

Luftwechselraten in bewohnten, sehr luftdichten Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung / Monitoring in einem Passivhaus- Geschosswohnbau

Endbericht

IEA SHC TASK 28 / ECBACS ANNEX 38

Dipl. Phys. Oliver Kah

Dr. Rainer Pfluger

Dr. Wolfgang Feist

Juni 2005

Luftwechselraten in bewohnten, sehr luftdichten Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung / Monitoring in einem Passivhaus- Geschosswohnbau

Endbericht

IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38

**Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen
Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar
Housing' der Internationalen Energie Agentur IEA**

Subtask D: Monitoring und Evaluierung

<p>Autoren: Dipl. Phys. Oliver Kah Dr. Rainer Pfluger Dr. Wolfgang Feist</p> <p>Herausgeber: Passivhaus Institut Rheinstraße 44/46 D-64283 Darmstadt</p> <p>Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: mail@passiv.de internet: www.passiv.de</p> <p>Darmstadt Juni 2005</p>	<p>Dieser Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojekts IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38 als nationale Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar Housing' der Internationalen Energieagentur IEA</p> <p>Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Forschungsarbeiten im Subtask C: Monitoring und Evaluierung</p> <p>Die Nationalen Forschungsarbeiten wurden teilweise finanziert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH (BEO).</p> <p>Danksagung: Besonderer Dank gilt den Bewohnern der untersuchten Wohnungen in Kassel und des Reihenhauses in Hannover für die Mitarbeit und die aufgebrachte Geduld während der Messtermine.</p>
---	---

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
2	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	4
3	Messtechnische Bestimmung des Luftwechsels	5
3.1	Forschungsziel	5
3.2	Messkonzept und Messtechnik	6
3.2.1	Indikatorgas-Messmethode	7
3.2.2	Indikatorgas	8
3.2.3	Indikatorgas-Messgerät	9
3.2.4	Auswertungsmethode	9
3.2.5	Fehlerbetrachtung zur Indikatorgas-Messung	12
3.2.6	Alternatives Auswertungsverfahren	14
3.3	Durchführung der Messungen im Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe	15
3.3.1	Lage und Anordnung der untersuchten Wohneinheiten	15
3.3.2	Randbedingungen und meteorologische Daten	17
3.3.3	Raumlufffeuchte	20
3.3.4	CO ₂ -Konzentration	21
3.3.5	Volumenstrommessung maschinelle Lüftung	26
3.3.6	Auswertung der Daten zu den Fensterstellungen	31
3.3.7	Beschreibung der Indikatorgas-Messung	33
3.3.8	Messaufbau der Indikatorgas-Messung	33
3.3.9	Referenzmessung zur Indikatorgas-Messung	35
3.3.10	Gleichmäßige Verteilung des Indikators in den Wohnungen	36
3.3.11	Verfahren zur Bestimmung des Fensterluftwechsels	38
3.3.12	Auswertung der Messergebnisse	39
3.3.13	Registrierung der Fensterlüftungsereignisse: Vergleich Fensterkontakte – Indikatorgas-Messung	43
3.3.14	Fensterlüftung: Tag- und Nachtlüfter	45
3.4	Durchführung der Messungen in der Reihenhaussiedlung Hannover Kronsberg	45
3.4.1	Grundrisse der untersuchten Wohneinheit	45
3.4.2	Randbedingungen und Klimadaten	46
3.4.3	Raumlufffeuchte	49
3.4.4	CO ₂ -Konzentrationen	49
3.4.5	Volumenstrommessung maschinelle Lüftung	51
3.4.6	Auswertung der Daten zu den Fensterstellungen	52
3.4.7	Beschreibung der Indikatorgas-Messung	53
3.4.8	Messaufbau der Indikatorgas-Messung	54
3.4.9	Referenzmessung zur Indikatorgas-Messung	56
3.4.10	Verfahren zur Bestimmung des Fensterluftwechsels	57
3.4.11	Auswertung der Messergebnisse	57
3.4.12	Fensterlüftung: Tag- und Nachtlüfter	60
3.4.13	Leckageströme am Lüftungsgerät	60

3.5	Übergreifende Auswertung der Messergebnisse	60
3.5.1	Abschätzung der Luftwechselraten bei Fensteröffnung	60
3.5.2	Einfluss der Witterung auf das Lüftungsverhalten	63
3.5.3	Vergleich der Fensteröffnungsdauern mit Literaturwerten	66
3.5.4	Einfluss der Disbalance der Lüftungsanlagen	68
3.5.5	Einfluss von nächtlicher Fensterlüftung am Beispiel des Reihenhauses	68
3.5.6	Zusammenstellung der mittleren Außenluftwechsel	69
3.5.7	Vergleich der zusätzlichen Luftwechsel mit der Projektierung	70
3.5.8	Energetische Auswirkungen des zusätzlichen Außenluftwechsels	71
3.5.9	Berücksichtigung des solaren Ausnutzungsgrads	74
3.6	Zusammenfassung zu den Messergebnissen	76
3.7	Projektbeschreibung	78
3.8	Aufbau der Messtechnik	81
3.9	Ergebnisse der Messungen in der Heizperiode 2001/2002	81
3.9.1	Heizwärmeverbrauch	81
3.9.2	Thermische Behaglichkeit	82
3.9.3	Heizlasten	87
3.10	Stromverbrauch	88
3.10.1	Haushaltsstrom	88
3.10.2	Frostschutzheizregister	89
3.11	Vergleich mit den Messungen in der Heizperiode 2000/2001	91
3.11.1	Klimabereinigung und Normierung auf 20 °C Raumlufttemperatur	91
3.11.2	Zusammenfassung der Messergebnisse	93
4	Literatur	94
5	Anhang	97
5.1	Dokumentation der Messdaten zur Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur in den Südwohnungen	97
5.2	Indikatorgas-Messung in Kassel: Darstellung der Konzentrationsverläufe	101
5.3	Indikatorgas-Messung in Hannover: Darstellung der Konzentrationsverläufe	104

1 Vorwort

Im Rahmen des IEA Task 28 wurde die Frage nach dem tatsächlichen Luftwechsel in Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung untersucht. Eine direkte Messung der Luftwechselrate in bewohnten Passivhäusern kann die Frage beantworten, in welchem Umfang die Nutzer zusätzlich über die Fenster lüften. Zwar wurden bereits bei vorausgehenden Messungen in mehreren Gebäuden Fensterkontakte installiert. Quantitative Aussagen über den tatsächlichen Betrag des zusätzlichen Außenluftwechsels können daraus jedoch nicht abgeleitet werden. Darüber hinaus sollten die Untersuchungen bei unterschiedlicher Nutzerstruktur, also einerseits in von Eigentümern bewohnten Reihenhäusern und zum anderen im sozialen Wohnungsbau durchgeführt werden, um evtl. unterschiedliches Nutzerverhalten erfassen zu können.

Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes CEPHEUS (Projektnummer BU/00127/97/DE/SE/AT) waren 14 Passivhaus-Projekte in 5 Ländern gebaut und messtechnisch untersucht worden. Dabei konnten Ergebnisse über das thermische Verhalten der Gebäude an unterschiedlichen Standorten sowie über die Streuung der Verbrauchswerte in der ersten Heizperiode gewonnen werden. In Deutschland wurde an zwei Standorten messtechnische Untersuchungen durchgeführt: In Hannover Kronsberg wurde eine Reihenhaussiedlung mit 32 Wohneinheiten und in Kassel Marbachshöhe ein Geschosswohnungsbau mit 23 Wohneinheiten messtechnisch begleitet. Beide Projekte wurden nun zusätzlich im Rahmen der IEA-SHC Task 28 / ECBCS Annex 38 „Sustainable Solar Housing“ zur Untersuchung der Luftwechselraten mit Hilfe der Spurengasanalyse herangezogen. Die in der Reihenhaussiedlung und im Geschosswohnungsbau bereits vorhandene Messtechnik konnte zur Bestimmung der Randbedingungen (Klimadaten, Raumtemperaturen etc.) während der Feldmessungen genutzt werden.

Darüber hinaus wurde im Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe die bereits vorhandene Messtechnik um zusätzliche Sensoren ergänzt, um weiterführende Fragen bzgl. Raumluftqualität und zum Heizwärmeverbrauch in der zweiten Heizperiode beantworten zu können. Ein direkter Vergleich mit den Messdaten der ersten Heizperiode konnte mit Hilfe einer Klima- und Temperaturbereinigung durchgeführt werden. Anlaufeffekte wie z.B. die Trocknung des Gebäudes konnten auf diese Weise quantifiziert und Aussagen über das Langzeitverhalten und den normierten Heizwärmeverbrauch des Gebäudes getroffen werden.

2 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In insgesamt 9 bewohnten Wohneinheiten mit kontrollierter Lüftungsanlage wurden Luftwechsel-Messungen während zweier Feldmesskampagnen durchgeführt. Dabei erwies sich der gewählte Messaufbau (Indikatorgas-Messverfahren) als ein geeignetes Instrument zur Bestimmung der Luftwechselraten. Der Außenluftwechsel wurde während der Messkampagnen in den bewohnten Wohneinheiten kontinuierlich erfasst.

Der zusätzliche durch Fensterlüftung induzierte Außenluftwechsel wurde im Messzeitraum im Mittel über alle Wohneinheiten zu $0,06 \text{ h}^{-1}$ bestimmt. Die Feldmessungen im Februar und Anfang März dauerten jeweils zwei Wochen.

Die beobachteten zusätzlichen Außenluftwechsel durch Fensterlüftung sind deutlich geringer als die entsprechenden normativen Vorgaben. Vorhergehende Abschätzungen des zusätzlichen Luftwechsels durch eine Bilanzierung mittels eines stationären Energiebilanzmodells unter Berücksichtigung des tatsächlichen Heizwärmeverbrauchs deuteten auf einen noch geringeren Außenluftwechsel hin. Eine Korrelationsanalyse konnte den Einfluss der Klimaparameter auf das Lüftungsverhalten während der Feldmessung zeigen. Aufgrund der ausgesprochen milden und sonnigen Witterung im Messzeitraum stellt der gemessene zusätzliche Außenluftwechsel eher eine Obergrenze für das Lüftungsverhalten während der Heizzeit dar, er enthält offenbar auch einen Teil des Zusatzwärmeverlustes, welcher durch $(1-\eta) Q_F$ infolge des Ausnutzungsgrads η der solaren und internen Gewinne gegeben ist.

Ein zusätzlicher Außenluftwechsel von $0,2 \text{ h}^{-1}$, wie er als Randbedingung in DIN 4108 Teil 6 Anhang D für Zu- und Abluftanlagen vorgeschrieben wird, ist zwar als Einzelwert einer Wohneinheit in der Messung aufgetreten, der Mittelwert von $0,06 \text{ h}^{-1}$ (Fensterbeitrag) liegt allerdings weit darunter.

Wie gezeigt werden konnte, kann auch eine Disbalance zwischen Zu- und Abluftströmen zu bedeutender In- bzw. Exfiltration führen. Die zusätzlichen Außenluftwechsel können dabei die Größenordnung der beobachteten mittleren Fensterluftwechsel erreichen und sogar übersteigen. Eine sorgfältige Planung und anschließende Einregelung der Lüftungsanlagen erweist sich vor diesem Hintergrund als entscheidend.

Das beobachtete Fensterlüftungsverhalten, das zwischen den einzelnen Wohneinheiten starke Unterschiede aufweist, gefährdet in keiner Wohneinheit das Passivhaus-Konzept. Die mittlere Raumtemperatur in der Wohneinheit mit intensivster Fensterlüftung lag während der Feldmessung bei $22,3^\circ\text{C}$. Wird der gemessene zusätzliche Außenluftwechsel während der Feldmessung für die gesamte Heizperiode zugrundegelegt, ergibt sich mit einem stationären Bilanzmodell ein Heizwärmemehrbedarf gegenüber der Projektierung von $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (gemäß [PHPP 2000]). Das entspricht einem Energiekennwert Heizwärme von $17,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ - immer noch ein ausgezeichnete Wert.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse stößt durch die Vielzahl der Einflussgrößen schnell an ihre Grenzen. Verhalten der Nutzer, Geometrie der Wohneinheit und Fenstergrößen, Klima usw. schränken die Verallgemeinerbarkeit ein. Auswahl und Anzahl der untersuchten Wohneinheiten sowie die Dauer der Feldmessung gehen allerdings deutlich über eine stichprobenartige Untersuchung hinaus. Von den Wohnungen waren 8 aus dem sozialen Wohnbau; Energiesparen als Hauptmotiv und damit verbunden ein besonderes Lüftungsverhalten der Bewohner kann daher nicht angenommen werden. Durch eine umfangreichere messtechnische Ausstattung und zusätzliche stichprobenartige Messungen des tatsächlichen Luftwechsels könnte die Datenbasis erweitert und die Schärfe der Ergebnisse noch verbessert werden. Wie gezeigt wurde, kann die Disbalance der Lüftungsanlage einen erheblichen Einfluss auf die Lüftungswärmeverluste haben. Bei weiterführenden Messungen erscheint es daher sinnvoll, das Lüftungssystem im Betrieb noch detaillierter (Leckageströme am Zentralgerät, etc.) zu untersuchen.

Im Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe wurden die Temperatur- und Verbrauchsmessungen in der zweiten Heizperiode fortgesetzt. Der durchschnittliche spezifische Heizwärmeverbrauch betrug (Messzeitraum 1.10.01 bis 30.4.04) 17,4 kWh/m². Die Messergebnisse zeigen wie erwartet eine Reduktion des Heizwärmeverbrauchs gegenüber der ersten Heizperiode. Diese betrug klima- und temperaturbereinigt 2,3 kWh/(m²a).

Der durchschnittliche Haushaltsstromverbrauch pro Wohneinheit entspricht mit 222 kWh pro Monat dem des Vorjahres, allerdings konnte durch eine Reduktion der Frostschutzgrenztemperatur der Hilfsstromverbrauch für die Frostschutzheizung um 58 % (gegenüber der 1. Heizperiode) gesenkt werden.

Die Messungen der relativen Feuchte der Raumluft in Verbindung mit der Untersuchung der Raumluftqualität mit Hilfe der CO₂-Messung haben gezeigt, dass die Luftwechselrate von durchschnittlich 0,6 1/h trotz relativ hoher Belegungsdichte im sozialen Wohnungsbau eher zu hoch ist. Die relative Raumluftfeuchte unterschritt gerade im Kernwinter häufig die 30 %-Grenze. Aus den CO₂-Messungen geht hervor, dass die Luftwechselrate im Hinblick auf die Raumluftqualität problemlos reduziert werden könnte.

3 Messtechnische Bestimmung des Luftwechsels

3.1 Forschungsziel

Die Frage des tatsächlichen Luftwechsels in Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung ist einerseits von großer Bedeutung für die Projektierung und die Energiebilanz der Gebäude, andererseits wird sie derzeit noch kontrovers diskutiert. Die Vermutung, dass auch bei korrekt ausgelegter und eingeregelter Lüftungsanlage

die Bewohner regelmäßig in hohem Ausmaß die Fenster öffnen, so dass alle Anstrengungen zur Reduzierung der Lüftungswärmeverluste ins Leere laufen, wird in der Fachöffentlichkeit sehr unterschiedlich bewertet.

Mit Hilfe von Indikatorgas-Messungen wurden in Passivhaus-Wohneinheiten die tatsächlichen Außenluftwechsel während der Heizperiode bestimmt. Durch Anzahl der Wohneinheiten, Zeitraum der Messung und Vergleich mit dem Nutzerverhalten anderer Untersuchungen sollten belastbare Ergebnisse gewonnen werden. Die kontinuierlichen Messungen zielten darauf ab, den gesamten und den über Fensterlüftung induzierten Luftwechsel zu quantifizieren. Das Nutzerverhalten sollte dabei nicht (nur) anhand von Fensterkontakten, sondern mittels einer direkten Messung des tatsächlichen Luftwechsels erfasst werden. Erst mit der Messung des Luftwechsels kann die direkte Auswirkung des Nutzerverhaltens – eine etwaige Erhöhung des Außenluftwechsel aufgrund von Fensterlüftung und damit verbunden erhöhten Lüftungswärmeverlusten – bestimmt werden. Zur Erfassung der Randbedingungen und der treibenden Kräfte sollten zusätzlich die meteorologischen Daten und andere Randbedingungen (Raumlufttemperaturen, teilweise Fensteröffnungszeiten) aufgezeichnet werden.

Die Relevanz des Nutzereinflusses auf das Konzept der Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung kann mit den Messergebnissen zum tatsächlichen Außenluftwechsel weitergehend diskutiert werden.

3.2 Messkonzept und Messtechnik

Die Indikatorgas-Analyse bietet ein wissenschaftlich abgesichertes Verfahren zur kontinuierlichen Bestimmung des Außenluftwechsels. Bei der angewandten Konstant-Injektions-Methode wird der Raumluft ein zeitlich konstanter Indikatorgas-Volumenstrom beigegeben.

Neben dem tatsächlichen Außenluftwechsel interessiert vor allem der Luftwechselanteil in bewohnten Gebäuden mit Lüftungsanlage, der nicht der Wärmerückgewinnung zugeführt wird. Durch Kombination der Außenluftwechsel-Messung mit einer davon unabhängigen Messung des Anlagenluftwechsels kann der zusätzliche Luftwechsel durch Fenster- und Fugenlüftung ermittelt werden. Hierzu wird parallel zur Indikatorgas-Messung der Anlagenluftwechsel mit Staukreuzen überwacht. In Zeiten geschlossener Fenster wird darüber hinaus ein Abgleich der beiden unterschiedlichen Messverfahren und eine Kontrolle der empfindlichen Indikatorgas-Messung möglich.

Nutzerverhalten und Fensterluftwechsel interessieren vorrangig in der Heizzeit. Darüber hinaus sollte, um belastbare Aussagen zum Außenluftwechsel ableiten zu können, eine möglichst große Anzahl von bewohnten Wohneinheiten kontinuierlich

und längerfristig untersucht werden. Die Indikatorgas-Analysetechnik ist jedoch mit erheblichem Aufwand und Kosten verbunden.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde der Außenluftwechsel in zwei Feldmessungen über jeweils etwa 14-tägige Zeiträume gemessen. Für die Feldmessungen wurden insgesamt 9 Wohneinheiten ausgesucht, unter den Prämissen, a) bei begrenztem Messaufwand eine möglichst große Anzahl von Wohneinheiten zu vermessen, b) unterschiedliche Nutzungen zu erfassen. Von den 9 Wohneinheiten befinden sich insgesamt 8 Wohnungen in einem sozialen Geschosswohnbau. Interessant waren diese Wohnungen insbesondere deshalb, da davon ausgegangen werden kann, dass bei den Mietern Energiesparen kein Hauptmotiv für den Einzug darstellt. Die 9. Wohneinheit ist ein Reihenhaus in Hannover und wird von den Eigentümern bewohnt.

3.2.1 Indikatorgas-Messmethode

Die Indikatorgas-Messmethoden bietet die einzige praktikable Möglichkeit, quantitative Untersuchungen des Luftaustauschs in Gebäuden durchzuführen. Die Anwendungsmöglichkeiten der Indikatorgas-Messungen, die auch als Tracergas- oder Spurengas-Messungen bezeichnet werden, erstrecken sich im Gebäudebereich über ein weites Feld von Messaufgaben. Bei diesem indirekten Messverfahren wird der zu untersuchenden Zone ein geeignetes Spurengas zugegeben. Der sich einstellende Verdünnungsverlauf des Indikatorgases wird mit einer Mess-Vorrichtung aufgezeichnet. Aus dem zeitlichen Konzentrationsverlauf kann anschließend die Luftwechselrate berechnet werden.

Zur Luftwechsel-Messung finden drei Indikatorgas-Verfahren Anwendung: die Konzentrations-Abkling-Methode, die Konstant-Injektions-Methode und die Konstant-Konzentrations-Methode (vgl. [VDI 4300/7] und [DIN EN ISO 12569]).

Die Konzentrations-Abkling-Methode stellt das gebräuchlichste Verfahren dar. Bei diesem Verfahren wird das Spurengas vor Beginn der Messung in die Raumluftzone eingebracht und dort gut verteilt. Das Abklingen der Spurengaskonzentration im Raum wird nun über eine gewisse Zeit gemessen. Sofern der Luftstrom während der Messung konstant ist und kein weiteres Spurengas in die Zone gelangt, wird die Konzentration exponentiell abfallen. Die Luftwechselrate ergibt sich als Kehrwert der Zeitkonstante dieser Abklingkurve.

Bei der Konstant-Injektions-Methode wird der Konzentrationsverlauf bei bekannter und konstanter Indikatorgas-Zugabe gemessen. Die Luftwechselrate bestimmt sich aus der Auswertung einer vereinfachten Kontinuitätsgleichung am Zonenvolumen (vgl. Abschnitt 3.2.4). Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit der Langzeitmessung.

Bei dem dritten Messverfahren, der Konstant-Konzentrations-Methode, wird die Spurengaskonzentration durch eine Regelung der Spurengaszugabe konstant

gehalten. Sofern die Konzentration in der Zone zeitlich konstant bleibt, ist die Luftwechselrate direkt proportional zum Indikatorgasstrom, der während der Messung ständig nachgeregelt wird. Die Konstant-Konzentrations-Methode wird, wie die Konstant-Injektions-Methode, auch für kontinuierliche Messungen des Luftwechsels eingesetzt.

Ausschlaggebend für den Einsatz der Konstant-Injektions-Methode war die beabsichtigte langfristige, kontinuierliche Messung, die Notwendigkeit, in mehreren Zonen gleichzeitig zu messen und der gegenüber der Konstant-Konzentrations-Methode geringere messtechnische Aufwand [Heidt 1987]. Bei der Konstant-Injektions-Methode wird das Spurengas der zu untersuchenden Raumzone kontinuierlich mit konstanter Injektionsrate zugegeben; gemessen und ausgewertet wird der Konzentrationsverlauf des Gases. Mit Hilfe eines mathematischen Ansatzes, der die physikalischen Zusammenhänge möglichst gut beschreibt, kann anschließend die Luftwechselrate in der Raumluftzone berechnet werden.

Beachtet werden muss bei dem gewählten Messverfahren der Konstant-Injektions-Methode aufgrund der zugrundeliegenden mathematischen Modellbildung,

- dass sich das Indikatorgas vollständig mit der Raumluft der Gebäudezone vermischt und
- dass die Indikatorverteilung in ihrer zeitlichen Entwicklung räumlich homogen bleibt.

Zur kontinuierlichen Einbringung und homogenen Verteilung des Indikatorgases konnte in den untersuchten Objekten der Indikator über die Lüftungsanlage mit der Zuluft eingebracht werden.

3.2.2 Indikatorgas

Weitere wichtige Anforderungen betreffen das Indikatorgas. Aufgrund der Messaufgabe in bewohnten Gebäuden muss ein Indikatorgas vor allem gesundheitlich unbedenklich sein.

Zusätzlich sollte das Spurengas

- chemisch inert sein,
- möglichst nicht an Oberflächen adsorbieren und
- keine unbekanntenen Quellen aufweisen.

Kein Gas erfüllt alle Anforderungen, aber es gibt einige Gase, die erfolgreich als Indikatorgas eingesetzt werden. Das gewählte Gas Schwefelhexafluorid (SF_6) gehört zu den erprobten Indikatorgasen, erfüllt die Anforderungen an ein Indikatorgas (vgl. [VDI 4300/7]) und ist im verwendeten Konzentrationsbereich gesundheitlich unbedenklich.

3.2.3 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 (SF ₆) (linear)
Nachweisgrenze:	5 ppt (SF ₆)
Genauigkeit:	3 % vom Messwert
Messintervall:	90 sec
Messkanäle:	bis zu 9 über Multiport-Sampler

3.2.4 Auswertungsmethode

Bei dem angewandten Messverfahren sind die Indikator-Konzentration und -Injektionsrate die eigentlichen Messgrößen. Erst durch eine mathematische Modellbildung der physikalischen Vorgänge beim Luftaustausch kann in einem zweiten Schritt die Luftwechselrate der betreffenden Zone bestimmt werden.

Für die Konzentration c des Indikatorgases folgt aus der Massenbilanz an einem Kontrollvolumen V die untenstehende Differentialgleichung:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = (c_a - c) \cdot V \cdot n + j \quad (1)$$

V : Kontrollvolumen, c : Indikatorgaskonzentration, c_a : Außenkonzentration, t : Zeit,
 n : Luftwechselrate, j : Injektionsrate

Zur Auswertung wird die Differentialgleichung nach dem Zuluftvolumenstrom umgeformt und es wird das bei [Roulet 1991] angegebene Integralverfahren angewendet. Dabei wird der zeitliche Mittelwert des Zuluftvolumenstroms über ein Zeitintervall gebildet. Mit der integralen Definition der zeitlichen Mittelwertbildung (2)

$$x_{mittel} = \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{t_1} x(t) \cdot dt \quad (2)$$

ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 (n \cdot V)_{\text{mittel}} &= \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{t_1} (n \cdot V) \cdot dt = \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \frac{j}{(c(t) - c_a)} \cdot dt - V \int_{t_0}^{t_1} \frac{1}{(c(t) - c_a)} \cdot dc(t) \right\} \\
 (n \cdot V)_{\text{mittel}} &= \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \frac{j}{(c(t) - c_a)} \cdot dt - V \cdot \ln \left(\frac{c(t_1) - c_a}{c(t_0) - c_a} \right) \right\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

c : Indikatorgaskonzentration, c_a : Außenkonzentration

V : Kontrollvolumen,

t : Zeit, n : Luftwechselrate,

j : Injektionsrate

Gleichung (3) stellt ein allgemeines Auswerteverfahren zur Bestimmung des mittleren Zuluftvolumenstroms dar.

Da das verwendete Indikatorgas in der Umgebung nicht vorhanden ist, d.h. $c_a = 0$ (die Spurengas-Injektion ist die einzige Quelle) und mit den Definitionen der Anfangs- und Endkonzentration des untersuchten Zeitintervalls t_0 bis t_1 ($c(t = t_0) = c_0$, $c(t = t_1) = c_1$) ergibt sich:

$$(n \cdot V)_{\text{mittel}} = \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{t_1} (n \cdot V) \cdot dt = \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \frac{j}{c} \cdot dt - V \cdot \ln \left(\frac{c_1}{c_0} \right) \right\} \quad (4)$$

V : Kontrollvolumen, c : Indikatorgaskonzentration,

t : Zeit, n : Luftwechselrate,

j : Injektionsrate

Zur Auswertung der Konzentrationsverläufe wurden abschnittsweise mittlere Zuluftvolumenströme bestimmt. Abbildung 1 zeigt exemplarisch den Konzentrationsverlauf an einer Mess-Stelle (hier in einer Wohnung des Geschosswohnbaus) und den Verlauf der Funktion j/c . Ein Fensterlüftungsereignis führt zu einem deutlichen Abfall der Indikatorgaskonzentration.

Zur Berechnung des mittleren Außenvolumenstroms wird die Funktion j/c über den Mittelungszeitabschnitt integriert und der Logarithmus von Anfangs- zu Endkonzentration gebildet. In dem unteren Diagramm von Abbildung 1 ist der so berechnete Außenluftwechsel dargestellt. Nach dem Lüftungsereignis strebt die Konzentration wieder gegen den Ausgangswert der Konzentration, der sich bei reinem Anlagenluftwechsel einstellt.

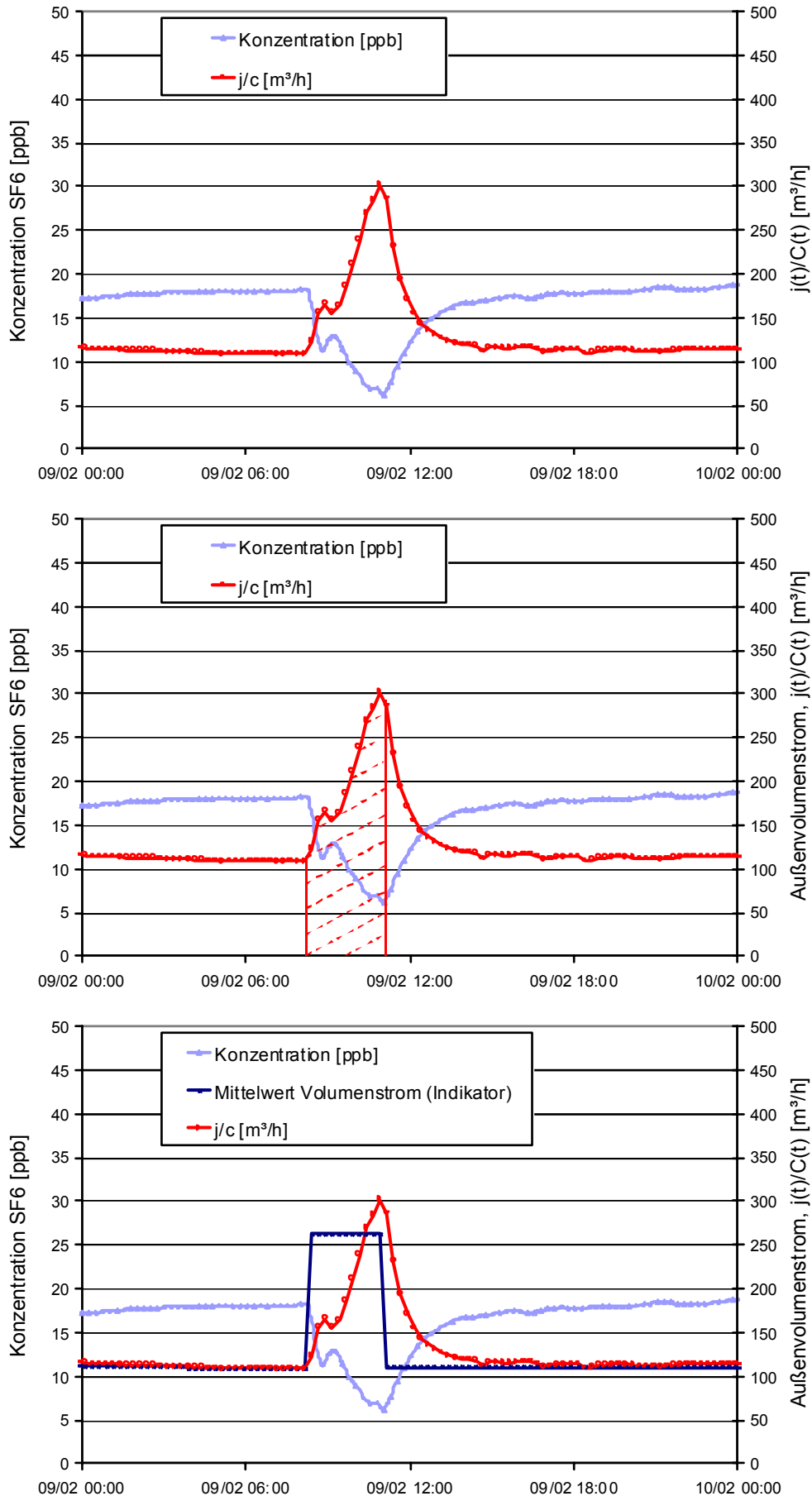


Abbildung 1: Auswertung eines exemplarischen Konzentrationsverlaufs.

3.2.5 Fehlerbetrachtung zur Indikatorgas-Messung

Der Außenvolumenstrom ($n \cdot V$) als gesuchte Größe ist nicht direkt messbar. Der Fehler in der Volumenstrom-Messung ergibt sich daher aus den fehlerbehafteten Einzelmessgrößen:

- Ungenauigkeit der Indikatorgas-Konzentration Δc ,
- Ungenauigkeit des Indikatorgas-Volumenstroms Δj ,
- Ungenauigkeit des effektiven Zonenvolumens ΔV .

Einflüsse durch Luftdichteunterschiede werden vernachlässigt. Weiterhin wird in der folgenden Betrachtung davon ausgegangen, dass die Voraussetzungen des Messverfahrens erfüllt sind (Indikatorgas vermischt sich vollständig mit der Raumluft der Gebäudezone und die Indikatorverteilung bleibt in ihrer zeitlichen Entwicklung räumlich homogen; vgl. Abschnitt 3.2.1). Mit dem analytischen Zusammenhang aus (4) kann die Unsicherheit in der Bestimmung des Volumenstroms nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz abgeleitet werden. Dabei wird angenommen, dass die Unsicherheiten der Einzelgrößen zufällig und voneinander unabhängig sind.

$$\Delta(n \cdot V) = \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{j}{c} \right)^2 \cdot \left(\left(\frac{\Delta j}{j} \right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c} \right)^2 \right) \cdot dt + V^2 \cdot \left(\left(\frac{\Delta V}{V} \cdot \ln \left(\frac{c_0}{c_1} \right) \right)^2 + \left(\frac{\Delta c_0}{c_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta c_1}{c_1} \right)^2 \right) \right\}^{1/2}$$

V : Kontrollvolumen, c : Indikatorgaskonzentration,

t : Zeit, n : Luftwechselrate,

j : Injektionsrate

Die Messgenauigkeit der Konzentrationsmessung liegt laut Hersteller bei 3%. Die Unsicherheit in der Messung der Injektionsrate liegt im Messbereich bei unter 5%, und der Fehler in der Bestimmung des Zonenvolumens wird mit 10% abgeschätzt. Unter stationären Bedingungen ($c_0 = c_1$; $j/c = \text{const.}$) berechnet sich die Unsicherheit in der Volumenstrom-Messung damit zu 9 %, im nicht stationären Fall unter den hier aufgetretenen Bedingungen liegt diese im Bereich bis 13 %.

Der Anlagenluftwechsel wurde unabhängig von der Indikatorgas-Messung mit Staukreuzen im Lüftungssystem erfasst. Systematische Fehler z.B. durch eine nicht korrekte Kalibrierung des Spurengas-Durchflussmessers oder des Spurengas-Monitors bzw. ein geringeres tatsächliches Zonenvolumen, das am Luftaustausch teilnimmt, wurden durch Abgleich der Indikatorgas-Messung mit dieser Volumenstrom-Messung des Anlagenluftwechsels minimiert (vgl. 3.3.9 und 3.4.9) und werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Zur Absicherung der oben gezeigten Fehlerabschätzung wurde zusätzlich der mittlere Fehler aus der Standardabweichung der Einzelmesswerte bestimmt: der mittlere Volumenstrom eines Zeitabschnitts ergibt sich durch Integralbildung über

diesen Abschnitt, dieser kann auch in kleinere Zeitabschnitte zerlegt werden. Exemplarisch wurde für zwei Wohnungen des Geschosswohnbaus die Standardabweichung für insgesamt 37 einzelne Zeitabschnitte ausgewertet. In Abbildung 2 wird für jeweils einen Zeitabschnitt die Standardabweichung des Mittelwerts des Außenvolumenstroms gebildet. Diese mittleren Fehler des Volumenstromwerts eines Zeitabschnitts sind nach Größe aufsteigend dargestellt. Neben zufälligen Messfehlern gehen in die dargestellten relativen Fehler des Mittelwerts auch tatsächliche Schwankungen des Außenvolumenstroms innerhalb des untersuchten Zeitabschnitts ein. Die aus den Messwerten ermittelten Standardabweichungen des Mittelwerts stellen daher eine obere Abschätzung für den Messfehler dar. In Zeiten mit reinem Lüftungsanlagenbetrieb, in denen keine Fensterlüftung stattfand, sollte der Volumenstrom nahezu konstant sein und der zufällige Fehler sollte durch die Messunsicherheit bestimmt sein: der relative Fehler für diese Zeitabschnitte lag immer unter 2%.

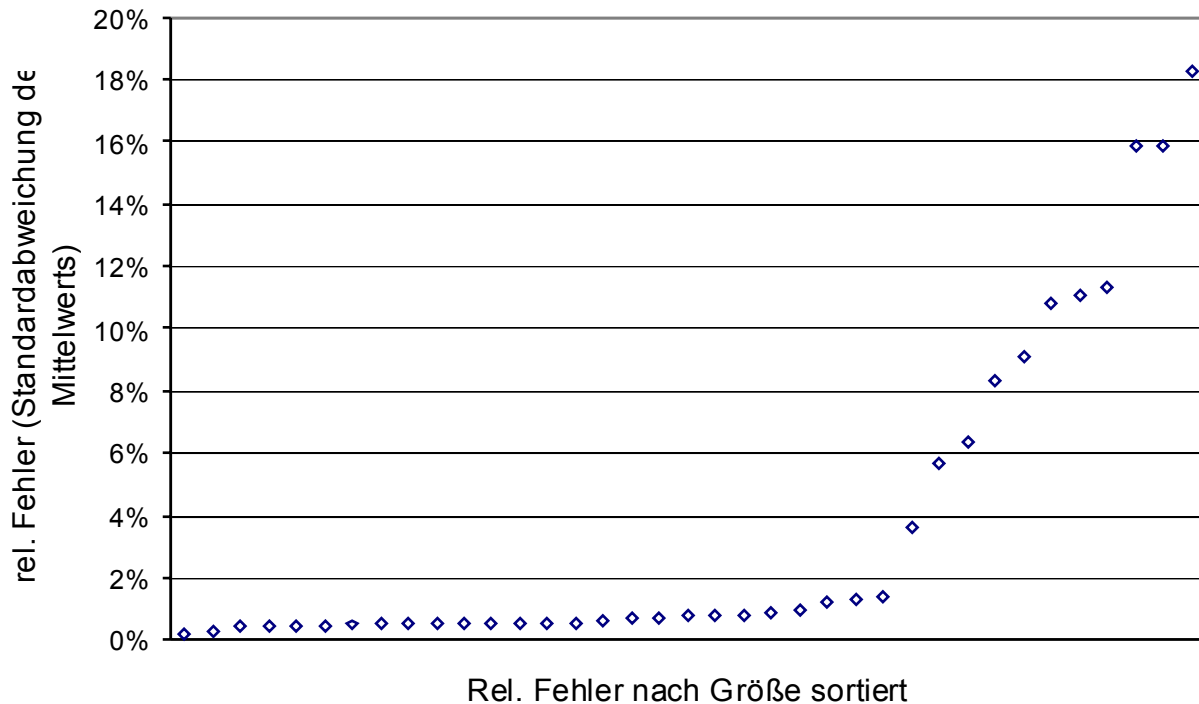


Abbildung 2: Auswertung der Standardabweichung für insgesamt 37 Zeitabschnitte in zwei Wohnungen des Geschosswohnbaus. Bezugswert ist der mittlere Außenvolumenstrom je Zeitabschnitt.

Für den Gesamtmesszeitraum wird die Standardabweichung des Mittelwerts des Außenvolumenstroms in Tabelle 1 unterschieden nach Fensterlüftungsereignissen und Zeitabschnitten ohne Fensterereignisse dargestellt. Wie oben erwähnt, sind im mittleren Fehler des Mittelwerts zufällige Fehler der Messung und Schwankungen des Außenluftwechsels während eines Zeitabschnitts gleichmaßen enthalten; die in Tabelle 1 angegebenen relativen Fehler sind daher obere Abschätzungen des zufälligen Fehlers bezogen auf den Gesamtmesszeitraum.

	zufälliger Fehler des Mittelwerts der Volumenstrom-Messung ohne Fensterlüftung	zufälliger Fehler des Mittelwerts der Volumenstrom-Messung bei Fensterlüftung
Wohnung A	0,2%	4,2%
Wohnung B	0,2%	4,9%
Anmerkung: die methodisch unvermeidbaren systematischen Fehler sind sicher höher.		

Tabelle 1: Exemplarische Abschätzung des zufälligen Fehlers der Messung anhand des mittleren Fehlers des Mittelwerts der Außenvolumenstrom-Messung.

3.2.6 Alternatives Auswertungsverfahren

Ein Teil der Konzentrationsverläufe wurde zusätzlich mit einem alternativen Verfahren ausgewertet. Hierzu wurde eine spezielle Lösung der Differentialgleichung (1) bestimmt (vgl. Abschnitt 3.2.4). Mit der Definition der Anfangsbedingung $c(t=0) = c_0$ und da das verwendete Indikatorgas in der Umgebung nicht vorhanden ist (die Spurengas-Injektion ist die einzige Quelle), ergibt sich (bei konstantem Luftwechsel n) folgende Lösung der Differentialgleichung:

$$c(t) = c_j + (c_0 - c_j) \cdot \exp(-n \cdot t) \quad (5)$$

c : Indikatorgaskonzentration, t : Zeit, n : Luftwechselrate

c_j ist die Gleichgewichtskonzentration, die sich nach langen Zeiten t einstellt.

$$c_j = \frac{j}{V \cdot n} \quad (6)$$

j : Injektionsrate, V : Kontrollvolumen, n : Luftwechselrate

Die Lösung kann wegen (6) nicht nach dem Luftwechsel n aufgelöst werden. Die Konzentrationsverläufe wurden durch abschnittweises Anpassen der Lösungsfunktion (5) ausgewertet. Mit der Methode der minimalen quadratischen Abweichungen wurde die Approximationsfunktion numerisch angepasst und deren Koeffizienten c_0 und n bestimmt. Im Unterschied zur Auswertung nach (4) wird bei diesem Verfahren vorausgesetzt, dass im untersuchten Zeitabschnitt der Luftwechsel n und die Indikatorgas-Injektionsrate j konstant sind. Aus den Konzentrationsverläufen wird abschnittsweise eine Luftwechselrate n bestimmt.

Abbildung 3 zeigt die berechneten Volumenströme nach dem Auswerteverfahren aus Abschnitt 3.2.4 und dem hier vorgestellten alternativen Verfahren. Die Ergebnisse nach beiden Verfahren stehen in guter Übereinstimmung. Der Korrelationskoeffizient zwischen den nach beiden Methoden berechneten Volumenströmen beträgt 98%.

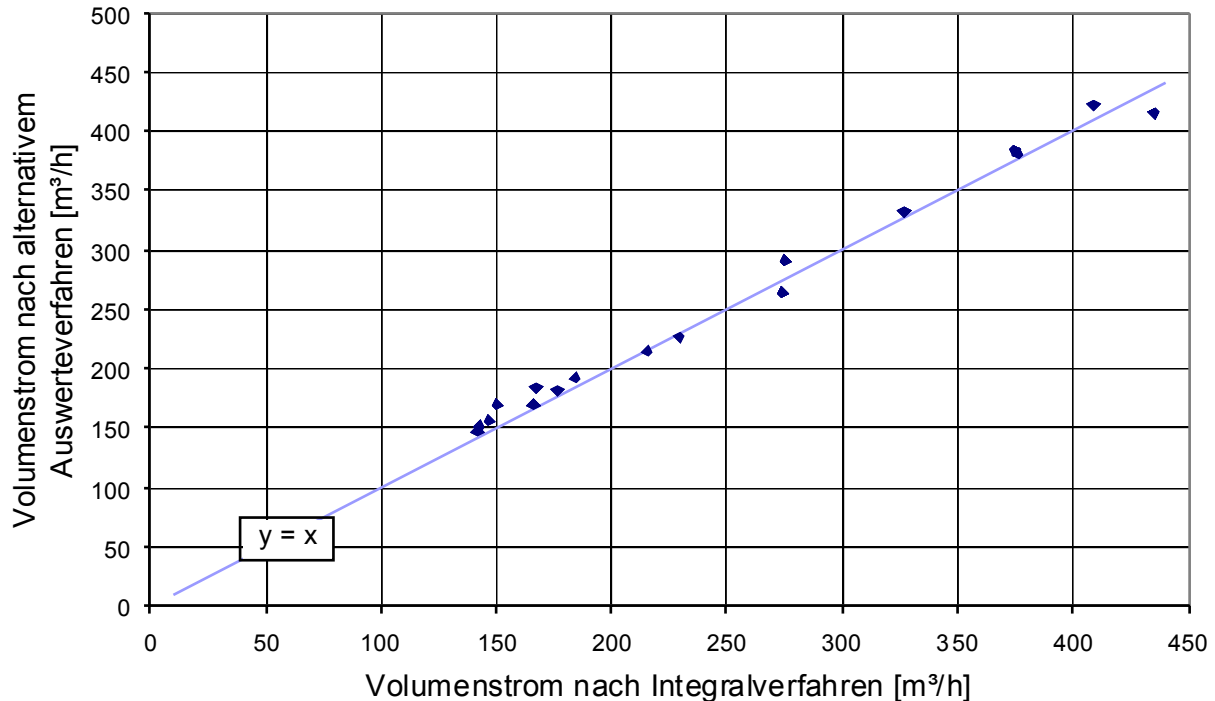


Abbildung 3: Vergleich der Volumenstrom-Ergebnisse nach zwei Auswerteverfahren. Beide Auswertungen stehen in guter Übereinstimmung.

3.3 Durchführung der Messungen im Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe

3.3.1 Lage und Anordnung der untersuchten Wohneinheiten

Um eine Aussage über die tatsächliche Luftwechselrate in bewohnten Gebäuden treffen zu können, ist die messtechnische Untersuchung einer möglichst großen Stichprobenzahl anzustreben. Die Messungen mit Hilfe der Tracergastechnik sind jedoch mit erheblichem Aufwand und Kosten verbunden. Darüber hinaus ist das Einverständnis der Bewohner sowie die Verlegung der Probenentnahmeschläuche Voraussetzung für die Durchführung der Messung. Will man den freien Außenluftwechsel vom kontrollierten (maschinellen) Luftwechsel unterscheiden, ist die Kenntnis des maschinellen Zuluftvolumenstromes notwendig.

Aus der Gesamtheit dieser Überlegungen heraus wurde die Entscheidung getroffen, die Messungen an den acht Südwohnungen des Gebäudes durchzuführen. Diese Gruppe von Wohneinheiten sind aus folgenden Gründen geeignet:

1. Das Einverständnis aller Bewohner war vorhanden.
2. Alle Wohneinheiten werden von der gleichen Lüftungszentrale versorgt.
3. Die Dachlüftungszentrale Süd ist bereits mit Volumenstrom-Messkreuzen ausgestattet.
4. Alle Wohneinheiten weisen gleiche Grundrisse und Orientierung auf.

Das Gebäude besteht, wie in Abbildung 4 zu erkennen, durchgehend aus drei Vollgeschossen, mit Ausnahme der Wohneinheiten, welche vom südlich gelegenen Treppenhaus erschlossen werden. In diesem Bereich liegen zwei zusätzliche Wohneinheiten im 4. OG. Mit der Auswahl der Südwohnungen konnte damit eine Stichprobengesamtheit von $n = 8$ Wohneinheiten untersucht werden, die alle über die Lüftungsschächte mit einer Lüftungszentrale verbunden sind.

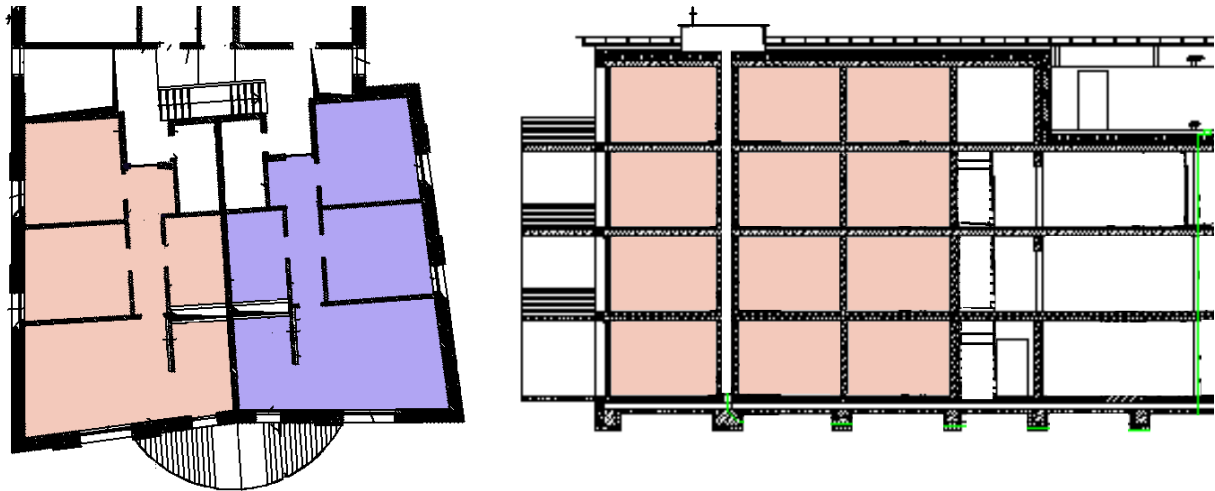


Abbildung 4: Lage der untersuchten Wohnungen (horizontaler Schnitt links, vertikaler Schnitt rechts), Anbindung an eine gemeinsame Lüftungszentrale auf dem Dach

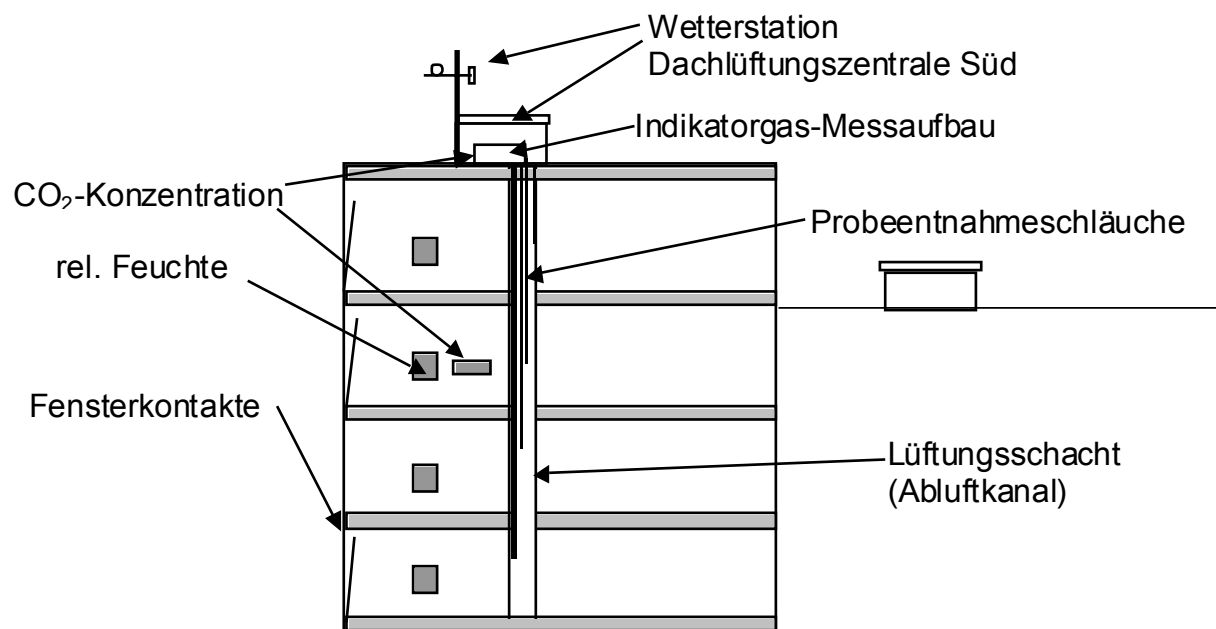


Abbildung 5: Anordnung der zusätzlichen Messtechnik im südlichen Gebäudetrakt

Wie zu erkennen, weisen die untersuchten Wohneinheiten in jedem Stockwerk jeweils spiegelsymmetrische Grundrisse (mit Ausnahme der Abstellräume) auf. Die Südfassade weist raumhohe Verglasungen mit öffnbaren Flügeln und festverglaste Brüstungselemente sowie verglaste Balkontüren auf. Sie schließen an Wohn- bzw.

Esszimmer an. Die ebenfalls raumhohen Verglasungen an der Ost- bzw. Westfassade belichten die Schlaf- bzw. Kinderzimmer und sind ebenfalls mit Drehkippschlag am Fensterflügel sowie Festverglasung im Brüstungsbereich ausgestattet. Details zur Anbringung der Fensterkontakte werden in Abschnitt 3.3.6 erläutert.

3.3.2 Randbedingungen und meteorologische Daten

Zur Erfassung der lokalen meteorologischen Daten wurde die im Rahmen der CEPHEUS-Messung errichtete Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes erweitert. Zusätzlich zu den bestehenden Messgeräten für Globalstrahlung, Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte wurden ein Schalenkreuzanemometer sowie eine Windrichtungsfahne installiert. Die lokale Windgeschwindigkeit und Windrichtung spielen sowohl für die Schwankungen des Zu- und Abluftvolumenstroms der maschinellen Lüftungsanlage als auch für die Luftwechselrate durch freie Lüftung und Fensterlüftung eine wesentliche Rolle. Da es sich bei der Windgeschwindigkeit um eine Messgröße mit sehr kurzzeitigen Schwankungen handelt, wurde ein Anemometer mit Impulsausgang gewählt (ein Impuls pro Umdrehung), und die Impulse wurden aufsummiert. Auf diese Weise konnte eine genaue Mittelwertbildung unabhängig vom gewählten Messdatenintervall erreicht werden.

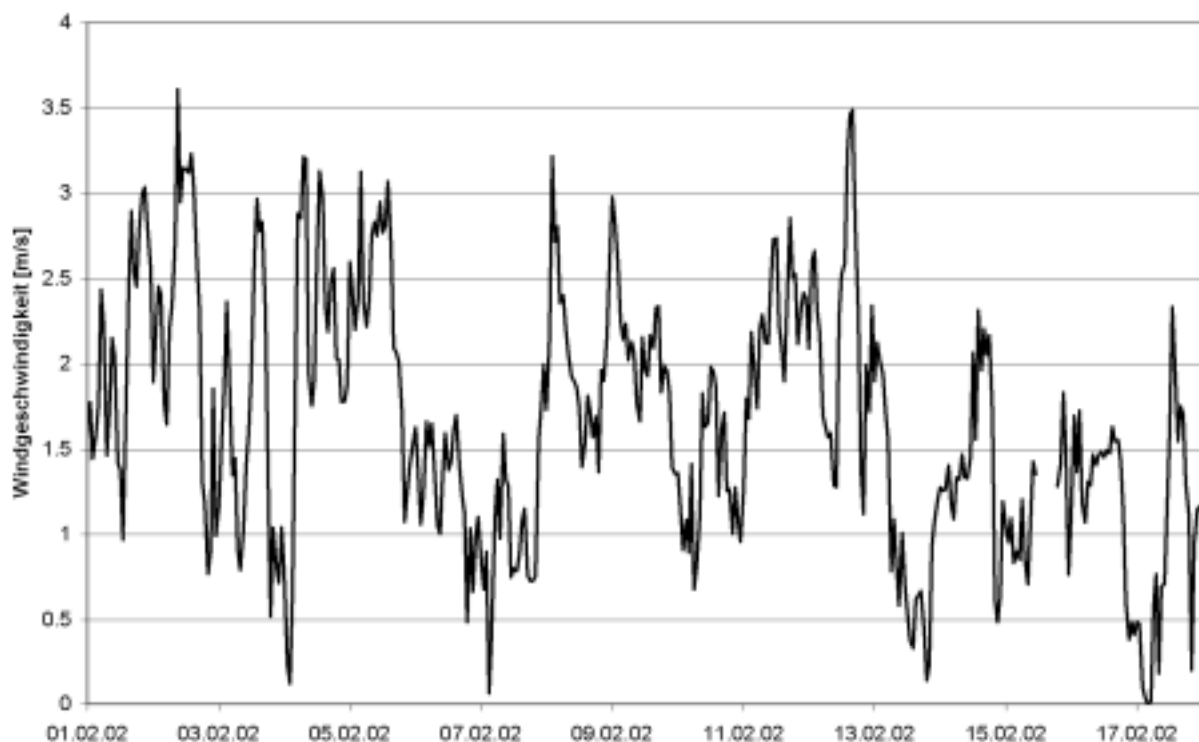


Abbildung 6: Verlauf der mittleren Windgeschwindigkeit im Zeitraum der Tracergasmessung

Die mittlere Windgeschwindigkeit im Messzeitraum betrug 1,6 m/s. Die Hauptwindrichtung im Messzeitraum vom 1.2. bis 18.2 war Süd-Süd-West und drehte im Zeitraum vom 13.2. bis zum 16.2 auf Nord.

Von besonderer Bedeutung für die Beurteilung des Nutzerverhaltens sind sowohl die Außentemperatur als auch die Solarstrahlung, weil diese das Fensteröffnungsverhalten der Nutzer maßgeblich beeinflussen. Überschüssige solare Gewinne werden, falls die Raumtemperaturen bedeutend ansteigen, abgelüftet. Diese Situation tritt gerade in den Südwohnungen häufiger auf. Bei höheren Außentemperaturen nimmt darüber hinaus auch die Balkonnutzungshäufigkeit zu.

Wie in Abbildung 7 zu erkennen, stieg die Außenlufttemperatur in der ersten Woche des Messzeitraums tagsüber bis auf 16 °C an, der Mittelwert lag mit 6,6 °C für den Februar untypisch hoch. Nur gegen Ende der zweiten Messwoche sanken die Temperaturen nachts unter den Gefrierpunkt.

Bis auf den 5., 9. und 11. Februar waren im Messzeitraum fast durchweg sonnige Tage, wie am Verlauf der horizontal gemessenen Globalstrahlung (siehe Abbildung 8) zu erkennen ist.

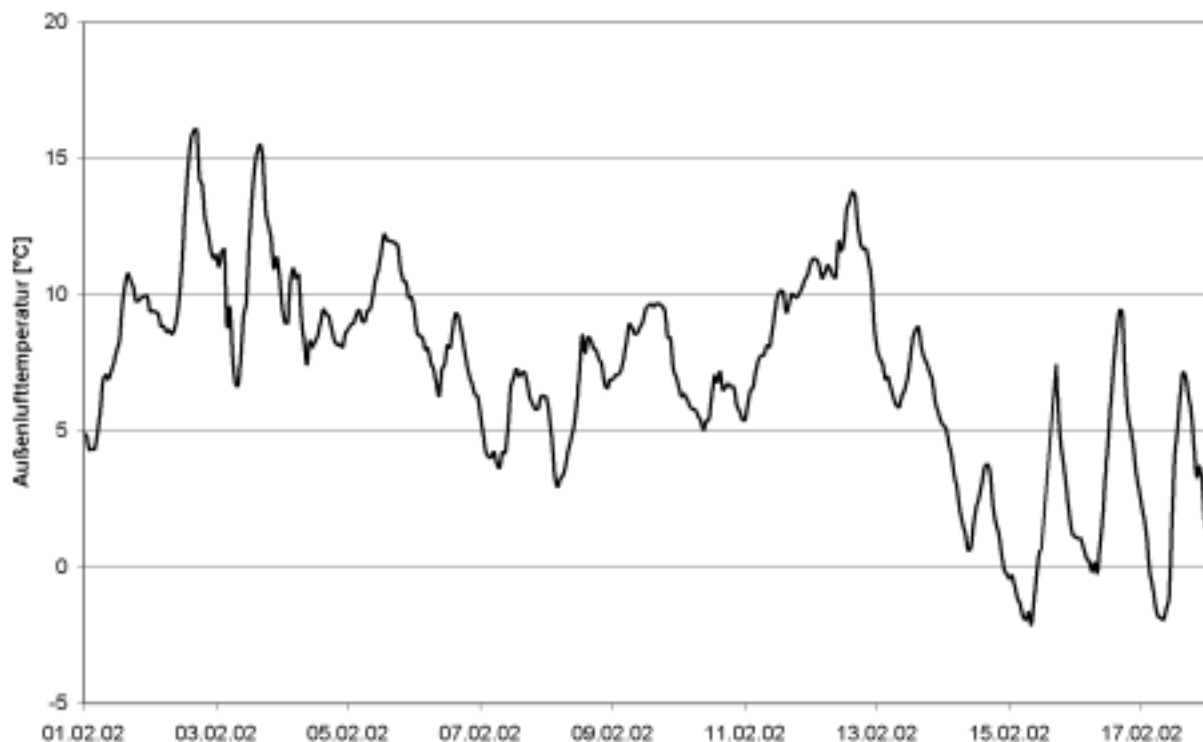


Abbildung 7: Verlauf der Außenlufttemperatur im Messzeitraum (Mittelwert 6,6 °C)

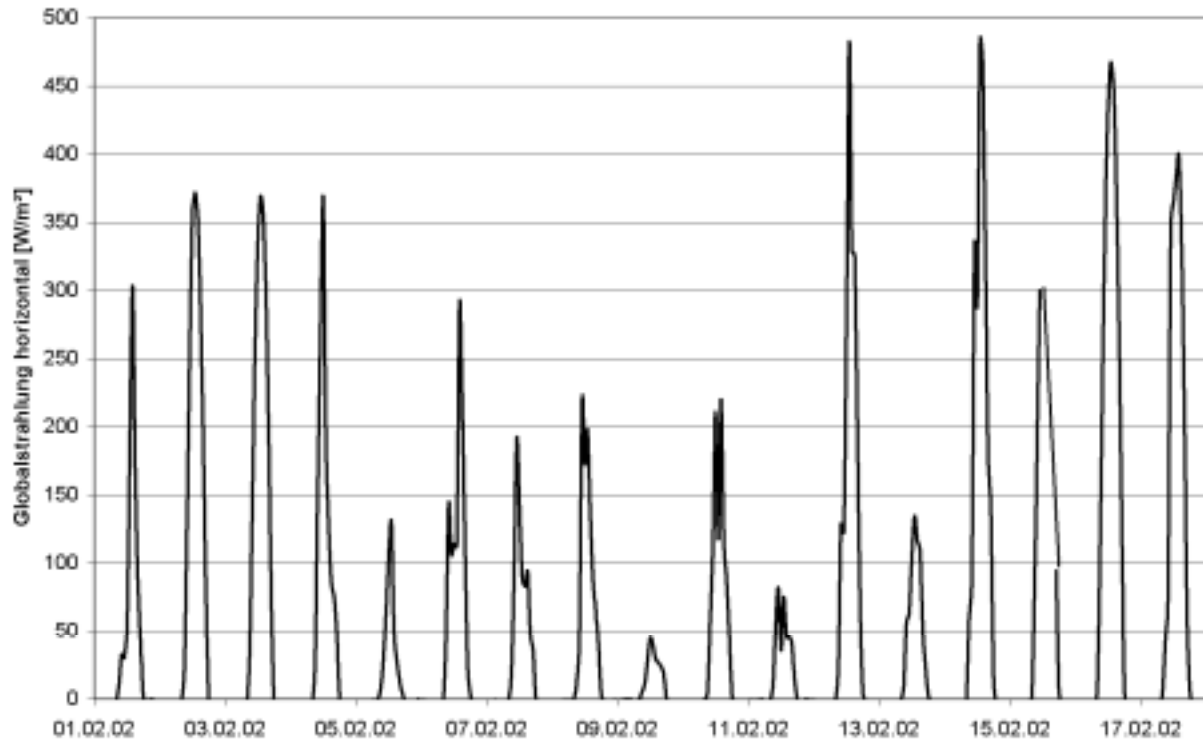


Abbildung 8: Verlauf der Globalstrahlung im Messzeitraum

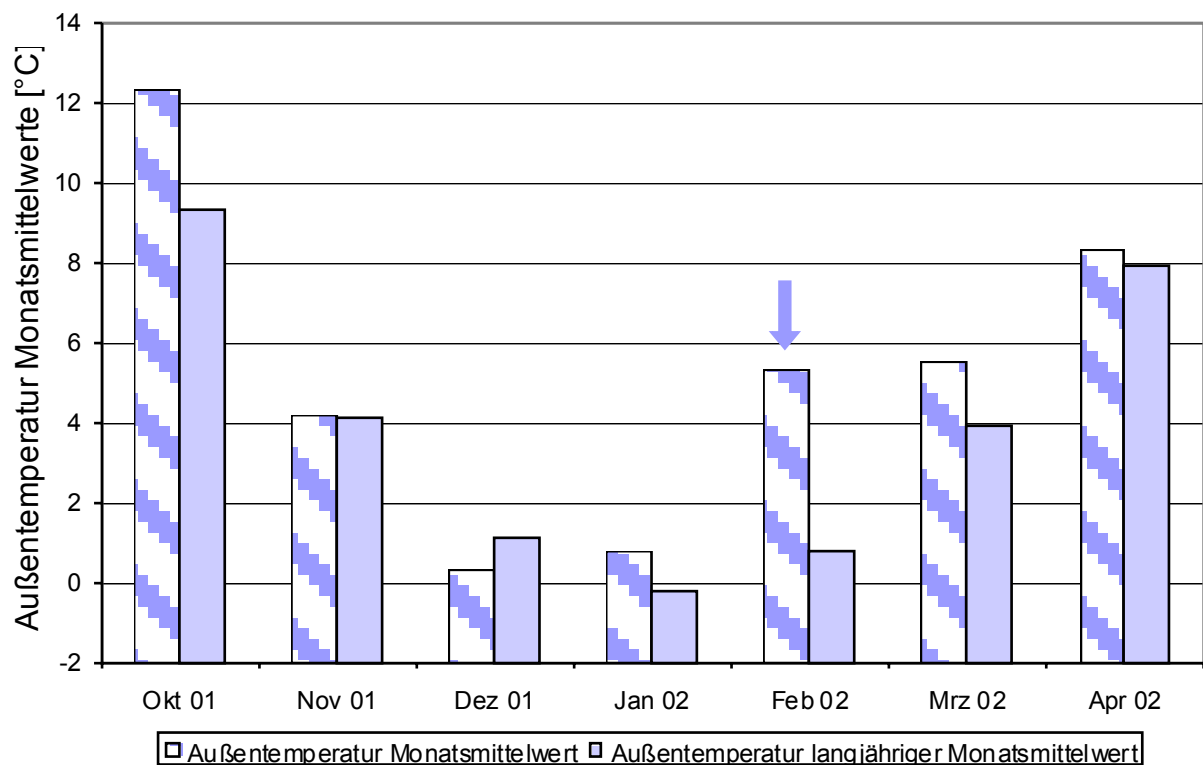


Abbildung 9: Vergleich der Monatsmittelwerte der Außentemperatur mit dem langjährigen Mittelwert (Datenquelle DWD, Station Kassel).

Im Vergleich zum langjährigen Mittelwert des Monats Februar war die Messperiode untypisch warm und sehr sonnig (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10). Die mittlere

Sonnenscheindauer während der Messperiode reicht an den langjährigen Mittelwert des Monats März heran und die Außentemperatur übersteigt sogar dessen langjährigen Mittelwert. Zusammenfassend lässt sich für die Randbedingungen festhalten, dass die Windverhältnisse für diesen Standort typisch, die Außenlufttemperatur und Globalstrahlung im Messzeitraum für die Jahreszeit aber untypisch hoch lagen.

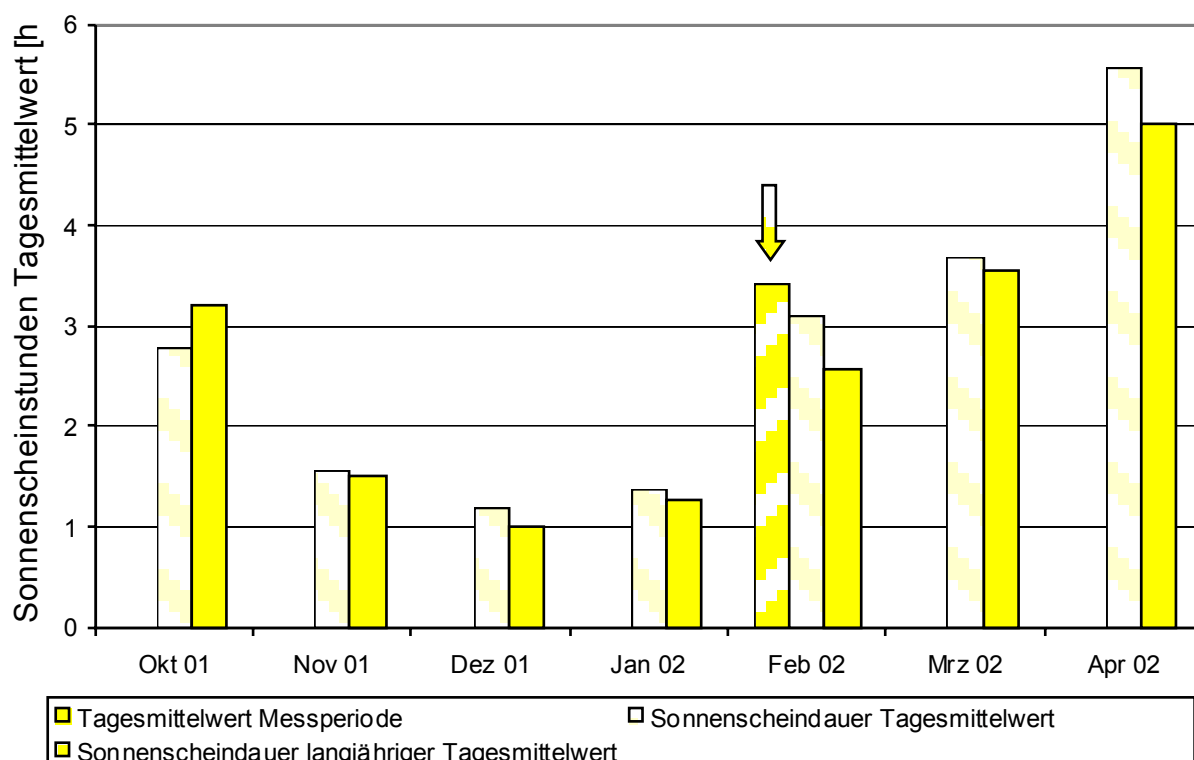


Abbildung 10: Vergleich der Tagesmittelwerte der Sonnenscheindauer mit dem langjährigen Mittelwert (Datenquelle DWD, Station Kassel).

3.3.3 Raumlufffeuchte

Für die Behaglichkeit im Raum spielt neben der operativen Temperatur auch die relative Raumlufffeuchte eine Rolle. Diese wird sowohl von der Quellstärke der Feuchtequellen als auch von der Luftwechselrate und der absoluten Feuchte der Außenluft beeinflusst.

Trägt man die Messdaten aus diesem Projekt in das Behaglichkeitsdiagramm [RWE 1998] ein, so zeigt sich, dass die Messwerte fast alle noch innerhalb der Grenzen „behaglich“ liegen, aber deutlich zu eher geringen Raumlufffeuchten tendieren (siehe Abbildung 11 und Grafiken im Anhang). Diese Tendenz wurde bereits in der letzten Heizperiode erkannt. Daraufhin wurden alle Bewohner mit einem Anschreiben darauf hingewiesen, dass die Lüftungsstufe im Kemwinter auf Minimum eingestellt werden kann, wenn zu trockene Raumluff vermieden werden soll.

Die gemessenen Werte liegen durchgängig im zulässigen Bereich, sie zeigen allerdings, dass die hier gewählten Luftmengen und Luftwechselraten eher im oberen Bereich der empfehlenswerten Werte liegen und keinesfalls als „gering“ eingestuft werden dürfen. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Raumlufffeuchte mit steigendem Luftwechsel sinkt, da die im Raum freigesetzte Feuchtigkeit stärker verdünnt wird.

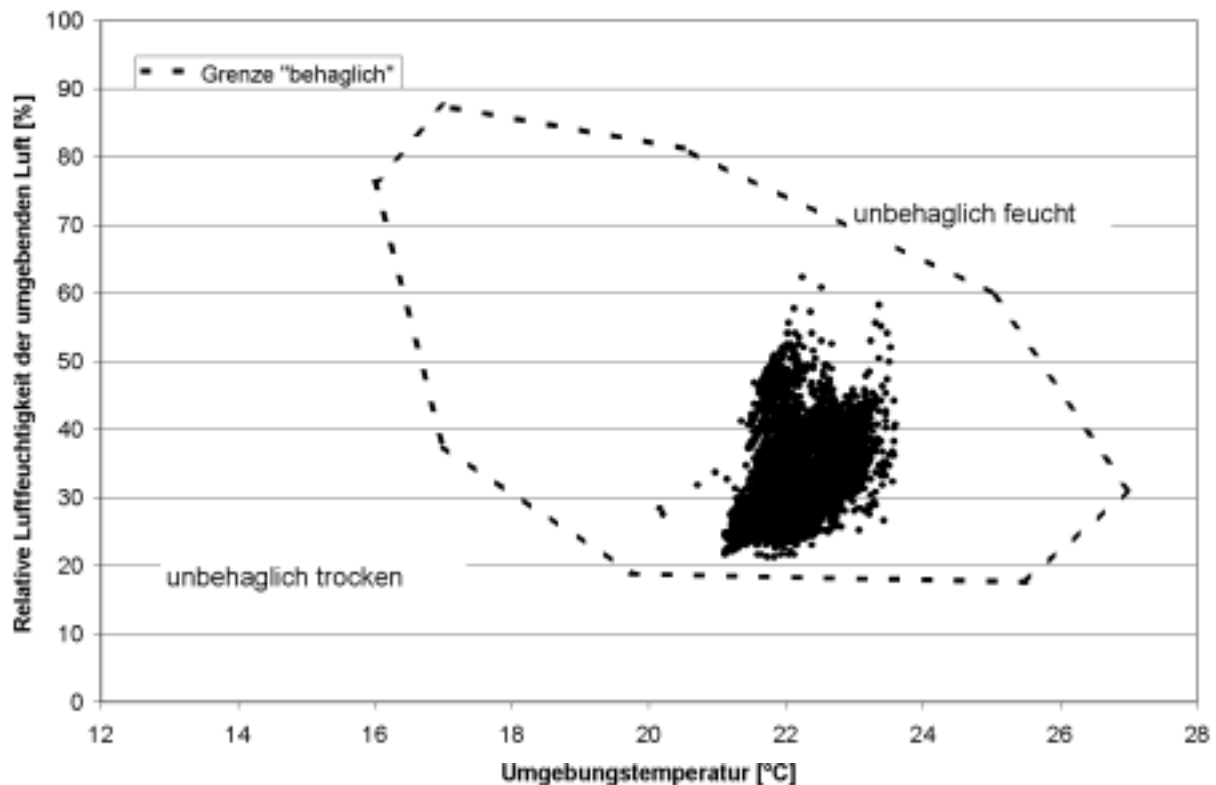


Abbildung 11: Behaglichkeitsbereich (v gl. [RWE 1998]) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der relativen Feuchtigkeit der umgebenden Luft sowie die Messdaten einer Wohnung v om 15.12.01 bis zum 17.2.02 (Stundenmittelwerte).

3.3.4 CO₂-Konzentration

Zur quantitativen Überprüfung der Raumluffqualität wurde die Messung der CO₂-Konzentration herangezogen. Diese hat sich als praktikabler Indikator für Innenraumluffbelastungen herausgestellt und lässt sich mit vertretbarem Aufwand kontinuierlich erfassen.

Der Prozentsatz Unzufriedener (PD-Wert gemäß CEN-Bericht CR 1752, siehe Abbildung 12) steigt mit der CO₂-Konzentration, nach DIN 1946 Teil 2 sollten 1500 ppm nicht dauerhaft überschritten werden.

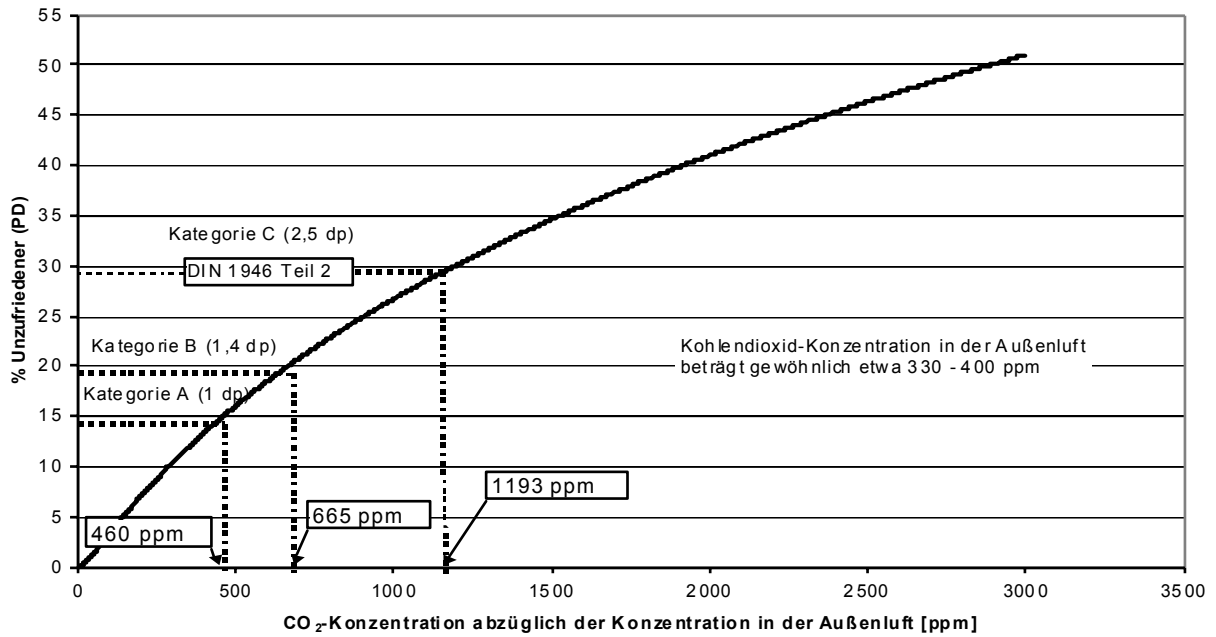


Abbildung 12: Abhängigkeit des Prozentsatzes Unzufriedener von der Kohlendioxid-Konzentration über der im Freien nach CEN-Bericht CR 1752

Um Aussagen über die CO₂-Bilanz im Gebäude durchführen zu können, war es notwendig, die Konzentration auch im Zuluftkanal zu messen. Geht man davon aus, dass die Leckagen im Wärmeübertrager vernachlässigbar gering sind, repräsentiert dieser Wert auch die CO₂-Konzentration in der Außenluft. Hierzu wurde ein Kanalsensor (Typ NDIR Non-Dispersive InfraRed, Messbereich 0-2000 ppm, Zeitkonstante <1 min) im Zuluftkanal installiert (siehe Abbildung 13).

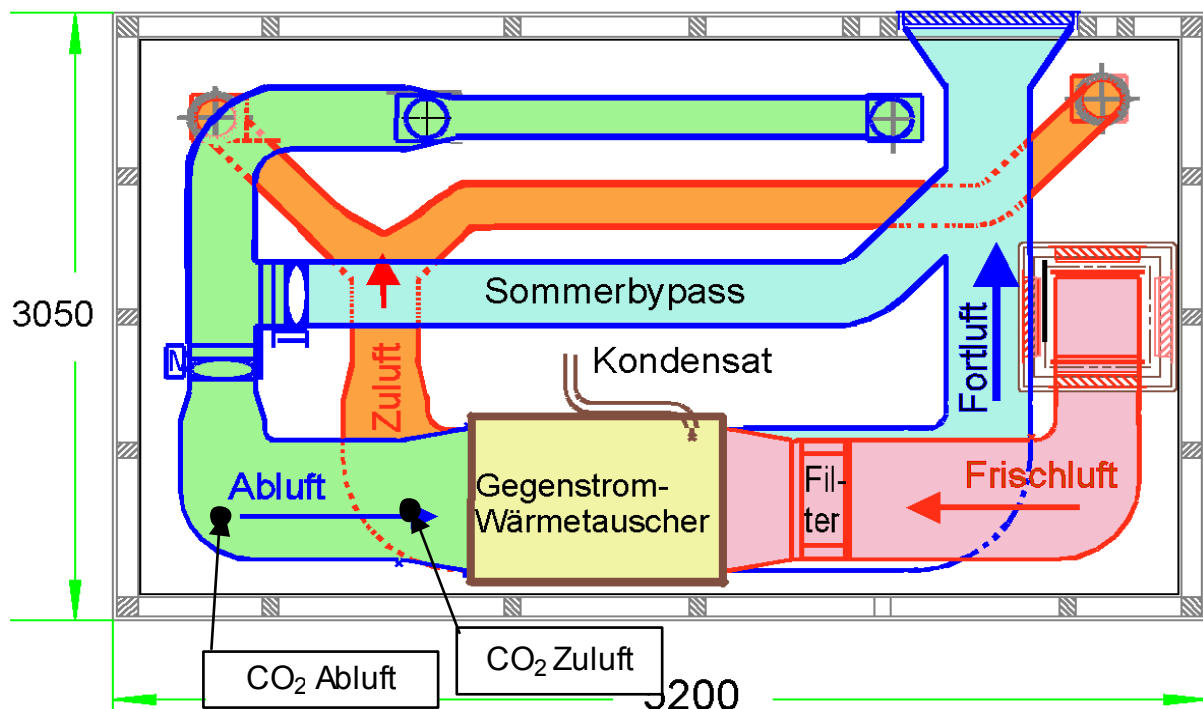


Abbildung 13: Anordnung der CO₂-Messstellen in der Lüftungszentrale Süd

Vor und nach der eigentlichen Messung (1.12.01 bzw. 8.5.02) wurden die Sensoren mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Prüfgasen (1503 bzw. 544 ppm CO₂ in synthetischer Luft, Messunsicherheit $\pm 2\%$ gem. Analysezertifikat) in der gesamten Messkette (Analogausgang, AD-Wandler) kalibriert. Alle Sensoren wurden bereits am Vortag der Kalibrierung zum Warmlaufen in Betrieb genommen.

Um das Eindringen von Umgebungsluft zu vermeiden, wurde für die Kanalsensoren ein Rohr mit Endkappe und Kugelhahn über den Ansaug-/Austrittsstutzen des Sensors gestülpt und luftdicht am Gehäuse befestigt (siehe Abbildung 14). Vom Druckminderer der Prüfgasflasche wurde ein PE-Schlauch in das Gehäuse des Sensors geführt. Bei geöffnetem Kugelhahn wurde das gesamte Sensorgehäuse jeweils mindestens 20 Minuten mit dem Prüfgas gespült. Damit konnte sichergestellt werden, dass die Sensorprüfkammer vollständig mit Prüfgas gefüllt wird. Die Zeitkonstante des Sensors (Herstellerangabe TSI) beträgt eine Minute. Um Kalibrierfehler aufgrund der Druckabhängigkeit des Sensors zu vermeiden, wurde wie im normalen Messbetrieb nur bei minimalem Überdruck kalibriert.

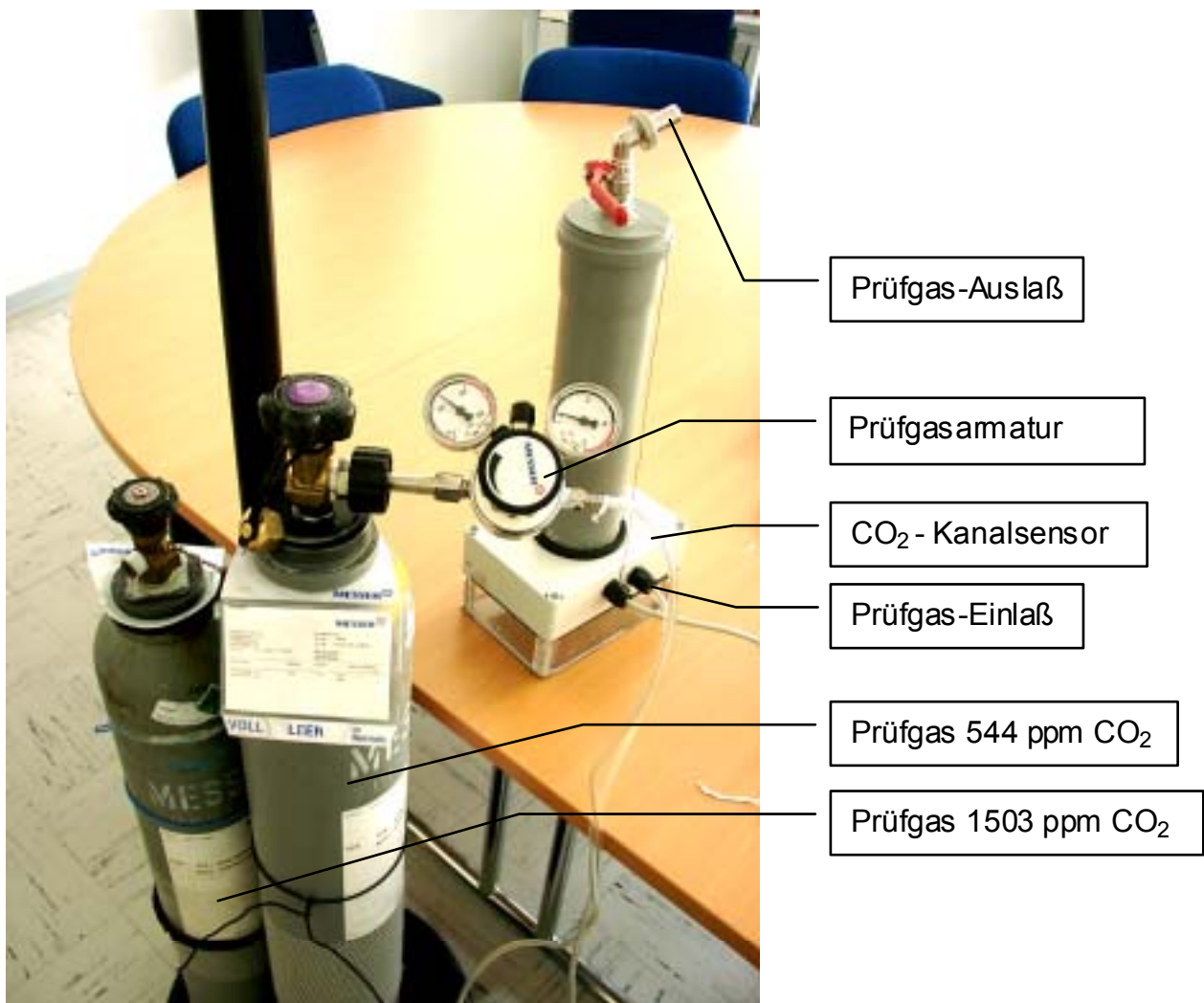


Abbildung 14: Kalibrierung eines CO₂-Sensors mit Prüfgasen (CO₂ in synthetischer Luft)

Die Drift des Sensorsignals innerhalb der 158 Tage zwischen der ersten und der zweiten Kalibrierung betrug 2 %. Damit ist die Stabilität der Kalibrierung ausreichend für die durchgeführte CO₂-Messung. Die Temperaturdrift des Sensors wird vom Hersteller mit 0,1 % /K (bei 20 °C) angegeben und ist in diesem Einsatzfall vernachlässigbar gering (Temperaturabweichung maximal 5 K).

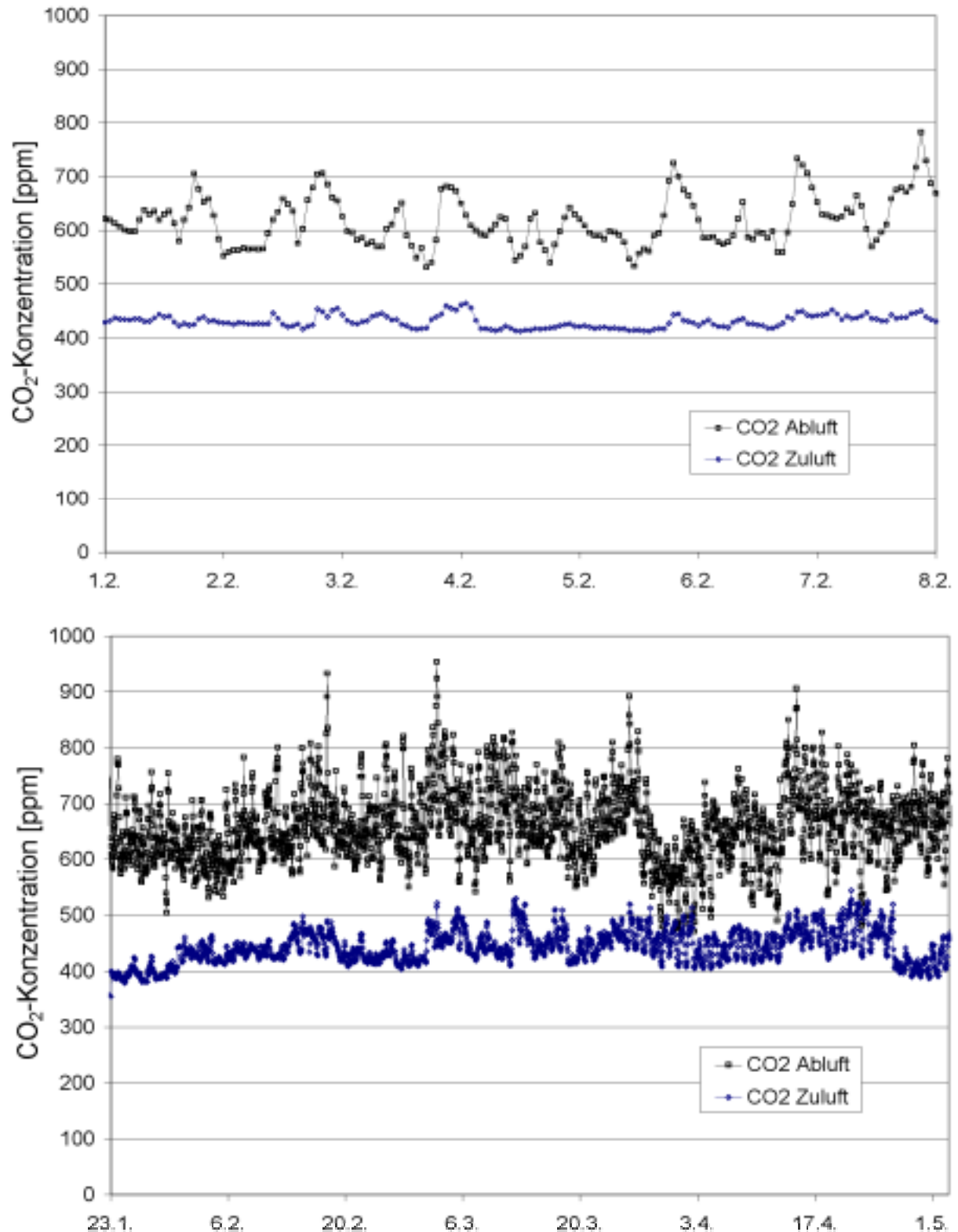


Abbildung 15: Verlauf der CO₂-Konzentration der Zu- und Abluft

Abbildung 15 zeigt einen typischen Tagesgang der CO₂-Konzentration in der Zuluft. Da die Schwankungsbreite innerhalb des Messzeitraums ca. 200 ppm beträgt, muss die Außenluftkonzentration bei der Bewertung der Raum- und Abluftkonzentrationen berücksichtigt werden.

Die CO₂-Konzentration in Wohnräumen soll nach DIN 1946 Teil 2 1500 ppm nicht übersteigen. Da die Konzentration in den einzelnen Räumen je nach Belegung sehr unterschiedlich sein kann, reicht die Messung der CO₂-Konzentration in der Abluft nicht aus. Diese stellt eine Mischkonzentration aus allen Ablufträumen dar und gibt damit nur den Mittelwert über alle Wohnräume an. Die maximalen Konzentrationen sind in den Schlafräumen zu erwarten, weil hier relativ hohe Belegungsdichten über längere Zeiträume vorliegen. Aus diesem Grund wurde ein zusätzlicher CO₂-Sensor (ebenfalls vom Typ NDIR Non-Dispersive InfraRed, Messbereich 0-2000 ppm, Zeitkonstante <1 min) in einem Schlafzimmer einer Wohneinheit aufgestellt. Die Aufzeichnung erfolgte über einen Datalogger (Fa. Almemo, Typ 2290-8) mit einer Zeitschrittweite von einer Minute. Auch dieser Sensor wurde inkl. der gesamten Messkette mit Hilfe von Prüfgasen kalibriert. Abbildung 16 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Konzentration. Nur in einem Ausnahmefall tritt kurzzeitig eine CO₂-Konzentrationen von 1006 ppm auf. Normalerweise steigen die Konzentrationen nachts auf Werte von ca. 900 ppm an und sinken nach Verlassen des Raumes in den Morgenstunden rasch bis fast auf Außenluftkonzentration ab.

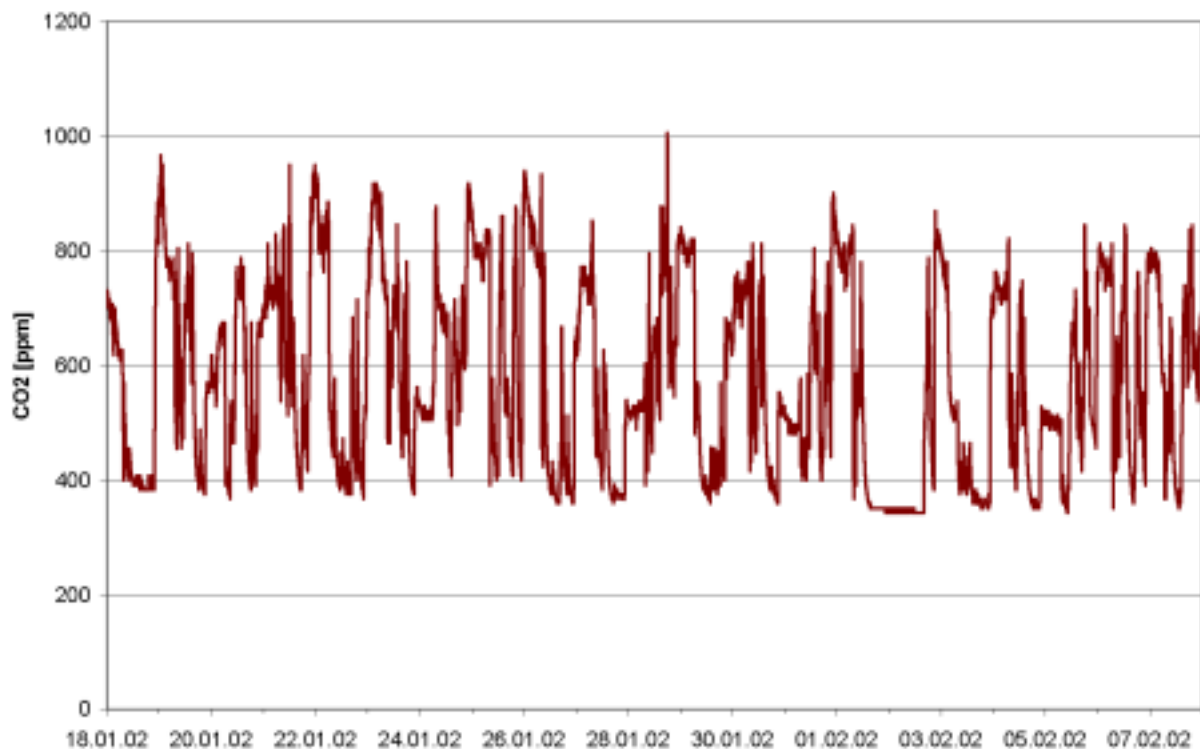


Abbildung 16: Verlauf der CO₂-Konzentration im Schlafzimmer einer Wohneinheit

Das Volumen des untersuchten Raumes beträgt 36,05 m³. Der am Zuluftelement (Weitwurfdüse) gemessene Volumenstrom bei Normallüftung betrug 44 m³/h, d.h. die

Luftwechselrate aufgrund mechanischer Lüftung beträgt für diesen Raum 1,22 1/h. Verlassen die Bewohner den Raum ohne das Fenster zu öffnen, sinkt die CO₂-Konzentration entsprechend einer exponentiellen Abklingkurve, wie in Abbildung 17 deutlich zu erkennen ist. Die aus der Regression bestimmte Luftwechselrate beträgt 0,97 1/h, weicht also um 20 % gegenüber der über die Volumenstrommessung bestimmten Luftwechselrate ab. Abweichungen können z. B. durch unzureichende Durchmischung sowie durch einen Eintrag von CO₂ aus den Nachbarräumen entstehen.

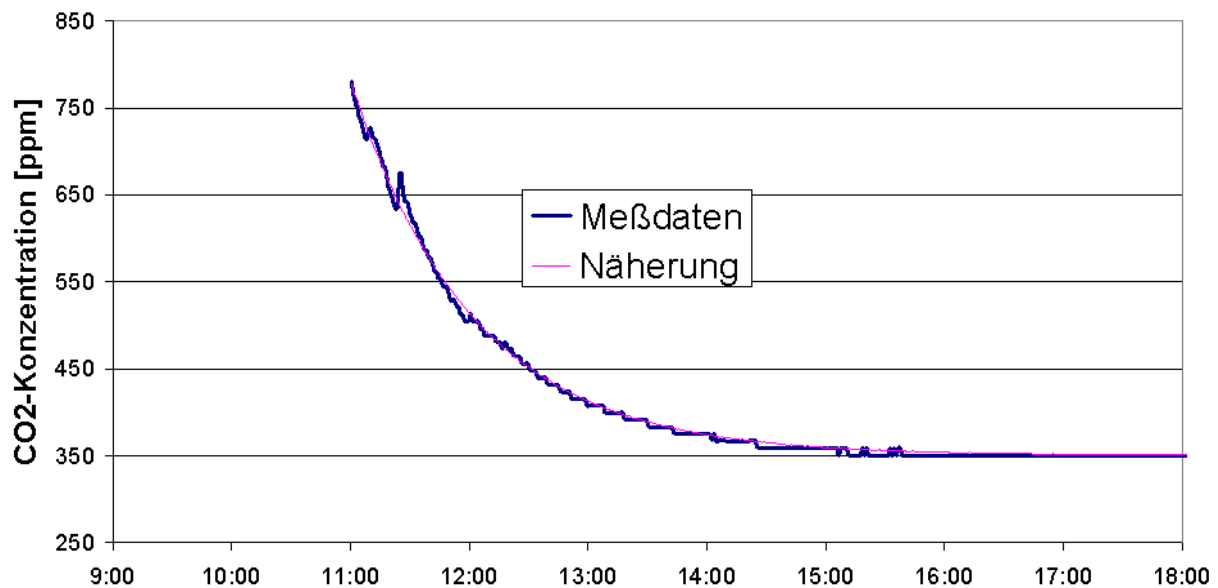


Abbildung 17: Absinken der CO₂-Konzentration nach Verlassen des Raumes bei rein maschinellem Luftwechsel

3.3.5 Volumenstrommessung bei maschineller Lüftung

Um eine möglichst genaue Aussage über die jeweiligen Zu- und Abluftvolumenströme im untersuchten Bereich (8 Südwohnungen) machen zu können, wurden diese mit Hilfe eines Volumenstrom-Messgerätes (Fa. Acin) jeweils für die drei Ventilatorstufen (Grund-, Normal- und Stoßlüftung) sowohl in den Zu- als auch in den Abluftzonen gemessen. Das Messprinzip des eingesetzten Gerätes (Druckverlustkompensation durch eingebauten Stützventilator) ermöglicht es, den Volumenstrom direkt am Ventil mit nur sehr geringer Beeinflussung durch zusätzlichen Druckverlust zu messen (siehe Abbildung 18). Um den Messtrichter an die unterschiedlichen Geometrien anpassen zu können, wurden spezielle Blendenkonstruktionen angefertigt.

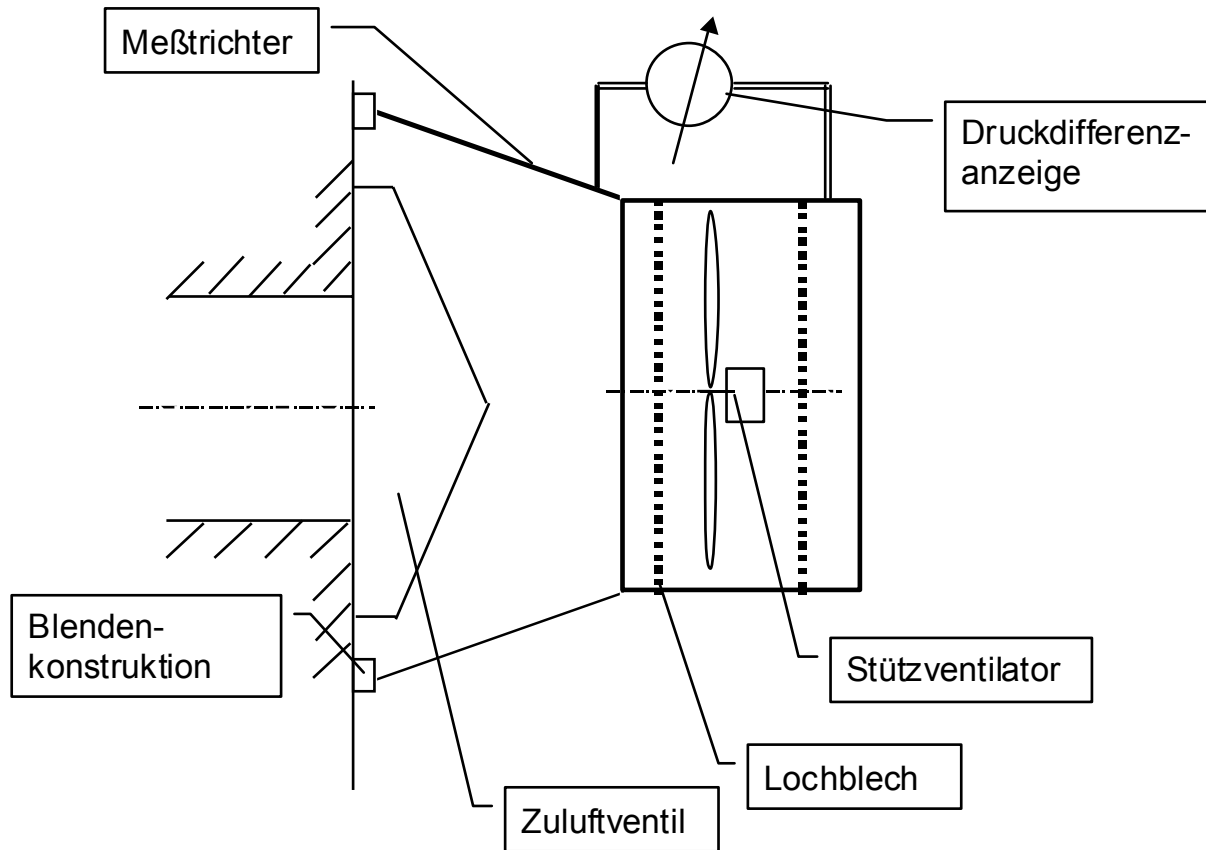


Abbildung 18: Prinzip der Volumenstrommessung mit Druckverlustkompensation durch Stützventilator



Abbildung 19: Messung des Zuluftvolumenstroms an einem Zuluftventil über der Wohnzimmertür

In jeder Wohneinheit wurde jeweils an drei Zuluftventilen (Kind, Schlafen, Wohnen) sowie zwei Abluftventilen (Küche und Bad) gemessen. Die Messdaten sowie die Ergebnisse für die Balance (Zuluftüberschuss) sind in Tabelle 2 eingetragen. Um die Verteilung der jeweiligen Disbalance zu veranschaulichen, wurden diese Werte zusätzlich in Abbildung 21 dargestellt. Bei den hier eingesetzten Ventilatoren handelt

es sich um elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren mit automatischer Massenstromregelung. Die Balance-Einstellung erfolgt daher selbsttätig, auch bei Veränderung des Druckabfalls (z.B. durch Verschmutzung der Vorlegefilter der Abluftventile). Der Betrag der Disbalance in der Stufe Normallüftung liegt im Mittel bei 7 %, die maximale Abweichung beträgt 12 %. Disbalance in diesem Bereich führt noch zu keinen erhöhten Lüftungswärmeverlusten durch erzwungene In- bzw. Exfiltration, weil die freie In- bzw. Exfiltration in gleichem Maße abnimmt. Betrachtet man den gesamten Gebäudeabschnitt (Südwohnungen), so beträgt der gesamte Zuluftvolumenstrom in der Ventilatorstufe „Normallüftung“ 1027 m³/h, der Abluftvolumenstrom 1003 m³/h. Die Disbalance bezogen auf den zentralen Wärmeübertrager beträgt damit lediglich 2 %. Stärkere Disbalance trat vor dem 6.2.02 aufgrund eines Ausfalls eines Zuluftventilators auf. In den Wohneinheiten 3 und 4 steigt beim Wechsel von Grundlüftung auf Normallüftung der Anlagenförderstrom nicht wie erwartet an (vgl. Tabelle 2), sondern sinkt um ca. 10% ab. Anhand der Aufzeichnungen konnte dieser Widerspruch nicht mehr abschließend geklärt werden. In den restlichen 6 Wohnungen waren die Ergebnisse der Volumenstrom-Messung schlüssig.

Nimmt man die zum Messzeitpunkt bestimmten Volumenströme als konstant für die jeweilige Lüfterstufe an, so kann aus den Daten des Haustechnik-Busses über die jeweils gewählte Lüfterstufe der einzelnen Wohneinheit der resultierende Gesamtvolumenstrom der Zu- und Abluft am Wärmeübertrager berechnet werden. Der entsprechende Zeitverlauf ist in Abbildung 20 dargestellt. Zu erkennen sind sowohl die Stoßlüftungen einzelner Wohneinheiten als auch der Sprung im Zuluftvolumenstrom durch die Reparatur des Ventilators.

Diese Werte stimmen mit den über Staukreuze in der Lüftungszentrale bestimmten Messwerten bis auf eine Abweichung von 4,5 % überein. Aufgrund kurzzeitiger Schwankungen des Winddrucks auf die Außen- bzw. Fortluftöffnung sind diese Daten jedoch mit einem hochfrequenten „Rauschen“ überlagert.

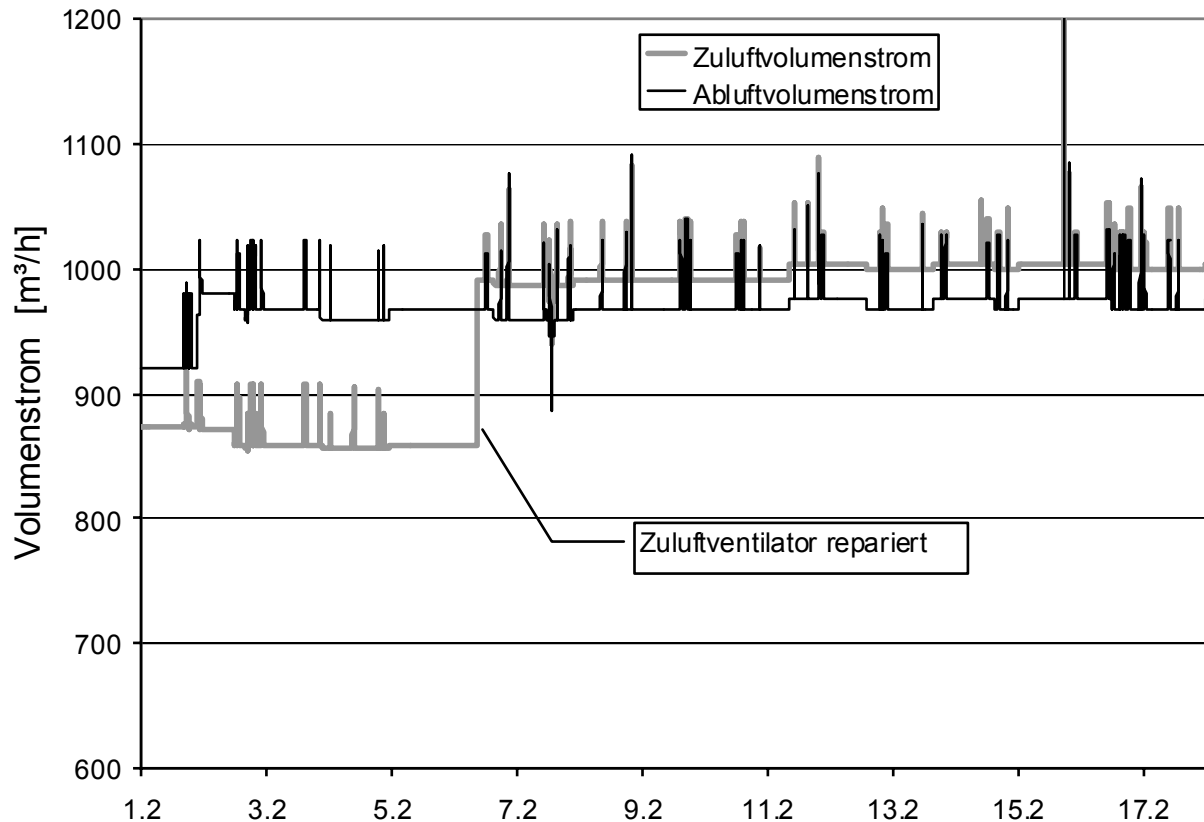


Abbildung 20: Gesamter Zu- bzw. Abluftvolumenstrom (berechnet aus den gemessenen Einzelwerten und den Daten über die jeweils gewählten Lüfterstufen).

Aus den gemessenen Zuluftvolumenstromdaten errechnet sich eine mittlere maschinelle Luftwechselrate von 0,62 für den untersuchten Gebäudeabschnitt. Wie sich aus den Messergebnissen nach Abschnitt 3.3.3 erkennen lässt, führt dieser relativ hohe Wert zu tendenziell eher trockener Raumluft in den Wintermonaten, jedoch generell zu sehr niedrigen Werten für die CO_2 -Konzentration als Indikator für die Innenraumluftbelastung. Der gewählte Luftwechsel ist daher in jedem Fall ausreichend, unter dem Gesichtspunkt der Raumluftfeuchte eher etwas zu hoch.

Die Belegungsdichte in diesem Projekt des sozialen Wohnungsbaus ist mit $23 \text{ m}^2/\text{Person}$ deutlich höher als bei Einfamilienhäusern. Für Einfamilienhäuser ergeben sich daher niedrigere Luftwechselraten als in diesem Projekt.

Grundlüftung [m ³ /h]	WE 1	WE 2	WE 3	WE 4	WE 5	WE 6	WE7	WE 8
Kind	38	42	44	40	37	42	36	36
Schlafen	38	42	44	46	39	40	40	40
Wohnen	33	33	40	44	35	36	56	40
Küche	45	50	72	68	56	73	60	58
Bad	68	60	58	54	63	56	56	52
Summe Zuluft	109	117	128	130	111	118	132	116
Summe Abluft	113	110	130	122	119	129	116	110
Disbalance [%]	-4	6	-2	6	-7	-9	12	5
Nomallüftung [m ³ /h]								
Kind	42	44	40	38	42	56	40	42
Schlafen	42	47	39	43	44	52	40	42
Wohnen	37	38	36	40	38	46	56	43
Küche	50	58	36	61	59	99	65	66
Bad	74	64	66	46	69	72	60	58
Summe Zuluft	121	129	115	121	124	154	136	127
Summe Abluft	124	122	102	107	128	171	125	124
Disbalance [%]	-2	5	11	12	-3	-11	8	2
Stoßlüftung [m ³ /h]								
Kind	54	56	57	54	54	53	50	55
Schlafen	54	57	56	60	55	50	50	55
Wohnen	50	49	51	58	50	46	61	54
Küche	70	84	99	94	87	100	92	92
Bad	99	94	77	68	94	72	85	74
Summe Zuluft	158	162	164	172	159	149	161	164
Summe Abluft	169	178	176	162	181	172	177	166
Disbalance [%]	-7	-10	-7	6	-14	-15	-10	-1

Tabelle 2: Messergebnisse der Volumenstrommessung bei allen drei Lüfterstufen

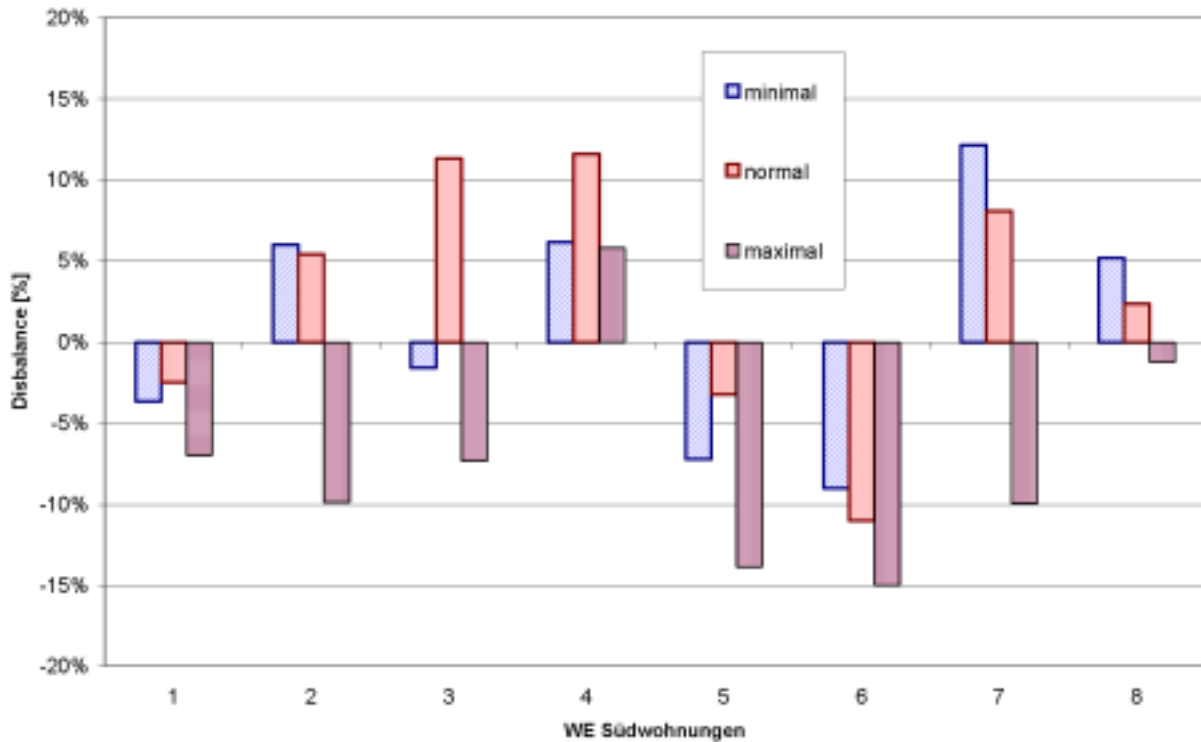


Abbildung 21: Disbalance (Zuluftüberschuß der untersuchten Wohneinheiten)

3.3.6 Auswertung der Daten zu den Fensterstellungen

Zur Untersuchung des Fensteröffnungsverhaltens wurde an 10 Fenstern Fensterkontakte angebracht. Dabei wurden die Bewohner vor dem Anbringen befragt, welche Fenster normalerweise zum Lüften geöffnet werden. Auf diese Weise konnten 5 Wohneinheiten der insgesamt 8 Wohneinheiten in Kassel mit Fensterkontakten ausgestattet werden. Die Öffnungszeiten wurden jeweils unterschieden nach Fensterstellung (gekippt bzw. offen). Abbildung 22 zeigt jeweils die mittlere tägliche Fensteröffnungsdauer in Minuten je Wohneinheit (unter der Annahme, dass nur an den Fenstern mit Öffnungskontakten gelüftet wurde). Im Mittel ergab sich für den untersuchten Zeitraum ein Mittelwert der 5 Wohnungen von 3 h pro Tag. Sowohl die geringe Anzahl an Wohnungen als auch der untersuchte Zeitraum sind nicht repräsentativ, zumal die Südwohnungen bei starker Solareinstrahlung häufiger erhöhte Temperaturen aufweisen und die Übertemperaturen abgelüftet werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 23 deutlich zu erkennen. Bei Temperaturen über 23 °C tritt gehäuft Fensterlüftung auf. An der Mitteltemperatur der Raumlufttemperaturen von 22,6 °C lässt sich erkennen, dass die Temperaturen im untersuchten Zeitraum deutlich über dem Langzeitmittelwert (21 °C) in der Heizperiode liegen. Die gemessenen Werte für die Fensteröffnungsdauer stellen damit eine Obergrenze für das Lüftungsverhalten im Winter dar.

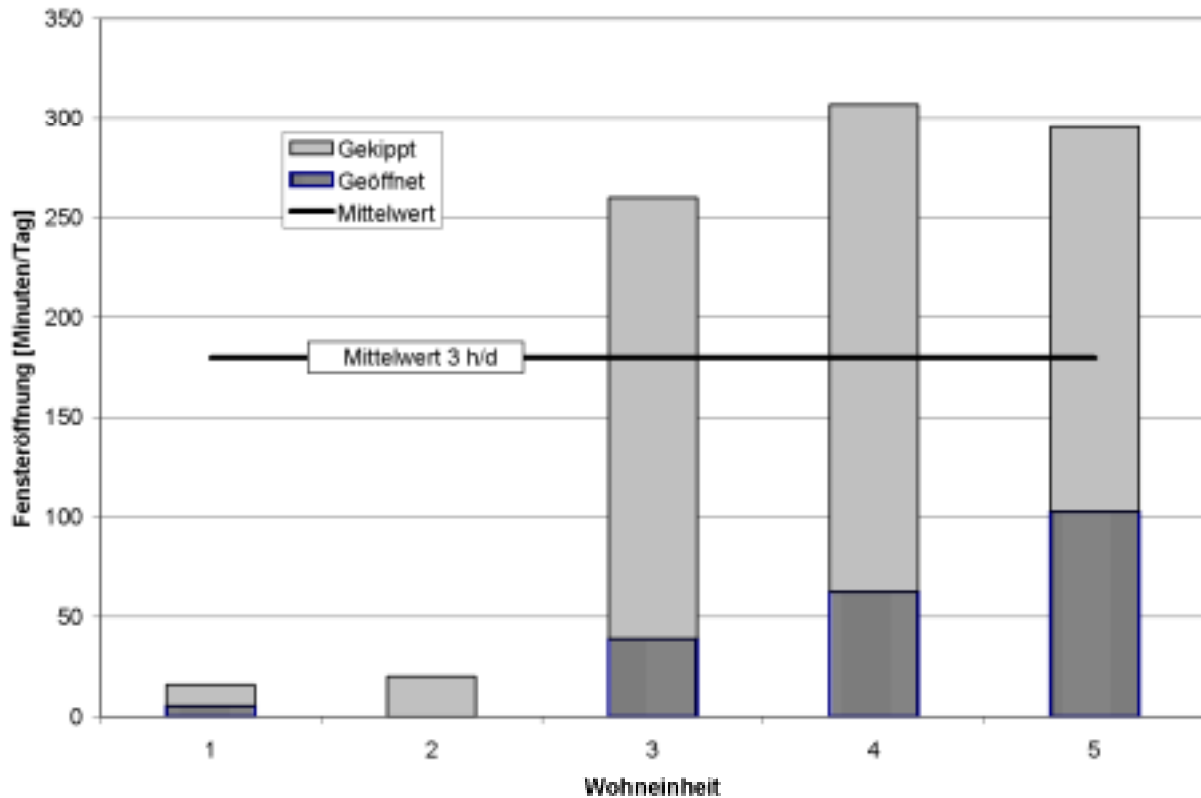


Abbildung 22: Mittelwerte der täglichen Fensteröffnungszeiten pro Wohnung (Stellung gekippt bzw. offen). Die Mittelwerte sind über die Öffnungsdauern der installierten Fensterkontakte gebildet (die Wohnungen waren nicht vollständig mit Fensterkontakten ausgestattet).

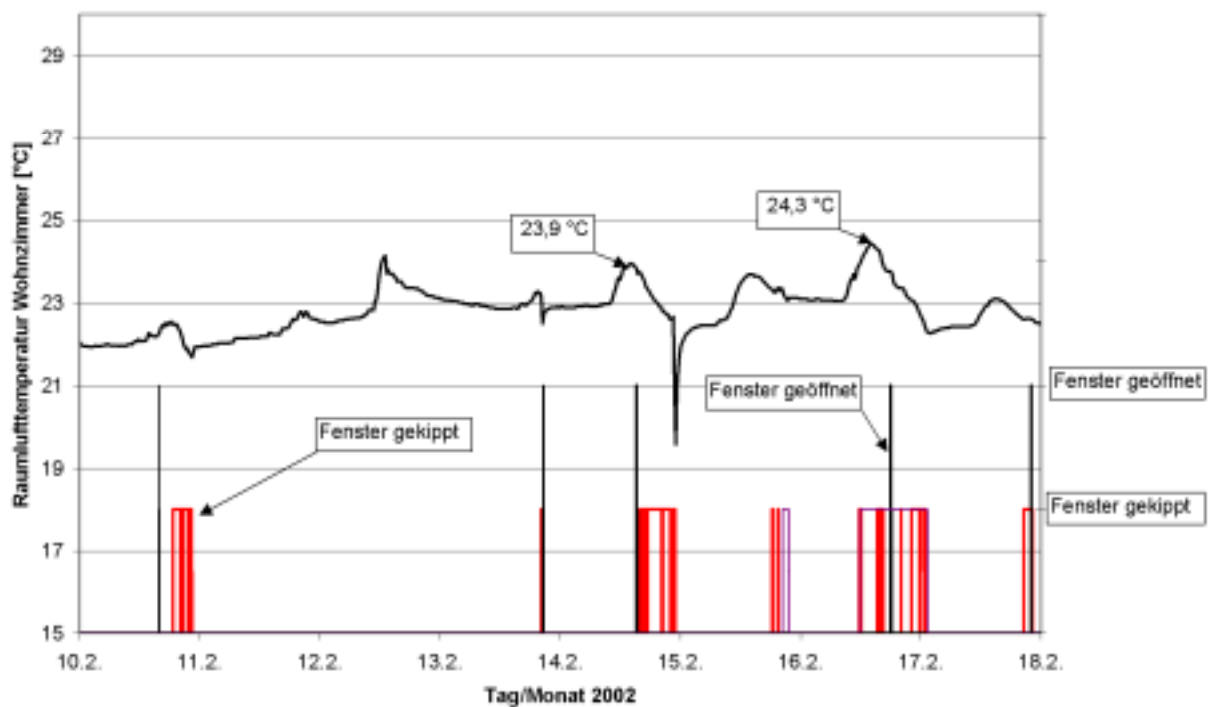


Abbildung 23: Fensteröffnungsverhalten bei Übertemperatur

3.3.7 Beschreibung der Indikatorgas-Messung

In Kassel wurden vom 31.1.2002 bis zum 16.2.2002 Indikatorgas-Messungen durchgeführt. Der Außenluftwechsel wurde in dieser Zeit in 8 süd-orientierten Wohneinheiten (vgl. Abschnitt 3.3.1) kontinuierlich erfasst. Bei zwei Wohneinheiten konnten die Messungen, aufgrund eines technischen Defekts, erst ab dem 6.2.2002 berücksichtigt werden.

Bei der angewandten Konstant-Injektions-Methode wird ein zeitlich konstanter Indikatorgas-Volumenstrom der Raumluft beigegeben. In Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf des Luftwechsels in der Raumluftzone stellt sich eine bestimmte Indikatorgas-Konzentration in der Raumluft ein, die gemessen wird (vgl. Abschnitt 3.2). Während der Messungen in Kassel wurde jeweils eine Wohnung als eine Raumluftzone aufgefasst. Mit einer Mess-Stelle im Abluftkanal konnte eine mittlere Wohnungs-Konzentration bestimmt werden. Ermittelt wurde der Gesamtaußenluftwechsel als Summe aus dem Anlagenluftwechsel, dem Beitrag durch Fensterlüftung und einem Beitrag durch In- und Exfiltration durch Leckagen.

3.3.8 Messaufbau der Indikatorgas-Messung

Der Messaufbau wurde in der Dachlüftungszentrale der 8 Südwohnungen eingerichtet. Gas-Zuführungseinheit und Indikatorgas-Monitor waren hier untergebracht (vgl. Abbildung 24). Die Spurengas-Injektionseinheit besteht aus einer Druckgasflasche mit Indikator-Luft-Gemisch, einem Druckminderer, einem Feindosierventil und einem Durchflussmesser. Das Spurengas wurde den Wohnungen über die Zuluft der Lüftungsanlage beigegeben. Die Injektionseinheit sorgte für die kontinuierliche Zugabe des Indikators bei gleichzeitiger Erfassung der Injektionsrate in den Zuluftstrang der 8 Südwohnungen. Mit der Zuluft gelangt der Indikator in die Wohnungen. Aufgrund des Zuluftvolumenstroms und des zusätzlichen zeitweiligen freien Luftwechsels durch Fensteröffnung wird das Spurengas in den Wohnungen verdünnt. Die sich einstellende Konzentration in den Wohnungen wird als Mittelwert in der Abluft gemessen (vgl. Abbildung 25).

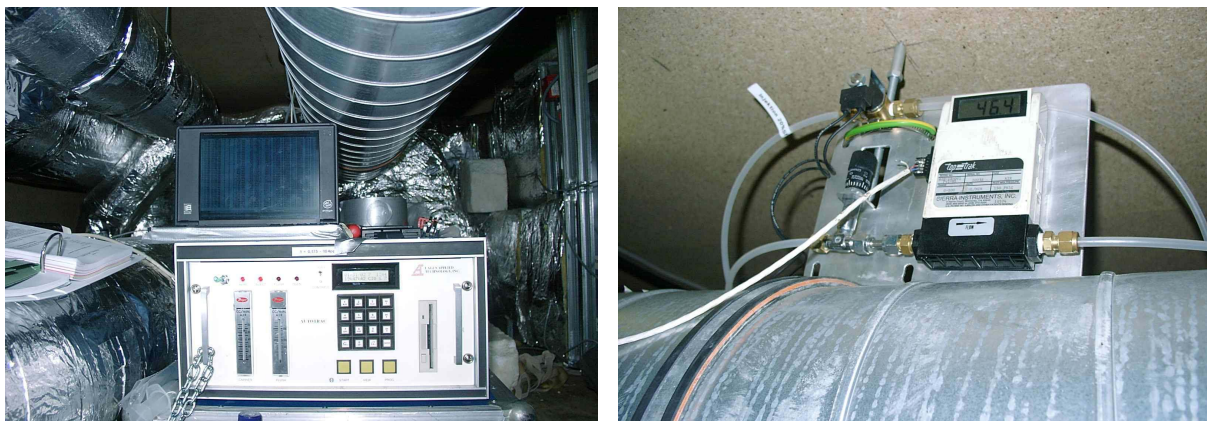


Abbildung 24: Messaufbau. Indikatorgas-Monitor und Durchflussmesser für Indikatorgas.

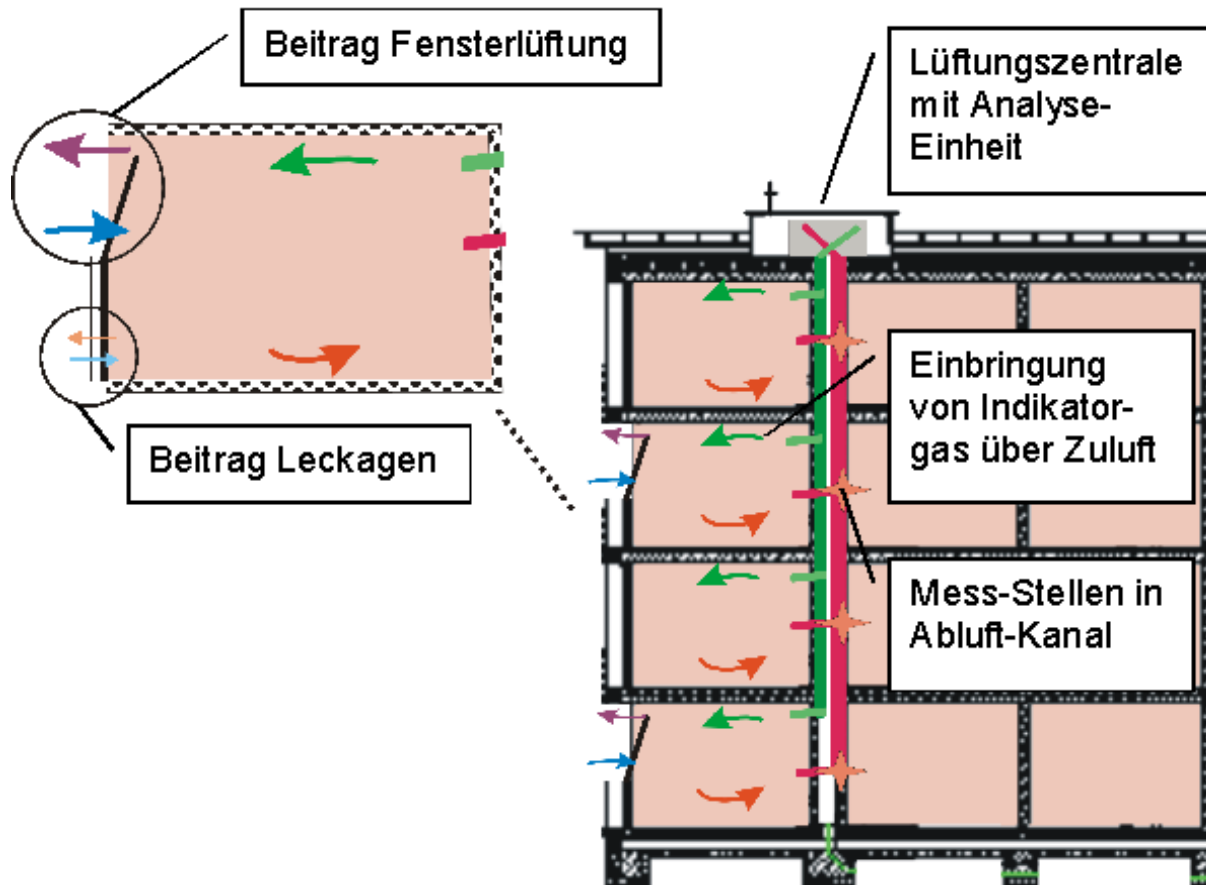


Abbildung 25: Prinzipskizze des Messaufbaus für 4 Wohnungen. Gemessen wird der Gesamtaußenluftwechsel als Summe der Beiträge der Lüftungsanlage, der Fensterlüftung sowie In- und Exfiltration durch Leckagen.



Abbildung 26: Ansaugen von Luftproben über Schlauchsystem (Zuluft-/ Abluftkanal)

Über ein Schlauchsystem werden Luftproben-Volumina von den Abluft-Mess-Stellen angesaugt und im mobilen Gaschromatographen (vgl. Abschnitt 3.2.3) ausgewertet. Die zeitliche Auflösung der Messwerte ist durch den Analysevorgang und das sequentielle Auslesen der neun Messkanäle auf 15 min begrenzt. D.h. alle 15 min wird ein Konzentrationswert je Wohnung aufgezeichnet.

3.3.9 Referenzmessung zur Indikatorgas-Messung

Der reine Anlagenluftwechsel wurde im Geschosswohnbau mit Staukreuzen im Fort- und Außenluftkanal erfasst (vgl. Abschnitt 3.3.5). Eine Kalibrierung der Indikatorgas-Messung konnte durch Abgleich der mit der Indikatorgastechnik ermittelten Volumenströme und der Staukreuzmessung des Anlagenluftwechsel durchgeführt werden. Hierzu wurden die wohnungsweise mit der Indikatorgasmethode gemessenen Außenluftwechselraten herangezogen. Bei geschlossenen Fenstern sollte der mit der Indikatorgastechnik bestimmte Wohnungsaußenluftwechsel dem reinen Anlagenluftwechsel entsprechen. Ein zusätzlicher Beitrag von In- und Exfiltration durch Leckagen wird aufgrund der sehr guten Luftdichtheit der Wohnungen zunächst vernachlässigt (n_{50} -Mittelwert des Gebäudes $0,35 \text{ h}^{-1}$). Diese Kalibrierung wurde der Datenauswertung im Mehrgeschosswohnbau zugrundegelegt.

In Abbildung 27 ist der mittlere Außenluftwechsel aller 8 Wohneinheiten in der Zeit von 22:00 bis 6:00 dargestellt. Fensterlüftung fand in dieser Zeit kaum statt, so dass für diese Zeiten die Messwerte der Indikatorgas-Messung und der Messung des Anlagenluftwechsels über Staukreuze verglichen werden können. Nächte mit Fensterlüftung sind mit „F“ markiert. Die Referenzmessung (Staukreuz) wird mit den Indikatorgas-Messungen ausreichend gut reproduziert.

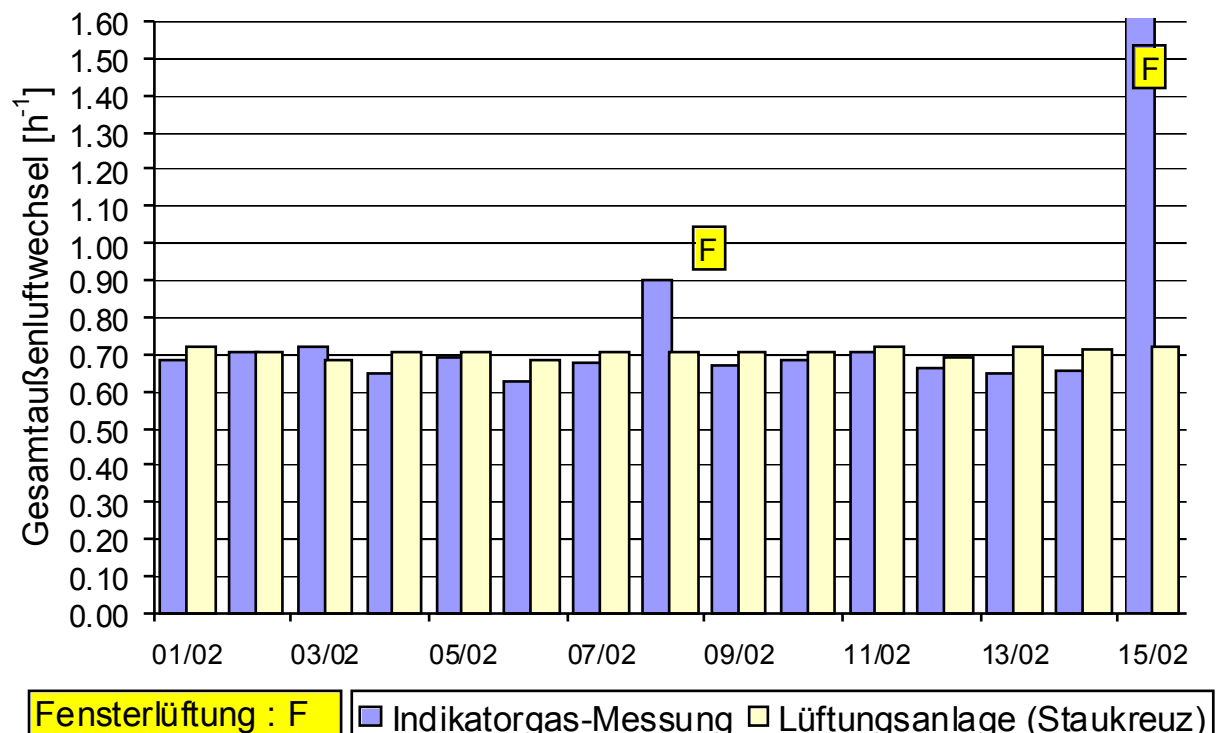


Abbildung 27: Vergleich von Indikatorgas-Messung und Anlagenluftwechsel (Staukreuz-Messung). Dargestellt ist der mittlere Außenluftwechsel zw. 22:00 und 6:00.

3.3.10 Gleichmäßige Verteilung des Indikators in den Wohnungen

Im verwendeten Messaufbau wird eine Wohnung als eine Raumlufthzone betrachtet. Voraussetzung für das Indikatorgasverfahren ist eine gleichmäßige Verteilung des Indikators in der zu untersuchenden Raumlufthzone. Das Indikatorgas wird über die Zuluft eingebracht und der Verdünnungsverlauf wird anschließend in der Abluft gemessen (vgl. Abschnitt 3.3.8). Mit zusätzlichen Luftprobennahmen wurde die gleichmäßige Verteilung des Indikators innerhalb einer Wohnung überprüft. Gemäß [DIN EN ISO 12569] dürfen die Schwankungen der Konzentrationswerte innerhalb einer Zone bis zu $\pm 10\%$ betragen. Abbildung 28 zeigt für drei Wohnungen die Abweichung der Indikatorkonzentration in den Luftproben und in der Abluft vom Mittelwert. Von weiteren Messungen wurde abgesehen, um die Bewohner während der Feldmessung so wenig als möglich zu stören. Die Messbedingungen waren während der Luftprobennahme mit dem normalen Betrieb während der Feldmessung vergleichbar; typische Störeinflüsse wie das Öffnen der Wohnungseingangstür und das Ändern der Lüfterstufen ereigneten sich auch beim Besuchstermin zur Probennahme. Die in jeweils drei Räumen der Wohnungen gezogenen Luftproben liegen im Bereich der zulässigen Abweichung.

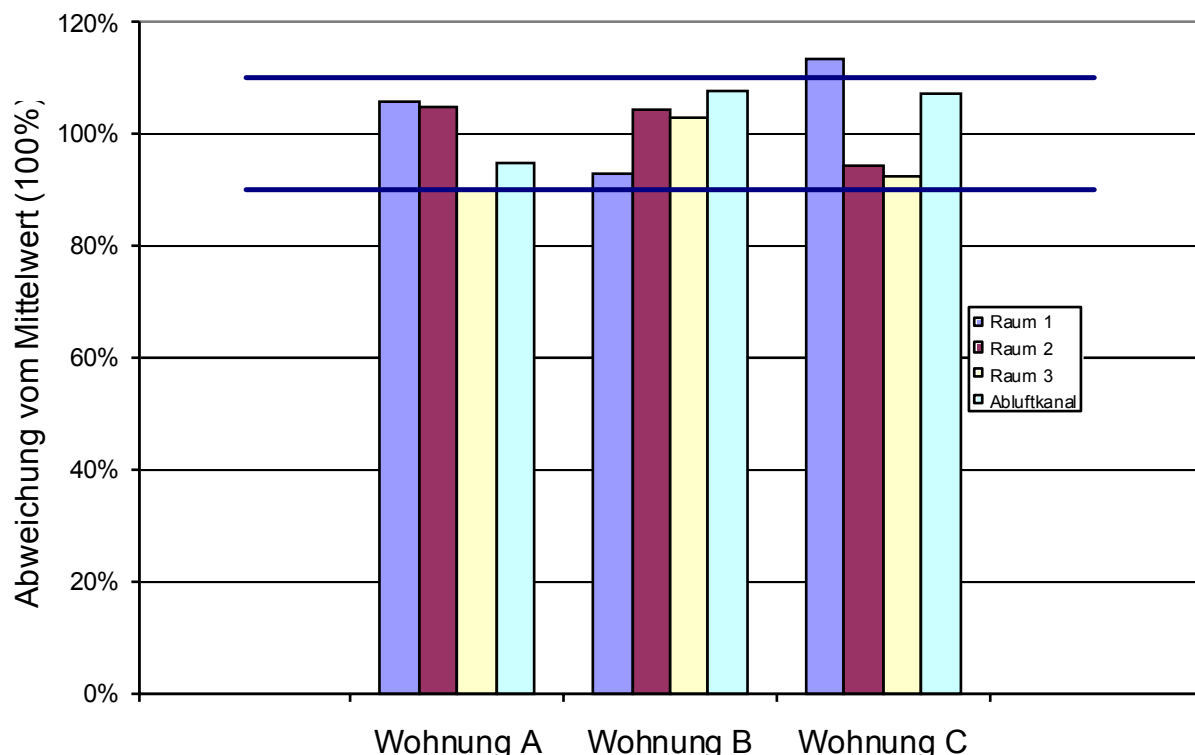


Abbildung 28: Auswertung der Konzentrationswerte der Luftproben in den drei unterschiedlichen Räumen und des Messwerts in der Abluft. Dargestellt sind drei exemplarische Messungen. Die Abweichungen liegen im Bereich von 10%.

Die verwendete Indikatorgas-Messmethode setzt für die Raumlufthzone eine vollständige Durchmischung voraus, d.h. der Indikator muss in allen Bereichen der Wohnung gleichmäßig verdünnt werden. Sofern lediglich Teilvolumina der Wohnung am Luftaustausch z.B. bei Fensterlüftung teilnehmen, ist diese Bedingung nicht erfüllt. In diesem Fall der unvollständigen Durchmischung können die Abluftkonzentrationen Mindestwerte nicht unterschreiten, da aus den nicht teilnehmenden Zonen weiterhin Luft mit der Ausgangskonzentration (bzw. Zuluftkonzentration) der Gesamtabluft beigemischt wird. Wäre der am Luftaustausch teilnehmende Bruchteil des Raumlufthvolumens der Wohnung X , dann ergäben sich minimalmögliche Abluftkonzentrationen von $(1 - X)$ der Zuluftkonzentration. Abluftkonzentrationen von nur wenigen Prozent der Zuluftkonzentration deuten auf eine überwiegend vollständige Teilnahme des Luftvolumens am Luftaustausch bzw. auf eine gute Durchmischung der Raumlufthzone hin (vgl. Abbildung 29). Das korrespondiert mit der Erfahrung, dass die Innentüren bei Wohnnutzung meist geöffnet sind; offene Innentüren führen zu einem intensiven Luftaustausch zwischen den Räumen innerhalb einer Wohnung.

Häufigkeitsverteilung

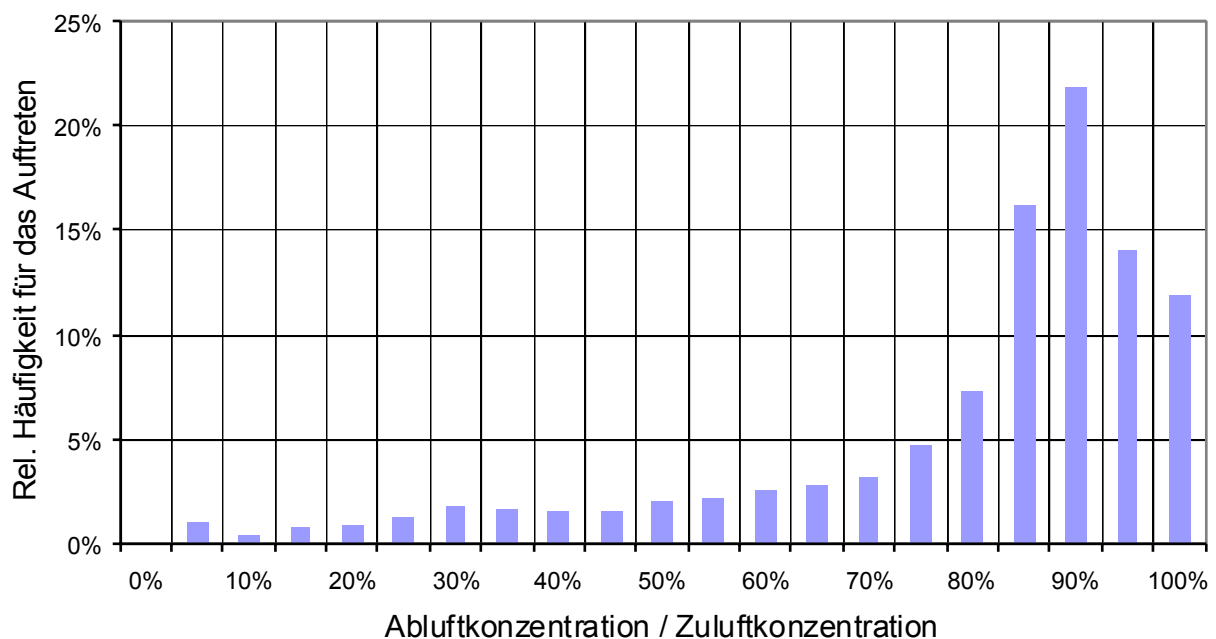


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung für das Verhältnis von Zuluft- zu Abluftkonzentration. Das Auftreten von sehr geringen Konzentrationsverhältnissen deutet auf eine gute Durchmischung der Raumlufthzone einer Gesamtwohnung hin. Das Maximum ergibt sich durch den häufigsten Zustand der geschlossenen Fenster. Aufgrund des charakteristischen Konzentrationsverlaufs bei Lüftungsereignissen mit einem exponentiellen Abklingen der Konzentration bei Erhöhung des Luftwechsels und einem asymptotischen Ansteigen gegen einen Endwert bei anschließender Verringerung des Luftwechsels, lässt sich aus der oben stehenden Häufigkeitsverteilung der Konzentrationen nicht die Häufigkeit von Fensteröffnungsereignissen ableiten.

3.3.11 Verfahren zur Bestimmung des Fensterluftwechsels

Wie weiter oben beschrieben, wurde mit der Indikatorgas-Messung der Gesamtaußenluftwechsel für jede Wohnung bestimmt. Der Außenluftwechsel setzt sich dabei zusammen aus dem maschinellen Anlagenluftwechsel, dem In- bzw. Exfiltrationsluftwechsel durch Leckagen und einem Beitrag durch Fensterlüftung (vgl. Abbildung 25). Zur Bestimmung des zusätzlichen durch Fensterlüftung induzierten Außenluftwechsels werden die Einzelmesswerte der Indikatorgas-Messung mit der Volumenstrom-Messung verglichen. Mit der Differenz der beiden Messungen ergibt sich der zusätzliche Beitrag durch Fensterlüftung (vgl. Abbildung 30). Fensterlüftungsereignisse wurden anhand der Fensteröffnungskontakte ermittelt. Zusätzlich wurden Lüftungsereignisse durch einen Vergleich der Differenz von Anlagen- und Gesamtaußenluftwechsel mit einem Mindestbetrag bestimmt. Dieser Schwellenwert wurde entsprechend sinnvoller Volumenströme bei Fensterlüftung gewählt. Hiermit konnten auch Fensteröffnungen an Fenstern ohne Öffnungskontakte bzw. an der Wohnungstür detektiert werden.

Der verbleibende Differenzbetrag aus der Summe des mittleren Anlagenluftwechsels sowie des mittleren Fensterbeitrags zum Gesamtaußenluftwechsel enthält neben Schwankungen im Infiltrationsluftwechsel alle sonstigen Störeinflüsse. Das sind Ereignisse, in denen ein zusätzlicher Außenluftwechsel registriert wurde, diesen aber keine Fensterlüftung zugeordnet werden konnte, wie z.B. nicht korrekt verschlossene Fenster, Schwankungen im Infiltrationsluftwechsel, etc. Eine genaue Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels war nicht Ziel dieser Untersuchung.

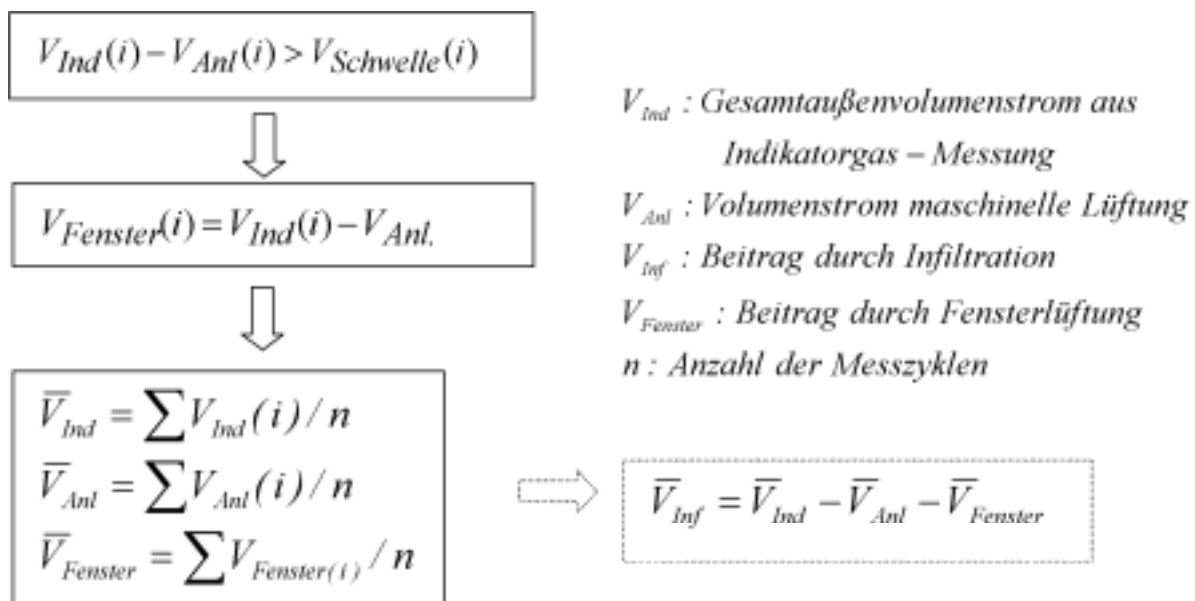
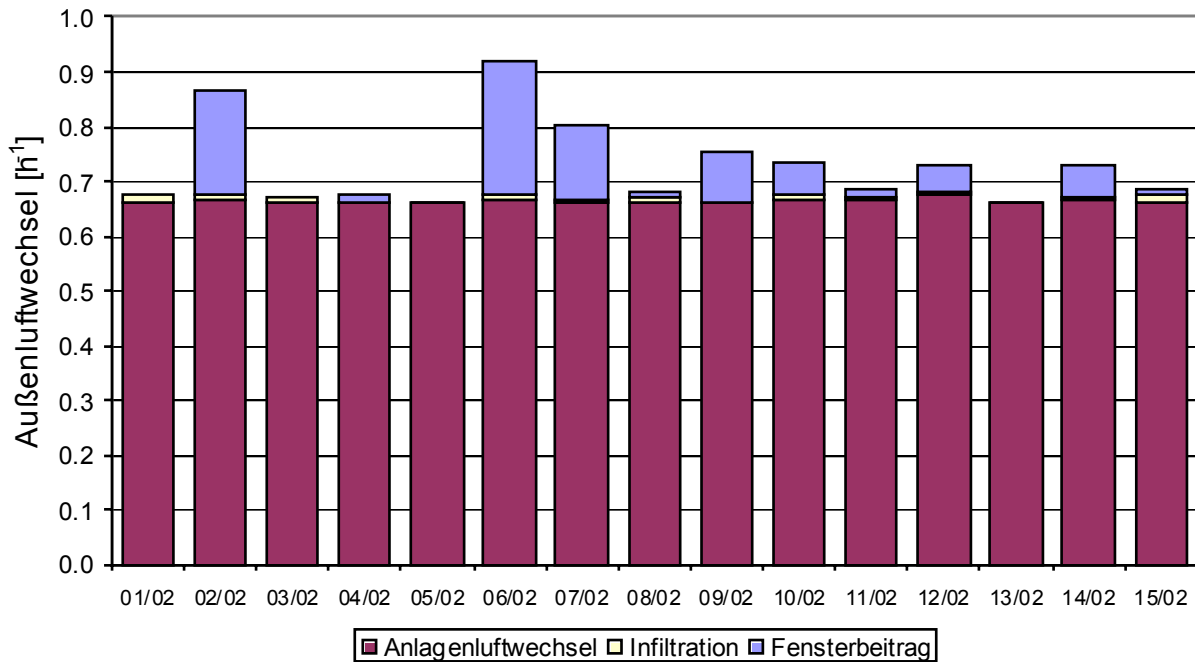


Abbildung 30: Flussdiagramm zur Bestimmung der Beiträge am Außenluftwechsel

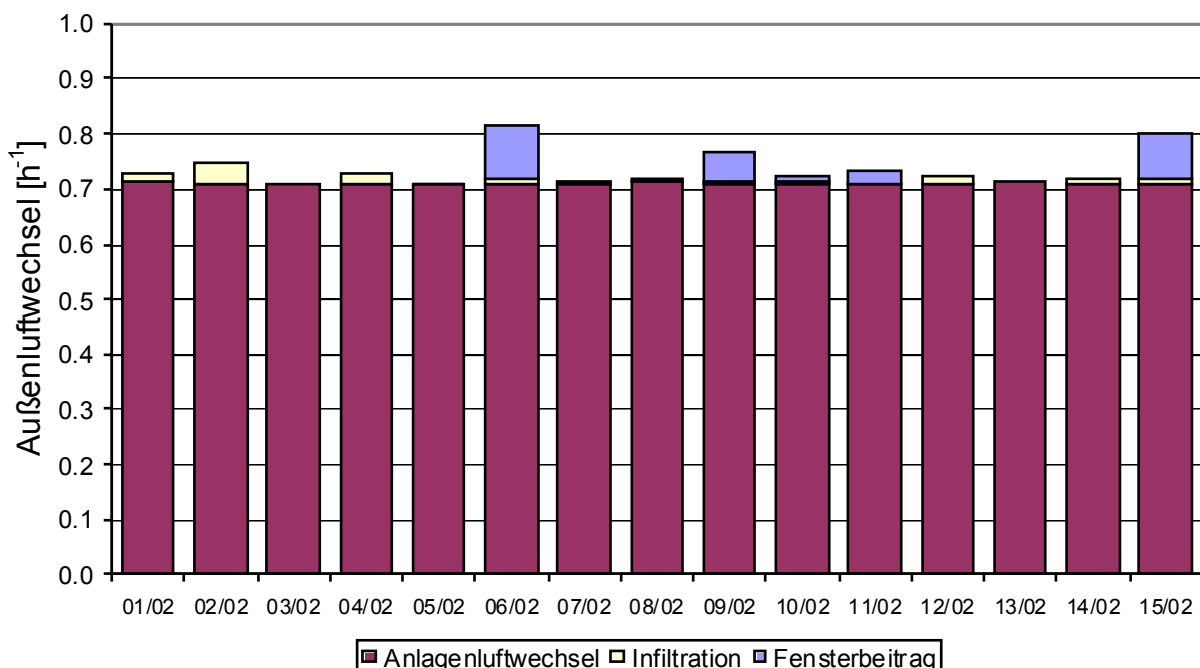
3.3.12 Auswertung der Messergebnisse

Die folgenden Diagramme zeigen wohnungswise den Außenluftwechsel der 8 untersuchten Wohneinheiten in Kassel. In Abschnitt 3.5.6 werden die über die Messperiode resultierenden Mittelwerte gebildet und diskutiert. Die gemessenen Konzentrationsverläufe werden im Anhang dokumentiert (vgl. Abschnitt 5.2).

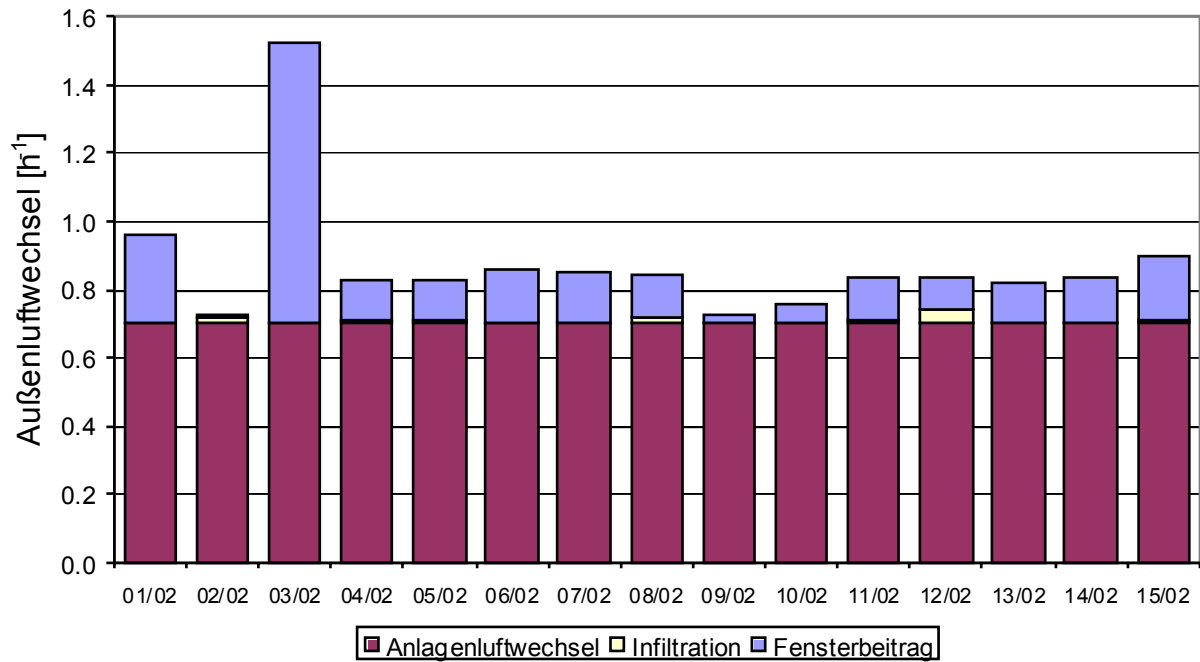
Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE1



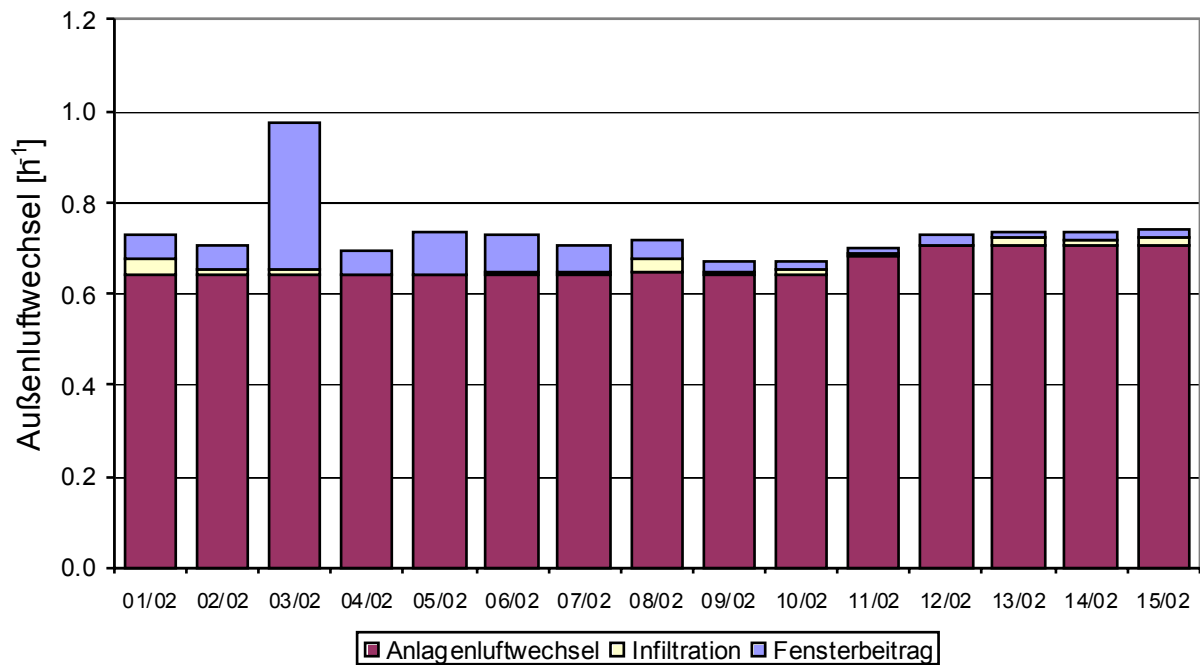
Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE2



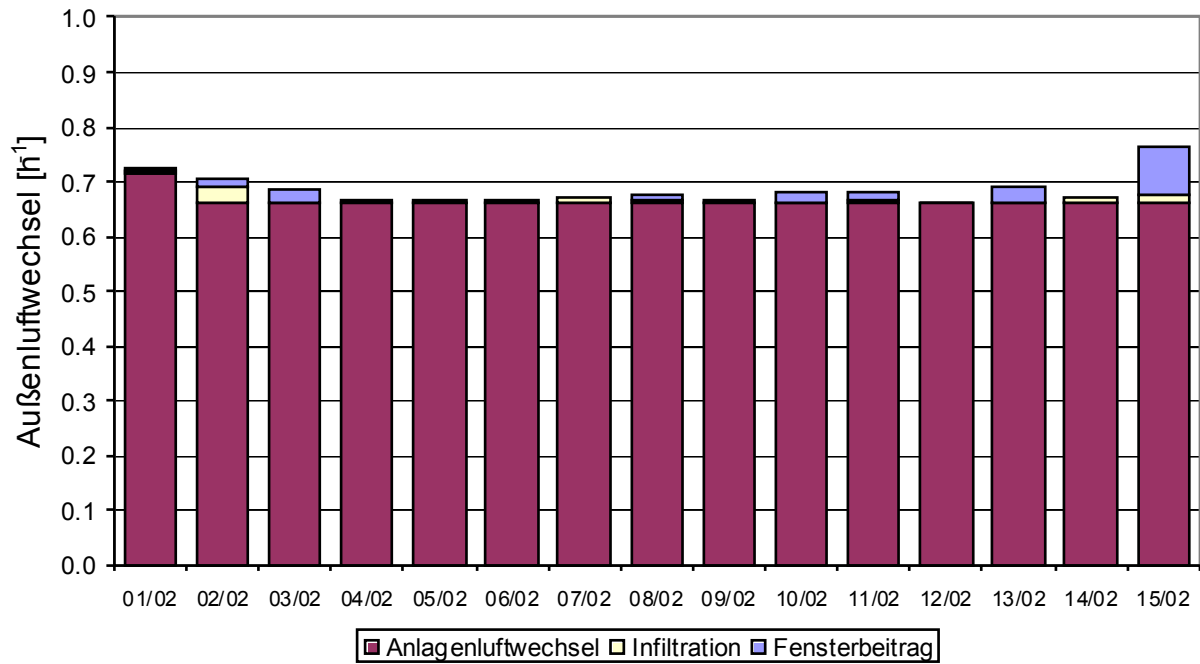
Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE3



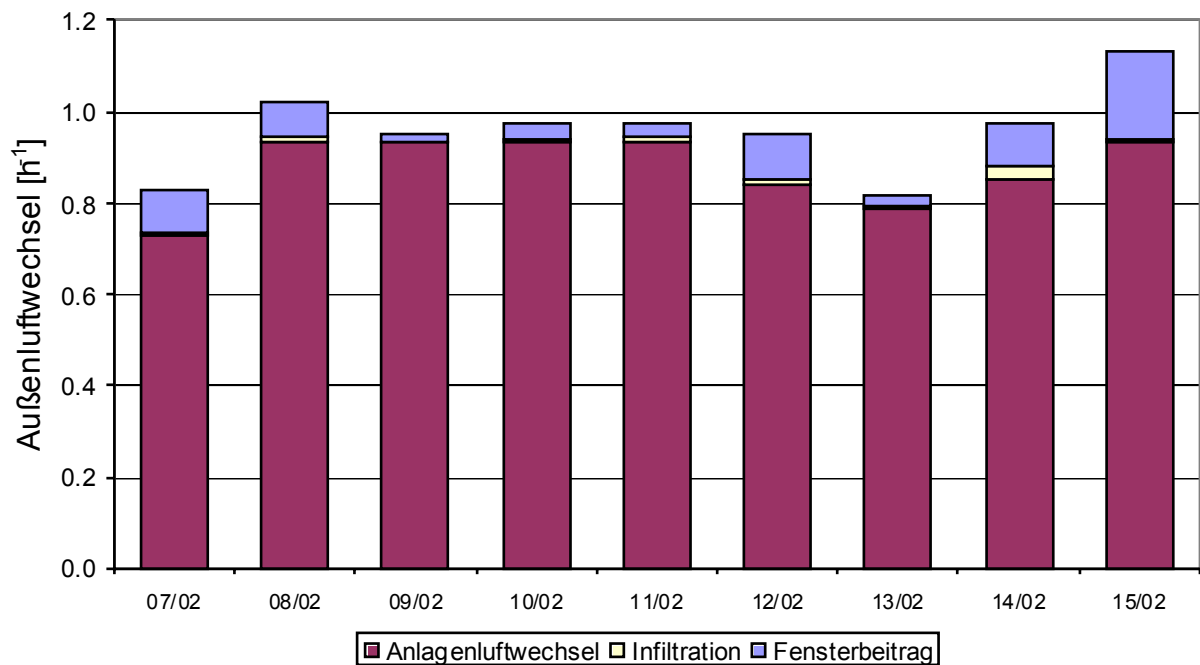
Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE4



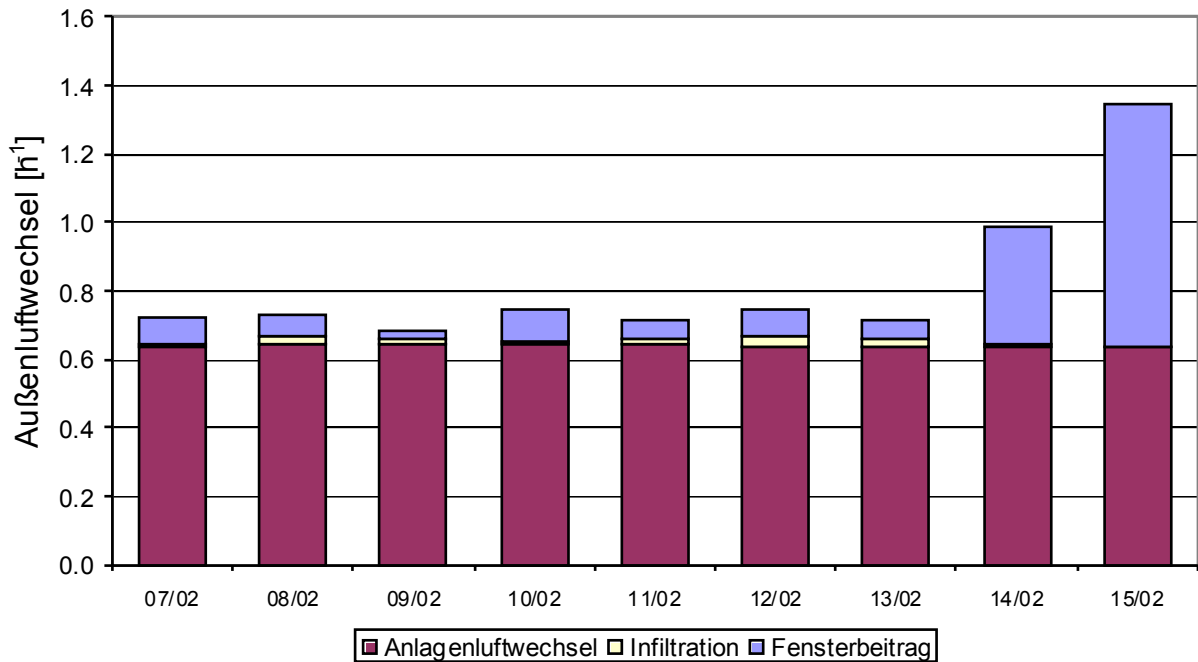
Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE5



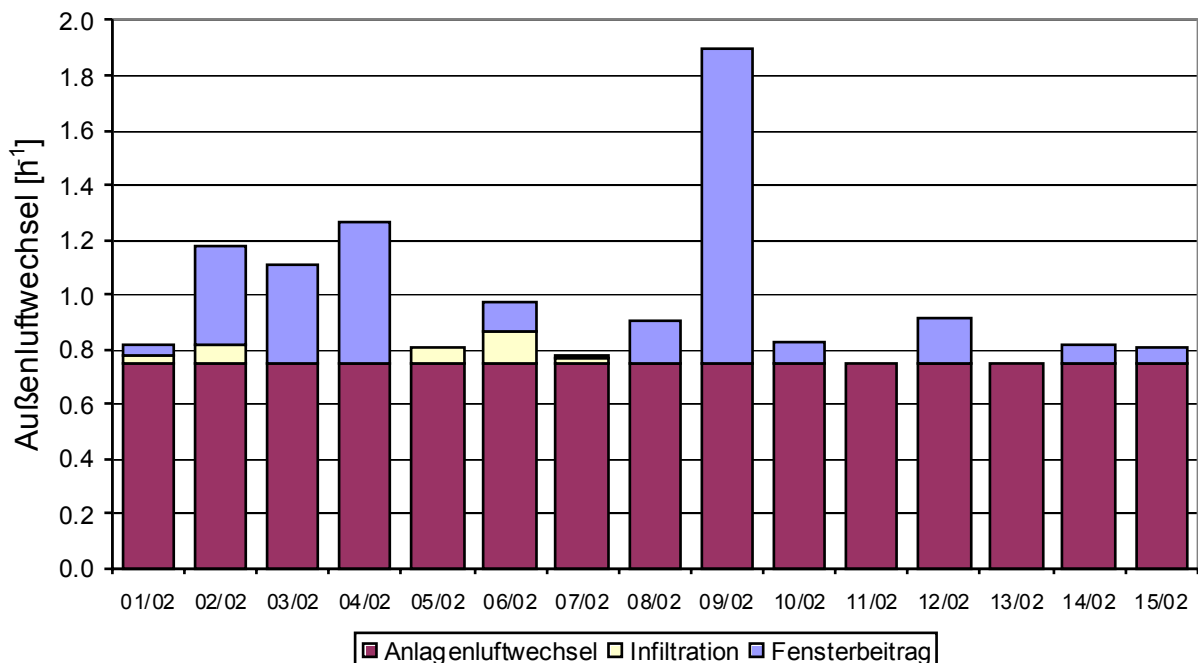
Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE6



Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE7



Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels WE8



In Wohneinheit 8 (WE8) wurde am 9.2. beinahe gänztägig gelüftet. Die Raumtemperatur im Wohnzimmer fiel in dieser Zeit gegenüber dem Messperioden-Mittelwert von 22,3°C um 1,2 K (vgl. Abbildung 31). Vermutlich wurde das Fenster vergessen. Durch den extremen Tageswert erhöhte sich der mittlere Außenluftwechsel durch Fensterlüftung für die gesamte Messperiode um 49%.

Dieses Ereignis hatte jedoch keinen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Passivhauskonzeptes: auch die betroffene Wohneinheit konnte allein mit der vorhandenen Zuluftheizung für diesen Zeitabschnitt im behaglichen Temperaturbereich gehalten werden, und die Rückwirkungen auf die anderen Wohnungen sind vernachlässigbar.

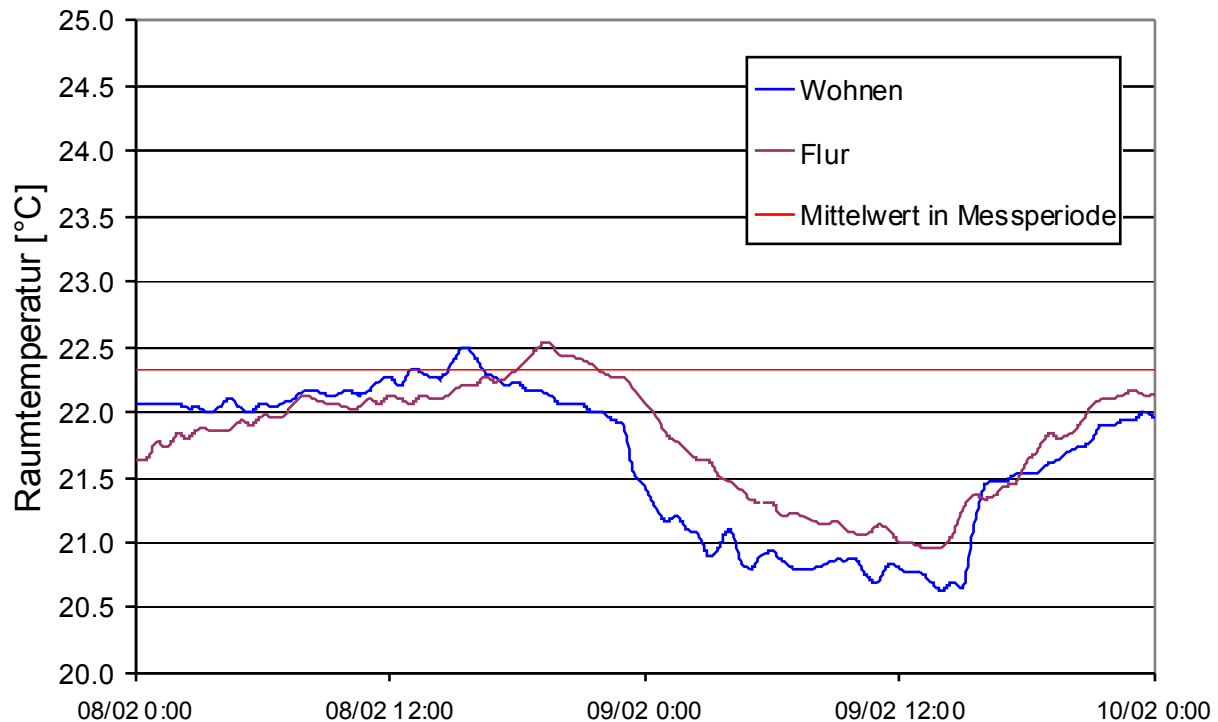


Abbildung 31: Raumtemperatur in WE8. Dargestellt ist die Temperatur im Flur und im Wohnzimmer.

3.3.13 Registrierung der Fensterlüftungsereignisse: Vergleich Fensterkontakte – Indikatorgas-Messung

In 5 der 8 Wohnungen in Kassel wurden Fensterkontakte zur Aufzeichnung von Fensteröffnungsereignissen an den Rahmen angebracht. Davon wurden zwei Wohnungen komplett mit Öffnungskontakten ausgestattet. Mit den Schaltern können Kippstellung und Drehöffnung unterschieden werden (vgl. Abschnitt 3.3.6). Ein Vergleich der Fensterstellung und der Indikatorgas-Messung ist in Abbildung 32 dargestellt.

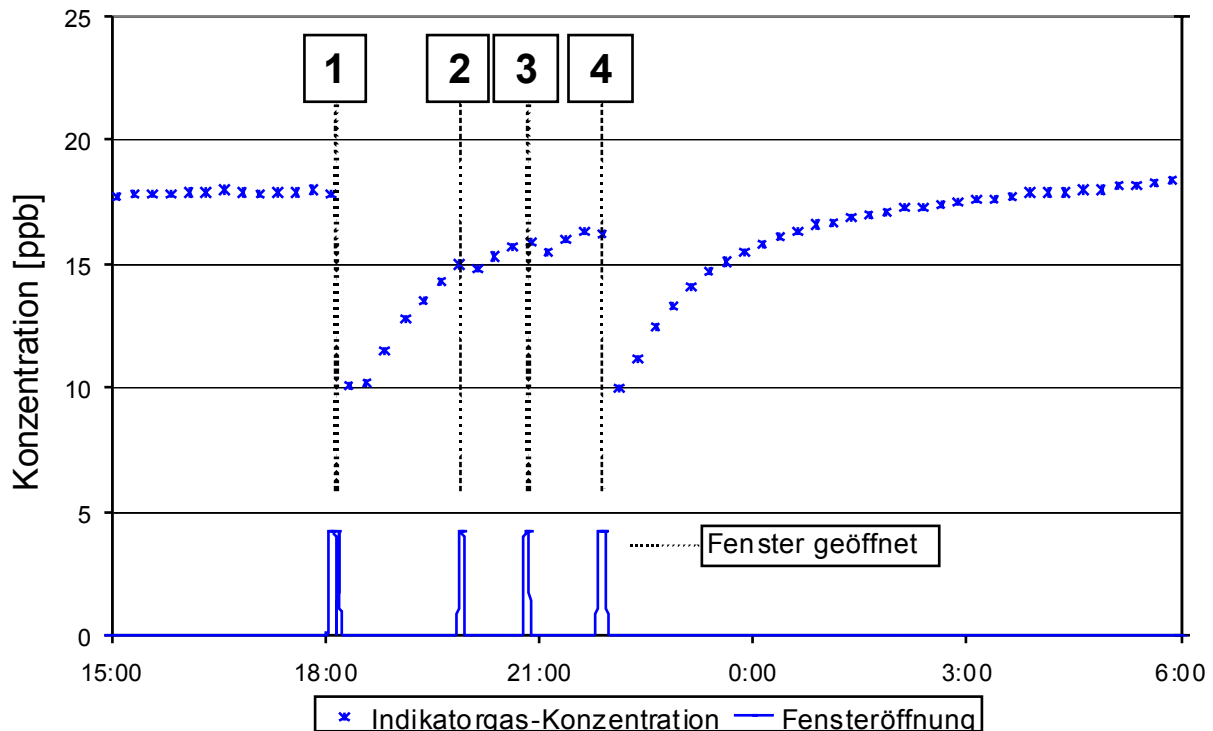


Abbildung 32: Einfluss von Fensteröffnung auf die Indikatorgas-Konzentration

Bei den Ereignissen 1 bis 4 in Abbildung 32 handelt es sich jeweils um das Öffnen der Balkontür. Alle Öffnungsereignisse konnten als Konzentrationsabfall bei der Indikatorgas-Messung nachgewiesen werden. Erkennbar ist ein zeitlicher Versatz zwischen dem Lüftungsereignis und dessen Wirkung auf die Indikatorgas-Konzentration. Die Lüftungsereignisse, die zwischen 4 und 8 min. andauern, haben deutlich unterschiedliche Auswirkungen auf die Indikatorgas-Konzentration und damit auf den zusätzlichen Außenluftwechsel. Während bei den Ereignissen 1 und 4 Gesamtaußenluftwechsel zwischen $1,6$ und $2,3 \text{ h}^{-1}$ auftreten, bleiben die Auswirkungen der Ereignisse 2 und 3 sehr gering.

Eine Angabe von Fensteröffnungszeiten anhand der Ergebnisse der Indikatorgas-Messung erscheint daher nicht sinnvoll. Wie oben gezeigt wurde, werden einzelne Lüftungsereignisse aufgrund ihrer geringen Wirkung kaum registriert. Andererseits können aufgrund von zeitlichen Verschiebungen und der begrenzten zeitlichen Auflösung der Indikatorgas-Messung die tatsächlichen Öffnungsdauern nicht bestimmt wiedergegeben werden.

Dieses Ergebnis macht deutlich, dass der tatsächlich eintretende Luftwechsel und die dadurch bestimmte Konzentrationsänderung beim Indikatorgas nicht nur von der Fensterstellung, sondern auch empfindlich von weiteren Randbedingungen abhängen (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, lokale Turbulenzen des Windfeldes, Stellung der Innentüren u.a.m.). Eine Bewertung der Auswirkungen von Fensteröffnungen anhand der Registrierung über Fensterkontakte erscheint daher nicht ausreichend. Vielmehr ist es unerlässlich, wie in dieser Arbeit geschehen, die Verdünnungsverläufe geeigneter Indikatorstoffe zu untersuchen.

3.3.14 Fensterlüftung: Tag- und Nachtlüfter

Interessant ist auch die Frage nach tageszeitlich unterschiedlichem Nutzerverhalten. Die Luftwechsel-Ergebnisse wurden hierzu unterschieden in einen Zeitraum Tag (von 5 Uhr bis 24 Uhr) und einen Zeitraum Nacht (24 Uhr bis 5 Uhr). Die Auswertung zeigte, dass in den 8 untersuchten Wohnungen während der Messperiode überwiegend am Tage zusätzlich über Fenster gelüftet wurde. In keiner Wohnung wurde regelmäßig nachts zusätzlich gelüftet und nur in einer Wohnung erreicht die Nachtlüftung eine relevante Höhe.

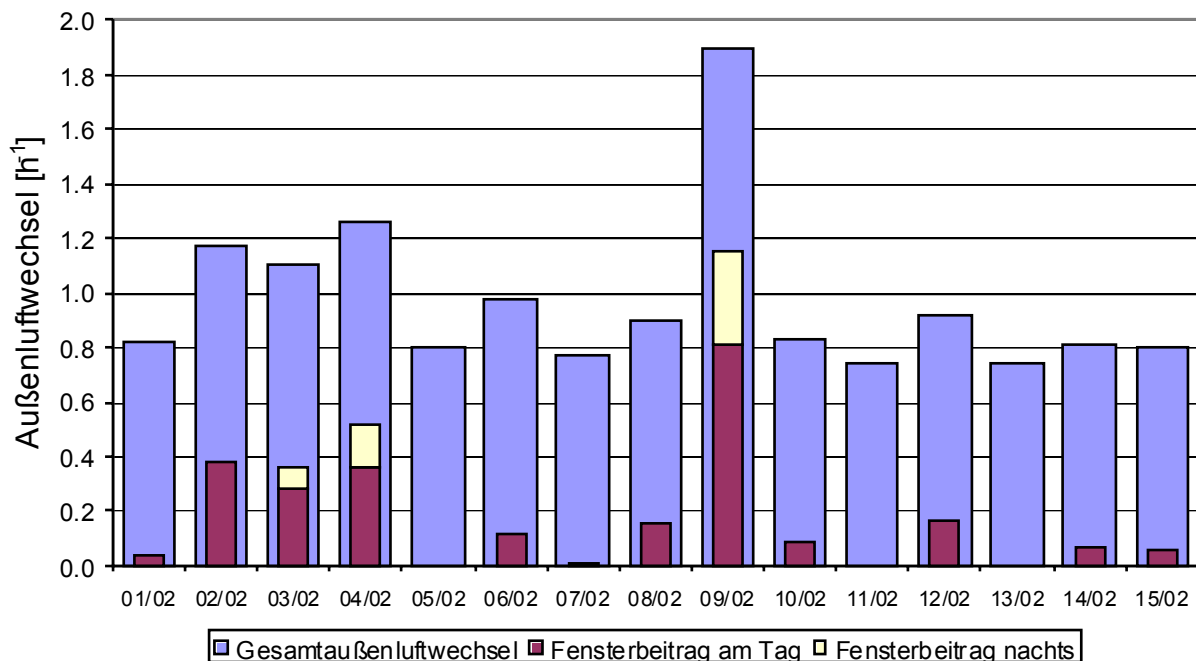


Abbildung 33: Beiträge der mittleren Tagesaußenluftwechsel. Dargestellt ist eine Wohneinheit mit nennenswerter Nachtlüftung

3.4 Durchführung der Messungen in der Reihenhaussiedlung Hannover Kronsberg

3.4.1 Grundrisse der untersuchten Wohneinheit

Der Grundriss der untersuchten Wohneinheit im Erdgeschoss weist im Eingangsbereich einen Windfang mit anschließendem Flur und Zugängen zur Küche (ein Fenster mit Dreh-Kippbeschlag) sowie einem fensterlosen Abstellraum auf. Der offene Wohn-/Essbereich wird von einer dreiteiligen Fensterfront belichtet, ein Flügel wird durch die verglaste Terrassentür gebildet. Das Treppenhaus zum OG steht im direkten Raumlufthub mit dem Wohn-/Essbereich. Der Flur im OG erschließt die beiden Kinderzimmer (raumhohe Verglasungen) im Süden, das Schlafzimmer (dreiteiliges Fenster mit Brüstung) im Norden, sowie das gefangene Bad und den fensterlosen Abstellraum. In den Grundrissen nicht zu erkennen ist der Technikcontainer,

der über dem Flur und dem Badezimmer im OG im Dachgiebelbereich untergebracht ist. Dort ist auch die zentrale Wohnungslüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung angeordnet. Für die Indikatorgas-Messung wurden hier auch die Gasflaschen und Messgeräte untergebracht.



Abbildung 34: Grundrisse EG (links) und OG (rechts)

3.4.2 Randbedingungen und Klimadaten

Während der Messperiode in Hannover wurden die wesentlichen Klimadaten mit einer Wetterstation auf dem Dach der Reihenhauszeile aufgenommen. Die zugehörige Messtechnik wurde im Rahmen des Forschungsprogramms CEPHEUS eingerichtet und ist in [Peper 2001] ausführlich beschrieben. Ausgewertet wurden die Größen Windgeschwindigkeit und –richtung, Globalstrahlung und Außentemperatur.

Im Messzeitraum der Indikatorgas-Messungen in Hannover betrug die mittlere Windgeschwindigkeit 3,8 m/s mit maximalen Stundenmittelwerten von über 10 m/s an dem windexponierten Standort. Die Hauptwindrichtung war West, nahezu parallel zu den Reihenhauszeilen.

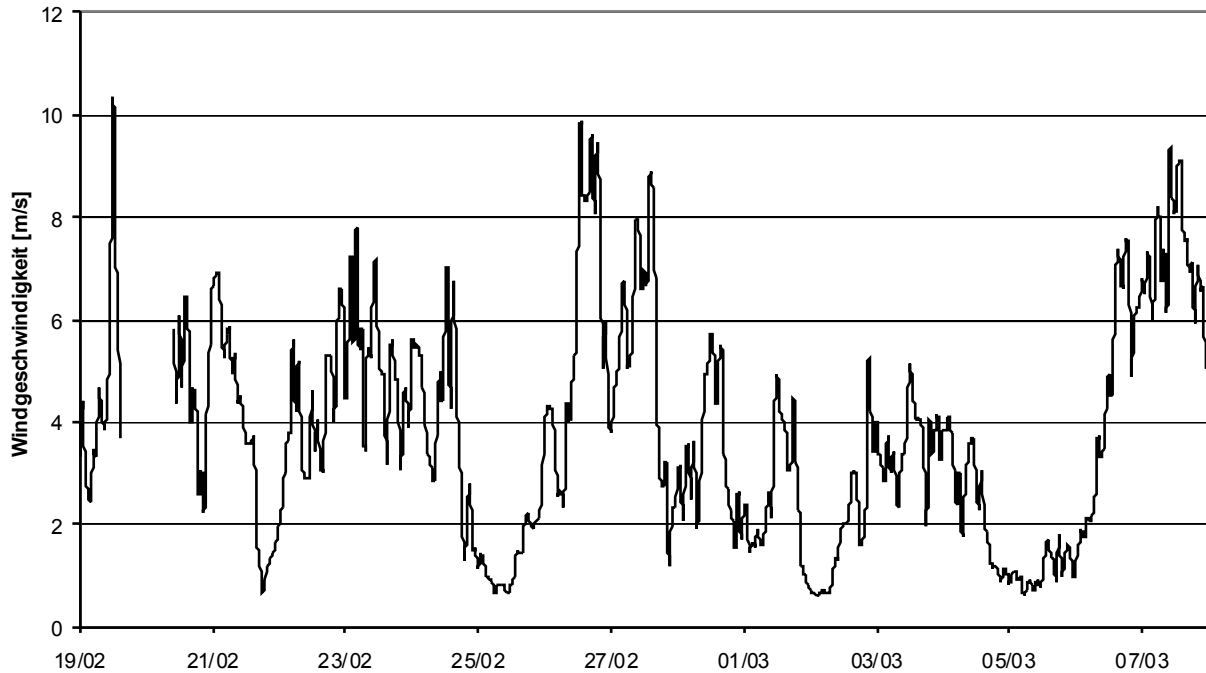


Abbildung 35: Verlauf der mittleren Windgeschwindigkeit im Zeitraum der Indikatorgas-Messung in Hannover.

Von größerem Einfluss auf das Lüftungsverhalten sind die Außentemperatur und die solare Einstrahlung. Mit einer mittleren Außentemperatur im Messzeitraum von $4,7^{\circ}\text{C}$ und Spitzentemperaturen von über 13°C war der Messzeitraum eher mild; die langjährigen Monatsmittelwerte für Hannover liegen im Februar und März bei $1,1^{\circ}\text{C}$ bzw. $4,0^{\circ}\text{C}$ (Quelle: DWD, Station Hannover-Langenhagen; vgl. Abbildung 37).

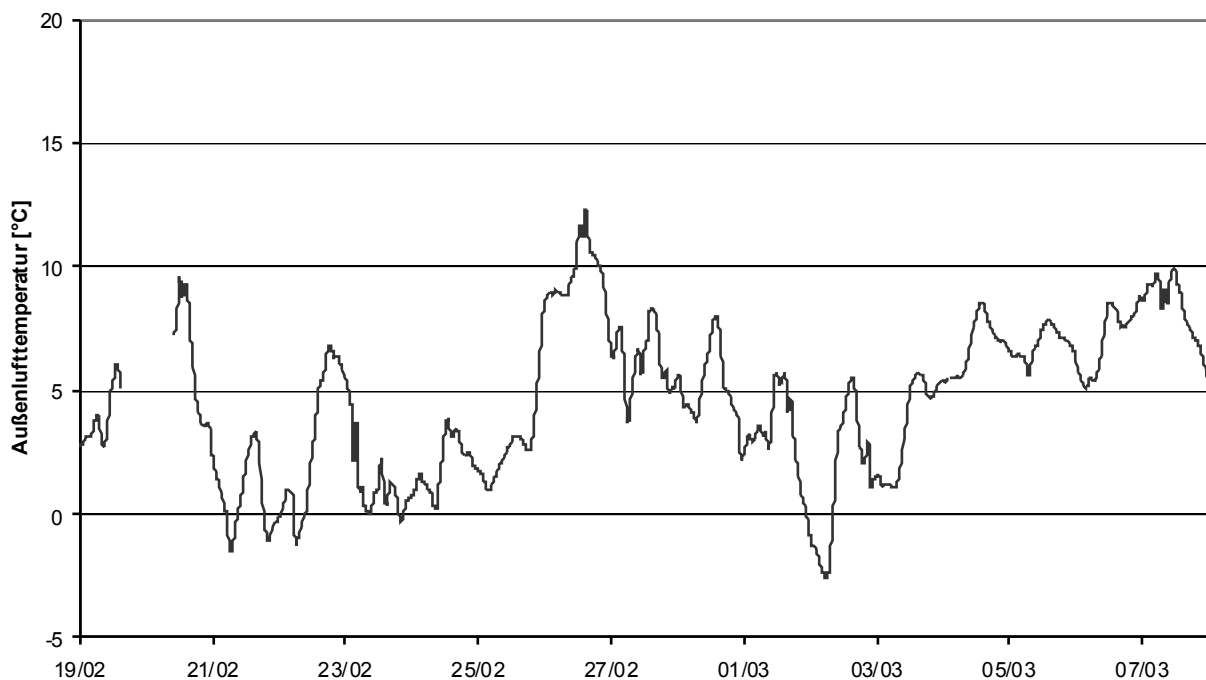


Abbildung 36: Verlauf der Außenlufttemperatur im Messzeitraum in Hannover (Mittelwert $4,7^{\circ}\text{C}$)

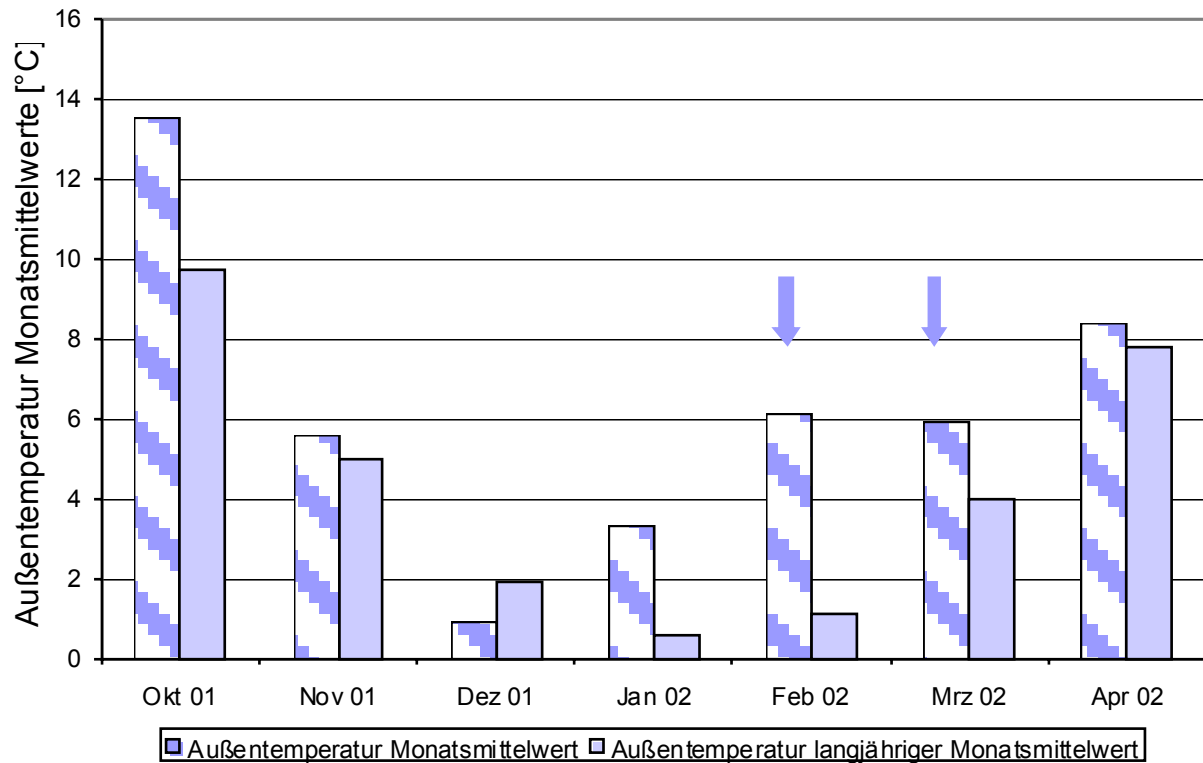


Abbildung 37: Vergleich der Monatsmittelwerte der Außentemperatur mit dem langjährigen Mittelwert (Datenquelle DWD, Station Hannover-Langenhagen).

Wie Abbildung 38 zeigt, hatte die Messperiode einige sonnige Abschnitte. Die täglichen Sonnenstunden lagen im für die Jahreszeit üblichen Bereich.

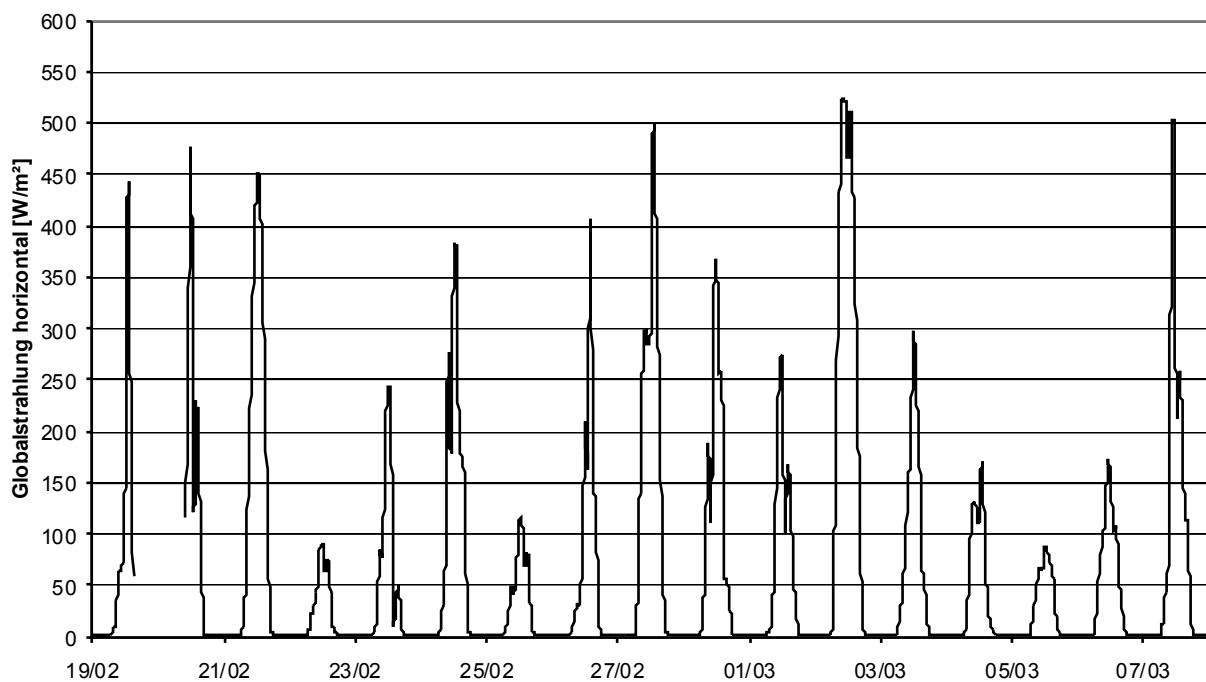


Abbildung 38: Verlauf der Globalstrahlung im Messzeitraum in Hannover

3.4.3 Raumlufffeuchte

Die relative Raumlufffeuchte ist neben der Raumtemperatur ein weiterer Raumklimaparameter. Im Behaglichkeitsdiagramm [RWE 1998] wird die relative Feuchte über der Raumtemperatur aufgetragen. Die dargestellte Raumlufffeuchte wurde in der Abluft gemessen und bildet einen Mittelwert des gesamten Reihenhauses. Während der Messperiode sind alle Messdaten im Bereich „behaglich“. Im Vergleich zu den Raumlufffeuchten im Mehrgeschosswohnbau in Kassel sind die Werte in Hannover deutlich höher. Die Raumlufffeuchte resultiert aus der Stärke der Feuchtequellen im Raum, der Außenluft-Feuchte und dem Außenluftwechsel. Die geringeren Außenluftwechsel in Hannover sind der entscheidende Grund für die gegenüber den Wohneinheiten in Kassel höheren Luftfeuchten.

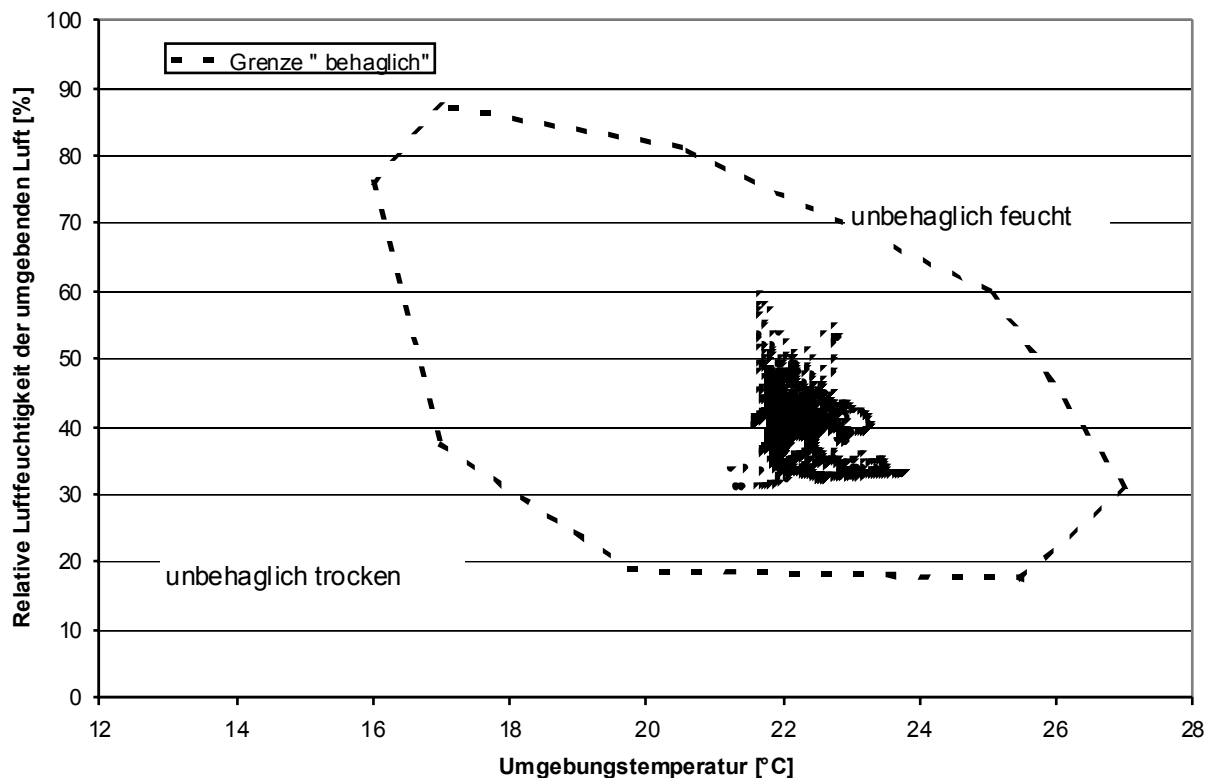


Abbildung 39: Behaglichkeitsbereich des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der relativen Feuchtigkeit der umgebenden Luft sowie die Messdaten im Reihenhaus während der Messperiode (19.2.02 bis 8.3.02).

3.4.4 CO₂-Konzentrationen

Wie im Geschosswohnungsbau in Kassel (vgl. Abschnitt 3.3.4) wurden auch in dem Reihenhaus in Hannover CO₂-Konzentrationen gemessen. Der CO₂-Raumlufsensor wurde hierzu ebenfalls im Schlafzimmer positioniert. Abbildung 40 zeigt den Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration (Zeitschrittweite eine Minute).

Im Vergleich zu den Messwerten in Kassel sind deutlich höhere Spitzenwerte zu erkennen, die jedoch mit Konzentrationen von 1400 ppm immer noch unterhalb des DIN-Grenzwertes liegen und im Vergleich mit Räumen ohne mechanische Lüftung eine sehr gute Raumluftqualität anzeigen. Im Gegensatz zu der untersuchten Wohneinheit in Kassel mit fast regelmäßiger morgendlicher Fensterlüftung wurde in der untersuchten Wohneinheit in Hannover nur sporadisch Zusatzlüftung über Fenster betrieben.

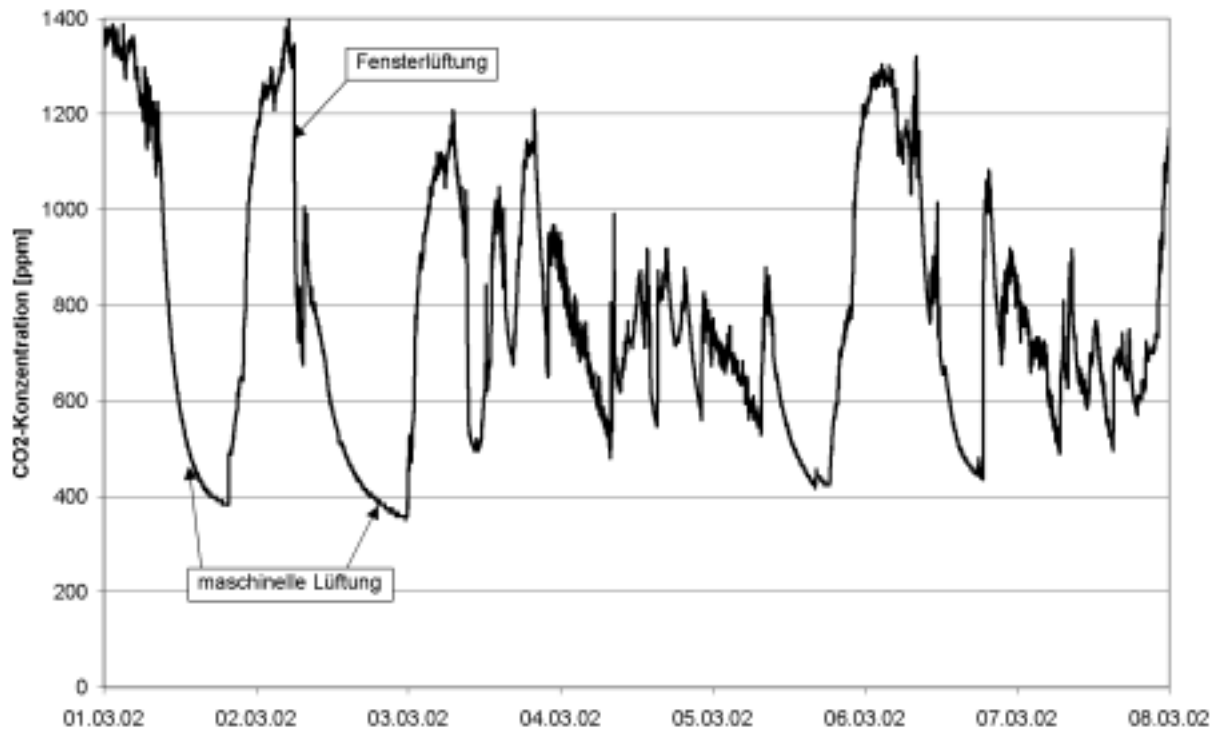


Abbildung 40: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration im Schlafzimmer

Aus der Volumenstrommessung (mit Hilfe des Volumenstrom-Messgerätes) an den beiden Zuluftelementen im Schlafzimmer (Zuluftvolumenstrom 8 bzw. 9 m³/h bei der Lüfterstufe „normal“) und dem Raumvolumen des Schlafzimmers von 55 m³ konnte die Luftwechselrate zu 0,31 1/h berechnet werden. Die aus den gemessenen CO₂-Konzentrationen über die Konzentrationsabfallmethode am 1.3. und 2.3.02 bei rein maschineller Lüftung bestimmte Luftwechselrate betrug im Mittel 0,33 1/h und stimmt damit sehr gut mit der Volumenstrom-Messung überein.

Dieser geringe Luftwechsel wird jedoch nach Aussagen der Bewohner als ausreichend für gute Raumluftqualität angesehen. Auch die CO₂-Werte deuten nicht auf zu geringe Luftwechselraten hin. Diese Erkenntnis zeigt, dass entgegen üblicher Planungspraxis tendenziell geringere Zuluftvolumenströme ausreichend sind und sogar Vorteile bezüglich einer als behaglich empfundenen relativen Raumluftfeuchte haben.

3.4.5 Volumenstrommessung maschinelle Lüftung

Sowohl die Zu- als auch die Abluftvolumenströme wurden, wie in Abschnitt 3.3.5 beschrieben, mit einem Volumenstrom-Messgerät bestimmt. Die Messergebnisse für alle Zu- und Abluftzonen bei den drei Ventilatorstellungen „Grundlüftung“, „Normallüftung“ und „Stoßlüftung“ sowie die jeweilige Disbalance sind in Tabelle 3 eingetragen.

Zone	Volumenstrom Grundlüftung	Volumenstrom Normallüftung	Volumenstrom Stoßlüftung
Zuluft [m ³ /h]			
Schlafen OG	14,5	17	32
OG West	7,5	7,5	14
OG Ost	6	6	10
Wohnen EG	18	20	34
Küche EG	11	13	25
Abluft [m ³ /h]			
Bad OG	28	30	48
WC EG	17	19	30
Küche EG	16	16	26
Zuluft/Abluft	57/61	63,5/65	115/104
Disbalance (Zuluftüberschuß)	- 7 %	- 2 %	10 %

Tabelle 3: Ergebnisse der Messung mit Volumenstrom-Messgerät

Die Förderströme der Lüftungsanlage wurden zusätzlich kontinuierlich mit Staukreuzen gemessen. Abbildung 41 zeigt den Abluft- und Zuluftvolumenstrom während der Messperiode in diesem Reihenhaus. Zuluft- und Abluftstrom verhalten sich beinahe symmetrisch zu einem mittlerem Volumenstrom aus Zu- und Abluft. Das gegenläufige Verhalten der Volumenströme resultiert aus der entgegengesetzten Anordnung von Außenluftein- und Fortluftauslass. Diese Anordnung sorgt für einen etwa konstanten Mittelwert aus Ab- und Zuluft, unabhängig von den Windverhältnissen. Die Disbalance schwankt hingegen aufgrund der Winddruck-Verhältnisse stark. Die mit den Staukreuzen ermittelten mittleren Ab- und Zuluftströme liegen mit 83,4 bzw. 75,9 m³/h über den Momentanwerten der Volumenstrom-Messung an Zu- und Abluftventilen. Die Abweichung der beiden Volumenstrom-Messungen ergibt sich hauptsächlich durch die Gegenüberstellung

eines zeitlichen Mittelwerts und einer Momentanmessung. Die aus den Momentanwerten der Staukreuzmessung bestimmte mittlere Disbalance beträgt im Messzeitraum 17%.

Bezogen auf das tatsächliche Luftvolumen des Gebäudes beträgt die mittlere Luftwechselrate 0,21 1/h bzw. mit dem Bezugsvolumen aus Energiebezugsfläche und 2,5 m Raumhöhe 0,27 1/h. Dieser Wert liegt unter dem projektierten Wert von 0,4 1/h. Wie bereits ausgeführt, ist der vorhandene Luftwechsel allerdings aus Luftqualitätsgesichtspunkten als zufriedenstellend anzusehen. Bezüglich einer als behaglich empfundenen rel. Feuchte wäre eine höhere Luftwechselrate nachteilig.

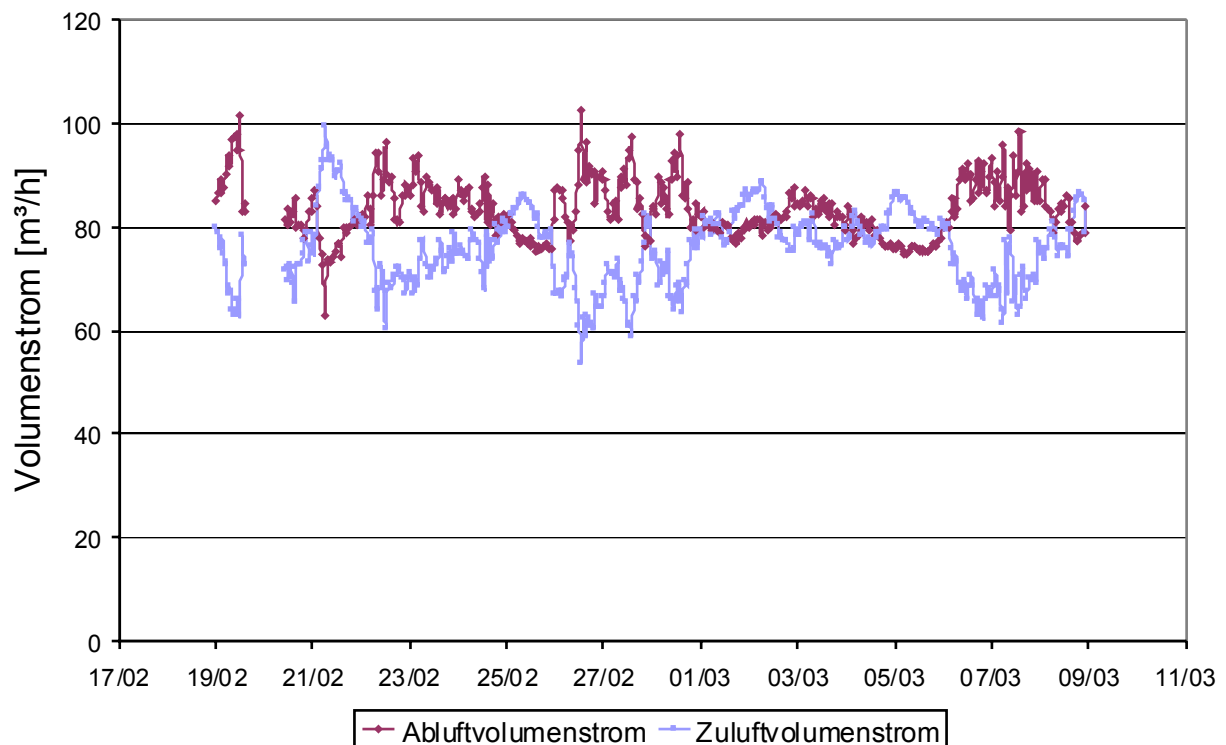


Abbildung 41: Lüftungsanlagen-Volumenströme während der Messkampagne.

3.4.6 Auswertung der Daten zu den Fensterstellungen

Zur Aufzeichnung der Fensterstellungen bzw. der Öffnungszeiten der Türen wurden insgesamt 5 Datalogger für den Zeitraum vom 20.2. bis zum 8.3.02 installiert. Diese zeichneten in Minutenintervallen die Fensterstellung offen bzw. gekippt des Küchenfensters sowie der Fenster in den Kinderzimmern (Ost bzw. West) und die Stellung der Haus- bzw. Terrassentür auf.

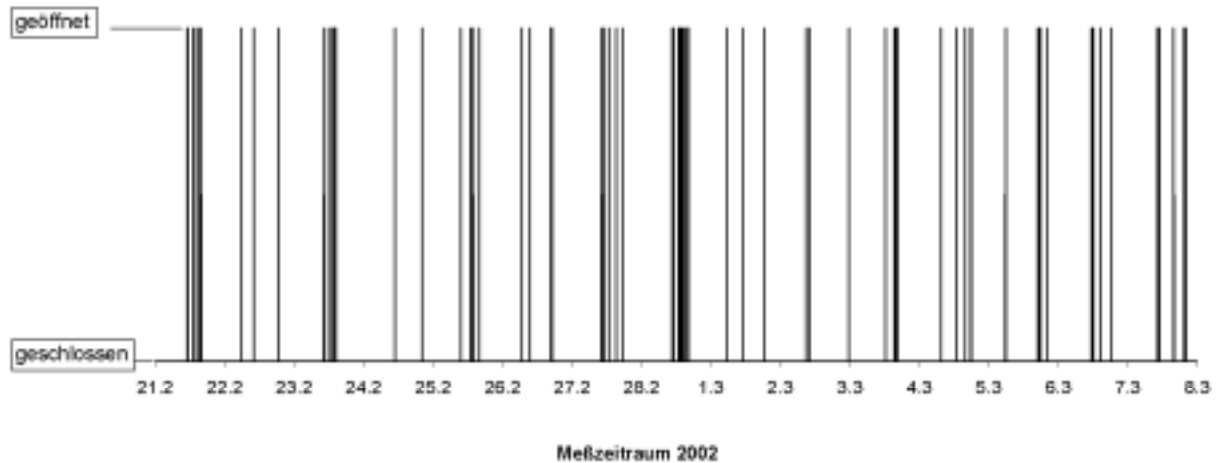


Abbildung 42: Zustandsdiagramm Haustür

In Abbildung 42 ist das Zustandsdiagramm für die Haustür im Messzeitraum dargestellt. Für die Auswertung muss man jedoch bedenken, dass das Messdatenintervall von einer Minute die kurzzeitigen Öffnungsvorgänge der Haustüre nicht erfassen kann, wenn diese gerade zwischen zwei Messzeitpunkten auftreten. Andererseits sind derartig kurze Öffnungsvorgänge energetisch nicht relevant. Im Vergleich zu den übrigen Öffnungsvorgängen weist die Haustür mit 10,4 min/d die höchste durchschnittliche Öffnungsdauer auf. Alle übrigen Fensteröffnungen sind energetisch irrelevant (siehe durchschnittliche Öffnungszeiten nach Tabelle 4). Im Messzeitraum von 15 Tagen wurden die Kinderzimmerfenster nur jeweils einmal, das Küchenfenster zweimal und die Terrassentür 6 mal geöffnet. Die Haustür wurde 70 mal geöffnet, also im Mittel 4,7 mal pro Tag, jedoch fast immer nur ein bis zwei Minuten (Maximum mit 19 min). Auch der zusätzliche Luftwechsel durch Öffnung der Haustür ist energetisch kaum relevant, zumal das Gebäude mit einem Windfang ausgestattet ist (siehe Abbildung 34). Die innere Tür ist normalerweise geschlossen.

Terrassentür	Haustür	Küche	Kind Ost	Kind West
0,3 min/d	10,4 min/d	0,1 min/d	1,1 min/d	0,1 min/d
Anmerkung: Die verabredeten nächtlichen Öffnungen des Schlafzimmerfensters (vgl. Abschnitt 3.4.11) wurden nicht mit Fensterkontakten erfasst.				

Tabelle 4: Durchschnittliche Öffnungszeiten im Messzeitraum vom 21.2. bis 7.3.2002

3.4.7 Beschreibung der Indikatorgas-Messung

In einem Reihenhaus der Passivhaus-Siedlung in Hannover-Kronsberg wurde eine weitere Feldmessung durchgeführt. In der Zeit 19.2.2002 bis zum 7.3.2002 wurden dort kontinuierlich mittels der Indikatorgasanalyse Luftwechselraten gemessen. Aufgrund von technischen Problem mit der Analyse-Einheit konnten am 27.2.2002 Konzentrationswerte teilweise nur im Wohnbereich aufgezeichnet werden.

Auch in Hannover wurden die Messungen nach der Konstant-Injektions-Methode durchgeführt. Das Indikatorgas wurde mit der Zuluft in die Räume des Reihenhauses eingebracht. An insgesamt 6 Orten im Haus wurden Konzentrations-Mess-Stellen eingerichtet. Mess-Stellen waren in allen Räumen mit offenen Fenstern angeordnet. Die Messanordnung in Hannover ermöglicht eine räumliche Unterteilung in mehrere Raumlufzonen und dementsprechend eine Zuordnung des Luftwechsels zu bestimmten Zonen. Es wird jeweils der gesamte Außenluftwechsel als Summe von Anlagenluftwechsel, Fugen- und Fensterlüftung bestimmt. Die Einzelbeiträge und insbesondere der Beitrag der Fensterlüftung werden in der Auswertung durch Kombination mit den zusätzlichen Volumenstrom-Messdaten an der Lüftungsanlage ermittelt (vgl. Abschnitt 3.4.5).

3.4.8 Messaufbau der Indikatorgas-Messung

Die Messapparatur wurde im Dachgeschoss des Reihenhauses untergebracht, in dem sich das Wohnungslüftungsgerät und die restliche Haustechnik befinden. Die Indikatorgas-Verteilung erfolgte auch im Reihenhaus über die Zuluft. Die erforderliche Injektionseinheit bestand aus einer Druckgasflasche mit Luft-Indikatorgas-Gemisch, einem Druckminderer, einem anschließenden Feindosierventil und einem Durchflussmesser (vgl. Abbildung 44). Mit dem kalibrierten Durchflussmesser wurde der Injektionsvolumenstrom kontinuierlich erfasst. Das Indikatorgas wurde bereits in den Außenlufteinlass am Lüftungsgerät eingebracht, um eine ausreichende Vermischung der Luft mit dem Indikator vor den Verzweigungen des Zuluftstrangs sicherzustellen. Mit der Zuluft gelangte das Indikatorgas anschließend in die Wohnräume.

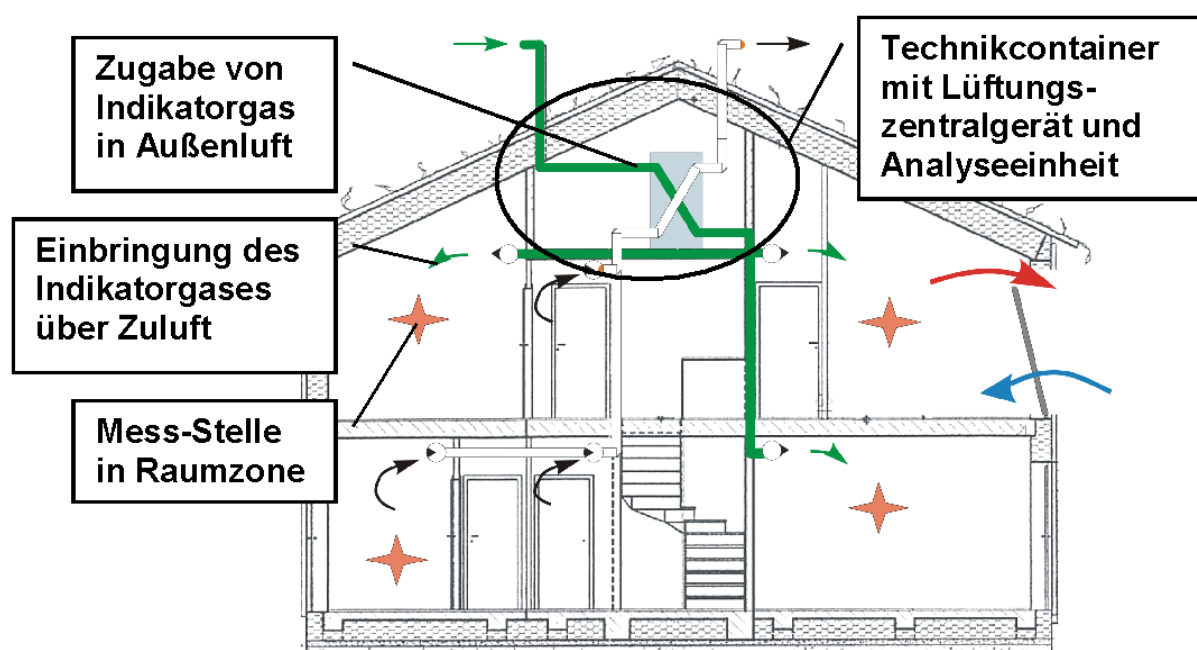


Abbildung 43: Prinzipskizze des Messaufbaus (Konzentrations-Mess-Stellen sind durch Sterne angedeutet).

Durch den Zuluftvolumenstrom und durch den zusätzlichen freien Außenluftwechsel (z.B. Fensterlüftung) wird das Spurengas anschließend in den Wohnräumen verdünnt. In den Wohnräumen wurde die Indikatorgas-Konzentration bestimmt (vgl. Abbildung 43). Mess-Stellen waren in allen Räumen mit Fenstern eingerichtet (vgl. Abbildung 46 und Abbildung 47). Über ein Schlauchsystem wurden Luftproben-volumina von den Mess-Stellen zum Indikatorgas-Monitor gepumpt und dort ausgewertet. Die PVC-Schläuche konnten über das Kanalnetz in die Räume geführt werden (vgl. Abbildung 45).



Abbildung 44: Indikatorgas-Injektionseinheit / Indikatorgas-Monitor

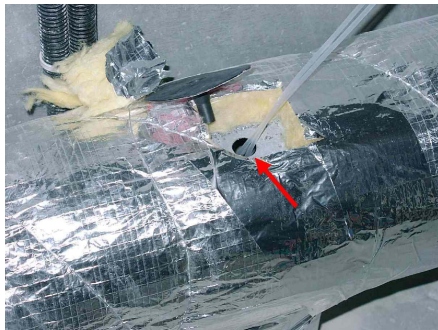


Abbildung 45: Schlauchsystem zu Mess-Stellen. Schlaucheinführung in Zuluftkanal (noch nicht abgedichtet).

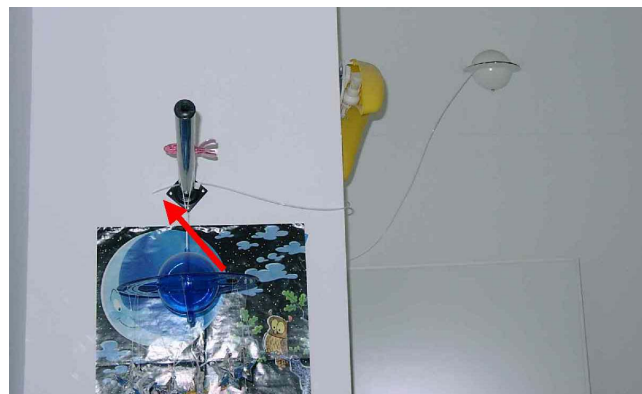


Abbildung 46: Mess-Stellen im Wohn-/ Essbereich und im Kinderzimmer

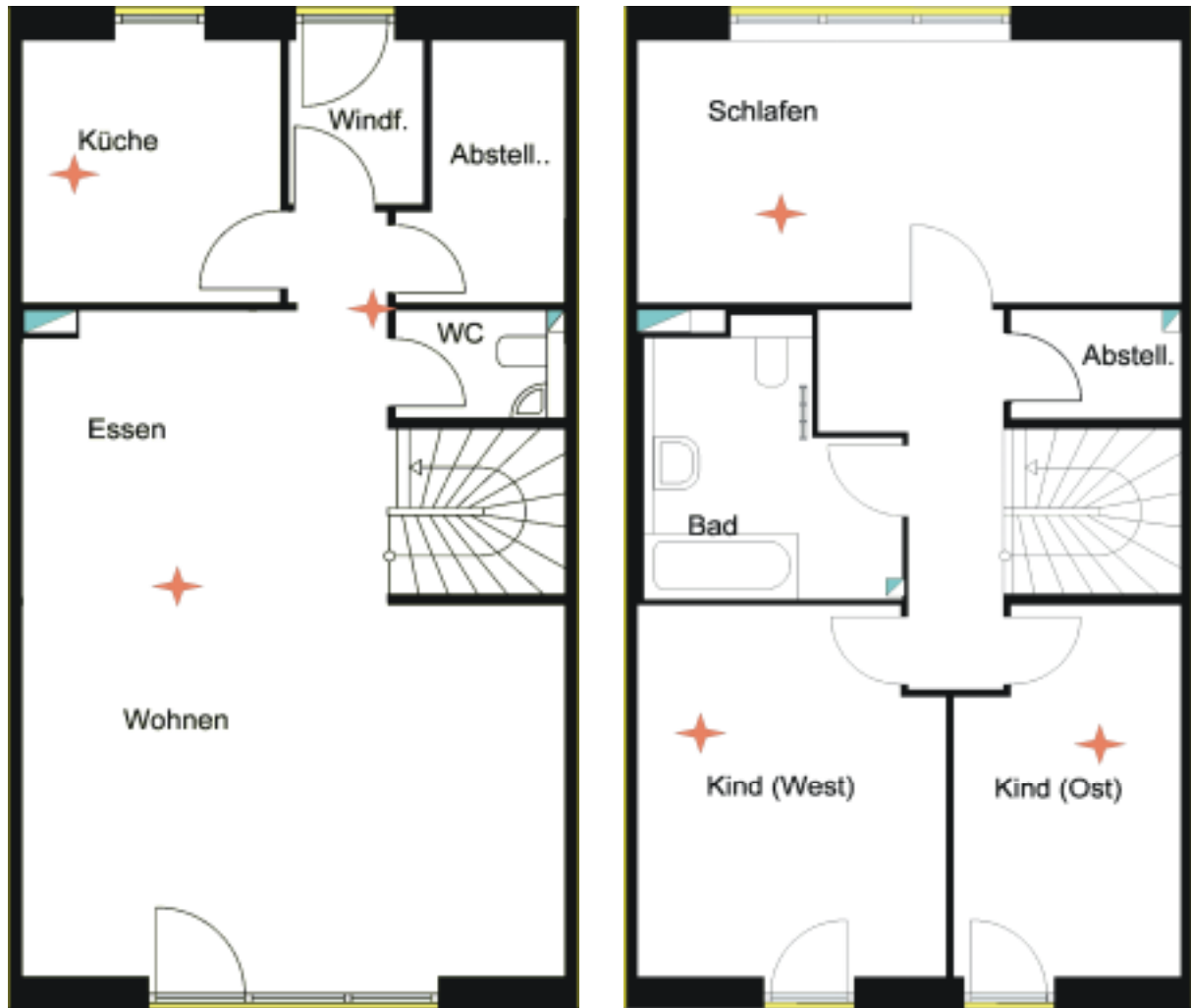


Abbildung 47: Grundrisse EG und OG mit Mess-Stellen (als Sterne angedeutet).

3.4.9 Referenzmessung zur Indikatorgas-Messung

Der reine Anlagenluftwechsel wurde während der Feldmessung mittels Staukreuzen im Lüftungssystem gemessen (vgl. Abschnitt 3.4.5). Die Staukreuz-Messung wurde als Referenz zur Kalibrierung der Indikatorgas-Messung herangezogen. Bei geschlossenen Fenstern sollte die Indikatorgas-Messung dieselben Luftwechselraten liefern wie die Messung mit dem Staukreuz. Der zusätzliche Beitrag durch In- und Exfiltration durch Leckagen wird an dieser Stelle aufgrund der sehr guten Luftdichtheit der Gebäudehülle zunächst nicht berücksichtigt.

Nachts wurde nur selten zusätzlich über Fenster gelüftet. In Abbildung 48 ist der mittlere Außenluftwechsel von 22:00 bis 5:00 dargestellt. Für diese Zeiten können die Messwerte der Indikatorgas-Messung und der Messung des Anlagenluftwechsels über Staukreuze verglichen werden. Drei Nächte mit durchgängiger Fensterlüftung sind mit „F“ gekennzeichnet (dabei handelt es sich um mit den Bewohnern vereinbarte Fensteröffnungen, vgl. Abschnitt 3.4.11). Die Messwerte der Referenzmessung (Anlagenluftwechsel über Staukreuz) und der Indikatorgas-Messung stimmen gut überein.

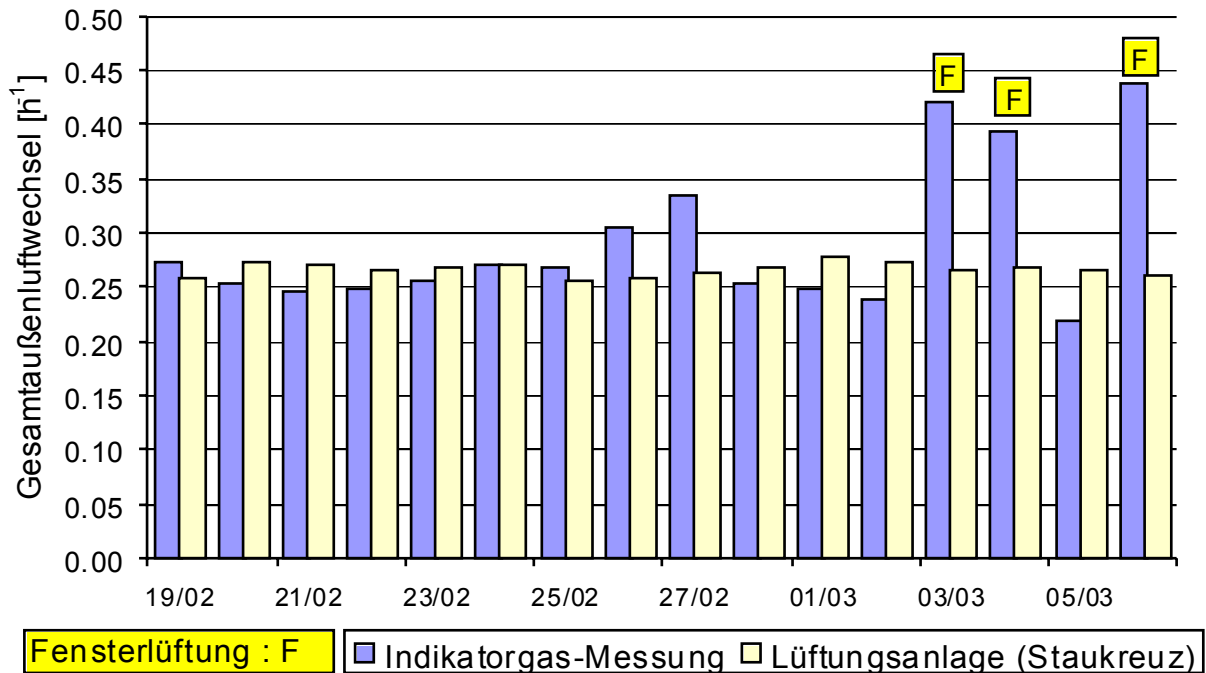


Abbildung 48: Vergleich von Indikatorgas-Messung und Anlagenluftwechsel (Staukreuz-Messung). Dargestellt ist der mittlere Außenluftwechsel zw. 22:00 und 5:00 im Reihenhaus.

3.4.10 Verfahren zur Bestimmung des Fensterluftwechsels

Mit der Indikatorgasanalyse wurde der Gesamtaußenluftwechsel im Reihenhaus gemessen, der sich als Summe aus dem maschinellen Anlagenluftwechsel, dem In- bzw. Exfiltrationsluftwechsel und dem Beitrag durch Fensterlüftung ergibt. Zur Bestimmung des Beitrags durch Fensterlüftung wurde entsprechend der Auswertung im Mehrfamilienhaus (vgl. Abschnitt 3.3.9) vorgegangen. Die Fensterlüftungsereignisse wurden anhand der Fensterkontakte ermittelt. Weiterhin wurden die Einzelmesswerte der Volumenstrom-Messung (Staukreuz) und der Indikatorgas-Messung für jeden Zeitschritt verglichen. Wenn die Differenz aus beiden Messungen einen Schwellenwert überschreitet, wird die Differenz als zusätzlicher Beitrag durch Fensterlüftung gewertet. Analog zum Vorgehen beim Mehrfamilienhaus enthält der verbleibende Differenzbetrag aus der Summe des mittleren Anlagenluftwechsels sowie des mittleren Fensterbeitrags zum Gesamtaußenluftwechsel neben den Schwankungen im Infiltrationsluftwechsel alle sonstigen Störeinflüsse (vgl. Abschnitt 3.3.9).

3.4.11 Auswertung der Messergebnisse

Abbildung 49 zeigt die Tagesmittelwerte des Außenluftwechsels während der Messperiode aufgeteilt nach dem Anlagenluftwechsel, einem Infiltrationsluftwechsel (der zusätzliche Außenluftwechsel, der keiner Fensterlüftung zugeordnet werden konnte; vgl. Abschnitt 3.4.10) und dem Beitrag durch Fensterlüftung. Die dargestellten Außenluftwechsel beziehen sich auf das Bezugsvolumen aus Energiebezugsfläche

und 2,5 m Raumhöhe. Die folgende Abbildung 51 zeigt den Gesamtaußenluftwechsel im zeitlichen Verlauf. Ein Lüftungsereignis am 3.3 konnte durch Auswertung der Fensteröffnungen als Querlüftung identifiziert werden.

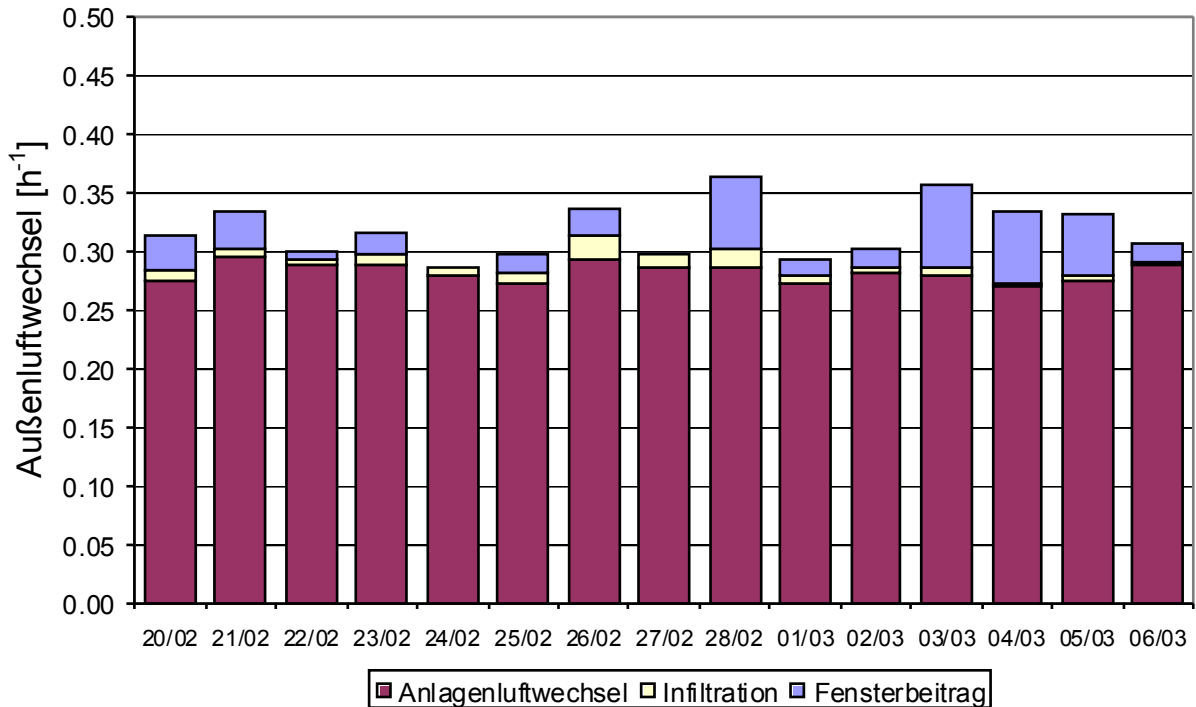


Abbildung 49: Mittlere Außenluftwechsel in Hannover er, einschließlich der verabredeten nächtlichen Fensterlüftung.

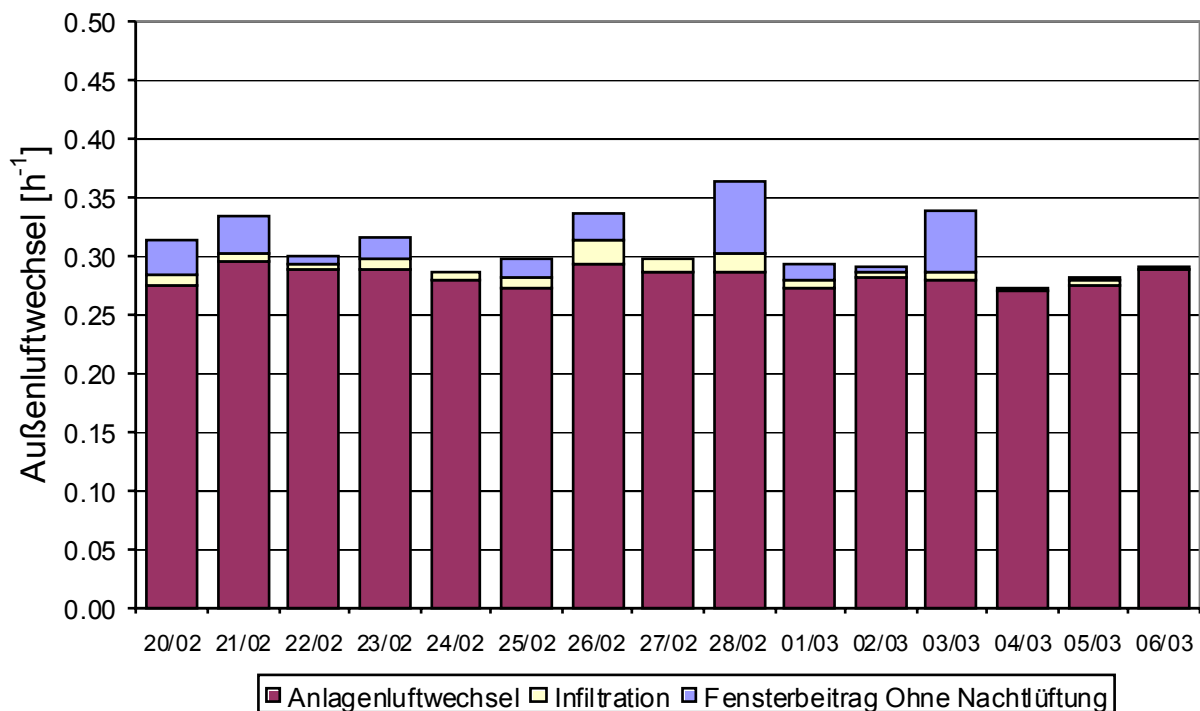


Abbildung 50: Mittlere Außenluftwechsel in Hannover er, ohne verabredete nächtliche Fensterlüftungen.

Fensteröffnung und Gesamtaußenluftwechsel

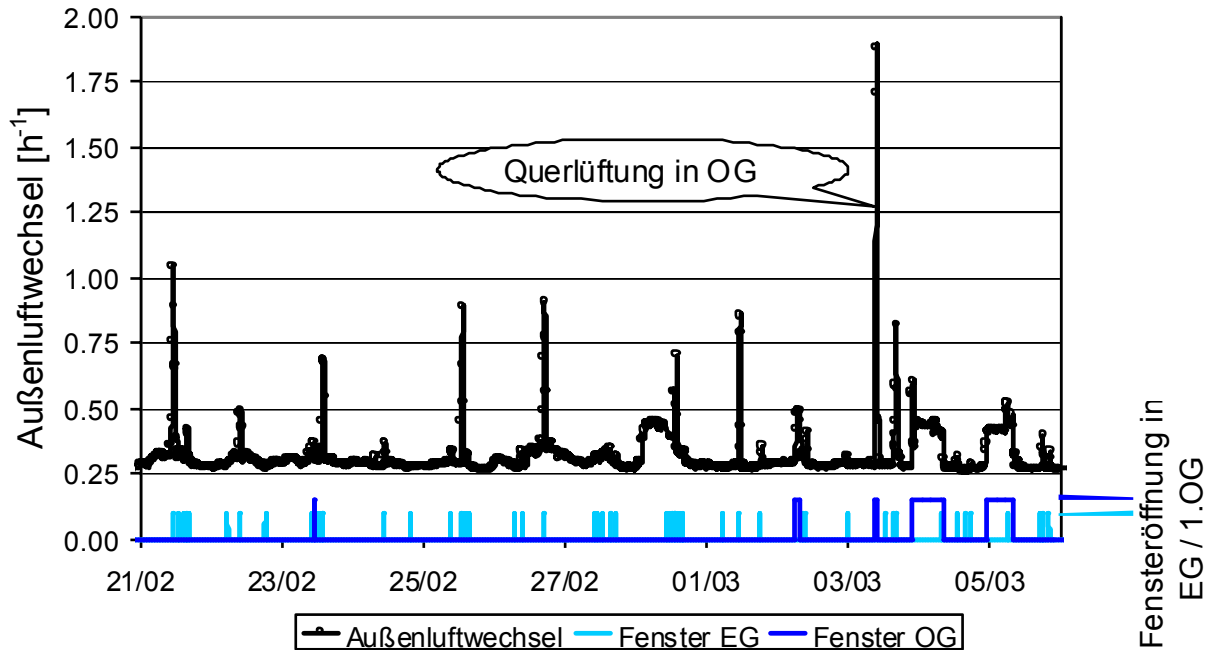


Abbildung 51: Fensteröffnung und Gesamtaußenluftwechsel.

Wie die Auswertung der Schließkontakte an Fenstern und Haustür (vgl. Abschnitt 3.3.6) zeigte, öffnete sich in diesem Reihenhaus am längsten die Haustür. Fenster wurden sonst kaum zum zusätzlichen Lüften genutzt. Die Bewohner wurden daher gebeten, einige Tage bei geöffnetem (gekipptem) Schlafzimmerfenster zu schlafen, um die Auswirkungen einer solchen Nutzung zu untersuchen. Tabelle 5 zeigt die resultierenden Außenluft-Volumenströme während dieser drei Nächte und einem Morgen.

Zeitraum	Gesamt- volumenstrom	Beitrag Fenster	mittl. Windgeschw.	mittl. Außentemp.
	[m³/h]	[m³/h]	[m/s]	[°C]
2.3. 6:13 bis 7:43	142	54	0,6	-2,4
3.3. 21:31 bis 4.3. 8:01	131	50	3,3	5,4
4.3. 23:01 bis 5.3. 7:46	129	43	0,9	6,4
6.3. 21:49 bis 7.3. 6:34	138	50	6,8	9,1

Tabelle 5: Außenluft-Volumenstrom bei gekipptem Fenster

In den Tagesmittelwerten des Außenluftwechsels in Abbildung 49 sind auch die abgesprochenen nächtlichen Öffnungen des Schlafzimmerfensters enthalten. Ohne diese nicht der Gewohnheit der Bewohner entsprechende Nachtlüftung verringern sich die zusätzlichen Beiträge durch Fensterlüftung an diesen Tagen deutlich (vgl. Abbildung 50).

3.4.12 Fensterlüftung: Tag- und Nachtlüfter

Im Reihenhauses in Hannover wurde ausschließlich am Tag und auch dann nur selten über Fenster gelüftet. Erst nach Aufforderung der Bewohner zum nächtlichen Öffnen der Fenster wurde während dreier Nächte das Schlafzimmerfenster gekippt.

3.4.13 Leckageströme am Lüftungsgerät

Die Indikatorgasanalyse kann auch zur Bestimmung von Leckageströmen am Lüftungsgerät eingesetzt werden. Untersucht werden sollten der Leckagestrom von der Abluft in die Zuluft und von der Außenluft in die Fortluft. Zur vollständigen Bilanzierung am Lüftungsgerät wurden hierzu Indikatorgas-Mess-Stellen an den Ein- und Auslässen des Lüftungsgeräts eingerichtet und es wurden die Förderströme erfasst. Aufgrund der windexponierten Außenluftansaugung bzw. des windexponierten Fortluftauslasses sind die Förderströme mit einem hochfrequenten Rauschen überlagert (vgl. Abschnitt 3.4.5.). Durch die kurzzeitigen Schwankungen der Förderströme und durch einen zeitlichen Versatz zwischen den Messwerten war eine eindeutige Interpretation des Konzentrationsverlaufs und eine quantitative Auswertung nicht möglich. Die Frage, welche Leckageströme sich am Lüftungsgerät unter realen Einsatzbedingungen einstellen, konnte mit dem Messaufbau leider nicht befriedigend untersucht werden.

3.5 Übergreifende Auswertung der Messergebnisse

3.5.1 Abschätzung der Luftwechselraten bei Fensteröffnung

Mit einem Strömungsmodell für Fenster wurden Fensterluftwechselraten berechnet und mit den Messwerten verglichen. Im Rahmen des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser ist ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des zusätzlichen durch Fensterlüftung induzierten Außenvolumenstroms am Passivhaus Institut entwickelt worden [AkkP 22] (das Berechnungsblatt ist auch Bestandteil des [PHPP 2004]). Mit diesem Strömungsmodell sind die zusätzlichen Außenluftwechsel mit den Fenstergeometrien der untersuchten Objekte berechnet worden. Neben der Geometrie gehen die mittlere Windgeschwindigkeit und die Differenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur in das Modell ein.

Für jeweils einen Fensteröffnungszustand wurde der maximale Wertebereich des zusätzlichen Außenluftwechsels mit den Extrembedingungen von gemessener Außentemperatur und Windbedingungen berechnet. In Tabelle 6 sind die Fenstergeometrien der untersuchten Wohnungen im Geschosswohnbau und im Reihenhauses zusammengefasst.

	Standard-Fenster	hohes Fenster
Geschosswohnbau		
lichte Fensterhöhe	1,28 m	2,10 m
lichte Fensterbreite	1,03 m	0,9 m
Raumvolumen	176 m ³	176 m ³
Reihenhaus		
lichte Fensterhöhe	1,11 m	2,01 m
lichte Fensterbreite	0,85 m	0,82 m
Raumvolumen	299 m ³	299 m ³

Tabelle 6: Zusammenfassung der Fenstergeometrien für den Geschosswohnbau und das Reihenhaus.

Da keine vollständigen Informationen zu den Fenster-Öffnungszuständen vorlagen, wurden die folgenden drei Öffnungsvarianten definiert und die damit resultierenden Luftwechselraten berechnet.

- Standard-Fenster, gekippt: Ein Standard-Fenster ist in Kippstellung.
- hohes Fenster, gekippt: Ein raumhohes Fenster ist in Kippstellung.
- zwei hohe Fenster gekippt (Geschosswohnbau)/ Standard-Fenster, gedreht: Ein Standard-Fenster ist vollständig geöffnet (Reihenhaus).

Für den Geschosswohnbau sind in Abbildung 52 den gemessenen Werten die berechneten Wertebereiche gegenübergestellt. Nahezu alle Messpunkte der zusätzlichen Luftwechselraten liegen im Wertebereich des Strömungsmodells. Wie zu erwarten war, überwiegt zu dieser Jahreszeit die Kippöffnung. Teilweise liegen Messpunkte noch unterhalb des Wertebereichs des gekippten Standardfensters. Da es sich um Feldmessungen in bewohnten Gebäuden handelt und die Randbedingungen daher nicht genau bekannt sind, kann dies unterschiedliche Ursachen haben. Z.B. sind die lokalen Klimabedingungen vermutlich andere als an der Wetterstation auf dem Dach des Geschosswohnbaus, die Fenster sind eventuell nicht in voller Weite gekippt, Vorhänge reduzieren den Außenvolumenstrom etc.

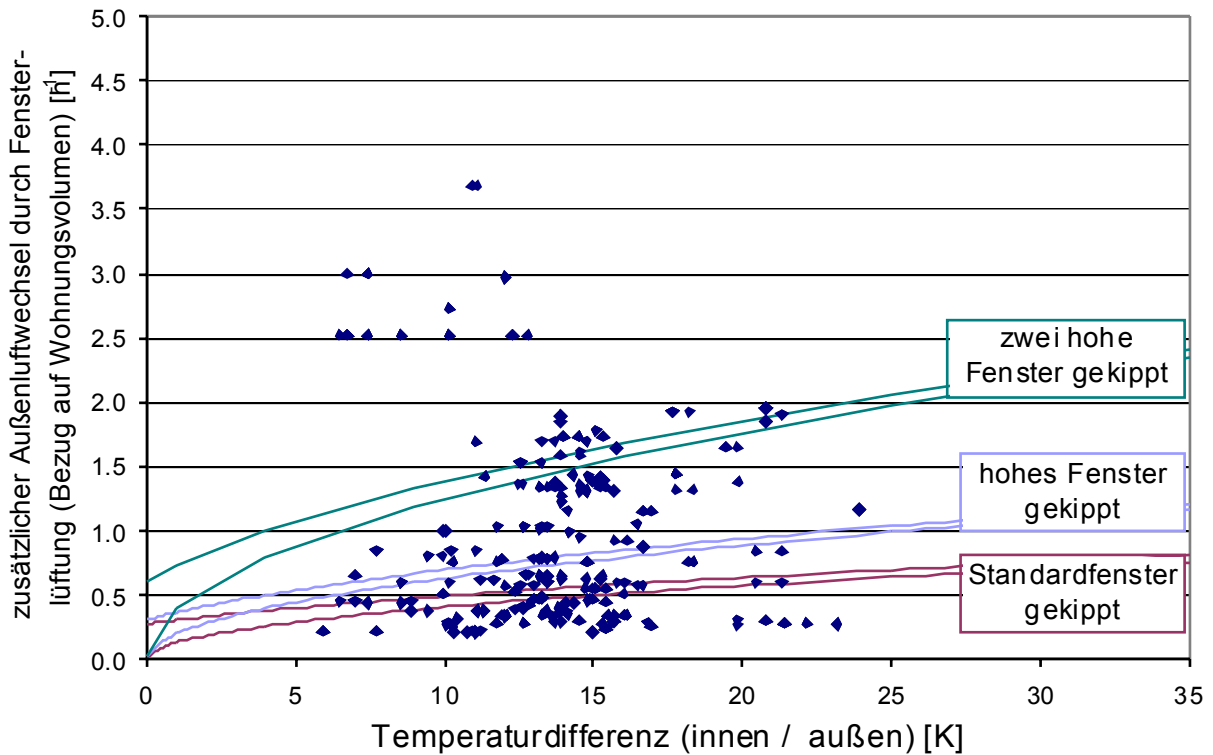


Abbildung 52: Vergleich der Messwerte im Geschosswohnbau mit den Wertebereichen eines vereinfachten Fenster-Durchströmungsmodells. Dargestellt ist der zusätzliche Außenluftwechsel durch Fensterlüftung über der Temperaturdifferenz. Die angegebenen Wertebereiche wurden mit dem Fenster-Durchströmungsalgorithmus unter Verwendung der gemessenen minimalen und maximalen Windgeschwindigkeiten berechnet.

Mit den Rechenwerten des Strömungsmodells kann ein auf die gesamte Dauer der Feldmessung bezogener mittlerer Außenluftwechsel für den Geschosswohnbau abgeschätzt werden. Zu den beschriebenen Fensteröffnungszuständen und mit den Öffnungsdauern wurden drei mittlere zusätzliche Luftwechselraten berechnet. Wie Tabelle 7 zeigt, liegt der Messwert zwischen den berechneten Varianten gekipptes „Standard-Fenster“ und gekipptes „hohes Fenster“. Diese Fensteröffnungszustände sind in der Heizzeit auch überwiegend zu erwarten. Für eine grobe Abschätzung der mittleren Außenluftwechselrate erweist sich das vereinfachte Rechenmodell somit als geeignet.

	Messwerte	Standard-Fenster, gekippt	hohes Fenster, gekippt	Standard-Fenster, gedreht
	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]
mittlerer Außenluftwechsel durch Fensterlüftung	0,06	0,04	0,09	0,27

Tabelle 7: Mittlerer Außenluftwechsel durch Fensterlüftung für 6 Wohneinheiten des Mehrgeschosswohnbaus. Messwert und Modellrechnung.

Fenster induzierte Luftwechselraten wurden auch für das untersuchte Reihenhaus berechnet. In Abbildung 53 sind zu den drei Öffnungszuständen die maximalen Wertebereiche berechnet worden, wie sie sich unter den gemessenen Außentemperatur- und Windbedingungen einstellen würden. Die meisten Messwerte liegen auch hier im Bereich des gekippten Standard-Fensters. Das sind vor allem Messwerte, welche während der abgesprochenen Nachtlüftung auftraten (drei Übernachtungen bei gekipptem Schlafzimmerfenster; vgl. Abschnitt 3.4.11).

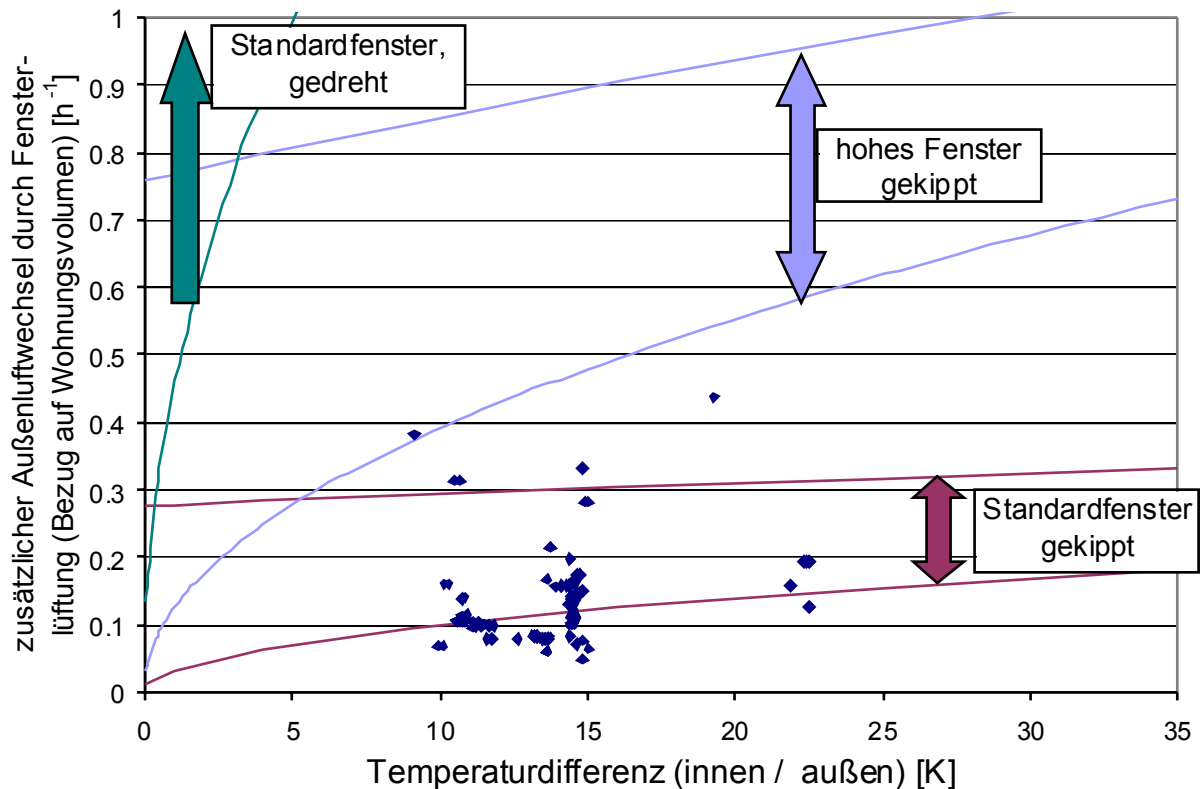


Abbildung 53: Vergleich der Messwerte im Reihenhaus mit den Wertebereichen eines Fenster-Durchströmungsprogramms. Dargestellt ist der zusätzliche Außenluftwechsel durch Fensterlüftung über der Temperaturdifferenz. Die angegebenen Wertebereiche wurden mit dem Fenster-Durchströmungsprogramm unter Verwendung der gemessenen minimalen und maximalen Windgeschwindigkeiten berechnet.

3.5.2 Einfluss der Witterung auf das Lüftungsverhalten

Von besonderer Bedeutung für die Beurteilung des Nutzerverhaltens sind sowohl die Außentemperatur als auch die Solarstrahlung, weil diese das Fensteröffnungsverhalten der Nutzer maßgeblich beeinflussen. Die mittlere Außentemperatur betrug während des Messzeitraums beim Mehrgeschosswohnbau in Kassel 6°C mit Spitzentemperaturen von 16°C. Im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt war es während der Messperiode viel zu warm. Zusätzlich war es sehr sonnig (vgl. Abschnitt 3.3.2). Die Südorientierung der Wohnungen und eine vermehrte Südbalkonnutzung haben zu häufigeren Fensteröffnungen in diesem Zeitraum geführt (vgl. Abschnitt 3.3.6).

In Abbildung 23 ist ein typischer Fall des Ablüftens von erhöhten Raumtemperaturen dargestellt. An den strahlungsreichen Tagen traten Raumtemperaturen bis über 24°C auf, die regelmäßig abgelüftet wurden.

Eine Korrelationsanalyse zeigt die deutliche Beeinflussung des Lüftungsverhaltens durch die Witterungsbedingungen. Trotz der geringen Datenbasis (zweiwöchige Feldmessung in 8 Wohneinheiten) beträgt die Korrelation zwischen dem zusätzlichen Fensterluftwechsel und der Globalstrahlung 0,67 (vgl. Abbildung 54).

Am 9.2. wurde der Tagesmittelwert des zusätzlichen Fensterluftwechsels der 8 Wohneinheiten überwiegend durch eine Wohneinheit (WE8) bestimmt, in der an diesem Tag durchgängig gelüftet wurde. Vermutlich wurde das Fenster vergessen. Diese Wohneinheit wurde am 9.2 bei der Korrelationsanalyse nicht berücksichtigt.

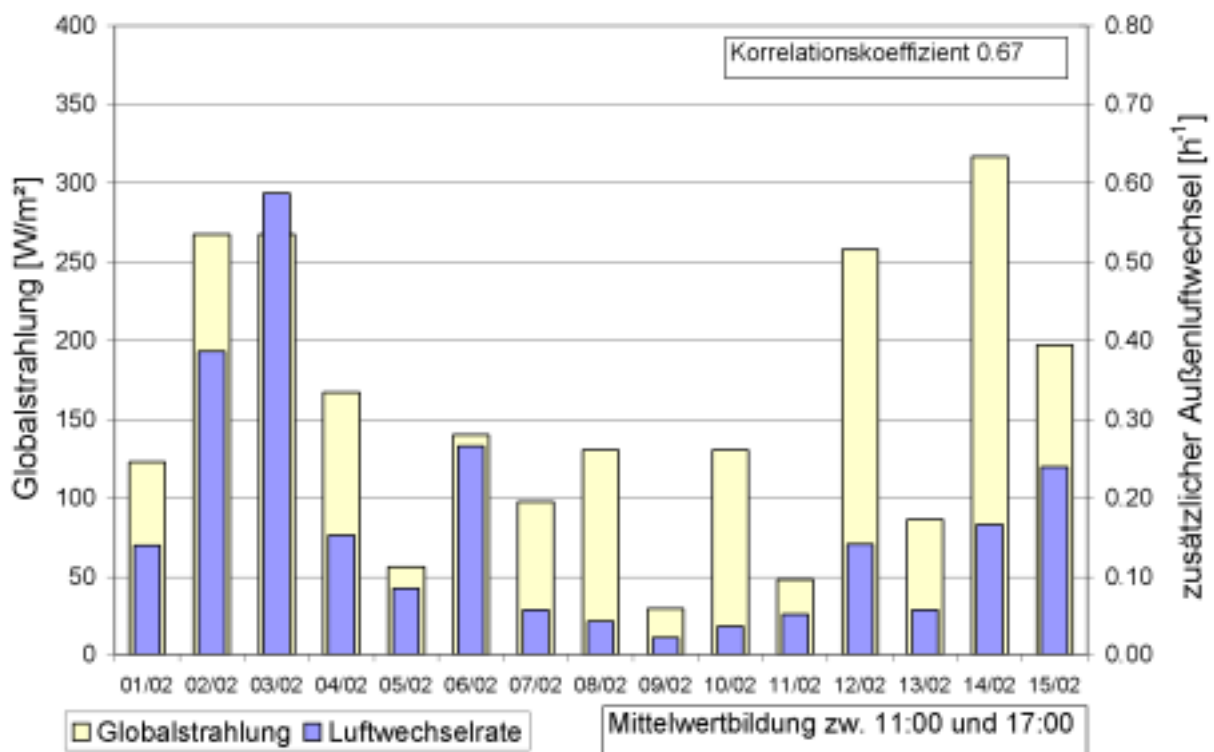


Abbildung 54: Darstellung der Globalstrahlung und der tagesmittleren Luftwechselrate durch Fensterlüftung der 8 Wohneinheiten im Geschosswohnbau.

Eine Untersuchung der mittleren Heizleistungen zeigt eine ähnliche Korrelation zum Fensterlüftungsverhalten. Der zusätzliche Fensterluftwechsel nimmt an Tagen mit geringer mittlerer Heizleistung zu, d.h. bei hohen Außentemperaturen oder an strahlungsreichen Tagen. In Abbildung 55 sind die tagesmittlere Heizleistung und der Fensterluftwechsel dargestellt (R = 52%).

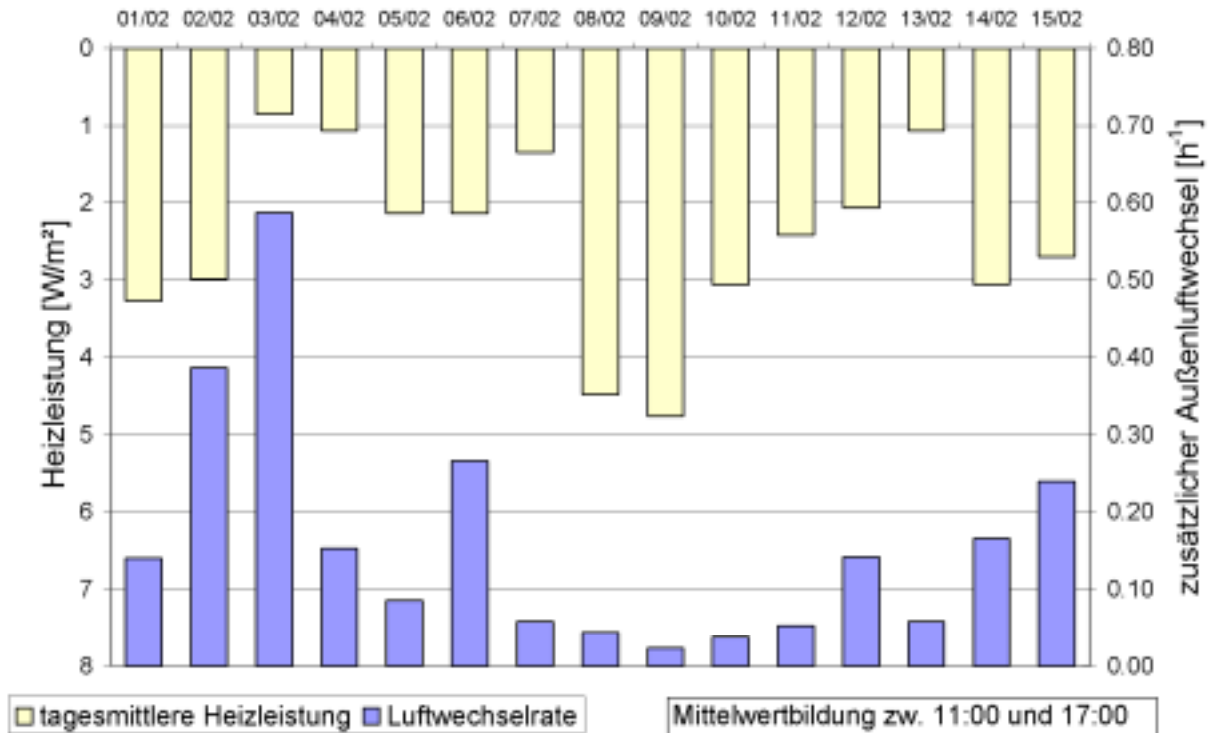


Abbildung 55: Darstellung der tagesmittleren Heizleistung und der tagesmittleren Luftwechselrate durch Fensterlüftung der 8 Wohneinheiten im Geschosswohnbau

Die Klimadaten sind im Vergleich zu typischen Kernwinterdaten für den Standort Kassel zu sonnig und zu mild. Die Analyse der zusätzlichen Fensterlüftung zeigt eine deutliche Beeinflussung des Lüftungsverhaltens durch die Witterungsbedingungen. Die Auswahl von 8 Wohneinheiten im Mehrgeschosswohnbau mit Südorientierung verstärkt diese Abhängigkeit von der Witterung noch. Untersuchungen der Fensteröffnungszeiten in der Literatur zeigen ähnliche Zusammenhänge. Bei einer Untersuchung von insgesamt 21 Passivhäusern wurde in der Kernheizperiode (November bis März) eine Halbierung der Fensteröffnungsdauern im Januar gegenüber November und März beobachtet (vgl. [Ebel 2003-b]).

Die beobachteten zusätzlichen Außenluftwechsel während der Feldmessung lagen höher als dies bei diesen Objekten aufgrund von vorhergehenden Analysen der Heizwärmeverbräuche zu erwarten war. Wie eine Korrelationsanalyse bereits bei der vorliegenden Datenbasis zeigt, hatten die nahezu frühlinghaften Wetterbedingungen in Kassel auf die Fensterlüftung einen deutlichen Einfluss. Wird die gezeigte Abhängigkeit des Lüftungsverhaltens von den Klimaparametern berücksichtigt, sind geringere mittlere Außenluftwechsel für die gesamte Heizzeit anzusetzen, die dann in Übereinstimmung mit den gemessenen Heizwärmeverbräuchen stehen.

Festzuhalten bleibt, dass die gemessenen Fensterluftwechsel aufgrund der milden Witterung eine obere Abschätzung für das Verhalten während der Heizzeit darstellen.

3.5.3 Vergleich der Fensteröffnungsdauern mit Literaturwerten

In der Literatur finden sich bereits einige Untersuchungen zu Fensteröffnungsdauern in Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern mit kontrollierter Wohnungs Lüftungsanlage. Zum Vergleich der Daten zur Fensternutzung aus Abschnitt 3.3.6 und 3.4.6 mit den Literaturwerten werden die Fensteröffnungsdauern auf die Anzahl der Fenster je Wohnung bezogen.

Im Geschosswohnbau in Kassel konnten 5 von insgesamt 8 Wohnungen mit Öffnungskontakten ausgestattet werden (vgl. Abschnitt 3.3.6). Da in den 5 untersuchten Wohnungen nicht alle Fenster mit Schließkontakten ausgerüstet wurden, werden für die Wohneinheiten im Geschosswohnbau entsprechend der beiden nachfolgenden Annahmen die durchschnittlichen täglichen Fensteröffnungszeiten während der Messperiode ermittelt. In der **Annahme A** wird davon ausgegangen, dass zum Lüften nur die mit Schließkontakten ausgerüsteten Fenster genutzt wurden. Diese Annahme steht im Einklang mit der Aussage der Bewohner, dass überwiegend an diesen Fenstern gelüftet wurde. **Annahme B** geht davon aus, dass jeweils alle 5 Fenster einer Wohneinheit genutzt wurden, wobei die durchschnittlichen aufgezeichneten Öffnungszeiten in einer Wohnung auf alle Fenster übertragbar sind. Diese Annahme stellt eine obere Abschätzung für das Nutzerverhalten in den 5 Wohnungen dar und trägt der Beobachtung Rechnung, dass auch Fenster ohne Schließkontakte zumindest im geringen Umfang geöffnet wurden, wie sich in der Indikatorgas-Messung zeigte. In Kassel wurden die Wohneinheiten WE3, WE4, WE6, WE7 und WE8 untersucht. Für das Reihenhaus in Hannover liegen Öffnungszeiten zu allen Fenstern vor. Das verabredete Nachtlüften wird im Reihenhaus nicht berücksichtigt. Der mittlere Außenluftwechsel durch Fensterlüftung der 6 Objekte ist nahezu identisch mit dem Wert des Gesamtstichprobenumfangs der Untersuchung (9 Wohneinheiten).

Zum Vergleich der Daten werden Untersuchungen des Öffnungsverhaltens von 23 Passivhaus-Reihenhäusern in Wiesbaden (vgl. [Ebel 2003-b]), 9 Passivhaus-Reihenhäusern in Stuttgart (vgl. [Reiß 2003]) und von 19 Wohneinheiten im Niedrigenergiehaus-Standard mit Lüftungsanlage in Leipzig (vgl. [Hausladen 2003]) herangezogen.

	Fensteröffnungsdauer [min/(Tag*Fenster)]			
	Mittelwert	Dezember	Januar	Februar
5 Wohneinheiten des MFH u. Reihenhaus nach Annahme A (ca. 14 Tage) Februar 2002				31
5 Wohneinheiten des MFH u. Reihenhaus nach Annahme B (ca. 14 Tage) Februar 2002				77
23 PH Wiesbaden Heizperiode (Nov.-Mrz.) 2000/2001	53			
23 PH Wiesbaden Heizperiode (Nov.-Mrz.) 2001/2002	91	66	55	106
9 PH Feuerbach Heizperiode (Nov.-Mrz.) 2001/2002	38	28	26	36
19 NEH Leipzig Heizperiode (Sep.-Mai) 1999/2000	45 ¹⁾			
19 NEH Leipzig Heizperiode (Sep.-Mai) 2000/2001	63 ¹⁾			
¹⁾ : Tage mit tagesmittlerer Außentemperatur kleiner 15°C, abzüglich der Gebäude ohne Lüftungsanlage.				

Tabelle 8: Fensteröffnungsdauern im Vergleich

Die tatsächliche durchschnittliche Fensteröffnungszeit im Mehrgeschosswohnbau dürfte sich während der Messperiode im Februar zwischen den Werten nach Annahme A und B bewegen. Damit liegen die Fensteröffnungszeiten der Passivhaus-Vergleichsobjekte in Wiesbaden bzw. in Stuttgart im Februar 2002 in ähnlicher Größenordnung. Auffällig ist dabei, insbesondere bei den Reihenhäusern in Wiesbaden, dass die Fensteröffnungsdauern im Dezember 2001 und Januar 2002 deutlich geringer ausfielen. Bei der Untersuchung in Wiesbaden liegt sogar der Heizperioden-Mittelwert 2001/2002 (November bis März) unter dem Wert von Februar 2002; in der Heizperiode 2000/2001 lag der Mittelwert sogar deutlich unter dem Wert von Februar 2002. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Öffnungsdauern in Kassel im Februar 2002 im Vergleich zu anderen Passivhaus-Objekten vergleichbar waren. Aufgrund der milden Witterung im Februar 2002 ist bei den Vergleichsobjekten ein Anstieg bzw. ein ausgeprägter Anstieg der Öffnungsdauern erkennbar (Wiesbaden). Da die Wohneinheiten in Kassel zusätzlich alle südexponiert waren, kann auch hier von einem Anstieg der Öffnungsdauern gegenüber den Vormonaten ausgegangen werden.

3.5.4 Einfluss der Disbalance der Lüftungsanlagen

Bei den untersuchten Objekten wurden, wie in Abschnitt 3.3.5 und 3.4.5 beschrieben, die Förderströme der Lüftungsanlagen aufgezeichnet. Gemessen wurde mittels Staukreuzen in den Lüftungssystemen und mit Hilfe eines Volumenstrom-Messgeräts zonenweise in den Wohnungen. Bei Disbalance zwischen Außen- und Fortluft kommt es zu einer erzwungenen Ex- bzw. Infiltration, einem zusätzlichen Außenluftwechsel, der nicht über die Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage geführt wird.

Im Reihenhaus ergibt sich durch die erzwungene Ex- bzw. Infiltration (mittlere Disbalance am Lüftungsgerät von 17%) ein zusätzlicher Außenluftwechsel von $0,04 \text{ h}^{-1}$. Im untersuchten Reihenhaus ist damit die erzwungene Ex- und Infiltration aufgrund der Disbalance bedeutender als der zusätzliche Beitrag durch Fensterlüftung. Allerdings führt der Umfang der Disbalance noch zu keinen bedeutenden Lüftungswärmeverlusten, da die freie In- und Exfiltration abnimmt und der Wärmebereitstellungsgrad zunimmt (vgl. [Werner 1999]).

Im Mehrgeschosswohnbau in Kassel besteht zwischen den einzelnen Wohnungen kein Raumlufverbund. Disbalancen in den Wohnungen mitteln sich zwar z.T. in der Summe am zentralen Lüftungsgerät weg, für einen zusätzlichen Infiltrations- bzw. Exfiltrationsluftwechsel ist jedoch die Balance der Lüftung innerhalb der Wohnungen entscheidend. Bei Normallüftung liegt die maximale Disbalance in einer Wohnung bei 12%. Wird die Volumenstromdifferenz innerhalb dieser Wohnung auf das Luftvolumen bezogen, resultiert ein zusätzlicher Außenluftwechsel von $0,08 \text{ h}^{-1}$. In dieser Wohneinheit ist damit der Einfluss der Disbalance auf die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung vergleichbar mit dem Einfluss der Fensterlüftung. Die erzwungene In- und Exfiltration übersteigt in dieser Wohnung den Bereich der freien In- und Exfiltration und kann damit bereits eine Erhöhung der Lüftungswärmeverluste zur Folge haben.

Wenn in dieser Untersuchung der Einfluss der Fensterlüftung auf das Konzept der Wohnungslüftung untersucht wird, sollte eine einwandfreie Funktion der Lüftungsanlage nicht außer acht gelassen werden. Entscheidend zur Vermeidung von Disbalance sind eine geeignete Anordnung von Außenluftansaugung und Fortluftauslass sowie eine Einregelung der Lüftungsanlage. Eine ausgezeichnete Luftdichtheit, wie sie die untersuchten Objekte aufweisen, wirkt der erzwungenen Infiltration entgegen. Bei geringerer Luftdichtheit wäre eine Disbalance des Lüftungssystems noch bedeutender.

3.5.5 Einfluss von nächtlicher Fensterlüftung am Beispiel des Reihenhauses

Wie bereits weiter oben beschrieben, wurden die Bewohner des Reihenhauses darum gebeten, einige Nächte bei gekipptem Schlafzimmerfenster zu übermachten, als sich abzeichnete, dass nur selten Fensterlüftung betrieben wurde. In den drei

untersuchten Nächten wurden zusätzliche durch Fenster induzierte Außenvolumenströme von im Mittel $47 \text{ m}^3/\text{h}$ gemessen (vgl. Abschnitt 3.4.11). Während der drei Nächte wurden die Fenster durchschnittlich 9,5 Stunden geöffnet. Durch Nachtlüftung würde sich im Reihenhaus mit den dargestellten Werten der mittlere Außenluftwechsel um $0,06 \text{ h}^{-1}$ erhöhen.

3.5.6 Zusammenstellung der mittleren Außenluftwechsel

In Abbildung 56 sind die mittleren Außenluftwechsel aller Wohneinheiten dargestellt. Die Mittelwerte wurden jeweils über die ca. 14-tägigen Messperioden gebildet. Die Gesamtaußenluftwechsel sind dabei aufgeteilt in die Anteile Anlagenluftwechsel, Beitrag durch Fensterlüftung und Infiltration (der zusätzliche Außenluftwechsel, der keiner Fensterlüftung zugeordnet werden konnte; vgl. Abschnitt 3.3.11).

Im Mehrgeschosswohnbau sind die Anlagenluftwechsel aufgrund der höheren Belegung deutlich höher als im Reihenhaus. Die hohen Luftwechsel führen dort zu tendenziell eher trockener Luft (vgl. Abschnitt 3.3.3). Die geringe Luftwechselrate im Reihenhaus wird von den Bewohnern noch immer als ausreichend für gute Raumluftqualität empfunden. Die aufgetretenen CO_2 -Werte bestätigen die Einschätzung der Bewohner (vgl. Abschnitt 3.4.4).

Im Reihenhaus wurde nur in geringem Umfang über Fenster gelüftet. Dieser mittlere zusätzliche Außenluftwechsel lag im Messzeitraum bei $0,03 \text{ h}^{-1}$. Ohne die abgesprochene Nachtlüftung (in drei Nächten und einem Morgen) reduziert sich der mittlere zusätzliche Außenluftwechsel auf $0,02 \text{ h}^{-1}$. Der Infiltrationsluftwechsel liegt für das Reihenhaus bei $0,01 \text{ h}^{-1}$.

Im Mehrgeschosswohnungsbau beträgt der mittlere Gesamtaußenluftwechsel $0,80 \text{ h}^{-1}$, der mittlere zusätzliche Fensterbeitrag $0,08 \text{ h}^{-1}$ und der zusätzliche mittlere Infiltrationsluftwechsel $0,01 \text{ h}^{-1}$. Wie in Abbildung 56 erkennbar ist, variiert der zusätzliche Außenluftwechsel durch Fensterlüftung von Wohnung zu Wohnung stark. Der mittlere Außenluftwechsel durch Fensterlüftung weicht mit $0,08 \text{ h}^{-1}$ merklich vom Median mit $0,06 \text{ h}^{-1}$ ab. Das bedeutet, dass in der Mehrzahl der Wohneinheiten weniger gelüftet wird, als es durch den Mittelwert ausgedrückt wird. Wird der Ausreißer im Lüftungsverhalten (WE8) nicht berücksichtigt, wandern Mittelwert und Median aufeinander zu und liegen beide bei $0,06 \text{ h}^{-1}$ (Bei der betreffenden Wohneinheit (WE8) wurde an einem Tag ganztägig gelüftet, vermutlich wurde das Fenster vergessen. Durch diesen Tageswert vom 9.2.2002 erhöhte sich der mittlere Außenluftwechsel der Wohneinheit um 49%). Die mittleren Außenluftwechsel für alle untersuchten Wohneinheiten (inkl. Reihenhaus, jedoch ohne den Ausreißer im Geschosswohnbau) liegen für den Anteil durch Fensterlüftung bei $0,06 \text{ h}^{-1}$ und für Infiltration bei $0,01 \text{ h}^{-1}$. Aufgrund der sehr milden Witterung und des damit verbundenen häufigeren Fensterlüftens im Geschosswohnbau stellen die dargestellten Werte Obergrenzen dar.

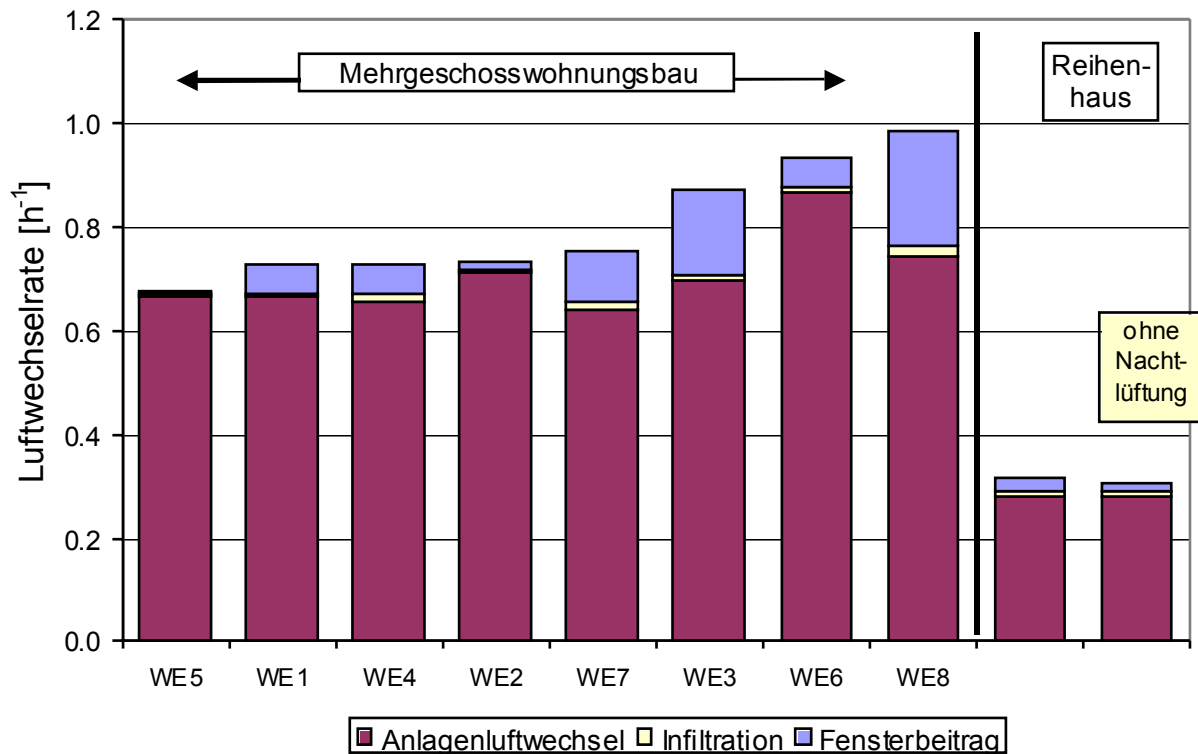


Abbildung 56: Darstellung der mittleren Außenluftwechsel aller Wohneinheiten innerhalb der Messperioden.

3.5.7 Vergleich der zusätzlichen Luftwechsel mit der Projektierung

Zur Projektierung der Objekte mit einem Energiebilanzverfahren wurde der zusätzliche Infiltrationsluftwechsel n_x infolge von Wind und Auftrieb bei undichter Gebäudehülle gemäß dem Verfahren der DIN EN 832 aus den Drucktest-Ergebnissen zur Luftdichtheit bestimmt.

$$n_x = \frac{n_{50} \cdot e}{1 + \frac{f}{e} \left(\frac{n_{zu} - n_{ab}}{n_{50}} \right)^2} \quad (4)$$

$$e = 0.04, f = 15$$

Die n_{50} -Werte der Einzelwohnungen im Mehrgeschosswohnungsbau in Kassel liegen im Bereich von 0,12 bis 0,60 h^{-1} mit einem Mittelwert von 0,35 h^{-1} . In der Passivhaus-Reihenhausssiedlung sind die Werte ebenfalls ausgezeichnet und liegen zwischen 0,17 und 0,40 h^{-1} . Mit (4) ergeben sich die folgenden Infiltrationsluftwechsel n_x :

	$n_{50, \min}$	$n_{50, \max}$	$n_{50, \text{mittel}}$	$n_{\text{Inf}, \min}$	$n_{\text{Inf}, \max}$	$n_{\text{Inf}, \text{mittel}}$
	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]
Mehrgeschoss-wohnbau	0,12	0,60	0,35	0,01	0,05	0,03
Reihenhäuser	0,17	0,40	0,29	0,02	0,04	0,03

Tabelle 9: Infiltrationsluftwechsel aus Drucktest-Kennwerten (n_{50}) berechnet.

Die mit den Drucktest-Kennwerten berechneten und zur Projektierung herangezogenen Infiltrationsluftwechsel bewegen sich im Bereich von 0,01 bis 0,05 h⁻¹. Die Messwerte des zusätzlichen Außenluftwechsels liegen damit in der Größenordnung der projektierten Werte. Wenn berücksichtigt wird, dass die zusätzlichen Außenluftwechsel im Mehrgeschosswohnbau aufgrund der milden und sonnigen Witterung eine obere Abschätzung darstellen, ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Annahmen bei der Projektierung und den Messergebnissen.

3.5.8 Energetische Auswirkungen des zusätzlichen Außenluftwechsels

Mit dem sehr guten Wärmeschutz im Passivhaus-Standard und den damit geringen Transmissionswärmeverlusten gewinnen die Lüftungswärmeverluste deutlich an Bedeutung. Der zusätzliche Außenluftwechsel durch Fensterlüftung während der Heizzeit erhöht die Lüftungswärmeverluste. Im Folgenden werden diese energetischen Auswirkungen mit einem stationären Energiebilanzverfahren abgeschätzt. Der rechnerische Heizwärmebedarf und der Heizenergiebedarf der untersuchten Objekte wurden in der Planungsphase mit dem Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) [PHPP 2000, PHPP 1999], einem stationären Energiebilanzverfahren, berechnet. Das zugrundeliegende Rechenverfahren basiert auf europäischen Normen (DIN EN 832 jahreszeitliches und monatliches Verfahren). Die Berechnung ist ausführlich dokumentiert in [Pfluger 2001-a] und in [Feist 2001-b].

Mit dem stationären Energiebilanzverfahren und den projektierten Infiltrationsluftwechseln aus Tabelle 9 wurde der Heizwärmebedarf für die untersuchten Objekte berechnet. Unter der Annahme, dass die gemessenen zusätzlichen Außenluftwechsel (Fensterlüftung und Infiltration) während der Feldmessung auf die gesamte Heizzeit übertragbar sind, wurde der Heizwärmebedarf auch mit den gemessenen Außenluftwechseln berechnet. In Abbildung 57 und Abbildung 58 sind der berechnete Heizwärmebedarf gemäß Projektierung, der resultierende Heizwärmebedarf entsprechend der gemessenen Außenluftwechsel und der gemessene Heizwärmeverbrauch dargestellt.

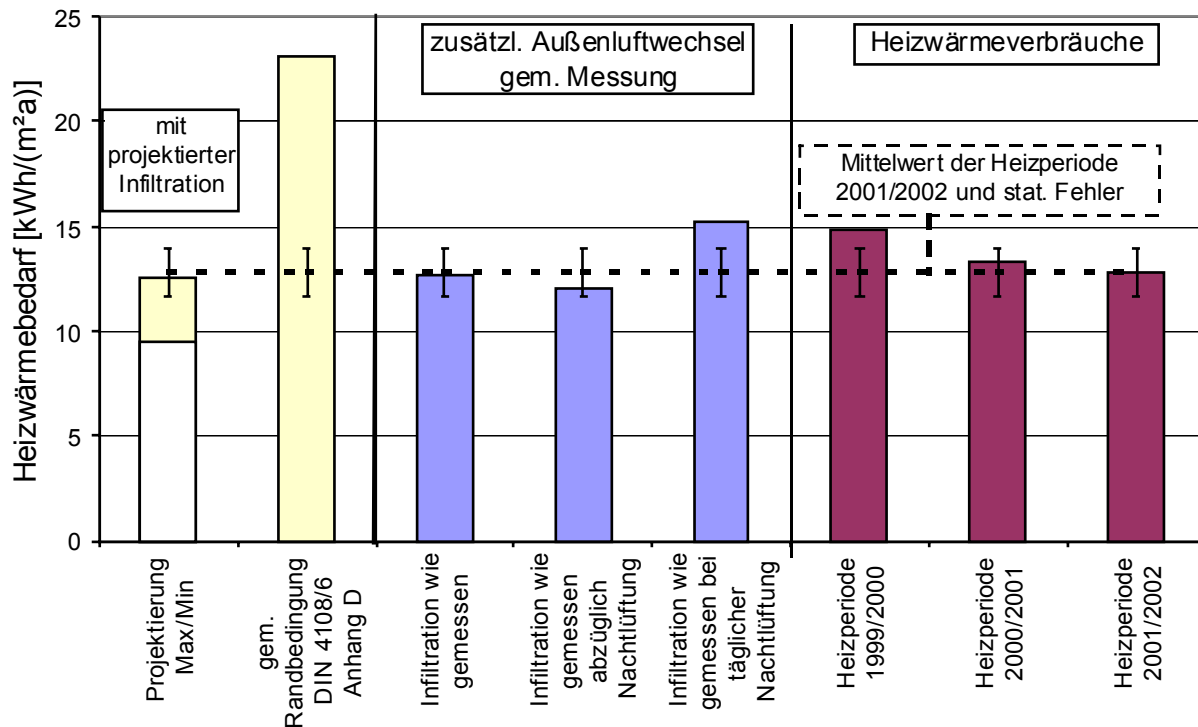


Abbildung 57: Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch für das Reihenhaus. Dargestellt sind der Heizwärmebedarf mit der projektierten Infiltration, mit der Infiltration gemäß DIN 4108/6 und mit dem zusätzlichen Außenluftwechsel gemäß der Feldmessung. Dem sind die gemessenen Heizwärmeverbräuche von drei Heizperioden gegenüber gestellt (Heizwärmeverbräuche aus [Peper 2001] und [Peper 2002]). Alle Werte sind auf die Wohnfläche bezogen.

Beim Reihenhaus ergibt sich durch die gemessenen zusätzlichen Außenluftwechsel keine große Änderung gegenüber dem Heizwärmebedarf gemäß der Projektierung. Für den Fall der täglichen Nachtlüftung würde sich der Heizwärmebedarf gegenüber der Projektierung um ca. 3,3 kWh/(m²a) erhöhen. Die Heizwärmeverbrauchsauswertung der insgesamt 32 Passivhaus-Reihenhäuser in Hannover führte auf eine Standardabweichung der Einzelmesswerte von $\pm 6,6$ kWh/(m²a). Auch im hypothetisch berechneten Fall einer regelmäßigen nächtlichen Lüftung liegt damit der potentielle Mehrverbrauch deutlich innerhalb des Bereichs der normalen Streuung der Heizwärmeverbräuche. Der Einfluss der Temperaturunterschiede zwischen den Reihenhäusern ist im Vergleich dazu weitaus höher. Aufgrund der resultierenden Querwärmeströme zwischen den Häusern sowie der erhöhten Transmissionswärmeverluste können dadurch Verbrauchsunterschiede von bis zu ± 11 kWh/(m²a) erklärt werden (vgl. [Peper 2002]). Abbildung 57 zeigt insbesondere, dass die in der Heizperiode 2000/2001 gemessenen Verbrauchswerte gut mit den Rechenwerten der ursprünglichen Projektierung übereinstimmen.

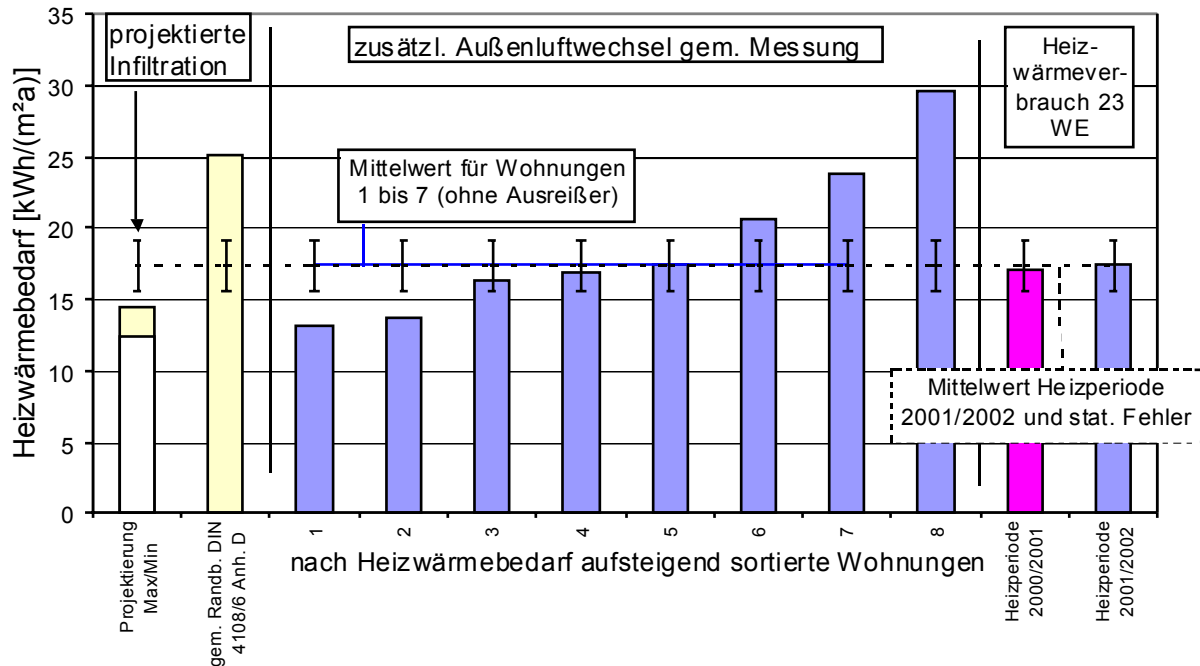


Abbildung 58: Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch beim Geschosswohnbau (Bezug auf Wohnfläche). Dargestellt ist der Heizwärmebedarf mit der projektierten Infiltration, mit der Infiltration gemäß DIN 4108/6 und mit den zusätzlichen Außenluftwechseln gemäß der Feldmessung. Dem sind die gemessenen Heizwärmeverbräuche von zwei Heizperioden gegenüber gestellt (Mittelwert ohne Ausreißer vgl. Abschnitt 3.5.6).

Beim Mehrgeschosswohnbau ergibt sich mit dem messtechnisch erfassten zusätzlichen Außenluftwechsel (unter der Annahme der Übertragbarkeit auf die gesamte Heizzeit) für 7 Wohneinheiten ein mittlerer Heizwärme-Mehrbedarf gegenüber der Projektierung von $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Auch diese obere Abschätzung aufgrund der milden Witterung für das Fensterlüftungsverhalten in der Heizzeit liegt innerhalb der individuellen Streuung der gemessenen Heizwärmeverbräuche bei insgesamt 23 Wohneinheiten des Geschosswohnbaus. Weitergehende Untersuchungen zeigen, dass der bestimmendere Einfluss für die Heizwärmeverbrauchsunterschiede in den individuell gewählten Temperaturniveaus (zwischen 18°C und 24°C) der Wohneinheiten zu finden ist (vgl. [Pfluger 2001-b]).

Bemerkenswert ist auch hier, dass trotz der erwartungsgemäßen Streuung der Einzel-Heizwärmeverbräuche der Mittelwert über alle Wohneinheiten den projektierten Wert ziemlich gut wiedergibt. Ein Ansatz, der den zusätzlichen Außenluftwechsel entsprechend DIN 4108 Teil 6 Anhang D auf $0,2 \text{ h}^{-1}$ festsetzt, führt auf eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs um nahezu $11 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (vgl. Abbildung 57 und Abbildung 58). Aus den Verbrauchsmessungen der Passivhaus-Wohneinheiten in Kassel und Hannover sind derart hohe zusätzliche Luftwechselraten nicht ableitbar. Einzelwerte in den Wohneinheiten können diese Größe zeitweise erreichen, doch ist der durchschnittliche mit den Verbrauchsmessungen konsistente Zusatzluftwechsel bei beiden Projekten deutlich geringer.

3.5.9 Berücksichtigung des solaren Ausnutzungsgrads

Das Fensterlüftungsverhalten in sonnigen Perioden der Heizzeit wird im in Abschnitt 3.5.8 verwendeten Energiebilanzverfahren nach EN 832 z.T. bereits im solaren Ausnutzungsgrad berücksichtigt. In Zeiträumen mit hohen inneren Wärmegeinnen und hohem Solarangebot neigen Räume zu Temperaturen, die über dem Sollwert liegen; dies konnte im konkreten Fall direkt bei den Messungen festgestellt werden. Diese höheren Temperaturen führen einmal direkt zu erhöhten Wärmeverlusten, zum anderen aber auch indirekt durch das aktive Öffnen von Fenstern durch die Nutzer. Diese Tatsache wird in einer thermischen Gebäudesimulation automatisch berücksichtigt; aber auch die Wärmebilanz nach der europäischen Norm EN 832 enthält einen Term, den solaren Ausnutzungsgrad η

$$\eta = \frac{(1 - \gamma^a)}{(1 - \gamma^{a+1})}$$

welcher den nutzbaren Anteil der freien Wärme angibt und in dem γ das Verhältnis von freier Wärme Q_F zum Wärmeverlust Q_L ("Solar/Last-Verhältnis") darstellt. Der Exponent a wird im Monatsverfahren durch $a = 1 + \tau/16h$ mit der Gebäudezeitkonstanten τ gegeben. $(1-\eta) \cdot Q_F$ ist der *nicht-nutzbare* Anteil der freien Wärme, somit gerade der zusätzliche Wärmeverlust, der in der Folge der Übertemperatur im Raum auftritt.

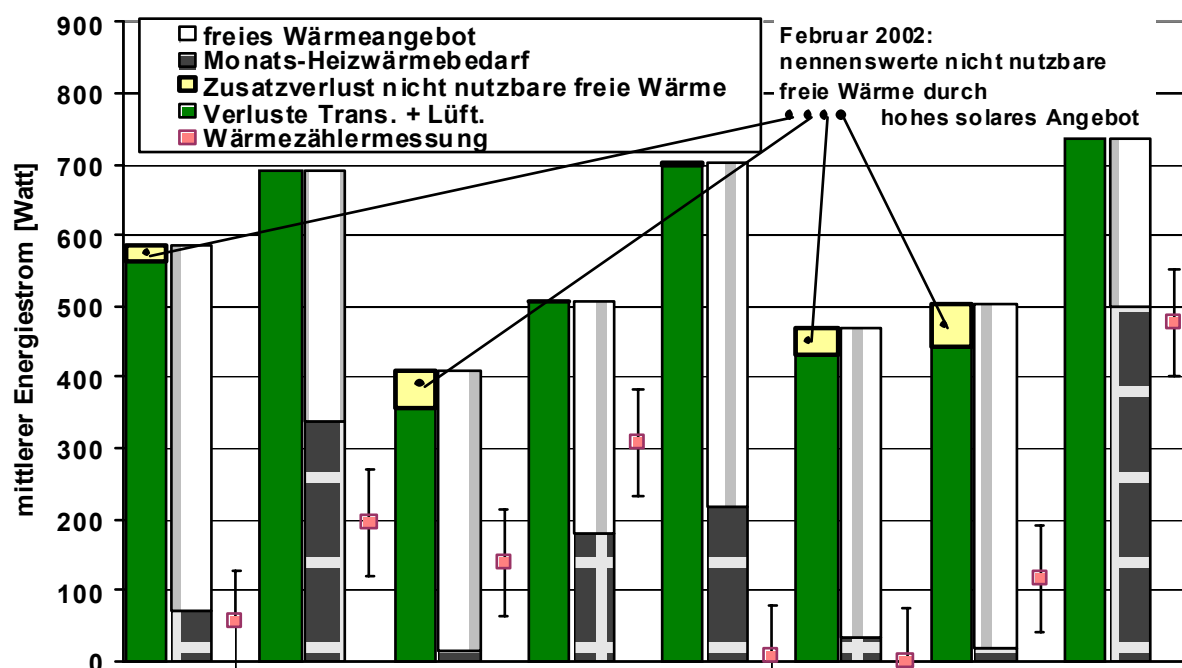


Abbildung 59: Nachvollzogene Monats-Energiebilanzen nach EN 832 für die untersuchten Wohnungen des Geschosswohnbaus in Kassel Marbachshöhe - Mehrzonenmodell unter Berücksichtigung von Wärmeströmen zwischen den Wohnungen. Im dargestellten Monat (Februar 2002) war das Verhältnis von Freier Wärme zu Wärmeverlusten so hoch, dass es nach EN 832 zu nennenswerten nicht nutzbaren Wärmegeinnen kommt. Man beachte die extrem geringen mittleren Heizleistungen (maximal 500 Watt) nach der Bilanz und nach der Wärmehölmessung.

In Abbildung 59 sind die Wärmebilanzen der 8 untersuchten Wohnungen des Geschosswohnbaus in Kassel Marbachshöhe im Februar 2002 dargestellt, wie sie mit dem Monatsverfahren nach EN 832 und aus den gemessenen Temperaturen, Beiträgen zu inneren Wärmequellen und Einstrahlungsdaten nachvollzogen werden können. Die Bilanz ist in der monatsdurchschnittlichen Leistung (Monatswärmebetrag geteilt durch Monatslänge in Stunden) ausgedrückt. Die Bilanzierung erfolgt als Teil eines stationären 27-Zonen-Gesamtmodells (vgl. [Pfluger 2001-b]). Dieses Modell berücksichtigt auch die Querwärmeströme zwischen den Wohnungen, die wegen der geringen Wärmedämmung der Geschossdecken und der Wohnungstrennwände einen nennenswerten Einfluss auf die individuellen Wärmebedarfswerte haben. Mit den Daten vom Februar 2002 zeigen sich in vielen Wohnungen bedeutende, in einigen Wohnungen sogar erhebliche Deckungsanteile der freien Wärme - dies ist auf die hohen Solarstrahlungsangebote und die untypisch hohen Februar-Außentemperaturen zurückzuführen. Damit ergeben sich hohe Solar/Last-Verhältnisse γ , aus denen nach EN 832 reduzierte Ausnutzungsgrade η resultieren. Somit ergeben sich nach den Bilanzen für den Messmonat in einigen Wohneinheiten deutlich erkennbare zusätzliche Wärmeverluste. Im Mittel entsprechen diese zusätzlichen Wärmeverluste einem "zusätzlichen Luftwechsel" von $0,02 \text{ h}^{-1}$. In der Bilanz nach EN 832 wird somit, wie hier erläutert, ein Teil des zusätzlichen Wärmeverlustes bereits berücksichtigt. Dieser Teil folgt aus der antizipierten Reaktion des Nutzers auf eine durch ein überschüssiges solares Angebot erzeugten temporären Erwärmung des Raumes über die Solltemperatur hinaus.

In Abbildung 59 finden sich neben den Bilanzen auch noch die gemessenen Werte der wohnungsweisen Wärmehähler für die Heizwärme (mit geschätzter Fehlerangabe). Diese Werte sind (wie die rechnerischen Bilanzwerte) extrem gering, in einigen Wohnungen im Februar bereits nahe Null. Manche Einzelmesswerte weichen von den berechneten Werten stärker ab, als der Fehlerbalken der Wärmehählermessung abdeckt; dies liegt daran, dass auch die Rechenwerte mit Fehlern behaftet sind, welche z.B. aus der Messgenauigkeit der Innentemperaturen und der Bestimmbarkeit der inneren Wärmequellen resultieren. Berücksichtigt man diese Umstände, dann ist die Korrelation zwischen Messwerten und Berechnung als relativ gut anzusehen (der Korrelationskoeffizient beträgt für diesen Monat 74%; vgl. auch [Pfluger 2001-b]). Der Mittelwert beträgt 162 W für die Messung im Vergleich zu 170 W nach den Berechnungen mit dem EN 832-Mehrzonenmodell. Die Messung bestätigt damit den extrem geringen Heizwärmebedarf dieser Passivhauswohnungen.

Zum Vergleich zeigt Abbildung 60 die Wärmebilanzen dieser Wohnungen, allerdings berechnet mit den mittleren langjährigen Klimadaten des Standortes Kassel im Februar. Die Wärmeverluste sind wegen der geringeren Außentemperatur höher, die Freie Wärme ist deutlich geringer als im oben dargestellten Fall mit den gemessenen Wetterdaten. Das führt einerseits zu einem höheren Wärmebedarf im "Standard-Februar", andererseits zu einem viel kleineren Solar/Last-Verhältnis und damit zu nur geringen nicht nutzbaren Anteilen der Freien Wärme. Dieser Vergleich zeigt deutlich, dass im Monat der durchgeführten Messungen sowohl die Wärmegewinne als auch

die Außentemperaturen ausnahmsweise besonders hoch waren; die Verhältnisse entsprechen eher denen, die normalerweise im März vorliegen. Für solche Verhältnisse wird generell ein höherer Fensterluftwechsel als im Kern der Heizperiode erwartet.

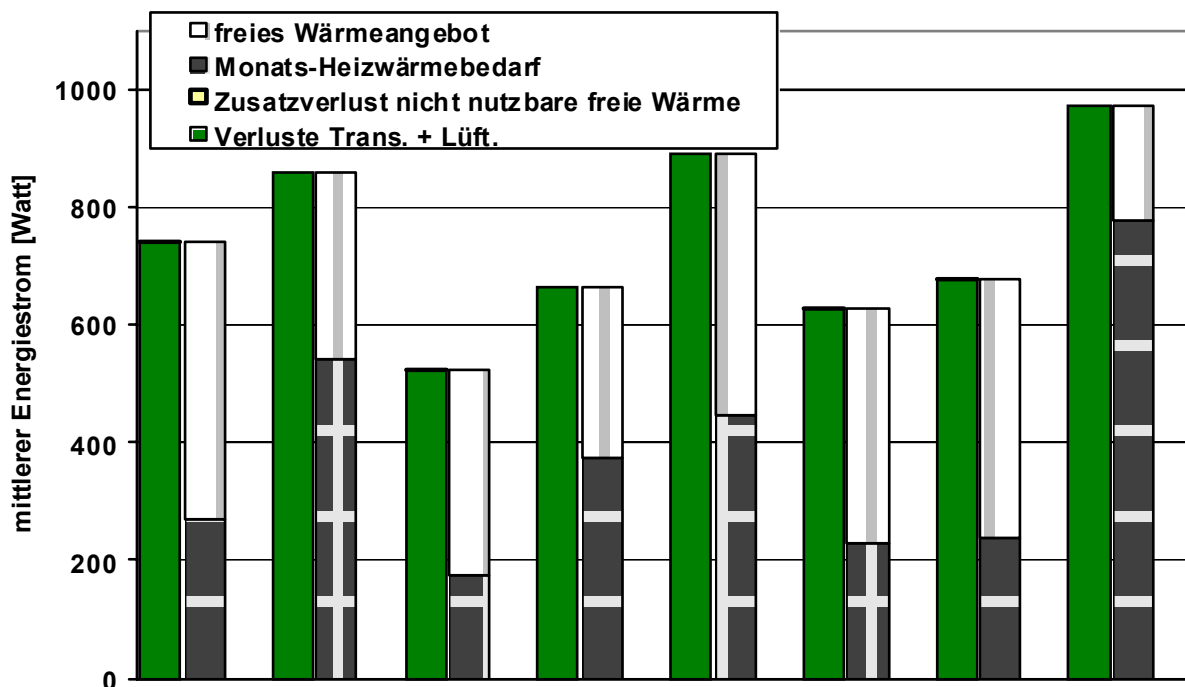


Abbildung 60: Monats-Energiebilanzen nach EN 832 für die untersuchten Wohnungen des Geschosswohnbaus in Kassel Marbachshöhe - Gebäude- und Nutzungsdaten wie oben, jedoch für den Standardmonat Februar in Kassel nach Langzeitklimadaten. Hier ist das Verhältnis von Freier Wärme zu Wärmeverlusten eher gering, so dass nach EN 832 Wärmegewinne nur in geringem Umfang nicht nutzbar sind.

3.6 Zusammenfassung zu den Messergebnissen

In insgesamt 9 Wohneinheiten mit kontrollierter Wohnungslüftung konnte der tatsächliche Außenluftwechsel mit Hilfe von Indikatorgas-Messungen ermittelt werden. Messaufbau und -verfahren erwiesen sich als geeignete Instrumente zur kontinuierlichen Erfassung des Außenluftwechsels. Neben der erfolgreichen Luftwechsel-Messung in bewohnten Objekten konnte ein zusätzlicher umfangreicher Datensatz der Randbedingungen aufgezeichnet werden. Die aufgezeichneten Fensteröffnungszeiten liegen in der Bandbreite der Literaturwerte von Wohnungen mit kontrollierter Lüftung. Der Gesamt-Außenluftwechsel konnte mit den zusätzlichen Daten des Anlagenluftwechsels in die Beiträge Lüftungsanlage, Fensterlüftung und In- bzw. Exfiltration durch Leckagen unterteilt werden.

Der gemessene mittlere zusätzliche Außenluftwechsel von $0,06 \text{ h}^{-1}$ (Fensterlüftung) plus $0,01 \text{ h}^{-1}$ (Infiltration¹) ist höher als auf Basis der konkreten energetischen Verbrauchsmessungen für diese Objekte erwartet. Die vorhergehende Analyse der

¹ zusätzlicher Außenluftwechsel der keiner Fensterlüftung zugeordnet werden konnte; vgl. Abschnitt 3.3.11.

Heizwärmeverbräuche mittels Energiebilanzmodellen in den untersuchten Objekten führte auf geringere mittlere Außenluftwechsel durch Fensterlüftung als in der vorliegenden Untersuchung beobachtet. Mit einer Korrelationsanalyse konnte der Einfluss der Klimaparameter auf das mittlere Lüftungsverhalten im Geschosswohnbau gezeigt werden. Die für den Standort Kassel im Februar deutlich zu milde und zu sonnige Witterung führte nach dieser Analyse zu intensiverer Fensternutzung in den südorientierten Wohneinheiten. Das Lüftungsverhalten im Messzeitraum markiert für den Mehrgeschosswohnbau deshalb eine Obergrenze für das Verhalten in der Heizzeit. Durch die weitgehend der Witterung angepasste Fensterlüftung können deutlich geringere Zusatzluftwechsel innerhalb der kurzen Heizzeit von Passivhäusern erwartet werden. Durch das witterungsabhängige Fensterlüftungsverhalten schlägt sich darüber hinaus die Fensterlüftung nur reduziert in erhöhten Lüftungswärmeverlusten nieder. Die geringe Korrelation zwischen dem Fensterlüftungsverhalten und den Heizwärmeverbräuchen in Passivhäusern mit Lüftungsanlage wurde auch an anderer Stelle beobachtet (vgl. [Ebel 2002]).

Der wesentliche Einfluss auf die nutzungsbedingte Streuung beim Heizenergiebedarf liegt nicht im zusätzlichen Außenluftwechsel. Dies zeigen messtechnische Untersuchungen sowohl in der Reihenhaus-Siedlung in Hannover als auch im Mehrgeschosswohnbau in Kassel. Der entscheidende Einfluss auf die Streuung in den Heizwärmeverbräuchen konnte in den unterschiedlichen Temperatur-Niveaus der Wohneinheiten ausgemacht werden.

Ein zusätzlicher Außenluftwechsel von $0,2 \text{ h}^{-1}$, wie er als Randbedingung in DIN 4108 Teil 6 Anhang D für Zu- und Abluftanlagen vorgeschrieben wird, ist zwar als Einzelwert in der Messung aufgetreten, der Mittelwert aller Wohneinheiten von $0,06 \text{ h}^{-1}$ (Fensterbeitrag) plus $0,01 \text{ h}^{-1}$ (Infiltration) liegt allerdings deutlich darunter. In Energiebilanzverfahren wird zusätzliches Fensterlüften in strahlungsreichen Winterperioden z.T. bereits im solaren Ausnutzungsgrad berücksichtigt. In einer Bilanz des untersuchten Geschosswohnbaus führt der Ausnutzungsgrad, aufgrund der untypisch milden Klimadaten des Messmonats Februar, zu „zusätzlichen Wärmeverlusten“. Diese entsprechen einem Außenluftwechsel von $0,02 \text{ h}^{-1}$.

Wie darüber hinaus gezeigt wurde, kann auch eine Disbalance zwischen Zu- und Abluftströmen zu bedeutender In- bzw. Exfiltration führen. Die zusätzlichen Außenluftwechsel können dabei die Größenordnung der beobachteten mittleren Fensterluftwechsel erreichen und sogar übersteigen. Eine sorgfältige Planung und anschließende Einregelung der Lüftungsanlagen sind vor diesem Hintergrund sehr wichtig.

Wie eine CO_2 -Messung zeigte, sorgen selbst die geringen Anlagenluftwechsel von $0,27 \text{ h}^{-1}$ im untersuchten Reihenhaus für eine gute Raumluftqualität. Die relativ hohen Luftwechsel im Mehrgeschosswohnbau hingegen führten tendenziell zu eher trockener Luft. Diese Erkenntnis zeigt,

- dass die heute noch übliche Dimensionierung auch für die Lüftung in Wohnungen zu regelmäßig stark überhöhten Luftwechselraten führt.
- dass demgegenüber die für Passivhäuser empfohlene Methode immer noch an der Obergrenze der erforderlichen Lüftung liegt:
 - Auslegung nach Zahl der Personen.
 - Für jede Person wird gemäß DIN 1946 eine Außenluftmenge von 30 m³/h projiziert.
 - Dies wird als Auslegungsvolumenstrom für die gesamte Wohnung angesetzt und nicht additiv für jeden einzelnen Raum.

Das Auslegungsverfahren ist z.B. im Algorithmus des [PHPP 2004] enthalten.

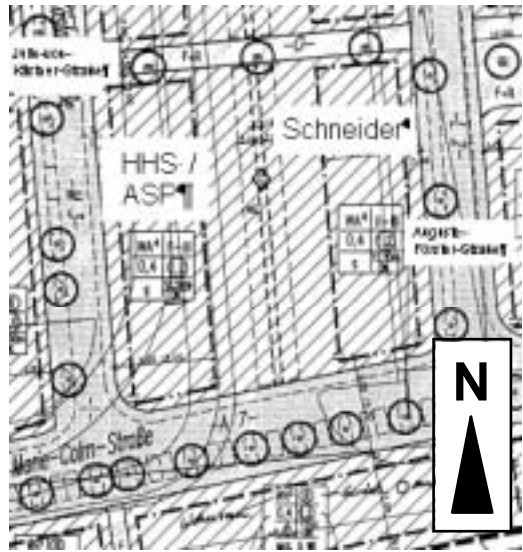
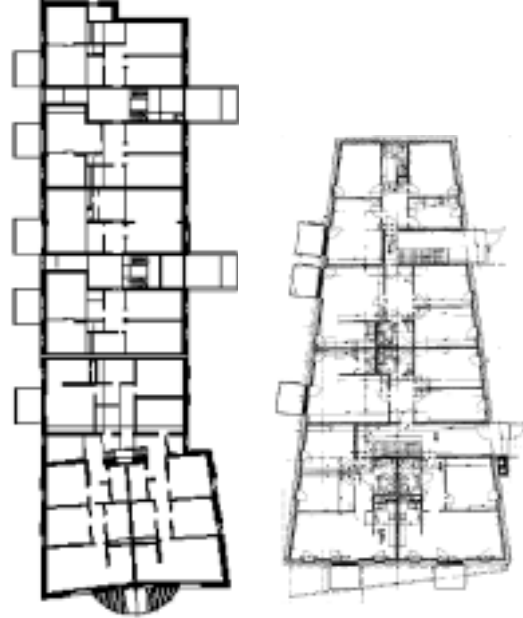

Mit einem Fensterdurchströmungsmodell, den Fenstergeometrien und den Klimaparametern wurden die zusätzlichen Fensterluftwechsel abgeschätzt. Die Berechnungsergebnisse dieses Algorithmus waren im Vergleich mit den Messwerten zufriedenstellend, zeigen jedoch auch die Grenzen der Berechnung von Luftwechselraten mit weitgehend vereinfachenden Strömungsmodellen auf.

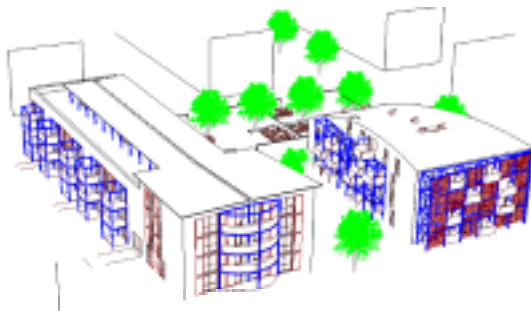
Messtechnische Untersuchung des Passivhaus-Geschosswohnungsbaus Kassel-Marbachshöhe (Julie-von-Kästner Str. 11/13/15) in der zweiten Heizperiode (Sept. 2001 bis Mai 2002)

Zusätzlich zu den spezifischen Untersuchungen zum tatsächlichen Luftwechsel in Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung wurden die Messungen zum Heizwärme- Warmwasser- und Stromverbrauch der Wohneinheiten im Passivhaus-Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe in der zweiten Heizperiode durchgeführt. Auf diese Weise konnten Aussagen über die Verbrauchsentwicklung nach Ablauf der ersten Heizperiode gewonnen werden. Aufgrund von Trocknungsvorgängen, noch unvollständiger Einstellung der Haustechnikkomponenten und der Eingewöhnung der Nutzer fallen die Verbräuche in der ersten Heizperiode erfahrungsgemäß höher aus. Um diese qualitative Aussage messtechnisch belegen und quantifizieren zu können, wurden die komplette Messtechnik ein Jahr weiter betrieben und die Daten ausgewertet. Für die Verbräuche der ersten und zweiten Heizperiode wurden sowohl eine Klimabereinigung als auch eine Normierung bezüglich der mittleren Raumlufttemperatur durchgeführt, auf diese Weise können die Ergebnisse direkt miteinander verglichen werden.

3.7 Projektbeschreibung

Eine vollständige Projektbeschreibung ist in [Feist 2000] dokumentiert, als zusammenfassende Information werden hier nur die folgenden zwei Tabellen wiedergegeben.

Projektbeschreibung											
<ul style="list-style-type: none"> • Geschoßwohnungen: Zwei Baukörper mit insgesamt 40 Wohneinheiten, WNF: 2.915 m², BGF: 6204 m² Hauptfassaden Ost/West orientiert, Keilförmige Verbreiterung nach Süden • Beschreibung, Energiekonzept: Kompakte kostengünstige Bauweise, Versorgung TWW und Restheizung über Fernwärme, PV-Anlage auf dem Gründach (Baulos 1) • PHPP-Berechnung: Heizwärmebedarf: $q_H = 13,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{TFA})$ Heizwärmelast $P_H = 7,4 \text{ W/m}^2$ • Kosten (Baukosten inkl. 16 % MwSt.): ca. 1148 Euro/m² Wohnfläche nach 2. BV 	<p>Lageplan</p>										
Konstruktion											
<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktionsart: Massivbau (Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem (30 cm EPS)) Fensterlaibungen mit Mineralfaser gedämmt • Fenster und Verglasung: Dreifachverglasung, Füllgas Kr, $U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ PVC-Rahmen mit PU-Dämmung • U-Werte: <table border="0" data-bbox="236 1216 651 1373"> <tr> <td>Außenwand</td> <td>0,13 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td>Kellerdecke</td> <td>0,11 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td>Dach</td> <td>0,11 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td>Verglasung</td> <td>0,6 W/(m²K)</td> </tr> <tr> <td>Fenster ges.</td> <td>0,8 W/(m²K)</td> </tr> </table> 	Außenwand	0,13 W/(m ² K)	Kellerdecke	0,11 W/(m ² K)	Dach	0,11 W/(m ² K)	Verglasung	0,6 W/(m ² K)	Fenster ges.	0,8 W/(m ² K)	<p>Grundrisse: Projekt HHS/ASP (links), Schneider (rechts)</p>
Außenwand	0,13 W/(m ² K)										
Kellerdecke	0,11 W/(m ² K)										
Dach	0,11 W/(m ² K)										
Verglasung	0,6 W/(m ² K)										
Fenster ges.	0,8 W/(m ² K)										
Haustechnik											
<ul style="list-style-type: none"> • Heizung und Lüftung: Semizentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Wärmeübertrager auf dem Dach, Ventilatoren in den einzelnen Wohneinheiten); Restheizung über Nachheizregister und Badheizkörper; Wärmeversorgung über Fernwärme • Warmwasser: Zentrale Warmwasserbereitung über Fernwärme, 800 l Warmwasserspeicher im Technikraum, Warmwasserverteilung und Zirkulationsleitung in der Bodendämmung verlegt. <p>elektr. Geräte: Energiesparberatung für die Bewohner (energieeffiziente Haushaltsgeräte), Treppenhäusbeleuchtung mit Kompaktleuchtstofflampen</p>	<p>Schnitte: Projekt HHS/ASP (oben), Schneider (unten)</p>										



Ansicht von Süd-West



Grundriss von drei typischen Wohneinheiten



Zentraler Gegenstromwärmeübertrager
(Lüftungszentralen auf dem Dach, Entwurf Fa.
Innovatec, Projekt HHS/ASP)

Passivhaus-Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe

ADRESSE:

D-34131 Kassel, Hessen

GENERALUNTERNEHMER:

HOCHTIEF AG, Fuldabrück

BAUHERR:

Gemeinnützige Wohnungsbaugesellschaft der
Stadt Kassel (GWG), Kassel

ARCHITEKTUR:

Prof. Dr. Schneider, Detmold und Berlin
Hegger/Hegger/Schleif (HHS), Kassel
ASP Planungs- und Bauleitungs-GmbH, Kassel

FACHINGENIEURE:

Klute & Klute (Statik), Kassel
Fa. InnovaTec Energiesysteme GmbH
(Haustechnikplanung), Kassel

FERTIGSTELLUNG: April 2000

VERÖFFENTLICHUNGEN:

[Schneider 2000-a], [Schneider 2000-b],
[Pfluger 2001-a], [Pfluger 2001-b],
[Pfluger 2001-c]



3.8 Aufbau der Messtechnik

Die vollständige Beschreibung der im Rahmen des EU-Projektes CEPHEUS installierten Messtechnik ist in [Pfluger 2001-b] veröffentlicht. Im Rahmen dieses Berichtes wird nur eine kurze Zusammenfassung als Überblick gegeben. Die zusätzlich im Rahmen der IEA Task 28-Untersuchungen eingesetzte Messtechnik wird in den entsprechenden Abschnitten erläutert.

Aufgrund der relativ großen Entfernungen zwischen den einzelnen Messstellen im Geschosswohnungsbau wurde auf dezentrale Wandler und Bus-Technologie (M-Bus und RS-485) zur Datenübertragung zurückgegriffen. Der für die Steuerung der Haustechnik (Lüftung, Heizung) ohnehin installierte RS-485-Bus wurde zur Übertragung der Lufttemperaturen (Lüftungsanlage und Raumlufttemperaturen) genutzt. Alle übrigen Messgrößen (Wetterdaten, Wärme- und Volumenströme, E-Zähler) wurden über M-Bus und Pegelwandler (RS232) auf den Messrechner übertragen.

Folgende Messgrößen wurden in Viertelstunden-Intervallen aufgezeichnet:

- Meteorologische Daten (Außenlufttemperatur und –feuchte, Globalstrahlung horizontal, Windgeschwindigkeit und Richtung im Zeitraum der Tracergasmessung)
- Einzelverbrauchsmessung von allen 23 Wohneinheiten (Heizwärme, Haushaltsstromverbrauch, Warmwasser, Kaltwasser)
- Temperaturen und Lüfterstufen von allen 23 Wohneinheiten (Raumlufttemperatur jeweils im Wohnzimmer und Flur, Zu- und Abluftstufe der Ventilatoren)
- Temperaturen und Volumenströme der Lüftungszentrale (Zu-, Ab-, Außen- und Fortlufttemperatur, Zu- und Abluftvolumenstrom)
- Allgemeinstromverbrauch und Stromverbrauch des Heizregisters
- Wärmemenge Heizung, Warmwasser und Zirkulation (gesamt)
- Relative Luftfeuchte in den 8 Südwohnungen mit Hilfe von Dataloggern

3.9 Ergebnisse der Messungen in der Heizperiode 2001/2002

3.9.1 Heizwärmeverbrauch

Die Auswertung der Heizwärmeverbräuche in der zweiten Heizperiode vom 1.10.01 bis zum 30.4.02 ergab einen Mittelwert von 17,4 kWh/m². Die Werte der einzelnen Wohneinheiten streuten von 0,04 bis 41,3 kWh/m².

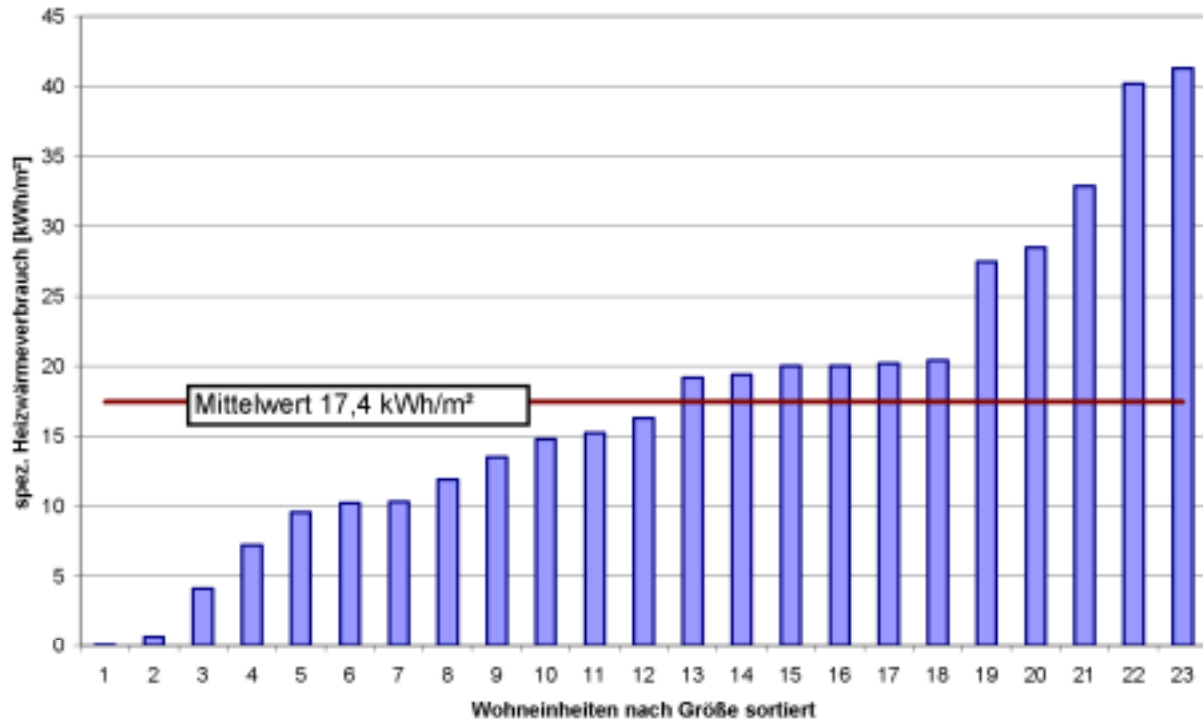


Abbildung 61: Spezifische Heizwärmeverbräuche in der zweiten Heizperiode von 1.10.01 bis 30.4.02

3.9.2 Thermische Behaglichkeit

Der Verlauf der gemessenen Raumlufttemperaturen der bewohnten Wohneinheiten zusammen mit dem flächengewichteten Mittelwert für das Gesamtgebäude sowie der Außenlufttemperatur sind in Abbildung 62 als Tagesmittelwerte dargestellt. Auf die thermische Behaglichkeit in den Sommermonaten wurde bereits in [Pfluger 2001-c] näher eingegangen, an dieser Stelle werden daher nur die Temperaturprofile in der zweiten Heizperiode diskutiert.

Die Abhängigkeit der mittleren Raumlufttemperatur von der Außenlufttemperatur (siehe Regressionsgerade in Abbildung 63) lag bei nur 0,01 K Temperaturanstieg pro Kelvin Temperaturerhöhung der Außenlufttemperatur.

In Abbildung 62 sind die Mittelwerte sowie die minimalen bzw. maximalen Tagesmittelwerte der Raumlufttemperaturen während der Heizperiode nach Größe sortiert dargestellt. Die Mittelwerte streuen von 19,2 °C (zeitweise unbewohnte Wohneinheit) bis 23,0 °C. Die geringste Mitteltemperatur der dauerhaft bewohnten Wohneinheiten betrug 19,7 °C.

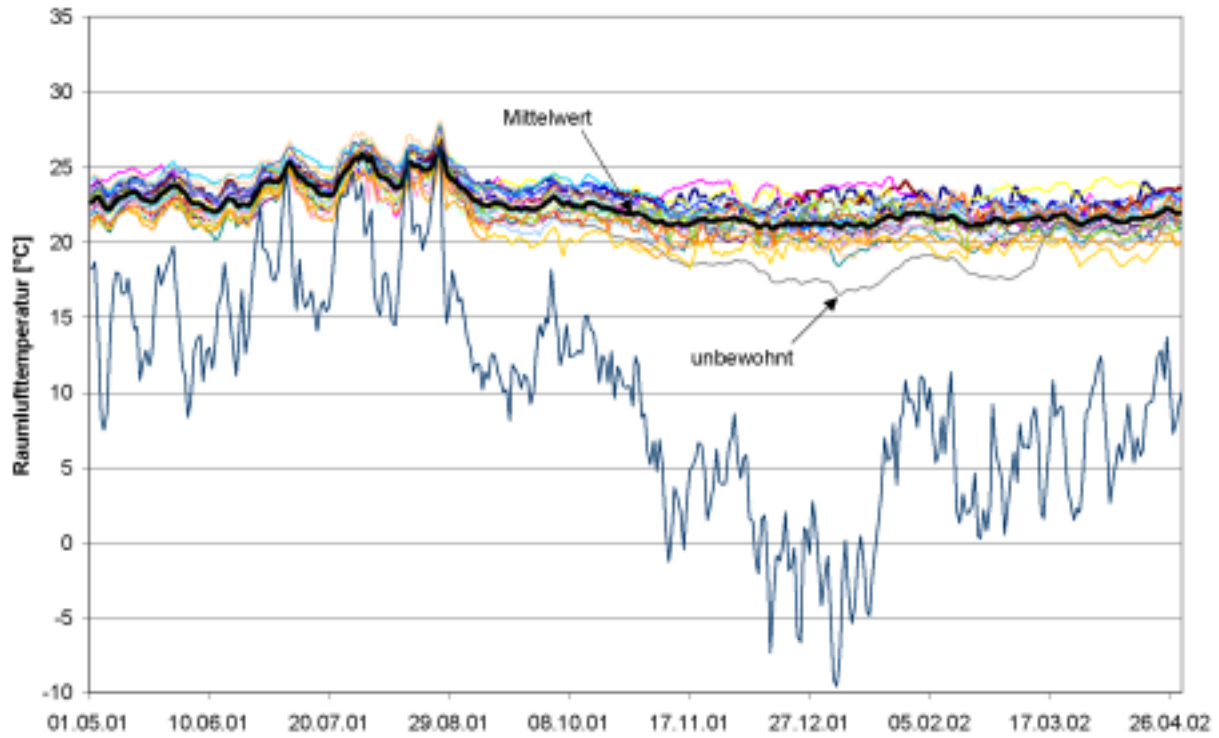


Abbildung 62: Tagesmittelwerte der Raumlufttemperaturen

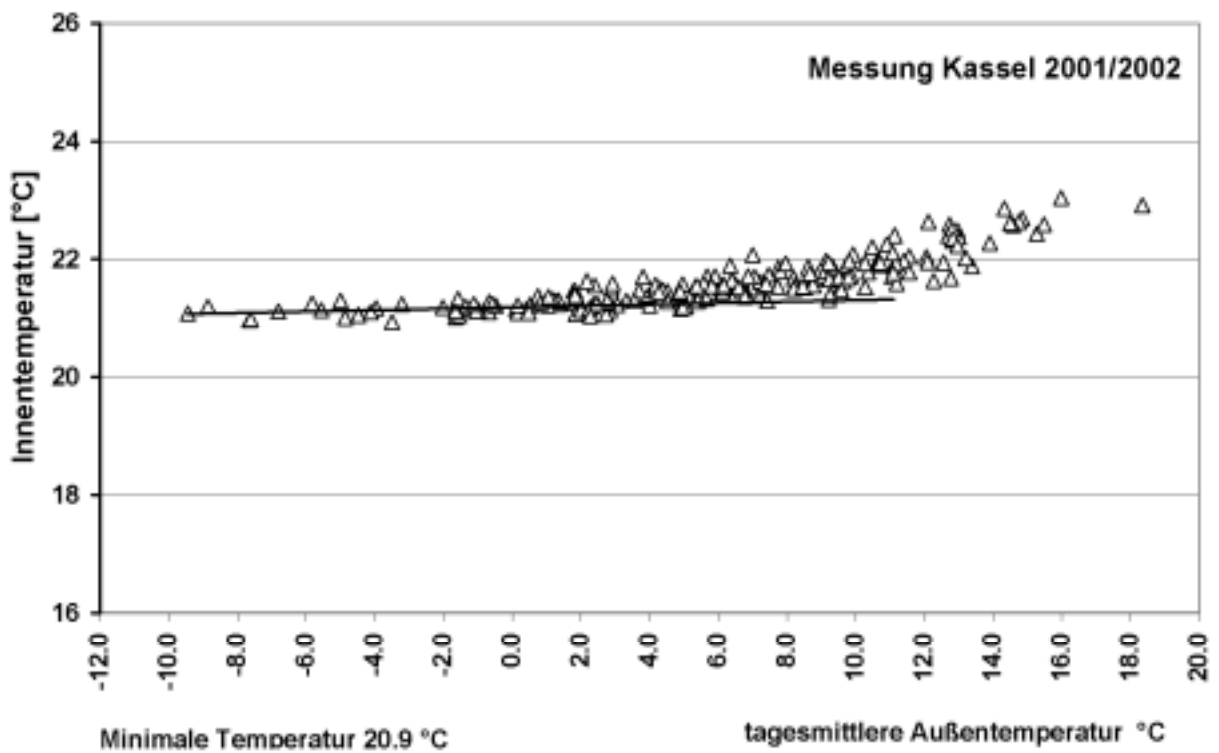


Abbildung 63: Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumlufttemperatur (Tagesmittelwerte) in der Heizperiode 2001/2002

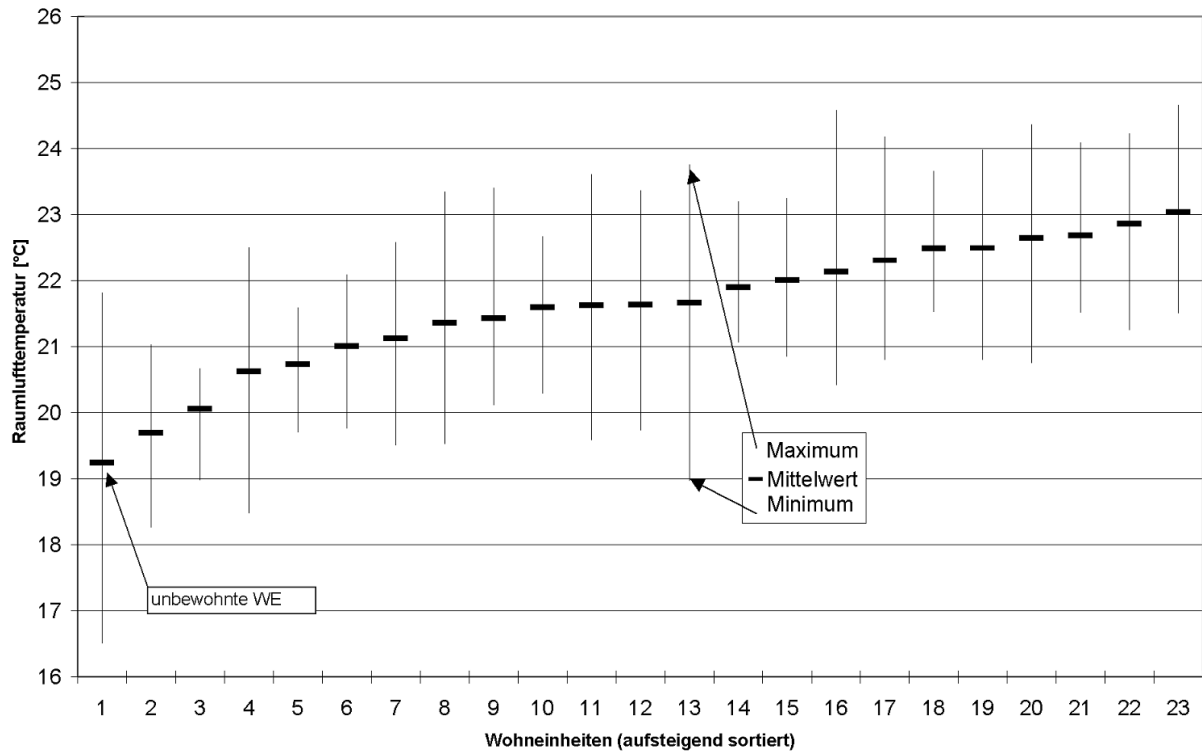


Abbildung 64: Minimum, Maximum und Mittelwert der Raumlufttemperaturen der einzelnen Wohneinheiten (aufsteigend sortiert) während der Heizperiode

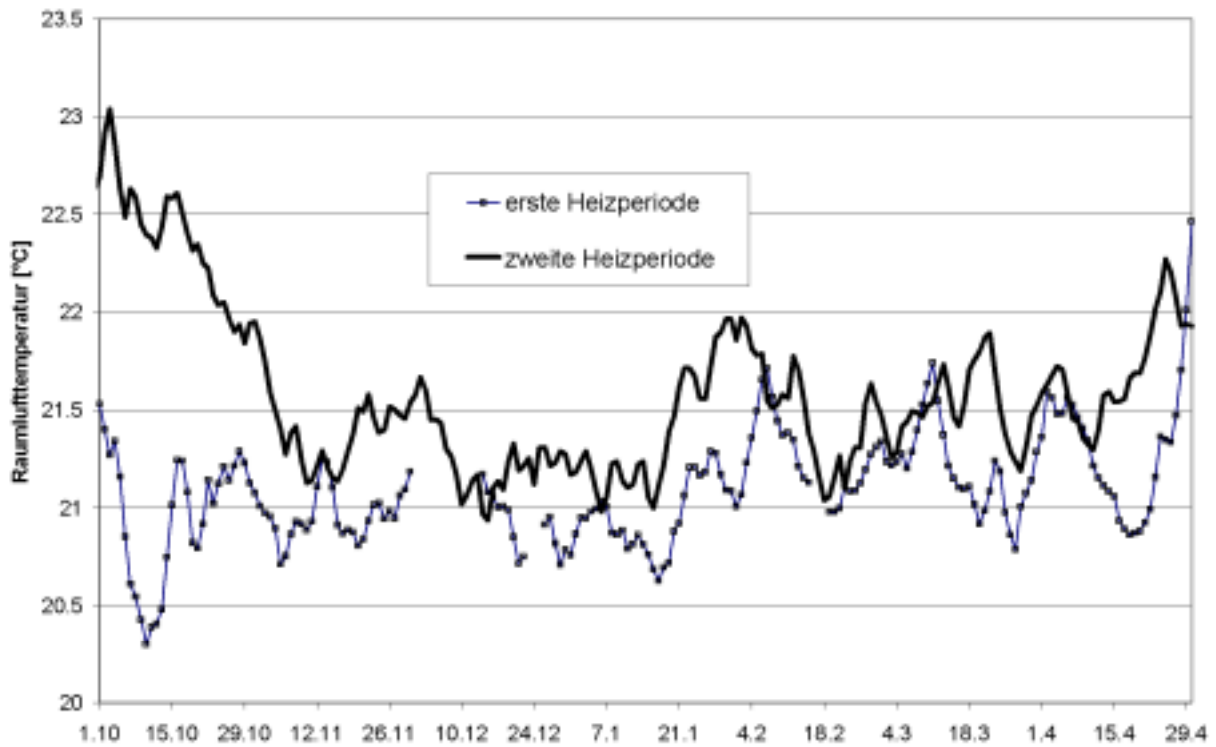


Abbildung 65: Verlauf der mittleren Raumlufttemperatur in der ersten und zweiten Heizperiode

Der Mittelwert lag im Zeitraum 1.10.01-30.4.02 mit 21,6 °C ein halbes Kelvin über der im Zeitraum 1.10.00-30.4.01 mit 21,1 °C. Wie am Vergleich der Zeitverläufe der mittleren Raumlufftemperatur in der ersten und zweiten Heizperiode zu erkennen ist, unterscheiden sich diese hauptsächlich im Oktober. In diesem Monat wirkt sich der klimatische Einfluss des Vormonates noch stark auf die Raumlufftemperatur aus. Wählt man daher für einen Vergleich nur jeweils den Zeitraum vom 1.11. bis 30.4. aus so unterscheiden sich die Mitteltemperaturen nur noch um 0,35 K. Die Verbleibende Differenz kann verschiedene Ursachen haben, mögliche Annahmen sind:

1. Vom Nutzer gewählte erhöhte Solltemperatur
2. Reduzierte Fensterlüftung in der zweiten Heizperiode
3. Zahl der unbewohnten Wohneinheiten hat in der zweiten Heizperiode abgenommen
4. Nachttemperaturabsenkung wurde in der zweiten Heizperiode zurückgenommen
5. Austrocknungsvorgänge in der ersten Heizperiode
6. Zeitweise Temperaturanhebung über die Solltemperatur hinaus durch solare nicht nutzbare Gewinne
7. Änderung der Reglerparameter des Heizungsthermostaten

Die möglichen Ursachen im Detail zu separieren ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, dennoch können die einzelnen Einflüsse abgeschätzt und aufgrund von Messdaten belegt bzw. widerlegt werden.

Wie alle übrigen Daten des Haustechnik-Busses wurde auch die vom Nutzer am Regler eingestellte Solltemperatur mit einer Zeitschrittweite von 10 Minuten aufgezeichnet. Der daraus berechnete Mittelwert betrug in der ersten Heizperiode 21,1 °C und in der zweiten Heizperiode 20,2 °C. Demnach ist die **Annahme 1**, die vom Nutzer gewählte Solltemperatur hätte sich in der zweiten Heizperiode erhöht, nicht zutreffend. Der arithmetische Mittelwert ist im Gegenteil sogar um 0,9 K gesunken. Diese Tatsache hat aber noch nicht unmittelbar eine geringere Raumluffmitteltemperatur zur Folge. Von Bedeutung ist hier die zeitliche Verteilung der Absolutwerte der Reglerstellung. Der Nutzer hat die Möglichkeit die Solltemperatur in den Grenzen zwischen 15 und 26 °C zu wählen. In Abbildung 66 ist die Verteilung der Summenhäufigkeit der Raumlufftsolltemperatur sowohl für die erste als auch die zweite Heizperiode aufgetragen. In beiden Heizperioden wurde die tatsächliche Raumluffmitteltemperatur mit einer relativ hohen Summenhäufigkeit (über 20 %) vom Nutzer gewählt. Der einzige signifikante Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Heizperiode besteht darin, dass in der zweiten Heizperiode die minimale Reglerstellung mit 21,8 % wesentlich häufiger gewählt wurde als in der ersten Heizperiode (8,0%). Aus den Ergebnissen lässt sich daher schließen, dass die Anhebung der mittleren Raumlufftemperatur zwischen der ersten und der zweiten Heizperiode nicht aus einer Sollwertanhebung resultiert.

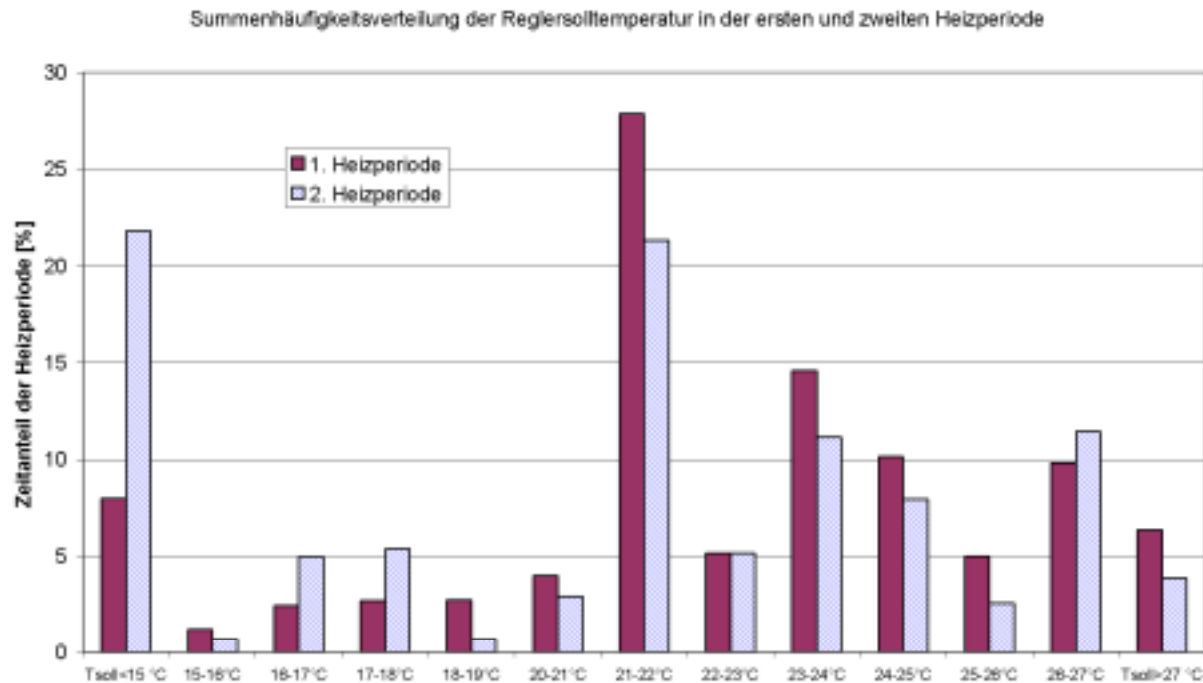


Abbildung 66: Verteilung der Summenhäufigkeit der vom Nutzer eingestellten Raumluft-Solltemperatur in der ersten und zweiten Heizperiode

Die **Annahme 2**, also die Reduzierung der Fensterlüftung, kann nicht quantitativ überprüft werden, weil in dem Gebäude keine dauerhaft installierten Fensterkontakte vorhanden sind. Aus den Erfahrungen anderer Projekte hat sich gezeigt, dass diese Annahme häufig zutrifft, weil die Bewohner nach der ersten Heizperiode „erfahren“ haben, dass auch ohne zusätzliche Fensterlüftung stets ausreichend Frischluft durch die kontrollierte Lüftung gefördert wird.

Die **Annahme 3** kann aus den Bezugsdaten der Wohneinheiten belegt werden. Das Gebäude wurde in der ersten Heizperiode erst nach und nach (in den Monaten Juli bis Dezember) bis auf eine Wohneinheit vollständig bezogen. Die letzte Wohneinheit wurde erst im März bezogen. Da die unbewohnten Wohneinheiten zwar belüftet aber nicht beheizt wurden, resultiert daraus ein geringerer Mittelwert der Raumlufttemperatur. Allerdings ging auch die Solltemperatureinstellung der unbewohnten Wohneinheiten in die Berechnungen zu Annahme 1 ein.

Die Auswirkung der Nachtabsenkung (**Annahme 4**) auf die mittlere Raumtemperatur ist aufgrund der hohen Zeitkonstante des Gebäudes sehr begrenzt. Nach Angabe des Haustechnikers wurde die Nachtabsenkung in der zweiten Heizperiode zurückgenommen.

Die Auswirkungen der Trocknungsvorgänge (**Annahme 5**) ist im Hinblick auf die mittlere Raumlufttemperatur nicht feststellbar, weil die Leistungsreserven der Heizung auch in der ersten Heizperiode ausreichen, das gewünschte Raumluft-

temperaturniveau zu erreichen. Die Auswirkung ist demnach nur im Heizwärmeverbrauch festzustellen (siehe hierzu Abschnitt 3.11.1).

Die **Annahme 6** ist schwer zu quantifizieren, weil hier die zeitliche Verteilung und der jeweilige Nutzungsgrad der solaren Gewinne von Bedeutung sind.

3.9.3 Heizlasten

Die Heizgerade in Abbildung 67 weist für das Gebäude eine Heizgrenztemperatur von 16 °C und eine spezifische maximale Heizlast von ca. 8 W/m² aus. Die eingetragenen Messwerte zeigen, dass die tatsächlichen Heizlasten unter 10 W/m² liegen (Maximum 8,7 W/m²). Im Vergleich zu den Daten im Vorjahr fällt auf, dass im Außenlufttemperaturbereich zwischen 5 °C und 12 °C deutlich mehr Punkte oberhalb der Heizgeraden auftraten. Andererseits weist die zweite Heizperiode im Bereich zwischen 0 °C und 5 °C 14 Tage mit einer spezifischen Heizlast unter 2 W/m² auf. Diese relativ hohe Streubreite ist vermutlich auf regelungstechnische Zusammenhänge zurückzuführen.

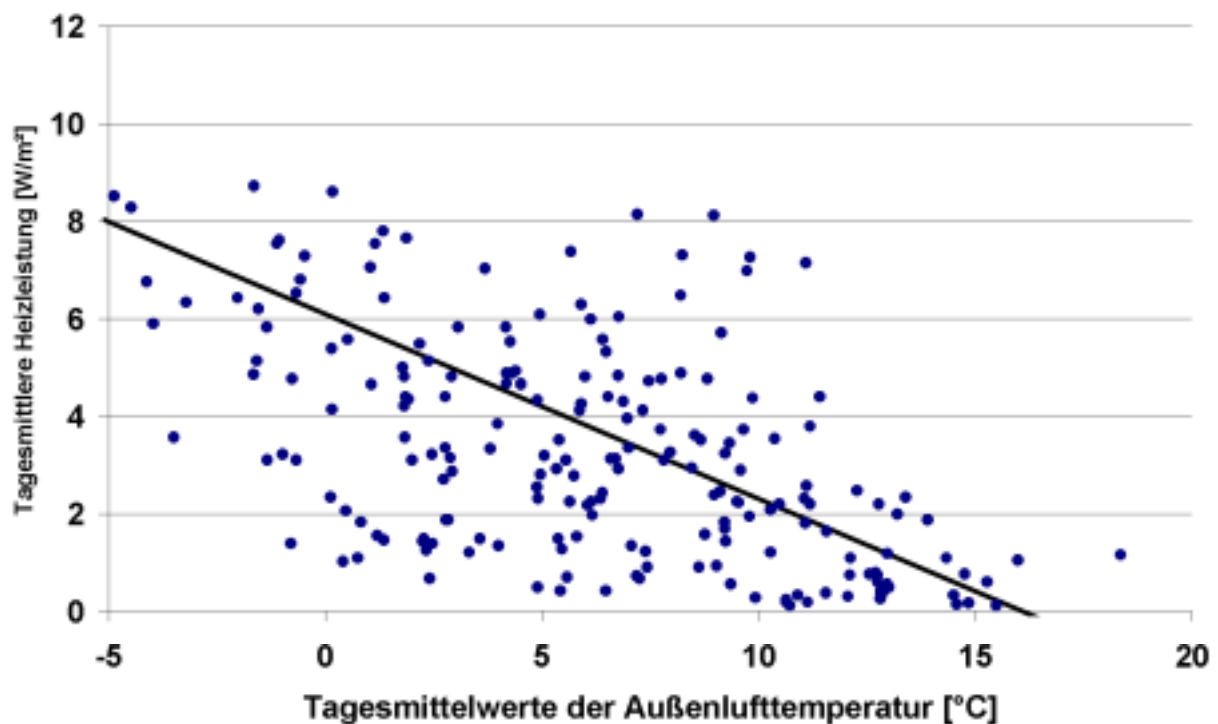


Abbildung 67: Heizgerade (Abhängigkeit der tagesmittleren Heizleistung von der Außenlufttemperatur)

3.10 Stromverbrauch

3.10.1 Haushaltsstrom

Der Haushaltsstromverbrauch inklusive Ventilatorstromverbrauch jeder Wohneinheit wurde über den Impulsausgang der Stromzähler mit Hilfe von M-Bus-Zählern erfaßt. Abbildung 69 zeigt die Verteilung über die einzelnen Wohneinheiten, der Mittelwert über alle dauerhaft bewohnten Wohneinheiten betrug 18 kWh/m² im Zeitraum vom 1.10.01 bis zum 30.4.02. Die in Abbildung 69 dargestellte zeitliche Verteilung des Gesamtverbrauchs zeigt, dass auch im frostreichen Januar kein erhöhter Stromverbrauch auftrat, also keine elektrische Zusatzheizung in Betrieb genommen wurde. Der Monatsmittelwert über die Heizperiode lag bei 5,1 MWh. Wie bereits in der ersten Heizperiode wurde erneut die hohe Bedeutung der Haushaltsstromverbräuche am Gesamt-Primärenergiebedarf deutlich. Auf diesem Gebiet können mit Hilfe hocheffizienter Geräte noch relativ hohe Einsparpotentiale erschlossen werden.

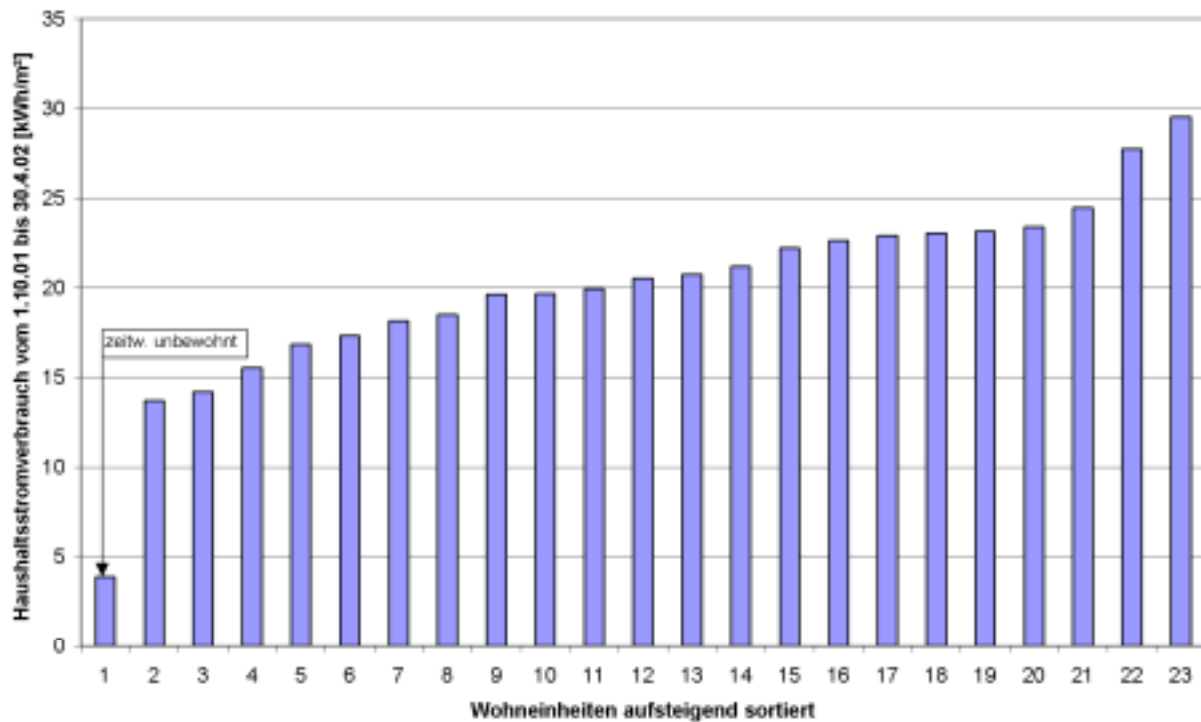


Abbildung 68: Spezifischer Haushaltsstromverbrauch der 23 Wohneinheiten nach Größe sortiert (Energiebezugsfläche 1801,6 m²)

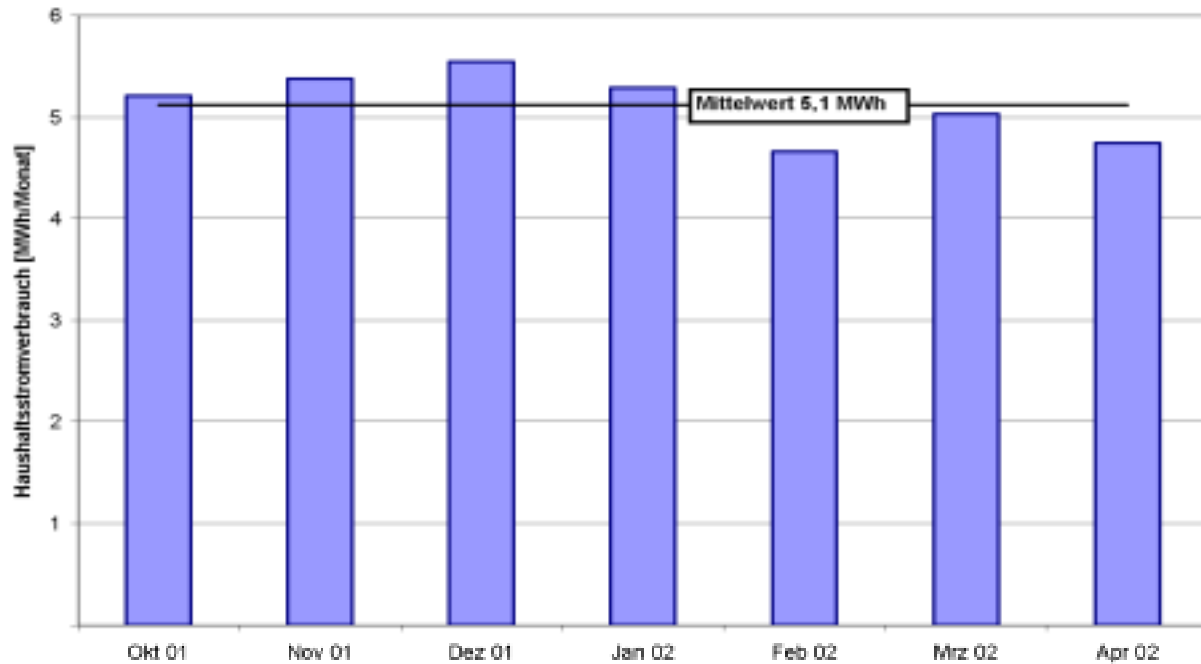


Abbildung 69: Monatlicher Haushaltsstromverbrauch aller 23 Wohneinheiten

3.10.2 Frostschutzheizregister

In der ersten Heizperiode konnte die Frostschutzheizung der Lüftungszentralen nur gemeinsam mit dem Allgemiestrom über einen gemeinsamen Zähler erfasst werden. Damals wurde jedoch bereits festgestellt, dass die Frostschutzgrenztemperatur der Regler zu hoch eingestellt war. Darüber hinaus ist die festeingestellte untere Grenze mit $+5\text{ °C}$ ebenfalls zu hoch. Eine Umprogrammierung der Regler macht jedoch den Tausch der EPROMs in allen vier Steuerungen der Heizzentralen erforderlich. Dies ist jedoch bis heute noch nicht erfolgt, die Messdaten der zweiten Heizperiode weisen daher immer noch unnötig hohe Stromverbräuche für die Frostschutzheizung aus. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde in der Dachlüftungszentrale Süd ein M-Bus-Einzelzähler eingebaut, der die viertelstündliche Aufzeichnung sowohl der Momentanleistung als auch des Stromverbrauchs ermöglicht. In Abbildung 70 sind sowohl die Verläufe der Fort- und Außenlufttemperatur als auch die Heizleistung in der Kälteperiode Ende Dezember 01 bis Mitte Januar exemplarisch aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Frostschutzheizung die Fortlufttemperatur auf etwa $+5\text{ °C}$ begrenzt. Diese unnötig hohe Reserve zur Vermeidung des Einfrierens des Wärmeübertragers resultiert in einem immer noch unangemessen hohen Stromverbrauch für den Frostschutz von 758 kWh allein in der Dachlüftungszentrale Süd (zweite Heizperiode). Gegenüber der ersten Heizperiode hat sich jedoch eine Verringerung um 58 % (bez. 1. HP) auf 2320 kWh für das gesamte Gebäude ergeben. Umgerechnet auf die Energiebezugsfläche entspricht das einem Hilfsstromverbrauch für den Frostschutz von $1,3\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in der zweiten Heizperiode. Diese vergleichende Auswertung mit der ersten Heizperiode wurde auf der Basis der Daten des Allgemiestrom-Zählers (abzüglich Pumpenstrom, Beleuchtung etc.) durchgeführt und bezieht sich jeweils auf die Verbrauchssumme

aller vier Heizregister der Lüftungszentralen. Die Korrelation zwischen Außenlufttemperatur und dem täglichen Stromverbrauch für alle vier Frostschutzheizregister in Abbildung 72 zeigt, dass diese Verbrauchsreduzierung allein aufgrund der geänderten Frostschutzgrenztemperatur resultiert (unterschiedliche Steigung der Regressionsgeraden) Die Einsparung konnte trotz strenger Frostperiode im Januar der zweiten Heizperiode erreicht werden.

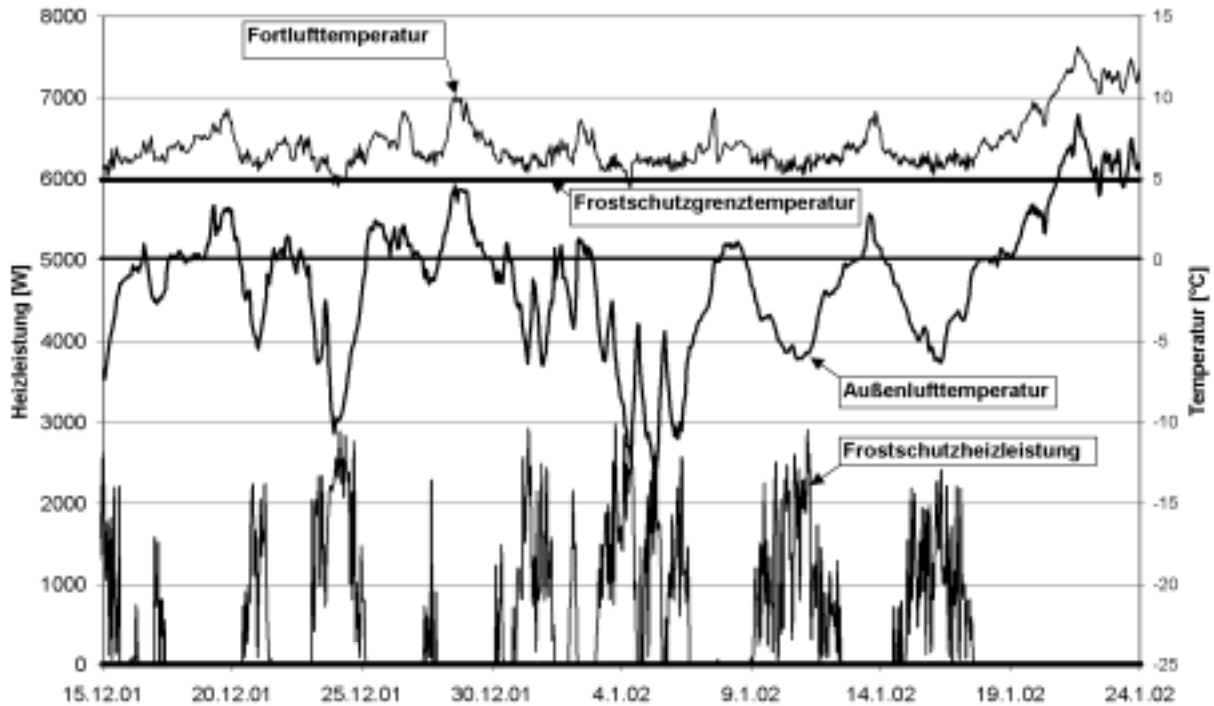


Abbildung 70: Zeitverlauf der Frostschutz-Heizleistung, Außentemperatur und Fortlufttemperatur

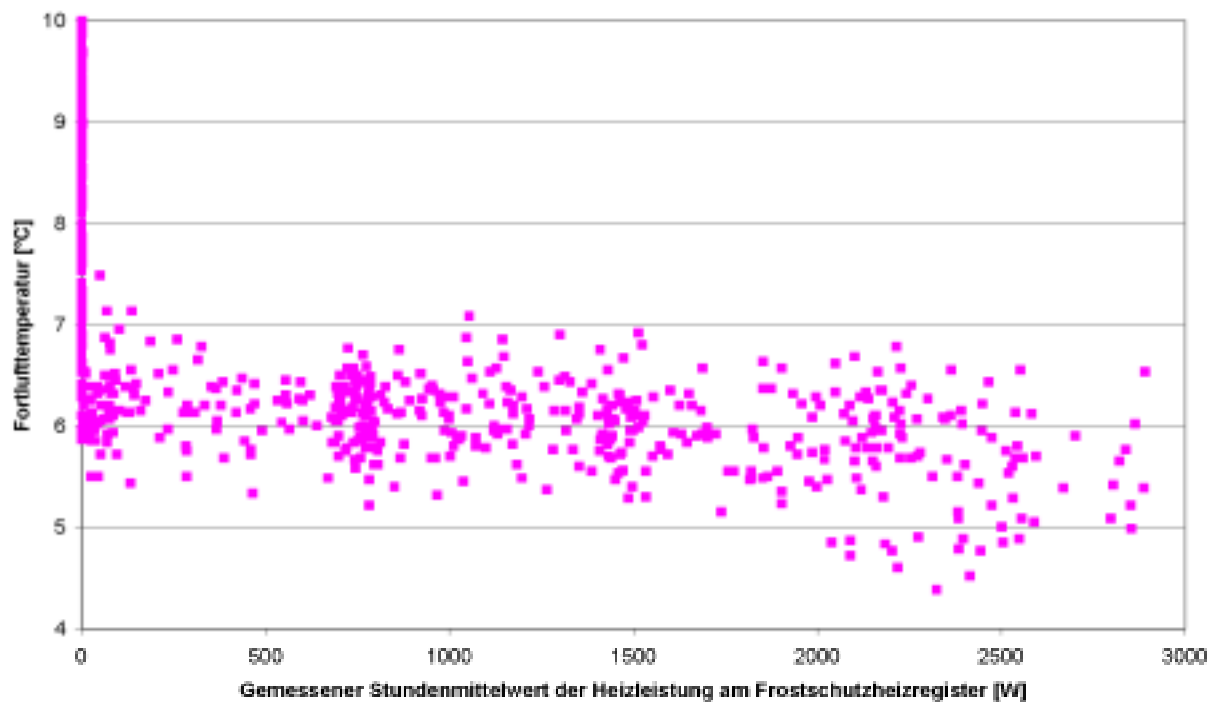


Abbildung 71: Korrelation zwischen Fortlufttemperatur und Stundenmittelwerten der Heizleistung am Frostschutzheizregister

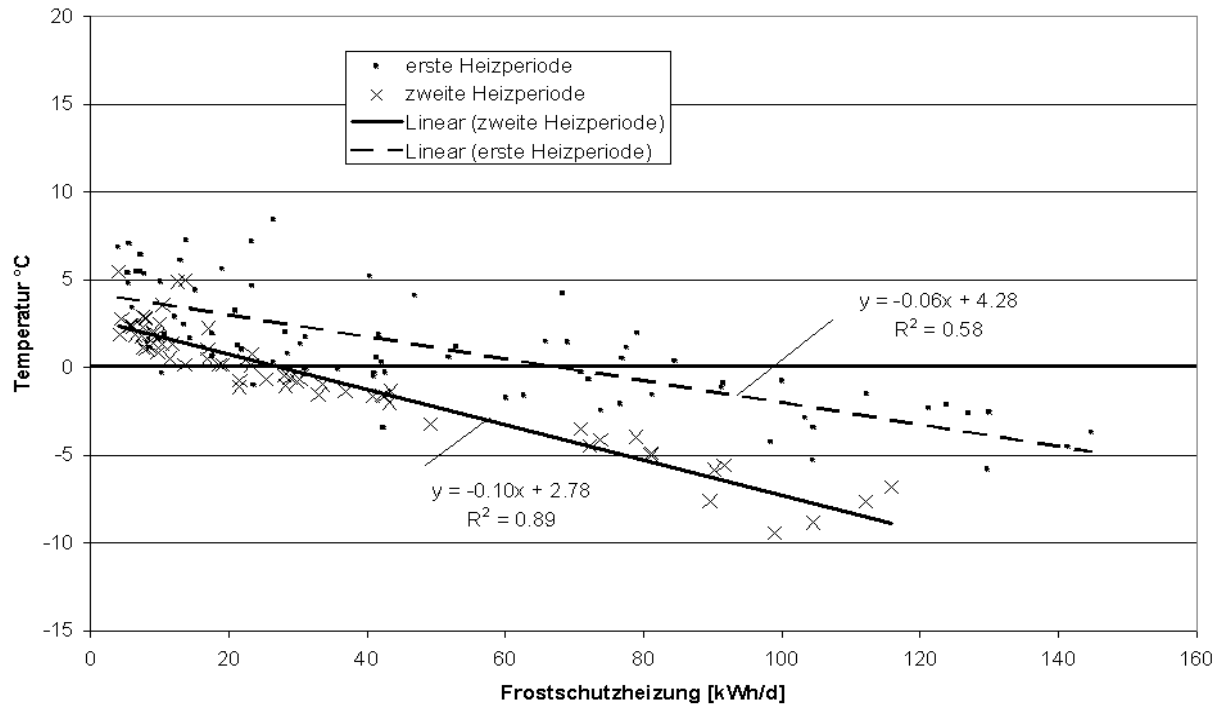


Abbildung 72: Korrelation zwischen Außenlufttemperatur und dem täglichen Stromverbrauch für alle vier Frostschutzheizregister

3.11 Vergleich mit den Messungen in der Heizperiode 2000/2001

3.11.1 Klimabereinigung und Normierung auf 20 °C Raumlufttemperatur

Mit Hilfe der Messdaten der zweiten Heizperiode ist es möglich, Anlaufeffekte, wie z.B. die Trocknung des Gebäudes (Baufeuchte) in der ersten Heizperiode zu quantifizieren. Hierzu wurde der Jahresheizwärmeverbrauch jeweils unter Standard-Randbedingungen bestimmt. Neben der Klimabereinigung wurde auch auf 20 °C Raumlufttemperatur umgerechnet.

Hierzu wurden die Standard-Klimadaten aus ESRA (European Solar Radiation Atlas), also die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur und der Solarstrahlung auf unterschiedlich orientierte Flächen herangezogen. Die Bodentemperatur wurde mit Hilfe der ESRA-Daten der Außenlufttemperatur berechnet (Annahme: Tiefe 2m, Temperaturverlauf sinusförmig, Phasenverschiebung 0,88, Amplitudenfaktor 0,414).

Da sich auch die gemessene Mitteltemperatur der Raumluft in den Heizperioden 2000/2001 bzw. 2001/2002 unterscheidet, wurden die Verbräuche auf 20 °C standardisiert.

Zum Vergleich der klimatischen Randbedingungen in der ersten und zweiten Heizperiode wurden die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur und der Solarstrahlung in Abbildung 73 und Abbildung 74 dargestellt. Die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur in den Monaten November, Dezember und Januar lagen in der zweiten Heizperiode deutlich unter den Vorjahreswerten. Im Dezember lag die Mitteltemperatur

mit 0,6 °C um 1,3 K unter den Referenzwerten (Meteonorm). Demgegenüber war die Mitteltemperatur im Februar der zweiten Heizperiode mit 5,7 °C verglichen mit dem langjährigen Mittel deutlich erhöht.

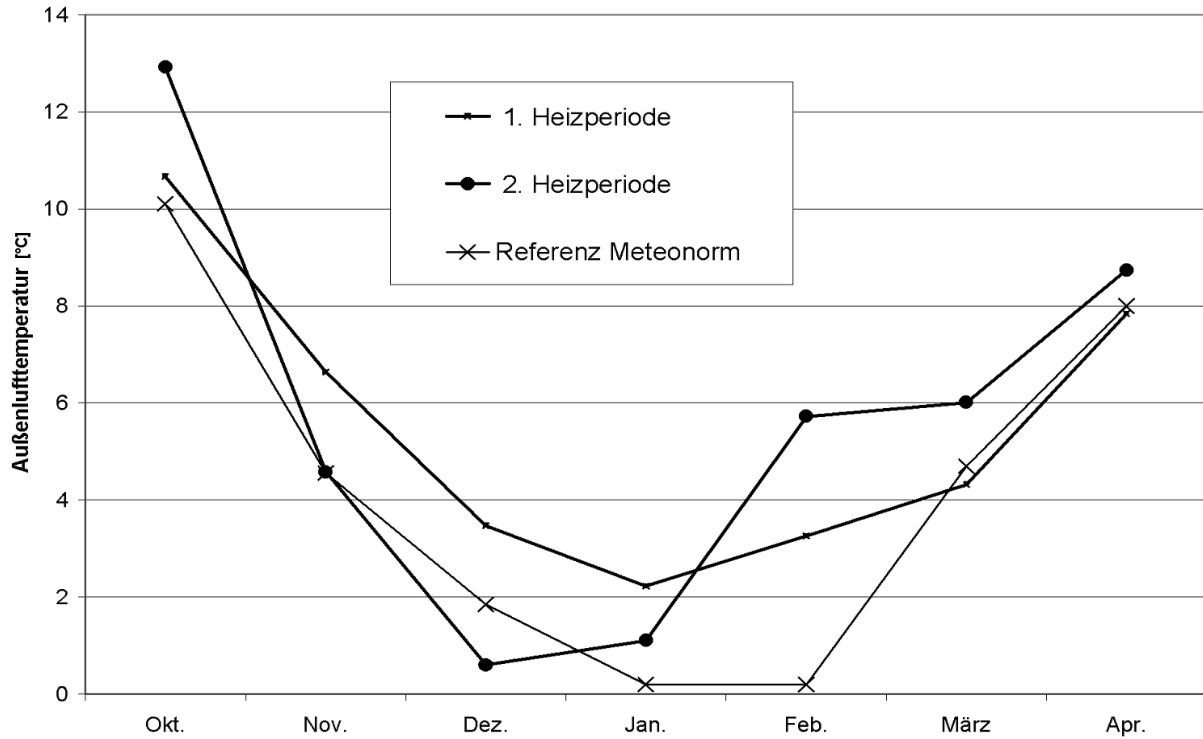


Abbildung 73: Vergleich der monatsmittleren Außenlufttemperaturen der ersten und zweiten Heizperiode

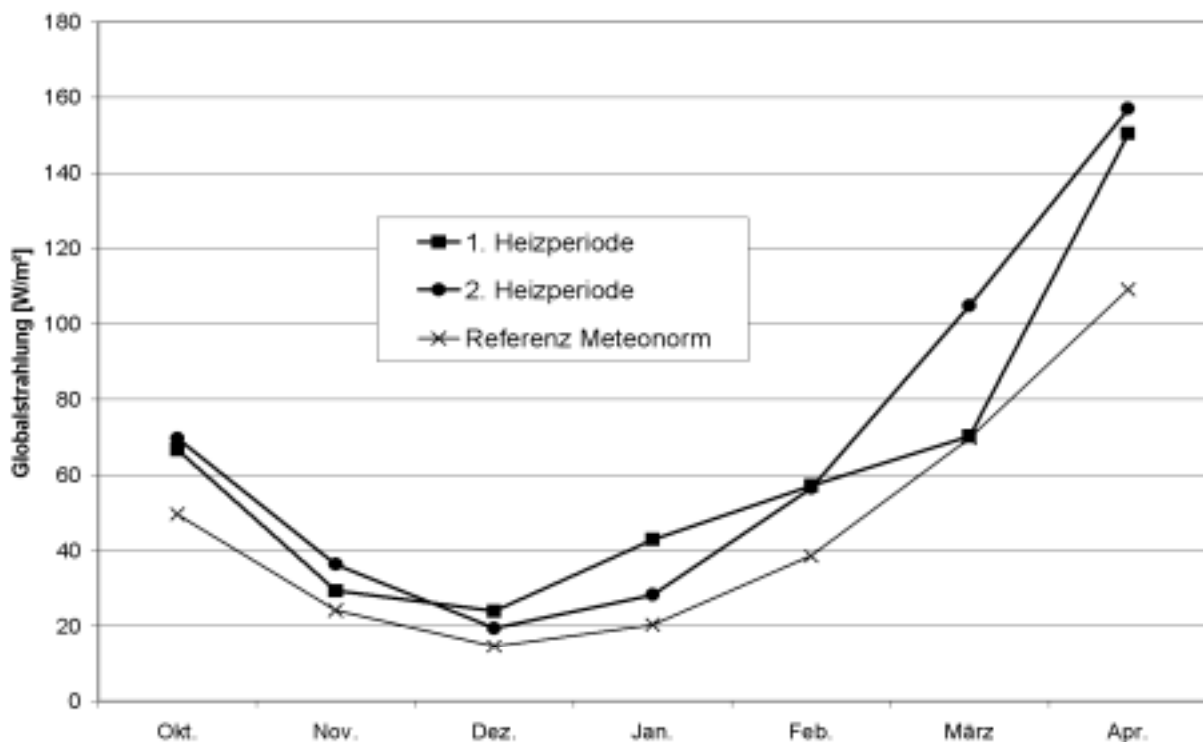


Abbildung 74: Vergleich der monatsmittleren horizontalen Globalstrahlung der ersten und zweiten Heizperiode

Um einen Vergleich der Heizwärmeverbräuche in der ersten und zweiten Heizperiode zu ermöglichen wurden diese jeweils mit dem Wetterdatensatz aus METEONORM normiert und auf eine mittlere Raumlufthtemperatur von 20 °C umgerechnet.

Der gemessene Heizwärmeverbrauch in den Monaten Oktober bis April betrug in der ersten Heizperiode 18,5 kWh/m² und in der zweiten Heizperiode 17,5 kWh/m². Klimabereinigt und auf 20 °C Raumlufthtemperatur umgerechnet, ergeben sich 19,5 bzw. 17,2 kWh/m²a für die erste bzw. zweite Heizperiode. Bezogen auf Standard-Randbedingungen hat der Verbrauch demnach um 2,3 kWh/m² bzw. 14 % (bezogen auf die zweite Heizperiode) abgenommen. Die Ursache hierfür kann sowohl in der Austrocknung des Gebäudes in der ersten Heizperiode als auch in geringerer Fensterlüftung in der zweiten Heizperiode liegen (siehe Abschnitt 3.9.2). Die höhere Raumlufthtemperatur in der zweiten Heizperiode trotz geringerer Solltemperatur spricht dafür, dass auch letztere Ursache einen gewissen Anteil hat. Eine Raumlufthtemperaturerhöhung durch solare Gewinne führt bei geringem Fensterlüftungsanteil zu einer Raumlufthtemperatur über der Solltemperatur.

3.11.2 Zusammenfassung der Messergebnisse

Die Messungen in der zweiten Heizperiode haben wie erwartet eine Reduktion des Heizwärmeverbrauchs gegenüber der ersten Heizperiode ausgewiesen. In [Pfluger 2001-b] wurde bereits auf den Mehrverbrauch für die Trocknung des Gebäudes in der ersten Heizperiode hingewiesen. Mit Hilfe einer Feuchtebilanz (Außen-/Abluftfeuchte) wurde dort die zusätzliche Heizwärme zur Deckung der Verdampfungsenthalpie auf 8,2 kWh/(m²a) geschätzt. Allerdings basierte die Schätzung auf einer pauschalen Annahme für den nutzerbedingten Feuchteeintrag und vernachlässigte den Einfluß der freien Lüftung. Die messtechnisch ermittelte Reduktion von der ersten zur zweiten Heizperiode um 2,3 kWh/(m²a) (klima- und temperaturbereinigt) fiel gegenüber dieser Abschätzung relativ gering aus. Hier kann es aber auch zu einer Überlagerung mehrerer Effekte gekommen sein, wobei Mehrverbräuche, verursacht z.B. durch zwei defekte Bypassklappen in den Dachlüftungszentralen die Verbrauchsminderung teilweise kompensiert haben können.

Der durchschnittliche Haushaltsstromverbrauch pro Wohneinheit entspricht mit 222 kWh pro Monat dem des Vorjahres, allerdings konnte durch eine Reduktion der Frostschutzgrenztemperatur der Hilfsstromverbrauch für die Frostschutzheizung um 58 % (bez. 1. HP) auf 2320 kWh (1,3 kWh/m²a) gesenkt werden. Durch Austausch der EPROMs der Regelung könnte noch eine weitere Reduktion in der nächsten Heizperiode erreicht werden.

Die Messungen der relativen Feuchte der Raumlufthtemperatur in Verbindung mit der Untersuchung der Raumlufthqualität mit Hilfe der CO₂-Messung haben gezeigt, dass die Luftwechselrate von durchschnittlich 0,6 1/h trotz relativ hoher Belegungsdichte

im sozialen Wohnungsbau eher zu hoch ist. Die relative Raumlufffeuchte unterschritt gerade im Kernwinter häufig die 30 %-Grenze. Aus den CO₂-Messungen geht hervor, dass die Luftwechselrate im Hinblick auf die Raumluffqualität problemlos reduziert werden kann. Wie sich an den Messungen in Hannover Kronsberg gezeigt hat, können bei Standardbelegung im Reihenhaus die Luftwechselraten sogar unter 0,4 1/h gesenkt werden, ohne raumluffhygienische Einbußen in Kauf nehmen zu müssen.

4 Literatur

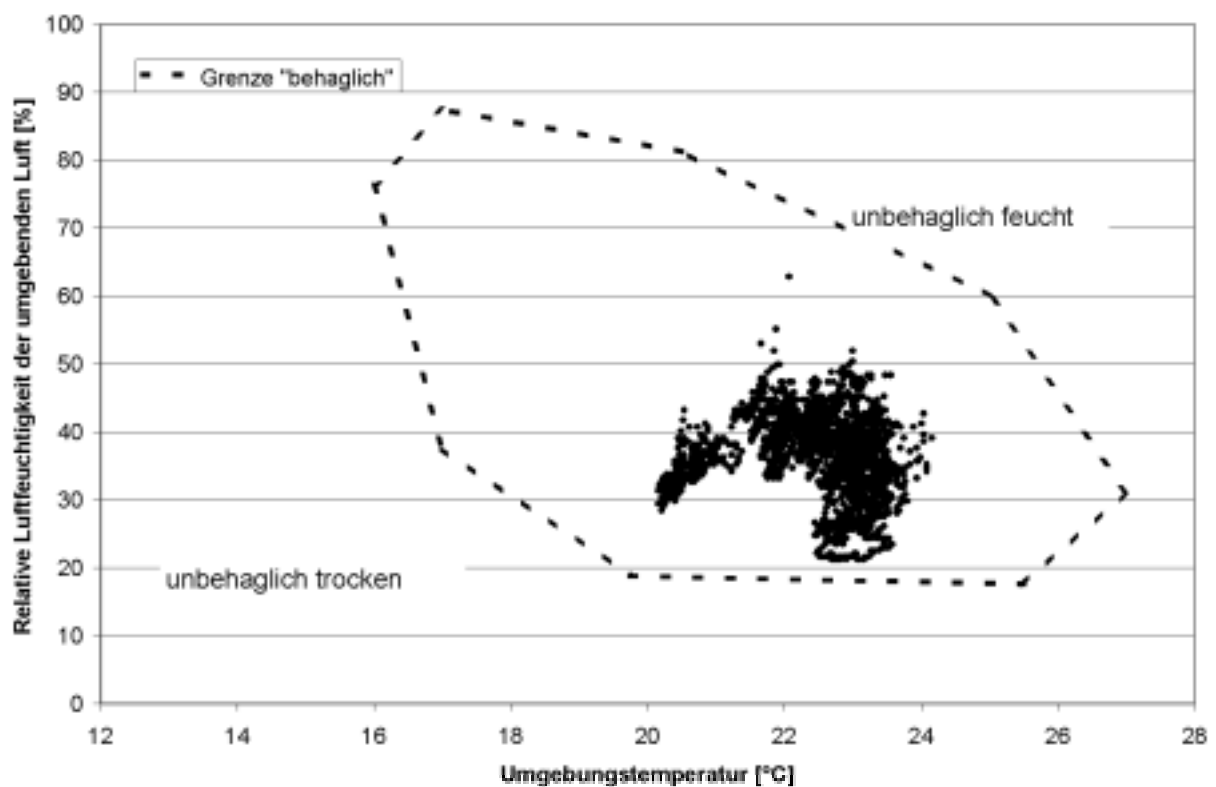
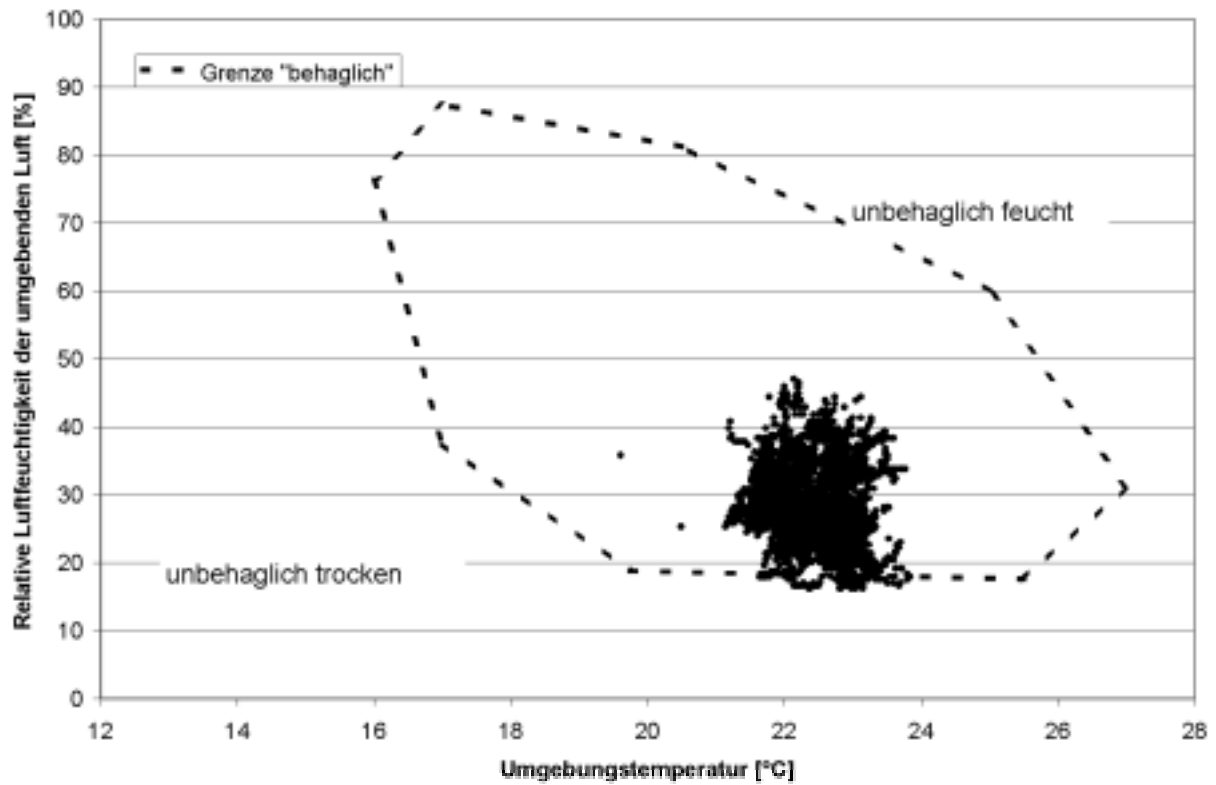
- [AkkP 22] Lüftungsstrategien für den Sommer; Protokollband Nr. 22 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Damstadt 2003.
- [DIN EN ISO 12569] DIN EN ISO 12569, Bestimmung des Luftwechsels in Gebäuden – Indikatorgasverfahren, Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [Ebel 2002] Ebel, W., Großklos, M., Loga, T., Bewohnerverhalten in Passivhäusern, 6. Passivhaus Tagung 2002, Basel.
- [Ebel 2003-a] Ebel, W., Kah, O., Tracergasmessungen: Auswirkungen von Fensteröffnung bei kontrollierter Lüftung, 7. Passivhaus Tagung 2003, Hamburg.
- [Ebel 2003-b] Ebel, W., Großklos, M., Knissel, J., Loga, T., Müller, K., Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern, Institut Wohnen und Umwelt, Damstadt 2003.
- [Feist 2000] Feist, W., Ebel, W., Löbau, B., Sairi, V., Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Phase II, Endbericht, Passivhaus Institut Damstadt, November 2000.
- [Feist 2001-a] Feist, W., Wissenschaftliche Auswertung von Messungen in Passivhäusern/Niedrigenergiehäusern der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ in Wiesbaden in der Messperiode 1997-1999, Studie im Auftrag des Institut Wohnen und Umwelt, Damstadt 2001.
- [Feist 2001-b] Feist, W., Peper, S., von Oesen, M., Klimaneutrale Passivhaus-Reihenhausiedlung Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18, Passivhaus Institut, Damstadt 2001.

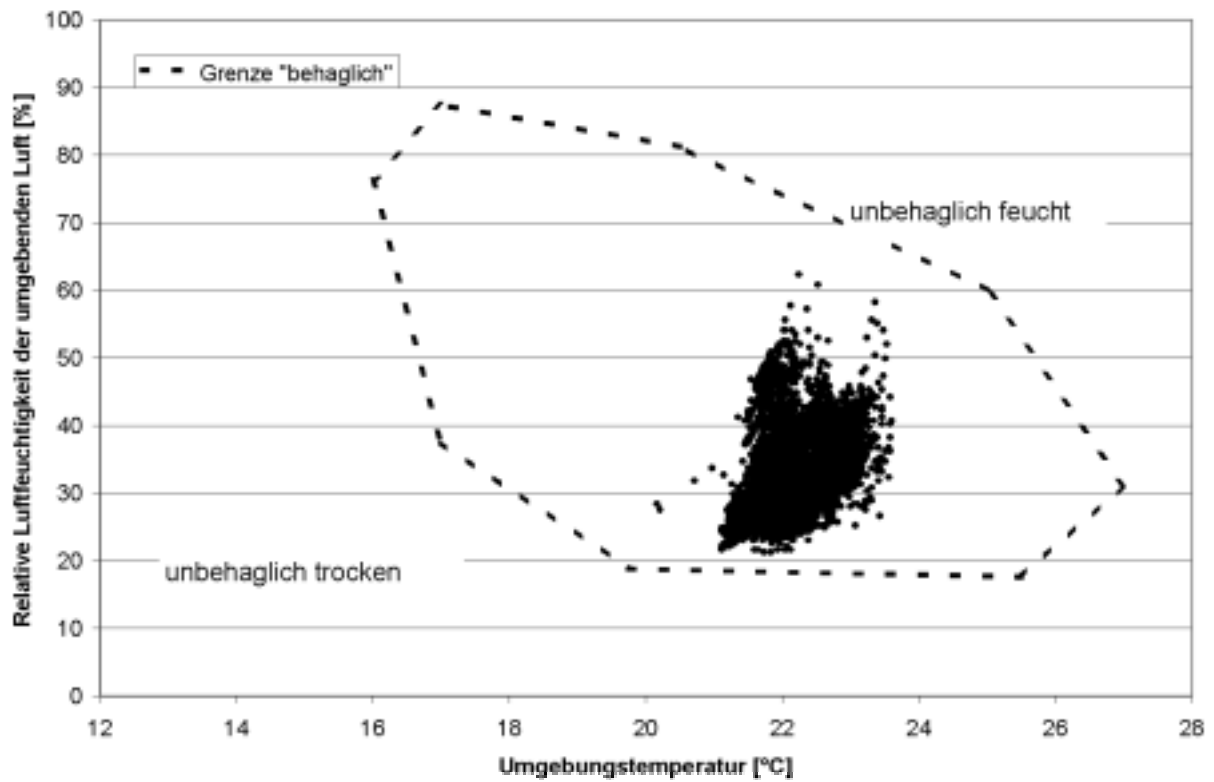
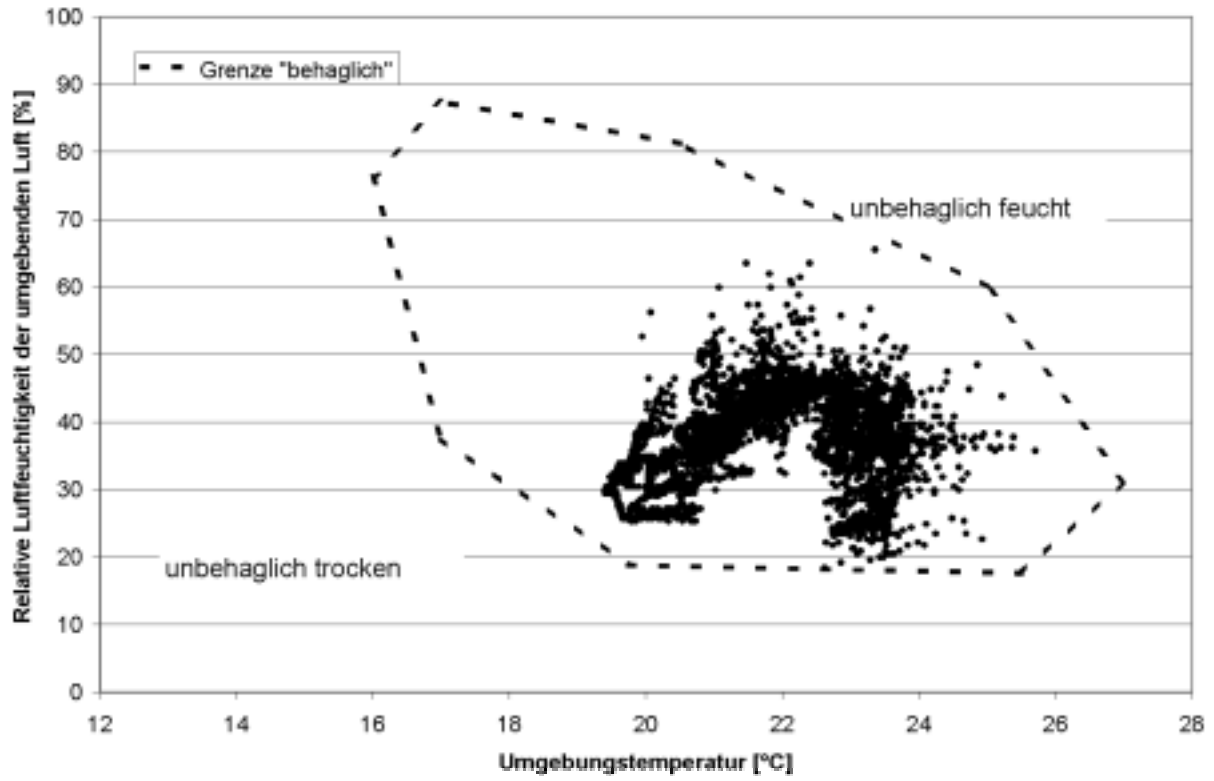
-
- [Hausladen 2003] Hausladen, G., Wimmer, A., Kaiser, J., Technikakzeptanz im Niedrigenergiehaus – Teil 1, HLH, Bd. 54 Nr. 7, 2003.
- [Heidt 1987] Heidt, F.-D., Zur Messung des Luftwechsels mit Spurengas-Methoden, Bauphysik 6/1987, Berlin.
- [Peper 2001] Peper, S., Feist, W., Kah, O., Messtechnische Untersuchung und Auswertung, Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [Peper 2002] Peper, S., Feist, W., Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Analyse im dritten Betriebsjahr. Bericht im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG, Passivhaus Institut, Darmstadt 2002.
- [Pfluger 2001-a] Pfluger, R., Feist, W., Kostengünstiger Passivhaus-Geschosswohnungsbau in Kassel Marbachshöhe: Projektdokumentation, Qualitätssicherung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Endbericht Juni 2001, Fachinformation PHI-2001/3, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 16, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [Pfluger 2001-b] Pfluger, R., Feist, W., Messtechnische Untersuchung und Auswertung; Kostengünstiger Passivhaus-Geschosswohnungsbau in Kassel Marbachshöhe: Endbericht Juni 2001; Fachinformation PHI-2001/2, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [Pfluger 2001-c] Pfluger, R., Feist, W., Sommerliches Innenklima im Passivhaus-Geschosswohnungsbau; Messtechnische Untersuchung und Auswertung des sommerlichen thermischen Verhaltens eines Passivhaus-Geschosswohnungsbaus in Kassel-Marbachshöhe, Endbericht Oktober 2001, Fachinformation PHI-2001/11, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 42, Darmstadt 2001.
- [PHPP 2000] Feist, W., Baffia, E., Schnieders, J., Pfluger, R., Passivhaus Projektierungs Paket '99; Werkzeug für die Planung und Auslegung von Passivhäusern; 3. Auflage, Passivhaus Institut, Darmstadt, Januar 2000.
- [PHPP 2004] Feist, W., Pfluger, R., Kaufmann, B., Schnieders, J., Kah, O., Passivhaus Projektierungs Paket 2004; Werkzeug für die Planung und Auslegung von Passivhäusern; Passivhaus Institut, Darmstadt, April 2004.

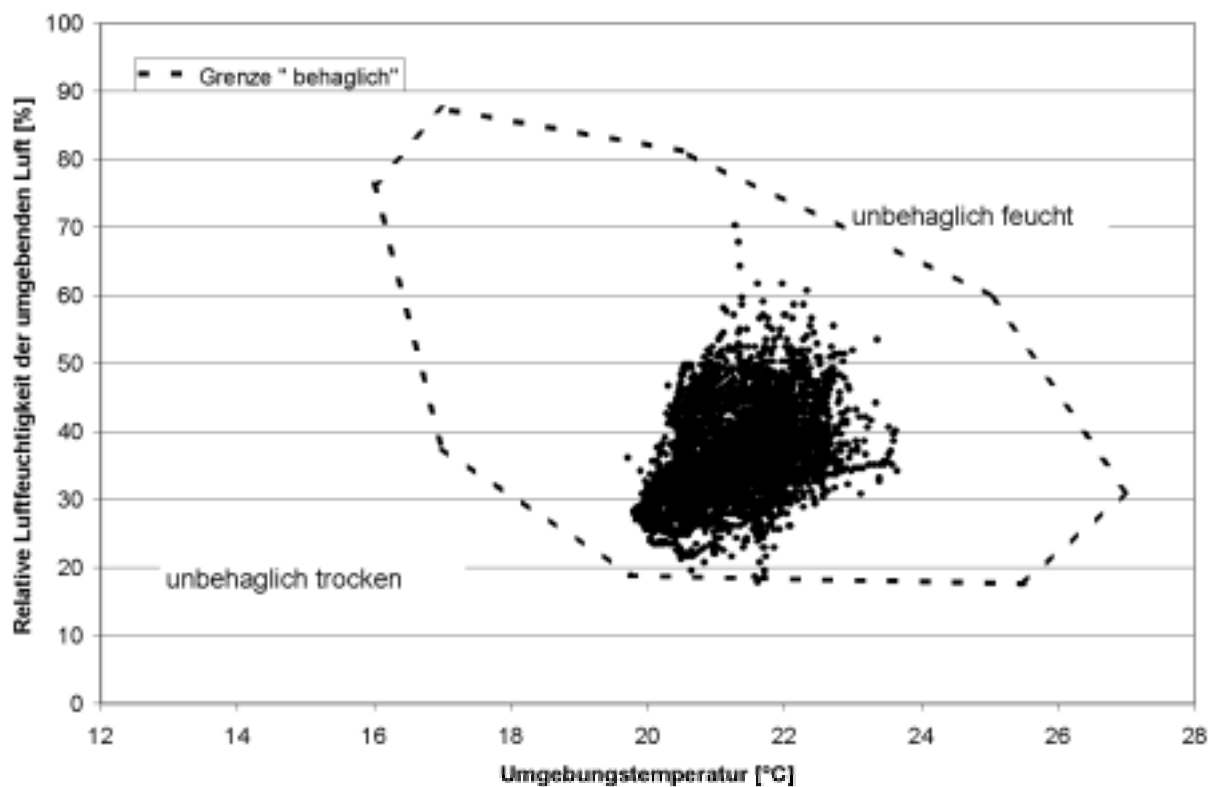
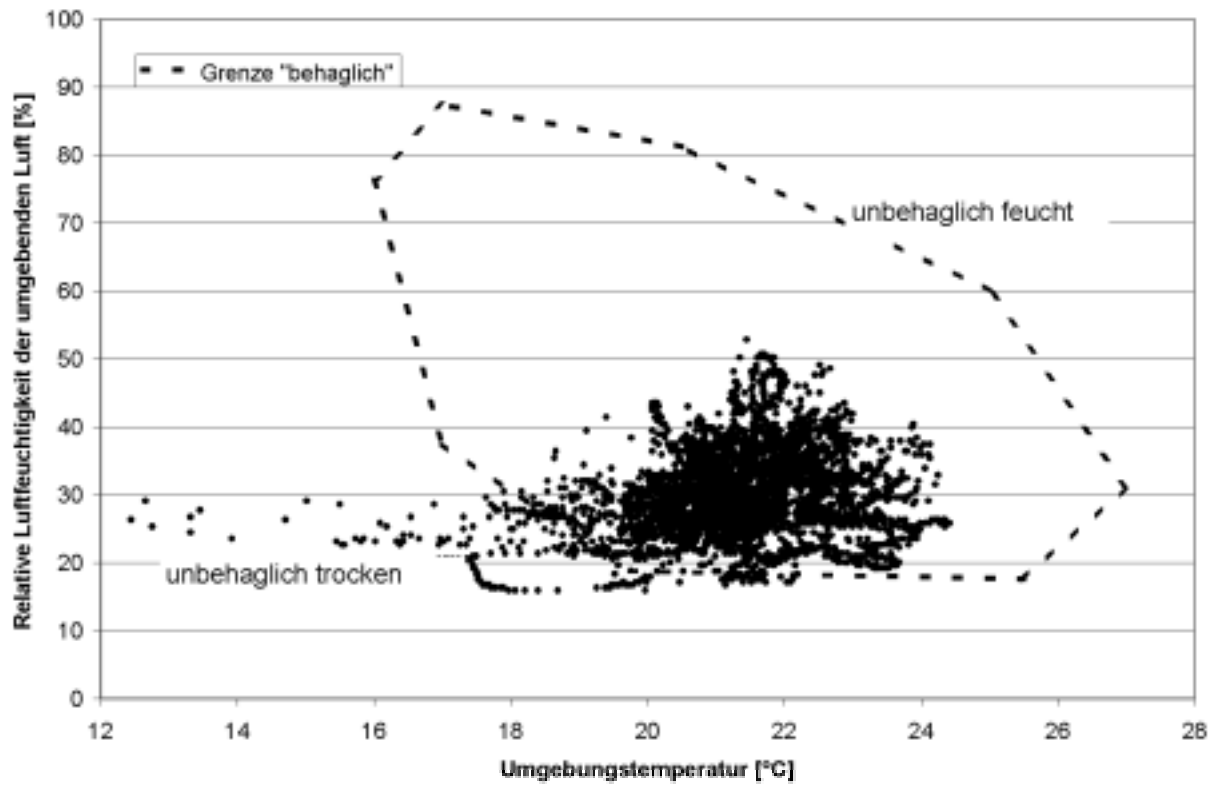
-
- [Reiß 2003] Reiß, J., Ergebnisse des Forschungsverbahens „Messtechnische Validierung des Energiekonzeptes einer großtechnisch umgesetzten Passivhausentwicklung in Stuttgart-Feuerbach“, 7. Passivhaus Tagung 2003, Hamburg.
- [Roulet 1991] Roulet, C.-A. und Vandaele, L.(Hrsg.), Airflow Patterns within Buildings - Measurement Techniques, Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note 34, Oscar Faber Partnership (1991).
- [RWE 1998] RWE Energie Bau-Handbuch, 12. Ausgabe, Essen, 1998.
- [Schneider 2000 a] Prof. Dr.-Ing. E. Schneider, Geschosswohnungen im Passivhausstandard, BbauBl, Heft 3/2000.
- [Schneider 2000 b] Prof. Dr.-Ing. E. Schneider, Passivhäuser im Geschosswohnbau, Bauzentralblatt 8/2000.
- [VDI 4300/7] VDI 4300, Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen, Blatt 7, Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [Werner1999] Werner, J., Laidig, M., Grundlagen der Wohnungslüftung, in Protokollband Nr. 17 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase II, Passivhaus Institut; Darmstadt 1999.

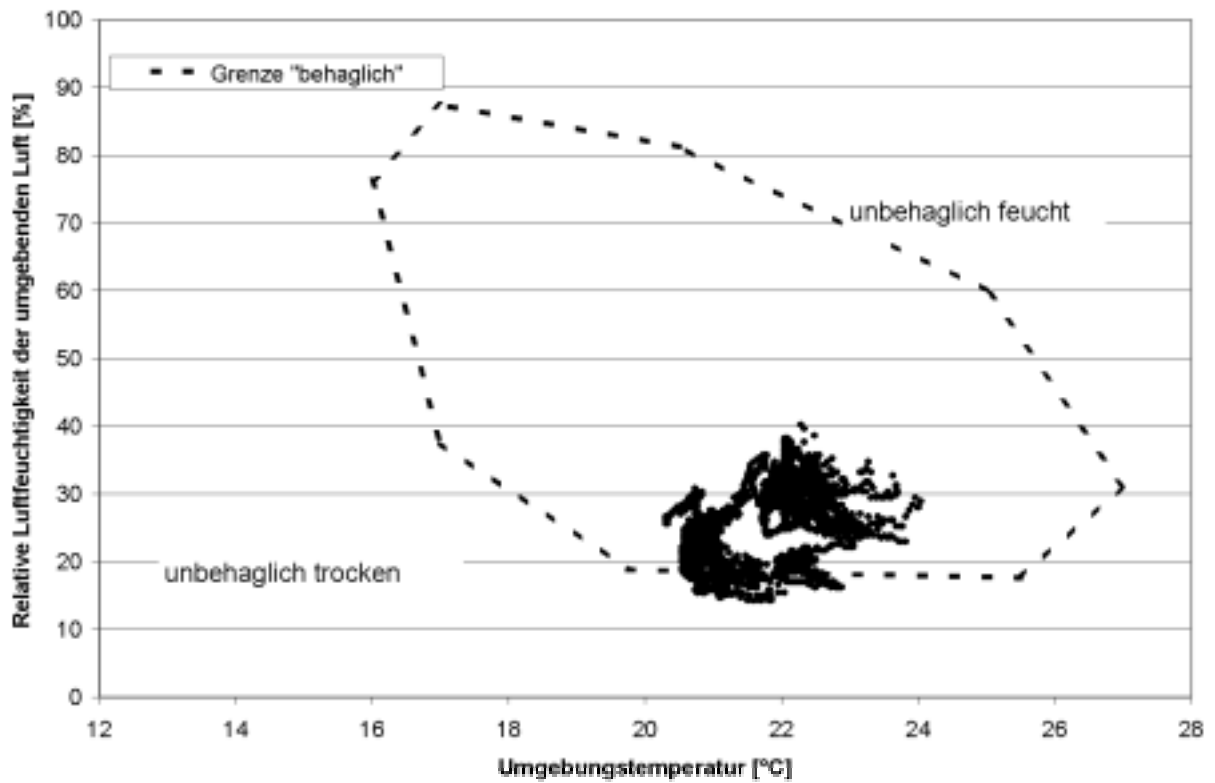
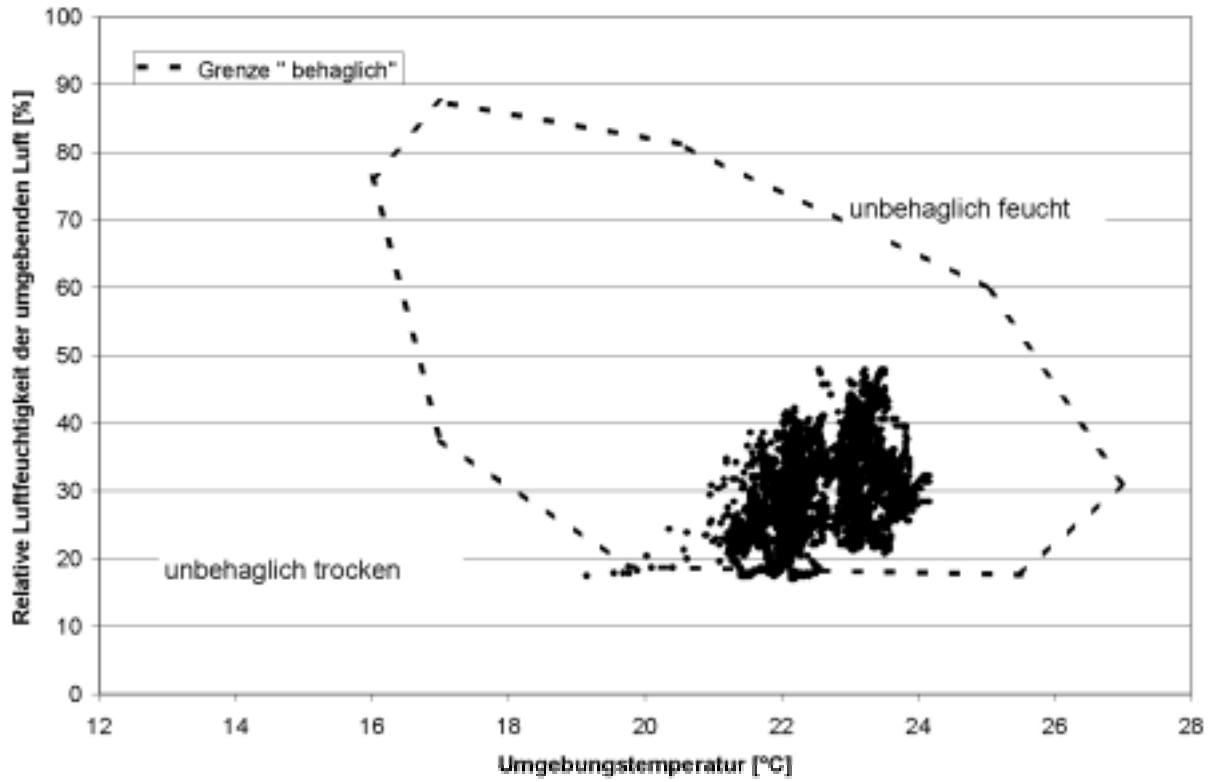
5 Anhang

5.1 Dokumentation der Messdaten zur Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur in den Südwohnungen





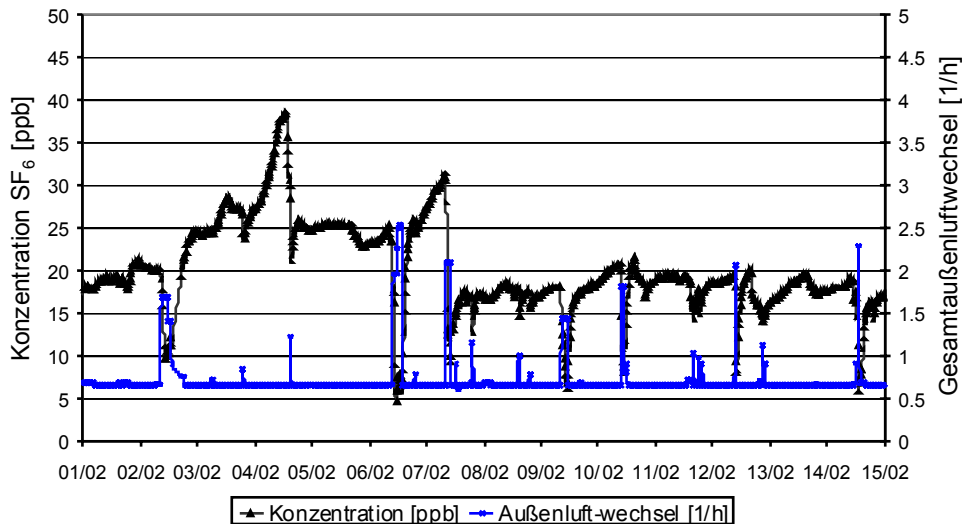




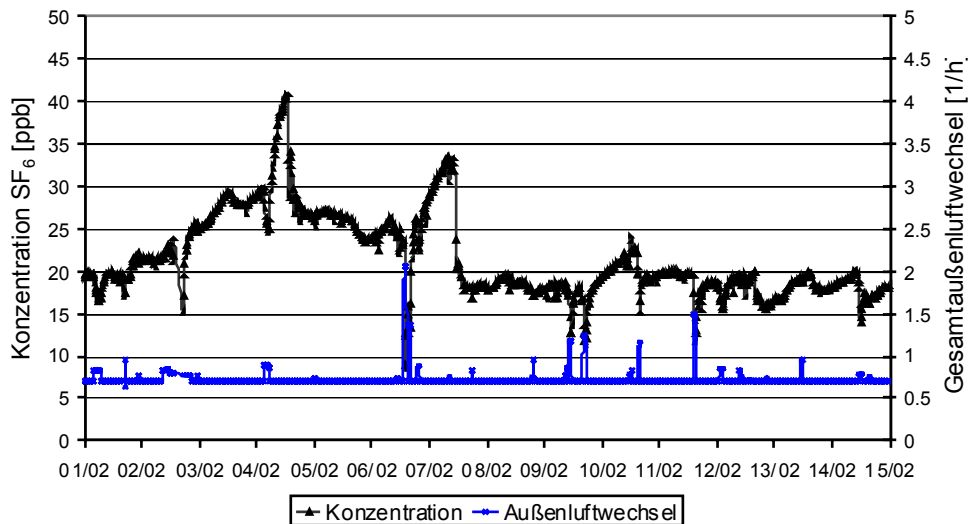
5.2 Indikatorgas-Messung in Kassel: Darstellung der Konzentrationsverläufe

In untenstehenden Diagrammen sind die gemessenen Konzentrationen in den insgesamt 8 Wohneinheiten in Kassel und die berechneten Außenluftwechsel dargestellt.

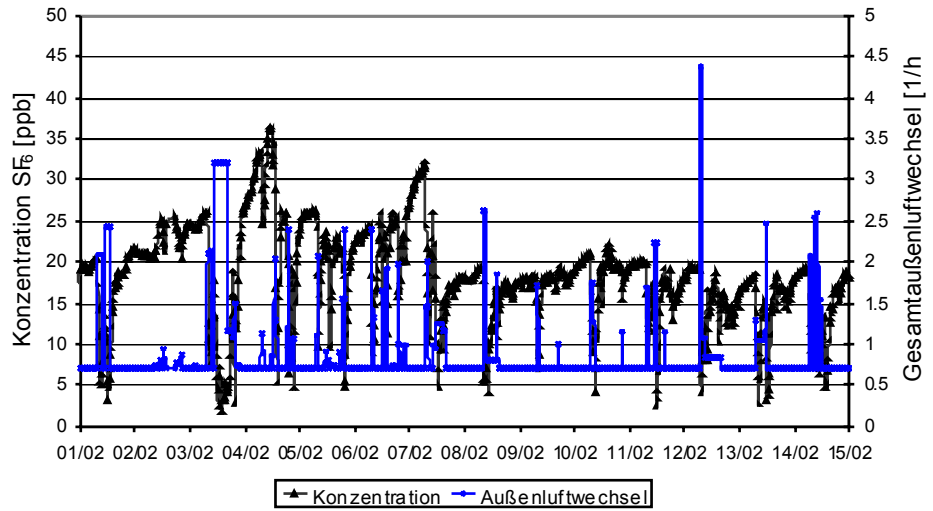
Konzentrationsverlauf WE1



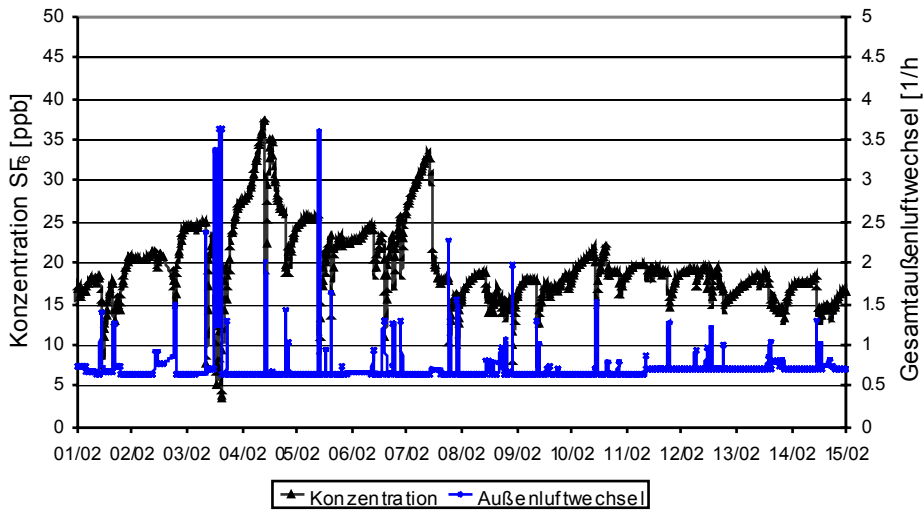
Konzentrationsverlauf WE2



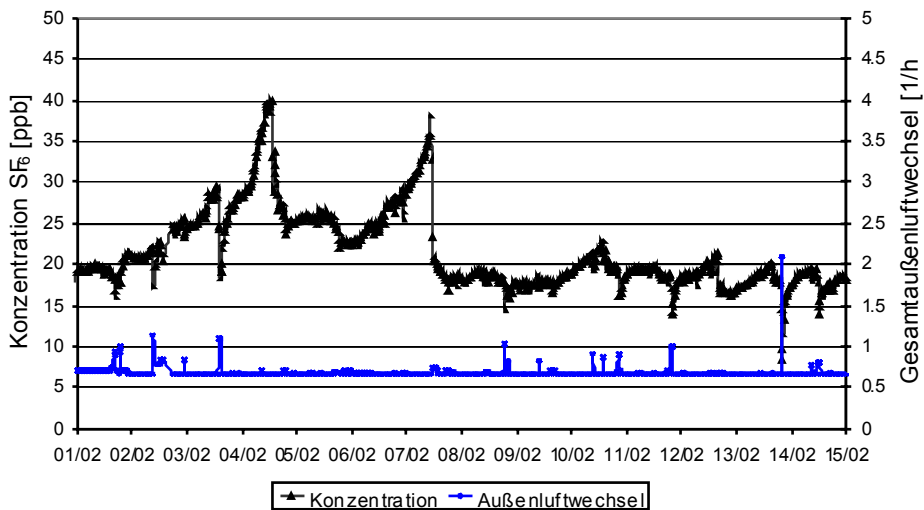
Konzentrationsverlauf WE3



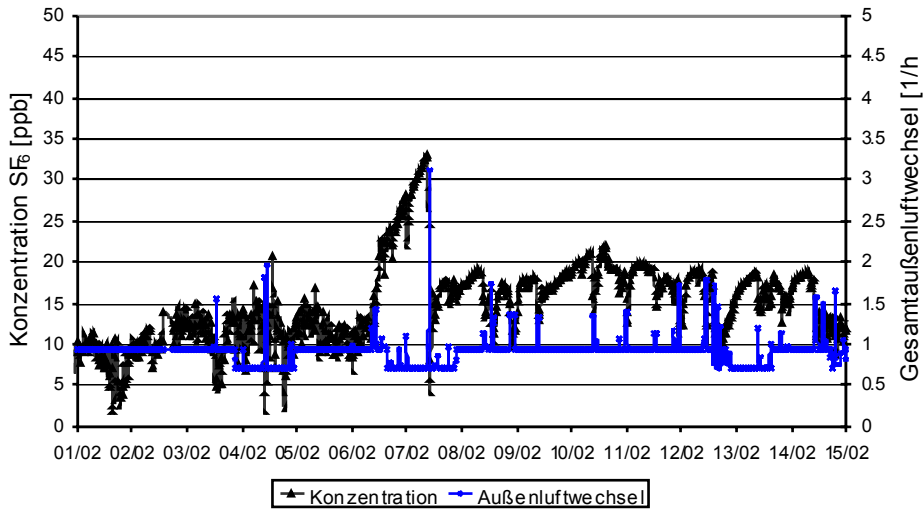
Konzentrationsverlauf WE4



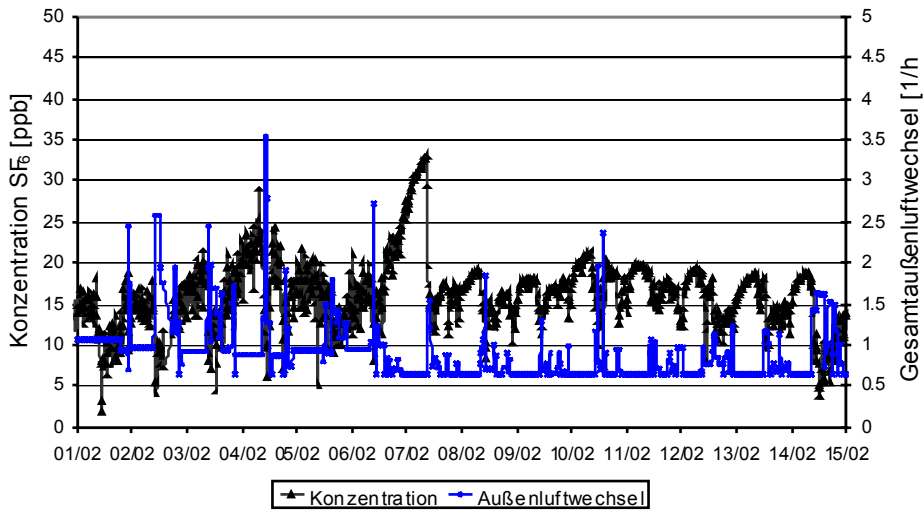
Konzentrationsverlauf WE5



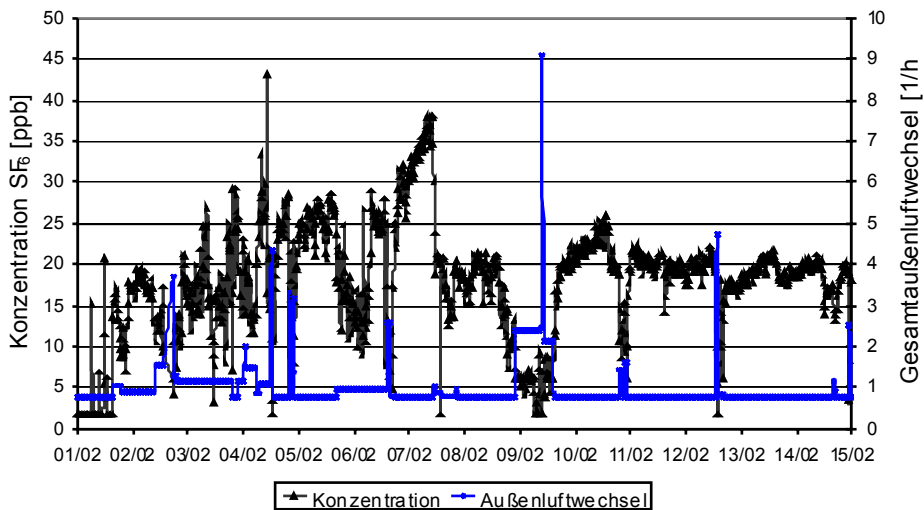
Konzentrationsverlauf WE6



Konzentrationsverlauf WE7



Konzentrationsverlauf WE8



5.3 Indikatorgas-Messung in Hannover: Darstellung der Konzentrationsverläufe

In den folgenden Diagrammen sind die gemessenen Indikatorgas-Konzentrationsverläufe und die berechneten Außenluftwechsel dargestellt. Die angegebenen Luftwechselraten beziehen sich auf das gesamte Luftvolumen des Reihenhauses.

