

Lebenszyklusbetrachtung von Wohnraumlüftung unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens

Tilman Jarmer

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Andreas Hild

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Florian Nagler
2. Prof. Thomas Auer

Die Dissertation wurde am 17.11.2023 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch
die TUM School of Engineering and Design am 12.02.2024 angenommen.

Danksagung

Vielen Dank an meinen Betreuer Prof. Florian Nagler

Danken möchte ich vor allem auch Prof. Thomas Auer und Prof. Elisabeth Endres für ihre Unterstützung, sowie meinem Promotions-Mentor Alexander Knirsch.

Vielen Dank auch an V.-Prof. Anne Niemann und Laura Franke für das ausgetauschte Feedback!

Kurzfassung

Diese Dissertation untersucht die ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit der Installation von Wohnraumlüftungsanlagen in Forschungshäusern in Bad Aibling. Obwohl der mögliche Energieeffizienzgewinn durch den Wechsel von Fensterlüftung zu Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung für die Installation spricht, sind Unsicherheiten im Nutzerverhalten und die ökologischen sowie finanziellen Auswirkungen Gegenargumente.

In diesem Zusammenhang werden die Daten einer Langzeitmessung in den Forschungshäusern genutzt, um das Potenzial zur Reduzierung des Energiebedarfs für die Raumheizung durch eine verbesserte Gebäudedichtheit und geschlossene Fenster abzuleiten.

Die Lebenszyklusbetrachtung verschiedener Szenarien zur Wohnraumlüftung ergab höhere Kosten und Umweltauswirkungen durch zusätzliche Technik.

Die Hypothese, dass Wohnraumlüftungsanlagen weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll sind, wurde durch die Untersuchung bestätigt. Die Kosten übersteigen die erzielten Einsparungen bei weitem. Die Umweltauswirkungen hängen sehr stark vom Nutzerverhalten ab.

Die Dissertation unterstreicht die Notwendigkeit einer praxisnahen Abbildung des Nutzerverhaltens in energetischen Prognosen, die in politischen Maßnahmen wie Gesetzen oder Förderprogrammen Anwendung finden. Sie schlägt darüber hinaus vor, den Materialaufwand und die Wartung zu berücksichtigen, um genauere Ergebnisse zu erzielen. Weitere Forschung ist notwendig, um Unsicherheiten in energetischen Prognosen zu reduzieren und dadurch gute politische Steuerung und richtige Projektentscheidungen zu ermöglichen.

Diese Dissertation gliedert sich in 5 Kapitel. Im Kapitel 1 wird in das Thema eingeführt. Dabei werden die Grundlagen der Wohnraumlüftung zusammengetragen, wobei besonders die Effizienzstrategie der ventilatorgestützten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung beleuchtet wird. Hierbei wird speziell der Forschungsstand bezüglich des Erfolgs dieser Effizienzstrategie in der Praxis zusammengetragen. Das Kapitel 1 endet mit der Projekthypothese und den daraus abgeleiteten drei Forschungsfragen, die jeweils in den Kapiteln 2, 3 und 4 untersucht werden. Im Kapitel 5 befinden sich das Fazit sowie ein Ausblick auf weitere Forschung.

Abstract

This dissertation explores the ecological and economic feasibility of installing residential ventilation systems in research houses in Bad Aibling. While the potential energy efficiency gain favors the switch from window ventilation to ventilation systems with heat recovery for installation, uncertainties in user behavior, as well as the ecological and financial impacts, serve as counterarguments.

In this context, data from a long-term measurement in the research houses are utilized to derive the potential for reducing energy demand for space heating through improved building tightness and closed windows.

The life cycle analysis of various scenarios for residential ventilation revealed higher costs and environmental impacts due to additional technology. The hypothesis that residential ventilation systems are neither ecologically nor economically viable was confirmed by the study. The costs far exceed the achieved savings, and environmental impacts are highly dependent on user behavior.

The dissertation underscores the need for a practical representation of user behavior in energy forecasts, which can be applied in policy measures such as laws or incentive programs. Additionally, it suggests considering material consumption and maintenance to achieve more accurate results. Further research is necessary to reduce uncertainties in energy forecasts, enabling effective policy making and informed project decisions.

This dissertation is structured into 5 chapters. Chapter 1 introduces the topic, gathering the fundamentals of residential ventilation, with a particular focus on the efficiency strategy of fan-assisted residential ventilation with heat recovery. The research status regarding the success of this efficiency strategy in practice is specifically examined. Chapter 1 concludes with the project hypothesis and the three research questions derived from it, each investigated in Chapters 2, 3, and 4. Chapter 5 contains the conclusion and an outlook on further research.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. Notwendigkeit von Raumlüftung.....	1
1.1.1. Feuchte.....	1
1.1.2. Gerüche.....	2
1.1.3. Schadstoffe.....	3
1.2. Notwendiger Luftwechsel	4
1.2.1. Historische Einordnung	4
1.2.2. Stand der Normung in Deutschland	5
1.2.3. Sensitivitätsanalyse der Auslegung des notwendigen Luftwechsels nach DIN 1946-6.....	7
1.3. Energieverluste durch Lüftung.....	12
1.3.1. Effizienzstrategie Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung	12
1.3.2. Energy Performance Gap.....	12
1.3.3. Lebenszyklusbetrachtung.....	16
1.4. Bisherige Forschungsarbeit.....	18
1.4.1. Einfach Bauen und die Forschungshäuser in Bad Aibling.....	18
1.5. Hypothese und abgeleitete Forschungsfragen.....	21
2. Gemessene Lüftungswärmeverluste durch Fensterlüftung und Undichtigkeiten	23
2.1. Datengrundlage	23
2.1.1. Verbrauch Wärme	23
2.1.2. Wetterdaten	23
2.1.3. Sensoren in den Wohnungen	24
2.1.4. Fotodokumentation.....	24
2.1.5. Qualität der Daten	24
2.1.6. Temperaturen Raumluft und Heizkörper	29
2.1.7. Heizung und Fensterlüftung	32
2.2. Methodik	36
2.2.1. Luftwechsel über die Fenster	36
2.2.2. Wärmeverluste über geöffnete Fenster während geheizt wurde.....	52
2.3. Ergebnisse.....	54
2.3.1. Luftwechsel über Fenster während geheizt wurde.....	54
2.3.2. Wärmeverluste über Fenster während geheizt wurde.....	54
2.3.3. Wärmeverluste über Infiltration während geheizt wurde	55
2.3.4. Wärmeverluste über offene Fenster und Infiltration	56
2.3.5. Limitierungen dieser Studie.....	57
2.3.6. Sensitivitätsanalyse Fensterstellung	59
3. Umweltauswirkungen und Kosten von Wohnraumlüftungsanlagen	61
3.1. Untersuchte Varianten.....	62
3.1.1. Szenario A: Fensterlüftung / Badabluft präsentgeführt.....	62

3.1.2.	Szenario B: Fensterlüftung / Badabluft präsentgeführt mit Grundlüftung	63
3.1.3.	Szenario C: Dezentrale Einzelraumlüfter mit Wärmerückgewinnung (WRG) + Badabluft	64
3.1.4.	Szenario D: Wohnungszentrale Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung (WRG)	65
3.2.	Methodik	66
3.3.	Ergebnisse.....	67
3.3.1.	Limitierungen dieser Studie	69
4.	Ökologisch oder ökonomisch Amortisation von Wohnraumlüftungsanlagen	71
4.1.	Datengrundlage	71
4.2.	Methodik	73
4.3.	Ergebnisse.....	74
4.3.1.	Limitierungen dieser Studie	79
5.	Fazit und Ausblick	81
5.1.	Ausblick	83
	Literaturverzeichnis	85
	Abbildungsverzeichnis	94

1. Einführung

1.1. Notwendigkeit von Raumlüftung

Die meisten Menschen verbringen viel Zeit in Wohnräumen. In einer britischen Umfrage mit 50 Teilnehmern durch [Lai et al. 2004], gaben sie an, dass sie durchschnittlich fast 70 % ihrer Zeit zu Hause verbringen.

Die Luft in unserer Wohnung atmen wir also häufig. Viele Dinge beeinflussen, wie diese Luft zusammengesetzt ist.

1.1.1. Feuchte

Feuchtigkeit gelangt durch Atmung, Schwitzen, Badezimmerbenutzung, Wäschetrocknen, Kochen, Pflanzen und Haustiere in Wohnungen. Es gibt Normen, die typische Feuchtigkeitsmengen angeben. [DIN/TS 4108-8:2022-09]

Tabelle 1: Feuchteabgabe durch die Nutzer an die Raumluft Norm DIN/TS 4108-8, Tabelle 1, Seite 19 [DIN/TS 4108-8:2022-09]

1 Erwachsener pro Tag (überwiegend nicht aktiv oder leicht aktiv)	1.200 g
1 x Wäsche trocknen (5 kg geschleudert)	2.500 g
1 Stunde Kochen	700 – 1.000 g
5 Minuten Duschen und Abtrocken	300 g
20 Minuten Wannenbad mit Abtrocken	300 g
Hund pro Tag (mittelgroß, 20 kg)	950 g
Zimmerpflanze pro Tag (Mittelwert)	50 g

Die Raumluft interagiert mit den umgebenden Oberflächen. Je nachdem, wie gut diese Oberflächen Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen und speichern können (hygroskopische Eigenschaften), findet ein mehr oder weniger intensiver Austausch von Feuchtigkeit zwischen der Raumluft und den Oberflächen statt. Die umgebenden Oberflächen fungieren dabei als Feuchtepuffer. Während 1 Kubikmeter Luft etwa 17 Gramm Wasser bei Raumtemperatur aufnehmen kann, haben poröse Baustoffe mit kapillarer Feuchtetransportfähigkeit die Fähigkeit, bis zu 800 Gramm Kondensatwasser pro Quadratmeter aufzunehmen. [Keller und Rutz 2010, S. 139]

[Klinge et al. 2016] haben bereits durch Messungen nachgewiesen, dass verschiedene Lehm- und Holzbaustoffe einen ausgleichenden Effekt auf die Raumlufffeuchte haben.

Die Raumlufffeuchte sollte idealerweise bei etwa 50 % liegen. Bei zu hoher Raumlufffeuchte besteht das Risiko von Kondensation und infolgedessen die Bildung von Schimmelpilzen, insbesondere an kalten und schlecht belüfteten Oberflächen.

[DIN/TS 4108-8:2022-09]

Zu trockene Luft kann sich negativ auf Schleimhäute auswirken [Sterling, Arundel 1985] und die Überlebensdauer von SARS-CoV-2-Viren in der Luft erhöhen. [Moriyama et al. 2020]

1.1.2. Gerüche

[Yaglou et al. 1936] haben Menschen nach ihrer Wahrnehmung von Gerüchen in Innenräumen befragt. Dabei haben sie den Einfluss verschiedener Faktoren auf diese Wahrnehmung systematisch untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Anzahl der Personen, die Raumgröße, die Belüftung des Raumes, die individuelle Körperpflege und die Sauberkeit der Kleidung einen erheblichen Einfluss auf die Geruchswahrnehmung haben. Es wurde auch festgestellt, dass es Unterschiede in der Geruchswahrnehmung gibt zwischen Neuankömmlingen und Personen, die bereits längere Zeit im Raum waren.

[Fanger 1988] führte Untersuchungen zur Geruchsabgabe durch. Dabei befragte er über tausend Personen im Alter von 18 bis 30 Jahren, die täglich badeten, frische Unterwäsche trugen, Deodorant verwendeten und überwiegend sitzende Tätigkeiten ausführten. Fanger argumentierte, dass der menschliche Geruchssinn besser als chemische Analysen ist, um festzustellen, ob Raumluff unangenehm riecht. Er entwickelte die Einheiten Olf für die Menge an Geruch, die eine durchschnittliche Person abgibt, und Decipol für die wahrgenommene Geruchskonzentration bei Verdünnung mit 10 l/s Frischluftstrom. 85 % der Teilnehmer empfanden 1 decipol als akzeptabel, während 10 decipol nur noch von 40 % akzeptiert wurden, und 32 decipol von niemandem. Diese Einheiten ermöglichten es, Geruchswahrnehmungen von unangepassten Personen (Neuankömmlingen) in Bezug auf die Geruchskonzentration anzugeben und die Stärke von Geruchsquellen zu quantifizieren, wenn der Frischluftwechsel bekannt war.

[Fanger et al. 1988] konnten durch Befragungen der Besucher von mehreren Bürogebäuden und öffentlichen Gebäuden und Messungen des Luftwechsels folgende Geruchsmengen ermitteln: Neben dem individuellen Geruch jeder Person (1 olf)

stammten durchschnittlich 2 olf pro Person aus Tabakrauch, 1-2 olf aus Gebäuden und Einrichtungen sowie 3 olf aus der Lüftungsanlage als "blinde Passagiere". Die Autoren betonten die Notwendigkeit, Tabellen mit Olf-Werten für übliche Materialien zu erstellen, um Architekten und Fachleuten bei der Auswahl geruchsarmen Materialien für zukünftige Gebäude und die Sanierung bestehender Räume zu unterstützen.

1.1.3. Schadstoffe

Schadstoffe in der Raumluft spielen in der öffentlichen Wahrnehmung eine zunehmende Rolle [WHO 2010]

[Vardoulakis et al. 2020] haben 141 Raumluftstudien in Wohnhäusern aus 29 Ländern über einen Zeitraum von 18 Jahren (2000–2017) systematisch überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass die Konzentrationen von Luftschadstoffen in Innenräumen stark variieren und hauptsächlich von den Quellen in den Räumen abhängen. Diese Quellen können beispielsweise Tabakrauch für Feinstaub oder Haushaltsprodukte und -materialien für flüchtige organische Verbindungen wie Formaldehyd sein. Die Autoren betonen die Notwendigkeit standardisierter Mess- und Analysemethoden für Raumluft sowie längere Überwachungszeiträume an verschiedenen Standorten, um ein umfassenderes Verständnis der komplexen Faktoren zu entwickeln, die die Luftqualität in Wohnräumen beeinflussen.

In einer Studie von [Coutalides et al. 2009] wurden in 18 Niedrigenergie-Holzgebäuden chemische Schadstoffmessungen durchgeführt, sowohl nach der Rohbauphase als auch nach der Innenausbauphase. In 10 der 18 Gebäude wurden zusätzlich Messungen im bewohnten Zustand vorgenommen. Dabei wurden mehrfach Überschreitungen von toxikologischen und lufthygienischen Grenzwerten festgestellt. Die Hauptquellen der Luftverschmutzung waren Parkettöle, Silikonharzfarben, Fugendichtmassen, Kleber und Holzwerkstoffe. Die Autoren schlagen vor, die Schadstoffbelastung nach dem ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable / So niedrig wie vernünftigerweise erreichbar) zu reduzieren. Sie empfehlen den Einsatz von industriell geöltem Parkett, Silikatfarben, Fugendichtmassen auf Basis von modifizierten Silanen (MS-Hybrid), Klebern mit dem Emissionslabel EC 1 oder OSB-Platten mit PMDI-Verleimung, um die Schadstoffbelastung zu minimieren.

1.2. Notwendiger Luftwechsel

1.2.1. Historische Einordnung

Nach [Klauss, 2011] wurden die ersten Theorien zur Notwendigkeit der Belüftung wahrscheinlich bereits im 17. oder 18. Jahrhundert entwickelt. Anfangs ging man davon aus, dass der Mangel an Sauerstoff in der Luft das Hauptproblem sei. Allerdings postulierte Lavoisier im Jahr 1777, dass ein Anstieg von Kohlendioxid die Fähigkeit des Körpers, Sauerstoff aufzunehmen, beeinträchtigte.

[Von Pettenkofer, 1858] führte Messungen zur Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft durch und stellte eine Verbindung zur Geruchsbelastung her. Er betonte, dass Kohlendioxid allein nicht die Luftverschlechterung verursacht, sondern dass organische Stoffe aus Atmung und Schweiß zusammen mit Kohlendioxid die Luft beeinflussen. Selbst geringe Mengen dieser Stoffe könnten die Luft so stark verschlechtern, dass sie als unangenehm empfunden würde. Kohlendioxid dient dabei als Maßstab, um auf den Gehalt anderer Stoffe in der Luft zu schließen, die sich proportional zur Menge des ausgestoßenen Kohlendioxids anreichern. Als Ergebnis seiner Messungen postulierte er: "Aus diesen Versuchen geht zur Evidenz hervor, dass uns keine Luft behaglich ist, welche in Folge der Respiration und Perspiration der Menschen mehr als 1 pro mille Kohlensäure enthält."

Die Studie von [Bienfait et al. 1992] beinhaltete die Beurteilung von Luftqualität durch 50 geschulte Personen bei verschiedenen Luftqualitäten. Die Untersuchung ergab, dass bei einer Kohlendioxid-Konzentration von 1.000 ppm etwa 20 % der Teilnehmer mit der Luftqualität unzufrieden waren. Bei 2.000 ppm stieg dieser Wert auf etwa 36 %. Die Studie betont den Zusammenhang zwischen der Kohlendioxid-Konzentration und der Luftqualität und stellt fest: "Menschen produzieren Kohlendioxid (CO₂) proportional zu ihrer Stoffwechselrate, und es ist das wichtigste Stoffwechselprodukt der Atmung. Bei den in Innenräumen üblicherweise vorkommenden niedrigen Konzentrationen ist CO₂ nicht gesundheitsschädlich und wird vom Menschen nicht wahrgenommen. Dennoch dient es als ein nützlicher Indikator dafür, dass andere Stoffwechselprodukte der Atmung in störenden Mengen vorhanden sein könnten. CO₂ wird daher seit über einem Jahrhundert erfolgreich als Indikator für diese Stoffwechselprodukte der Atmung eingesetzt."

Der ASHRAE-Standard 62 ist seit seiner ersten Veröffentlichung im Jahr 1973 einer der wichtigsten Lüftungsstandards. Dieser legt Mindest- und empfohlene Luftmengen

fest, um die Gesundheit, Sicherheit und das Wohlbefinden der Bewohner sicherzustellen. [Persily 2015]

Der [ASHRAE 1973] gab den erforderlichen Mindestluftwechsel für Wohnungen mit 5 Kubikfuß pro Minute (entspricht 8,5 m³/h) pro Person an.

In späteren Überarbeitungen des Standards wurde der erforderliche Mindestluftwechsel stattdessen anhand der Grundfläche der Wohnung, also in Abhängigkeit vom Gebäude, berechnet. Ein zusätzlicher Zuschlag wurde basierend auf der Anzahl der Schlafzimmer, also in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen, hinzugefügt. [ASHRAE 2016]. Die Autoren reagierten auf neue Erkenntnisse über Schadstoffe, die unabhängig von den Personen in den Raum eingebracht wurden. Das Konzept der Addition wurde jedoch diskutiert, da die Einträge sowohl von Gebäuden als auch von Personen sich zwar addieren, aber bei einem Luftaustausch gleichzeitig entfernt werden. [Persily 2015] Dies verdeutlicht die Komplexität bei der Bestimmung des Mindestluftwechsels und der Raumlufqualität.

1.2.2. Stand der Normung in Deutschland

In Deutschland wird der Mindestluftwechsel gemäß der Norm [DIN 1946-6:2019-12] ermittelt. Diese Norm gilt für Wohnungen, die sowohl über natürliche Lüftung als auch über ventilatorgestützte Lüftung oder eine Kombination aus beidem verfügen. Der notwendige Luftwechsel wird mithilfe einer Gleichung, die auf der Grundfläche der Wohnung basiert, berechnet.

Das Ergebnis dieser Berechnung wird als "Nennlüftung" bezeichnet und stellt die erforderliche Lüftung dar, um die gesundheitlichen Anforderungen und den Schutz des Gebäudes sicherzustellen, wenn alle Bewohner anwesend sind (Normalbetrieb). Die Stufe "Intensivlüftung" entspricht 130 % der Nennlüftung und dient dazu, vorübergehend einen höheren Luftvolumenstrom zur Bewältigung von Lastspitzen (Lastbetrieb) sicherzustellen.

Die Stufe "Reduzierte Lüftung" entspricht 70 % der Nennlüftung und wird verwendet, um die gesundheitlichen Mindestanforderungen und den Bautenschutz (Feuchteschutz) sicherzustellen, wenn die Bewohner nur teilweise anwesend sind oder der Anspruch an die Raumlufqualität geringer ist.

Die niedrigste Stufe, "Lüftung zum Feuchteschutz", variiert je nach Belegungsdichte und Wärmeschutzstandard des Gebäudes und entspricht 20 bis 40 % der Nennlüftung. Diese Stufe wird genutzt, um den Feuchteschutz des Gebäudes sicherzustellen, wenn die Bewohner zeitweise abwesend sind und kein Wäschetrocknen stattfindet.

Tabelle 2: Faktor zur Berücksichtigung der Lüftungsstufe f_{LSt} , nach DIN 1946-6, Tabelle 6, Seite 25 [DIN 1946-6:2019-12]

	Wärmeschutz hoch	Wärmeschutz gering
Lüftung zum Feuchteschutz geringe Belegung (selbstgenutztes Eigentum wie z. B. Einfamilienhaus)	0,2	0,3
Lüftung zum Feuchteschutz hohe Belegung	0,3	0,4
Reduzierte Lüftung		0,7
Nennlüftung		1,0
Intensivlüftung		1,3

Die Norm [DIN 1946-6:2019-12] berücksichtigt durch verschiedene Lüftungsstufen die Anwesenheit der Bewohner, deren Anspruch an die Raumluftqualität und den Wärmeschutzstandard der Gebäudehülle. In Bezug auf Schadstoffe macht die Norm im Abschnitt "Anwendungsbereich" die Aussage, dass ihre Planungsempfehlungen für schadstoffarme Nutzungseinheiten gelten und verweist dabei auf die [DIN EN 16798-1:2021-04]. Diese Norm definiert ein Gebäude als schadstoffarm, wenn der Großteil der verwendeten Baustoffe emissionsarm ist und Aktivitäten wie beispielsweise Rauchen nicht zu einer Verunreinigung des Gebäudes führen.

Die Norm [DIN EN 16798-1:2021-04] verwendet vier Kategorien, um die Erwartungen der Gebäudenutzer zu reflektieren. Kategorie I entspricht den Erwartungen auf "hohem" Niveau, Kategorie II entspricht den Erwartungen auf "mittlerem" Niveau und soll die "durchschnittlichen Erwartungen" repräsentieren. Die Kategorien III ("moderat") und IV ("niedrig") stehen für unterdurchschnittliche Erwartungen.

In dieser Norm werden auch Angaben zum erforderlichen Mindestluftwechsel gemacht. Es werden Werte für die "Verdünnung von Emissionen aus dem Gebäude" angegeben, sowie ein Wert für die "Verdünnung von menschlichen Emissionen (biologischen Ausdünstungen)". Dabei wird davon ausgegangen, dass nicht geraucht wird und die Personen sitzende Tätigkeiten ausführen. Gemäß dieser Norm ergeben beide Werte in Addition den erforderlichen Luftwechsel, der zur Aufrechterhaltung der Raumluftqualität notwendig ist.

Die Vorrangregel für den Anwendungsfall ist wie folgt festgelegt: "Auslegungs-Außenluftvolumenströme für Wohngebäude werden für Nutzungseinheiten bis 500 m² nach DIN 1946-6 festgelegt." [DIN EN 16798-1/NA:2021-06] Das bedeutet, dass für normale Wohnungen zur Berechnung des erforderlichen Luftaustauschs die Norm DIN 1946-6 verwendet werden sollte. Diese Norm legt die Luftwechselraten und

Lüftungsempfehlungen für Wohngebäude fest und hat Vorrang in diesem Anwendungsfall.

1.2.3. Sensitivitätsanalyse der Auslegung des notwendigen Luftwechsels nach DIN 1946-6

In diesem Abschnitt wurde untersucht, wie sich Einträge aus verschiedenen Quellen auf die Raumluft auswirken. Die Ergebnisse wurden mit den Auslegungswerten gemäß der Norm [DIN 1946-6:2019-12] verglichen. Die Untersuchung wurde in einer 2-Raum-Wohnung durchgeführt. Dies dient dazu, ein besseres Verständnis für die erforderlichen Luftwechselraten in verschiedenen Szenarien zu entwickeln.

Feuchte

Es werden drei Mengen Feuchteeintrag gemäß der Norm für ein "übliches Wohnverhalten" untersucht. Diese Mengen ergeben sich aus unterschiedlichen Haushaltsgrößen und Nutzungsgewohnheiten. [DIN/TS 4108-8:2022-09]

Tabelle 3, Untersuchte tägliche Feuchteinträge [DIN/TS 4108-8:2010-09]

Szenario		Feuchteeintrag pro Tag
2-Personen-Haushalt (17 h)	Mit Wäschetrocknen	5.200 g
1-Personen-Haushalt anwesend (24 h)	Mit Wäschetrocknen	3.800 g
1-Personen-Haushalt berufstätig (12 h)	Ohne Wäschetrocknen	2.700 g

Die Auslegungsparameter zur Begrenzung der Feuchte in der Raumluft zielen darauf ab, Kondensatbildung an kritischen Bauteilen, wie dem Übergang vom Fenster zur Außenwand, zu verhindern. Die Oberflächentemperatur wurde mithilfe der Software Therm 7.7 ermittelt, die am Lawrence Berkeley National Laboratory entwickelt wurde und die Wärmeübertragung innerhalb von Gebäudebauteilen simulieren kann.

Die Untersuchung konzentrierte sich auf die Heizperiode und berücksichtigte zwei Szenarien: den Winter bei einer Außentemperatur von -5 °C und die Übergangszeit bei einer Außentemperatur von 10 °C. In beiden Fällen wurde eine Raumlufttemperatur von 20 °C angenommen.

Während des Winters betrug die Oberflächentemperatur am Übergang von der Außenwand zum Fenster 16,3 °C, und in der Übergangszeit stieg sie auf 18,5 °C an. Dies sind wichtige Parameter, um die Feuchteregulierung und Kondensatbildung in der Raumluft zu verstehen.

Die Norm [DIN 4108-3:2018-10] legt einen Grenzwert von 80 % relative Luftfeuchte in Bezug auf die Oberflächentemperatur der kritischen Bauteile fest, der nicht überschritten werden sollte, um die Bildung von Kondensat an Bauteilen zu verhindern und somit Schäden am Gebäude zu vermeiden.

In der Norm [DIN/TS 4108-8:2022-09] wird präzisierend erläutert: „Für die Praxis kann man vereinfachend von bauphysikalischen Modellbetrachtungen ausgehen. Hiernach kann eine Schimmelpilzbildung auftreten, wenn an mindestens fünf aufeinander folgenden Tagen die relative Luftfeuchte auf der Bauteiloberfläche mindestens 12 Stunden pro Tag einen Wert von mehr als 80 % aufweist. Bei höheren Luftfeuchten sind kürzere Zeiträume zu erwarten. Das Vorliegen von Wasser, wie z. B. Tauwasser, ist nicht erforderlich.“

Es wird für die Untersuchung angenommen, dass die relative mittlere Luftfeuchte der Außenluft bei 80 % liegt.

Unter diesen Annahmen lässt sich nun berechnen, wie viel Luftaustausch erforderlich ist, um die von den Nutzern eingebrachte Feuchtigkeit aus den Räumen abzuführen.

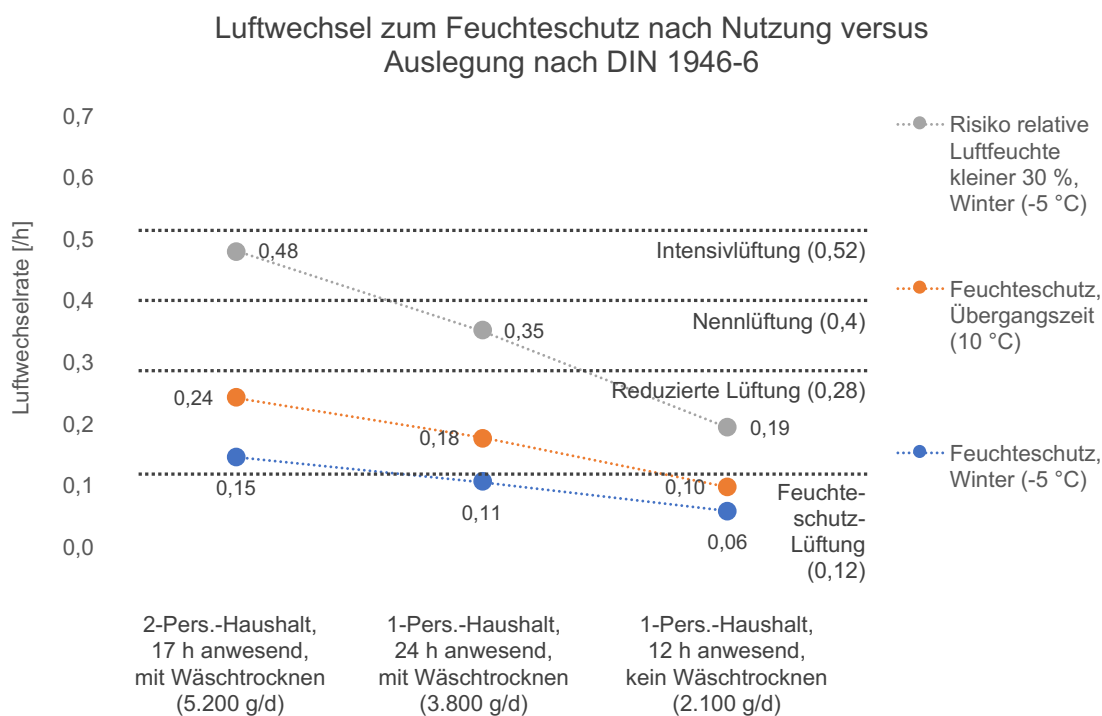


Bild 1, Luftwechselraten zum Feuchteschutz nach Nutzung versus Auslegung nach DIN 1946-6

In Bild 1 werden die Ergebnisse des erforderlichen Luftaustauschs zum Feuchteschutz nach der üblichen Auslegung gemäß [DIN 1946-6:2019-12] dargestellt. Dieser

Luftaustausch basiert auf der Fläche der Wohnung und berücksichtigt Zuschläge gemäß dem Dämmstandard und der Belegung der Wohnung.

Die Ergebnisse zeigen eine hohe Varianz. Bei Nutzungen mit einem hohen Feuchteeintrag reicht die Feuchteschutz-Lüftung mit 0,12 /h nicht aus; es sind 0,24 /h erforderlich. Bei Nutzungen mit geringem Feuchteintrag führt bereits die reduzierte Lüftung nach Norm (0,28 /h) im Langzeitbetrieb zu einer kritischen Austrocknung der Luft auf unter 30 % Feuchte. Dies verdeutlicht, dass die angemessene Luftaustauschrate in Bezug auf den Feuchteschutz stark von der tatsächlichen Feuchteintragsmenge abhängig ist.

Gerüche

Es werden drei Eintragsmengen von den Bewohnern untersucht. Die Norm [DIN EN 15665:2009-07] gibt die CO₂-Anreicherung in der Luft durch Atmung an. Demnach entstehen 16 l/h pro Person im wachen Zustand und 10 l/h pro Person während des Schlafs. Die Norm [DIN EN 16798-1:2019] definiert Grenzwerte für die notwendige Verdünnung der Einträge durch die Personen, auch als hygienischer Luftwechsel bezeichnet. Diese Grenzwerte sind in vier Stufen des Qualitätsanspruchs von "hoch" bis "niedrig" festgelegt. Je nach Stufe ist für unangepasste Personen, also Personen, die aus einem Bereich mit Frischluft ankommen, ein Anteil von 15 % bis 40 % Unzufriedener zu erwarten.

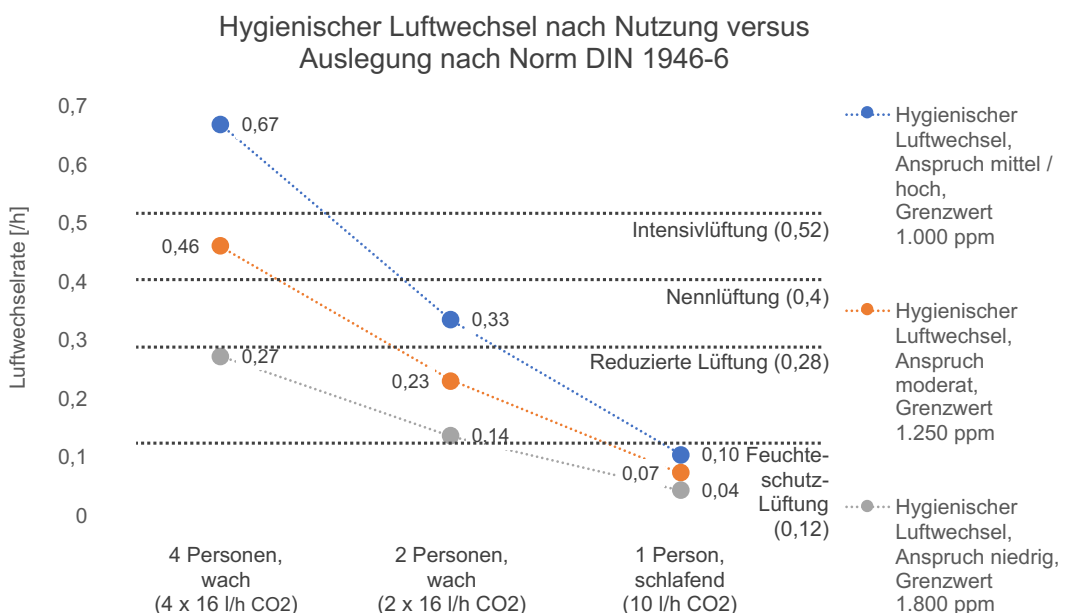


Bild 2, Hygienischer Luftwechsel nach Nutzung versus Auslegung nach Norm DIN 1946-6

In Bild 2 sind die Ergebnisse des erforderlichen Luftaustauschs für hygienische Zwecke dargestellt. Für eine Belegung mit zwei wachen Personen ist die Nennlüftung (0,4 /h) ausreichend. Bei moderaten Erwartungen an die Raumluftqualität wäre auch die reduzierte Lüftung (0,28 /h) ausreichend. Bei vier Personen kann selbst mit der Intensivlüftung (0,52 /h) nur der moderate Anspruch erfüllt werden. Für eine schlafende Person ist die Feuchteschutzlüftung ausreichend (0,12 /h).

Schadstoffe

Da die übliche Auslegung des notwendigen Luftaustauschs nach der Norm [DIN 1946-6:2019-12] nur schadstoffarme Gebäude abdeckt, werden hier auch die Werte für nicht schadstoffarme und sehr schadstoffarme Gebäude untersucht. Wie bereits in vorherigen Abschnitten, wird auch hier nach den Qualitätsanspruchs-Stufen von "hoch" bis "niedrig" differenziert. [DIN EN 16798-1:2019]

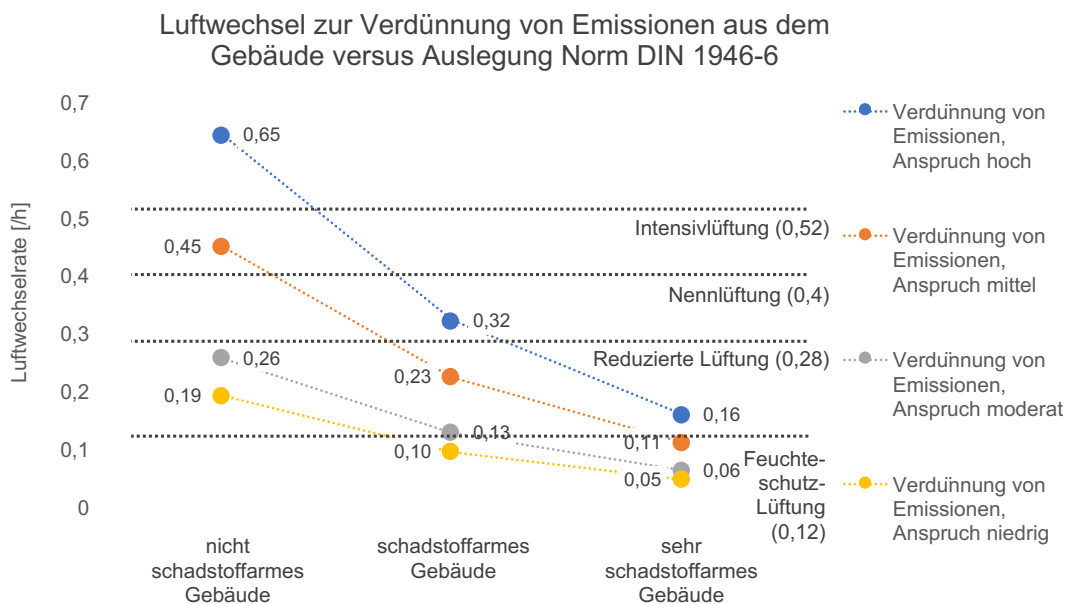


Bild 3, Luftwechsel zur Verdünnung von Emissionen aus dem Gebäude versus Auslegung nach Norm DIN 1946-6

In Bild 3 sind die Ergebnisse dargestellt. In einem schadstoffarmen Gebäude wird die Stufe "hoch" mit der Nennlüftung (0,4 /h) erreicht. In einem nicht schadstoffarmen Gebäude erfüllt die Intensivlüftung (0,52 /h) mittlere Anforderungen. In einem sehr schadstoffarmen Gebäude reicht bereits die Feuchteschutzlüftung (0,12 /h) aus, um mittlere Anforderungen zu erfüllen.

Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen eine große Bandbreite auf, die jedoch durch die verschiedenen Lüftungsstufen der [DIN 1946-6:2019-12] gut abgedeckt wird. Eine anpassbare Regelung des Luftwechsels, die auf die Nutzung und das Gebäude zugeschnitten ist, ist notwendig. Dies ist besonders wichtig, da im Winter bereits die Lüftungsstufe "reduzierte Lüftung" im Dauerbetrieb bei geringem Feuchteeintrag zu einer kritischen Austrocknung der Raumluft unter 30 % relative Luftfeuchte führen kann.

Daher sind in Lüftungsanlagen Komponenten zur Feuchterückgewinnung vorhanden, die eine Austrocknung der Raumluft reduzieren sollen. Es gibt drei gängige Verfahren mit verschiedenen Vor- und Nachteilen: das Enthalpie-Verfahren, das Kondensations-Verfahren und das Sorptionsverfahren. [Hackl 2017]

Gemäß [DIN 1946-6:2019-12] muss die Lüftung mindestens auf der Stufe Feuchteschutzlüftung nutzerunabhängig erfolgen. Dies kann beispielsweise durch Querlüftung über Außenluftdurchlässe realisiert werden.

Wenn eine ventilatorgestützte Lüftung verwendet wird, muss diese auch bei geschlossenen Fenstern die Anforderungen der Stufe Nennlüftung erfüllen können.

In Fällen, in denen die Wohnung fensterlose Bäder, Küchen oder Toiletten enthält, sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um eine ausreichende Be- und Entlüftung dieser Räume sicherzustellen. Die Auslegung dieser Maßnahmen erfolgt gemäß der Norm [DIN 18017-3:2020-05], die die notwendigen Luftwechselraten für diese Räume festlegt. Diese zusätzlichen Luftwechsel müssen durch eine ventilatorgestützte Lüftungsanlage erreicht werden.

1.3. Energieverluste durch Lüftung

Gemäß [Wouters et al. 1987] finden in unsanierten Gebäuden die meisten Wärmeverluste über die Gebäudehülle statt. Bei Gebäuden mit sehr hohem Dämmstandard, auch als Niedrigenergiegebäude bezeichnet, hingegen machen die Verluste durch den Luftaustausch den Großteil der Gesamtwärmeverluste aus. In der Energieoptimierung von Wohngebäuden wird deshalb der Zielkonflikt zwischen der Notwendigkeit eines ausreichenden Luftwechsels und der Reduzierung der damit verbundenen Wärmeverluste in der Heizperiode immer wichtiger. [Borsch-Laaks 2001]

1.3.1. Effizienzstrategie Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung

Um die Wärmeverluste in der Heizperiode zu minimieren, werden Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung eingesetzt. Diese Geräte ermöglichen einen Wärmeaustausch zwischen der warmen Abluft und der kalten Zuluft, wodurch die Lüftungswärmeverluste reduziert und die Energieeffizienz der Lüftungsanlage erhöht werden. Das Passivhaus Institut hat mehrere dieser Geräte im Labor unabhängig getestet und die Ergebnisse veröffentlicht. [Passivhaus Institut GmbH 2023]

Der Effekt der Wärmerückgewinnung hat auch Eingang in die gesetzlich geforderten Wärmeschutznachweise gefunden und wird in diesen berücksichtigt. Für bestimmte zentrale Lüftungsanlagen wird dieser Effekt sogar konkret gefordert. [Bundestag 2020]

In der Norm [DIN V 18599-2:2018-09] wird folgender Ansatz für den Luftwechsel bei der energetischen Bewertung von Gebäuden beschrieben: "Bei Gebäudezonen mit mechanischen Lüftungsanlagen mit Zuluft ist der Fensterluftwechsel [...] um den Luftwechsel der Lüftungsanlage zu reduzieren." Dies bedeutet, dass angenommen wird, dass die natürliche Fensterlüftung in Gebäudezonen mit mechanischer Lüftungsanlage und Zuluft um die Luftmenge abnimmt, die über die Lüftungsanlage zugeführt wird.

1.3.2. Energy Performance Gap

Die Energy Performance Gap (EPG) oder Energieleistungslücke wird in [Galvin 2014] als Prozentsatz des Überverbrauchs gegenüber dem erwarteten Energieverbrauch definiert. Dies bedeutet, dass die EPG den Unterschied zwischen dem tatsächlichen Energieverbrauch eines Gebäudes oder einer Anlage und dem in der Planungs- oder Entwurfsphase erwarteten Energieverbrauch in Prozent ausdrückt.

Um das Konzept des Energy Performance Gap (EPG) zu verdeutlichen, betrachten wir ein Beispiel: Angenommen, für ein bestimmtes Gebäude wurde ein Energieverbrauch von 100 Megawattstunden (MWh) pro Jahr prognostiziert. Tatsächlich verbraucht dieses Gebäude jedoch 150 MWh pro Jahr. In diesem Fall liegt ein Überverbrauch von 50 MWh vor, was einem EPG von 50 % entspricht. Das bedeutet, dass der tatsächliche Energieverbrauch um 50 % über dem prognostizierten Verbrauch liegt. Wenn das gleiche Gebäude nur noch 50 MWh pro Jahr verbraucht, wird das EPG entsprechend mit -50 % ausgewiesen.

Das EPG ist ein nützlicher Indikator, um Abweichungen von Energieeffizienzzielen zu quantifizieren.

Per Definition wird beim EPG die Primärenergie betrachtet. Primärenergie schließt unter anderem auch die Erzeugungsverluste von Strom und bei fossilen Brennstoffen die Energie, die für die Gewinnung und den Transport benötigt wird, mit ein. Dazu werden die von Gebäuden bezogenen Energiemengen je nach Energieträger über Primary Energy Factors (PEF), also Primärenergiefaktoren, umgerechnet.

Der gesamte Prozess der Berechnung der PEF-Werte ist von Natur aus komplex. Der PEF variiert je nach Versorgungsnetz lokal oder national und entwickelt sich weiter, zum Beispiel durch den Zubau neuer Energieerzeuger. Das Konzept der Primärenergie umfasst eine Mischung aus technischen, politischen und wirtschaftlichen Dimensionen. Daher ist es vielleicht nicht überraschend, dass die gemeldeten Werte verschiedener Organisationen und Länder anscheinend nicht auf die gleiche Weise berechnet werden. [Hitchin 2019]

Es ist jedoch wichtig, dass die Bewertung auf transparente und eindeutige Weise erfolgt. Veränderungen im Energiemarkt und im Bausektor erfordern auch eine regelmäßige Neuberechnung dieser PEF-Werte. [Hogeling 2018]

In Deutschland werden für die energetische Bewertung von Gebäuden die PEF aus der Norm [DIN V 18599-1:2018-09] verwendet. Bei Lebenszyklusbetrachtungen von Gebäuden werden üblicherweise die Daten der ÖkobaDat verwendet. [BBSR 2022].

In einer Metastudie haben [Shi et al. 2019] über 20 Arbeiten zum Energy Performance Gap analysiert. Die Auswertung von Daten aus diesen Quellen zeigt, dass tatsächlich eine Diskrepanz in der Energieeffizienz von Gebäuden besteht. Allerdings variieren die gemeldeten Abweichungen der tatsächlichen Energieverbräuche von den Prognosen mit Faktoren zwischen -73 % bis 300 % erheblich. Es gibt keinen klaren Zusammenhang zwischen der Größe dieser Leistungslücke und den üblicherweise

verwendeten Gebäudeparametern. Die Autoren identifizieren aber drei Hauptursachen für diese Leistungsdefizite: Das Verhalten der Bewohner, das Mikroklima und Unterschiede zwischen dem geplanten Design und dem tatsächlichen Bauzustand.

In einer Metastudie von [Mahdavi et al. 2021] wurden weitere Aspekte des Nutzerverhaltens identifiziert, die das Energy Performance Gap (EPG) beeinflussen können und sich von den angenommenen Verhaltensweisen unterscheiden. Neben dem Lüftungsverhalten über die Fenster spielen auch die Bedienung von Heizung und Lüftung, das Innenraumtemperaturniveau, die Anwesenheit der Nutzer, der Stromverbrauch, die Warmwassernutzung, die Bedienung von Sonnenschutzvorrichtungen und interne Temperaturunterschiede zwischen den Wohnungen eine relevante Rolle. Die Autoren kritisieren, dass nur 40 % der überprüften Veröffentlichungen die Mindestkriterien für eine evidenzbasierte Bestätigung der vermeintlich entscheidenden Rolle der Nutzer im Energie-Performance-Gap erfüllen. Tatsächlich erhoben sogar nur 14 % der betrachteten Veröffentlichungen detaillierte (sensorbasierte) Überwachungsdaten zum tatsächlichen Nutzerverhalten.

Im Folgenden werden die 14 % der Veröffentlichungen, die das Nutzerverhalten sensorbasiert erfassten, besprochen.

[Dall'O' et al. 2012] untersuchten zwei Geschosswohnungsbauten mit insgesamt 169 Einheiten in Mailand. Die Wärmeversorgung erfolgte zentral über eine Grundwasserwärmepumpe in Kombination mit Photovoltaik und Solarthermie sowie Trägheitsspeichern mit 9.000 l Volumen. Die Fensterlüftung wurde mit einer Abluftanlage unterstützt. Es konnte ein EPG beim Warmwasser von 96 % und bei der Heizung von 61 % gegenüber der statischen Berechnung nach italienischer UNI-Norm gemessen werden. Als Gründe für das EPG der Heizung nennen die Autoren das Öffnen der Fenster, die Nutzung von Rollläden und die Temperatureinstellung der Heizung.

[Lehmann et al. 2017] untersuchten in der Schweiz das EPG eines Wohngebäudes für 40 Studierende. Die Belüftung erfolgte über eine Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung und einer Luftwechselrate von 0,3 /h. Das EPG im Vergleich zum berechneten Wert nach Norm betrug 81 %. Die gemessenen Werte konnten durch eine thermisch-dynamische Simulation in Übereinstimmung gebracht werden, nachdem die Luftwechselrate in der Simulation von 0,3 /h auf 1 /h erhöht wurde. Der zusätzliche Luftwechsel wurde dem Fensterlüftungsverhalten der Bewohner zugeschrieben. An mehreren Wintertagen wurden die Fensteröffnungen beobachtet

(72 Beobachtungen). Im Durchschnitt waren 20 % der Fenster in Küchen und Wohnzimmern geöffnet. Vor allem Küchenfenster blieben im Winter über mehrere Stunden in Kippstellung. Gründe hierfür könnten, nach Einschätzung der Autoren, Unaufmerksamkeit, mangelndes Verantwortungsbewusstsein oder das Fehlen von Abzugshauben in der Küche sein.

[Heesen, Madlener 2018] untersuchten das EPG von Geschosswohnungsbauten mit 60 Wohneinheiten in Deutschland. Die 6 Aufgänge der Bestandsgebäude wurden nach verschiedenen Energieeffizienzklassen saniert, von EnEV 2009 bis hin zum Passivhausstandard. Die Messungen erstreckten sich über drei Heizperioden von Oktober bis März zwischen 2011 und 2014.

Die Forscher versuchten, die Abweichungen zwischen den berechneten Werten und den tatsächlichen Verbrauchswerten empirisch vorherzusagen, indem sie eine Regressionsanalyse durchführten. In den Rahmenbedingungen dieser Untersuchung hatte die Raumtemperatur die größte Korrelation mit einem erhöhten EPG, gefolgt vom Fensteröffnungsverhalten. Die Außentemperatur hatte den größten umgekehrten Effekt auf das EPG, gefolgt von der Raumlufffeuchte.

Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die aktuellen statischen Verbrauchsberechnungen nicht gut geeignet sind, die Verbräuche in der Praxis zu erklären, sondern nur als Schätzungen dienen, wenn alle Variablen vergleichbar sind. Sie forderten, das aktuelle System transparenter, zuverlässiger und vertrauenswürdiger zu gestalten und gingen davon aus, dass die Verwendung gemessener Daten zu genaueren Verbrauchsvorhersagen führen kann.

Der gleiche Datensatz wurde bereits von [Cali et al 2016] untersucht. Die Autoren stellten fest, dass die Verbräuche in den Jahren zwischen 2011 bis 2014 tendenziell gesunken sind. Sie führten diese Verbesserung darauf zurück, dass in diesem Zeitraum "Kinderkrankheiten" bei der Warmwasserversorgung, der Wärmepumpe und der Wohnraumlüftung behoben wurden.

Die Abweichungen zwischen den gemessenen Verbräuchen und den berechneten Bedarfswerten waren in einem Abschlussbericht eines Monitorings von 8 Geschosswohnungsbauten im Auftrag der Obersten Baubehörde Bayerns auffallend niedriger bei einfachen Technikkomponenten im Vergleich zu den komplexeren Technikkonzepten. [Oberste Baubehörde 2017]

1.3.3. Lebenszyklusbetrachtung

Das Energy Performance Gap (EPG) konzentriert sich auf den Primärenergieverbrauch während des Betriebs und eignet sich daher gut zur Bewertung prognostizierter Energieverbräuche. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Lebenszyklusbetrachtung die Untersuchung von Material- und Energieströmen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes, einschließlich Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Die Betrachtung kann sich entweder auf die Herstellungsphase - "cradle to gate" - oder auf den gesamten Lebenszyklus - "cradle to grave" - konzentrieren. Die Lebenszyklusbetrachtung ist ein wichtiges Werkzeug zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und bildet einen zentralen Bestandteil der Bewertungssysteme für Gebäudezertifikate wie BREEAM, LEED, DGNB und BNB. [Theißen et al. 2020]

Die Methoden für die Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden sind europaweit standardisiert und folgen bestimmten Normen, darunter [DIN EN ISO 14044:2021-2], [DIN EN 15978:2012-10] und [DIN EN 60300-3-3:2014-09]. Dabei erfolgt eine Unterscheidung zwischen einer Ökobilanz, die auch als Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet wird, und der Betrachtung der Lebenszykluskosten, die als Life Cycle Costing (LCC) bezeichnet wird.

In einer Untersuchung von [Ramírez-Villegas et al. 2019] wurde das Global Warming Potential (GWP) verschiedener Modernisierungsvarianten für Geschosswohnungsbauten in mehreren europäischen Staaten analysiert. Durch die Anwendung der Ökobilanz – cradle to grave – konnten die Autoren feststellen, dass die ökologische Amortisation der Modernisierung in Norwegen je nach Variante aufgrund des niedrigen Primärenergiefaktors (PEF) des lokalen Stromnetzes mehr oder weniger schnell erfolgt, während in Deutschland aufgrund des höheren PEF keine der Varianten eine ökologische Amortisation erreicht. Diese Ergebnisse verdeutlichen die starke Abhängigkeit der ökologischen Sinnhaftigkeit verschiedener Modernisierungsmaßnahmen von der lokalen Energieinfrastruktur.

In einer Untersuchung von [Blom et al. 2010] wurden neben dem Global Warming Potential (GWP) auch weitere Umweltauswirkungen, wie den Abbau der Ozonschicht, die Toxizität für den Menschen und die Versauerung betrachtet. Die Forscher analysierten verschiedene Modernisierungsoptionen für typische serielle Geschosswohnungsbauten aus den 60er bis 80er Jahren. Mithilfe der Ökobilanz konnten sie zeigen, dass eine Abluft-Wärmepumpe im Vergleich zu einer Gasbrennwerttherme nur dann ökologisch vorteilhafter ist, wenn die Betriebsenergie überwiegend aus erneuerbaren Quellen stammt. Die Autoren führten die Ergebnisse

auf Faktoren wie die im Vergleich größeren Geräte, den Einsatz von Kältemitteln und den reduzierten Wirkungsgrad der Wärmepumpentechnik bei der Warmwassererzeugung zurück.

Sowohl [Ramírez-Villegas et al. 2019] als auch [Blom et al. 2010] verwendeten für ihre Untersuchungen Standardwerte für das Nutzerverhalten, das Wetter und die Technikperformance und ermittelten die Energieverbräuche anhand statischer Verbrauchsberechnungen.

[Knecht und Sigrist 2019] verwendeten für ihre Lebenszyklusbetrachtung gemessene Energieverbräuche. Die Daten stammen aus 173 Wohnungen mit Fensterlüftung und Abluftanlage sowie 167 Wohnungen mit Wohnraumlüftung unter Einsatz von Wärmerückgewinnung und wurden von Mitte 2013 bis Mitte 2016 erhoben. Alle Wohnungen befanden sich in einer mehrgeschossigen Blockrandbebauung. Dabei wurden GWP (Global Warming Potential), Kosten und nicht erneuerbare Primärenergie der beiden Lüftungskonzepte verglichen. In allen drei Dimensionen schnitt die Fensterlüftung besser ab. Vor allem die Komponenten der Lüftungstechnik selbst, der Rohbau des Lüftungskellers und die Wartungsarbeiten wirkten sich negativ aus. Der Energieverbrauch der beiden Lüftungskonzepte war entgegen der Prognose nahezu gleich. Die Wohnungen mit der Wohnraumlüftungsanlage wiesen ein Energy Performance Gap (EPG) von 29 % auf. Die Autoren schrieben dazu: "Das theoretisch mögliche Potential wird also bei weitem nicht ausgeschöpft. Mögliche Gründe könnten ein falsches Nutzerverhalten (wenn etwa während der Heizperiode trotz kontrollierter Wohnraumlüftung oft mit den Fenstern gelüftet wird), eine nicht optimal funktionierende Wärmerückgewinnung (WRG) oder ein häufiger Betrieb der Abtauschaltung (WRG wird mit Bypass umgangen) sein." Im Rahmen der Studie erfolgte keine nähere Untersuchung der tatsächlichen Gründe.

Die [GEWOFAG 2015] führte eine ähnliche Untersuchung mit jeweils 8 Wohnungen durch. Die Daten, die für die Auswertung verwendet wurden, stammen aus dem Zeitraum von Oktober 2012 bis September 2013. Bei den 8 Wohnungen mit Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) lag das Energy Performance Gap (EPG) bei 16,5 %. Bei Kosten und Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen schnitt die ventilatorgestützte Wohnraumlüftung jeweils schlechter ab als die Fensterlüftung. Die GEWOFAG zeichnete parallel zu den Verbräuchen auch die Dauer, während der die Bewohner die Fenster öffneten, auf. In beiden Gebäuden, sowohl mit Fensterlüftung als auch mit Wohnraumlüftung, öffneten die Bewohner die Fenster ähnlich häufig. Die Annahme, dass das Vorhandensein einer Lüftungsanlage das Lüftungsverhalten der Bewohner erheblich verändert, konnte zumindest anhand der

von der GEWOFAG erfassten Messdaten nicht bestätigt werden. Dies stärkt die Vermutung, dass die schlechtere Leistung der Wohnraumlüftungsanlage in der Praxis auf von der Norm abweichendes, nicht ideales Nutzerverhalten zurückzuführen ist.

[Heesen, Madlener 2018] argumentierten, dass nicht das heterogene Verhalten der Bewohner das Hauptproblem darstellt, sondern die Unfähigkeit, den mittleren Energieverbrauch angemessen vorherzusagen.

Diese Unfähigkeit stellt ein Problem dar, da im Klimaschutzgesetz das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 festgeschrieben ist [Bundestag 2021], und in Deutschland etwa 25% des Gesamtendenergieverbrauchs auf den Endenergieverbrauch für die Raumheizung in Wohngebäuden entfällt [BMW 2020]. Da die Prognoseverfahren für den Energieverbrauch gemäß Norm ein integraler Bestandteil politischer Instrumente wie dem Gebäudeenergiegesetz sind [Bundestag 2020], besteht die Gefahr einer Fehlsteuerung, würden diese Prognosen zu weit von den tatsächlichen Ergebnissen abweichen.

[Schröder & Seeberg et al. (201)] analysierten den Energieverbrauch für Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung in Wohngebäuden für den Zeitraum von 2004 bis 2016 anhand von 1,6 Millionen Gebäudeenergieabrechnungen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass sich die Geschwindigkeit, mit der die Verbräuche reduziert werden, seit 2009 abnimmt. Bei Gebäuden mit einer Nutzfläche von über 1500 m² ist der Verbrauch seit 2014 sogar wieder angestiegen.

1.4. Bisherige Forschungsarbeit

1.4.1. Einfach Bauen und die Forschungshäuser in Bad Aibling

Die Idee von „Einfach Bauen“ basiert auf der These, dass ein Haus, das einfach und weniger aufwendig konstruiert ist, über den gesamten Lebenszyklus hinweg sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile bietet im Vergleich zu einem Niedrigenergiegebäude oder einem Passivhaus.

Durch [Endres et al. 2017] wurden bereits Untersuchungen an Bürogebäuden durchgeführt, bei denen die Robustheit von einfachen und komplexen technischen Systemen mithilfe thermischer Simulationen analysiert wurde. Dabei wurden passive Parameter wie die Ausrichtung des Gebäudes, die Konstruktion der Außenwände und die Größe der Fenster systematisch variiert. In den Rahmenbedingungen dieser Studie

reichte der Endenergiebedarf der Varianten mit Fensterlüftung von 5 bis 16 kWh/m² und bei der ventilatorgestützten Lüftung von 12 bis 20 kWh/m². Die internen Wärmegewinne aus Beleuchtung, Bürotechnik und Körperabwärme wurden mit 24 W/m² angenommen, was etwa doppelt so hoch ist wie die üblichen Werte in Wohngebäuden. Dies schränkt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Wohnnutzungen ein. Die Simulationen gingen von einer üblichen Büroanwesenheit von 8-18 Uhr aus. Es wurde auch eine Ökobilanzierung durchgeführt, jedoch nur für die untersuchten Außenwandkonstruktionen. Das Ziel dieser Analyse war es, die Materialbilanz mit den jeweiligen Auswirkungen auf den Energiebedarf während des Betriebs zu vergleichen.

[Nagler et al. 2019] haben eine Parameterstudie im Bereich des Geschosswohnungsbaus durchgeführt, die unter dem Titel "Einfach Bauen – Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion" stand. Ähnlich wie bei [Endres et al. 2017] wurden passive Parameter wie Raumgeometrie, Baumaterialien und Fenstergrößen systematisch variiert. Die optimale Raumkonfiguration, hinsichtlich des Energiebedarfs für die Raumheizung und die sommerliche Überhitzung, wurde dann auf ihre Robustheit gegenüber unsicheren Randbedingungen wie dem Lüftungsverhalten der Bewohner oder verändertem Wetter überprüft.

Die Ergebnisse zeigten, dass das Lüftungsverhalten der Bewohner innerhalb der gesetzten Rahmenbedingungen den größten Einfluss auf den Energiebedarf für die Raumheizung hatte. Die höchsten Verbräuche traten bei Varianten auf, bei denen die Fenster durchgängig gekippt waren, während die geringsten Verbräuche bei Varianten erreicht wurden, bei denen die Fenster während der Heizperiode dauerhaft geschlossen blieben und nur eine Feuchtschutzlüftung erfolgte.

Die Studie umfasste auch eine Lebenszyklusbetrachtung, die die Herstellung, den Austausch und die Entsorgung von Gebäuden und Technik sowie den Energieverbrauch der Bewohner für Geräte, Warmwasser und Raumheizung berücksichtigte. Die untersuchten Parameter umfassten das Global Warming Potential (GWP), die Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen und die Kosten, und zeigten je nach angenommenem Lüftungsverhalten der Bewohner eine große Bandbreite an Ergebnissen. In der Variante mit einer Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung war die Streuung der Ergebnisse am größten.

Die Forschungshäuser in Bad Aibling, wurden durch Florian Nagler Architekten im Auftrag der B&O Gruppe geplant und durch die B&O selbst gebaut und stellen eine praktische Umsetzung des Konzepts "Einfach Bauen" dar. Das Energiekonzept wurde

von Transsolar entwickelt. Die Planungsphase begann im Jahr 2018, und die Fertigstellung erfolgte im Jahr 2020.

Diese Forschungshäuser setzen auf ein reduziertes Technikkonzept. Die innenliegenden, fensterlosen Bäder werden durch einen Badabluft-Ventilator belüftet. Die Zufuhr von Frischluft erfolgt über sogenannte Fensterfalzlüfter (FFL). [Nagler 2022]



Bild 4, Straßenansicht der drei Forschungshäuser kurz vor Fertigstellung, Quelle: Tilmann Jarmer

[Jarmer et al. 2021] dokumentierten den Bauprozess. Eine Langzeitmessung des Nutzerverhaltens wurde ebenfalls vorbereitet und getestet.

„Einfach Bauen – Ein Leitfaden“, an interessierte Planende und Bauende gerichtet, wurde ebenfalls veröffentlicht. [Nagler 2022]

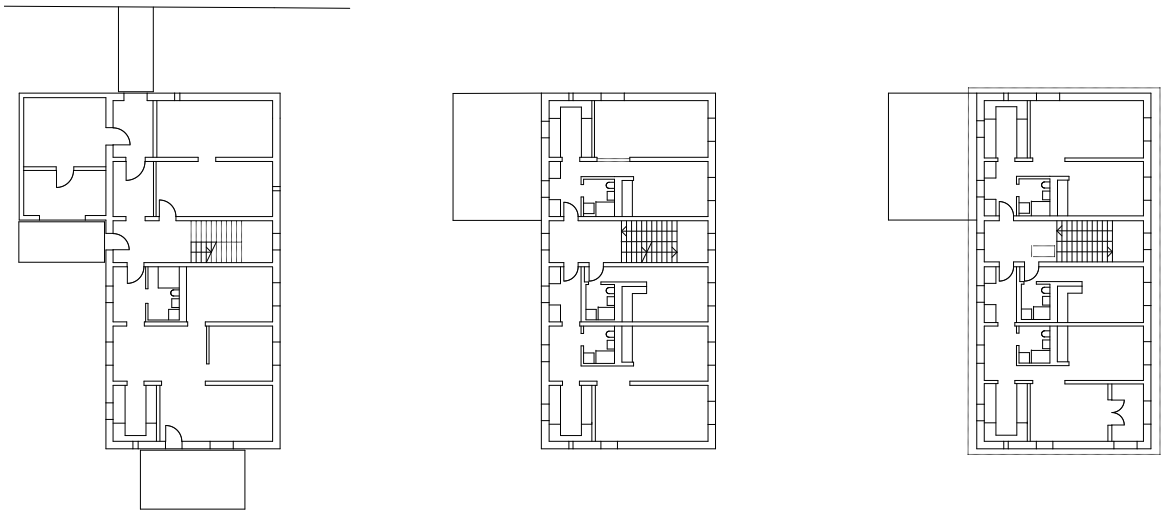


Bild 5, Grundrisse Gebäude in Bad Aibling, von links nach rechts: Erdgeschoss, 1. Obergeschoss, 2. Obergeschoss, Quelle: Florian Nagler Architekten

Von Anfang 2021 bis Anfang 2023 führten [Franke et al. 2023] umfangreiche Messungen an den Forschungshäusern in Bad Aibling durch. Der Energieverbrauch der drei Gebäude für Raumwärme hat ein EPG von - 15 %. In insgesamt 6 Wohnungen wurde über Sensoren das Raumklima und das Lüftungs- und Heizverhalten der Bewohner gemessen. Gleichzeitig wurde eine Befragung mit allen gewillten Bewohnern der drei Häuser durchgeführt.

[Kargruber 2022] verwendete die Daten, um die thermisch-dynamischen Simulationen der Forschungshäuser zu validieren. Die Qualität der Simulationsergebnisse kann durch die genaue Abbildung der Nutzer verbessert werden. Dabei muss die Abbildung des Nutzers allerdings sehr genau sein, da Ungenauigkeiten große Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Dies kann die Qualität der Ergebnisse verschlechtern.

[Ficht 2022] untersuchte, ob anhand der gewonnenen Daten probabilistische Modelle für das Nutzerverhalten abgeleitet werden können, um diese in thermisch-dynamischen Simulationen verwenden. Während der Untersuchung wurde festgestellt, dass das Lüftungsverhalten nicht sicher durch äußere Faktoren wie die CO₂-Konzentration oder die Raum- und Außenlufttemperatur erklärt werden kann. Stattdessen scheint es, dass das Lüftungsverhalten in erster Linie von den täglichen Gewohnheiten der Nutzerinnen und Nutzer beeinflusst wird.

1.5. Hypothese und abgeleitete Forschungsfragen

Im Rahmen dieser Dissertation wird untersucht, ob die Installation einer Wohnraumlüftungsanlage in den Forschungshäusern aus ökologischer und

ökonomischer Sicht sinnvoll gewesen wäre oder ob sie als Modernisierungsmaßnahme noch in Betracht gezogen werden sollte. Der potenzielle Energieeffizienzgewinn durch den Wechsel von der Fensterlüftung zu einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung spricht für die Installation. Allerdings steht dem das mögliche Energy Performance Gap gegenüber, also die Unsicherheit, ob sich dieses Effizienzpotenzial tatsächlich realisieren würde. Auch die Auswirkungen auf das Budget und die Umwelt im Zusammenhang mit der Anwendung einer ventilatorgestützten Lüftungsanlage, sei es in Bezug auf Herstellung, Wartung und Austausch, sind Gegenargumente.

Die in Bad Aibling gesammelten Daten ermöglichen die Abschätzung der Energieverluste der Bewohner durch Fensterlüftung. In Kombination mit einer Lebenszyklusbetrachtung verschiedener Wohnraumlüftungsvarianten kann untersucht werden, wie ökologisch und ökonomisch sinnvoll die Installation einer solchen Anlage wäre.

Um die Untersuchung gut zu strukturieren und dabei stets einen roten Faden während der Auswertung zu behalten, werden an dieser Stelle eine Hypothese und daraus abgeleitete Forschungsfragen formuliert:

- Hypothese: In den Forschungshäusern in Bad Aibling sind Wohnraumlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll.
- Frage 1: Welche Lüftungswärmeverluste entstanden bei den Forschungshäusern während der Langzeitmessungen durch die Fensterlüftung und Undichtigkeiten der Gebäudehülle, die durch Zufuhr von Raumwärme ausgeglichen werden müssen?
- Frage 2: Welche Umweltauswirkungen und Kosten würden durch geeignete Wohnraumlüftungsanlagen über den Lebenszyklus hinweg entstehen?
- Frage 3: Welche Einsparungen an Raumwärme sind notwendig, damit sich die Wohnraumlüftungsanlage ökologisch oder ökonomisch amortisiert?

2. Gemessene Lüftungswärmeverluste durch Fensterlüftung und Undichtigkeiten

2.1. Datengrundlage

Die Rohdaten wurden dem Autor vom Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen übergeben und in den folgenden Untersuchungen verwendet. Diese Untersuchungen erfolgen unabhängig von [Franke et al. 2023]. Im Folgenden wird die Art der genutzten Daten beschrieben, deren Qualität überprüft und am Ende ein Zeitfenster für die Untersuchung festgelegt.

2.1.1. Verbrauch Wärme

Die Messungen wurden mit Hilfe von Wärmemengenzählern durchgeführt, die die Durchflussmengen sowie die Temperaturen von Vor- und Rücklauf direkt in den Wohnungen erfassten. Dabei wurden sowohl die Energie für die Raumerwärmung (Heizwärme) als auch die Energie für die Trinkwassererwärmung gemeinsam gemessen. Um den Energieverbrauch für die Raumerwärmung vom Energieverbrauch für die Trinkwassererwärmung zu trennen, wurde der Verbrauch für die Trinkwassererwärmung aus den Messwerten während des Sommers (15. Mai - 14. September 2022) abgeleitet, auf das gesamte Jahr hochgerechnet und vom Gesamtmesswert abgezogen. [Franke et al. 2023].

- Verbrauch Energie zur Raumerwärmung [kWh/m²a]

2.1.2. Wetterdaten

Die Wetterstation war auf dem Dach des Forschungshauses aus Leichtbeton angebracht, und die Daten wurden im Minutentakt erfasst. Die für die Untersuchung relevanten Parameter sind:

- Außenlufttemperatur [° C]
- Windgeschwindigkeit [m/s]

2.1.3. Sensoren in den Wohnungen

In den drei Gebäuden (Leichtbeton, Holz und Mauerwerk) wurden jeweils zwei bewohnte Wohnungen, insgesamt also sechs Wohnungen, vermessen. Die Daten wurden im Minutentakt erfasst. Die für die Untersuchung relevanten Daten umfassen:

- Raumlufttemperatur [° C]
- Temperatur der Heizkörper [° C]
- Status der Fenster [Offen / Geschlossen]

2.1.4. Fotodokumentation

Die Sensoren an den Fenstern unterscheiden nur zwischen offen und geschlossen und liefern somit keine detaillierteren Informationen zur Öffnungsstellung, wie etwa ob das Fenster vollständig geöffnet oder gekippt ist. Daher wurden im Rahmen von [Franke et al. 2023] Fotoaufnahmen der Außenfassaden gemacht. Im Zeitraum vom 24.11.2021 bis 7.4.2022 wurden bei insgesamt 14 Besuchen vor Ort Fotos von allen Fassaden gemacht. Die Auswertung der Fotos ergab eine Verteilung von 29 % geöffneten Fenstern zu 71 % gekippten Fenstern.

Diese Verteilung wurde verwendet, um die Sensorwerte [Offen / Geschlossen] für den Fall "Offen" aufzuteilen in "Offen" (29 %) und "Gekippt" (71 %). Da dieses Vorgehen eine Unschärfe in den Ergebnissen erzeugt, wurde im Anschluss noch eine Sensitivitätsuntersuchung dazu durchgeführt (siehe 2.3.5).

2.1.5. Qualität der Daten

Die Qualität der Messdaten wird im Endbericht von [Franke et al. 2023] wie folgt beschrieben: "Nach Aufbau der Messtechnik und Programmierung der Sensoren wurde das Messsystem getestet und Fehler in der Datenerhebung und dem Datentransfer behoben. Die Werte der kalibrierten Sensoren wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Dabei kam es zu Abweichungen, die entweder behoben wurden (Austausch fehlerhafter Sensoren) oder im Nachbereitungsprozess der Daten korrigiert wurden."

Trotz der behobenen Fehler während der Messkampagne gibt es größere Datenlücken in den für die Untersuchung relevanten Parametern. Wie im Bild 6 bis 8 zu sehen ist, sind im Zeitraum vom 15.9.2021, 0:00 bis zum 14.9.2022, 23:59 jedoch genug Daten

vorhanden, um die Untersuchungen zum Lüftungsverhalten der Bewohner an vier der sechs gemessenen Wohnungen vorzunehmen.

Wohnung Holz Nord

Monat	Temp. Luft Schlafz.	Temp. Luft Wohnz.	Temp. Luft Küche	Temp. Luft Bad	Temp. Heizung Schlafz.	Temp. Heizung Wohnz.	Temp. Heizung Bad	Status Öffnung Fenster Schlafz.	Status Öffnung Fenster Ost Wohnz.	Status Öffnung Fenster Nord Wohnz.	Status Öffnung Fenster Nord Küche	Status Öffnung Fenster West Küche	Status Öffnung Fenster Flur	Temp. Außen	Geschw .Wind	Datenlücken
Jan.	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	29,0%	29,0%	29,1%
Feb.	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	3,9%	3,9%	4,1%
Mär.	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	3,7%	3,7%	3,9%
Apr.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,5%	4,5%	4,6%
Mai.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,8%
Jun.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	24,0%	24,0%	24,0%
Jul.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	100,0%	100,0%	100,0%
Aug.	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	9,2%	9,2%	12,3%
Sep.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,4%	4,4%	4,5%
Okt.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,7%
Nov.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,9%	4,9%	4,9%
Dez.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,7%

Wohnung Holz Süd

Monat	Temp. Luft Schlafz.	Temp. Luft Wohnz.	Temp. Luft Küche	Temp. Luft Bad	Temp. Heizung Schlafz.	Temp. Heizung Wohnz.	Temp. Heizung Bad	Status Öffnung Fenster Schlafz.	Status Öffnung Fenster Ost Wohnz.	Status Öffnung Fenster Süd Wohnz.	Status Öffnung Fenster Süd Küche	Status Öffnung Fenster West Küche	Status Öffnung Fenster 1 Flur	Status Öffnung Fenster 2 Flur	Temp. Außen	Geschw .Wind	Datenlücken
Jan.	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	29,0%	29,0%	29,1%
Feb.	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	3,9%	3,9%	4,1%
Mär.	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	3,7%	3,7%	3,9%
Apr.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,5%	4,5%	4,6%
Mai.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,8%
Jun.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	24,0%	24,0%	24,0%
Jul.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	100,0%	100,0%	100,0%
Aug.	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	9,2%	9,2%	12,3%
Sep.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,4%	4,4%	4,5%
Okt.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,7%
Nov.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,9%	4,9%	4,9%
Dez.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,7%

Bild 6, Anteil fehlender Datensätze je Monat in %, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Wohnung Leichtbeton Nord

Monat	Temp. Luft Schlafz.	Temp. Luft Wohnz.	Temp. Luft Küche	Temp. Luft Bad	Temp. Heizung Schlafzi.	Temp. Heizung Wohnzi.	Temp. Heizung Bad	Status Öffnung Fenster Schalfz.	Status Öffnung Fenster Ost Wohnz.	Status Öffnung Fenster Nord Wohnz.	Status Öffnung Fenster Nord Küche	Status Öffnung Fenster West Küche	Status Öffnung Fenster Flur	Temp. Außen	Geschw .Wind	Datenlücken
Jan.	26,5%	26,5%	31,7%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	100,0%	26,5%	72,6%	26,5%	29,0%	29,0%	100,0%
Feb.	0,4%	0,4%	4,9%	0,4%	0,4%	0,8%	0,4%	0,4%	0,4%	76,7%	0,4%	68,9%	0,4%	3,9%	3,9%	100,0%
Mär.	0,2%	0,2%	0,7%	0,2%	0,2%	72,9%	0,2%	0,2%	0,2%	20,0%	0,2%	100,0%	0,2%	3,7%	3,7%	100,0%
Apr.	1,0%	1,0%	1,1%	1,0%	1,0%	95,1%	1,0%	1,0%	1,1%	90,9%	1,0%	99,9%	1,0%	4,5%	4,5%	100,0%
Mai.	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	65,4%	0,1%	0,1%	0,1%	99,1%	0,1%	100,0%	0,1%	3,7%	3,7%	100,0%
Jun.	22,4%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	85,4%	22,1%	22,1%	22,1%	96,3%	22,1%	99,9%	22,1%	24,0%	24,0%	100,0%
Jul.	99,7%	99,5%	99,7%	99,1%	99,2%	99,7%	98,6%	98,9%	99,1%	100,0%	99,3%	100,0%	99,4%	100,0%	100,0%	100,0%
Aug.	9,0%	9,0%	9,0%	9,0%	9,0%	54,5%	9,0%	9,0%	8,9%	100,0%	9,2%	100,0%	9,2%	9,2%	9,2%	100,0%
Sep.	1,1%	0,9%	0,9%	0,9%	1,2%	54,2%	0,9%	0,9%	0,9%	56,7%	1,2%	46,7%	0,9%	4,4%	4,4%	100,0%
Okt.	0,2%	0,2%	19,1%	0,2%	0,2%	67,5%	0,2%	0,2%	0,2%	36,3%	0,2%	0,2%	0,2%	3,7%	3,7%	100,0%
Nov.	0,1%	0,1%	3,4%	0,1%	0,1%	5,1%	0,1%	0,1%	0,1%	100,0%	0,1%	0,4%	0,1%	4,9%	4,9%	100,0%
Dez.	0,1%	0,1%	0,4%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	100,0%	0,1%	77,5%	0,1%	3,7%	3,7%	100,0%

Wohnung Leichtbeton Süd

Monat	Temp. Luft Schlafz.	Temp. Luft Wohnz.	Temp. Luft Küche	Temp. Luft Bad	Temp. Heizung Schlafzi.	Temp. Heizung Wohnzi.	Temp. Heizung Bad	Status Öffnung Fenster Schalfz.	Status Öffnung Fenster Ost Wohnz.	Status Öffnung Fenster Süd Wohnz.	Status Öffnung Fenster Süd Küche	Status Öffnung Fenster West Küche	Status Öffnung Fenster 1 Flur	Status Öffnung Fenster 2 Flur	Temp. Außen	Geschw .Wind	Datenlücken
Jan.	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,7%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	29,0%	29,0%	29,3%
Feb.	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	3,9%	3,9%	3,9%
Mär.	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	3,7%	3,7%	3,7%
Apr.	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,1%	1,0%	1,0%	1,1%	1,0%	1,0%	1,0%	1,6%	1,0%	4,5%	4,5%	5,1%
Mai.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,7%
Jun.	22,1%	22,1%	22,2%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	22,1%	24,0%	24,0%	25,0%
Jul.	99,6%	99,6%	99,3%	99,5%	99,1%	99,0%	98,9%	99,0%	99,5%	99,0%	99,2%	99,1%	98,8%	99,2%	100,0%	100,0%	100,0%
Aug.	9,4%	9,1%	8,9%	8,9%	9,3%	8,9%	8,9%	8,9%	9,0%	8,9%	9,0%	9,1%	8,9%	9,2%	9,2%	13,2%	
Sep.	1,0%	0,9%	0,9%	0,9%	1,0%	1,0%	0,9%	0,9%	1,0%	0,9%	0,9%	1,0%	2,3%	0,9%	4,4%	4,4%	6,1%
Okt.	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	3,7%	3,7%	3,7%
Nov.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,9%	4,9%	4,9%
Dez.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,7%

Bild 7, Anteil fehlender Datensätze je Monat in %, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Wohnung Mauerwerk Nord

Monat	Temp. Luft Schlafz.	Temp. Luft Wohnz.	Temp. Luft Küche	Temp. Luft Bad	Temp. Heizung Schlafz.	Temp. Heizung Wohnz.	Temp. Heizung Bad	Status Öffnung Fenster Schalfz.	Status Öffnung Fenster Ost Wohnz.	Status Öffnung Fenster Nord Wohnz.	Status Öffnung Fenster Nord Küche	Status Öffnung Fenster West Küche	Status Öffnung Fenster Flur	Temp. Außen	Geschw .Wind	Datenlücken
Jan.	4,4%	11,4%	4,3%	4,3%	24,7%	4,7%	4,3%	99,7%	4,3%	100,0%	5,0%	11,8%	4,3%	29,0%	29,0%	100,0%
Feb.	0,2%	4,7%	0,2%	0,2%	35,7%	18,7%	0,2%	90,2%	6,0%	76,9%	0,2%	1,1%	0,2%	3,9%	3,9%	99,3%
Mär.	1,0%	1,0%	16,6%	1,0%	16,3%	3,2%	1,0%	97,6%	1,0%	33,0%	12,1%	14,7%	1,0%	3,7%	3,7%	98,0%
Apr.	0,6%	2,8%	4,0%	0,6%	0,7%	8,3%	0,5%	16,0%	0,6%	99,3%	0,6%	2,3%	0,5%	4,5%	4,5%	99,4%
Mai.	1,0%	1,0%	1,5%	1,0%	1,2%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	100,0%	1,3%	1,2%	1,0%	3,7%	3,7%	100,0%
Jun.	76,3%	0,6%	36,1%	0,7%	76,5%	0,7%	0,6%	76,2%	0,6%	100,0%	46,4%	28,4%	0,6%	24,0%	24,0%	100,0%
Juli.	100,0%	1,0%	92,9%	1,0%	100,0%	1,0%	1,0%	100,0%	1,0%	100,0%	12,9%	27,7%	1,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Aug.	89,7%	2,5%	19,4%	2,2%	89,7%	2,2%	2,2%	89,7%	2,2%	100,0%	32,6%	15,1%	2,3%	9,2%	9,2%	100,0%
Sep.	100,0%	8,9%	30,8%	0,3%	46,7%	0,3%	0,3%	46,7%	0,3%	46,8%	58,9%	67,0%	0,3%	4,4%	4,4%	100,0%
Okt.	99,2%	13,6%	21,9%	3,2%	3,2%	27,1%	3,2%	3,2%	3,2%	92,1%	25,5%	69,4%	3,2%	3,7%	3,7%	100,0%
Nov.	100,0%	14,1%	3,1%	0,1%	0,1%	17,8%	0,1%	0,1%	0,1%	100,0%	0,3%	3,3%	0,1%	4,9%	4,9%	100,0%
Dez.	47,7%	43,5%	3,0%	0,1%	0,1%	6,2%	0,1%	16,2%	0,5%	100,0%	0,4%	4,6%	0,1%	3,7%	3,7%	100,0%

Wohnung Mauerwerk Süd

Monat	Temp. Luft Schlafz.	Temp. Luft Wohnz.	Temp. Luft Küche	Temp. Luft Bad	Temp. Heizung Schlafz.	Temp. Heizung Wohnz.	Temp. Heizung Bad	Status Öffnung Fenster Schalfz.	Status Öffnung Fenster Ost Wohnz.	Status Öffnung Fenster Süd Wohnz.	Status Öffnung Fenster Süd Küche	Status Öffnung Fenster West Küche	Status Öffnung Fenster 1 Flur	Status Öffnung Fenster 2 Flur	Temp. Außen	Geschw .Wind	Datenlücken
Jan.	4,3%	4,3%	4,3%	4,4%	4,3%	4,3%	4,4%	4,3%	4,3%	4,3%	4,3%	4,3%	4,3%	4,3%	29,0%	29,0%	29,2%
Feb.	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	3,9%	3,9%	4,0%
Mär.	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	3,7%	3,7%	4,6%
Apr.	0,5%	0,6%	0,5%	1,2%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	1,0%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,5%	4,5%	4,5%	6,2%
Mai.	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	3,7%	3,7%	4,6%
Jun.	0,6%	1,0%	0,6%	0,7%	0,6%	0,6%	1,2%	0,6%	1,4%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	24,0%	24,0%	26,1%
Juli.	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Aug.	2,3%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,3%	2,2%	2,2%	2,2%	2,4%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	9,2%	9,2%	11,4%
Sep.	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	4,4%	4,4%	4,5%
Okt.	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,7%	3,7%	6,6%
Nov.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4,9%	4,9%	5,0%
Dez.	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	3,7%	3,7%	3,7%

Bild 8, Anteil fehlender Datensätze je Monat in %, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Die Daten wurden im Minutentakt erfasst, aber selbst in den Wohnungen mit ausreichend Daten sind die Erfassungen nicht lückenlos. Um diese Datenlücken auszugleichen, wurden die Datensätze in Kalenderwochen zusammengefasst, und der Anteil der Datenlücken pro Woche wurde ermittelt. Anschließend wurden die Ergebnisse der Untersuchung wochenweise mit einem entsprechenden Faktor hochgerechnet, um die Datenlücken auszugleichen. In Tabelle 4 sind die entsprechenden Faktoren je Wohnung aufgelistet.

Tabelle 4, Faktoren je Woche zum Ausgleich der Datenlücken.

Kalender- woche	Wohnung Holz Nord	Wohnung Holz Süd	Wohnung Leichtbeton Süd	Wohnung Mauerwerk Süd	Bemerkung
1	1,07	1,07	1,07	1,07	
2	-	-	-	-	Mittelwert KW 1 & 3
3	1,11	1,11	1,11	1,11	
4	1,11	1,11	1,11	1,12	
5	1,04	1,04	1,05	1,04	
6	1,04	1,04	1,04	1,04	
7	1,04	1,04	1,04	1,04	
8	1,05	1,05	1,05	1,05	
9	1,04	1,04	1,04	1,04	
10	1,04	1,04	1,04	1,07	
11	1,04	1,04	1,04	1,04	
12	1,04	1,04	1,04	1,05	
13	1,04	1,04	1,04	1,04	
14	1,04	1,04	1,04	1,04	
15	1,04	1,04	1,04	1,07	
16	1,08	1,08	1,08	1,08	
17	1,04	1,04	1,04	1,05	
18	1,04	1,04	1,06	1,07	
19	1,04	1,04	1,04	1,04	
20	1,04	1,04	1,04	1,08	
21	1,04	1,04	1,04	1,04	
22	1,04	1,04	1,04	1,04	
23	1,04	1,04	1,04	1,12	
24	1,04	1,04	1,08	1,05	
25	1,04	1,04	1,04	1,04	
26	1,56	1,56	1,56	1,56	
27	-	-	-	-	unberücksichtigt
28	-	-	-	-	unberücksichtigt
29	-	-	-	-	unberücksichtigt
30	-	-	-	-	unberücksichtigt
31	-	-	-	-	unberücksichtigt
32	1,36	1,36	1,43	1,39	
33	1,04	1,04	1,04	1,05	
34	1,04	1,04	1,04	1,13	
35	1,04	1,04	1,22	1,05	
36	1,05	1,05	1,05	1,05	
37	1,07	1,07	1,15	1,08	
38	1,04	1,04	1,04	1,04	
39	1,04	1,04	1,04	1,04	
40	1,04	1,04	1,04	1,04	

Kalender- woche	Wohnung Holz Nord	Wohnung Holz Süd	Wohnung Leichtbeton Süd	Wohnung Mauerwerk Süd	Bemerkung
41	1,04	1,04	1,04	1,20	
42	1,04	1,04	1,04	1,04	
43	1,04	1,04	1,04	1,04	
44	1,04	1,04	1,04	1,04	
45	1,04	1,04	1,04	1,04	
46	1,10	1,10	1,10	1,10	
47	1,04	1,04	1,04	1,04	
48	1,04	1,04	1,04	1,04	
49	1,04	1,04	1,04	1,04	
50	1,04	1,04	1,04	1,04	
51	1,04	1,04	1,04	1,04	
52	1,04	1,04	1,04	1,04	

Die meisten Hochrechnungsfaktoren lagen bei 1,04, aber es gab Ausreißer darüber, die farblich markiert sind. Ein Totalausfall der Daten trat in Kalenderwoche (KW) 2 auf. In KW 2 wurde daher ein Mittelwert aus KW 1 und KW 3 verwendet, um die Datenlücke auszugleichen. Die Totalausfälle in KW 27 - 31 fielen außerhalb der Heizperiode, daher sind diese Wochen für die Untersuchung nicht relevant und wurden nicht berücksichtigt.

2.1.6. Temperaturen Raumlufte und Heizkörper

Für die vier Wohnungen, für die ausreichend Daten für den Zeitraum vom 15.9.2021 bis 14.9.2022 vorhanden sind, konnte anhand der Temperatur der Raumlufte und der Heizkörper abgeleitet werden, wie die Bewohner geheizt haben. Die wöchentlichen Mittelwerte der vier Wohnungen im Bild 9 bis 12 zeigen unterschiedliches Heizverhalten, wobei die Heizperiode meist im Mai endet und im Oktober wieder beginnt.

Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Holz Nord [° C]

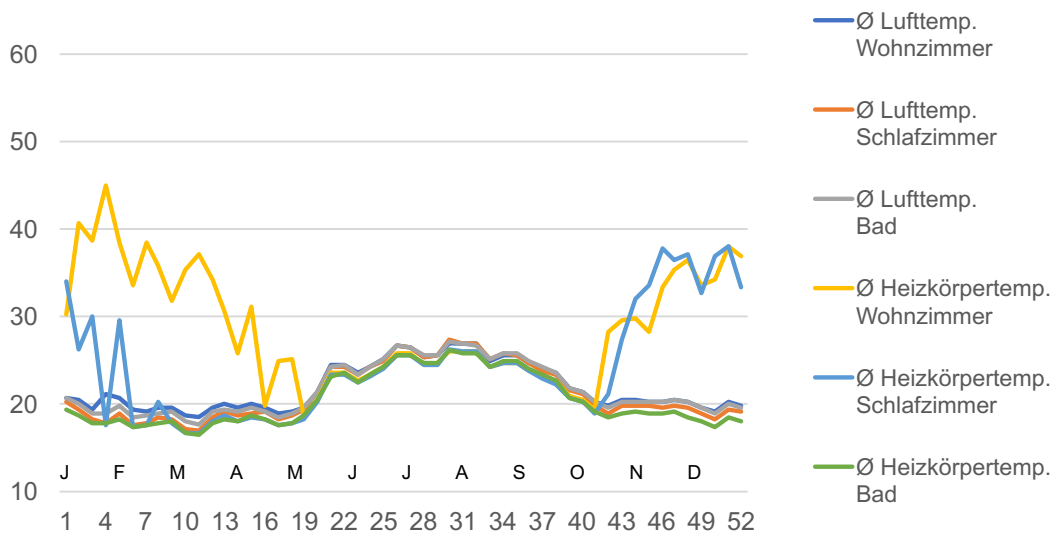


Bild 9, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Holz Nord [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Holz Süd [° C]

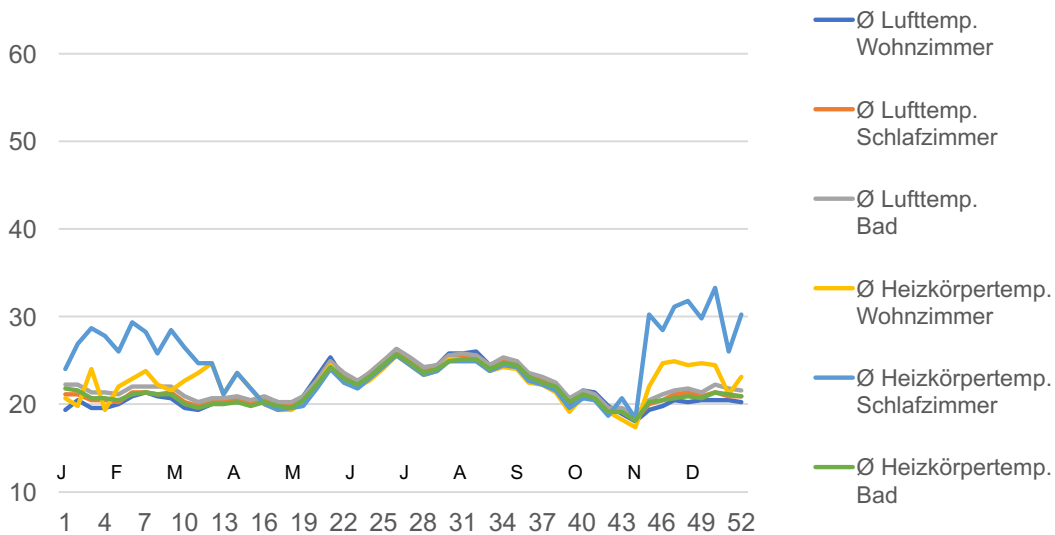


Bild 10, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Holz Süd [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Leichtbeton Süd [° C]

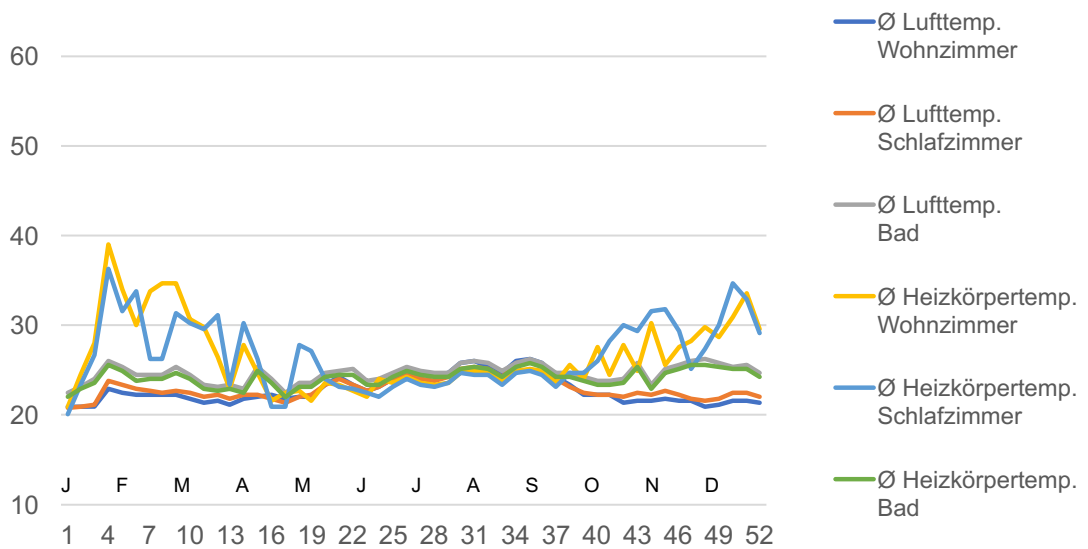


Bild 11, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Leichtbeton Süd [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Mauerwerk Süd [° C]

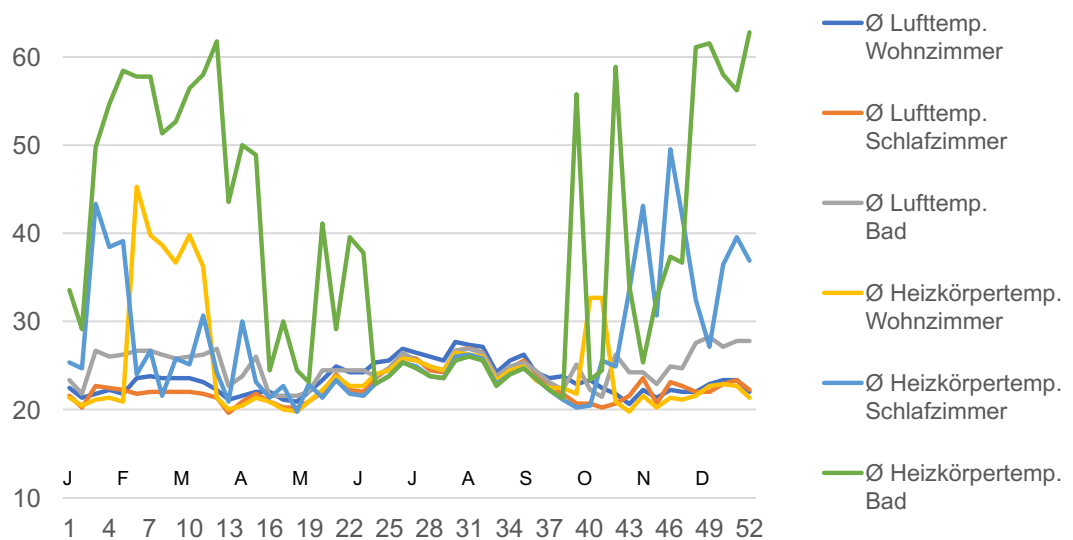


Bild 12, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Mauerwerk Süd [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

2.1.7. Heizung und Fensterlüftung

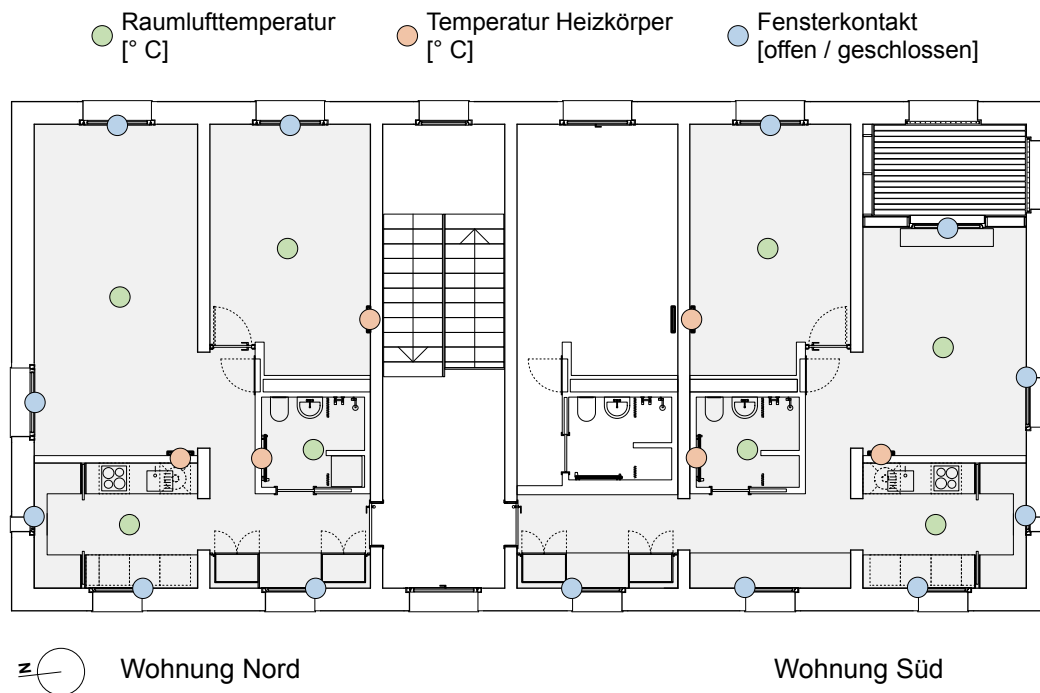


Bild 13, Betrachtete Sensoren in den Wohnungen: Raumlufttemperatur, Heizkörpertemperatur und Fensteröffnung, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München

Die Sensoren in den Wohnungen erfassten die Temperaturen der Raumluft und der Heizkörper sowie den Zustand der Fenster (geöffnet oder verschlossen) für jede Minute der Messungen im untersuchten Zeitraum. Es wurden die folgenden Zustände abgeleitet:

- "Lüftet": Mindestens 1 Fenster ist geöffnet.
- "Heizt": Mindestens 1 Heizkörper ist mehr als 2 °K wärmer als die Raumluft im entsprechenden Raum.
- "Heizlüftet": Es liegt eine Kombination von "Lüftet" und "Heizt" vor.

Die Verteilungen dieser Zustände je Wohnung über den Jahresverlauf zeigen unterschiedliche Verhaltensweisen der Bewohner, wie in Bild 14 bis 17 dargestellt.

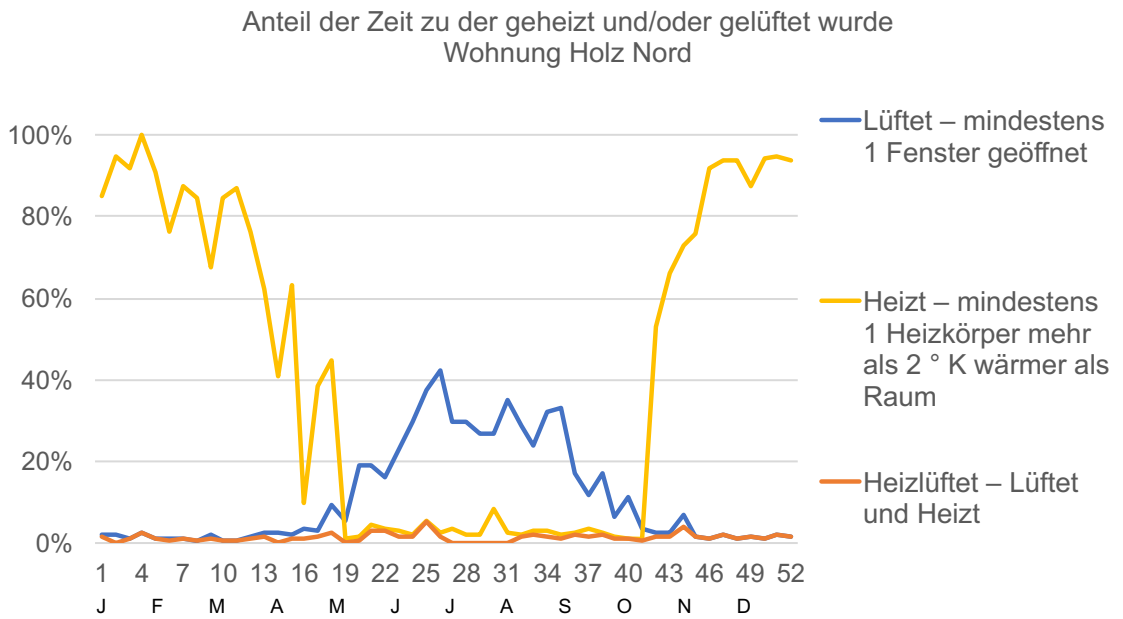


Bild 14, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Holz Nord, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

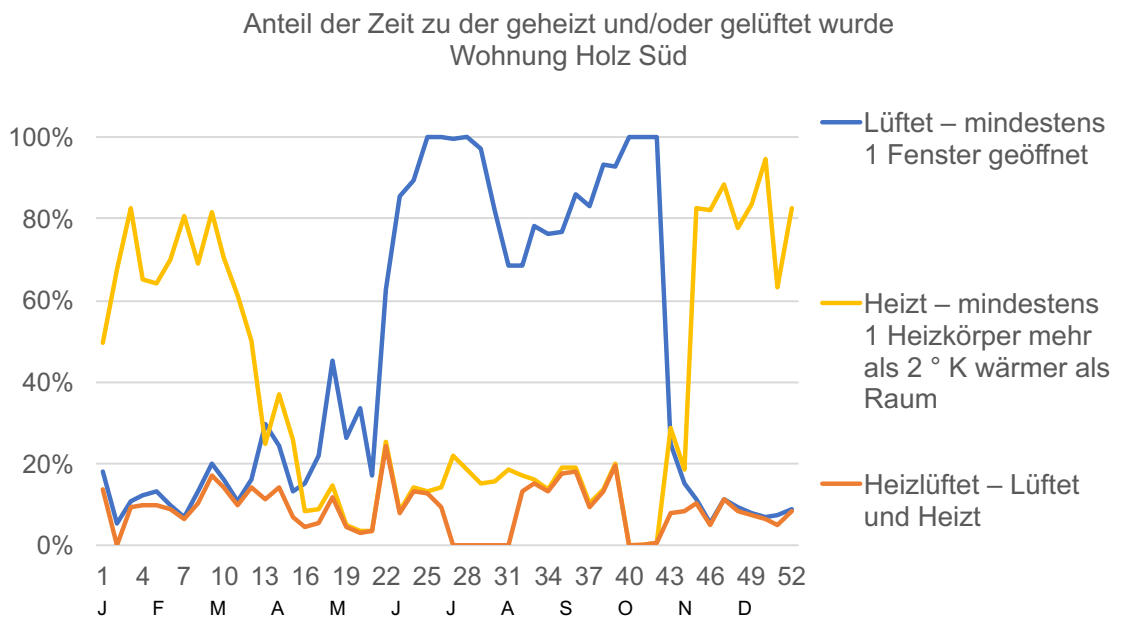


Bild 15, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Holz Süd, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde
Wohnung Leichtbeton Süd

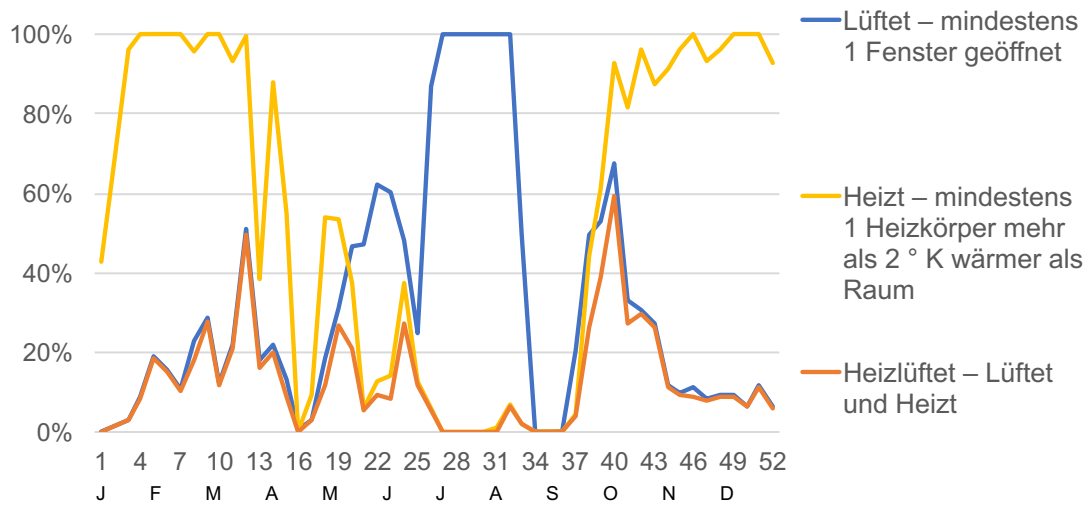


Bild 16, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Leichtbeton Süd, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde
Wohnung Mauerwerk Süd

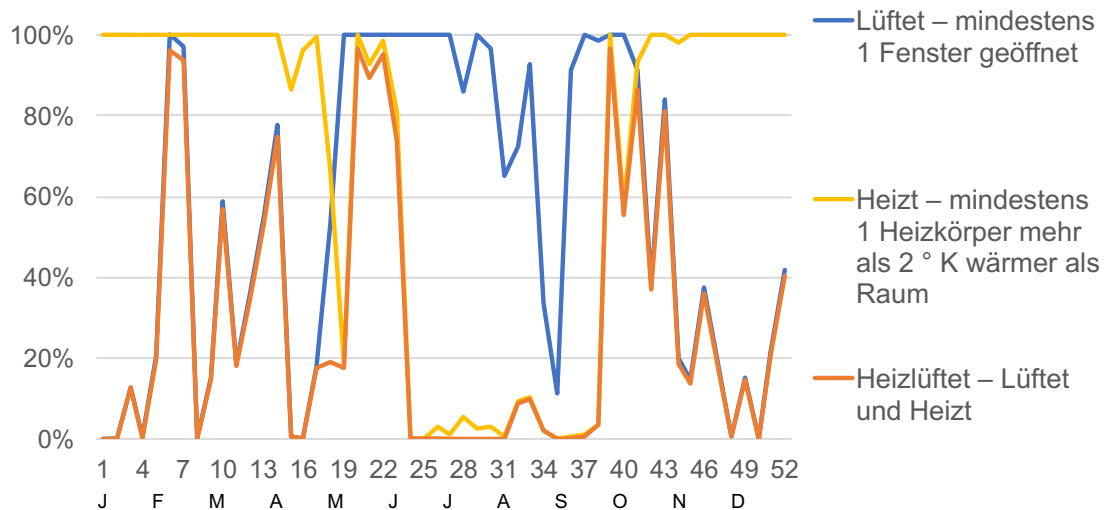


Bild 17, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Mauerwerk Süd, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Die Daten wurden auf die Minutenabschnitte reduziert, in denen gelüftet und geheizt wurde. In Tabelle 5 ist die verbleibende Anzahl von Datensätzen je Wohnung dargestellt.

Tabelle 5, Anzahl der Datensätze bei denen gleichzeitig geheizt und über die Fenster gelüftet wurde

Wohnung	Anzahl Datensätze	Anteil ganzes Jahr
Holz Nord	2.504	0,5 %
Holz Süd	16.751	3,2 %
Leichtbeton Süd	51.807	9,8 %
Mauerwerk Süd	134.315	25,6 %

2.2. Methodik

2.2.1. Luftwechsel über die Fenster

Um den Luftwechsel über geöffnete Fenster abzuschätzen, werden seit Ende der 1980er mathematische Gleichungen verwendet. Zur Berechnung müssen Windgeschwindigkeit, Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft sowie die wirksame Fensteröffnungsfläche bekannt sein. Der Einfluss dieser Größen auf den Luftwechsel wurde über zahlreiche empirische Messungen validiert. Dabei wird zwischen einseitiger und mehrseitiger Fensterlüftung unterschieden [Phaff et al. 1980] [Wouters et al. 1987]

Weitere Einflussgrößen wie Windrichtung, Fensterleibung und der Einfluss von Heizkörpern unter dem Fenster wurden später durch Messungen in Versuchsräumen und in Windkanälen untersucht. Die gefundenen Zusammenhänge waren jedoch aufgrund der Komplexität von Strömungsvorgängen nur bedingt verallgemeinerbar. [Maas 1995] [Richter et al. 2003] [Larsen 2006]

Inzwischen wurden auch Algorithmen entwickelt, um im Rahmen von computergestützten dreidimensionalen spezifischer Berechnungen und Simulationen eine höhere Genauigkeit im Vergleich zu den empirischen Gleichungen zu ermöglichen. [Freire et al. 2009] [Khalifa et al. 2015]

Die Nutzung eines Simulationstools zur Untersuchung wurde in Betracht gezogen, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Allerdings wurden keine detaillierten Daten zum Nutzerstromverbrauch, zur Anwesenheit, zum Wolkenbedeckungsgrad oder der Stellung der Türen ermittelt bzw. die durchgeführten Messungen waren nicht erfolgreich. Diese Werte hätten durch Annahmen ersetzt werden müssen, was wiederum die Genauigkeit der Simulation beeinträchtigt hätte. [Ficht 2022] [Kargruber 2022]

Da bereits die Kombination von Fensterlüftungsverhalten und Heizkörpertemperatur dazu verwendet wurde, die Lüftungsvorgänge zu identifizieren, bei denen gleichzeitig auch geheizt wurde, und zusätzlich der Energieverbrauch für die Raumerwärmung während des Messzeitraums gemessen werden konnte, wurde für die Untersuchung die Methode der empirisch validierten Gleichungen gewählt. Die Ergebnisse wurden dann mit den parallel gemessenen Energieverbräuchen für die Raumerwärmung verglichen.

Die Berechnung erfolgte unter Verwendung der Gleichungen im Anhang G "Berechnung von Luftvolumenströmen durch offene Fenster" der Norm [DIN/TS 4108-8:2022-09].

Der thermisch induzierte Luftwechsel, also der Luftaustausch, der durch die Temperaturunterschiede zwischen Außenluft und Raumluft entsteht, kann mithilfe folgender Gleichungen abgeschätzt werden, wenn nur eine Fassadenseite mit einem oder mehreren Fenstern gelüftet wird [DIN/TS 4108-8:2022-09]:

$$q_{v,Fe,Fas1,th} = \frac{1}{3} \cdot C_D \cdot A_{Fe,Fas1} \sqrt{\frac{g \cdot h_1 \cdot \Delta\theta}{T_e}} \cdot 3.600 \frac{s}{h} \quad (\text{Gleichung 1a})$$

Für den Fall, dass über zwei Fassadenseiten gelüftet wird [DIN/TS 4108-8:2022-09]:

$$q_{v,Fe,1-2,th} = C_D \cdot A_{eff} \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_{1-2} \cdot \Delta\theta}{T_e}} \cdot 3.600 \frac{s}{h} \quad (\text{Gleichung 1b})$$

Dabei ist

$q_{v,Fe,Fas1,th}$ der thermisch induzierte Luftvolumenstrom des Raumes bei einseitiger Lüftung durch die Öffnungsfläche $A_{Fe,Fas1}$ in m^3/h ;

$q_{v,Fe,1-2,th}$ der thermisch induzierte Luftvolumenstrom des Raumes bei gemeinsamer Durchströmung (zweiseitiger Lüftung) durch die Öffnungsfläche A_{eff} in m^3/h ;

$A_{Fe,Fas1}$ die Öffnungsfläche der Fenster im Raum der Fassadengruppe 1

A_{eff} die wirksame Öffnungsfläche bei gemeinsamer Durchströmung (zweiseitiger Lüftung) im Raum

C_D die Durchflusszahl (Standardwert: $C_D = 0,61$);

g die Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);

h_1 die Höhe der Fensteröffnungen von Unter- bis Oberkante in Fassadengruppe 1 in m;

h_{1-2} der Höhenunterschied zwischen den Öffnungen der Fassadengruppe 1 und 2 in m, der Höhenunterschied ist aus dem Flächenschwerpunkten y_1 und y_2 der Öffnungen für Fassadengruppe 1 und für Fassadengruppe 2 zu ermitteln;

$\Delta\theta$ die Temperaturdifferenz der Luft zwischen innen und außen in K;

T_e die Absoluttemperatur der Außenluft, in K, ($T_e = \theta_e + 273 \text{ K}$).

Der windinduzierte Luftwechsel, also der Luftaustausch, der durch Windbewegungen verursacht wird, kann mithilfe folgender Gleichungen abgeschätzt werden, wenn nur eine Fassadenseite mit einem oder mehreren Fenstern gelüftet wird [DIN/TS 4108-8:2022-09]:

$$q_{v,Fas1,w} = b' \cdot A_{Fe,Fas1} \cdot v_{Fas} \cdot 3.600 \frac{\text{S}}{\text{h}} \quad (\text{Gleichung 2a})$$

Für den Fall, dass über zwei Fassadenseiten gelüftet wird [DIN/TS 4108-8:2022-09]:

$$q_{v,Fe,1-2,w} = C_D \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{\Delta C_P} \cdot v_{Fas} \cdot 3.600 \frac{\text{S}}{\text{h}} \quad (\text{Gleichung 2b})$$

Dabei ist

$q_{v,Fe,Fas1,w}$ der windinduzierte Luftvolumenstrom des Raumes bei einseitiger Lüftung durch die Öffnungsfläche $A_{Fe,Fas1}$, in m^3/h ;

$q_{v,Fe,1-2,w}$ der thermisch induzierte Luftvolumenstrom des Raumes bei gemeinsamer Durchströmung (zweiseitiger Lüftung) durch die Öffnungsfläche A_{eff} , in m^3/h ;

b' der Beiwert (Standardwert: $b' = 0,05$);

v_{Fe} lokale Windgeschwindigkeit an der Fassade, in m/s. Vereinfachend gilt:

$$v_{Fe} = \max \left(0; \frac{\ln(H_{Grund.Zone}/Z_{0,Standort})}{\ln(H_{Grund.80}/Z_{0,Standort})} \cdot 1,36 \cdot v_{meteo} \right) \text{ in m/s}$$

Hierbei bedeuten:

$H_{Grund.Zone}$ Mittlere Höhe des Fensters über Terrain, in m;

$H_{Grund.80}$ Bezugshöhe über Grund ($H_{Grund.80} = 80 \text{ m}$);

$Z_{0,Standort}$ Rauheitsparameter für örtliche Windgeschwindigkeiten an der Fassade, in m

- keine Abschirmung (offene Lage): 0,03 m
- mittlere Abschirmung (normale Lage): 0,25 m
- starke Abschirmung (abgeschirmte Lage): 0,50 m

v_{meteo} meteorologische Windgeschwindigkeit, gemessen in 10 m Höhe in offener Lage, in m/s. Für die Untersuchung wurden die vor Ort von der Wetterstation in ca. 15 m gemessenen Wert eingesetzt.

Es wird angenommen, dass sich der thermisch induzierte und der windinduzierte Lüftungsstrom nicht ungestört überlagern, sondern sich gegenseitig beeinflussen. Dies wird in der Norm mit folgender Gleichung beschrieben [DIN/TS 4108-8:2022-09]:

$$q_{v,Fe} = \sqrt{q_{v,Fe,th}^2 + q_{v,Fe,w}^2} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Dabei ist

$q_{v,Fe}$ der gesamte Luftvolumenstrom Fenster, in m³/h;

$q_{v,Fe,th}$ der thermisch induzierte Luftvolumenstrom Fenster, in m³/h;

$q_{v,Fe,w}$ der windinduzierte Luftvolumenstrom Fenster, in m³/h.

Die geometrischen Parameter der Fenster dienen als Eingangswerte für die Formeln zur Abschätzung des thermisch induzierten und des windinduzierten Luftwechsels. In den Abbildungen 18 bis 29 sind die verschiedenen Fenstertypen dargestellt, die in den vier untersuchten Wohnungen vorkommen. Dabei sind lediglich die für die Abschätzung relevanten Maße eingetragen.

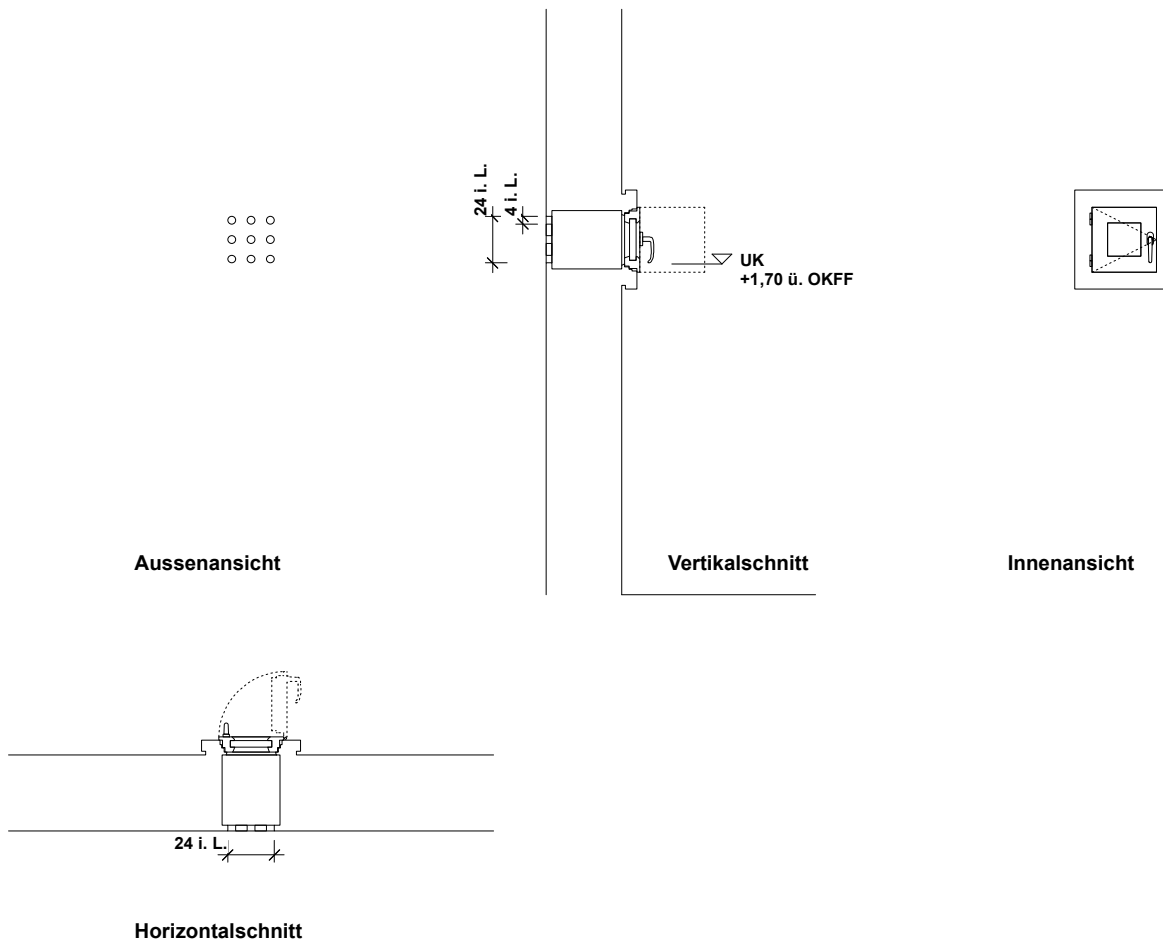


Bild 18, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Guckerl“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 6, Eingangsparameter „Guckerl“, Gebäude Holz

$h_{Brüstung}$	1,70 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,24 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	0,24 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
y_{Fe}	1,82 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche = $h_{Brüstung} + h/2$
x	0,04 m	Höhe Lamellen aus Zeichnung
n	3 St.	Anzahl Lamellen aus Zeichnung
A_{Fe}	0,04 m ²	Lüftungsfläche, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Lamellenfenster: $= \max \left(0; \min \left(b \cdot \frac{(h-n \cdot 0,002 \text{ m}) + (\frac{h}{n} - 0,002 \text{ m})}{2}; b \cdot (x \cdot 2) \cdot n \right) \right),$
y_{Fe}	1,82 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche = $h_{Brüstung} + h/2$

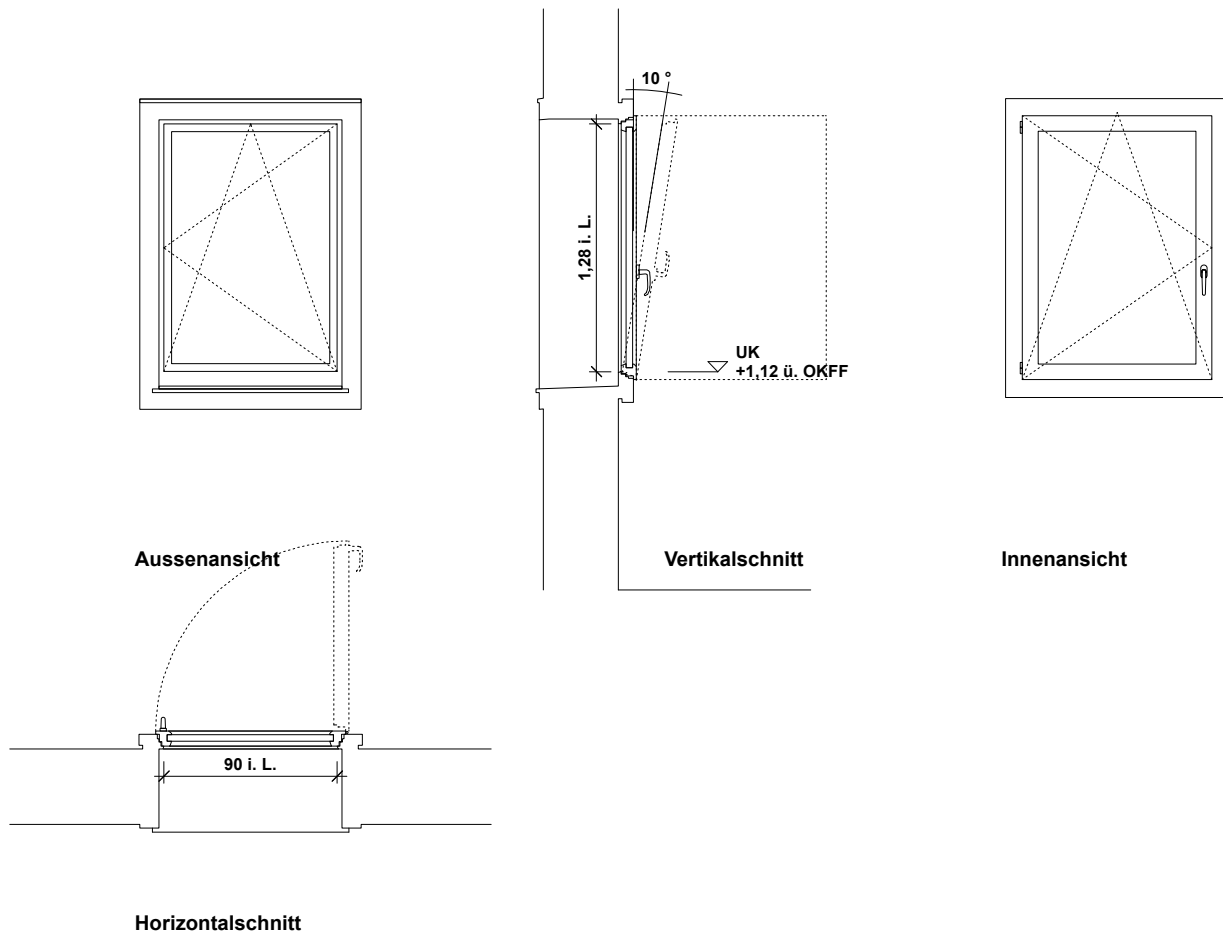


Bild 19, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Mittelgroß“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 7, Eingangsparameter „Mittelgroß“, Gebäude Holz

$h_{\text{Brüstung}}$	1,12 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,90 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	1,28 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
$A_{\text{Fe,offen}}$	1,15 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $b \cdot h$
$y_{\text{Fe,offen}}$	1,76 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{\text{Brüstung}} + h/2$
α	10 °	Winkel in Stellung aus Zeichnung
$A_{\text{Fe,kipp}}$	0,2 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster = $C_{\text{korrr}} \cdot b \cdot h$, mit $C_{\text{korrr}} = 2,60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1,86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$,
$y_{\text{Fe,kipp}}$	2,11 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster: $= \sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \tan \alpha}} + h_{\text{Brüstung}}$

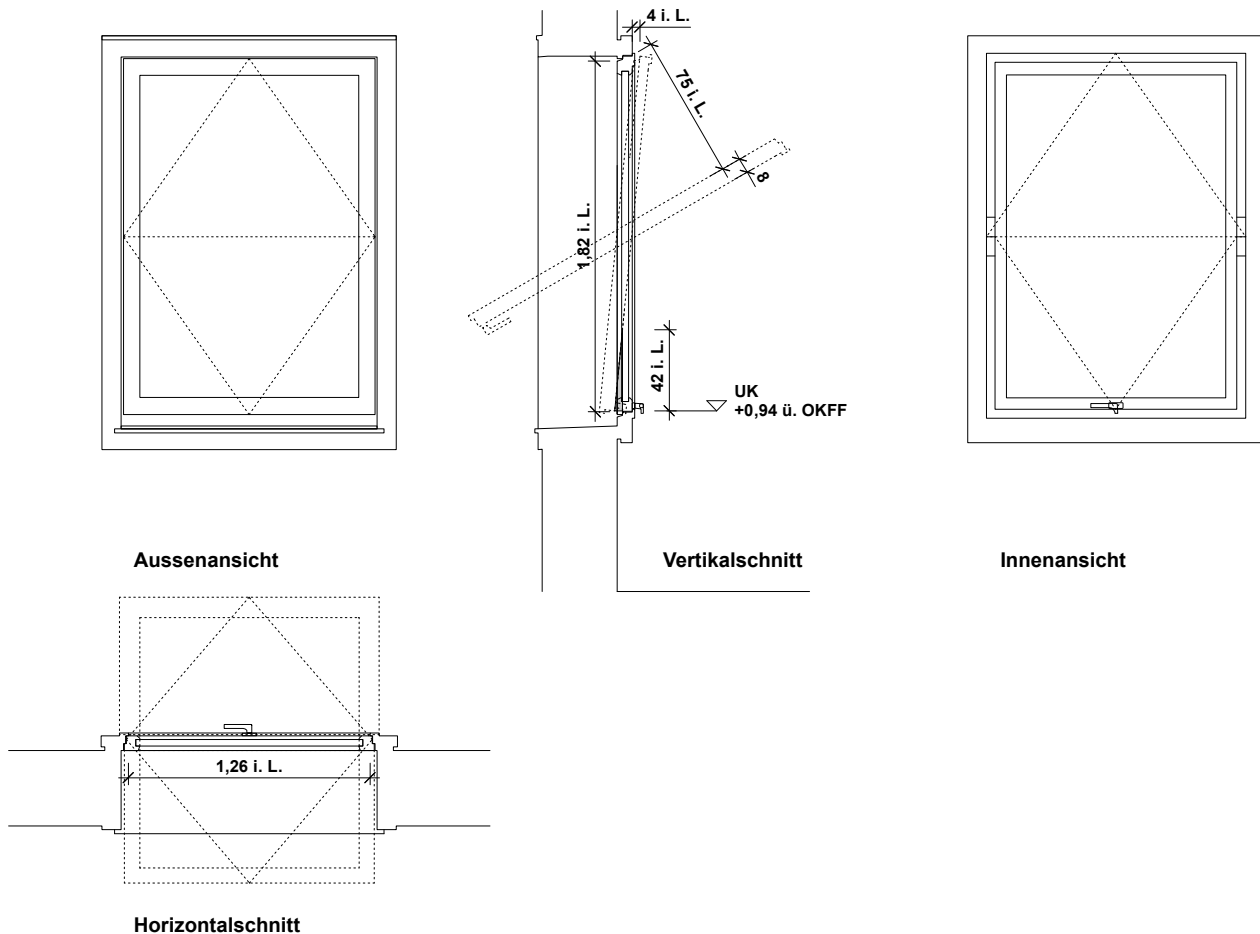
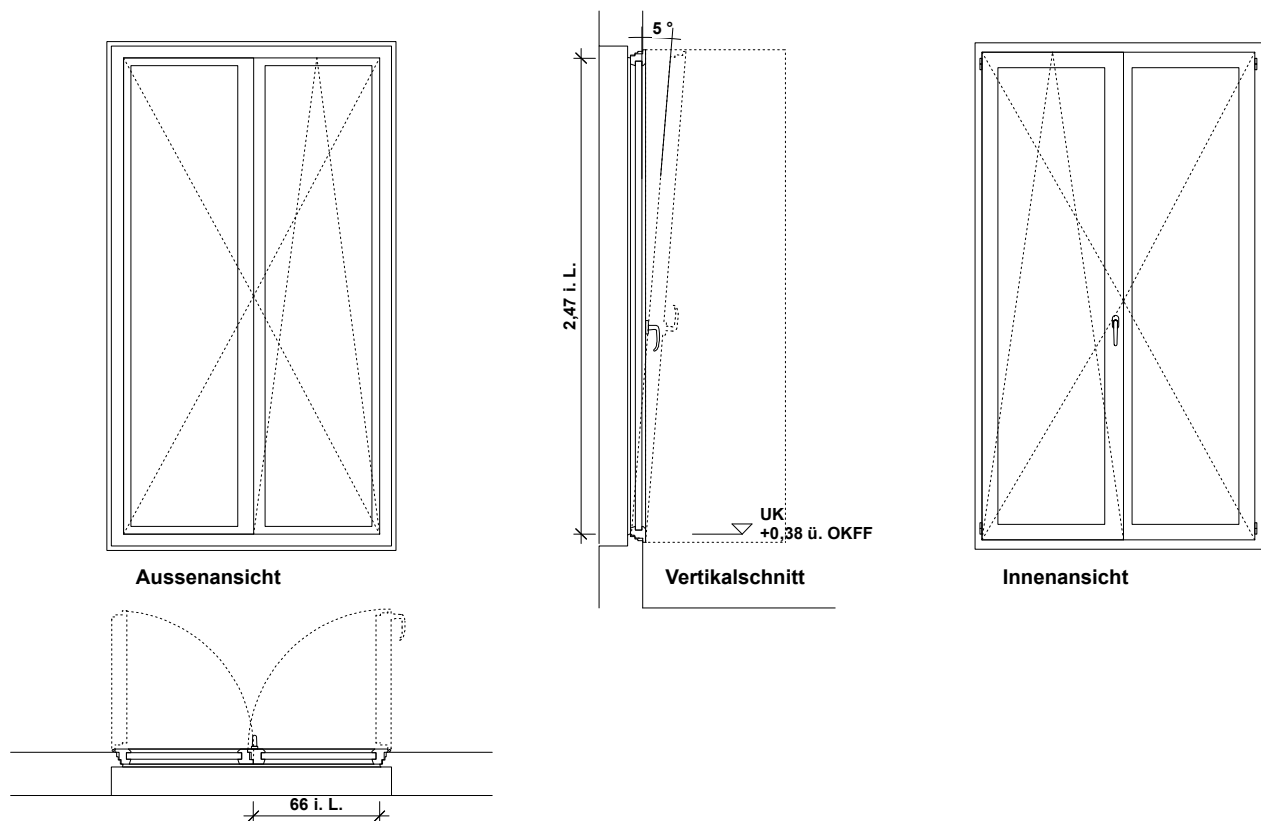


Bild 20, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Schwingflügel Fenster“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 8, Eingangsparameter „Schwingflügel Fenster“, Gebäude Holz

$h_{Brüstung}$	0,94 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	1,26 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	1,82 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
d	0,08 m	Dicke Schwingflügel Fenster aus Zeichnung
x_{offen}	0,75 m	Höhe von Schwingflügel bis Fensterstock bei Stellung „offen“ aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	2,19 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Schwingflügel Fenster, mit $x = x_{offen}$: $= \min \left(2 \left(x \cdot (b - 2d) + x \cdot \sqrt{\left(\frac{h}{2} \cdot \frac{1}{1 + d/x} \right)^2 - 0,25x^2} \right); (h - d) \cdot b \right)$
$y_{Fe,offen}$	1,85 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
x_{kipp}	0,04 m	Höhe von Schwingflügel bis Fensterstock bei Stellung „kipp“ aus Zeichnung
$A_{Fe,kipp}$	0,11 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Schwingflügel Fenster, (siehe $A_{Fe,offen}$) mit $x = x_{kipp}$
$y_{Fe,kipp}$	1,85 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$



Horizontalschnitt

Bild 21, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Loggiatür“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 9, Eingangsparameter „Loggiatür“, Gebäude Holz

$h_{Brüstung}$	0,38 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,66 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	2,47 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	1,63 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $b \cdot h$
$y_{Fe,offen}$	1,62 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
α	5 °	Winkel in Stellung aus Zeichnung
$A_{Fe,kipp}$	0,15 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster = $C_{korrr} \cdot b \cdot h$, mit $C_{korrr} = 2,60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1,86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$,
$y_{Fe,kipp}$	1,91 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster: $= \sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \tan \alpha}} + h_{Brüstung}$

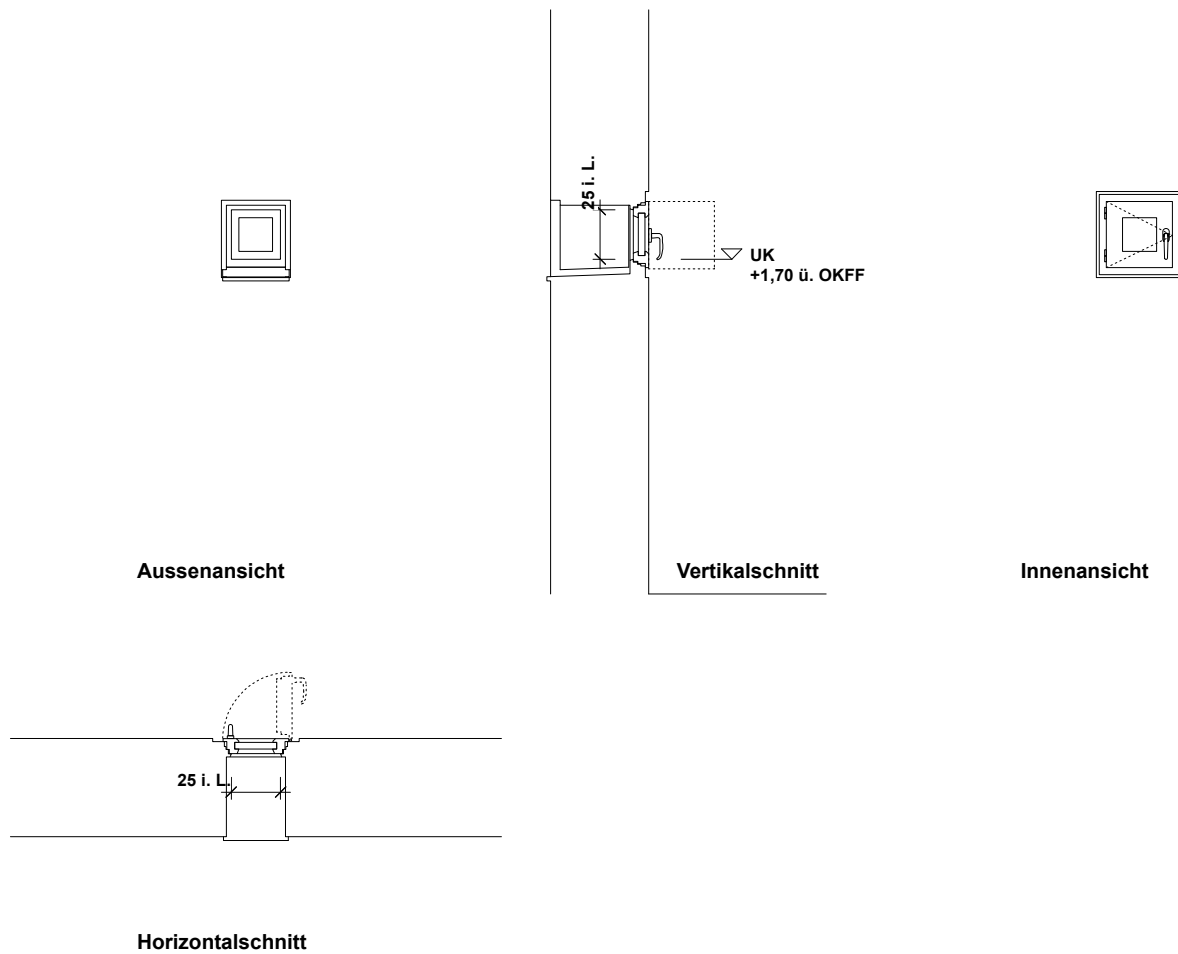


Bild 22, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Guckerl“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 10, Eingangsparameter „Guckerl“, Gebäude Leichtbeton

$h_{Brüstung}$	1,70 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,25 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	0,25 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
A_{Fe}	0,06 m ²	Lüftungsfläche = $b \cdot h$
y_{Fe}	1,82 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche = $h_{Brüstung} + h/2$

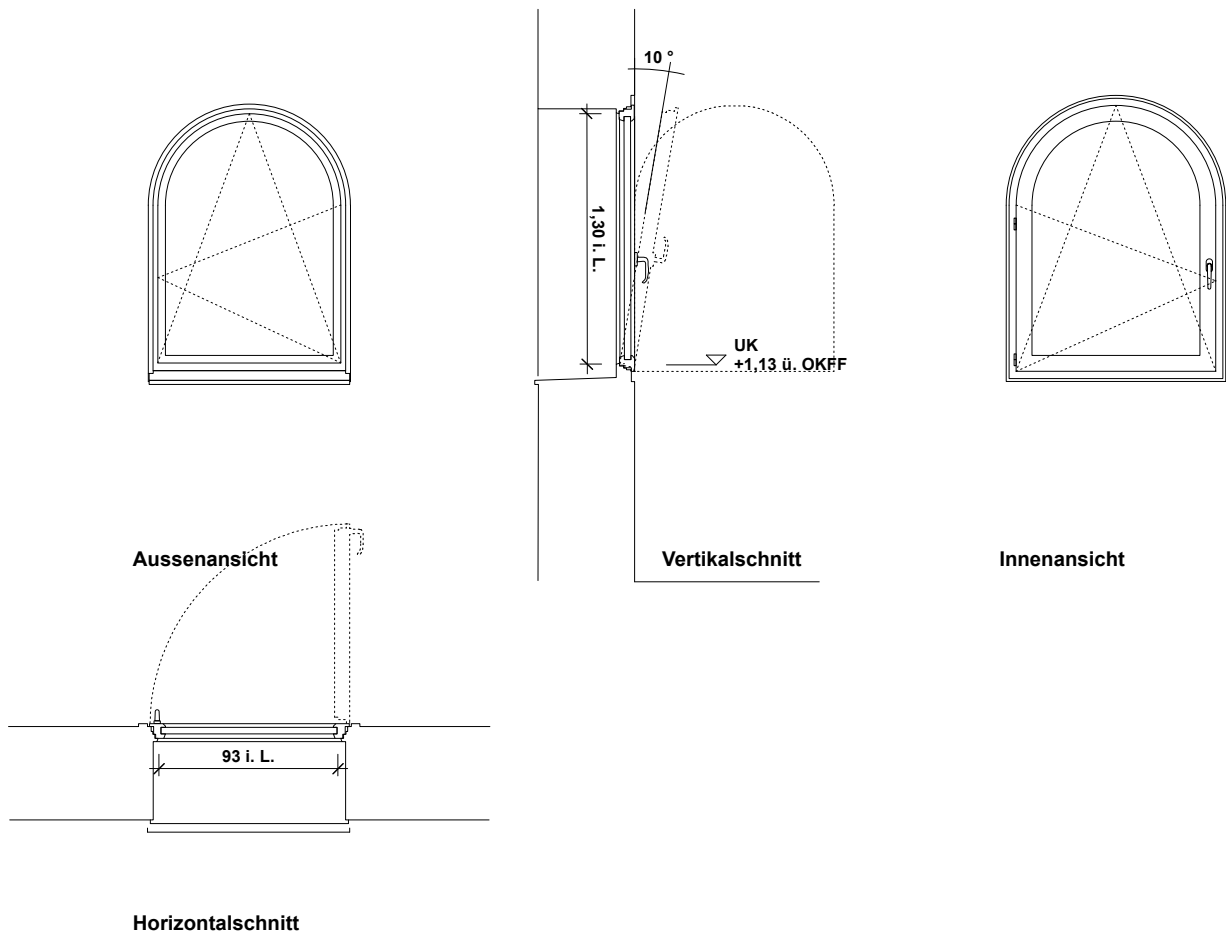


Bild 23, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Mittelgroß“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 11, Eingangsparameter „Mittelgroß“, Gebäude Leichtbeton

$h_{Brüstung}$	1,13 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,93 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	1,30 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	1,21 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $b \cdot h$
$y_{Fe,offen}$	1,78 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
α	10 °	Winkel in Stellung aus Zeichnung
$A_{Fe,kipp}$	0,21 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster = $C_{korrr} \cdot b \cdot h$, mit $C_{korrr} = 2,60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1,86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$,
$y_{Fe,kipp}$	2,14 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster: $= \sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \tan \alpha}} + h_{Brüstung}$

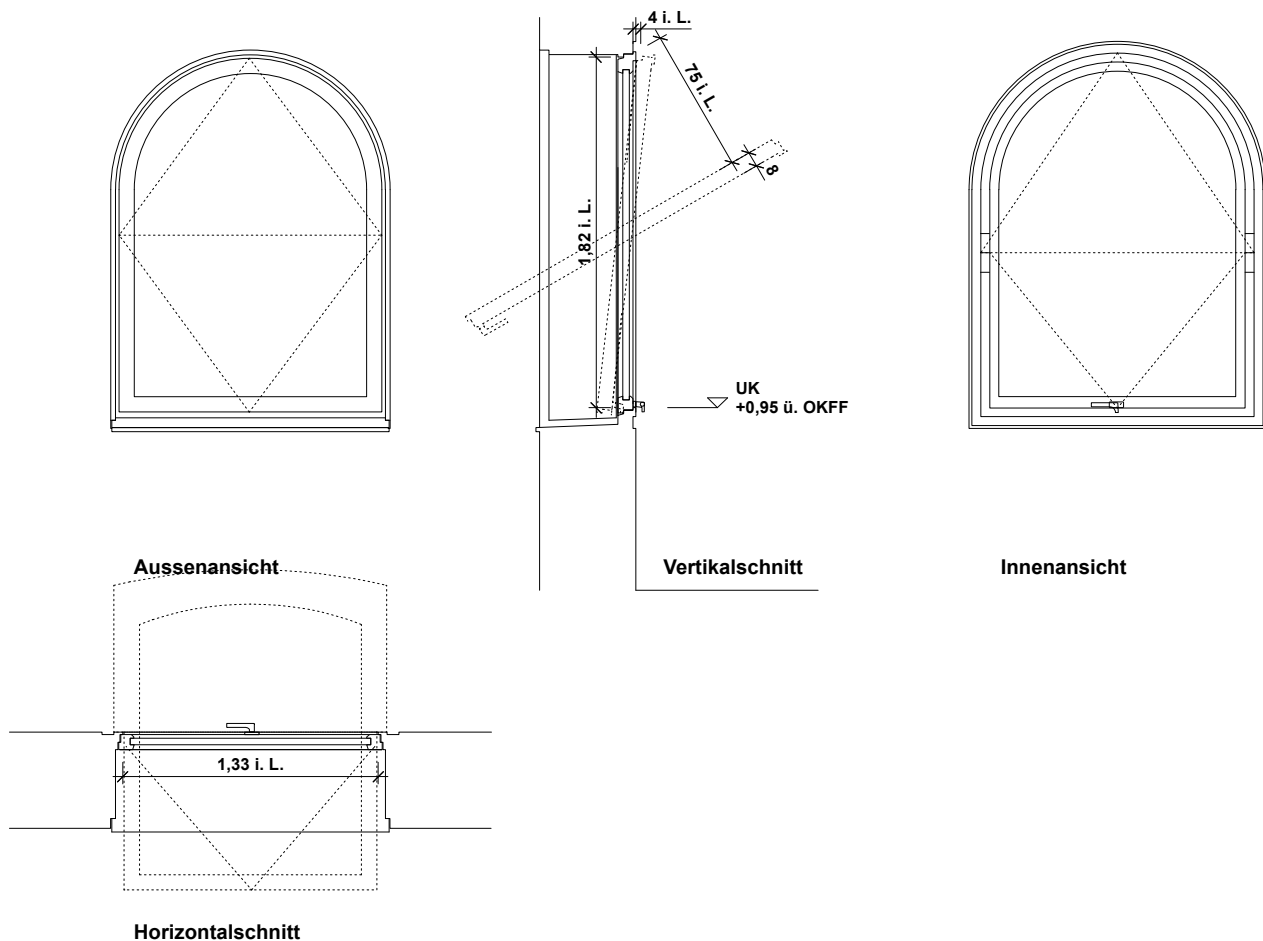
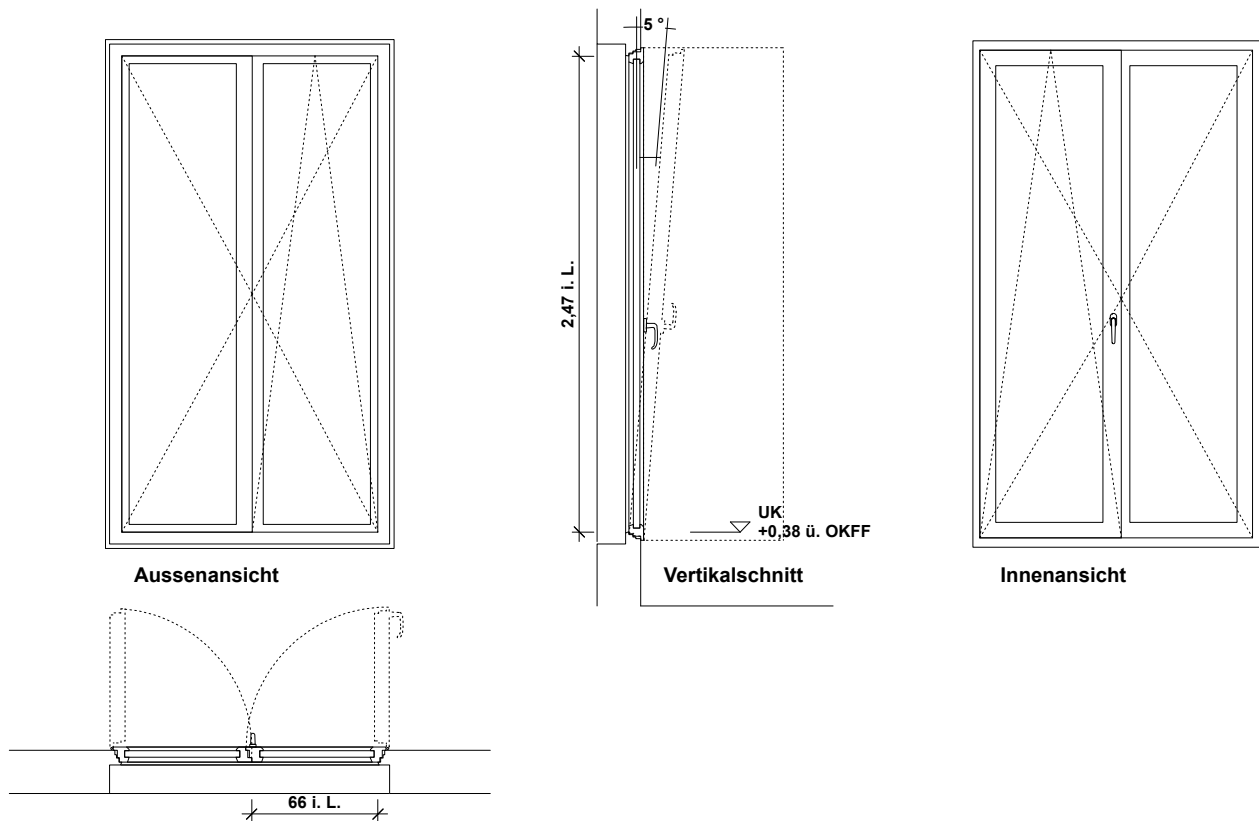


Bild 24, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Schwingflügel Fenster“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 12, Eingangsparameter „Schwingflügel Fenster“, Gebäude Leichtbeton

$h_{Brüstung}$	0,95 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	1,33 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	1,82 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
d	0,08 m	Dicke Schwingflügel Fenster aus Zeichnung
x_{offen}	0,75 m	Höhe von Schwingflügel bis Fensterstock bei Stellung „offen“ aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	2,31m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Schwingflügel Fenster, mit $x = x_{offen}$: $= \min \left(2 \left(x \cdot (b - 2d) + x \cdot \sqrt{\left(\frac{h}{2} \cdot \frac{1}{1 + d/x} \right)^2 - 0,25x^2} \right); (h - d) \cdot b \right)$
$y_{Fe,offen}$	1,86 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
x_{kippen}	0,04 m	Höhe von Schwingflügel bis Fensterstock bei Stellung „kippen“ aus Zeichnung
$A_{Fe,kippen}$	0,12 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Schwingflügel Fenster, (siehe $A_{Fe,offen}$) mit $x = x_{kippen}$
$y_{Fe,kippen}$	1,86 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$



Horizontalschnitt

Bild 25, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Loggiatür“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 13, Eingangsparameter „Loggiatür“, Gebäude Leichtbeton

$h_{Brüstung}$	0,38 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,66 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	2,47 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	1,63 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $b \cdot h$
$y_{Fe,offen}$	1,62 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
α	5 °	Winkel in Stellung aus Zeichnung
$A_{Fe,kipp}$	0,15 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster = $C_{korrr} \cdot b \cdot h$, mit $C_{korrr} = 2,60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1,86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$,
$y_{Fe,kipp}$	1,91 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster: $= \sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \tan \alpha}} + h_{Brüstung}$

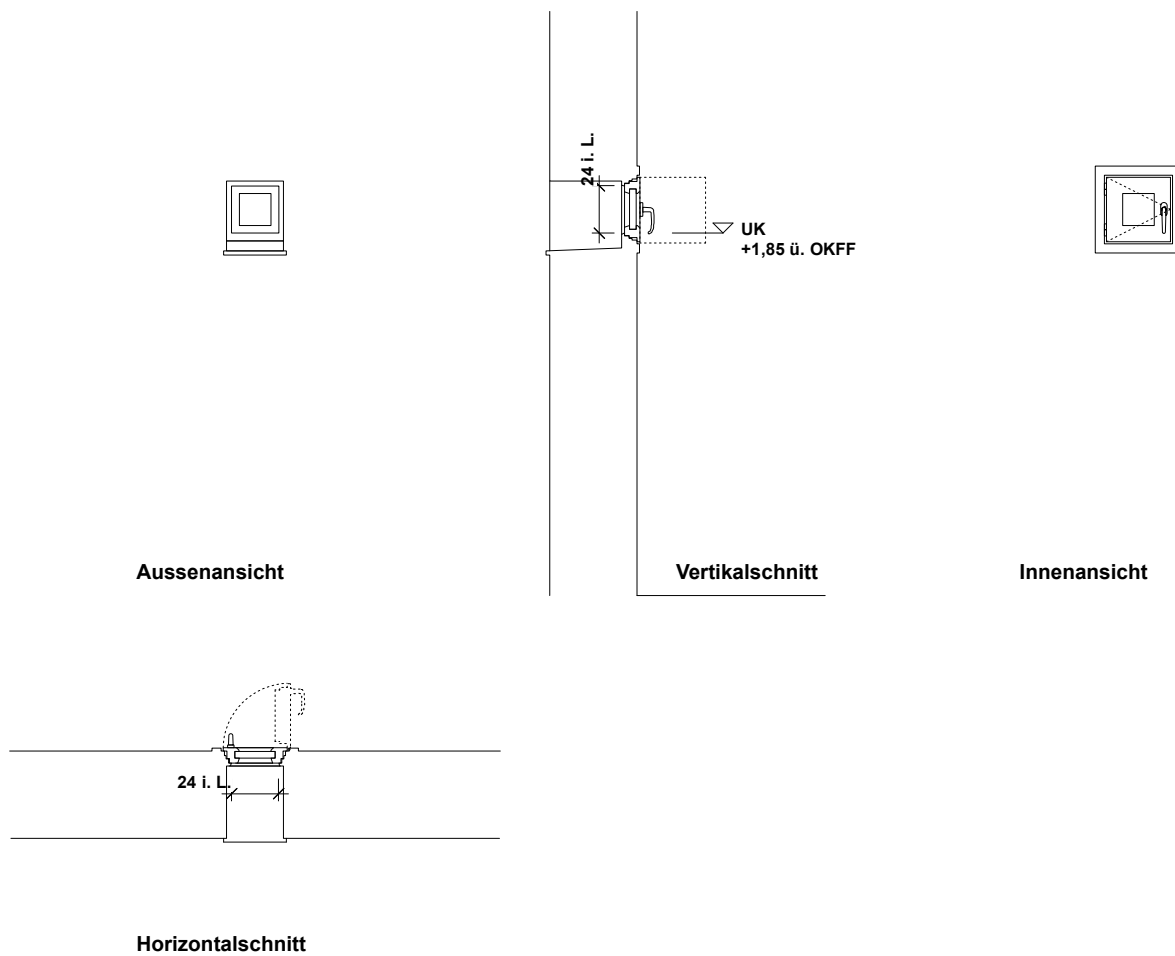


Bild 26, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Guckerl“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 14, Eingangsparameter „Guckerl“, Gebäude Mauerwerk

$h_{Brüstung}$	1,85 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,24 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	0,24 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
A_{Fe}	0,06 m ²	Lüftungsfläche = $b \cdot h$
y_{Fe}	1,97 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche = $h_{Brüstung} + h/2$

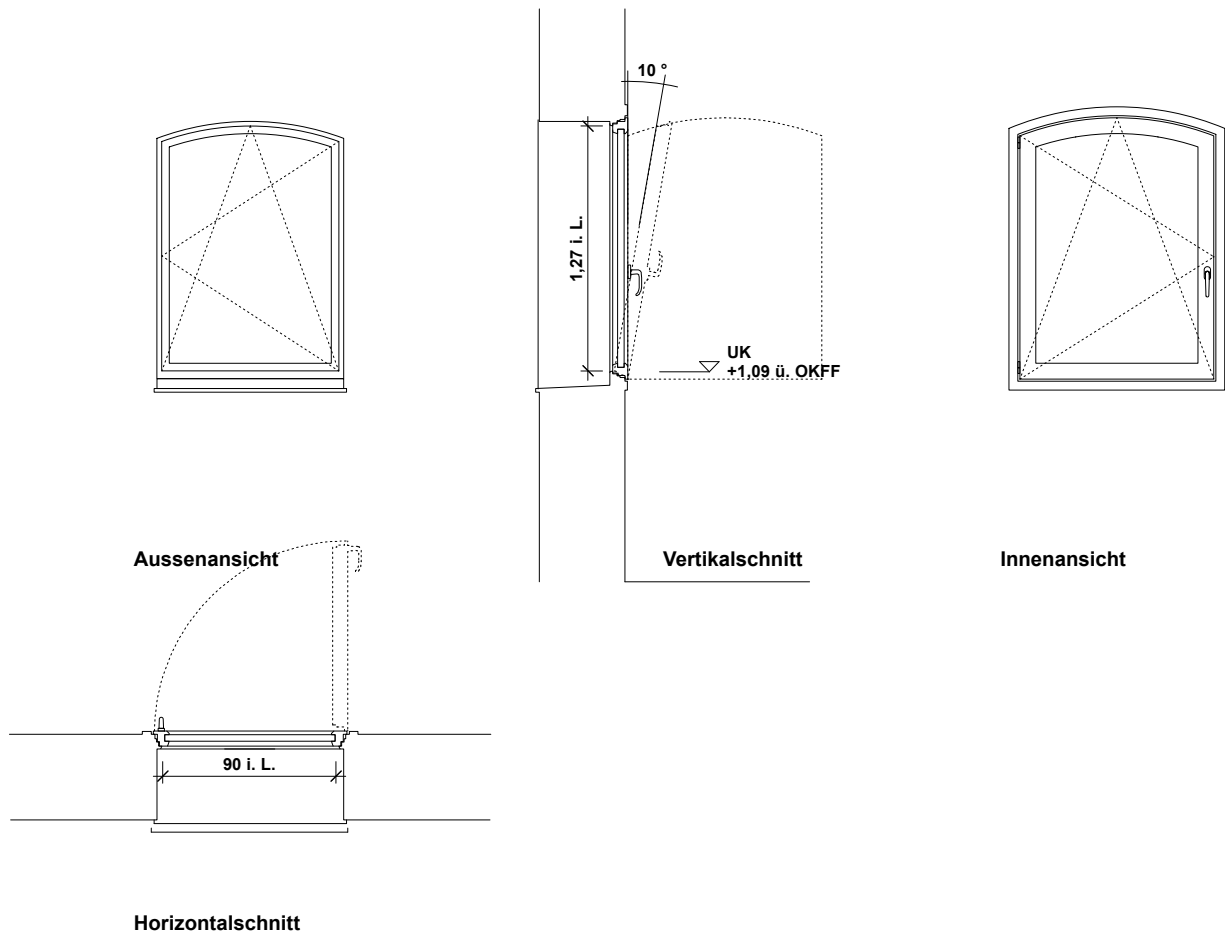


Bild 27, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Mittelgroß“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 15, Eingangsparameter „Mittelgroß“, Gebäude Mauerwerk

$h_{Brüstung}$	1,09 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,90 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	1,27 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	1,14 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $b \cdot h$
$y_{Fe,offen}$	1,72 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
α	10 °	Winkel in Stellung aus Zeichnung
$A_{Fe,kipp}$	0,20 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster = $C_{korrr} \cdot b \cdot h$, mit $C_{korrr} = 2,60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1,86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$,
$y_{Fe,kipp}$	2,07 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster: $= \sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \tan \alpha}} + h_{Brüstung}$

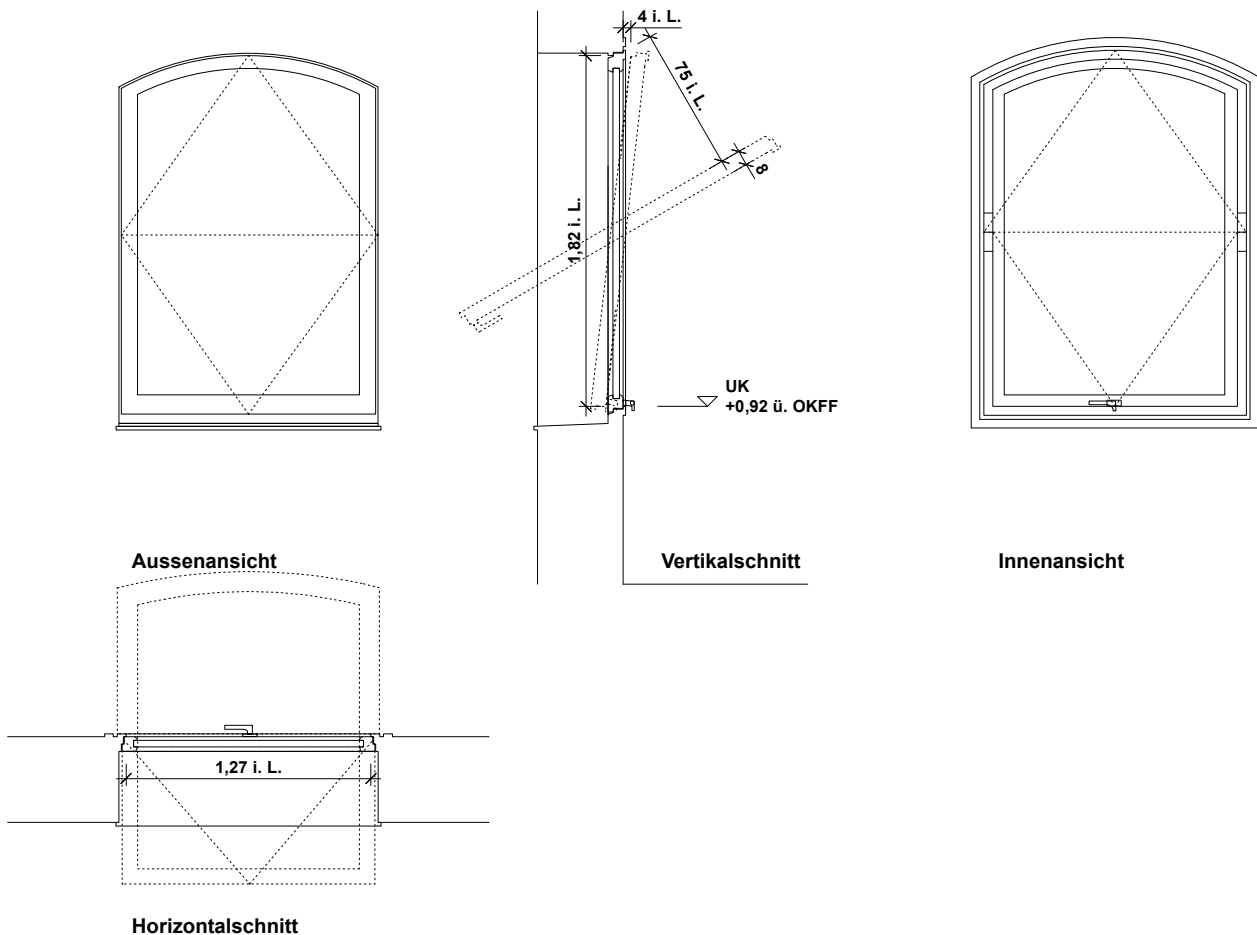
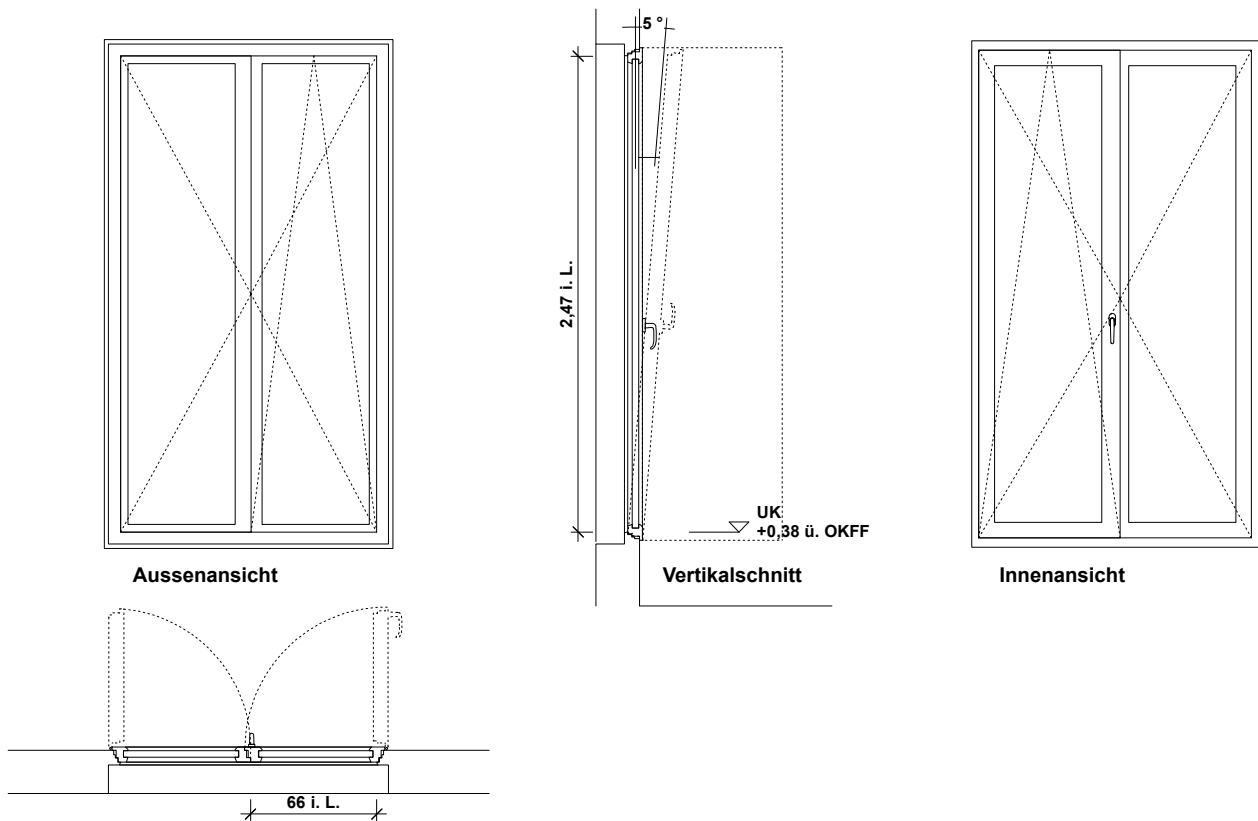


Bild 28, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Schwingflügel Fenster“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 16, Eingangsparameter „Schwingflügel Fenster“, Gebäude Mauerwerk

$h_{Brüstung}$	0,92 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	1,27 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	1,82 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
d	0,08 m	Dicke Schwingflügel Fenster aus Zeichnung
x_{offen}	0,75 m	Höhe von Schwingflügel bis Fensterstock bei Stellung „offen“ aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	2,21m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Schwingflügel Fenster, mit $x = x_{offen}$: $= \min \left(2 \left(x \cdot (b - 2d) + x \cdot \sqrt{\left(\frac{h}{2} \cdot \frac{1}{1 + d/x} \right)^2 - 0,25x^2} \right); (h - d) \cdot b \right)$
$y_{Fe,offen}$	1,83 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
x_{kipp}	0,04 m	Höhe von Schwingflügel bis Fensterstock bei Stellung „kipp“ aus Zeichnung
$A_{Fe,kipp}$	0,11 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Schwingflügel Fenster, (siehe $A_{Fe,offen}$) mit $x = x_{kipp}$
$y_{Fe,kipp}$	1,83 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$



Horizontalschnitt

Bild 29, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Loggiatür“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Tabelle 17, Eingangsparameter „Loggiatür“, Mauerwerk

$h_{Brüstung}$	0,38 m	Höhe Brüstung aus Zeichnung
b	0,66 m	Breite Lüftungsfläche aus Zeichnung
h	2,47 m	Höhe Lüftungsfläche aus Zeichnung
$A_{Fe,offen}$	1,63 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $b \cdot h$
$y_{Fe,offen}$	1,62 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „offen“ = $h_{Brüstung} + h/2$
α	5 °	Winkel in Stellung aus Zeichnung
$A_{Fe,kipp}$	0,15 m ²	Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster = $C_{korrr} \cdot b \cdot h$, mit $C_{korrr} = 2,60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1,86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$,
$y_{Fe,kipp}$	1,91 m	Schwerpunkt Lüftungsfläche in Stellung „kipp“, Berechnung nach DIN/TS 4108-8:2022-09, Tabelle G.2, Zeile Kippfenster: $= \sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \tan \alpha}} + h_{Brüstung}$

Aus den Eingangsparametern der Fenster und den Messwerten der Sensoren für Raumtemperaturen, Außenlufttemperatur und Windgeschwindigkeit kann nun der Luftwechsel abgeschätzt werden. Die Berechnung erfolgt wie folgt, abhängig von der Anzahl und Lage der geöffneten Fenster:

- Nur ein Fenster geöffnet: Die Gleichung für einseitige Lüftung wird verwendet, wobei die Raumtemperatur des zugehörigen Raumes berücksichtigt wird.
- Mehr als ein Fenster auf nur einer Fassadenseite geöffnet: Auch hier wird die Gleichung für einseitige Lüftung angewendet. Wenn in mehreren Räumen gelüftet wird, wird ein Mittelwert der zugehörigen Raumtemperaturen verwendet.
- Fenster auf zwei Fassadenseiten geöffnet: Die Gleichung für zweiseitige Lüftung kommt zum Einsatz, und es wird ein Mittelwert der zugehörigen Raumtemperaturen verwendet.
- Fenster auf drei Fassadenseiten geöffnet: In diesem Fall werden nur die Fenster auf den gegenüberliegenden Seiten (Ost-West) betrachtet, und es wird ein Mittelwert der zugehörigen Raumtemperaturen verwendet.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Öffnungsstellung der Tür zum Schlafzimmer nicht erfasst wurde und alle Türöffnungen raumhoch sind. Für die Untersuchung wird angenommen, dass ein Luftverbund zwischen allen Räumen innerhalb der Wohnung besteht, sodass die Luft in der gesamten Wohnung frei zirkulieren kann. Dies kann dazu führen, dass der tatsächliche Luftwechsel geringer ist, siehe dazu auch Kapitel 2.3.5.

2.2.2. Wärmeverluste über geöffnete Fenster während geheizt wurde

Die Wärmeverluste können durch die Verwendung des ermittelten Luftwechsels pro Minutentakt und der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft abgeschätzt werden. [Wouters et al. 1987]

$$Q_v = 0,34 \cdot q_v \cdot (T_i - T_e) \quad (\text{Gleichung 3})$$

Dabei ist

Q_v die Wärmeverluste durch den Luftaustausch in W;

q_v	den Luftvolumenstrom in m^3/h ;
T_i	die Raumlufthtemperatur in $^\circ\text{C}$;
T_e	die Außenlufttemperatur in $^\circ\text{C}$

2.3. Ergebnisse

2.3.1. Luftwechsel über Fenster während geheizt wurde

In Bild 30 ist der Luftwechsel dargestellt, der über die Fenster erfolgte, während in der Wohnung geheizt wurde. Der ermittelte Luftwechsel wurde wöchentlich summiert und durch die Stundenanzahl der jeweiligen Kalenderwoche und das Raumvolumen der Wohnung geteilt, um die mittlere Luftwechselrate pro Stunde zu erhalten.

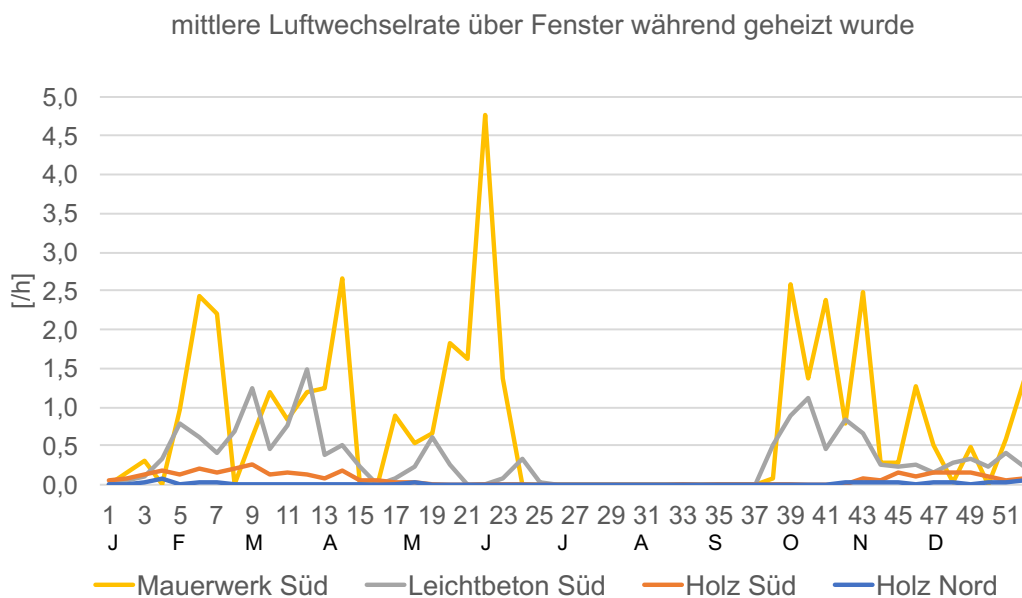


Bild 30, mittlere Luftwechselrate über Fenster während geheizt wurde, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Das unterschiedliche Verhalten der Bewohner in den vier Wohnungen spiegelt sich auch in den Luftwechselraten wider.

2.3.2. Wärmeverluste über Fenster während geheizt wurde

In Bild 31 sind die Wärmeverluste durch den Luftaustausch dargestellt, der über die geöffneten Fenster stattfand, während in der Wohnung geheizt wurde. Die ermittelten Wärmeverluste wurden wöchentlich summiert und durch die Wohnfläche der Wohnung geteilt, um sie in kWh/m² pro Woche umzurechnen.

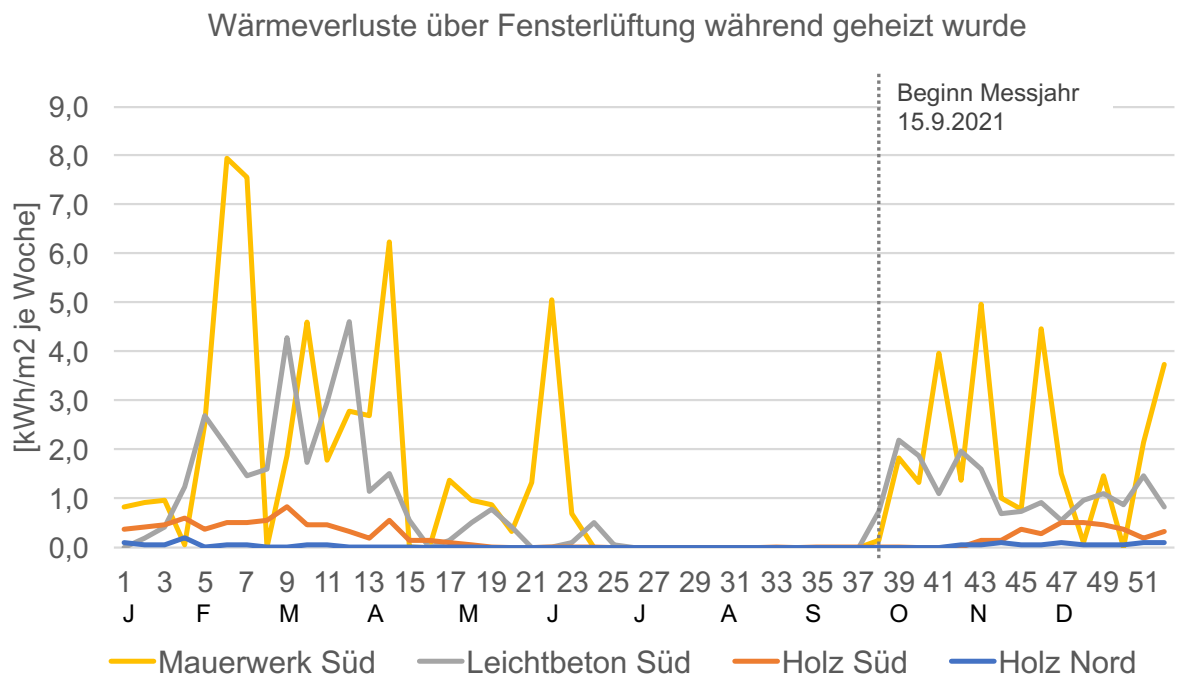


Bild 31, Wärmeverluste über Fensterlüftung während geheizt wurde, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

2.3.3. Wärmeverluste über Infiltration während geheizt wurde

Selbst bei geschlossenen Fenstern findet in den Forschungshäusern ein Luftaustausch über die Fensterfalzlüfter und andere Undichtigkeiten in der Gebäudehülle statt. Diese Leckagen werden zwar nicht durch das Verhalten der Bewohner verursacht, bieten jedoch theoretisch ein Potenzial zur Einsparung. In einem Szenario, in dem eine zentrale Wohnraumlüftung in der Wohnung implementiert wird, würden die Fensterfalzlüfter überflüssig, und zusätzliche Maßnahmen könnten ergriffen werden, um Undichtigkeiten zu reduzieren. Daher ist es sinnvoll, für die Diskussion der Ergebnisse auch eine Abschätzung der Verluste durch Infiltration vorzunehmen.

Zu diesem Zweck wird angenommen, dass durch die Infiltration über Fensterfalzlüfter und andere Undichtigkeiten eine Luftwechselrate von 0,2 pro Stunde (1/h) entsteht. In jedem Zeitintervall (Minutentakt), in dem ein oder mehrere Heizkörper aktiv sind und keine Querlüftung über Fenster stattfindet, wird der Wärmeverlust über die Differenz zwischen Raumluft- und Außenlufttemperatur ermittelt (Bild 32).

Wärmeverluste über Infiltration während geheizt wurde

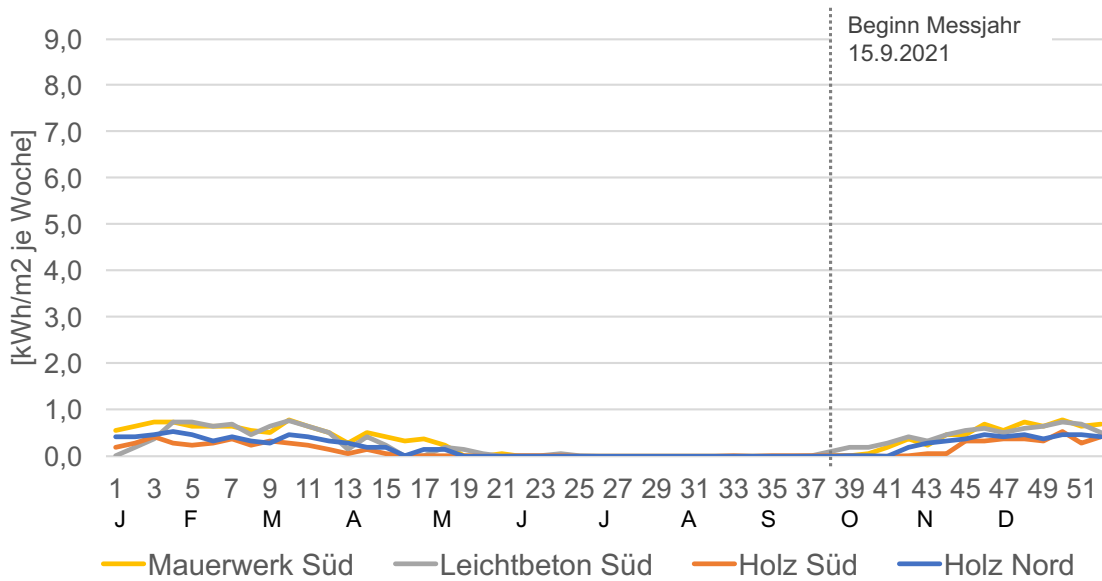


Bild 32, Wärmeverluste über Infiltration während geheizt wurde, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

2.3.4. Wärmeverluste über offene Fenster und Infiltration

Durch die Addition der Verluste durch Fensterlüftung und Infiltration über alle Kalenderwochen hinweg ergibt sich der Jahreswert in kWh/m²a. Diese Jahreswerte für die vier untersuchten Wohnungen sind in Bild 33 dargestellt.

Abschätzung Wärmeverluste durch Fensterlüftung und Infiltration bezogen auf die Wohnfläche [kWh/m²*a] Zeitraum 15.9.2021 – 14.9.2022

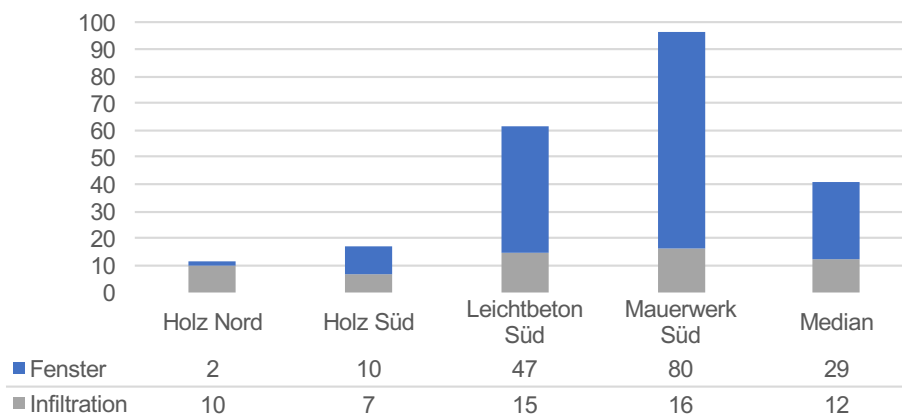


Bild 33, Abschätzung Wärmeverluste durch Fensterlüftung und Infiltration bezogen auf die Wohnfläche [kWh/m²a], Zeitraum 15.9.2021 – 14.9.2022, Quelle: TU München

Die Wärmeverluste durch Fensterlüftung variieren stark in den vier untersuchten Wohnungen und reichen von 2 bis 80 kWh/m²a. Die Infiltration variiert zwischen 7 und 19 kWh/m²a und spiegelt das Niveau der Raumtemperatur und die Dauer des Heizens wider.

Die vier Wohnungen werden hier über den Medianwert zusammengefasst. Der Median ist eine weniger anfällige Metrik für Ausreißer in der Stichprobe im Vergleich zum Mittelwert.

Der Medianwert der Wärmeverluste durch Fensterlüftung liegt bei 29 kWh/m²a. Der Medianwert der Wärmeverluste durch Infiltration beträgt 12 kWh/m²a. Die Summe dieser beiden Werte ergibt 41 kWh/m²a.

2.3.5. Limitierungen dieser Studie

Anzahl der Untersuchten Wohnungen

Die Untersuchung nur an vier Wohnungen durchgeführt, und daher ist es wichtig, zu beachten, dass die Ergebnisse der Studie auf diese begrenzte Stichprobe beschränkt sind. Die Schlussfolgerungen und Erkenntnisse aus einer solchen Studie können daher nicht automatisch auf alle Wohnungen oder Gebäude verallgemeinert werden.

Um eine breitere Allgemeingültigkeit zu gewährleisten, sind in der Regel größere Stichproben und umfangreichere Untersuchungen notwendig. Dennoch liefern die Ergebnisse dieser Studie wertvolle Einblicke und Erkenntnisse, die bei der Entwicklung von Strategien zur Energieeinsparung und zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden berücksichtigt werden können. Weitere Forschung und Untersuchungen könnten dazu beitragen, die Aussagekraft und die Anwendbarkeit der Ergebnisse zu erweitern.

Interne und solare Wärmegewinne

Die Studie betrachtet den Luftwechsel, der über die Fenster und Undichtigkeiten stattfindet, während einer oder mehrere Heizkörper aktiv sind. Es ist möglich, dass die in diesem Zeitraum ermittelten Wärmeverluste nicht vollständig über die Heizkörper gedeckt werden mussten, sondern teilweise durch Abwärme von Personen und Technik oder durch solare Wärmegewinne ausgeglichen wurden. Es kann also sein, dass die tatsächlichen Verluste über die Fensterlüftung geringer sind.

Thermische Trägheit des Gebäudes

Zeitintervalle, in denen kein Heizkörper aktiv ist, werden in der Studie nicht betrachtet. Es kann jedoch sein, dass in diesen Intervallen aufgrund von Fensterlüftung und Infiltration eine Abkühlung der Raumluft und des Gebäudes auftritt, die dann zu einem späteren Zeitpunkt durch die Heizung kompensiert wird. Aufgrund dieses Effekts ist es möglich, dass die Verluste über die Fensterlüftung unterschätzt werden.

Unschärfe der Berechnungsmethode

Die verwendeten Gleichungen aus der Norm DIN/TS 4108-8, Anhang G, weisen eine gewisse Unschärfe auf. Beispielsweise werden weder die Windrichtung noch die Laibungstiefe berücksichtigt. Auch für die Überlagerung der Luftströmung aus thermisch induzierten und windinduzierten Luftwechseln wird in der Norm ein 'mittlerer Ansatz' gewählt [DIN/TS 4108-8:2022-09]. Es kann daher sein, dass die Luftwechselraten über die Fenster geringer oder höher ausfallen.

Unsichere Annahmen

Die Inputparameter bestehen teilweise aus Annahmen. Zum Beispiel wurde in der Studie davon ausgegangen, dass die Tür zum Schlafzimmer geöffnet ist, die Fenster nicht durch Vorhänge verschlossen sind und ansonsten eine ungehinderte Zirkulation in der Wohnung stattfinden konnte. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass die Bedingungen während der Messungen von diesen Annahmen abwichen und daher die tatsächlichen Verluste über die Fensterlüftung über- oder unterschätzt wurden. Auch die angenommene Luftwechselrate von 0,2 pro Stunde für die Infiltration ist eine Annahme, welche sich von Wert her zwischen „Feuchteschutzlüftung“ (0,12 /h) und „Reduzierter Lüftung“ (0,28 /h) nach Norm [DIN 1946-6:2019-12] bewegt.

Öffnungsstellung der Fenster

Sensoren an den Fenstern unterscheiden nur zwischen offen und geschlossen und liefern somit keine detaillierteren Informationen zur Öffnungsstellung. Die für die Untersuchung verwendete Verteilung von 29 % vollständig geöffneten und 71 % gekippten Fenstern basiert auf den Ergebnissen von 14 Vor-Ort-Besuchen. Aufgrund der geringen Anzahl und weil diese nur tagsüber stattfanden, ergibt sich hieraus eine Unschärfe. Da der Luftwechsel zwischen einem geöffneten und einem gekippten Fenster stark abweicht, wird im Folgenden noch eine Sensitivitätsuntersuchung dieses Parameters durchgeführt.

2.3.6. Sensitivitätsanalyse Fensterstellung

Die Sensoren an den Fenstern zeichnen nur den Zustand 'Offen' oder 'Geschlossen' auf. Die Auswertung von 14 Vor-Ort-Besuchen, bei denen alle Fenster fotografiert wurden, ergab eine Verteilung von 29 % geöffneten Fenstern (die übrigen waren gekippt). Im Rahmen dieser Sensitivitätsuntersuchung wurden die Berechnungen mit den Verteilungen von 58 % (Faktor 2) und 15 % (Faktor 0,5) geöffneten Fenstern (die übrigen waren jeweils gekippt) wiederholt.

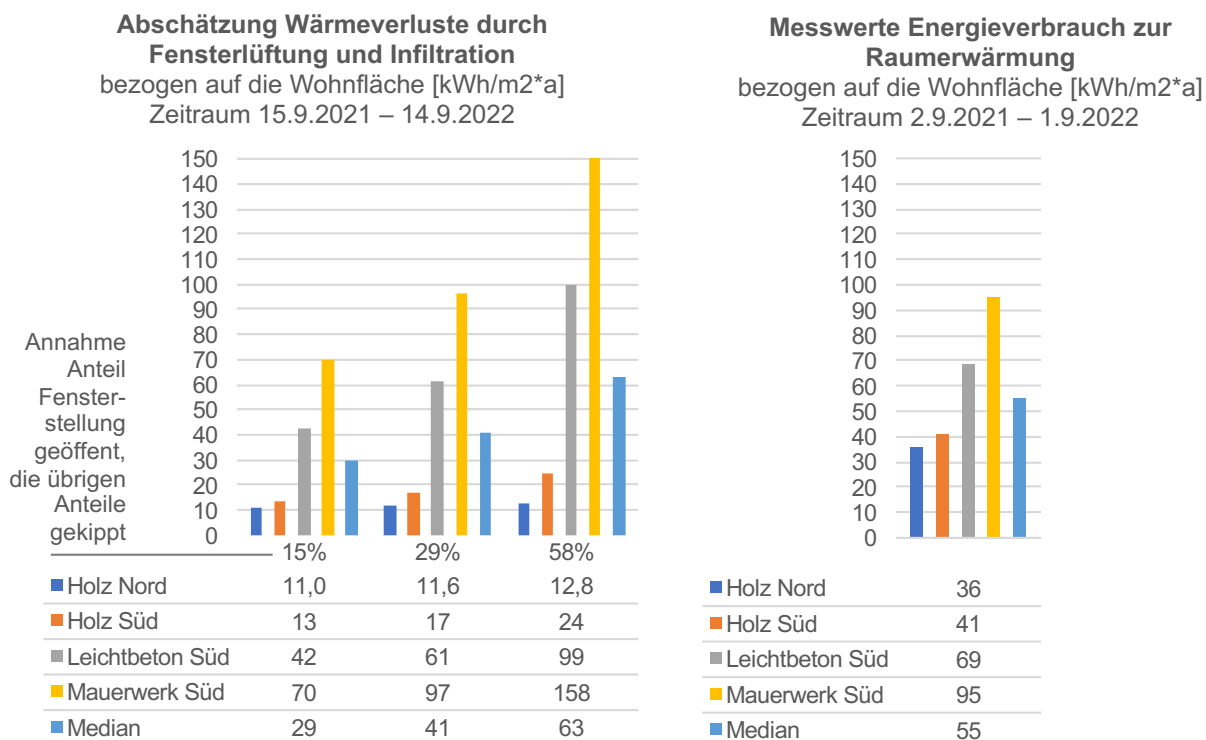


Bild 34, links: Abschätzung der Wärmeverluste durch Fensterlüftung und Infiltration bezogen auf die Wohnfläche [kWh/m²a], Zeitraum 15.9.2021 – 14.9.2022, für verschiedene angenommene Anteile der Fensterstellung (geöffnet, übrige gekippt); rechts: Messwerte des Energieverbrauchs zur Raumerwärmung bezogen auf die Wohnfläche [kWh/m²a], Zeitraum 1.9.2021 – 31.8.2022, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München

Betrachtet man die Spannweite der Werte zwischen den Wohnungen und vergleicht sie mit den Ergebnissen der Messungen der Wärmeenergie zur Raumheizung, ist ersichtlich, dass die Variante mit 15 % der Fenster geöffnet und 85 % gekippt eine gute Übereinstimmung aufweist (Bild 34). Der Unterschied zwischen den beiden Extremen, nämlich 'Holz Nord' und 'Mauerwerk Süd', beträgt 59 kWh/m²a. Dies entspricht auch dem Abstand in den tatsächlichen Messwerten des Energieverbrauchs zur

Raumheizung. Die Wohnungen 'Holz Süd' und 'Leichtbeton Süd' ordnen sich in ähnlicher Weise dazwischen ein.

Basierend auf den Ergebnissen der Studie kann für die vier untersuchten Wohnungen das Einsparpotenzial wie folgt abgeschätzt werden: Wenn die Bewohner während der Heizperiode die Fenster geschlossen halten und bauliche Maßnahmen zur Verbesserung der Gebäudedichtheit durchgeführt werden, könnte der Energiebedarf zur Raumheizung theoretisch um etwa 30 kWh/m²a reduziert werden.

3. Umweltauswirkungen und Kosten von Wohnraumlüftungsanlagen

In diesem Kapitel werden vier verschiedene Lüftungsvarianten miteinander verglichen, und zwar unter Verwendung der Methode der Lebenszyklusbetrachtung. Dabei werden die Kosten, das Treibhauspotential (Global Warming Potential - GWP) und der Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie (Primary Energy Not Renewable Total - PENRT) für jede der Varianten analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden bereits in [Jarmer et al. 2023] veröffentlicht. Hier erfolgt lediglich eine kurze Zusammenfassung dieser Ergebnisse.

3.1. Untersuchte Varianten

3.1.1. Szenario A: Fensterlüftung / Badabluft präsentgeführt

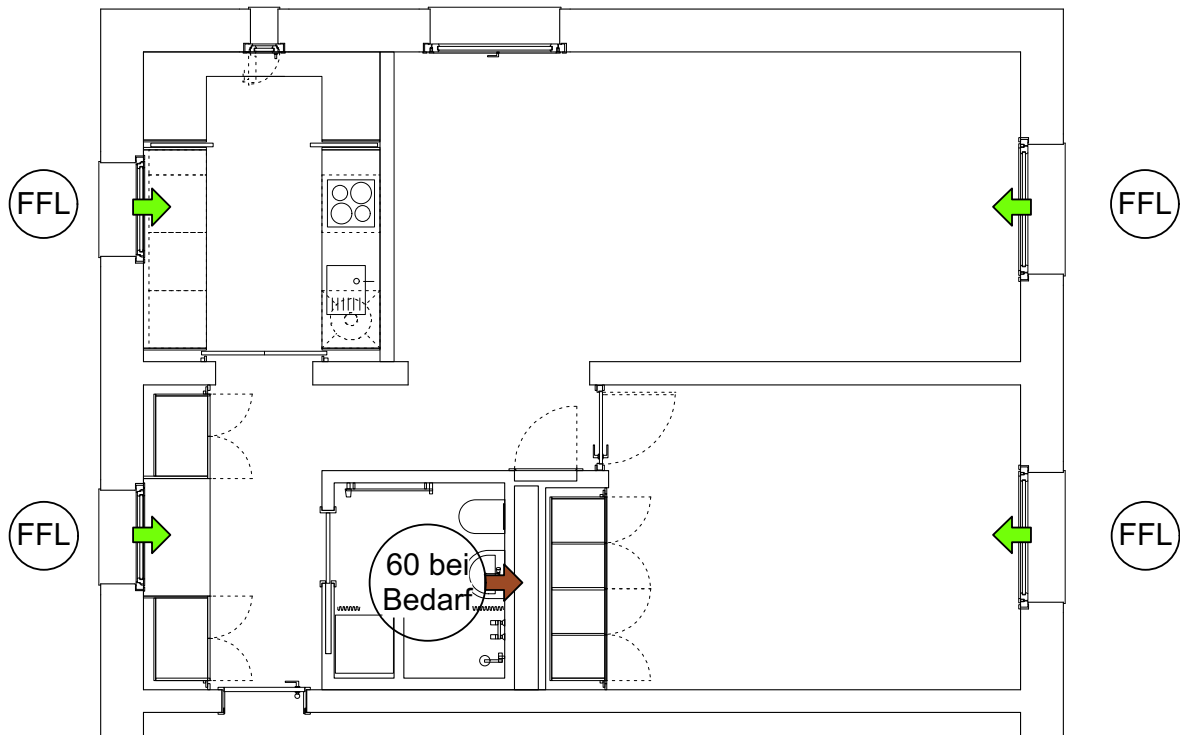


Bild 35, Grundriss Schema Szenario A: Fensterlüftung / Badabluft präsentgeführt, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]

Das Szenario A, im Bild 35 zu sehen, ist tatsächlich so errichtet worden. Das Bad ist fensterlos und hat eine präsentgeführte Badabluft im 15-minütige Nachlaufschaltung, wie in [DIN 18017-3:2020-05] gefordert. Die anderen Räume der Wohnung werden durch die Bewohner über die Fenster belüftet. Tabelle 18 zeigt alle Werte des Szenarios A.

Tabelle 18, Parameter Szenario A [Jarmer 2023]

1	Luftvolumenstrom Badabluft-Ventilator	60	m ³ /h	
2	Dauer Luftvolumenstrom pro Tag	2	h/d	
3	Spezifischer Energiebedarf	0,1	Wh/m ³	
4	Luftvolumenstrom pro Tag	120	m ³ /d	Zeilen 1 * 2
5	Bedarf Nutzenergie pro Tag	12	Wh/d	Zeilen 3 * 4

3.1.2. Szenario B: Fensterlüftung / Badabluft präsentgeführt mit Grundlüftung

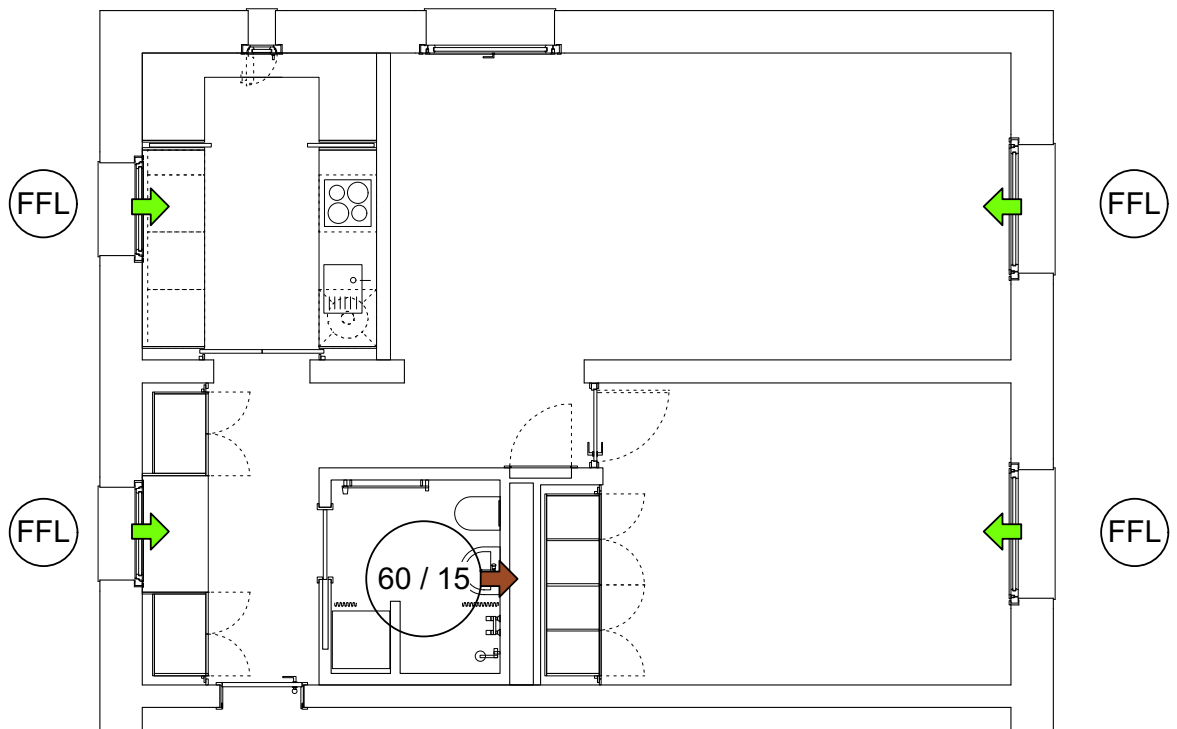


Bild 36, Grundriss Schema Szenario B: Fensterlüftung / Badabluft präsentgeführt mit Grundlüftung, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]

Bei Szenario B läuft die Badabluft zwischen den Zeitintervallen in denen die Bewohner im Bad präsent sind, mit einer reduzierten Luftmenge von $15 \text{ m}^3/\text{h}$ weiter (siehe Bild 36). Im Gegenzug entfällt die Nachlaufschaltung. Tabelle 19 zeigt alle Werte von B.

Tabelle 19, Parameter Szenario B [Jarmer 2023]

1	Luftvolumenstrom Badabluft-Ventilator	60	m^3/h	
2	Dauer Luftvolumenstrom pro Tag	1	h/d	
3	Luftvolumenstrom Badabluft-Ventilator, Feuchteschutz	15	m^3/h	
4	Dauer Luftvolumenstrom pro Tag	23	h/d	
5	Spezifischer Energiebedarf	0,1	Wh/m^3	
6	Luftvolumenstrom pro Tag	405	m^3/d	Zeilen (1 * 2) + (3 * 4)
7	Bedarf Nutzenergie pro Tag	41	Wh/d	Zeilen 5 * 6

3.1.3. Szenario C: Dezentrale Einzelraumlüfter mit Wärmerückgewinnung (WRG) + Badabluft

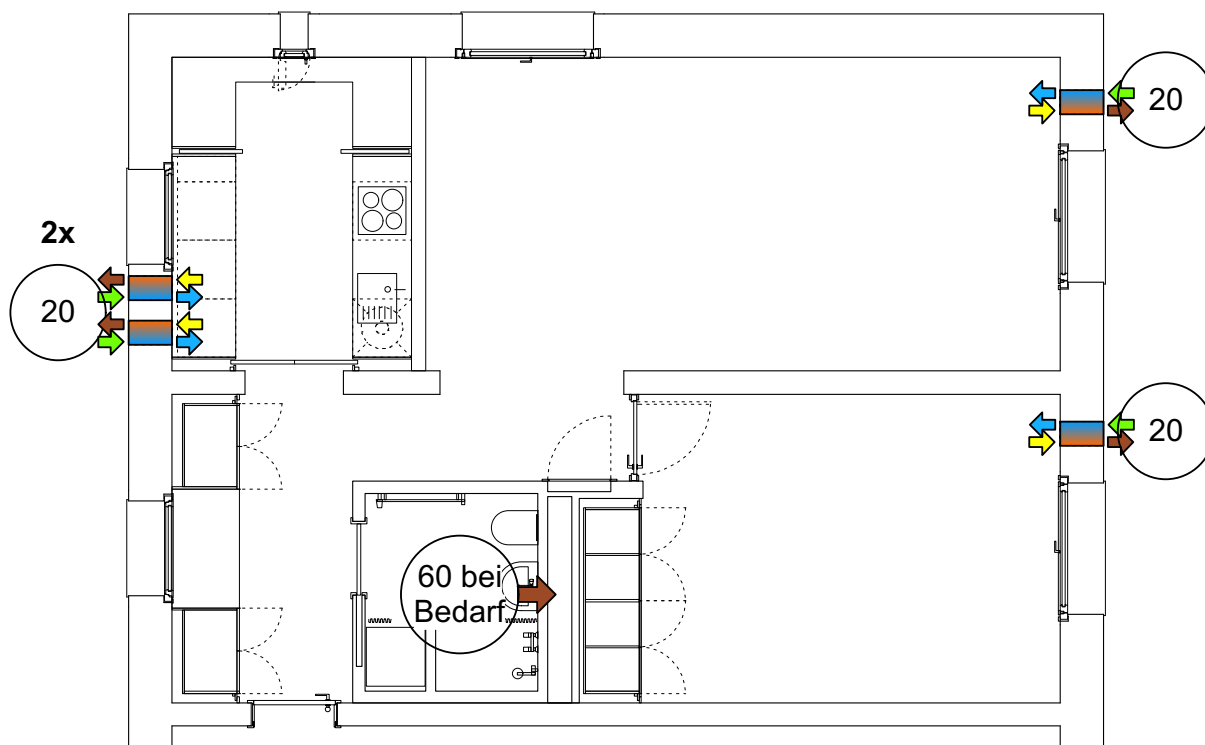


Bild 37, Grundriss Schema Szenario C: Dezentrale Einzelraumlüfter mit Wärmerückgewinnung (WRG) + Badabluft, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]

In Szenario C (Bild 37) stellen vier dezentrale Einzelraumlüfter eine Nennlüftung nach Norm her. [Norm DIN 1946-6:2019-12]. Die Badabluft ist gleich zu Szenario A. Tabelle 20 zeigt alle Werte von C.

Tabelle 20, Parameter Szenario C [Jarmer 2023]

1	Luftvolumenstrom Einzelraumlüfter	80	m ³ /h	
2	Wärmerückgewinnungsgrad	84	%	
3	Dauer Luftvolumenstrom pro Tag	24	h/d	
4	Spezifischer Energiebedarf Einzelraumlüfter	0,28	Wh/m ³	
5	Luftvolumenstrom Badabluft-Ventilator	60	m ³ /h	
6	Dauer Luftvolumenstrom pro Tag	2	h/d	
7	Spezifischer Energiebedarf	0,1	Wh/m ³	
8	Bedarf Nutzenergie pro Tag	550	Wh/d	Zeilen (1 * 3 * 4) + (5 * 6 * 7)

3.1.4. Szenario D: Wohnungszentrale Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung (WRG)

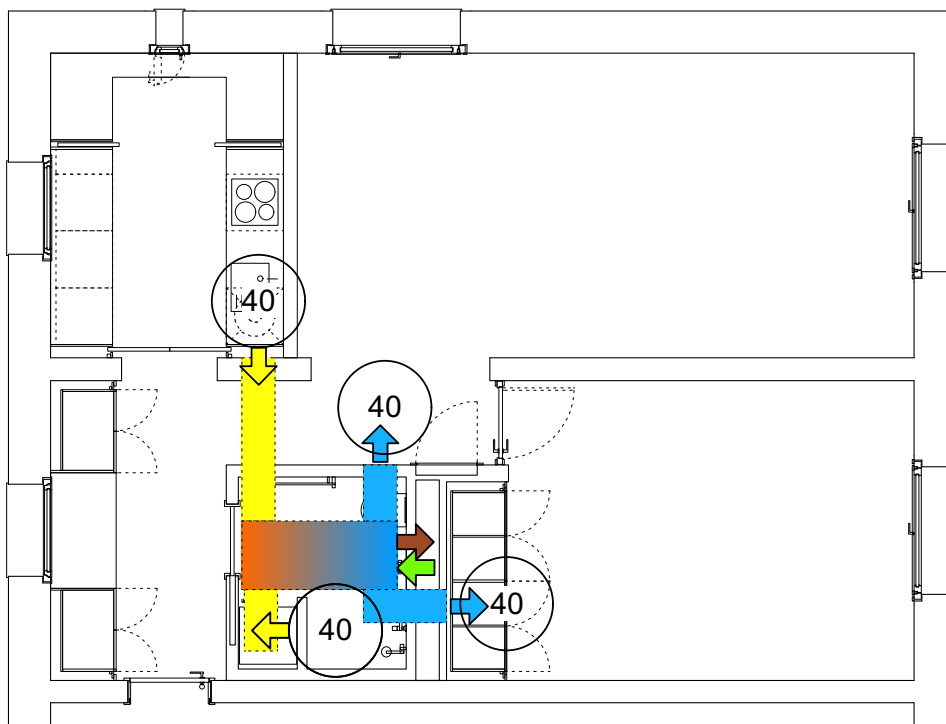


Bild 38, Grundriss Schema Szenario D: Wohnungszentrale Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung (WRG), Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]

Ein Wohnungszentrale führt Frischluft in die beiden Wohnräume und zieht die Fortluft aus Bad und Küche ab (siehe Bild 38). Im Vergleich zu Szenario C hat diese Methode der Lüftung eine effektivere Wärmerückgewinnung aber auch einen höheren spezifischen Energiebedarf (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21, Parameter Szenario D [Jarmer 2023]

1	Luftvolumenstrom Wohnungszentrale	80	m ³ /h	
2	Wärmerückgewinnungsgrad	87	%	
3	Dauer Luftvolumenstrom pro Tag	24	h/d	
4	Spezifischer Energiebedarf Einzelraumlüfter	0,36	Wh/m ³	
5	Bedarf Nutzenergie pro Tag	691	Wh/d	Zeilen (1 * 3 * 4)

3.2. Methodik

Die Bilanzierung wurde in Anlehnung an [DIN EN ISO 14044:2021-2] und [DIN EN 15978:2012-10] über den gesamten Lebenszyklus durchgeführt, also von der "Wiege bis zum Grab" (cradle to grave). Dabei wurden nur die Anlagenteile berücksichtigt, die für den Vergleich relevant sind. Projektspezifische und bauseitige Leistungen wurden nicht einbezogen, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Projekte zu verbessern. Die Wartung der Anlagen erfolgte gemäß [VDI 6022-1:2018-01] jährlich. Dies stellt sicher, dass die Untersuchung auf einer konsistenten und vergleichbaren Grundlage durchgeführt wurde.

Die Werte für das GWP und PENRT wurden aus den Datensätzen der Ökobaudat ermittelt. [BBSR 2022] Für den Betriebsstrom wurde die [DIN V 18599-1:2018-09] als Quelle verwendet. Die Nutzungsdauer der Technikkomponenten wurden aus [VDI 2067:2012-11, Blatt 1, Tabelle A.3] entnommen, während die Nutzungsdauer der Bauteile aus [BBSR 2017] stammt.

Für Wirkungsgrade der Wärmerückgewinnung und den spezifischen Energieverbrauch der Wohnraumlüftung wurden Mittelwerte der Komponentendatenbank des Passivhausinstituts verwendet. [Passivhaus Institut GmbH/1 2022] [Passivhaus Institut GmbH/2 2022]

Als Ort der Untersuchung wurde die Wohnung in den Forschungshäusern gewählt, für die das Lüftungsverhalten der Bewohner in Kapitel 2 untersucht wurde. Die Wohnung hat eine Nutzfläche von $56,2 \text{ m}^2$, eine Raumhöhe von $3,1 \text{ m}$ und ein Raumvolumen von $174,2 \text{ m}^3$.

3.3. Ergebnisse

Der Zeitraum der Betrachtung erstreckt sich über 50 Jahre, und die Ergebnisse werden jährlich dargestellt, indem das Gesamtergebnis durch 50 dividiert wird. (siehe Tabellen 22 bis 25) Bei Komponenten mit einer Nutzungsdauer von weniger als 50 Jahren wird der Austausch nach Ablauf der Nutzungsdauer in der Gesamtbewertung berücksichtigt.

Tabelle 22, Wirkungsbilanz Szenario A [Jarmer 2023]

	Menge	Kosten o. MwSt. [€/a]	[%]	GWP [kg CO ₂ -Äq./a]	[%]	PENRT [kWh/a]	[%]
1 Fensterfalzlüfter	4 St.	7,20		-		-	
2 Badabluft-Ventilator	1 St.	14,40		0,32		3,64	
3 Abluftleitung	5 m	6,00		0,90		4,88	
4 Summe Technik		27,60	25,2%	1,22	40,1%	8,52	37,2%
5 Wartung	0,5 h _w	50,00		-		-	
6 Anfahrt	10 km/h _w	20,00		1,73		6,51	
7 Filterwechsel	1 St.	10,00		-		-	
8 Summe Wartung		80,00	73,2%	1,73	25,1%	6,51	28,4%
9 Betriebsstrom	4 kWh	1,75	1,6%	2,41	34,8%	7,88	34,4%
10 Gesamt		109,35	100%	5,36	100%	22,92	100%

Tabelle 23, Wirkungsbilanz Szenario B [Jarmer 2023]

	Menge	Kosten o. MwSt. [€/a]	[%]	GWP [kg CO ₂ -Äq./a]	[%]	PENRT [kWh/a]	[%]
1 Fensterfalzlüfter	4 St.	7,20		-		-	
2 Badabluft-Ventilator	1 St.	18,00		0,97		3,64	
3 Abluftleitung	5 m	6,00		1,80		4,88	
4 Summe Technik		31,20	26,6%	2,77	21,9%	8,52	20,5%
5 Wartung	0,5 h _w	50,00		-		-	
6 Anfahrt	10 km/h _w	20,00		1,73		6,51	
7 Filterwechsel	1 St.	10,00		-		-	
8 Summe Wartung		80,00	68,3%	1,73	13,7%	6,51	15,6%
9 Betriebsstrom	15 kWh	5,91	5,0%	8,13	64,4%	26,61	63,9%
10 Gesamt		117,11	100%	12,63	100%	41,64	100%

Tabelle 24, Wirkungsbilanz Szenario C [Jarmer 2023]

	Menge	Kosten o. MwSt. [€/a]	[%]	GWP [kg CO ₂ -Äq./a]	[%]	PENRT [kWh/a]	[%]
1 Einzelraumlüfter	4 St.	216,00		7,18		27,46	
2 Badabluft-Ventilator	1 St.	14,40		0,97		3,64	
3 Abluftleitung	15 m	6,00		1,80		4,88	
4 Summe Technik		236,40	46,7%	9,95	8,0%	35,98	8,8%
5 Wartung	1 hw	100,00		-		-	
6 Anfahrt	20km/hw	40,00		3,46		13,03	
7 Filterwechsel Wohnungsanlage	5 St.	50,00		-		-	
8 Summe Wartung		190,00	37,5%	3,46	2,8%	13,03	3,2%
9 Betriebsstrom	201 kWh	80,24	15,8%	110,33	89,2%	361,09	88,1%
10 Gesamt		506,64	100%	123,74	100%	410,09	100%

Tabelle 25, Wirkungsbilanz Szenario D [Jarmer 2023]

	Menge	Kosten o. MwSt. [€/a]	[%]	GWP [kg CO ₂ -Äq./a]	[%]	PENRT [kWh/a]	[%]
1 Zentrale Wohnungsanlage	1 St.	288,00		5,38		16,18	
2 Abluftleitung	15 m	18,00		5,40		14,64	
3 Summe Technik		306,00	51,3%	10,78	7,0%	30,82	6,2%
4 Wartung	1 hw	100,00		-		-	
5 Anfahrt pro	20 km/hw	40,00		3,46		13,03	
6 Filterwechsel	1 St.	50,00		-		-	
7 Summe Wartung		190,00	31,8%	3,46	2,3%	13,03	2,6%
8 Betriebsstrom	252 kWh	100,92	16,9%	138,76	90,7%	454,12	91,2%
9 Gesamt		596,92	100%	153,00	100%	497,96	100%

Übersicht Wirkungsbilanz je Quadratmeter Wohnfläche und Jahr für Erstellung, Betrieb und Wartung

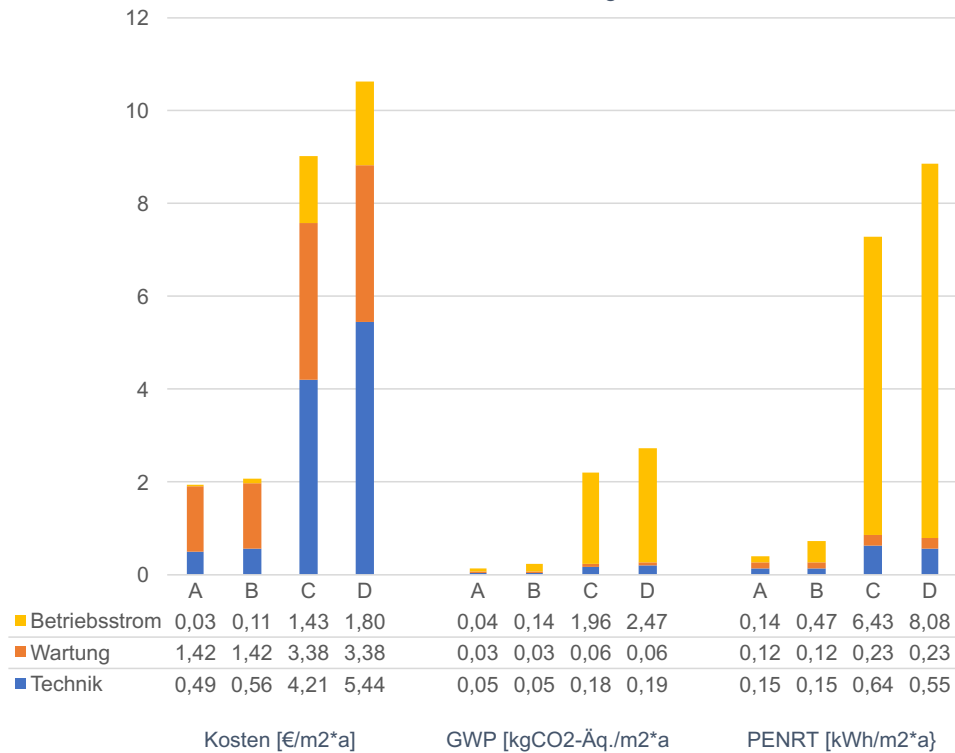


Bild 39, Übersicht Wirkungsbilanz je Quadratmeter Wohnfläche und Jahr, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]

In Bild 39 ist deutlich zu sehen, dass zusätzliche Technik nicht nur die Kosten, sondern auch die Umweltauswirkungen erhöht. Die Umweltauswirkungen werden hauptsächlich durch den Stromverbrauch während des Betriebs verursacht, während die Kosten vor allem von den Technikinvestitionen und den Wartungskosten getrieben werden.

3.3.1. Limitierungen dieser Studie

In der Studie wurden weder bauseitige Anpassungen noch zusätzliche Lüftungsfunktionen wie Befeuchtung oder Vorwärmung der Zuluft noch Störungen oder Ausfälle der Technik berücksichtigt. Zudem wurden bestimmte Annahmen getroffen, einschließlich der Badnutzungsdauer durch die Bewohner (2 Stunden pro Tag) und der Betrieb in der Lüftungsstufe „Nennlüftung“. Der Betrachtungszeitraum erstreckt sich über 50 Jahre, wobei konstante Umweltauswirkungen und Kosten pro Material oder Energieart angenommen werden.

Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien sinkt der nichterneuerbare Teil im Strom-Mix allerdings. [Fritsche und Greß 2020] haben diese Entwicklung seit 2000

untersucht und Hochrechnungen für 2030 und 2050 angestellt. Diese Entwicklung des Strom-Mix hat auch in reduziertem Maß Auswirkungen auf die Umweltwirkung von Gas, zum Beispiel durch den Einsatz von Power-to-Gas bei dem ein Überangebot aus erneuerbaren Quellen über Wasserstoff zwischengespeichert werden kann. [Fritsche und Greß 2021]. Auch die Preisentwicklung von Energieträgern ist dynamisch. Auch hierfür gibt es Prognosen. [Schlesinger et al. 2014] Inwiefern sich diese Entwicklungen darauf auswirken, ob sich der Einsatz einer ventilatorgestützten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung amortisiert wird im Kapitel 4 genauer untersucht.

4. Ökologisch oder ökonomisch Amortisation von Wohnraumlüftungsanlagen

Im Kapitel 2 wurden die Forschungshäuser analysiert, um das mögliche Einsparpotenzial beim Raumwärmebedarf zu ermitteln. Die Studienergebnisse zeigen, dass in den vier untersuchten Wohnungen bei geschlossenen Fenstern und baulichen Verbesserungen zur Gebäudedichtheit der Energiebedarf zur Raumheizung theoretisch um etwa 30 kWh/m²a gesenkt werden könnte.

In Kapitel 3 wurden über eine Lebenszyklusbetrachtung Umweltauswirkung und Kosten von vier Varianten der Wohnraumlüftung untersucht. Sowohl Umweltauswirkung als auch Kosten nehmen zu, je mehr Technik zum Einsatz kommt. Treiber dieser Entwicklung sind die Technikkomponenten selbst, die Wartung und die Betriebsenergie.

In diesem Kapitel 4 soll aus diesen Ergebnissen abgeleitet werden, ob und wie schnell sich der Aufwand für den Einsatz von Lüftungstechnik durch eine Einsparung von Energie für die Raumerwärmung amortisiert.

4.1. Datengrundlage

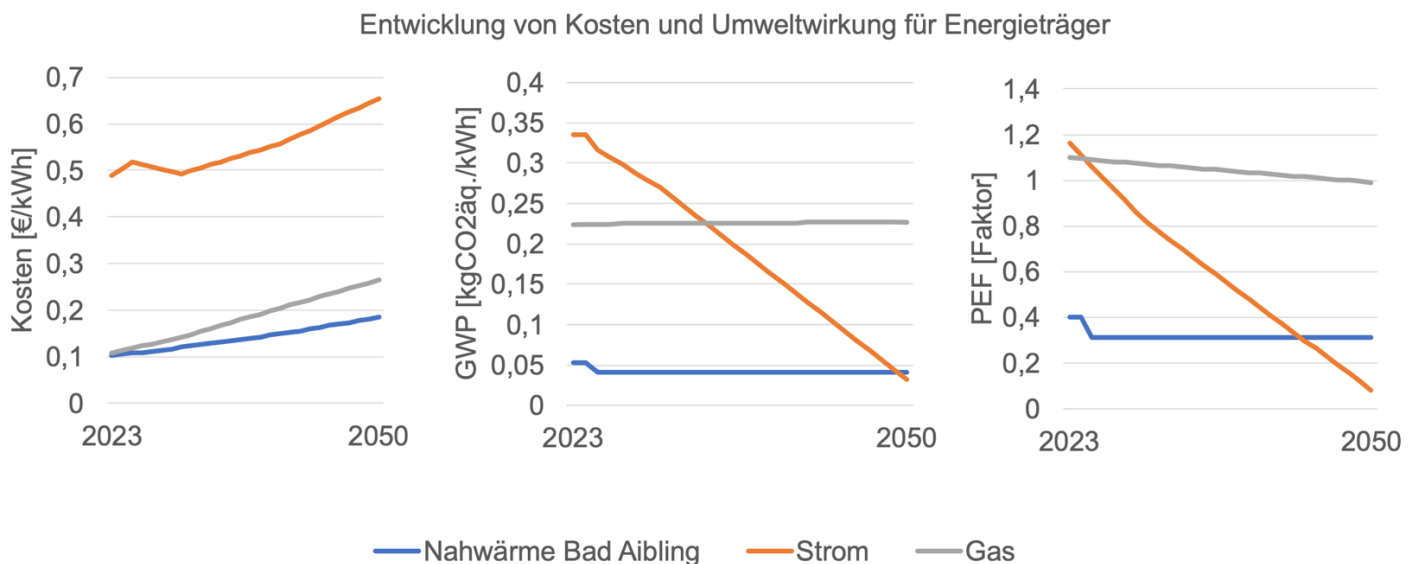


Bild 40, Entwicklung von Kosten und Umweltwirkung für Energieträger, TU München

In Bild 40 sind die Entwicklungen der drei Energieträger Nahwärme in Bad Aibling, Strom und Gas dargestellt. Die Grundlage für die Kosten bildet [Schlesinger et al.

2014]. Für die Fernwärme in Bad Aibling wurde ausgehend von einem Preis von 10 Cent pro kWh im Jahr 2022 eine Kostensteigerung durch Inflation von 2,3 % jährlich prognostiziert, ab 2030 dann 2,2 % [Schlesinger et al. 2014]. Die Werte für die Umweltauswirkungen von Strom stammen aus [Fritsche und Greß 2020], für Gas aus [Fritsche und Greß 2021]. Die Umweltauswirkungen der Fernwärme in Bad Aibling werden voraussichtlich im Jahr 2025 durch den Zubau eines weiteren Holzackschnitzelofens reduziert. Die Werte wurden von einem planenden Ingenieurbüro gemäß [AGFW FW-309-1:2021-05] ermittelt.

4.2. Methodik

Für den Zeitraum von 2023 (Einbau) bis 2050 wurden die Ökobilanzen und Kosten für jedes Jahr analog zu Kapitel 3 ermittelt. Dabei wurden jeweils die spezifischen Werte der Energieträger für das jeweilige Jahr verwendet. Ebenfalls für jedes Jahr wurde ermittelt, welche Kosten und Umweltauswirkungen durch eine konstant angenommene Reduktion des Endenergiebedarfs für die Raumerwärmung vermieden werden könnten. Die Summe dieser Werte ergibt eine Jahresbilanz für den Einsatz der Lüftungstechnik. Diese Jahresbilanzen wurden zu einer Gesamtbilanz zusammengefasst. Es wurden zwei Varianten untersucht: Dezentrale Einzelraumlüfter mit Wärmerückgewinnung in Kombination mit einer Badabluft (siehe Szenario C in Kapitel 3) und eine Wohnungszentrale mit Zu- und Abluft sowie Wärmerückgewinnung (siehe Szenario D in Kapitel 3).

4.3. Ergebnisse

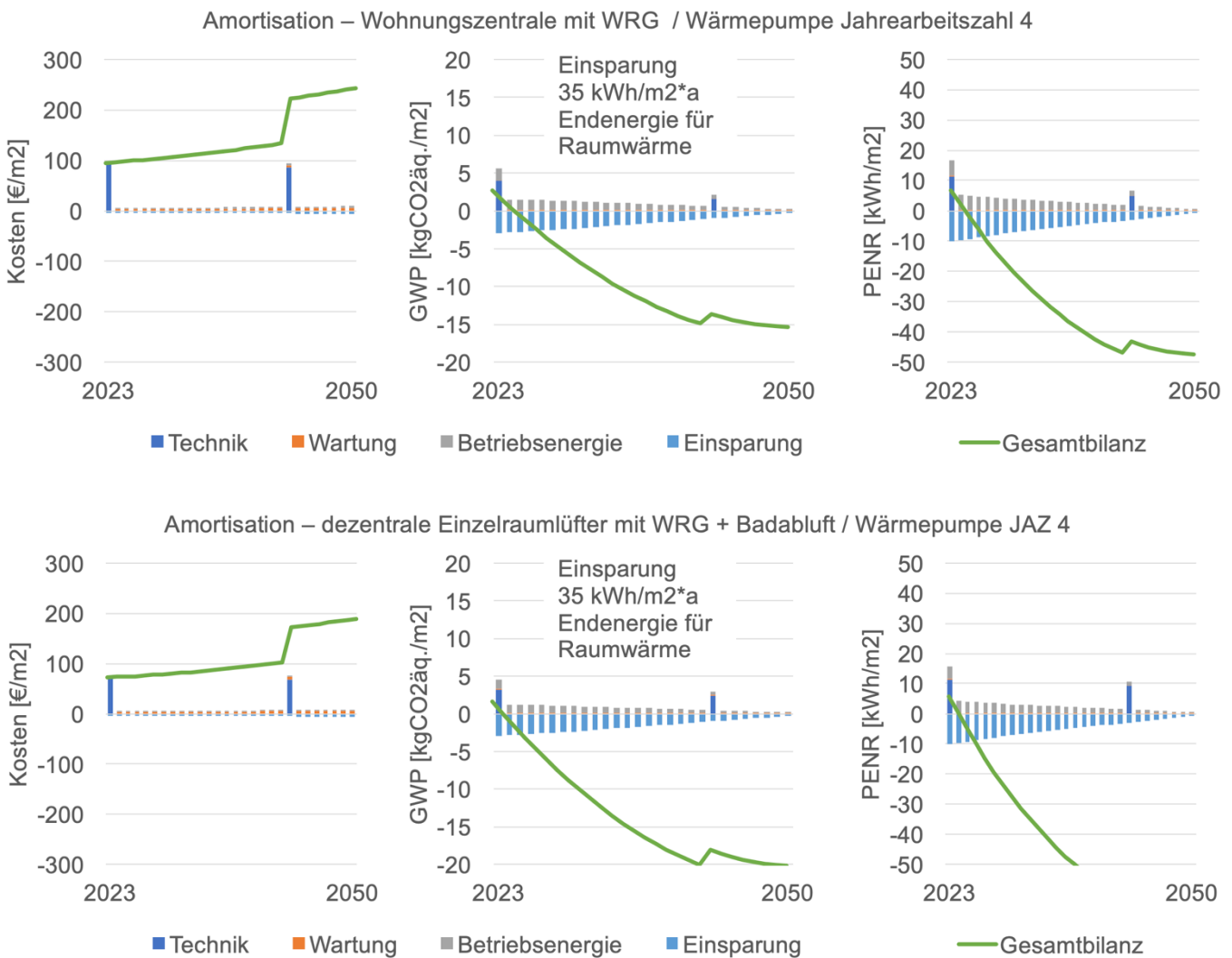


Bild 41, Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer angenommenen Einsparung von 35 kWh/m²*a Endenergie für Raumwärme, TU München

In Bild 41 sind die Ergebnisse für die Wärmerversorgung mit einer Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 4 dargestellt. Es wird angenommen, dass jedes Jahr 35 kWh/m²*a für die Raumheizung eingespart werden konnten. Dies entspricht etwa dem Potenzial aus Kapitel 2, einschließlich der ebenfalls reduzierten Verteilungsverluste im Gebäude. Ökonomisch betrachtet findet hier keine Amortisation statt. Die Anfangs- und Folgeinvestitionen in die Technik sowie die jährlichen Wartungskosten übersteigen über den Betrachtungszeitraum von 2023 bis 2050 die Gewinne bei den Energiekosten. Beim Treibhauspotenzial (GWP) und der nicht erneuerbaren Primärenergie (PENR) erfolgt eine Amortisation bereits nach wenigen Jahren. Diese Entwicklung verlangsamt sich im Laufe der Zeit, da die Umweltauswirkungen des Stroms sowohl für die Lüftung als auch für die Wärmepumpe sinken und somit auch das Potenzial für ökologische Verbesserungen durch

energetische Effizienz abnimmt. Das Ergebnis ist für beide Varianten der Lüftung ähnlich.

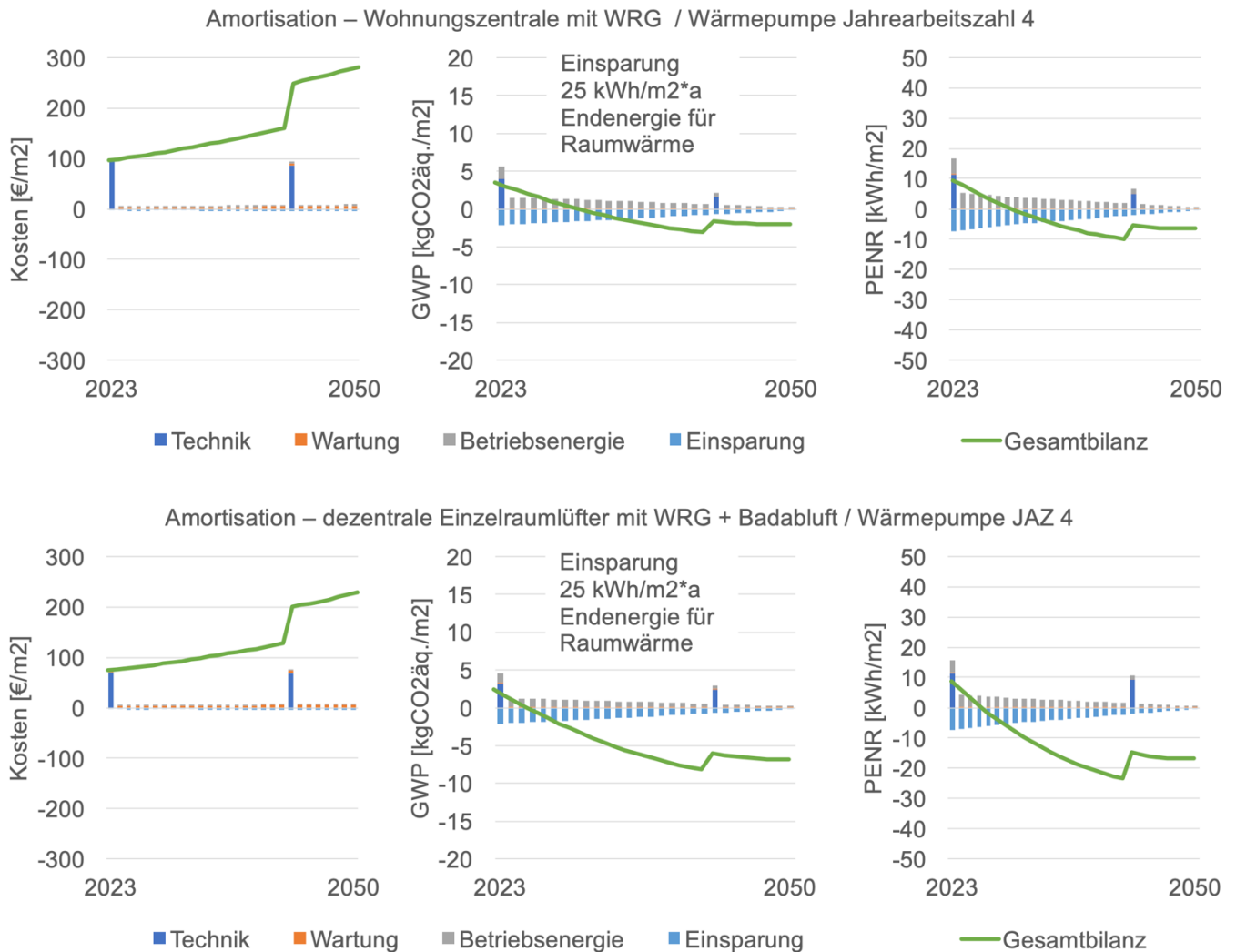


Bild 42, Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer angenommenen Einsparung von 25 kWh/m²*a Endenergie für Raumerwärmung, TU München

In Bild 42 werden die Ergebnisse unter der Annahme gezeigt, dass lediglich 25 kWh/m²*a Endenergie für die Raumheizung durch den Einsatz der Lüftung eingespart werden können. Dadurch steigen sowohl die Kosten als auch die Umweltauswirkungen in der Gesamtbilanz. Die Anzahl der Jahre, die es dauert, bis sich der Einsatz einer ventilatorgestützten Lüftung ökologisch amortisiert, erhöht sich um mehr als das Doppelte.

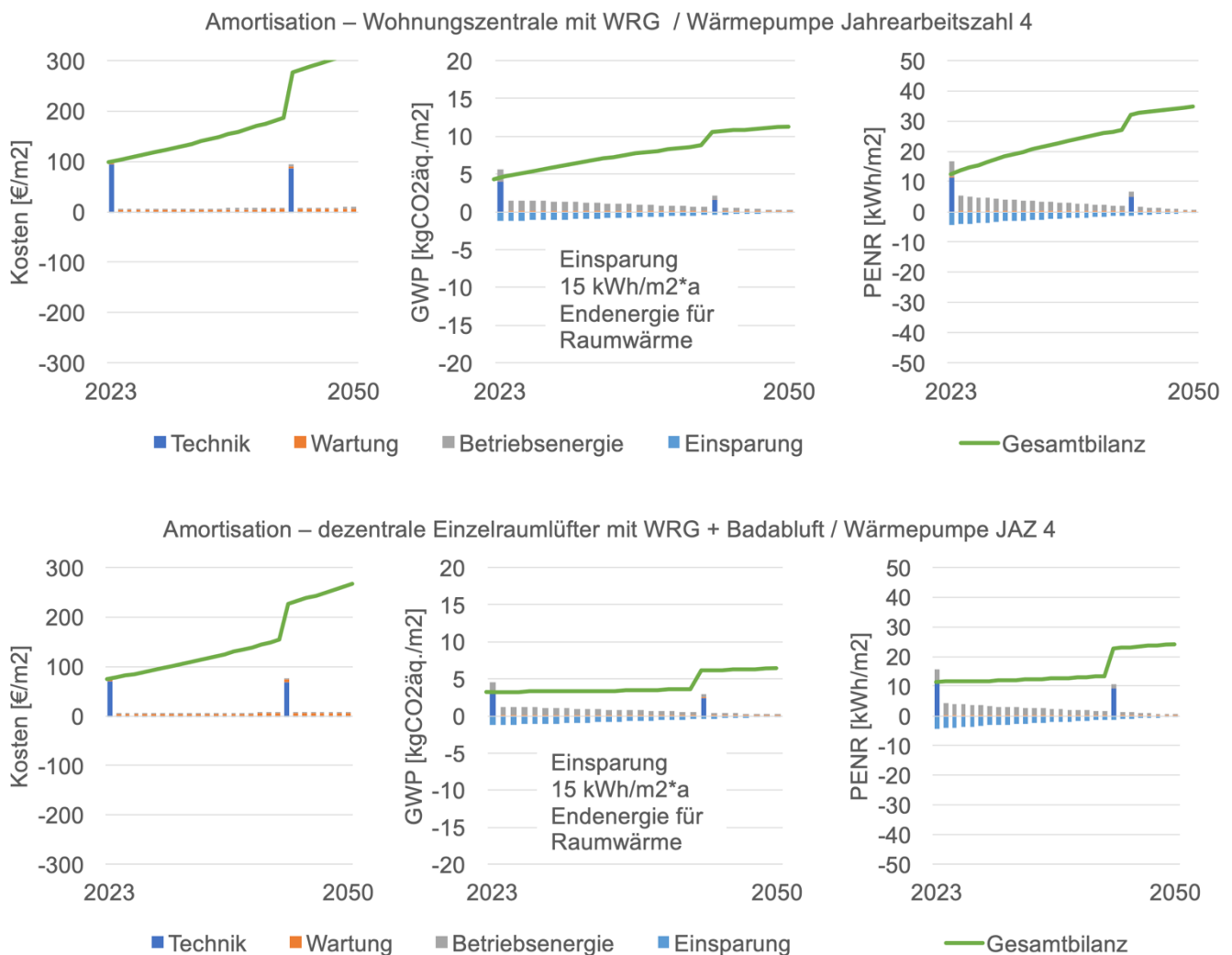


Bild 43, Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer angenommenen Einsparung von 15 kWh/m²*a Endenergie für Raumerwärmung, TU München

In Bild 43 werden die Ergebnisse unter der Annahme gezeigt, dass lediglich 15 kWh/m²*a Endenergie für die Raumheizung durch den Einsatz der Lüftung eingespart werden können. Es gibt keine Amortisation der Umweltauswirkungen durch den Einsatz der ventilatorgestützten Lüftung. Unter diesen Rahmenbedingungen wäre der Einsatz weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll.

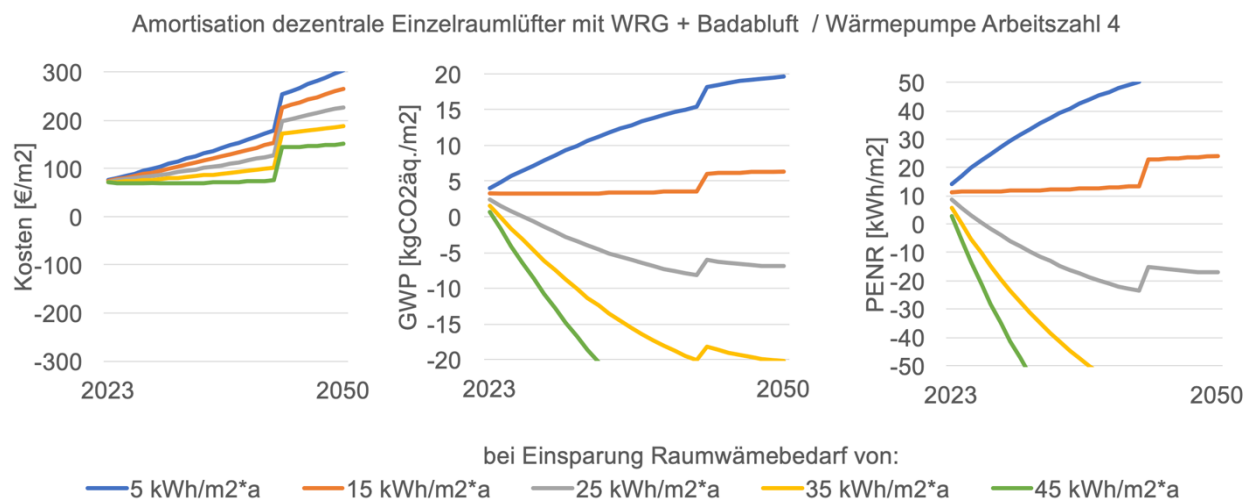
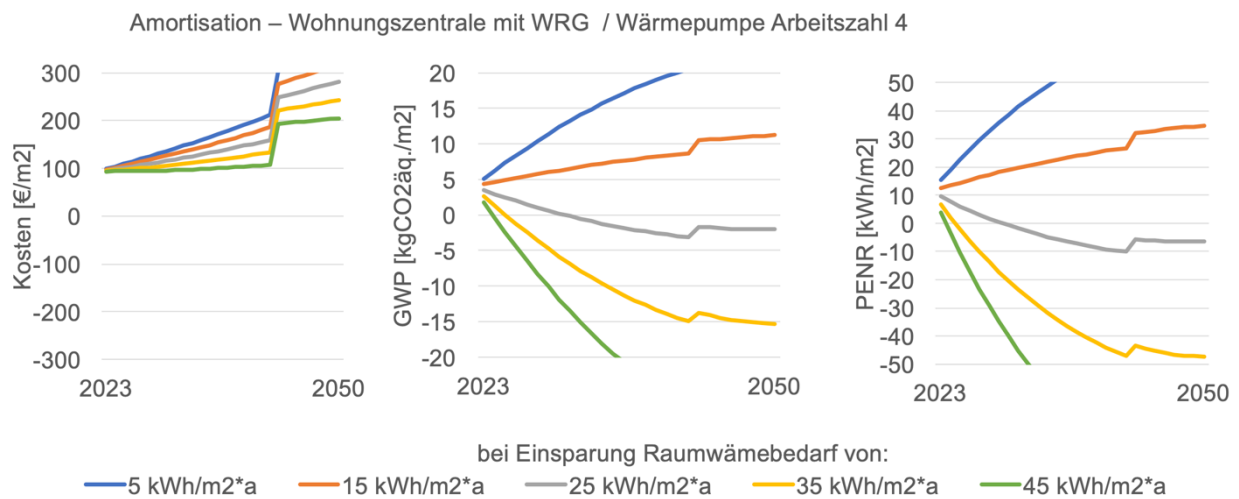


Bild 44, Übersicht Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer Wärmeerzeugung durch eine Wärmepumpe mit Jahresarbeitszahl von 4, TU München

Bild 44 zeigt eine Übersicht der Amortisation für angenommene Einsparungen von 5, 15, 25, 35 und 45 kWh/m²*a beim jährlichen Endenergieverbrauch für Raumheizung.

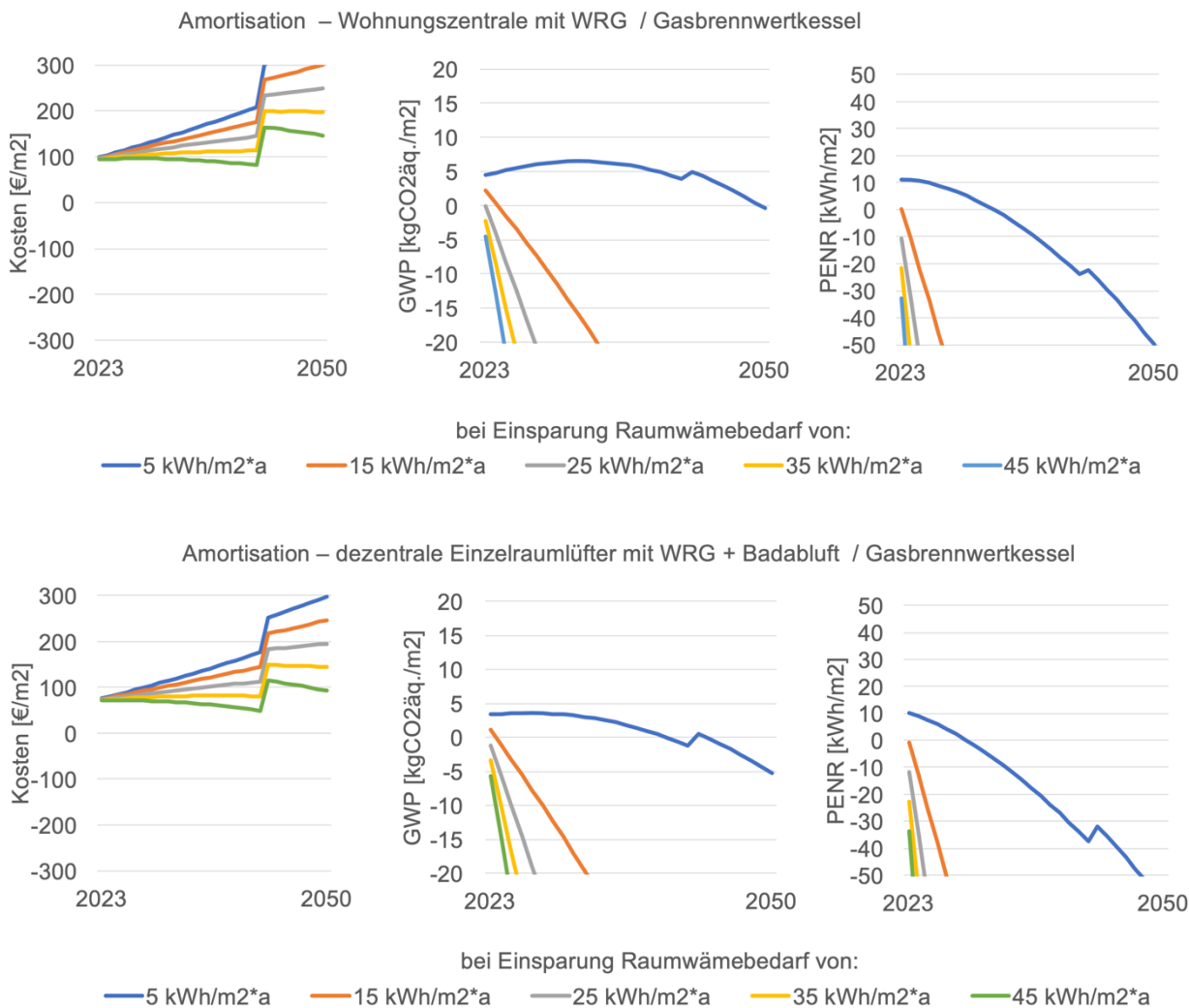


Bild 45, Übersicht Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer Wärmeerzeugung durch einen Gasbrennwertkessel, TU München

Im Bild 45 sind die Ergebnisse für eine Wärmeversorgung mit einem Gasbrennwertkessel dargestellt. Dort ist erkennbar, dass bereits eine Einsparung von 5 kWh/m²*a ausreicht, um eine ökologische Amortisation zu erreichen. Der positive ökologische Effekt nimmt Jahr für Jahr zu, da ein immer größerer Anteil an erneuerbarer Energie im Betriebsstrom der Lüftung enthalten ist und somit dessen negative Umweltauswirkung reduziert wird, was sich positiv in der Gesamtbilanz zeigt.

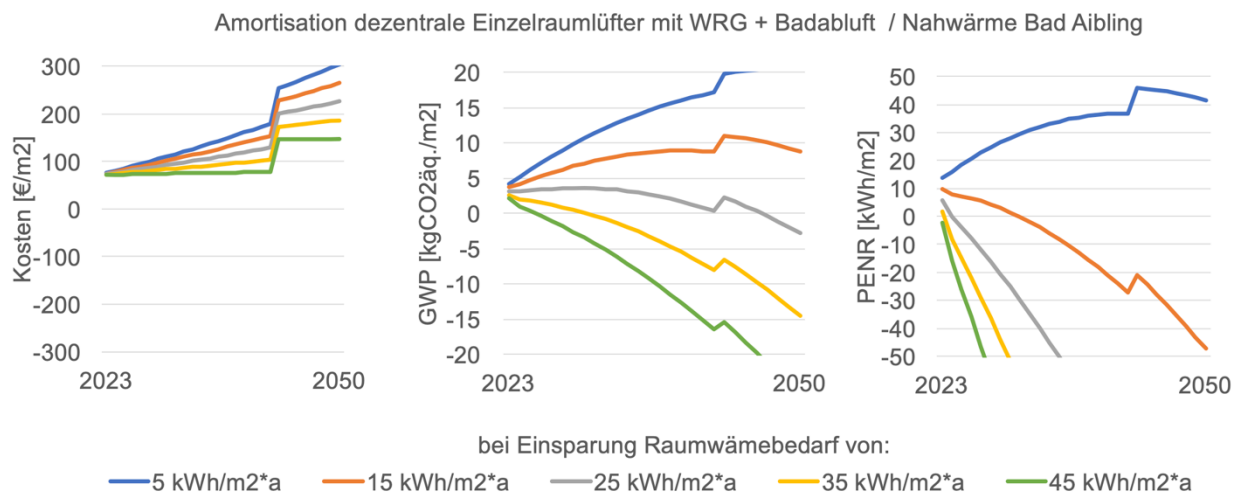
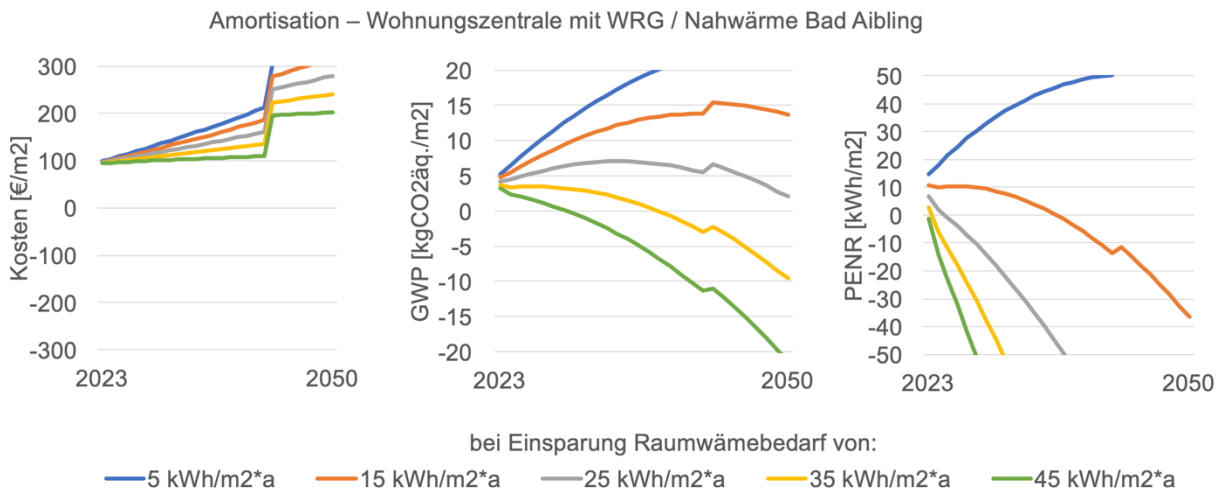


Bild 46, Übersicht Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer Wärmeversorgung über das Nahwärmenetz der Forschungshäuser in Bad Aibling, TU München

Im Bild 46 sind die Ergebnisse für eine Wärmeversorgung aus dem Nahwärmenetz in Bad Aibling dargestellt. Dort ist erkennbar, dass bei weniger als 25 kWh/ m²*a Einsparung pro Jahr keine Amortisation beim Treibhauspotenzial erreicht wird.

4.3.1. Limitierungen dieser Studie

So wie bereits in Kapitel 3 wurden weder bauseitige Anpassungen noch zusätzliche Lüftungsfunktionen wie Befeuchtung oder Vorwärmung der Zuluft noch Störungen oder Ausfälle der Technik berücksichtigt. Dadurch kann es sein, dass die Lüftungstechnik hier zu positiv bewertet wird.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden für die betrachteten Heizsysteme die positiven Effekte auf Kosten und Umweltwirkung untersucht, die sich aus der Reduktion des Endenergieverbrauchs für die Raumheizung ergeben.

Die Datengrundlage enthält Prognosen und Abschätzungen über die Zukunft, wodurch sich eine gewisse Unschärfe ergibt.

5. Fazit und Ausblick

Aus den Untersuchungen aus den Kapiteln 2 bis 4 werden nun die Antworten auf die Forschungsfragen formuliert und danach eine Stellung zur Hypothese bezogen.

Frage 1: Welche Lüftungswärmeverluste entstanden bei den Forschungshäusern während der Langzeitmessungen durch die Fensterlüftung und Undichtigkeiten der Gebäudehülle, die durch Zufuhr von Raumwärme ausgeglichen werden müssen?

Die Ergebnisse in Kapitel 2 deuten darauf hin, dass das Schließen der Fenster und hohe Gebäudedichtheit den Energiebedarf zur Raumheizung reduzieren könnten, sofern die Bewohner dies durchgängig praktizieren. Es gab jedoch einige Limitierungen, darunter eine begrenzte Stichprobe von nur vier Wohnungen und Unsicherheiten in den Berechnungsmethoden aufgrund von Annahmen und Datenlücken. Trotz der Unsicherheiten kann man von einem Einsparpotential von um etwa 30 kWh/m²a Nutzenergie ausgehen.

Frage 2: Welche Umweltauswirkungen und Kosten würden durch geeignete Wohnraumlüftungsanlagen über den Lebenszyklus hinweg entstehen?

In einer Lebenszyklusbetrachtung in Kapitel 3 wurden die Auswirkungen von verschiedenen Szenarien auf die Kosten, Umweltauswirkungen und den Energieverbrauch betrachtet. Die Szenarien reichen von einfacher Technik bis hin zu komplexen Lüftungssystemen. Dabei zeigt sich, dass zusätzliche Technik mehr kostet und sich die Umweltauswirkungen hauptsächlich durch den Betriebsstrom getrieben ist.

Frage 3: Welche Einsparungen an Raumwärme sind notwendig, damit sich die Wohnraumlüftungsanlage ökologisch oder ökonomisch amortisiert?

In Kapitel 4 wurden drei Wärmeerzeugungsvarianten untersucht: Nahwärmenetz Bad Aibling, Wärmepumpe mit Jahresarbeitszahl 4 und Gasbrennwertkessel. In Kombination mit einer Gastherme reicht bereits eine Einsparung von 5 kWh/m²a beim Endenergieverbrauch für die Raumheizung aus, damit sich der Einsatz einer Wohnraumlüftung ökologisch amortisiert. Bei einer Wärmepumpe und dem Nahwärmenetz in Bad Aibling müssen hingegen 25 kWh/m²a Endenergie eingespart werden, damit der Einsatz sich ökologisch amortisiert. Eine ökonomische Amortisation findet in keinem der untersuchten Szenarien statt.

Hypothese: Wohnraumlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind, unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll.

Betrachtet man die Kosten, lässt sich zumindest im Rahmen dieser Studie eindeutig feststellen, dass sich die Investitionskosten, die jährliche Wartungsaufwendungen und die Energiekosten für den Betrieb der Anlage nicht amortisieren würden.

Um die Umweltauswirkungen auszugleichen, müssten die Bewohner die Fensterlüftung während der Heizperiode erheblich reduzieren. In Verbindung mit einer verbesserten Abdichtung der Gebäudehülle müssten so mindestens 25 kWh/m²a Endenergie eingespart werden. Vergleichsmessungen zwischen Gebäuden mit Fensterlüftung und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung konnten weder bei Neubauten [GEWOFAG 2015] [Knecht und Sigrist 2019] noch bei Altbausanierung [Cali et al 2016] entsprechende hohe Einsparungen feststellen.

5.1. Ausblick

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die Lebenszyklusbetrachtung eine geeignete Methode ist, um den Erfolg von Effizienzstrategien zu bewerten. Dabei ist es wichtig, alle relevanten Prozesse und deren Veränderungen über den Betrachtungszeitraum hinweg zu erfassen. [Conrad 2020] ging sogar so weit, im Rahmen einer Untersuchung von Sanierungsszenarien für den Wohngebäudebestand die Wechselwirkung zwischen Gebäudebestand und Energieversorgungsnetz über den Tagesverlauf zu simulieren. Mit steigender Genauigkeit der Modelle werden die Unsicherheiten bei den Eingabewerten aber auch entsprechend relevanter. [Kargruber 2022]

In der Studie wurde gezeigt, dass die ökologische Amortisation von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung stark davon abhängt, ob die Bewohner sich ideal beim Lüften verhalten. Die aktuellen Rechenregeln für Energieverbrauchsprognosen setzen dieses ideale Verhalten voraus. Messungen in der Praxis haben gezeigt, dass Nutzer teilweise weit davon abweichen. [Lehmann et al. 2017] [Heesen, Madlener 2018] [GEWOFAG 2015]

[Loga & Behem 2021] arbeiten derzeit an der Entwicklung einer praxisnahen Grundlage, die auf umfangreichen Daten von über 100 sanierten Mehrfamilienhäusern basiert. Für sämtliche Eingabewerte wird ein typischer Bereich festgelegt, in dem der wahrscheinliche tatsächliche Wert liegt. Der Mittelwert kann dann als Eingabewert für das physikalische Modell verwendet werden. Die Gesamtunsicherheit des berechneten Energieverbrauchs ergibt sich aus den Unsicherheiten aller Eingabewerte. Diese Methodik führt zu einem erwarteten Bereich für den Energieverbrauch. Das Hauptziel der Autoren besteht darin, eine Datenbank aufzubauen, die kontinuierlich aktualisiert wird, um eine bessere Kenntnis der typischen Unsicherheitsbereiche zu ermöglichen. Insbesondere weisen die Autoren darauf hin, dass ihrer Ansicht nach noch Lücken bei den Standardwerten und Unsicherheiten im Zusammenhang mit Wärmeverlusten durch Wärmebrücken, Luftaustausch durch das Öffnen von Fenstern und der Effizienz von Wärmeversorgungssystemen bestehen.

Es besteht also weiterhin Forschungsbedarf hinsichtlich der Unsicherheiten und Mittelwerte der Eingabewerte. Diese Aufgabe ist anspruchsvoll, da die Parameter sich gegenseitig beeinflussen. Zum Beispiel konnten [Bauer et al. 2021] [Schröder & Gill et al. 2018] [Wolff et al. 2017] einen Zusammenhang zwischen dem Fensterlüftungsverhalten der Bewohner, dem Heizverhalten, dem Dämmstandard und der Wärmeverteilungstechnik nachweisen.

Energetische Prognosen, die im Rahmen politischer Steuerung wie Gesetze oder Förderprogramme Anwendung finden, sollten das Nutzerverhalten praxisnah abbilden und gleichzeitig den Materialaufwand sowie die Wartung berücksichtigen, um die richtige Steuerungswirkung zu erzielen.

Literaturverzeichnis

AGFW FW 309-1 (2021) Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 1 Energetische Bewertung von Fernwärme und Fernkälte - Primärenergie- und Emissionsfaktoren nach Stromgutschriftmethode: AGFW e. V. Ausgabe Mai 2012.

ASHRAE. Standard 62-73, Standards for Natural and Mechanical Ventilation. American Society for Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA; 1973

ASHRAE. Standard 62.2016, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. American Society for Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA; 2016

Bauer, A., Möller, S., Gill, B., & Schröder, F. (2021). When energy efficiency goes out the window: How highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany. Energy Research & Social Science, 72, 101888.

BBSR (2022) Ökobaudat – Informationsportal für Nachhaltiges Bauen [online]. Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. <https://www.oekobaudat.de/> [Zugriff am: 13. Aug. 2022]

BBSR (2017) Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) [online]. Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf

Bienfait, D. (1992). ECA Report No. 11 Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings. Commission of the European Communities: Bruxelles, Belgium.

Blom, I., Itard, L., & Meijer, A. (2010). LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings. Building and Environment, 45(11), 2362-2372.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020. Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020, Berlin. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2020.html>.

Borsch-Laaks, R. (2001). Lüftung im Wohngebäude-Wissenswertes über den Luftwechsel und moderne Lüftungsmethoden – Broschüre Energiesparinformationen 8. Wiesbaden, Darmstadt: Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten Referat Öffentlichkeitsarbeit, Institut Wohnen und Umwelt.

Bundestag, D. (2020). Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz-GEG). GEG. Fundstelle: BGBl. I S, 1728.

Bundestag, D. (2021). Bundes-Klimaschutzgesetz: KSG. Deutscher Bundestag: Berlin, Germany.

Cali, D., Osterhage, T., Streblow, R., & Müller, D. (2016). Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. Energy and Buildings, 127, 1146-1158.

Conrad, J. (2020). Modellierung und Bewertung von Maßnahmen zur kosteneffizienten CO₂-Verminderung im Sektor private Haushalte (Doctoral dissertation, Technische Universität München).

Coutalides, R., Hauri, T., Horowitz, L., Heinss, U., Samuel, K., Zachau, M. & Wenger, L. (2009). LIWOTEV-Report. Luftqualität in Wohnbauten mit tiefem Energieverbrauch, Bau- und Umweltchemie Beratungen + Messungen AG Zürich (Hrsg.), Schweiz.

Dall'O', G., Sarto, L., Galante, A., & Pasetti, G. (2012). Comparison between predicted and actual energy performance for winter heating in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy). Energy and Buildings, 47, 247-253.

DIN 1946-6:2019-12 (2019) Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung. Berlin: Beuth.

DIN 4108-3:2018-10 (2018) Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Berlin: Beuth.

DIN 18017-3:2020-05 (2020) Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Außenfenster – Teil 3: Lüftung mit Ventilatoren. Berlin: Beuth.

DIN EN 16798-1:2021-04, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6. Berlin: Beuth.

DIN EN 15665:2009-07, Lüftung von Gebäuden – Bestimmung von Leistungskriterien für Lüftungssysteme in Wohngebäuden. Berlin: Beuth.

DIN EN 15978:2012-10 (2010) Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011. Berlin: Beuth.

DIN EN 16798-1/NA:2021-06, Nationaler Anhang – Nationale Ergänzungen und Hinweise zur Anwendung – Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6. Berlin: Beuth.

DIN EN 60300-3-3:2014-09 (2014) Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten (IEC 56/1549/CD:2014). Berlin: Beuth.

DIN EN ISO 14044:2021-2 (2021) Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Berlin: Beuth.

DIN/TS 4108-8:2022-09 (2022) Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäude. Berlin: Beuth.

DIN V 18599-1:2018-09 (2018) Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Berlin: Beuth.

DIN V 18599-2:2018-09 (2018) Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen. Berlin: Beuth.

Endres, M. E., Franke, L., Dong, M. S., & Neubert, L. (2017). Parameterstudie Low-Tech Bürogebäude. Technische Universität München. Endbericht. BBSR, Zukunft Bau: SWD-10.08.18.7-16.65.

Fanger, P. O. (1988). Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors. *Energy and buildings*, 12(1), 1-6.

Fanger, P. Ole, et al. (1988) "Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit." *Energy and Buildings* 12.1 (1988): 7-19

Ficht, R. (2022). Entwicklung probabilistischer Modelle zur Abbildung unsicherer Randbedingungen in der Gebäudesimulation (Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science, TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München).

Franke, L.; Niemann, A.; Varga, Z.; Kränkel, T.; Jarmer, T.; Auer, T.; Nagler, F. (2023): Einfach Bauen 3 – Messen, Validieren, Rückkoppeln: Monitoring der Pilothäuser aus Massivholz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk aus Einfach Bauen 2 (SWD-10.08.18.7-18.32) und Validierung der Ergebnisse. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

Freire, R. Z., Abadie, M. O., & Mendes, N. (2009). Integration of natural ventilation models in the hygrothermal and energy simulation program PowerDomus.

Fritsche, U. R.; Greß, H. W. (2020) Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG- Emissionen des deutschen Strom-Mix im Jahr 2019 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050 [online]. Darmstadt: IINAS GmbH.
https://iinas.org/app/downloads_from_old_page/GEMIS/2020_KEV_THG_Strom-2019_2020-2050.pdf [Zugriff am: 6. Okt. 2023]

Fritsche, U. R.; Greß, H. W. (2021) THG-Emissionen und nichterneuerbarer Primärenergieverbrauch des deutschen Erdgasmix im Jahr 2019 und 2020 sowie Ausblick auf 2030 [online]. Darmstadt: IINAS GmbH.
<https://iinas.org/app/uploads/2021/12/IINAS-2021-KEV-THG-Gas-ASEW-final.pdf> [Zugriff am: 6. Okt. 2023]

Galvin, R. (2014). Making the ‘rebound effect’ more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the ‘energy savings deficit’ and the ‘energy performance gap’. *Energy and Buildings*, 69, 515-524.

GEWOFAG (2015) Forschung für energiesparende Bauen der Zukunft – Forschungsprojekt Riem [online]. München: GEWOFAG Holding GmbH. [https://www.gewofag.de/web.nsf/id/broschuere-forschungshaeuser-riem-gewofag/\\$file/Broschuere_Forschungshaeuser_Riem.pdf](https://www.gewofag.de/web.nsf/id/broschuere-forschungshaeuser-riem-gewofag/$file/Broschuere_Forschungshaeuser_Riem.pdf) [Zugriff am: 13. Aug. 2022]

Hackl, R. (2017) Wärme und Feuchterückgewinnung mit einem System [online]. Stuttgart: Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. <https://www.haustec.de/klima-lueftung/lueftungstechnik/waerme-und-feuchte-rueckgewinnung-mit-einem-system> [Zugriff am: 27. Sep. 2023]

Heesen, F., & Madlener, R. (2018). Consumer behavior in energy-efficient homes: The limited merits of energy performance ratings as benchmarks. *Energy and Buildings*, 172, 405-413.

Hitchin, R. (2019). Primary Energy Factors and the primary energy intensity of delivered energy: An overview of possible calculation conventions. *Building Services Engineering Research and Technology*, 40(2), 198-219.

Hogeling, J. A. A. P. (2018). New standardization project on Primary energy factors and Greenhouse gas emission factors. *REHVA J*, 57.

Jarmer, T.; Niemann, A.; Franke, L.; Varga, Z.; Diewald, F.; Nagler, F.; Auer, T. (2021) Einfach Bauen 2: Planen, Bauen, Messen – Anwendung integraler Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

Jarmer, T. (2023). Einfach Bauen – spart eine Wohnraumlüftungsanlage Kosten und Energie? *Bautechnik*, 100(1), 23-34.

Kargruber, J. (2022). Validierung des thermisch-dynamischen Simulationsmodells aus dem Forschungsprojekt Einfach Bauen 3 der TUM anhand von Messdaten (Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science, TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München).

Keller, Bruno; Rutz, Stephan (2010): Pinpoint. Key facts + figures for sustainable buildings. Basel, Zürich: Birkhäuser; vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

- Khalifa, I., Gharbi Ernez, L., Znouda, E., & Bouden, C. (2015). Coupling TRNSYS 17 and CONTAM: simulation of a naturally ventilated double-skin façade. *Advances in Building Energy Research*, 9(2), 293-304.**
- Klauss, A. K., Tull, R. H., Roots, L. M., & Pfafflin, J. R. (1970). History of the changing concepts in ventilation requirements. *ASHRAE Journal*, 53(2), 34-41.**
- Klinge, A., Roswag-Klinge, E., Fontana, P., Hoppe, J., Richter, M., & Sjöström, C. (2016). Reduktion von Lüftungstechnik durch den Einsatz klimasteuernder Naturbaustoffe-Ergebnisse aus dem EU Forschungsvorhaben H-House und der Baupraxis.**
- Knecht, K.; Sigrist, D. (2019) Vergleich der beiden Lüftungskonzepte der Siedlung Klee bezüglich Ökologie und Ökonomie [online]. Dübendorf: s3 GmbH. <https://docplayer.org/115270007-Vergleich-der-beiden-lueftungskonzepte-der-siedlung-klee-bezueglich-oekologie-und-oekonomie.html> [Zugriff am: 13. Aug. 2022]**
- Lai, H. K., Kendall, M., Ferrier, H., Lindup, I., Alm, S., Hänninen, O., ... & Nieuwenhuijsen, M. J. (2004). Personal exposures and microenvironment concentrations of PM_{2.5}, VOC, NO₂ and CO in Oxford, UK. *Atmospheric Environment*, 38(37), 6399-6410.**
- Larsen, T. S. (2006). Natural Ventilation Driven by Wind and Temperature Difference. (DCE Thesis No. 2, Department of Civil Engineering, Aalborg University).**
- Lehmann, U., Khoury, J., & Patel, M. K. (2017). Actual energy performance of student housing: Case Study, benchmarking and performance gap analysis. *Energy Procedia*, 122, 163-168.**
- Loga, T., & Behem, G. (2021). Target/actual comparison and benchmarking used to safeguard low energy consumption in refurbished housing stocks. *Proceedings of the ecee Summer Study 2021*, 461-471.**
- Maas, A. (1995). Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung (Dissertation, Fachbereichs Architektur der Universität Gesamthochschule Kassel).**

Mahdavi, A., Berger, C., Amin, H., Ampatzi, E., Andersen, R. K., Azar, E., ... & Verbruggen, S. (2021). The role of occupants in buildings' energy performance gap: myth or reality? *Sustainability*, 13(6), 3146.

Moriyama, M., Hugentobler, W. J., & Iwasaki, A. (2020). Seasonality of respiratory viral infections. *Annual review of virology*, 7, 83-101.

Nagler, F.; Jarmer, T.; Niemann, A., Cruel, A.; Auer, T.; Franke, L.; Kaufmann, H.; Winter, S.; Ott, S.; Krechel, M.; Gehlen, C.; Thiel, C. (2019) Einfach Bauen – Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Nagler, F. [Hrsg.] (2022) Einfach Bauen – Ein Leitfaden. Basel: Birkhäuser.

Oberste Baubehörde (2017) e% – Energieeffizienter Wohnungsbau – Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellvorhabens; Projektevaluation der wissenschaftlichen Begleitung des Modellvorhabens „e% – Energieeffizienter Wohnungsbau“ des Experimentellen Wohnungsbaus der Obersten Baubehörde. München: Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr.

Passivhaus Institut GmbH (2023) Passivhaus Portal Komponentendatenbank. https://database.passivehouse.com/de/components/list/group_2? [Zugriff am: 18. Sep. 2023]

Passivhaus Institut GmbH/1 (2022) Komponentendatenbank – Dezentrale Lüftungsgeräte (Einzelraumgeräte/Einzelraumgeräte mit Zweitraumanschluss) [online]. Darmstadt: Passivhaus Institut. https://database.passivehouse.com/de/components/list/ventilation_decentralised_single?lat=491&lon=9&cz=5 [Zugriff am: 12. Feb. 2022]

Passivhaus Institut GmbH/2 (2022-2) Komponentendatenbank – Kleine Lüftungsgeräte [online]. Darmstadt: Passivhaus Institut. https://database.passivehouse.com/de/components/list/ventilation_small?lat=491&lon=9&cz=51 [Zugriff am: 12. Feb. 2022]

Persily, A. (2015). Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62. *Building and Environment*, 91, 61-69.

Phaff, J. C., & De Gids, W. F. (1980). The ventilation of buildings: investigation of the consequences of opening one window on the internal climate of a room.

Ramírez-Villegas, R., Eriksson, O., & Olofsson, T. (2019). Environmental payback of renovation strategies in a northern climate—the impact of nuclear power and fossil fuels in the electricity supply. *Energies*, 13(1), 80.

Richter, W., Seifert, J., Gritzki, R., & Rösler, M. (2003). Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht. Forschungsvorhaben BBR, Fraunhofer IRB Verlag.

Schlesinger, M., Hofer, P., Kemmler, A., Kirchner, A., Koziel, S., Ley, A., ... & Ulrich, P. (2014). Entwicklung der Energiemärkte—Energierferenzprognose. Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel/Köln/Osnabrück: ewi/gws/prognos.

Schröder, F., Gill, B., Güth, M., Teich, T., & Wolff, A. (2018). Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards—Sind Rebound-Effekte unvermeidbar?. *Bauphysik*, 40(3), 151-160.

Schröder, F., Seeberg, A., Novotny, D., Johannsen, F., & Cerny, R. (2018). Statistische Energiekennzahlen für Deutschland: Heizenergie-Verbrauchsentwicklung im Wohnungsbestand seit 2004. *Bauphysik*, 40(4), 203-213.

Shi, X., Si, B., Zhao, J., Tian, Z., Wang, C., Jin, X., & Zhou, X. (2019). Magnitude, causes, and solutions of the performance gap of buildings: A review. *Sustainability*, 11(3), 937.

Sterling, E. M., & Arundel, A. (1985). Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings

Theißen, S., Höper, J., Drzymalla, J., Wimmer, R., Markova, S., Meins-Becker, A., & Lambertz, M. (2020). Using open BIM and IFC to enable a comprehensive consideration of building services within a whole-building LCA. *Sustainability*, 12(14), 5644.

Vardoulakis, S., Giagloglou, E., Steinle, S., Davis, A., Sleuwenhoek, A., Galea, K. S., Dixon, K. & Crawford, J. O. (2020). Indoor exposure to selected air pollutants

in the home environment: A systematic review. *International journal of environmental research and public health*, 17(23), 8972.

VDI 2067:2012-11 (2012) Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. Berlin: Beuth. Ausgabe Nov. 2012.

VDI 6022-1:2018-01 (2018) Raumluftechnik, Raumlufqualität – Hygieneanforderungen an raumluftechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln). Berlin: Beuth.

Von Pettenkofer, M. (1858). Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cotta.

Wolff, A., Weber, I., Gill, B., Schubert, J., & Schneider, M. (2017). Tackling the interplay of occupants' heating practices and building physics: Insights from a German mixed methods study. *Energy research & social science*, 32, 65-75.

World Health Organization. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization. Regional Office for Europe, 2010.

Wouters, P., De Gids, W. F., & Warren, P. R. (1987). Ventilation rates and energy losses due to window opening behaviour.

Yaglou, C. P., Riley, E. C., & Coggins, D. I. (1936). Ventilation requirements. *Ashve transactions*, 42(1), 133-162.

Abbildungsverzeichnis

Bild 1, Luftwechselraten zum Feuchteschutz nach Nutzung versus Auslegung nach DIN 1946-6.....	8
Bild 2, Hygienischer Luftwechsel nach Nutzung versus Auslegung nach Norm DIN 1946-6	9
Bild 3, Luftwechsel zur Verdünnung von Emissionen aus dem Gebäude versus Auslegung nach Norm DIN 1946-6.....	10
Bild 4, Straßenansicht der drei Forschungshäuser kurz vor Fertigstellung, Quelle: Tilmann Jarmer	20
Bild 5, Grundrisse Gebäude in Bad Aibling, von links nach rechts: Erdgeschoss, 1. Obergeschoss, 2. Obergeschoss, Quelle: Florian Nagler Architekten	21
Bild 6, Anteil fehlender Datensätze je Monat in %, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	25
Bild 7, Anteil fehlender Datensätze je Monat in %, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	26
Bild 8, Anteil fehlender Datensätze je Monat in %, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	27
Bild 9, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Holz Nord [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	30
Bild 10, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Holz Süd [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	30
Bild 11, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Leichtbeton Süd [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	31
Bild 12, Durchschnittliche Temperaturen Raumlufte und Heizkörper über den Verlauf des Jahres, Wohnung Mauerwerk Süd [° C], Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	31
Bild 13, Betrachtete Sensoren in den Wohnungen: Raumlufteemperatur, Heizkörpertemperatur und Fensteröffnung, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München	32

Bild 14, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Holz Nord, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	33
Bild 15, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Holz Süd, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	33
Bild 16, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Leichtbeton Süd, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	34
Bild 17, Anteil der Zeit zu der geheizt und/oder gelüftet wurde, Wohnung Mauerwerk Süd, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	34
Bild 18, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Guckerl“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	40
Bild 19, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Mittelgroß“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	41
Bild 20, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Schwingflügelfenster“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	42
Bild 21, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Loggiatür“, Gebäude Holz, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	43
Bild 22, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Guckerl“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	44
Bild 23, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Mittelgroß“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	45
Bild 24, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Schwingflügelfenster“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	46
Bild 25, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Loggiatür“, Gebäude Leichtbeton, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	47
Bild 26, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Guckerl“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	48
Bild 27, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Mittelgroß“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	49
Bild 28, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Schwingflügelfenster“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München.....	50
Bild 29, Detailzeichnung der Fenster, ohne Maßstab, „Loggiatür“, Gebäude Mauerwerk, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	51
Bild 30, mittlere Luftwechselrate über Fenster während geheizt wurde, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	54

Bild 31, Wärmeverluste über Fensterlüftung während geheizt wurde, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	55
Bild 32, Wärmeverluste über Infiltration während geheizt wurde, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	56
Bild 33, Abschätzung Wärmeverluste durch Fensterlüftung und Infiltration bezogen auf die Wohnfläche [kWh/m²a], Zeitraum 15.9.2021 – 14.9.2022, Quelle: TU München	56
Bild 34, links: Abschätzung der Wärmeverluste durch Fensterlüftung und Infiltration bezogen auf die Wohnfläche [kWh/m²a], Zeitraum 15.9.2021 – 14.9.2022, für verschiedene angenommene Anteile der Fensterstellung (geöffnet, übrige gekippt); rechts: Messwerte des Energieverbrauchs zur Raumerwärmung bezogen auf die Wohnfläche [kWh/m²a], Zeitraum 1.9.2021 – 31.8.2022, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München	59
Bild 35, Grundriss Schema Szenario A: Fensterlüftung / Badabluft präsenzgeführt, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]	62
Bild 36, Grundriss Schema Szenario B: Fensterlüftung / Badabluft präsenzgeführt mit Grundlüftung, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]	63
Bild 37, Grundriss Schema Szenario C: Dezentrale Einzelraumlüfter mit Wärmerückgewinnung (WRG) + Badabluft, Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023].....	64
Bild 38, Grundriss Schema Szenario D: Wohnungszentrale Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung (WRG), Quelle: Florian Nagler Architekten / Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023]	65
Bild 39, Übersicht Wirkungsbilanz je Quadratmeter Wohnfläche und Jahr, Quelle: Tilmann Jarmer, TU München [Jarmer 2023].....	69
Bild 40, Entwicklung von Kosten und Umweltwirkung für Energieträger, TU München.....	71
Bild 41, Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer angenommenen Einsparung von 35 kWh/m²*a Endenergie für Raumerwärmung, TU München...	74
Bild 42, Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer angenommenen Einsparung von 25 kWh/m²*a Endenergie für Raumerwärmung, TU München...	75
Bild 43, Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer angenommenen Einsparung von 15 kWh/m²*a Endenergie für Raumerwärmung, TU München...	76

Bild 44, Übersicht Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer Wärmeerzeugung durch eine Wärmepumpe mit Jahresarbeitszahl von 4, TU München.....	77
Bild 45, Übersicht Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer Wärmeerzeugung durch einen Gasbrennwertkessel, TU München	78
Bild 46, Übersicht Amortisation von Wohnraumlüftung bei einer Wärmeversorgung über das Nahwärmenetz der Forschungshäuser in Bad Aibling, TU München.....	79

