle: [PHPP 2015].

*Der PER-Erzeugungs- und Bedarfswert von thermischen Solaranlagen wird anhand des Outputs einer PV-Referenzanlage mit gleicher Kollektorfläche bestimmt.

Der Vergleich zwischen den alten Primärenergiefaktoren (nicht erneuerbar) f_p und den neuen PER-Faktoren f_{PER} ist bei den Stromanwendungen besonders auffällig. Die f_{PER} -Werte liegen hier deutlich niedriger als bei den Brennstoffen, während es sich bei den Faktoren auf der Basis der nicht erneuerbaren Primärenergie f_p und zum derzeitigen Global-Warming-Potential f_{GWP} der jeweiligen Energieträger genau umgekehrt verhält.

Ungewohnt ist, dass es im PER-System keine einheitlichen Primärenergiefaktoren mehr gibt. Sie sind immer auf eine bestimmte Anwendung und einen bestimmten Standort bezogen.

3.4 Einführung einer neuen Bezugsgröße für die PER-Erzeugung

Im Gegensatz zur alten Primärenergiebewertung von Passivhäusern wird im neuen PER-Modell die Eigenerzeugung erneuerbarer Energien auf dem Bau- bzw. Siedlungsgrundstück bewusst miteinbezogen. Als Bezugsgröße wird - anders als beim PER-Bedarf - nicht die Nutzfläche (Energiebezugsfläche) sondern die (versiegelte) Grundfläche des Gebäudes verwendet. Dafür sprechen eine Reihe von Gründen:

- Die eigentlich knappe Ressource ist nicht die Energie sondern die Fläche (Boden).
- Solare Systeme können, sofern sie einigermaßen verschattungsfrei und in zusammenhängenden Flächen installiert werden sollen, hauptsächlich auf Dachflächen vorgesehen werden.
- Abhängig von der Geschosshöhe sind die nutzflächenbezogenen Solarerträge bei niedrigen Gebäuden viel höher als in hohen Gebäuden. Um hier eine Privilegierung zersiedelnder Bauformen zu vermeiden ist die Wahl der Grundfläche als Bezugsgröße sinnvoll.

- Um Freiaufstellungen von Solaranlagen zu vermeiden, ist es sinnvoll bauliche Flächen (Dächer, Fassaden) doppelt zu nutzen. Bei thermischen Solaranlagen kommt hinzu, dass die Wege zu den Wärmespeichern möglichst kurz sein sollten, um die solaren Leitungsverluste möglichst gering zu halten.

3.5 Biomasse-Budget

Die Biomassenutzung hat eine spezielle Stellung in einem erneuerbaren Energiesystem. Die möglichen Anwendungen sind einerseits besonders vielfältig; andererseits existieren komplex zu bewertende Restriktionen für den weiteren Ausbau, z.B. im Hinblick auf Nahrungsmittelsicherheit, Natur- und Landschaftsschutz. Die Bestimmung der energetisch nachhaltig nutzbaren Potenziale setzt somit immer voraus, sich sowohl mit den Verfügbarkeitsgrenzen als auch den konkurrierenden Anwendungsmöglichkeiten auseinander zu setzen (vgl. [WBGU 2009] und [Vallentin 2012], S. 67 ff.).

Trotz der stark unterschiedlichen Angaben in der Literatur zu den energetischen Biomassepotenzialen, existiert ein Grundkonsens in der (Nachhaltigkeits-)Wissenschaft, der vor allem die Problematik der Nahrungsmittelsicherheit und der Landnutzungsänderungen betrifft:

- Erste Priorität hat die Nahrungsmittelsicherheit. Eine intensive energetische Nutzung von Biomasse kann in Konkurrenz zu der Produktion von Lebensmitteln geraten.
- An nächster Stelle steht der Natur- und Landschaftsschutz. Problematisch ist vor allem der Anbau auf zuvor existierenden Feuchtgebieten und Tropenwäldern, deren Zerstörung mit großen Treibhausgasemissionen verbunden ist, die durch den Neuanbau von Energiepflanzen bei weitem nicht ausgeglichen werden können.
- Eine stoffliche Nutzung sollte Vorrang vor einem Einsatz als Brennstoff haben. Die Verwendung von Biomasse (z.B. Holz, Holzwerkstoffe, Stroh) in Baukonstruktionen kann in diesem Zusammenhang als Kohlenstoffspeicherung interpretiert werden.
- Erst dann kann eine energetische Nutzung ins Auge gefasst werden. Alleinstellungsmerkmal der Biomasse ist, dass sie ein vergleichsweise einfach produzierbarer speicherfähiger Energieträger ist.

Weil Biomasse sowohl in Heizungen, Kraftwerken und KWK-Anlagen genutzt werden kann und zudem ein wertvoller speicherbarer Energieträger ist, wird diese in allen Versorgungsvarianten als „Basisbeitrag“ mit dem besonders niedrigen PER-Faktor von 1,1 für Biomasse berücksichtigt. Das Biomasse-Budget wird in der Reihenfolge Heizung, Warmwasser im Winter, Haushaltsstrom solange „abgearbeitet“ bis der PER-Wert von 20 kWh/m²a erreicht ist. Erst danach werden die höheren PER-Werte der tatsächlich gewählten Versorgungslösung in Ansatz gebracht (vgl. [Krick 2015], S. 403).

Wird im PER-Model das Gebäude tatsächlich mit Biomasse versorgt, wird der Brennstoffbedarf, der über dem Biomasse-Budget liegt mit dem PER-Wert für Strom zu Heizzwecken (fPER 1,8) multipliziert, um hier einen Lenkungseffekt hin zu einer effizienter Nutzung dieses begrenzten Energieträgers zu erreichen.

4. Die neuen Passivhaus-Klassen

Dieser Abschnitt basiert wesentlich auf der Veröffentlichung von Benjamin Krick „Classic, Plus, Premium: Die neuen Passivhaus-Klassen und wie sie erreicht werden können“ [Krick 2015].

Anstelle des bisherigen einheitlich definierten Passivhausstandards werden nun im Zuge der PER-Bewertung mehrere Klassen von Passivhäusern unterschieden, die unterschiedliche Kombinationen von Gebäudeeffizienz und Energieproduktion darstellen. Entsprechend werden PER-Bedarf und PER-Eigenerzeugung zunächst getrennt berechnet und anschließend einer kombinierten Wertung zugeführt.

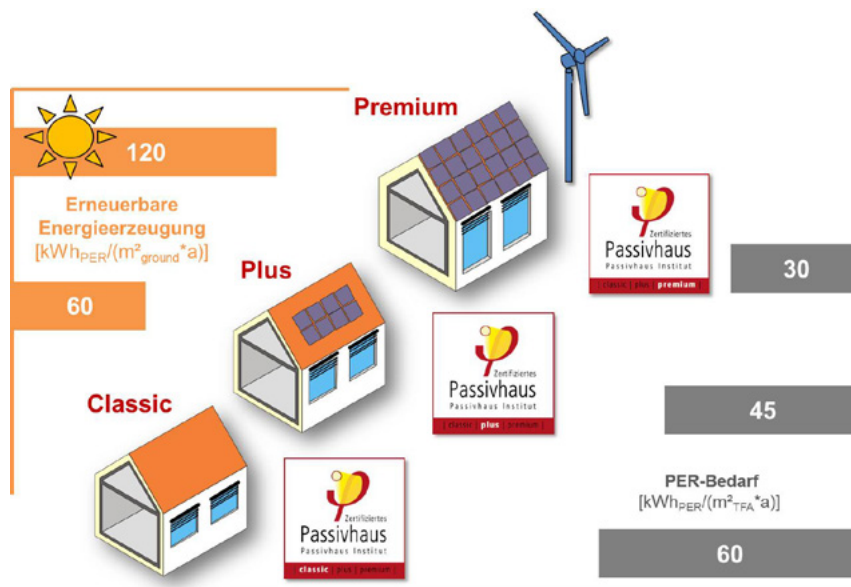


Abbildung 2: Die neuen Passivhausklassen mit ihren Anforderungsprofilen, die immer gleichzeitig den PER-Bedarf und die PER-Erzeugung umfassen. Zu beachten ist, dass der PER-Bedarf als Bezugsgröße die Energiebezugsfläche (Einheit kWh/m²_{EBF}*a) aufweist, die PER-Erzeugung jedoch die überbaute Fläche durch Gebäude (Einheit kWh/m²_{Grund}*a). Quelle: [Krick 2015], S. 402.

Je höher die primärenergetische Gesamteffizienz und die Erzeugung erneuerbarer Energie am Gebäude (bzw. außerhalb des Gebäudes), desto höher die erreichte Passivhaus-Klasse:

	PER-Bedarf in kWh/(m ² _{EBF} a)	PER-Erzeugung in kWh/(m ² _{Grund} a)
PHI-Energiesparhaus	≤ 75	Keine Anforderung
Passivhaus Classic	≤ 60	Keine Anforderung
Passivhaus Plus	≤ 45	≥ 60
Passivhaus Premium	≤ 30	≥ 120

Tabelle 3: Anforderungen an den PER-Bedarf und die PER-Erzeugung in den verschiedenen Passivhaus-Klassen. Quelle: Passivhaus-Institut.

In einem gewissen Bereich (bis zu $\pm 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$) ist ein Ausgleich zwischen PER-Bedarf und PER-Erzeugung zulässig. Dies ist an den schräg verlaufenden Abgrenzungslinien zwischen den Passivhaus-Klassen in Abb. 13a erkennbar. Von besonderer Bedeutung ist dies in der Passivhaus-Klasse „Classic“ und dem „PHI-Energiehaus-Standard“. Obwohl hier zunächst keine Erzeugung gefordert wird, kann hier mit einer thermischen Solar- oder Fotovoltaikanlage ein höherer PER-Bedarfswert kompensiert werden. Analog kann in den Klassen „Plus“ und „Premium“ vorgegangen werden bzw. es kann alternativ ein Erzeugungsdefizit durch höhere Effizienz ausgeglichen werden.

Die Einordnung des konkret projektierten Gebäudes wird in graphischer Form im sog. PER-Diagramm erfasst. Auf der x-Achse wird der PER-Bedarf angetragen, auf der y-Achse die PER-Erzeugung. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass dabei Energiekennwerte mit unterschiedlichen Bezugsgrößen (Bedarf: Energiebezugsgröße; Erzeugung: überbaute Fläche) in Beziehung gesetzt werden.

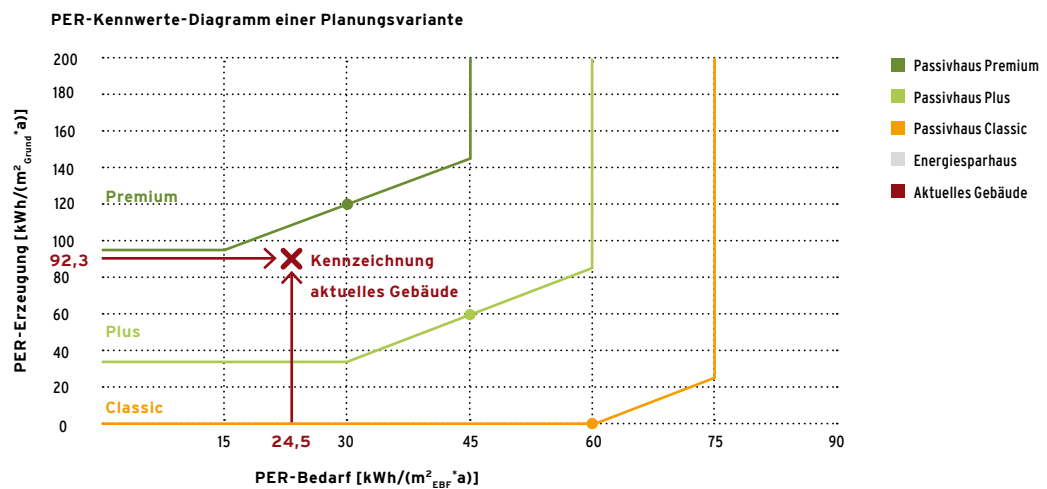


Abbildung 3: PER-Diagramm zur Einordnung von Gebäuden zu den Passivhaus-Klassen. In einem gewissen Bereich ($\pm 15 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$) kann ein Ausgleich stattfinden, erkennbar an schräg verlaufenden Abgrenzungslinien zwischen den „Klassen“. Das konkrete Projekt weist einen PER-Bedarf von $24,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ und einer PER-Erzeugung von $92,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Grund}} \cdot \text{a})$ auf.

5. Fazit

Das PER-Modell ist ein wertvolles Gedankenexperiment zur Beurteilung von Gebäuden in einer künftig 100%-erneuerbaren Energieversorgung:

- Es wird ein Grundverständnis geweckt, welche Wechselwirkungen zwischen Gebäude (-park) und erneuerbarer Energieversorgung bestehen, z.B. die „Winterlücke“ und die Notwendigkeit einer saisonalen Energiespeicherung. Die überragende Rolle der Energieeffizienz tritt klar hervor, sofern eine erneuerbare Versorgung kulturverträglich und mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand aufgebaut werden soll.
- Der Beitrag der erneuerbaren Energieerzeugung am Gebäude wird wichtiger Teil der Bewertung und auf die eigentlich knappe Ressource der bebauten Fläche bezogen.
- Bioenergie wird als besonders wertvolle und zugleich knappe Ressource behandelt.
- Die strategische Rolle stromgestützter Wärmeversorgungen wird herausgearbeitet.
- In den Passivhaus-Klassen erfolgt eine kombinierte Betrachtung von Energiebedarf und Energieerzeugung am Gebäude, die dem Anspruch einer ganzheitlichen Bewertung im Sinne von „energetischer Nachhaltigkeit“ entgegen kommt.

Für Passivhäuser mit stromgestützten Wärmeversorgungen (Wärmepumpen, direktelektische Wärmeversorgung) ist es empfehlenswert, das neue PER-System anzuwenden. Für brennstoffgestützte Versorgungen ist hingegen das alte System vorteilhafter und wird vom Passivhaus-Institut bis auf weiteres für die Projektierung und Zertifizierung von Passivhäusern auch ausdrücklich zugelassen.

Angesichts dieser Zweiteilung sind jedoch gewisse Zweifel angebracht, ob das PER-Modell bereits heute und während der Anfangsphase der langwierigen Transformation für eine vergleichende Bewertung von Gebäuden geeignet ist. Hauptgrund ist das noch über mehrere Jahrzehnte dominant auf fossile Energieträger gestützte Energiesystem. Das betrifft sowohl die Strom- als auch die Wärmeversorgung. Hinzu kommt, dass der Ausbau regenerativer Energien in verschiedenen Ländern bzw. Weltregionen sehr unterschiedlich ablaufen wird. Eine entsprechende Kritik der PER-Bewertung und der neuen Passivhaus-Klassen ist auch in einer Langfassung [Vallentin 2016] mit ausführlicher Darlegung der Argumente und Quellen verfügbar.

Quellen:

[Bertram 2012] Bertram, Georg (Hrsg.): „Philosophische Gedankenexperimente“, Reclam Verlag, Stuttgart, 2012.

[Feist 2012] Feist Wolfgang (Hrsg.): EnerPhit - Planerhandbuch, Eigenverlag, Darmstadt, 2012.

[Feist 2013] Feist, Wolfgang: „Energiekonzepte - das Passivhaus im Vergleich“; 17. Int. Passivhaustagung, 19. - 20. April 2013 in Frankfurt a. Main, Tagungsband, Eigenverlag, Darmstadt/Innsbruck, 2013, S. 611 - 629.

[Grove-Smith / Feist 2015] Grove-Smith, Jessica; Feist, Wolfgang: „Nachhaltigkeitsbewertung mit PER“, 19. Int. Passivhaustagung, 17. - 18. April 2015 in Leipzig, Tagungsband, Eigenverlag, Darmstadt/Innsbruck, 2015, S. 285 - 292.

[Grove-Smith 2015] Grove-Smith, Jessica: Vortragsfolien zum o.g. Beitrag „Nachhaltigkeitsbewertung mit PER“ auf der 19. Int. Passivhaustagung; Hrsg.: Passivhaus-Institut Darmstadt, 2015.

[Krick 2015] Krick, Benjamin: „Classic, Plus, Premium: Die neuen Passivhaus-Klassen und wie sie erreicht werden können“, 19. Int. Passivhaustagung, 17. - 18. April 2015 in Leipzig, Tagungsband, Eigenverlag, Darmstadt/Innsbruck, 2015, S. 401 - 410.

[PHPP 2015] Passivhaus Institut (Hrsg.): Passivhaus-Projektierungspaket, Version 9 (2015), Eigenverlag, Darmstadt, 2015.

[Vallentin 2012] Vallentin, Rainer: „Hansaviertel Berlin: Energieperspektiven 2010 - 2060 : Anwendung der Klimaschutzstandards in einem Stadtteil mit hohem Denkmalbestand“ ; Begleitbroschüre zur Studie „Verbesserung der Energieeffizienz im Berliner Hansaviertel“; im Auftr. der Senatsverwaltung Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, 2013; Internet-Veröffentlichung, ULR: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/staedtebau/baukultur/iba/download/studien/IBA-Studie_Hansaviertel_Begleitbroschuere.pdf, Zugriff am 20.12.2015.

[Vallentin 2016] Vallentin, Rainer: „PER-Bewertung und die neuen Passivhaus-Klassen: Eine Kritik (Langfassung)“; Internet-Veröffentlichung unter www.vraie.de, verfügbar ab 22.04.2016, München, 2016.

[WBGU 2009] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltänderungen (WBGU): „Welt im Wandel - Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“, Eigenverlag, Berlin, 2009.

Impressum

Herausgeber

Energieinstitut Vorarlberg, Campus V, Stadtstraße 33, 6850 Dornbirn
www.energieinstitut.at, info@energieinstitut.at

DI Arch. Martin Ploss

Autoren

Martin Ploss, Tobias Hatt, Energieinstitut Vorarlberg
Rainer Pfluger, Gabriel Rojas, Universität Innsbruck,
Kristin Bräunlich, Passivhaus Institut Darmstadt/D
Daniel Ruepp, EQUA Solutions AG, Zug/CH
Elmar Draxl, Engelbert Spiß, Neue Heimat Tirol, Innsbruck
Rainer Vallentin, Architekt, München/D

Graphik

studio altenried · bernd altenried, angelika abbrederis · www.almo.de

Bezug

Energieinstitut Vorarlberg

Die von den Autoren in ihren Beiträgen wiedergegebenen Positionen müssen nicht in allen Fällen mit denen des Herausgebers oder der Träger übereinstimmen.

2. Auflage, Dornbirn 2018

Die economicum Veranstaltungsreihe wird unterstützt von:



Die Arbeit des Energieinstitut Vorarlberg wird unterstützt von:



