



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM

Bachelorarbeit

Energetische Betrachtung der manuellen Fensterlüftung

Untersuchung des Nutzerverhaltens in Wohnräumen im Heizfall

im Studiengang Energie- und Gebäudetechnik

vorgelegt von: Adrian Volk

Studienbereich: Versorgungstechnik

Matrikelnummer: 2976528

Erstgutachter: Prof. Dr. Wolfram Stephan

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel

Ort, Abgabetermin: Nürnberg, 31.07.2020

© 2020

Dieses Werk einschließlich seiner Teile ist **urheberrechtlich geschützt**. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Abstract

Die vorliegende Bachelorarbeit erweitert ein aus Seifert [1] bekanntes Berechnungssystem zur Berechnung des Luftwechsels bei Fensterlüftung um verschiedene, anhand einer Umfrage erarbeitete, Nutzerprofile. Die Nutzerprofile werden bei unterschiedlichen Fensteröffnungsvarianten bezüglich Energieverlust und hygienischer Effektivität bewertet und verglichen. Die Ergebnisse bestätigen zum großen Teil bereits aus Gritzki [2], Hall [3], Maas [4], Oppermann [5] und allgemein bekannte Annahmen, dass zum Beispiel besser oft und dafür kurz oder mit möglichst großen Öffnungsflächen, sowie Durchzug gelüftet werden sollte.

Die Ergebnisse der eigenen Berechnungen zeigen, dass mit größerer Öffnungsfläche die korrekte Lüftungszeit immer wichtiger wird, da sonst schnell große Mengen an Energie verloren gehen. Aus dem Vergleich des hygienisch effektiv wirksamen Luftwechsels mit dem Energieverlust der jeweiligen Öffnungsvarianten geht hervor, dass die Lüftungszeit unbedingt an die Öffnungsvariante angepasst werden muss, da sonst entweder keine wirksamen hygienischen Effekte erzielt werden können oder unnötig viel Energie verloren geht. Des Weiteren reicht es, um effektiv zu lüften, nicht aus, die Lüftungsdauer an die Jahreszeiten anzupassen. Die Dauer des Öffnens muss je Öffnungsart, momentaner Temperaturdifferenz von Außenluft zu Raumluft und Einfluss des Windes angepasst werden.

Anhand der Auswertung der 27- Fragen umfassenden Umfrage an 372 Teilnehmern wird zum Beispiel gezeigt, dass knapp zwei Drittel der Befragten mit dem Konzept der Fensterlüftung sehr zufrieden sind. Aus dem Vergleich mehrerer Fragen geht hervor, dass die Teilnehmer, die selbst öfter mit dem Fenster Lüften, tendenziell auch zufriedener mit dem Lüftungskonzept sind. Des Weiteren steigt die Zufriedenheit mit der Aufklärung über das Lüftungskonzept. Die Frage des Wäschetrocknens in der Wohnung wird gesondert ausgewertet, da hierdurch, selbst mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung, ein großer Lüftungsbedarf durch das Fenster entsteht. Festzustellen ist zum Beispiel, dass Mieter, im Vergleich zu Hauseigentümern, eher die Wäsche in der Wohnung trocknen. Ein eindeutiger Einfluss auf die Lüftungshäufigkeit zeigt sich jedoch nicht.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	IX
Formelzeichen und Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Natürliche Lüftung	2
2.2 Lüftungseffektivität	3
2.3 Behaglichkeit	5
2.3.1 Thermische Behaglichkeit	6
2.3.2 Raumluftqualität	8
2.3.3 Einflussnahme durch den Nutzer	9
2.4 Bauphysikalische und hygienische Aspekte	9
2.5 Energetische Aspekte	11
2.6 Rechtliche Aspekte	11
2.7 Schadenssituation durch Schimmel	13
2.7.1 Beurteilung vorhandener Schäden	13
2.7.2 Vorgehen bei Feuchte- und Schimmelschäden	13
2.7.3 Häufigkeit von Schimmelbefall in Wohnhäusern	14
3 Luftwechsel bei Fensterlüftung	16
3.1 Überblick der Methoden zur Luftwechselermittlung	16
3.1.1 Durch Messung	18
3.1.1.1 Tracergasmessmethode	18
3.1.1.2 Bestimmung der lokalen Luftalter	19
3.1.2 Durch Berechnung	20
3.1.2.1 Näherungsformel nach VDI	20
3.1.2.2 Ansatz nach Maas	21
3.1.2.3 Numerische Simulation der lokalen Luftalter	22
3.2 Bewertung des Luftwechsels	23
3.2.1 Hygienischer Luftwechsel	25

3.2.2	Energetischer Luftwechsel	26
4	Energieverlustberechnung	27
4.1	Randbedingungen	27
4.1.1	Der Referenzraum	27
4.1.2	Wetterdaten	28
4.1.3	Nutzerprofile	29
4.2	Berechnungsweg	31
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	32
5	Untersuchung des Nutzerverhaltens	38
5.1	Forschungsdesign	38
5.2	Durchführung der Studie	39
5.3	Auswertung der Studie	43
5.4	Ergebnisse	44
6	Abschließende Bemerkungen	53
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	53
6.2	Weiterführende Gedanken	54
	Literaturverzeichnis	55
7	Anhang	61
	Prüfungsrechtliche Erklärung	80

Abbildungsverzeichnis

2.1	Klassifizierung der Effektivität eines Lüftungskonzepts aus Gritzki [2] . . .	4
2.2	Zu erwartender Prozentsatz unzufriedener Personen (PPD) in Abhängigkeit der mittleren subjektiven Klimabewertung (PMV)	7
2.3	Ergebnisse der Umfrage zu Schimmelbefall in Wohnräumen aus de.statista.com [28]	15
2.4	Ergebnisse der Umfrage zu Schimmelbefall in Wohnräumen aus Kapitel 5	15
3.1	Einflussfaktoren auf den Luftwechsel. Modifiziert aus Maas [4]	17
3.2	Modell für die Tracergas-Luftwechsellmessung eines Messraums	18
3.3	Modell für die Bestimmung der lokalen Luftalter eines Messraums	19
3.4	Vergleich der Berechnungswerte Ansatz nach Maas [4] und VDI 2078 [29] für den Öffnungswinkel 15° bei Fenstermaßen von 1 m auf 1 m . . .	22
3.5	Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für verschiedene Öffnungswinkel bei $u = 5\text{ m/s}$ aus Maas [4]	23
3.6	Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für verschiedene Kippstellungen mit und ohne Rahmen ohne Windeinfluss aus Maas [4]	24
3.7	Vergleich der berechneten Zuluftvolumenströme ohne Windeinfluss. Modifiziert aus Seifert [1] und Maas [4] bei ähnlicher Raumgeometrie . . .	25
3.8	Berechnungswerte für den globalen, energetischen und hygienischen Luftwechsel aus Seifert [1]	26
4.1	Bemaßte Ansicht in mm des ausgewählten Modellraums	28
4.2	Lüftungsplan 1	29
4.3	Lüftungsplan 2	30
4.4	Lüftungsplan 3 - ein Fenster geöffnet	31
4.5	Jährlicher Energieverlust je Lüftungsplan je Lüftungsvariante	33
4.6	Jährlicher Energieverlust bei Lüftungsplan 3 je Lüftungsvariante	34
4.7	Energieverlust pro Minute je Lüftungsplan je Lüftungsvariante	34
4.8	Durchschnittlicher täglicher hygienischer Luftwechsel je Lüftungsplan je Lüftungsvariante	35
4.9	Theoretisch erreichter Luftwechsel pro Tag pro Watt Energieverlust . . .	36
4.10	Energieverbrauch der privaten Haushalte in Deutschland nach Anwendungsbereich im Jahr 2017	37
5.1	Zeitlicher Verlauf der Teilnahmen an der Umfrage	44

5.2	relative Projizierung der <i>Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... manuell mit dem Fenster</i> auf die <i>Frage 18: Frische Luft in der Wohnung ist mir ...</i>	44
5.3	Relative Projizierung der <i>Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... manuell mit dem Fenster</i> auf die <i>Frage 25: Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...</i>	45
5.4	Relative Projizierung der <i>Frage 23: Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte</i> auf die <i>Frage 25: Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...</i>	45
5.5	Relative Projizierung der <i>Frage 23: Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte</i> auf die <i>Frage 15: In folgenden Räumen kippe ich die Fenster gerne dauerhaft</i>	46
5.6	Relative Projizierung der <i>Frage 23: Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte</i> auf die <i>Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster.</i>	47
5.7	Relative Projizierung der <i>Frage 23: Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte</i> auf die <i>Frage 19: Das Fenster wird nach dem Öffnen ...</i>	47
5.8	Relative Projizierung der <i>Frage 23: Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte</i> auf die <i>Frage 24: Mich interessiert die Heizungs- und Lüftungsanlage in meiner Wohnung ...</i>	48
5.9	Relative Projizierung der <i>Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet</i> auf die <i>Frage 3: Ich wohne momentan als: ...</i>	48
5.10	Relative Projizierung der <i>Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet</i> auf die <i>Frage 12: Ich schlafe in der Übergangszeit mit dem Fenster...</i>	49
5.11	Relative Projizierung der <i>Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet</i> auf die <i>Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster.</i>	49
5.12	relative Projizierung der <i>Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet</i> auf die <i>Frage 25: Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...</i>	50
5.13	Relative Projizierung der <i>Frage 22: Ich hatte ... Probleme mit Schimmel in meiner Wohnung</i> auf die <i>Frage 2: Ich bin ... Jahre alt.</i>	51
7.1	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster gekippt	62

7.2	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster halb geöffnet	63
7.3	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster geöffnet	64
7.4	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern gekippt	65
7.5	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern halb geöffnet	66
7.6	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern geöffnet	67
7.7	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster gekippt	68
7.8	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster halb geöffnet	69
7.9	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster geöffnet	70
7.10	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern gekippt	71
7.11	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern halb geöffnet	72
7.12	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern geöffnet	73
7.13	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster gekippt	74
7.14	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster halb geöffnet	75
7.15	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster geöffnet	76
7.16	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern gekippt	77
7.17	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern halb geöffnet	78
7.18	Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern geöffnet	79

Tabellenverzeichnis

2.1	Luftwechsel in Abhängigkeit der Fensterlüftung und der Gebäudedichtheit nach Recknagel [10]	3
2.2	Kategorien des Umgebungsklimas bezogen auf PPD und PMV	8
4.1	Übersicht der Ergebnisse	32
4.2	Vergleich jährlicher Energieverlust bezogen auf ein Fenster geöffnet . . .	33
7.1	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster gekippt	62
7.2	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster halb geöffnet	63
7.3	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster geöffnet	64
7.4	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern gekippt	65
7.5	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern halb geöffnet	66
7.6	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern geöffnet	67
7.7	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster gekippt	68
7.8	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster halb geöffnet	69
7.9	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster geöffnet	70
7.10	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern gekippt	71
7.11	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern halb geöffnet	72
7.12	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern geöffnet	73
7.13	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster gekippt	74
7.14	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster halb geöffnet	75
7.15	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster geöffnet	76

7.16	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern gekippt	77
7.17	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern halb geöffnet	78
7.18	Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern geöffnet	79

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom lüftungstechnisch	m^3/h
C_1	Konstante des Turbulenzmodells	-
C_2	Konstante des Turbulenzmodells	$m/(s^2 * K)$
C_3	Konstante des Turbulenzmodells	m^2/s^2
g	Gravitationsvektor	m/s^2
H	Höhe	m
t	Zeitspanne, Lüftungszeit	h
T	Temperatur	$K, ^\circ C$
u	Windgeschwindigkeit	m/s
λ	Luftwechsel	$1/h$
l	Länge	m
b	Breite	m
h	Höhe	m
ρ	Dichte	kg/m^3
c	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg * K)$
n_{50}	Luftwechsel bei 50 Pascal Überdruck	$1/h$
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
ε	Wirkungsgrad	-
X	Regressionsvariable aus [1]	-
Y	Regressionsvariable aus [1]	-

Indizes

Index	Bedeutung
<i>glob</i>	global
<i>hyg</i>	hygienisch
<i>ener</i>	energetisch
<i>wirk</i>	wirksam
<i>eff</i>	effektiv
<i>d</i>	Dauerlüftung
<i>s</i>	Stoßlüftung

1 Einleitung

Die Wohnungslüftung wird sowohl in Fachpublikationen, als auch bei der Wohnhausplanung und beim Bau kontrovers diskutiert. Durch die stetige Weiterentwicklung der Gebäude, gerade im Bereich der Wärmedämmstandards, sinken die Transmissionswärmeverluste drastisch. Dies bringt was einen relativen Anstieg der Lüftungswärmeverluste mit sich. Gleichzeitig werden aufgrund von hygienischen und bauphysikalischen Anforderungen Mindestaußenluftstraten empfohlen, um Bauschäden auszuschließen und die Schadstoffabfuhr zu gewährleisten. Folglich werden Lüftungswärmeverluste künftige Heizungs- und Klimaanlage entscheidend in ihrer Wirtschaftlichkeit und Effizienz beeinflussen.

Auch die Art der Lüftung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Behaglichkeit, die Raumluftqualität sowie das thermische Verhalten des Gebäudes. Die Mehrzahl der heute errichteten Gebäude ist nicht mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung ausgestattet, da sie einen erheblichen Kostenpunkt darstellt und bei Nutzern laut der Umfrage in [Kapitel 5](#) oft nicht als notwendig erachtet wird. Die Lüftung erfolgt hier ausschließlich über manuelle Fensterlüftung, sowie Infiltration. Zusätzlich zeigt Oppermann [5], dass selbst in Wohnhäusern mit mechanischer Lüftungsanlage die Fensteröffnungszeit etwa der eines Wohnhauses nur mit manueller Fensterlüftung entspricht. Die Lüftungswärmeverluste durch Fensterlüftung sind daher ähnlich.

Die Fensterlüftung allgemein steht oft im Widerspruch mit den heutigen Bemühungen zur Lüftungseffektivität und Energieeinsparung. Um diesen Widerspruch begründen zu können, muss jedoch der Energieverlust durch das Fenster bei unterschiedlichsten Nutzungsprofilen betrachtet werden. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine Zusammenstellung der Kenntnisse zur Lüftungseffektivität der Fensterlüftung zusammengestellt. Aufbauend darauf werden die Berechnungsgrundlagen um Wetterdaten sowie durch auf einer Umfrage basierende Nutzungsprofile erweitert und bewertet.

2 Grundlagen

2.1 Natürliche Lüftung

Als **natürliche Lüftung** oder **freie Lüftung** werden Lüftungskonzepte bezeichnet, bei denen sich die Raumluftrömung aufgrund natürlicher und nicht mechanischer Antriebskräfte einstellt. Die manuelle Fensterlüftung, wie auch Nachtlüftungen ohne mechanische Unterstützung und Fensterfalzlüftungen, sind typische natürliche Lüftungsformen. Lüftungsformen werden anhand eines globalen Luftwechsels λ quantifiziert, welcher das Verhältnis des Volumenstroms $\dot{V}_{Fenster}$ zum Volumen des Raumes V_{Raum} beschreibt.

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{Fenster}}{V_{Raum}} \quad (2.1)$$

Gebäude, die nicht mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet sind, müssen über freie Lüftung gelüftet werden. Der jeweilige vorgeschriebene Luftwechsel wird von verschiedenen Normen behandelt. Die Norm **DIN 1946-6** [6] teilt den Gesamtaußenluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Nutzung in vier Lüftungsstufen ein: In Lüftung zum Feuchteschutz, reduzierte Lüftung, Nennlüftung und in Intensivlüftung. Außerdem wurde festgelegt, die Lüftung zum Feuchteschutz und die reduzierte Lüftung **nutzerunabhängig** sicherzustellen. "Nutzerunabhängig" schließt die manuelle Fensterlüftung aus und muss durch eine mechanische Lüftungsanlage oder nutzerunabhängige natürliche Lüftung realisiert werden. In der **DIN 4701-1** [7] wird bei der Wärmebedarfsrechnung mit einem Mindestluftwechsel von $0,5h^{-1}$ gerechnet. Nach **DIN 4108-2** [8] müssen Außenbauteile nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik luftdicht ausgeführt werden, gleichzeitig muss aber aus Gründen der Hygiene, der Begrenzung der Raumluftheuchte sowie gegebenenfalls der Zuführung von Verbrennungsluft nach bauaufsichtlichen Vorschriften für einen ausreichenden Luftwechsel gesorgt werden. Die Energieeinsparverordnung **EnEV 2014** [9] äußert sich zum Mindestluftwechsel in § 6 und legt fest, dass die zu errichtenden Gebäude so auszuführen sind, dass der zum Zwecke der Gesundheit und Beheizung erforderliche Mindestluftwechsel sichergestellt ist. Außerdem ist die Gebäudehülle entsprechend den anerkannten Regeln der Technik auszuführen, womit wiederum auf die aktuell gültigen DIN-Normen verwiesen wird. In der **Tabelle 2.1** sind zur Übersicht grobe Luftwechsel für unterschiedlich dicht gebaute Häuser sowie grobe Luftwechsel bei verschiedenen Fensterlüftungsvarianten aus Recknagel [10] dargestellt. Querlüftung beschreibt das Lüften durch mindestens zwei Öffnungen an unterschiedlichen Raumseiten.

Parameter	Luftwechsel λ [1/h]
Dichte Häuser ($n_{50} \leq 3h^{-1}$)	0,1 - 0,3
Undichte Häuser ($n_{50} > 5h^{-1}$)	$\leq 2,0$
Regulierbare Lüftungseinrichtungen	0,2 - 0,8
Fenster gekippt ohne Querlüftung	0,8 - 2,5
Fenster gekippt mit Querlüftung	2 - 4
Fenster offen ohne Querlüftung	9 - 15
Fenster offen mit Querlüftung	< 20

Tabelle 2.1: Luftwechsel in Abhängigkeit der Fensterlüftung und der Gebäudedichtheit nach Recknagel [10]

Die **DIN EN 15242** [11] definiert den Begriff natürliche Lüftung als eine Lüftung, bei der die Luft aufgrund von natürlichen Kräften durch Undichtheiten (Infiltration) und Öffnungen in das Gebäude strömt und dieses durch Undichtigkeiten, Öffnungen, Schachtaufbauten oder Dach-Fortluftdurchlässe, einschließlich Lüftungsschächten zur Luftabführung, verlässt.

Als primäre Antriebskraft bei der natürlichen Lüftung fungieren Kraftwirkungen infolge von Druckunterschieden zwischen Rauminnen- und Außenluft. Zum Einen beruhen diese Druckunterschiede auf der Temperaturdifferenz der Innen- und der Außenluft und sind damit experimentell ermittelbar. Andererseits beruhen sie auch auf Windlasten, die je nach geographischer Lage und meteorologischer Situation variieren. Zusätzlich kommt die nutzerabhängige manuelle Lüftung durch Öffnen von Türen und Fenstern hinzu, was die natürliche Lüftung nicht allgemein quantifizierbar macht. Verschiedene Forschungsprojekte haben sich mit dem Thema auseinandergesetzt, den natürlichen Luftwechsel durch zum Beispiel Fensterlüftung möglichst genau zu simulieren.

Obwohl ein gewisser Luftwechsel erreicht werden soll, sollte die Gebäudehülle nicht undicht ausgeführt werden. Durch Leckagen in der Gebäudehülle findet ein unkontrollierter Luftaustausch statt, der zu Energieverlusten, Behaglichkeitseinbußen und gegebenenfalls zu Schäden durch Feuchte im Bauwerk führen kann. Feuchteschäden entstehen durch den unkontrollierten Feuchtetransport, der mit dem Luftaustausch einhergeht. [12]

2.2 Lüftungseffektivität

Der erreichte Luftwechsel muss noch bezüglich seiner Effektivität beurteilt werden. Grundsätzlich kann bezugnehmend auf **Abbildung 2.1** die Effektivität eines Lüftungskonzepts in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Der eine Bereich beinhaltet die **Effektivität aus energetischer Sicht**, bezogen auf den effektiven Abtransport thermischer Lasten. Der andere Bereich beschreibt die **Effektivität bezüglich der Hygiene** und teilt sich

in die Versorgung des Raumes mit Frischluft, sowie das Abführen von Schadstoffen und verbrauchter Luft auf. Um den globalen Luftwechsel aus **Gleichung 2.1** aus hygienischer und energetischer Sicht betrachten zu können, wird ein hygienischer und energetischer Luftwechsel [1] berechnet.

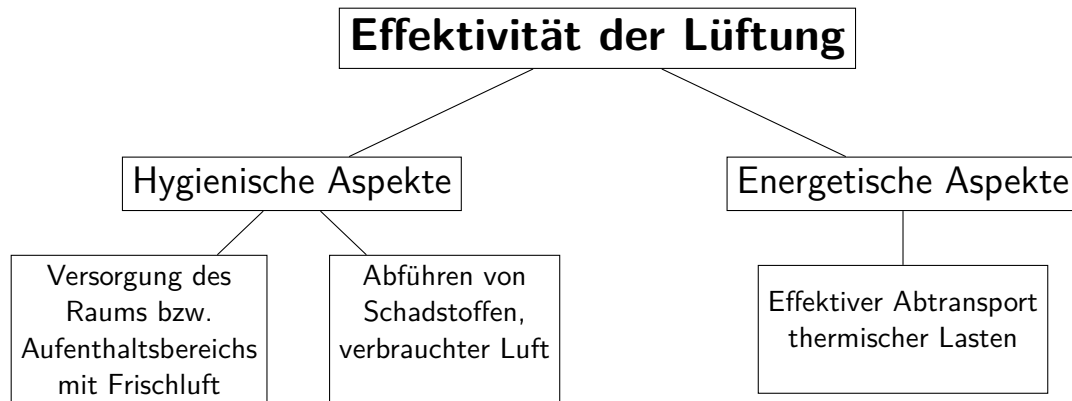


Abbildung 2.1: Klassifizierung der Effektivität eines Lüftungskonzepts aus Gritzki [2]

Als **hygienischer Luftwechsel** λ_{hyg} wird das Verhältnis des im Raum hygienisch wirksam werdenden Teils des Volumenstroms zum Volumen des Raumes bezeichnet. Dafür wird das Verhältnis des tatsächlich ausgetauschten Raumvolumens zum durch den gesamten Luftwechsel möglichen austauschbaren Raumvolumen berechnet. Aus diesem Verhältnis kann dann ein theoretisch hygienisch wirksamer Luftwechsel bestimmt werden (bei einem hygienischen Luftwechsel von 1 wird die komplette Raumluft ausgetauscht). Daher gilt es für die effektivste Lüftungsvariante einen **möglichst großen hygienisch wirksamen Luftwechsel** zu erreichen, um die Luftqualität zu verbessern und Feuchte abzuführen. In der Berechnung wird der globale Luftwechsel λ mit dem hygienischen Luftaustauschwirkungsgrad ε_{hyg} ¹ multipliziert.

$$\lambda_{hyg} = \lambda * \varepsilon_{hyg} \quad (2.2)$$

Als **energetischer Luftwechsel** λ_{ener} wird der im Heizfall zur Erwärmung oder im Kühlfall zur Entwärmung beitragende Teil des globalen Luftwechsels bezeichnet. Hier wird aus der dem Raum tatsächlich abgeführten Energie und der theoretisch durch den gesamten Luftwechsel möglichen zugeführten Energie das Verhältnis berechnet. Aus diesem Verhältnis kann dann ein theoretisch energetisch wirksamer Luftwechsel bestimmt werden (bei einem energetischen Luftwechsel von 1 hat alle dem Raum zugeführte Luft exakt die Temperatur der Außenluft und alle dem Raum entzogene Luft exakt die Temperatur

¹Der hygienische Luftaustauschwirkungsgrad ε_{hyg} zeigt an, wie die Strömung im Vergleich zur idealen Verdrängungsströmung zu bewerten ist. Je kleiner der Wert wird, desto weniger Luft wird effektiv ausgetauscht (z. B. Kurzschlussströmung und innere Rezirkulation). Der Wert hängt von zahlreichen Faktoren ab (z.B. der Positionierung der Öffnung/ des Fensters, der Lüftungsart, der Einrichtung, der Heizungsart/Positionierung, dem Öffnungswinkel des Fensters,...).

der Raumluft). Daher gilt es für die effektivste Lüftungsvariante einen **möglichst kleinen energetisch wirksamen Luftwechsel** zu erreichen, um möglichst wenig Energie aus dem Raum zu entziehen. In der Berechnung wird der globale Luftwechsel λ mit dem energetischen Luftaustauschwirkungsgrad ε_{ener} ² multipliziert.

$$\lambda_{ener} = \lambda * \varepsilon_{ener} \quad (2.3)$$

Das Forschungsprojekt von Seifert [1] befasst sich mit der Berechnung des hygienischen und energetischen Luftwechsels und unterscheidet die Luftwechsel erfahrungsgemäß in **Stoßlüftung** und **Dauerlüftung**. Zwischen den Vorgängen muss unterschieden werden, da sich der Vorgang der Stoßlüftung nur über einen recht kurzen Zeitraum (im Minutenbereich) erstreckt, während die Dauerlüftung über längere Zeit andauert. Bei Stoßlüftung ändern sich die Temperaturverhältnisse der Umgebungsflächen nur geringfügig, sodass näherungsweise von stationären Raumbedingungen ausgegangen werden kann. Bei der Dauerlüftung muss die thermische Rückkopplung über das Ändern der Umgebungsflächentemperatur berücksichtigt werden.

2.3 Behaglichkeit

Behaglichkeit beschreibt einen **subjektiv wahrgenommenen Zustand des Wohlbefindens**, der sich von Mensch zu Mensch unterscheidet. Zusammengefasst werden Auslegungskriterien für Gebäude in der DIN EN 15251 [13], welche die Klassenbezeichnungen A, B und C nach DIN EN ISO 7730 [14] in die identischen Kategorien I, II und III einteilt.

- **Kategorie I:** entspricht einem hohen Maß an Erwartungen und wird empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche oder anfällige Personen aufhalten
- **Kategorie II:** entspricht einem normalen Maß an Erwartungen und wird für neue und renovierte Gebäude empfohlen
- **Kategorie III:** steht für ein moderates Maß an Erwartungen und kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden

²Der energetische Luftaustauschwirkungsgrad ε_{ener} zeigt an, wie sich die Enthalpieströmung im Vergleich zur maximal möglichen Enthalpieströmung verhält. Wie auch beim hygienischen Luftaustauschwirkungsgrad hängt der Wert von zahlreichen Einflussfaktoren ab.

2.3.1 Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit wird in Recknagel [10, S.146ff] in mehrere Hauptfaktoren gegliedert:

- **Raumtemperatur**

Als Raumtemperatur (oder auch operative Temperatur) wird die Temperatur bezeichnet, die sich aus der Luft- und der Umschließungsflächentemperatur³ zusammensetzt.

- **Luftfeuchte**

Es ist umstritten, inwiefern der Mensch in der Lage ist die Luftfeuchte sensorisch abzuschätzen [15]. Außerdem ändert sich die Wahrnehmung der Luftfeuchte mit der Raumtemperatur. Die Luft sollte jedoch nicht dauerhaft zu trocken oder feucht sein, da sie sonst trockene Augen und Schleimhäute hervorrufen kann oder als stickig empfunden wird.

- **Luftbewegung**

In geschlossenen Räumen ist der Mensch recht empfindlich gegenüber Luftbewegungen. Allerdings kann genau dieser Effekt teilweise genutzt werden, um eine erhöhte Raumtemperatur durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit zu kompensieren [14].

- **Bekleidungsdaämmung**

In einem zu kalten Raum kann sich durch besser dämmende Kleidung Behaglichkeit verschafft werden, während sich in einem zu warmen Raum durch leichte Kleidung behaglich gefühlt werden kann. Berechnungsgrundlagen zu Dämmwerten von Kleidung werden in der DIN EN ISO 9920 [16] und der DIN EN ISO 7730 [14] ausgeführt.

- **körperliche Arbeit**

Die bevorzugte Raumtemperatur hängt auch von der Wärmeabgabe des Menschen ab, die sich nach der momentan ausgeführten Tätigkeit richtet.

Neben diesen Hauptfaktoren werden auch denen in der Literatur als Kontext-Effekte bezeichneten Faktoren Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit unterstellt [10, S.161ff]. Zu den Kontext-Effekten zählen beispielsweise:

- **kulturelle Variablen**

z.B. Anpassung an die Umgebung, Umgewöhnung an ein anderes Klima

³Die mittlere Temperatur der Wände, des Bodens, der Decke und den Einrichtungsgegenständen

- **psychologische Faktoren**
z.B. Erfahrungen, Erwartungen, Wissen und Einstellung zum Thema Lüftung und Behaglichkeit
- **demographische Faktoren**
z.B. Alter, Geschlecht und Gesundheitszustand
- **andere Faktoren**
z.B. Vertrautheit der Umgebung

Inwiefern psychosoziale Faktoren Einfluss auf die thermische Behaglichkeit nehmen ist umstritten. Die Arbeitszufriedenheit hat laut Dear [17] einen Einfluss auf die Zufriedenheit mit der Temperatur. Das thermische Empfinden scheint jedoch laut R. Hellwig [18], im Gegensatz zur Zufriedenheit mit der Temperatur, wenig von den psychosozialen Faktoren beeinflusst. Das thermische Empfinden wird in der **DIN EN ISO 7730 [14]** in einen Index gegliedert, der einen Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe anhand einer Klimabeurteilungsskala vorhersagt. Die mittlere subjektive Klimabewertung wird in einer 7-stufigen Skala in den sogenannten **PMV-Wert (Predicted Mean Vote)** gegliedert. Aus dem PMV-Wert kann schließlich der durchschnittlich zu erwartende Prozentsatz unzufriedener Personen als **PPD-Wert (Predicted Percentage of Dissatisfied)** quantifiziert werden. Der Zusammenhang der beiden Werte und der zulässige Bereich an PMV wird in **Abbildung 2.2** aus Richter [19] dargestellt.

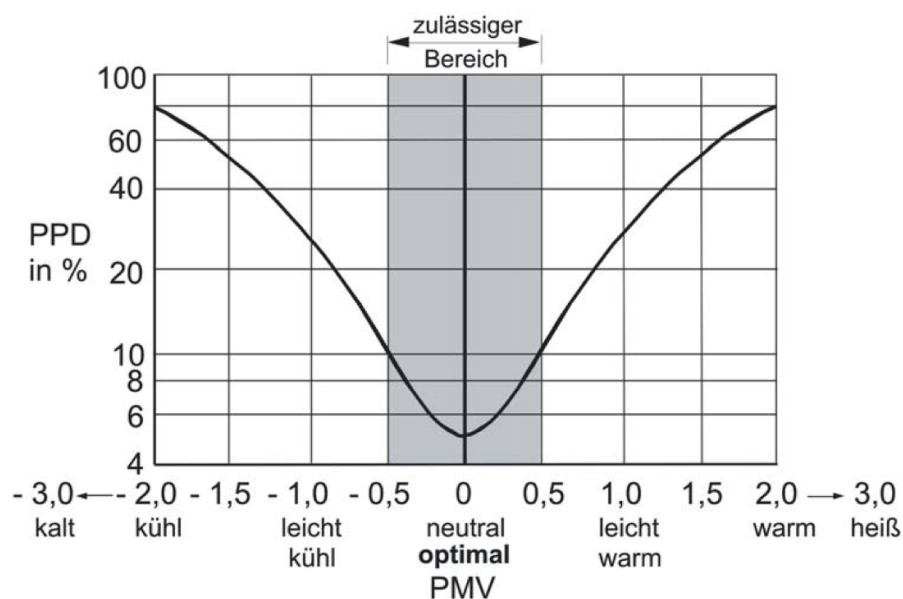


Abbildung 2.2: Zu erwartender Prozentsatz unzufriedener Personen (PPD) in Abhängigkeit der mittleren subjektiven Klimabewertung (PMV)

In der **Tabelle 2.2** aus DIN EN ISO 7730 [14] wird der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener (PPD) in die aus 2.3 bekannten Kategorien I, II und III eingeteilt. Nach dieser sind selbst in einem Raum der Kategorie I, in welchem mit einem hohen Maß an Erwartungen gerechnet wird, noch bis zu 6 % unzufriedene Personen vorhergesagt. Im amerikanischen nationalen Standard 55 [20] hingegen wird mit einem PPD-Wert von $< 10\%$ und einem PMV-Wert von $\pm 0,5$ gerechnet.

Qualitätskategorie	Wärmezustand des Körpers als Ganzes	
	Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener (PPD)	Vorausgesagtes mittleres Votum (PMV)
A	$< 6\%$	$-0,2 < \text{PMV} < +0,2$
B	$< 10\%$	$-0,5 < \text{PMV} < +0,5$
C	$< 15\%$	$-0,7 < \text{PMV} < +0,7$

Tabelle 2.2: Kategorien des Umgebungsklimas bezogen auf PPD und PMV

Die Thermische Behaglichkeit unterscheidet sich also je nach Nutzungsart des Raumes und je nach Nutzer. Während in öffentlichen Gebäuden nur nach einem möglichst niedrigen PPD-Wert gestrebt werden kann, kann in Wohnungen auf die nutzerspezifischen Bedürfnisse eingegangen werden und die Behaglichkeit so für alle Nutzer möglichst optimal gewährleistet werden. Ausführlichere Informationen dazu sind unter anderem in Raja [21], Recknagel [10, S.146, 151, 146] und Bäumler [22, S.3] zu finden.

2.3.2 Raumluftqualität

Die Luftqualität eines Raumes kann in zwei verschiedene Bereiche abgegrenzt werden. Einerseits in **nicht gesundheitsbeeinträchtigende Luftqualität**, die vom Nutzer lediglich als unangenehm oder unbehaglich empfunden wird und andererseits in **gesundheitsbeeinträchtigende Luftqualität**. Diese werden separat betrachtet und bewertet. Die nicht gesundheitsbeeinträchtigende Luftqualität wird durch den Nutzer subjektiv bewertet und daher in der weiteren Betrachtung als empfundene Luftqualität bezeichnet.

Der Mensch empfindet nach Recknagel [10, S.137ff] die Luftqualität durch zwei seiner Sinne: Den Geruchssinn in der Nasenhöhle und den chemischen Sinn, der durch freie Nervenenden vermittelt wird, die sich in Auge, Nase, Mund und Rachen befinden. Die Kombination dieser beiden Sinne lässt den Mensch die Luft als frisch, angenehm, muffig oder abgestanden empfinden oder sogar Schleimhäute reizen.

Eine Quelle der Luftverunreinigung ist der Mensch selbst. Jedoch wird die Luft auch durch das Gebäude verunreinigt. Unter dem Begriff **Sick Building Syndrom** wurden in den 80er Jahren zunächst nicht messbare Luftverunreinigungen vom Raum selbst und seiner Ausstattung bekannt. Zahlreiche internationale Studien, unter anderem von

Tookey [23] oder die ProKlimA-Studie ⁴, beschäftigen sich mit den Ausdünstungen von Baustoffen und zeigen, dass diese durchaus relevant sind und zum Teil sogar extrem groß sein können. Um diese Ausdünstungen zu berechnen und in die Auslegung von lufttechnischen Anlagen einfließen zu lassen, wurde eine Verunreinigungslast mit der Einheit *olf* eingeführt. Aus der den Raum durchströmenden Luft und der Verunreinigungslast berechnet sich dann die empfundene Luftqualität in *dezipol*. Heute wird beim Bau eines Gebäudes genau auf Ausdünstungen geachtet.

Da zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität in *dezipol* derzeit noch kein Messgerät eingesetzt werden kann, werden hier (ähnlich zum PPD-Wert aus 2.3.1) zur Bewertung Probandengruppen eingesetzt, die unmittelbar nach Betreten des Raumes die Luftqualität beurteilen. Entsprechend einer durchschnittlichen Gruppenbewertung wird der Prozentsatz an unzufriedenen Personen bestimmt.[10, S.175ff]

2.3.3 Einflussnahme durch den Nutzer

Untersuchungen aus den 80er Jahren zeigen, dass die Möglichkeit der Kontrolle, ungeachtet dessen Ausführung, den Komfort und die Behaglichkeit der Nutzer beeinflussen können. Bordass & Leaman [24] geben einen Überblick über die Relevanz der Präferenzen und der Einflussnahmemöglichkeiten der Nutzer.

Angrenzend an dieses Phänomen ist als energetische Steuerung auch ein intelligentes Kontrollsystem denkbar, das nicht selbst Handlungen ausführt oder unterbindet, jedoch durch ein Signal dem vielleicht unwissenden Nutzer die optimale Maßnahme signalisiert. Hier hat der Nutzer die volle Kontrolle und wird von heuristischen Kontrollsystemen auf die energetisch und/ oder komforttechnisch optimale Vorgehensweise hingewiesen. In Malkawi [25] werden die Energieeinsparungen durch, unter anderem derartige Methoden analysiert, mit dem Ergebnis, dass diese Systeme durchaus für energetische Optimierungen sorgen können, jedoch stark von der Ausführungsquote der vorgeschlagenen Aktion abhängen.

2.4 Bauphysikalische und hygienische Aspekte

Laut der DIN 1946-6 [6] muss **zum Feuchteschutz eine nutzerunabhängige Lüftung** sichergestellt sein. Dies schließt die Fensterlüftung zum Feuchteschutz bei von der Norm betroffenen Gebäuden⁵ aus. Trotzdem werden selbst Neubauten oft ohne, oder

⁴Ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt zur Untersuchung des Sick Building Syndromes (SBS) von einer aus den Bereichen Raumluftechnik, Physik, Chemie, Mikrobiologie, Medizin, Soziologie, Psychologie und Arbeitswissenschaft bestehenden Projektgruppe Klima und Arbeit (ProKlimA).

⁵Neubauten ab Februar 2009, sowie bei Sanierung von mehr als 1/3 der Fenster oder des Dachs

mit unrealistischen Lüftungskonzepten zum nutzerunabhängigen Feuchteschutz errichtet. Außerdem ist die nutzerunabhängige Lüftung nur für nutzerunabhängige Feuchtelasten ausgelegt. Das bedeutet, dass selbst bei Einhaltung der Mindestanforderungen die vom Nutzer direkt verursachten Feuchtelasten durch eine erweiterte Lüftung, wie zum Beispiel Fensterlüftung, abgeführt werden müssen. Allgemein kann die Wohnung bei regelmäßigem Fensterlüften und korrekt ausgeführter Bausubstanz meistens auch ohne die in der DIN 1946-6 [6] vorgeschriebene nutzerunabhängige Lüftung zum Feuchteschutz schimmelfrei und hygienisch ausreichend belüftet werden.

Feuchtigkeit in Wohnräumen kann unterschiedliche Ursachen haben:

- Die Feuchtigkeit kann, bei nicht ordnungsgemäß ausgeführter Bauweise durch das Bauwerk von außen in den Raum eintreten. Hier liegt ein baulicher Mangel vor.
- Tauwasser kann an Wänden anfallen, wenn die Wand nicht korrekt gedämmt wurde oder Wärmebrücken entstehen. Hier liegt ein baulicher Mangel vor.
- Wenn Feuchtigkeit, die im Inneren des Raumes zum Beispiel durch Personen, Trocknen von Wäsche oder Pflanzen entsteht, nicht aus dem Raum abgeführt wird, kondensiert Dampf an kalten Oberflächen.

Bei korrekter Auslegung und Ausführung aller Bauteile unter Berücksichtigung der gültigen Normen und den allgemein anerkannten Regeln der Technik, sowie einer der Nutzung angepassten Lüftung, sollte keine Feuchtigkeit im Raum anfallen.

Die Feuchtigkeit im Rauminnen kondensiert dann, wenn die Luft an kalten Bauteilen so weit abgekühlt wird, dass die relative Luftfeuchte auf 100 % ansteigt. Die Luft kann dann kein weiteres Wasser mehr aufnehmen und kondensiert an der kalten Oberfläche. Bei ausreichender Lüftung um das Bauteil stellt dies kein Problem dar, da die Feuchtigkeit dann wieder verdunstet.⁶ Problemstellen sind schlecht belüftete Stellen im Raum, zum Beispiel hinter Schränken und in Raumecken. Bei den Raumecken kommt noch der thermodynamisch nachteilige Effekt hinzu, dass ein größeres Verhältnis von Außenwandfläche zu Innenwandfläche besteht und so die Ecke auskühlt. Auch die Wandbeschaffenheit und der Putz haben einen großen Einfluss auf die Pufferwirkung der Feuchte. Bei größerer Pufferwirkung kann die Wand bei Übersättigung der Luft einen Teil des Wassers aufnehmen und später wieder abgeben.

Gerade bei älteren Gebäuden oder bei nachträglichen Veränderungen der Gebäudehülle durch Dämmung der Außenwände oder Erneuerung der Fenster kann der Lüftungsbedarf steigen. Bei einer außen gedämmten Fassade steigt die Temperatur der Wand bis zur

⁶Beispielsweise kann das im Bad nach einer heißen Dusche angefallene Kondenswasser durch Lüften wieder getrocknet werden.

Dämmung hin an. Wenn die Fenster nicht entsprechend angepasst werden, entsteht am Rahmen eine Wärmebrücke. Durch Dämmung an der Innenseite der Fassade wird unter Umständen die Pufferfähigkeit der Wand negativ beeinflusst.

Aus bauphysikalischer Sicht ist die Fensterlüftung, je nach Lüftungskonzept, zur Erhaltung der Bausubstanz notwendig. Bei Gebäuden ohne kontrollierte Wohnraumlüftung und/oder Feuchteregulierung muss die komplette anfallende Feuchte und alle Luftverunreinigungen über die Fenster gelüftet werden. Die Lüftung muss des Weiteren an die Bausubstanz angepasst werden. Nicht alle Gebäude benötigen dasselbe Maß an Lüftung, um Feuchtigkeitsbildung zu vermeiden. Feuchtigkeitsbildung und dadurch auftretende Schimmelpilzbildung sollte jedoch auf jeden Fall vermieden werden, da sich die Bausubstanz nach Feuchtigkeitsschäden oft nie wieder ganz erholt.

Die Normen werden ständig an neue Erkenntnisse angepasst. **Es gelten immer die Mindestanforderungen zur Bauzeit des Gebäudes.**

2.5 Energetische Aspekte

Die Fensterlüftung ist (im Heizfall) energetisch gesehen ineffektiv verglichen mit Lüftungsvarianten die einen Teil der Wärme aus der Abluft zur Erwärmung der Zuluft nutzen können.

Da bei der Fensterlüftung keine Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung besteht, ist sie im Heizfall energetisch gesehen schlechter als Lüftungsvarianten, die einen Teil der Wärme der Abluft zur Erwärmung der Zuluft nutzen können. Stehen Fenster dauerhaft offen, erhöhen sich die Energieverluste durch Auskühlung der Wände und Möbel zusätzlich. Daher ist es wichtig, die Fensterlüftung möglichst effektiv einzusetzen und mit möglichst wenig Energieverlust möglichst gute hygienische Effekte zu erzielen.

Zur Nachtkühlung im Sommer ist die Fensterlüftung durch große Querschnitte und direkte Strömung zur Außenluft energetisch sehr effektiv.

2.6 Rechtliche Aspekte

Die Lüftung ist gerade bei Schadensfällen in Mietwohnungen ein Streitpunkt zwischen Mieter und Vermieter. Die Sorgfalts- und Obhutspflicht für die Mietsache schreibt hier eine bedarfsgerechte Lüftung vor. Bei Feuchtigkeitsschäden sind sich Mieter und Vermieter oft uneinig, ob **bedarfsgerecht** gelüftet wurde. Gerichtsurteile zur Zumutbarkeit von Lüftung durch das Fenster, gerade bei Abwesenheit durch Vollzeitjobs, fallen teilweise sehr unterschiedlich aus.

Allgemein kann, wenn der Mieter durch ungenügendes oder falsches Lüften eine massive Schimmelpilz und Feuchtigkeitsbildung verursacht hat, wodurch die Mietsache in erheblichem Maße gefährdet und beschädigt wurde, eine fristlose Kündigung ausgesprochen werden. In den meisten Wohnhäusern ist jedoch der Anspruch des Lüftens zur bauphysikalischen Erhaltung der Gebäudesubstanz durch sehr wenig Aufwand realisierbar. Wäschetrocknen in der Wohnung oder Offenlassen der Badtüre nach dem Duschen erhöhen diesen Aufwand. Durch baulich nicht optimal ausgeführte Bauteile ist nicht automatisch ein Mangel vorhanden. Wenn zur Zeit des Baus alle gültigen Normen und anerkannten Regeln der Technik eingehalten wurden, gilt die Bausubstanz als mangelfrei ausgeführt. Der dadurch anfallende Aufwand zur Erhaltung der Mietsache liegt dann beim Mieter. Ob der Aufwand zumutbar ist muss im Zweifel ein Gericht entscheiden.

Nach einem Urteil des Landgerichts Frankfurt am Main vom 07.02.2012 ist dem voll berufstätigen Mieter ein Stoßlüften von 3 bis 4 mal am Tag zumutbar.⁷ So kann laut der Urteilsbegründung morgens vor Verlassen des Hauses 1 bis 2 mal gelüftet werden, dann nachmittags nach der Rückkehr von der Arbeit und abends. Des Weiteren hat der Mieter bei vorliegendem Schimmelbefall nach **§ 536 Abs. 1 BGB ein Recht auf Mietminderung** um 20 %, wenn sich nicht exakt belegen lässt, dass der Mieter ein Mitverschulden an der Schimmelpilzbildung trägt und ein Baumangel festzustellen ist. Das Amtsgericht Norderstedt hat zum Beispiel in einem Urteil von 18.12.2009 eine Mietminderung von 10 % für angemessen erklärt.⁸ Das Amtsgericht Königs Wusterhausen hat im Urteil vom 11.05.2007 eine Mietminderung von 20 % erklärt.⁹ In einem älteren Urteil vom Landgericht Hamburg am 09.02.1990 wurde dem Mieter die Mietminderung und Anspruch auf Beseitigung des Schimmels untersagt, da der Wärmeschutz des Gebäudes den Mindestanforderungen im Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung entsprach. In einem Einzelfall wurde vom Amtsgericht München im Urteil vom 11.06.2010 sogar eine Mietsminderung von bis zu 100 % erklärt, da eine konkrete Gesundheitsgefährdung aufgrund des massiven und großflächigen Schimmelbefalls besteht. Die intensive Pilzbesiedlung und das extrem hohe Aufkommen von Milben mache eine Nutzung der Wohnung unmöglich, hieß es im Urteil.

Die Urteile fallen somit je nach Aufkommen des Befalls und Ausführung der Bausubstanz unterschiedlich aus. Allgemein ist die Tendenz, dass bei bedarfsgerechtem Lüften von zumutbaren 3 bis 4 Stoßlüftungen am Tag und ohne Auskühlung eines Raums keine

⁷Im Konkreten Fall hatte zuvor ein Gutachter ausgeschlossen, dass die Feuchtigkeitsbildung durch die Bausubstanz eindringt oder ein anderer Mangel vorliegt.

⁸Ein Gutachter hat in diesem Fall ausgeführt, dass Wärmebrücken durch ungenügende Dämmung der Festerlaibung vorhanden sind. Gemäß § 535 BGB habe der Mieter Verschlechterungen der Mietsache, die durch den vertragsgemäßen Gebrauch herbeigeführt wurden, nicht zu vertreten.

⁹Das Urteil erfolgte nach Feststellung eines Baumangels durch schlechte Bausubstanz durch einen Gutachter und fehlenden exakten Belegen, dass der Mieter ein Mitverschulden trägt. Des Weiteren stünde dem Vermieter kein Anspruch auf Schadens- oder Aufwendungsersatz hinsichtlich der Schimmelpilzbeseitigung zu.

Feuchtigkeitsschäden auftreten, beziehungsweise bei Auftritt ein baulicher Mangel vorliegt und eine Mietminderung möglich ist. Die Höhe der Mietminderung hängt von der Schwere des Mangels und des Befalls ab.

2.7 Schadenssituation durch Schimmel

2.7.1 Beurteilung vorhandener Schäden

Das Bundesamt für Gesundheit hat 2009 einen Leitfaden zur Beurteilung von Schimmelfällen veröffentlicht [26]. In diesem werden Schimmelfälle in folgende Kategorien eingeteilt.

- **Gesundheitlich und bauphysikalisch unproblematisch**
Zum Beispiel vereinzelter Schimmelbewuchs auf einer kühlen Wand oder leichter oberflächlicher Bewuchs im Bad.
- **Im Sinne der Gesundheitsvorsorge inakzeptabel, bauphysikalisch wenig problematisch (kann sich aber verschlechtern)**
Zum Beispiel kleinflächiger schwarzer Schimmelbewuchs hinter Tapeten, an der Sockelleiste, in Außenwandecken oder an Bauteilanschlüssen ohne Anzeichen auf ein größeres Problem.
- **Im Sinne der Gesundheitsvorsorge inakzeptabel, bauphysikalisch häufig problematisch (Zustand kann sich weiter verschlimmern)**
Zum Beispiel großflächiger dichter Schimmelbewuchs an Außenwandecken, an Bauteilanschlüssen, hinter Vorhängen und Schränken sowie in tiefere Schichten vorgedrungener Schimmel und Bewuchs, der zum Abblättern der Farbe oder des Putzes führt. Anzeichen sind außerdem deutlicher Schimmelgeruch ohne sichtbaren Schimmelbewuchs oder Stockflecken (Verfärbungen).

2.7.2 Vorgehen bei Feuchte- und Schimmelschäden

Als Sofortmaßnahme eignet sich häufiges und konsequentes Lüften mit möglichst schnellem Luftaustausch. Um den kompletten Raum zu durchlüften sollten zum Beispiel Sofas und Schränke von der Wand weggerückt werden. Kurzfristig kann auch die Feuchtigkeitsproduktion reduziert werden (kein Wäsche trocknen, Pflanzen neu positionieren, Badtüre schließen,...)¹⁰

¹⁰Beim Wäschetrocknen kann die in der Luft freigesetzte Wassermenge recht einfach am Mehrgewicht der nassen Wäsche festgestellt werden. Beim gießen von Pflanzen geht fast die komplette gegossene Wassermenge in die Luft über.

Grundsätzlich sollte jedoch die Ursache des Befalls festgestellt und behoben werden. Bei Unklarheiten zur Schadenkategorie oder der Ursache soll unbedingt ein Spezialist für Bauschäden und Bauphysik kontaktiert werden.

Die Schimmel-Sanierung und Beseitigung der Ursachen sollte fachgerecht durchgeführt¹¹ und darauf geachtet werden, unbelastete Bereiche abzuschirmen. Entfeuchtungsgeräte sollten erst nach der Schimmelbeseitigung in Betrieb genommen werden, da sich sonst die Sporenzahl vermehren kann¹². Des Weiteren sollte bei gesundheitlichen Beschwerden, die in Zusammenhang mit dem Schimmelbefall gebracht werden können, ein Hausarzt aufgesucht werden.

Zur **Beseitigung des Schimmels** kann bei Befall innerhalb der oben angeführten **gesundheitlich weitgehend unbedenklichen** Kategorie der Befall mit handelsüblichem Haushaltsreiniger leicht selbst entfernt werden. Unbedingt sollte sich jedoch vor Beginn umfangreich informiert und mit den nötigen hygienischen Schutzmitteln ausgestattet werden. Anschließend kann die Stelle mit Javel-Wasser¹³ oder 70-80%igem Ethylalkohol desinfiziert werden. Langfristig empfiehlt es sich die Ursache zu lösen. Bei Nichtbeseitigung sollten die Schimmelspuren auf jeden Fall beobachtet werden.

Bei **gesundheitlich inakzeptablem Befall** sollten insbesondere gefährdete Personen¹⁴ unbedingt einen Arzt kontaktieren und alle Beschwerden ernst genommen werden. Kurzfristig sollten befallene Räume gemieden und abgeschirmt werden. Ein Spezialist für Bauschäden sollte umgehend beauftragt werden. Es sollte unbedingt ein eigener Versuch der Entfernung befallener Bauteile unterlassen werden. Von jeglicher Eigensanierung wird abgeraten. Die fachgerechte Sanierung muss erfolgen.

2.7.3 Häufigkeit von Schimmelbefall in Wohnhäusern

Aus der Frage 22 der Umfrage in **Kapitel 5** gehen die in **Abbildung 2.4** dargestellten Ergebnisse hervor. Zum Vergleich ist in **Abbildung 2.3** das Ergebnis einer Umfrage¹⁵ aus dem Jahr 2018 abgebildet.

¹¹Laut Gesundheit [26] raten das BAG, der SMGV (Schweizer Maler- und Gipserunternehmer-Verband) und VSLF (Verband der Schweizerischen Lack- und Farbenfabrikanten) von der Verwendung biozid ausgerüsteter Innenfarben und Putze ab, da die langfristigen Risiken für die Benutzer nur schwer abschätzbar sind.

¹²Die Trocknungsgeräte stoppen das Pilzwachstum und leiten daher die Sporenbildung ein. Diese werden dann durch die erzeugte Luftströmung in großen Mengen in der Raumluft freigesetzt. [27]

¹³Wässrige Lösung von Calciumhypochlorit KOCI

¹⁴Patienten mit geschwächtem Immunsystem sowie Transplantations-, AIDS- und Krebspatienten können an schweren Pilzinfektionen erkranken. Der Schimmelpilz Aspergillus, der allerdings recht selten auf Bauschimmel vorkommt, kann bei Patienten mit Cystischer Fibrose (CF) und schwerem chronischem Asthma eine schwere allergische Lungenerkrankung hervorrufen. [27]

¹⁵502 Befragte ab 18 Jahren; Schweiz; Februar 2018 [28]

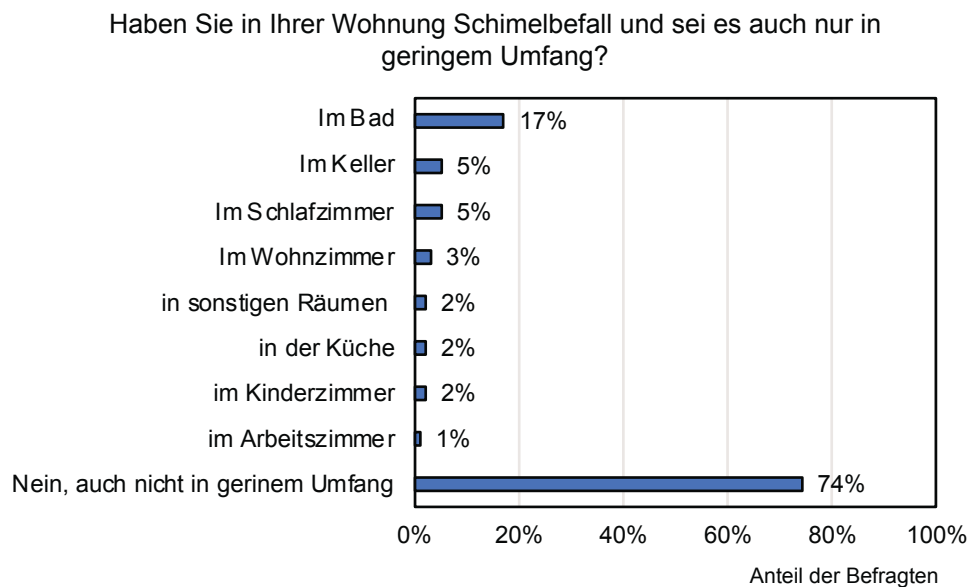


Abbildung 2.3: Ergebnisse der Umfrage zu Schimmelbefall in Wohnräumen aus de.statista.com [28]

Die Umfragen zeigen ähnliche Ergebnisse. Es geben ca. 70 % der Befragten an, keine Probleme mit Schimmelbefall zu haben. Zusammengefasst hat also ungefähr **jeder vierte Bewohner Schimmelbefall** in der Wohnung.

Die Umfrage aus [28] zeigt die Problemstellen bei Schimmelbefall im Wohnhaus. Im Bad wird beim Duschen und Baden sehr viel Feuchtigkeit in die Luft abgegeben. Der Keller hingegen ist meistens schlecht belüftet und unterirdisch, wodurch bei nicht fachgerecht ausgeführtem Feuchteschutz Feuchtigkeit durch die Wand eindringen kann.

Ich hatte ... Probleme mit Schimmel in meiner Wohnung.

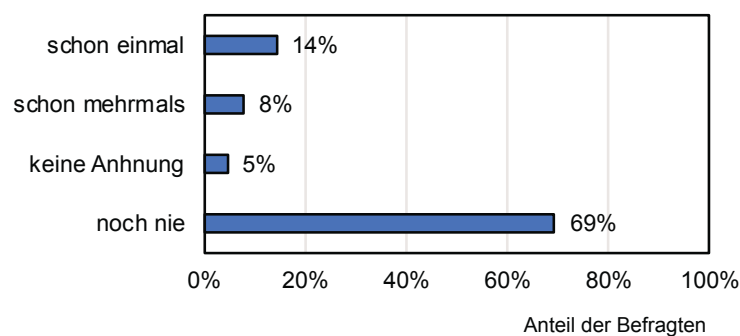


Abbildung 2.4: Ergebnisse der Umfrage zu Schimmelbefall in Wohnräumen aus [Kapitel 5](#)

Die Umfrage aus [Kapitel 5](#) geht mit dieser Frage eher auf die Erfolgsquote der Sanierung ein. Bei mehrmalig auftretendem Schimmel kann die Sanierung zwar fachgerecht durchgeführt worden sein, jedoch wurde die Ursache eventuell nicht identifiziert und entfernt.

3 Luftwechsel bei Fensterlüftung

Die Quantifizierung des Luftwechsels bei der Fensterlüftung gestaltet sich in der Realität besonders schwierig, da er von sehr vielen unterschiedlichen instationären Einflussgrößen abhängt.

Auf den Volumenstrom wirken unter anderem die Luftzustände der Innen- und Außenluft mit den daraus resultierenden Druckunterschieden, Wetterdaten und bauphysikalische Aspekte wie Bauform, Falz, Öffnungswinkel des Fensters, Fensterbretter und sogar die Einrichtung im Raum. Dieser Volumenstrom hängt zudem vom Nutzer und dessen aus [Unterabschnitt 2.3.1](#) bekannten Behaglichkeitspräferenzen ab und ist somit unmöglich exakt zu quantifizieren. Die Messung des Luftwechsels, nutzerabhängig wie nutzerunabhängig, wird in vielen Forschungen untersucht, da der Luftwechsel nicht nur in energetischen, sondern auch in hygienisch-gesundheitstechnischen und bauphysikalischen Branchen von großer Bedeutung ist.

Eine Funktion aller wesentlichen Einflussparameter mit experimenteller Überprüfung ist erst in Ansätzen vorhanden. In der [Abbildung 3.1](#) werden einige Beziehungen der Einflussfaktoren auf den Luftwechsel dargestellt. Diese zeigt, dass der Luftwechsel durch Luftströmung durch die Öffnungen in der Gebäudehülle hervorgerufen wird. Geöffnet wird jedoch vom Nutzer. Der Nutzer selbst richtet sich nach der Behaglichkeit, die wie in [Abschnitt 2.3](#) beschrieben extrem subjektiv ist und in aktuellen Normen nur in drei Kategorien eingeteilt wird, was dem großen Einfluss auf den Luftwechsel nur spärlich gerecht wird.

3.1 Überblick der Methoden zur Luftwechselermittlung

Der Luftwechsel kann entweder durch Messung oder durch Berechnung ermittelt werden. Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile sowie die Genauigkeit einiger gängiger Methoden erläutert.

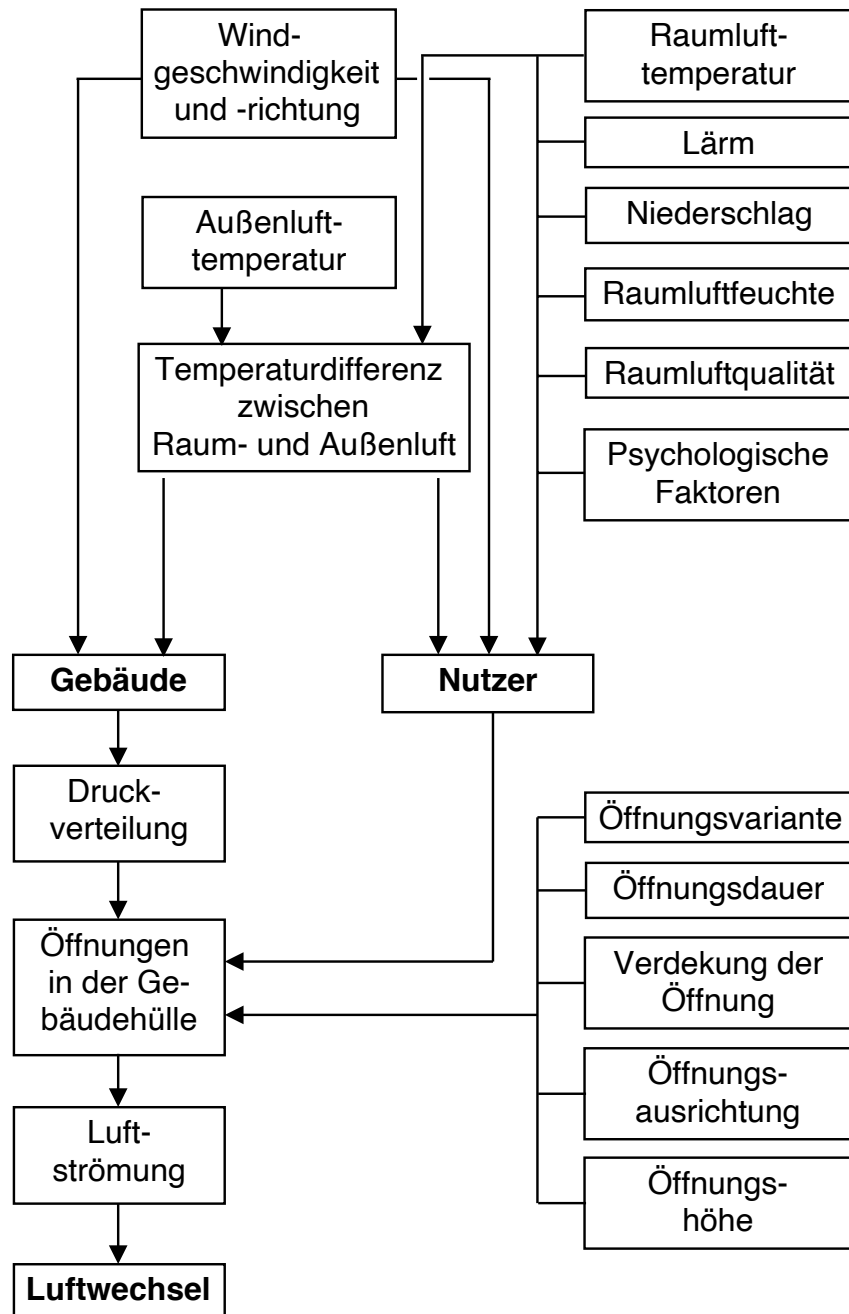


Abbildung 3.1: Einflussfaktoren auf den Luftwechsel. Modifiziert aus Maas [4]

3.1.1 Durch Messung

3.1.1.1 Tracergasmessmethode

Eine Ermittlungsmethode zur Messung des Zu- und Abluftvolumenstroms bzw. des Luftwechsels funktioniert indirekt durch Tracergasmessverfahren. Hierzu wird ein Messgas (Tracergas) in die betrachtete Messzone eingebracht. Der zeitliche Verlauf der Messgaskonzentration wird aufgezeichnet. Anhand dessen lässt sich durch ein mathematisches Verfahren der Luftwechsel berechnen. **Abbildung 3.2** gibt eine Übersicht der Volumenströme beim Messen mit dem Tracergasverfahren.

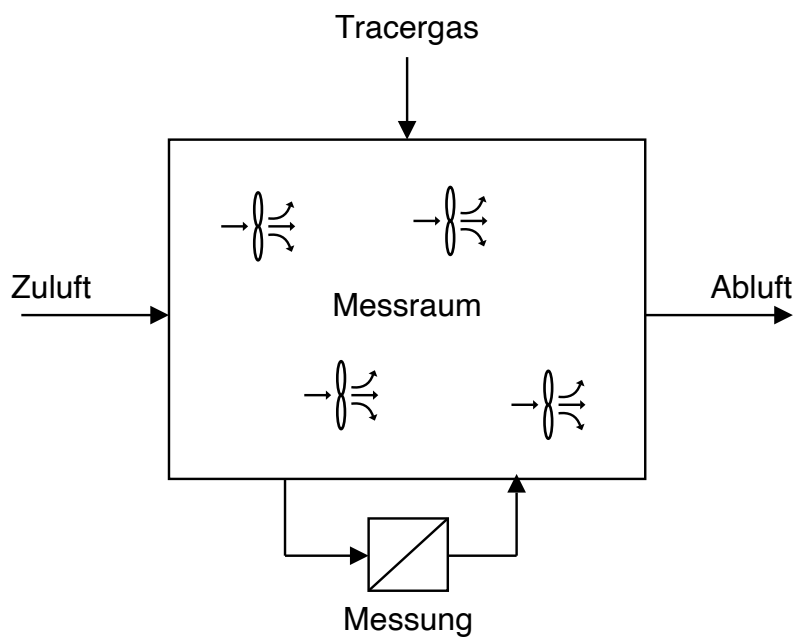


Abbildung 3.2: Modell für die Tracergas-Luftwechselmessung eines Messraums

Die Genauigkeit dieser Methode hängt davon ab, wie gut folgende Voraussetzungen eingehalten werden können:

- vollständige Durchmischung des gesamten Volumens des Messraums während der gesamten Messung (hier kommen meist im Messraum verteilte Ventilatoren zum Einsatz),
- keine chemische Zersetzung des Tracergases oder Reaktionen mit anderen Stoffen,
- keine eingeschlossenen Volumina (alternativ werden die Volumina gasdicht verschlossen und vom Luftvolumen der Messzone subtrahiert),
- der atmosphärische Druck bleibt konstant und

- die Einbringung des Messgases verändert die Dichte nicht signifikant (diese Forderung ist meist erfüllt, da die Konzentration des Tracergases meist unter 10^{-4} Volumenanteilen liegt).

Der Nachteil dieses Messverfahrens liegt vor allem darin, dass durch die Messung eines Raumes im Grunde keine allgemeingültigen Aussagen über das Gebäude getroffen werden können. Zusätzlich ist durch den Einfluss des Windes, der Außenlufttemperatur und der Dichte das Ergebnis nur schwierig bis gar nicht reproduzierbar. Außerdem ist die Instrumentierung des Messverfahrens recht aufwändig und muss über den gesamten Messverlauf am Messort verbleiben. Des Weiteren entsteht durch das Durchmischen des Volumens ein künstlicher Zustand, der unter Umständen die Resultate beeinflusst. Zudem gibt dieses Messverfahren keine Auskunft über die Luftverteilung im Raum und kann deshalb nur den globalen Luftwechsel messen.

Trotz dieser Einschränkungen stellt die Tracergasmessung die einzige praktisch verfügbare Möglichkeit dar den Luftwechsel zu messen.

3.1.1.2 Bestimmung der lokalen Luftalter

Die Bestimmung der Luftalter wird an mehreren Stellen im Raum gleichzeitig durchgeführt und gestaltet sich ähnlich der Tracergasmessung. Auch hier wird ein Messgas in den Raum eingeführt um den Abfall oder Anstieg der Konzentration im Verlauf der Zeit zu messen. Allerdings wird das Raumvolumen absichtlich nicht durchmischt, um lokal die Unterschiede der Konzentration zu messen.

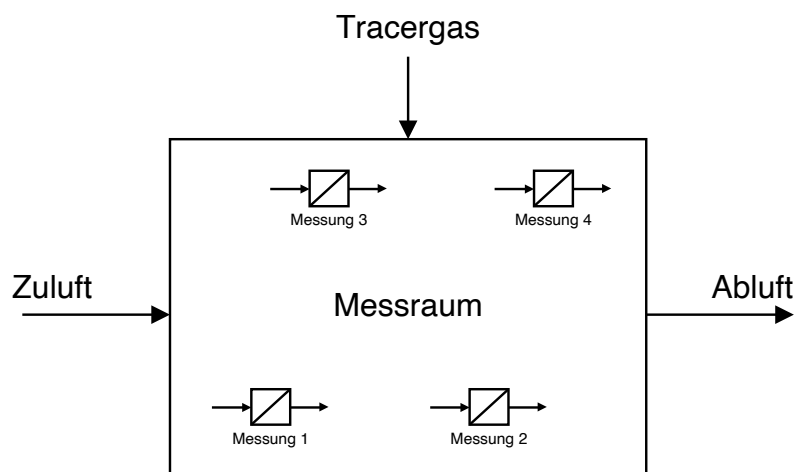


Abbildung 3.3: Modell für die Bestimmung der lokalen Luftalter eines Messraums

Die Nachteile dieses Systems entsprechen (abgesehen von der Durchmischung) im Wesentlichen denen der Tracergasmethode. Der entscheidende Unterschied ist das Ziel der

Messung. Während bei der Tracergasmessung nur der globale Luftwechsel bestimmt und nur wenige hygienische und bauphysikalische Schlüsse gezogen werden können, wird die Bestimmung der lokalen Luftalter gezielt an Problemstellen¹⁶ durchgeführt und kann so hygienisch und bauphysikalisch bewertet werden. Allerdings kann keine Aussage über den globalen Luftwechsel des Raumes getroffen werden. Diese Methode eignet sich nach Gritzki [2] auch nicht zur Untersuchung natürlicher Lüftungsformen.

3.1.2 Durch Berechnung

3.1.2.1 Näherungsformel nach VDI

Im Anhang 3 der VDI 2078 [29] werden Näherungsformeln für den Luftaustausch bei bis zu 15° gekippten und komplett geöffneten Fenstern angegeben. Des Weiteren wird zwischen einzelnen und übereinander angeordneten Fenstern unterschieden.

Der Luftwechsel wird in Anlehnung an die Näherungsformel aus Gleichung 3.1 aus Recknagel [10] für den Luftwechsel eines Raumes aufgrund der Temperaturunterschiede über freie Konvektion berechnet. Dabei wird das Fenster vertikal in Ein- und Ausströmungsseite aufgeteilt betrachtet.

$$\dot{V} = 3600 * A_{Wirk} * \sqrt{\frac{g * H_{Wirk} * \Delta\vartheta}{2 * T_1}} \quad (3.1)$$

A_{Wirk} beschreibt dabei die wirksame Öffnungsfläche des Fensters, hergeleitet aus den geometrischen Verhältnissen von Fensterrahmen und Öffnungswinkel nach [29, 111 ff].

H_{Wirk} beschreibt die für den thermischen Auftrieb wirksame Höhe¹⁷.

g beschreibt die Erdbeschleunigung mit $9,81m/s^2$.

$\Delta\vartheta$ ist die Temperaturdifferenz der in den Raum ein- und ausströmenden Luft. Die Temperatur der einströmenden Luft ist in der Regel die Außentemperatur, während die ausströmende Lufttemperatur die der Rauminnenluft entspricht.¹⁸ Der normierte Luftwechsel wird auf $\Delta\vartheta = 10K$ bezogen.

T_1 beschreibt die absolute Temperatur der in den Raum einströmenden Luft. Standardmäßig wird $T_1 = 273,15K + 15K$ angesetzt. Das mit diesem Ansatz errechnete Ergebnis ist jedoch sehr theoretisch, da nur ein statischer Zustand berechnet werden kann und Einflüsse wie die Windgeschwindigkeit und Störungen der Strömung durch Möbel oder

¹⁶Stellen, in denen der Luftwechsel aus hygienischer, bauphysikalischer oder energetischer Sicht eine besondere Rolle spielt (z. B. in Wandecken oder hinter Möbelstücken, an denen sich Feuchtigkeit oder Schimmel gebildet hat)

¹⁷Das Fenster wird horizontal in Einström-, Abström-, bzw. Mischbereich eingeteilt. Daher werden in der Berechnung z. B. nur ca. 75 % der kompletten Öffnungsfläche verwendet.

¹⁸Da der Ansatz nur den statischen Fall betrachtet müssen keine zeitlichen Veränderungen der Temperaturen durch Erwärmung oder Abkühlen miteinbezogen werden.

den Falz nicht berücksichtigt werden. Für die Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung ist dieser Ansatz daher nur bedingt geeignet.

3.1.2.2 Ansatz nach Maas

Der in Maas [4] gewählte Ansatz erweitert den der VDI 2078 [29] um die Miteinberechnung des Windeinflusses und experimentell ermittelte Korrekturwerte C_1 , C_2 und C_3 .

$$\dot{V} = 3600 * \frac{1}{2} A_{eff} * \sqrt{(C_1 * u^2 + C_2 * H * \Delta\vartheta + C_3)} \quad (3.2)$$

A_{eff} beschreibt dabei die effektive Öffnungsfläche, die sich aus $A_{eff} = A_I * \Theta$ berechnet. A_I ist die Fläche der lichten Fensteröffnung und Θ ein Durchflussverhältnis, welches aus der jeweiligen Fensterstellung berechnet wird. Die Größe u ist die momentane Windgeschwindigkeit senkrecht zum Fester am Messort. $\Delta\vartheta$ beschreibt die Temperaturdifferenz des Rauminnen zur Außenluft¹⁹. H ist die lichte Höhe der Öffnung. Aus diesen Einflussgrößen, sowie den drei Korrekturfaktoren C_1 , C_2 und C_3 lässt sich der Luftvolumenstrom recht genau berechnen. Für kleine Zeitschritte²⁰ werden bei Kipp- und Drehstellungen von 5 bis 15 cm folgende Koeffizienten verwendet:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0,052 \\ C_2 &= 0,0039m/(s^2 * K) \\ C_3 &= 0,012m^2/s^2 \end{aligned}$$

Öffnungsstellungen von 45° und 90° können in dieser Berechnung nicht realistisch berücksichtigt werden, weshalb sich dieses Verfahren auch nur bedingt zur Quantifizierung der Fensterlüftung eignet.

In der **Abbildung 3.4** werden Ergebnisse einer vergleichbaren Berechnung²¹ der VDI 2078 und von Maas dargestellt. Der Ansatz nach Maas wird, um den Windeinfluss einschätzen zu können, mit und ohne Windeinfluss dargestellt. Die Ergebnisse der VDI entsprechen grob denen von Maas mit mittlerem Windeinfluss.

Die Ergebnisse aus Maas [4] für den Zuluftvolumenstrom je Temperaturdifferenz bei unterschiedlichen Öffnungsvarianten sind in **Abbildung 3.6** dargestellt. Weitere Ergebnisse

¹⁹Auch hier wird diese Größe nur statisch betrachtet, wodurch die zeitabhängige Änderung nicht betrachtet werden kann und das errechnete Ergebnis, einer Zeit bis zum vollständigen Luftaustausch, nur bedingt aussagekräftig ist.

²⁰Aufgrund der Feldgrößenbeschränkung des Auswertprogramms können nur minimal 0,2 Stunden Öffnungszeit angesetzt werden.

²¹Es wurde zur Berechnung ein Raum mit 5 m Länge, 4 m Breite und 3 m Höhe, sowie ein Öffnungswinkel des Fensters von 15° angenommen. Die Fenstermaße liegen bei 1 m Breite und 1 m Höhe.

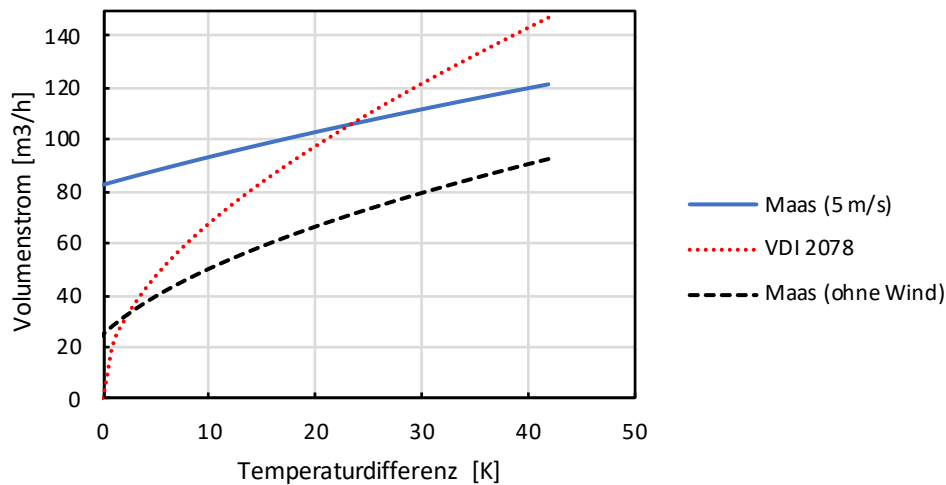


Abbildung 3.4: Vergleich der Berechnungswerte Ansatz nach Maas [4] und VDI 2078 [29] für den Öffnungswinkel 15° bei Fenstermaßen von 1 m auf 1 m

bezüglich des Einflusses des Fensterrahmens werden in [Abbildung 3.5](#) gezeigt. Die zugrundeliegenden Randdaten sind die, des in Maas [4] verwendeten Versuchsraumes mit einer Fenstergröße von 1,98 m Breite und 1,33 m Höhe.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Art des Rahmens einen sehr großen Einfluss auf den Luftwechsel hat und somit die Berechnung nur unter der Betrachtung aller Randbedingungen zu realistischen Ergebnissen führen kann.

3.1.2.3 Numerische Simulation der lokalen Luftalter

Eine gute Möglichkeit einige der Einschränkungen der vorgestellten Mess- und Rechenmethoden zu umgehen ist die numerische Simulation durch Aufstellung und Lösung einer Transportgleichung der lokalen Luftalter im Messraum. Hierzu wird eine Erhaltungsgleichung aufgestellt und mit den geeigneten numerischen Verfahren gelöst²². Diese Methode bietet eine sehr gute Möglichkeit, die tatsächlich auftretende räumliche Verteilung der lokalen Luftalter zu bestimmen. Diese Verteilung gibt Berechnungsgrundlagen für den globalen Luftwechsel sowie dessen Beurteilung in energetischer und hygienischer Sicht. Der entscheidende Vorteil liegt in der Möglichkeit, sowohl die zeitlich, wie auch die räumlich bedingten Phänomene recht genau und zuverlässig bestimmen zu können. Das Verfahren ist jedoch sehr komplex und setzt eine numerische Simulation des vorliegenden Geschwindigkeitsfeldes voraus, da Messungen hier noch aufwendiger wären.

²²Die Gleichung, deren Herleitung und die numerischen Verfahren sind in Etheridge [30] zu finden und bleiben an dieser Stelle unkommentiert.

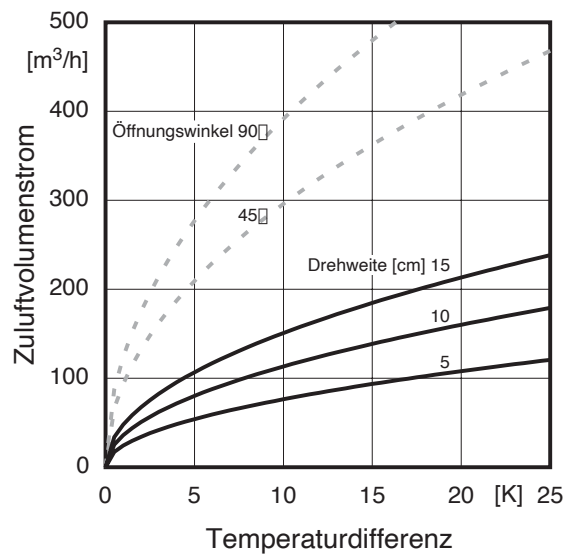


Abbildung 3.5: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für verschiedene Öffnungswinkel bei $u = 5 \text{ m/s}$ aus Maas [4]

[2] Die Untersuchungen mittels dieses Verfahrens gestalten sich, gerade bei Berechnungen über längere Zeiträume, als sehr aufwendig. Außerdem hängt die Aussagekraft des Berechnungsergebnisses unmittelbar von der Genauigkeit der Simulation des Geschwindigkeitsfeldes ab. Gerade die Nachbildung der Strömungserscheinungen bei natürlicher Lüftung gestaltet sich äußerst schwierig. vgl. [2, S.11]

3.2 Bewertung des Luftwechsels

Die Relevanz der Bewertung eines ermittelten oder berechneten Luftwechsels wurde bereits in [Abschnitt 2.2](#) angesprochen. Je nach Verfahren nach [Abschnitt 3.1](#) kann zwar bereits eine Aussage zur Effektivität getroffen werden, die meisten Verfahren lassen dies jedoch nicht zu. In Seifert [1] wird eine detaillierte Beschreibung der bereits bestehenden Berechnungsverfahren gegeben und die numerische Simulation um weitere Randgrößen erweitert. So werden erstmals unterschiedliche Raumgeometrien in Betracht gezogen und die zeitliche Veränderung der Rauminnen- und Umgebungsflächentemperatur je nach Öffnungsvariante betrachtet.

Folgende Ergebnisse aus Seifert [1] werden als Grundlage für die weitere Betrachtung Lüftungseffektivität herangezogen:

- Der erreichbare Luftwechsel hängt hauptsächlich von der **Temperaturdifferenz** und der **Fensterstellung** ab. Der Anschlag des Fensterflügels und die Anordnung

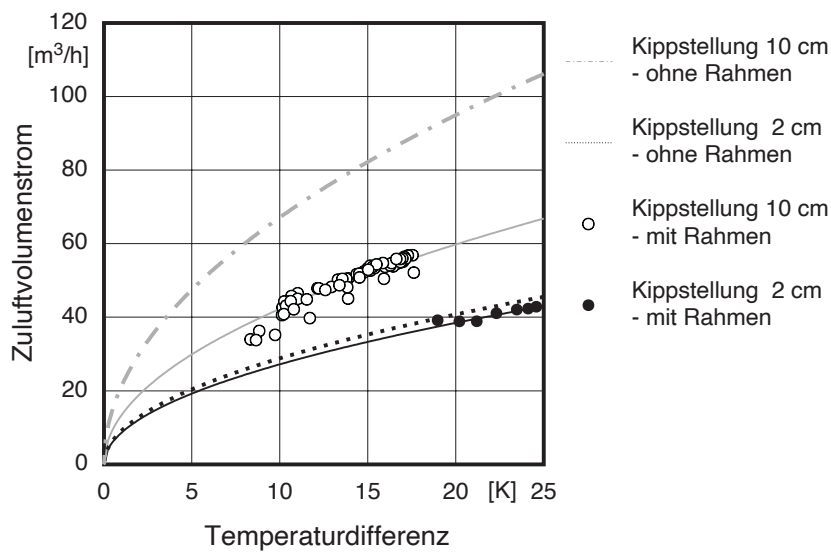


Abbildung 3.6: Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für verschiedene Kippstellungen mit und ohne Rahmen ohne Windeinfluss aus Maas [4]

der Fenster im Raum haben (abgesehen von übereinander angeordneten Fenstern²³) nur geringen Einfluss. Siehe hierzu [Abbildung 3.5](#) und [Abbildung 3.6](#).

- Der **Windeinfluss** dominiert den Luftwechsel ab Anströmgeschwindigkeiten von ca. 0,5 m/s.
- Die **Lüftungsdauer** ist von großer Bedeutung und kann zur Berechnung grob in Stoßlüften und Dauerlüften eingeteilt werden.
- Bei der **Stoßlüftung** ist die Temperaturdifferenz der mittleren Raumlufttemperatur und der Außentemperatur die treibende thermische Antriebsgröße. Es findet keine spürbare Entwärmung der Umgebungsflächen statt.
- Bei **Dauerlüftung** kann die mittlere Temperaturdifferenz der Umgebungsflächen und der Außentemperatur als thermische Antriebsgröße angesehen werden. Hier findet eine spürbare Entwärmung der Umgebungsflächen statt.

Eine genaue Abgrenzung oder zeitliche Festlegung von Stoß- und Dauerlüften ist nicht möglich, da diese von sowohl thermischen als auch geometrischen Verhältnissen abhängig ist. Aus der Aufbereitung der Ergebnisse für die Praxis aus [1] geht jedoch hervor, dass sich die Stoßlüftung im Heizfall über eine relativ kurze Zeitdistanz im Minutenbereich erstreckt. Im Rahmen der Berechnungen der Bachelorarbeit wird daher die Dauer

²³Übereinander angeordnete Fensterstellungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht betrachtet, da diese Konstellation ohnehin in Wohnräumen nur selten vorkommt.

der Stoßlüftung vereinfacht als die vom Öffnungszeitpunkt an beginnenden 3 Minuten definiert.

Um den **Einfluss von Stoß- und Dauerlüftung** auf den globalen Luftwechsel einschätzen zu können sind in **Abbildung 3.7** aus Seifert [1] die dort errechneten Volumenströme mit denen aus Maas [4] bei ähnlicher Raumgeometrie²⁴ verglichen. Zu erkennen ist, dass vor allem bei einem großen Öffnungswinkel die Unterscheidung in Stoß- und Dauerlüftung wichtig ist. Die Berechnung aus Maas entspricht bei kleinen Öffnungsweiten ungefähr dem Mittel der aus Seifert berechneten Stoß- und Dauerlüftung.

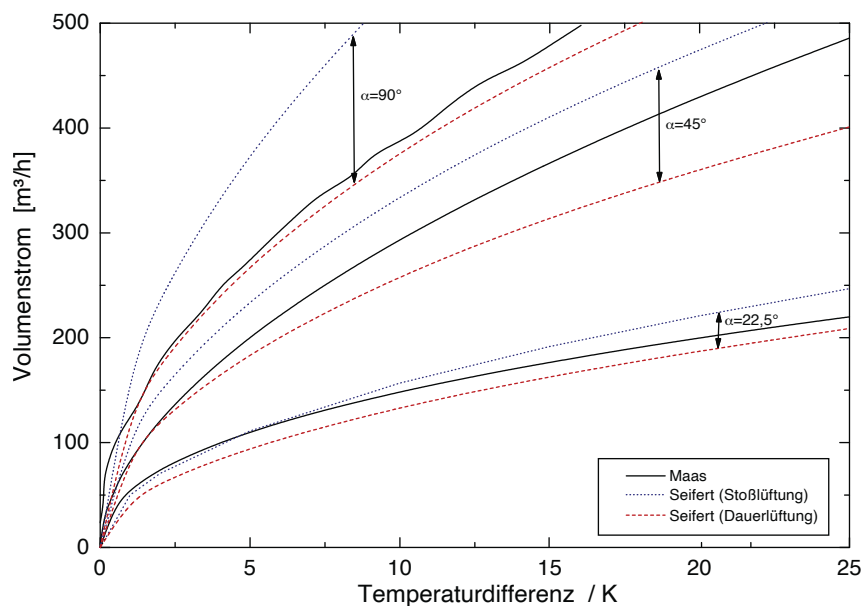


Abbildung 3.7: Vergleich der berechneten Zuluftvolumenströme ohne Windeinfluss. Modifiziert aus Seifert [1] und Maas [4] bei ähnlicher Raumgeometrie

3.2.1 Hygienischer Luftwechsel

Der **hygienische Luftwechsel** beschreibt, wie bereits in **Abschnitt 2.2** erklärt das im Raum wirksam ausgetauschte Raumvolumen. Für die weitere Berechnung werden die Ergebnisse aus Seifert [1] verwendet. Unterschieden wird in Stoß- und Dauerlüftung sowie unterschiedliche Außenlufttemperaturen. Aus Berechnungen für ausgewählte Temperaturdifferenzen ergibt sich folgende Regressionsgleichung mit den zwei in Seifert [1] eingeführten Variablen X_{hyg} und Y_{hyg} :

$$\lambda_{hyg} = X_{hyg} * \Delta \vartheta^{Y_{hyg}} \quad (3.3)$$

²⁴In Seifert [1] wurde versucht die Raumgeometrie aus Maas [4] möglichst genau nachzustellen.

3.2.2 Energetischer Luftwechsel

Der **energetische Luftwechsel** beschreibt den energetisch wirksamen Teil des globalen Luftwechsels. Auch dieser wird unterschieden in Stoß- und Dauerlüftung sowie unterschiedliche Außenlufttemperaturen. Aus Berechnungen für ausgewählte Temperaturdifferenzen ergibt sich folgende Regressionsgleichung mit den zwei Variablen X_{ener} und Y_{ener} :

$$\lambda_{ener} = X_{ener} * \Delta \vartheta^{Y_{ener}} \quad (3.4)$$

Die verwendeten Werte für X und Y sind in der **Abbildung 3.8** dargestellt.

	Stoßlüftung		Dauerlüftung	
	$X_{stoß}$	$Y_{stoß}$	X_{dauer}	Y_{dauer}
global				
ein Fenster gekippt	0,34023	0,55792	0,32737	0,55182
ein Fenster halb geöffnet	3,59225	0,50630	2,91338	0,48029
ein Fenster geöffnet	5,37982	0,50293	4,04235	0,47256
zwei Fenster gekippt	0,69156	0,54958	0,64848	0,53854
zwei Fenster halb geöffnet	70,67500	0,50826	5,11682	0,47155
zwei Fenster geöffnet	11,04770	0,50410	7,06297	0,46304
hygienisch				
ein Fenster gekippt	0,24400	0,38882	0,23746	0,38469
ein Fenster halb geöffnet	2,17246	0,50246	1,76456	0,47667
ein Fenster geöffnet	3,42487	0,50258	2,57395	0,47223
zwei Fenster gekippt	0,32457	0,52176	0,30538	0,51125
zwei Fenster halb geöffnet	4,01213	0,50752	2,90607	0,47087
zwei Fenster geöffnet	6,95249	0,50297	4,44941	0,46195
energetisch				
ein Fenster gekippt	0,28582	0,53542	0,27544	0,52957
ein Fenster halb geöffnet	2,52332	0,46243	2,08285	0,43886
ein Fenster geöffnet	3,45767	0,44398	2,68557	0,41731
zwei Fenster gekippt	0,54782	0,53730	0,51446	0,52649
zwei Fenster halb geöffnet	4,11909	0,43981	3,11345	0,40820
zwei Fenster geöffnet	5,31677	0,42325	3,64687	0,38927

Abbildung 3.8: Berechnungswerte für den globalen, energetischen und hygienischen Luftwechsel aus Seifert [1]

4 Energieverlustberechnung

Die Ergebnisse aus Seifert [1] geben sehr genaue und zuverlässige Informationen zum Luftwechsel sowie dessen Effektivität in energetischer und hygienischer Sicht. Aus den Ergebnissen können jedoch wenige Aufschlüsse zum tatsächlichen Energieverlust eines Fensters oder Raumes über eine Zeitspanne bei verschiedenen Nutzerprofilen und Klimabereichen gezogen werden.

Um einige genauere Aussagen zum jährlichen Energieverlust bei Fensterlüftung treffen zu können, werden die Ergebnisse aus Seifert [1] um Nutzerprofile und Wetterdaten erweitert und ausgewertet.

Das Ziel der nachfolgenden Berechnungen soll die Betrachtung der hygienischen Wirkung und der energetischen Verluste bei verschiedenen Nutzerprofilen sein. Hierfür werden anhand der Umfrage aus Kapitel 5 verschiedene Nutzerprofile erarbeitet. Diese werden mit einem theoretisch optimalen Lüftungsplan je Öffnungsvariante hinsichtlich Energieverlust und hygienischer Wirksamkeit betrachtet.

4.1 Randbedingungen

4.1.1 Der Referenzraum

Der zur Simulation verwendete Modellraum ist in der Abbildung 4.1 dargestellt. Die Maße des Raumes und des Fensters werden in allen betrachteten Varianten gleich gehalten. Im Falle der vollständig geöffneten Fenster werden die Fensterflügel vernachlässigt. In allen anderen Varianten werden die Fensterflügel als geometrische Hindernisse betrachtet. Auf eine Variation der Position der Fenster sowie die Auswertung übereinanderliegender Fenster wird im weiteren Verlauf verzichtet. Auf die Betrachtung der umgekehrten Variante bei unterschiedlichen Öffnungen der beiden Fenster wird aufgrund der fast identischen Berechnungswerte ebenfalls verzichtet.

Die weitere Untersuchung grenzt die Lüftungsvarianten in folgende repräsentative Varianten ein:

- ein Fenster gekippt
- ein Fenster halb geöffnet
- ein Fenster geöffnet

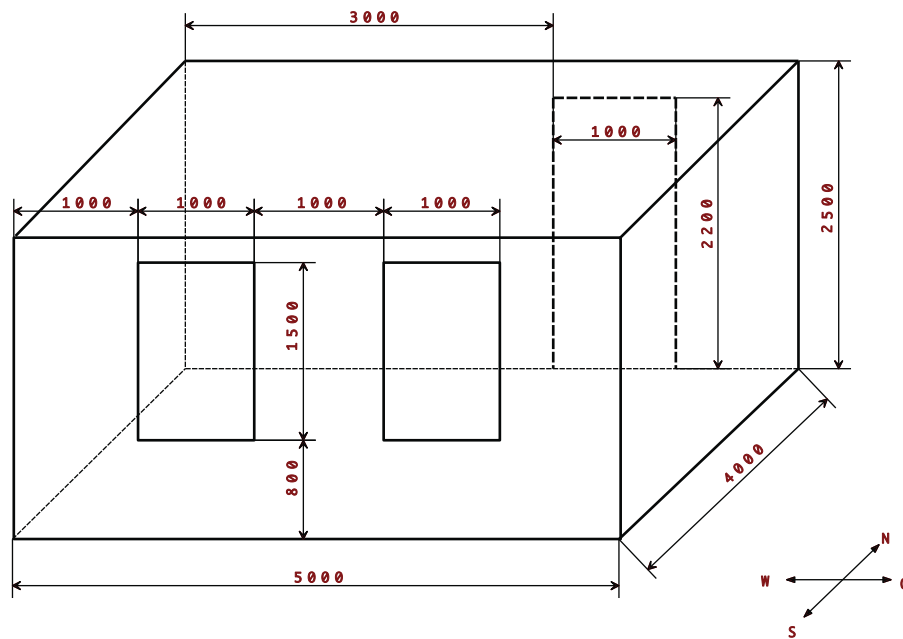


Abbildung 4.1: Bemaßte Ansicht in mm des ausgewählten Modellraums

- ein Fenster geöffnet und ein Fenster gekippt
- zwei Fenster gekippt
- zwei Fenster geöffnet

Bei der gekippten Variante wird mit einer Neigung des Fensterflügels von 6° in Richtung des Raumes gerechnet. Beim halb geöffneten Fenster wird von einer Drehung des Fensterflügels von 45° ins Rauminnere ausgegangen. In der Berechnung der geöffneten Fenster wird der Fensterflügel vernachlässigt.

4.1.2 Wetterdaten

Um möglichst realistische Außenlufttemperaturwerte in die zeitliche Berechnung einfließen zu lassen, werden Daten des **Testreferenzjahres 2015 des Standortes Nürnberg** herangezogen [31]. Die Wetterdaten sind Messungen des Deutschen Wetterdienstes, welche überarbeitet wurden, um ein repräsentatives Jahr darzustellen. Nürnberg liegt in der Mitte Deutschlands, besitzt ein warmgemäßigtes Übergangsklima [32] und bietet sich daher als Referenz an.

Der **Wind** hat auf den Volumenstrom, wie in **Abschnitt 3.2** erwähnt, bereits ab 0,5 m/s einen dominierenden Einfluss, er kann jedoch aufgrund nicht ausreichender Berech-

nungsgrundlagen²⁵ im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt werden. Allerdings hat der Einfluss des Windes in nahezu allen Fällen einen volumenstromerhöhenden Effekt [1]. Die berechneten Ergebnisse können folglich als Mindestwerte angesehen werden.

Um die Berechnung der Energieverluste nur auf die Tage zu beziehen, an denen auch wirklich geheizt wird, wird eine **Heizgrenztemperatur** von 10 °C angesetzt. Bei Außenlufttemperaturen über denen der Heizgrenztemperatur fließt der Energieverlust nicht in die Berechnung ein.

4.1.3 Nutzerprofile

Um den Einfluss der Nutzer, sowie die Auswirkung beispielhafter Wetterdaten zu quantifizieren werden mehrere Nutzungsprofile (Lüftungspläne) mit Lüftungszeiten über den Tag festgelegt. In Anlehnung an diverse Empfehlungen zur Lüftungshäufigkeit mit dem Fenster sowie den Umfrageergebnissen aus Kapitel 5 wird im Lüftungsplan die Möglichkeit für 5 verschiedene Uhrzeiten gegeben²⁶. Die Dauer der Lüftung kann je Uhrzeit angepasst werden. Bezogen auf das Wetter des Testreferenzjahres wurde des Weiteren eine Untergliederung in die vier meteorologischen Jahreszeiten ermöglicht. In Abbildung 4.2 ist das Format des verwendeten Lüftungsplans dargestellt.

Lüftungsplan 1					
Tägliche Lüftungszeit [min]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	10	20	0	20
Uhrzeit 2	15	10	20	0	20
Uhrzeit 3	22	10	20	0	20
Uhrzeit 4	0	0	0	0	0
Uhrzeit 5	0	0	0	0	0
Summe am Tag:		30	60	0	60

Abbildung 4.2: Lüftungsplan 1

Anhand der Ergebnisse der Umfrage aus Kapitel 5 ist in Abbildung 4.2 ein möglichst repräsentativer Lüftungsplan realisiert worden. Fast 80 % der Befragten geben an, dass in der Wohnung am Tag höchstens 2 - 3 mal manuell mit dem Fenster gelüftet wird²⁷. Im **ersten Lüftungsplan** wird also drei mal am Tag gelüftet. Um die Ergebnisse mit

²⁵Für die genaue Quantifizierung der Windeinflüsse müssen Fensterhöhe, Himmelsrichtung, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und die Einbausituation mit allen geometrischen Bauteilen berücksichtigt werden. Außerdem ist das Ergebnis dann nicht mehr allgemein auf alle Fenster des Hauses übertragbar, sondern spezifisch für ein Fenster berechnet.

²⁶Nur 5,1 % der Befragten geben an öfter als 5 mal am Tag zu lüften.

²⁷Wird berücksichtigt, dass Besitzer einer kontrollierten Wohnraumlüftung nicht mit in die Ergebnisse eingerechnet werden, bestätigt sich die These aus Oppermann [5], dass das Besitzen einer kontrollierten Wohnraumlüftung sich nur unwesentlich auf die Lüftungszeit auswirkt. Da sich in der

anderen Lüftungsintervallen vergleichen zu können, werden die Lüftungszeiten über den Tag verteilt. Im Sommer werden die Lüftungszeiten nicht mitberechnet. Eine gezielte Nachtkühlung im Sommer wird später separat betrachtet. Im Winter wird aufgrund der niedrigeren Außentemperaturen die Lüftungsdauer stark reduziert. Zur Vergleichbarkeit wird die Lüftungszeit im Winter gegenüber denen der Übergangszeiten in der Berechnung genau halbiert.

Der **zweite Lüftungsplan** wird angepasst an das unter anderem aus Seifert [1], Gritzki [2], Hall [3] und Maas [4] bekannte Ergebnis, dass besser öfter und dafür kürzer als weniger oft und dafür länger gelüftet werden soll. Im Lüftungsplan 2 in **Abbildung 4.3** wurde daher dieselbe Gesamtlüftungszeit in den Jahreszeiten auf fünf statt drei Lüftungsintervalle aufgeteilt.

Lüftungsplan 2					
Tägliche Lüftungszeit [min]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6	12	0	12
Uhrzeit 2	12	6	12	0	12
Uhrzeit 3	15	6	12	0	12
Uhrzeit 4	18	6	12	0	12
Uhrzeit 5	22	6	12	0	12
Summe am Tag:		30	60	0	60

Abbildung 4.3: Lüftungsplan 2

Für beide Lüftungspläne werden alle aus **Unterabschnitt 4.1.1** bekannten Lüftungsvarianten berechnet, um die Lüftungsvarianten vergleichen zu können. Für alle Varianten wird der jeweilige durchschnittliche hygienische Luftwechsel dargestellt sowie der jeweilige gesamte Energieverlust durch den energetisch wirksamen Volumenstrom.

Der **dritte Lüftungsplan** wird in **Abbildung 4.4** exemplarisch für die Variante *ein Fenster geöffnet* dargestellt. Dieser richtet die Lüftungszeit nach dem jeweiligen hygienischen Luftwechsel, um in jeder der gelüfteten Lüftungszeiten einen durchschnittlichen hygienischen Luftwechsel von 1 zu erreichen. Das bedeutet, dass die Lüftungszeit vor allem der Temperatur zur jeweiligen Uhrzeit angepasst wird und ein zu langes²⁸ oder zu kurzes²⁹ Lüften vermieden wird. Rechnerisch wird dies mit einer Regression der Lüftungszeit der jeweiligen Uhrzeit zum hygienischen Luftwechsel von 1 umgesetzt.

Umfrage das Ergebnis nur unwesentlich um wenige Prozent verschiebt wird im weiteren Verlauf diese Abhängigkeit vernachlässigt.

²⁸Lüftungsintervalle, bei denen der hygienische Luftwechsel von 1 überschritten wird, werden als zu lange angesehen, da theoretisch ab hier kein hygienischer Bedarf mehr besteht.

²⁹Lüftungsintervalle, bei denen kein hygienischer Luftwechsel von 1 erreicht wird, also das Raumvolumen hygienisch nicht vollständig ausgetauscht wird, werden als zu kurz angesehen, da hier nicht das komplette Potential ausgeschöpft wird.

Lüftungsplan 3 für ein Fenster geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	4,05	7,4	0	7,8
Uhrzeit 2	12	4,4	15,4	0	16,6
Uhrzeit 3	15	4,55	19,2	0	16,88
Uhrzeit 4	18	4,2	9	0	9
Uhrzeit 5	22	4,35	13,5	0	11,2
Summe am Tag:		22	65	0	61

Abbildung 4.4: Lüftungsplan 3 - ein Fenster geöffnet

4.2 Berechnungsweg

Die Lüftungszeit t wird zur Berechnung in Dauerlüftung t_d und Stoßlüftung t_s aufgeteilt. Bei Lüftungszeiten unter 3 Minuten wird die komplette Lüftungszeit als Stoßlüftung berechnet, da sich laut Seifert [1] hier die Umgebungsflächentemperaturen noch nicht merklich verändern. Die Lüftungszeit nach 3 Minuten innerhalb eines Lüftungsvorgangs wird als Dauerlüftung gerechnet. Anschließend werden beide Luftwechsel addiert und je Uhrzeit und Jahreszeit gemittelt.

Der hygienische Luftwechsel wird aus Gleichung 2.2 und Gleichung 3.3 berechnet. Die Berechnung erfolgt für jede relevante Stunde im Jahr. Die relevanten Uhrzeiten werden im Lüftungsplan festgelegt. In der relevanten Stunde wird aus der Temperaturdifferenz, der Lüftungszeit und den Regressionsvariablen X und Y aus Abbildung 3.8 der Luftwechsel berechnet.

$$\lambda_{hyg} = X_{hyg,s} * \Delta\vartheta^{Y_{hyg,s}} * t_s + X_{hyg,d} * \Delta\vartheta^{Y_{hyg,d}} * t_d \quad (4.1)$$

Der Wärmestrom wird näherungsweise anhand des theoretisch energetisch wirksamen Volumenstroms berechnet:

$$\lambda_{ener,s} = X_{ener,s} * \Delta\vartheta^{Y_{ener,s}} * t_s \quad (4.2)$$

$$\lambda_{ener,d} = X_{ener,d} * \Delta\vartheta^{Y_{ener,d}} * t_d \quad (4.3)$$

$$\dot{V}_{ener,s} = \lambda_{ener,s} * l * b * h \quad (4.4)$$

$$\dot{V}_{ener,d} = \lambda_{ener,d} * l * b * h \quad (4.5)$$

$$\dot{Q} = \rho * c * \dot{V} * \Delta\vartheta \quad (4.6)$$

Die Berechnung des energetischen Wärmestroms erfolgt für jede relevante Stunde im Jahr mit:

$$\dot{Q}_{ener} = \rho * c * \dot{V}_{ener,s} * t_s * \Delta\vartheta + \rho * c * \dot{V}_{ener,d} * t_d * \Delta\vartheta \quad (4.7)$$

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Alle Berechnungsergebnisse sind im Anhang wie in **Tabelle 4.1** dargestellt aufgeführt.

Lüftungsplan	Ergebnisse	
Plan 1	Abbildung 7.1 bis 7.6	Tabelle 7.1 bis 7.6
Plan 2	Abbildung 7.7 bis 7.12	Tabelle 7.7 bis 7.12
Plan 3	Abbildung 7.13 bis 7.18	Tabelle 7.13 bis 7.18

Tabelle 4.1: Übersicht der Ergebnisse

Allgemein muss bei der Auswertung der Ergebnisse darauf geachtet werden, dass die errechneten Lüftungszeiten aus Plan 3 zum Teil sehr theoretische Werte ergeben. So muss beim Lüftungsplan 3 bei einem Fenster gekippt im Herbst um 15:00 Uhr theoretisch 290 Minuten gelüftet werden, um einen hygienischen Luftaustausch von 1 zu generieren. Das entspräche fast 5 Stunden Lüftungszeit und ist in diesem Lüftungsplan nicht realisierbar, da um 18:00 Uhr wieder gelüftet werden soll. Die Ergebnisse können daher nur schlecht mit den Lüftungsplänen 1 und 2 verglichen, aber gut zur theoretischen Betrachtung der Unterschiede in den Lüftungsvarianten herangezogen werden.

Um den Gesamtjahresenergieverbrauch besser vergleichen zu können, wurde dieser je Lüftungsvariante in **Abbildung 4.5** aufgetragen.

Allgemein lässt sich sagen, dass beim Lüftungsplan 1 die meiste Energie verbraucht wird. Bei gleicher Lüftungszeit im Lüftungsplan 2 wird etwas Energie eingespart. Der Lüftungsplan 3, der die Lüftungszeit variiert, spart bei großen Öffnungen weiter Energie ein. Um die Ergebnisse genauer zu betrachten, werden weitere Diagramme erstellt.

Um die Lüftungsvarianten untereinander zu vergleichen, sind in **Abbildung 4.6** die Energieverluste bei Plan 3, nach zu jeder Uhrzeit vollständigem hygienischen Luftaustausch,

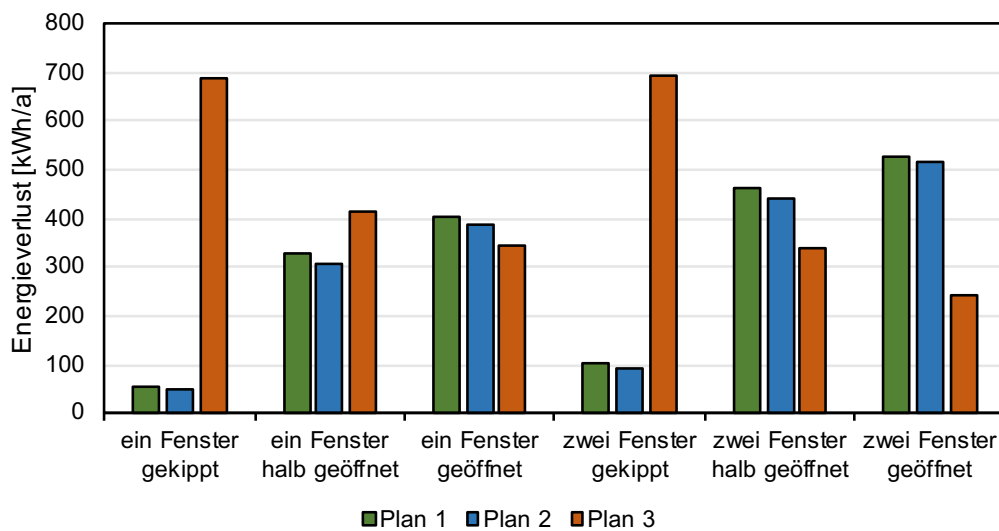


Abbildung 4.5: Jährlicher Energieverlust je Lüftungsplan je Lüftungsvariante

dargestellt. Die Lüftungsvarianten können hier verglichen werden, da beim Lüftungsplan 3 alle Varianten den selben hygienischen Effekt auf den Raum haben. Der zeitliche Unterschied kann, abgesehen von den extrem theoretischen Werten, bei den gekippten Fenstern vernachlässigt werden, da er sich innerhalb der genannten Stunde aufhält.

Lüftungsvariante	Energieverlust
ein Fenster gekippt	200,9 %
ein Fenster halb geöffnet	120,4 %
ein Fenster geöffnet	100 %
zwei Fenster gekippt	202,3 %
zwei Fenster halb geöffnet	99,1 %
zwei Fenster geöffnet	70,8 %

Tabelle 4.2: Vergleich jährlicher Energieverlust bezogen auf ein Fenster geöffnet

Die Lüftungsvariante mit der größten Öffnungsfläche bringt, wie erwartet, den geringsten Energieverlust mit knapp 243 kWh. Der **höchste Energieverlust** stellt sich bei der Variante *zwei Fenster gekippt* mit fast 694 kWh, also dem fast dreifachen Energieverlust ein. Zum Vergleich der Varianten ist in [Tabelle 4.2](#) die zur hygienischen Lüftung übliche Variante *ein Fenster geöffnet* als Vergleichswert angesetzt und die prozentualen Veränderungen des jährlichen Energieverlustes je Lüftungsvariante aufgezeigt.

Des Weiteren ist in [Abbildung 4.7](#) der **Energieverlust je gelüftete Minute** je Lüftungsvariante verglichen. Durch die Abhängigkeit des Energieverlustes pro Minute kann verglichen werden, wie viel Energie bei den Lüftungsvarianten verloren geht, wenn die

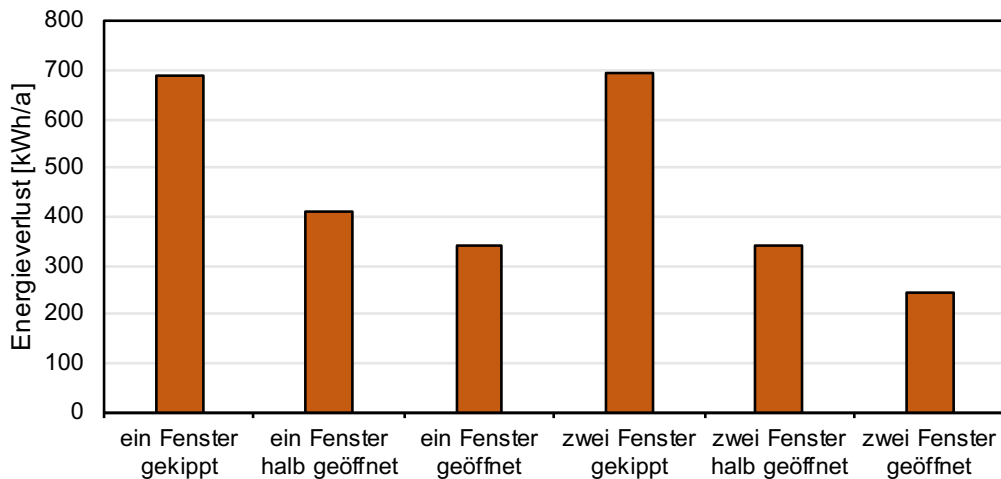


Abbildung 4.6: Jährlicher Energieverlust bei Lüftungsplan 3 je Lüftungsvariante

Lüftungszeit gleich bleibt. Hier sind die Unterschiede im Energieverlust je Lüftungsplan sehr deutlich zu erkennen. Bei allen Varianten schneidet der Lüftungsplan 1 am schlechtesten ab, Lüftungsplan 2 deutlich besser und Lüftungsplan 3 mit deutlichem Abstand am Besten.

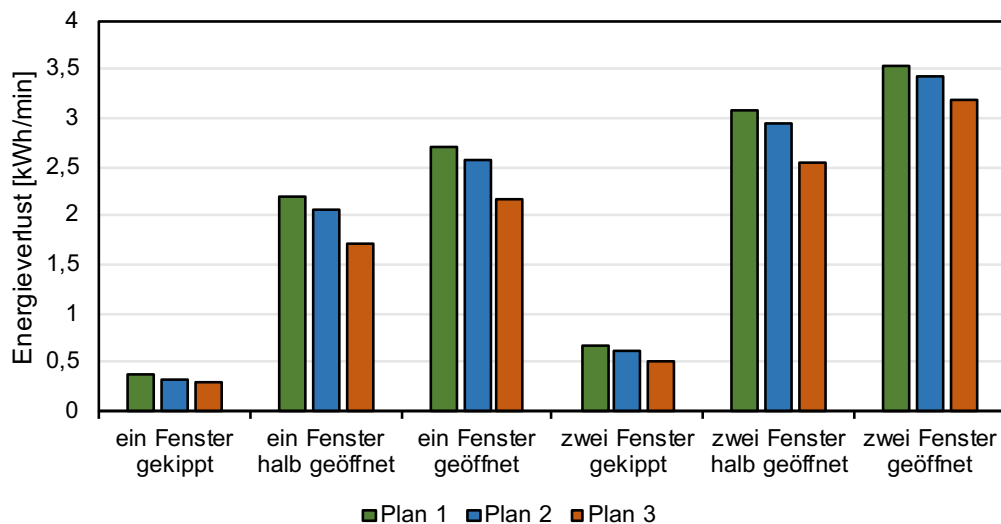


Abbildung 4.7: Energieverlust pro Minute je Lüftungsplan je Lüftungsvariante

Der Vergleich der Lüftungsvarianten hinsichtlich **hygienischer Wirkung** ist in [Abbildung 4.8](#) dargestellt. Um die Vergleiche sinnvoll darstellen zu können wurden einige Korrekturen an den Ergebnissen im Anhang durchgeführt. Der hygienische Luftwechsel pro Lüftungszeit ist auf 1 begrenzt. Für den Überblick über die Lüftungseffektivität sind

in den in [Tabelle 4.1](#) aufgeführten Werten die Luftwechsel nicht auf 1 begrenzt angegeben. Hygienisch gesehen kann sich jedoch die Luft nach vollständigem Luftaustausch nicht mehr verbessern. Daher muss zum Vergleich der Varianten der gewertete hygienische Luftwechsel begrenzt werden. Im Diagramm wird der erreichte Luftwechsel auf den kompletten Tag bezogen. Daher ist der mit den Lüftungsplänen maximal durch Fensterlüftung erreichbare durchschnittliche tägliche Luftwechsel auf $\lambda_{Tag,max} = \frac{5}{24} \frac{1}{h} = 0,21 \frac{1}{h}$ begrenzt³⁰.

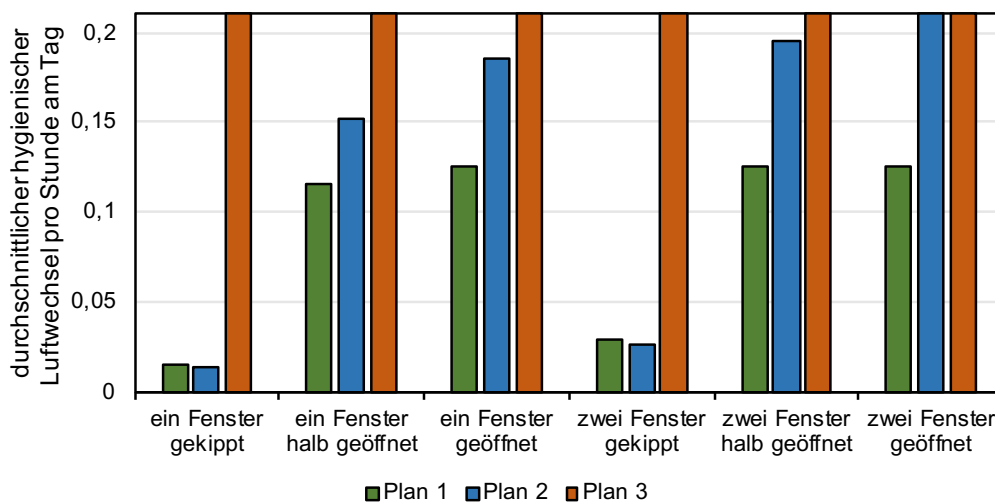


Abbildung 4.8: Durchschnittlicher täglicher hygienischer Luftwechsel je Lüftungsplan je Lüftungsvariante

Die [Abbildung 4.8](#) zeigt deutlich, wie schlecht der Lüftungsplan 1 beim hygienischen Vergleich abschneidet. Auch zeigt sie, dass der Lüftungsplan 3 den Lüftungsplan 2 bei großer Öffnungsfläche hygienisch nur gering bis gar nicht optimiert.

Anhand des errechneten durchschnittlichen hygienischen Tagesluftwechsels und des Gesamtenergieverlustes kann ein theoretisch erreichter hygienischer Luftwechsel pro Energieverlust berechnet werden. Die errechneten Werte sind sehr theoretisch, bieten sich aber zum Vergleich der Varianten an, da die hygienische **Effektivität pro Energieverlust** betrachtet werden kann. In [Abbildung 4.9](#) ist dieser theoretisch erreichte Luftwechsel dargestellt. Lüftungsplan 3 bleibt relativ gesehen unverändert. Bei den Lüftungsplänen 1 und 2 fällt auf, dass der knapp beste Wert bei der Variante ein Fenster halb geöffnet auftritt. Bei Lüftungsplan 1 stellt sich sogar der schlechteste Wert bei größter Öffnungsfläche ein. Deutlich zu erkennen ist, dass bei größerer Öffnungsfläche des Fensters die korrekte Lüftungszeit immer wichtiger wird, da die Effektivität sonst extrem beeinträchtigt wird.

³⁰bei fünf Lüftungszeiten jeweils vollständiger hygienischer Luftaustausch

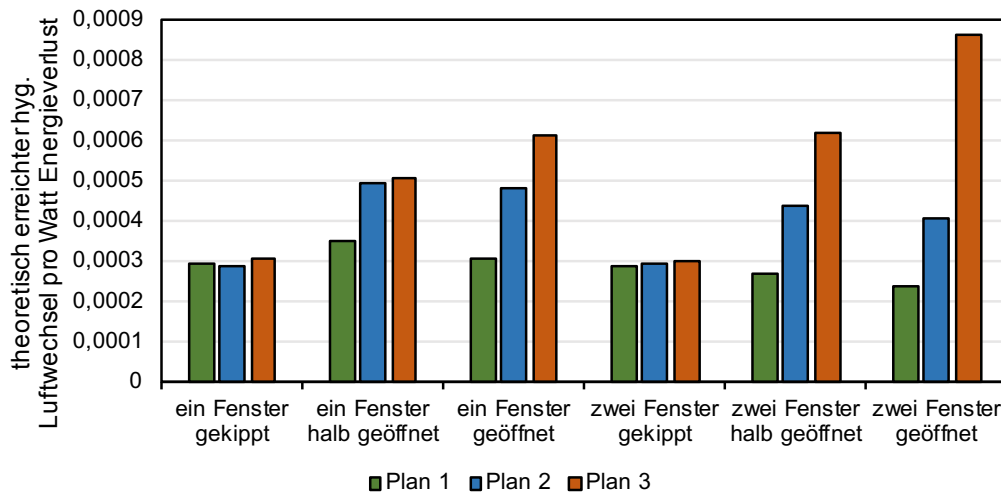


Abbildung 4.9: Theoretisch erreichter Luftwechsel pro Tag pro Watt Energieverlust

Laut der in Umfrage [Kapitel 5](#) denken 78,6 % der Befragten, dass sie entweder richtig oder ganz OK lüften. 63 % finden die aktuelle Art zu lüften gut. Die Einschätzungen der Befragten müssen jedoch als sehr subjektiv angenommen werden, da man als Nutzer nur wenig Gefühl für die Energiemenge hat, die bei der Fensterlüftung verloren geht, beziehungsweise eingespart werden könnte. Im allgemeinen Energieverbrauch der deutschen privaten Haushalte nimmt die Raumwärme laut [Abbildung 4.10](#) einen Anteil von 70 % ein. Anteilig nehmen die Lüftungswärmeverluste innerhalb der Raumwärmeverluste in den letzten Jahren sogar weiter zu, da die Isolierung der Bauteile immer besser ausgeführt wird. Die Raumwärmeverluste steigen auch anteilig an, da zum Beispiel die Beleuchtung immer effizienter wird. Die Möglichkeit selbst, spontan zu lüften und unmittelbar Ergebnisse zu spüren stillt beim Nutzer, wie in [Abschnitt 2.3](#) erwähnt, ein gewisses Bedürfnis und kann daher nur schwer ersetzt werden. Hier besteht jedoch die Möglichkeit, **durch Aufklärung Energie einzusparen**.

In der Realität bewegen sich die meisten Nutzer wahrscheinlich innerhalb einer Mischung aus Lüftungsplan 1 und 3 oder Lüftungsplan 2 und 3. Dies lässt sich anhand der Umfrage begründen, da 78 % der Befragten angegeben haben höchstens 2 bis 3 mal am Tag mit dem Fenster zu lüften und daher bezogen auf die Lüftungshäufigkeit vermutlich zu Lüftungsplan 1 tendieren. Im Bezug auf die Lüftungslänge gaben jedoch nur 36,6 % der Befragten eine eher temperaturunabhängige Lüftungszeit an und tendieren daher zu Lüftungsplan 1 und 2. 61,8 % der Befragten gaben jedoch an, das Fenster wieder zu schließen wenn es zu kalt wird. Dies lässt auf eine temperatur- und luftwechselabhängige Öffnungszeit, und damit eher Lüftungsplan 3 schließen.

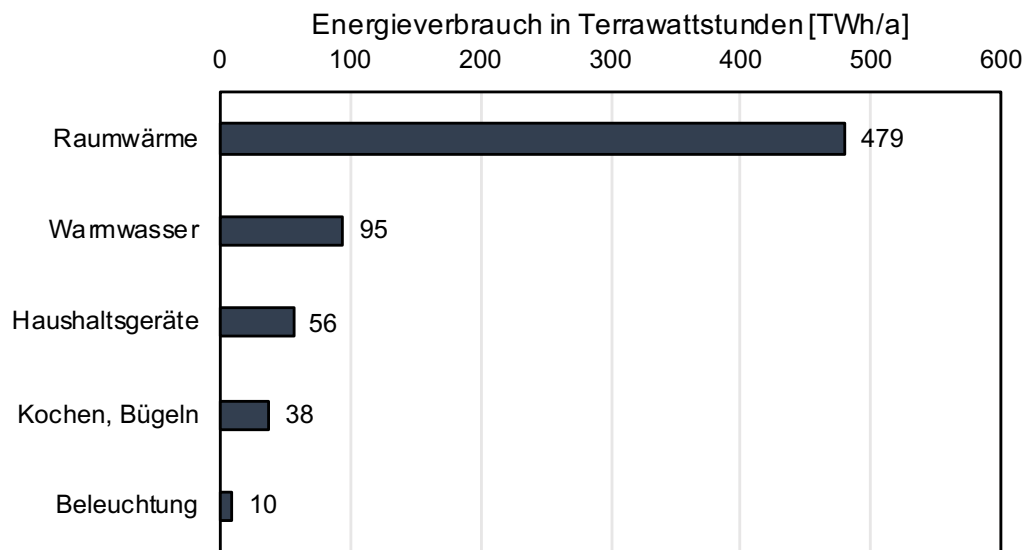


Abbildung 4.10: Energieverbrauch der privaten Haushalte in Deutschland nach Anwendungsbereich im Jahr 2017

Allgemein lassen sich aus den Ergebnissen folgende Tendenzen bezogen auf den Energieverlust feststellen:

- Bei gleicher Gesamtlüftungszeit ist es immer energetisch besser, öfter und dafür kürzer zu lüften.
- Bei kleinerer Öffnungsfläche geht mehr Energie verloren bis ein kompletter hygienischer Luftaustausch durchgeführt ist.
- Eine größere Öffnungsfläche lohnt sich nur, wenn die Lüftungszeit angepasst wird.
- Weitere Lüftung nach vollständigem hygienischem Luftaustausch sollte vermieden werden.
- Je größer die Öffnungsfläche, desto wichtiger ist die passende Lüftungszeit

5 Untersuchung des Nutzerverhaltens

Da sich eine energetische Bewertung der Fensterlüftung nur bezogen auf das Lüftungsverhalten und die Präferenzen der Nutzer beziehen lässt wurde am 31.03.2020 im Rahmen der Bachelorarbeit eine Umfrage zum Thema Fensterlüftung gestartet. Der Aufbau sowie die Gestaltung und Intentionen der Umfrage werden nachfolgend erläutert.

5.1 Forschungsdesign

An das Umfragedesign wurden unter Anderem folgende Ansprüche gestellt:

- kurzweilig und in höchstens 5 Minuten abschließbar,
- Abbrüche während der Umfrage sollen vermieden werden, da die Ergebnisse nicht in die Wertung einfließen können,
- die Umfrage muss für alle Altersklassen leicht zugänglich sein,
- möglichst unabhängige, gemischte Teilnehmer,
- möglichst viele Teilnehmer,
- ansprechendes Design und
- gute Auswertungsmöglichkeiten

Um möglichst vielen der oben genannten Ansprüchen gerecht zu werden wurde die Umfrage parallel in gedruckter Form und online gestartet. Die gedruckte Variante wurde jedoch nur vereinzelt nach technischen Problemen gewünscht. Online wurde das Umfrageportal www.umfrageonline.de verwendet, da sie für Studenten eine unbegrenzte Teilnehmerzahl bietet und einfach zu verteilen und bearbeiten ist. Durch den Klick eines Links wird der Teilnehmer direkt auf die Umfrage-Startseite weitergeleitet und kann beginnen.

Um die Umfrage so einfach und persönlich wie möglich zu gestalten, wurden alle Fragen im Ich-Format gestellt und Antwortmöglichkeiten zum Ankreuzen vorgegeben. Die Fragen sind außerdem umgangssprachlich und subjektiv gestellt, um ein persönliches und ehrliches Klima zu gestalten, das nicht das Gefühl einer Abfrage vermittelt. Auch wurden Formulierungen wie *keine Ahnung* sowie offene Antwortmöglichkeiten mit Absicht gewählt, um Raten oder *blindes Ankreuzen* bei Nichtwissen oder Sonderfällen zu vermeiden. Das Format der Umfrage ist dadurch jedoch **nicht wissenschaftlich** gehalten.

In den letzten beiden Fragen wurde den Teilnehmern die Möglichkeit gelassen, die Fragen offen zu beantworten und bei Bedarf noch einige Gedanken hinzuzufügen.

Die Umfrage wurde, um ein möglichst durchmisches Feld an Teilnehmern zu erhalten, in zahlreichen Vereinen und Zusammenkünften über Social-Media verteilt.

Die angestrebte Teilnehmerzahl von ca. 200 Personen wurde mit 374 gewerteten Teilnehmern³¹ weit überschritten.

5.2 Durchführung der Studie

Nachfolgend ist die originale Umfrage mit den Ergebnissen der einzelnen Fragen dargestellt: (Pflichtfragen sind mit einem Stern markiert)

Startseite

Mein Name ist Adrian. Ich studiere an der TH Nürnberg und schreibe meine Bachelorarbeit zum Thema Fensterlüftung. Es wäre schön, wenn Sie sich 5 Minuten Zeit nehmen, um die folgenden Fragen ehrlich zu beantworten. Vielen Dank.

Informationen über dich

- | | |
|--|--|
| 1. Ich bin:* | <input type="checkbox"/> Mieter (42,0 %) |
| <input type="checkbox"/> Männlich (38,2 %) | <input type="checkbox"/> Eigentümer (47,3 %) |
| <input type="checkbox"/> Weiblich (61,8 %) | <input type="checkbox"/> (10,7 %) |
| <input type="checkbox"/> Divers (0,0 %) | |
| 2. Ich bin ... Jahre alt. | 4. Ich wohne mit ... Personen zusammen in der Wohnung. |
| <input type="checkbox"/> unter 21 (19,8 %) | <input type="checkbox"/> alleine (13,6 %) |
| <input type="checkbox"/> 21-30 (37,7 %) | <input type="checkbox"/> 1 (21,7 %) |
| <input type="checkbox"/> 31-40 (11,8 %) | <input type="checkbox"/> 2 (20,6 %) |
| <input type="checkbox"/> 41-50 (10,4 %) | <input type="checkbox"/> 3 (24,9 %) |
| <input type="checkbox"/> >50 (20,3 %) | <input type="checkbox"/> 4 (12,0 %) |
| 3. Ich wohne momentan als: | <input type="checkbox"/> 5 oder mehr (7,2 %) |

³¹Es werden nur Antworten der Teilnehmer ausgewertet, welche die Umfrage bis zum Schluss beantwortet haben

5. Ich wohne im ...

(Mehrfachauswahl möglich)

- ☐ Untergeschoss (12,8 %)
- ☐ Erdgeschoss (37,7 %)
- ☐ 1. Obergeschoss (51,1 %)
- ☐ 2. Obergeschoss (20,6 %)
- ☐ 3. Obergeschoss (4,5 %)
- ☐ höher (3,2 %)
- ☐ (10,4 %)

6. Ich bin aufgewachsen:

- ☐ eher ländlich (81,6 %)
- ☐ eher städtisch (17,6 %)
- ☐ (0,8 %)

7. Ich ...

(Mehrfachauswahl möglich)

- ☐ bin vormittags in der Wohnung (23,9 %)
- ☐ bin mittags in der Wohnung (38,3 %)
- ☐ bin abends in der Wohnung (84,2 %)
- ☐ arbeite in der Wohnung (Home Office) (16,6 %)
- ☐ arbeite in der Wohnung (Hausarbeit) (22,3 %)
- ☐ bin eigentlich nur zum Schlafen in der Wohnung (10,2 %)

☐ koche in der Wohnung (66,0 %)

☐ (4,6 %)

8. Meine Wohnung ist gebaut worden ...

- ☐ vor den 80ern (31,6 %)
- ☐ in den 80ern (9,1 %)
- ☐ in den 90ern (16,0 %)
- ☐ in den 2000ern (18,4 %)
- ☐ nach 2010 (9,4 %)
- ☐ keine Angabe (15,5 %)

9. Folgende energetische Systeme sind in der Wohnung/ im Haus verbaut oder renoviert worden:*

(Mehrfachauswahl möglich)

- ☐ Fenster erneuert (51,9 %)
- ☐ Wände Isoliert (außen) (42,2 %)
- ☐ Wände Isoliert (innen) (26,5 %)
- ☐ Heizungsanlage getauscht (31,3 %)
- ☐ Solaranlage (23,3 %)
- ☐ kontrollierte Wohnraumlüftung (7,5 %)
- ☐ Wärmepumpe (11,2 %)
- ☐ Fußbodenheizung (28,3 %)
- ☐ (15,5 %)

Lüftungsverhalten

10. In Wohnräumen mag ich es eher...

☐ wärmer (41,4 %)

☐ mittel (54,8 %)

☐ kälter (2,4 %)

- ☐ kalt (0,8 %)
- ☐ (0,5 %)
11. In Schlafräumen mag ich es eher...
- ☐ wärmer (7,5 %)
- ☐ mittel (25,9 %)
- ☐ kälter (47,3 %)
- ☐ kalt (19,0 %)
- ☐ (0,3 %)
12. Ich schlafe in der Übergangszeit mit dem Fenster...
- ☐ offen (13,9 %)
- ☐ gekippt (46,0 %)
- ☐ geschlossen (40,1 %)
13. Mich stört der Lärm bei offenem Fenster ...
- ☐ nicht (43,3 %)
- ☐ ein bisschen (30,7 %)
- ☐ schon, aber ich öffne es trotzdem (13,9 %)
- ☐ extrem (12 %)
14. Insgesamt wird in der Wohnung am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster Stoßgelüftet.
- ☐ gar nicht (6,7 %)
- ☐ 1-2 mal (50,3 %)
- ☐ 2-3 mal (21,9 %)
- ☐ 3-4 mal (11,0 %)
- ☐ 4-5 mal (5,1 %)
- ☐ 5-6 mal (2,4 %)
- ☐ öfter als 6 mal (2,7 %)
15. In folgenden Räumen kippe ich die Fenster gerne dauerhaft:
- ☐ Küche (31,3 %)
- ☐ Bad (33,9 %)
- ☐ WC (49,3 %)
- ☐ Schlafzimmer (53,0 %)
- ☐ Wohnzimmer (6,6 %)
- ☐ Flur (5,6 %)
- ☐ (10,2 %)
16. Ich selbst lüfte am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster.
- ☐ gar nicht (5,1 %)
- ☐ 1-2 mal (56,1 %)
- ☐ 2-3 mal (19,5 %)
- ☐ 3-4 mal (9,1 %)
- ☐ 4-5 mal (5,9 %)
- ☐ 5-6 mal (2,1 %)
- ☐ öfter als 6 mal (2,1 %)
17. Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet.
- ☐ nicht (29,9 %)
- ☐ manchmal (23,8 %)
- ☐ öfters (20,9 %)
- ☐ immer (25,4 %)
18. „Frische Luft“ in der Wohnung ist mir ...

- ☐ egal (1,3 %)
- ☐ nicht wichtig (4,8 %)
- ☐ wichtig (56,4 %)
- ☐ sehr wichtig (37,4 %)
- ☐ noch nie (69,3 %)
- ☐ schon einmal (14,2 %)
- ☐ schon mehrmals (7,8 %)
- ☐ keine Ahnung (4,5 %)

19. Das Fenster wird nach dem Öffnen ...

- ☐ nach einer vorher angedachten Zeit wieder geschlossen (27,8 %)
- ☐ wenn es zu kalt wird wieder geschlossen (61,8 %)
- ☐ beim nächsten Betreten des Raumes geschlossen (7,2 %)
- ☐ abends geschlossen (1,6 %)
- ☐ (1,6 %)

20. Ich denke ich lüfte mit dem Fenster ...

- ☐ richtig (24,1 %)
- ☐ ganz OK (54,5 %)
- ☐ falsch (2,1 %)
- ☐ zu wenig (18,2 %)
- ☐ zu viel (1,1 %)

21. Ich hatte ... Probleme mit Feuchte in meiner Wohnung

- ☐ noch nie (67,6 %)
- ☐ schon einmal (10,4 %)
- ☐ schon mehrmals (8,8 %)
- ☐ keine Ahnung (7,8 %)
- ☐ (5,3 %)

22. Ich hatte ... Probleme mit Schimmel in meiner Wohnung.

☐ (4,3 %)

23. Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte.

- ☐ gut (39,3 %)
- ☐ mittel (28,6 %)
- ☐ schlecht (16,3 %)
- ☐ ausreichend (14,4 %)
- ☐ (1,3 %)

24. Mich interessiert die Heizungs- und Lüftungsanlage in meiner Wohnung ...

- ☐ sehr (20,9 %)
- ☐ mittel (52,9 %)
- ☐ überhaupt nicht (23,0 %)
- ☐ (3,2 %)

25. Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...

- ☐ gut (63,6 %)
- ☐ mittel (30,2 %)
- ☐ schlecht (3,2 %)
- ☐ nicht zeitgemäß (0,8 %)
- ☐

26. Ich würde meine Fenster an ein Smart Home System anschließen (per Smartphone oder Fernbedienung öffnen und schließen).

☐ ja, weil

☐ nein, weil

27. Ich hätte gerne eine kontrollierte Wohnraumlüftung in meiner Wohnung.

☐ ja, weil

☐ nein, weil

Vielen Dank für Ihre Hilfe.

5.3 Auswertung der Studie

Die Auswertung der Ergebnisse der Studie geht **über die für die Berechnung innerhalb der Bachelorarbeit relevanten Ergebnisse heraus** und soll auch für weiterführende Studien und Untersuchungen als Informationsbasis und Vergleichswert dienen. Daher sind nachfolgend interessante Ausreißer und Tendenzen zweier relativ aufeinander bezogener Fragestellungen bewertet.

Zunächst wird jedoch das Format der Studie und die Teilnahme bewertet.

Von den 403 Teilnehmern brachen 31 Teilnehmer die Umfrage vorzeitig ab. Das entspricht 7,6 % der Befragten. Abbrüche sind jedoch normal und finden im Idealfall gleich auf der ersten Seite statt. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass nicht der Fragebogen der Grund ist. Wer so früh abbricht, hat die Umfrage vermutlich aus Neugierde geöffnet, ohne die Absicht, sie zu beenden. 5 der Abbrecher haben die Teilnahme bereits vor Abschluss der ersten Seite, also der ersten 9 Fragen abgebrochen. Alle anderen Abbrecher können jedoch aufgrund des Umfrageformats nicht eingeteilt werden, da sie zwar vielleicht einen Teil der Umfrage beantwortet haben, jedoch nie auf absenden geklickt haben. In Umfragen sollten daher möglichst nach jedem thematischen Abschnitt eine Absendung der Ergebnisse verlangt werden, um die Abbruchrate besser einschätzen zu können. Dann können die Fragestellungen, die zum Abbruch geführt haben, besser erkannt werden.

Der zeitliche Verlauf der Teilnahmen und der Teilnahmen bis zum Schluss sind in der **Abbildung 5.1** dargestellt. Über 80 % der Teilnehmer nahmen am ersten Tag der Umfrage teil. Das bedeutet, es ist durchaus sinnvoll, möglichst viele Personen an einem Tag zu erreichen und früh am Morgen damit zu beginnen.

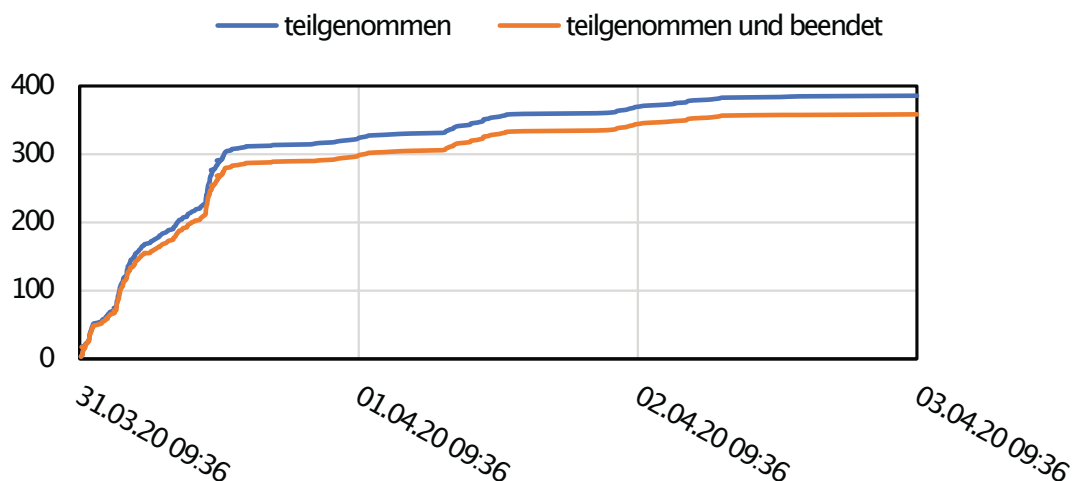


Abbildung 5.1: Zeitlicher Verlauf der Teilnahmen an der Umfrage

5.4 Ergebnisse

In der **Abbildung 5.2** ist der relative Vergleich der *Frage 18: Frische Luft in der Wohnung ist mir ...* auf die *Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... manuell mit dem Fenster.* dargestellt, um einen **Zusammenhang der Bedürfnisse der Bewohner mit dem aktiven Lüftungsverhalten** festzustellen. Eindeutig zu erkennen ist, dass den meisten Teilnehmern Frische Luft wichtig oder sehr wichtig ist. Trotzdem ist die Anzahl wie oft gelüftet wird recht durchmischt. Über 50 % der Teilnehmer, die gar nicht selbst lüften haben angegeben, dass ihnen Frische Luft wichtig oder sehr wichtig ist. Bei den Teilnehmern, die 5 bis 6 mal oder öfter als 6 mal lüften ist jedoch eine eindeutige Tendenz zur Wichtigkeit der Frischen Luft zu erkennen.

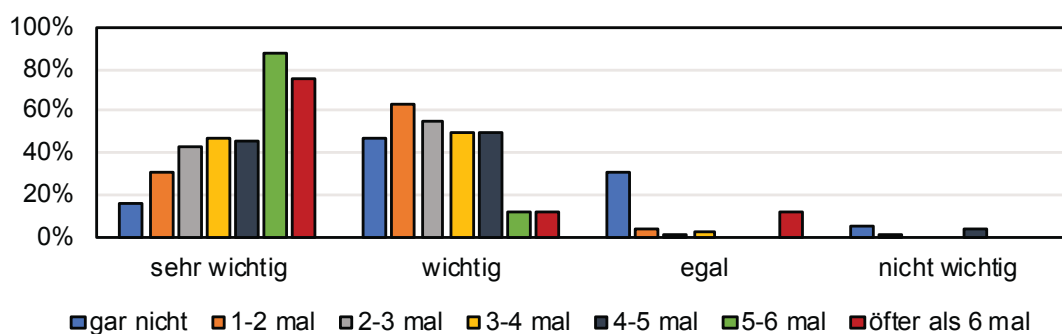


Abbildung 5.2: relative Projizierung der *Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... manuell mit dem Fenster* auf die *Frage 18: Frische Luft in der Wohnung ist mir ...*

Aufbauend darauf wird zur Bewertung der Zufriedenheit mit dem Lüften durch das Fenster in **Abbildung 5.3** die Projizierung der *Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ...*

manuell mit dem Fenster. auf die Frage 25: *Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...* dargestellt. Interessant ist die Tendenz, dass die **Zufriedenheit mit der Lüftungshäufigkeit** steigt. Zu erkennen ist auch, dass fast alle, die die Lüftung mit dem Fenster nicht als zeitgemäß erachten gar nicht selbst lüften.

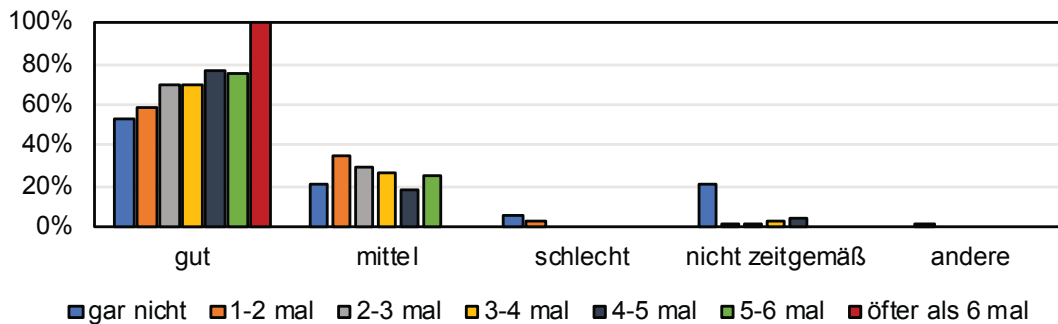


Abbildung 5.3: Relative Projizierung der Frage 16: *Ich selbst lüfte am Tag ca. ... manuell mit dem Fenster* auf die Frage 25: *Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...*

Zusätzlich ist in **Abbildung 5.4** eine Projizierung der Frage 23. *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 25: *Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...* dargestellt. Hier ist die Tendenz zu erkennen, dass die **Zufriedenheit mit der Lüftung durch die Aufklärung über das Lüftungskonzept** steigt.

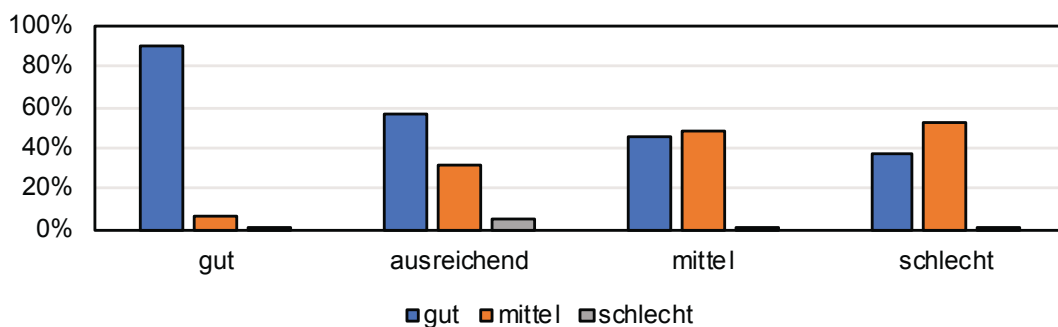


Abbildung 5.4: Relative Projizierung der Frage 23: *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 25: *Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...*

Um bewerten zu können, wie **energetisch bei unterschiedlicher Aufklärung über das Lüftungskonzept gelüftet wird** wird in **Abbildung 5.5** die Frage 23. *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 15. *In folgenden Räumen kippe ich die Fenster gerne dauerhaft bezogen.* Wie in **Abschnitt 3.2** beschrieben, kann das Kippen der Fenster nicht pauschal

als energetisch schlecht beschrieben werden, tendiert jedoch dazu ineffektiv zu sein. Das bedeutet, dass der in **Abbildung 5.5** dargestellte Vergleich nur bedingt als realistisch angesehen werden kann. Es ist jedoch zu erkennen, dass tendenziell die meisten der Befragten angeben, gut oder mittel über das Lüftungskonzept informiert zu sein und gleichzeitig in vergleichsweise vielen Räumen das Fenster kippen.

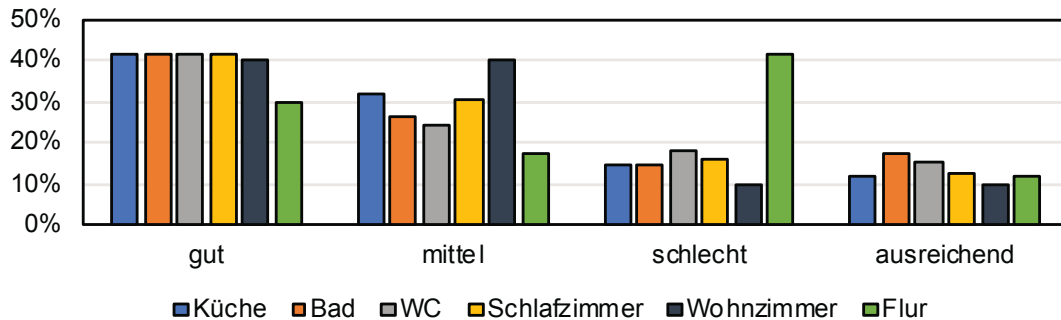


Abbildung 5.5: Relative Projektion der Frage 23: *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 15: *In folgenden Räumen kippe ich die Fenster gerne dauerhaft*

Angrenzend dazu ist in der **Abbildung 5.6** die Projektion der Frage 23. *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 16. *Ich selbst lüfte am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster* dargestellt, um die **Aufklärung mit der Lüftungshäufigkeit** zu vergleichen. Interessant ist hier, dass fast 60 % der Befragten, die gar nicht selbst manuell mit dem Fenster lüften, angeben gut über ihr Lüftungskonzept informiert zu sein. Hier muss angebracht werden, dass bei Abzug der Befragten, deren Wohnhaus mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung ausgestattet sind sich der Quote knapp halbiert. Das ist jedoch oft eine falsche Annahme, da die meisten der kontrollierten Wohnraumlüftungen nur für den Grundbedarf an Lüftung ausgelegt sind und keinesfalls die Fensterlüftung ersetzen. Interessant ist auch, dass knapp alle Befragten, die angegeben haben öfter als 6 mal am Tag zu lüften entweder denken sie sind gut (knapp 60 %) oder schlecht (knapp 40 %) über das Lüftungssystem informiert.

Eine weitere Bewertung der **Lüftungsweise je Aufklärung** ist in der **Abbildung 5.7** in der Projektion der Frage 23. *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 19. *Das Fenster wird nach dem Öffnen ...* dargestellt. Diese zeigt, wann die Fenster nach dem Öffnen wieder geschlossen werden und ist wie folgt zu bewerten. Gemäß **Abschnitt 3.2** sollte die Lüftungszeit auf jeden Fall dynamisch auf die Temperatur angepasst werden und nicht statisch bleiben. Daher sind die Antworten *wenn es zu kalt wird ...* und *nach einer vorher angedachten Zeit ...* als energetisch besser anzusehen, wie die beiden anderen

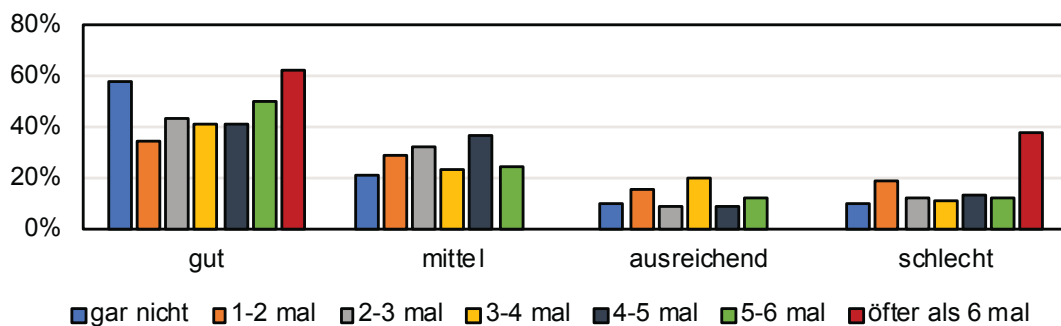


Abbildung 5.6: Relative Projizierung der Frage 23: *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 16: *Ich selbst lüfte am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster.*

Antwortmöglichkeiten. Im Diagramm ist zwar eine Tendenz zu dynamischer Lüftungszeit bei besserer Information zu erkennen, jedoch keine eindeutige Abhängigkeit.

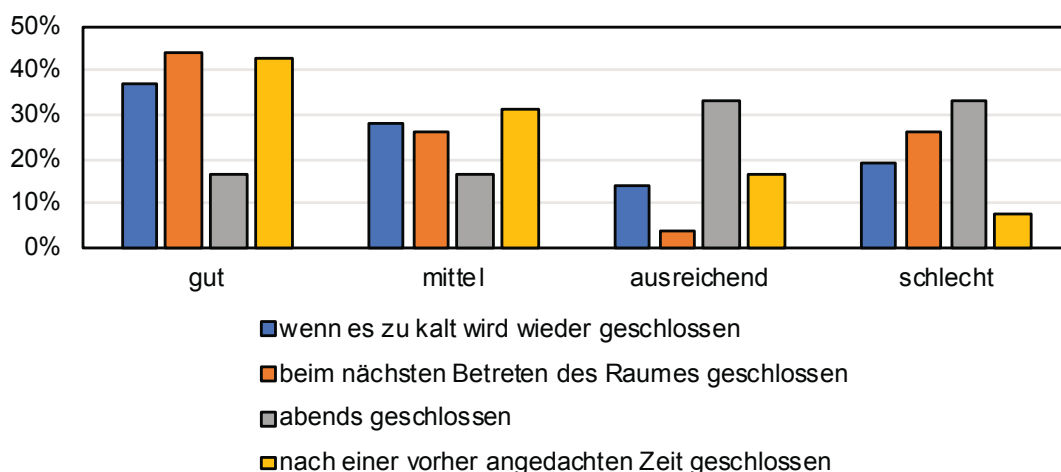


Abbildung 5.7: Relative Projizierung der Frage 23: *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 19: *Das Fenster wird nach dem Öffnen ...*

Nachdem in [Abbildung 5.5](#), [Abbildung 5.6](#) und [Abbildung 5.7](#) der Zusammenhang der Effektivität mit der Aufklärung verglichen wurde, ist in [Abbildung 5.8](#) die **Aufklärung mit dem Interesse** verglichen. Aus der Projizierung der Frage 23. *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 24. *Mich interessiert die Heizungs- und Lüftungsanlage in meiner Wohnung ...* soll hervorgehen, ob die schlechte Aufklärung damit zu tun hat, dass kein Interesse an dem Thema Heizung besteht. Es ist eine eindeutige Tendenz zu sehen, dass die Informierung über das Lüftungskonzept von dem Interesse der Heizungsanlage abhängt.

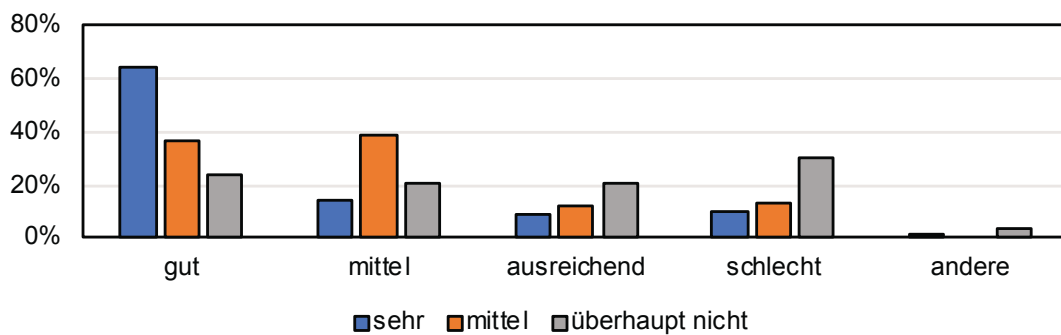


Abbildung 5.8: Relative Projizierung der Frage 23: *Ich finde ich bin ... informiert über das Lüftungskonzept in meiner Wohnung und wie/ob ich mit dem Fenster lüften sollte* auf die Frage 24: *Mich interessiert die Heizungs- und Lüftungsanlage in meiner Wohnung ...*

In den folgenden Abbildungen wird der **Einfluss des Wäschetrocknens in der Wohnung auf das Lüftungsverhalten** dargestellt. Aus den Ergebnissen aus Kapitel 5 setzt Wäschetrocknen in der Wohnung eine sehr große Menge an Feuchtigkeit in der Luft frei, was selbst bei Häusern mit kontrollierter Wohnraumlüftung nur mit häufigem Lüften durch das Fenster auszugleichen ist.

In der Abbildung 5.9 ist mit der Projizierung der Frage 17: *Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet* auf die Frage 3: *Ich wohne momentan als* der **Zusammenhang des Wäschetrocknens mit der Wohnungssituation** dargestellt. Die freie Antwortmöglichkeit ist in der Grafik als *andere* dargestellt. Diese Möglichkeit wurde meist von jüngeren Teilnehmern genutzt, um anzugeben, dass sie bei ihren Eltern wohnen. Aus der Grafik geht hervor, dass tendenziell die Wäsche öfters in Mietwohnungen getrocknet wird. Eigentümer, wie auch die hier unter *andere* gegliederte Mitbewohner trocknen die Wäsche vergleichsweise weniger in der Wohnung.

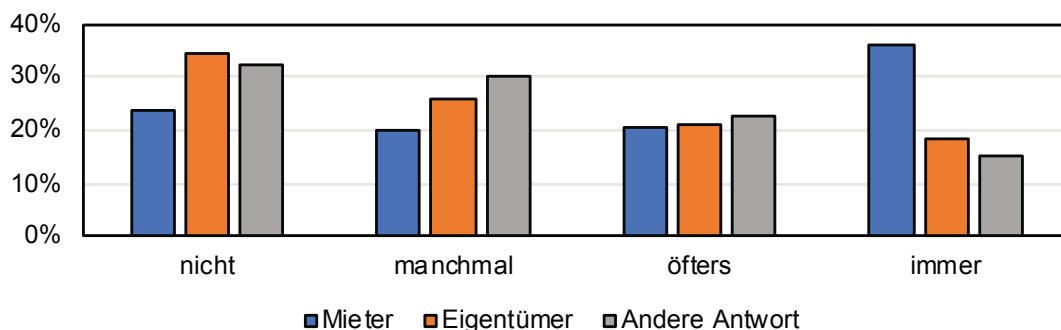


Abbildung 5.9: Relative Projizierung der Frage 17: *Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet* auf die Frage 3: *Ich wohne momentan als*:

In der **Abbildung 5.10** ist der relative Vergleich der *Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet* auf die *Frage 12: Ich schlafe in der Übergangszeit mit dem Fenster...* dargestellt. Hier wird der **Zusammenhang der Häufigkeit des Wäschetrocknens mit der bevorzugten Fensterstellung beim Schlafen** verglichen. Tendenziell schlafen die Teilnehmer, die ihre Wäsche in der Wohnung trocknen eher mit geschlossenem Fenster, während die Teilnehmer, die ein offenes Fenster zum Schlafen bevorzugen, tendenziell die Wäsche weniger in der Wohnung trocknen.

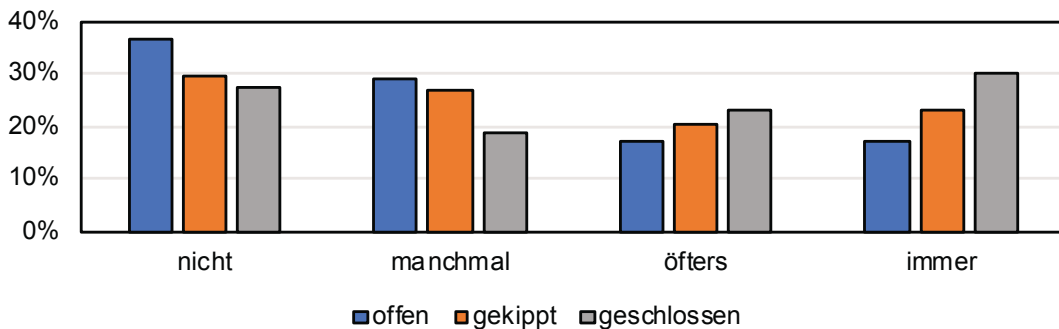


Abbildung 5.10: Relative Projektion der *Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet* auf die *Frage 12: Ich schlafe in der Übergangszeit mit dem Fenster...*

Um einen **Einfluss des Wäschetrocknens auf die Lüftungshäufigkeit** festzustellen ist in **Abbildung 5.11** die Projektion der *Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet* auf die *Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster* dargestellt. Es ist jedoch kein eindeutiger Einfluss auf die Lüftungshäufigkeit festzustellen. Der größte Anteil der Teilnehmer (ca. 30 %), die angegeben haben gar nicht selbst zu lüften trocknen ihre Wäsche immer in der Wohnung.

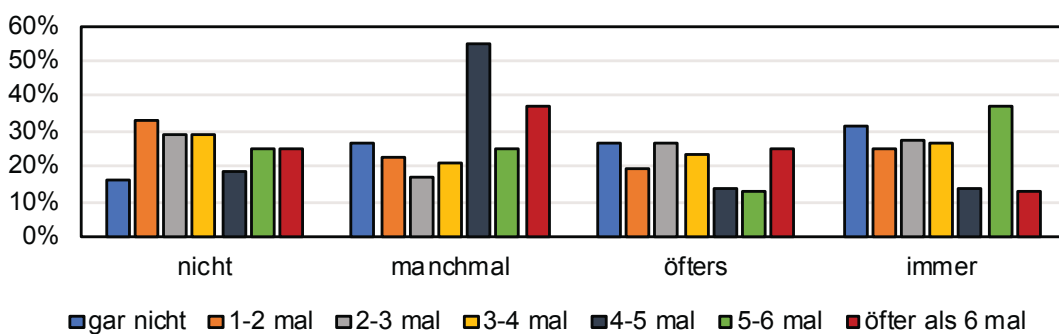


Abbildung 5.11: Relative Projektion der *Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet* auf die *Frage 16: Ich selbst lüfte am Tag ca. ... mal manuell mit dem Fenster.*

Der **Zusammenhang vom Trocknen der Wäsche in der Wohnung mit der Zufriedenheit über das Lüftungskonzept** ist in der **Abbildung 5.12** mit der Projektion der

Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet auf die Frage 25: Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ... dargestellt. Ein allgemeiner Zusammenhang lässt sich nicht erkennen. Jedoch ist festzustellen, dass die Einschätzung darüber, ob die Lüftungsvariante zeitgemäß sei, mit häufigerem Trocknen eher abnimmt. Es muss jedoch beachtet werden, dass die prozentuale Bewertung der Antwortmöglichkeit *nicht zeitgemäß* nur auf absolut 12 Teilnehmer beruht und daher nicht repräsentativ ist.

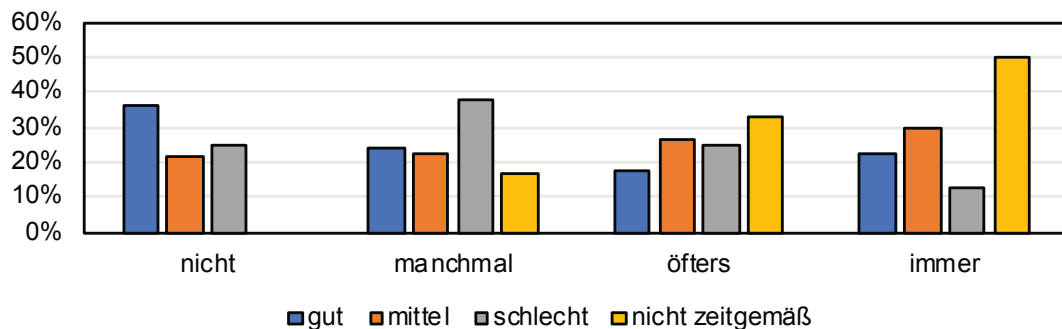


Abbildung 5.12: relative Projizierung der Frage 17: Die Wäsche wird bei mir ... in der Wohnung getrocknet auf die Frage 25: Ich finde die aktuelle Art in meiner Wohnung zu lüften ...

Die Auswertung der Umfrage zeigt keinen direkten Zusammenhang der Lüftungshäufigkeit mit der Häufigkeit des Schimmelbefalls. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es unter anderem daran liegt, dass das Lüftungsverhalten durch den Befall angepasst wurde. Um einen Zusammenhang festzustellen müsste gefragt werden, wie das Lüftungsverhalten vor dem Befall war. Ein **Zusammenhang der Häufigkeit des Schimmelbefalls mit dem Alter der Bewohner** ist jedoch festzustellen. Dieser ist in der [Abbildung 5.13](#) mit der Projizierung der Frage 22: Ich hatte ... Probleme mit Schimmel in meiner Wohnung. auf die Frage 2: Ich bin ... Jahre alt. dargestellt. Tendenziell hatten eher jüngere Bewohner schon einmal oder mehrmals Probleme mit Schimmel in der Wohnung.

Die Frage 26: **Ich würde meine Fenster an ein Smart Home System anschließen (per Smartphone oder Fernbedienung öffnen und schließen)** wurde offen gestellt, um einige Eindrücke der Teilnehmer zu dem Thema Smart Home zu gewinnen, ohne die Beeinflussung durch vorgefertigte Antwortmöglichkeiten. Durchschnittlich wurden ca. 6 Wörter als Antwort gegeben. Ungefähr ein Drittel der Befragten gaben an, für das Smart Home System zu sein, ungefähr ein Drittel brachte Gründe gegen das System an und ein Drittel äußerte sich nicht zur Frage. Eine Betrachtung beider Möglichkeiten und Unsicherheit in der Entscheidung gab es nur selten. Da eine Auswertung aller Antworten zu unübersichtlich werden würde, werden nachfolgend die häufigsten und die wichtigsten Gründe für die Antworten aufgeführt:

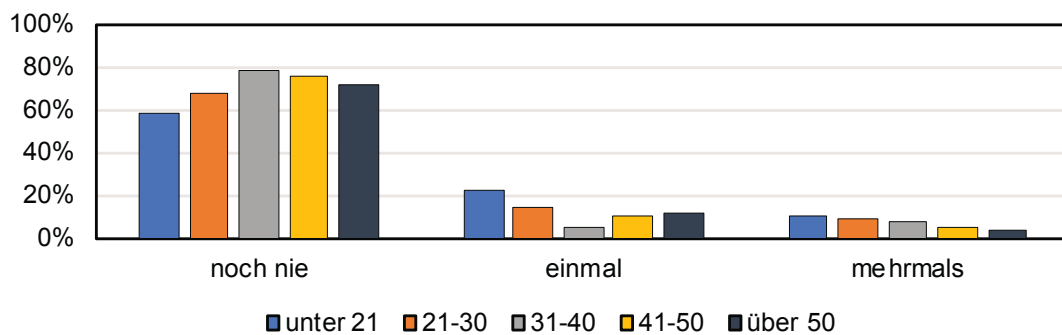


Abbildung 5.13: Relative Projizierung der Frage 22: *Ich hatte ... Probleme mit Schimmel in meiner Wohnung* auf die Frage 2: *Ich bin ... Jahre alt*.

Begründungen für das Smart Home System:

- Optimierung der Lüftung
- Rolladen und Fenster gleichzeitig schließen
- Bequemlichkeit
- Coolness Faktor
- Lüften von unterwegs
- Automatische Schließung bei Regen
- Erinnerung an offene Fenster
- Fernbedienung
- Zusammenspiel mit smarter Heizung
- Stoßlüften vor dem Aufstehen
- Gedankenaufwand wird minimiert
- Zeitgemäßes Denken
- Kein Auskühlen der Wände
- Luftqualitätsgesteuerte Lüftung

Bei den Antworten für das Smart Home System fällt allgemein auf, dass von den Teilnehmern schon viele Gedanken zum Thema Lüftung und Problemen mit der Fensterlüftung gemacht worden sind. Bequemlichkeit wurde nur selten als Grund angegeben. Die meisten Kommentare beziehen sich auf die Verbesserung der Luftqualität und der Behaglichkeit. Die Teilnehmer scheinen sich bewusst zu sein, dass sie selbst oft nicht optimal lüften und Verbesserungspotential besteht.

Begründungen gegen das Smart Home System:

- fehlende Sicherheit (Hacker, Stromausfall, Umgebung)
- Zusätzlicher Stromverbrauch
- In Besitz einer Lüftungsanlage
- Zu umständlich
- Zusätzliche Kosten
- Verkomplizierung
- Umrüstaufwand
- Anfallende Daten
- Fehlende Spontanität
- Laut Mietvertrag verboten
- Störanfällig
- Gewohnheit
- Probleme mit bestehendem Smart Home System
- Gefühl für die Lüftung und Raumluftqualität geht verloren

Die Antworten gegen das Smart Home System fallen, verglichen mit denen für das System, sehr pauschal aus. Es wird oft der zusätzliche Energieaufwand oder zu hohe Kosten erwähnt. Meist wird aber eine grundlegende Ablehnung gegenüber der Digitalisierung deutlich, die sich teils auf verschiedenste schlechte Erfahrungen mit bestehenden Smart Home Systemen oder fehlende Sicherheit stützt.

Mit der *Frage 27: **Ich hätte gerne eine kontrollierte Wohnraumlüftung** in meiner Wohnung* wurde versucht, die allgemeine Meinung zum Thema kontrollierte Wohnraumlüftung besser einschätzen zu können. Leider konnten viele Teilnehmer mit dem Begriff nichts anfangen. Zudem wurde die Frage oft falsch interpretiert und davon ausgegangen, dass sie aufbauend zur Frage 26 gestellt wurde und an die Fester angeschlossen wird. Folglich kann so keine Aussage getroffen werden. Bei mehreren Antworten wurde jedoch die Hygiene und Haltbarkeit der Systeme kritisiert. Als häufigster Vorteil wurde die Aufwandserleichterung genannt.

6 Abschließende Bemerkungen

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus bauphysikalischen und hygienischen Gründen ist eine Lüftung in Wohnhäusern notwendig. Werden die anfallenden Feuchtelasten auf Dauer nicht abgeführt, entsteht Feuchtigkeit und es bildet sich Schimmel.

Die Fensterlüftung ist in allen Häusern verfügbar und vielfältig einsetzbar. Jedoch steht die Fensterlüftung durch den direkten Austausch der Außenluft im Widerspruch zu den aktuellen Energieeinsparmaßnahmen. Da die Fenster trotz moderner Lüftungsanlagen die beliebteste Lüftungsvariante sind und wenigstens als Spitzenlast-Lüftung auch weiterhin bleiben werden, muss die Fensterlüftung so effektiv wie möglich gestaltet werden.

Um eine Lüftungsvariante hinsichtlich ihrer hygienischen und energetischen Effektivität zu betrachten, wird der Anteil des energetisch und hygienisch wirksamen Luftwechsels bewertet. Grundsätzlich ist das kürzere Stoßlüften durch möglichst große Querschnitte die effektivste Variante Feuchtelasten bei geringem Energieverlust abzuführen. Jedoch wird, je größer die Öffnungsfläche ist, die korrekte Lüftungszeit immer entscheidender. Unbedingt sollte in Heizzeiten zu langes Lüften vermieden werden, in denen die Umgebungsflächen unnötig auskühlen.

Da der effektive Energieverlust durch Fensterlüftung fast unmöglich exakt zu quantifizieren ist, besteht bei den Nutzern wenig Gefühl für den Verlust. Die Auswertung der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Umfrage an 372 Teilnehmern zeigt, dass für über 90 % der Befragten frische Luft in der Wohnung wichtig oder sehr wichtig ist. Ein eindeutiger Zusammenhang zu effektiverem Lüftungsverhalten zeigen jedoch nur knapp 40 % der Teilnehmer die angegeben haben, dass ihnen frische Luft sehr wichtig sei. Des Weiteren ist zu erkennen, dass ca. zwei Drittel der Teilnehmer mit dem aktuellen Konzept der Fensterlüftung zufrieden sind und außerdem die Lüftungshäufigkeit mit steigender Zufriedenheit zunimmt.

6.2 Weiterführende Gedanken

Angrenzend an die Berechnung aus **Kapitel 3** könnten noch mehrere äußere Faktoren in die Berechnung mit einfließen, um genauere Aussagen über den Energieverlust und die hygienische Wirksamkeit treffen zu können. So wäre der wohl wichtigste Einfluss der des Windes. Jedoch ist zu beachten, dass hierdurch alle Ergebnisse orts-, höhen- und wetterbezogen werden.

Des Weiteren könnte die Luftqualität und die Feuchte über die Zeit aufgezeichnet oder berechnet werden, um eine Aussage zur richtigen Lüftungshäufigkeit treffen zu können. Hier könnten verschiedene Szenarien bei Anwesenheit mehrerer Personen, Wäschetrocknen oder Pflanzen simuliert und eine Empfehlung zur Lüftungshäufigkeit je Szenario getroffen werden.

Außerdem ist im Rahmen der Arbeit nur der Heizfall betrachtet. Die Berechnung könnte auf die sommerliche Nachtabkühlung abgewandelt werden. Hier wäre auch der Vergleich verschiedener Szenarien interessant (zum Beispiel ein Vergleich der hygienischen und energetischen Effektivität eines nachts gekippten Fensters und morgendlichem Stoßlüften).

Bezogen auf die Umfrage könnte eine darauf aufbauende Umfrage genauer auf die Behaglichkeit eingehen und Fragen zur Kontrolle über die Lüftung stellen. Zudem könnte die Bewertung der vorhandenen Lüftung und Lüftungsweise genauer ausfallen, um die Zufriedenheit und das damit verbundene Lüftungsverhalten genauer einschätzen zu können.

Aufbauend auf die Ergebnisse der Bachelorarbeit könnte die Fensterlüftung optimiert werden. Es wären CO_2 - oder Feuchtwarnsysteme zum Beispiel in Form einer Ampel denkbar, um den Nutzer besser zu informieren. Um die energetische Effektivität zu verbessern und Auskühlen zu vermeiden, wären automatische Fensterschließer denkbar. Diese schränken das Lüftungsverhalten nicht ein, vermeiden jedoch zu langes Lüften und sparen so Energie.

Literaturverzeichnis

Normen

- [6] DIN 1946-6. *Raumlufttechnik Teil 6: Lüftung von Wohnungen Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2017 (Zitiert auf den Seiten 2, 9, 10).
- [7] DIN 4701-1. *Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden - Grundlagen der Berechnung*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 1983 (Zitiert auf Seite 2).
- [8] DIN 4108-2. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2013 (Zitiert auf Seite 2).
- [9] EnEV 2014. *Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, vom 18. November 2013*. Bundesbauministerium, www.bmvbs.de, 2014 (Zitiert auf Seite 2).
- [11] DIN EN 15242. *Lüftung von Gebäuden - Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2007 (Zitiert auf Seite 3).
- [13] DIN EN 15251. *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden, Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2007 (Zitiert auf Seite 5).
- [14] DIN EN ISO 7730. *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2006 (Zitiert auf den Seiten 5–8).
- [16] DIN EN ISO 9920. *Ergonomie der thermischen Umgebung Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2007 (Zitiert auf Seite 6).

- [20] Standard 55. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE Standing Standard Project Committee 55, 2017 (Zitiert auf Seite 8).
- [29] VDI 2078. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG). 2015 (Zitiert auf den Seiten 20–22).
- [55] VDI 2078. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG). 2015.

Dissertationen

- [2] Dipl.-Ing. Ralf Gritzki. “Bestimmung der Effektivität nutzerbedingter Fensterlüftung mit Hilfe numerischer Simulationsverfahren”. 2001 (Zitiert auf den Seiten III, 4, 20, 23, 30).
- [3] Monika Hall. “Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern”. 2004 (Zitiert auf den Seiten III, 30).
- [4] Anton Maas. “Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung”. 1995 (Zitiert auf den Seiten III, 17, 21–25, 30).
- [5] Jens Oppermann. “Untersuchung der Sensitivität von Heizungs-/Lüftungsanlagen in Niedrigenergiehäusern”. 2003 (Zitiert auf den Seiten III, 1, 29).
- [22] Armin Bäumler. “Experimentelle Quantifizierung des thermisch induzierten Luftwechsels in Abhängigkeit von der Fensteröffnungsart sowie Beurteilung der Potentiale der Nachtlüftung”. 2016 (Zitiert auf Seite 8).
- [33] M.A.Sc. Ian Beausoleil-Morrison B.A.Sc. “The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation”. 2000.
- [34] Tobias Knopp. “Finite element simulation of buoyancy-driven turbulent flows”. 2003.
- [35] Wolfram Haupt. “Zur Simulation von auftriebsinduzierten Innenraumströmungen”. 2001.
- [36] Dipl.-Ing. Runa Tabea Hellwig. “Thermische Behaglichkeit - Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht”. 2005.

Andere Quellen

- [1] W. Richter; R. Gritzki; M. Rösler. ;J. Seifert. *Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht*. Abgerufen am 05.03.2020. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verl., 2003. URL: [https://wlb.ibs-bw.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/\\$DirectLink&sp=SOPAC00&sp=SAKSWB-IdNr373202512](https://wlb.ibs-bw.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/$DirectLink&sp=SOPAC00&sp=SAKSWB-IdNr373202512) (Zitiert auf den Seiten III, XI, 4, 5, 23–27, 29–31).
- [10] Schramek; Sprenger; Recknagel. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik* 76. Auflage. Deutsche Bauzeitschrift 24, 2013 (Zitiert auf den Seiten 2, 3, 6, 8, 9, 20).
- [12] G. Hauser; A. Maas. *Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten*. Deutsche Bauzeitschrift 24, 1992 (Zitiert auf Seite 3).
- [15] N. von Hahn. „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit - Ergebnisse einer Literaturstudie. Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz, 2007 (Zitiert auf Seite 6).
- [17] M. Fountain; Richard de Dear. *Field Experiments on Occupant Comfort and Office Thermal Environments in a Hot-Humid Climate*. Indoor Environmental Quality (IEQ), Center for the Built Environment, Center for Environmental Design Research, UC Berkeley, 1994 (Zitiert auf Seite 7).
- [18] ;S. Brasche; W. Bischof R. Hellwig. *Thermischer Komfort - die extraphysikalischen Aspekte*. Fraunhofer IBP, 2007 (Zitiert auf Seite 7).
- [19] W. Richter. *Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Sommerlicher Kühlbetrieb*. baua: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2007 (Zitiert auf Seite 7).
- [21] J.Fergus Nicol; Kathryn J McCartney; Michael A Humphreys; Iftikhar A Raja. *Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings*. Elsevier B.V., 2001 (Zitiert auf Seite 8).
- [23] Amirhosein Ghaffarianhoseini; Husam AiWaer; Hossein Omrany; Ali Ghaffarianhoseini; Chaham Alalouch; Derek Clements-Croome; John Tookey. *Sick building syndrome: are we doing enough?* Taylor & Francis, 2018 (Zitiert auf Seite 9).
- [24] Adrian & Bill Bordass & Leaman. *Productivity in buildings: The 'killer' variables*. EcoLibrium, 2005 (Zitiert auf Seite 9).
- [25] Yujiao Chen; Zheming Tong; Holly Samuelson ; Wentao Wu; Ali Malkawi. *Realizing natural ventilation potential through window control: The impact of occupant behavior*. ScienceDirect, 2018 (Zitiert auf Seite 9).

- [26] Bundesamt für Gesundheit. *Vorsicht Schimmel - Eine Wegleitung zu Feuchtigkeitsproblemen und Schimmel in Wohnräumen*. Bundesamt für Gesundheit, 2009 (Zitiert auf den Seiten 13, 14).
- [27] Wolfgang Mücke. *Schimmelpilze: Vorkommen, Gesundheitsgefahren, Schutzmaßnahmen*. Ecomed MEDIZIN, 2004 (Zitiert auf Seite 14).
- [28] de.statista.com. *Schimmel in Wohnräumen*. Abgerufen am 27.06.2020. de.statista.com; Primärquelle: Immowelt (Schweiz), 2019. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/961116/umfrage/umfrage-zu-schimmelbefall-in-der-wohnung-in-der-schweiz/> (Zitiert auf den Seiten 14, 15).
- [30] Mats Etheridge David; Sandberg. *Building Ventilation: Theory and Measurement*. wiley, 1996 (Zitiert auf Seite 22).
- [31] www.dwd.de. *Testreferenzjahr Nürnberg 2015*. de.statista.com; Primärquelle: Immowelt (Schweiz), 2019 (Zitiert auf Seite 28).
- [32] wetter.de. *Klima für Nürnberg*. Abgerufen am 27.05.2020. wetter.de, 2020. URL: <https://www.wetter.de/klima/europa/deutschland/nuernberg-s107630.html> (Zitiert auf Seite 28).
- [37] Moon Keun Kim; Christopher Barber; Jelena Srebric. *Traffic noise level predictions for buildings with windows opened for natural ventilation in urban environments, Science and Technology for the Built Environment*. Abgerufen am 10.03.2020. Taylor & Francis©, 2017. URL: <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1262708>.
- [38] M. MUSY; E. WURTZ; J.M NATAF. *Ventilation and cooling*. 18 TH ANNUAL APVC CONFERENCE ATHENS, GREECE, 23-26 SEPTEMBER, 1997.
- [39] K. Fitzner; U. Finke. *Lüftungsregeln für freie Lüftung*. baua: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 1997.
- [40] Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Richter. *Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Sommerlicher Kühlbetrieb*. baua: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2007.
- [41] Dominik Surek; Silke Stempin. *Technische Strömungsmechanik: Für Studium, Examen und Praxis*. © Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [42] Martin W Liddament. *Energy-Efficient Ventilation of Large Enclosures*. IEA Energy Conservation In Buildings & Community Systems Programme. (ECBCS), 1998.
- [43] Dipl. Phys. Oliver Kah; Dipl.-Ing. Søren Pepe; r Dr. Witta Ebel; Dr. Berthold Kaufmann; Prof. Dr. Wolfgang Feist; Dipl.-Ing. Zeno Bastian. *Untersuchung zum Außenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung*. Advanced Housing Renovation with Solar & Conservation' der Internationalen Energie Agentur, IEA, 2010.

- [44] Yuguo Li; Laszlo Fuchs; Sture Holmberg. *METHODS FOR PREDICTING AIR CHANGE EFFICIENCY*. Department of Gasdynamics Royal Institute of Technology in Sweden.
- [45] Per Heiselberg; Shuzo Murakami; Claude-Alain Roulet. *Ventilation of Large Spaces in Buildings: Analysis and Prediction Techniques*. IEA: Energy Conservation in Buildings and Community Systems Annex 26: Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures, 1998.
- [46] Anna Heeboll; Pawel Wargocki; Jorn Toftum. *Window and door opening behaviour, carbon dioxide concentration, temperature, and energy use during the heating season in classrooms with different ventilation retrofits*. Abgerufen am 10.03.2020. Taylor & Francis©, 2017. URL: <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1432938>.
- [47] Behrang Chenari; João Dias Carrilho; Gustavo Botte; Manuel Gameiro da Silva. *Towards Energy-Efficient Ventilation in Buildings: Development of the Smart Window Ventilation System*. Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 6, November, 2016.
- [48] Dipl.-Ing. Norbert Nadler. *Bemessung lüftungstechnischer Komponenten nach DIN 1946-6*. C.A.T.S. Software GmbH, 2011.
- [49] Per Heiselberg. *Characteristics of Air Flow through Windows*. Aalborg University Denmark, 1999.
- [50] Yue Zhang¹; Xiaofeng Li; Pok L. Cheng. *Optimal window opening based on natural ventilation measurements*. Tsinghua University Dept. Of Building Science, School of Architecture, Tsinghua University Beijing, 100084, China.
- [51] Florian Antretter; Christine Mayer; Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Wellisch. *An approach for a statistical model for the user behaviour regarding window ventilation in residential buildings*. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011.
- [52] Dipl.-Ing. D. Schmidt; Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Hauser. *Meßtechnische und theoretische Untersuchungen zum Luftaustausch in Gebäuden*. Universität Gesamthochschule Kassel, 1998.
- [53] P R Warren. *Ventilation Through Openings on One Wall Only*. International Conference on Heat and Mass Transfer in Buildings, 1977.
- [54] Monika Hall; Achim Geißler. *Anforderungen an die Gebäudedichtheit und den Dichtheits-Nachweis im Rahmen der EnEV*. Bauphysik 24 (2002), H. 4, S. 240-242, eb (2002) H. 4, S. 56-59, 2002.

- [56] Monika Bullinger-Naber; Boris Kruppa; Bernd Hans Müller; RUDolf Schwab Wolfgang Bischof. *Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden*. Fraunhofer IRB Verlag, 2004.

7 Anhang

Lüftungsvariante: ein Fenster gekippt					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 1					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	10	20	0	20
Uhrzeit 2	15	10	20	0	20
Uhrzeit 3	22	10	20	0	20
Uhrzeit 4	0	0	0	0	0
Uhrzeit 5	0	0	0	0	0
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	0,13	0,17	0,00	0,16
Uhrzeit 2	15	0,12	0,07	0,00	0,07
Uhrzeit 3	22	0,13	0,14	0,00	0,14
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Durchschnitt am Tag:		0,02	0,02	0,00	0,02
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	7,96	8,08	0,00	7,22
Uhrzeit 2	15	5,93	2,64	0,00	2,81
Uhrzeit 3	22	7,42	6,03	0,00	5,92
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe:		21,31	16,75	0,00	15,94

Tabelle 7.1: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster gekippt

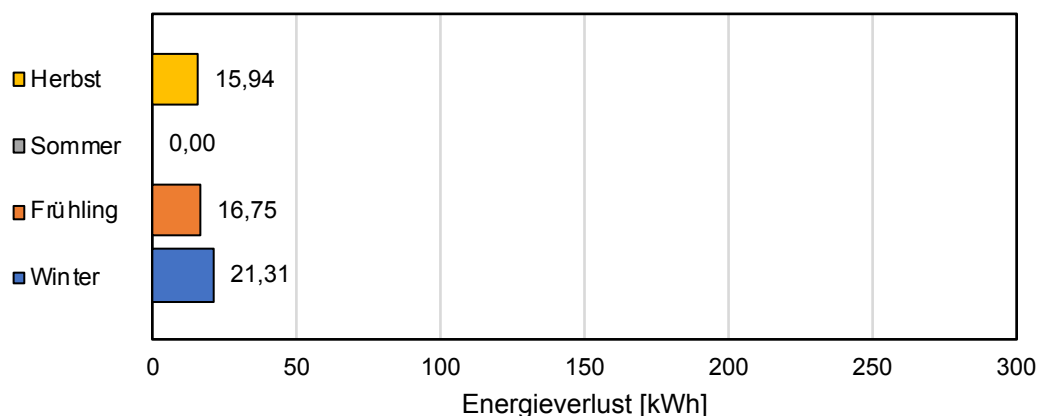


Abbildung 7.1: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster gekippt

Lüftungsvariante: ein Fenster halb geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 1					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	10	20	0	20
Uhrzeit 2	15	10	20	0	20
Uhrzeit 3	22	10	20	0	20
Uhrzeit 4	0	0	0	0	0
Uhrzeit 5	0	0	0	0	0
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,40	1,67	0,00	1,60
Uhrzeit 2	15	1,27	0,69	0,00	0,69
Uhrzeit 3	22	1,37	1,41	0,00	1,40
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Durchschnitt am Tag:		0,17	0,16	0,00	0,15
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	48,69	48,58	0,00	43,59
Uhrzeit 2	15	36,84	16,18	0,00	17,15
Uhrzeit 3	22	45,55	36,65	0,00	35,97
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe:		131,07	101,41	0,00	96,71

Tabelle 7.2: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster halb geöffnet

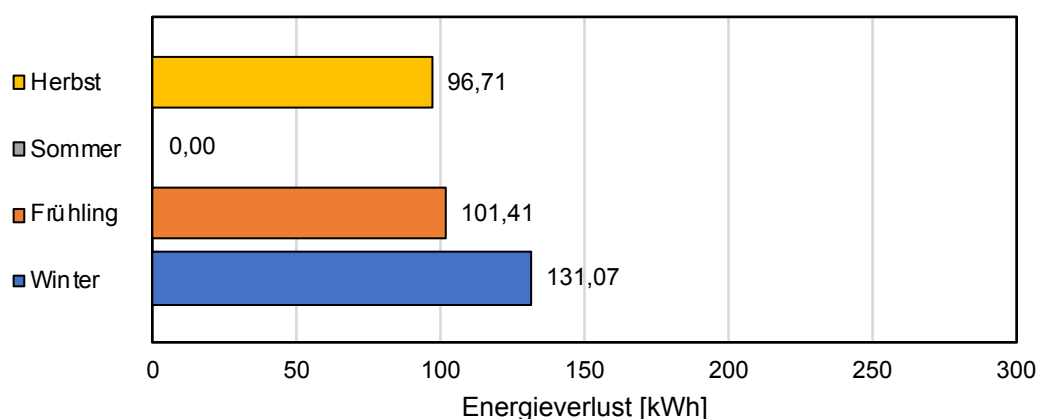


Abbildung 7.2: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster halb geöffnet

Lüftungsvariante: ein Fenster geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 1					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	10	20	0	20
Uhrzeit 2	15	10	20	0	20
Uhrzeit 3	22	10	20	0	20
Uhrzeit 4	0	0	0	0	0
Uhrzeit 5	0	0	0	0	0
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	2,09	2,45	0,00	2,34
Uhrzeit 2	15	1,89	1,01	0,00	1,02
Uhrzeit 3	22	2,05	2,07	0,00	2,06
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Durchschnitt am Tag:		0,25	0,23	0,00	0,23
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	60,24	59,62	0,00	53,56
Uhrzeit 2	15	45,74	19,95	0,00	21,12
Uhrzeit 3	22	56,41	45,09	0,00	44,26
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 7.3: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster geöffnet

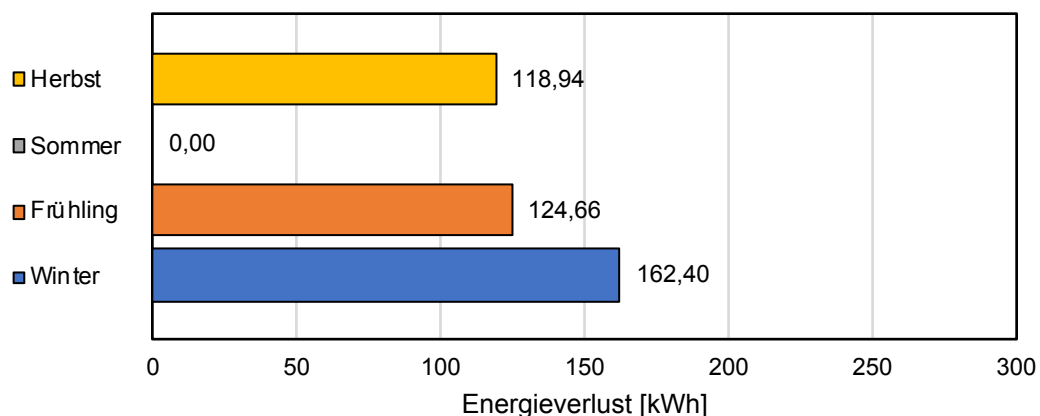


Abbildung 7.3: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei einem Fenster geöffnet

Lüftungsvariante: zwei Fenster gekippt					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 1					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	10	20	0	20
Uhrzeit 2	15	10	20	0	20
Uhrzeit 3	22	10	20	0	20
Uhrzeit 4	0	0	0	0	0
Uhrzeit 5	0	0	0	0	0
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	0,25	0,31	0,00	0,29
Uhrzeit 2	15	0,23	0,13	0,00	0,13
Uhrzeit 3	22	0,25	0,26	0,00	0,26
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Durchschnitt am Tag:		0,03	0,03	0,00	0,03
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	14,92	15,05	0,00	13,44
Uhrzeit 2	15	11,12	4,91	0,00	5,24
Uhrzeit 3	22	13,90	11,24	0,00	11,03
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe:		39,95	31,20	0,00	29,71

Tabelle 7.4: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern gekippt

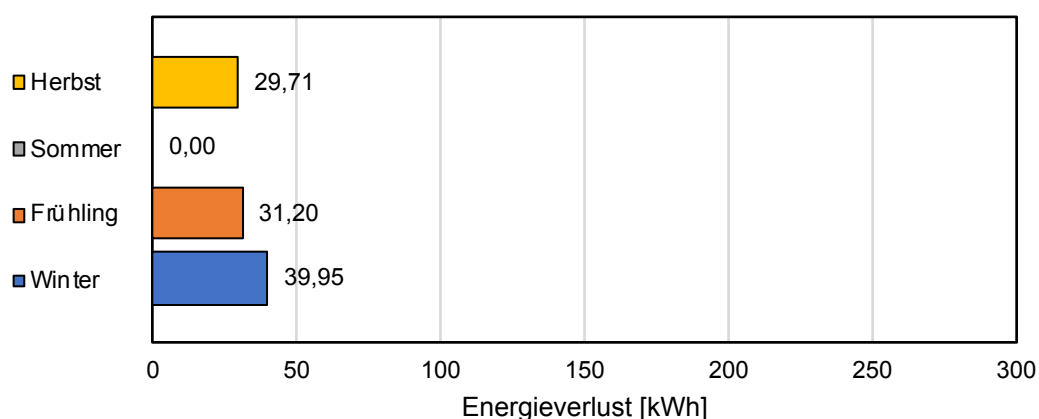


Abbildung 7.4: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern gekippt

Lüftungsvariante: zwei Fenster halb geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 1					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	10	20	0	20
Uhrzeit 2	15	10	20	0	20
Uhrzeit 3	22	10	20	0	20
Uhrzeit 4	0	0	0	0	0
Uhrzeit 5	0	0	0	0	0
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	2,40	2,79	0,00	2,66
Uhrzeit 2	15	2,17	1,15	0,00	1,15
Uhrzeit 3	22	2,35	2,36	0,00	2,34
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Durchschnitt am Tag:		0,29	0,26	0,00	0,26
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	68,99	67,87	0,00	61,00
Uhrzeit 2	15	52,46	22,76	0,00	24,08
Uhrzeit 3	22	64,63	51,38	0,00	50,43
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe:		186,07	142,00	0,00	135,51

Tabelle 7.5: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern halb geöffnet

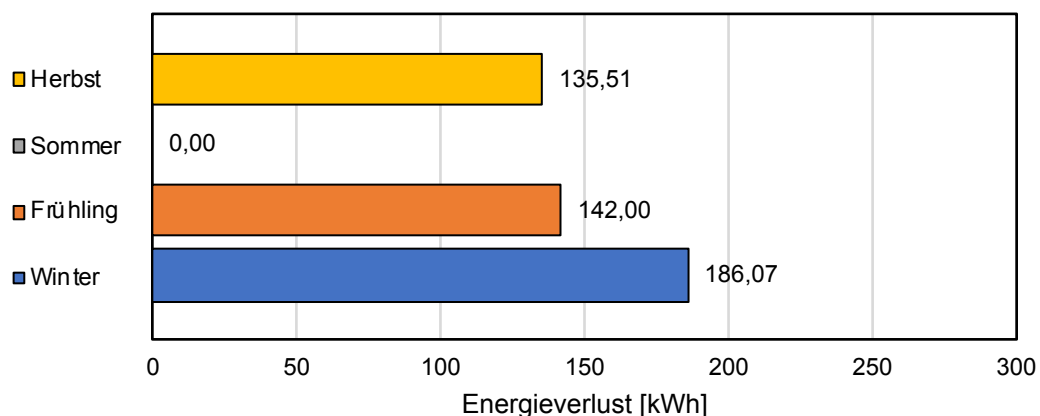


Abbildung 7.5: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern halb geöffnet

Lüftungsvariante: zwei Fenster geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 1					
	Uhrzeit	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	10	20	0	20
Uhrzeit 2	15	10	20	0	20
Uhrzeit 3	22	10	20	0	20
Uhrzeit 4	0	0	0	0	0
Uhrzeit 5	0	0	0	0	0
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
	Uhrzeit	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	3,79	4,29	0,00	4,10
Uhrzeit 2	15	3,43	1,77	0,00	1,78
Uhrzeit 3	22	3,71	3,63	0,00	3,60
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Durchschnitt am Tag:		0,46	0,40	0,00	0,40
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
	Uhrzeit	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	79,41	76,91	0,00	69,19
Uhrzeit 2	15	60,57	25,89	0,00	27,36
Uhrzeit 3	22	74,46	58,35	0,00	57,28
Uhrzeit 4	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Uhrzeit 5	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe:		214,44	161,16	0,00	153,84

Tabelle 7.6: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern geöffnet

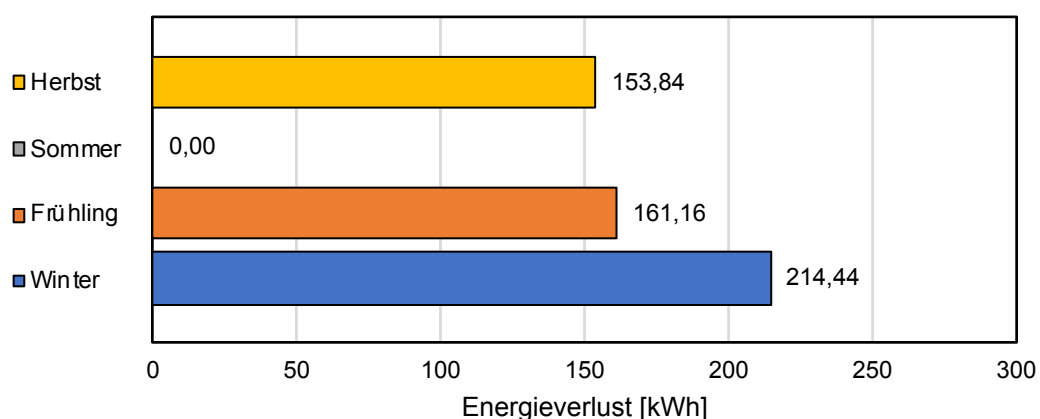


Abbildung 7.6: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 1 bei zwei Fenstern geöffnet

Lüftungsvariante: ein Fenster gekippt					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 2					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6	12	0	12
Uhrzeit 2	12	6	12	0	12
Uhrzeit 3	15	6	12	0	12
Uhrzeit 4	18	6	12	0	12
Uhrzeit 5	22	6	12	0	12
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	0,08	0,10	0,00	0,10
Uhrzeit 2	12	0,08	0,05	0,00	0,05
Uhrzeit 3	15	0,07	0,04	0,00	0,04
Uhrzeit 4	18	0,07	0,05	0,00	0,06
Uhrzeit 5	22	0,08	0,09	0,00	0,08
Durchschnitt am Tag:		0,02	0,01	0,00	0,01
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	4,83	4,87	0,00	4,35
Uhrzeit 2	12	3,96	2,09	0,00	2,07
Uhrzeit 3	15	3,60	1,59	0,00	1,70
Uhrzeit 4	18	4,00	1,84	0,00	2,42
Uhrzeit 5	22	4,50	3,64	0,00	3,57
Summe:		20,89	14,04	0,00	14,11

Tabelle 7.7: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster gekippt

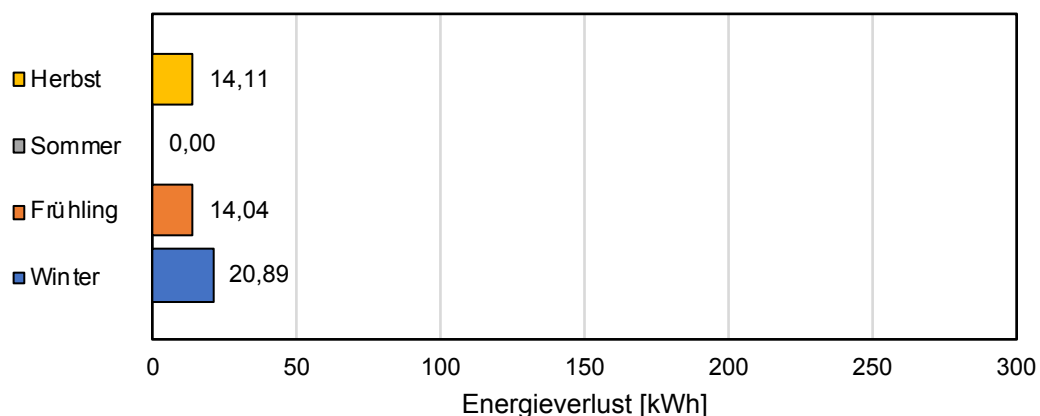


Abbildung 7.7: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster gekippt

Lüftungsvariante: ein Fenster halb geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 2					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6	12	0	12
Uhrzeit 2	12	6	12	0	12
Uhrzeit 3	15	6	12	0	12
Uhrzeit 4	18	6	12	0	12
Uhrzeit 5	22	6	12	0	12
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	0,89	1,03	0,00	0,99
Uhrzeit 2	12	0,84	0,54	0,00	0,50
Uhrzeit 3	15	0,81	0,43	0,00	0,43
Uhrzeit 4	18	0,84	0,49	0,00	0,60
Uhrzeit 5	22	0,87	0,87	0,00	0,87
Durchschnitt am Tag:		0,18	0,14	0,00	0,14
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	30,84	29,98	0,00	26,90
Uhrzeit 2	12	25,55	13,09	0,00	12,86
Uhrzeit 3	15	23,31	9,98	0,00	10,58
Uhrzeit 4	18	25,77	11,56	0,00	15,06
Uhrzeit 5	22	28,85	22,61	0,00	22,19
Summe:		134,32	87,21	0,00	87,59

Tabelle 7.8: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster halb geöffnet

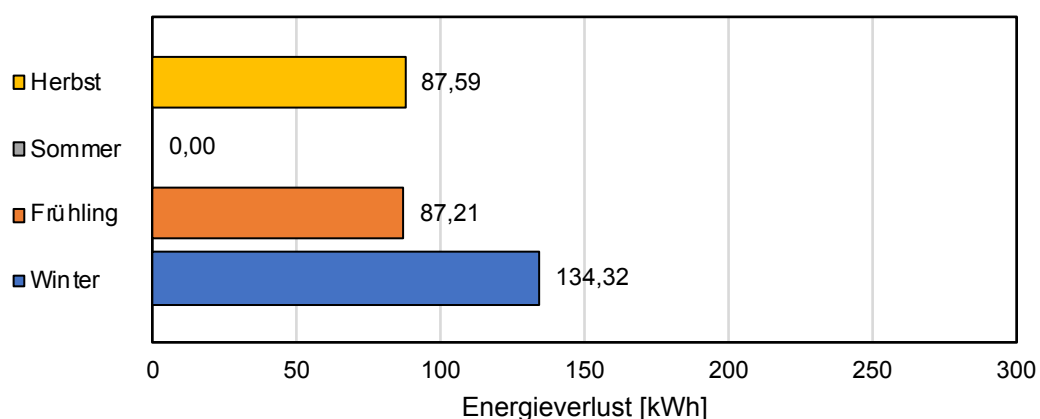


Abbildung 7.8: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster halb geöffnet

Lüftungsvariante: ein Fenster geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 2					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6	12	0	12
Uhrzeit 2	12	6	12	0	12
Uhrzeit 3	15	6	12	0	12
Uhrzeit 4	18	6	12	0	12
Uhrzeit 5	22	6	12	0	12
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,35	1,53	0,00	1,46
Uhrzeit 2	12	1,27	0,80	0,00	0,74
Uhrzeit 3	15	1,22	0,63	0,00	0,63
Uhrzeit 4	18	1,27	0,72	0,00	0,89
Uhrzeit 5	22	1,33	1,29	0,00	1,29
Durchschnitt am Tag:		0,27	0,21	0,00	0,21
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	38,72	37,09	0,00	33,32
Uhrzeit 2	12	32,16	16,26	0,00	15,95
Uhrzeit 3	15	29,37	12,40	0,00	13,13
Uhrzeit 4	18	32,44	14,37	0,00	18,69
Uhrzeit 5	22	36,25	28,04	0,00	27,53
Summe:		168,93	108,17	0,00	108,62

Tabelle 7.9: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster geöffnet

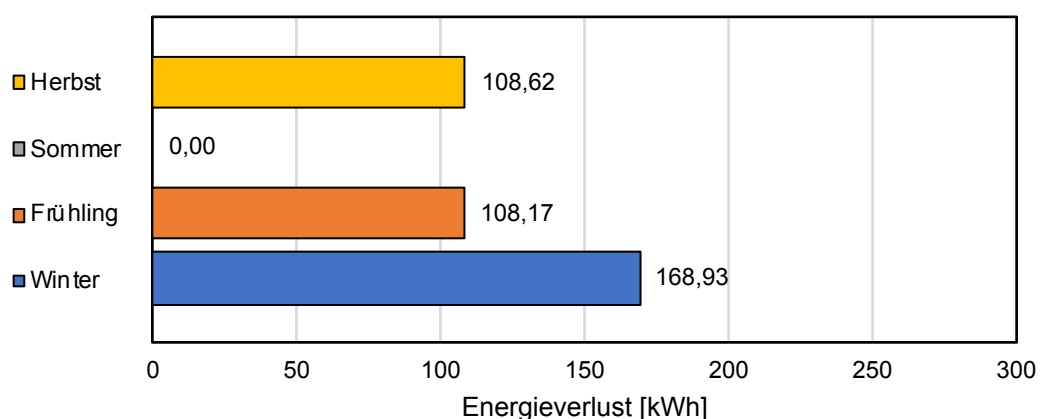


Abbildung 7.9: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei einem Fenster geöffnet

Lüftungsvariante: zwei Fenster gekippt					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 2					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6	12	0	12
Uhrzeit 2	12	6	12	0	12
Uhrzeit 3	15	6	12	0	12
Uhrzeit 4	18	6	12	0	12
Uhrzeit 5	22	6	12	0	12
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	0,15	0,19	0,00	0,18
Uhrzeit 2	12	0,14	0,10	0,00	0,09
Uhrzeit 3	15	0,14	0,08	0,00	0,08
Uhrzeit 4	18	0,14	0,09	0,00	0,11
Uhrzeit 5	22	0,15	0,16	0,00	0,16
Durchschnitt am Tag:		0,03	0,03	0,00	0,03
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	9,13	9,12	0,00	8,14
Uhrzeit 2	12	7,48	3,92	0,00	3,87
Uhrzeit 3	15	6,80	2,98	0,00	3,17
Uhrzeit 4	18	7,56	3,45	0,00	4,53
Uhrzeit 5	22	8,50	6,81	0,00	6,68
Summe:		39,47	26,27	0,00	26,40

Tabelle 7.10: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern gekippt

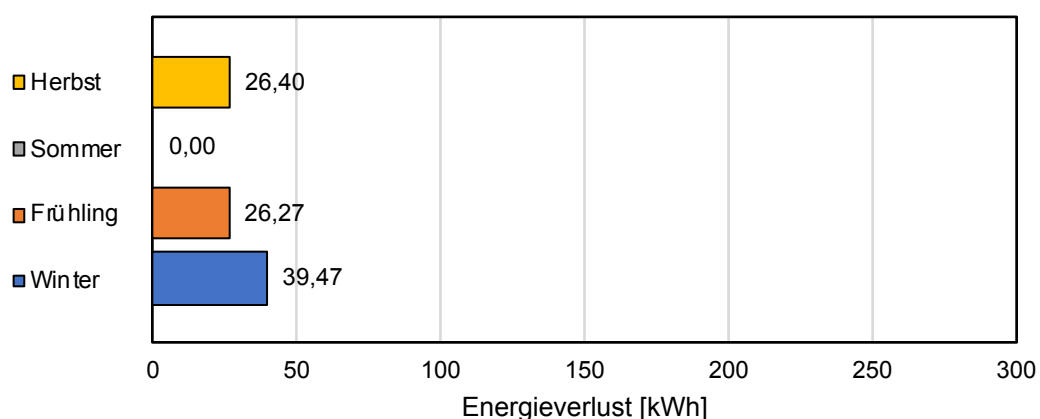


Abbildung 7.10: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern gekippt

Lüftungsvariante: zwei Fenster halb geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 2					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6	12	0	12
Uhrzeit 2	12	6	12	0	12
Uhrzeit 3	15	6	12	0	12
Uhrzeit 4	18	6	12	0	12
Uhrzeit 5	22	6	12	0	12
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,58	1,75	0,00	1,68
Uhrzeit 2	12	1,48	0,91	0,00	0,85
Uhrzeit 3	15	1,42	0,72	0,00	0,73
Uhrzeit 4	18	1,47	0,83	0,00	1,02
Uhrzeit 5	22	1,54	1,48	0,00	1,47
Durchschnitt am Tag:		0,31	0,24	0,00	0,24
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	44,74	42,44	0,00	38,14
Uhrzeit 2	12	37,19	18,63	0,00	18,27
Uhrzeit 3	15	33,98	14,22	0,00	15,05
Uhrzeit 4	18	37,51	16,47	0,00	21,41
Uhrzeit 5	22	41,90	32,11	0,00	31,52
Summe:		195,30	123,86	0,00	124,38

Tabelle 7.11: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern halb geöffnet

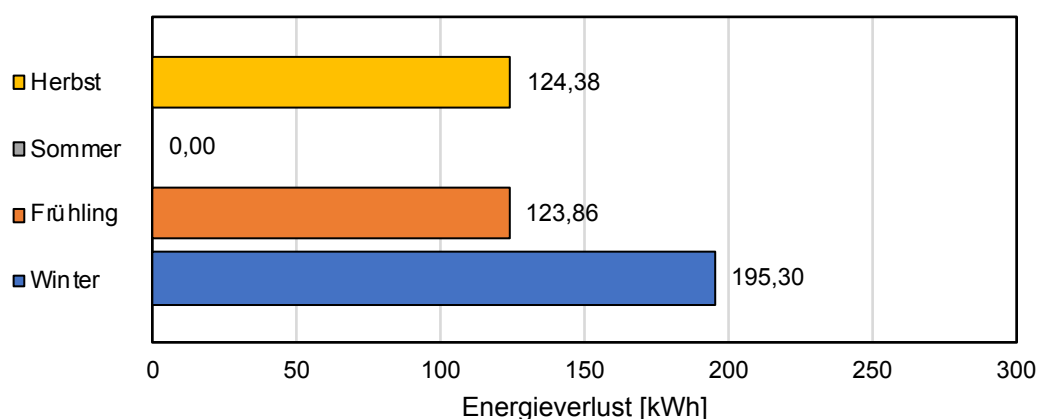


Abbildung 7.11: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern halb geöffnet

Lüftungsvariante: zwei Fenster geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 2					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6	12	0	12
Uhrzeit 2	12	6	12	0	12
Uhrzeit 3	15	6	12	0	12
Uhrzeit 4	18	6	12	0	12
Uhrzeit 5	22	6	12	0	12
Summe am Tag:		30	60	0	60
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	2,56	2,75	0,00	2,63
Uhrzeit 2	12	2,40	1,43	0,00	1,33
Uhrzeit 3	15	2,31	1,13	0,00	1,14
Uhrzeit 4	18	2,39	1,30	0,00	1,59
Uhrzeit 5	22	2,50	2,32	0,00	2,31
Durchschnitt am Tag:		0,51	0,37	0,00	0,37
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	52,63	48,73	0,00	43,83
Uhrzeit 2	12	43,84	21,46	0,00	21,02
Uhrzeit 3	15	40,09	16,39	0,00	17,32
Uhrzeit 4	18	44,21	18,98	0,00	24,64
Uhrzeit 5	22	49,33	36,95	0,00	36,27
Summe:		230,11	142,49	0,00	143,07

Tabelle 7.12: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern geöffnet

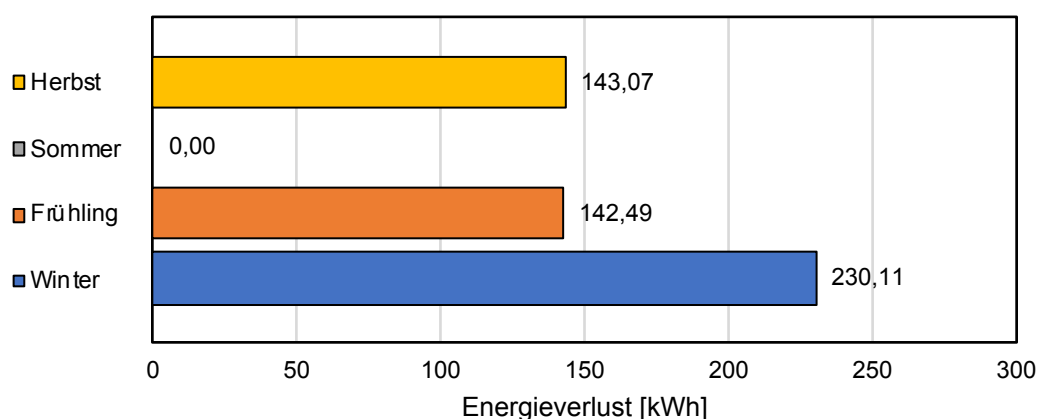


Abbildung 7.12: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 2 bei zwei Fenstern geöffnet

Lüftungsvariante: ein Fenster gekippt					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 3					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	77	121	0	126
Uhrzeit 2	12	81	230	0	249
Uhrzeit 3	15	84	290	0	290
Uhrzeit 4	18	81,5	252	0	206
Uhrzeit 5	22	78,5	142	0	143
Summe am Tag:		402	1035	0	1014
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 2	12	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 3	15	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 4	18	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 5	22	1,00	1,00	0,00	1,00
Durchschnitt am Tag:		0,21	0,21	0,00	0,21
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	60,42	48,55	0,00	45,14
Uhrzeit 2	12	52,10	39,61	0,00	42,37
Uhrzeit 3	15	49,10	37,94	0,00	40,45
Uhrzeit 4	18	52,94	38,25	0,00	40,99
Uhrzeit 5	22	57,38	42,51	0,00	42,02
Summe:		271,93	206,86	0,00	210,98

Tabelle 7.13: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster gekippt

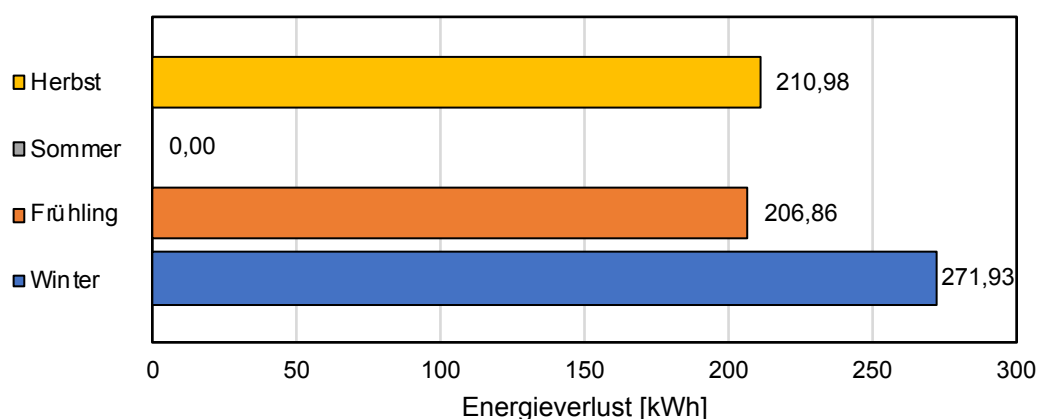


Abbildung 7.13: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster gekippt

Lüftungsvariante: ein Fenster halb geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 3					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	6,85	11,6	0	12,1
Uhrzeit 2	12	7,35	23,1	0	25
Uhrzeit 3	15	7,7	29,6	0	29,3
Uhrzeit 4	18	7,4	25,8	0	20,6
Uhrzeit 5	22	7	13,9	0	14
Summe am Tag:		36	104	0	101
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 2	12	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 3	15	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 4	18	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 5	22	1,00	1,00	0,00	1,00
Durchschnitt am Tag:		0,21	0,21	0,00	0,21
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	34,63	29,05	0,00	27,11
Uhrzeit 2	12	30,54	24,37	0,00	25,84
Uhrzeit 3	15	29,06	23,62	0,00	24,79
Uhrzeit 4	18	31,00	23,95	0,00	25,12
Uhrzeit 5	22	33,02	25,94	0,00	25,64
Summe:		158,26	126,94	0,00	128,48

Tabelle 7.14: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster halb geöffnet

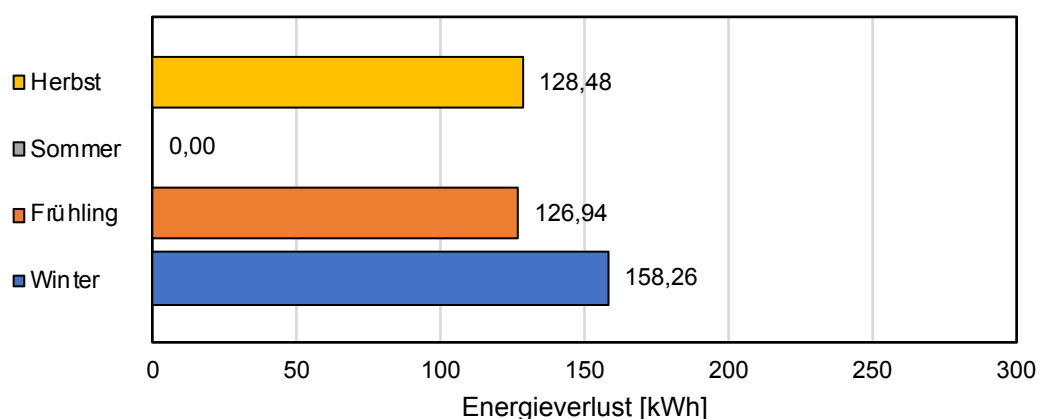


Abbildung 7.14: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster halb geöffnet

Lüftungsvariante: ein Fenster geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 3					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	4,05	7,4	0	7,8
Uhrzeit 2	12	4,4	15,4	0	16,6
Uhrzeit 3	15	4,65	19,8	0	19,7
Uhrzeit 4	18	4,45	17,2	0	13,7
Uhrzeit 5	22	4,2	9	0	9
Summe am Tag:		22	69	0	67
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 2	12	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 3	15	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 4	18	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 5	22	1,00	1,00	0,00	1,00
Durchschnitt am Tag:		0,21	0,21	0,00	0,21
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	28,23	24,14	0,00	22,69
Uhrzeit 2	12	24,99	20,46	0,00	21,53
Uhrzeit 3	15	23,85	19,76	0,00	20,82
Uhrzeit 4	18	25,44	20,05	0,00	21,10
Uhrzeit 5	22	27,18	21,65	0,00	21,25
Summe:		129,68	106,06	0,00	107,39

Tabelle 7.15: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster geöffnet

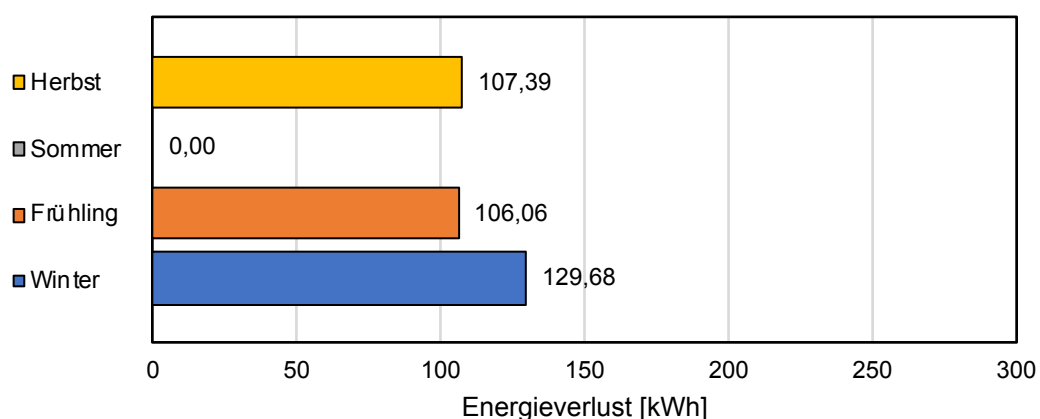


Abbildung 7.15: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei einem Fenster geöffnet

Lüftungsvariante: zwei Fenster gekippt					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 3					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	40,5	65,5	0	68,5
Uhrzeit 2	12	43	127	0	136
Uhrzeit 3	15	45	160	0	159
Uhrzeit 4	18	43,5	140	0	114
Uhrzeit 5	22	41,5	78	0	78
Summe am Tag:		214	571	0	556
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 2	12	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 3	15	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 4	18	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 5	22	1,00	1,00	0,00	1,00
Durchschnitt am Tag:		0,21	0,21	0,00	0,21
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	59,10	48,80	0,00	45,57
Uhrzeit 2	12	51,43	40,57	0,00	42,92
Uhrzeit 3	15	48,91	38,83	0,00	41,13
Uhrzeit 4	18	52,54	39,42	0,00	42,09
Uhrzeit 5	22	56,41	43,35	0,00	42,55
Summe:		268,39	210,96	0,00	214,25

Tabelle 7.16: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern gekippt

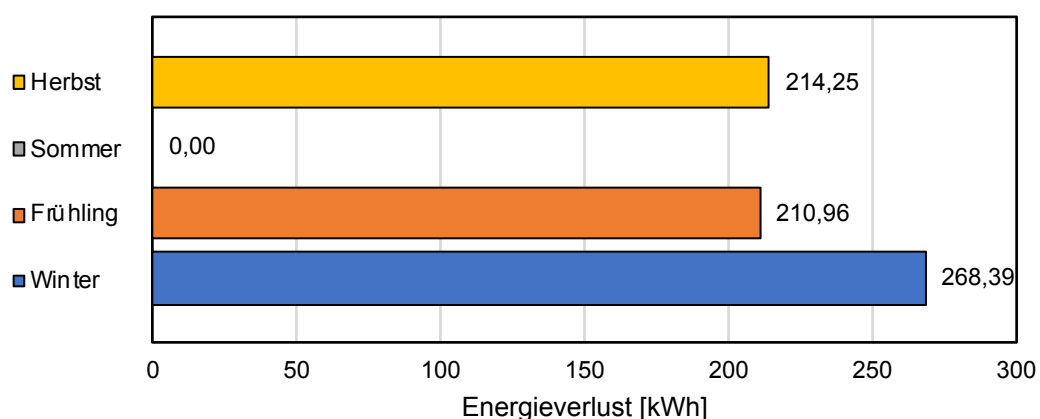


Abbildung 7.16: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern gekippt

Lüftungsvariante: zwei Fenster halb geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 3					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	3,2	6,15	0	6,5
Uhrzeit 2	12	3,55	13,3	0	14,5
Uhrzeit 3	15	3,75	17,2	0	17,2
Uhrzeit 4	18	3,55	14,8	0	11,8
Uhrzeit 5	22	3,3	7,6	0	7,6
Summe am Tag:		17	59	0	58
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 2	12	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 3	15	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 4	18	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 5	22	1,00	1,00	0,00	1,00
Durchschnitt am Tag:		0,21	0,21	0,00	0,21
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	27,76	23,85	0,00	22,42
Uhrzeit 2	12	24,81	20,44	0,00	21,69
Uhrzeit 3	15	23,58	19,77	0,00	20,92
Uhrzeit 4	18	25,03	19,93	0,00	21,08
Uhrzeit 5	22	26,55	21,52	0,00	21,12
Summe:		127,73	105,50	0,00	107,23

Tabelle 7.17: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern halb geöffnet

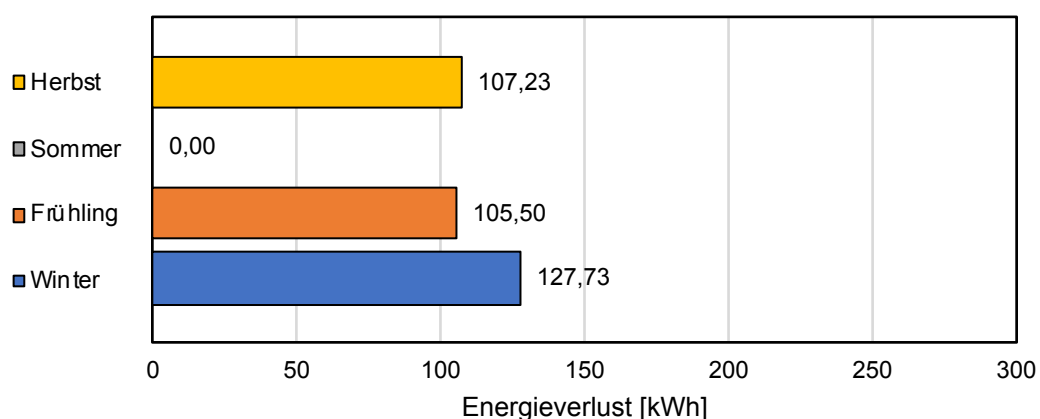


Abbildung 7.17: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern halb geöffnet

Lüftungsvariante: zwei Fenster geöffnet					
Tägliche Lüftungszeit [min] Plan 3					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,84	2,95	0	3,15
Uhrzeit 2	12	1,95	7,7	0	8,5
Uhrzeit 3	15	2,04	10,4	0	10,2
Uhrzeit 4	18	1,96	8,8	0	6,7
Uhrzeit 5	22	1,88	3,9	0	3,9
Summe am Tag:		10	34	0	32
Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 2	12	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 3	15	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 4	18	1,00	1,00	0,00	1,00
Uhrzeit 5	22	1,00	1,00	0,00	1,00
Durchschnitt am Tag:		0,21	0,21	0,00	0,21
Energetischer Wärmeverlust [kWh]					
Uhrzeit		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Uhrzeit 1	7	19,96	16,73	0,00	15,76
Uhrzeit 2	12	17,59	14,77	0,00	15,69
Uhrzeit 3	15	16,82	14,49	0,00	15,06
Uhrzeit 4	18	17,83	14,57	0,00	15,18
Uhrzeit 5	22	19,11	15,27	0,00	14,99
Summe:		91,32	75,83	0,00	76,69

Tabelle 7.18: Durchschnittlicher hygienischer Luftaustausch und energetischer Wärmeverlust bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern geöffnet

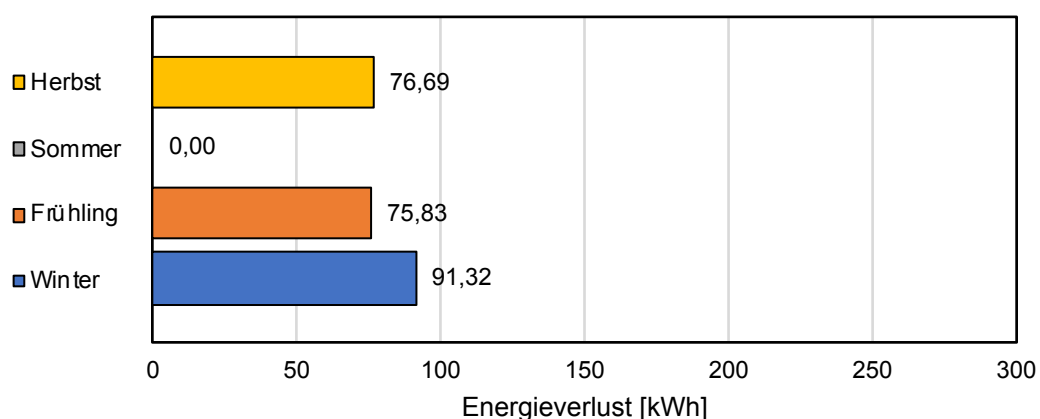


Abbildung 7.18: Jährlicher energetischer Wärmeverlust grafisch bei Lüftungsplan 3 bei zwei Fenstern geöffnet