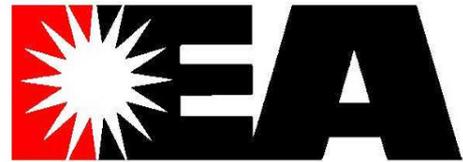


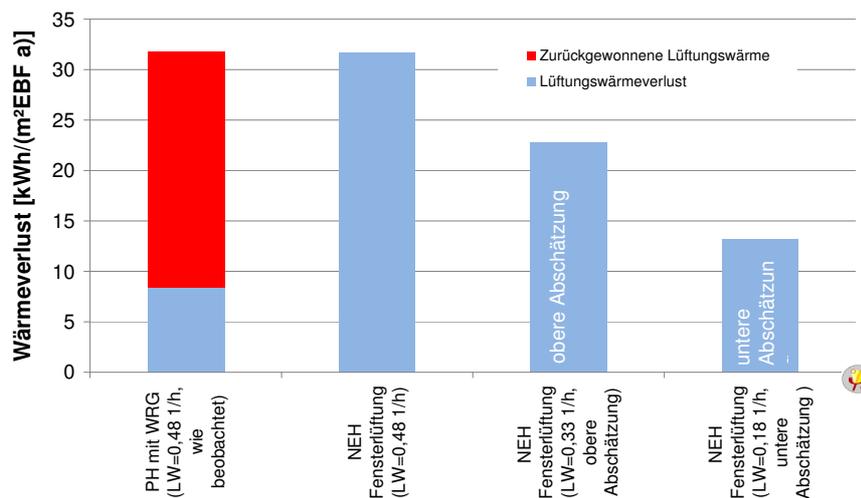


**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

**Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44-46
D64283 Darmstadt**



Untersuchung zum Außenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung



**Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen
Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Advanced Housing
Renovation with Solar & Conservation' der
Internationalen Energie Agentur, IEA:**

IEA SHC Task 37

Projekttitle: Energieeffiziente und solare Sanierung von Wohngebäuden

**gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi
vertreten durch den Projektträger BEO Forschungszentrum Jülich GmbH**

Darmstadt, 2010

Untersuchung zum Außenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung

Endbericht IEA SHC TASK 37 Subtask C

Autoren:

Dipl. Phys. Oliver Kah
Dipl.-Ing. Søren Peper
Dr. Witta Ebel
Dr. Berthold Kaufmann,
Prof. Dr. Wolfgang Feist
Dipl.-Ing. Zeno Bastian

Unter Mitarbeit von:

Henning Aust
Florian Meffert

Herausgeber:

PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt

Tel: 06151 / 82699-0
Fax: 06151 / 82699-11
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt, 2010

Dieser Bericht entstand im Unterauftrag des Fraunhofer Institutes für solare Energiesysteme, ISE, Freiburg im Rahmen des

Solar Heating and Cooling Programme der Internationalen Energie Agentur IEA, **Task 37 'Advanced Housing Renovation with Solar and Conservation'**.

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Forschungsarbeiten im **Subtask C: Sanierungskonzepte für Gebäude und Energieversorgung**

Die nationale Beteiligung wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi Vertreten durch den Projektträger BEO Forschungszentrum Jülich GmbH

Förderkennzeichen 032 27271B

Wir danken der GAG Ludwigshafen für die konstruktive Zusammenarbeit im Laufe des Projektes.

Haftungsausschluss: Die Informationen in dieser Schrift wurden nach bestem Wissen zusammengestellt. Eine Haftung für den Inhalt kann jedoch trotz sorgfältiger Bearbeitung und Korrektur nicht übernommen werden. Dies gilt insbesondere für Detailzeichnungen, die in jedem Fall als Prinzipskizzen zu verstehen sind, in denen nicht immer alle baulich relevanten Komponenten enthalten sein müssen.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	3
2	Einleitung	4
3	Untersuchtes Objekt.....	5
4	Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung	7
4.1	Messung der Außenluftvolumenströme für exemplarische Fensteröffnungsereignisse.....	7
4.2	Vergleich mit theoretischem Ansatz.....	13
4.3	Messung des Fensterzustands im Messzeitraum.....	15
4.4	Berechnung des durch Fensterlüftung induzierten Volumenstroms.....	18
5	Wohnungen mit kontrollierter Wohnungslüftung	21
5.1	Volumenströme mit kontrollierter Lüftung.....	21
6	Messungen zur Raumluftqualität.....	24
7	Energetischer Einfluss	27
7.1	Einfluss des gemessenen Außenluftwechsels auf die Lüftungswärmeverluste.....	27
7.2	Ergebnisse des energetischen Monitorings in der Heizperiode 2009/2010	28
8	Zusammenfassung.....	30
9	Literatur.....	32
10	Anhang.....	34
10.1	Indikatorgas-Messung.....	34
10.2	Tagesmittlere Volumenströme in den untersuchten Wohnungen	40
10.3	Energetische Kennwerte der Sanierungsprojekte	44

2 Einleitung

Mit der energetischen Sanierung von Gebäuden wird in der Regel auch die Luftdichtheit der Gebäudehülle verbessert. In den überwiegend über Fensterlüftung gelüfteten Bestandsgebäuden nimmt entsprechend der Anteil der Ex- bzw. Infiltration ab. Um weiterhin ausreichenden Luftaustausch zu gewährleisten, muss das Lüftungsverhalten an die neuen Bedingungen angepasst werden. Dabei ist die Notwendigkeit einer luftdichten Bauweise zur Vermeidung von Bauschäden und im Interesse der Energieeinsparung inzwischen allgemein anerkannt und hat Eingang in Normen und in gesetzliche Verordnungen gefunden. Darüber hinaus erwarten Nutzer in modernisierten Gebäuden, dass es keine wahrnehmbaren Zugerscheinungen gibt – schon deshalb muss die Luftdichtheit der Gebäudehülle nach der Sanierung erheblich verbessert sein. Durch eine kontrollierte Lüftung kann hingegen unabhängig vom Nutzereinfluss für eine ausreichende Lüfterneuerung gesorgt werden.

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Messbegleitung zweier energetisch unterschiedlich weitgehend sanierter Geschosswohnbauten, einer Niedrigenergiehaus-Sanierung mit Fensterlüftung und einer Passivhaus-Sanierung mit kontrollierter Lüftung (vgl. [Peper/Feist 2008]), stellten sich geringere Unterschiede im Heizenergieverbrauch ein, als dies aufgrund einer energetischen Bilanzierung zu erwarten war. Die Messergebnisse deuteten daraufhin, dass dies in den ansonsten baugleichen Bestandssanierungen vor allem auf unterschiedliche Frischluftzufuhr und damit auf den Lüftungswärmeverlust zurückzuführen ist. In den auf Niedrigenergie-Standard sanierten Wohnungen wird ausschließlich über Fenster gelüftet, während in den auf Passivhaus-Standard sanierten Wohnungen eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerecycling für eine ausreichende Lüfterneuerung sorgt.

Eine im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführte erweiterte Messung an den gleichen Gebäuden im Kernwinter 2009/2010, sollte zur weiteren Klärung der Fragestellung beitragen. Die zusätzliche Messkampagne hatte zum Ziel, das Lüftungsverhalten, den resultierenden Außenluftwechsel und die Luftqualität in den mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung sanierten Wohnungen genauer zu untersuchen. Dieser Bericht stellt die Ergebnisse der Auswertung dieser Messkampagne vor.

Im Unterschied zur Messbegleitung in [Peper/Feist 2008] sollte das Lüftungsverhalten in einer größeren Anzahl von Wohnungen untersucht werden, um statistisch besser belastbare Aussagen zu erlangen. Weiterhin wurde die Erfassung der Fensteröffnungsdauern neu konzipiert, da das vorhergehende Konzept, aufgrund von Mängeln bei den bauseitig verwendeten Reedkontakten, erhebliche Ausfallzeiten hatte.

Zur Ermittlung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung wurden Indikatorgas-Messungen zu typischen Fensteröffnungszuständen durchgeführt. Ein Berechnungsansatz zur Fensterlüftung (vgl. [Schnieders 2003]) sollte hiermit für die konkreten Wohnungen validiert werden. Außerdem sollten Konstellationen, welche den Luftaustausch mindern wie z.B. geschlossene Rollläden, näher untersucht werden. Die Luftqualitätsmessungen konnten zudem auf mehr Wohnungen ausgedehnt werden. Ein energetisches Monitoring in den beiden Modellprojekten wurde im Kernwinter 2009/2010 fortgeführt. Die Verbrauchswerte sollten für einen weiteren Abgleich der Ergebnisse zum Außenluftwechsel in den untersuchten Objekten dienen.

3 Untersuchtes Objekt

Bei der Komplettsanierung im Jahr 2005/2006 von zwei aneinander angrenzender Wohnungsbauten in Ludwigshafen a. R. wurde gleichzeitig auch der energetische Standard weitgehend verbessert.

Bei den Gebäuden handelt es sich um klassische Wohnungsbauten aus dem Jahr 1965 mit je drei Vollgeschossen und je 12 Wohnungen (jeweils 750 m² beheizte Wohnfläche). Eigentümer der beiden Gebäude ist die GAG Ludwigshafen.

Das westliche Gebäude wurde mit Passivhauskomponenten modernisiert. Jede Wohnung wurde mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Die Beheizung erfolgt über eine Nachheizung der Zuluft. Nur im Badezimmer ist ein Heizkörper vorhanden. Der Wärmeschutz wurde mit Passivhaus üblichen Dämmstärken und Fenstern mit Dreischeibenverglasungen in gedämmten Rahmen ausgeführt.

Das baugleiche angrenzende östliche Gebäude wurde ebenfalls hochwertig, aber energetisch weniger weitgehend auf einen guten Niedrigenergiehaus-Standard saniert. Dabei wurden Details zur Reduzierung von Wärmebrücken und zur Herstellung der Luftdichtheit z.T. aus der weitgehenderen Passivhaus-Sanierung übernommen. Dämmstärken und Fensterqualitäten sind entsprechend gegenüber der Passivhaus-Sanierung verringert. Zudem wurde auf eine kontrollierte Lüftung in diesen Wohnungen verzichtet.



Abbildung 1: Südansicht des sanierten Passivhaus-Geschosswohnbaus (Quelle [Peper/Feist 2008]).

Die Untersuchung zum Lüftungsverhalten konnte jeweils in den 6 größeren 3-Zimmer-Wohnungen (73,5 m² Wohnfläche) durchgeführt werden. Im Niedrigenergiehaus war zur Zeit der Messkampagne eine Wohnung unvermietet, so dass hier nur in 5 Wohnungen gemessen wurde. Die leerstehende Wohnung konnte andererseits für die umfangreichen Indikatorgas-Messungen genutzt werden.

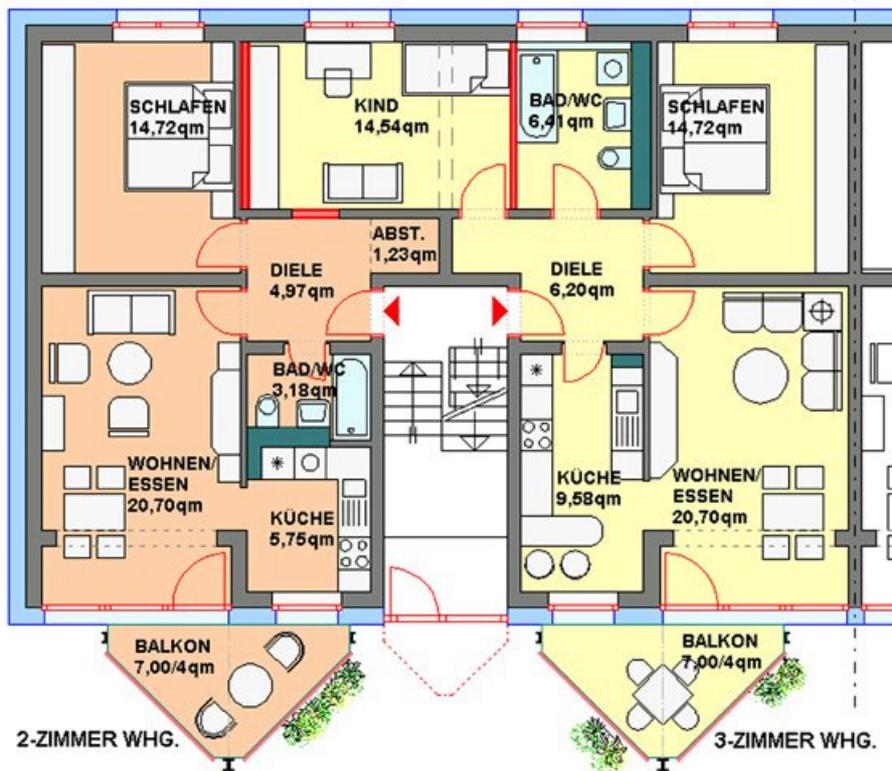


Abbildung 2: Wohnungsgrundriss eines Teilgebäudes mit Hausaufgang (Quelle: GAG Ludwigshafen). In beiden Objekten wurde die Untersuchung auf die größeren Wohnungen mit drei Zimmern und 73,5 m² Wohnfläche beschränkt (rechte Wohnung im Grundriss).

4 Wohnungen mit konventioneller Fensterlüftung

In den Wohnungen des Niedrigenergiehauses muss weiterhin konventionell über Fenster gelüftet werden. Zur Bestimmung des natürlichen Luftwechsels haben sich Indikatorgas-Verfahren bewährt, durch Auswertung des Verdünnungsverlaufs eines im Innenraum ausgebrachten Indikators kann der Außenluftwechsel berechnet werden. Eine zunächst favorisierte kontinuierliche Messung des Außenluftwechsels mittels Indikatorgas-Verfahren (vgl. [Kah et al. 2005]) wurde aufgrund des hohen messtechnischen Aufwands wieder verworfen.

Das schließlich entwickelte Messkonzept sah vor, zunächst typische Fensteröffnungsereignisse und Öffnungsdauern zu identifizieren. Der tatsächliche Luftaustausch für diese typischen Fensterlüftungseignisse wurde anschließend mit Hilfe von Indikatorgasmessungen in einer leerstehenden Wohnung des Niedrigenergiehauses bestimmt. Theoretische Berechnungsansätze zum Luftaustausch durch Fensterlüftung konnten anhand dieser Daten validiert werden. Mit den gemessenen Fensteröffnungsdauern im Messzeitraum und dem validierten Berechnungsansatz zur Fensterlüftung konnte anschließend wohnungsweise der Außenluftwechsel bestimmt werden.

4.1 Messung der Außenluftvolumenströme für exemplarische Fensteröffnungsereignisse

Anhand von Aufzeichnungen zu Fensteröffnungsereignissen konnten zunächst typische Öffnungskonfigurationen identifiziert werden. In einer unvermieteten Wohnung des Niedrigenergie-Geschosswohnbaus konnten anschließend im Kernwinter Messungen zum Luftaustausch für diese typischen Öffnungszustände durchgeführt werden. Dabei wurde der natürliche Luftaustausch mittels Indikatorgas-Messungen (vgl. [prEN ISO 12569], [Ebel/Kah 2003]) für ausgewählte Lüftungseignisse bestimmt.

Bei der verwendeten Konzentrationsabfall-Methode wird ein Spurengas in dem betrachteten Wohnungsvolumen ausgebracht und möglichst gleichmäßig verteilt. Sobald eine homogene Verteilung des Spurenstoffs in der Wohnungsraumluft erreicht ist, wird entsprechend des Versuchsszenarios die Messung gestartet. Anhand des Verdünnungsverlaufs des Spurengases kann bei der rechnerischen Auswertung der Außenluftwechsel bestimmt werden.

Eine Voraussetzung für die Auswertung dieser Messmethode ist, dass die Konzentration im untersuchten Raumvolumen, d.h. in der Wohnung, auch im zeitlichen Verlauf gleichmäßig abnimmt. Die Raumluft-Durchmischung wurde daher durch Ventilatoren unterstützt. Zur Überprüfung dieser Anforderung wurde die Konzentrationsmessung an 4 Messpunkten in der Wohnung durchgeführt.

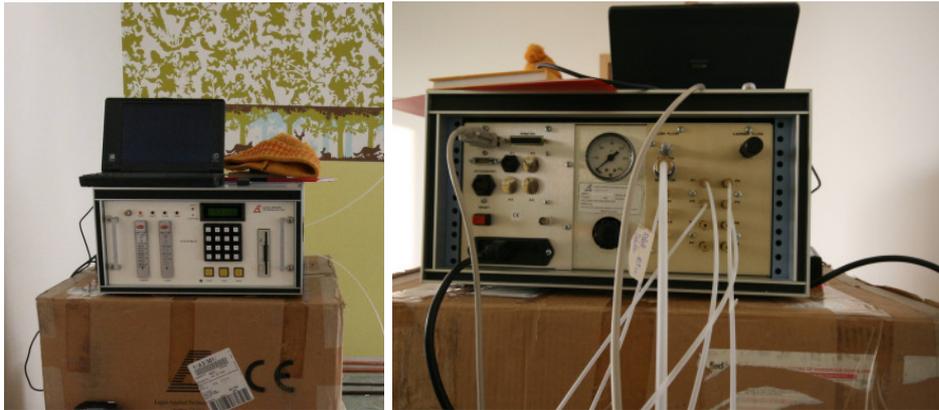


Abbildung 3: Messaufbau mit Indikatorgas-Monitor



Abbildung 4: Luftprobenahme bei der Indikatorgas-Messung über ein Schlauchsystem

Bei der Auswertung wird daher davon ausgegangen, dass das Indikatorgas sich vollständig mit der Raumluft vermischt und dass die Indikatorgaskonzentration in ihrer zeitlichen Entwicklung räumlich homogen bleibt. Die im Anhang dokumentierten Messreihen für jeweils 4 Entnahmestellen in der Wohnung bestätigen diese Annahme. Unter diesen Bedingungen folgt das Abklingen der Indikatorgaskonzentration folgender Gleichung (die Konzentration des Indikatorgases in der Außenluft kann mit Null angesetzt werden):

$$c_{\text{Indikator}}(t) = c_{\text{Indikator}}(t=0) \cdot \exp(-n \cdot t) \quad (1)$$

$c_{\text{Indikator}}$: Indikatorgaskonzentration, t : Zeit, n : Luftwechselrate

Die Luftwechselrate n wurde jeweils durch Regressionsanalyse bestimmt: Werden die Konzentrationen im logarithmischen Maßstab aufgetragen, dann entspricht die negative Steigung einer Ausgleichsgeraden der Luftwechselrate n . Im Abschnitt 10 sind die Konzentrationsverläufe in logarithmischer Darstellung mit ihren zugehörigen Ausgleichsgeraden wiedergegeben.

Das Ergebnis der beschriebenen Indikatorgas-Messung ist eine Luftwechselrate. Die Außenvolumenströme ergeben aus dieser Luftwechselrate und dem jeweils am Luftaustausch teilnehmenden effektiven Volumen, hier wurde das Nettoraumvolumen (183 m³) der Wohnung zugrundegelegt, da in der leerstehenden Wohnung keine Möbel oder Schränke das Luftvolumen verringern.

Die folgenden Versuchsszenarios wurden untersucht:

Tabelle 1: Untersuchte Fensteröffnungszustände

<p>V1 Schlafzimmer-Fenster gekippt</p>		<p>V2 Schlafzimmer-Fenster aufgedreht</p>	
<p>V3 Schlafzimmer gekippt / Rollläden geschlossen bis auf 30 cm</p>		<p>V4 Schlafzimmer gekippt / Rollläden geschlossen bis auf Spalte</p>	
<p>V5 Schlafzimmer gekippt / Gardine vor dem Fenster</p>		<p>V6 Schlaf- und Kinderzimmer-Fenster gekippt, gleiche Fassade</p>	
<p>V7 Bad-Fenster gekippt</p>		<p>V8 Bad-Fenster aufgedreht (kein Foto vorhanden)</p>	
<p>V10 Wohnzimmer-Fenster gekippt, Raffstore geschlossen</p>		<p>V11 Schlaf-zimmer- und Küchen-Fenster gekippt, gegenüberliegende Fassaden (Querlüftung)</p>	

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Indikatorgasmessung für die verschiedenen Öffnungszustände sowie die meteorologischen Randbedingungen der Messung wiedergegeben.

Während zwei Nächten wurde zudem der Grundluftaustausch bei geschlossenen Fenstern aufgrund von Leckagen mit der Indikatorgas-Methode gemessen. Die ermittelten Werte lagen bei 2 bzw. 3 m³/h (bzw. 0,009 bzw. 0,015 h⁻¹). Zur Bestimmung des durch die Fenster verursachten Luftwechsels wurde dieser Infiltrationsanteil abgezogen. Die geringe In- bzw. Exfiltration bestätigt die guten Drucktestergebnisse aus der Bauphase.

Tabelle 2: Ergebnisse der Indikatorgas-Messung

Versuchsszenario	Volumenstrom (Fenster induziert *)		Fenstergeometrie (Fenster1)			meteorologische Randbedingungen		
	Messwert [m ³ /h]	Konfidenz- intervall von Messwert (+/-) [m ³ /h]	lichte Höhe [cm]	lichte Breite [cm]	Öffnungsweite (bei Kippen- ster) [cm]	mittlere Temperatur- differenz [K]	mittlere Wind- geschwindigkeit [m/s]	relative Windrichtung auf Fassade [°, 0°: parallel zur Fassade, 90°: senkrecht zur Fassade]
V1 Schlafzimmer-Fenster gekippt	45,2	3,7	114,0	60,0	8,5	21,0	1,3	90,0
V2 Schlafzimmer-Fenster aufgedreht	352,0	19,0	114,0	60,0	0,0	20,5	1,1	45,0
V3 Schlafzimmer gekippt / Rollladen geschlossen bis auf 30cm	26,6	0,5	114,0	60,0	8,5	23,0	1,3	90,0
V4 Schlafzimmer gekippt / Rollladen geschlossen bis auf Spalte	21,1	0,4	114,0	60,0	8,5	22,0	1,3	90,0
V5 Schlafzimmer gekippt / Gardine vor dem Fenster	27,2	1,2	114,0	60,0	8,5	21,5	1,1	90,0
V6 Schlaf- und Kinderzimmer-Fenster gekippt, gleiche Fassade	156,3	4,6	114,0	60,0	8,5	21,5	1,0	90,0
V7 Bad-Fenster gekippt	78,5	5,1	113,0	86,5	8,5	18,0	1,0	90,0
V8 Bad-Fenster aufgedreht	486,1	39,6	113,0	86,5	0,0	16,5	1,3	90,0
V9 Wohnzimmer-Fenster gekippt	166,0	13,4	226,5	97,5	8,5	22,0	3,2	90,0
V10 Wohnzimmer-Fenster gekippt, Raffstore geschlossen	133,7	7,2	226,5	97,5	8,5	22,0	3,8	90,0
V11 Schlafzimmer- und Küchen-Fenster gekippt, gegenüberliegende Fassaden	1151,4	145,3	114,0	60,0	8,5	18,5	3,8	90,0

* Infiltrationsanteil wurde abgezogen

4.2 Vergleich mit theoretischem Ansatz

Der natürliche Luftaustausch beruht auf Druckunterschieden zwischen dem Innen- und dem Außenraum. Temperaturunterschiede zwischen innen und außen, der thermische Antrieb und der Winddruck auf den Fassaden sind hierfür verantwortlich. Eine analytische Beziehung für den Einfluss des thermischen Antriebs kann durch geeignete Vereinfachungen aus dem Bernoulli-Prinzip hergeleitet werden. Basierend auf den grundlegenden physikalischen Zusammenhängen und empirischen Untersuchungen (vgl. [Warren 1977], [Daler 1984], [Maas 1995]) erstellte das Passivhaus Institut [Schnieders 2003] ein Berechnungstool, welches den natürlichen Luftaustausch als Funktion der Fenstergeometrien und der meteorologischen Randbedingungen berechnet. Das Berechnungstool ist im Passivhaus-Projektierungspaket implementiert (vgl. [PHPP 2007]).

Auf Basis dieses Tools wurde im Rahmen dieser Untersuchung ein Fensterlüftungsmodell zu den untersuchten Wohnungen entwickelt. Die oben dargestellten Volumenstrom-Messungen sollen im Folgenden zur Validierung der Modellansätze genutzt werden.

Einseitige Lüftung über gekippte Fenster

Die Indikatorgas-Messungen an jeweils einem gekippten Bad- und Wohnzimmerfenster (V7 und V9) bestätigen den theoretischen Ansatz. Die Abweichungen zum Rechenwert liegen im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeiten (–11% beim Badfenster bzw. +13% beim Wohnzimmerfenster). An den Messtagen war der Luftaustausch durch den theoretisch besser fassbaren Temperaturantrieb bestimmt.

Eine weitere Messung am Schlafzimmerfenster (V1) zeigte eine Unterschreitung des berechneten Werts um rund 30%. Vermutlich veränderte hier im Unterschied zu den zuvor genannten Fenstern die Heizkörperanordnung unter dem Fenster das Strömungsmuster im Raum. Im Bad und Wohnzimmer befinden sich keine Heizkörper unter dem Fenster. Der Einfluss eines Heizkörpers unter einem geöffneten Fenster wurde auch in [Maas 1995] beobachtet. Dort deuten systematische Messungen auf eine Herabsetzung des Luftaustauschs durch einen Heizkörper unter einem Fenster um etwa 20% hin.

Die einseitige Fensterlüftung mit zwei gekippten Fenstern (Bad und Schlafzimmerfenster) wurde in einem weiteren Versuch untersucht (V6). Der beobachtete Außenluftaustausch übersteigt den theoretischen Ansatz um 14%, aber liegt noch im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit.

Einseitige Lüftung über ein vollständig geöffnetes Fenster

Der Luftaustausch bei gedrehtem Fenster konnte im Bad (V8) und im Schlafzimmer (V2) ermittelt werden. Im Vergleich zu den Versuchen mit gekipptem Fenster waren die Abweichungen für diese Konfiguration größer. Die Messwerte unterschritten um ca. 20% die theoretischen Werte. Vermutlich bildet sich durch die höheren Volumenströme eine Temperaturschichtung aus, welche die wirksamen Temperaturunterschiede zwischen innen und außen verringert.

Einfluss von zusätzlichen Nutzungseinrichtungen am Fenster

In der Wohnnutzung können zusätzliche Einrichtungen wie Vorhänge, Rollläden oder Jalousien die Fensterlüftung beeinflussen, sofern die effektive Öffnungsfläche verringert oder Strömungsmuster beeinflusst werden. Regelmäßige Beobachtungen am untersuchten Geschosswohnbau zeigten, dass am Schlaf- und Kinderzimmer-Fenster abends der Rollladen überwiegend geschlossen war. Z.T. blieb der Rollladen sogar tags im Schlafzimmer geschlossen.

Zur Untersuchung des Einflusses von Rollläden, Vorhängen und Raffstoren wurden bei gekipptem Fenster und zusätzlicher Nutzung dieser Einrichtungen am Fenster Messungen zum Luftaustausch durchgeführt. Die Messungen belegen den relevanten Einfluss dieser im Wohnbau üblichen Elemente am Fenster. Die Fensterlüftung gegenüber dem ungestörten Fall wurde hierdurch im Bereich von 30% (geschlossener Außenraffstore vor Fenster) bis zu 70% verringert (Rollladen bis auf Spalte geschlossen).

Querlüftung über zwei gekippte Fenster

In einem weiteren Versuch wurde die Querlüftung zwischen gekipptem Schlafzimmer- und Küchenfenster untersucht (V11). Die Fenster sind in gleicher Höhe angeordnet, so dass die Fensterlüftung vor allem durch den Windantrieb bedingt ist. Wie in [Schnieders 2003] dargestellt, zeigt der Berechnungsansatz hinsichtlich des Windantriebs größere Unsicherheiten. Der konkrete Winddruck auf der Fassade hängt von der Anströmungsrichtung, der Anordnung des Fensters in der Fassade und der umgebenden Bebauung ab. Zudem sind Windgeschwindigkeit und -richtung stark schwankend. In dem Berechnungsansatz ergibt sich der Winddruck auf die Fassade aus dem Produkt aus Windgeschwindigkeit und Druckbeiwert c_p . Der Druckbeiwert c_p im verwendeten Berechnungsansatz nach [Schnieders 2003] liegt bei 0,3 und unterschätzt bewusst den Windeinfluss. Für die tatsächlichen Windbedingungen während der Indikatorgas-Messung – senkrechte Anströmung - finden sich in der Literatur c_p -Werte von 0,9 (vgl. [Maas 1998]) und 1,3 (vgl. [Daler 1984]). Gleichzeitig nimmt die Genauigkeit der Messmethode bei höheren Volumenströmen ab. Wird der höhere

Druckbeiwert nach [Daler 1984] angesetzt, dann liegt der Messwert noch um 33% höher, als der Berechnungsansatz.

Beim schließlich verwendeten Berechnungsansatz wurde dennoch weiterhin der ursprüngliche Druckbeiwert von 0,3 verwendet, da der senkrecht zur Fassade anströmende Nordwind am Messtag eher ein Sonderfall war. Zudem spielt Querlüftung bei der Auswertung der tatsächlichen Fensteröffnungsereignisse in den Wohnungen eine untergeordnete Rolle.

Fazit zu Vergleich mit theoretischem Ansatz

Für die Konfigurationen mit gekipptem Fenster und einseitiger Lüftung stimmen die Ergebnisse des Fenstermodells hinreichend genau mit den gemessenen Werten überein.

Für die Versuchsszenarios mit höheren durch Fensterlüftung induzierten Luftaustausch nimmt die Übereinstimmung der Ergebnisse ab. Insbesondere bei dem Versuchsdesign mit Querlüftung unterscheiden sich berechneter und gemessener Wert deutlich. Vor dem Hintergrund, dass die Zusammenhänge beim Windantrieb sehr komplex sind und stark durch die konkreten örtlichen Bedingungen beeinflusst werden, sind die Abweichungen verständlich.

Im Betrachtungszeitraum dominiert in der Regel der temperaturgetriebene Luftaustausch, zudem sind Querlüftungsereignisse selten, so dass die Unsicherheiten hinsichtlich des windgetriebenen Einflusses nicht so bedeutend erscheinen. Hingegen ist der Einfluss von zusätzlichen Elementen am Fenster, welche die effektive Fensteröffnungsfläche verringern, von großer Bedeutung. Der Luftaustausch aufgrund dieser Einrichtungen verringerte sich gegenüber dem ungestörten Fall des gekippten Fensters zwischen 30% (Raffstore geschlossen) bis zu 70% (Rollladen bis auf Spalte geschlossen).

4.3 Messung des Fensterzustands im Messzeitraum

Zur Untersuchung des Fensteröffnungsverhaltens wurden alle Fenster in den bewohnten 5 Niedrigenergie-Wohnungen mit speziellen Funkkontakt-Fenstergriffen ausgerüstet (vgl. Abbildung 5). Die Fenstergriffe senden bei Änderung der Griffstellung den aktuellen Zustand: geschlossen, gekippt oder aufgedreht.



Abbildung 5: Fenstergriff mit Funkkontakt

Wie die spätere Auswertung zeigte, wurden die Fenstergriffe vereinzelt nicht in die Ausgangsstellung „geschlossen“ gebracht. Der Griffkontakt zeigte noch aufgedreht an, obwohl das Fenster geschlossen war. Die Öffnungszustände mit aufgedrehtem Fenster wurden daher anhand der Raumtemperaturmessung auf Plausibilität geprüft. Zeiträume mit gemessener, aber unplausibler Fensteröffnung wurden anschließend korrigiert.

Abbildung 6 zeigt die beobachteten Fensteröffnungsdauern als mittlere Öffnungsdauer in einer Wohnung je Fenster und Tag. Erwartungsgemäß gibt es zwischen den Wohnungen deutliche Unterschiede. In der Wohnung mit intensivstem Lüftungsverhalten wird über 9-mal (bei Außentemperaturen unter 0°C) bzw. 5-mal (bei Außentemperaturen zwischen 0 und 10°C) häufiger gelüftet als in jener mit den geringsten Öffnungsdauern. Im Durchschnitt über die Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung wurde jedes Fenster am Tag 207 Minuten im Messzeitraum geöffnet. Die Fensteröffnungsdauern sind dabei vergleichbar mit Angaben in der Literatur (vgl. [Reiß et al. 2001],[Hausladen et al. 2003]). Am häufigsten wurde in den untersuchten Wohnungen im Bad und im Schlafzimmer gelüftet (vgl. Abbildung 7).

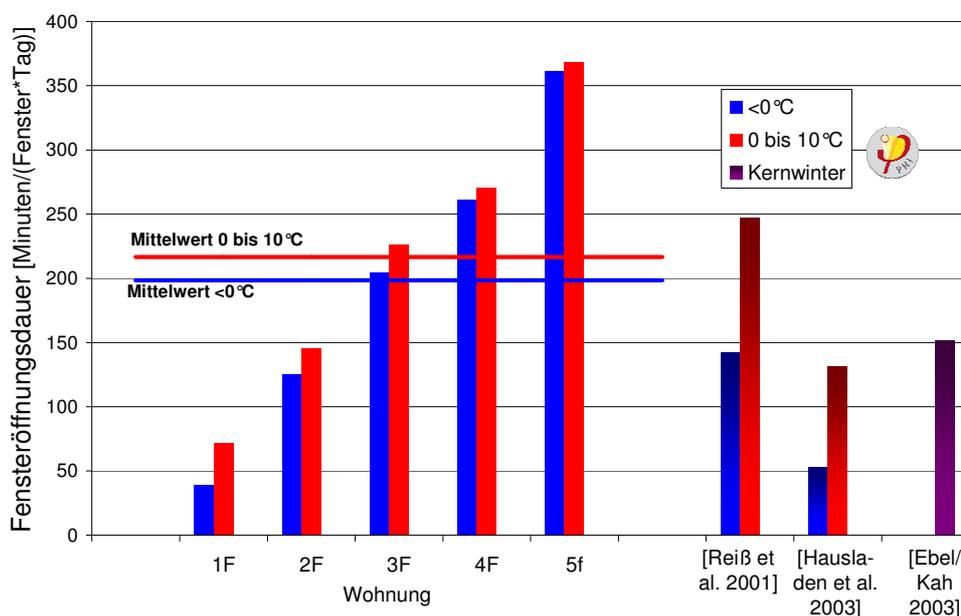


Abbildung 6: Fensteröffnungsdauern in den Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung im Messzeitraum (Messzeitraum Dezember 2009 bis Februar 2010). Die Fensteröffnungsdauern in den einzelnen Wohnungen fallen erwartungsgemäß sehr unterschiedlich aus. Die durchschnittliche Öffnungsdauer je Fenster und Tag ist vergleichbar mit Angaben in der Literatur (vgl. [Reiß et al. 2001], [Hausladen et al. 2003]).

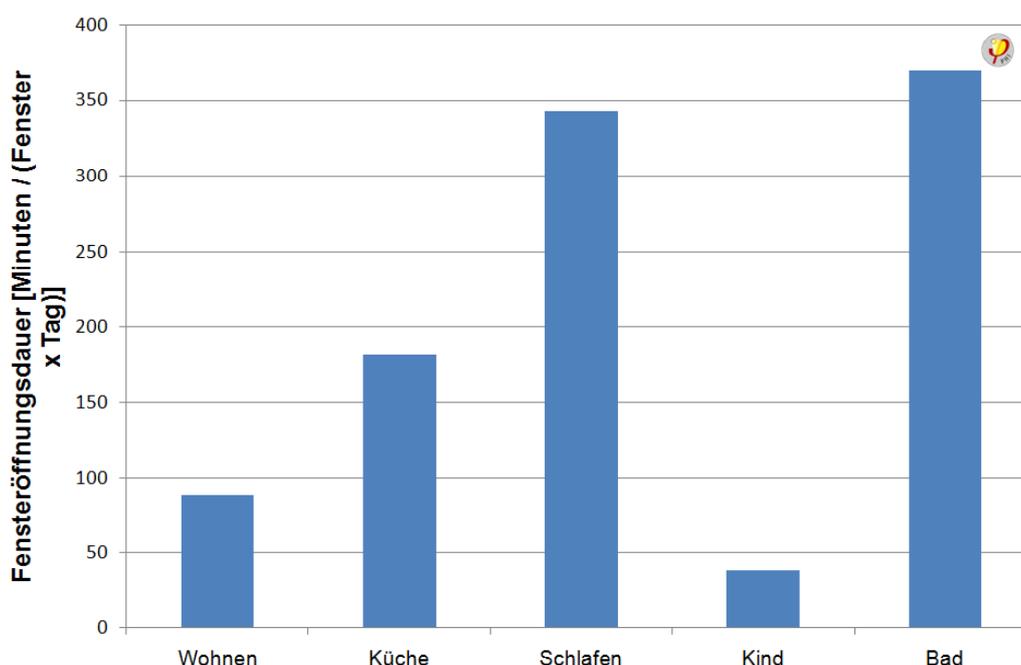


Abbildung 7: Durchschnittliche Fensteröffnungsdauern in den 5 ausgewerteten Wohnungen des Niedrigenergiehauses. Im Bad und im Schlafzimmer wird am häufigsten gelüftet.

4.4 Berechnung des durch Fensterlüftung induzierten Volumenstroms

Anhand der beobachteten Fensteröffnungsdauern (vgl. Abschnitt 4.3) und des validierten Fensterlüftungsmodells (vgl. Abschnitt 4.2) wird der Außenluftwechsel in den Wohnungen mit Fensterlüftung im gesamten Untersuchungszeitraum bestimmt. Da es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich war, alle relevanten Einflüsse zu erfassen, mussten zur Auswertung zusätzliche Annahmen getroffen werden. Dabei wurden Ansätze gewählt, welche in der Regel den Luftaustausch eher überschätzen. Z.B. wurde bei Öffnung von gegenüberliegenden Fenstern angenommen, dass die Innentüren geöffnet sind und Querlüftung statt findet.

Regelmäßige Beobachtungen zeigten, dass die Rollläden in allen Wohnungen nachts geschlossen waren. In der Mehrzahl der Wohnungen blieb der Rollladen im Schlafzimmer sogar tags zu. Für eine obere Abschätzung des Luftaustauschs wurde daher angenommen, dass zumindest zwischen 19:00 und 7:00 der Rollladen in der Küche und im Schlaf- und Kinderzimmer bis auf einen Spalt von etwa 30 cm geschlossen ist.

Zudem sind an nahezu allen Fenstern Vorhänge angebracht. Für einen zusätzlichen Berechnungsgang wurde weiter angenommen, dass an allen Fenstern die Vorhänge den natürlichen Luftwechsel, wie in Abschnitt 4.1 ermittelt, verringern. Für diese untere Abschätzung wurde eine Reduzierung des Fensterluftwechsels um 50% angesetzt.

Im Messzeitraum ergibt sich unter diesen Annahmen ein mittlerer Volumenstrom von 59 m³/h für die obere und von 34 m³/h für die untere Abschätzung. Dies entspricht einem Außenluftwechsel von 0,33 h⁻¹ bzw. 0,18 h⁻¹. Wird die sicher untypische Zeit zwischen Weihnachten und Sylvester heraus gerechnet (aufwendiges Kochen, Besuche, etc.), dann stellen sich nochmals um 11% (obere Abschätzung) bzw. 10% (untere Abschätzung) geringere mittlere Volumenströme ein. Dabei unterscheidet sich der ermittelte Luftaustausch deutlich von Wohnung zu Wohnung, da das Nutzerverhalten diesen maßgeblich bestimmt (vgl. Abbildung 8). Zudem wird auch in denselben Wohnungen von Tag zu Tag sehr unterschiedliche gelüftet. Abbildung 9 zeigt die tagesmittleren Volumenströme der Wohnung, deren Lüftungsverhalten in etwa die beobachteten Mittelwerte über alle Wohnungen mit Fensterlüftung repräsentiert (die Ergebnisse zu den anderen Wohnungen sind im Anhang dokumentiert).

Die [DIN 1946-6] gibt in Abhängigkeit von der Personenbelegung erforderliche Außenluftvolumenströme zur Wohnungslüftung an. In Abbildung 10 ist die in [DIN 1946-6] dargestellte Nennlüftung (mindestens 30m³/(Person h)) den in dieser Untersuchung gemessenen Außenluftvolumenströmen gegenüber gestellt. Wie Abbildung 10 zeigt,

wird selbst nach der Annahme der oberen Abschätzung im Durchschnitt nur in 2 Wohnungen genügend gelüftet.

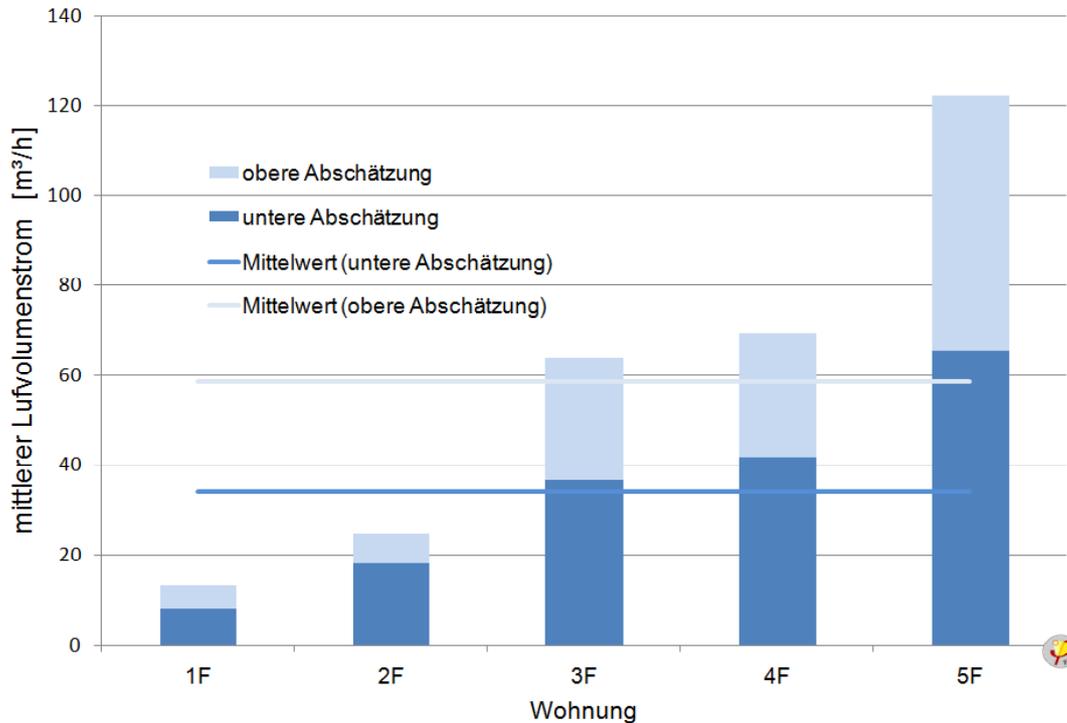


Abbildung 8: Mittlerer Außenvolumenstrom in den Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung. Mit den Annahmen zur oberen Abschätzung liegt der durchschnittliche Volumenstrom in den fünf untersuchten Wohnungen bei 59 m³/h und gemäß der unteren Abschätzung bei 34 m³/h.

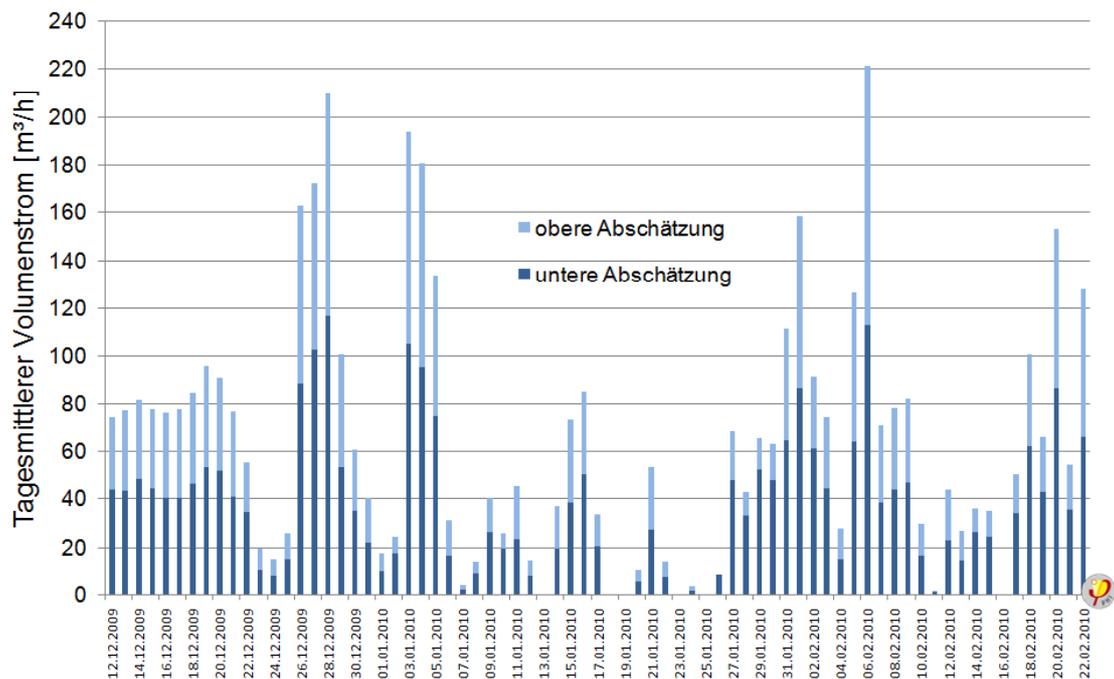


Abbildung 9: Tagesmittelwerte des Außenvolumenstroms in einer Wohnung (3F) mit einem mittleren Lüftungsverhalten. Wie die Tagesmittelwerte zeigen, kann das Lüftungsverhalten auch von Tag zu Tag sehr unterschiedlich sein.

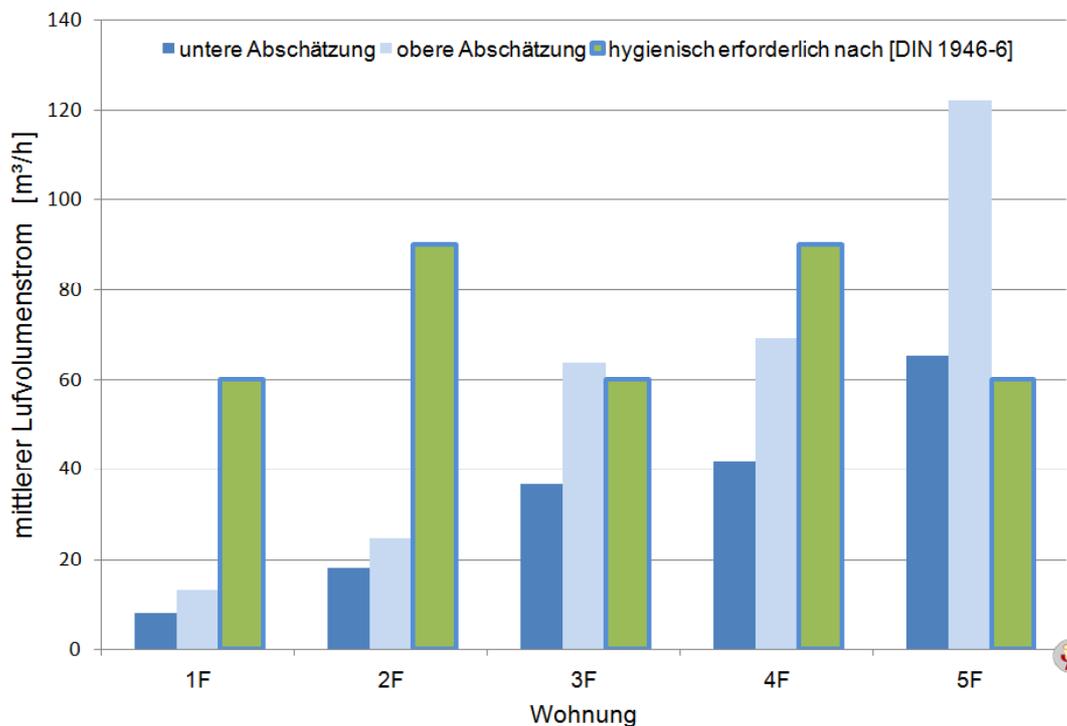


Abbildung 10: Wohnungsweiser mittlerer Volumenstrom und zur Personenanzahl korrespondierender hygienisch erforderlicher Außenluftbedarf (nach [DIN 1946-6]). Auch gemäß der oberen Abschätzung für den mittleren Außenvolumenstrom wird der hygienische Bedarf nur in zwei Wohnungen gedeckt.

5 Wohnungen mit kontrollierter Wohnungslüftung

Zeitgleich wurden zusätzlich Messungen zum Außenluftwechsel und zur Luftqualität in 6 weiteren Wohnungen mit kontrollierter Lüftung durchgeführt. Die Wohnungen sind baugleich und befinden sich in dem angrenzenden Häuserblock, welcher energetisch auf nahezu Passivhaus-Niveau saniert wurde. Die Lüftung ist dezentral mit wohnungsweisen Lüftungsgeräten organisiert.

5.1 Volumenströme mit kontrollierter Lüftung

Die Außenvolumenströme der kontrollierten Lüftung konnten in 4 untersuchten Wohnungen durchgängig erfasst werden. An den Zentralgeräten wurde hierfür im Messzeitraum die aktuelle Leistungsstufe der Lüftung aufgezeichnet. Durch Kombination der aktuellen Leistungsstufe mit den zugehörigen Volumenströmen, welche zuvor mit einem Volumenstrom-Messgerät ermittelt wurden, konnte der mechanische Außenluftwechsel bestimmt werden. Für zwei weitere Wohnungen mit kontrollierter Lüftung liegen keine durchgängigen Daten zur Lüftungsstufe vor, hier wurde eine mittlere Betriebsstufe des Lüftungsgeräts angesetzt.

Im Rahmen der vorhergehenden Messbegleitung in demselben Objekt (vgl. [Pepper/Feist 2008]) wurde kaum Fensterlüftung in diesen Wohnungen beobachtet. Auf diesen Erfahrungen basierend wurde in den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung auf eine Erfassung der Fensteröffnung verzichtet. Für die Auswertung wird im Folgenden angenommen, dass der Umfang der Fensterlüftung vernachlässigbar ist.

Der über den Messzeitraum gemittelte Außenvolumenstrom ist in Abbildung 11 dargestellt. Für jeden Zeitschritt wurde hierbei jeweils der größere Wert aus Zu- und Abluftvolumenstrom verwendet. Die wohnungsweisen Mittelwerte liegen zwischen 41 und 135 m³/h mit einem Durchschnitt über alle Wohnungen von 84 m³/h. Wie die Messungen zeigen, sind die Außenvolumenströme des Lüftungsgeräts für die Wohnungsgröße (73,5 m² Wohnfläche) ausreichend variabel einstellbar. Bis zu 4 Personen können mit genügend Außenluft versorgt werden. Zudem zeigen die Messungen, dass die Lüftungsstufen auch geändert werden.

Leider zeigte sich erst im Verlauf der Messkampagne, dass die Lüftung in Wohnung L1 nicht den vollen Volumenstrom bereitstellt. Die maximale Luftleistung lag etwa bei 50% des vorgesehenen Wertes. Der mittlere Außenvolumenstrom in dieser Wohnung ist entsprechend geringer. Zudem zeigten Messungen an zwei der Wohnungslüftungsanlagen eine beträchtliche Disbalance der Volumenströme (Abluftüberschuss). Nur bei den Zuluftvolumenströmen kann davon ausgegangen werden, dass sie auch tatsächlich in den Wohnräumen wirksam sind. In Abbildung 12 ist daher ein Vergleich von mittlerem Zuluftvolumenstrom und den hygienisch erforderlichen

Nennvolumenströmen nach [DIN 1946-6] dargestellt. Aufgrund von fehlerhafter Einregelung und niedriger Betriebsstufenwahl übersteigt der hygienische erforderliche Bedarf in einer Wohnung den mittleren Zuluftvolumenstrom, in zwei weiteren liegt eine nur geringfügige Unterschreitung vor. Vor allem in Mietwohnungen sollten die Nutzer wegen des Mieterwechsels, über, für die jeweilige Personenanzahl, geeignete Betriebsstufen informiert werden.

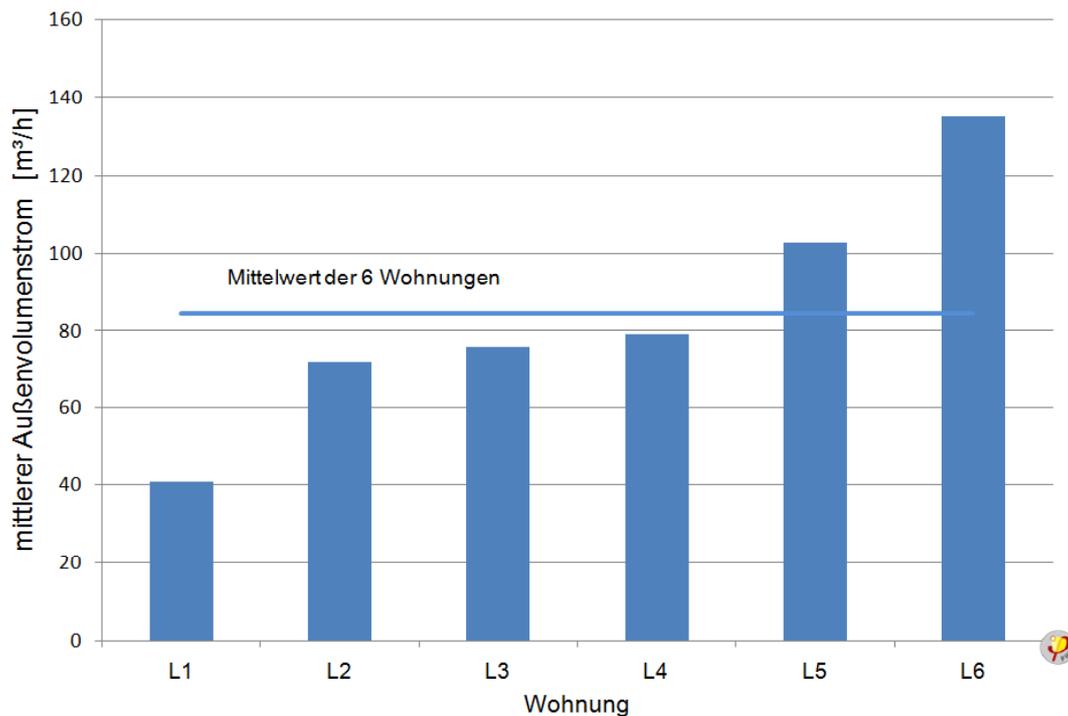


Abbildung 11: Mittlerer Außenvolumenstrom in den Wohnungen mit Wohnungslüftung. Die Mittelwerte liegen zwischen 41 und 135 m³/h. In Wohnung L1 liefert die kontrollierte Lüftung aufgrund eines technischen Defekts nur die halbe Luftleistung.

Anmerkung: In den Wohnungen L2 und L3 wurde eine mittlere Betriebsstufe angenommen, da keine durchgängigen Daten zur Lüftungsstufe vorlagen.

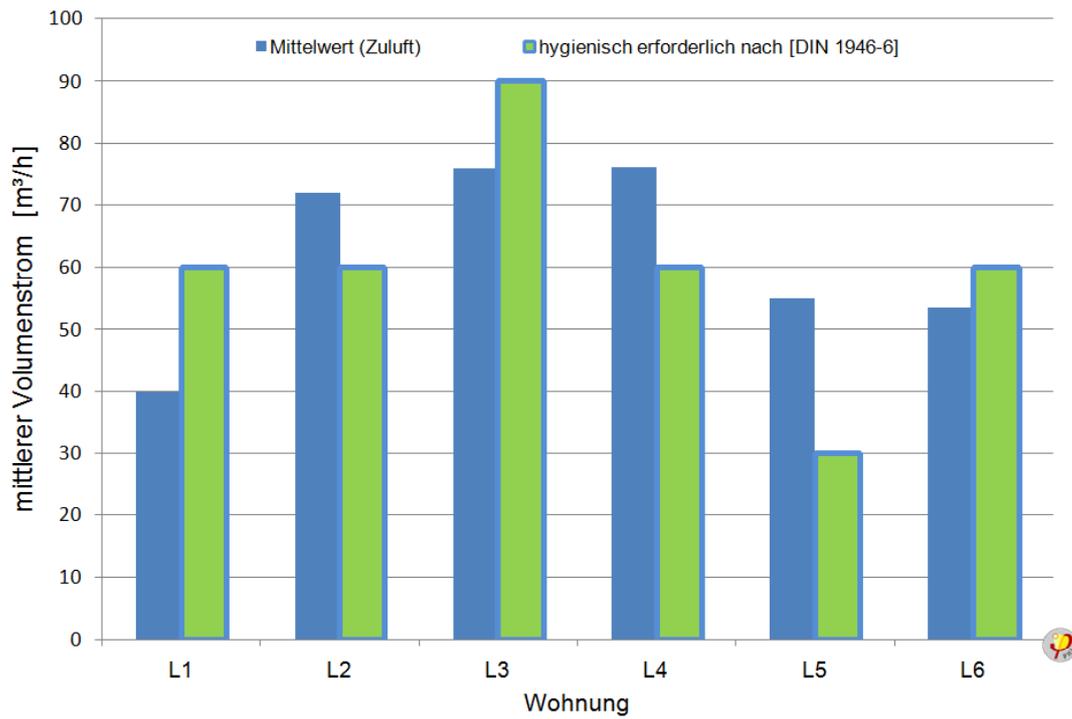


Abbildung 12: Vergleich des, der Personenbelegung entsprechenden, hygienischen Zuluftbedarfs und des gemessenen mittleren Zuluftvolumenstroms. Aufgrund einer Fehleinstellung, liegt der Zuluftvolumenstrom in einer Wohnung unter dem hygienischen Zuluftbedarf (Lüftung in L1 hatte technischen Defekt).

6 Messungen zur Raumlufthqualität

Zur Überprüfung der Raumlufthqualität wurde in den Wohnungen die Kohlendioxid-Konzentration aufgezeichnet. Kohlendioxid (CO_2) ist selbst noch in deutlich höheren als den hier vorliegenden Konzentrationen unschädlich, gilt jedoch als eingeführte Leitgröße zur Bewertung der Raumlufthqualität. In nahezu allen Wohnungen konnten CO_2 -Sensoren im Schlaf- und Wohnzimmer aufgestellt werden. In diesen Hauptwohnräumen sind die höchsten CO_2 -Werte zu erwarten. Die bereits ersetzte [DIN 1946-2] forderte einen Richtwert von 1000 ppm und einen Grenzwert von 1500 ppm. Gemäß der aktuellen Normung [EN 13779] besteht eine niedrige Luftqualität oberhalb von 1400 ppm (bei Annahme eines CO_2 -Gehalts der Außenluft von 400 ppm).

Wie die Messungen zeigen, weisen die Wohnungen mit kontrollierter Lüftung im Vergleich zu den Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung substantiell geringere CO_2 -Konzentrationen auf. Eine Grenzkonzentration von 1500 ppm wurde in den Wohnungen mit Fensterlüftung durchschnittlich während 64% der Messdauer überschritten, während in den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung hingegen nur 14% der Messwerte oberhalb von 1500 ppm lagen. Die Grenze für niedrige Luftqualität nach der [EN 13779] von 1400 ppm wird sogar während 70% bei Fensterlüftung und während 34% des Messzeitraums bei kontrollierter Lüftung überschritten.

Die untersuchten Wohnungstypen weisen vergleichbare Belegungsdichten auf. In den Wohnungen mit Fensterlüftung wohnten durchschnittlich 1,8 Erwachsene und 0,4 Kinder während jene mit Lüftungsanlage von 1,8 Erwachsenen und 0,2 Kindern je Wohneinheit bewohnt waren.

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die gemessenen Häufigkeiten für 4 CO_2 -Konzentrationsklassen. Neben dem Außenluftwechsel bestimmen die Personenanzahl und Aufenthaltsdauer, d.h. die CO_2 -Quellstärke die resultierenden Konzentrationswerte. Als zusätzliche Information ist daher in den folgenden Abbildungen der mittlere gemessene auf die Bewohneranzahl bezogene Volumenstrom dargestellt. In den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung ist der Zuluftvolumenstrom zugrunde gelegt. Wie die Abbildungen zeigen, besteht keine deutliche Korrelation zwischen dem personenbezogenen Volumenstrom und der Luftqualität. Weitere Faktoren, wie die tatsächliche Anwesenheitszeit und z.B. regelmäßige Besuche haben in der Wohnung deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse.

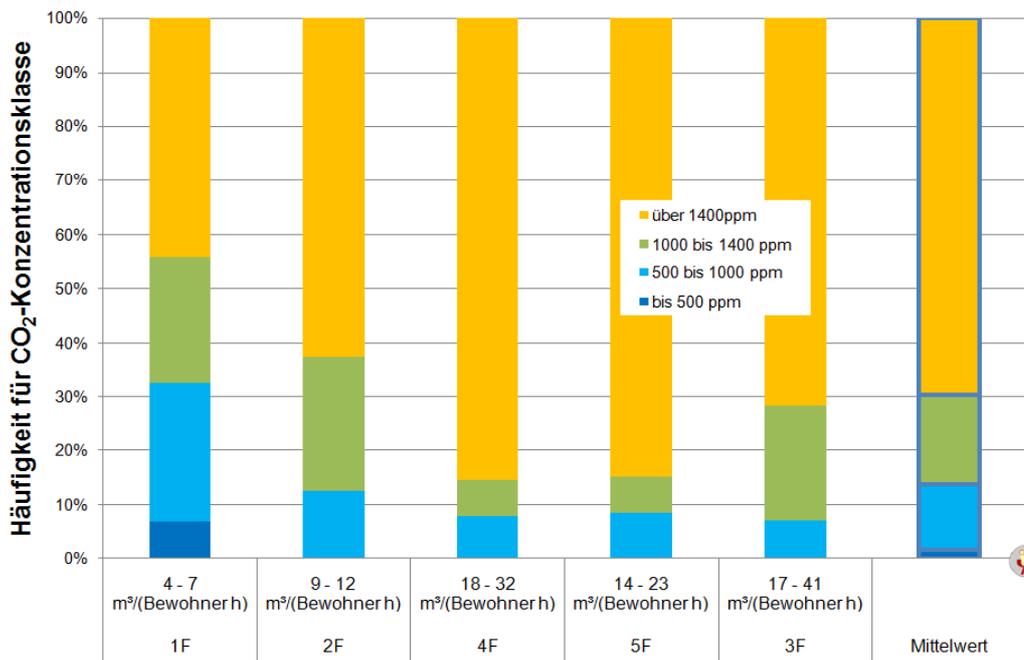


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung für CO₂-Konzentrationsklassen im Messzeitraum in den Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung. Gemäß [EN 13779] besteht eine niedrige Raumluftqualität oberhalb von CO₂-Konzentrationen von 1400 ppm (unter der Annahme einer Außenkonzentration von 400 ppm). In den untersuchten Wohnungen mit Fensterlüftung herrschte demnach durchschnittlich während 70% der Zeit eine niedrige Raumluftqualität.

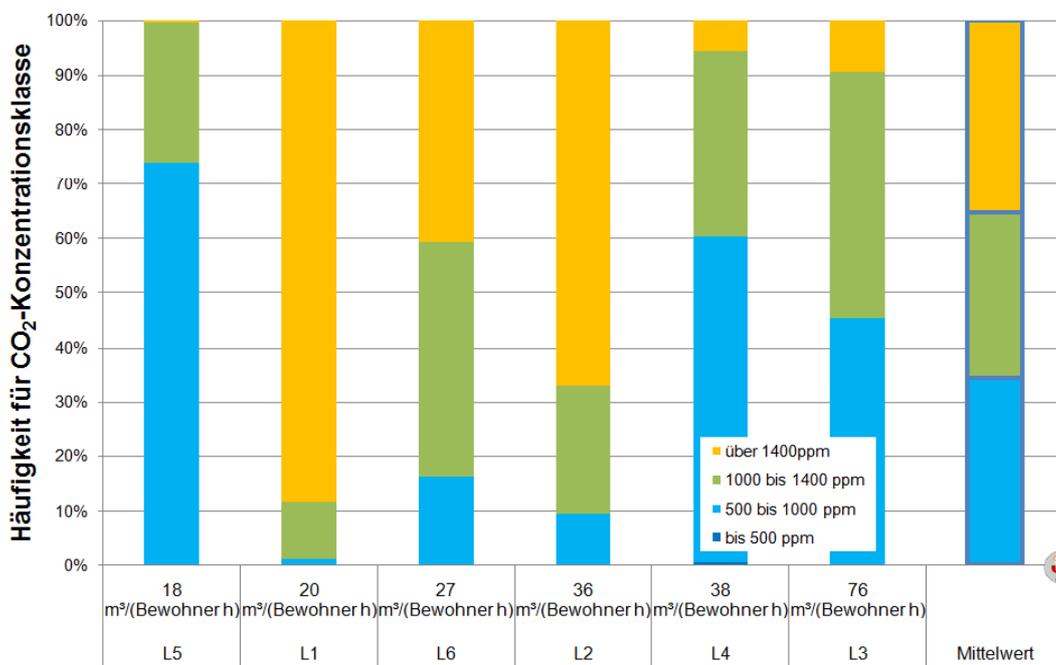


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung für CO₂-Konzentrationsklassen im Messzeitraum in den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung. Gegenüber den Wohnungen mit reiner Fensterlüftung nimmt die Häufigkeit von niedriger Luftqualität deutlich ab. Während 34% des Messzeitraums traten hier noch Zeiten mit niedriger Luftqualität auf.

Um den Einfluss der individuell unterschiedlichen Aufenthaltsdauern zu verringern, wurden zusätzlich die Verhältnisse während typischer Anwesenheitszeiten abends im Wohnzimmer und nachts im Schlafzimmer betrachtet. Die Häufigkeit geringer Raumluftqualität nimmt in diesen Zeiten nochmals zu. Im Durchschnitt über die untersuchten Schlafzimmer mit Fensterlüftung war während 81% dieser Zeitabschnitte die Luftqualität niedrig, in denen mit kontrollierter Lüftung noch zu 44%. In den Wohnungen mit Fensterlüftung ist die Luftqualität im Wohnzimmer gegenüber dem Schlafzimmer etwas besser (niedrige Luftqualität immer noch während 65% der angenommen typischen Anwesenheit). In den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung wären bessere Ergebnisse zu erwarten gewesen. Wie weiter oben bereits ausgeführt, waren in drei Wohnungen mit Lüftungsanlage die Volumenströme nicht korrekt eingeregelt. Diese Fehleinstellung konnte jedoch erst nach der Durchführung der Feldmessung verbessert werden.

Die grundsätzliche Problematik des Fensterlüftens zeigt sich vor allem in der geringen Luftqualität im Schlafzimmer. Lüften ist immer ein aktiver Prozess der Bewohner; sofern das Schlafzimmerfenster nachts nicht gekippt ist, findet die Lüfterneuerung erst am nächsten Morgen statt.

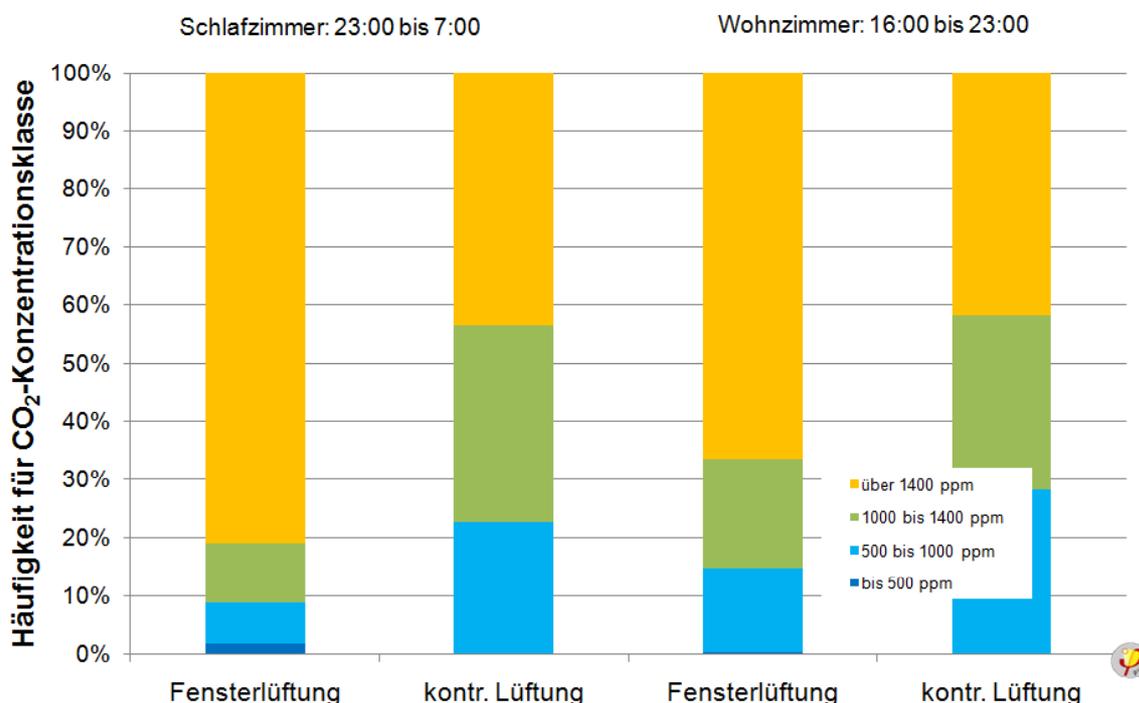


Abbildung 15: Luftqualität während üblicher Anwesenheitszeiten als Mittelwert der Wohnungen mit Fensterlüftung und kontrollierter Lüftung. Geringe Luftqualität tritt während diesen Zeitabschnitten nochmals häufiger auf, in den Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung im Vergleich zu jenen mit kontrollierter Lüftung mit rund der doppelten Häufigkeit.

7 Energetischer Einfluss

7.1 Einfluss des gemessenen Außenluftwechsels auf die Lüftungswärmeverluste

Bereits eine vorhergehende Untersuchung in [Peper/Feist 2008] deutete auf deutliche Unterschiede im Lüftungsverhalten in den Niedrigenergiewohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung im Vergleich zu den Passivhaus-Wohnungen mit kontrollierter Lüftung hin. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen diese Hypothese. Für den Untersuchungszeitraum beträgt der mittlere Luftwechsel in den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung $0,48 \text{ h}^{-1}$. In den Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung wurde der Außenluftwechsel mittels eines validierten Fensterlüftungsmodells bestimmt. Der mittlere Außenluftwechsel liegt hier nur zwischen $0,18$ und $0,33 \text{ h}^{-1}$. Der Unterschied im Lüftungsverhalten spiegelt sich auch in den Messungen zur Luftqualität wider (vgl. Abschnitt 6).

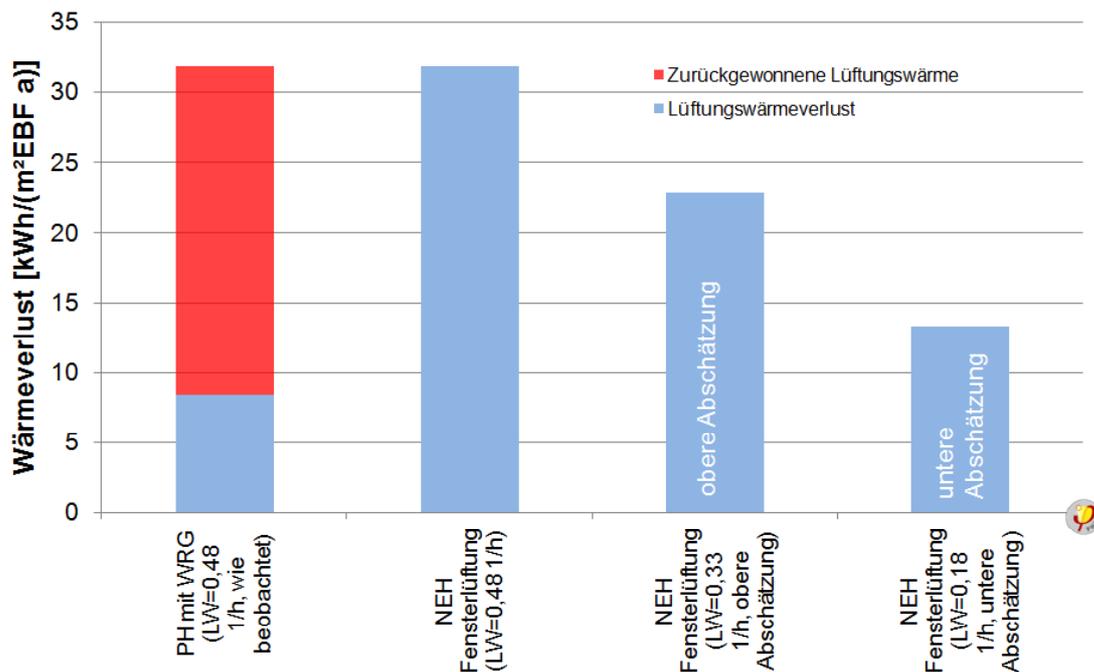


Abbildung 16: Mittlerer Lüftungswärmeverlust auf Basis der gemessenen Außenluftwechsel. In den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung verringert die Wärmerückgewinnung die Lüftungswärmeverluste um etwa 80% auf ca. $8,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}} \text{ a})$. Im direkten Vergleich mit den Wohnungen mit Fensterlüftung erscheint die erreichte Energieeinsparpotential der Wohnungslüftung jedoch geringer, da in diesen in deutlich geringerem und sogar unzureichendem Umfang gelüftet wurde. Werden hinsichtlich der Luftqualität vergleichbare Qualitäten angenommen und damit vergleichbare Luftwechsel, dann beträgt die durch die Wärmerückgewinnung im untersuchten Objekt erreichbare Energieeinsparung etwa $23,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}} \text{ a})$. Randbedingungen: Klimadaten Ludwigshafen.

Die kontrollierte Lüftung sorgt für eine kontinuierliche Lüfterneuerung, zudem verringert die im Zentralgerät integrierte Wärmerückgewinnung die Lüftungswärmeverluste. Im direkten Vergleich der untersuchten Objekte erscheint das Energieeinsparpotential der Lüftungsvarianten mit Wärmerückgewinnung verringert, da in den Niedrigenergie-Wohnungen deutlich weniger und wie die Messungen zur Luftqualität belegen, sogar in erheblich zu geringem Umfang gelüftet wurde. Abbildung 16 zeigt unter Ansatz der beobachteten Luftwechsel, eines Wärmebereitstellungsgrads der Wärmerückgewinnung von 80 % und eines Klimadatensatzes der Region die berechneten Lüftungswärmeverluste. Im konkreten Objekt ist im Vergleich zur Variante mit Fensterlüftung demnach eine Heizwärmeeinsparung von lediglich 5 bis 14 kWh/(m²_{Wohnfläche} a) zu erwarten. Der Vergleich ist jedoch in dieser Form unzulässig, da offensichtlich in den Wohnungen mit Fensterlüftung unzureichend gelüftet wurde. Werden vergleichbare Luftwechsel und damit vergleichbare Luftqualitäten zugrunde gelegt, beträgt das Einsparpotential durch die kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung ca. 80 % bzw. im betrachteten Objekt 23,4 kWh/(m²_{Wohnfläche} a).

7.2 Ergebnisse des energetischen Monitorings in der Heizperiode 2009/2010

Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Wärmeschutzmaßnahmen einschließlich der Wärmerückgewinnung sowie der Abgleich mit den Ergebnissen zur Fensterlüftung wurden im Messzeitraum auch Innen- und Außentemperaturen sowie Energieverbräuche erhoben. Der Messzeitraum vom 1.12.2009 bis zum 1.3.2010 entsprach dem Kernwinter und im Wesentlichen der Heizzeit des Passivhauses. Der Heizenergieverbrauch der Passivhaus-Sanierung betrug 13,6 kWh/(m²a) bei einer durchschnittlichen Raumtemperatur von 21,8 °C, die deutlich über der Standardrandbedingung von 20 °C entsprechend der Energiebilanz mit dem [PHPP] liegt.

Das Niedrigenergiehaus verbrauchte in diesem Zeitraum 24,4 kWh/m², allerdings umfasst der Kernwinter beim NEH nicht die gesamte Heizperiode. Die durchschnittliche Raumtemperatur lag 0,5 K unter der des Passivhauses, so dass das Niedrigenergiehaus von einem Querwärmestrom zwischen den Gebäuden profitiert. Vor allem aber ist die zu niedrige, hygienisch überwiegend nicht ausreichende Luftwechselrate für einen niedrigen Energieverbrauch verantwortlich. Allein durch ein Anheben des Luftwechsels auf das hygienisch notwendige Niveau würde der Verbrauch um 15 kWh/(m²a) ansteigen.

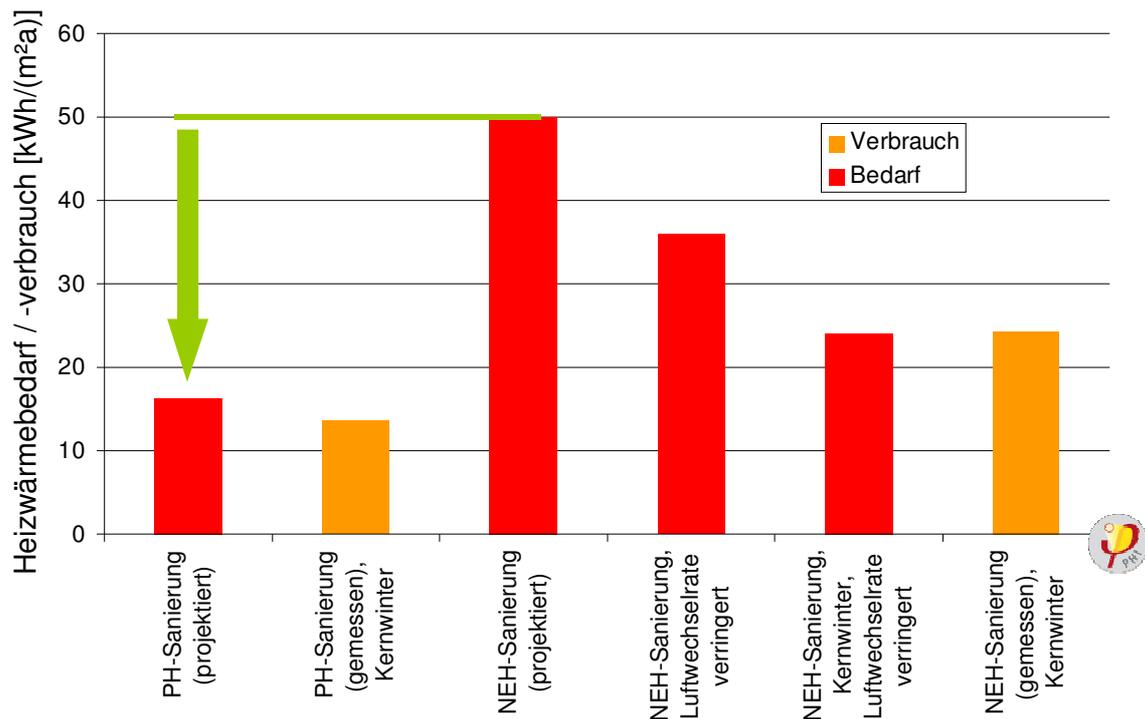


Abbildung 17: Gegenüberstellung der Ergebnisse zum Heizwärmeverbrauch und –bedarf in der Passivhaus- und der Niedrigenergiehaus-Sanierung. Wird der gegenüber der Heizperiode verkürzte Messzeitraum im Kernwinter und die beobachteten Außenluftwechsel angesetzt, dann sind der berechnete Bedarf und der tatsächliche Verbrauch in beiden Objekten in guter Übereinstimmung. Die Hypothese, dass die niedrigen beobachteten Energieverbräuche in der Niedrigenergiehaus-Sanierung auf sehr geringe Luftwechselraten zurückzuführen ist, konnte in diesem Modellprojekt bestätigt werden.

Dies ist in Abbildung 17 im Detail dargestellt: wird beim NEH der projektierte Heizwärmebedarf HWB_1 (projektiert) = (50 kWh/(m²a)) umgerechnet auf den hier gemessenen Luftwechsel im NEH, so reduziert sich der Wert auf HWB_2 (geringer Luftwechsel) = 36 kWh/(m²a). Rechnet man weiterhin nur die drei gemessenen Monate des Kernwinters an, die man aus den Monatsmittelwerten der Energiebilanzberechnung (PHPP) kennt, dann reduziert sich der Heizwärmebedarf auf HWB_3 (geringer Luftwechsel, Kernwinter) = 24 kWh/m² für die Monate Dezember bis Februar. Dieser Wert entspricht damit genau dem im Kernwinter tatsächlich gemessenen Verbrauch. Die Energiebilanz zu beiden Objekten ist im Anhang (Abschnitt 10.3) dokumentiert.

In der Gesamtbetrachtung liegt damit der Heizwärmebedarf dieses Gebäudeteils (NEH) bei ca. 50 kWh/(m²a) und wie projektiert auf Niedrigenergiehausniveau. Mit der Messung der Luftwechselrate und der parallel dazu durchgeführten Messung der Heizwärmeverbräuche konnten damit die Ergebnisse die in [Peper/Feist 2008] publiziert wurden, validiert werden.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Untersuchung konnten mittels Indikatorgas-Messungen Berechnungsansätze zum Fensterluftwechsel in konkreten Wohnungen eines sanierten Geschosswohnbaus überprüft werden. Die Messungen zeigen unter anderem, den maßgeblichen Einfluss von Zusatzeinrichtungen wie Rollläden und Vorhängen auf den resultierenden Luftaustausch.

In baugleichen Wohnungen einer Niedrigenergiehaus-Sanierung und einer Passivhaus-Sanierung mit kontrollierter Lüftung konnte im Kernwinter eine vergleichende Messung zum Außenluftwechsel durchgeführt werden. Über etwa 2 Monate konnte der Luftaustausch in 5 Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung und 6 Wohnungen mit kontrollierter Lüftung erfasst werden. Da es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich war alle relevanten Einflüsse in den Wohnungen mit Fensterlüftung zu erfassen, wurde anhand von plausiblen Annahmen eine obere und eine untere Abschätzung zum Außenluftwechsel bestimmt. Die Untersuchung zeigt, dass erwartungsgemäß der Außenluftwechsel in den Wohnungen mit Fensterlüftung von Wohnung zu Wohnung sehr unterschiedlich ausfällt. Der mittlere Außenluftwechsel in den Wohnungen mit geringster und intensivster Fensterlüftung unterscheidet sich etwa um einen Faktor 10. Zudem ist das Lüftungsverhalten auch in einer Wohnung von Tag zu Tag sehr verschieden. Als Mittelwert über die untersuchten Wohnungen mit Fensterlüftung ergibt sich im Messzeitraum ein Außenluftwechsel zwischen $0,18 \text{ h}^{-1}$ (untere Abschätzung) und $0,33 \text{ h}^{-1}$ (obere Abschätzung). Wird die Weihnachtszeit mit intensiverem Lüftungsverhalten heraus gerechnet, dann sinken die mittleren Außenluftwechsel nochmals um ca. 10 %. In den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung wurde ein mittlerer maschineller Außenluftwechsel von $0,48 \text{ h}^{-1}$ bestimmt.

Die Messungen zur Luftqualität belegen deutlich bessere Verhältnisse in den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung. In den Wohnungen mit ausschließlicher Fensterlüftung herrschte demnach während durchschnittlich 70% des Messzeitraums geringe Luftqualität (CO_2 -Konzentration über 1400 ppm), in den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung hingegen während 34% der Messzeit. Nochmals bedenklicher sind die Verhältnisse während typischer Anwesenheitszeiten z.B. nachts im Schlafzimmer. Die Zeiten mit geringer Luftqualität nehmen im Schlafzimmer auf 81% bei Fensterlüftung bzw. 44% bei kontrollierter Lüftung zu. In den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung wären eigentlich noch bessere Ergebnisse zur Luftqualität zu erwarten gewesen. Fehlfunktionen der Lüftung führten jedoch in einzelnen Wohnungen auf geringere Zuluftvolumenströme als in der Planung vorgesehen.

Frühere Untersuchungen in [Peper/Feist 2008] deuteten auf starke Unterschiede im Lüftungsverhalten in den untersuchten Wohnungen mit Fensterlüftung bzw. kontrollierter Lüftung hin. Die Vermutung stützt sich dabei vor allem auf geringere Differen-

zen im Heizenergieverbrauch der beiden Gebäudestandards, als dies a priori erstellte Energiebilanzmodelle erwarten ließen. Die erneute Messkampagne in diesen Objekten bestätigt die Vermutung der deutlich verschiedenen Außenluftwechsel. Werden die beobachteten Außenluftwechsel in den Wohnungen mit kontrollierter Lüftung zugrunde gelegt, dann verringert die Wärmerückgewinnung die Lüftungswärmeverluste im untersuchten Objekt um $23,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}} \text{ a})$ auf $8,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}} \text{ a})$ (Annahme: Klimadaten Ludwigshafen). Die berechneten Lüftungswärmeverluste in den Wohnungen mit Fensterlüftung betragen hingegen $13,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}} \text{ a})$ für die untere bzw. $22,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}} \text{ a})$ für die obere Abschätzung des Fensterluftwechsels. Die Messungen belegen, dass in den Wohnungen mit Fensterlüftung nicht nur weniger, sondern offensichtlich in zu geringem Umfang gelüftet wurde.

Veröffentlichte Fensteröffnungsdauern aus anderen Messbegleitungen [Reiß et al. 2001], [Hausladen et al. 2003], [Ebel/Kah 2003] legen die Vermutung nahe, dass die sogenannte natürliche Lüftung in der Praxis regelmäßig zu geringeren Außenluftwechseln führt, als dies Hygienevorschriften im Wohnbau fordern. Die Ergebnisse bestätigen die vielfach geäußerte Empfehlung, dass bei heutigen Bauweisen im Interesse gesunder Wohnbedingungen zumindest eine Abluftanlage für ausreichende Lüftung vorgesehen werden sollte (vgl. [Feist 2004]).

Das weitergeführte energetische Monitoring im Kernwinter 2009/2010 bestätigt, dass die Sanierung mit Passivhauskomponenten zu einem sehr geringen Energieverbrauch führt bei einer gleichzeitig guten Luftqualität. Im Zeitraum vom 1. Dezember bis 1. März, der im Wesentlichen die Passivhaus-Heizzeit umfasst, verbrauchte das Passivhaus (Sanierung mit Passivhaus-Komponenten) $13,6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ Heizwärme, das ist kompatibel mit der Projektierung (zuvor berechneter Heizwärmekennwert $16,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$).

Das Niedrigenergiehaus verbrauchte innerhalb dieser 3 Monate $24,4 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Der Luftwechsel erwies sich tatsächlich als deutlich geringer sowohl im Vergleich zur Projektierung als auch zum Passivhaus-Nachbargebäude, das bestätigten übereinstimmend das aufgezeichnete Öffnungsverhalten und der daraus geschätzte Luftaustausch als auch die Messergebnisse zur Luftqualität in den Wohnräumen. Mit einer Größenordnung von der Hälfte des Außenluftwechsels im Niedrigenergiehaus reduziert sich der projektierte Heizwärmebedarf von $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ auf $36 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der Heizwärmebedarf für den Kernwinter beträgt unter diesen Umständen $24 \text{ kWh}/\text{m}^2$ im Zeitraum 1. Dezember bis 1. März und erklärt damit dem gemessenen Verbrauch.

9 Literatur

- [Daler 1984] Daler, Reinhard; Hirsch, Erwin; Haberda, Franz; Knöbel, Uwe und Krüger, Werner: Bestandsaufnahme von Einrichtungen zur freien Lüftung im Wohnungsbau. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 84-028, Februar 1984.
- [DIN 1946-6] Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Beuth Verlag, Berlin 2009
- [DIN1946-2] Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Beuth-Verlag, Berlin Januar 1994
- [Ebel/Kah 2003] Ebel, W., Kah, O., Tracergasmessungen: Auswirkungen von Fensteröffnung bei kontrollierter Lüftung, 7. Passivhaus Tagung 2003, Hamburg.
- [EN 13779] Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme, Beuth Verlag, Berlin 2007.
- [Feist 2004] Feist, W., Einführung – Lüftung bei Bestandsanierung unverzichtbar, Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, 1. Auflage 2004.
- [Hausladen et al. 2003] Hausladen, G., Wimmer, A., Kaiser, J., Technikakzeptanz im Niedrigenergiehaus – Teil 1, HLH, Nr. 7, 2003.
- [Kah et al. 2005] Kah, O., Pfluger, R., Feist, W., Luftwechselraten in bewohnten sehr luftdichten Gebäuden mit kontrollierter Wohnlüftung / Monitoring in einem Passivhaus-Geschosswohnbau, Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen Beteiligung an der Arbeitsgruppe ‚Sustainable Solar Housing‘ der Internationalen Energie Agentur IEA, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [Maas 1995] Maas, A., Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, 1995.
- [Maas 1998] Maas, A., Schmidt, D. und Hauser, G., Experimentelle Untersuchungen zum Luftaustausch bei Querlüftung, wksb 42/98, S. 39-45.
- [Peper/Feist 2008] Peper, S., Feist, W., Gebäudesanierung „Passivhaus im

- Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim, Studie im Auftrag der GAG Ludwigshafen mit Fördermitteln des Landes Rheinland Pfalz, Passivhaus Institut, Darmstadt 2008.
- [PHPP 2007] Feist, W., Pfluger, R., Kaufmann, B., Schnieders, J., Kah, O., Passivhaus Projektierungs-Paket 2007, Planungstool für Passivhäuser, Passivhaus Institut Darmstadt, 2007
- [prEN ISO 12569] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden - Indikatorgasverfahren, Beuth Verlag, Berlin 2010.
- [Reiß et al. 2001] Reiß, J., Erhorn, H., Ohl, J., Klassierung des Nutzerverhaltens bei Fensterlüftung, HLH, Nr. 8, 2001.
- [Schnieders 2003] Schnieders, J., Lüftungsstrategien für den Sommer, Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, 1. Auflage 2004
- [Warren 1977] Warren, P.R., Ventilation through Openings on One Wall Only. In: Hoogendorn, C.J. und N.H. Afgan, Energy Conservation in Heating, Cooling and Ventilating Buildings, Heat and Mass Transfer Techniques and Alternatives, Vol. 1, Belgrad, Hemisphere Publishing, 1977.

10 Anhang

10.1 Indikatorgas-Messung

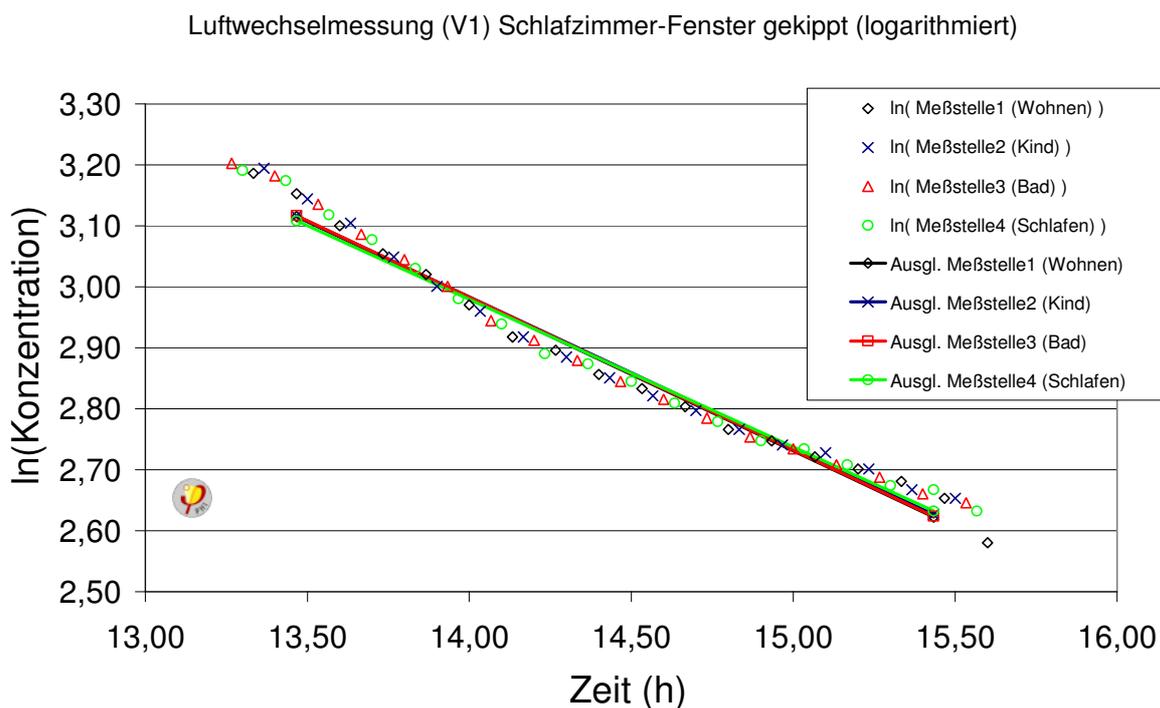
Indikatorgas-Messgerät

Gemessen wurden die Konzentrationsverläufe während der Feldmessungen mit einem mobilen Gaschromatographen. Das Mess-System genügt dabei den Anforderungen der betreffenden Richtlinien (vgl. [VDI 4300/7] und [DIN EN ISO 12569]).

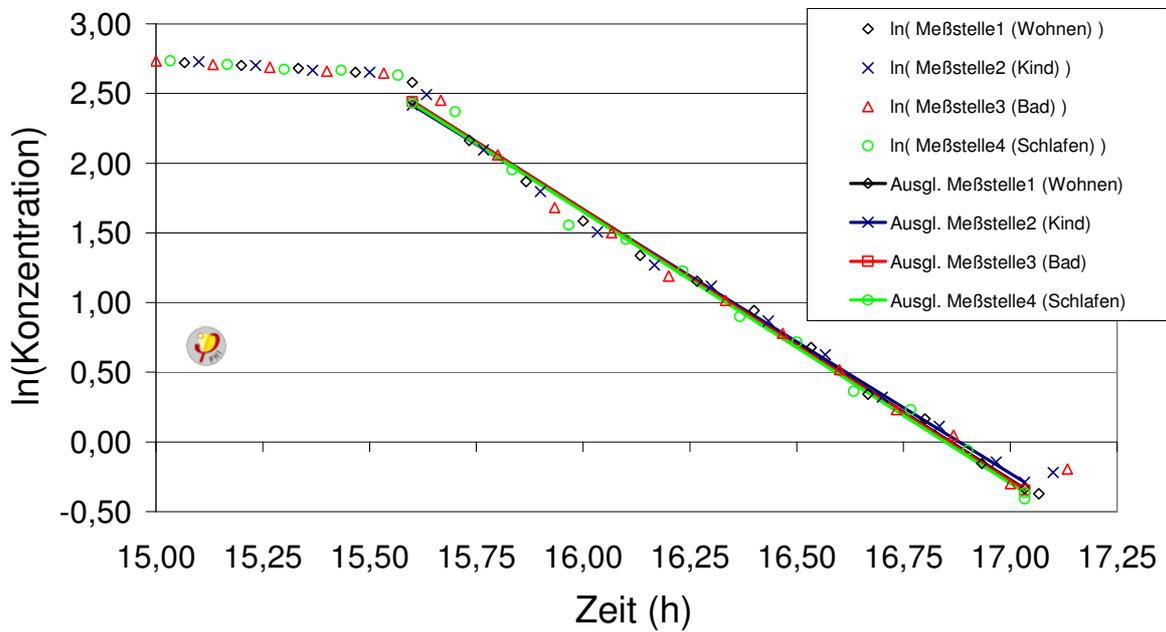
Messgerät: Autotrac 101, Fa. Lagus Applied Technology
 Messverfahren: Gaschromatograph mit Elektroneneinfang-Detektor
 Messbereich: 0,05 bis 100 ppb (SF6) (linear)
 Nachweisgrenze: 5 ppt (SF6)
 Genauigkeit: 3 % vom Messwert
 Messintervall: 90 sec

Indikatorgas-Konzentrationsverläufe

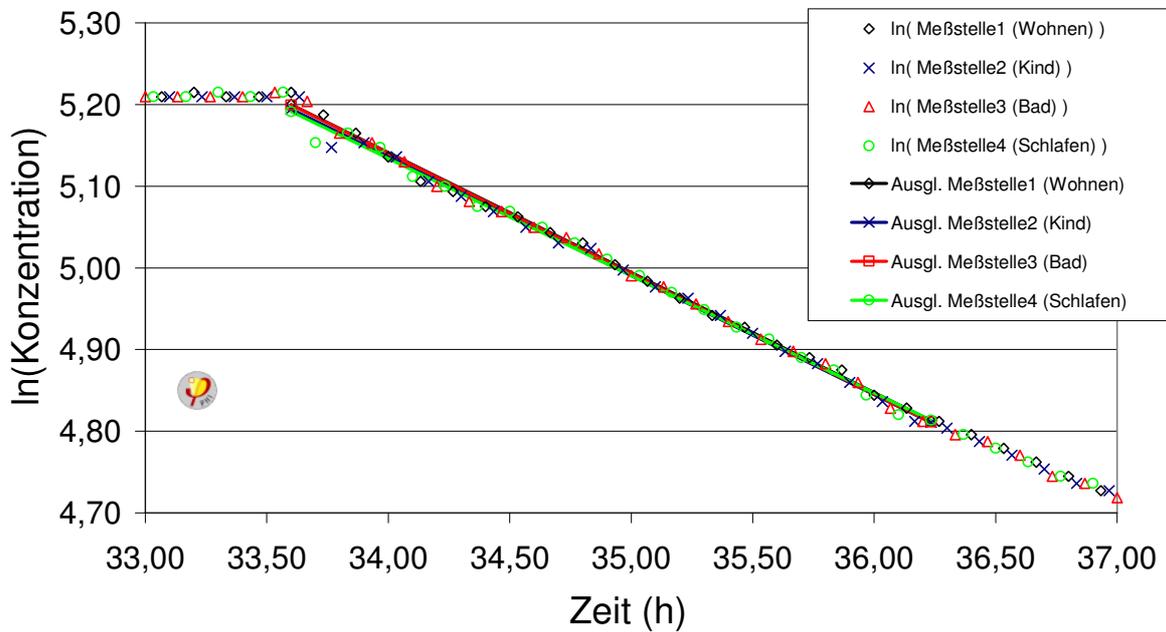
Die folgenden Abbildungen zeigen den exponentiellen Abfall der Indikatorgas-Konzentration und belegt deren räumliche Homogenität mit der Messung an 4 verschiedenen Punkten. Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden durch die Logarithmen der Konzentrationen lässt sich der Außenluftwechsel bestimmen.



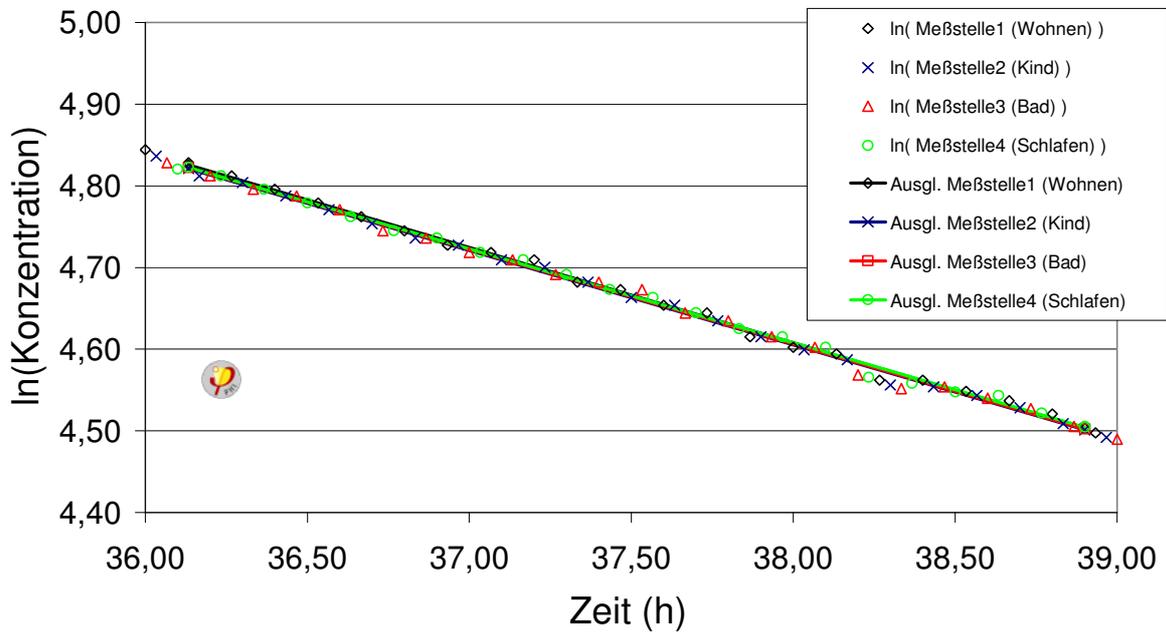
Luftwechselformung (V2) Schlafzimmer-Fenster aufgedreht (logarithmiert)



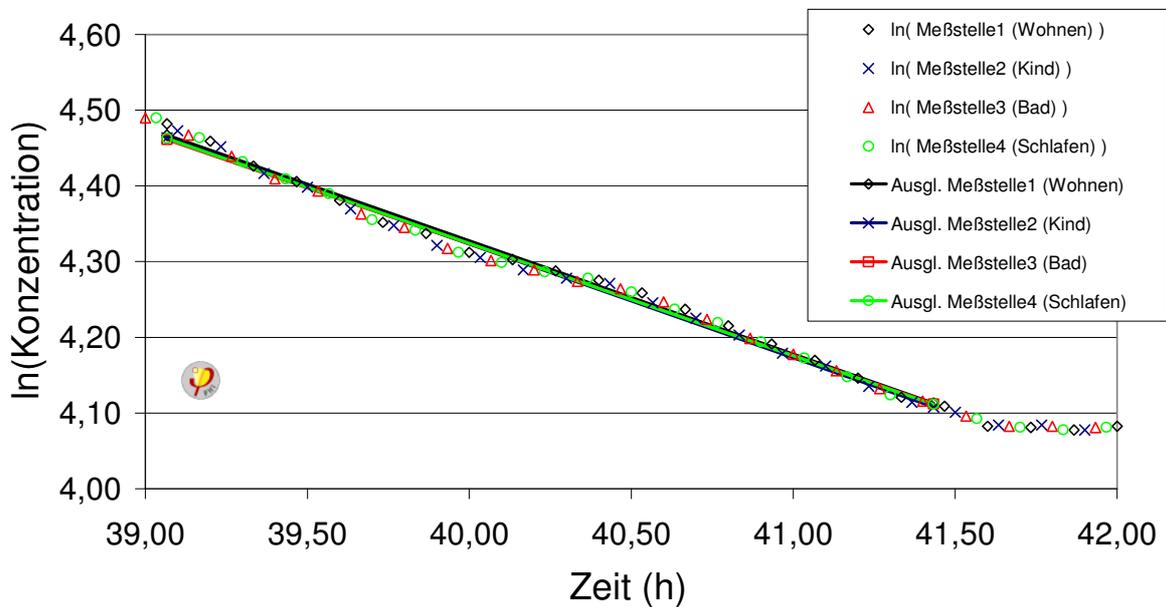
Luftwechselformung (V3) Schlafzimmer-Fenster gekippt, Rolläden bis auf 30 cm geschlossen geschlossen (logarithmiert)



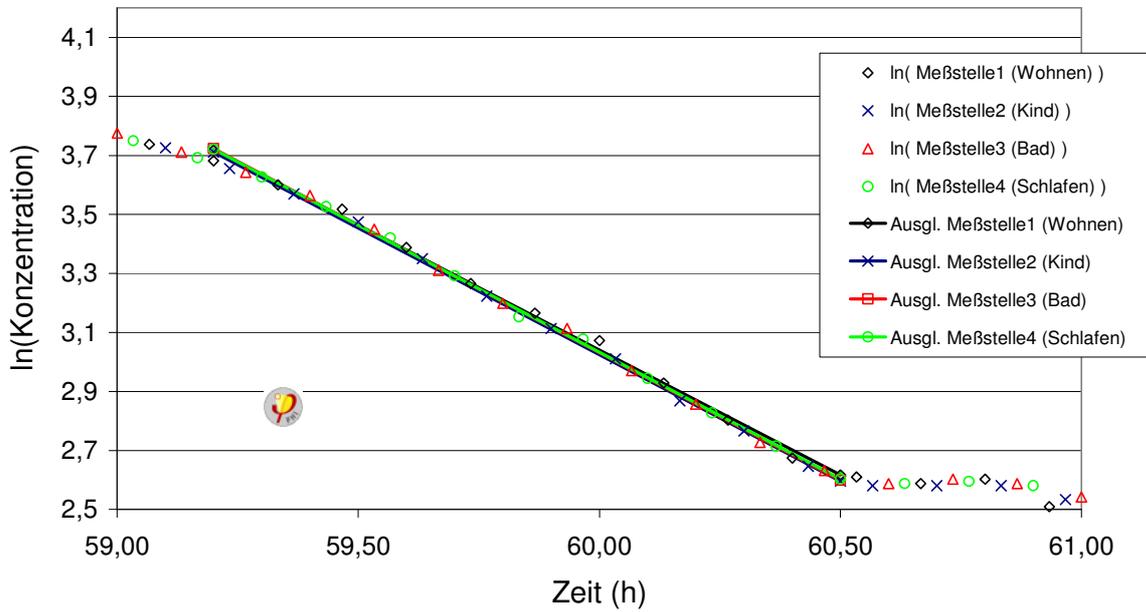
Luftwechselformung (V4) Schlafzimmer-Fenster gekippt, Rolladen bis auf Spalte geschlossen(logarithmiert)



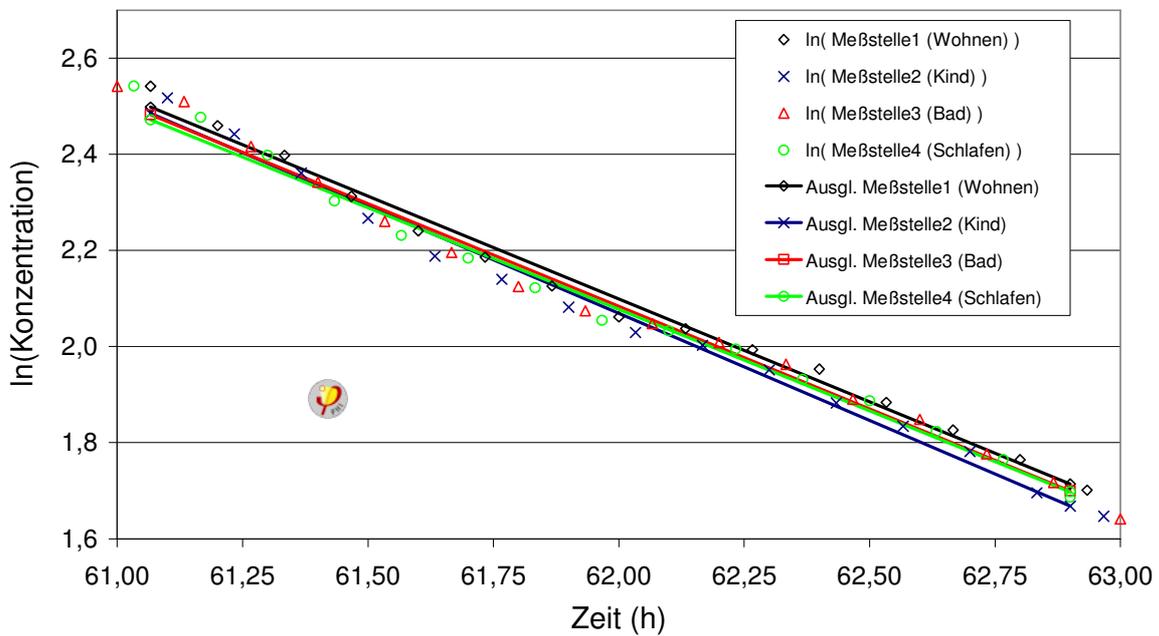
Luftwechselformung (V5) Schlafzimmer-Fenster gekippt, mit Gardine (logarithmiert)



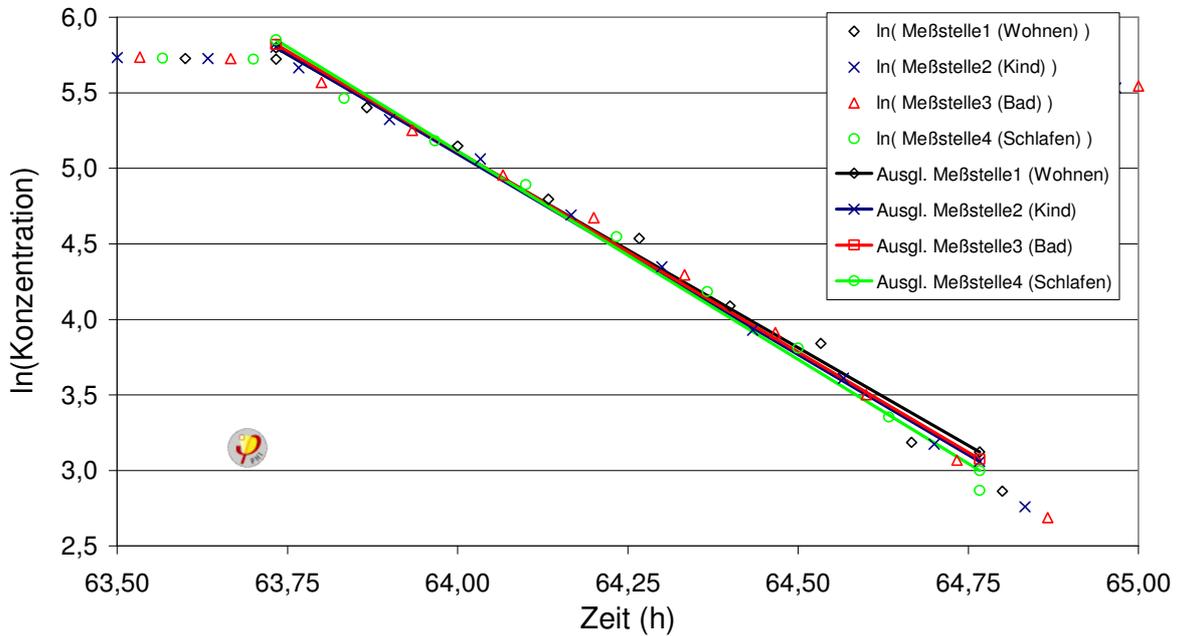
Luftwechselformung (V6) Schlaf- und Kinderzimmer-Fenster gekippt, einseitige Lüftung (logarithmiert)



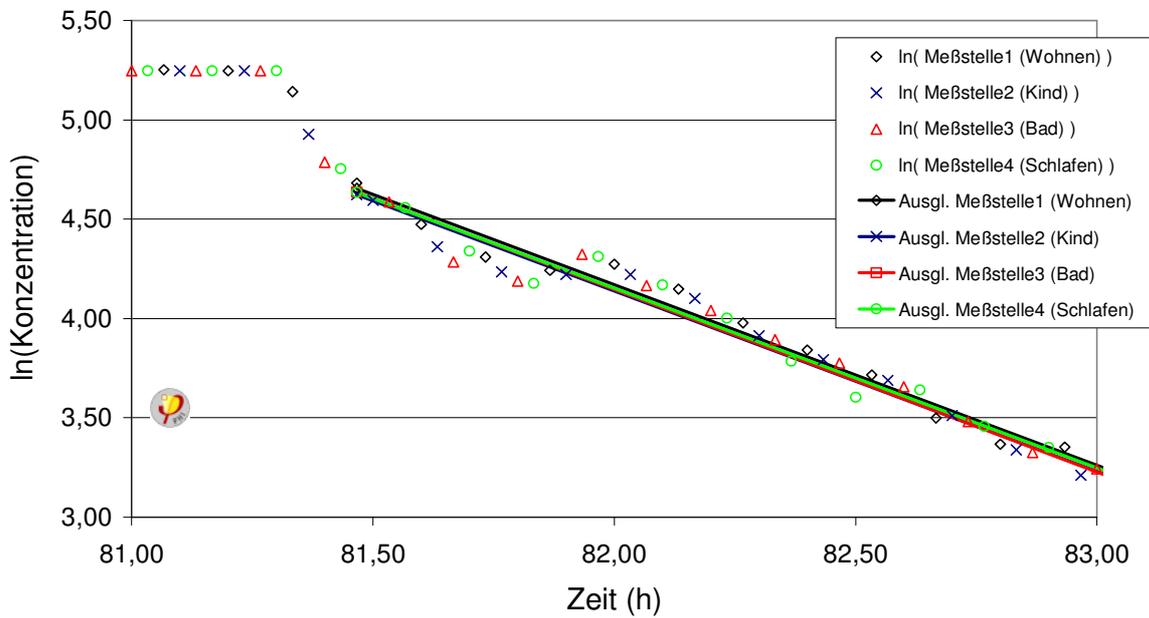
Luftwechselformung (V7) Badfenster gekippt (logarithmiert)

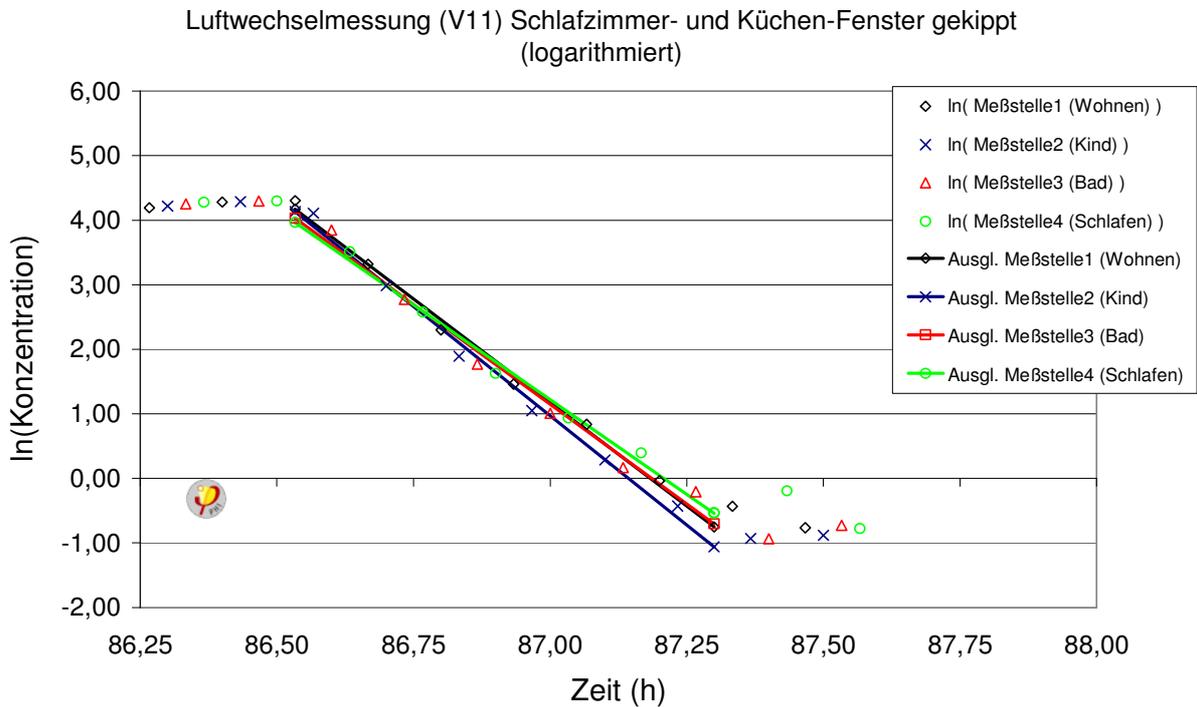
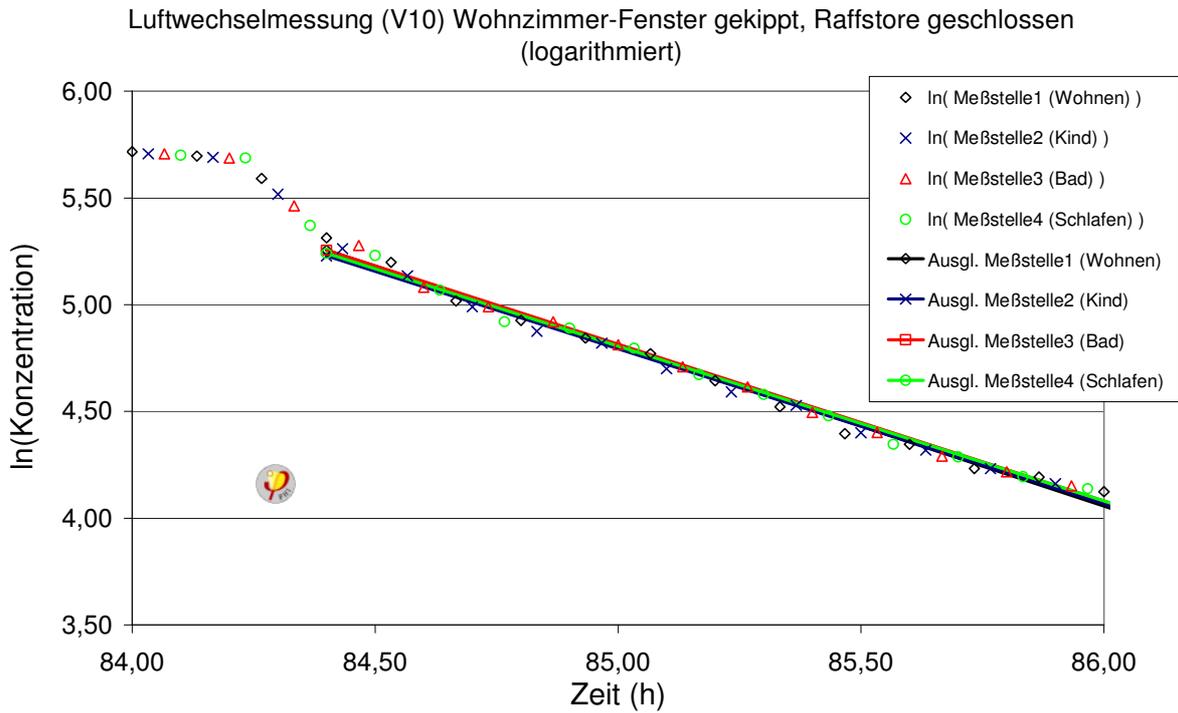


Luftwechselfmessung (V8) Badfenster aufgedreht (logarithmiert)



Luftwechselfmessung (V9) Wohnzimmer-Fenster gekippt (logarithmiert)





10.2 Tagesmittlere Volumenströme in den untersuchten Wohnungen

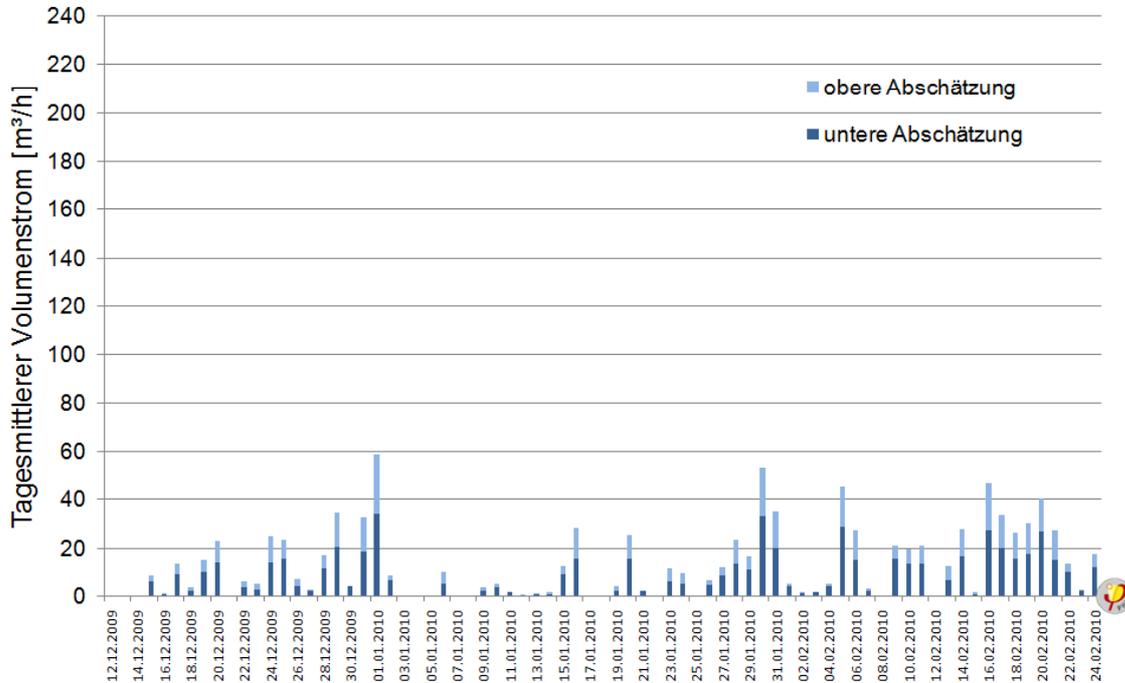


Abbildung 18: Tagesmittlerer Volumenstrom durch Fensterlüftung in Wohnung 1F.

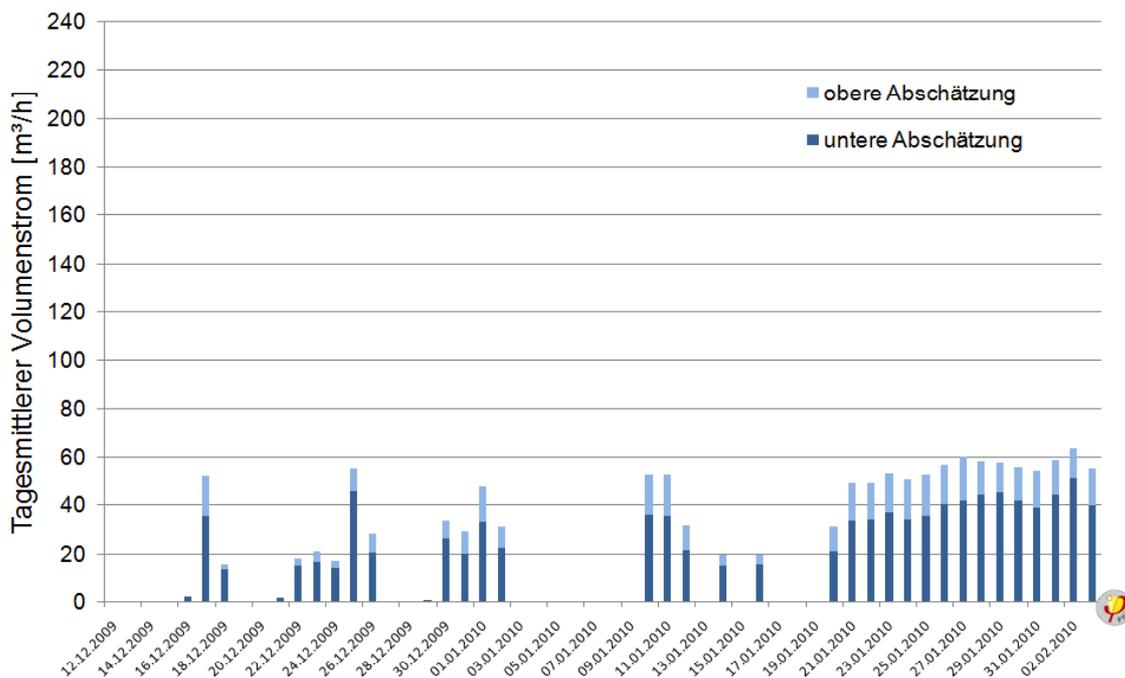


Abbildung 19: Tagesmittlerer Volumenstrom durch Fensterlüftung in Wohnung 2F.

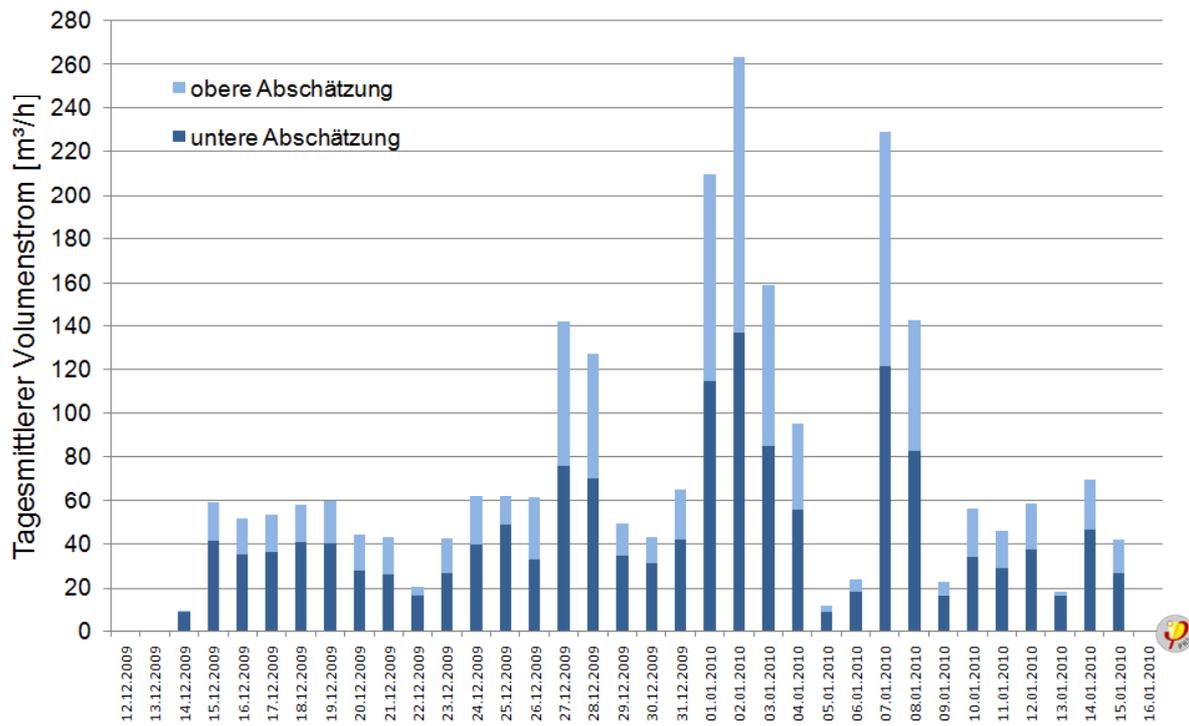


Abbildung 20: Tagesmittlerer Volumenstrom durch Fensterlüftung in Wohnung 4F.

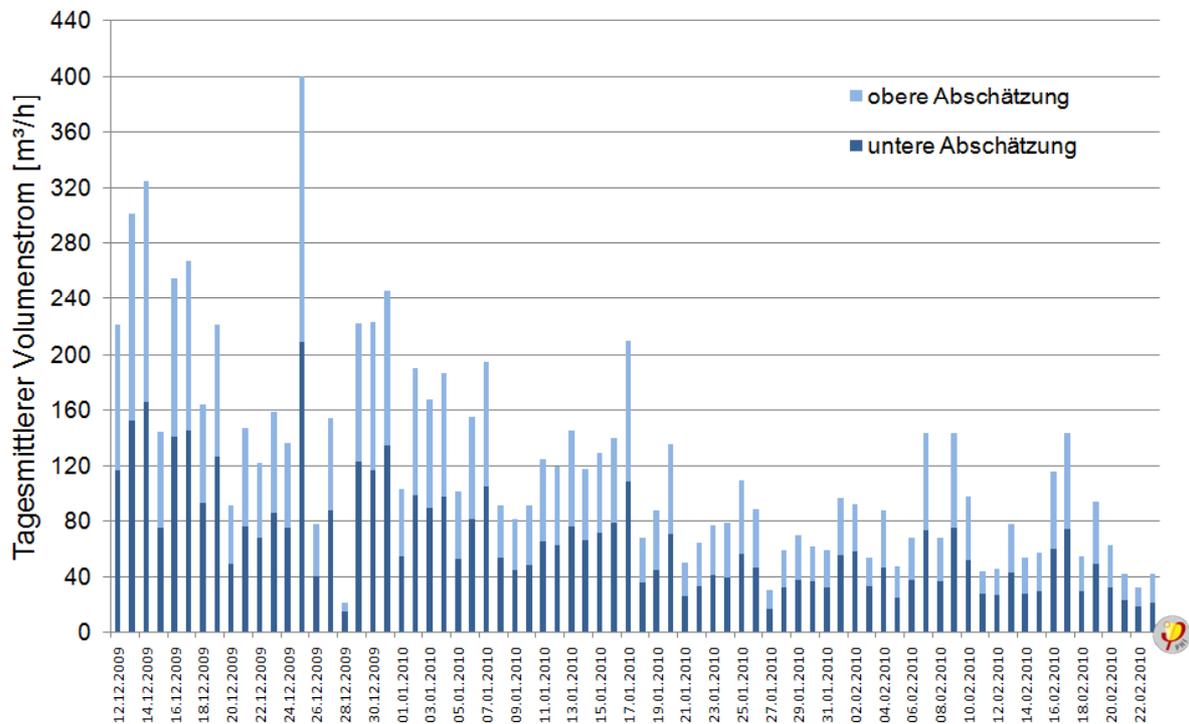


Abbildung 21: Tagesmittlerer Volumenstrom durch Fensterlüftung in Wohnung 5F.

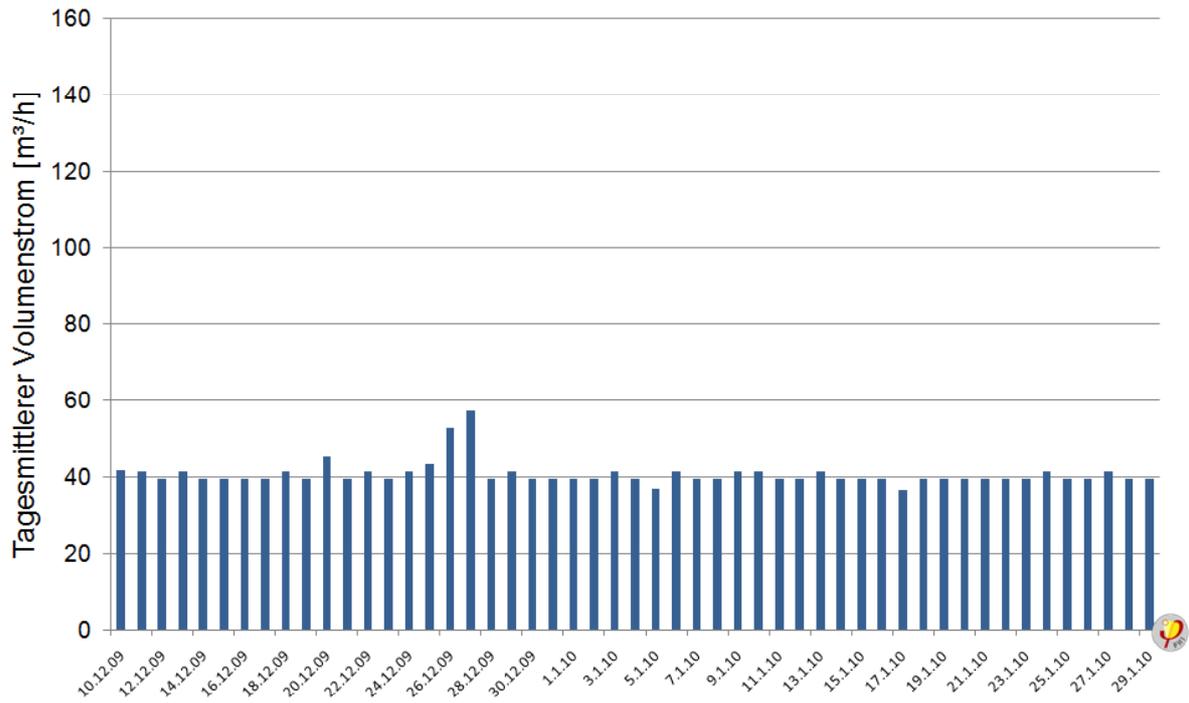


Abbildung 22: Tagesmittlerer Volumenstrom der kontrollierten Lüftung in Wohnung L1.

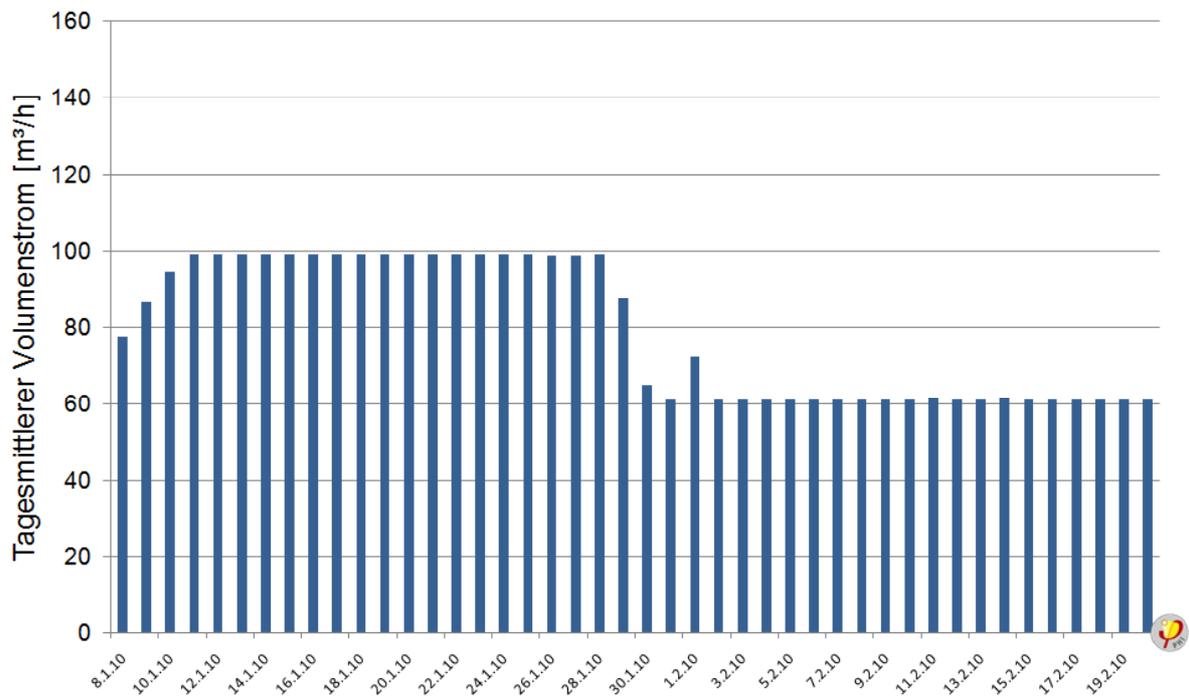


Abbildung 23: Tagesmittlerer Volumenstrom der kontrollierten Lüftung in Wohnung L4.

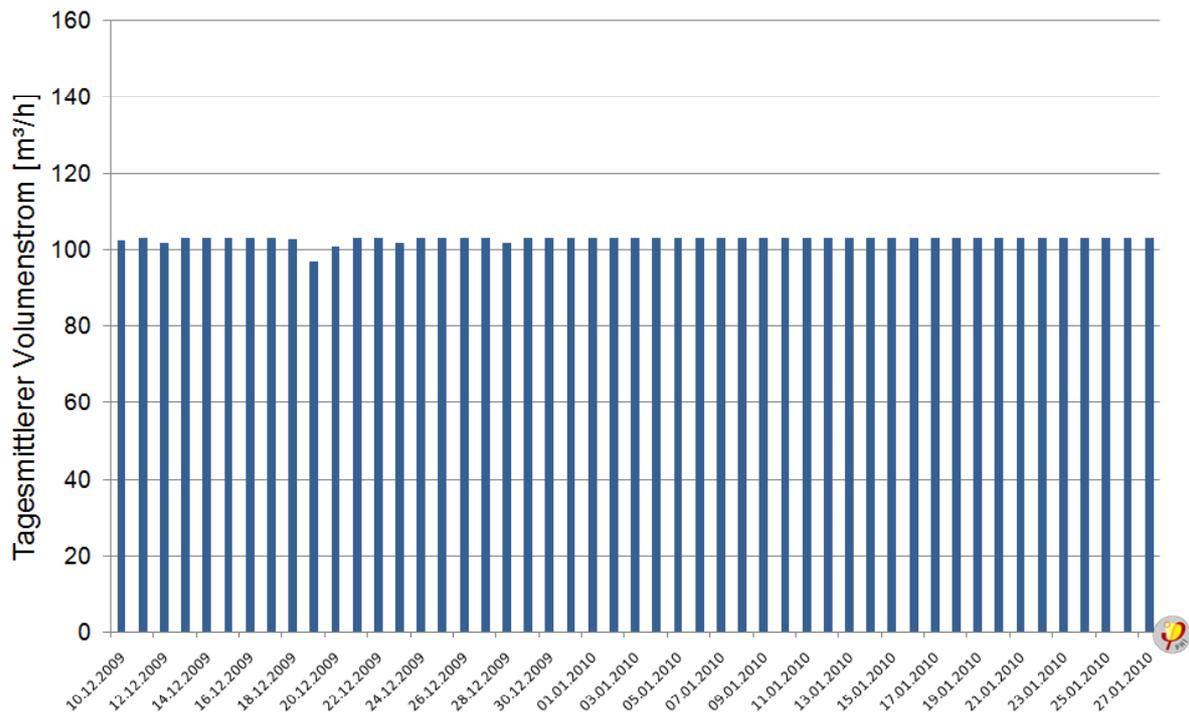


Abbildung 24: Tagesmittlerer Volumenstrom der kontrollierten Lüftung in Wohnung L5.

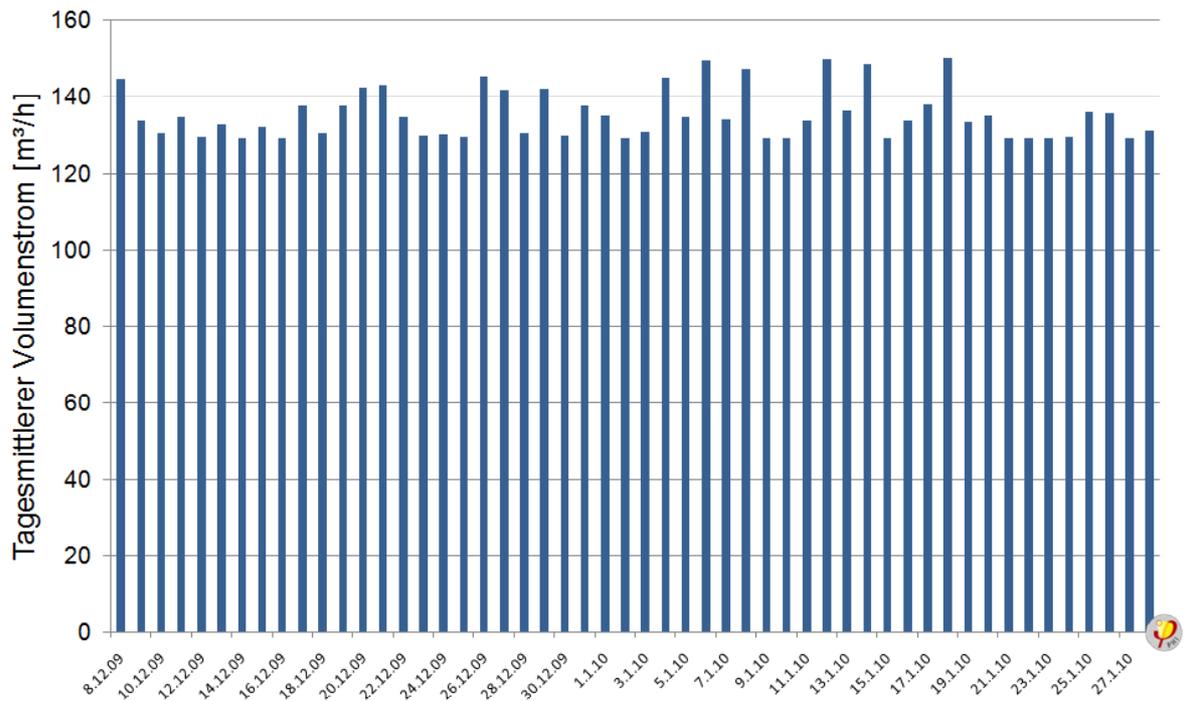


Abbildung 25: Tagesmittlerer Volumenstrom der kontrollierten Lüftung in Wohnung L6.

10.3 Energetische Kennwerte der Sanierungsprojekte

Die folgenden Abbildungen zeigen die Nachweisblätter für das Niedrigenergiehaus und für das Passivhaus.

Unter Standardbedingungen wurde mit dem Passivhaus-Projektierungspaket [PHPP] ein Heizwärmebedarf von 16,2 kWh/(m²a) und für das Niedrigenergiehaus 50,3 kWh/(m²a) berechnet. Bezugsgröße ist die beheizte Wohnfläche.

Passivhaus Nachweis



Objekt:	Passivhaus im Bestand; Mundenheim SO		
Standort und Klima:	Ludwigshafen am Rhein		Mannheim
Straße:	Hooheoloogstraße lund 3		
PLZ/Ort:	67065 Ludwigshafen-Mundenheim		
Land:	Deutschland/ RP		
Objekt-Typ:	Geschoßwohnungsbau		
Bauherr(en):	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Architekt:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Haustechnik:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Baujahr:	2004		
Zahl WE:	12		
Umbautes Volumen V_e :	3000,0	m ³	
Personenzahl:	24,0		
Innentemperatur:	20,0	°C	
Interne Wärmequellen:	2,1	W/m ²	

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	750,24	m ²	
Verwendet:	Jahresverfahren		PH-Zertifikat: Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	16,15	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a) <input type="checkbox"/>
Drucktest-Ergebnis:	0,60	h⁻¹	0,6 h ⁻¹ <input checked="" type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	111	kWh/(m²a)	120 kWh/(m ² a) <input checked="" type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	45	kWh/(m²a)	
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:	53	kWh/(m²a)	
Heizlast:	13,5	W/m²	

Übertemperaturhäufigkeit: **0,0%** über **25** °C

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV			
Nutzfläche nach EnEV:	960,0	m ²	
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	35,2	kWh/(m²a)	40 kWh/(m²a) <input checked="" type="checkbox"/>

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima: **Mannheim (Region 12)**
 Objekt: **Passivhaus im Bestand; Mundenheim SO**
 Standort: **Ludwigshafen am Rhein**

Innentemperatur: **20,0** °C
 Gebäudetyp/Nutzung: **Geschoßwohnungsbau**
 Energiebezugsfläche A_{EB}: **750,2** m²
 Standard-Personenbelegung: **24,0** Pers pro m² Energiebezugsfläche

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Temp.-faktor f _t	G _t kWh/a	kWh/a	Energiebezugsfläche
1. Außenwand Außenluft	A	511,4	0,100	1,00	73,5	3772	
2. Außenwand Erdreich	B	24,0	0,150	0,49	73,5	129	
3. Dach/Decken Außenluft	D	392,4	0,115	1,00	73,5	3325	
4. Bodenplatte	B	362,9	0,218	0,49	73,5	2834	
5.	A			1,00			
6.	A			1,00			
7.	X			1,00			
8. Fenster	A	193,5	0,862	1,00	73,5	12255	
9. Außentür	A			1,00			
10. Wbrücken außen (Länge/m)	A	352,9	0,054	1,00	73,5	1389	
11. Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P			0,49			
12. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	109,6	0,086	0,49	73,5	337	
Summe aller Hüllflächen		1484,3					

Transmissionswärmeverluste Q_T

Summe **24601** kWh/a **32,8** kWh/(m²a)

Lüftungsanlage:

effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnung
 Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmeübertr.

wirksames Luftvolumen V_L

η_{eff} **80%**

η_{EWT} **0%**

energetisch wirksamer Luftwechsel n_L

n_{L,Anlage} 1/h

Φ_{WRG}

n_{L,Rest} 1/h

0,443

0,80

0,048

0,138

V_L m³

n_L 1/h

c_{Luft} Wh/(m³K)

G_t kWh/a

1876

0,138

0,33

73,5

6293

8,4 kWh/(m²a)

Lüftungswärmeverluste Q_L

Q_T kWh/a

Q_L kWh/a

Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenendauslenkung

24601

6293

1,0

30894

41,2 kWh/(m²a)

Summe Wärmeverluste Q_v

Ausrichtung der Fläche

Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster

g-Wert (senkr. Einstr.)

Fläche m²

Globalstr. Heizzeit kWh/(m²a)

kWh/a

1. Ost	0,40	0,00	0,00	207	0
2. Süd	0,43	0,49	146,44	352	10904
3. West	0,40	0,00	0,00	213	0
4. Nord	0,29	0,51	47,08	131	920
5. Horizontal	0,40	0,00	0,00	318	0

Summe **11824** kWh/a **15,8** kWh/(m²a)

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S

Interne Wärmequellen Q_i

kh/d

Länge Heizzeit d/a

spezif. Leistung q_l W/m²

A_{EB} m²

kWh/a

kWh/(m²a)

0,024

205

2,10

750,2

7733

10,3

Freie Wärme Q_F

Q_S + Q_i = **19557** kWh/a

26,1 kWh/(m²a)

Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten

Q_F / Q_v = **0,63**

Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G

(1 - (Q_F / Q_v)⁵) / (1 - (Q_F / Q_v)⁶) = **96%**

Wärmegewinne Q_G

η_G * Q_F = **18777** kWh/a

25,0 kWh/(m²a)

Heizwärmebedarf Q_H

Q_v - Q_G = **12116** kWh/a

16 kWh/(m²a)

Passivhaus Nachweis



Objekt:	Passivhaus im Bestand; Mundenheim SO		
Standort und Klima:	Ludwigshafen am Rhein		Mannheim
Straße:	Hooheoogstraße 5 und 7		
PLZ/Ort:	67065 Ludwigshafen-Mundenheim		
Land:	Deutschland/ RP		
Objekt-Typ:	Geschoßwohnungsbau		
Bauherr(en):	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Architekt:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Haustechnik:	GAG Ludwigshafen am Rhein		
Straße:	Wittelsbachstraße 32		
PLZ/Ort:	67061 Ludwigshafen am Rhein		
Baujahr:	2004		
Zahl WE:	12		
Umbautes Volumen V _e :	3000,0	m ³	
Personenzahl:	24,0		
Innentemperatur:	20,0	°C	
Interne Wärmequellen:	2,1	W/m ²	

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	750,24	m ²	
Verwendet:	Jahresverfahren		PH-Zertifikat: Erfüllt?
Energiekennwert Heizwärme:	50,28	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a) <input type="checkbox"/>
Drucktest-Ergebnis:	0,60	h⁻¹	0,6 h ⁻¹ <input type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	137	kWh/(m²a)	120 kWh/(m ² a) <input type="checkbox"/>
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	71	kWh/(m²a)	
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:	53	kWh/(m²a)	
Heizlast:	25,1	W/m²	

Übertemperaturhäufigkeit: **0,0%** über **25** °C

Kennwert mit Bezug auf Nutzfläche nach EnEV			
Nutzfläche nach EnEV:	960,0	m ²	
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	55,8	kWh/(m²a)	40 kWh/(m²a) <input type="checkbox"/>
			Anforderung: Erfüllt?

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima:	Mannheim (Region 12)	Innentemperatur:	20,0 °C
Objekt:	Passivhaus im Bestand; Mundenheim SO	Gebäudetyp/Nutzung:	Geschoßwohnungsbau
Standort:	Ludwigshafen am Rhein	Energiebezugsfläche A _{EB} :	750,2 m ²
		Standard-Personenbelegung:	24,0 Pers pro m ²

Bauteile	Temperaturzone	Fläche m ²	U-Wert W/(m ² K)	Temp.-faktor f _t	G _t kWh/a	kWh/a	Energiebezugsfläche kWh/(m ² a)
1. Außenwand Außenluft	A	511,4	0,238	1,00	73,5	8930	
2. Außenwand Erdreich	B	24,0	0,227	0,45	73,5	179	
3. Dach/Decken Außenluft	D	392,4	0,160	1,00	73,5	4597	
4. Bodenplatte	B	352,0	0,542	0,45	73,5	6251	
5.	A			1,00			
6.	A			1,00			
7. Decke Übergaberaum Haus Nr	X	23,0	0,558	0,00	73,5	0	0,0
8. Fenster	A	193,5	1,320	1,00	73,5	18767	
9. Außentür	A			1,00			
10. Wbrücken außen (Länge/m)	A	352,9	0,054	1,00	73,5	1389	
11. Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P			0,45			
12. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	111,6	0,084	0,45	73,5	308	
Summe aller Hüllflächen		1496,3					

Transmissionswärmeverluste Q_T Summe **40981 kWh/a** **54,6 kWh/(m²a)**

Lüftungsanlage:

wirksames Luftvolumen V_L = A_{EB} m² * lichte Raumhöhe m = 750,2 * 2,50 = 1875,6 m³

effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnung η_{eff} = 0%

Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmeübertr. η_{EWT} = 0%

energetisch wirksamer Luftwechsel n_L = n_{L-Anlage} (1 - Φ_{WRG}) + n_{L,Rest} = 0,443 (1 - 0,00) + 0,000 = 0,443 1/h

Lüftungswärmeverluste Q_L V_L m³ * n_L 1/h * c_{Luft} Wh/(m³K) * G_t kWh/a = 1876 * 0,443 * 0,33 * 73,5 = 20158 kWh/a **26,9 kWh/(m²a)**

Summe Wärmeverluste Q_V (Q_T + Q_L) * Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenendauslenkung = (40981 + 20158) * 1,0 = 61139 kWh/a **81,5 kWh/(m²a)**

Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor vgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Einstr.)	Fläche m ²	Globalstr. Heizzeit kWh/(m ² a)	kWh/a	Energiebezugsfläche kWh/(m ² a)
1. Ost	0,40	0,00	0,00	207	0	
2. Süd	0,47	0,59	146,44	352	14378	
3. West	0,40	0,00	0,00	213	0	
4. Nord	0,37	0,63	47,08	131	1425	
5. Horizontal	0,40	0,00	0,00	318	0	
Summe					15803	21,1

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S Summe **15803 kWh/a** **21,1 kWh/(m²a)**

Interne Wärmequellen Q_I kh/d * Länge Heizzeit d/a * spezif. Leistung q-l W/m² * A_{EB} m² = 0,024 * 205 * 2,10 * 750,2 = 7733 kWh/a **10,3 kWh/(m²a)**

Freie Wärme Q_F Q_S + Q_I = 23537 kWh/a **31,4 kWh/(m²a)**

Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten Q_F / Q_V = 0,38

Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G (1 - (Q_F / Q_V)⁵) / (1 - (Q_F / Q_V)⁶) = 99%

Wärmegewinne Q_G η_G * Q_F = 23414 kWh/a **31,2 kWh/(m²a)**

Heizwärmebedarf Q_H Q_V - Q_G = 37725 kWh/a **50 kWh/(m²a)**