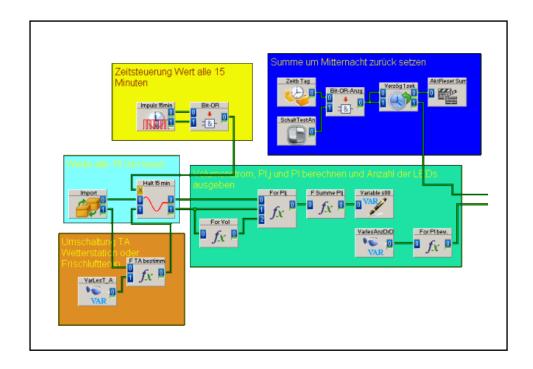




# Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes



# Teilbericht 3 Endbericht mit Dokumentation des Feldtests

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 0327398A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes

Teilbericht 3: Endbericht mit Dokumentation des Feldtests

Autoren: Marc Großklos (IWU)

Ulrike Hacke (IWU)

#### Unter Mitarbeit von:

Margrit Schaede (IWU) Günter Lohmann (IWU)

Rolf Born (IWU)

Prof. Dr. Jens Knissel (Universität Kassel)
Prof. Dr. Claus Kahlert (Ingenieurbüro ebök)
Johannes Werner (Ingenieurbüro ebök)

Ralf Jaudas (Schwörer Haus KG)

Reinhard Patzer (AL-KO Therm GmbH)

Reprotechnik: Reda Hatteh

# 1. Auflage

Darmstadt, den 25.10.2012

ISBN: 978-3-941140-28-8 IWU-Bestellnummer: 05/12

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH

Rheinstraße 65 64295 Darmstadt

Germany

Telefon: +49(0)6151/2904-0 / Fax: -97

Internet: www.iwu.de



# Inhalt

0	Zusam	menfassung und Bewertung der Ergebnisse	5
1	Einleit	ung und Überblick über das Forschungsvorhaben	12
	1.1	Einleitung	12
	1.2	Vorstellung des Forschungsvorhabens	12
	1.3	Ablauf des Forschungsvorhabens	14
	1.4	Stand der Technik der Luftqualitätsregelung von Wohnungslüftungsanlagen	16
2	Beschr	eibung der neu entwickelten Regelung	18
	2.1	Luftqualitätsregelung	19
	2.2	Feuchteregelung	23
	2.3	Gesamtregelung	25
	2.4	Erfassung der Fensteröffnung im Gebäude mit der Drd-Methode	26
	2.5	Nutzerrückmeldung	
3	Ablauf	der Erprobungsphase	29
	3.1	Test des Prototyps im Testraum	29
	3.2	Feldtest	32
	3.2.1	Beschreibung der Gebäude	32
	3.2.2	Luftdichtheit der Gebäude	
	3.2.3	Volumenströme und Geräuschentwicklung der Lüftungsanlage	36
4	Messd	atenerfassung	38
	4.1	Beschreibung der Messtechnik	38
	4.2	Messwertkorrekturen	41
	4.3	Datenlücken	46
5	Messd	atenauswertung Lüftungsregelung	47
	5.1	Auswertung der VOC-Messwerte und der Funktionsweise der VOC-Sensoren	47
	5.1.1	Langzeitentwicklung der VOC-Messwerte	48
	5.1.2	VOC-Messwerte in Zu- und Abluft sowie in den Räumen der Gebäude	
	5.1.3	Dynamik der VOC-Messwerte	
	5.1.4 5.1.5	Ausfallhäufigkeit der VOC-Sensoren Vergleich von VOC-Werten mit Messdaten von CO₂-Sensoren	
	5.1.6	Ergebnisse der Nachkalibrierung der VOC-Sensoren	
	5.2	Luftqualitätsregelung	68
	5.2.1	Entwicklung der Schaltschwellen und Neuberechnungszeiten	79
	5.2.2	Übersteuerung der LQ-Regelung durch den Nutzer	
	5.2.3	Auswirkungen von Drift und Ausfall der VOC-Sensoren der LQ-Regelung	89
	5.3	Auswirkungen unterschiedlicher Lüftungsstrategien auf den elektrischen	0.3
	г 4	Energieverbrauch	
	5.4	Feuchteregelung	
	5.5	Perspektiven für den Einsatz der Luftqualitätsregelung	101



6	Entwic	klung der Anzeige für das Nutzerfeedback	107
7	Messd	atenauswertung der Erfassung des Fensterzustand und der Nutzerrückmeldung	110
	7.1	Häufigkeit Fensteröffnung Winter / Sommer – Messdaten Fensterkontakte	111
	7.2	Erfassung des Fensteröffnungzustandes mit der Drd-Sequenz – Übereinstimmung mit Fensterkontakten	114
	7.2.1 7.2.2 7.2.3 7.2.4	Ausführung der Innen- und Außenmessstellen in den Gebäuden des Feldtests	118 121
	7.2.5	Anlagentechnische Einflussfaktoren auf das Ergebnis der Drd-Sequenz	
	7.3	Ausgabe Nutzeranzeige	131
	7.3.1 7.3.2	Anpassung der Skalierung der Anzeige Ergebnisse Nutzerrückmeldung / Befragung	
	7.4	Ergebnisse Nutzerrückmeldung	137
	7.5	Übertragbarkeit der Drd-Sequenz	138
8	Bewoh	nerinterviews	140
	8.1	Methodik Bewohnerinterviews	140
	8.2	Ergebnisse Bewohnerinterviews	141
	8.2.1 8.2.2 8.2.3 8.2.4	Allgemeine Zufriedenheit mit dem PH Zufriedenheit mit der LüftungAkzeptanz/Zufriedenheit mit der Einstellung der Lüftung: Automatikbetrieb Einschätzung der Funktionalität der Lüftungsanzeige/Drd-Sequenz	141 142 143
	8.2.5	Generelle Verbesserungsvorschläge und Anmerkungen	
	8.3	Kurzfragebögen	144
9	Übersi	cht der Verbrauchswerte der Feldtestgebäude	145
	9.1	Verbräuche Elektroenergie	145
	9.2	Warmwasserbereitung	150
10	Literat	ur	154
11	Abbild	ungsverzeichnis	156
12	Tabelle	enverzeichnis	161
Ar	nhang A	Änderungen an den Regelparametern der LQ-Regelung während des Feldversuchs	163
Ar	nhang B	Verbrauchsdaten der Feldtestgebäude als Monatswerte	165
Ar	nhang C	Gesprächsleitfaden – Bewohnerinterviews	169
Ar	nhang D	Software Lüftungsanzeige	171
Ar	nhang E	Bericht zur Überprüfung der Abweichung der LuQaS-EvaKit-VOC-Sensoren	173
Ar	nhang F	Protokolle zur Überprüfung der Gebäudedichtheit	184



# 0 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Wohnungslüftungsanlagen tragen einerseits zur Verbesserung der Luftqualität und andererseits zur Reduktion der Lüftungswärmeverluste bei, wenn Sie über eine Wärmerückgewinnung verfügen. Zusätzlich helfen Sie bei der Vermeidung von Bauschäden. Üblicherweise verfügen sie über mehrere Lüftungsstufen, mit denen die Bewohner den Luftwechsel im Gebäude ihren Bedürfnissen anpassen können. Allerdings ist dabei immer wieder ein Nutzereingriff notwendig, um den Betrieb sowohl unter energetischen Gesichtspunkten, als auch mit optimaler Luftqualität zu erreichen, da Gebäude im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf selten gleichmäßig genutzt werden. Bei Gebäuden mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung führt zusätzliche Fensteröffnung, zu einem deutlich ansteigenden Heizwärmeverbrauch, da beim Luftaustausch über die Fenster die Wärme der ausströmenden Luft nicht mehr genutzt werden kann. Aus diesem Grund kann es für die Bewohner hilfreich sein, kontinuierlich Informationen über die energetischen Auswirkungen ihres Fensteröffnungsverhaltens zu bekommen.

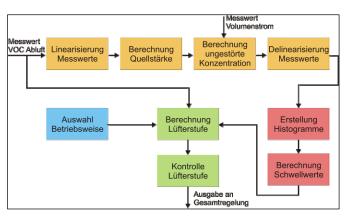
Beide Themen, die Optimierung des Betriebs von Lüftungsanlagen und die Ermittlung und Rückmeldung der Auswirkungen von Fensteröffnung waren Kernthemen im Forschungsvorhaben "Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes", das im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie sowie dem Projektträger Jülich durchgeführt wurde.

Das Projekt gliederte sich in 3 Phasen: in Projektphase 1 wurden die theoretischen Grundlagen für den Einsatz von Luftqualitätssensoren in Wohngebäuden, mögliche Regelstrategien und zur als Druck-Differenz-Methode (Drd) bezeichneten Erfassung des Fensteröffnungszustandes über die Lüftungsanlage erarbeitet und in zwei Teilberichten dokumentiert. In Projektphase 2 wurde die Luftqualitätsregelung (LQ-Regelung) technisch umgesetzt und an Prototypen sowie auf einem Teststand erprobt. Projektphase 3 umfasste einen Feldtest mit vier Einfamilienhäusern, in denen die LQ-Regelung sowie die Erfassung des Fensterzustandes in bewohntem Zustand über längere Zeit erprobt und optimiert wurde. Die Ergebnisse der Projektphasen 2 und 3 sind in diesem Bericht dokumentiert.

# Luftqualitätsregelung

Als Luftqualitätssensoren werden entweder CO<sub>2</sub>-Sensoren oder VOC-Sensoren (VOC = Volatile Organic Compounds) eingesetzt. Letztere erfassen das heterogene Stoffgemisch, das sich in der Raumluft befindet mit einem charakteristischen Signal, das jedoch, anders als z. B. bei Kohlendioxid, nicht einer einzigen Substanz zuzuordnen ist und für das auch kein Schwellwert definiert ist, der zur Regelung einer Lüftungsanlage verwendet werden könnte. Damit verfügen VOC-Sensoren über ein breiteres Spektrum an Substanzen, auf die sie reagieren, es muss aber immer eine Interpretation der Messwerte erfolgen. In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden VOC-Sensoren zur LQ-Regelung eingesetzt. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem aus der charakteristischen Verteilung der Messwerte der letzten Tage auf die Nutzungsintensität des Gebäudes geschlossen werden kann, um daraus dann Schwellwerte für die LQ-Regelung abzuleiten.

Für die LQ-Regelung ist in den Feldtestgebäuden in Zu- und Abluft je ein VOC-Sensor montiert worden. Die Messwerte werden im Minutentakt von einer Mess- und Regelschaltung verarbeitet. Nach einer Linearisierung der Messwerte wird die Quellstärke auf Basis der Veränderung der Messwerte im letzten Zeitschritt berechnet und in der Folge diejenige VOC-Konzentration bestimmt, die sich bei kontinuierlichem Betrieb in Normallüftung (Auslegungsfall) eingestellt hätte. Mit die-





sem Verfahren erhält man VOC-Werte, die durch die LQ-Regelung nicht beeinflusst sind (eine abgesenkte Lüftungsstufe führt z. B. zur Erhöhung der aktuellen VOC-Konzentration). Mit diesem VOC-Wert bei Normallüftung werden nach einer Delinearisierung zwei Häufigkeitsverteilungen erstellt (Histogramme), die über prozentuale Häufigkeiten (Quantile) die Schwellwerte für die LQ-Regelung liefern. Dabei wurden Schwellwerte für zwei verschiedene Betriebsweisen erzeugt:

- Eine komfortorientierte Betriebsweise erhöht den Volumenstrom der Lüftungsanlage automatisch, wenn die Messwerte des VOC-Sensors in der Abluft besondere Belastungen anzeigen und sorgt somit für eine schnelle Abfuhr der Luftinhaltsstoffe. Ist niemand im Gebäude anwesend und die VOC-Werte sind niedrig, so wird die Lüftungsstufe vermindert. Dies reduziert den Lüftungsstromverbrauch.
- Bei der energieorientierten Betriebsweise läuft die Lüftungsanlage im Normalbetrieb. Wird jedoch erkannt, dass die VOC-Werte gering sind, wird der Luftwechsel reduziert, eine Erhöhung auf die höchste Stufe findet nie statt. Mit dieser Betriebsweise wurden etwas größere Energieeinsparungen erwartet.

### Feuchteregelung

Zusätzlich zur LQ-Regelung wurde eine Feuchteregelung entwickelt, die einerseits im Winter bei sehr trockener und gleichzeitig nicht zu schlechter (VOC) Raumluft den Luftaustausch mit dem Ziel reduziert, den Abtransport von Raumluftfeuchte zu vermindern. Im Sommer und in der Übergangszeit wurde gleichzeitig überwacht, ob im Gebäude bauphysikalisch kritische Raumluftfeuchten auftreten und dann gegebenenfalls der Luftaustausch erhöht. Die Feuchteregelung bildete jedoch keinen Schwerpunkt im Forschungsprojekt.

#### Druckdifferenz -Sequenz

Die Druckdifferenz-Sequenz (Drd) nutzt die Tatsache, dass sich bei vergleichsweise luftdichten Gebäuden, die die Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind, sich eine Druckdifferenz zwischen Gebäude und der Außenluft einstellt, wenn z. B. der Zuluftvolumenstrom kurzzeitig stark vermindert wird, während die Abluft normal weiter betrieben oder erhöht wird. Voraussetzung ist, dass alle Außenfenster und Türen des Gebäudes geschlossen sind. Ist mindestens ein Fenster geöffnet, kann sich kein nennenswerter Druckunterschied aufbauen, wie in einem Vorläuferprojekt bereits praktisch erprobt wurde. Dieses Verfahren und die Information, ob alle Fenster geschlossen sind, wird im hier vorgestellten Projekt verwendet, um mit einem vereinfachten Ansatz zusammen mit Messwerten der aktuellen Außentemperatur den Bewohnern die Information über die energetischen Auswirkungen der Fensteröffnung über eine Anzeige im Wohnzimmer zu visualisieren.

#### <u>Feldtest</u>

Die beschriebene Regelung zur Beeinflussung des Volumenstroms der Lüftungsanlage sowie die Drd-Sequenz wurden zusammen mit weiteren Kontrollfunktionen zur Überwachung der Sensoren und einer umfangreichen Messdatenerfassung mit dem Mess- und Regelsoftwarepaket Dasylab umgesetzt.

Nach einer Erprobung der Regelung an einem Testraum und weiteren Optimierungen der Software wurden vier Neubau-Passivhäuser der Firma Schwörer Haus KG ausgewählt, in denen im bewohnten Zustand die neuen Verfahren über einen längeren Zeitraum von mindestens 1,5 Jahren oder mehr erprobt wurden. Es handelt sich um Einfamilienhäuser mit ca. 140 m² Wohnfläche, die alle von Familien mit zwei Kindern kontinuierlich bewohnt wurden.

Teil des Feldtests waren außerdem mehrere Befragungen (bis zu 6 schriftliche Kurzbefragungen und eine längere telefonische Befragung) der Bewohner zu ihrer Zufriedenheit mit der Luftqualität und ihrer Einschätzung zu den neu entwickelten Techniken.



#### **Ergebnisse**

#### Messung der VOC-Konzentrationen der Gebäude

Bei den Gebäuden des Feldtests wurden die VOC-Konzentrationen sowohl in Zu- und Abluft als auch in allen Räumen gemessen. Die Messwerte nach Bezug nahmen mit einer mathematisch gut abbildbaren Abklingfunktion ab. Dieses Abklingen der VOC-Messwerte wurde jedoch von einer in ihrem zeitlichen Ablauf nicht genauer bekannten Veränderungen der Kalibrierung der Sensoren überlagert. Über die Monate betrachtet, konnte ein geringer jahreszeitlicher Einfluss auf die VOC-Konzentration in der Zuluft (Außenluft) herausgearbeitet werden, der aber möglicherweise auch von der im Jahresverlauf schwankenden Luftfeuchte beeinflusst wird. Besonders in der Zuluft war beim Anspringen der Wärmepumpe und der damit verbundenen Reduktion der Feuchte bei Zuluftnachheizung ein deutlicher Einfluss auf die VOC-Messwerte nachweisbar. Hier ist gegebenenfalls eine Platzierung des VOC-Sensors nicht in der Zu-, sondern in der Frischluft zu prüfen.

Insgesamt konnte durch die VOC-Messung in der Abluft recht gut ein mittlerer VOC-Wert des Gebäudes erfasst und für die Luftqualitätsregelung verwendet werden. Die Messwerte der einzelnen Räume unterscheiden sich aber deutlich voneinander, abhängig von Ausstattung und Nutzung.

Fast alle VOC-Sensoren wurden nach Abschluss des Feldtests auf ihre Abweichungen gegenüber der Kalibrierung im Auslieferungszustand überprüft. Es zeigte sich, dass bei den Sensoren in der Zuluft zwar eine Abweichung von der Ursprungskalibrierung festzustellen war, die Charakteristik aber im Wesentlichen noch vorhanden war. Bei den Sensoren in der Abluft und allen, die in den Wohnräumen eingesetzt waren, konnte kaum noch eine Sensitivität gegenüber dem Kalibriergas Kohlenmonoxid festgestellt werden. Dennoch wiesen die Sensoren immer noch eine nennenswerte Signaldynamik auf, mit der die LQ-Regelung den Volumenstrom gut beeinflussen konnte.

Der bei den Sensoren in der Abluft gemessene fortschreitende Abfall der VOC-Konzentrationen lässt die Frage aufkommen, wie weit die Messwerte in Richtung unterer Messbereichsgrenze abfallen, was die Luftqualitätsregelung mittelfristig beeinflussen kann. In der Zuluft konnte bis auf den jahreszeitlichen Effekt nur eine geringe Langzeitveränderung der Messwerte festgestellt werden. Auffällig war weiterhin die Tatsache, dass das beobachtete Abklingen der VOC-Messwerte in der Abluft bei einem Feldtestgebäude kaum festzustellen war. Bei diesem Gebäude wurden für die Installation der Lüftungskanäle im Bereich des Lüftungsgerätes Polystyrol-Formteile verwendet und die Sensoren waren direkt in diese Formteile montiert. Unklar ist aber, ob dieses abweichende Verhalten auf die kürzere Messdauer in diesem Gebäude, die Polystyrol-Formteile oder auf die Veränderung der Sensitivität der Sensoren zurückzuführen ist.

Es wurden zwei unterschiedliche Ausführungen des VOC-Sensors eingesetzt, die beide auf dem gleichen Sensorelement basieren. Allerdings besaß die Kanalausführung eine abweichende Kalibrierung. Bis auf einen frühen Defekt bei einem der Raumsensoren ist bei diesen 43 Fühlern bei einer Betriebsdauer von über 1.200.000 h kein weiterer Defekt aufgetreten, die Sensoren sind somit in ihrer grundsätzlichen Funktion sehr zuverlässig. Bei den Kanalsensoren sind vier Sensoren in der Zuluft ausgefallen. Die Ursache könnte in den Temperatur- und Feuchtesprüngen in der Zuluft nach der Wärmepumpe liegen, die bei dem anderen Sensortyp, der ebenfalls in der Zuluft montiert war, jedoch nicht zu einem Ausfall führten.

Der Vergleich der Messwerte der VOC-Sensoren und der in einem Gebäude des Feldtest vorhandenen CO<sub>2</sub>-Sensoren zeigt, dass Ereignisse, beiden die VOC-Sensoren erhöhte Signalpegel liefern, tendenziell auch bei den CO<sub>2</sub>-Sensoren zu finden sind. Allerdings sind CO<sub>2</sub>-Sensoren nicht in der Lage, die im Gebäude vorhandenen variablen Konzentrationen an Geruchs- und sonstigen Luftinhaltsstoffen zu erkennen, die besonders in der Anfangszeit nach Bezug des Gebäudes vorhanden sind und abgelüftet werden müssen. Auch zusätzliche Emittenten wie Möbel oder Zigarettenrauch können nur mit VOC-Sensoren erfasst werden. Aus diesem Grund besitzen VOC-Sensoren Vorteile gegenüber reinen CO<sub>2</sub>-Sensoren beim Einsatz in Luftqualitätsregelungen.



#### Luftqualitätsregelung

Die Luftqualitätsregelung (LQ-Regelung) wurde nach einer Inbetriebnahmephase bei allen vier Gebäuden des Feldtests eingesetzt. Detaillierte Analysen des Regelverhaltens ergaben, dass die Regelung gut auf Belastungsspitzen reagierte und auch recht zuverlässig die Abwesenheit der Bewohner erkannt und entsprechend nachgeregelt hat. Die Reaktionszeit vom Anstieg der VOC-Messwerte bis zu einer Erhöhung des Volumenstroms lag bei 2 bis 3 Minuten. Auch längere Abwesenheiten der Bewohner (z. B. Urlaub) wurden gut erkannt und die Regelung reduzierte den Volumenstrom dann automatisch auf die niedrigste Lüftungsstufe.

Entscheidend dabei ist, dass die Ermittlung der Schwellwerte nicht durch längere Abwesenheiten negativ beeinflusst wird und die Regelung bei Rückkehr der Bewohner nicht dauerhaft einen zu hohen Volumenstrom einstellt. Auch diese Funktion wurde von der LQ-Regelung gut erfüllt.

Besondere Aufmerksamkeit wurde auf das Verhalten der LQ-Regelung in der Nacht gerichtet. Hier zeigte sich, dass teilweise die niedrigste Lüftungsstufe 1 eingestellt wurde, so dass besonders in einem doppelt belegten Schlafzimmer kein ausreichender Volumenstrom sichergestellt wäre. Diese nächtliche Absenkung war jedoch nur zeitweise zu beobachten und die Auswertung der Messwerte zeigte, dass die Entwicklung der VOC-Werte im Schlafzimmer nicht kontinuierlich verläuft (es ist eine große Dynamik innerhalb der Nacht vorhanden). Es liegen keine Informationen über die tatsächliche Belegung des Gebäudes und des Schlafzimmers in dieser Zeit vor, könnte es sich somit um eine korrekte Funktion der LQ-Regelung handeln.

Im Projekt wurde überwiegend die komfortorientierte Betriebsweise erprobt. Auch mit dieser Regelung, die bei erhöhten VOC-Messwerten den Volumenstrom vergrößert, lag im Mittel die Lüftungsstufe unter derjenigen eines kontinuierlichen Betriebs in Normallüftung. Die energieorientierte Betriebsweise wurde in einem Gebäude über einige Monate eingesetzt. Trotz der vergleichsweise kurzen Erprobungszeit zeigte sich auch hier im Mittel effektiv eine Reduktion des Volumenstroms.

Die entwickelte Regelung verfügt über zwei Mechanismen zur Dämpfung von Regelschwingungen und häufigen Wechseln der Lüftungsstufe. Einerseits besitzt die LQ-Regelung eine Hysterese (0,6 Digits), mit der das Regelverhalten geglättet wurde. Außerdem wurde die Gesamtregelung aus LQ- und Feuchteregelung nochmals geglättet, um ein Takten zwischen zwei Lüfterstufen zu verhindern. Dazu wurden insbesondere zu Beginn des Einsatzes der LQ-Regelung unterschiedliche Grenzwerte erprobt. Messungen des Geräuschpegels in den verschiedenen Lüftungsstufen ergaben, dass daraus keine Belästigungen der Nutzer entstehen. Diese berichteten bei einer ebenfalls durchgeführten Befragung, dass die Veränderungen kaum wahrnehmbar waren.

Bei der Ermittlung der Schaltschwellen aus den Histogrammen hat sich ein Wert von ca. 14 Tagen für das Intervall bis zur Neuberechnung der Kurzzeitschwellwerte bewährt, bei den Langzeitschwellen wurde der Aktualisierungszeitraum von anfangs fast 3 Monaten auf 41 Tage verkürzt. Damit können Abwesenheiten über einige Wochen gut ausgeglichen werden.

Die Nutzer der Feldtestgebäude haben in unterschiedlichem Umfang von der Möglichkeit zur Übersteuerung der LQ-Regelung mit dem "Party-Taster" Gebrauch gemacht. Detaillierte Analysen ergaben, dass in einem Teil der Fälle die LQ-Regelung aber bereits die höchste Lüftungsstufe eingestellt hatte, die Lüftung also bereits reagiert hatte. Allerdings war die mögliche Volumenstromerhöhung bei allen Gebäuden begrenzt, so dass die Auswirkungen nicht sofort spürbar waren. Teilweise wurde der Nutzereingriff direkt nach Betreten des Gebäudes registriert, noch bevor die LQ-Regelung die Anwesenheit erfassen konnte. Hier liegen die Grenzen der neu entwickelten LQ-Regelung, die innerhalb weniger Minuten auf die Ankunft der Bewohner reagiert hatte. Die Übersteuerung der LQ-Regelung bei Betreten des Gebäudes war aber die Ausnahme.

Da vier M18-VOC-Sensoren in der Zuluft ausgefallen waren, wurde untersucht, welche Auswirkungen ein Sensordrift oder Sensordefekt auf die Berechnung der Quellstärken und der ungestörten VOC-Werte hat (ohne Einfluss der LQ-Regelung; diese Werte wurden zur Berechnung der Schwellwerte verwendet). Abhängig vom Volumenstrom der Lüftungsanlage ist der Einfluss des Zuluftsensors meist gering. Ein alleiniger



Drift bei dem Abluftsensor führt dagegen zu einem nahezu linearen Anstieg des Fehlers bei der Berechnung der Quellstärken. Insbesondere der Ausfall des VOC-Sensors in der Abluft muss über zusätzliche Kontrollfunktionen erkannt werden. Wie die Ergebnisse des Feldtests zeigen, war die entwickelte Regelung in der Lage, den aufgetretenen Sensordrift recht gut auszugleichen.

Zur Bewertung der Energieeinsparung bzw. eines möglichen Mehrverbrauchs durch die LQ-Regelung wurden zwei Szenarien einer üblichen Betriebsweise der Lüftungsanlage definiert. Bei Szenario 1 wird die Anlage kontinuierlich mit Auslegungsvolumenstrom betrieben, außer bei längerer Abwesenheit von mindestens zwei Tagen. Bei Szenario 2 wird unterstellt, dass die Bewohner regelmäßig an Werktagen für 7 Stunden das Haus verlassen und dann die Anlage auf Grundlüftung reduziert wird. Der Vergleich mit den realen Messwerten zeigt, dass die LQ-Regelung bei komfortorientierter Betriebsweise zwischen 1 % und 6 % niedrigere Lüftungsstromverbräuche aufwies als Szenario 1, obwohl die LQ-Regelung den Luftwechsel auch in die höchste Stufe erhöht. Gegenüber dem optimierten Szenario 2 ergaben sich um 4 % bis 7 % höhere Lüftungsstromverbräuche, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Häuser teilweise nicht so bewohnt wurden, dass eine werktägliche Absenkung von 7 Stunden überhaupt realistisch ist. Somit zeigt die Auswertung, dass die LQ-Regelung je nach Wohnsituation in der Lage ist, auch bei komfortorientierter Betriebsweise den Lüftungsstromverbrauch zu reduzieren. Die Gesamtenergieeinsparung ist bei beiden Betriebsweisen (komfort- und energieorientiert) in einem Passivhaus als gering einzustufen.

#### Feuchteregelung

Bereits vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung wurden die Raumluftfeuchten der einzelnen Räume und der Abluft analysiert. Dabei zeigte sich, dass die Abluftfeuchte zwar im oberen Bereich der Streuungen der Feuchtewerte der einzelnen Räume lag, da sie sozusagen einen durchmischten Wert der Ablufträume darstellt, aber dennoch im Mittel gut zur Beurteilung der Feuchtesituation im Gebäude geeignet ist und somit separate Feuchtesensoren nicht unbedingt erforderlich sind. Nach Inbetriebnahme der LQ-Regelung wurden die Schwellwerte, ab denen die Feuchteregelung in den Betrieb der Lüftungsanlage eingreift, sehr weit nach unten bzw. oben gelegt, so dass das Verhalten der LQ-Regelung nur selten von der Feuchteregelung übersteuert wurde, damit die LQ-Regelung besser beurteilt werden kann. In der Endauswertung zeigte sich, dass die Feuchteregelung im Winter in keinem der Feldtestgebäude aktiv war. Trotzdem ist die mittlere Abluftfeuchte in den Feldtestgebäuden kaum unter 30 % relative Feuchte gefallen. Ursache ist hier wohl der Zusammenhang zwischen menschlicher Aktivität im Gebäude und Feuchteproduktion im Haus. Sind keine Personen anwesend und wir dadurch weniger Feuchte in den Raum abgegeben, so wird aufgrund der sich ebenfalls einstellenden niedrigeren VOC-Konzentrationen der Volumenstrom der Lüftungsanlage reduziert und somit gleichzeitig ein Absinken der Feuchtewerte begrenzt. Die Auswertungen der Feldtestgebäude zeigen, dass bei Einsatz einer LQ-Regelung eine zusätzliche Feuchteregelung entbehrlich ist.

#### Drd-Sequenz und Nutzeranzeige

Mit der Drd-Sequenz konnte die Öffnung von Fenstern im Gebäude unterschiedlich gut erkannt werden. Offene Fenster wurden zwischen 63 % und 90 % der Fälle korrekt erkannt, geschlossene zwischen 95 % und 99 %. Bei einem Gebäude ist möglicherweise eine größere Leckage im Technikraum gegen Außenluft für die geringere Erkennungsrate verantwortlich. Als Hauptursache für nicht erkannte Fensteröffnungen werden aber geschlossene Innentüren vermutet. Bei Voruntersuchungen spielten diese nur eine untergeordnete Rolle. In den Feldtestgebäuden war der Spalt zwischen Fußboden und Innentür als Überströmöffnungen vorhanden, so dass der Einfluss geschlossener Innentüren auf das Ergebnis der Drd-Sequenz teilweise von der Veränderungen dieses Türspalts im Zeitverlauf abhängen kann. Für die Außenklimabedingungen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Außentemperatur konnte kein nennenswerter Einfluss auf das Drd-Ergebnis festgestellt werden. Außerdem konnten Einbrüche bei den Differenzdrücken während den Drd-Sequenzen als Ursache für falsch oder nicht erkannte Fensteröffnung identifiziert werden. Insgesamt funktionierte das Verfahren aber dennoch gut und kann zukünftig weiter eingesetzt werden.



Als weitere Einflussfaktoren auf den Differenzdruck zwischen innen und außen konnte der Abtaubetrieb der Wärmepumpe sowie die Vereisung der Wärmetauscher identifiziert werden. Das entwickelte Verfahren ist gegen diese Einflüsse aber sehr robust.

Der zeitliche Fehler bei der Erfassung der Fensteröffnung über die Drd-Sequenz im 15-Minuten-Takt liegt im Bereich von wenigen Minuten pro Tag, ist aber abhängig von der Häufigkeit der Änderungen des Fensteröffnungszustandes. Für eine Bewertung der zusätzlichen Lüftungswärmeverluste reicht die Genauigkeit aber aus. Alle Feldtestgebäude erfüllten die im Vorfeld definierten Dichtheitsanforderungen an den Einsatz der Drd-Sequenz.

Die Fensteröffnungshäufigkeit im Winter lag in den Gebäuden des Feldtests noch unter denjenigen anderer Untersuchungen zur Fensteröffnung in Passivhäusern, so dass die ebenfalls entwickelte Nutzeranzeige zur Rückmeldung der energetischen Auswirkungen der Fensteröffnung auf den Heizwärmeverbrauch nur selten Veränderungen erbrachte. Es wurden zwei unterschiedliche Skalierungen umgesetzt, um die Sensitivität zu erhöhen. Dennoch zeigten die Bewohner (siehe unten) ein Interesse an den Ergebnissen der Anzeige, um ihr Lüftungsverhalten zu optimieren.

#### Bewohnerbefragung

Die Befragung der Bewohner der Feldtestgebäude ergab eine gute bis sehr gute Bewertung der Luftqualität mit LQ-Regelung. Probleme mit der Luftqualität einzelner Räume wurden untersucht und konnten auf nicht optimale Ausführungen oder nicht fachgerechte nachträgliche Änderungen an der Lüftungsanlage zurückgeführt und im Nachhinein beseitigt werden. In der Befragung wurde die Luftqualität der Gebäude nach längerer Abwesenheit als gut eingestuft, und auch die Abfuhr von besonderen Gerüchen, z. B. durch Kochen, erfolgte problemlos. Die Geräuschentwicklung der Lüftungsanlage wurde als nicht oder nur wenig störend eingestuft.

Die Bewohner wünschten sich neben dem Automatikbetrieb der LQ-Regelung teilweise noch Einstellmöglichkeiten für eine Temperaturabsenkung nachts, die für den Feldversuch deaktiviert war (wegen der Kopplung mit dem Volumenstrom). Ob eine Lüftungsanlage mit einer typischen Auslegung für Wohngebäude Wünsche wie die Unterstützung der sommerlichen Nachtlüftung oder individuelle Einstellung des Volumenstroms einzelner Räume erfüllen kann, ist aber fraglich.

Die Drd-Sequenz wurde von den Bewohnern kaum als störend empfunden. Aufgrund der sehr geringen Fensteröffnungszeiten im Winter wurde bei der Lüftungsanzeige kaum eine Veränderung bemerkt. Aus diesem Grund wurde in der letzten Heizperiode auch eine "schärfere" Einstellung gewählt, die bereits bei relativ kurzer Fensteröffnung eine Auswirkung auf den Heizenergieverbrauch anzeigt. Aufgrund der kaum vorhandenen Fensteröffnung ergab sich dadurch nur eine minimal verbesserte Dynamik der Anzeige.

Darüber hinaus wurde eine hohe Zufriedenheit mit den Passivhäusern, der Anlagentechnik und den Heizkosten ermittelt.

#### Energieverbräuche in den Feldtestgebäuden

Alle Feldtestgebäude verfügten über eine thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung sowie eine Fortluftwärmepumpe zur Beheizung des Gebäudes. Reicht die Wärmepumpe entweder zur Beheizung oder zur Nacherwärmung des Brauchwassers nicht aus, so kann direktelektrisch nachgeheizt werden. Die Auswertung der Stromverbräuche ergab, dass der Endenergieverbrauch für Heizung, Warmwasserbereitung und Hilfsenergie bei allen Feldtestgebäuden zwischen 16,5 kWh/(m²a) und 38,5 kWh/(m²a) lagen, wobei das eine Gebäude ohne Erdreichwärmetauscher die höchsten Endenergieverbräuche aufwies. Auch bei Betrachtung des gesamten Primärenergieverbrauchs für Heizung, Warmwasser, Hilfsenergie und Haushaltsstrom erreichten die Gebäude im Mittel mit 102 kWh/(m²a) sehr gute Ergebnisse.



### Ausblick und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Aus den Erfahrungen des Forschungsprojektes, insbesondere aus der Feldphase, wurden zahlreiche Erkenntnisse für die Übertragbarkeit der LQ-Regelung und der Drd-Sequenz gesammelt und Vereinfachungen im Anlagenkonzept entwickelt.

Eine Recherche zeigte, dass mehrere geeignete VOC-Sensoren am Markt verfügbar sind, die künftig für eine LQ-Regelung eingesetzt werden können.

Zur Vereinfachung der Regelung wird der Verzicht auf den VOC-Sensor in der Zuluft vorgeschlagen, was die Materialkosten reduziert und die Regelung vereinfacht. Stattdessen wurde eine Korrekturfunktion entwickelt, mit der bei der Berechnung der Quellstärke der VOC-Wert der Zuluft aus dem Abluftwert abgeschätzt werden kann. Dadurch ist eine Reaktion der Lüftungsanlage auf besondere Luftbelastungen in der Zuluft aber nicht mehr möglich. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Betriebssicherheit durch diese Maßnahme gesteigert werden kann.

Wenn die LQ-Regelung die Anwesenheit von Personen im Gebäude erkennt und den Volumenstrom entsprechend anpasst – das zeigen die Messdaten aus den Feldtestgebäuden – dann ist eine separate Feuchteregelung zumindest in energetisch hochwertigen Gebäuden verzichtbar, so dass sich die Gesamtregelung weiter vereinfacht.

Ein interessanter Einsatzbereich zeichnet sich bei Abluftanlagen ab, da dort neben der Einsparung von Lüfterstrom auch die Lüftungswärmeverluste mit der LQ-Regelung deutlich reduziert werden können.

Die Drd-Sequenz ist nur für Gebäude mit Lüftungsanlage geeignet, könnte aber auch in Gebäuden mit Abluftanlage eingesetzt werden. Aufgrund des dann vorhandenen Unterdrucks im Gebäude ist sogar eine kontinuierliche Erfassung des Öffnungszustandes ohne spezielle Sequenz möglich. Besonders interessant ist der Einsatz in vermieteten Gebäuden, wobei die Luftdichtheit gegenüber den Nachbarwohnungen beachtet werden muss.



# 1 Einleitung und Überblick über das Forschungsvorhaben

# 1.1 Einleitung

An mechanische Lüftungsanlagen werden von den Bewohnern unterschiedliche Erwartungen gestellt. So sollen die Anlagen den Wohnkomfort erhöhen, eine gute Luftqualität in der Wohnung sichern und Feuchteschäden durch einen zu geringen Luftaustausch verhindern. Gleichzeitig soll eine deutliche Energieeinsparung gegenüber einer reinen Fensterlüftung erreicht werden. Die Akzeptanz von Lüftungsanlagen bei den Bewohnern hängt entscheidend von dem Umfang ab, in welchem diese Erwartungen erfüllt werden.

Voraussetzung hierfür ist zunächst eine gute Planung. Ebenso wichtig ist jedoch eine angepasste Betriebsführung in der Nutzungsphase. Zentrale Größe ist dabei die Höhe des geförderten Volumenstroms. Beim Volumenstrom ergibt sich jedoch aus den Erwartungen ein Zielkonflikt. Soll eine gute Luftqualität erreicht werden, ist ein hoher Volumenstrom erforderlich. Dies kann aber zu einem Anstieg des Energieverbrauchs und zu höheren Heizkosten führen. Wird der Volumenstrom reduziert, ergibt sich zwar ein geringerer Energieverbrauch, dies kann aber zu einer schlechten Luftqualität führen.

In dem mit diesem Bericht dokumentierten Forschungsprojekt sollte eine Lüftungsregelung entwickelt werden, die eine hohe Luftqualität sichert und Feuchteschäden zuverlässig vermeidet. Hierzu wurde der Volumenstrom von der Regelung kontinuierlich an den sich über den Tag ändernden hygienisch und bauphysikalisch erforderlichen Volumenstrom mit einer Luftqualitätsregelung (LQ-Regelung) angepasst. Ziel war es, so viel Volumenstrom wie nötig aber so wenig wie möglich in das Gebäude zu fördern. Gegenüber einer ungeregelten Anlage sollte erreicht werden, dass die hier entwickelte energieeffiziente Komfortlüftungsregelung bei vergleichbarer oder höherer Luftqualität und höherem Komfort zu einem geringeren Energieverbrauch führt.

Möglich wurde diese Komfortlüftungsregelung durch die Weiterentwicklung des LuQaS-VOC-Sensors, der die Luftqualität (VOC) misst. Dazu wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über den Projektträger Jülich im Vorfeld mehrere Forschungsvorhaben gefördert.

Bei Gebäuden mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung wird der Energieverbrauch neben dem geförderten Volumenstrom in großem Maß von der Fensteröffnungsdauer beeinflusst. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher ein Ansatz weiterentwickelt, den Fensteröffnungsstatus über die Lüftungsanlage zu messen und deren Auswirkung auf den Energieverbrauch für die Nutzer zu visualisieren. Hierzu ermittelt die Lüftungsanlage kontinuierlich den Fensteröffnungszustand mit Hilfe der Druckdifferenz-Methode (Drd). Zusammen mit dem Messwert der Außentemperatur werden dann die energetischen Auswirkungen abgeschätzt. Diese Information wird in geeigneter Weise an die Bewohner zurückgemeldet.

# 1.2 Vorstellung des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben "Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes" wurde initiiert, um den Betrieb von Wohnungslüftungsanlagen durch die Erweiterung um eine luftqualitätsgeführte Volumenstromregelung zu ermöglichen und damit verbunden eine der Nutzung der Wohngebäude angepasste automatische Beeinflussung des Volumenstroms in besonders Energie sparenden Gebäuden zu entwickeln. Außerdem sollte ein bereits in einem vorangegangenen Projekt entwickeltes Konzept zur Erfassung des Fensteröffnungszustandes des Gebäudes über die Lüftungsanlage mit einer Information der Nutzer über die energetischen Konsequenzen ihres Fensterlüftungsverhaltens gekoppelt werden.

Das Projekt wurde im Oktober 2006 gestartet und unterteilte sich in die drei wesentlichen Teilschritte:



- 1. Theoretische Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten der Luftqualitätssensoren in Wohngebäuden, Überlegungen zu möglichen Regelkonzepten bei Wohnungslüftungsanlagen mit Luftqualitätssensoren und sondierende Messungen über die zu erwartenden Signaldynamiken mit dem LuQaS-Sensor der Firma ETR. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden mit einem Teilbericht bereits dokumentiert [Großklos et. al 2011].
  Darüber hinaus theoretische Untersuchung zum Einfluss der Gebäudedichtheit, der Lage von Leckagen sowie zur Positionierung der Außendruckmessstelle beim Einsatz der Druckdifferenzmethode (Drd-Methode), die in einem vorangegangenen Projekt entwickelt und erstmals praktisch
  - ckagen sowie zur Positionierung der Außendruckmessstelle beim Einsatz der Druckdifferenzmethode (Drd-Methode), die in einem vorangegangenen Projekt entwickelt und erstmals praktisch erprobt wurde [Großklos, Knissel 2002]. Weiterhin wurde ein Berechnungsalgorithmus zur Abschätzung der energetischen Konsequenzen von Fensteröffnung bei unterschiedlichen Außentemperaturen erarbeitet, eine Nutzerrückmeldung für die energetischen Auswirkungen von Fensteröffnung entwickelt und schließlich die Randbedingungen für den Einsatz der Drd-Methode in Gebäuden mit offenen Feuerstellen diskutiert. Auch dieser Teil des Arbeitspaketes wurde mit einem Teilbericht abgeschlossen [Knissel et. al 2011].
- 2. Entwicklung einer luftqualitätsgeführten Volumenstromregelung für Wohngebäude bei gleichzeitiger Umsetzung der Drd-Methode zur Rückmeldung der energetischen Auswirkungen von Fensterlüftung. Die Entwicklungen wurden überwiegend im Institut Wohnen und Umwelt durchgeführt und später an einem Teststand bei der Firma Schwörer Haus optimiert. Anschließend wurden die erforderlichen Modifikationen in Wohnungslüftungsanlagen mit Fortluftwärmepumpen der Firma Schwörer Haus KG/BauInfoCenter vorgenommen und vier Prototypen dieser Anlagentechnik hergestellt.
- 3. Im sich anschließenden Feldversuch über mindestens 1,5 Jahre wurden die Regelungen und die Nutzerrückmeldung in vier Einfamilienhäusern an unterschiedlichen Standorten bei Wohnnutzung der Gebäude durch je eine vierköpfige Familie erprobt und weiter optimiert. Dazu gehörte auch eine Nutzerbefragung der beteiligten Haushalte. Die Entwicklung der Regelung und der Feldversuch und seine Ergebnisse werden im vorliegenden Bericht dokumentiert.

Tab. 1 zeigt die am Forschungsprojekt direkt beteiligten Institutionen und Unternehmen, wobei die Projektleitung bei Institut Wohnen und Umwelt lag.

Tab. 1: Beteiligte im Forschungsprojekt und Aufgabenverteilung

Institution / Firma	Aufgaben					
Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Darmstadt)	Theoretische Untersuchungen, Entwicklung der LQ-Regelung, Erprobung am Teststand, Durchführung Feldtest (Montage, Betrieb, Optimierung					
Ansprechpartner: Marc Großklos, Prof. Dr. Jens Knissel (jetzt Uni Kassel), Margrit Schaede	der Regelung), Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse, Projekt- leitung					
Schwörer Haus KG (Hohenstein)	Beratung bei der Entwicklung der LQ-Regelung, Bereitstellung des Test-					
Ansprechpartner: Ralf Jaudas	raumes, Unterstützung bei der Akquisition der Gebäude im Feldtest, Unterstützung der Montage der Mess- und Regeltechnik					
AL-KO Therm GmbH (früher ETR Elektro- nik) (Dortmund) Ansprechpartner: Reinhard Patzer	Beratung bei der Messung von VOC-Werten und beim Einsatz der Luft- qualitätssensoren, Lieferung der LuQaS-Triple-Sensoren, Nachkali- brierungen der VOC-Sensoren					
Ingenieurbüro ebök GbR (Tübingen)	Untersuchung der Konsequenzen des Einsatzes der Drd-Methode bei					
Ansprechpartner: Prof. Dr. Claus Kahlert und Johannes Werner	Gebäuden mit offenen Feuerstätten, messtechnische Überprüfung der Luftdichtheit der Feldtestgebäude nach Abschluss des Feldversuches					



Nicht direkt im Projekt eingebunden, aber als Vertragspartner der Firma Schwörer Haus setzte die Firma Hermes Electronik (Essen) erforderliche Modifikationen in der "Standard"-Regelung der Lüftungsgeräte/Wärmepumpen der Firma Schwörer Haus für die Datenkommunikation und Ansteuerung der Lüftungsmotoren um.

Das Projekt wurde finanziell gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen: 0327398A) bzw. den Projektträger Jülich (PTJ), wofür sich die Projektpartner ausdrücklich bedanken möchten.

Ein ganz besonderer Dank gilt den Eigentümern der vier Feldtestgebäude für die Bereitschaft, ihre Gebäude für das Projekt zur Verfügung zu stellen und das Projektteam bei Vorortterminen und den Befragungen zu unterstützen.

# 1.3 Ablauf des Forschungsvorhabens

Die oben beschriebenen Arbeitsphasen wurden teilweise zeitgleich im Projekt durchgeführt, insbesondere beim Übergang vom ersten Prototyp zu den Anlagen in den Feldtestgebäuden. Tab. 2 zeigt die einzelnen Schritte sowie den Zeitrahmen der Umsetzung. Die theoretischen Untersuchungen zu LQ-Regelung und Drd-Sequenz dauerten von Oktober 2006 bis Oktober 2007. Anschließend wurde mit der Umsetzung der Regelung am Computer und an Versuchsaufbauten im IWU begonnen. Neben der eigentlichen Regelung musste auch die Kommunikation mit der Standard-Regelung der Gebäude sowie die Implementierung der Messdatenerfassung für die, zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannten, Feldtestgebäude realisiert werden.

Der erste Prototyp der Gesamtregelung mit Messdatenerfassung wurde dann von Mai 2009 bis Oktober 2009 an einem Testraum bei der Firma Schwörer Haus im Dauertest an einer realen Lüftungsanlage getestet. Diese Versuche wurden genutzt, um die Regelung und insbesondere die Kommunikation mit der Standardregelung zu optimieren.

Parallel wurde im November 2008 das erste Gebäude des Feldtests errichtet, bezogen und mit der kompletten Messtechnik ausgestattet. Ab Januar 2009 liegen von diesem Gebäude Messdaten – noch ohne LQ-Regelung und Drd-Sequenz – vor. Das zweite Feldtestgebäude wurde im März 2009 errichtet (Inbetriebnahme Messtechnik Mitte April 2009), das dritte im Juli 2009 (Inbetriebnahme Messtechnik Mitte Juli 2009), das vierte im Januar 2011 (Inbetriebnahme Messtechnik aufgrund eines fehlenden Telefonanschlusses April 2011).

Nach Abschluss der Versuche am Teststand wurde im Oktober 2009 ein erster Versuch zum Einbau der neuen Regelung im ersten Feldtestgebäude unternommen. Allerdings stellte sich dabei heraus, dass die bis zu diesem Zeitpunkt eingesetzten Regelungen und diejenige der Feldtestgebäude nicht kompatibel waren und Nacharbeiten erforderlich wurden, so dass die neue Regelung erst im März 2010 in Haus 1 in Betrieb genommen werden konnte. Nach einer Test- und Optimierungsphase wurde bei den Feldtestgebäuden 2 und 3 die neuen Regelungen im Mai 2010 bzw. August 2010 in Betrieb genommen. Haus 4 wurde schließlich sofort mit der neuen Regelung installiert und diese wurde direkt aktiviert.

In der anschließenden Mess- und Optimierungsphase wurden auch die Hauptbewohnerbefragung im Mai 2011 durchgeführt. Zusätzlich fanden je nach Bezugsdauer noch bis zu 7 Kurzbefragungen statt, in denen die Erfahrungen der Bewohner mit der LQ-Regelung und der Drd-Sequenz erhoben wurden.

Der Feldtest lief bis Ende Mai 2012, danach wurde die Messtechnik demontiert und die Daten ausgewertet.



Tab. 2:	Zeit	lich	er A	blau	ıf de	es P	roje	kte	s												
Mellensteine	Berichte	Bewohnerinterview	Betriebszeit LQ-Regelung Haus 4	Betriebszeit Messtechnik Haus 4	Betriebszeit LQ-Regelung Haus 3	Betriebszeit Messtechnik Haus 3	Betriebszeit LQ-Regelung Haus 2	Betriebszeit Messtechnik Haus 2	Betriebszeit LQ-Regelung Haus 1	Betriebszeit Messtechnik Haus 1	Optimierung Prototypen	Test des Prototyps auf dem Teststand	Aufbau und Betreuung Messung	Entwickeln der Prototypen	Umsetzen der Regelung	Reaktion der Lüftungsanlage	Einsatzrandbedingunen DrD	Einsatzrandbedingungen LuQa- Sensor	Zeitablauf		
Projektbeginn																				Okt 06	20
																				Nov 06 Dez 06	2006
																				Jan 07 Feb 07	
																				Mrz 07 Apr 07	
																				Mai 07 Jun 07	2007
																				Jul 07 Aug 07	17
																				Sep 07 Okt 07	
Ende Phase I (Theorie)																				Nov 07 Dez 07	
																				Jan 08 Feb 08	
																				Mrz 08 Apr 08	
																				Mai 08 Jun 08	2008
																				Jul 08 Aug 08	8
																				Sep 08 Okt 08	
Errichtung Haus 1	-																			Nov 08 Dez 08	
																				Jan 09 Feb 09	
Errichtung Haus 2																				Mrz 09 Apr 09	
Errichtung Haus 3																				Mai 09 Jun 09	2009
																				Jul 09 Aug 09	09
Einbau Regelung Haus 1																				Sep 09 Okt 09	
																			_	Nov 09 Dez 09	
																				Jan 10 Feb 10	
Ende Phase II (Prototypen)																				Mrz 10 Apr 10	
																				Mai 10 Jun 10	20
																			_	Jul 10 Aug 10	2010
																				Sep 10 Okt 10	
Errichtung Haus 4																			_	Nov 10 Dez 10	
	_ =																			Jan 11 Feb 11	
	Teilbericht Phase 1																		_	Mrz 11 Apr 11	
Bewohnerbefragung	<u> 1 불</u>																		_	Mai 11 Jun 11	20
																				Jul 11 Aug 11	2011
																				Sep 11 Okt 11	
																				Nov 11 Dez 11	
																				Jan 12 Feb 12	
																				Mrz 12 Apr 12	
Ende Feldtest	2																			Mai 12 Jun 12	2012
	Teilbericht Phasen 2 und																			Jul 12 Aug 12	2
	richt 2 und																			Sep 12 Okt 12	
Projektende	ω																			Nov 12	



# 1.4 Stand der Technik der Luftqualitätsregelung von Wohnungslüftungsanlagen

Der Volumenstrom wird in Wohnungslüftungsanlagen in der Regel kontinuierlich über 24 Stunden am Tag gefördert. Die Höhe des Volumenstroms kann vom Benutzer üblicherweise manuell durch die Auswahl unterschiedlicher Lüfterstufen eingestellt werden. Zusätzlich besitzen die meisten Lüftungsanlagen ein Zeitprogramm, über das die Lüfterstufen z. B. im Wochenrhythmus vorgegeben werden können. Unterschiede existieren außerdem in dem Umfang, mit dem die Lüfterstufen variiert werden können.

Die im vorliegenden Forschungsvorhaben eingesetzten Wohnungslüftungs-Kompaktaggregate mit Wärmepumpe verfügen neben einem Zeitprogramm ebenfalls über eine begrenzte Möglichkeit zur Beeinflussung der Raumluftfeuchte, indem der Volumenstrom der Anlage bei Unterschreiten einer eingestellten Außentemperatur um 3 % reduziert wird. Weiterhin ist ein CO<sub>2</sub>-Sensor grundsätzlich verfügbar.

Optional bieten einige Firmen auch bereits Luftqualitätsfühler an. Dieser wird jedoch meist nur verwendet, um zwischen zwei Lüfterstufen zu schalten. Beim Überschreiten eines Sollwertes wird die Lüfterstufe von "normal" auf "Party" erhöht und abhängig von dem Signal eines CO<sub>2</sub>- oder VOC-Sensors wird die Lüfterstufe beim Unterschreiten des Sollwertes wieder vermindert. Alternativ/additiv kann auch ein Feuchtesensor angeschlossen werden. Hier wird beim Überschreiten des Sollwertes z. B. für eine Stunde auf die höchste Lüfterstufe geschaltet. Auch im Bereich von raumweise angeordneten Lüftern ist vereinzelt eine Regelung abhängig vom VOC- oder CO<sub>2</sub>-Messwert verfügbar.

Kontinuierliche Volumenstromregelung mit VOC-Sensoren wurde in den derzeit verfügbaren Wohnungslüftungsanlagen nur selten realisiert. Ein Grund kann das bisher existierende Problem der Querempfindlichkeit von VOC-Sensoren gegenüber Feuchte sowie die fehlende Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit der Messwerte sein. Der LuQaS-VOC-Sensor dagegen wurde so weiterentwickelt, dass die Querempfindlichkeit stark reduziert wurde und auch im Zeitverlauf reproduzierbare Messwerte generiert werden können.

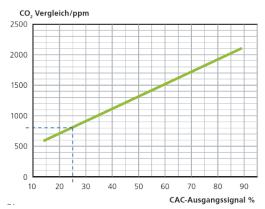
Untersuchungen anderer Autoren [Peper et. al 2007, S. 42] zweifeln die Einsetzbarkeit von VOC-Sensoren zur Regelung von Lüftungsanlagen zur Wohnungslüftung an. Hauptgrund ist der festgestellte Sensordrift bzw. die Notwendigkeit, die Sensoren regelmäßig nachzukalibrieren.

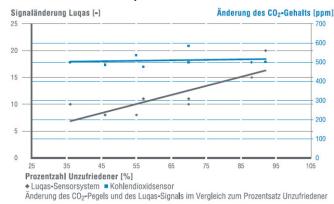
Als Kompromiss zwischen Erfassung der VOC-Konzentrationen im Raum und dem Verzicht auf eine Luftqualitätsregelung werden teilweise CO<sub>2</sub>-Sensoren verwendet. Diese messen die durch menschliche Aktivität entstehende CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum und haben den Vorteil, dass es sich nur um einen einzigen Parameter handelt, dessen Messwert auf bekannte Stoffpegel mit nachgewiesener Wirkung auf den Menschen kalibriert werden kann, so dass absolute Schwellwerte für eine Regelung verwendet werden können. Gerüche und Verunreinigungen, die z. B. durch menschliche Aktivität im Gebäude, Rauchen, die Wohnungseinrichtung oder auch die Außenluft in das Gebäude eingebracht werden, können mit CO<sub>2</sub>-Sensoren nicht erkannt werden; somit ist auch keine Reaktion der Lüftungsanlage möglich.

Im Laufe der Projektlaufzeit wurden weitere Ansätze zur Regelung des Volumenstroms in Räumen oder Gebäuden auf Basis von VOC-Sensoren umgesetzt. So erlaubt der AirQualitizer der Firma Al-KO Therm den Volumenstrom nach Verunreinigungslast zu regeln. Der Kern des AirQualitizers ist dabei ebenfalls der LuQaS-Sensor, der jedoch die VOC-Messwerte auf einer Dezipol-Skala ausgibt. Die Messwerte werden über eine MP-Bus-Schnittstelle an die RLT-Anlage übermittelt. Gleichzeitig dient der Airqualitizer als Temperatur- und Volumenstrombedienteil und visualisiert die Luftqualität. Da er sozusagen als "Raum- und Luftqualitätsthermostat" konzipiert ist, ist die Ansteuerung einer Wohnungslüftungsanlage damit zwar möglich, da die Lüftung in Wohngebäuden üblicherweise kaum raum- oder zonenweise Regeleinrichtungen besitzt, werden die Fragen, die im vorliegenden Forschungsprojekt bearbeitet wurden, nicht obsolet (Platzierung von möglichst wenig Sensoren, geeigneter Einbauort, Regelstrategien bei unterschiedlicher Nutzung des Gebäudes, …).



Bild 1: Beispiele von Anpassungskurven für den VOC-Messwert: links Clean Air Control der Fa. [Swegon 2012] mit Zusammenhang von Messwert (CAC output in %) und CO<sub>2</sub>-Konzentration; rechts AirQualitizer der Fa. [AL-KO Therm 2012], Ausgabe der Luftqualität als Prozentsatz der mit der Luftqualität unzufriedener Testpersonen





Um die Problematik des Fehlens absoluter Schwellwerte für VOC-Messwerte zu umgehen, wurden von einigen Anbietern aufgrund von Erfahrungswerten Umrechnungsalgorithmen entwickelt, die den VOC-Messwert z. B. als CO<sub>2</sub>-äquivalenten Messwert ausgeben (Bild 1 links) oder die Ausgabe in einer empirischen Dezipolskala (Bild 1 rechts). Zur Frage, wie gut diese Umrechnungen die Dynamik der VOC-Messung abbilden, konnten keine veröffentlichen Ergebnisse gefunden werden.

Schließlich ist beim Einsatz von VOC- und CO<sub>2</sub>-Sensoren die Frage der geeigneten Kalibrierung zu berücksichtigen. Viele Sensoren verwenden eine automatische Selbstkalibrierung, bei der über einen bestimmten Zeitraum die niedrigsten gemessenen Werte als Basiswert verwendet werden ("Automatic Background Calibration"). Problematisch ist dabei, dass, wenn der Volumenstrom bei niedrigen Messwerten reduziert wird, der Referenzwert tendenziell ansteigt. Differenzen unterschiedlicher Konzentrationen werden zwar weiterhin korrekt gemessen, der Basiswert kann sich jedoch verschieben, wodurch die Verwendung fester Schwellwerte erschwert wird. [Gieseler, Wiegleb 2012] haben zum Thema Kalibrierung vom CO<sub>2</sub>-Sensoren den ersten Teil einer Untersuchung veröffentlich. Sie kommt zum Schluss, dass es bei CO<sub>2</sub>-Sensoren große Differenzen zwischen den Messwerten gibt. Als wichtiger Einflussfaktor wurde auch hier die Art der automatischen Kalibrierung identifiziert. Eine vergleichbare Untersuchung für VOC-Sensoren ist nicht bekannt.

Während der Projektlaufzeit wurden wesentliche Normen zur Lüftung in Gebäuden überarbeitet, so dass sich auch die Anforderungen an die Planung und den Betrieb von Lüftungsanlagen in Gebäuden verändert haben. So werden in [DIN EN 13779] (2007) Klassen für die Raumluftqualität definiert (IDA1 - IDA4). Zwar gilt die Norm streng genommen nur für Nichtwohngebäude, dennoch liefert sie Hinweise, die auch auf Wohngebäude übertragen werden können. In Anhang A der Norm werden die IDA-Klassen über den zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft oberhalb der Umgebungskonzentration definiert. Der Standardwert von IDA1 liegt dann bei 750 ppm CO<sub>2</sub>, bei IDA2 bei 900 ppm und IDA3 bei 1200 ppm. Weiterhin werden mögliche Arten der Regelung der Raumluftqualität festgelegt. Während übliche Lüftungsregelungen mit Zeitprogrammen die Stufe IDA-C3 erreichen, wird die im Forschungsprojekt entwickelte Regelung in die beste Stufe IDA-C6 eingeordnet. Die [DIN EN 15251] (2007) regelt unter anderem die Raumluftqualität in Gebäuden, somit auch in Wohngebäuden. Dort werden Anwendungen der vier Kategorien definiert. Für Neubauten wird Kategorie II (normales Maß) empfohlen, für Bestandsgebäude Kategorie III (annehmbares, moderates Maß). Kategorie I wird für Gebäude mit sehr hohen Erwartungen an die Luftqualität (z. B. kranke oder alte Personen sowie sehr kleine Kinder) empfohlen.

Zum Thema automatische Erfassung des Fensterzustandes über die Beeinflussung der Lüftungsanlage sind bisher keine anderen Veröffentlichungen oder Arbeiten von Dritten bekannt geworden, so dass hier in diesem Forschungsprojekt Neuland betreten wurde.



# 2 Beschreibung der neu entwickelten Regelung

Zur Umsetzung der im Forschungsprojekt neu entwickelten Regelung wurde auf einem Messcomputer eine kombinierte Mess- und Regelschaltung mit dem Programm Dasylab (Version 10) realisiert, die einerseits die Messdatenerfassung aller Fühler und Zähler übernimmt, andererseits die verschiedenen gestaffelten Regelungsfunktionen sowie die Druckdifferenzmethode und die Kommunikation mit der Standardregelung übernimmt.

Das im Rahmen der Prototypentwicklung entworfene und auf dem Teststand sowie später im Feldtest verbesserte Regelschema der Luftqualitäts-Regelung (LQ) und der Drd-Methode mit Nutzerrückmeldung ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Es sind mehrere farblich gruppierte Blöcke vorhanden, die jeweils eine Funktionseinheit darstellen.

Regelung Forschungsprojekt Standard-Anlagentechnik BauInfoCenter WRG 134 (Dasylab) Luftqualitätsregelung VOCZu, Gesamt-Standard-VOCAb. regelung regelung VolZu, VolAb Start Drd-Sequenz Einstellung Feuchte-Luftvolumenstrom regelung FeuchteAbluft; Feuchte aller Status Fensterkontakte Messdaten-Erfassung erfassung Fensterzustand Messdaten-Ausgabe speicherung Bewertung Auslesen Fensteröffnung Anlagenparameter

Bild 2: Funktionsschema von Regelungen und Datenerfassung im Forschungsprojekt

Die Messdatenerfassung (blau, siehe Kapitel 4) liest alle vorhandenen Fühler und Zähler in Minutenschritten aus und gibt die für die Regelung benötigten Messwerte an die Regelmodule weiter. Zusätzlich werden aus den Minutenwerten Stundenwerte gebildet und abgespeichert.

Die LQ-Regelung (orange, siehe Kapitel 2.1) erhält aktuelle Messwerte der VOC-Konzentrationen in Zu- und Abluft sowie die Volumenströme der Lüftungsanlage von der Messdatenerfassung. Daraus wird, wie weiter unten detaillierter beschrieben, der Einstellwert für die Lüfterstufe der Luftqualitätsregelung berechnet.

Die Feuchteregelung (lila) erhält Feuchtemesswerte aus der Abluft oder aus den einzelnen Räumen und berechnet daraus die erforderliche Lüftungsstufe unter dem Aspekt des Feuchteschutzes (siehe Kapitel 2.2).

LQ-Regelung und Feuchteregelung fließen in der Gesamtregelung (braun, Kapitel 2.3) zusammen, wo die zum aktuellen Zeitpunkt (Sommer/Winter) relevante Regelgröße bestimmt wird. Die Gesamtregelung sendet die berechnete Lüfterstufe an die Standardregelung der Anlage, die dann die Lüftermotoren ansteuert. Die Ansteuerung bildet die Schnittstelle zwischen der Neuentwicklung im Forschungsprojekt und der Stan-



dardregelung, in der auch Schutzfunktionen z. B. für den Betrieb und das Abtauen der Fortluftwärmepumpe integriert sind.

Die Lüftungsanlage verfügt über 3 Betriebsstufen. Stufe 2 ist die Normallüftung und entspricht dem Auslegungsfall. Stufe 1 ist ein um ca. 25 % abgesenkter Betrieb, Stufe 3 (Partylüftung) erhöht den Volumenstrom um ca. 25 % und wird in der Standardregelung nach 30 Minuten wieder auf Stufe 2 zurückgesetzt.

Einen weiteren Funktionsblock (grün) bildet die Sequenz zur Erfassung des Fensterzustandes (Druckdifferenz-Methode – Drd). Über ein Zeitprogramm steuert diese den Start der Drd-Sequenz alle 15 Minuten, in der die Ventilatoren erst auf Stufe 2 (Normalbetrieb) gesetzt werden, um einen definierten Startpunkt für die Sequenz zu haben, die dann innerhalb von 20 Sekunden durchlaufen wird. Dabei wird der Zuluftventilator in seiner Drehzahl stark gedrosselt, der Abluftventilator läuft aber normal bzw. auf erhöhter Stufe weiter. Eine detaillierte Beschreibung der Drd-Methode findet sich in [Großklos, Knissel 2002], eine Kurzfassung in Kapitel 2.4.

# 2.1 Luftqualitätsregelung

Die Entwicklung der Luftqualitätsregelung (LQ-Regelung) bildet eine der zentralen Aufgaben im Forschungsprojekt. Sie ordnet auf Basis von aktuellen VOC-Messwerten in der Abluft den Verunreinigungspegel in den Kontext der Werte der letzten Wochen und Monate ein und bestimmt darüber hinaus die erforderliche Lüfterstufe.

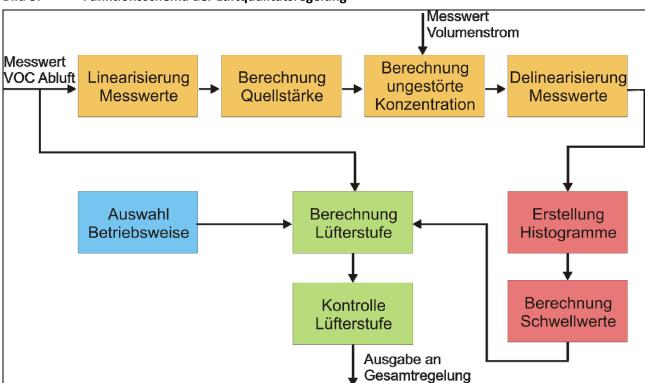


Bild 3: Funktionsschema der Luftqualitätsregelung

Bild 3 zeigt die einzelnen (Grund-)Funktionen der LQ-Regelung. Da die Kennlinie der LuQaS-Sensoren nicht linear ist und somit bei steigender Konzentration eines Stoffes das Signal nicht linear ansteigt, wird zu Beginn eine Linearisierung der Messwerte durchgeführt (siehe Teilbericht 1 zu den Einsatzgrenzen der LuQaS-Sensoren). Die verwendete Gleichung zur Linearisierung lautet:



$$C_{Lin} = (\frac{C_{Digits}}{41.4} - 1,57)^{2,34}$$
 (Gl. 1)

mit  $C_{\text{Digits}}$  als VOC-Messwert und  $C_{\text{Lin}}$  dem linearisierten Messwert.

Mit den linearisierten Messwerten wird die Quellstärke  $\mathcal Q$  des VOC-Pegels für kurze Zeitschritte (z. B. Minutenwerte) berechnet.

$$Q = V_{Geb} * \frac{C_{Abluft,2} - C_{Abluft,1}}{t_2 - t_1} + \dot{V}_{Anlage} * \left(C_{Abluft} - C_{Zuluft}\right) \tag{GI. 2}$$

Eingangsgrößen sind die VOC-Konzentrationen der Abluft im aktuellen und im vorangegangenen Zeitintervall ( $C_{Abluft,1/2}$ ), das anzusetzende belüftete Gebäudevolumen  $V_{Geb}$  [m³], der aktuelle Volumenstrom der Lüftungsanlage  $\dot{V}_{Aplage}$  [m³/h] sowie die Differenz der VOC-Konzentrationen in Zu- und Abluft.

Diese Quellstärke wird dazu verwendet, zusammen mit dem Ist-Volumenstrom die VOC-Konzentration im Gebäude zu berechnen, die sich eingestellt hätte, wenn die Lüftungsanlage kontinuierlich in Stufe 2 (Normallüftung) betrieben worden wäre. Diese Information ist wichtig, um eine durch die LQ-Regelung unverfälschte Häufigkeitsverteilung der VOC-Werte im Gebäude zu berechnen. Die ungestörte VOC-Konzentration in der Abluft  $C_{Abluft.ungestört}$  errechnet sich dann mit folgender Formel:

$$C_{Abluft,ungestört} = C_{Zuluft,2} + (C_{Abluft,1} - C_{Zuluft,2}) * e^{(-n*t)} + \frac{Q}{n*V_{Coh}} * (1 - e^{(-n*t)})$$
 (GI. 3)

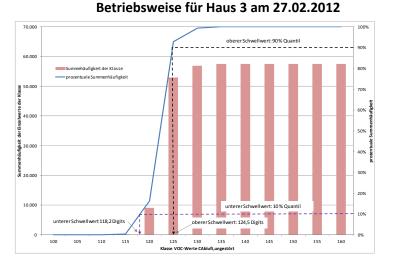
Dabei sind  $C_{Abluft,1}$  und  $C_{Zuluft,2}$  die VOC-Konzentration der Zuluft im vorangegangenen und im aktuellen Zeitintervall, n der Anlagenluftwechsel, t die Länge des Zeitintervalls und  $V_{Geb}$  das Gebäudevolumen.

Anschließend werden die berechneten ungestörten VOC-Konzentrationen wieder delinearisiert, um einen Vergleich mit Messwerten zu ermöglichen.

$$C_{Delin} = 41,4*\ln(C_{Abluft,ungest\"{o}rt})^{0,43} + 65$$
 (GI. 4)

In einem weiteren Berechnungsschritt werden die delinearisierten ungestörten Abluftkonzentrationen in 2 Histogrammen (Häufigkeitsverteilungen) abgespeichert. Aus diesen Histogrammen werden mit voreingestellten Quantilen die Schwellwerte der LQ-Regelung festgelegt. Ein Histogramm wird für die Berechnung der kurzfristigen Schwellwerte der LQ-Regelung (Neuberechnung ca. 14 Tage), das andere für die langfristigen Schwellwerte (Neuberechnung ca. 41 Tage) verwendet. Die optimierten Werte der Quantile sind in Kapitel 5.2.1 dokumentiert.

Die Berechnung der Schwellwerte aus den Histogrammen ist in Bild 4 dargestellt. Die ungestörten VOC-Werte der Abluft wurden in Schritten von 5 Digits im Bereich von 90 Digits bis 240 Digits in Klassen<sup>1</sup> definiert Bild 4: Schematische Darstellung der Berechnung der Schwellwerte auf Basis des Histogramms der ungestörten VOC-Werte der Abluft: hier Langfristschwellwerte komfortorientierte



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Die verwendeten VOC-Sensoren liefern ein dimensionsloses Signa, das im Wertebereich zwischen 80 und 254 Digits liegt.



(hier nur von 100 Digits bis 160 Digits dargestellt). Zum Zeitpunkt jeder Neuberechnung wird mit dem gewählten Quantil der untere und obere Schwellwert aus der Verteilung berechnet.

Die Berechnung der Schwellwerte erfolgt nach Ablauf der eingestellten Aktualisierungszeit der Histogramme immer kurz nach Mitternacht. Ein Ausschnitt aus dem Dasylab-Schaltbild für die LQ-Regelung ist in Bild 5 dargestellt. Er zeigt die wichtigsten Blöcke der Messwertverarbeitung. Die Berechnung der Quellstärken und der ungestörten VOC-Konzentration sowie die Erstellung der Histogramme erfolgt in den Untermodulen (Bezeichnung beginnend mit BIB).

WCC-Regulary

| Work | Plant |

Bild 5: Dasylab-Schaltbild mit allen Hauptmodulen der Luftqualitätsregelung

Zusätzlich wurden weitere Kontroll- und Sicherheitsfunktionen implementiert, die ein Abdriften der Regelung sowie Sensordefekte erkennen sollen. Wenn z. B. die Lüftungsanlage mit LQ-Regelung eine Mindestzeit von 200 Minuten in Stufe 2 betrieben wurde, wird unterstellt, dass sich im Gebäude die Konzentration eingestellt hat, die sich auch bei Dauerbetrieb in Normallüftung ergeben hätte. Dieser Zeitpunkt wird verwendet um die berechnete Quellstärke in Stufe 2 mit der gemessenen abzugleichen, um einen Langzeitdrift der Messwerte zu verhindern.

Durch den Vergleich der VOC-Werte in Zu- und Abluft sollte weiterhin verhindert werden, dass bei belasteter Außenluft der Volumenstrom im Gebäude erhöht wird.

Parallel zur Berechnung der Quellstärke, der ungestörten VOC-Konzentration und der Erstellung der Histogramme wird mit dem aktuellen VOC-Messwert der Abluft die Lüftungsstufe der LQ-Regelung berechnet (siehe Bild 3). Dazu wurden zwei unterschiedliche Betriebsstrategien definiert:

#### Komfortorientiere Betriebsweise

Die komfortorientierte Betriebsweise unterstellt, dass es im Gebäude Phasen mit erhöhter VOC-Belastung gibt und solche mit reduzierter Belastung. Die Regelung versucht nun einerseits Belastungsspitzen durch erhöhten Volumenstrom zu reduzieren und bei geringer Belastung den Volumenstrom der Lüftungsanlage zu vermindern und somit den Energieverbrauch zu begrenzen. So soll der Luftwechsel an die im Gebäude vorhandene Verunreinigungslast angepasst werden. Da der Luftwechsel sowohl erhöht als auch vermindert wird, wurde im Vorfeld erwartet, dass im zeitlichen Mittel kein nennenswert erhöhter Luftwechsel im Gebäude entsteht. Die detaillierten Auswertungen zu dieser Frage sind in Kapitel 5.2 und 5.3 dokumentiert.



Bild 6 links zeigt das Regelverhalten bei komfortorientierter Betriebsweise. Liegt der aktuelle VOC-Messwert unter dem unteren Schwellwert (gestrichelte grüne Linie), so wird die niedrigste Stufe eingestellt, wird der Schwellwert überschritten, so wird in Stufe 2 geschaltet. Steigt die VOC-Konzentration weiter bis über den oberen Schwellwert an, so erfolgt die Umschaltung in Lüftungsstufe 3. Sinkt die Konzentration wieder unter die obere Schwelle ab, so muss zusätzlich der Wert der Hysterese unterschritten werden, bis die Regelung wieder in Stufe 2 zurückschaltet. Genauso verhält es sich beim Unterschreiten der unteren Schwelle.

#### **Energieorientierte Betriebsweise**

Bild 6 rechts zeigt den Ablauf der energieorientierten Betriebsweise. Sie soll Phasen identifizieren, in denen die Belastung der Luftqualität im Gebäude z. B. wegen Abwesenheit der Bewohner gering ist und die Lüftungsanlage aus diesem Grund reduziert werden kann. Eine Erhöhung des Volumenstroms bei Lastspitzen findet nicht statt. Somit wird bei energieorientierter Betriebsweise nur in Stufe 1 abgesenkt, aber nie automatisch in Stufe 3 angehoben. Den Bewohnern bleibt aber immer die Möglichkeit, über den Party-Taster zumindest kurzfristig den Volumenstrom der Lüftungsanlage anzuheben.

Der untere Schwellwert kommt bei der energieorientierten Betriebsweise nicht zum Einsatz. Die Regelung reagiert erst, wenn der obere Schwellwert überschritten wird mit einer Erhöhung des Volumenstroms in Stufe 2. Sinkt die VOC-Konzentration unter den obere Schwellwert abzüglich der Hysterese ab, so wird die Lüftungsanlage wieder in Stufe 1 geschaltet.

VOC-Messwert Abluft

Schwellwert oben

Hysterese 
Stufe Lüftung

Schwellwert unten
Hysterese 
Schwellwert unten

Hysterese 
Schwellwert unten

Toeit

Bild 6: Schematische Darstellung von komfortorientierter und energieorientierter Betriebsweise

Komfortorientierte Betriebsweise

Energieorientierte Betriebsweise

Zeit

Bei beiden Betriebsarten soll ein Abgleiten der dargestellten Kurzfristschwellwerte, z. B. bei längerer Abwesenheit der Bewohner wegen Urlaub, durch die zusätzlichen Langfristschwellwerte, die einen längeren Zeitraum überbrücken, verhindert werden. Die Entwicklung der Kurz- und Langfristschwellwerte bei den Feldtestgebäuden ist in Kapitel 5.2.1 dokumentiert.



# 2.2 Feuchteregelung

Neben der LQ-Regelung verfügt die entwickelte Regelung zusätzlich über eine Feuchteregelung, die den Luftvolumenstrom unterschiedlich beeinflussen soll:

- Steigt im Sommer die gemessene Raumluftfeuchte über einen einstellbaren Schwellwert, so soll der Volumenstrom der Lüftungsanlage auf Stufe 3 erhöht werden, damit der Luftaustausch vergrößert wird und die Raumluftfeuchte nicht in einen kritischen Bereich ansteigt (Ablaufschema Bild 7 links). Diese sommerliche Feuchteregelung soll die Bausubstanz vor Schäden schützen.
- Sinkt im Winter die gemessene Raumluftfeuchte unter einen einstellbaren Schwellwert, so wird der Volumenstrom der Lüftungsanlage auf Stufe 1 reduziert, damit der Luftaustausch begrenzt wird und die Raumluftfeuchte nicht weiter absinkt (Bild 7 rechts). Gibt gleichzeitig die LQ-Regelung jedoch die Lüftungsstufe 3 vor (die Luftqualität im Gebäude ist schlecht), wird als "Kompromiss" die Lüftungsstufe 2 eingestellt.

Bei den Passivhäusern des Feldtests konnte unterstellt werden, dass es im Winter nicht zu bauphysikalisch kritischen Feuchtezuständen kommt.

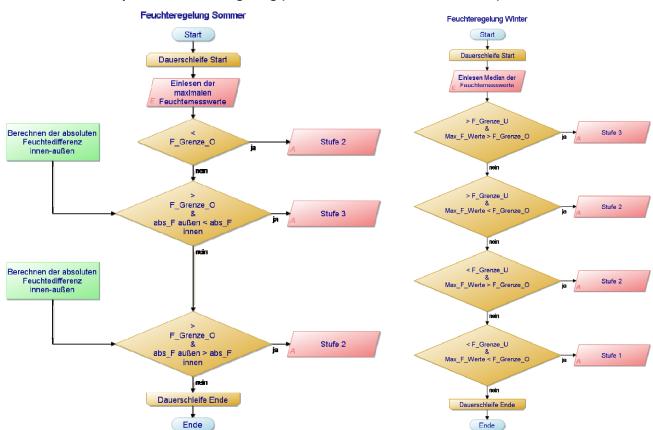


Bild 7: Ablaufplan der Feuchteregelung (links Sommerfall, rechts Winterfall)

Als Führungsgröße können sowohl nur der Feuchtefühler in der Abluft der Lüftungsanlage verwendet werden, als auch alle Feuchtefühler in allen Räumen, zusätzlich zum Abluftfühler. Werden alle Messwerte verwendet, wird der Median berechnet und dann als Führungsgröße in die Feuchteregelung eingespeist. Erläuterungen zu dem Hintergrund der Umschaltung finden sich in Kapitel 5.4.



Zusätzlich wird aus den Temperatur- und Feuchtemesswerten von Zu- und Abluft die absolute Feuchtedifferenz zwischen innen und außen berechnet. Diese Größe wird im Sommer als zusätzliches Entscheidungskriterium eingesetzt, ob die Lüftungsanlage bei hoher Feuchte im Gebäude in die höchste Stufe geschaltet werden soll. Dies sollte verhindern, dass bei ungünstigen Außenbedingungen mehr Feuchte in das Gebäude transportiert wird.

Für die Umschaltung zwischen Sommer- und Winterbetrieb ist eine kalenderabhängige Schwelle definiert worden.

Grundsätzlich hat die Feuchteregelung Vorrang gegenüber der LQ-Regelung. Im Verlauf des Feldversuchs zeigte sich jedoch, dass in den Passivhäusern im Sommer kritische Feuchtezustände nie auftraten. Im Winter wurden die Schwellwerte teilweise so gewählt, dass die Lüftungsanlage nur bei extremer Trockenheit den Luftvolumenstrom reduziert.

Der Funktionsblock in Dasylab zur Feuchteregelung ist in Bild 8 dargestellt.

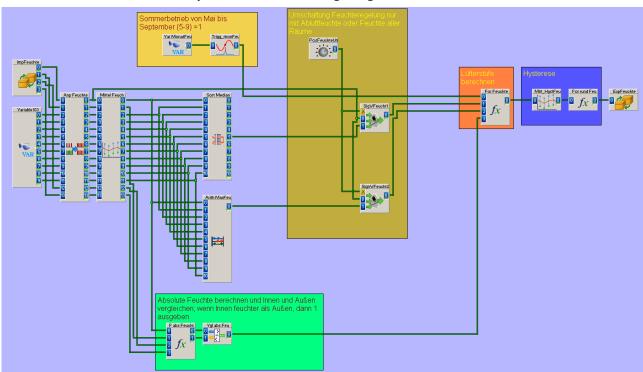


Bild 8: Ausschnitt aus Dasylab mit der Feuchteregelung

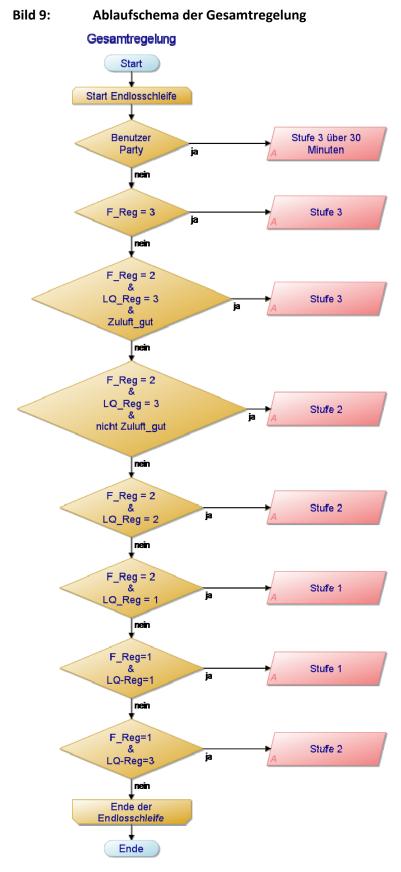


# 2.3 Gesamtregelung

Die Gesamtregelung führt die Ergebnisse der Feuchteregelung, der LQ-Regelung sowie den Benutzereingriff über die Party-Taste zusammen, gewichtet die Eingaben und gibt das Resultat geglättet an die Standardregelung aus. Der Ablauf der Prozedur ist in Bild 9 schematisch dargestellt. Betätigt der Nutzer die Taste für die Partylüftung, so wird sofort und ohne Verzögerung für 30 Minuten Stufe 3 eingestellt.

Gibt die Feuchteregelung aufgrund zu hoher Feuchtewerte im Gebäude die Lüftungsstufe 3 vor, so wird diese ausgewählt, da der Feuchteschutz oberste Priorität besitzt. Gibt die Feuchteregelung Stufe 2 und die LQ-Regelung Stufe 3 vor, so wird die Lüftung dann auf Stufe 3 erhöht, wenn der Vergleich der Innenluftqualität und der Außenluftqualität ergibt, dass mit der Erhöhung der Lüftungsstufe die Luftqualität im Gebäude tatsächlich verbessert werden kann. Ist dies nicht der Fall, der VOC-Wert der Außenluft also zu hoch, bleibt die Lüftung in Stufe 2. Ebenso wird Stufe 2 ausgegeben, wenn sowohl Feuchte- als auch LQ-Regelung dies vorgeben. Bei Stufe 2 der Feuchteregelung und Stufe 1 der LQ-Regelung wird die Lüftung auf 1 reduziert, ebenso, wenn beide Regelungen dies vorgeben. Wird schließlich von der Feuchteregelung Stufe 1 und von der LQ-Regelung Stufe 3 vorgegeben, so wird Stufe 2 eingestellt.

Die Schaltung der Gesamtregelung ist in Bild 10 zu sehen. Diese enthält neben der reinen Berechnung der Lüftungsstufe noch eine Mittelungs- und eine Rundungsfunktion, die die Aufgabe der Glättung der Ausgabe an die Standardregelung übernimmt. Zusätzlich werden noch die verschiedenen Eingangsparameter in die Gesamtregelung visualisiert und Kontrollfunktionen ausgeführt.





Die im Forschungsprojekt erprobten Regelungen der Luftqualität und der Raumluftfeuchte wurden additiv auf "Standardregelung" aufgesetzt, d. h. diese wird von der Gesamtregelung überschrieben, solange sie funktioniert. Wenn Messtechnik oder die Gesamtregelung ausfällt und sich 5 Minuten lang nicht mehr bei der Standardregelung meldet, geht diese in den Auslieferungszustand und kann die Häuser unverändert mit Frischluft und Wärme versorgen – alle Sicherheitsfunktionen der Standardregelung bleiben erhalten, insbesondere für den Betrieb der Wärmepumpe.

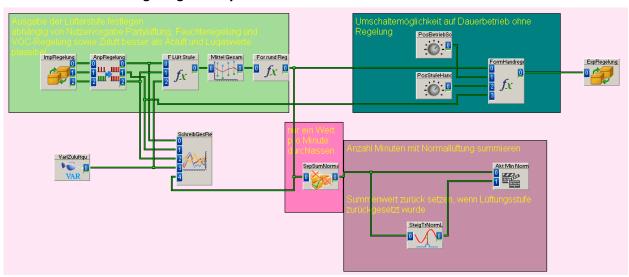


Bild 10: Gesamtregelung im Dasylab-Schaltbild

# 2.4 Erfassung der Fensteröffnung im Gebäude mit der Drd-Methode

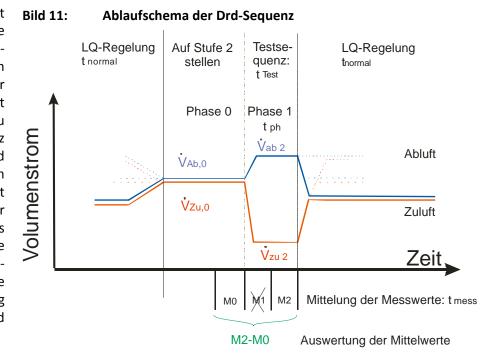
Die Druckdifferenz-Sequenz, die zur Erfassung des Öffnungszustandes der Fenster im Gebäude verwendet wird, nutzt die Tatsache, dass bei vergleichsweise luftdichten Gebäuden bei einer Disbalance der Lüftungsanlage ein Unter- oder Überdruck im Gebäude gegenüber der Außenluft entsteht, wenn alle Fenster geschlossen sind. Ist mindestens ein Fenster geöffnet, kann keine nennenswerte Druckdifferenz aufgebaut werden.

Bild 11 zeigt den zeitlichen Ablauf der Sequenz. Alle 15 Minuten wird die aktuelle Lüfterstufe gespeichert und die Lüftungsanlage auf Stufe 2 (Auslegungsvolumenstrom) gestellt. Nach einer Ausgleichszeit von 20 Sekunden wird die Druckdifferenz zwischen Gebäude und Außenluft über weitere 20 Sekunden gemittelt und abgespeichert (M0). Anschließend wird die Testsequenz gestartet und der Abluftvolumenstrom auf 95 % der maximalen Ventilatordrehzahl gestellt, gleichzeitig wird der Zuluftvolumenstrom auf 20 % der Ventilatordrehzahl reduziert, so dass eine Disbalance in der Lüftungsanlage entsteht. Diese Disbalance führt bei geschlossenen Fenstern dazu, dass sich eine Druckdifferenz zwischen Gebäude und Außenluft einstellt. Aus den Erfahrungen in [Großklos, Knissel 2002] ist bekannt, dass die Druckänderung nach wenigen Sekunden abgeschlossen ist. Aus diesem Grund wird 20 Sekunden nach Beginn der Testsequenz damit begonnen, den Differenzdruck über weitere 20 Sekunden zu mitteln (M2). Nach dieser Zeit ist die Testsequenz abgeschlossen und es wird wieder die Lüftungsstufe der LQ-Regelung eingestellt, die vor Beginn der Drd-Sequenz vorhanden war. Die Software überprüft anschließend, ob die Differenz M2-M0 größer als ein Schwellwert ist, der als Indikator für geschlossene Fenster hinterlegt ist. Wird der Schwellwert unterschritten, ist davon auszugehen, dass mindestens ein Fenster geöffnet ist und sich aus diesem Grund keine Druckdifferenz aufbauen konnte. Die Änderungen in der Betriebsstufe sind kaum wahrnehmbar und wurden von den Bewohnern nicht beanstandet (siehe Kapitel 8.2).



Die Drd-Sequenz wird nicht durchlaufen, wenn die Wärmepumpe sich im Abtaubetrieb befindet, da ein Abtauen dann nicht mehr gewährleistet ist. Befindet sich die Wärmepumpe zu Beginn der Drd-Sequenz nicht im Abtaubetrieb, wird an die Standardregelung ein Befehl gesendet, der mit einer Abtaupause von einer Minute verhindert, dass während der Sequenz die Wärmepumpe in den Abtaubetrieb gehen kann. Die Schaltung der Ansteuerung der Drd-Sequenz ist in Bild 12 gezeigt.

Bild 12:



Ausschnitt aus dem Mess- und Regelprogramm: Ansicht der Steuerung der Drd-Sequenz



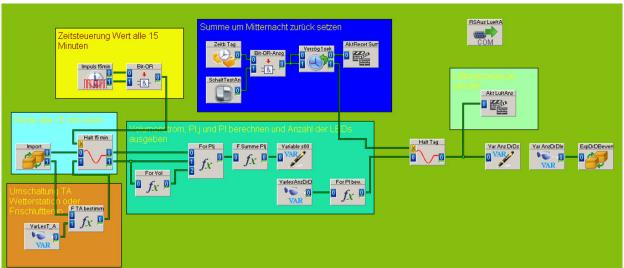
# 2.5 Nutzerrückmeldung

Die Nutzerrückmeldung, die den Bewohnern der Gebäude die energetischen Auswirkungen des Fensteröffnungsverhaltens visualisieren soll, erhält von der Drd-Sequenz bzw. den Fensterkontakten den Status, ob alle Fenster geschlossen sind und zusätzlich von der Messtechnik/Anlagentechnik die aktuelle Außentemperatur. Im Takt der Drd-Sequenzen wird dann mit der Formel

$$\Pi_{\scriptscriptstyle n} = (-7,2022*T_{\scriptscriptstyle A} + 164,39)*t*(T_{\scriptscriptstyle A,Grenz} - T_{\scriptscriptstyle A}) \text{ (Gl. 5), wenn Fenster offen sind und}$$
 
$$(T_{\scriptscriptstyle A,Grenz} - T_{\scriptscriptstyle A}) > 0$$

der zusätzliche Energieverbrauch durch Fensterlüftung für das aktuelle Zeitintervall abgeschätzt und auf den Tageswert addiert.  $T_{A,Grenz}$  ist dabei die Heizgrenztemperatur, die hier mit 15 °C angesetzt wurde,  $T_A$  die Außentemperatur und t die Länge des aktuellen Zeitschritts (eine Herleitung der Formel ist im Teilbericht 1 zur Drd-Sequenz zu finden). Eine Auswerteschaltung gibt dann aufgrund des Summenwertes für den Vortag die Bewertungsgröße  $\Pi$  für den vorangegangenen Tag an die Anzeige aus. Bild 13 zeigt die Schaltung zur Berechnung der Nutzerrückmeldung.

Bild 13: Berechnung der Nutzerrückmeldung nach Abschluss der Drd-Sequenz





# 3 Ablauf der Erprobungsphase

Die LQ-Regelung und die Drd-Sequenz wurden im Rahmen des Arbeitspakets 2 im IWU entwickelt und an Testaufbauten simuliert. Anschließend wurde der Prototyp der Regelung an einem Testraum mit einer realen Lüftungsanlage auf seine Funktionsfähigkeit getestet und weiter optimiert. Im nächsten Schritt wurden vier Neubauten im Passivhausstandard in einem Feldtest mit dem modifizierten Lüftungsgerät und der zusätzlichen Mess- und Regeltechnik ausgestattet und über mindestens 1,5 Jahre erprobt.

# 3.1 Test des Prototyps im Testraum

Nach der Entwicklung der Luftqualitätsregelung und der Nutzerrückmeldung im IWU wurde der erste Prototyp der Mess- und Regeltechnik vom 07.05.2009 bis 28.09.2009 an einem Testraum (siehe Bild 14) bei der der Firma Schwörer Haus weiter optimiert. Bei dem Testraum handelt es sich um einen Büroraum innerhalb einer Lager- und Fabrikationshalle in der Firmenzentrale in Hohenstein, der über eine Lüftungsanlage mit Wärmepumpe verfügt, die weitgehend identisch mit den im Feldtest umgesetzten Anlagen war.

Bild 14: Ansichten des Testraums und der Messtechnik

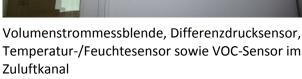




**Testraum** 

Lüftungsanlage des Testraumes







Messprogramm und Messtechnik (an der Wand)



Bei diesem Feldtest sollte geklärt werden, ob die Steuerung der Lüftungsregelung dauerhaft zuverlässig vom Mess-PC aus durchgeführt werden kann, die DrD-Sequenz an einer realen Anlage durchlaufen werden kann und die Luftqualitätsregelung mit den im Testraum vorhandenen Verunreinigungslasten den Volumenstrom der Anlage zuverlässig beeinflusst.

Es bestand eine Fernzugriffsmöglichkeit vom IWU aus auf den Mess- und Regel-PC, so dass unterschiedliche Tests und Verbesserungen durchgeführt werden konnten.

Die Erprobung auf dem Teststand wurde genutzt, um Fehler und Probleme bei der Regelung, der Kommunikation und der Datenauswertung frühzeitig zu erkennen und zu beheben. In der Zeit der Versuche mit dem Teststand mussten eine Reihe von Funktionen ergänzt oder geändert werden, um die geplante Funktionsweise der Regelung zu erreichen.

Weiterhin wurden unterschiedliche Hysteresen und Glättungen der Regelungsfunktion erprobt, um zu häufige Wechsel der Lüfterstufe zu vermeiden, die ggf. über eine Geräuschänderung von den Bewohnern als störend wahrgenommen werden könnten. Die Ergebnisse wurden als Startwerte für den Feldtest verwendet.

Ein erhöhter Aufwand war auch für die Synchronisierung der Drd-Sequenz innerhalb der LQ-Regelung erforderlich, da sich in regelmäßigen Abständen die Ansteuerung der LQ-Regelung und der Drd-Sequenz überlagerten, so dass defacto die Drd-Sequenz abgebrochen wurde.

Mit den Daten des Teststandbetriebs wurde auch die Ermittlung der Quellstärken überprüft. Über einen Zeitraum von mehreren Tagen wurde für jede Minute eines Tages mit einer Tabellenkalkulation die Quellstärke nachgerechnet und mit den Werten der LQ-Regelung verglichen, da dies die Voraussetzung für eine korrekte Berechnung der Schwellwerte darstellt.

Bild 15 zeigt exemplarisch für die 1440 Zeitschritte eines Tages die Übereinstimmung zwischen LQ-Regelung und Tabellenkalkulation. Es war nicht möglich, die Ergebnisse der LQ-Regelung exakt nachzuvollziehen, die Quellstärken liegen aber systematisch in dem gleichen Wertebereich, wobei Einzelwerte deutlich abweichen können. Ursachen hierfür sind unterschiedliche Rechengenauigkeiten der eingesetzten Programme (es wird teilweise mit kleinen Differenzen gerechnet, so dass unterschiedliche Rundungen von Zwischenwerten zu größeren Abweichungen führen können) und nicht völlig identische Zeitschritte der beiden Berechnungen. Insgesamt ergaben die Kontrollen aber eine korrekte Funktion der Quellstärkenberechnung.

Bild 15: Korrelation der von der LQ-Regelung berechneten Quellstärke der Verunreinigungslasten im Gebäude mit der Kontrollrechnung mit einer Tabellenkalkulation

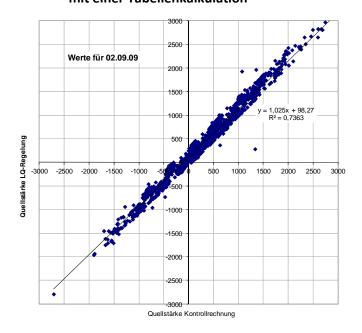




Bild 16: Exemplarische Darstellung der Messwerte des Teststandes für Volumenstrom, VOC, Stufe der Regelung und Zulufttemperatur für einen Tag und Reaktion der LQ-Regelung auf Veränderungen der Luftqualität am 17.09.2009

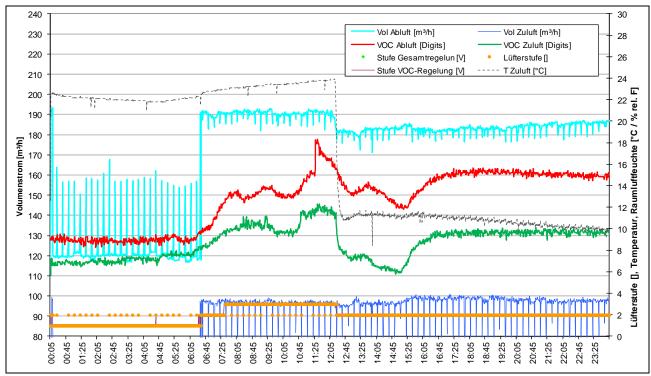


Bild 16 zeigt für einen Tag die Messwerte des Teststandes und die Reaktion der LQ-Regelung. In den Morgenstunden liegen die VOC-Werte in der Abluft (rote Linie) relativ niedrig und die LQ-Regelung stellt die Lüftungsanlage auf die Stufe 1. Um 6:30 ist Arbeitsbeginn und in der Folge steigen die VOC-Messwerte deutlich an. Die LQ-Regelung erhöht mit nur geringer zeitlicher Verzögerung die Lüftungsstufe erst auf Stufe 2 und nach einiger Zeit weiter auf Stufe 3, da die VOC-Werte weiter anstiegen. Nach dem Absinken der VOC-Werte gegen 12:30 wird die Lüftungsstufe auf 2 reduziert. Die kurzen Peaks in den Volumenströmen sowie die Punkte bei der Lüfterstufe resultieren aus den Drd-Sequenzen, die alle 15 Minuten durchlaufen werden und den Volumenstrom kurzzeitig verändern.

Eine Besonderheit des Teststandes war die Tatsache, dass er in einer Fertigungshalle lag und somit die VOC-Werte der angesaugten Zuluft bereits recht hoch lagen und im Wesentlichen auch diejenigen in der Abluft bestimmten. Wünschenswert wäre es gewesen, wenn die LQ-Regelung den Volumenstrom nicht weiter erhöht hätte, falls die Zuluft eine schlechte Qualität aufweist. Da die VOC-Messwerte der Abluft aber höher lagen als diejenigen der Zuluft (ggf. auch erhöhte Infiltration von VOC in den Testraum), kann die Funktionsweise der LQ-Regelung als korrekt bezeichnet werden.

Nach Abschluss der Versuche mit dem Teststand wurden weitere Anpassungen bezüglich der Kommunikation zwischen LQ-Regelung und Standardregelung von deren Lieferanten, der Firma Hermes Electronik in Essen, umgesetzt, bevor der eigentliche Feldtest beginnen konnte.



# 3.2 Feldtest

In einem Feldtest mit vier Einfamilienhäusern im Passivhausstandard wurde die neu entwickelte Luftqualitätsregelung sowie die Drd-Sequenz mit Nutzerrückmeldung in der Praxis erprobt, verbessert und in unterschiedlichen Betriebsmodi eingesetzt.

Der Feldtest lief in allen Gebäuden in folgender Reihenfolge ab:

- 1. Installation der Messtechnik nach Fertigstellung des Gebäudes (kurz vor oder nach Bezug des Hauses)
- 2. Probebetrieb von Mess- und Anlagentechnik (bis zu 2 Monate) ohne Eingriffe in die Standardregelung, um vorab einen korrekten Betrieb der Anlagentechnik sicherstellen zu können.
- 3. Installation der Luftqualitätsregelung mit anschließendem Probebetrieb (ca. 1 Monat)
- 4. Inbetriebnahme der Luftqualitätsregelung mit anschließendem Dauerbetrieb

Der Start des Feldversuches hat sich im Herbst 2009 nach Abschluss der Versuche am Teststand verzögert, da sich bei der Montage vor Ort zeigte, dass die umprogrammierten Standardregelungen nicht für die in den Feldtestgebäuden eingesetzten Lüftungsanlagen mit Fortluftwärmepumpe und zusätzlicher Warmwasserbereitung geeignet waren. Aus diesem Grund mussten alle Programmänderungen<sup>2</sup> auf die korrekte Regelung übertragen und danach erneut getestet werden. Untersuchungen am Teststand fanden nicht mehr statt. Im März 2010 konnte dann das erste Gebäude mit der LQ-Regelung betrieben werden.

Gegenüber einem Test in Gebäuden, bei denen Belüftung und Beheizung anlagentechnisch getrennt sind, ergab sich durch den Einsatz der Wärmepumpen-Kompaktaggregate in den Feldtestgebäuden die zusätzliche Anforderung, dass sowohl die neu entwickelte Regelung als auch die Drd-Sequenz auch im Heizbetrieb mit seinen zusätzlichen Anforderungen an die Luftversorgung der Wärmepumpe und die Reaktion im Abtaubetrieb angepasst werden musste. Diese Funktionen konnten auf dem Teststand nicht vorab getestet werden.

# 3.2.1 Beschreibung der Gebäude

Für den Feldtest wurden zusammen mit der Firma Schwörer Haus vier Passivhaus-Neubauten ausgewählt, die sich aufgrund vergleichbarer Anlagentechnik für eine Teilnahme am Feldtest eigneten. Weitere Voraussetzungen waren eine überwiegende Wohnnutzung sowie die Bereitschaft der Eigentümer, sich am Feldtest zu beteiligen. Die Gebäude wurden zwischen Herbst 2009 und Winter 2010/11 fertig bezogen und werden je von vier Personen (inkl. Kinder) bewohnt.

Alle vier Gebäude verfügen grundsätzlich über die gleiche Anlagentechnik mit einem Lüftungsgerät mit Fortluftwärmepumpe vom Typ WRG 134 der Firma BaulnfoCenter / Schwörer Haus KG und eine thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung. Die Wärme wird über die Zuluft in das Gebäude eingebracht, zusätzlich gibt es in den Zulufträumen direktelektrische Nacherhitzer, die raumweise geregelt werden können und in den Bädern/WCs direktelektrische Raumheizkörper zur Nachheizung. Eine Heizungswasserverteilung existiert nicht. Die Anlagentechnik ist schematisch in Bild 19 dargestellt.

.

im Wesentlichen die Möglichkeit die Ventilatordrehzahl für Zu- und Abluft individuell einzustellen, Veränderungen am Nutzerdisplay und eine zusätzliche Kontrollfunktion, die in die Standardbetriebsart zurückschaltet, wenn der Mess- und Steuerrechner sich über einen festgelegten Zeitraum nicht meldet, um die sichere Versorgung der Gebäude mit Frischluft und Wärme zu gewährleisten

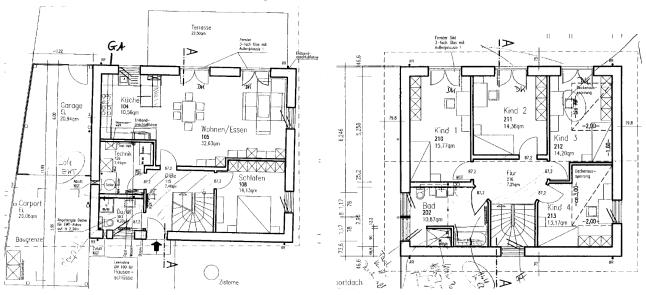


Tab. 3: Kurzprofile der Feldtestgebäude

Haus 1	Haus 2					
2 Vollgeschosse + Dachstudio, nicht unterkellert	2 Vollgeschosse, unterkellert (thermisch getrennt)					
Lufterdreichwärmetauscher	Kein Erdreichwärmetauscher vorhanden, Anlagentechnik					
Außenmessstelle über First (Druckmessschlauch nach	im unbeheizten Bereich					
unten gerichtet)	Außenmessstelle über First (Druckmessschlauch mit T-					
Energiebezugsfläche: 147 m²	Stück abgeschlossen)					
Koblenz und Umgebung	Energiebezugsfläche: 132 m²					
	Koblenz und Umgebung					
Haus 3	Haus 4					
2 Vollgeschosse + Spitzboden (teilweise ausgebaut), nicht unterkellert	2 Vollgeschosse + Spitzboden (teilweise ausgebaut), nicht unterkellert					
Soleerdreichwärmetauscher	Soleerdreichwärmetauscher					
Außenmessstelle an der Außenwand des Erdgeschosses	Außenmessstelle an der Außenwand des Erdgeschosses					
Energiebezugsfläche: 145 m²	Energiebezugsfläche: 150 m²					
Koblenz und Umgebung	Solingen					

Tab. 3 zeigt die wesentlichen Kenndaten der Feldtestgebäude, exemplarisch sind in Bild 17 die Grundrisse eines der vier Gebäude abgebildet. Außenansichten der vier Gebäude sind in Bild 18 zu sehen (die Reihenfolge entspricht aus Gründen der Anonymisierung nicht der Zuordnung Haus 1 bis 4).

Bild 17: Grundrisse eines der Feldtestgebäude















#### 3.2.2 Luftdichtheit der Gebäude

In den theoretischen Untersuchungen in Arbeitspaket 1 zur Drd-Methode zeigte sich, dass die Luftdichtheit der Gebäudehülle einen großen Einfluss auf die Funktionsweise der Drd-Methode besitzt. Bei undichten Gebäuden kann auch bei geschlossenen Fenstern mit der Lüftungsanlage kein ausreichender Unterdruck im Gebäude aufgebaut werden. Als Grenze wurde bei den theoretischen Analysen im Teilbericht 2 [Knissel et. al 2011] ein n<sub>50</sub>-Wert von 0,8 1/h bis 1,3 1/h berechnet (je nach Randbedingungen), der unterschritten sein muss, damit die Drd-Sequenz zufriedenstellend funktioniert.

Aus diesem Grund wurden alle Gebäude zweimal einem Drucktest zur Bestimmung der Luftdichtheit unterzogen. Die erste Messung fand vor Übergabe der Gebäude an die Eigentümer statt und wurde im Rahmen der für Passivhäuser (bzw. deren Förderung) ohnehin erforderlichen Messungen von der Firma Schwörer Haus bzw. beauftragten Büros durchgeführt.

Eine weitere Messung wurde in jedem Gebäude am Ende des Feldversuchs durchgeführt. Diese zweite Messung sollte Aussagen darüber liefern, ob sich die Luftdichtheit der Gebäudehülle während der Betriebsphase verändert hat. Die zweite Messung wurde vom Büro ebök im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messungen (nach Verfahren A nach DIN 13829) und ggf. vorhandene Veränderungen sind in Tab. 4 dargestellt. Bei der zweiten Messung wurden die Ergebnisse mit abgeschlossener Haustür ermittelt.



Dabei ergaben sich teilweise deutliche Differenzen bei der Bestimmung des anrechenbaren Gebäudevolumens. Aus diesem Grund ist besonders der Leckagevolumenstrom von Interesse, um zu beurteilen, ob sich bei den Gebäuden nennenswerte Änderungen ergeben haben. Dieser liegt bei drei Häusern in einer vergleichbaren Größenordnung, so dass es hier keine Indizien für eine nennenswerte Veränderung der Gebäudedichtheit gibt. Bei Haus 1 liegt der Leckagevolumenstrom 44 % über demjenigen der ersten Messung. Die Ursachen hierfür sind nicht bekannt, das Gebäude erfüllt aber auch noch mit diesem erhöhten Leckagevolumenstrom die Anforderungen, die an den Einsatz der Drd-Sequenz zu stellen sind. Auffällig ist noch das Ergebnis der ersten Messung in Haus 4, da sich auf Basis von angegebenem Leckagevolumenstrom und Innenvolumen ein n50-Wert von 0,91 1/h ergeben hätte – im Messbericht ausgegeben wurde aber ein Wert von 0,56 1/h. Wie Leckagevolumenstrom und n50-Wert der zweiten Messung zeigen, liegen die Ergebnisse der zweiten Messung mehr in der Größenordnung der korrigierten ersten Messung.

Tab. 4: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen

	1. N	Messung (bei Ba	ufertigstellu	ng)	2. Messung (	am Ende der Me			
				n50-Wert				Differenz	Differenz
	Leckagestrom	Innenvolumen	n50-Wert	korrigiert	Leckagestrom	Innenvolumen	n50-Wert	Leckagestrom	Volumen
	m³/h	m³	1/h	1/h	m³/h	m³	1/h	%	%
Haus 1	187	420	0,45		270	450,72	0,60	44%	7%
Haus 2	189,5	491	0,39		190	349,23	0,54	0%	-29%
Haus 3	227	384	0,59		210	424,55	0,50	-7%	11%
Haus 4	371,5	408	0,91	0,56	332	498,50	0,67	-11%	22%

Die Drucktests in den Feldtestgebäuden ergaben, dass – wie später in Kapitel 7 auch messtechnisch bestätigt – die Dichtheit der Gebäudehülle bei allen Häusern so hoch war, dass problemlos die erforderliche Druckdifferenz zum Betrieb der Drd-Sequenz mit der Lüftungsanlage erzeugt werden konnte.

#### Leckagen

Wichtig für die Interpretation der Ergebnisse des Feldtests ist auch die Leckageverteilung, d. h. die Frage, in welchen Räumen sich größere Undichtigkeiten in der Gebäudehülle befinden. Dies gilt einerseits bei der Drd-Sequenz für den Differenzdruck, der sich zwischen innen und außen aufbauen kann, andererseits für die gerichtete Durchströmung des Gebäudes bei der Erfassung der VOC-Werte (siehe Tab. 5).

Kleinere Leckagen traten bei allen Gebäuden im Bereich der Betätigungskette des Sonnenschutzrollos im Zwischenraum der Kastenfenster auf.

Bei Haus 1 ist bei den Leckagen vor allem die Revisionsöffnung im Technikraum von Bedeutung, da hier einerseits Luft aus dem Technikraum wieder für die Zuluft angesaugt werden kann, andererseits sich auch der Differenzdruck während der Drd-Sequenz reduzieren kann. Die Undichtigkeiten der Haustür können sich auch auf den Differenzdruck auswirken. In Anbetracht eines Leckagevolumenstroms von 270 m³/h können diese Leckagen einen Teil der Ursache der geringeren Erkennungsrate bei der Drd-Sequenz in Haus 1 sein.

Bei Haus 2 sind besonders die Durchführungen der Elektrorohre in den Keller von Bedeutung. Da sich diese in Ablufträumen befinden, kann zusätzlich zur Reduktion der Druckdifferenz bei Drd auch der VOC-Wert der Abluft beeinflusst werden, zumal die Haustür, die sich direkt neben dem Haustechnikraum befindet, ebenfalls Undichtigkeiten aufweist. Die kleineren Leckagen im Obergeschoss werden als unkritisch eingestuft, da im Normalbetrieb der Differenzdruck im Gebäude gering ist.

Bei Haus 3 sind nur kleinere Leckagen aufgetreten, die im gesamten Gebäude verteilt sind, und der Leckagevolumenstrom ist vergleichsweise gering, so dass durch die verbleibenden Undichtigkeiten nur ein geringer Einfluss auf die Messergebnisse des Feldtest zu erwarten ist.



Haus 4 besitzt zwar den höchsten Leckagevolumenstrom aller Feldtestgebäude, die Leckagen scheinen aber gleichmäßig verteilt zu sein, da keine größeren Einzelleckagen gefunden werden konnten, so dass auch hier von einer geringen Beeinflussung der VOC- und Drd-Ergebnisse auszugehen ist.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass besonders bei den Häusern 1 und 2 Auswirkungen von Leckagen auf die Messergebnisse möglich sind.

Tab. 5: Lage wesentlicher Leckagen an den Feldtestgebäuden

	Ablufträume	Zulufträume	Überströmzone
Haus 1	Revisionsöffnung Bypass Außen-		Haustür
	luft im Technikraum		Elektroverteilung im Flur (kleine- re Leckage)
Haus 2	Durchführung am Elektroverteiler im EG zum Keller	Abseiten aller Räume im OG (leichte Leckage)	Haustür
	Waschtisch Bad EG an der Abdeckmanschette		
Haus 3		Mittelanschlag Verbundfenster EG/OG (leichte Leckagen)	
		Spitzboden im Bereich der First- pfette (leichte Leckagen)	
Haus 4	Küchenfenster (kleinere Leckage)		Haustür (kleinere Leckage)
	Leerrohr Haustechnikraum (klei- nere Leckage)		

# 3.2.3 Volumenströme und Geräuschentwicklung der Lüftungsanlage

# Volumenströme in den Gebäuden

Es wurden in den Gebäuden des Feldtests die Volumenströme in den einzelnen Räumen gemessen, die im Folgenden kurz exemplarisch dokumentiert sind. In Haus 1 wurden Messungen von IWU und ebök vorgenommen, in den anderen Gebäuden vom IWU.

Tab. 6 zeigt das Messprotokoll der Volumenströme in Haus 1 für Lüfterstufe 2 und 3 vom 23.10.2009. Die Anlage ist vergleichsweise ausbalanciert (kleine Differenz zwischen Summe Zu- und Abluft), durch die Erhöhung von Stufe 2 in Stufe 3 wird der Volumenstrom aber nur um ca. 10 % angehoben. Tab. 8 zeigt eine vergleichende Messung vom 21.01.2010 in Stufe 2. Der Volumenstrom lag bei dieser Messung um 10 % höher als in der vergleichbaren Stufe bei der ersten Messung. Die Messungen wurden mit einem FlowFinder FF225 durchgeführt, der die Volumenströme während der Messung nur minimal beeinflusst und so besonders bei niedrigen Volumenströmen genauere Ergebnisse liefert. Neben Messunsicherheiten bei der Erfassung vieler vergleichsweise kleiner Volumenströme ist hier vor allem der Einfluss der Filterverschmutzung zu vermuten. Auffällig bei beiden Messungen sind die geringen Volumenströme im Schlafzimmer OG, die unter 20 m³/h langen.

Tab. 7 zeigt für Haus 3 die Volumenstrommessungen. Auch hier ist der Volumenstrom im Schlafzimmer extrem niedrig, so dass die in Kapitel 5.1.5 berichteten Probleme mit der Luftqualität nicht verwundern. Hier wurde die Situation durch eine nachträgliche Erweiterung des Kanalnetzes in den Spitzboden noch verschärft. Bei beiden Häusern wurden den Eigentümern Hinweise zur Verbesserung der Situation geben, die aber nicht sofort umgesetzt wurden. Die Häuser 2 und 4 wiesen keine Auffälligkeiten auf.



Tab. 6: Messprotokoll der Volumenstrommessung von Haus 1

RaumNr	Rezeichnung	Fläche	Volumenstrom Zu- /Abluft Stufe 2	Volumenstrom Zu- /Abluft Stufe 3	
Ablufträume	5				
Abiditidamo					
100	WC EG	1,88	20	24	
104	Küche	8,69	14		
119	Hauswirtscha	7,8	26	32	
202	Bad	7,41	35	45	
220	Abstell	2,49	12,5	16	
303	Dusche/WC	3,67	25	29	
326	Technik	19,28	24	28	
	Summe Ablu	174			
Zulufträume					
105	Wohnen	29,79	42	49	
104	Küche	8,69	16		
210	Kind1	12,61	20	22	
211	Kind2	11,33	19	22,5	
208	Schlafen	15,31	15	18	
329	Studio	26,34	46	58	
	Summe Zulufträume		158	169,5	

Tab. 7: Messprotokoll der Volumenstrommessung von Haus 3

RaumNr	Bezeichnung	Fläche	Volumenstrom Zu- /Abluft Stufe 2			
Ablufträume						
103	WC/Dusche	4,2	30			
104	Technik	7,44	31			
119	Küche	10,56	14			
202	Bad OG	10,87	34			
115	Flur OG	7,25	21			
Summe Ablufträume 13						
Zulufträume						
105	Wohnen	36,63	36			
119	Küche		28			
104	Schlafen EG	14,13	14			
114	Kind1	15,77	10			
208	Kind2	14,36	13			
210	Kind3	14,2	10			
211	Kind4	13,17	46			
	Summe Zulufträume 15					

Tab. 8: Messprotokoll der Volumenstrommessung in den einzelnen Räumen von Haus 1

ssung Lun	tmengenverteilung Zu-A	bluftanlage Einfamilienh	aus, Koblenz			DG-3, Fa. MD	P impe: WRG 134	1BP	21.01.2010
tockwerk	Raum	Überströmöffnungen [mm]	Ventiltyp	Spaltmaß [mm], offene Lochreihen	V <sub>ZU</sub> Ist	Ventiltyp	Spaltmaß	V <sub>AB</sub> Ist	
EG	Wohnzimmer (li)	0,5	CTVB	10	24		[]	[11711]	d .
EG	Wohnzimmer (re)	0,5	CTVB	10.5	25				l .
EG	Küche	0,0	STU	3	15	KGEB	3	14	1
EG	Hauswirtschaftsraum					KGEB	3	29	1
EG	WC	0.7				KGEB	-2	22	1
OG	Kinderzimmer 1	0,65	STU	5,5	20		_		
OG	Kinderzimmer 2	-,	STU	5,5	21				l .
OG	Abstellraum	0,4				KGEB	-12	7	1
OG	Schlafzimmer		STU	4	18				
OG	Badezimmer	0,5				KGEB	7	37	1
DG	Raum (li)		STU	4	21				1
DG	Raum (re)		STU	4	22				l .
DG	Badezimmer					KGEB	-3	22	1
DG	Technik					KGEB	-4	25	Abweichung [
	Summe				166			156	1

### Geräuschentwicklung der Lüftungsanlage

Am 21.01.2010 wurde vom Büro ebök zusätzlich zu den Volumenströmen in Haus 1 auch die Geräuschentwicklung der Lüftungsanlage in unterschiedlichen Lüftungsstufen in verschiedenen Räumen mit dem Messgerät Model 1800 der Fa. Quest electronics gemessen. In Tab. 9 sind für das Wohnzimmer im Erdgeschoss, ein Kinderzimmer und das Schlafzimmer im Obergeschoss die Messwerte bei abgeschalteter Lüftung, in Stufe 2 und in Stufe 3 dokumentiert. In allen Räumen lagen die Schalldruckpegel auch in der höchsten Stufe nur minimal über dem Grundpegel bei ausgeschalteter Lüftungsanlage.

Tab. 9: Ergebnisse der Schallpegelmessungen Haus 1

			Schallpegel	Schallpegel
		Schallpegel	Lüftung Stufe	Lüftung Stufe
Stockwerk	Raum	Lüftung aus	2	3
		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
EG	Wohnzimmer	26,1	26,8	26,7
OG	Kinderzimmer 1	26,0	26,8	27,5
OG	Schlafzimmer	26.0	26.1	26,3



# 4 Messdatenerfassung

Die vier Gebäude des Feldtests wurden mit weitgehend einheitlicher Messtechnik ausgestattet. Ziel war einerseits die detaillierte Erfassung der Betriebszustände der Lüftungsanlage und deren Beeinflussung durch die Luftqualitätsregelung, andererseits die Erfassung der Verbräuche sowie der sonstigen Komfortbedingungen im Gebäude.

## 4.1 Beschreibung der Messtechnik

Je Gebäude wurden zwischen 43 und 53 Fühler sowie Zähler erfasst. Zusätzlich wurden 17 Werte über den Zustand der Lüftungsanlage aus der Standardregelung ausgelesen. Das Ausleseintervall lag bei einer Minute. Die meisten Messdaten wurden sowohl als Minutenwerte als auch als Stundenmittelwerte abspeichert.

Bild 19 zeigt das Anlagenschema der Feldtestgebäude. Es besteht einerseits aus einer Reihe von Elektrozählern, die Teilverbräuche für Lüftung, Wärmepumpe, elektrische Warmwasser-Nacherwärmung, Zuluft-Heizregister, Direktheizgeräte in den Bädern, Haushaltsstrom sowie den Messtechnikstrom erfassen. Weiterhin wurden die Betriebszustände der Lüftungsanlage über Temperatur-/Feuchtefühler in Zu- und Abluft, Volumenstrommessblenden und VOC-Sensoren gemessen. Mit einem Differenzdrucksensor und einem dünnen Schlauch nach draußen wurde der Differenzdruck zwischen innen und außen gemessen. In insgesamt mindestens 8 Haupt-Wohnräumen wurde die Luftqualität sowie die Temperatur und Feuchte erfasst. Der Öffnungszustand aller Fenster und Außentüren wurde über Kontakte erfasst, wobei nicht zwischen ganz geöffneten und gekippten Fenstern unterschieden wurde. Schließlich besitzen drei der vier Gebäude eine Wetterstation zur Erfassung der Parameter Außenlufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung.

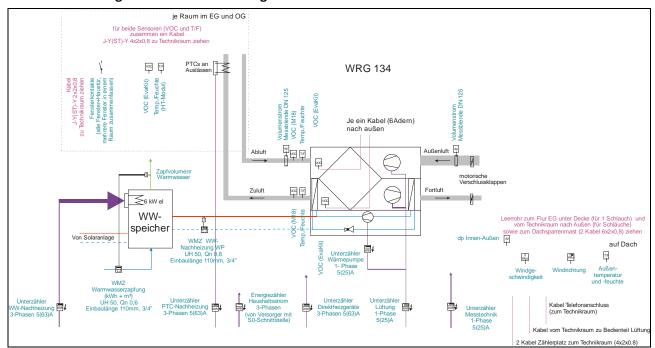


Bild 19: Anlagenschema der Feldtestgebäude

Die verwendeten Sensoren und Messgeräte sind zusammen mit Angaben zur Auflösung und zur Genauigkeit in Tab. 10 zusammengestellt.



Tab. 10: Übersicht über die verwendeten Sensoren und Messgeräte

Art	Тур	Genauigkeit	Auflösung
Differenzdruck / Volumenstrom	Setra D267 MR6 (Volumenstrom mit Messblende Halton MSD125)	± 1,0 % (ohne Messblende)	0,03 Pa (ohne Messblende)
Kanaltemperatur und -feuchte	Galltec TFK80J	± 2 % rel. Feuchte	0,3 % rel. F.
	595 % rel. Feuchte; -30+60 °C	± 0,2 K	0,03 K
VOC Kanal	ETR LuQaS M18	< 15 % vom Endwert	0,7 Digits (analog)
VOC Zu-/Abluft	ETR LuQaS-EvaKit	k.A.	0,7 Digits (analog)
Raumtemperatur und - feuchte	ETR mit SHT15-Sensor von Sensirion	± 2 % rel. Feuchte	0.05 % rel. F.
		± 0,3 K (Sensor)	0,01 K
VOC-Raumluft	ETR LuQaS EvaKit	k.A.	1 Digits
Außentemperatur und –	Thies Hygro-Thermogeber Compact	± 2 % rel. Feuchte	0,3 % rel. F.
feuchte	0100 % rel. Feuchte; -30+70 °C	± 0,2 K	0,03 K
Windrichtung	Thies Windrichtungsgeber Compact 0 360 °	± 5 %	11,25 °
Windgeschwindigkeit	Thies Windgeber Compact 0 50 m/s	0,5 m/s / ± 3 %	0,1 m/s
Fensteröffnungszustand	Mechanische Reedkontakte	-	1 sek.
CO2 (nur ein Haus)	E+E EE80 05000 ppm	± 50 ppm+2% v. Mw.	0,2 ppm
Wärmemenge (Warmwasser-	Landis&Gyr UH 50	Klasse 2 (max. 5 %)	10 Wh bzw. 2 Liter
zapfung und WW-Nachheizung)			
Unterzähler Elektro einphasig	Conrad Geco32	Genauigkeitsklasse B	0,5 Wh
Unterzähler Elektro dreiphasig	Eltako DSZ12B	Genauigkeitsklasse B	2 Wh
Haushaltsstromzähler	Unterschiedliche Zähler mit SO-		2 Wh (3 Häuser)
	Schnittstelle bzw. optischem		bzw.
	Abtaster		0,1 Wh (1 Haus)

Die Messdatenerfassung wurde – genau wie die im Projekt umgesetzten Regelungen – mit der Mess-, Regel- und Analysesoftware Dasylab (Version 10) umgesetzt. Das Funktionsschema der Gesamtregelung ist in Bild 2 dargestellt, die Messdatenerfassung in Bild 20. Analoge und digitale Signale wurden mit Messmodulen der Adam 4000er-Reihe des Herstellers Advantech erfasst und im Sekundentakt vom Messprogramm abgefragt und verarbeitet. Zusätzlich wurden sowohl die Betriebszustände und Messwerte der Standardregelung über eine serielle Schnittstelle im Minutentakt abgefragt, als auch die in den Räumen montierten Luftqualitätssensoren mit angekoppeltem Temperatur-/Feuchte-Modul. Die Messwerte mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung wurden im Messprogramm synchronisiert, weiterverarbeitet (Mittelung, Summenbildung), in Minuten- und Stundenschritten abgespeichert und an die LQ-Regelung, Feuchteregelung, Drd-Sequenz und Auswertung für die Lüftungsanzeige weitergeleitet.

Zum Abspeichern der Windrichtung wurde die gemessene Richtung in ihre Vektorkomponenten (Sinus- und Cosinus-Bestandteile) zerlegt und diese dann minütlich oder stündlich abgespeichert. Damit konnten bei der Auswertung die Windrichtung für beliebige Zeiträume gemittelt werden.

Bild 20 zeigt den schematischen Aufbau der Messschaltung mit ihren unterschiedlichen Zweigen zur Datenerfassung. Bild 21 zeigt links ein Foto des Schrankes mit der Messtechnik mit seinem Innenaufbau, rechts die Montage des Schrankes im Technikraum, hier beispielhaft für Haus 3. Der zentrale Messrechner wurde mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung gegen kurze Stromausfälle und Überspannungen gesichert. Über einen ISDN-Router wurden einerseits täglich die Messdaten auf einem Webserver gesichert, andererseits bestand hierüber eine vollständige Kontroll- und Fernsteuermöglichkeit der Anlage.



### Bild 20: Funktionsschema der Messdatenerfassung

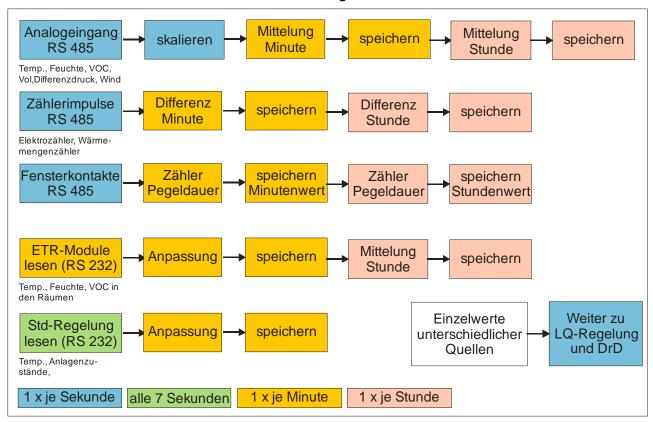


Bild 21: Fotos des Schrankes für die Messtechnik bei der Montage in einem der Feldtesthäuser







### Luftqualitätssensoren

Ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsprojekts war der Einsatz von VOC-Luftqualitätssensoren. Verwendet wurden zwei Ausführungen des LuQaS-Luftqualitätssensors der Firma ETR, Dortmund. Der Sensor und die Entwicklung wurden in Teilbericht 1: "Einsatz des LuQaS-Triple-Sensors zur luftqualitätsgeführten Volumenstromregelung von mechanischen Lüftungsanlagen in Wohngebäuden" [Großklos et. al 2011] dokumentiert.

In den einzelnen Räumen und in der Lüftungsanlage wurden die EvaKits des LuQaS-Sensors in einem Edelstahlgehäuse eingesetzt, das neben dem eigentlichen Sensor noch Platz für eigene Erweiterungen sowie zwei Schaltausgänge besitzen. In der Zu- und Abluft der Lüftungsanlage wurde zusätzlich der LuQaS-VOC-Sensor in einem runden Schraubgewinde (M18) eingesetzt (Bild 22 rechts). Diese besitzen eine abweichende Kalibrierung und andere Sensitivität gegenüber den EvaKits. Alle VOC-Sensoren in den Räumen wurden digital über das angeschlossene Temperatur-/Feuchtemodul ausgelesen (Bild 23 links), alle VOC-Sensoren in der Lüftung über den ebenfalls vorhandenen Analogausgang. Dies führte dazu, dass die eigentlich ganzzahligen Messwerte der Sensoren von der LQ-Regelung mit Nachkommastellen verarbeitet wurden.

Bild 22: VOC-Sensoren: links EvaKit in geöffnetem Zustand, rechts M18-Sensor im Zuluftkanal





Die VOC-Sensoren geben ihre Messwerte als dimensionslose Zahl zwischen 80 und 255 Digits aus, die keiner Substanz und keinem Stoffpegel direkt zugeordnet werden kann.

### 4.2 Messwertkorrekturen

Zusammen mit den VOC-Fühlern ist ein kombinierter Temperatur-Feuchtefühler in den Räumen des Feldtests montiert. Um die Bewohner möglichst wenig "optisch" zu stören, wurde diese Kombination der drei Fühler in Unterputzkästen in die Wand eingelassen. Den äußeren Abschluss bildet jeweils eine Metallplatte, die mit Abstandhaltern 1 cm vor Wand und Kasten befestigt war. Der entstehende Luftspalt sollte für die Ankopplung an die Raumluft sorgen. Die gemessenen Temperaturen und Luftfeuchten können jedoch nicht ohne Einschränkungen verwendet werden. Da der VOC-Sensor beheizt wird, erwärmt sich der Kasten in der Wand über die Raumlufttemperatur. Durch die weiße Metallplatte kann außerdem ein Strahlungsaustausch zwischen Temperaturfühler und VOC-Sensor entstehen. Zusätzlich gibt es eine systematische Abweichung zwischen der Wandtemperatur und der Raumtemperatur, auch weil die Fühler meist in ca. 2 m Höhe montiert waren und somit sich eine Abweichung gegenüber einer Messhöhe von 1,40 m, die üblicherweise angestrebt wird, vorhanden ist. Schließlich ist eine vertikale Temperaturschichtung im Raum durch die Zuluftnachheizung möglich.



Die Temperaturmessung in den Räumen stand nicht im Fokus dieses Forschungsprojekts, die vorliegenden Daten sollten aber trotz der erwähnten Einschränkungen ausgewertet werden, insbesondere für die Beurteilung der Raumluftfeuchte.

Bild 23: Einbau der VOC-Sensoren sowie der Temperatur-Feuchtesensoren in den Zimmern in einem Unterputzkasten mit einer Blechabdeckung



Temperatur-Feuchtesensor mit Ausleseelektronik für den Mess-Bus (links) und VOC-Sensor rechts



Seitliche Ansicht des Messkastens in der Innenwand mit davor geschraubtem Abdeckblech mit 1 cm Hinterlüftung

Um die Effekte des Wandeinbaus bei der Temperatur-Feuchtemessung (teilweise) kompensieren zu können, wurden zu mehreren Zeitpunkten in unterschiedlichen Räumen Messungen der Raumlufttemperatur und -feuchte mit einem kalibrierten Handmessgerät vom Typ testo400 durchgeführt und mit den zu diesem Zeitpunkt gemessenen Werten der ETR-Sensoren verglichen. Es wurde unterstellt, dass sich Unterschiede zwischen der gemessenen Temperatur in der Wand und der Raumluft einstellen, die absolute Raumluftfeuchte aber unverändert bleibt.

Die Korrektur lief in folgenden Schritten ab:

- 1. zuerst wird die absolute Feuchte mit den gemessenen Werten berechnet,
- 2. dann wird die Raumtemperatur korrigiert;
- 3. mit dieser korrigierten Raumtemperatur wird die maximale Taupunktfeuchte berechnet,
- 4. schließlich wird aus dem Verhältnis von gemessener absoluter Feuchte und Taupunktfeuchte die tatsächliche relative Feuchte berechnet.

## Korrektur der Raumlufttemperatur

Das folgende Diagramm (Bild 24) zeigt die gemessenen Temperaturen (ETR-Fühler) und die Messwerte im Raum. Es ergibt sich eine systematische Abweichung der ETR-Messwerte um ca. 2,9 °C nach oben. Im Diagramm ist eine lineare Ausgleichsfunktion eingetragen. Es wurden ebenfalls logarithmische und potenzielle Ausgleichsfunktionen untersucht, die im dargestellten Messbereich zwar geringfügig höhere Bestimmtheitsmaße (R²) ergeben als die lineare Funktion, jedoch physikalisch-mathematisch keine plausiblen Funktionen darstellen.



Für die Korrektur der Messwerte wird die dargestellte lineare Ausgleichsfunktion verwendet.

Bild 24: Messwerte der Temperaturfühler bei Wandeinbau sowie der Temperatur der Raumluft und Ausgleichsfunktion

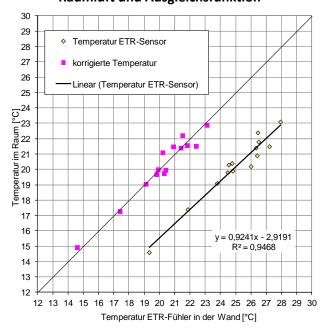
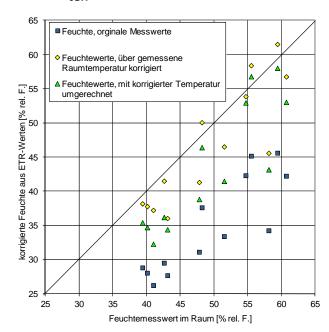


Bild 25: Zusammenhang zwischen Messwerten der Raumluftfeuchte sowie korrigierten Werten



### Feuchtekorrektur

Bild 25 zeigt die Ergebnisse der Feuchtekorrektur. Während die Orginal-Messdaten systematisch zu niedrige Feuchtewerte ergeben (im Mittel ca. 15 % relative Feuchte niedriger), führt die Korrektur mit den tatsächlichen Raumtemperaturen (gelbe Rauten) dazu, dass die Werte sich um die Diagonale des Diagramms anordnen, wobei auch die korrigierte Feuchtefunktion noch im Mittel um 2,9 % relative Feuchte zu niedrige Werte ausgibt. Die Standardabweichung beträgt 4,3 % rel. Feuchte. Kombiniert man die Feuchtekorrektur mit den korrigierten Temperaturmesswerten (somit werden nur noch die kontinuierlich erfassten Sensoren benötigt), verschlechtert sich das Ergebnis ein wenig. Die mittlere Abweichung zwischen Messwert im Raum und korrigierter Feuchte liegt dann bei 6 % relativer Feuchte, die Standardabweichung bei 4, 4 % rel. Feuchte.

Dieser Fehler kann innerhalb des vorliegenden Projekts toleriert werden, da die Klimabedingungen einzelner Räume zur Beantwortung der Forschungsfragen nicht im Vordergrund standen.

### Vergleich unterschiedlicher Temperaturfühler

Einige wenige Messgrößen wurden sowohl über die Standardregelung als auch über die zusätzliche Messtechnik erfasst. Dazu gehören die Zuluft- und die Ablufttemperatur (siehe Bild 26 für Haus 4). Der Vergleich zeigt, dass bei Haus 4 die Abweichung bei den Messwerten der Zuluft sehr gering ist. Der Fühler der Standardregelung zeigt im Mittel 0,37 K höhere Temperaturen an, die Standardabweichung beträgt 0,38 K. Bei der Abluft liegt der Messwert der Standardregelung im Mittel um 1,66 K über derjenigen des zusätzlichen Messfühlers, die Standardabweichung beträgt nur 0,09 K.



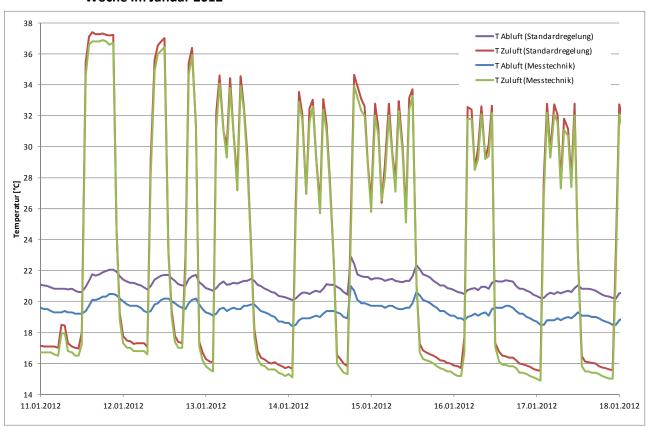
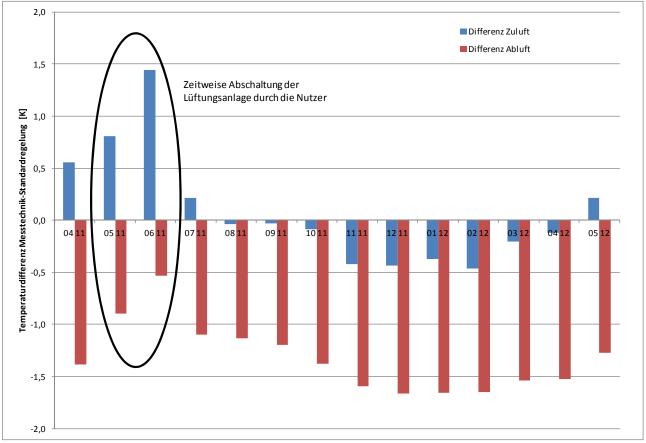


Bild 26: Zu- und Ablufttemperaturen in Haus 4, erfasst mit unterschiedlichen Sensoren, für eine Woche im Januar 2012

In Bild 27 sind die Monatsmittelwerte der Differenz zwischen Temperaturfühler Messtechnik und Standardregelung über die gesamte Messperiode dargestellt. Im Mai und Juni 2011 wurde die Lüftungsanlage einige Male tagsüber von den Nutzern abgeschaltet, so dass die sich ergebenden Temperaturdifferenzen größer ausfielen, da die Fühler dann nicht mehr umströmt wurden und sich in der Folge unterschiedliche Temperaturen, je nach Messort, ergeben. Im Mittel liegen die Abweichungen bei Haus 4 bei 0,1 K bei der Zuluft und bei 1,3 K bei der Abluft. Mögliche Ursache der größeren Differenz bei der Abluft könnte zum Teil die unterschiedliche Einbaulage sein.



Bild 27: Verlauf der Monatsmittelwerte der Differenz zwischen Temperaturmessung zusätzlicher Fühler und Standardregelung in Haus 4 für gesamte die Messphase



In den anderen Gebäuden des Feldtests ergeben sich teilweise abweichende Differenzen (siehe Tab. 11). Besonders auffällig ist Haus 2, bei dem alle Messwerte der Zusatzfühler systematisch zu niedrig liegen. Bei den entsprechenden Auswertungen wurde für Haus 2 dann die Werte der Standard-Regelung verwendet, da z. B. die Messwerte für die Abluft sonst unter 20 °C lägen, was nicht plausibel ist.

Tab. 11: Differenzen zwischen Zusatzfühler und Fühler Standardregelung für Zu- und Ablufttemperatur

	Differenz Zuluft (Wert Mess- technik-Standardregelung)	Differenz Abluft (Wert Mess- technik-Standardregelung)
Haus 1	0,16 K	-1,38 K
Haus 2	-1,94 K	-3,22 K
Haus 3	1,20 K	-0,42 K
Haus 4	0,08 K	-1,32 K

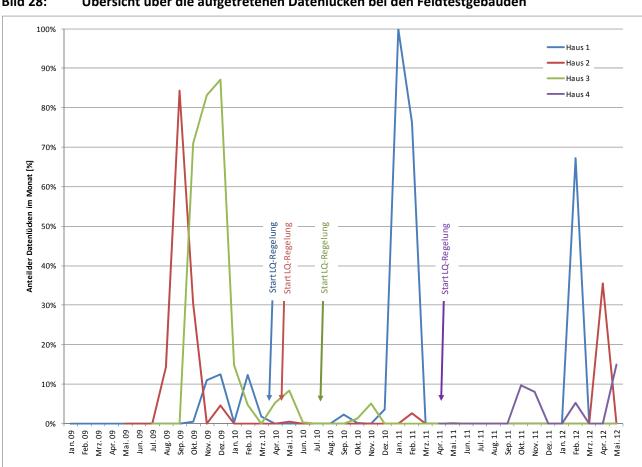


## 4.3 Datenlücken

Im Verlauf der Feldtestphase traten immer wieder Ereignisse auf, die zu Datenausfällen führten. Hauptursache sind Probleme mit dem Betriebssystem der Messrechner und Absturz der OPC-Server auf diesen, die die Messdaten der Messmodule an die Messdatenerfassung weiterreichen. Im Verlauf der Messphase wurden einige Veränderungen am Messprogramm und an den Messcomputern vorgenommen, um die Datenausfälle zu minimieren.

Bild 28 zeigt im Verlauf der gesamten Messphase die prozentualen Datenlücken je Monat und Gebäude. Bei Haus 2 und 3 traten anfangs längere Datenlücken auf, die aber vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung und der Drd-Sequenz liegen und somit nur bei der Bilanzierung der Energieströme berücksichtigt werden müssen. Danach folgten nur noch kleinere Lücken über einige wenige Tage. Bei Haus 1 ist durch Urlaubszeit und mehrere Termine für die Reparatur eine längere Datenlücke im Januar/Februar 2011 aufgetreten.

Die Datenverfügbarkeit liegt bei Haus 1 bei 90 %, bei Haus 4 bei 97 % und bei den Häusern 2 und 3 jeweils bei 99 % für die Betriebszeit der LQ-Regelung. Betrachtet man den gesamten Messzeitraum, liegt die Verfügbarkeit bei Haus 1 bei 93 %, bei Haus 2 bei 95 %, bei Haus 3 bei 92 % und bei Haus 4 bei 97 %. Dies sind sehr gute Werte, die verbleibenden Datenlücken wurden, wenn nötig, sinnvoll ergänzt (z. B. durch Handablesungen von Zählerständen).



**Bild 28:** Übersicht über die aufgetretenen Datenlücken bei den Feldtestgebäuden



# 5 Messdatenauswertung Lüftungsregelung

Dieses Kapitel widmet sich der Auswertung der Messdaten zur Untersuchung der Funktion der Luftqualitäts- und Feuchteregelung. Die Auswertungen zur Drd-Sequenz sind in Kapitel 7 dokumentiert.

# 5.1 Auswertung der VOC-Messwerte und der Funktionsweise der VOC-Sensoren

In den Gebäuden des Feldtests wurde fast jeder Raum mit VOC-Sensoren ausgestattet. Die folgende Tab. 12 zeigt die Raumfühler und weitere Messpunkte, an denen VOC-Sensoren montiert wurden. Generell nicht messtechnisch erfasst wurden die VOC-Werte im Eingangsbereich/Flur sowie im Technikraum und soweit vorhanden, im Spitzbodenbereich, der zum Zeitpunkt der Montage nicht ausgebaut war. In der Lüftungsanlage wurden zwei Arten von VOC-Sensoren (LuQaS-EvaKit, wie in den Räumen sowie M18-Kanalfühler) eingesetzt, die jedoch leicht unterschiedlich kalibriert waren.

Tab. 12: Überblick über die Räume und Messpunkte mit VOC-Sensoren

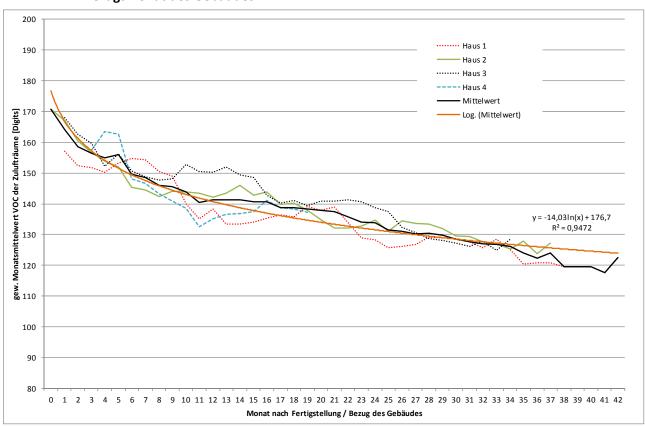
Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
Abluft Lüftung (LuQaS+M18)	Abluft Lüftung (LuQaS+M18)	Abluft Lüftung (LuQaS+M18)	Abluft Lüftung (LuQaS+M18)
Zuluft Lüftung (LuQaS+M18)	Zuluft Lüftung (LuQaS+M18)	Zuluft Lüftung (LuQaS+M18)	Zuluft Lüftung (LuQaS+M18)
WC EG	Dusche / WC EG	Dusche / WC EG	Dusche/WC EG
Wohnen EG	Wohnen EG	Wohnen / Küche EG	Wohnen EG
Küche EG	Küche EG	Schlafen EG	Küche EG
Hauswirtschaftsraum EG	Hauswirtschaftsraum EG	Bad OG	Gäste EG
Bad OG	Arbeiten EG	Kind 1 OG	Bad OG
Kind 1 OG	Bad OG	Kind 2 OG	Arbeiten OG
Kind 2 OG	Kind 1 OG	Schlafen OG	Kind 1 OG
Schlafen OG	Kind 2 OG	Arbeiten OG	Schlafen OG
Dusche DG	Schlafen OG		
Studio DG			
Nicht erfasst:	Nicht erfasst:	Nicht erfasst:	Nicht erfasst:
Windfang, Flur/Diele, Tech- nikraum	Flur/Diele	Technikraum, Flur/Diele, Spitzboden	Technikraum, Flur/Diele, Spitzboden



## 5.1.1 Langzeitentwicklung der VOC-Messwerte

Nicht bei allen Gebäuden beginnen die Messdaten mit Bezug des Gebäudes, teilweise startete die Messdatenerfassung aufgrund von Problemen mit dem Fernzugriff auf den Messrechner bis zu 3 Monate verzögert. Betrachtet man die mit dem Auslegungsvolumenstrom gewichteten Monatsmittelwerte der Zulufträume und bezieht die Zeitachse auf den Monat der Fertigstellung des Gebäudes/Einzug der Bewohner, so ergibt sich der in Bild 29 gezeigte Verlauf für die vier Feldtestgebäude. Bei allen ist eine Abklingkurve der VOC-Konzentration deutlich zu erkennen, auch wenn im einzelnen Gebäude – zum Teil aufgrund jahreszeitlicher Effekte – die Messwerte Ausreißer nach oben oder unten enthalten. Der Mittelwert der Zuluftkonzentration aller vier Häuser (mit angepasster Zeitskala) ist als schwarze Linie dargestellt, eine logarithmische Ausgleichsfunktion als orange Linie. Insgesamt ergibt sich eine relativ gute Übereinstimmung der Messwerte, unabhängig vom Gebäude und den Bewohnern. Dies deutet darauf hin, dass die VOC-Sensoren ähnliche Messwerte liefern (somit vergleichbare Drifts aufweisen) und die "Alterung" der Sensoren im Mittel für das jeweilige Gebäude vergleichbar verläuft.

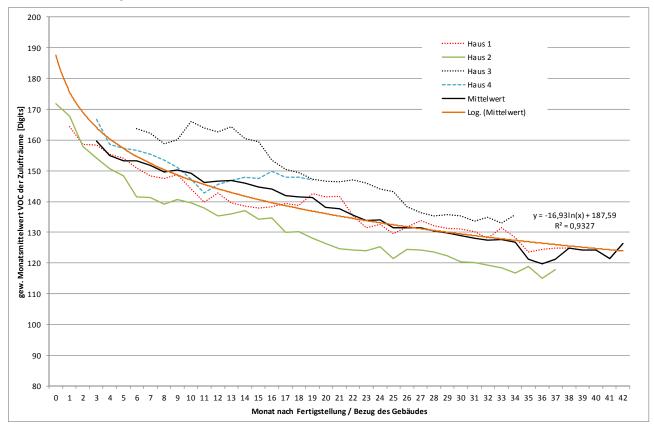






Betrachtet man die gewichteten mittleren VOC-Werte der Ablufträume (Bild 30), so fällt die Spreizung zwischen den Häusern größer aus, als in den Zulufträumen. Dies ist auch verständlich, da die Ablufträume die individuellen VOC-Quellen der Bewohner sowohl der Abluft- als auch der Zulufträume beinhalten. Dennoch lässt sich auch hier eine logarithmische Ausgleichsfunktion finden, die die Entwicklung der Messwerte prinzipiell beschreibt.

Bild 30: Entwicklung der gewichteten mittleren VOC-Konzentration der Ablufträume relativ zum Bezugsmonat des Gebäudes



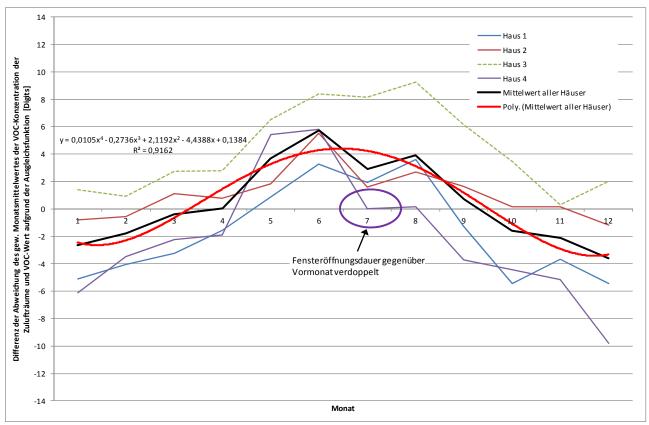


Mit der in Bild 29 gezeigten Ausgleichsfunktion für die Zulufträume kann man für den Zeitpunkt nach Bezug des Gebäudes den Wert der Abklingkurve der VOC-Konzentrationen berechnen und von den Monatsmittelwerten der gewichteten VOC-Werte der Zulufträume abziehen. Werden die Ergebnisse eines Hauses für die jeweils gleichen Monate über die Messjahre gemittelt, ergibt sich die in Bild 31 gezeigte Jahresverteilung. Bei allen Gebäuden liegen die Werte im Winterhalbjahr niedriger als im Sommer, d. h. in den Sommermonaten, in denen auch mehr über die Fenster gelüftet wird, werden unter Berücksichtigung der Abklingkurve höhere VOC-Werte gemessen als im Winter. Möglicherweise besteht hier auch ein Zusammenhang mit der im Jahresverlauf schwankenden absoluten Feuchte.

Bei Haus 3 ist eine deutliche Verschiebung des Jahresganges in den positiven Bereich zu erkennen, was bedeutet, dass der Offset der VOC-Werte dort höher liegt, der Jahresverlauf ergibt sich aber ähnlich. Bei Haus 4 ergibt sich von Juni nach Juli ein großer Sprung von ca. 6 Digits. Wie weiter unten gezeigt, trat Ende Juni 2011 in der Zuluft/Außenluft über mehrere Tage eine starke Belastung auf, die die Messwerte der Zulufträume sicherlich beeinflusst hat. Möglicherweise als Konsequenz daraus liegen die Fensteröffnungszeiten im Juli 2011 auch mehr als doppelt so hoch wie im Juni. Die genauen kausalen Zusammenhänge lassen sich aufgrund der Messwerte nicht erklären.

Grundsätzlich zeigt das Bild jedoch, dass bei den VOC-Werten der Zulufträume mit einem Jahresgang zu rechnen ist, dessen Amplitude ca. 8 Digits beträgt.

Bild 31: Abweichung der mittleren VOC-Konzentrationen in den Zulufträumen von der Ausgleichsfunktion



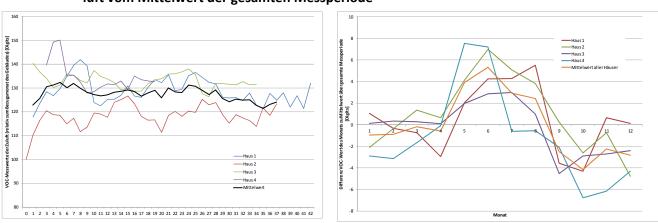


In Bild 32 links sind die VOC-Messwerte der LuQaS-Sensoren in der Zuluft, relativ zum Bezugstermin des Gebäudes dargestellt. Zu Beginn der Messungen liegen die VOC-Messwerte der Zuluft bzw. Außenluft meist etwas niedriger, danach schwanken die Werte leicht. Eine Tendenz der Werte zu kontinuierlichem Ansteigen oder Abfallen ist nicht zu erkennen. Dies kann als ein Indiz gewertet werden, dass die vier zugehörigen Sensoren keinem nennenswerten Drift unterliegen, was auch in Kapitel 5.1.6 bestätigt wurde.

Zur Ermittlung eines möglicherweise vorhandenen Jahresganges der VOC-Werte in der Außenluft wurde aus den Einzelmesswerten (abzüglich der ersten drei Monate) ein Mittelwert über die gesamte Messperiode gebildet. Dieser wurde anschließend vom Messwert abgezogen und die sich ergebende Differenz über die Monate aufgetragen (rechter Teil von Bild 32). Auch hier ergibt sich bei allen Häusern ein Jahresgang der VOC-Messwerte, der maximal ca. 10 Digits beträgt. Die starke Streuung der Einzelwerte zeigt aber, dass dieser Jahresgang sehr unterschiedlich ausfallen kann. Ein gewisser Einfluss der Sensoren ist beim Vergleich von Haus 1 und Haus 3 zu erkennen, die in unmittelbarer Nachbarschaft gebaut wurden, deren VOC-Werte der Zuluft sich aber doch unterscheiden. Hier muss aber auch berücksichtigt werden, dass bei Haus 1 ein Erdreichwärmetauscher vorhanden ist, bei Haus 3 die Außenluft an einer Gebäudewand angesaugt wird. Außerdem liegt zwischen der Errichtung der beiden Häuser eine Zeitspanne von einem dreiviertel Jahr.

Wie weiter unten gezeigt wird, ergeben sich durch den Betrieb der Wärmepumpe und die dadurch verbundene Reduktion der relativen Feuchte der Zuluft nennenswerte Änderungen im Messwert, was den Jahresgang der VOC-Messwerte in der Zuluft erklären kann, da nur im Winterhalbjahr extrem niedrige relative Feuchten in der Zuluft auftreten.

Bild 32: VOC-Messwerte der Zuluft (gemessen mit den LuQaS-Sensor) relativ zum Bezugsmonat des jeweiligen Hauses sowie mittlere monatliche Abweichung der VOC-Konzentration der Zuluft vom Mittelwert der gesamten Messperiode



Auffällig ist der Ausreißer bei dem Jahresverlauf der Zuluft im Mai/Juni 2011 von Haus 4 in Bild 32 (rechts). Um dies zu erklären, zeigt Bild 33 für die Monate Juni 2011 und Juli 2011 die gemessenen VOC-Werte als Tagesmittelwerte der Zuluft mit beiden verwendeten Fühlern. Man erkennt, dass Ende Juni über mehrere Tage die VOC-Werte bei beiden Fühlern deutlich angestiegen sind, so dass ein Defekt eines Sensors auszuschließen ist. Da das Gebäude in ländlicher Umgebung steht, sind Substanzen oder Gerüche aus der Landwirtschaft als mögliche Quelle denkbar. Der plötzliche Abfall auf ein niedrigeres VOC-Niveau könnte durch Regenfälle verursacht worden sein.



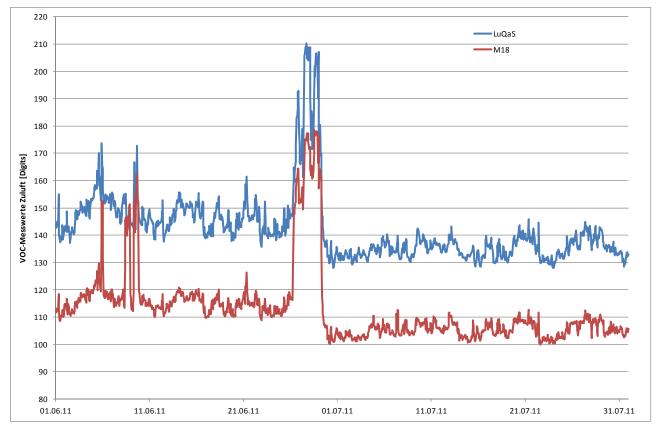


Bild 33: VOC-Konzentration der Zuluft in Haus 4 im Juni/Juli 2011

Analysiert man den Verlauf der VOC-Werte der Zuluft mit hoher Auflösung so fällt auf, dass es eine sprunghafte Veränderung der VOC-Werte der VOC-Sensoren gibt, wenn die Wärmepumpe in Betrieb geht und die Zuluft nachgeheizt wird (Bild 34 exemplarisch für Haus 1 am 25.10.2011). Es ist zu vermuten, dass die Ursache in der stark sinkenden relativen Feuchte der Zuluft zu suchen ist, die durch die Nachheizung der Zuluft verursacht wird. Springt die Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung an, so ändert sich der VOC-Messwert nicht sprunghaft nach oben (zweite Betriebsphase der Wärmepumpe in der Bildmitte). Für den Oktober 2011 ergab sich eine Erhöhung der VOC-Messwerte bei Betrieb der Wärmepumpe um 4,2 Digits oder 6 %, bezogen auf die vorhandene Spreizung der VOC-Sensoren im Monat Oktober von 67,8 Digits.



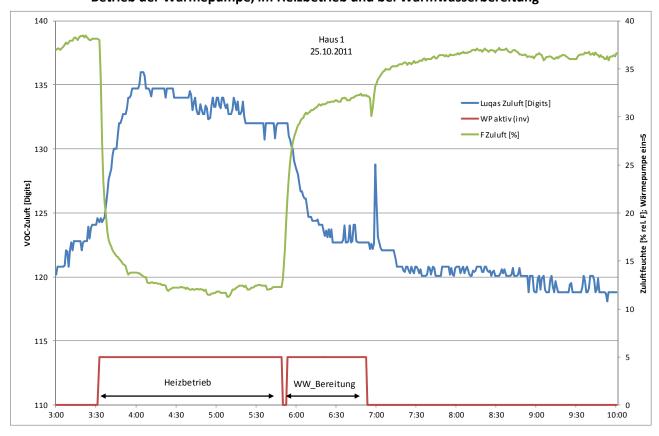


Bild 34: Zuluftfeuchte und VOC-Werte LuQaS-Sensor in der Zuluft am 25.10.2011 in Haus 1 ohne Betrieb der Wärmepumpe, im Heizbetrieb und bei Warmwasserbereitung

Diese Abhängigkeit der VOC-Messwerte von der relativen Luftfeuchte stellt einen Schwachpunkt der VOC-Sensoren dar, da für die Berechnung der Quellstärken und damit der Schwellwerte der LQ-Regelung die Differenz aus VOC-Wert von Abluft und Zuluft verwendet wird. Durch die sprunghafte Änderung der Messwerte wird eine korrekte Berechnung erschwert. Abhilfe kann eine veränderte Platzierung der Sensoren in der Frischluft sein, wodurch zumindest extrem niedrige Feuchtewerte vermieden werden. Der Einfluss von Luftfeuchte nahe 100 %, wie in der Außenluft möglich, konnte im Feldversuch nicht untersucht werden. Da in Kapitel 5.5 der Verzicht des VOC-Sensors in der Zuluft vorgeschlagen wird, stellt die hier beschriebene Abhängigkeit des VOC-Messwerts von der Luftfeuchte kein Problem für die LQ-Regelung dar.

### 5.1.2 VOC-Messwerte in Zu- und Abluft sowie in den Räumen der Gebäude

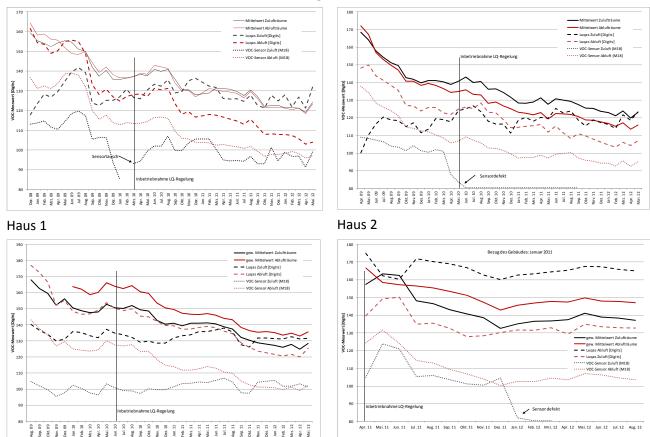
Für Haus 1 zeigt Bild 35 (links oben) beispielhaft die Entwicklung der VOC-Messwerte auf Basis von Monatsmittelwerten für Zu- und Abluft, gemessen mit den beiden unterschiedlichen VOC-Sensoren (LuQaS-EvaKit und M-18-Kanalfühler) sowie die Mittelwerte aller Zu- und Ablufträume. Die VOC-Werte der Zu- und Ablufträume klingen seit Bezug des Gebäudes fast kontinuierlich ab (siehe oben). Nur im Sommer 2010 ist ein leichter Anstieg der Messwerte festzustellen, der ab September 2010 kompensiert wurde.

Auffällig bei den VOC-Werten der Abluft (LuQaS-Sensor) ist, dass die Messwerte anfangs in der gleichen Größenordnung lagen wie die der Ablufträume, im August 2009 die Werte aber schlagartig abfielen und in der Folge kontinuierlich ca. 20 Digits unter denjenigen der Ablufträume liegen. Die VOC-Werte des 2. Sensors in der Abluft (M18-Sensor) zeigen eine ähnliche Charakteristik auf wie die des LuQaS-Sensors, die Spitzen sind hier aber aufgrund der abweichenden Kalibrierung ein wenig geglättet. Die beiden Kurven liegen anfangs bis zu 21 Digits auseinander, die Differenz sinkt aber über ca. 9 Monate ab. Im September 2009



liegt sie bei ca. 14 Digits, diese Differenz blieb dann über ca. 2 Jahre gleich. Seit August 2011 sinkt die Differenz zwischen beiden Sensoren weiter und hat zuletzt einen Wert von 7 Digits erreicht.

Bild 35: Monatsmittelwerte der VOC-Konzentration in Zu- und Abluft für zwei unterschiedliche Sensorarten sowie die volumenstromgewichteten Mittelwerte der Zu- und Ablufträume



Haus 3 Haus 4

Die Messwerte in der Zuluft liegen anfangs deutlich unterhalb den Messwerten der Zulufträume. Dies ist verständlich, da besonders in der Anfangsphase nach Bezug das Gebäude (Farben, Bodenbeläge, ...) und die Inneneinrichtung erhöhte VOC-Werte verursachen. Allerdings steigen die VOC-Werte der Zuluft im ersten ¾ Jahr kontinuierlich an, um dann fast das Niveau der Abluftwerte zu erreichen. Nach einer Phase mit etwa gleich hohen VOC-Messwerten in Zu- und Abluft erreichen die Zuluftwerte den Level der Zulufträume, um sie zeitweise sogar zu übersteigen. Dieses Verhalten der Zuluftwerte ist bei allen Gebäuden des Feldtests festzustellen. Die Frischluftansaugung erfolgt bei Haus 1 über einen Erdreichwärmetauscher mit Bypass im Sommer. Zu Beginn des Messprojekts waren die Außenanlagen des Gebäudes noch nicht fertig gestellt. Möglicherweise hat der starke Anstieg der VOC-Messwerte seinen Grund in VOC-Emissionsquellen im Garten, die erst im Laufe des ersten Messjahres hinzu kamen. Wie Kapitel 5.1.6 zeigt, scheint hier vor allem die unterschiedliche Entwicklung der Sensitivität der Sensoren in Zu- und Abluft die Hauptursache zu sein. Ein Vergleich mit dem M18-Sensor ist bei diesem Gebäude nicht möglich, da dieser nach ca. 1 Jahr wegen eines Defekts ausgetauscht werden musste. Mit dem getauschten Sensor verlaufen die Messwerte von LuQaS-EvaKit und M18 nahezu parallel, aber mit einer großen Differenz von ca. 30 Digits.



In Bild 35 ist auch für die anderen drei Gebäude die Entwicklung der VOC-Messwerte dargestellt. Es stellt sich die Frage, wie weit im Verlauf der nächsten Jahre die Messwerte der Abluft weiter absinken würden, da sie sich immer weiter der unteren Messbereichsgrenze von ca. 80 Digits nähern. Über diese Langzeiteffekte, die einen Zeitraum von ca. 2,5 Jahren übersteigen, liegen aus dem Projekt aber keine Ergebnisse vor.

## 5.1.3 Dynamik der VOC-Messwerte

Bild 36 zeigt für einen Tag exemplarisch die VOC-Messwerte in den Ablufträumen und in der Abluft von Haus 1. In den Morgenstunden um ca. 5:50 Uhr ist ein deutlicher Anstieg der VOC-Messwerte im Badezimmer zu erkennen. Ab 6:30 Uhr wurde ein starker Anstieg der Messwerte in der Küche erfasst, außerdem zwei unterschiedlich starke Anstiege der VOC-Messwerte im WC. Bildet man einen Mittelwert der VOC-Konzentration der Ablufträume und gewichtet dabei die Messwerte mit den Planungswerten der Abluftvolumenströme in den Räumen, ergibt sich die gelbe Linie. Diese gibt die Belastungsspitzen der unterschiedlichen Räume gedämpft wieder. Der Messwert des LuQaS-Sensors in der Abluft vor der Wärmerückgewinnung zeigt einen ähnlichen Verlauf. Allerdings liegt das Niveau deutlich niedriger, was auf eine unterschiedliche Sensitivität der Sensoren zurückzuführen sein könnte. Weiterhin gibt es Belastungsspitzen, die weniger stark im Abluftkanal erfasst werden, als bei Mittelung aus den Messwerten in den Räumen und solche, die deutlich stärker in der Abluft erfasst wurden.

Insgesamt ergibt sich aber trotz der Glättung eine gute Dynamik der VOC-Messwerte in der Abluft mit dem LuQaS-Sensor, so dass er der für eine LQ-Regelung gut eingesetzt werden kann, obwohl die Sensitivität deutlich abgenommen hat (siehe Kapitel 5.1.6).

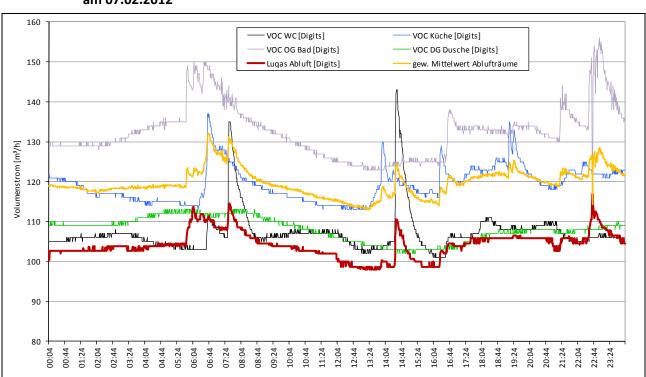


Bild 36: Exemplarische Darstellung der VOC-Messwerte in Ablufträumen und in der Abluft in Haus 1 am 07.02.2012

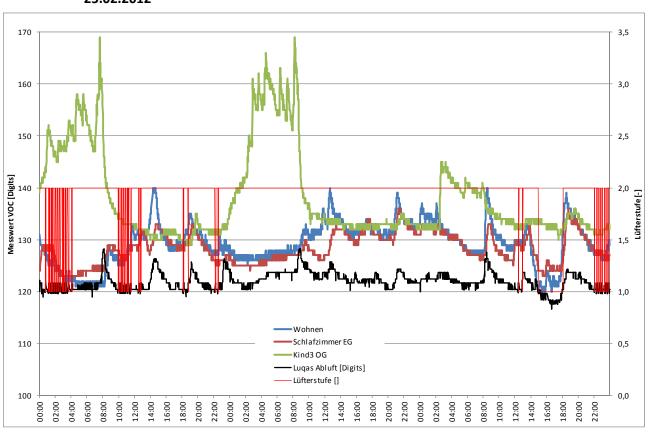
Eine wichtige Frage ist, inwieweit Belastungsspitzen in Zulufträumen in geeigneter Art und Weise mit der LQ-Regelung beseitigt werden können. Dies zeigt ein Vergleich ausgewählter Aufenthaltsräume mit den



Messwerten in der Abluft. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, welcher Volumenstrom in dem entsprechenden Raum vorhanden ist.

In Bild 37 sind für Haus 3 die VOC-Messwerte von drei wichtigen Aufenthaltsräumen (Wohnzimmer, Schlafzimmer EG und Kind3 OG bzw. Schlafzimmer OG) sowie die Messwerte in der Abluft und die Lüfterstufe für den Zeitraum vom 23.02. bis 25.02.2012 (Donnerstag bis Samstag) zu sehen. In diesem Gebäude ist in dieser Zeit keine längere Abwesenheit aller Bewohner aufgetreten, und alle drei Zulufträume weisen eine unterschiedliche Dynamik auf. Die höchsten Lastspitzen treten im Schlafzimmer OG (Kind3 OG) in den Nachtund Morgenstunden auf<sup>3</sup>. Im Wohnzimmer sind diese geringer und treten tagsüber und in den Abendstunden auf. Das Schlafzimmer EG wurde kaum genutzt und weist eine ähnliche Dynamik wie das Wohnzimmer auf. Als Konsequenz der überwiegenden Nutzung des Gebäudes im dargestellten Zeitraum wird die Lüftungsanlage nahezu kontinuierlich in Stufe 2 betrieben, nur zu einigen Zeiten in der Nacht des ersten und letzten Tages regelt die Anlage zwischen Stufe 2 und 1. Der Messwert in der Abluft liegt über den dargestellten Zeitraum immer unter demjenigen der Zulufträume. Das ausgewählte Beispiel zeigt, dass hier die Dynamik z. B. des Schlafzimmers nicht direkt in der Abluft wiederzufinden ist, aber dennoch die Anlage korrekt regelte. Die Zapfprofile beim Warmwasser zeigen, dass das Gebäude auch tagsüber meist belegt war, so dass die Regelung dann auch nicht absenken konnte.





Hier muss berücksichtigt werden, dass in diesem Raum der Zuluftvolumenstrom sehr niedrig ausgelegt war (siehe Kapitel 3.2.3), so dass die hohen VOC-Werte in diesem Raum dadurch zu erklären sind.



Ein anderes Beispiel zeigt Bild 38 aus Haus 2 für den Zeitraum 10.02. - 12.02.2012 mit sehr tiefen Außentemperaturen, bei denen außer dem Öffnen der Haustür keine Fensterlüftung stattfand. Auffällig ist hier vor allem das niedrige Niveau der Messwerte im Schlafzimmer. Hier liegt möglicherweise ein geringerer Offset beim VOC-Fühler vor. Dennoch zeigt er eine Dynamik in den Messwerten, die aber niedriger ausfällt als in den anderen Räumen. Das Gleiche gilt für die VOC-Messwerte in der Abluft, die ebenfalls deutlich niedriger liegen als in den anderen Zulufträumen. In diesem Haus wurde von der LQ-Regelung häufig die Lüftungsstufe verändert, insbesondere wurde nachts die Lüftung zeitweise auf Stufe 1 betrieben. Ob dieses Verhalten evtl. durch Schichtdienst entstanden ist, so dass das Schlafzimmer nicht dauerhaft mit zwei Personen belegt ist oder die Schlafzimmertür überwiegend geöffnet war, ist nicht bekannt. Darüber hinaus zeigt der Ausschnitt, dass die LQ-Regelung die Spitzen bei den VOC-Messwerten in Wohnzimmer recht schnell ablüftet.

Bild 38: VOC-Messwerte in ausgewählten Zulufträumen und in der Abluft in Haus 2 vom 10.02. - 12.02.2012

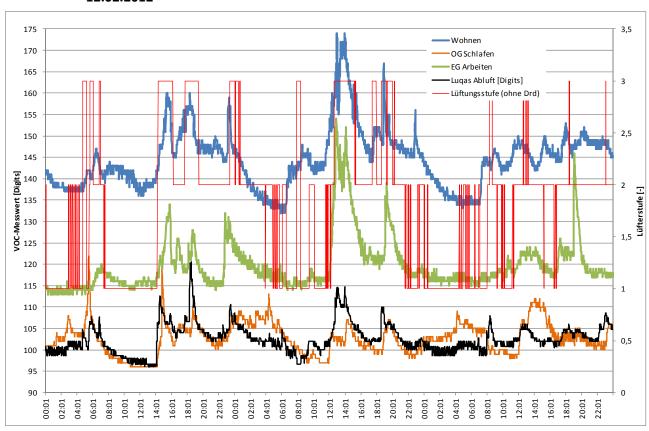




Bild 39 zeigt für alle vier Feldtestgebäude die VOC-Messwerte im Schlafzimmer im Zeitraum von 01.03.2011 (Haus 4 ab 01.04.2011) bis 29.02.2012. Auf der Y-Achse sind die Stunden des Tages dargestellt, auf der X-Achse die Tage des Auswertezeitraumes. Es zeigt sich bei allen Gebäuden, dass die VOC-Messwerte in den Nachtstunden (unten und oben) höher liegen als tagsüber (Mitte, dunklere Farben), außerdem dass die VOC-Konzentrationen von links nach rechts abnehmen (Farben dunkler werden). Allerdings ist die Dynamik der VOC-Messwerte bei den Gebäuden unterschiedlich. Bei Haus 2 ist die Verteilung gleichmäßiger als z. B. bei Haus 3 (unten links), ist der Einfluss der Veränderung der Volumenströme zwischen Schlafzimmer und Galerie Anfang September 2011 deutlich zu erkennen.

VOC Schlafen VOC Schlafen 22 20 18 16 VOC-Messwert [Digits] 12 10 01.03.2011 01.06.2011 02.12.2011 01.09.2011 Datum 01.03.2011 01.06.2011 02.12.2011 29.02.2012 01.09.2011 Datum VOC Schlafen VOC Schlafen 22 22 20 16 OC-Messwert [Digits] Uhrzeit Uhrzeit 12 10 01.03.2011 01.06.2011 02.12.2011 29.02.2012 01.09.2011 Datum 02.07.2011 02.10.2011 Datum

Bild 39: VOC-Messwerte der Schlafzimmer aller vier Feldtestgebäude für den Zeitraum 01.03.2011 (01.04.2011) - 29.02.2012

## 5.1.4 Ausfallhäufigkeit der VOC-Sensoren

Insgesamt wurden in den vier Gebäuden des Feldtests 51 VOC-Sensoren eingesetzt, davon 43 LuQaS-EvaKits und 8 M18-Kanalfühler. Die gesamte Betriebszeit aller Sensoren summiert sich auf insgesamt 1.215.360 h, im Mittel waren die Sensoren 23.831 h/Sensor in Betrieb (max. 30936 h/Sensor, min. 10248 h/Sensor). Hierbei ist es von Interesse, wie viele Ausfälle bei den Sensoren aufgetreten sind. Alle Ausfälle sind in Tab. 13 dokumentiert.

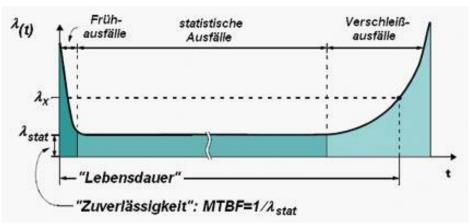


Tab. 13: Sensorausfälle im Feldversuch

Gebäude	Sensortyp	Ausfalldatum	Betriebszeit	Anmerkung
Haus 1	M18 Zuluft	18.12.2009	394 d	Totalausfall, Sensor lieferte Ausgangsspannung OV, getauscht
Haus 2	M18 Zuluft	12.04.2010	362 d	Totalausfall, Sensor lieferte Ausgangsspan- nung 0 V, nach Reset lieferte der Sensor 4 Tage plausible Messdaten und fiel dann wieder aus; wurde nicht getauscht
Haus 3	LuQaS Ba- dezimmer	01.08.2009	18 d	Lieferte kein Signal mehr, getauscht
Haus 4	M18 Zuluft	03.01.2012	278 d	Totalausfall, Sensor lieferte Ausgangsspannung OV, wurde nicht getauscht

Bei den LuQaS-Sensoren fiel nur ein einziger Sensor nach kurzer Zeit aus. Berücksichtigt werden muss jedoch, dass alle Sensoren vor der Montage über einen Zeitraum von einigen Tagen bis mehreren Wochen vorab getestet wurden. Dabei wurde ein weiterer Sensor wegen Fehlfunktionen nach kurzer Zeit ausgetauscht und somit nie montiert. Bei zwei defekten LuQaS-Sensoren ergibt sich eine Ausfallrate ( $\lambda$ ) von 1946 FIT ("Failures in Time" – Ausfälle je 10^9 Stunden) bzw. eine mittlere statistische Lebensdauer von 58,7 Jahren<sup>4</sup> bis zum Ausfall (ohne Berücksichtigung der Zeit der Testphase vor Montage), wobei die statistische Sicherheit aufgrund der geringen Anzahl von Ausfallereignissen gering ist. Der FIT-Wert wird meist für einzelne elektronische Bauteile bestimmt. Hier gibt es keine Grenzwerte, aber Standardwerte z. B. nach MIL-HDBK-217. Der LuQas-Sensor liegt im Bereich von Ausfallraten, wie sie für einzelne integrierte Schaltkreise angegeben werden (1164 -6444 FIT). Da beide Ausfälle zu Beginn der Messphase bzw. sogar davor stattfanden, können sie zu den Frühausfällen gerechnet werden (siehe Bild 40). Statistische Ausfälle sind bei den LuQaS-Sensoren innerhalb der Feldphase nicht aufgetreten, die LuQaS-EvaKit-Sensoren können somit als sehr ausfallsicher bezeichnet werden.

Bild 40: Schematische Darstellung von Ausfälle von Bauteilen [Frick 2011]



Von den M18-VOC-Sensoren sind drei von 8 Sensoren während der Feldphase ausgefallen. Daraus ergibt sich eine deutlich höhere Ausfallrate von 15985 FIT oder eine mittlere Lebensdauer von 7,1 a bis zum Ausfall. Die Tatsache, dass alle in der Zuluft montiert waren, lassen vermuten, dass die Einsatzbedingungen dort nicht optimal waren. Bild 41 zeigt die Einbaulage des LuQaS-EvaKit- und M18-Sensors in der Zuluft.

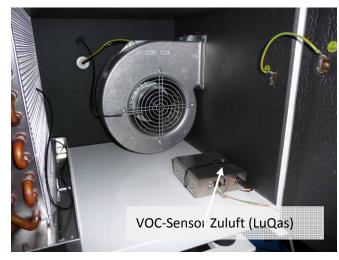
<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Aus der mittleren statistischen Lebensdauer lassen sich jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die tatsächliche Lebensdauer eines einzelnen Bauteils ziehen, sie dient hauptsächlich Vergleichszwecken.



Während der LuQaS im Lüftungs-/Wärmepumpengerät aufgestellt war (Bild rechts), wurde M18 als Kanalfühler in die Zuluftleitung geschraubt. Die Temperaturen und Feuchtewerte, der die beiden Sensoren ausgesetzt waren, können als identisch angesetzt werden.

Bild 41: Einbausituation der VOC-Sensoren in der Zuluft





VOC-Fühler Zuluft bei Haus 2

Montage des VOC-Sensor (LuQaS) der Zuluft in Haus 1

Laut Datenblatt [ETR 2004] ist der M18-Sensor für Einsatzbereiche von 0 °C bis 60 °C und 10 % rel. Feuchte bis 95 % rel. Feuchte geeignet.

Bild 42: Zulufttemperatur und –feuchte sowie VOC-Werte M18 und LuQaS-EvaKit in der Zuluft Ende Dezember 2011 in Haus 4 vor Ausfall des M18-Sensors

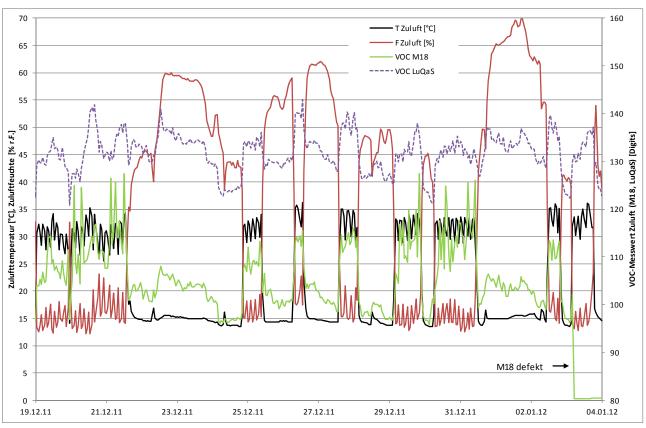




Bild 42 zeigt die gemessenen VOC-Werte des M18 und des LuQaS-EvaKit-Sensors sowie die Zulufttemperatur und -feuchte von Haus 4 in den letzten zwei Wochen vor Versagen des M18-Sensors. Die Zulufttemperatur steigt nie über 37 °C und sinkt nie unter 13,7 °C. Auch wenn die Messdaten in Minutenauflösung ausgewertet werden, liegt die niedrigste Zulufttemperatur nie unter 11,3 °C und die höchste Zulufttemperatur nie über 41,6 °C im gesamten Messzeitraum von 427 Tagen. Der Temperatureinsatzbereich wurde somit nie verlassen.

Die Feuchtewerte liegen im Bild 42 im Bereich 10 % rel. Feuchte bis 70 % rel. Feuchte. Im gesamten Messzeitraum wurde eine Feuchte von 76,9 % rel. Feuchte nie überschritten, die minimale Feuchte lag in 1,3 % der Zeit (375 Minuten) unter der Schwelle von 10 % rel. Feuchte. Somit wurde im Monat vor dem Versagen des M18-Sensors der Betriebsbereich für Feuchte nicht verlassen, im Gesamtzeitraum nur wenig Stunden. Eine Erklärung für den Ausfall des VOC-Sensors kann daraus nicht abgeleitet werden, es ist aber möglich, dass die niedrige Feuchte ein Problem darstellt.

Grundsätzlich zeigten sich die LuQaS-EvaKit-Sensoren als zuverlässig im Dauereinsatz (bezüglich der grundsätzlichen Sensorfunktion), bei zukünftigen Anwendungen sollte jedoch darauf geachtet werden, dass keine Feuchtesprünge den VOC-Messwert zu stark beeinflussen.

## 5.1.5 Vergleich von VOC-Werten mit Messdaten von CO<sub>2</sub>-Sensoren

Bild 43:

In Haus 3 wurden parallel zu den VOC-Sensoren auch CO<sub>2</sub>-Sensoren in allen Räumen montiert. Im Gegensatz zu den VOC-Sensoren waren diese nicht im Unterputzkasten in der Wand sondern auf deren Abdeckung mit gutem Kontakt zur Raumluft befestigt (Bild 44).

Verlauf der Monatsmittelwerte der CO2-Konzentration in Haus 3 in den unterschiedlichen



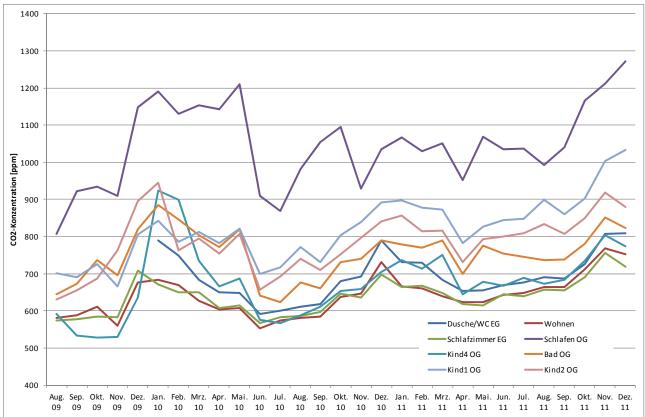




Bild 43 zeigt den Verlauf der Monatsmittelwerte der CO2-Konzentration aller gemessenen Räume von Haus 3. Die Mittelwerte der meisten Räume liegen zwischen 550 ppm und 900 ppm und somit auf niedrigem Niveau (Außenluftkonzentration CO<sub>2</sub> ca. 400 ppm). Auffällig sind die CO<sub>2</sub>-Werte im Schlafzimmer im OG, die im Mittel über 1000 ppm liegen, nächtliche Spitzenwerte erreichen bis zu 2600 ppm (Bild 45). Diese viel zu hohen Werte lagen darin begründet, dass durch eine nachträgliche Erweiterung der Eigentümer der Luftverteilung in den Spitzboden sich die Volumenströme im Obergeschoss verschoben haben. In der Folge konnte bei einer Kontrolle der Volumenströme im Schlafzimmer, das mit zwei Personen belegt ist, nur ein Volumenstrom von 10 m³/h gemessen werden – empfeh-

Bild 44: Montage der CO<sub>2</sub>-Fühler auf der Abdeckung der VOC-/Temperatur- und Feuchtemesstechnik



lenswert wäre ein Volumenstrom von mindestens 35 m³/h. Im selten genutzten Spitzboden lag der Volumenstrom jedoch bei 46 m³/h. Als Sofortmaßnahme wurde beim Zuluftelement im Spitzboden teilweise mit Klebeband der Querschnitt reduziert, um den Volumenstrom dort zu reduzieren und im Schlafzimmer zu erhöhen. In der Folge sind im Schlafzimmer die CO<sub>2</sub>-Werte kaum noch über 2000 ppm angestiegen (siehe Bild 45), was aber immer noch als zu hoch eingestuft werden muss.

Nachträgliche Erweiterung der Lüftungsverteilung

2400

1600

1200

Bild 45: Stundenmittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzetration im Schlafzimmer Haus 3

800



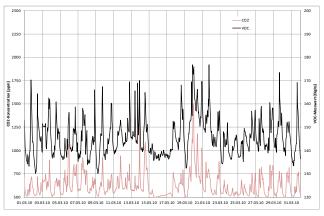
Bild 46 zeigt für die vier Räume Wohnzimmer (oben links), Elternschlafzimmer (unten links), Badezimmer (oben rechts) und Dusche/WC (unten rechts) den Verlauf der VOC- und der CO<sub>2</sub>-Werte für den März 2010 (Stundenmittelwerte). Dieser Zeitraum liegt vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung.

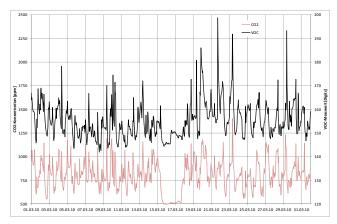
Im Wohnzimmer überstieg die CO<sub>2</sub>-Konzetration im dargestellten Zeitraum nur zweimal kurz nennenswert die Schwelle von 1000 ppm (Pettenkofer-Grenze), die in Passivhäusern als gute Luftqualität angestrebt wird (entsprechend etwa IDA2 nach DIN EN 13779). Nachts sinken die Werte meist auf 500 ppm bis 600 ppm ab. Die VOC-Werte schwanken vergleichbar, alle Peaks bei den CO<sub>2</sub>-Werten führen auch zu Spitzen beim VOC. Eine Detailauswertung von CO<sub>2</sub> und VOC-Werten folgt weiter unten.

Das Schlafzimmer (Bild 46 unten links) zeigt die bereits geschilderten hohen CO<sub>2</sub>-Werte, die sich auch in hohen VOC-Werten widerspiegeln. An den beiden Tagen Mitte März, an denen das Haus offensichtlich nicht bewohnt war, sinken die VOC- und die CO<sub>2</sub>-Werte in Wohn- und Schlafzimmer auf vergleichbare Werte ab, was als Indiz dafür gewertet werden kann, dass die Sensoren nicht unterschiedlich gedriftet sind.

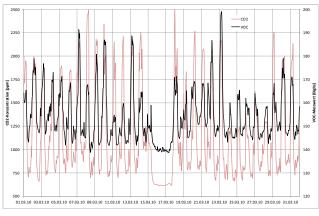
Die Ablufträume Badezimmer und Dusche/WC besitzen VOC-Werte auf einem erhöhten Niveau, hier fallen besonders die ausgeprägten Spitzen auf, die im Allgemeinen auch mit einer nennenswerten Geruchsbelastung verbunden sind. Die CO<sub>2</sub>-Werte liegen in Dusche/WC deutlich niedriger als im Badezimmer. Die Ursache dafür ist nicht bekannt.

Bild 46: Entwicklung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Konzentration und VOC-Messwerte in Haus 3 für den März 2010

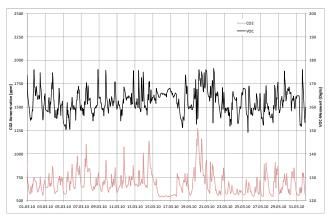




### Wohnzimmer EG







Schlafzimmer OG

Dusche / WC EG

Bild 47 zeigt eine Detailauswertung der CO<sub>2</sub>- und VOC-Messwerte im Wohnzimmer für 9 Tage im März 2010. Grundsätzlich sind alle Spitzen und Täler in beiden Kurven zu erkennen. Allerdings führen identische



CO<sub>2</sub>-Messwerte nicht immer zu gleichen VOC-Messwerten. So sind am 09.03. und am 11.03. die Spitzenwerte bei der CO<sub>2</sub>-Konzentration identisch, die zugehörigen VOC-Messwerte unterscheiden sich jedoch um 15 Digits. Umgekehrt treten am 09.03. und 10.03. niedrige CO<sub>2</sub>-Werte mit ca. 520 ppm auf, die zugehörigen VOC-Werte liegen ca. 6 Digits auseinander. Schließlich gibt es am 13.03. eine nennenswerte Spitze bei den VOC-Werten, die keine Entsprechung bei den CO<sub>2</sub>-Werten besitzt.

Bild 47: Detailauswertung eines Zeitraumes von 9 Tagen der VOC- und CO<sub>2</sub>-Messwerte im Wohnzimmer

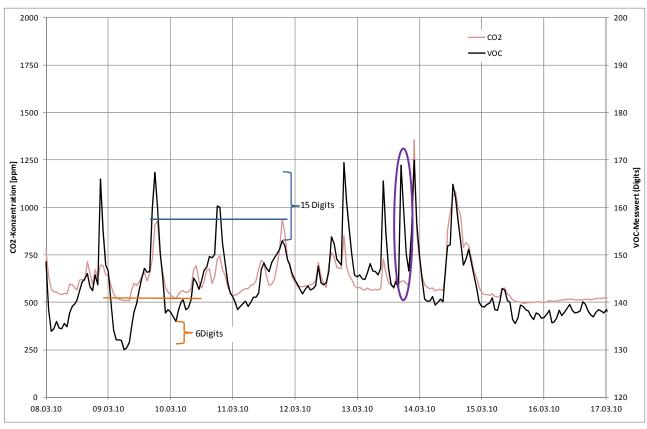


Bild 48 zeigt im Verlauf über die Messzeit die nach Volumenstrom gewichteten Mittelwerte der Zu- und Ablufträume für CO<sub>2</sub> und VOC. Die Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Messwerte sind in den VOC-Messdaten nicht wiederzufinden, letztere zeigen den bereits gezeigten Effekt der sich im Zeitverlauf langsam abbauenden VOC-Werte. Die Erläuterung findet sich im folgenden Kapitel.



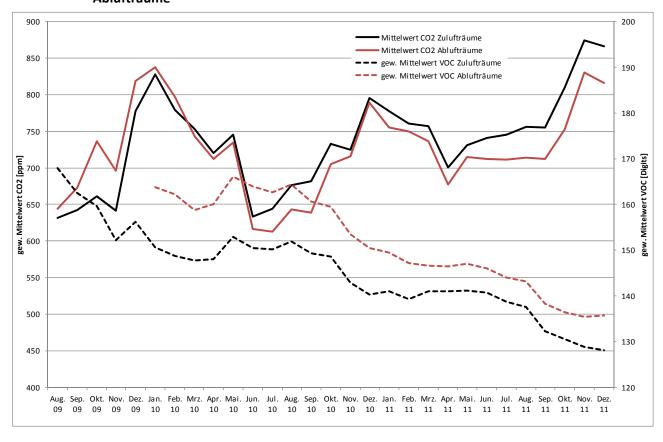


Bild 48: Vergleich der gewichteten Mittelwerte von CO<sub>2</sub> und VOC im Zeitverlauf für Zu- und Ablufträume

Generell ist festzustellen, dass die VOC-Messwerte im Vergleich mit den CO<sub>2</sub>-Messwerten durchaus plausibel und meist erklärbar sind, einzelne Ereignisse tauchen aber nur in den VOC-Sensoren auf, was ihren Vorteil in einer LQ-Regelung gegenüber den CO<sub>2</sub>-Sensoren ausmacht. Besonders die langfristige Entwicklung der VOC-Pegel im Gebäude durch Ausdünstungen der Inneneinrichtung können die CO<sub>2</sub>-Sensoren nicht abbilden. Im Feldtest nicht aufgetreten, besteht mit den VOC-Sensoren aber die Möglichkeit, auch auf besondere Belastungen wie z. B. Tabakrauch zu reagieren, der mit CO<sub>2</sub>-Sensoren kaum erkannt werden kann. Diese Aufzählung zeigt die Vorteile des Einsatzes von VOC-Sensoren zu Regelung der Raumluftqualität. Als Nachteile sind die fehlenden absoluten Schwellwerte und der Sensordrift zu nennen, die aber auch bei CO<sub>2</sub>-Sensoren auftreten.

# 5.1.6 Ergebnisse der Nachkalibrierung der VOC-Sensoren

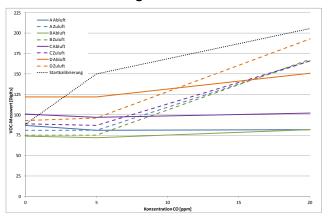
Alle eingesetzten LuQaS-EvaKit-VOC-Sensoren wurden nach Ablauf des Messprogramms von der Firma AL-KO Therm auf die Abweichung zu ihrer Ursprungskalibrierung überprüft. Als Kalibriergas wurde CO verwendet. Die Sensoren waren bei Auslieferung auf eine CO-Konzentration von 5 ppm kalibriert, der Messwert lag dann bei 150 Digits. Bei der Überprüfung zeigte sich, dass außer bei den Sensoren, die in der Zuluft montiert waren, sich die Sensitivität aller Sensoren gegenüber dem Kalibriergas CO sehr stark abgeschwächt hat bzw. kaum noch eine Reaktion auf eine Erhöhung der CO-Konzentration stattfindet. Aus diesem Grund wurde zusätzlich auch der Messwert bei einem CO-Wert von 20 ppm ermittelt. Trotz der stark abge-



schwächten Sensitivität auf CO <sup>5</sup> zeigen die Sensoren eine charakteristische Reaktion auf übliche Belastungen im Büro.

Bild 49 links zeigt den Vergleich der EvaKit-VOC-Sensoren in Zu- und Abluft aller Feldtestgebäude. Bei allen Sensoren in der Zuluft hat sich die Sensitivität stark abgeschwächt, bei erhöhten Konzentrationen des Kalibriergases ist aber eine deutliche Veränderung des Sensorsignal vorhanden, das in der gleiche Größenordnung liegt, wie im Auslieferungszustand. Die Sensoren, die in der Abluft montiert waren, zeigen dagegen kaum eine Reaktion auf steigende CO-Konzentrationen.

Bild 49: Auszug der Ergebnisse der Überprüfung der Kalibrierung der LuQaS-EvaKit-VOC-Sensoren: links Sensoren in Zu- und Abluft, rechts Sensoren aus Wohn- und Schlafzimmer für alle Feldtestgebäude



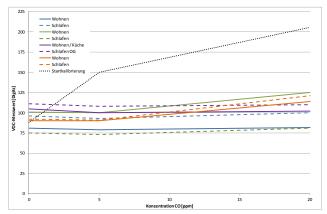
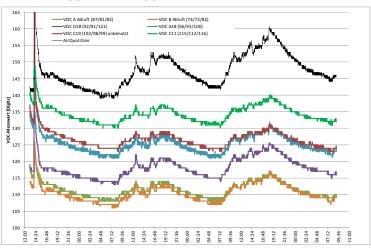


Bild 49 rechts zeigt die Ergebnisse für die Sensoren, die im Wohn- und Schlafzimmer montiert waren. Hier zeigt sich ebenso wie bei den Abluftsensoren kaum eine Sensitivität gegenüber ansteigenden CO-Konzentrationen. Die vollständige Dokumentation dieser Überprüfung der VOC-Sensoren ist in Anhang E zu finden.

Dennoch reagieren die Sensoren in normaler Luft auf unterschiedliche Luftbelastungen. Exemplarisch wurde mit sechs LuQaS-Sensoren aus dem Feldtest der Verlauf der Messwerte in Raumluft im Vergleich mit einem Sensor vom Typ AirQualitizer (siehe Kapitel 5.5) über drei Tage erfasst (Bild 50). Der Grundpegel (Offset) ist bei den verschiedenen Sensoren sehr unterschiedlich, die Signaldynamik aber bei allen LuQaS-Sensoren vergleichbar und ausreichend für eine Beeinflussung durch die LQ-Regelung. Ein Sensor (C19) war als Reservesensor nie montiert und besitzt trotz minimaler Betriebsstunden die gleiche Signaldynamik und einen ähnlichen Grundpegel, wie die Sensoren aus dem Feldtest, die mehrere Tausend Betriebs-

Bild 50: Vergleich von sechs LuQaS-Sensoren mit dem AirQualitizer in Büroluft über drei Tage nach Abschluss der Feldphase (Signalpegel bei 0 ppm, 5 ppm und 20 ppm in Klammern)



<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> CO sollte in der Raumluft nicht oder nur in geringsten Mengen auftreten. Die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) liegt bei 35 ppm.

66



stunden aufweisen. Der AirQualitizer ist nach Herstellerangaben für eine größere Signaländerung ausgelegt, was auch in der Darstellung zu erkennen ist. Die Verläufe der Messwerte sind aber direkt mit den LuQaS-Sensoren vergleichbar. Unabhängig von der Reaktion auf das Kalibriergas sind die Sensoren somit bei den im Projekt entwickelten Regelverfahren immer noch voll einsetzbar.

Die Ursache für die große Diskrepanz zwischen Auslieferungszustand und Überprüfung nach Abschluss der Messphase ist unbekannt. Die Sensoren in der Zuluft sind genau wie diejenigen in der Abluft horizontal im Kanal bzw. im Lüftungsgerät angeordnet gewesen. Hauptunterschied ist neben der Temperatur- und Feuchtebelastung vor allem die Tatsache, dass die Zuluftsensoren hinter einem Feinfilter angeordnet sind. Allerdings verfügen die Sensorelemente über ein Glassieb, das Staubeinträge in den Sensor verhindern soll. Die Sensoren in den Räumen der Feldtestgebäude waren alle senkrecht in der Wand eingebaut, so dass hier keine erhöhte Staubbelastung auftreten sollte. Aus diesem Grund ist es nicht erklärlich, warum alle VOC-Sensoren, außer denen in der Zuluft, ihre Sensitivität gegenüber CO verloren haben.

Die Überprüfung der Kalibrierung der Sensoren liefert somit die Erklärung, warum die Signale der VOC-Sensoren in Zu- und Abluft so weit auseinander liegen und warum sowohl in der Abluft als auch in den Wohnräumen ein starkes Abklingen festgestellt wurde. Gleichzeitig zeigen die Sensordrifts auch die Stärke der entwickelten LQ-Regelung, die in weiten Bereichen den Drift korrigiert hat und so die Funktionsfähigkeit der Volumenstrombeeinflussung sichergestellt hat.

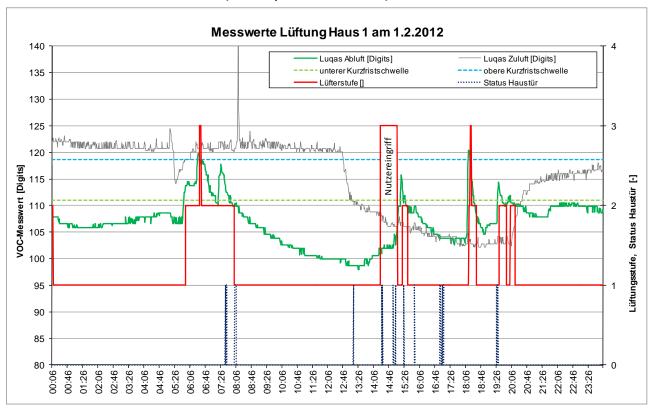


## 5.2 Luftqualitätsregelung

Die Luftqualitätsregelung (LQ-Regelung) hat in der komfortorientierten Betriebsweise die Aufgabe den Volumenstrom der Lüftungsanlage zu erhöhen, wenn die VOC-Werte in der Abluft die periodisch neu berechneten Schwellwerte überschritten haben, da im Gebäude dann besondere VOC-Emittenten vorhanden sind. Außerdem soll sie den Volumenstrom reduzieren, wenn die Schwellwerte, z. B. wegen Abwesenheit der Bewohner unterschritten werden.

Bild 51 zeigt beispielhaft für Haus 1 am 01.02.2012 die gemessenen VOC-Werte der Abluft und der Zuluft, die für diesen Tag berechneten VOC-Schwellwerte (Kurzfrist) zur Umschaltung der Lüftungsanlage (unten/oben) sowie die Lüftungsstufe. Nachts liegen die VOC-Werte der Abluft deutlich unter dem unteren Schwellwert von 110,7 Digits und in der Folge wird die Lüftungsstufe 1 eingestellt. Gegen 6:00 Uhr steigt die Aktivität im Gebäude und in der Folge ist ein starker Anstieg der VOC-Messwerte in der Abluft festzustellen. Wenige Minuten nach Überschreiten der unteren Schwelle schaltet die Lüftungsanlage in Stufe 2 und verbleibt in dieser Stufe, bis die Bewohner das Gebäude um 8:00 Uhr verlassen haben (erfasst über den Türstatus) und die Messwerte kontinuierlich absinken. Einzige Ausnahme an diesem Morgen ist eine kurze Phase, in der die VOC-Werte der Abluft kurzzeitig über den oberen Schwellwert ansteigen. Auch hier reagiert nach kurzer Zeit die LQ-Regelung und erhöht für fünf Minuten auf Stufe 3, bis der Schwellwert wieder unterschritten ist.

Bild 51: Beispiel der gemessenen VOC-Werte in der Ab- und Zuluft sowie die Lüftungsstufe für Haus 1 am 01.02.2012 (Drd-Sequenzen eliminiert)



Bis zum Mittag sinkt der VOC-Wert der Abluft kontinuierlich ab. Gegen 13:00 Uhr wird das Haus wieder betreten, und die Werte beginnen leicht anzusteigen, ohne dass sie das Niveau des unteren Schwellwerts erreichen. Der langsame Anstieg legt nahe, dass nur einzelne Bewohner das Gebäude wieder betreten haben. Um 14:24 Uhr wird manuell von den Bewohnern die Bedarfslüftung aktiviert und die Anlage verbleibt 30 Minuten in Stufe 3. Am Ende der Bedarfslüftung steigt der VOC-Wert deutlich an, so dass die LQ-



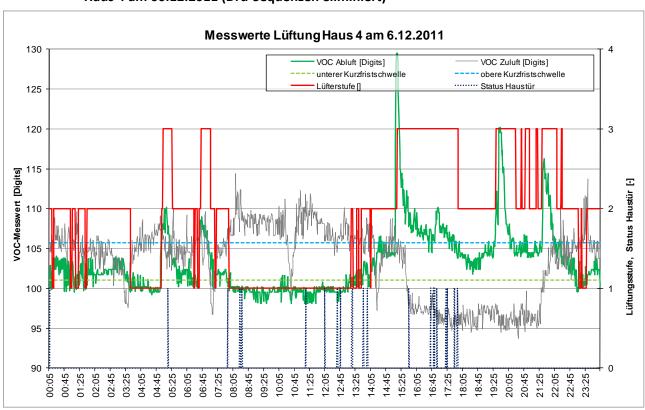
Regelung danach selbsttägig wieder in Stufe 2 schaltet, bis der VOC-Wert den unteren Schwellwert deutlich unterschreitet.

Danach sinken die VOC-Werte bis 18:00 Uhr wieder deutlich ab und die LQ-Regelung schaltet in Stufe 1. Aufgrund der Aktivität an der Haustür ist es wahrscheinlich, dass sich in dieser Zeit niemand im Gebäude aufhält. Um 18:00 Uhr steigen die VOC-Werte deutlich an, und die LQ-Regelung fährt die Lastspitzen bei Überschreitung der Schwellwerte nach.

Wie bereits in Kapitel 5.1.2 und Kapitel 5.1.6 dokumentiert, sind die VOC-Werte in der Abluft nicht unbedingt plausibel, da nach einiger Betriebszeit die Werte der Zuluft deutlich höher liegen als in der Abluft. Dieses Verhalten ist auch in Bild 51 zu sehen (graue Linie). Bis zur Mittagszeit verbleibt die VOC-Konzentration der Zuluft auf einem konstant hohen Wert, um in den Nachmittagsstunden deutlich abzusinken.

Die folgende Detailauswertung (Bild 52) zeigt für Haus 4 den Verlauf der VOC-Messwerte und der Lüftungsregelung. Hier ist zu beachten, dass zu diesem Zeitpunkt die M18-VOC-Sensoren für die LQ-Regelung verwendet wurden und dass aus diesem Grund sowohl das Niveau der VOC-Messwerte niedriger liegt, als auch die Spanne zwischen unterer und oberer Schaltschwelle kleiner ausfällt. Hier wird die Lüftungsanlage nachts überwiegend in Stufe 2 betrieben, nur kurzzeitig sinken die Messwerte unter den unteren Schwellwert. Gegen 5:00 Uhr steigen die Messwerte in der Abluft steil an und die Regelung folgt nahezu sofort dem VOC-Signal.

Bild 52: Beispiel der gemessenen VOC-Werte in der Ab- und Zuluft sowie die Lüftungsstufe für Haus 4 am 06.12.2011 (Drd-Sequenzen eliminiert)



Auch hier ist am Vormittag ein Abklingen der VOC-Werte und damit verbunden die Reduktion der Lüfterstufe auf 1 zu erkennen. Am Nachmittag steigen die Werte kontinuierlich an und die Regelung fährt die VOC-Last gut nach.



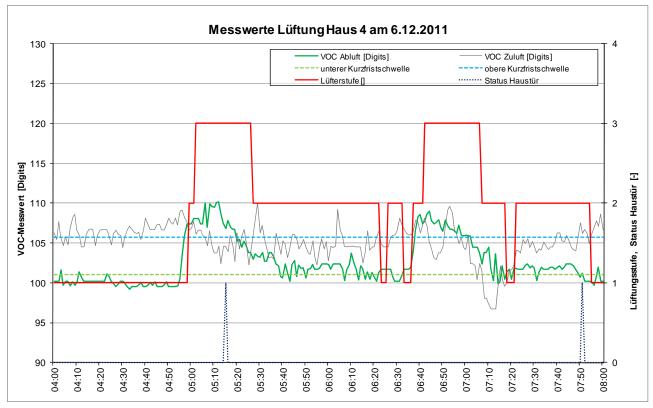


Bild 53: Detaildarstellung der Morgenstunden für Haus 4 am 06.12.2011 (Drd-Sequenzen eliminiert)

Bild 53 zeigt eine Detaildarstellung der Morgenstunden aus Bild 52. Zwischen 4:55 Uhr und 4:57 Uhr ist ein starker Anstieg der VOC-Werte in der Abluft festzustellen. Die LQ-Regelung reagiert mit nur zwei Minuten Verzögerung auf den Anstieg der VOC-Werte und erhöht die Lüftungsstufe erst auf 2 und dann gleich weiter auf 3, nachdem auch der obere Schwellwert überschritten wurde. Die Hysterese der LQ-Regelung, die auf 0,6 Digits eingestellt war, sorgt dafür, dass einerseits die Anlage nach Unterschreiten der Schwellwerte noch einige Minuten in der höheren Stufe verbleibt, bis in die nächst niedrigere Stufe gewechselt wird. Im dargestellten Beispiel führt diese Hysterese dazu, dass die Anlage erst ca. 7 Minuten nach Unterschreiten des oberen Schwellwertes in Stufe 2 zurück schaltet. Die Dauer der Verzögerung hängt in jedem Fall von der Abklinggeschwindigkeit des VOC-Messwertes ab.

Da die Hysterese von 0,6 Digits bei allen Häusern über die gesamte Messphase eingestellt war, wurde die LQ-Regelung bei Betrieb mit M18-VOC-Sensoren stärker gedämpft als bei Verwendung von EvaKits, da letztere einen höheren Signalpegel bei gleicher VOC-Last besitzen und somit die Hysterese prozentual niedriger ausfällt. Außerdem ist die Signaldynamik bei den EvaKits größer. Überschreitet der VOC-Wert einen Schwellwert wieder, so reagiert die LQ-Regelung sofort. Bedingt durch die eingebaute Verzögerung der LQ-Regelung kann es, wie im Bild oben um 6:20 Uhr, dazu kommen, dass bei einer geringen Überschreitung der Schwelle die Regelung trotzdem in die tiefere Stufe schaltet, da dies die Reaktion auf den Messwert 2 Minuten zuvor ist. Zu Beginn der Feldphase wurden unterschiedliche Einstellungen zur Dämpfung des Regelverhaltens erprobt, um einen Kompromiss zwischen schneller Ansprechzeit auf VOC-Spitzen und nur vergleichsweise geringen Regelschwingungen bei Messwerten im Bereich der Schaltschwellen zu finden.

Wie die LQ-Regelung auf eine längere Abwesenheit der Bewohner reagiert, ist in Bild 54 zu sehen. Am 20./21.12. ist das Haus noch normal genutzt und die LQ-Regelung passt kontinuierlich die Lüftungsstufe an. Am 21.12. brechen die Bewohner in einen 16-tägigen Urlaub auf. In der Folge sinkt die VOC-Konzentration im Gebäude stark ab, und die LQ-Regelung stellt die Lüftungsanlage in Stufe 1. Auf diesem Volumenstrom verbleibt sie bis zum Ende des Urlaubs (kurze Spitzen sind auf die auch in dieser Zeit durchgeführten Drd-Sequenzen zurückzuführen).



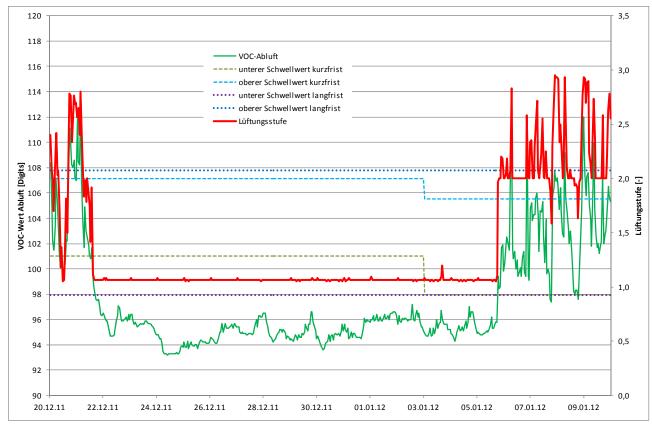


Bild 54: VOC-Wert Abluft und Lüftungsstufe für Haus 4 vom 20.12.2011 -09.01.2012 mit Urlaubszeit

Während der Abwesenheit werden am 03.01.2012 auch die kurzfristigen Schwellwerte für die Regelung neu bestimmt. Da kaum VOC-Lasten im Auswertungszeitraum der letzten 14 Tage vorhanden waren, sinken die Schwellwerte nennenswert ab. Das Absinken des unteren Schwellwerts wird jedoch durch den unteren Langfristschwellwert begrenzt, damit die Regelung nicht "davonläuft". Nach Rückkehr der Bewohner schaltet die LQ-Regelung automatisch wieder in Normallüftung (Stufe 2) bzw. bei höheren VOC-Spitzen in Stufe 3. Zwar wurden die Kurzfristschwellwerte durch die längere Abwesenheit deutlich beeinflusst, so dass nach Rückkehr der Bewohner tendenziell schneller in Stufe 3 geschaltet wird, dies ist aber aufgrund der nach einer längeren Abwesenheit meist vorhandenen verstärkten Aktivität der Bewohner nicht schädlich. Das Beispiel zeigt, dass die LQ-Regelung sehr gut auf einen längeren Leerstand des Gebäudes reagiert.

Auch im Sommer funktionierte die automatische Anpassung der Schwellwerte und die LQ-Regelung bei Abwesenheit der Bewohner gut. Bild 55 zeigt die VOC-Werte von Zu- und Abluft, die Lüfterstufe sowie die Kurzfrist- und Langfristschwellwerte für Haus 1 in einer Zeit mit 16-tägiger Urlaubsphase. Zu Beginn des Urlaubs sinken die VOC-Werte der Abluft stark ab, und die Lüftungsanlage fährt in Stufe 1 und verbleibt während des gesamten Urlaubs in dieser Stufe. Einzige Ausnahme sind zwei Tage (28./29.06), an denen die VOC-Werte der Zuluft stark ansteigen und in der Folge auch die Werte in der Abluft erhöht sind. Die LQ-Regelung erhöht in diesem Fall die Lüftungsstufe leicht, um den erhöhten VOC-Level wieder abzubauen. Am 06.07. werden die Kurzfristschwellen neu berechnet und wie im Winter wird ein zu tiefes Absinken des unteren Schwellwertes wegen fehlenden VOC-Lasten durch die Langfristschwellen verhindert. Untere Kurzund Langfristschwellen liegen dann eine Zeit lang beim gleichen Wert. Am Ende des Urlaubs fährt die LQ-Regelung die Lüftung wieder in Normallüftung.



140 3,5 Lugas Abluft [Digits] Luqas Zuluft [Digits] unterer Schwellwert kurzfrist oherer Schwellwert kurzfrist unterer Schwellwert langfrist 135 3.0 oberer Schwellwert langfrist Lüfterstufe [] 130 VOC-Wert Abluft / Zuluft [Digits] Lüfterstufe [-] 115 110 105 0.0 21.06.11 19.06.11 23.06.11 25.06.11 27.06.11 29.06.11 01.07.11 03.07.11 05.07.11 07.07.11 09.07.11 11.07.11 13.07.11

Bild 55: VOC-Werte Zu- und Abluft und Lüftungsstufe für Haus 1 vom 19.06.2011 - 13.07.2011 mit Urlaubszeit im Sommer

Die Auswirkungen einer längeren Abwesenheit sind in Bild 56 für das Ende des Urlaubs und die Zeit danach dargestellt. Nachdem der untere Kurzfristschwellwert zum Ende des Urlaubs abgesunken war, führt die Neuberechnung am 21.07. dazu, dass der untere Schwellwert aufgrund der dann wieder vorliegenden Nutzung des Gebäudes ansteigt, der obere absinkt. Das Absinken des oberen Schwellwertes bei häufigeren VOC-Spitzenwerten ist darauf zurückzuführen, dass hohe Werte zwar häufiger auftreten als in der Urlaubszeit, insgesamt die VOC-Messwerte enger um einen Mittelwert herum liegen, die Verteilungskurve also steiler ausfällt und somit die Quantile der unteren und oberen Schwelle näher an den Mittelwert/Medianwert heranrücken. Am 27.07. werden die Langfristschwellen neu berechnet. Hier zeigen sich die Auswirkungen des Urlaubs in einem moderaten Absinken der Schwellwerte. Das Absinken fällt jedoch gering genug aus, dass die Kurzfristschwellen nicht direkt beeinflusst werden.



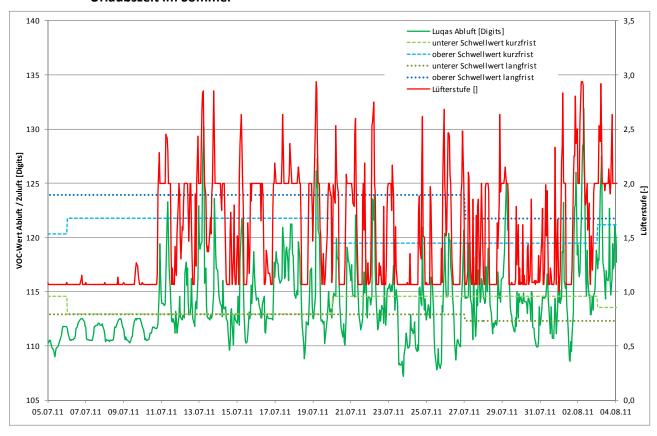


Bild 56: VOC-Wert Abluft und Lüftungsstufe für Haus 1 vom 05.07.2011 - 03.08.2011 nach Ender der Urlaubszeit im Sommer

Eine Gesamtübersicht über die gewählten Lüfterstufen ist in Bild 57 zu sehen. Dargestellt sind die Stunden des Tages (Y-Achse) und die Tage zwischen dem 01. März 2011 und Ende Februar 2012 (X-Achse). Je heller die Farbe ist, desto höher fällt im Zeitraum die Lüfterstufe aus. Die Messdaten wurden immer mit Winterzeit abgespeichert, so dass im Bereich der Zeitumstellung teilweise Sprünge in der Darstellung zu erkennen sind.

Bei Haus 1 ist einerseits die Urlaubszeit im Sommer 2011 und etwas kürzer im Herbst 2011 mit abgesenktem Betrieb (dunkle Farben von unten nach oben, also über den gesamten Tag) zu erkennen. Außerdem ist tagsüber (mittlere Höhe in der Darstellung) die Lüfterstufe abgesenkt, während sie abends und vor allem nachts deutlich höher ausfällt. Die höchsten Werte werden am frühen Morgen erreicht. Im Winter 2011/12 wird das Bild etwas uneinheitlicher. Zwischen 3:00 Uhr und 5:00 Uhr morgens werden immer noch die Volumenströme von der LQ-Regelung eingestellt und zusätzlich ist die Lüfterstufe in der Mittagszeit erhöht. Dies deutet auf eine Änderung der Gewohnheiten der Bewohner hin. Abends und in der Nacht liegt die Lüfterstufe tendenziell niedriger als in den Monaten davor. Dies könnte mit dem absinkenden VOC-Pegel im Gebäude und der damit verbundenen geringeren Spanne zwischen den Schwellwerten unten und oben zu tun haben, so dass öfter die niedrigere Lüfterstufe eingestellt wurde. Wie die Kurzbefragung der Bewohner im Winter 2011/12 zeigt, wurde von den Bewohnern die Luftqualität in dieser Zeit nicht schlechter eingeschätzt als zuvor (siehe Kapitel 8.3).



01.03.2011 20.08.2011 Datum 14.11.2011 01.03.2011 01.06.2011 01.09.2011 Datum Haus 2 Haus 1 22 20 01.06.2011 01.09.2011 Datum 02.12.2011 29.02.2012 02.10.2011 Datum Haus 3 Haus 4

Bild 57: Darstellung der Lüfterstufen der vier Gebäude im Zeitraum 01.03.2011 bis 29.02.2012 (bzw. jeweils verfügbarer Zeitraum)

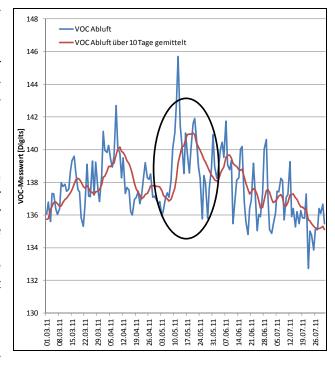
Bei Haus 2 ist der Tagesgang weniger deutlich ausgeprägt, da die Bewohner möglicherweise nicht so oft das Haus komplett verlassen. Ursache könnte die Tatsache sein, dass kleinere Kinder betreut werden. Dennoch ist auch hier in den Mittagsstunden der reduzierte Volumenstrom zu erkennen, nachts tritt immer der höchste Volumenstrom auf. Die höheren Werte in den Mittagsstunden im September/Oktober sind auf Basis der Messdaten nicht zu erklären, aber auch hier könnte die Ursache in einer häufigeren Anwesenheit der Bewohner liegen.



Haus 3 zeigt im Mai 2011 über mehrere Tage einen auffällig hohen Volumenstrom. Gleichzeitig sind die VOC-Messwerte in der Abluft deutlich erhöht gegenüber den Monaten davor und danach (siehe Bild 58), so dass die Erhöhung des Volumenstroms bei hohen VOC-Messwerten die korrekte Reaktion der LQ-Regelung darstellt. In der übrigen Zeit des dargestellten Zeitraums ist das Bild vergleichbar derjenigen von Haus 1. Auch hier wird tagsüber abgesenkt, die höchsten Werte treten in den Morgenstunden und am frühen Abend auf.

Die Auswertung von Haus 4 ist etwas schwieriger, da die LQ-Regelung direkt nach Inbetriebnahme der Messtechnik aktiviert wurde (12.04.2011). In der Folge lag die Lüfterstufe erst sehr hoch, da die Startwerte noch nicht zum VOC-Pegel des neuen Gebäudes passten. Im Mai 2011 wurde die Anlage mehrmals von den Bewohnern tagsüber komplett abgeschaltet (die Ursache ist unbekannt, es wird aber eine Abwesenheit der Bewohner als Grund vermutet). Anschließend zeigte sich auch bei diesem Haus, dass in der Mittagszeit eine Volumenstromre-

Bild 58: Verlauf der VOC-Konzentration in der Abluft Haus 3 vom 1.3.11 bis 31.7.11



duktion von der LQ-Regelung vorgegeben wurde und in den Abend- und Nachtstunden die Anlage auf höherem Niveau lief. Hier ist zu berücksichtigen, dass auch bei diesem Gebäude wohl selten alle Bewohner das Gebäude verlassen haben, da kleine Kinder betreut wurden. Im Januar 2012 wurde auf energieorientiere Betriebsweise umgeschaltet. Kurz darauf war aber der M18-VOC ausgefallen, so dass nach Umschaltung auf den LuQaS-EvaKit-Sensor die Schwellwerte erst neu bestimmt werden mussten. In der Folge zeigt die Darstellung überwiegend rot (Lüftungsstufe 2), dann 1 Woche mit erhöhtem Volumenstrom (gelb), da nach einem Softwareproblem die komfortorientierte Betriebsweise kurzzeitig aktiviert war. Anschließend lief die Anlage korrekt entweder in Stufe 2 oder darunter.

Den prozentualen Anteil der Lüfterstufen zu den jeweiligen Stunden des Tages ist in Bild 59 für das letzte Betriebsjahr in komfortorientierter Betriebsweise dargestellt.

Bei Haus 1 ist nachts zu über 50 % der Zeit die Lüftungsstufe 1 von der LQ-Regelung gewählt worden. In den Morgenstunden wird dann verstärkt in Stufe 2 und teilweise in Stufe 3 gelüftet. Tagsüber sind die Bewohner überwiegend abwesend, so dass wieder verstärkt in Stufe 1 gelüftet wird. In den Abendstunden wurde verstärkt die Lüftung in den höheren Stufen betrieben, es lag aber immer noch ein Anteil von 50 % in Stufe 1 vor, was im Vergleich mit den anderen Gebäuden als nicht optimales Regelungsverhalten eingestuft wird.

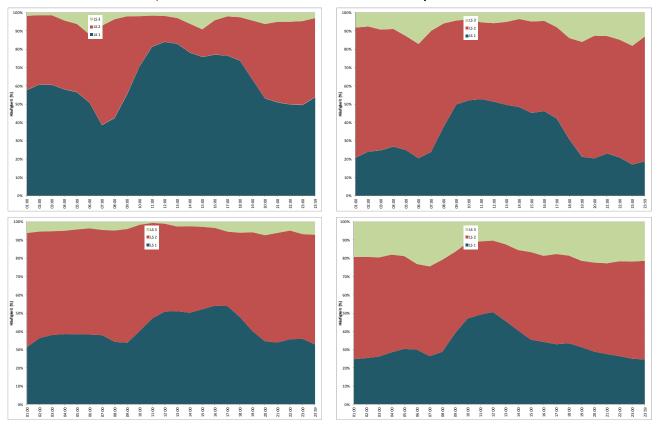
Bei Haus 2 liegt nachts der Anteil in Stufe 1 deutlich niedriger, nur bei ca. 25 %. Tagsüber steigt der Anteil der niedrigsten Stufe wegen Abwesenheit der Bewohner deutlich an, um dann abends wieder auf 25 % abzufallen. Stufe 3 wurde auch in diesem Haus nur zu ca. 10 % eingestellt, besonders bei den morgendlichen und abendlichen Aktivitätszeiten der Bewohner. Insgesamt wird das Profil der Regelung als sehr gut eingestuft.

In Haus 3 sind die Bewohner seltener komplett abwesend, so dass die Dynamik der verschiedenen Lüfterstufen weniger stark ausgeprägt ist als z. B. bei Haus 2. Nachts wird zu ca. einem Drittel der Zeit die niedrigste Stufe von der LQ-Regelung vorgegeben, tagsüber gibt es nur einen kleinen Anstieg der niedrigsten Stufe. Das Profil ergibt sich aufgrund der individuellen Nutzungsgewohnheiten der Bewohner und ist als adäquat einzustufen.



Bei Haus 4 liegt der höchste Anteil an Stufe 3 vor, was sicherlich durch die Tatsache verursacht wurde, dass die LQ-Regelung kurz nach Bezug installiert wurde und im Gebäude noch ein erhöhter Grundpegel vorhanden war, der von der Anlage weggelüftet wurde. Da am 24.01.2012 die Anlage auf energieorientierte Betriebsweise umgeschaltet wurde, liegt hier kein komplettes Jahr vor. Dennoch zeigt sich gut der Effekt der automatischen Anpassung der LQ-Regelung an die tatsächliche Situation im Gebäude.

Bild 59: Häufigkeitsverteilung der Lüfterstufen zu den unterschiedlichen Stunden des Tages, jeweils für den Zeitraum 01.06.2011 bis 31.05.2012 (außer Haus 4, hier nur von 01.04.2011-23.01.2012, Zeit mit komfortorientierter Betriebsweise)



#### Dämpfung der Gesamtregelung

Neben der in Kapitel 2.1 beschriebenen Hysterese von 0,6 Digits der LQ-Regelung wurde auch in der nachgeschalteten Gesamtregelung das Regelverhalten weiter gedämpft. Die LQ-Regelung arbeitete im Sekundentakt, die Verarbeitung der VOC-Messwerte und die Ausgabe der Ergebnisse der LQ-Regelung an die Lüftermotoren/Standardregelung in Zeitschritten von einer Minute. Auch die Dämpfung der Gesamtregelung musste optimiert werden zwischen kurzer Reaktionszeit auf Änderungen der VOC- oder Feuchtemesswerte in der Abluft, die dann aber häufiger Änderungen der Lüftungsstufe hervorrufen können und einer langsamen Reaktion , die ein "gutmütigeres" Regelverhalten bei weniger schnellem Ansprechen auf Belastungsspitzen ermöglicht.

Die berechnete Lüfterstufe in der Gesamtregelung wurde über drei Minuten gemittelt und anschließend ohne Nachkommastellen gerundet, so dass abhängig von der Änderungsgeschwindigkeit (Sprung um eine Stufe oder um zwei Stufen) die nächste Stufe nach ca. 3 Minuten ausgegeben wird. Bild 60 zeigt das Regelverhaltens von LQ- und Gesamtregelung nach Einsatz dieser Glättung. Dadurch konnten zu häufige Änderungen im Volumenstrom der Lüftungsanlage vermieden werden.



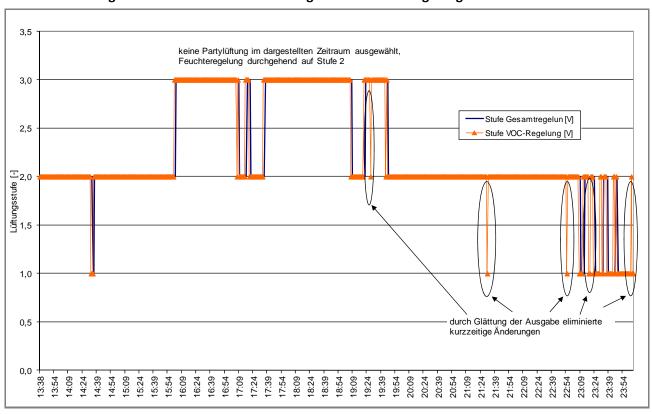


Bild 60: Lüftungsstufen am 20.04.2010 bei Haus 1 und Darstellung der Effekte der Glättung der Ausgabe durch die Mittelwertbildung bei der Gesamtregelung

### Differenz zwischen Abluft- und Zuluftqualität und die Auswirkungen auf die LQ-Regelung

Die Regelung versucht auch zu erkennen, ob die Qualität der Zuluft besser ist als die der Abluft. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, würde die Gesamtregelung den Volumenstrom in Stufe 3 erhöhen, wenn die LQ-Regelung dies vorgibt (siehe auch Bild 9). Dazu wurde in der Regelung ein Schwellwert definiert, um den die Zuluft besser (niedrigerer VOC-Wert) sein muss als die Abluft, damit die Lüftung mit erhöhtem Volumenstrom betrieben werden kann.

Aufgrund der bereits beschriebenen unterschiedlichen Entwicklung der VOC-Messwerte in Zu- und Abluft stellte sich die Frage, ob diese Zusatzfunktion überhaupt funktionierte und ob deren Einsatz sinnvoll ist. Aus diesem Grund wurde auf Basis der Tagesmittelwerte der für die Regelung verwendeten VOC-Sensoren die Entwicklung der Messwerte sowie die Differenz bestimmt (siehe Bild 61).

Bei Haus 1 sollte ursprünglich die Zuluft um 10 Digits besser sein als die Abluft. Diese Bedingung wurde auch meist erfüllt (Ausnahmen im Herbst 2009). Nach dem Defekt und dem Austausch des Zuluftsensors (Differenz Ab-Zuluft > 40 Digits) fällt die Differenz kontinuierlich ab. Im Mai 2010 wird der Schwellwert von +10 Digits auf -20 Digits gestellt, da die sinkende Differenz der beiden Werte eine starke Beeinflussung der Regelung erwarten ließ. In der Folge wurde der sehr niedrige Schwellwert, der bedeutet, dass der Zuluftwert bis zu 20 Digits über dem Abluftwert liegen darf, nicht mehr unterschritten, so dass die Regelung nicht beeinflusst wurde. Dennoch wurden VOC-Werte in der Zuluft gemessen, die bis zu 10 Digits höher waren als in der Abluft, durch die Erhöhung des Volumenstroms somit keine Verbesserung der Luftqualität zu erwarten wäre, wenn ausgeschlossen werden kann, dass die Differenz durch Sensordrift beeinflusst ist.

Bei Haus 2 war anfangs ebenfalls eine Differenz von +10 Digits eingestellt. Nach zwei Wochen mit einer Differenz von +30 Digits wurde auch hier auf den Wert von -20 Digits reduziert. Dennoch ist am Ende der

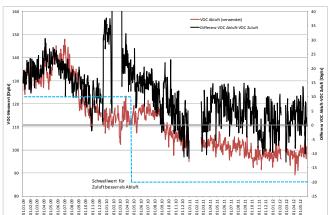


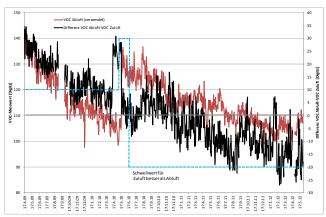
Messphase selbst dieser Schwellwert unterschritten worden, so dass ggf. eine Erhöhung des Volumenstroms nicht mehr vorgenommen wurde.

Vergleichbar ist die Situation bei Haus 3, nur dass hier der Schwellwert nur auf -10 Digits reduziert wurde. Am Ende des Messprogramms wurde diese Schwelle häufig unterschritten, so dass weniger häufig der Volumenstrom in Stufe 3 erhöht wurde.

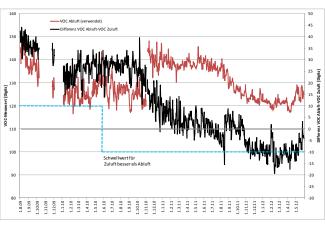
Die Auswertung von Haus 4 umfasst einen deutlich kürzeren Zeitraum, so dass Langzeiteffekte bei den VOC-Messwerten weniger stark ausgeprägt sind. Der Schwellwert lag hier immer bei -20 Digits und wurde nur selten unterschritten. Der Sprung der Messdaten in der Mitte der Darstellung ist durch die Umschaltung von M18- auf EvaKit-Sensoren verursacht. Bei den ab Januar 2012 für die Regelung verwendeten EvaKit-Sensoren ist kein Drift bei der Differenz zwischen Ab- und Zuluft zu erkennen, obwohl der Sensor genauso lange in Betrieb war wie die M18-Sensoren. Mögliche Ursache könnte die bei Haus 4 geänderte Installation der Kanäle am Lüftungsgerät sein, die hier aus Polistyrol-Formteilen besteht, bei den anderen Häusern aus Wickelfalzrohr.

Bild 61: Entwicklung der VOC-Messwerte in Zu- und Abluft und Unterschreitung des Schwellwertes für "schlechte" Zuluft

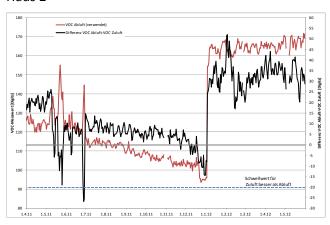




Haus 1



Haus 2



Haus 3

Insgesamt lässt sich feststellen, dass beim Einsatz von je einem VOC-Sensor in Zu- und Abluft die Gefahr von Fehlfunktionen ansteigt. Wie die Nachmessungen gezeigt haben, hat sich an allen Abluftsensoren eine größere Veränderung der Sensitivität eingestellt, so dass diese Zusatzfunktion ohne externen Eingriff (Veränderung der Schwellwerte) nicht mehr zuverlässig funktioniert hätte.



## 5.2.1 Entwicklung der Schaltschwellen und Neuberechnungszeiten

Da sich das Niveau der VOC-Messwerte in den Gebäuden kontinuierlich verändert und auch der absolute Startwert nie identisch ist, mussten für die LQ-Regelung die Schwellwerte dynamisch berechnet und angepasst werden. Dazu wurden kontinuierlich Histogramme der theoretisch vorhandenen VOC-Werte bei Normalbetrieb errechnet und daraus dann die Schwellwerte der Regelung bestimmt. Um den Einfluss kurzfristiger Effekte wie z. B. Urlaubszeit auf die LQ-Regelung zu begrenzen, wurden zusätzlich zu den kurzfristigen Schwellwerten, die über die letzten 14 Tage ermittelt wurden, auch langfristige Schwellen definiert, deren Bestimmung anfangs alle 85 Tage erfolgte, später wurde diese Zeit aber auf 41 Tage verkürzt (Details zur Bestimmung der LQ-Regelung sind in Kapitel 2 zu finden). In der LQ-Regelung wurden zur Berechnung der Schwellwerte unten und oben sowohl für die kurzfristigen als auch für die langfristigen Schwellwerte Zahlen der Quantile hinterlegt (z. B. 0,2 für das 20 % Quantil). Mit diesen Eingabedaten wurden dann von der LQ-Regelung auf Basis der berechneten Histogramme die aktuellen Schwellwerte bestimmt. Da es keinerlei Erfahrungswerte für die Einstellung der Quantile gab, wurden die Werte im Laufe des Projekts mehrfach angepasst und überprüft. In Anhang A sind die Änderungen an den verschiedenen Einstellgrößen der LQ-Regelung bei den vier Gebäuden während des Feldtests dokumentiert.

Der Schwerpunkt der Optimierungen lag bei der komfortorientieren Betriebsweise bei allen Feldtestgebäuden. Bei Haus 4 wurde im Winter 2011/12 auf die energieorientierte Betriebsweise umgeschaltet und dort weitere Verbesserungen erprobt. Die folgenden Darstellungen umfassen den Zeitraum vom 02.12.2010 bis 31.5.2012, in dem die Schwellwerte und Quantile täglich vorliegen. Zeitpunkte, an denen die automatische Berechnung durch Handeingaben korrigiert wurde, sind in den Abbildungen mit Sternen markiert.

Bei Haus 1, das als erstes mit der LQ-Regelung ausgestattet wurde, ist gut zu erkennen, dass die Schwellwerte zum Wechsel von einer Lüftungsstufe in die nächste sich im Zeitverlauf kontinuierlich verändert haben. Es ist einerseits der bereits bei der Auswertung der VOC-Sensoren festgestellte Jahresgang zwischen Sommer und Winter zu erkennen wie auch die kontinuierliche Abnahme der VOC-Messwerte im Gebäude, die sich in den berechneten Schwellwerten widerspiegelt. Somit hat die LQ-Regelung eine ihrer wichtigsten Aufgaben grundsätzlich erfüllt, da sie auch auf den Sensordrift reagiert hat.

Zu Beginn des dargestellten Zeitraums zeigt sich, dass die Kurzfristschwellen zu nahe beieinander lagen. Aus diesem Grund wechselte die Regelung zu oft in die niedrigste Stufe und die Zufriedenheit der Bewohner nahm dadurch ab. Über die Weihnachtszeit wurde im Jahr 2010 die LQ-Regelung abgeschaltet und die Lüftung konstant auf Stufe 2 betrieben, da Unsicherheiten über die korrekte Funktion bei fehlender Eingriffsmöglichkeit bestand.



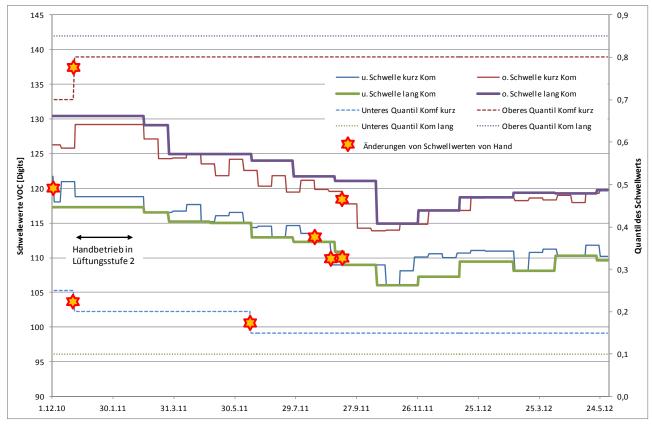


Bild 62: Entwicklung der Schaltschwellen für komfortorientierte Betriebsweise in Haus 1

In Haus 1 wurde Anfang Juni 2011 das untere Kurzfristquantil von 0,2 auf 0,15 verringert, da die unteren Kurzfristschwellwerte häufig durch die seltener aktualisierten Langfristschwelle begrenzt wurde. Im Laufe des Sommers 2011 wurden zu zwei Zeitpunkten die Schwellwerte von Hand nach unten angepasst. Danach passten die Kurzfristschwellwerte recht gut in das Band, das von den Langfristschwellwerten aufgespannt wird.



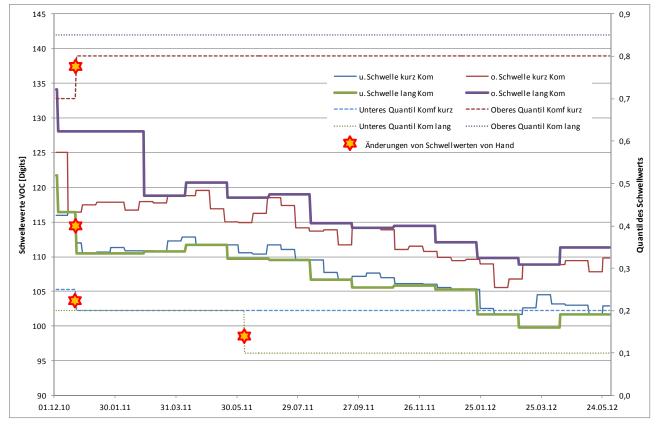


Bild 63: Entwicklung der Schaltschwellen für komfortorientierte Betriebsweise in Haus 2

Bei Haus 2 (Bild 63) wurden ebenfalls im Dezember 2010 die Werte für die Kurzfristquantile angepasst, allerdings lag durch eine Fehleingabe das kurzfristige und das langfristige Quantil auf dem gleichen Wert. Dies wurde im Mai 2011 korrigiert. Auch bei Haus 2 ist ein kontinuierliches Absinken der Schwellwerte zu verzeichnen, auch hier wurde die untere Kurzfristschwelle recht häufig durch die Langfristschwelle begrenzt. Bei Haus 2 musste nie in die eigentlichen Schwellwerte eingegriffen werden, hier funktioniert die Berechnung der Schwellwerte korrekt. Das absolute Niveau der Schwellwerte lag in Haus 2 etwas niedriger als in Haus 1.

Bei Haus 3 wurde im November 2010 die Regelung von den M18-Sensoren auf die LuQaS-Sensoren umgestellt. Dies führte zu einem veränderten Niveau der VOC-Werte und folglich dauerte es ein Aktualisierungsintervall der Langfristschwellen, bis die Schwellwerte zu den neuen VOC-Messwerten passten. Dies ist in Bild 64 links zu erkennen, wo die berechneten Langfristschwellwerte Ende Dezember 2010 sprunghaft ansteigen, da die LuQaS-Sensoren einen höheren Grundpegel ausgeben. Auch bei diesem Haus wurde Anfang Juni 2011 das untere Langfristquantil von 0,2 auf 0,1 korrigiert, weitere Eingriffe in die LQ-Regelung gab es nicht mehr.



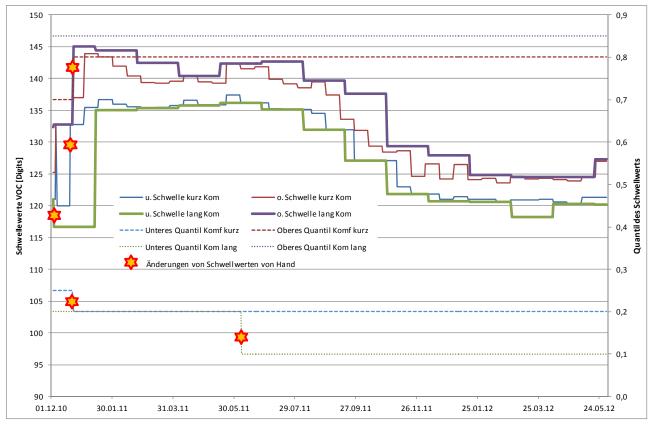


Bild 64: Entwicklung der Schaltschwellen für komfortorientierte Betriebsweise in Haus 3

Haus 4 wurde erst im April 2011 in Betrieb genommen. Die Testphase zur Kontrolle der Sensoren und der Reaktion der Regelung wurde aus diesem Grund auf zwei Wochen verkürzt. Am 12.04.2011 begann der Betrieb der LQ-Regelung, anfangs mit LuQaS-Sensoren, nach einem Monat wurde auf M18-Sensoren umgestellt, um die M18-Sensoren erneut testen zu können. Bild 65 zeigt die Entwicklung der Schaltschwellen der komfortorientierten Betriebsweise. Im Sommer 2011 trat eine Fehlfunktion bei der Berechnung der oberen Kurzfristschwelle auf, die höher lag als die zugehörige Langfristschwelle. Nach zwei Berechnungsintervallen (4 Wochen) trat der Fehler nicht mehr auf. Anfang Februar 2012 wurde auch bei diesem Haus wieder auf LuQaS-Sensoren umgestellt, da die bereits erläuterten Probleme mit dem M18-Sensor in der Zuluft auch hier auftraten. In diesem Fall wurden die neuen Schwellwerte aber mit einer Tabellenkalkulation vorausberechnet, so dass die Anpassung der Schwellwerte schneller erfolgte als bei Haus 3. Kurz zuvor, am 25.01.2012, war jedoch auf die energieorientierte Betriebsweise umgeschaltet worden, so dass keine Eingriffe in die komfortorientierten Schwellwerte mehr vorgenommen wurden.

Bild 66 zeigt die Entwicklung der Schwellwerte der energieorientierten Betriebsweise während des gesamten Messzeitraumes, auch außerhalb der Nutzung der Schwellen für diese Betriebsweise<sup>6</sup>. Hier liegen die Schwellen deutlich näher zusammen, da bei der energieorientierten Betriebsweise keine Erhöhung des Volumenstroms auf Stufe 3 vorgesehen ist. Über den gesamten Zeitraum wurde die obere Kurzfristschwelle mehrmals falsch berechnet. Analysen des Dasylab-Codes ergaben, dass die Ursache in einer Lücke in der Definition der Berechnungsgleichung zu finden war. Während der Nutzung der energieorientieren Betriebsweise ist dieser Fehler ein einziges Mal aufgetreten und wurde von Hand korrigiert. Bedingt durch die zuvor notwendig gewordene Umstellung auf die LuQaS-Sensoren ist die Auswertung der energieorientierten Betriebsweise schwieriger. Trotz des vergleichsweise kurzen Zeitraumes funktionierte sie aber – mit der bereits erwähnten Einschränkung – zufriedenstellend.

-

Zur Vereinfachung der Schaltung der Regelung wurden auch hier zwei Schwellwerte bestimmt, auch wenn nur der untere für die Regelung verwendet wurde.





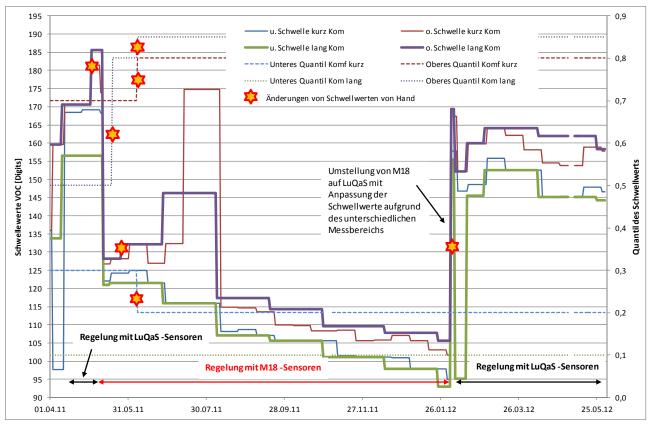
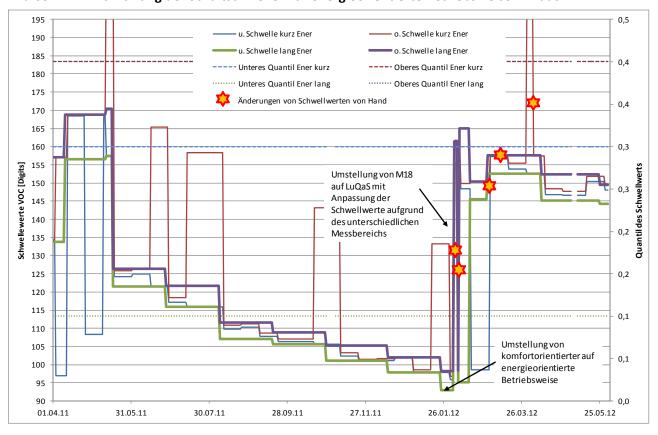


Bild 66: Entwicklung der Schaltschwellen für energieorientierte Betriebsweise in Haus 4





### Fazit:

Durch die periodische Neuberechnung der Schwellwerte konnte sehr gut auf die sich verändernden Belastungssituationen und den Sensordrift reagiert werden. Berechnung der Schwellwerte ist besonders bei den unteren Schwellen kritisch, da sie einen direkten Einfluss auf die Luftqualität im Gebäude haben. Zum Ende des Messprojekts hatten sich für die Quantile die Werte aus Tab. 14 bewährt.

Tab. 14: Quantile für die unterschiedlichen Schwellwerte

	Komfortorientiert		Energieorientiert	
	Kurzfrist	Langfrist	Kurzfrist	Langfrist
Untere Schwelle	20 %	10 %	30 %	20 %
Obere Schwelle	80 %	85 %		

Das Berechnungsintervall für die Langzeitschwellen darf nicht zu lange sein, damit die jahreszeitlichen Schwankungen und der Drift der VOC-Sensoren nicht durch "veraltete" Schwellwerte übersteuert wird. Im Feldtest wurden am Ende 14 Tage für die kurzfristigen und 41 Tage für die langfristigen Schwellen gewählt.

## 5.2.2 Übersteuerung der LQ-Regelung durch den Nutzer

Die Luftqualitätsregelung stellt üblicherweise die Luftmenge im Gebäude automatisch ein. Die einzige Möglichkeit für die Nutzer, diese Regelung zu übersteuern, ist die Auswahl der Stufe Intensivlüftung/Partylüftung (entspricht Lüftungsstufe 3 – erhöhter Luftwechsel). Sie ist ein Indiz dafür, wie zufrieden die Nutzer mit der Luftqualitätsregelung der eingestellten Lüfterstufe sind oder dass besondere Nutzungssituationen vorliegen.

Bild 67 zeigt einen Zeitraum von vier Stunden am 6. März 2012 bei Haus 2. Gegen 12:40 Uhr gibt die LQ-Regelung aufgrund eines Anstieges der VOC-Werte die Stufe 3 vor. Da die Differenz von VOC-Wert Abluft und Zuluft größer als 5 Digits ist (voreingestellter Schwellwert), wird die Zuluft schlechter als die Abluft eingestuft (schwarze dünne Linie) und die Gesamtregelung bleibt in Stufe 2. Gegen 14:30 Uhr findet erneut ein Anstieg der VOC-Konzentration statt, auch hier erkennt die LQ-Regelung diese Veränderung und gibt Stufe 3 vor. Durch den starken Anstieg der VOC-Werte in der Abluft sinkt die Differenz zur Zuluft auf unter 5 Digits und die Zuluft wird als gut eingestuft. Damit gibt die Gesamtregelung die Stufe 3 frei. Kurze Zeit später reagiert der Nutzer durch Drücken des Tasters für die Intensivlüftung. Da die Anlage aber bereits in der maximalen Lüfterstufe läuft, hat dies keine Auswirkungen mehr auf die Betriebsweise der Lüftungsanlage. Nach wenigen Minuten ist die VOC-Spitze abgebaut, und die LQ-Regelung springt zurück auf Stufe 2. Da die Intensivlüftung immer 30 Minuten andauert, verbleiben die Ventilatoren aber auf Stufe 3, bis die 30 Minuten abgelaufen sind.

In diesem Beispiel hat die LQ-Regelung vor den Nutzern reagiert. Es zeigt sich aber, dass die Überprüfung der Luftqualität in der Zuluft zu einem Fehlverhalten der Regelung führen kann.



Bild 67: LQ-Regelung und Gesamtregelung (entspricht Anlagenzustand) über vier Stunden am 06.03.2012 in Haus 2, an denen der Nutzer auf Intensivlüftung geschaltet hat.

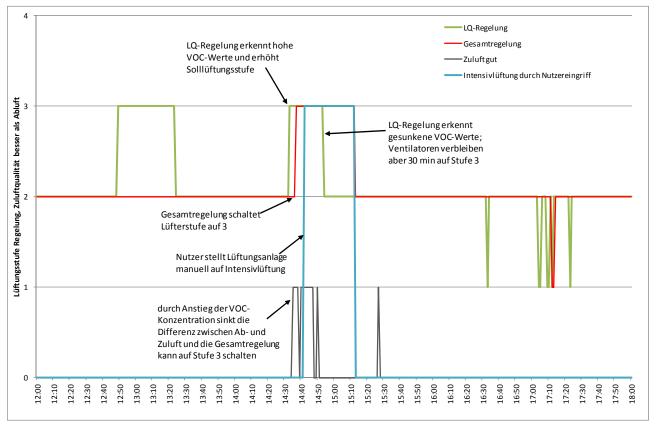
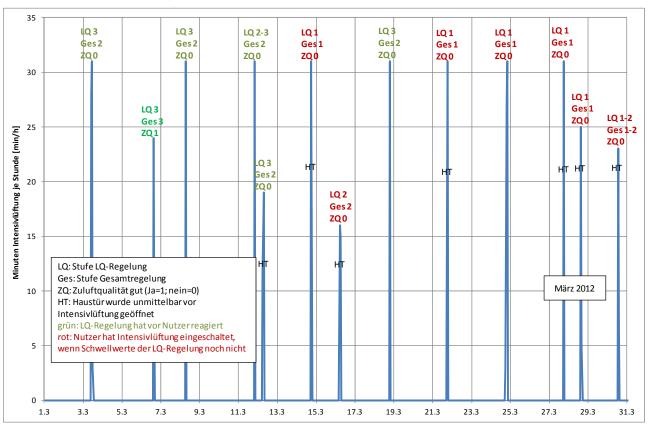


Bild 68 zeigt, dass von den 13 Zeitpunkten im März 2012, an denen die Nutzer die LQ-Regelung übersteuert haben, bei sechs die LQ-Regelung bereits zuvor die erhöhte Lüfterstufe vorgegeben hat, die Zuluftqualität aber aufgrund der Differenz zwischen Zu- und Abluft als schlecht eingestuft war und aus diesem Grund der Volumenstrom nicht erhöht wurde. Bei einem Zeitpunkt lief die LQ-Regelung bereits auf höchster Stufe, als die Nutzer den Taster für Intensivlüftung drückten. Bei den verbleibenden sieben Zeiten mit Intensivlüftung lief die Anlage in der niedrigsten Stufe. Bei sechs davon wurde innerhalb von max. 15 Minuten vor der Erhöhung auf die Intensivstufe ein Öffnungsvorgang der Haustür registriert (hier nicht dargestellt). Hier ist zu vermuten, dass die Nutzer abwesend waren und die LQ-Regelung den Volumenstrom wie geplant auf Stufe 1 reduziert hat. Beim Betreten des Hauses wurde dann sofort der Taster für die Intensivlüftung gedrückt, da beim direkten Vergleich der Raumluft im Eingangsbereich mit der Außenluft die Nutzer einen Unterschied feststellen konnten. Hier stößt die LQ-Regelung an ihre Grenzen, da die gewünschte Reduktion des Volumenstromes bei Abwesenheit verhindert, dass die Raumluftqualität beim Betreten des Gebäudes im Vergleich mit der Außenluft als sehr gut eingestuft wird. An anderen Tagen zeigen die Auswertungen, dass die LQ-Regelung innerhalb weniger Minuten den Volumenstrom nach Betreten des Gebäudes erhöht hat.



Bild 68: Zeitpunkte, zu denen die Nutzer die LQ-Regelung durch Intensivlüftung übersteuert hat sowie die Stufen der LQ-Regelung, Gesamtregelung, Zuluftqualität und Öffnung der Haustür kurz zuvor; Haus 2 im März 2012



Im Folgenden sind für alle Gebäude die für jeden Monat aufsummierten Minuten der Intensivlüftung dargestellt, die von den Bewohnern eingestellt wurden. Ein Wert von 300 bedeutet, dass die Intensivlüftung im Monat 10 Mal aktiviert wurde.

In Haus 1 (Bild 69) liegen die Ereignisse der Intensivlüftung anfangs bei vergleichsweise niedrigen Werten. Ab August 2011 treten aber auch sehr hohe Werte/häufiges Intensivlüften auf. Diese entstanden, da die Nutzer die Regelung auf manuellen Betrieb gestellt hatten und die Lüftungsanlage dann über einen längeren Zeitraum in der maximalen Stufe lief (z. B. über Nacht). Auffällig ist, dass Zeiten mit häufigem Betrieb der Intensivstufe über das ganze Jahr verteilt sind und nur teilweise im Winter auftraten. In der Befragung vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung gaben die Nutzer an, gelegentlich die Intensivlüftungsstufe zu nutzen. Es kann somit nicht von einer verstärkten Nutzung nach Inbetriebnahme der LQ-Regelung ausgegangen werden.

Bei Haus 2 (Bild 70) ist eine vergleichsweise hohe Häufigkeit der Intensivlüftung über das gesamte Jahr zu erkennen, mit tendenziell höheren Werten in der Übergangszeit. Eine detaillierte Analyse der Intensivlüftung im März 2012 ist in Bild 68 zu sehen. Dort zeigte sich, dass die meisten Ereignisse in der konkreten Situation erklärt werden können. Teilweise verhinderte der unterschiedliche Drift der VOC-Sensoren die Reaktion der LQ-Regelung, teilweise sind die Ereignisse mit dem Betreten des Gebäudes gekoppelt. Auch hier haben die Nutzer bereits vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung die Intensivstufe gelegentlich genutzt.





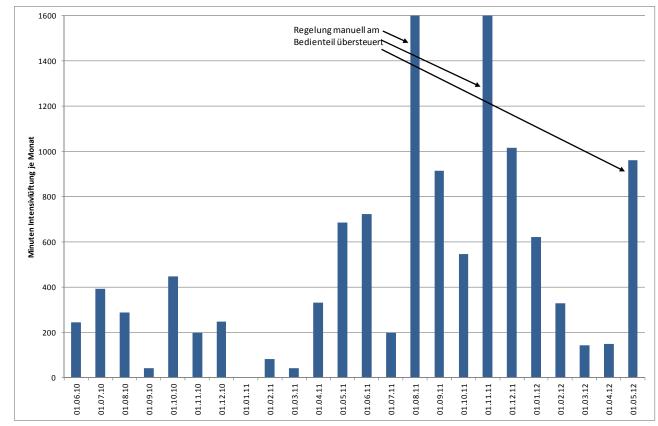
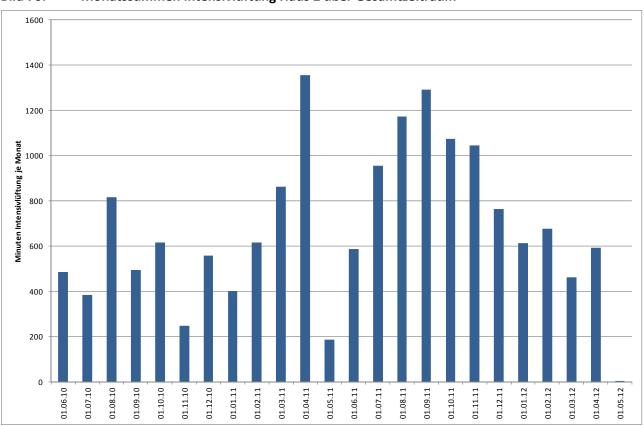


Bild 70: Monatssummen Intensivlüftung Haus 2 über Gesamtzeitraum





Bei Haus 3 wurde deutlich seltener auf die Intensivstufe geschaltet (Bild 71). Dabei sind vor allem im Winter einige Zeiten erkennbar, in denen die Intensivstufe über drei Stunden betrieben wurde. In allen Fällen war die Lüftungsanlage aber bereits vorher von der LQ-Regelung in Stufe 3 geschaltet worden, die Verunreinigungen waren also vorher bereits korrekt erkannt worden. Das Gebäude besitzt im Wohnzimmer einen Ethanolofen, der seine Verbrennungsabgase direkt in den Raum abgibt. Auf Basis der CO<sub>2</sub>-Messungen die parallel durchgeführt wurden, lässt sich hier ein direkter Zusammenhang zwischen Betrieb des Ethanolofens und der Lüftungsstufe 3 ableiten. Auch hier haben die Nutzer bereits vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung die Intensivstufe gelegentlich genutzt.

Auch im weiteren Verlauf der Feldtestphase lässt sich immer wieder feststellen, dass die Nutzer Intensivlüftung auswählten, die LQ-Regelung aber bereits zuvor die Lüfterstufe auf 3 erhöht hatte.

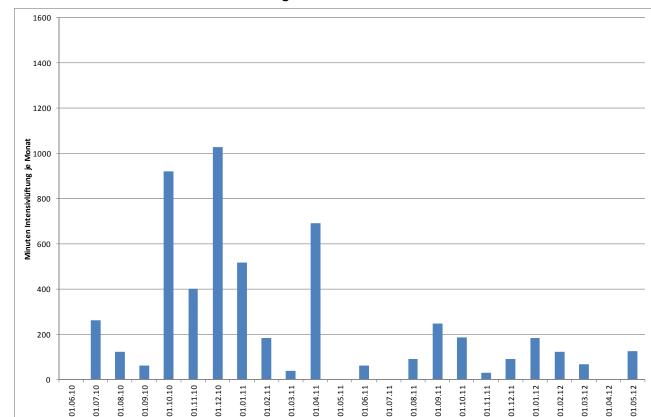


Bild 71: Monatssummen Intensivlüftung Haus 3 über Gesamtzeitraum

Bei Haus 4 (Bild 72) wurde die Intensivstufe kaum genutzt, obwohl ab Ende Februar 2012 die LQ-Regelung energieorientiert betrieben wurde, d. h. die Lüftungsanlage nur heruntergeregelt wurde, wenn der VOC-Wert niedrig ist, aber nie automatisch in Stufe 3 hochgeregelt. Trotzdem haben die Nutzer hier keine Eingriffe vorgenommen. In der Befragung vor dem Start der LQ-Regelung gaben die Nutzer an, die Intensivlüftung nicht zu verwenden. Somit hat sich das Verhalten durch die LQ-Regelung weder bei komfortorientierter noch bei energieorientierter Betriebsweise geändert.



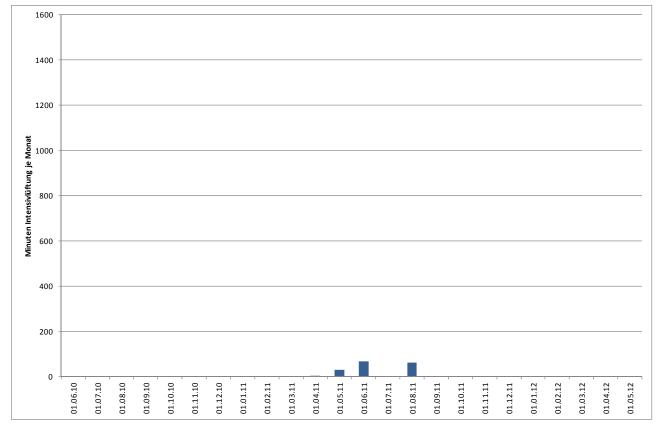


Bild 72: Monatssummen Intensivlüftung Haus 4 über Gesamtzeitraum

### Fazit

Wenn in einem Gebäude die Intensivlüftung von den Bewohnern ausgewählt wurde, hatte die LQ-Regelung oft schon die Verunreinigung erkannt und den Luftwechsel erhöht. Nur beim Betreten des Gebäudes konnte die LQ-Regelung nicht immer schnell genug auf die Anforderungen der Bewohner reagieren.

# 5.2.3 Auswirkungen von Drift und Ausfall der VOC-Sensoren der LQ-Regelung

Wie in Kapitel 5.1.4 gezeigt, zeigten sich während des Feldversuchs insbesondere bei den M18-VOC-Sensoren in der Zuluft einige Defekte. Weiterhin entwickelten sich die VOC-Messwerte in Zu- und Abluft unterschiedlich. Bei einigen Gebäuden lag am Ende der Messphase der VOC-Wert in der Zuluft im Mittel höher als in der Abluft. Im Sinne einer Abfuhr von Verunreinigungen über die Abluft hätte dies aber zu einem stetigen Ansteigen der VOC-Messwerte im Gebäude führen müssen. Dies wurde aber nicht beobachtet, somit müssen die VOC-Messwerte mit Fehlern behaftet sein, was auch bei der Nachmessung nach Abschluss der Feldphase festgestellt wurde.

Um die Auswirkungen von Sensordrift und Sensordefekt der Führungssensoren der LQ-Regelung beurteilen zu können, wurden ein Standardfall der Messwerte in Zu- und Abluft definiert und anschließend zuerst der Wert des Zuluftsensors und dann der des Abluftsensors variiert, um die Auswirkungen auf die Berechnung des Histogramms und somit auf die Schaltschwellen beurteilen zu können. Dieser Standardfall ist in Tab. 15 wiedergegeben.



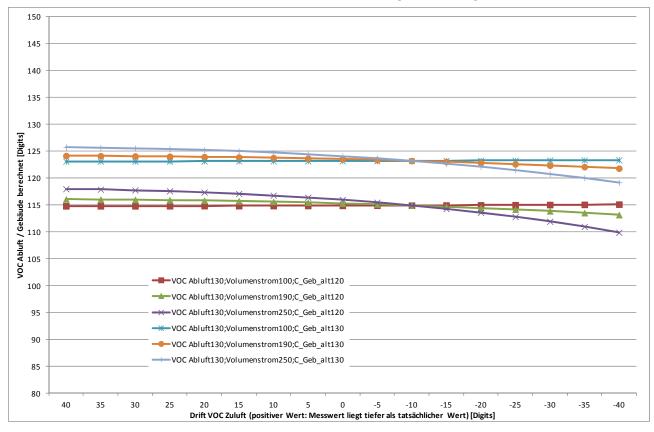
Tab. 15: Randbedingungen für Variation der VOC-Sensor	r-Messwerte
---	-------------

VOC Zuluft	120 Digits	C_Gebäude_alt <sub>t-1</sub> <sup>7</sup>	130 / 120 Digits
VOC Abluft <sub>aktuell</sub>	130 Digits	VOC Abluft <sub>t-1</sub>	128 Digits
Volumenstrom	190 (100 bzw. 250) m³/h		

Für diesen Standardfall ergäbe sich nach Gleichung 3 ein ungestörter VOC-Wert in der Abluft von 123,3 Digits (C Gebäude alt=130) bzw. 115,1 Digits (C Gebäude alt=120).

Bild 73 zeigt für Drifts im Zuluftsensor die Auswirkungen auf die berechnete Konzentration in der Abluft. Ein Drift von +40 Digits entspricht in diesem Fall dem totalen Ausfall des Sensors. Dennoch sind die Auswirkungen auf die berechnete VOC-Konzentration in der Abluft im gesamten Bereich gering. Bei niedrigen Volumenströmen (100 m³/h) liegt diese nur bei 0,3 Digits bei einer Variation zwischen -40 bis +40 Digits. Bei Auslegungsvolumenstrom steigt diese Schwankungsbreite auf 2,4 Digits bzw. 2,9 Digits (190 m³/h, C\_Geb\_alt 120). Erst bei sehr hohen Volumenströmen von 250 m³/h, die in den Gebäuden des Feldtests nicht auftraten, stieg die Differenz der VOC-Konzentration im Gebäude bei einem Drift von +/- 40 Digits auf 8,1 Digits. Besonders bei hohen Volumenströmen wirkt sich somit ein Drift bei der Messung der VOC-Werte in der Zuluft nennenswert auf das Ergebnis aus.

Bild 73: Auswirkungen auf die berechnete VOC-Konzentration im Gebäude bei Variation des VOC-Messwertes Zuluft; Ist-Wert (0 auf der X-Achse) liegt bei 120 Digits



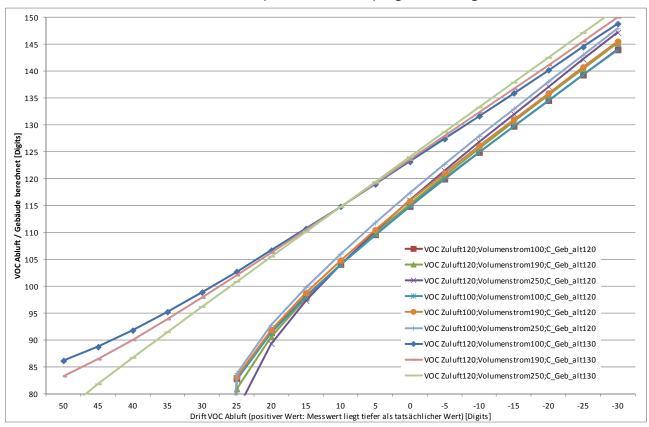
-

Der Unterschied der beiden Varianten besteht darin, dass bei einem Wert von 130 nur eine kleine Änderung der VOC-Werte im aktuellen Intervall vorliegt, bei 120 aber eine ausgeprägte Belastungsspitze auftritt.



Wird der Drift des VOC-Sensors in der Abluft variiert, so ergibt sich die Situation aus Bild 74. Der Zusammenhang zwischen der Differenz von Ist-Wert zu Messwert und der Auswirkung auf die berechnete VOC-Konzentration im Gebäude ist hier annähernd linear, nur bei sehr großen Abweichungen Richtung Sensordefekt sind die Fehler teilweise noch größer. Durch unterschiedliche Volumenströme werden die Kurven überwiegend vertikal verschoben, je nach angesetzter VOC-Konzentration im Zeitschritt zuvor ergeben sich die beiden Kurvenscharen. Die Auswertung zeigt, dass Abweichungen bei der Messung der VOC-Konzentration in der Abluft deutlich kritischer zu beurteilen sind als solche in der Zuluft und erklärt somit auch, warum die zeitweise defekten VOC-Sensoren in der Zuluft nur geringe Auswirkungen auf die Bestimmung der Schwellwerte hatten und die LQ-Regelung dennoch zufriedenstellend funktionierte.

Bild 74: Auswirkungen auf die berechnete VOC-Konzentration im Gebäude bei Variation des VOC-Messwertes Abluft; Ist-Wert (0 auf der X-Achse) liegt bei 130 Digits





# 5.3 Auswirkungen unterschiedlicher Lüftungsstrategien auf den elektrischen Energieverbrauch

Um den Einfluss der LQ-Regelung auf den Energieverbrauch der Feldtestgebäude zu beurteilen, wurden die eingestellten Lüftungsstufen und der damit verbundene Verbrauch an Elektroenergie herangezogen. Dabei wurden zwei Szenarien als Vergleich herangezogen:

- Szenario 1: Die Lüftungsanlage wird dauerhaft im Normalbetrieb (Lüftungsstufe 2) betrieben, nur bei Abwesenheit von mindestens 2 Tagen wird die Lüftungsanlage in Stufe 1 reduziert.
- Szenario 2: Die Lüftungsanlage wird über ein Zeitprogramm wochentags für 7 Stunden reduziert, am Wochenende läuft sie in Normalbetrieb. Die Urlaubsabsenkung ist identisch mit dem zuvor beschriebenen Szenario.

Nach eigenen Aussagen ist vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung bei einem Teil der Feldtestgebäude Szenario 1 eingesetzt worden, bei mindestens einem Gebäude wurde das Zeitprogramm genutzt (Szenario 2).

Bild 75 zeigt die Monatsmittelwerte der Lüftungsstufe für die vier Feldtestgebäude in der Betriebsart "komfortorientiert". Die Monatswerte sind hier mit ihrem tatsächlichen Datum aufgetragen, nicht mit dem "relativen Datum", das auf den Bezugstermin des Hauses referenziert. Damit sind höhere Lüftungsstufen, die z. B. aufgrund des späteren Bezugs von Haus 4 vorhanden sind, nicht eliminiert. Die Daten stehen aber dafür im korrekten zeitlichen Zusammenhang (Sommer/Winter).

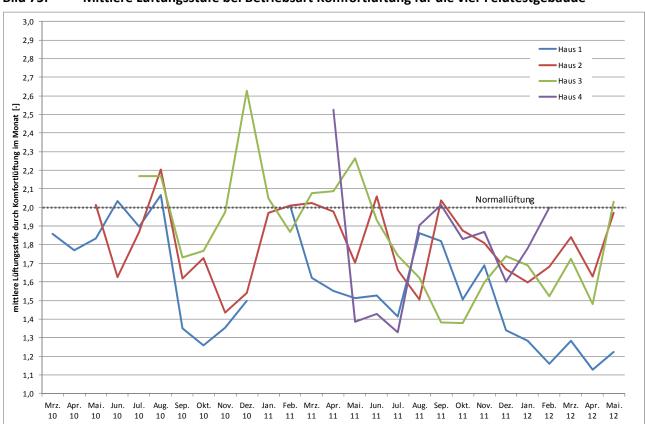


Bild 75: Mittlere Lüftungsstufe bei Betriebsart Komfortlüftung für die vier Feldtestgebäude

Man erkennt, dass die mittlere Lüftungsstufe bei den Häusern meist unter einem Wert von 2,0 liegt, was der durchgängigen Nutzung der Stufe Normallüftung entsprechen würde. Bei Haus 3 steigt besonders im Dezember 2010 die mittlere Betriebsstufe mit einem Wert von 2,6 deutlich über denjenigen der Normallüf-



tung. Ursache ist hier, dass im November 2010 die LQ-Regelung von den Bewohnern abgeschaltet wurde, da sie mit der Luftqualität im Schlafzimmer unzufrieden waren<sup>8</sup> (siehe Kapitel 8.2). Dadurch dauerte es eine Zeit lang, bis die Berechnung der Schwellwerte sich wieder an die im Winter tatsächlich vorhandenen VOC-Werte angepasst hatte. Die Folge war ein vermehrter Betrieb in der höchsten Lüftungsstufe.

Die Mittelwerte der Lüftungsstufe lagen im Zeitraum mit LQ-Regelung zwischen 1,57 und 1,85, somit im Mittel immer unter der Betriebsstufe Normallüftung. Um einen Vergleich des tatsächlichen Verbrauchs an elektrischer Energie mit LQ-Regelung (Ist-Situation) und bei unterschiedlichen Szenarien der Sollwertvorgaben ohne LQ-Regelung durchführen zu können, wurde der mittlere Lüftungsenergieverbrauch für die einzelnen Lüftungsstufen bei jedem Feldtestgebäude ermittelt. Mit diesen Daten wurden die hypothetischen Szenarien abgebildet. Die sich ergebenden Lüftungsstromverbräuche für beide Szenarien sind in Bild 76 dargestellt. Abhängig von der Anzahl der Tage des jeweiligen Monats, der Anzahl der Urlaubstage im Monat und der Arbeitstage, ergibt sich die dargestellte Schwankung der Werte. Die exakten Urlaubstage der Bewohner der einzelnen Häuser sind nicht bekannt. Sie wurden berechnet aus den Zeiten, in denen mindestens 2 Tage in Folge kein Warmwasserverbrauch in den Häusern aufgetreten ist. Durch die zusätzliche Absenkung der Lüftungsstufe in Szenario 2 an Werktagen liegen die Verbrauchswerte für Haus 1 im Mittel 2,9 kWh/Monat niedriger als bei Szenario 1, bei den anderen Gebäuden liegt die Reduktion bei 4,1 kWh/Monat (Haus 2), 3,4 kWh/Monat (Haus 3) bzw. 2,5 kWh/(Monat).

Durch den schleichenden Ausfall von zwei Elektrozählern (Haus 1 und Haus 3) sind bei diesen Häusern die auswertbaren Zeiträume der Ist-Verbräuche kürzer.

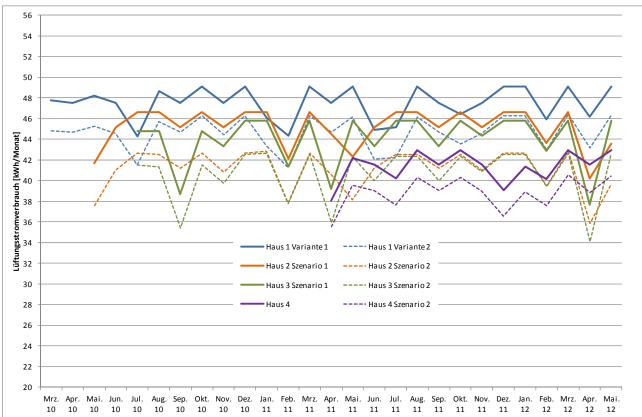


Bild 76: Berechneter monatsweiser Lüftungsstromverbrauch der Szenarien 1 und 2

\_

Wie Messungen der tatsächlichen Volumenströme im Schlafzimmer ergaben, hatte sich durch eine nachträgliche Veränderung an der Lüftungsverteilung durch die Bewohner der Zuluftvolumenstrom sehr stark reduziert, was die Unzufriedenheit mit der Luftqualität erklärt (siehe Kapitel 5.1.5). Die Situation konnte durch die Drosselung des zusätzlich montierten Lüftungsstrangs deutlich verbessert werden



#### Szenario 1

Den Vergleich des tatsächlichen Lüftungsstromverbrauchs bei LQ-Regelung sowie die prozentuale Differenz zwischen berechnetem Verbrauch bei Szenario 1 und Ist-Verbrauch zeigt Bild 77. Abhängig von den eingestellten Lüftungsstufen schwanken die Verbräuche deutlich. Die sich theoretisch ergebende Energieeinsparung (Differenz theoretischer Wert Szenario 1 – Ist-Verbrauch) schwankt zwischen -20 % (Mehrverbrauch) und +35 % (Minderverbrauch). Im Mittel ergibt sich für alle Gebäude eine geringe Einsparung bei der LQ-Regelung gegenüber Szenario 1 von 1 % (Haus 3) bis 6 % (Haus 2). Somit führte selbst die komfortorientierte Regelung nicht zu einem Mehrverbrauch beim Lüfterstrom. Aus diesem Grund wurde die Betriebsart "energieorientiert" auch nur über einige Monate in Haus 4 erprobt, da bereits die komfortorientierte Betriebsweise zu einer Reduktion des mittleren Luftwechsels führte.

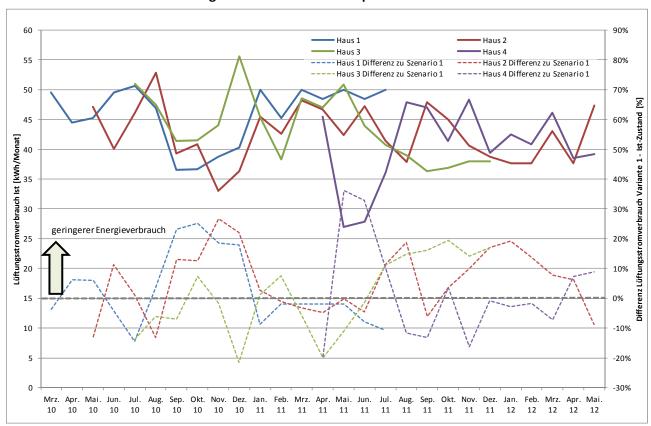


Bild 77: Tatsächlicher Lüftungsstromverbrauch sowie prozentuale Differenz zur Szenario 1

### Szenario 2

Bild 78 zeigt die Situation mit LQ-Regelung im Vergleich mit Szenario 2. Die Differenzen zur Ist-Situation mit LQ-Regelung sind ein wenig größer, da Szenario 2 sozusagen eine optimierte Variante für den Fall von ganztägig berufstätigen (und abwesenden) Bewohnern darstellt. Hier käme es im Mittel über die auswertbaren Zeiträume bei Haus 1 und 2 zu ca. 4 % Mehrverbrauch, bei Haus 3 liegt der Mehrverbrauch bei ca. 7 % und bei Haus 4 bei 5 %. Insgesamt liegen Szenario 1 und 2 sowie die Ist-Situation mit LQ-Regelung aber relativ nahe beieinander.



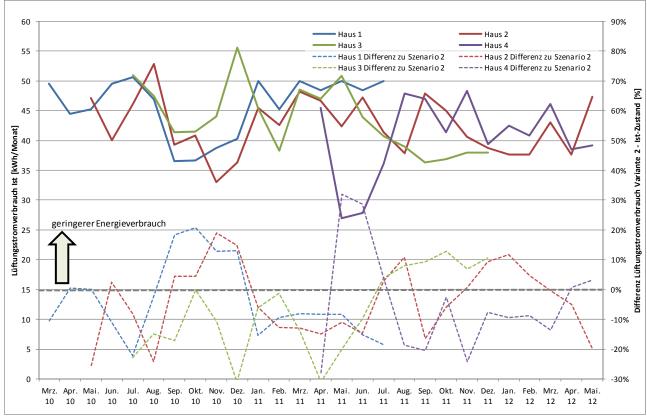


Bild 78: Tatsächlicher Lüftungsstromverbrauch sowie prozentuale Differenz zur Szenario 2

Bei der energieorientierten Betriebsweise, bei der die Lüftungsanlage nur in ihrem Volumenstrom reduziert wird, wenn das Gebäude niedrige VOC-Werte aufweist, aber keine Volumenstromanhebung auf Stufe 3 stattfindet (in Haus 4 von Ende Februar 2012 bis zum Abbau der Messtechnik Ende August 2012 eingestellt), ergeben sich geringfügig höhere Einsparungen beim Lüfterstrom. Gegenüber Szenario 1 können 2,5 kWh/Monat im Mittel oder 6 % der Elektroenergie für den Betrieb der Lüftermotoren eingespart werden. Im Mittel über die Monate mit energieorientierter Betriebsweise wurde der gleiche Stromverbrauch wie bei Szenario 2 erreicht, so dass hier zu erkennen ist, dass die energieorientierte Betriebsweise tatsächlich eine weitere Verringerung beim Lüftungsstromverbrauch erreicht hat. Berücksichtigt man zusätzlich, dass aufgrund des Defekts des VOC-Sensors in der Zuluft zu Beginn der energieorientierten Betriebsweise auf die VOC-Sensoren vom Typ EvaKit umgeschaltet werden musste und dadurch die geeigneten Schwellwerte erst nach einigen Wochen gefunden waren, ist zu erwarten, dass noch höhere Einsparungen mit dieser Betriebsweise möglich sind.

Die Volumenstromreduktion führt auch zu einer Verringerung der Lüftungswärmeverluste. Da die Wärmerückgewinnung aber mit über 80 % eine sehr hohe Rückwärmzahl ausweist, führt die geringe Volumenstromreduktion nicht zu einer nennenswerten Energieeinsparung bei Gebäuden dieser energetischen Qualität. Der Einfluss der Volumenstromreduktion auf die Effizienz der Wärmepumpe konnte aufgrund der vorliegenden Messwerte nicht detailliert untersucht werden. Betrachtet man die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, so ist durch den reduzierten Volumenstrom mit einem leichten Anstieg der Rückwärmzahl zu rechnen, da die Wärmetauscherfläche bei leicht verringertem Volumenstrom gleich bleibt. Umgekehrt steht der Wärmepumpe weniger Energieinhalt in der Fortluft nach der Wärmerückgewinnung zur Verfügung, was deren Effizienz leicht verschlechtern kann. Auf Basis der sehr geringen Gesamtenergieverbräuche für Lüftung und Beheizung aller Gebäude (siehe Kapitel 9.1) ist nicht von einem nennenswerten Unterschied der Gesamteffizienz der Einheit Wärmepumpe und Lüftungsgerät auszugehen.



#### Ausblick

Aufgrund der Wärmerückgewinnung war keine nennenswerte Heizenergieeinsparung durch die LQ-Regelung zu erwarten. Einzig die Reduktion der elektrischen Hilfsenergie ist bei Passivhäusern erreichbar. Deutlich anders wären die Verhältnisse bei Gebäuden mit Abluftanlage, da hier eine Reduktion des Volumenstroms auch die Lüftungswärmeverluste deutlich reduziert. Dies zeigte sich bereits bei der Auswertung der Niedrigenergiehäuser in Wiesbaden-Dotzheim [Ebel et al. 2003], bei denen über dezentral feuchtegeregelte Zuluftelemente der Abluftanlagen der Volumenstrom im Winter sehr weit reduziert wurde, so dass die gemessenen Heizwärmeverbräuche deutlich unter den Bedarfswerten lagen. In diesen Häusern wurden aber zum Teil sehr hohe Kohlendioxidkonzentrationen in den Aufenthaltsräumen gemessen, die nicht dem Ziel einer guten Luftqualität zuträglich sind. Hier könnte die in diesem Projekt entwickelte LQ-Regelung eine Energieeinsparung mit einer deutlichen Verbesserung der Luftqualität erzielen.

## 5.4 Feuchteregelung

Die Feuchteregelung sollte neben der Luftqualitätsregelung die maximalen und minimalen Werte der relativen Feuchte im Gebäude begrenzen. Sie ist der LQ-Regelung übergeordnet (siehe Kapitel 2). Zu Beginn des Feldversuches war die Feuchteregelung so programmiert, dass als Regelgröße der Median aller Messwerte der einzelnen Räume sowie des Fühlers in der Abluft verwendet wurde. Lag dieser Medianwert in der Heizperiode unterhalb der eingestellten Schwelle (anfangs 35 % rel. Feuchte), so wurde der Luftvolumenstrom reduziert, wenn die VOC-Regelung nicht Lüftungsstufe 3 vorgegeben hat. War die Luftqualität schlecht, die Raumluft aber sehr trocken, so wurde die Lüftung in Stufe 2 (Normalbetrieb) geschaltet.

Es zeigte sich im ersten Winter in Haus 1 jedoch, dass die in den Räumen gemessenen Raumtemperaturen, aufgrund der in den Wänden eingelassenen Fühler (inkl. zusätzlicher Wärmequelle durch den VOC-Sensor, siehe 4.2), zu hoch und in der Folge die gemessene relative Feuchte zu gering war. Die Konsequenz war, dass die Feuchteregelung zu oft die Anlage in Stufe 1 betrieben hätte. Aus diesem Grund wurde bei einer Überarbeitung der Software eine Umschaltmöglichkeit geschaffen, die Feuchteregelung entweder nur auf Basis des Messwertes in der Abluft oder mit dem Median aller Feuchtefühler zu betreiben. Der Feldversuch wurde überwiegend nur mit dem Abluftfühler als Regelgröße durchgeführt, da der Schwerpunkt des Projekts die Erprobung der LQ-Regelung war und der Eingriff der Feuchteregelung auf Extremfälle beschränkt werden sollte. Außerdem ist für einen Praxiseinsatz die Überwachung aller Räume unrealistisch, da die Kosten für eine vollständige Ausstattung mit Sensoren zu hoch lägen.



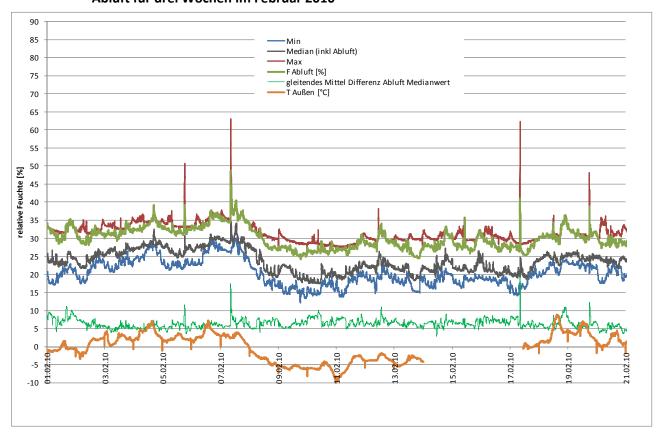


Bild 79: Haus 3: Verlauf der Feuchtemesswerte im Gebäude (unkorrigiert / zu gering) und in der Abluft für drei Wochen im Februar 2010

Bild 79 zeigt über einen Zeitraum von drei Wochen im Februar 2010 den Verlauf der unkorrigierten minimalen und maximalen Raumluftfeuchten, den Medianwert aus den Messwerten der Räume und der Abluft, den Abluftmesswert sowie die gleitend gemittelte Differenz zwischen Abluftmesswert und Medianwert. Die minimalen und maximalen Messwerte liegen ca. 10 bis 15 % relativer Feuchte auseinander, der Abluftmesswert immer am oberen Rand, da Feuchtespitzen üblicherweise in den Ablufträumen auftreten und der Abluftmesswert einen gemischten Wert der Ablufträume widerspiegelt. Die ebenfalls dargestellte Differenz zwischen Abluftmesswert und Median aller Feuchtemesswerte (gleitendes Mittel über 10 Minuten, wie in der Feuchteregelung verwendet) zeigt mit einer Größe von ca. 7 %, dass in diesem Zeitraum durch einen entsprechenden Offset beim Schwellwert für die Feuchteregelung durchaus auch auf den Wert der Abluftfeuchte geregelt werden kann, da auftretende Feuchtespitzen im Winter relativ schnell von der Lüftungsanlage abgebaut werden.

Korrigiert man die Feuchtemesswerte in den Räumen auf Basis der korrigierten Raumlufttemperatur (siehe Kapitel 4.2), so ergibt sich, wie in Bild 80 gezeigt, dass die Feuchtewerte aus den Räumen meist angehoben werden und die Abluftfeuchte dadurch nur noch eine geringe Differenz zum Medianwert aufweist (dünne grüne Linie).

Auf Basis dieser Auswertungen wurde für den eigentlichen Feldtest die Abluftfeuchte als Eingangsgröße für die Feuchteregelung verwendet. Dies hat für eine Übertragung auf eine größere Anzahl von Gebäuden den Vorteil, dass deutlich weniger Fühler erforderlich sind und die Sensorik damit preiswerter ist. Gegenüber der von einigen Herstellern angebotenen Feuchteregelung über eine Führungsraum (z. B. Wohnzimmer),unterscheidet sich die Regelung auf Basis der gemessenen Abluftfeuchte dadurch, dass sie indirekt alle Räume des Gebäudes mit berücksichtigt, die Messwerte aber durch Feuchtespitzen in den Ablufträumen verändert werden. Dies kann insbesondere bei einer Begrenzung der relativen Feuchte nach



oben ein Vorteil sein, eine Begrenzung des Wertes nach unten könnte dadurch jedoch seltener aktiviert werden.

90 85 Min (korrigierte Feuchte) Median (inkl Abluft) korrigierte Feuchte 80 Max (korrigierte Feuchte) 75 F Abluft [%] gleitendes Mittel Differenz Abluft Medianwe 70 T Außen [°C] 65 60 55 50 2 45 relative Feuchte 40 35 20 15 10 5 -5 -10

Bild 80: Haus 3: Korrigierter Verlauf der Feuchtemesswerte im Gebäude und in der Abluft für drei Wochen im Februar 2010

Zu Beginn des Feldtests (vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung) lag bei Haus 1 die untere Schwelle der relativen Feuchte, ab der der Luftvolumenstrom reduziert wurde, bei 35 % rel. Feuchte. Dieser Wert wurde nach der ersten Heizperiode 2009/10 stufenweise auf 20 % rel. Feuchte (22.04.2010) reduziert und gleichzeitig wurde nur der Abluftfühler als Regelgröße verwendet. Die eigentliche Feldphase mit LQ- und Feuchteregelung wurde dann bei allen Häusern mit 20 % bzw. 23 % rel. Feuchte als unterer Schwellwert durchgeführt. Die Differenz der absoluten Feuchte, die berechnet wurde, um zu überprüfen, ob das Gebäude überhaupt entfeuchtet werden kann, lag bei den Häusern 1 bis 3 bei 1 g/m³, bei Haus 4 bei 0 g/m³.

In [Pfluger 2012] wurden medizinische Studien zum optimalen Feuchtebereich für den Menschen ausgewertet. Er kommt zum Ergebnis, dass ein Bereich von 30 % rel. Feuchte nicht dauerhaft unterschritten werden sollte, um ein behagliches Raumklima zu erhalten. Die Feuchteregelung war somit so eingestellt, dass sie nur in die Lüftungsanlage eingreift, wenn die Raumluftfeuchte in den unbehaglichen Bereich abdriften sollte.

Bild 81 zeigt die gemessenen Monatswerte der Abluftfeuchte der vier Gebäude. Dargestellt sind der minimale Minutenmesswert im entsprechenden Monat (kurze Striche), der Monatsmittelwert (durchgezogene Linie) sowie der maximale Wert je Monat (lange Striche), jeweils auf Grundlage von Auswertungen auf Minutenbasis. Man erkennt, dass die niedrigsten minimalen Werte im Winter in dem Bereich von 20 % bis 25 % rel. Feuchte liegen, die Mittelwerte aber einen Wert von 30 % nicht nennenswert unterschreiten. Dies erklärt, dass bei den eingestellten Grenzen der Feuchteregelung von 20 % diese praktisch nicht in Betrieb war.



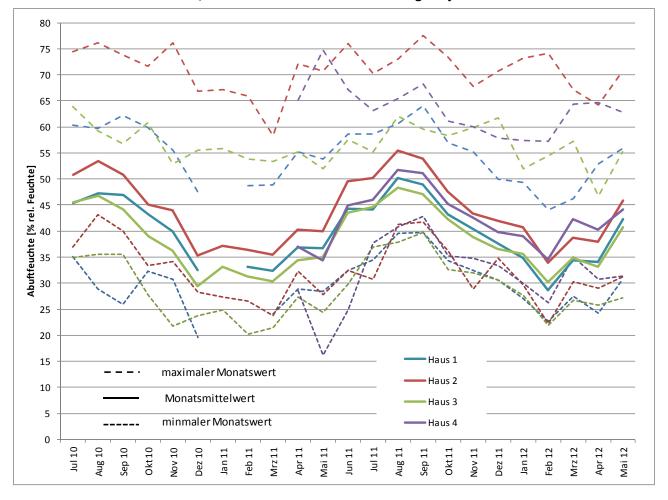


Bild 81: Haus 2: Minimale, mittlere und maximale Luftfeuchtigkeit je Monat

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der LQ-Regelung im Winter nur in Ausnahmefällen und nur kurzzeitig Situationen auftraten, in denen die relative Abluftfeuchte unter einen Wert von ca. 30 % gesunken ist. Bild 82 zeigt zusätzlich die Häufigkeitsverteilung der Tagesmittelwerte der Abluftfeuchte für alle Feldtestgebäude. Außer bei Haus 3 wurde eine Abluftfeuchte von 30 % r. F. nur in 3 % bis 5 % der Zeit unterschritten. Bei Haus 3 war dies in 11 % der Zeit der Fall. Ein Wert von 25 % r. F. wurde in keinem der Häuser unterschritten. Auffällig ist, dass die Feuchteverteilung bei Haus 2 deutlich nach rechts zu höheren Werten verschoben ist. Ursache könnte hier im Vergleich zu den anderen Häusern die Lage des Gebäudes in einem Talkessel sein, die zu höheren relativen Feuchten führte. Keines der Gebäude erreichte im Sommer oder der Übergangszeit Tagesmittelwerte der Abluftfeuchte von über 68 %.

Da neben der Verdunstung von Pflanzen die menschliche Aktivität im Gebäude die Hauptfeuchtequelle darstellt (Feuchte der ausgeatmeten Luft, Kochen, Körperreinigung, Wäsche trocknen), die menschliche Aktivität aber auch durch die VOC-Sensoren erfasst wird, liefern die Messergebnisse Hinweise, dass bei Verwendung der LQ-Reglung in Wohngebäuden eine zusätzliche Feuchteregelung entbehrlich ist, da der Volumenstrom im Gebäude reduziert wird, wenn aufgrund der Sensormesswerte keine oder nur wenige anwesende Personen zu erwarten sind und damit auch weniger Feuchtequellen zur Verfügung stehen.



16% 15% Haus 1 14% Haus 2 13% Haus 3 12% Haus 4 11% 10% Häufigkeit [%] 9% 8% 7% 6% 5% 4% 3% 2% 1% 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50 52 54 56 58 60 62 64 66 68 70 relative Feuchte [%]

Bild 82: Häufigkeitsverteilung der Abluftfeuchte im Zeitraum Juli 2010 bis Ende Mai 2012 für die vier Gebäude des Feldtests auf Basis von Tagesmittelwerten

Im Bereich der maximalen Luftfeuchten im Sommer wurden in Haus 2 in einzelnen Monaten die obere Schwelle von 75 % kurzzeitig überschritten. Die Feuchteregelung hat dann die Lüftungsstufe erhöht, wenn die absolute Feuchtedifferenz zwischen innen und außen zu einer Entfeuchtung beitragen konnte (siehe Bild 83). Aufgrund der guten thermischen Qualität der Gebäude (wärmebrückenfreie Konstruktion) sind die Gebäude unkritisch in Bezug auf sommerliche Feuchteprobleme, so dass die kurzen Spitzenwerte, die gemessen wurden als völlig unproblematisch zu bewerten sind. Die Monatsmittelwerte liegen auch im Hochsommer mit maximal 55 % rel. Feuchte weit unter dem kritischen Bereich.

Mit den eingestellten Schwellwerten (20 % bzw. 23 % untere Schwelle im Winter und 75 % obere Schwelle im Sommer) war die Feuchteregelung im Winter nur in Haus 4 in einem einzigen Zeitintervall (1 Minute) aktiv. Da die Ausgabe der Feuchteregelung aber über 10 Minuten gemittelt wurde, ergab sich bei keinem der Feldtestgebäude ein Eingriff der Feuchteregelung im Winter. Im Sommer gab es bei Haus 2 insgesamt 66 Zeitintervalle, in denen die Feuchtregelung den Luftvolumenstrom erhöht hat, vor allem im September 2011 (exemplarisch in Bild 83 für den 04.09.2011 dargestellt). Die erhöhten Feuchtewerte wurden durch die Lüftungsanlage dann aber schnell abtransportiert.



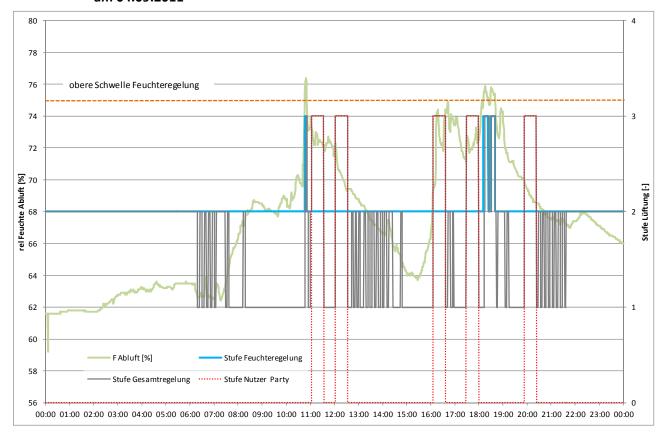


Bild 83: Haus 2: Reaktion der Feuchteregelung im Bereich der oberen Schwelle (75 % rel. Feuchte) am 04.09.2011

Insgesamt ergab sich in den vier Gebäuden des Feldtests kaum die Notwendigkeit, eine zusätzliche Feuchteregelung neben der LQ-Reglung zu betreiben, da die Messwerte bereits in einem sinnvollen Bereich lagen. In einzelnen Zimmern kommen niedrigere Feuchtewerte vor. Hier ist die Frage zu stellen, ob ein einzelner Raum, der unter Umständen nicht belegt ist und deswegen kaum Feuchtequellen besitzt, das Regelungsverhalten bestimmen soll oder ein mittlerer Wert für das Gebäude, zumal bei zusätzlichem Eingriff der Feuchteregelung eine Abwägung zwischen ggf. hohen VOC-Konzentrationen durch verringerten Luftaustausch und der begrenzt möglichen Anhebung der Raumluftfeuchte stattfinden müsste.

# 5.5 Perspektiven für den Einsatz der Luftqualitätsregelung

Die im Forschungsprojekt entwickelte LQ-Regelung hat die in sie gesetzten Erwartungen überwiegend erfüllt. Aufgrund der Tatsache, dass die Regelung hier erstmalig in Feldtestgebäuden eingesetzt wurde, war aber zum Teil ein höherer Aufwand erforderlich, um die Regelung umzusetzen und erproben zu können. Außerdem ergaben sich im Verlauf der Forschungsprojekts Erkenntnisse und Entwicklungen, die bei einer Umsetzung in einer größeren Anzahl von Gebäude berücksichtigt werden sollten.

### Luftqualitätssensoren

Die im Feldversuch und bei allen Voruntersuchungen eingesetzten VOC-Sensoren vom Typ "LuQaS" wurden von der Firma Elektronik und Technologie Rump GmbH (ETR) in Dortmund entwickelt und hergestellt. Nach der Eröffnung des Insolvenzverfahrens von ETR am 15.04.2008 und der anschließenden Einstellung des



Betriebs stellt sich die Frage nach der Verfügbarkeit vergleichbarer VOC-Sensoren für eine zukünftige breite Anwendung.

Eine Tochterfirma der früheren ETR, die ETR PS, ebenfalls mit Sitz in Dortmund, ist in der Lage sowohl ein ähnliches EvaKit mit Anzeigefunktion als auch das LuQaS-Sensorelement zu liefern [Hiller 2012]. Somit können die Ergebnisse direkt weiterverwendet werden.

Die Firma AL-KO Therm GmbH, die zusammen mit ETR den Luftqualitätsregler "AirQualitizer" entwickelt hat, setzt in diesem einen nahezu identischen Sensor ein. Der AirQualitizer ist für die Einzelraumregelung in Bürogebäuden konzipiert, kann über verschiedene Bussysteme angesprochen und auch nur messend eingesetzt werden. Die Ausgabe erfolgt in einer Dezipol-Skala, die Messwerte in Digits sind aber grundsätzlich auch verfügbar.

Weiterhin entwickelt AL-KO Therm zurzeit einen dem M18-Sensor vergleichbaren Kanalfühler, der ebenfalls zur Regelung der Luftqualität eingesetzt werden kann und ebenfalls auf dem LuQaS-Sensor basiert.

Bild 84: Ansichten Kanalfühler R3 (links) und AirQualitizer (rechts) [AL-KO 2012]





Bild 85 zeigt eine Vergleichsmessung über einige Tage von LuQaS-EvaKit und AirQualitizer in einem Büroraum im IWU. Die Darstellung ist so skaliert, dass beide Kurven gut miteinander vergleichbar sind, die Skalierung ist aber für beide Messwerte unterschiedlich. Die Messwerte des AirQualitizers laufen synchron mit denen des LuQaS-EvaKits, wobei die Dynamik beim AirQualitizer insbesondere bei Spitzenwerten größer ausfällt. Zwischen beiden Messwerten existiert ein Offset von ca. 25 Digits. Somit kann der AirQualitizer auch gut als Ersatz des LuQaS-EvaKits verwendet werden.



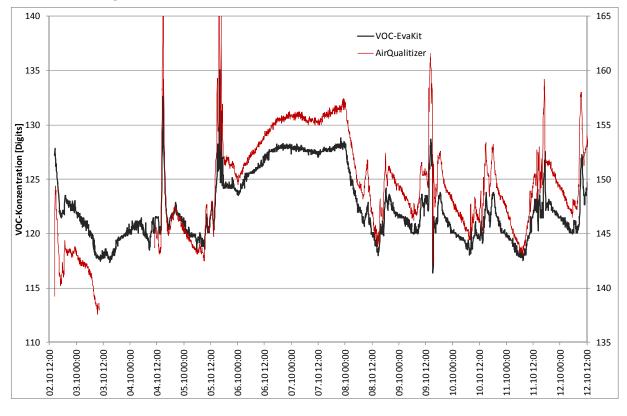


Bild 85: Vergleich der Messdaten des EvaKits mit dem AirQualitizer

In den letzten Jahren wurden auch von einer Reihe anderer Hersteller Luftqualitätssensoren weiterentwickelt, die für den Einsatz in der LQ-Regelung in Frage kommen, denn die entwickelte Regelung ist nicht auf den LuQaS-Sensor beschränkt, sondern kann auch mit anderen Luftqualitätssensoren kombiniert werden, auch wenn im Feldtest sehr viele Erfahrungen zum Betriebsverhalten der LuQaS-Sensoren gesammelt wurden, die nicht unbedingt auf andere Sensoren übertragbar sind. Wichtig ist u. a. die Frage, ob eine Linearisierung der Messwerte vorgenommen werden muss. Beim LuQaS-Sensor wurde die Linearisierung auf Basis der Kennlinie mit dem Gas Kohlemonoxid vorgenommen. Da VOC-Sensoren für verschiedene Gase eine unterschiedliche Sensitivität besitzen, ist hier die Frage von grundsätzlicher Bedeutung, welche typischen Gase sind im Gebäude zu erwarten und wie bildet der Sensor diese bei sich ändernder Konzentration ab. In der Praxis sind die Substanzen aber selten bekannt, so dass ein pragmatischer Ansatz mit einer Linearisierung auf Basis eines ohnehin verwendeten Kalibriergases angewandt werden kann.

Alle Messwerte wurden in Gebäuden erfasst, die in einer rationellen Holzfertigbauweise erstellt wurden, bei denen zwischen Herstellung der Gebäudeelemente und dem Bezug teilweise nur 4 Wochen vergehen. Die gemessenen Abklingkurven bei den VOC-Werten im Gebäude sind somit nicht notwendigereise auf andere Neubauten mit anderen Baumaterialien und längeren Bauzeiten übertragbar, außerdem stellt sich die Frage, wann die Veränderung der Kalibrierung bei den Sensoren begonnen hat. Da im Allgemeinen der Innenausbau und die Möblierung als wichtiger Einfluss auf die Stoffkonzentrationen in der Raumluft angesehen werden, müssen Messergebnisse z. B. in Massivbauten nicht unbedingt anders verlaufen. Dann ergäben sich beim Einsatz anderer Sensoren auch nicht unbedingt andere VOC-Profile und Abklingkurven.



### Vereinfachungen im Konzept der LQ-Regelung

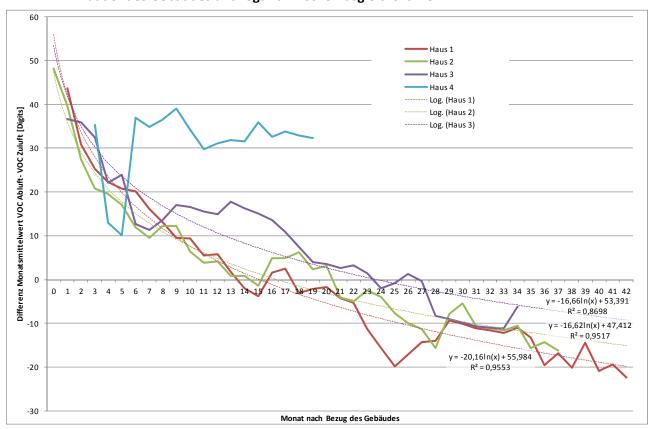
Wie in Kapitel 5.2.3 erläutert, ist der Einfluss der Zuluftqualität auf die Bestimmung der Schwellwerte bei niedrigen und mittleren Volumenströmen in der Lüftungsanlage gering, andererseits erhöht der VOC-Sensor in der Zuluft die Kosten und den Aufwand der Installation. Aus diesem Grund kann bei zukünftigen Anwendungen geprüft werden, ob der VOC-Sensor in der Zuluft nicht eingespart wird und stattdessen bei der Berechnung der ungestörten VOC-Konzentration mit einer definierten Differenz zwischen Zu- und Abluft gerechnet wird.

Bild 86 zeigt die Differenz der Monatsmittelwerte der VOC-Konzentration von Abluft minus Zuluft (LuQaS-Sensoren) in Abhängigkeit von der Bezugsdauer des Gebäudes. Bei den Häusern 1 bis 3 ergibt sich eine logarithmische Abklingfunktion, die aber einen Offset von ca. -18 Digits besitzt. Daraus ergibt sich die Schwierigkeit, dass keine lineare Differenz zwischen Abluft und Zuluft angesetzt werden kann, sondern sich der Wert mit der Nutzungszeit des Gebäudes ändert. Eine mittlere Ausgleichsfunktion könnte auf Basis der Häuser 1 bis 3 mit folgender Formel beschrieben werden:

$$VOC_{Ab} - VOC_{Zu} = -17,813 * \ln(t_{Betrieb}) + 52,26$$
 (GI. 6)

Bei Haus 4 ergab sich innerhalb der Messzeit von 17 Monaten kein Abfall der Differenz der VOC-Werte von Ab- und Zuluft. Berücksichtigt man die Ergebnisse der Überprüfung der Kalibrierung der VOC-Sensoren, stellt sich aber die Frage, inwieweit diese Funktion durch den – nicht gewollten – Sensordrift verursacht wird. Zeigt sich bei zukünftigen Einsätzen ein ähnliches Verhalten wie im Feldtest, so kann obige Formel verwendet werden, sind andere VOC-Sensoren stabiler, kann ein fester Wert von ca. 20 Digits eingesetzt werden.

Bild 86: Differenz der Monatsmittelwerte VOC Abluft – VOC Zuluft in Abhängigkeit von der Bezugsdauer des Gebäudes und logarithmische Ausgleichskurven





Ein Verzicht auf den Zuluft-VOC-Sensor würde bedeuten, dass die LQ-Regelung nicht mehr den Luftvolumenstrom reduzieren kann, wenn die Luftqualität in der Außenluft schlechter ist als im Gebäude. Aufgrund der oben dargestellten sich ändernden Differenzen zwischen Ab- und Zuluft, hätte bei den Häusern 1 bis 3 nach ca. 1,5 bis 2 Jahren Betriebszeit diese Zusatzfunktion aber zu einer nicht mehr korrekten Funktion der Lüftungsanlage geführt, da im Monatsmittel die Messwerte in der Zuluft immer höher lagen als in der Abluft. Im Feldversuch wurde dieses Problem durch eine Anpassung des Schwellwertes für die Kennung, dass die Außenluft besser ist als die Abluft, gelöst.

Aus diesem Grund scheint ein Verzicht auf die Funktion einer Reaktion auf die Außenluftqualität verzichtbar, wenn das Gebäude nicht in einem Gebiet mit starken Geruchsbelästigungen errichtet wurde.

### **Feuchteregelung**

Die Feuchteregelung als Teil der LQ-Regelung wurde im Feldversuch nur sehr vorsichtig parametriert, da der Fokus im Projekt bei der Beeinflussung der Luftqualität durch die VOC-Sensoren lag. Dennoch wurde im Winter kaum der Komfortbereich der Raumluftfeuchte verlassen, obwohl die Feuchteregelung fast nie den Luftvolumenstrom beeinflusst hat. Dies ist ein Indiz, dass dann, wenn die LQ-Regelung die An- und Abwesenheiten der Bewohner erkennt und entsprechend regelt, auch die Feuchtewerte günstig beeinflusst werden, da bei Abwesenheit der Personen weniger Feuchte produziert wird und gleichzeitig weniger über die Lüftungsanlage abtransportiert wird. Hohe Luftfeuchten traten im Projekt fast überhaupt nicht auf und sind bei Passivhäusern mit einer Lüftungsanlage auch nur selten anzutreffen und bauphysikalisch selten ein Problem. Aus diesem Grund kann zur Vereinfachung der Regelung und zur Reduktion der Kosten für den Fühler auf die Feuchteregelung unter Umständen verzichtet werden.

#### Einsatz zur Regelung von Abluftanlagen

Die LQ-Regelung wurde im Feldtest in Passivhäusern der Firma Schwörer Haus KG erprobt. Wie in Kapitel 5.2 gezeigt, konnte durch die LQ-Regelung die Lüftungsreglung an die vorhandene Belastung der Raumluft und somit an die Luftqualität angepasst werden. Da die Gebäude mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet sind, fällt die erreichbare Energieeinsparung gering aus (hauptsächlich Lüfterstrom, der Einfluss der Reduktion der Lüftungswärmeverluste ist gering). Deutlich größer wird die Energieeinsparung jedoch in Gebäuden mit Abluftanlage ausfallen, die mit einer solchen Luftqualitätsregelung ausgestattet wird, da hier der energetisch relevante Außenluftvolumenstrom identisch mit dem Anlagenvolumenstrom ist. Wird der Volumenstrom durch die LQ-Regelung aufgrund geringer Belastung im Gebäude reduziert, vermindern sich direkt die Lüftungswärmeverluste. Besonders für solche Abluftanlagen ist auch die energieorientierte Betriebsweise von Interesse, wenn die Anlage normalerweise mit Auslegungsvolumenstrom und bei geringen VOC-Werten (z. B. bei Abwesenheit der Bewohner) mit reduziertem Volumenstrom betrieben wird.

Bei Gebäuden mit Abluftanlage sollte aber geprüft werden, ob eine Feuchteregelung hier sinnvoll eingesetzt werden kann, besonders wenn diese in energetisch schlechteren oder Bestandsgebäuden eingesetzt wird.

### Konzept einer Vereinfachten LQ-Regelung

Fasst man die möglichen Vereinfachungen zusammen, so ergibt sich ein gut umsetzbares Konzept zur LQ-Regelung. Erforderliche Eingangsdaten sind die VOC-Konzentration in der Abluft und der aktuelle Volumenstrom (entweder aus Messdaten einer Messblende oder über die Kennlinie der Lüftermotoren). Außerdem müssen bei Inbetriebnahme das Gebäudevolumen und der Luftwechsel bei Auslegungsvolumenstrom einmalig hinterlegt werden. Bild 87 zeigt die Funktionen der vereinfachten Regelung. Der VOC-Messwert wird linearisiert, die Quellstärke berechnet und anschließend wird die VOC-Konzentration C<sub>Raum</sub> bei ungestörtem Betrieb in Normallüftung bestimmt. Beide Werte werden nichtflüchtig zwischengespeichert. Nach einer



Delinearisierung werden die Häufigkeitsklassen für das kurzfristige und das langfristige Histogramm gebildet und nach Ablauf des jeweiligen Zeitintervalls werden die Schwellwerte berechnet.

Zeitsteuerung 14 d / 41 d letzten Wert Erstellung Berechnung speichern Schwellwerte Histogramme Werte in nicht flüchtigem Speicher ablegen Messwert Plausibi-VOC Abluft Lineari-Quell-Delineari Raum litätskonsierung stärke sierung trollen Messwert Volumenstrom Berechnung Lüfterstufe Partytaster/Handsteuerung Ausgabe an Lüftermotoren

Bild 87: Vorschlag Funktionsschema vereinfachte LQ-Regelung

Mit dem aktuellen Messwert VOC Abluft und den gültigen Schwellwerten wird kontinuierlich die Lüfterstufe bestimmt. Zusätzliche Eingänge für einen Partytaster und eine Handsteuerung ergänzen die Wahl der Lüftungsstufe. Schließlich sollte ein zusätzliches Modul zur Plausibilitätskontrolle der Messwerte, der ungestörten VOC-Werte im Gebäude und der Schwellwerte ergänzt werden, um Fehlfunktionen erkennen zu können. Als Quantile zur Berechnung der Schwellwerte haben sich im aktuellen Feldversuch die Werte aus Tab. 14 bewährt.

Alle beschriebenen Funktionen lassen sich einfach in einem aktuellen Microcontroller implementieren, so dass die zusätzlichen Hardwarekosten überschaubar sind.



# 6 Entwicklung der Anzeige für das Nutzerfeedback

Im Rahmen des Projektes sollte auch mit Hilfe der Lüftungsanlage, die in regelmäßigen Abständen eine spezielle Testsequenz durchläuft, der Öffnungszustand der Fenster des Gebäudes überprüft werden. Eine Beschreibung des Verfahrens und der Sequenz findet sich in den Kapiteln 2.4 und 2.5.

Mit der Information, ob alle Fenster im Gebäude geschlossen sind oder nicht, sowie der gemessenen Außentemperatur, wurde mit einem vereinfachten Berechnungsansatz die Auswirkung der Fensteröffnung auf den Heizwärmebedarf des Gebäude abgeschätzt (dokumentiert in [Knissel et. al 2011]) und den Bewohnern mit einer dreifarbigen Balkenanzeige rückgemeldet.

Die Skalierung erfolgte mit dem abgeschätzten zusätzlichen Heizwärmeverbrauch, der sich einstellt, wenn ein Fenster bei -10 °C Außentemperatur über eine Stunde gekippt ist. Liegt die Außentemperatur höher, so kann deutlich länger geöffnet werden, bis der gleiche Anzeigenwert erreicht ist.

**Bild 88:** 

### Nutzerfeedback / Lüftungsanzeige

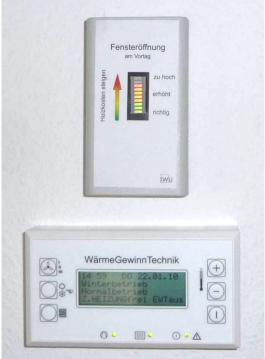
Das Nutzerfeedback besteht aus der Software, die den Fensteröffnungsstatus in eine Bewertung der energetischen Auswirkungen des Fensteröffnungsverhaltens umwandelt (Bewertungsgröße  $\Pi$ ) und einer Anzeige, die an zentraler Stelle im Wohnzimmer das Ergebnis in Form einer Balkengrafik ausgibt. Die Berechnungen wurden innerhalb des Forschungsprojektes von der Dasylab-Regelung ausgeführt.

An die Anzeige wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Einfache Visualisierung der Bewertungsgröße Π in Form einer dreifarbigen Balkenanzeige. Dabei sollten vernachlässigbare Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch durch die Farbe Grün, erhöhter Heizwärmeverbrauch durch die Farbe Orange und hoher Heizwärmeverbrauch durch die Farbe Rot symbolisiert werden.
- Eine Rückmeldung des Fensteröffnungsverhaltens vom Vortag, um definierte Zeiten zu besitzen, auf die sich die Anzeige bezieht. Von einer Rückmeldung des Fensteröffnungsverhaltens der letzten 24 h (also gleitend) wurde abgesehen, da es einfacher ist, sich daran zu erinnern, ob man am Vortag die Fenster geöffnet hat als zu bestimmen, ob dieses Fensteröffnen in den letzten 24 h stattgefunden hat.
- Der ausgegebene Wert sollte den ganzen Tag angezeigt werden.

ge im Wohnzimmer über dem Bedienteil der Lüftungsanlage/Wärmepumpe

Montage der Lüftungsanzei-



• Die Anzeige sollte über eine Standardschnittstelle mit der Dasylab-Regelung kommunizieren können.



### Entwicklung einer Lüftungsanzeige

Trotz intensiver Recherche konnte zu Beginn des Projekts auf dem Markt keine Anzeige gefunden werden, die eine 9-zeilige Anzeige in den Farben Grün, Orange und Rot bietet und über den PC einfach angesteuert werden kann.

Aus diesem Grund wurde eine Ausgabemöglichkeit selbst entwickelt, die den Bewohnern die energetischen Auswirkungen ihres Fensteröffnungsverhaltens visualisieren kann und über eine RS 485-Schnittstelle aus Dasylab heraus angesprochen werden kann. Zur Datenübertragung wurde ein einfaches ASCII-Protokoll definiert, das das Gerät adressiert und den auszugebenden numerischen Wert als Anzahl eingeschalteter farbiger Leuchtdioden ausgibt. Bild 89 zeigt den Schaltplan der Lüftungsanzeige. Die Schaltung besteht im Wesentlichen aus einer Schnittstelle für den RS 485-Bus sowie einem Microcontroller vom Typ Atmel ATMega8, die Software wurde mit BASCOM erstellt (Dokumentation in Anhang D). Der Microcontroller übernimmt dabei die Auswertung der Befehle vom RS 485-Bus und die Ansteuerung der farbigen Balkengrafik.

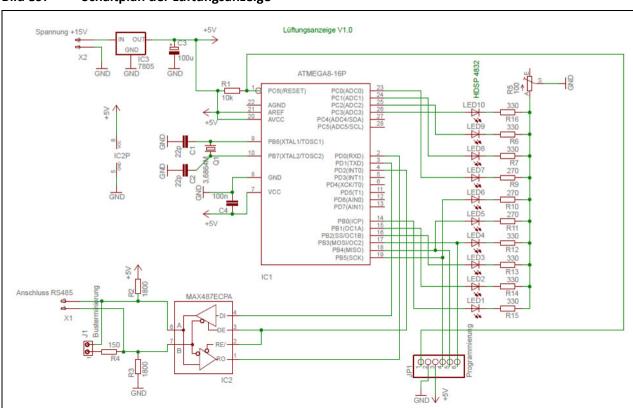
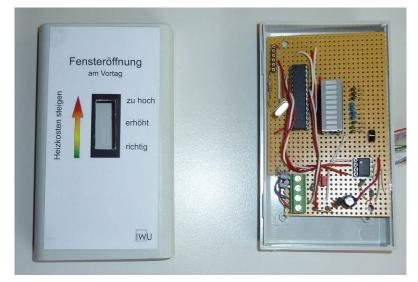


Bild 89: Schaltplan der Lüftungsanzeige

Aufgrund der geringen Stückzahl von nur vier Anzeigen wurden alle Schaltungen auf Lochrasterplatine aufgebaut und in einem Gehäuse für Wandmontage untergebracht (siehe Bild 90).









Gehäuse (links) und Schaltung (rechts) der Lüftungsanzeige

**Anzeige in Betrieb** 

Die Anzeige wurde in den Gebäuden des Feldtests jeweils im Wohnzimmer an zentraler Stelle direkt über der Lüftungsregelung montiert.



# 7 Messdatenauswertung der Erfassung des Fensterzustand und der Nutzerrückmeldung

In diesem Kapitel werden die Messdaten der Feldtestgebäude bezüglich Fensteröffnung dargestellt, die Werte mit den über die Drd-Sequenz erfassten Fensteröffnungszeiten verglichen und die Ergebnisse der Nutzerrückmeldung dargestellt.

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Drd-Sequenz wurden alle Fenster mit fest verdrahteten Reed-Kontakten ausgestattet, die als Minutensummen der Öffnungsdauer von der Messdatenerfassung aufgezeichnet wurden, um eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Information zum Öffnungszustand aller Fenster zur Verfügung zu haben. Bei einzelnen Fenstern traten mit den Reedkontakten Probleme bei der Erkennung offener Fenster auf (Abstand Kontakt-Magnet, zu schwacher Magnet). Diese wurden ggf. nachjustiert bzw. aus der Auswertung herausgenommen, bis das Problem behoben war. Bei mehreren öffenbaren Fenstern in einem Raum wurden die Reedkontakte in Reihe geschaltet, so dass für den Raum ein offenes Fenster angezeigt wurde, sobald ein Fenster zumindest geöffnet wurde. Eine Unterscheidung zwischen gekippten und ganz geöffneten Fenstern war nicht möglich, eine Kippstellung war jedoch nur bei den Einfachfenstern ohne Doppelflügel möglich, die es nur in einem Feldtestgebäude gab.

#### Besonderheiten der Gebäude bezüglich Fensterlüftung

Bedingt durch die spezielle Konstruktion der Fenster in den Feldtestgebäuden mit überwiegend Kastenfenstern aus zwei Flügeln (siehe Bild 91) ergeben sich für die Auswertung der Fensteröffnungsdauer und der Drd-Sequenz eine Reihe von Besonderheiten, die hier kurz dargestellt werden sollen.

- Der Aufwand ein Fenster zu öffnen, ist für die Bewohner höher, da beide Flügel geöffnet werden müssen und eine Sicherung gegen Zuschlagen nicht immer vorhanden ist. Aus diesem Grund muss von geringer Fensteröffnungshäufigkeit ausgegangen werden.
- 2. Der äußere Fensterflügel kann nicht gekippt werden, da er sonst mit dem Innenflügel kollidieren würde.
- 3. Besonders im Winter an sonnigen Tagen entsteht im Zwischenraum zwischen den Fensterflügeln eine erhöhte Temperatur. Diese kann zur Beheizung des Gebäudes genutzt werden, wenn der innere Flügel gekippt wird. Die Fensterkontakte zur Überprüfung der Drd-Sequenz sind im inneren Flügel montiert. Dies kann im Winter tagsüber zu Fehlinterpretationen führen, wenn nur der innere Flügel gekippt ist, der äußere aber geschlossen. Einige der Bewohner haben in persönlichen Gesprächen geäußert, dass sie diese "Zusatzheizung" aus dem Kastenfenster im Winter bewusst nutzen.

Tab. 16 zeigt eine Übersicht, in welchem Gebäude welche Fenster vorhanden sind.

Tab. 16: Übersicht über die Anzahl der Kastenfenster und der konventionellen Fenster mit Drehkippbeschlag

	Kastenfenster	Einfachfenster mit Drehkipp- beschlag
Haus 1	Nur Kastenfenster	
Haus 2	Nur Kastenfenster	
Haus 3	8 Kastenfenster	2 Fenstertüren und 3 Fenster
Haus 4	Nur Kastenfenster	



Bild 91: Ansicht der zweiflügligen Kastenfenster, links beide Flügel geöffnet, rechts innerer Flügel gekippt und äußerer Flügel geschlossen





# 7.1 Häufigkeit Fensteröffnung Winter / Sommer – Messdaten Fensterkontakte

Bild 92 zeigt die Fensteröffnungsdauer in den Feldtestgebäuden in Stunden je Fenster und Tag als Monatsmittelwerte. Es zeigt sich, dass sich die schon in anderen Projekten gemessenen Jahresprofile ergeben, mit langen Fensteröffnungszeiten im Sommer und sehr kurzen im Winter. Die Haustür wurde bei der Auswertung wie ein Fenster behandelt, da sie besonders im Winter oft die längsten Öffnungszeiten aufweist. Fenster, bei denen die Kontakte zeitweise nicht funktionierten, wurden aus der Auswertung ausgeschlossen. Da die Gebäude zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Betrieb genommen wurden, liegt nicht für alle Monate ein kompletter Wertesatz vor.

Die Kennwerte der Fensteröffnung für das Winterhalbjahr (Oktober bis März), die Sommerzeit (Mai bis September) und das gesamte Jahr sind in Tab. 17 dargestellt. In Häusern 1 und 2 liegen die Fensteröffnungszeiten im Winter extrem niedrig, deutlich höhere Werte erreicht Haus 3, das neben den Kastenfenstern auch Fenster mit Dreh-Kipp-Beschlag besitzt, so dass die Bewohner die Fenster leichter öffnen konnten. Bei Haus 4 liegen die Fensteröffnungsdauern in der gleichen Größenordnung wie bei Haus 3, obwohl hier ausschließlich Kastenfenster verbaut wurden. Die ist ein Indiz dafür, dass die Art der Fenster keinen Einfluss auf die Fensteröffnungsdauer haben muss.



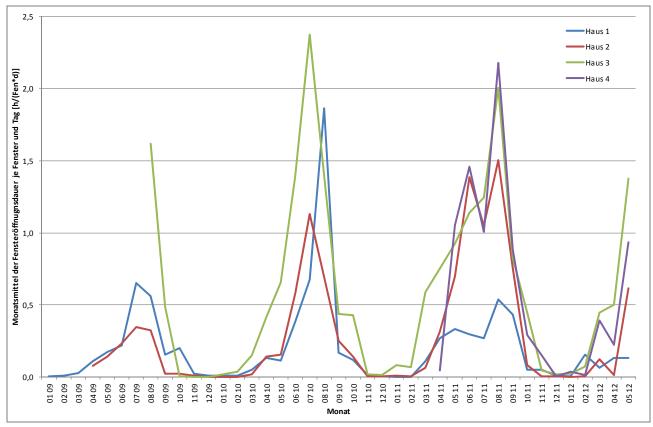


Bild 92: Fensteröffnungsdauer der Feldtestgebäude je Fenster und Tag

Die Abhängigkeit der Fensteröffnung von der Außentemperatur ist im folgenden Bild 93 zu sehen. Für alle Häuser ergibt sich eine charakteristische Abhängigkeit, da bei niedrigen Außentemperaturen die Fenster kaum geöffnet werden. Ausnahme ist Haus 1, bei dem bei Außentemperaturen von unter -12 °C ein Fenster im Kinderzimmer nach den Messdaten über 2 Tage geöffnet gewesen wäre (Diagramm oben links). Es handelt sich hierbei um ein Kastenfenster, und es ist zu vermuten, dass hier lediglich das Innenfenster nicht richtig verriegelt war.

Tab. 17: Kennwerte der Fensteröffnungsdauer der Feldtestgebäude für Winter, Sommer und das gesamte Jahr in Stunden je Fenster und Tag [h/(Fen\*d)]

Winter	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
2009/10	0,05	0,01	0,04	
2010/11	0,04	0,04	0,20	
2011/12	0,06	0,04	0,18	0,15

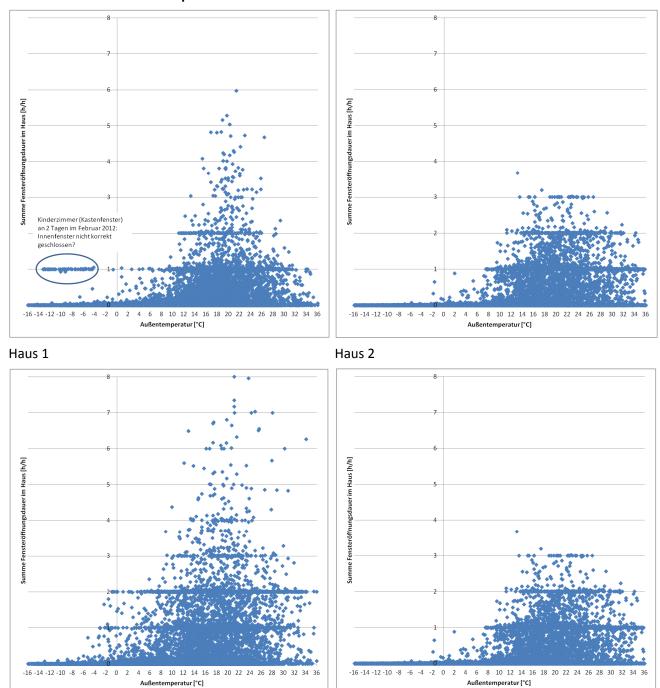
Sommer	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
2009	0,35	0,21		
2010	0,64	0,56	1,25	
2011	0,37	1,08	1,23	1,32

Jahr	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
2009/10	0,18	0,11	0,30	
2010/11	0,31	0,28	0,68	
2011/12	0,20	0,47	0,64	0,64



Grundsätzlich ist gut das höhere Niveau der Fensteröffnung bei Haus 3 (Bild 93 unten links) zu erkennen, wo eine Fensteröffnung, insbesondere Kippen, leichter von den Bewohnern umgesetzt werden kann. Die Fensteröffnungsdauer aller Häuser steigt meist ab einer Temperatur von ca. 8 °C (Heizgrenztemperatur von Passivhäusern ca. 10 °C) steil an und sinkt bei sehr hohen Außentemperaturen wieder ab.

Bild 93: Zusammenhang von Fensteröffnungsdauer (Summe Fensteröffnung aller Fenster je Stunde) und Außentemperatur für alle vier Gebäude im Feldtest

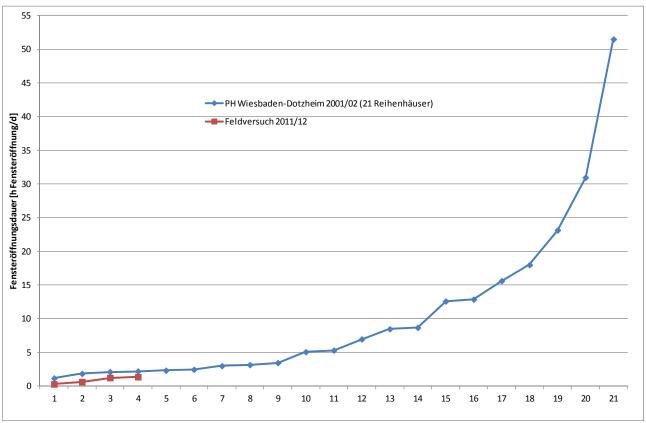


Haus 3 Haus 4



Zur Einordnung der ermittelten Fensteröffnungszeiten ist in Bild 94 die in den Gebäuden des Feldtests gemessene summierte Fensteröffnungsdauer aller Fenster eines Hauses je Tag in den Monaten von November bis März (Kernwinter) mit den Fensteröffnungszeiten der Passivhaussiedlung Wiesbaden-Dotzheim verglichen [Ebel et al. 2003]. Es zeigt sich, dass die Gebäude des Feldtests noch geringere Fensteröffnungsdauern aufweisen als in den 21 Passivhäusern in Wiesbaden im Jahr 2001/02 gemessen wurden. Gleichzeitig wurde die Luftqualität bei den Gebäuden im Feldtest als gut bis sehr gut eingeschätzt. Bei keinem der Feldtestgebäude wurde ein Nachtlüftungsverhalten (Schlafzimmerfenster auch im Winter nachts gekippt/geöffnet) festgestellt, das bei den Gebäuden in Wiesbaden bei ca. einem Drittel der Häuser im Schlafzimmer festgestellt werden konnte.

Bild 94: Geordnete Fensteröffnungsdauern der Feldtestgebäude (rot) und von 21 Passivhäusern der PH-Siedlung Wiesbaden-Dotzheim (blau) für die Kernheizmonate November bis März



# 7.2 Erfassung des Fensteröffnungzustandes mit der Drd-Sequenz – Übereinstimmung mit Fensterkontakten

Der Ablauf einer Drd-Sequenz ist in Bild 95 nochmals mit exemplarischen Messdaten dargestellt. In der Ausgleichsphase 1 wird der Volumenstrom der Anlage, der zu Beginn bei Stufe 1 lag, auf Stufe 2 gestellt und in der anschließenden Referenzphase ein Vergleichswert für die Druckdifferenz innen-außen ermittelt. Zu Beginn der Ausgleichsphase 2 wird der Zuluftvolumenstrom auf 20 % der max. Ventilatorleistung reduziert und die Abluft auf 95 % Ventilatorleistung erhöht. Dadurch verändert sich der Differenzdruck zwischen innen und außen (blaue Linie), wenn alle Fenster geschlossen sind. Ist mindestens ein Fenster offen, so stellt sich kaum eine Veränderung im Differenzdruck ein.



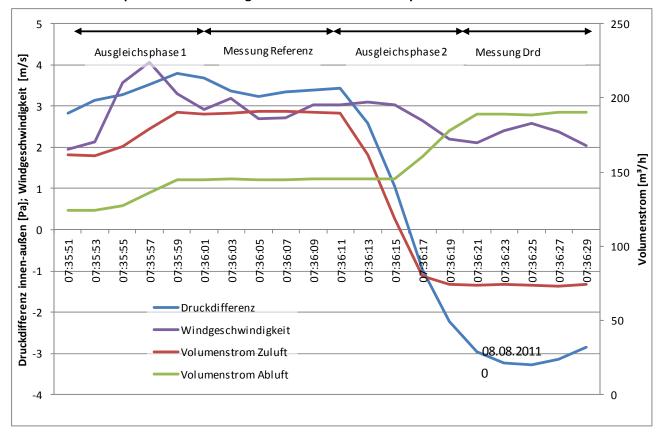


Bild 95: Exemplarische Darstellung des Ablaufs einer Drd-Sequenz

Die Summenhäufigkeit der Differenzdrücke zwischen dem Gebäudeinneren und außen während der Drd-Sequenz sind im folgenden Bild 96 für alle vier Häuser dargestellt. Teilweise lagen Testdaten ab Mitte März 2010 bzw. Mitte Mai 2010 vor, der einheitlichen Darstellung wegen und um Phasen mit Testbetrieb aus der Auswertung auszuschließen, wurde für die Häuser 1 bis 3 die Auswertung zum 01.07.2010 begonnen. Für Haus 4 liegen Messdaten der Drd-Sequenzen ab April 2011 vor. Aufgrund von Kommunikationsschwierigkeiten zwischen Drd-Sequenz und Standard-Regelung ist jede 7. Drd-Sequenz nicht durchlaufen worden, da die geänderten Steuerspannungen der Ventilatoren nicht korrekt übertragen wurden (Timingproblem). Die dadurch verursachten Ausfälle der Drd-Sequenz wurden bei der Auswertung herausgerechnet.

Bei Haus 1 funktionierte die Erkennung geschlossener Fenster bei einem Differenzdruck von 7 Pa zwischen innen und außen zu 94,6 % korrekt, absolut wurden bei 557 von 40418 Drd-Sequenzen die geschlossenen Fenster nicht korrekt erkannt, wovon das kurze Öffnen der Haustür mit 130 Fällen 6 % einen Teil der "falschen" Erkennungen ausmachte. Offene Fenster wurden zu 68,8 % korrekt erkannt. Insgesamt 1870 von 5992 Drd-Sequenzen mit offenen Fenstern wurden nicht korrekt erkannt. Ursache liegt hier wohl vor allem in Problemen bei der Differenzdruckmessung. Außerdem stellt sich die Frage, ob die etwas größere Leckage an der Revisionsklappe am Bypass der Lüftungsanlage zu einer Beeinflussung der Drd-Sequenzen geführt hat. Die Klappe sitzt im Technikraum, dessen Tür wohl meist geschlossen ist, so dass zumindest der zusätzliche Strömungswiderstand von einer Innentür zwischen der Leckagestelle und der Referenzdruckstelle im Flur des 1. OG des Gebäudes lagen. Dennoch ist ein negativer Einfluss hier nicht auszuschließen.

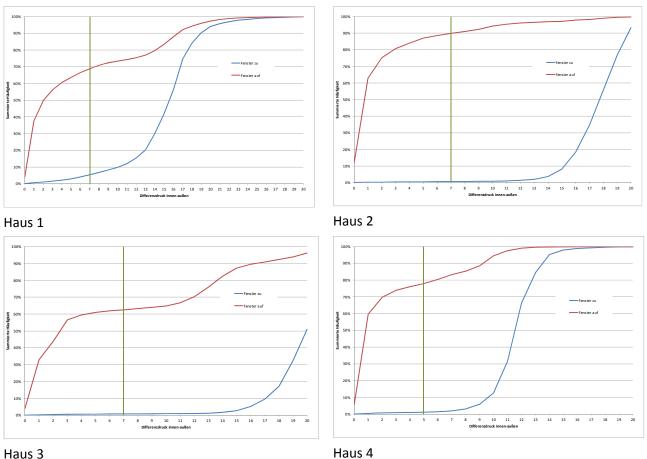
Bei Haus 2 funktionierte die Erkennung geschlossener Fenster bei einem Schwellwert von 7 Pa zu 99,4 % korrekt, absolut wurde nur bei 275 von 57236 Drd-Sequenzen die geschlossenen Fenster nicht korrekt erkannt, wovon das kurze Öffnen der Haustür mit 53 Fällen einen Teil der "falschen" Erkennungen ausmachte. Offene Fenster wurden zu 89,9 % korrekt erkannt. Insgesamt 754 von 7476 Drd-Sequenzen mit offenen Fenstern wurden nicht korrekt erkannt. Ursache sind hier wohl auch z. T. geschlossene Innentüren und Einbrüche/Schwankungen der Messwerte während der Differenzdruckmessung (siehe unten).



Bei Haus 3 funktionierte die Erkennung geschlossener Fenster bei einem Schwellwert von 7 Pa zu 99,3 % korrekt, absolut wurden nur bei 342 von 46283 Drd-Sequenzen die geschlossenen Fenster nicht korrekt erkannt, wovon das kurze Öffnen der Haustür mit 103 Fällen einen Teil der "falschen" Erkennungen ausmachte. Offene Fenster wurden zu 62,5 % korrekt erkannt. Insgesamt 3706 von 9878 Drd-Sequenzen mit offenen Fenstern wurden nicht korrekt erkannt. Ursache sind hier wohl auch z. T. geschlossene Innentüren und Einbrüche bei der Differenzdruckmessung.

Es zeigt sich weiterhin, dass bei Haus 4 bei geschlossenen Fenstern nur in 1,1 % der Fälle der Differenzdruck unterhalb des Schwellwertes von 5 Pa lag (232 von 24258 Fällen), geschlossene Fenster somit in 98,9 % der Fälle korrekt erkannt werden konnten. Waren im Gebäude Fenster tatsächlich geöffnet, so lag der Differenzdruck bei 78 % aller Fälle unter der Schwelle von 5 Pa, d. h. dann wurden sie korrekt erkannt. Dies bedeutet, dass sich bei 1254 von 5680 Drd-Sequenzen trotz offenem Fenster ein Differenzdruck von mehr als 5 Pa aufgebaut hatte. In 17 % der Fälle mit fälschlicherweise als geschlossen erkannten Fenstern wurde in der Minute der Drd-Sequenz die Haustür geöffnet oder geschlossen, so dass der Fehler hier an dem zeitlichen Verzug zwischen Ermittlung des Referenzwertes und der Drd-Sequenz liegt.

Bild 96: Häufigkeit des Differenzdrucks innen-außen für alle vier Gebäude des Feldtests (Betriebszustände, bei denen der Differenzdrucksensor bereits vor der Messung am Messbereichsende angelangt war, wurden nicht berücksichtigt)



Aus Bild 96 lässt sich ebenfalls ableiten, wie sich die Erkennungsraten verändern, wenn die Schwellwerte anders eingestellt werden. Abgesehen von Haus 1, wo grundlegende Probleme bei der Messung der Differenzdrücke auftraten, ergibt sich ein Bereich bis zu 14 Pa (Haus 2 und 3) bzw. 8 Pa (Haus 4), bei dem sich die Erkennungsrate geschlossener Fenster nicht nennenswert ändert. Gleichzeitig könnte mit einem erhöh-



ten Grenzdruck die Erkennung geöffneter Fenster verbessert werden, von 90 % auf ca. 95 % bei Haus 2, von 62,5 % auf ca. 81 % bei Haus 3 und von 78 % auf ca. 85 % bei Haus 4.

## 7.2.1 Ausführung der Innen- und Außenmessstellen in den Gebäuden des Feldtests

Bei den Gebäuden wurden unterschiedliche Ausführungen der Innen- und Außenmessstellen realisiert. Bei den Häusern 1 und 2 liegt die Außenmessstelle an der Wetterstation über First (siehe Bild 97 rechts). Haus 2 besitzt zusätzlich an der Öffnung ein T-Stück um den Einfluss unterschiedlicher Anströmung ausgleichen zu können.

#### Bild 97: Lage der Druckmesstellen Haus 1

Innenmessstelle (blauer Schlauch) ohne und mit Abdeckung





Außenmessstelle an der Wetterstation über First; der Druckmessschlauch ist in einem Schutzschlauch gegen UV-Strahlung untergebracht und mit einer Gaze verschlossen



Bei den Häusern 3 und 4 ist die Außenmessstelle an der Ostwand im oberen Bereich des Erdgeschosses herausgeführt, in der auch die Frischluftansaugung liegt (siehe Bild 98). Bei Haus 3 wurde sie nachträglich mit einem Carport überbaut, so dass sie stärker gegen Windanströmung abgeschirmt ist als bei Haus 4.

Die Innenmessstellen sind bei den Häusern 2 bis 4 im Erdgeschoss im offenen Hausflur im Bereich der Installationsebene (ca. 30 cm) unter der Geschossdecke verlegt (siehe Bild 98 oben links). Bei Haus 1, das 2 Vollgeschosse und ein Studio besitzt, liegt die Innenmessstelle kurz über dem Fußboden des Obergeschosses, um auch hier die Messung des Innendrucks im Bereich der druckneutralen Zone im Gebäude zu platzieren (siehe Bild 97 links).



Lage der Druckmesstellen in Haus 2, 3 und 4 Bild 98:

Innendruckmessstelle Haus 2



Außendruckmessstelle Haus 3



Außenmessstelle an einem Haus



Außendruckmessstelle Haus 4





## 7.2.2 Analyse des Einflusses des Außenklimas auf die Drd-Sequenz

Um die Gründe für nicht korrekt erkannte Fensteröffnung zu untersuchen, wurde für alle vier Gebäude des Feldtests der Einfluss von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Außentemperatur auf die Erfassung der Fensteröffnung ausgewertet. Dabei wurden sowohl die Verteilungen aller Drd-Sequenzen als auch ausschließlich derjenigen, bei denen der Fensterzustand nicht korrekt erkannt wurde, analysiert.

Bild 99 zeigt für alle vier Gebäude die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit sowohl bei allen Drd-Sequenzen (rot) als auch bei denjenigen Sequenzen, bei denen der Fensteröffnungszustand nicht korrekt erkannt wurde (schwarz). Bei Haus 4 verlaufen beide Linien nahezu gleich, so dass nicht geschlossen werden kann, dass die Windgeschwindigkeit bei falscher Erkennung eine nennenswerte Rolle spielt. Bei Haus 1, 2 und 3 sind die Abweichungen etwas größer, insbesondere bei höheren Windgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und ca. 6 m/s sind Fehler bei der Drd-Sequenz häufiger aufgetreten. Als signifikant zur Erklärung der falschen Erkennung wird dieser Unterschied aber nicht eingestuft.



Bild 99: Verteilung der gemessenen Windgeschwindigkeiten in allen Drd-Sequenzen sowie fehlerhafter Erkennung des Fensteröffnungszustandes

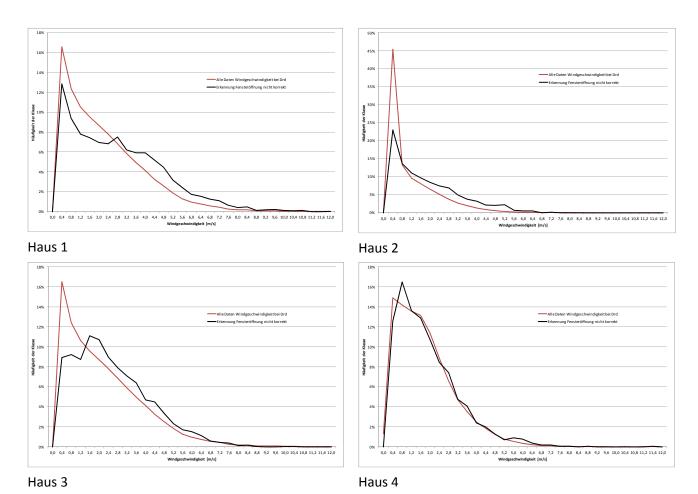


Bild 100 zeigt die Auswertung über die Außentemperatur. Es zeigt sich, dass bei allen Häusern besonders bei höheren Außentemperaturen falsche Drd-Ergebnisse deutlich häufiger sind als bei niedrigen. Ursache für die Häufigkeit der falschen Ergebnisse bei hohen Temperaturen ist wohl die Tatsache, dass absolut im Sommer die Fenster häufiger geöffnet wurden als im Winter. Dies hat auch zur Konsequenz, dass die Fehler bei der Bewertung der energetischen Auswirkungen der Fensteröffnung keine Rolle spielen, da bei hohen Außentemperaturen kein zusätzlicher Energieverbrauch entsteht.



Bild 100: Verteilung der gemessenen Außentemperaturen in allen Drd-Sequenzen sowie fehlerhafter Erkennung des Fensteröffnungszustandes

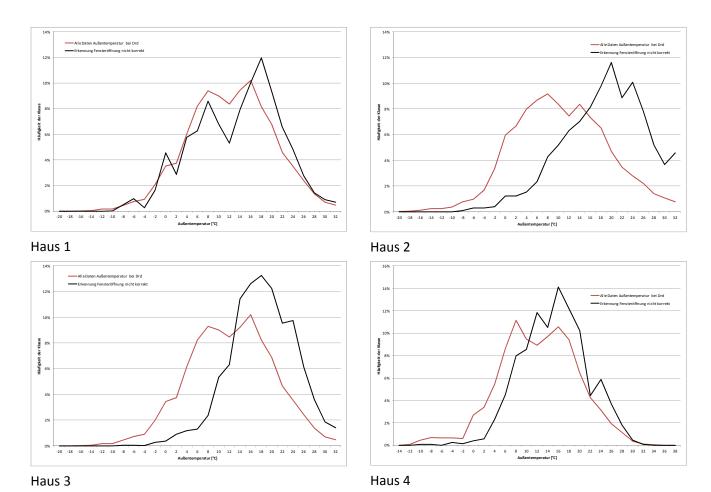


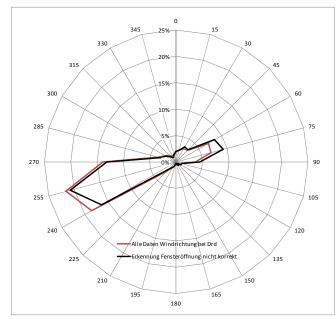
Bild 101 zeigt schließlich die Verteilung der Windrichtung bei den Drd-Sequenzen. Auch hier zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen der Darstellung aller Zeitpunkte (mit Drd-Sequenz) und denen mit falsch erkanntem Fensterzustand. Ein Einfluss der Lage der Referenzdruckmessstelle oder der

Gebäudeanströmung kann daraus nicht abgeleitet werden.

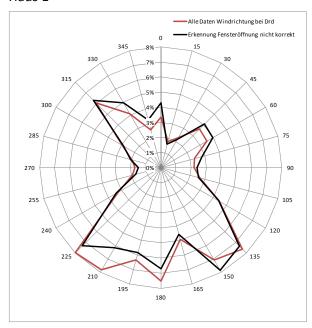


Bild 101: Verteilung der gemessenen Windrichtungen in allen Drd-Sequenzen sowie fehlerhafte Erkennung des Fensteröffnungszustandes

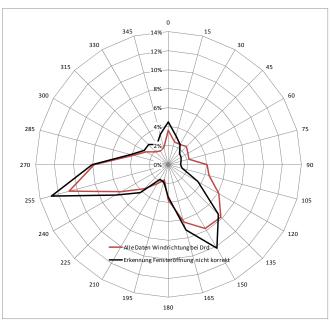




Haus 1



Haus 2



Haus 3 Haus 4

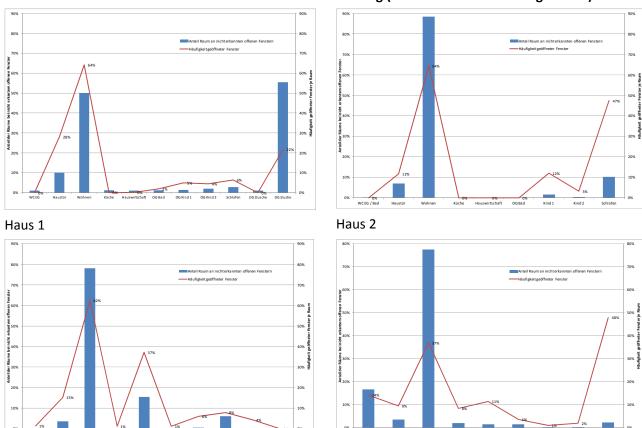
## 7.2.3 Analyse fehlerhafter Erkennung des Fensteröffnungszustandes

Bild 102 zeigt für die einzelnen Räume von allen vier Häusern die Anteile der offenen Fenster im Gesamtzeitraum (rote Linie) sowie die Anteile der Räume an den nicht erkannten offenen Fenstern. Es zeigt sich z. B. für Haus 4, dass die Fenster im Flur im Obergeschoss (48 %) und im Wohnzimmer (37 %) besonders häufig geöffnet wurden. Danach folgen WC im Erdgeschoss (14 %), Badezimmer im Obergeschoss (11 %) und Haustür (9 %). Der Anteil der Fenster bei nicht korrekt erkannten offenen Fenstern über die Drd-Sequenz ist anders verteilt. Das Wohnzimmer ist mit 77 % der Fälle dominierend, gefolgt vom WC im Erdgeschoss (17 %), dem Badezimmer im Obergeschoss (11 %) und der Haustür (4 %). Das Fenster im Flur im Oberge-



schoss, das nicht durch eine Tür vom übrigen Gebäude abgetrennt werden kann, ist trotz der häufigen Fensteröffnung absolut nur zu 2 % an den durch die Drd-Sequenz falsch erkannten Öffnungszuständen beteiligt. Dies legt die Vermutung nahe, dass neben zufälligen Fehlern (siehe oben) vor allem geschlossene Innentüren für die nicht erkannten offenen Fenster verantwortlich sind. Ist die Innentür geschlossen und vergleichsweise dicht, so kann sich trotz geöffnetem Fenster in diesem Raum ein Unterdruck im restlichen Gebäude aufbauen, so dass unterstellt wird, dass alle Fenster geschlossen wären.

Bild 102: Anteile der einzelnen Räume des Gebäudes an nicht erkannten offenen Fenstern sowie Anteile der Räume an der Gesamtfensteröffnung (mindestens ein Fenster geöffnet)



In den weiteren Häusern 1 bis 3 werden zum Teil andere Fenster häufiger geöffnet, immer wird jedoch das Wohnzimmerfenster mit dem Ausgang auf die Terrasse am meisten geöffnet. Da nur noch Haus 3 mit dem Fenster im Treppenhaus des OG ein Fenster ohne Innentür zum Flur besitzt, dieses aber kaum geöffnet wurde, kann die These, dass geschlossene Innentüren die Hauptursache für nicht erkannte offene Fenster darstellen, nicht weiter verifiziert werden. In [Großklos, Knissel 2002] wurde der Einfluss geschlossener Innentüren auf den sich aufbauenden Differenzdruck messtechnisch untersucht (Bild 103). Im Ergebnis ergaben sich damals ca. 3 Pa Druckunterschied für die erste geschlossene Innentür bei einem offenen Fenster im Obergeschoss und zwischen 0,5 Pa und 1 Pa zusätzlich für die zweite und dritte geschlossene Innentür. Bei einem offenen Fenster im Erdgeschoss und zwei geschlossenen Innentüren ergab sich ein Druckunterschied von ca. 2 Pa. Der Einfluss der Innentüren war somit gering, aber messbar. Die dort vorhandenen Innentüren besaßen Überströmöffnungen oberhalb des Türrahmens, so dass hier immer eine Mindestüberströmung sichergestellt war. Im Gegensatz dazu wird bei den Gebäuden des Feldversuchs der Spalt zwischen Innentür und Fußboden als Überströmöffnung verwendet, so dass sich geschlossene Innentüren bei Veränderungen der Türspalte stärker auf den tatsächlichen Differenzdruck zwischen innen und außen aus-

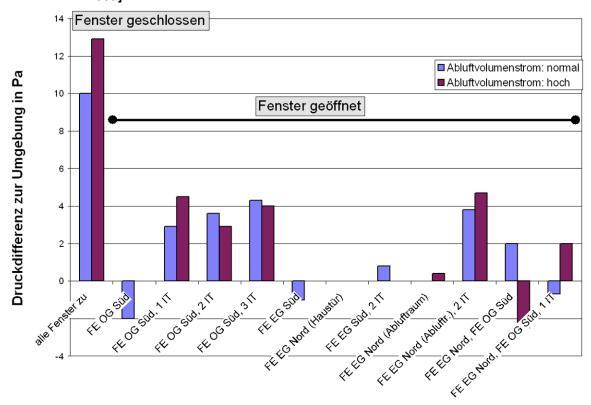
Haus 4

Haus 3



wirken können. Bei Detailuntersuchungen wurde festgestellt, dass bei einzelnen Innentüren die Spaltbreite zwischen Türblatt und Fußboden, die erforderlich ist, um eine ausreichende Überströmung zu gewährleisten, nicht mehr vorhanden war, was den Druckabfall an der Innentür deutlich erhöhen kann. Insgesamt kann von einem nennenswerten Einfluss der geschlossenen Innentüren auf die Bestimmungsgenauigkeit der Drd-Sequenz ausgegangen werden.

Bild 103: Handmessungen zur Druckdifferenz zwischen innen und außen bei unterschiedlichen geöffnetem Fenster und einer oder mehreren geschlossenen Innentüren [Großklos, Knissel 2003]



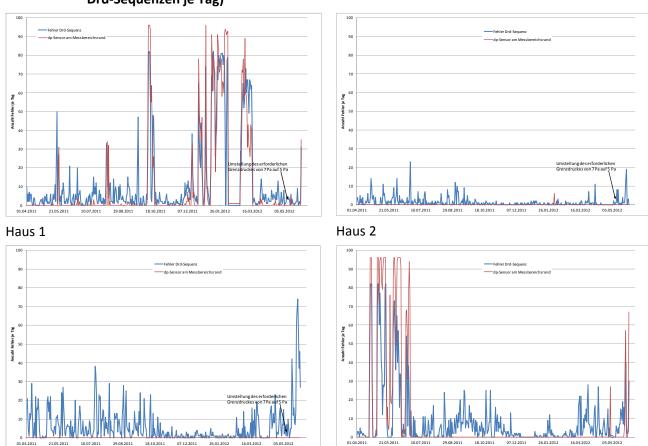
Ein weiterer Einflussfaktor sind Beeinflussungen der Ergebnisse der Druckdifferenzmessung durch Zustände, bei denen der Differenzdrucksensor im Bereich der Messbereichsgrenzen betrieben wurde. Die Sensoren wurden so eingestellt, dass sie Differenzdrücke zwischen -50 Pa und +50 Pa erfassen können. Vergleicht man diese mit den zu erwartenden Differenzdrücken von -20 Pa bis +20 Pa während der Drd-Sequenz, sollten die Messbereichsgrenzen nur bei besonders ungünstiger Windanströmung erreicht werden. Besonders bei Haus 1 und 4 traten jedoch im Normalbetrieb bereits zeitweise gehäuft Betriebszustände auf, in denen die Messbereichsgrenzen erreicht wurden. Bei einer sich anschließenden Drd-Sequenz ist es dann nicht mehr möglich eine Veränderung im Messwert zu erzielen, so dass in diesen Situationen immer offene Fenster ermittelt wurden (keine Druckveränderung im Gebäude).

Bild 104 zeigt für alle Gebäude des Feldtests die Häufigkeit von Betriebszuständen am Messbereichsende der Differenzdrucksensoren vor Beginn der Drd-Sequenz (Startwert <- 42 Pa oder > 42 Pa) und die Summe der Fehler bei der Erkennung des Fensteröffnungszustandes, jeweils als Summenwert je Tag. Es zeigt sich, dass bei Haus 1 zeitweise über viele Tage der Differenzdrucksensor nicht einsatzfähig war (maximaler Wert je Tag: 96), ebenso bei Haus 4. Bei Haus 2 und 3 sind solche Betriebszustände fast überhaupt nicht aufgetreten, obwohl die beiden Gebäude unterschiedlich Positionen der Luftansaugung aufweisen (siehe unten). Somit ist ein Einfluss der Lage der Referenzdruckmessstelle außen auf das Auftreten von hohen Differenzdrücken zwischen innen und außen nicht zu belegen. Eine Disbalance der Lüftungsanlage kann ebenfalls ausgeschlossen werden, da selbst bei der Drd-Sequenz, bei der der Zuluftventilator fast komplett abgeschaltet wird und die Abluft erhöht wird, nur Differenzdrücke von 15 Pa bis 20 Pa erreicht wurden.



Vermutlich ist die Ursache, ebenso wie bei den weiter unten beschriebenen Druckeinbrüchen während der Drd-Sequenz, auf Probleme der Differenzdrucksensoren zurückzuführen.

Bild 104: Darstellung der Häufigkeit von Fehlern in der Drd-Sequenz der einzelnen Gebäude und Zuständen, in denen die Differenzdrucksensoren Startwerte am Messbereichsrand liefern und somit nicht mehr zuverlässig funktionieren konnten; jeweils Häufigkeit je Tag (max. 96 Drd-Sequenzen je Tag)



Haus 3 Haus 4

Bei Abtaubetrieb war die LQ-Regelung so programmiert, dass zu diesen Zeitpunkten keine Drd-Sequenz durchlaufen wurde, damit der Abtaubetrieb nicht durch die Drd-Sequenz gestört wurde. Da die Probleme mit dem Differenzdruck überwiegend außerhalb der Heizperiode auftraten, ist eine Vereisung der Lüftungsanlage als Grund unwahrscheinlich.



Bild 105: Detaildaten der Drd-Sequenz vom 02.04.2011 um 04:21 Uhr, Haus 4

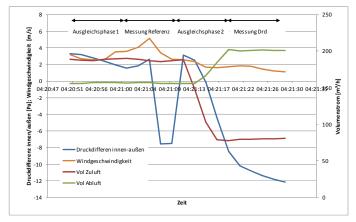
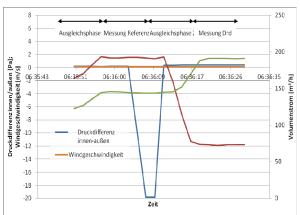


Bild 106: Detaildaten der Drd-Sequenz vom 20.07.2011 um 06:36 Uhr, Haus 4



Das Bild 105 zeigt die detaillierten Messdaten der Drd-Sequenz am 02.04.2011 um 4:21 Uhr bei Haus 4, bei der der Fensterstatus nicht korrekt erkannt wurde, da der erreichte Differenzdruck mit 4,9 Pa knapp unter dem Schwellwert von 5 Pa lag. Es zeigt sich, dass die Windgeschwindigkeit während den 10 Sekunden der Referenzmessung von 2,5 m/s auf 5,1 m/s angestiegen ist. In der Folge veränderte sich der Differenzdruck innen-außen kurzzeitig von ca. +2 Pa auf -7,4 Pa. In der Messphase Drd wurde dann zwar ein Differenzdruck von -12,3 Pa erreicht, der im Vergleich der Ausgleichsphase 1 für die korrekte Erkennung geschlossener Fenster ausgereicht hätte. Da als Referenzwert aber -7,4 Pa gespeichert war, wurde der Fensteröffnungszustand fälschlich als offen angezeigt. Bild 106 weist einen noch stärkeren Einbruch der Druckdifferenz während der Referenzmessung auf. Während der Messung war im Obergeschoss ein Fenster geöffnet, was auch an den Messdaten erkannt werden kann, da sich im Gebäude – abgesehen von dem kurzen Druckeinbruch bei der Referenzmessung – kein Differenzdruck aufbaut. Während der gesamten Sequenz lag die Windgeschwindigkeit nahe Null, so dass ein Windeinfluss ausgeschlossen werden kann. Eine mögliche Erklärung dieses Fehlverhaltens sind Aussetzer bei den Differenzdruckfühlern oder in der Messdatenerfassung.

Eine andere Situation mit falscher Erkennung des Fensteröffnungszustandes zeigen Bild 107 und Bild 108 für Haus 2. Bei der Sequenz links ist ein Schwellwert für den Differenzdruck von 7 Pa eingestellt. Der Differenzdruck baut sich auf und bricht dann wieder ein, ohne dass aus den Messdaten ersichtlich wäre, dass ein Fenster geöffnet worden wäre. Ähnlich ist es in der rechten Sequenz, bei der der Differenzdruck innerhalb der Drd-Messung zusammenbricht. Auch hier ergeben sich aus den Messdaten keine Hinweise auf ein geöffnetes Fenster.



Bild 107: Detaildaten der Drd-Sequenz vom 08.04.2012 um 04:21 Uhr, Haus 2

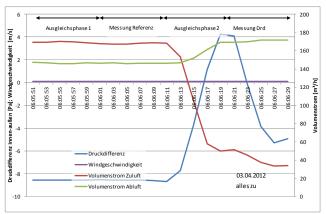
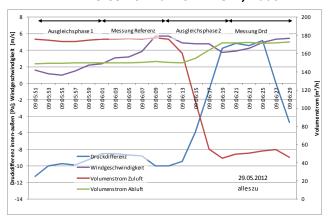


Bild 108: Detaildaten der Drd-Sequenz vom 29.05.2012 um 04:21 Uhr, Haus 2



#### **Fazit**

Zusammenfassend können die Probleme, die bei der Erkennung des Fensterzustandes aufgetreten sind, durch folgende Randbedingungen erklärt werden:

- Messbereichsüberschreitung des Differenzdrucksensors vor Beginn der Drd-Sequenz
- Einbrüche bei der Messung der Differenzdrücke während der Drd-Sequenz
- Geöffnete Fenster in einem Raum mit möglicherweise geschlossener vergleichsweise dichter Zimmertür, was aber auf Basis der Messdaten nicht überprüft werden kann
- Fehler bei der Kommunikation zwischen LQ-Regelung und Standard-Regelung, so dass die Ventilatordrehzahl nicht oder nicht im geplanten Umfang angepasst wurde
- Änderung des Fensteröffnungszustandes während der Sequenz (z. B. Öffnen der Haustür)

Insgesamt kann mit den gezeigten Auswertungen kein nennenswerter Einfluss der Außenklimabedingungen auf die Erkennungsgenauigkeit der Drd-Sequenz abgeleitet werden. Auch aus der Lage der Außenmessstelle ist keine höhere oder niedrigere Erkennungsgenauigkeit abzuleiten. Grundsätzlich scheint ein etwas höherer Schwellwert, unter Berücksichtigung der Gebäudedichtheit, günstiger, um offene Fenster bei geschlossenen Innentüren besser zu detektieren.

# 7.2.4 Zeitlicher Fehler der Erfassung des Fensteröffnungszustandes über die Drd-Sequenz

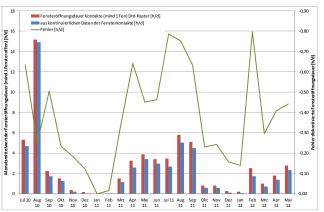
Bedingt durch die Intervalle von 15 Minuten, in denen die Drd-Sequenz durchlaufen wird, ergibt sich ein Diskretisierungsfehler gegenüber einer kontinuierlichen Erfassung mit Fensterkontakten. Der Fehler ist auch abhängig von der Häufigkeit der Fensteröffnungen und deren absoluter Dauer. In Bild 109 sind die Monatsmittelwerte der Tagesummen der Fensteröffnungsdauern, bei denen mindestens ein Fenster geöffnet ist, für alle vier Gebäude dargestellt.

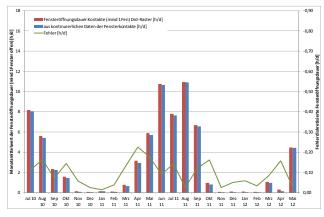
Bei allen Gebäuden ist der typische Jahresverlauf der Fensteröffnungsdauer mit sehr kurzen Öffnungszeiten im Winter und deutlich längeren Fensteröffnungszeiten im Sommer zu erkennen, wobei das Niveau bei den verschiedenen Gebäuden unterschiedlich ausfällt. Der Unterschied zwischen der kontinuierlichen Erfassung und der zeitdiskreten Erfassung mit der Drd-Sequenz ist der Differenz der beiden Balken zu entnehmen und zusätzlich noch als Fehler in [h/d] als Linie aufgetragen. Fast immer wird die Fensteröffnungszeit durch die



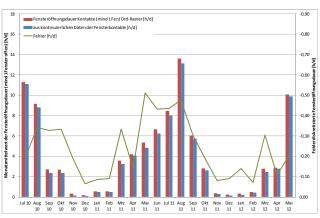
Drd-Sequenz überschätzt (als negativer Wert aufgetragen). Dies bedeutet, dass alle wesentlichen Öffnungsvorgänge erfasst werden. Bei kurzen Öffnungsvorgängen kann durch die Gewichtung mit 15 Minuten in der Folge die Dauer der Fensteröffnung überschätzt werden.

Bild 109: Vergleich der Monatsmittelwerte der täglichen Fensteröffnungsdauer in Stunden je Tag mit mindestens einem offenen Fenster bei kontinuierlicher Erfassung und bei Erfassung über Drd-Sequenz sowie absoluter Fehler

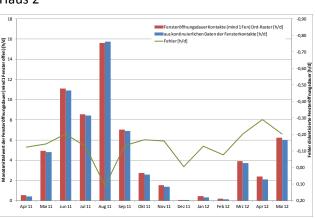




Haus 1



Haus 2



Haus 3

Haus 4

Für Haus 1 liegt der Heizperiodenmittelwert (Anfang Oktober - Ende März<sup>9</sup>) der Fensteröffnungsdauer<sup>10</sup> bei 0,59 h/d (2010/11) bzw. 0,93 h/d (2011/12), der Fehler, der durch die Diskretisierung entsteht, liegt bei -0,15 h/d bzw. -0,31 h/d, d. h. durch die Erfassung mit der Drd-Sequenz werden die tatsächlichen Fensteröffnungszeiten bei niedrigen Werten um ca. 25 % (31 %) überschätzt, absolut gesehen liegt der Fehler bei ca. 8 (19, in der Heizperiode 2011/12) Minuten pro Tag, was aber vernachlässigbar ist. Bei Haus 2, das höhere Fensteröffnungsdauern im Jahresmittel aber kürzere in der Heizperiode aufweist, liegt der absolute Diskretisierungsfehler bei ca. 4 Minuten in der Heizperiode. Bei Haus 3 mit langen Fensteröffnungszeiten im Winter mit 1,3 h/d (2010/11) und 1,16 h/d (2011/12) überschätzt die Drd-Sequenz die tatsächliche Fensteröffnungsdauer um 0,18 h/d bzw. 0,15 h/d, so dass der Fehler bei 11 (bzw. 9) Minuten je Tag liegt. Bei

In Passivhäuser sind die Monate November-März als Kernheizperiode zu betrachten, da hier jedoch die energetischen Auswirkungen von Fensteröffnung bewertet werden sollen, ist die Berücksichtigung der Zeitspanne Oktober bis Ende März geeigneter

Im Gegensatz zu den Fensteröffnungszeiten in Kapitel 7.1 ist hier die Öffnungsdauer mindestens eines Fensters im Gebäude in h/d angegeben und nicht in h/(Fen\*d), die hier über die Drd-Sequenz ermittelt wurde, somit inkl. Diskretisierungsfehler



Haus 4, das die höchsten Fensteröffnungszeiten im Winter aufweist (1,49 h/d) liegt der Fehler bei 7 Minuten je Tag.

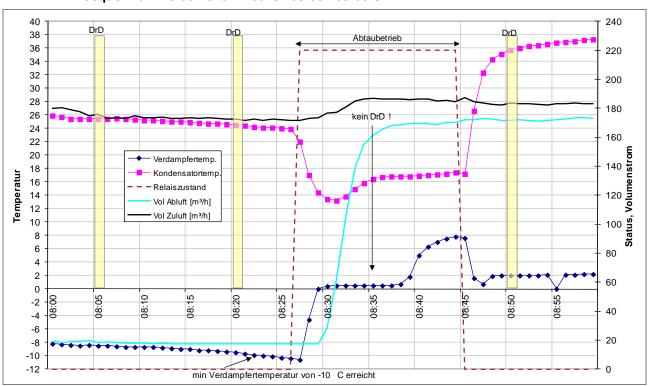
Somit kann aus den Messdaten gefolgert werden, dass die Diskretisierung der Fensteröffnungserfassung keine nennenswerten Auswirkungen auf die Genauigkeit der mit dieser Methode bestimmten Öffnungszeiten hat und besonders in der Heizperiode die Fehler im Bereich von wenigen Minuten liegen.

## 7.2.5 Anlagentechnische Einflussfaktoren auf das Ergebnis der Drd-Sequenz

Im Winter kann die Wärmepumpe aufgrund des Feuchtegehaltes in der Abluft und dem Wärmeentzug durch das Kältemittel vereisen. Die Folge sind reduzierter Wärmeentzug über die Eisschicht und Verringerung des Luftvolumenstroms aufgrund des verkleinerten Querschnitts im Wärmetauscher. In diesem Fall werden über ein Umschaltventil Verdampfer und Kondensator der Wärmepumpe vertauscht bis die Eisschicht abgetaut ist. Bild 110 zeigt für etwa eine Stunde am 15. März 2010 die wichtigsten Kenndaten. Während der zweiten Drd-Sequenz lag die Verdampfertemperatur bereits bei -9,5 °C. Nach Ende der Sequenz sinkt die Verdampfertemperatur bis auf -10,6 °C. Die Wärmepumpe schaltet auf Abtauen, was 18 Minuten dauerte. Die Drd-Sequenz, die während dieses Abtauvorgangs hätte durchlaufen werden sollen, wurde nicht ausgeführt, da diese Schutzfunktion speziell in die Drd-Sequenz integriert wurde um den Abtauvorgang nicht zu stören.

An den Messdaten kann auch gut die Entwicklung von Verdampfertemperatur und Volumenstrom während des Abtauens beobachtet werden. Beim Abtauen steigt die Verdampfertemperatur schnell bis auf 0 °C an, danach verharrt sie auf diesem Wert, bis das Eis im Verdampfer geschmolzen ist. Anschließend steigt sie wieder schnell bis zum Schwellwert für das Abtauende (hier 8 °C). Der Volumenstrom der Abluft, der vor dem Abtauvorgang bis an den unteren Rand des Messbereichs der Messblenden abgesunken war, bleibt erst auf niedrigem Niveau. Wenn ein Teil des Eises abgeschmolzen ist, steigt der Volumenstrom schnell an und erreicht bereits vor Ende des Abtauvorgangs wieder annähernd seinen Sollwert. Danach läuft die Anlage wieder im normalen Betriebszustand.

Bild 110: Detailauswertung der Messdaten von Haus 1 mit Abtaubetrieb und Einfluss auf die Drd-Sequenz am 15.03.2010 zwischen 08:00 - 09:00 Uhr

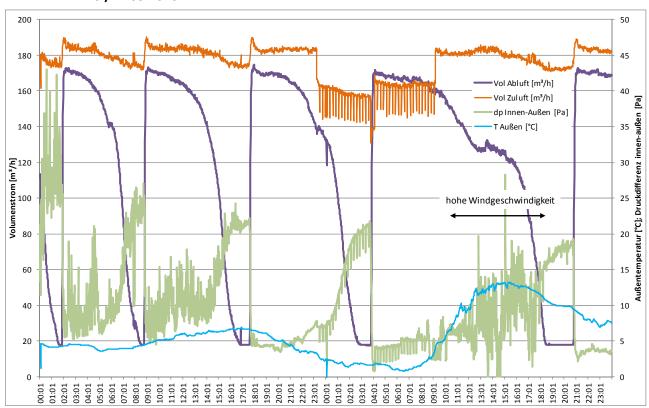




Die Vereisung des Wärmetauschers hat somit nicht nur einen Einfluss auf die Heizleistung der Wärmepumpe, sondern auch auf den Volumenstrom im Gebäude und somit auch auf die Disbalance zwischen Zu- und Abluft. Somit kann im Winter öfter eine Verschiebung des Druckniveaus allein durch die Vereisung der Wärmepumpe entstehen. Dies musste durch die Mittelwertbildung zu Beginn der Drd-Sequenz eliminiert werden.

Bild 111 zeigt exemplarisch die Veränderung der Volumenströme aufgrund von Vereisung des Verdampfers und die damit verbundene Veränderung der Druckdifferenz zwischen innen und außen für Haus 1 am 16./17.03.2010. Am ersten Tag, bei konstant niedrigen Außentemperaturen von ca. 5 °C, geht die Anlage drei Mal in den Abtaubetrieb. Die Zuluft wird hier noch nicht durch die kurzen Drd-Sequenzen beeinflusst und ist nahezu konstant. Der Abluftvolumenstrom sinkt vor dem Abtauen deutlich ab und in der Folge verdoppelt sich der Differenzdruck zwischen innen und außen. Am zweiten Tag muss aufgrund der höheren Außentemperaturen nur noch einmal abgetaut werden. Am Nachmittag dieses Tages steigt die Windgeschwindigkeit stark an (mit Pfeil dargestellt), was zu deutlichen und schnellen Druckschwankungen führt und die Drd-Sequenz beeinflussen kann. Dies zeigt die dynamische Veränderung der Druckzustände des Gebäudes, die besonders im Winter von der Drd-Sequenz kompensiert werden müssen

Bild 111: Veränderung der Volumenströme, des Differenzdrucks zwischen innen und außen und die Außentemperatur durch Vereisung des Wärmetauschers in der Abluft von Haus 4 am 16./17.03.2010



Weitere Einflussfaktoren, die die Druckbilanz des Gebäudes beeinflussen sind z. B. Filterverschmutzungen, die besonders im Frischluftstrang (höhere Filterklasse) im Laufe der Zeit zu einer Verminderung des Volumenstromes führen.

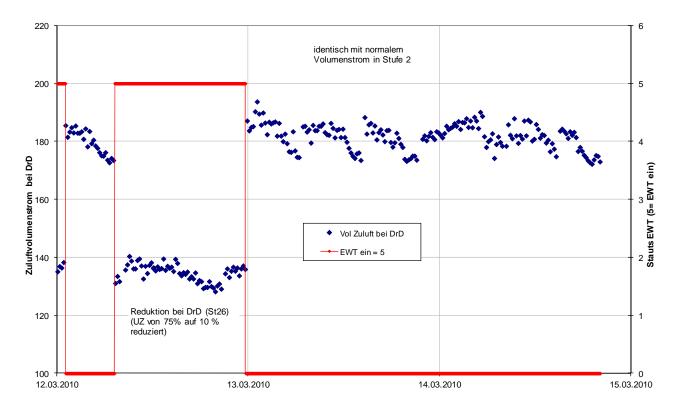
Als zusätzlicher Einfluss auf den Volumenstrom in der Lüftungsanlage und somit auf den Differenzdruck innen-außen ist bei Haus 1 der Betrieb über den Erdreichwärmetauscher zu benennen. Durch den zusätzlichen Druckverlust im Kanalnetz sinkt der Zuluftvolumenstrom trotz Stützventilator ab, so dass sich das er-



reichbare Druckniveau durch Reduktion des Zuluftvolumenstroms während der Drd-Sequenz verringert (Bild 112).

Wird die Drd-Sequenz in Gebäuden eingesetzt, bei denen Lüftung und Wärmeerzeugung nicht anlagetechnisch gekoppelt sind, vereinfacht sich die Umsetzung, und die Anzahl möglicher Störgrößen ist geringer.

Bild 112: Abhängigkeit des Zuluftvolumenstroms bei Drd vom Betriebszustand des Erdreichwärmetauschers bei Haus 1 vom 12.3. -14.03.2010





# 7.3 Ausgabe Nutzeranzeige

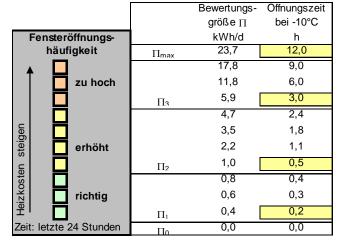
Mit den ermittelten Fensteröffnungszeiten wurden zusammen mit Messwerten der Außentemperatur der Wert der Bewertungsgröße  $\Pi$  (siehe Kapitel 2.5) für die Nutzeranzeige berechnet und an das Display im Wohnzimmer der Feldtestgebäude weitergeleitet.

## 7.3.1 Anpassung der Skalierung der Anzeige

Zu Beginn des Feldversuchs wurde die Skalierung der Nutzeranzeige so umgesetzt, wie in Projektphase 1 festgelegt [Knissel et. al 2011]. Aufgrund der geringen Fensteröffnungsdauern durch die Bewohner und auch als Reaktion auf die Ergebnisse der Befragung (siehe Kapitel 8; die Bewohner vermuteten aufgrund der immer gleichen, grünen Anzeige, dass diese möglicherweise defekt sei), wurde die Skalierung der Anzeige im Februar 2012 verändert, um ein sensitiveres Verhalten der Anzeige zu erreichen. Eine häufigere Veränderung sollte auch die Aufmerksamkeit der Bewohner für die Anzeige erhöhen. Dazu wurde die Bewertungsskala so verändert, dass bereits bei kürzerer Fensteröffnung ein größerer Anstieg der Heizkosten ausgegeben wurde. Bild 113 zeigt beide Skalen im Vergleich. Insbesondere in den Bereichen  $\Pi_1$  und  $\Pi_2$  wurde die Sensitivität der Anzeige deutlich erhöht, da die zugehörigen Öffnungszeiten auf ein Drittel reduziert wurden.

Bild 113: Vergleich von ursprünglicher und angepasster Bewertungsskala

				Bewertungs-	Offnungszeit
				größe ∏	bei -10°C
Fensteröffnungs-			kWh/d	h	
	häu	figkeit	Птах	29,6	15,0
4				23,0	11,7
		zu hoch		16,5	8,3
			$\Pi_3$	9,9	5,0
				8,1	4,1
gen				6,4	3,3
steigen		erhöht		4,7	2,4
			П2	3,0	1,5
Ste				2,3	1,2
Heizkosten		richtig		1,6	0,8
위 I			$\Pi_1$	1,0	0,5
Zeit: letzte 24 Stunden		По	0,0	0,0	



Ursprüngliche Bewertungsskala

Angepasste Bewertungsskala

## 7.3.2 Ergebnisse Nutzerrückmeldung / Befragung

In Bild 114 sind für Haus 1 die Außentemperatur, die Lüftungsanzeige, die ursprünglich skaliert war und die Anzeige mit der veränderten Skalierung dargestellt. Im gesamten Zeitraum von Juni 2010 bis Ende Mai 2012 gab es nur 4 Tage, an denen die Anzeige nicht beim Minimalwert von 1 lag (rote Linie). Die Ausschläge der Anzeige wären ein wenig stärker, wenn von Anfang an die modifizierte Skalierung verwendet worden wäre. Allerdings sind die abgeschätzten energetischen Auswirkungen der Fensteröffnung bei diesem Gebäude immer noch gering.



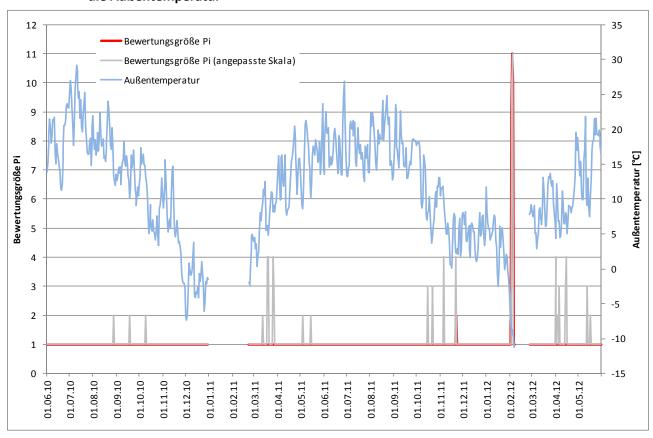


Bild 114: Haus 1: Ergebnisse der Nutzeranzeige für die ursprüngliche und die angepasste Skala sowie die Außentemperatur

In der ersten Heizperiode 2010/11 ergeben sich 13 kWh, in der zweiten Heizperiode 105 kWh an zusätzlichem Heizwärmeverbrauch aufgrund der Fensteröffnung. Letzterer liegt erstaunlich hoch und resultiert aus einem mit den Fensterkontakten erfassten offenen Fenster über 50 Stunden in der sehr kalten Phase Anfang Februar 2012. Da es sich bei diesem Fenster um ein Kastenfenster handelt, bei dem innerer und äußerer Flügel geöffnet werden müssen, damit Außenluft in den Raum gelangt, ist es unwahrscheinlich, dass dieses Fenster tatsächlich über mehr als zwei Tage bei -8 °C Außentemperatur offen stand. Die Drd-Sequenz konnte zu dieser Zeit auch keine offenen Fenster erkennen, so dass davon ausgegangen werden muss, dass das innere Fenster, in dem der Fensterkontakt montiert ist, nicht richtig geschlossen war, das äußere, das für den Außenluftwechsel verantwortlich ist, jedoch schon, so dass hier die Drd-Sequenz das korrekte Ergebnis lieferte<sup>11</sup>. Wird dieses Fenster herausgerechnet, so liegt der zusätzliche Heizwärmeverbrauch in der Heizperiode 2011/12 bei 14 kWh, d. h. unter 0,1 kWh/(m²a).

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Das Beispiel zeigt, dass die Erfassung der Fensteröffnung über Kontakte nicht unbedingt zuverlässigere Ergebnisse liefern muss



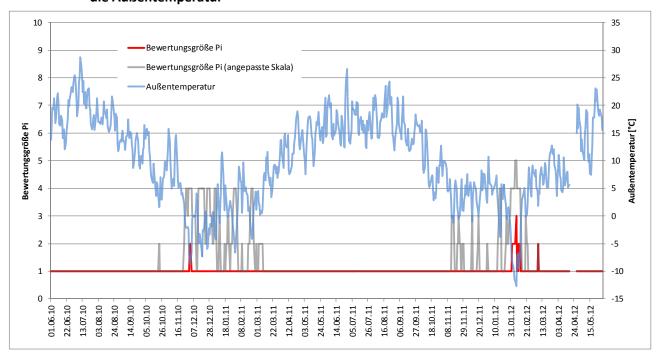


Bild 115: Haus 2: Ergebnisse der Nutzeranzeige für die ursprüngliche und die angepasste Skala sowie die Außentemperatur

Bild 115 zeigt für Haus 2 die Ergebnisse der Berechnung der Bewertungsgröße  $\Pi$  mit der Originalskala sowie mit der angepassten Skala (nachträglich berechnet) auf Basis der tatsächlich vorhandenen Fensteröffnungsdauern. Es zeigt sich, dass in der ersten Heizperiode nur an einem einzigen Tag die Anzeige über ihren Basiswert anstieg, in der zweiten Heizperiode nur an fünf Tagen. Ursache sind die geringen Fensteröffnungsdauern bei sehr niedrigen Außentemperaturen. Mit der angepassten Skala hätte sich für die Nutzer im Kernwinter eine deutlichere Änderung der Anzeige ergeben, der Maximalwert hätte den Wert 5 erreicht (auf der Anzeige drei grüne und zwei orange LEDs).

Summiert man die abgeschätzten zusätzlichen Wärmeverluste über die Heizperiode auf, so ergeben sich in der Heizperiode 2010/11 zusätzliche Wärmeverluste durch die Fensterlüftung (inkl. Haustür) von 17 kWh bzw. 0,11 kWh/m²a, in der Heizperiode 2011/12 Verluste von 7 kWh bzw. 0,04 kWh/(m²a). Aufgrund dieser geringen energetischen Auswirkungen wäre eine weitere Verschärfung der Schwellwerte für die Nutzerrückmeldung nicht vertretbar.

Exemplarisch zeigt Bild 116 die gemessene Zeit, in der mindestens ein Fenster offen ist (grün) und die somit für den Wärmeverlust bestimmend ist. Weiterhin sind die Außentemperatur (blau) und der theoretische, abgeschätzte Volumenstrom (orange) über ein geöffnetes Fenster bei der jeweiligen Außentemperatur in m³/h dargestellt. Da in der Heizperiode kaum Fenster geöffnet werden, fallen die tatsächlichen zusätzlichen Wärmeverluste sehr gering aus. Im Sommer wird die Fensterlüftung dann zu nächtlichen Hitzeabfuhr genutzt. Die höchsten tatsächlichen Wärmeverluste treten in der Übergangszeit (z. B. März/April) auf. Durch die ansteigenden solaren Gewinne können die zusätzlichen Wärmeverluste über eine verstärkte Fensteröffnung aber meist kompensiert werden, so dass auch zu diesen Zeiten bei moderater Fensteröffnung kein nennenswert erhöhter Heizwärmeverbrauch entsteht.

Bild 117 zeigt neben der Außentemperatur auch die Zeit je Tag, die mindestens ein Fenster geöffnet ist (schwarz) sowie die Summe der Fensteröffnungszeiten je Tag (rot). Aus der Differenz der beiden Werte ist abzulesen, wann mehrere Fenster im Haus geöffnet sind und wann nur eines. Dies ist wichtig um einschätzen zu können, ob die Annahmen zum Luftaustausch über ein geöffnetes Fenster zutreffen. Es zeigt sich, dass im Winter und in der Übergangszeit kaum mehrere Fenster gleichzeitig geöffnet sind und somit die Ansätze für den Luftaustausch über ein geöffnetes Fenster nicht in Frage gestellt werden. Im Sommer wird intensiv über mehrere Fenster gelüftet.



Bild 116: Haus 2: Zeit mit mindestens einem geöffneten Fenster [h/d], Berechneter Volumenstrom über geöffnete Fenster und Außentemperatur

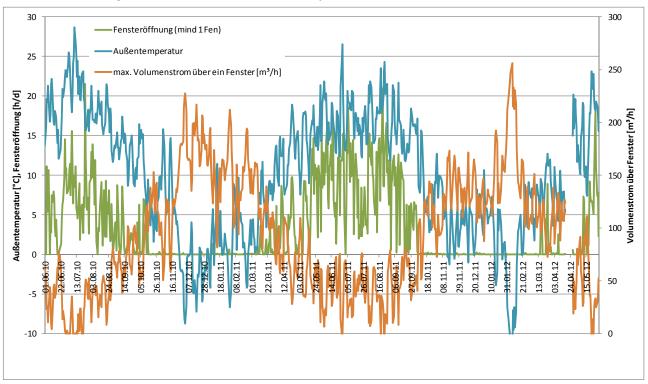
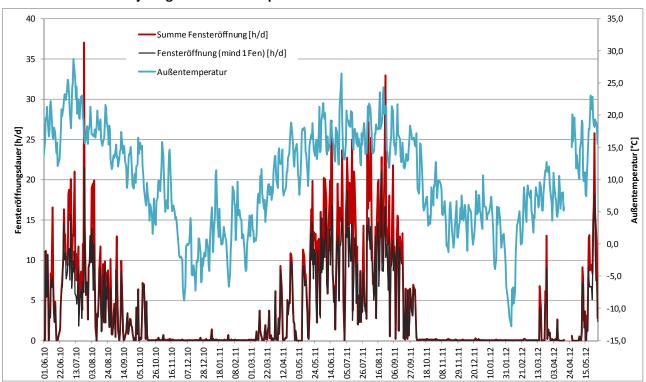


Bild 117: Haus 2: Zeit mit mindestens einem geöffneten Fenster (h/d], Summe Fensteröffnung in Stunden je Tag und Außentemperatur





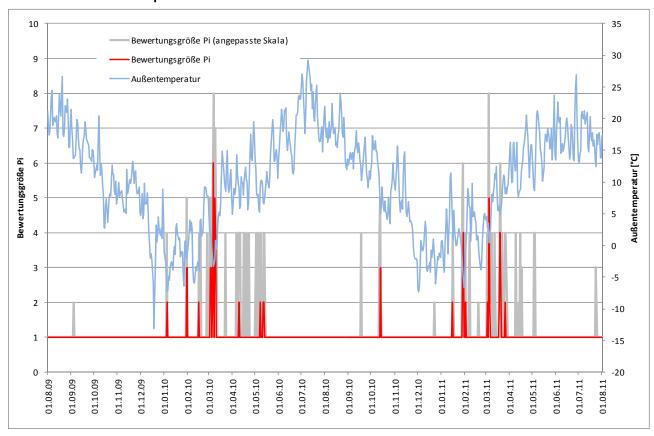


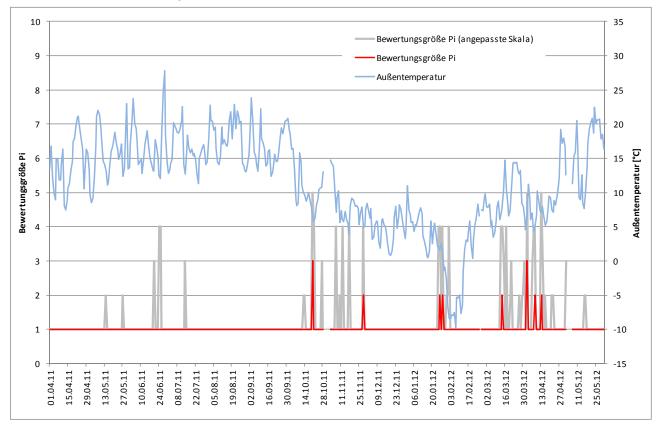
Bild 118: Haus 3: Ergebnisse der Nutzeranzeige für die ursprüngliche und angepasste Skala sowie die Außentemperatur

Bei Haus 3 liegen die gemessenen Fensteröffnungsdauern etwas höher als bei den anderen Feldtestgebäuden. Die sich daraus ergebenden Anzeigewerte sind in Bild 118 dargestellt. Mit der ursprünglichen Skalierung der Bewertungsgröße  $\Pi$  ergaben sich einzelne Tage, an denen Anzeigen von über 4 LEDs berechnet wurden. Die Anzeige wäre noch höher ausgefallen, wenn sofort die angepasste Skalierung verwendet worden wäre. In der Summe liegen die zusätzlichen Wärmeverluste jedoch nur zwischen 32 kWh (2011/12) und 60 kWh (2010/11) bzw. 0,2 kWh/(m²a) und 0,4 kWh/(m²a). Somit sind die energetischen Auswirkungen durch die Fensterlüftung auch in diesem Gebäude gering.

Bild 119 zeigt schließlich die Ergebnisse der Anzeige für Haus 4. Auch hier ergibt sich überwiegend ein Wert von 1 (1 LED leuchtet), nur an 8 Tagen liegt die Anzeige darüber. Mit der angepassten Skalierung erhält die Anzeige im Winter mehr Dynamik, die gesamten abgeschätzten Wärmeverluste über Fensterlüftung im Winter 2011/12 liegen mit 42 kWh bzw. 0,26 kWh/(m²a) wie bei den anderen Gebäuden vergleichsweise niedrig.



Bild 119: Haus 4: Ergebnisse der Nutzeranzeige für die ursprüngliche und die angepasste Skala sowie die Außentemperatur





# 7.4 Ergebnisse Nutzerrückmeldung

Aufgrund der geringen Fensteröffnungsdauern bei tiefen Außentemperaturen spielt die Frage, welche Skalierung sinnvollerweise eingesetzt wird, eine untergeordnete Rolle. Grundsätzlich ist für eine Nutzeranzeige ein dynamischeres Verhalten zu empfehlen, damit die Aufmerksamkeit nicht nachlässt. Allerdings muss beachtet werden, dass die gemessenen Fensteröffnungszeiten energetisch nur geringe Auswirkungen besitzen und somit kein Grund für übermäßige Reaktionen der Anzeige besteht.

In Kapitel 8.2.4 sind die Antworten der Bewohner bezüglich der Nutzerrückmeldung dokumentiert. Hier sollen vorab die wichtigsten Aussagen zusammengefasst und bezüglich ihrer Umsetzbarkeit kommentiert werden (Tab. 18).

Tab. 18: Anmerkungen der Nutzer in der Befragung

Anmerkung der Nutzer	Kommentar
Anzeige soll nicht das Verhalten am Vortag sondern aktuell in Echtzeit dokumentieren	Diese Veränderung wäre grundsätzlich möglich und würde den Nutzern eine Einschätzung des Zusammenhangs von Außentemperatur und Fensteröffnungsdauer verdeutlichen; problematisch könnte jedoch sein, dass durch die zeitliche Auflösung der Drd-Sequenz von 15 min. die Nutzer beim Öffnen der Fenster keine direkte Rückmeldung erhalten und eine Fehlfunktion vermuten könnten
Anzeigen, wo Fenster offen sind	Dies ist mit der Drd-Sequenz nicht möglich, da nur bestimmt werden kann, ob Fenster geöffnet sind; eine genaue Anzeige der offenen Fenster ist nur mit Fensterkontakten möglich
Handlungsempfehlung ausgeben, ob Fenster geöffnet oder geschlossen werden sollen in Abhängigkeit des Sauerstoff- bzw. Kohlendio- xidgehalts der Raumluft	Da die Drd-Sequenz das Vorhandensein einer Lüftungsanlage voraussetzt, wird unterstellt, dass der Nutzer normalerweise nicht zusätzlich über die Fenster lüften muss; die Anzeige auf Basis bestimmter Kenngrößen setzt entweder einen zusätzlichen Sensor voraus oder die Information kann bei einem System aus LQ-Regelung und Drd-Sequenz gewonnen werden (wie bei den Feldtestgebäuden)
Raumweise Displays mit Lüftungsanzeige und ggf. Luftqualität	Da mit der Drd-Sequenz nur für das gesamte Haus der Fensteröffnungszustand erfasst werden kann, ist eine raumweise Auflösung nur mit Fensterkontakten möglich; LQ- oder CO <sub>2</sub> -Sensoren mit Display (als Messwert oder bewertet) sind am Markt verfügbar
Ausgabe von längeren Zeiträumen oder Halb- jahresprotokollen der Fensteröffnung	Diese Modifikation ist möglich, erfordert jedoch ein aufwändigeres Display

Grundsätzlich scheint ein variabler Zeitraum für die Rückmeldung sinnvoll zu sein. Neben der im Feldversuch eingesetzten Rückmeldung der energetischen Auswirkungen des Fensteröffnungsverhaltens des vorangegangenen Tages sollte eine Reaktion auf das aktuelle Fensteröffnungsverhalten geprüft werden. Dazu muss die Bewertungsgröße  $\Pi$  auf unterschiedliche Zeittakte aufgeteilt werden. Die von den Nutzern angeregten längeren Rückmeldungsintervalle von z. B. einer Heizperiode dienen mehr dem Informationsbedürf-



nis der Nutzer als der Optimierung des Lüftungsverhaltens, könnten aber auf dem Standarddisplay der Lüftungsregelung ausgegeben werden.

Grundsätzlich wird eine Nutzeranzeige über eine farbige Balkenskala als sinnvolle Lösung angesehen. Diese wurde jedoch speziell an die Erfordernisse der im Projekt vorhandenen Hard- und Software entwickelt. Mit den heute verfügbaren LCD- und LED-Displays ist aber auch denkbar, die Nutzerrückmeldung in das Standardbedienteil der Lüftungsanlage bzw. der Wärmepumpenregelung zu integrieren. Hierbei ist jedoch die Frage zu stellen, ob eine Ausgabe als Zahlenwert ausreicht und ob dieser immer auf dem Display verfügbar ist, oder erst über einen Menüpunkt erreicht werden kann. Ein Beispiel einer möglichen Anzeige ist im folgenden Bild 120 zusehen.

Bild 120: Beispiel einer Integration der Nutzerrückmeldung in das Bedienteil der Standardregelung der Lüftungsanlage/Wärmepumpe (Ausgabe als Zahl und als Balken)

10:53 FR 15.01.12. Winterbetrieb Normalbetrieb Fensteröff:9 \_**\_\_**  11:29 FR 13.01.12. Winterbetrieb Normalbetrieb Fensteröff:2 \_\_

# 7.5 Übertragbarkeit der Drd-Sequenz

Die Erprobung der Drd-Sequenz hat mit zwei Einschränkungen (Messwerte der Differenzdrucksensoren und Einfluss der Innentüren) gut funktioniert und könnte so nun auch zur Nutzung in anderen Gebäuden eingesetzt werden. Nach den Erfahrungen mit den Passivhäusern zeigt sich, dass die Nutzer dieser Gebäude überwiegend selten die Fenster im Winter öffnen (bei gleichzeitig guter Luftqualität) und damit die Notwendigkeit einer Fensteröffnungsanzeige gering ist. Dennoch zeigten auch die Nutzer im Feldtest ein Interesse nach Informationen zum optimalen Lüftungsverhalten. Ein negativer Einfluss der Drd-Sequenz auf den Heizwärmeverbrauch ist nicht zu erwarten, da die Sequenz nur 20 Sekunden andauert.

Da die Drd-Sequenz an die Beeinflussung einer Lüftungsanlage gekoppelt ist, ist sie nur für Gebäude mit mechanischer Lüftung und einer Mindestluftdichtigkeit geeignet. Dabei ist sie nicht nur in Gebäuden mit mechanischer Zu- und Abluft einsetzbar, sondern ebenso in Gebäuden mit Abluftanlage und dezentralen Zuluftelementen. Hier herrscht im Normalbetrieb ein Unterdruck im Gebäude, der zur Detektion offener Fenster eingesetzt werden kann. Dieser Ansatz wurde bereits in [Knissel et. al 2011] diskutiert.

Interessant ist ggf. die Anwendung in Mietwohnungen, in denen die Information der Nutzer zum optimalen Lüftungsverhalten nicht immer so hoch ist wie bei selbstnutzenden Eigentümern. Inwieweit die Drd-Sequenz in Mehrfamilienhäusern mit ihrer geringeren Dichtheit innerhalb der Gebäudehülle zwischen den Wohnungen geeignet ist, lässt sich pauschal nicht beantworten. In [Knissel et. al 2011] wurde für Einfamilienhäuser eine Mindestluftdichtigkeit von ca. 1,3 1/h für eine Wohneinheit ermittelt, damit ausreichend Unterdruck im Gebäude über die Lüftungsanlage erzeugt werden kann. Um alle ungünstigen Randbedingungen wie z. B. die Windanströmung des Gebäudes oder andere Klimaeinflüsse sicher eliminieren zu können, sollte ein n50-Wert von 0,8 1/h unterschritten werden. Bei Gebäuden mit Abluftanlage ist der Unterdruck im Normalbetrieb bereits vorhanden, so dass hier die Drd-Sequenz immer eingesetzt werden kann, sobald die Abluftanlage in Betrieb ist. Hier sind dann auch keine besonderen Anforderungen an die Gebäudedichtheit zu erfüllen. In diesem Fall ist auch eine kontinuierliche Erfassung des Fensterzustandes möglich.



Die zusätzlichen Aufwendungen für die Erfassung der Fensteröffnung und Bewertung über die Drd-Sequenz sind:

- ein Differenzdrucksensor
- die Verlegung eines Schlauches zur Außendruckmessstelle
- die Innendruckmessstelle; dort kann ggf. der Montageort des Differenzdrucksensors verwendet werden. Wenn dieser gut an die Wohnung angekoppelt wird, dann entfallen weitere Kosten
- und die Änderungen in der Software.

Die Ausgabe der Ergebnisse der Berechnung der Bewertungsgröße  $\Pi$  kann, wie in Kapitel 7.4 gezeigt, auch auf einem normalen Bedienteil der Lüftungsregelung ausgegeben werden, wenn die Anlage über ein entsprechendes Display bereits verfügt. Sonst addieren sich die Kosten für eine Nutzeranzeige. Zusätzlich sollte auf geeignete Überströmmöglichkeiten innerhalb der Wohnung geachtet werden.

Grundsätzlich könnte bei erkannter Fensteröffnung die Lüftungsanlage z. B. den Volumenstrom reduzieren, um elektrische Antriebsenergie einzusparen. Besonders beim Einsatz in Abluftanlagen ist diese Reaktion sinnvoll, da bei diesen durch ein geöffnetes Fenster der Unterdruck im Wohnraum zusammenbricht und sich dann keine Durchströmung von Räumen außerhalb des Raumes mit dem geöffneten Fenster mehr ergibt. Eine weitere Reaktion der Lüftungsanlage erscheint gegenwärtig nicht sinnvoll.



# 8 Bewohnerinterviews

Im Rahmen des Feldtests war es wichtig, auch die Erfahrungen und Rückmeldungen der Bewohner zu sammeln und, wenn möglich, in das Projekt einfließen zu lassen. Dazu wurden zwei verschiedene Untersuchungen durchgeführt: telefonische Bewohnerinterviews sowie Kurzfragebögen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten den Bewohnern zugeschickt wurden.

#### 8.1 Methodik Bewohnerinterviews

Zur Erfassung der Nutzerakzeptanz und Nutzerzufriedenheit mit der Komfortlüftungsanlage wurden mit jeweils einem Mitglied der vier Bewohnerhaushalte ausführliche Leitfaden-Interviews geführt<sup>12</sup>. Der Vorteil einer solchen Befragungsmethodik ist, dass einerseits ein teilstandardisierter und damit gut vergleichbarer Gesprächsleitfaden (siehe Anhang C) zu den interessierenden Themen genutzt werden kann. Im Unterschied zum vollstandardisierten Interview gibt es andererseits jedoch keine Antwortvorgaben, so dass die Befragten ihre Erfahrungen und Ansichten frei äußern können. Damit erhielten die Befragten auch die Gelegenheit, nicht angesprochene Aspekte oder Probleme selbst zu thematisieren. Die Auswertung orientierte sich an der Methode der zusammenfassenden Inhaltsanalyse, wobei das transkribierte Textmaterial unter Beibehaltung der wesentlichen Inhalte auf Kernaussagen reduziert wurde.<sup>13</sup>

Die Interviews erfolgten telefonisch im Mai 2011. Die Bewohnererfahrungen mit der Komfortlüftung stützten sich auf Zeiträume von 5 Wochen bei einem Haushalt<sup>14</sup> und etwa 15 Monaten bei den übrigen drei Haushalten.

Die Befragung hatte fünf inhaltliche Schwerpunkte. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in der genannten Reihenfolge:

- 1. allgemeine Zufriedenheit mit dem Passivhaus und den Energiekosten
- 2. Zufriedenheit mit der Lüftung: Raumklima (Raumtemperatur, Luftqualität, Luftfeuchtigkeit) und Funktionalität (Geräuschentwicklung, Störungen)
- 3. Akzeptanz/Zufriedenheit mit der Einstellung der Lüftung: individuelle Programmierung, Wahrnehmung der Änderung der Lüftungsstufen, Nutzung der Partylüftung
- 4. Einschätzung der Funktionalität der Lüftungsanzeige/Drd-Sequenz und deren Auswirkungen auf das Alltagsverhalten
- 5. eigene Verbesserungsvorschläge, Anmerkungen etc. zu den vorgenannten Aspekten

140

Leitfaden-Interviews zeichnen sich durch ihre Variantenvielfalt aus (z.B. Hopf 1991, S 177ff). Der in der vorliegenden Studie verwendete Interviewtyp lässt sich am ehesten als Mischform aus fokussiertem und Experteninterview verstehen. Die Bewohner verfügen demnach über sehr spezifisches und gegenstandsbezogenes Expertenwissen im täglichen Umgang und Wohnen mit einer Komfortlüftungsanlage.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Auch bei der qualitativen Inhaltsanalyse lassen sich je nach Fragestellung verschiedene Formen unterscheiden (siehe z.B. Mayring 1990).

Bei einem Haushalt hatten Verzögerungen im Bauablauf zu einer vergleichsweise späten Installation der Luftqualitätsregelung geführt.



# 8.2 Ergebnisse Bewohnerinterviews

## 8.2.1 Allgemeine Zufriedenheit mit dem PH

Alle Befragten fühlen sich in ihrem Passivhaus sehr wohl und würden – stünde diese Entscheidung erneut an – wieder ein Passivhaus kaufen. Sie finden das Leben mit einer Lüftungsanlage sehr komfortabel und die beständig gute Luftqualität, ohne zusätzlich das Fenster öffnen zu müssen, überzeugend. Jeder Befragte nutzt verschiedene Gelegenheiten, um für das Passivhaus zu werben und es bspw. Freunden und Verwandten weiterzuempfehlen. Der Kenntnisstand zu den Besonderheiten des Passivhauses ist nach eigenen Angaben hoch. Die Bewohner haben sich im Vorfeld des Einzuges mit diesem Thema ausführlich auseinandergesetzt, zum Teil wird auch von einem regen Erfahrungsaustausch in der Nachbarschaft berichtet.

Von besonderem Interesse war zudem die Erfassung der Zufriedenheit mit den Energiekosten, im Besonderen den Kosten für elektrischen Strom. Bei allen Befragten ist die Zufriedenheit hier hoch. Der Befragte, dessen Haus über eine kleine Photovoltaik-Anlage verfügt, berichtete, dass deren Erträge den Bedarf an Heizstrom decken und somit nur ein geringer Verbrauch an Haushaltsstrom verbleibt. Ein weiterer Befragter stellte deutlich positiv fest, dass – obwohl nur eine erste Jahresabrechnung vorlag, die zudem noch von der Bauphase beeinflusst war – die Jahresstromkosten für die Heizung um etwa 200 Euro geringer waren als der Preis für Öl (Heizung und Warmwasserbereitung) in der vorherigen Wohnung.

## 8.2.2 Zufriedenheit mit der Lüftung

#### Raumklima (Raumtemperatur, Luftqualität, Luftfeuchtigkeit)

Generell sind die Befragten mit den Raumtemperaturen im Winter zufrieden. Die Höhe der jeweiligen Wohlfühl-Temperatur ist unterschiedlich. Ausgehend von mindestens 20 °C, die überall erreicht werden (eine Ausnahme: 19 °C in Zimmer Nordseite bei einem Gebäude), empfinden drei der befragten Haushalte höhere Temperaturen bis 23/24 °C als angenehm. Dazu wurde beispielsweise gezielt kurzzeitig im Wohnund Kinderzimmer nachgeheizt oder interne Gewinne genutzt (z. B. Betrieb des Fernsehers, Brötchen-Aufbacken). Der vierte Befragte beschrieb die erreichten Raumtemperaturen an sehr kalten Tagen der letzten Heizperiode mit 20 - 21 °C (morgens 18,5 °C) als etwas zu kühl, aber nicht störend. Dieser Haushalt hatte nach eigenen Angaben nur an etwa 2 - 3 Tagen nachgeheizt. Ein weiterer Befragter merkte an, dass – bedingt durch den Einzug im Januar – das Haus anfänglich sehr ausgekühlt war und entsprechend längere Zeit brauchte, um die als angenehm empfundenen Raumtemperaturen zu erreichen. Ein anderer Bewohner beschrieb, dass es nach einer längeren Abwesenheit einige Stunden dauere, um die Temperaturen von etwa 18 °C wieder anzuheben. Zwei Befragte äußerten sich auch zu den Sommertemperaturen, die sie als sehr hoch beschrieben (1 Mal mit Temperaturangabe (25 °C), 1 Mal ohne konkrete Nennung). Durch Verschattung und längeres Fensteröffnen abends/nachts und nach längerer Abwesenheit wird versucht, die Temperaturen zu regulieren.

Auch mit der Luftqualität sind die Bewohner im Wesentlichen zufrieden. Besonders positiv wurde die Frische der Luft beim Betreten des Hauses nach Arbeit, Urlaub etc. bemerkt. Es wurde berichtet, dass die Innenluft nicht abgestanden wirke und kein Unterschied zwischen Außen- und Innenluft feststellbar sei. Bei zwei Häusern wird die Situation in einzelnen Räumen als weniger gut bezeichnet: In einem Schlafzimmer ist die Luft morgens schlechter, wenn nachts die Tür angelehnt war. Dabei wurde eine niedrigere Luftwechselrate als in den übrigen Zimmern als technischer Grund vermutet. Im zweiten Haus besteht dieses Problem in einem Schlafzimmer und einem Kinderzimmer. In einem weiteren Haus konnten anfänglich aufgetretene ähnliche Mängel in einem Zimmer durch eine Änderung der Einstellung des Luftstroms behoben werden.

Die Abführung schlechter Gerüche beim Kochen erfolgt nach Ansicht der Befragten problemlos. Drei der vier Befragten nutzen dabei unterstützend die Partylüftung (1 bis 2 Mal 30 min). Bei Besuch von mehreren Personen im Haus wurde eher die Wärmeentwicklung als die Auswirkungen auf die Luftqualität als proble-



matisch angesehen. Abhilfe erfolgt allgemein durch ein kurzzeitiges Öffnen der Fenster bzw. Terrassentüren, gelegentlich wird die Partylüftung zusätzlich aktiviert.

Ein Befragter wies darauf hin, nachträglich Kohlefilter installiert zu haben, um unerwünschte Gerüche aus der Nachbarschaft (Kamin, Grill) fernzuhalten. Ein weiterer Bewohner problematisierte ebenfalls Geruchsbelästigungen aus der Zuluft. Ein anderer Haushalt nahm die Filterwechselintervalle als zu lang wahr, was zu subjektiv empfundenen Einbußen bei der Luftqualität führte und senkte das Intervall von 1.400 auf 1.296 Stunden ab.

Hinsichtlich der Luftfeuchtigkeit empfinden drei der vier Befragten die Luft als zu trocken. Dem wird teilweise durch Duschen oder Wäschetrocknen entgegengewirkt. Der vierte Haushalt empfindet die Luftfeuchtigkeit als der Umgebungsluft entsprechend, fügte aber hinzu, durch viele Grünpflanzen regulierend mit einzugreifen.

#### Funktionalität

Die Lüftungsanlagen funktionierten im Wesentlichen störungsfrei. In einem Haus wurde kurzzeitig ein Problem mit der Automatik bemerkt, was sich aber schnell durch einen temporären manuellen Betrieb wieder lösen ließ. In einem anderen Haus war firmenseitig anfangs eine falsche Einstellung der Wärmepumpe erfolgt.

Die durch den Betrieb der Lüftungsanlage erzeugten Geräusche werden zumeist als nicht oder wenig störend empfunden. Ein Befragter fühlt sich durch die nur im Erdgeschoss hörbaren Geräusche in manchen Situationen, z. B. beim Lesen, belästigt und äußerte ferner seinen Eindruck, dass die Lüftungsanlage im Laufe von zwei Jahren deutlich lauter geworden sei. Von drei Befragten werden die Geräusche im normalen Alltag jedoch kaum wahrgenommen, teilweise würden sie nachts auffallen, wenn der Umgebungslärm fehlt, oder nur dann, wenn man sich gezielt darauf konzentriert. In einem Haus werden die Geräusche der Lüftungsanlage zwar als in Küche und Bad deutlich hörbar, aber dennoch nicht als störend beschrieben. Für wahrgenommene Änderungen der Lüftungsstufen gelten die Aussagen entsprechend.

Ein Befragter stellte in diesem Zusammenhang fest, dass er sich eine bessere Einweisung seitens des Herstellers der Lüftungsanlage gewünscht hätte. Ein anderer Befragter kritisierte die Lüftungsanlage als relativ wartungsintensiv aufgrund der Notwendigkeit zum häufigen Filterwechsel. Ein anderer Befragter merkte an, im Frühjahr aufgrund des Pollenflugs häufig die Luftansaugung absaugen zu müssen.

## 8.2.3 Akzeptanz/Zufriedenheit mit der Einstellung der Lüftung: Automatikbetrieb

In der Frage, ob ein Automatikbetrieb favorisiert wird oder eigene Eingriffsmöglichkeiten gewünscht werden, gingen die Präferenzen der Befragten deutlich auseinander. Ein Befragter hob hervor, den Automatikbetrieb sehr zu schätzen und darauf nicht verzichten zu wollen. Die übrigen drei befragten Bewohner wünschten sich mehr Einflussmöglichkeiten, wobei die Stärke des gewünschten Einflusses jedoch recht unterschiedlich war: Ein Befragter würde die Lüftungsstufen nachts und im Winter (die Temperaturabsenkung betreffend) gern selbst nach seinen Komfortwünschen programmieren. Ein anderer Befragter äußerte einerseits den Wunsch nach einem Zeitprogramm, welches in Sommernächten die Lüftungsstufe anhebt, um die Kühlung der Räume zu unterstützen. Andererseits könnte er sich bei technischer Machbarkeit neben der Partylüftung noch eine "Turbostufe" für einen extraschnellen Luftaustausch vorstellen. Der Wunsch des dritten Befragten ging mit dem Vorschlag nach einer Stufe zum "Superdurchlüften" in eine ähnliche Richtung, allerdings damit motiviert, danach vorerst keine Lüftungsgeräusche mehr hören zu müssen.



## 8.2.4 Einschätzung der Funktionalität der Lüftungsanzeige/Drd-Sequenz

Nach Angaben der Befragten werden die Fenster kaum noch geöffnet, bei allen hat sich nach dem Einzug in das Passivhaus das Lüftungsverhalten grundsätzlich verändert. Kein Befragter hat bislang eine Veränderung der Anzeige (grüner Bereich) bemerkt, obwohl täglich (teilweise mehrfach) darauf geschaut wird. Zum einen werden Defekte vermutet, zum anderen wird das Fensteröffnungsverhalten als fehlerfrei angesehen. In keinem Fall hat die Anzeige das Fensteröffnungsverhalten beeinflusst.

Verbesserungsvorschläge betreffen vorrangig den Informationsgehalt und die Verständlichkeit der Anzeige: Ein Befragter empfindet den Bezug zum Vortag zwar nicht als Nachteil, seines Erachtens wäre eine (ggf. zusätzliche) Echtzeit-Rückmeldung aber sinnvoller, die genau dann erfolgen sollte, wenn ein ungünstiges Verhalten vorliegt – egal ob im Passivhaus oder im konventionellen Haus. Zudem hätte er Interesse an Halbjahresprotokollen (Sommer und Winter). Ein weiterer Befragter sieht ein Display für komfortabel an, welches aktuell anzeigt, wo ein Fenster geöffnet ist. Dies wäre zudem nützlich im Sinne eines Einbruchschutzes beim Verlassen des Hauses und daher auch für konventionelle Gebäude geeignet. Ein dritter Befragter empfindet den Vortagsbezug als nicht ausreichend, sondern fände längere Beobachtungszeiträume und Anzeigen attraktiver, die auch Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt der Raumluft angeben sollten. Letztgenannte sollten nach Möglichkeit als raumweise Displays zur Verfügung stehen. Zudem hielte er konkrete Ableitungen für Handlungsanweisungen (Fenster öffnen oder Fenster schließen) für angebracht. Der vierte Befragte hält die Anzeige für im Passivhaus überflüssig, weil jeder Tag anders sei. Er betonte, dass er sehr viel häufiger die Fenster ohne Wärmeverluste öffnen könnte, dazu aber keine Notwendigkeit sieht. Seiner Ansicht nach wäre eine solche Anzeige dagegen in konventionellen Häusern sehr sinnvoll, wobei diese dann klar auch an die Rückmeldung der Luftqualität gekoppelt werden sollte.

## 8.2.5 Generelle Verbesserungsvorschläge und Anmerkungen

Drei der vier Befragten formulierten zu den bereits genannten Vorschlägen weitere Kommentare oder offene Punkte:

Ein Befragter vermisst eine individuelle Belüftungsmöglichkeit einzelner Räume, ohne die Fenster dazu öffnen zu müssen und sucht nach Tipps, wie die richtige Belüftungsstrategie im Winter aussieht: Lässt man die Zwischentüren auf oder zu? Wie ist der Luftstrom im Haus? Gibt es Stellschrauben, wie man die Raumtemperatur im Winter optimieren kann, ohne zuheizen zu müssen? Zudem sollte der Bedienkomfort der Anlage erhöht werden. Die Einstellungsanzeige der Lüftungsanlage sei zu klein und so unhandlich, dass selbst eine Uhrzeitumstellung nicht selbst erklärend möglich sei.

Der zweite Befragte empfindet die Direktheizgeräte im Flur und in den Badezimmern als wenig geeignet für das Zusammenleben mit kleinen Kindern, die beim Spielen unbemerkt die Geräte anschalten können. Seiner Ansicht nach sinnvoller wären Thermostate. Abraten würde er von Elektroheizkörpern angesichts steigender Strompreise. Sehr zufrieden äußerte er sich über die Vakuumröhrenkollektoren zur Warmwasserbereitung auf dem Dach, von denen er sich allerdings wünschen würde, dass die überschüssige Energie nach dem Aufheizen des Warmwasserspeichers noch anderweitig genutzt (z. B. im Heizkreislauf der Wärmepumpe) oder gespeichert werden könnte.

Der dritte Befragte würde seine Warmwasserbereitung heute anders machen: Im Winter (Dez.- Feb.) würde er dazu nicht die Warmwasser-Thermiekollektoren (Eintrag = Null), sondern einen PH-tauglichen Kamin nutzen, der auch an den Warmwasserspeicher angeschlossen ist. (Das wurde vom Haushersteller erst ein halbes Jahr später ins Programm aufgenommen.)



# 8.3 Kurzfragebögen

Alle vier Haushalte wurden im Verlauf des Feldversuchs mehrfach mit Hilfe von kurzen Fragebögen über ihre Zufriedenheit mit der Luftqualität und der Anlagentechnik im Haus befragt. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der LQ-Regelung wurden alle in einem ausführlicheren Fragebogen zu ihrer Zufriedenheit und ihren Anlageneinstellungen in der Zeit zuvor befragt. Anschließend wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Heizperiode und der Übergangszeit weitere Kurzfragebögen verschickt. Zum Ende des Feldtests sollten alle Haushalte nochmals eine Gesamtbewertung abgeben. Bild 121 zeigt die Zeitpunkte der Befragungen und welches Haus zu welchem Zeitpunkt angeschrieben wurde.

Bild 121: Befragungszeitpunkte der Nutzer im Feldtest zur Luftqualität in ihrem Gebäude

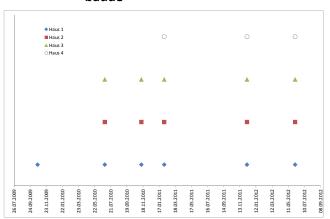


Bild 122: Zufriedenheit der Nutzer mit der Luftqualität in ihrem Gebäude (Schulnoten)

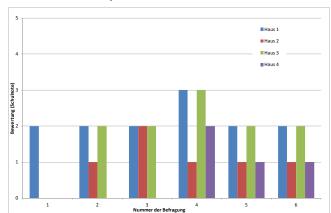


Bild 122 zeigt die Zufriedenheit der Nutzer mit der Luftqualität in ihrem Gebäude im Zeitverlauf. Bei keinem Haus waren die Angaben im Zeitverlauf immer gleich, die Bewertung schwankt zwischen "sehr gut" und "befriedigend". Im Mittel ergeben sich Schulnoten zwischen 1,2 und 2,2, wobei die Nutzer mit der schlechteren Schulnote bereits vor Beginn der LQ-Regelung für Einzelräume (Kinderzimmer bzw. Elternschlafzimmer) eine schlechtere Luftqualität angemerkt hatte. Nachmessungen ergaben, dass dort der Volumenstrom teilweise viel zu gering war und die subjektive Bewertung auch durch Messdaten untermauert werden konnte. Den Eigentümern wurden in diesem Zusammenhang Hinweise zur Verbesserung der Situation gegeben, die unabhängig von der LQ-Regelung entstanden war.

In drei von vier Feldtestgebäuden wurde auch vor Inbetriebnahme der LQ-Regelung gelegentlich die Intensivlüftung eingesetzt, das vierte Haus gab an, diese nie genutzt zu haben. Die Hälfte der Häuser hatte vor Beginn des Feldtests ein Wochenprogramm zur Beeinflussung des Volumenstroms im Gebäude genutzt.

Der Geräuschpegel wurde von allen Nutzern als lauter als erwartet eingestuft, und auch bei den folgenden Befragungen wurden immer wieder Geräusche oder Surren angemerkt.

Insgesamt ergaben sich aus den Befragungen (ausführliche Telefonbefragung und Kurzfragebögen) Ansätze für Verbesserungsmöglichkeiten der LQ-Regelung und der Nutzerrückmeldung, aber keine Antworten, die auf generelle Unzufriedenheit mit der entwickelten Technik hindeuten. Die Bewertungen der Luftqualität lagen zwischen gut bis sehr gut.



# 9 Übersicht der Verbrauchswerte der Feldtestgebäude

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Verbrauchserfassung sowie der Komfortbedingungen dokumentiert.

### 9.1 Verbräuche Elektroenergie

Alle Gebäude des Feldtests besitzen eine thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung. Die Deckung des Restenergiebedarfs für Beheizung und Warmwasser erfolgt elektrisch (Wärmepumpe bzw. direktelektrisch), so dass der anzurechnende Endenergieverbrauch der Gebäude ausschließlich über Elektroenergiezähler erfasst wird. Im Folgenden werden die gemessenen Energieverbräuche dokumentiert.

#### Haus 1

Für Haus 1 sind die in Tab. 19 als Jahreswerte dargestellten Elektroenergieverbräuche angefallen, die Monatswerte sind in Anhang A zu finden. Datenlücken konnten überwiegend auf Basis von Handablesungen korrigiert oder durch sinnvolle Annahmen (z. B. elektrische Leistung Messtechnik quasi konstant) ergänzt werden. Beim Haushaltsstrom ist ein nahezu konstanter Verbrauch von ca. 16 kWh/(m²a) über die drei ausgewerteten Jahre aufgetreten. Auch die weiteren Verbrauchsgrößen unterlagen nur geringen Schwankungen. Ausnahme ist der Stromverbrauch für die Nacherwärmung der Zuluft in den Räumen über PTC (d. h. direktelektrisch), die im Auswertungszeitraum 2011/12 mit 9 kWh/(m²a) sechs Mal so hoch lag wie in den Jahren davor. Ursache ist wahrscheinlich eine Fehleinstellung eines Raumreglers, denn die Stromverbräuche beginnen bereits im September 2011 deutlich anzusteigen. Auffällig ist auch der erhöhte Stromkennwert für die Direktheizung (in Bad und WC). Hier ist zwischen September 2010 und November 2010 ein kontinuierlicher Verbrauch von ca. 270 W aufgetreten. Ursache war hier das Einschalten eines Heizgerätes im WC durch eines der Kinder. Die Rückmeldung der Verbrauchswerte konnte diese ungewollte Nachheizung aufklären und beseitigen. Der Wert für den Stromverbrauch der Messtechnik wird vor allem durch den kontinuierlich betriebenen Messcomputer und die hohe Anzahl der Sensoren verursacht. Bei einer zukünftigen Anwendung der LQ-Regelung entfällt dieser Stromverbrauch nahezu vollständig.

Tab. 19: Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 1 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)

	Strom Haushalt [kWh/m²a]	Strom Lüftung [kWh/m²a]	Strom WP [kWh/m²a]	Strom PTC [kWh/m²a]	Strom Direktheizung [kWh/m²a]	Strom WW [kWh/m²a]	Strom Messtechnik [kWh/m²a]
2009/10	16,3	4,2	8,0	1,4	1,2	5,9	8,6
2010/11	16,0	3,7	8,9	1,6	3,6	6,1	7,7
2011/12	15,9	4,0	7,8	9,0	0,0	5,9	8,4

kursiv: Datenlücken wurden u. a. auf Basis von Handablesungen hochgerechnet

Die Zusammenfassung der Verbräuche für die Anlagentechnik und für das gesamte Gebäude ist in Tab. 20 zu finden. Für den Bereich Anlagentechnik (Heizung, Lüftung, Warmwasserbereitung) ergibt sich ein Endenergieverbrauch zwischen 20,6 kWh/(m²a) im ersten Messjahr und 26,8 kWh/(m²a) im dritten Messjahr, das zweite Messjahr lag mit 23,9 kWh/(m²a) zwischen den beiden Werten. Allerdings muss der Heizbeitrag des Messtechnikstromes in der Bilanz mit berücksichtigt werden, da die Abwärme in die Abluft gelangt und über die Wärmerückgewinnung zu mehr als 80 % im Winter zurückgewonnen wird. Werden hierzu vereinfachend die Messtechnik-Stromverbräuche von November bis Ende März angesetzt, so liegt der Endenergieverbrauch der Anlagentechnik zwischen 24,3 kWh/(m²a) und 30,3 kWh/(m²a).



Tab. 20: Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 1 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)

		Endenergie		
	Endenergie	Heizung+WW	Primärenergie	Primärenergie
	Heizung+WW+	+ Heizbeitrag	Anlagen-	Haus
	Lüftung	Messtechnik	technik	gesamt(1)
	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]
2009/10	20,6	24,3	60,7	101,5
2010/11	23,9	26,8	67,0	106,8
2011/12	26,8	30,3	75,7	115,6

<sup>(1)</sup> inkl. Messtechnik-Strom, der zur Beheizung nutzbar ist

Mit dem angesetzten mittleren Primärenergiefaktor für den bundesdeutschen Strommix im Messzeitraum von 2,5 kWh $_{PE}$ /kWh $_{End}$  ergeben sich Primärenergieverbräuche für die Anlagentechnik zwischen 60,7 kWh/( $m^2a$ ) und 75,7 kWh/( $m^2a$ ). Der Gesamtprimärenergieverbrauch des Gebäudes (inkl. Haushaltsstrom) liegt mit Werten zwischen 101,5 kWh/( $m^2a$ ) und 115,6 kWh/( $m^2a$ ) im Bereich der Anforderungen an Passivhäuser.

#### Haus 2

Die Elektroenergieverbräuche von Haus 2 sind in Tab. 21 als Jahreswerte dargestellt, die Monatswerte sind in Anhang A zu finden. Datenlücken wurden auf Basis von Handablesungen und mit Hochrechnungen aus anderen Zeiträumen sinnvoll ergänzt. Der Haushaltsstromverbrauch war im ersten Messjahr 2009/10 mit 21,0 kWh/(m²a) ca. 25 % höher als in den folgenden Jahren. Möglicherweise wurde direktelektrisch (z. B. über zusätzliche Heizlüfter) zugeheizt, da die Mehrverbräuche hauptsächlich von Dezember bis Februar aufgetreten sind. Bei den anderen Verbrauchszählern ergeben sich nur bei der elektrischen Warmwassernacherwärmung nennenswerte Schwankungen zwischen den Messjahren (3,9 kWh/(m²a) im ersten Messjahr, ca. 6,9 kWh/(m²a) in den folgenden Jahren). Dies kann auf eine veränderte Einstellung der Heizpatrone am Warmwasserspeicher zurückzuführen sein (siehe Kapitel 9.2).

Tab. 21: Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 2 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)

	Strom Haushalt [kWh/m²a]	Strom Lüftung [kWh/m²a]	Strom WP [kWh/m²a]	Strom PTC [kWh/m²a]	Strom Direktheizung [kWh/m²a]	Strom WW [kWh/m²a]	Strom Messtechnik [kWh/m²a]
2009/10	21,0	4,0	12,4	10,0	1,3	3,9	9,5
2010/11	17,5	3,9	10,6	11,8	1,2	7,0	9,3
2011/12	16,2	3,8	11,5	9,9	1,1	6,7	9,0

Die Zusammenfassung der Verbräuche für die Anlagentechnik und für das gesamte Gebäude ist in Tab. 22 zu finden. Für den Bereich Anlagentechnik (Heizung, Lüftung, Warmwasserbereitung) ergibt sich ein Endenergieverbrauch zwischen 31,6 kWh/(m²a) im ersten Messjahr und 34,6 kWh/(m²a) im zweiten Messjahr, das dritte Messjahr lag mit 33,0 kWh/(m²a) zwischen den beiden Werten. Allerdings muss der Heizbeitrag des Messtechnikstromes in der Bilanz mit berücksichtigt werden. Werden hierzu vereinfachend die Messtechnik-Stromverbräuche von November bis Ende März angesetzt, so liegt der Endenergieverbrauch der Anlagentechnik zwischen 35,6 kWh/(m²a) und 38,5 kWh/(m²a).



Tab. 22: Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 2 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)

		Endenergie		
	Endenergie	Heizung+WW	Primärenergie	Primärenergie
	Heizung+WW+	+ Heizbeitrag	Anlagen-	Haus
	Lüftung	Messtechnik	technik	gesamt(1)
	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]
2009/10	31,6	35,6	89,1	141,6
2010/11	34,6	38,5	96,1	140,0
2011/12	33,0	36,9	92,2	132,6

<sup>(1)</sup> inkl. Messtechnik-Strom, der zur Beheizung nutzbar ist

Mit dem angesetzten mittleren Primärenergiefaktor für den bundesdeutschen Strommix im Messzeitraum von 2,5 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>End</sub> ergeben sich Primärenergieverbräuche für die Anlagentechnik zwischen 89,1 kWh/(m²a) und 92,2 kWh/(m²a). Der Gesamtprimärenergieverbrauch des Gebäudes liegt mit Werten zwischen 132,6 kWh/(m²a) und 141,6 kWh/(m²a) leicht über der Anforderungen an Passivhäuser. Hier muss aber berücksichtigt werden, dass Haus 2 eine ca. 10 % niedrigere Energiebezugsfläche als die anderen Häuser aufweist, wodurch die flächenbezogenen Kennwerte zusätzlich ansteigen. Außerdem verfügt es nicht über einen Erdreichwärmetauscher, was die Effizienz der Wärmepumpe negativ beeinflusst.

#### Haus 3

Die Elektroenergieverbräuche von Haus 3 sind in Tab. 23 als Jahreswerte dargestellt, die Monatswerte sind in Anhang A zu finden. Datenlücken im ersten Messjahr wurden auf Basis von Handablesungen und mit Hochrechnungen aus anderen Zeiträumen sinnvoll ergänzt. Der Haushaltsstromverbrauch lag zwischen 14,3 kWh/(m²a) und 14,8 kWh/(m²a) und war somit relativ konstant über den Auswertezeitraum. Bei den anderen Verbrauchszählern ergeben sich nur geringe Schwankungen.

Tab. 23: Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 3 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken ergänzt)

	Strom Haushalt [kWh/m²a]	Strom Lüftung [kWh/m²a]	Strom WP [kWh/m²a]	Strom PTC [kWh/m²a]	Strom Direktheizung [kWh/m²a]	Strom WW [kWh/m²a]	Strom Messtechnik [kWh/m²a]
2009/10	14,8	7,1	3,9	0,3	0,3	2,0	8,1
2010/11	14,7	8,9	3,8	0,8	0,2	0,8	7,6
2011/12	14,3	8,3	3,2	0,3	0,2	1,3	7,7

kursiv: Zeitraum wurde auf Basis von Mittelwerten hochgerechnet

Die Zusammenfassung der Verbräuche für die Anlagentechnik und für das gesamte Gebäude ist in Tab. 24 zu finden. Für den Bereich Anlagentechnik (Heizung, Lüftung, Warmwasserbereitung) ergibt sich ein Endenergieverbrauch zwischen 13,3 kWh/(m²a) und 14,6 kWh/(m²a). Wenn auch hier der Heizbeitrag des Messtechnikstromes in der Bilanz mit berücksichtigt wird (Messtechnik-Stromverbräuche von November bis Ende März), so liegt der Endenergieverbrauch der Anlagentechnik zwischen 16,5 kWh/(m²a) und 17,6 kWh/(m²a).



Tab. 24: Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 3 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken ergänzt)

		Endenergie		
	Endenergie	Heizung+WW+	Primärenergie	Primärenergie
	Heizung+WW+L	Heizbeitrag	Anlagen-	Haus
	üftung	Messtechnik	technik	gesamt(1)
	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]
2009/10	13,5	16,9	42,2	79,2
2010/11	14,6	17,6	44,0	80,7
2011/12	13,3	16,5	41,2	77,0

<sup>(1)</sup> inkl. Messtechnik-Strom, der zur Beheizung nutzbar ist

kursiv: Zeitraum wurde auf Basis von Mittelwerten hochgerechnet

Mit dem angesetzten mittleren Primärenergiefaktor für den bundesdeutschen Strommix im Messzeitraum von 2,5 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>End</sub> ergeben sich Primärenergieverbräuche für die Anlagentechnik zwischen 41,2 kWh/( $m^2a$ ) und 44,0 kWh/( $m^2a$ ). Der Gesamtprimärenergieverbrauch des Gebäudes liegt mit Werten zwischen 77,0 kWh/( $m^2a$ ) und 80,7,1 kWh/( $m^2a$ ) sehr niedrig. Die Höhe des zusätzlichen Heizbeitrags des Ethanolofens im Wohnzimmer ist nicht bekannt, die  $CO_2$ -Messwerte deuten aber nicht auf eine häufige Nutzung hin.

#### Haus 4

Bei Haus 4 liegt aufgrund des späten Bezugs des Gebäudes nur eine vollständige Heizperiode zur Auswertung vor (Tab. 25). Der Haushaltsstromverbrauch liegt mit 16,5 kWh/(m²a) im Bereich der übrigen Gebäude. Die spezifischen Verbräuche für Lüftung, Wärmepumpe, PTCs, Direktheizgeräte und Warmwassernacherwärmung liegen im Vergleich mit den anderen Gebäuden recht niedrig, der Stromverbrauch für die Messtechnik ist mit 8,3 kWh/(m²a) in einem ähnlichen Bereich wie bei den übrigen Gebäuden.

Tab. 25: Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 4 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)

	Strom Haushalt [kWh]	Strom Lüftung [kWh]	Strom WP [kWh]	Strom PTC [kWh]	Strom Direktheizung [kWh]	Strom WW [kWh]	Strom Messtechnik [kWh]
2011/12	16,5	3,4	4,9	2,3	0,1	2,3	8,3

Der Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasserbereitung liegt in Haus 4 mit 13,1 kWh/(m²a) sehr niedrig (Tab. 26), und auch bei Berücksichtigung der zur Beheizung nutzbaren Abwärme der Messtechnik liegt der Kennwert mit 16,7 kWh/(m²a) sehr niedrig. Primärenergetisch betrachtet ergibt sich für die Anlagentechnik ein Energieverbrauch von 41,7 kWh/(m²a), und das Gesamtgebäude weist inkl. Haushaltsstrom einen Primärenergieverbrauch von 83,0 kWh/(m²a) auf.

Tab. 26: Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 4 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)

		Endenergie		
	Endenergie	Heizung+WW	Primärenergie	Primärenergie
	Heizung+WW+	+ Heizbeitrag	Anlagen-	Haus
	Lüftung	Messtechnik	technik	gesamt(1)
	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]	[kWh/m²a]
2011/12	13,1	16,7	41,7	83,0

<sup>(1)</sup> inkl. Messtechnik-Strom, der zur Beheizung nutzbar ist



#### Zusammenfassung zu den Elektroenergieverbräuchen

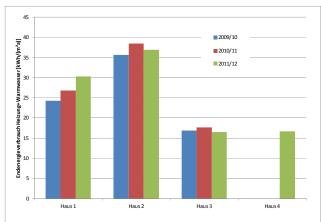
Bild 123 zeigt den Vergleich der Verbrauchskennwerte der vier Feldtestgebäude. Links im Bild sind die Endenergieverbräuche an elektrischer Energie zur Beheizung und Warmwasserbereitung (inkl. nutzbarer Abwärme aus dem Messtechnikstromverbrauch) dargestellt. Die Verbräuche der Häuser 3 und 4 liegen über alle Auswertezeiträume sehr niedrig und mit ca. 17 kWh/(m²a) in einer vergleichbaren Größenordnung. Beide Gebäude verfügen über einen Sole-Erdreichwärmetauscher, der im Winter die kalte Außenluft vorerwärmt, was sich günstig auf die Arbeitszahl der Wärmepumpe und die erforderliche Nacherwärmung auswirkt.

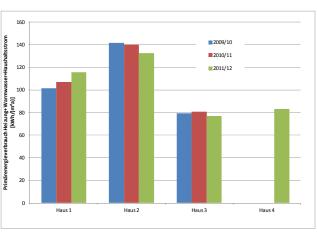
Die ansteigenden Verbräuche von Haus 1 sind dadurch zu erklären, dass im Jahr 2010/11 durch eine Fehlbedienung über ca. zwei Monate ein Direktheizgerät im WC in Betrieb war. Im Jahr 2011/12 war der Stromverbrauch für die Nacherwärmung in den Räumen verstärkt in Betrieb, was ebenfalls zu deutlich erhöhtem Stromverbrauch führte<sup>15</sup>. Wird unterstellt, dass diese Zusatzverbräuche überwiegend unbeabsichtigt und auch teilweise außerhalb der Heizperiode anfielen und man rechnet die beiden Zusatzverbräuche heraus, so ergibt sich ein Verbrauch von ca. 24,3 kWh/(m²a). Dieser liegt immer noch sehr niedrig, aber ca. 7 kWh/(m²a) über den Häusern 3 und 4. Hintergrund könnte die Tatsache sein, dass Haus 1 mit einem Luft-Erdreichwärmetauscher ausgestattet ist, der ggf. eine geringere Wärmeleistung besitzt als die Sole-Erdreichwärmetauscher. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass es sich bei Haus 1 um ein Reihenendhaus handelt, das aber über die meiste Zeit des Feldversuchs freistehend war.

Haus 2 besitzt keinerlei Erdreichwärmetauscher und in der Folge liegen die Endenergieverbräuche für Heizung und Warmwasserbereitung mit ca. 37 kWh/(m²a) deutlich über denjenigen der anderen Häuser. Zusätzlich muss die geringere Energiebezugsfläche für die Berechnung der Kennwerte berücksichtigt werden.

Die Haushaltsstromverbräuche liegen bei allen Feldtestgebäuden in einem Bereich zwischen 14 kWh/(m²a) und 21 kWh/(m²a) und somit ebenfalls vergleichsweise niedrig.

Bild 123: Vergleich der Endenergieverbräuche für Heizung und Warmwasserbereitung (elektrischer Strom) sowie Primärenergieverbräuche für Heizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsstrom in kWh/(m²a)





Die rechte Abbildung in Bild 123 zeigt die Primärenergieverbräuche (Heizung, Heizbeitrag der Messtechnik, Warmwasserbereitung, Haushaltstrom) für die vier Feldtestgebäude. Haus 2 liegt aufgrund des höheren Energieverbrauchs für die Beheizung im Jahr 2011/12 bei 132 kWh/(m²a) Primärenergieverbrauch und über dem Wert von 120 kWh/(m²a), der für Passivhäuser im Passivhaus-Projektierung-Paket gefordert wird [PHPP]. Alle anderen Gebäude unterschreiten dieses Niveau zum Teil deutlich. Haus 3 und 4 erreichen im Mittel Primärenergieverbräuche von 80 kWh/(m²a), sie liegen somit ein Drittel unter Haus 2. Haus 1 liegt trotz der ungewollten Mehrverbräuche mit 108 kWh/(m²a) ebenfalls auf einem hervorragenden Wert.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Von diesen Bewohnern wurde auch ein besserer Schutz gegen versehentliches Einschalten gewünscht (siehe Kapitel 8.2)



Bei der Beurteilung der Unterschiede zwischen den Häusern und zwischen den Jahren muss jedoch auch der Einfluss des Nutzerverhaltens berücksichtigt werden, der unter Umständen den Energieverbrauch stark beeinflussen kann. Eine Klimabereinigung wurde bei den dargestellten Verbrauchswerten nicht vorgenommen.

### 9.2 Warmwasserbereitung

Alle Gebäuden des Feldtest besitzen eine thermische Solaranlage auf dem Dach der Hauses (Haus 4: Vakuumröhrenkollektoren, alle anderen Flachkollektoren) und einen Brauchwasserspeicher im Technikraum.
Reicht die solare Wärme nicht aus, um die eingestellte Solltemperatur (zwischen 40 °C und 46 °C) zu erreichen, kann mit der Wärmepumpe nachgeheizt werden, wenn diese sich nicht im Heizbetrieb befindet (Vorrang Heizbetrieb). Kann die Solltemperatur damit noch nicht erreicht werden (z. B. im Kernwinter, wenn die
Wärmepumpe überwiegend sich im Heizbetrieb befindet), wird mit einem elektrischen Warmwasserbereiter mit 6 kW Leistung mit einem externen Wärmetauscher indirekt zusätzlich Wärme an den Warmwasserspeicher abgegeben. Die Wärmepumpe bringt die Wärme im unteren Drittel, der elektrische Warmwasserbereiter im oberen Drittel und die Solaranlage im Bereich der Wärmepumpe ein. Eine Zirkulationsleitung ist
nicht vorhanden.

#### Warmwasserverbräuche

In Tab. 27 sind die absoluten Warmwasserverbräuche in Kubikmeter und Jahr für die vier Feldtestgebäude dokumentiert. Die höchsten Verbräuche wurden bei Haus 1 gemessen, die niedrigsten bei Haus 3.

Tab. 27: Absolute Warmwasserverbräuche der Feldtestgebäude in m³ pro Jahr

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
6/2009 - 5/2010	32,5	25,7	13,8	
6/2010 - 5/2011	32,9	31,6	9,1	
6/2011 - 5/2012	38,0	28,3	12,5	20,1

Bei den Warmwasserverbräuchen pro Person und Tag (siehe Tab. 28) wurde unterstellt, dass alle Gebäude mit vier Personen belegt sind (zwei Erwachsenen und zwei Kindern, entspricht in allen Gebäuden der realen Situation am Ende des Feldtests). Hier zeigt sich, dass auch bei Haus 1 die mittleren Verbräuche auf dem Niveau liegen, das im Passivhaus-Projektierungs-Paket [PHPP] je Person angesetzt wird (25 Liter/(Pers.\*d)) oder deutlich darunter. Berücksichtigt man zusätzlich, dass die Zapftemperaturen mit 40 °C bis 46 °C (siehe Tab. 29) deutlich unter den im PHPP angesetzten Werten von 60 °C liegen, sind die personenbezogenen Warmwasserverbräuche als niedrig einzustufen. Die Schwankungen bei den Warmwasserverbräuchen können unter Umständen durch das unterschiedliche Alter der Kinder verursacht sein.

Tab. 28: Mittlere Warmwasserverbräuche der Feldtestgebäude Liter pro Person und Tag

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
6/2009 - 5/2010	22,3	17,6	9,5	
6/2010 - 5/2011	22,4	21,7	6,2	
6/2011 - 5/2012	26,0	19,3	8,5	13,8



#### Warmwassertemperaturen

Die Warmwassersolltemperatur ist bei allen Häusern unterschiedlich eingestellt (siehe Tab. 29), die Hysterese mit 5 K, d. h. die Nacherwärmung startet bei einer Speichertemperatur, die 5 K unter der Solltemperatur liegt.

Tab. 29: Eingestellte Warmwassersolltemperaturen für die Erwärmung mit Hilfe der Wärmepumpe

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
Warmwassersolltemperatur für Wärmepumpenbetrieb	40 °C	46 °C	46 °C	42 °C

Zusätzlich muss berücksichtig werden, dass die externe Heizpatrone die Warmwasserbereitung unterstützen kann. Dazu besitzt die Heizpatrone einen zusätzlichen Temperaturregler, der aufgrund der Einspeisung über einen Wärmeüberträger höher eingestellt werden muss, als die Warmwassersolltemperatur (ca. 15 K – 20 K höher). Außerdem können die Nutzer die direktelektrische Nacherwärmung über einen Schalter abschalten. Dies wurde in den verschiedenen Häusern unterschiedlichen gehandhabt (teilweise wurde die Sommerabschaltung vergessen oder die Winternachheizung verspätet eingeschaltet).

Bild 124: Monatsmittelwerte der Temperatur im Warmwasserspeicher aller Gebäude im Feldtest

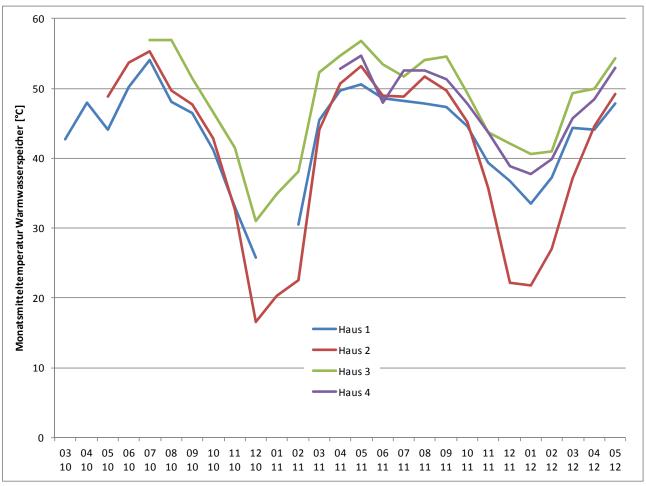


Bild 124 zeigt die gemessenen Monatsmitteltemperaturen der Warmwasserspeicher der Modellgebäude. Es ergibt sich ein charakteristischer Jahresgang mit hohen Speichertemperaturen im Sommer und Werten im Winter, die die Solltemperaturen teilweise nicht erreichen. Auffällig sind die Temperaturen im Winter



bei Haus 2, die teilweise sehr niedrige Werte aufweisen. Ursache ist u. a. die Tatsache, dass bei diesem Gebäude kein Erdreichwärmetauscher vorhanden ist, der die kalte Außenluft für die Wärmerückgewinnung vortemperiert. Dadurch muss zur Beheizung mehr Wärme in die Zuluft des Gebäudes eingebracht werden. Die Leistung der Wärmepumpe wird somit überwiegend zur Beheizung benötigt, so dass der Brauchwasserspeicher vergleichsweise kalt bleibt. Eine Anhebung der Zapftemperatur über die elektrische Heizpatrone erfolgt nur begrenzt, wahrscheinlich haben die Bewohner die Solltemperatur an der Heizpatrone sehr weit reduziert oder diese nicht eingeschaltet.

#### Warmwassernacherwärmung mit der Wärmepumpe

Bild 125 zeigt den Temperaturverlauf im Warmwasserspeicher an einem halben Tag im Oktober 2011 für Haus 1 sowie die Betriebszustände der Wärmepumpe und die Zapfmengen. Während der Nacht lag die Warmwassertemperatur bei 36,8 °C. Gegen 4:45 Uhr werden ca. 8 Liter Warmwasser gezapft. In der Folge sinkt die Speichertemperatur unter den Schwellwert von 35 °C. Die Wärmepumpe schaltet jedoch nicht sofort auf Warmwasserbereitung um, da noch eine Wärmeanforderung für die Beheizung besteht. Bei einer Warmwassertemperatur von 34,7 °C wird auf Warmwasserbereitung umgeschaltet und nach ca. 15 Minuten beginnt die Speichertemperatur (am Messpunkt im oberen Bereich des Speichers) zu steigen. Bei 40 °C Speichertemperatur wird die Wärmepumpe wieder abgeschaltet.

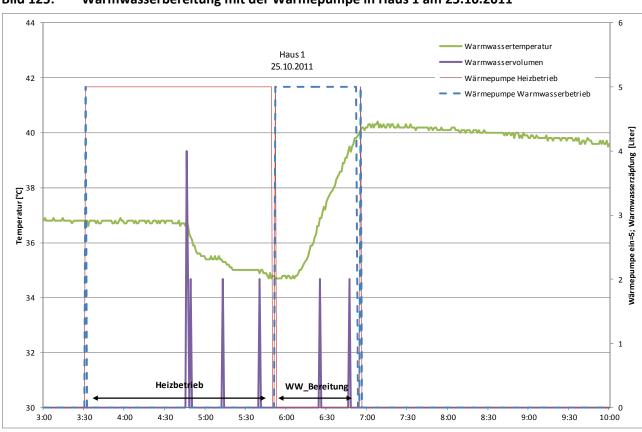


Bild 125: Warmwasserbereitung mit der Wärmepumpe in Haus 1 am 25.10.2011



#### Wärme zur Warmwasserbereitung

Tab. 30 zeigt den auf die Energiebezugsfläche bezogene Wärme für die Warmwasserbereitung (Nutzwärme Warmwasser) der Feldtestgebäude in kWh/( $m^2a$ ). Die Werte liegen bei allen Gebäuden sehr niedrig. Zum Vergleich: die Energieeinsparverordnung rechnet mit einem pauschalen Nutzenergiebedarf für Warmwasser von 12,5 kWh/( $m^2_{AN}a$ ). Dieser ist jedoch auf die Bezugsfläche  $A_N$  der EnEV bezogen, der bei Einfamilienhäusern 30 % bis 40 % über der Energiebezugsfläche liegen kann. Somit würde bei vergleichbarer Bezugsfläche die Vorgabe der EnEV bei 16,25 bis 17,5 kWh/( $m^2a$ ) liegen. Diese Werte wurden von allen Feldtestgebäuden deutlich unterschritten.

Tab. 30: Wärmeverbrach Warmwasser [kWh/(m²a)]

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
6/2009 - 5/2010	9,1	7,7	3,1	
6/2010 - 5/2011	10,3	10,7	2,5	
6/2011 - 5/2012	11,5	9,3	3,3	5,3

Tab. 31 zeigt die über ein Jahr summierte, flächenbezogene Wärmeeinspeisung von Wärmepumpe und Elektroheizstab in den Warmwasserspeicher. Die Werte liegen bei zwei Häusern unter dem Nutzwärmebedarf der Feldtestgebäude für Warmwasserbereitung. Die Differenz wird durch die thermischen Solaranlagen geliefert. Da bei einer Wärmepumpe immer ein Bereitschaftsspeicher für die Warmwasserbereitung erforderlich ist, entstehen Bereitschaftsverluste, die teilweise von der Solaranlage gedeckt werden, ursächlich aber nicht dem Solarsystem zuzuordnen sind. Aus diesem Grund kann aus der Differenz von Tab. 30 und Tab. 31 kein korrekter solarer Deckungsgrad abgeleitet werden. Dieser liegt bei den Feldtestgebäuden zwischen 32 % und 46 %.

Bei Haus 2 und 3, bei denen die Einspeisung höher liegt als die Abnahme, wirken sich auch die teilweise sehr niedrigen Warmwasserverbräuche auf die Bilanz aus, so dass die Wärmeverluste sich stark auswirken.

Tab. 31: Wärmeeinspeisung (ohne Solar) in den Warmwasserspeicher [kWh/(m²a)]

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
6/2009 - 5/2010	6,5	9,9	4,8	
6/2010 - 5/2011	8,7	10,1	4,0	
6/2011 - 5/2012	8,7	9,9	4,0	4,1

Insgesamt sind bei allen Feldtestgebäuden extrem niedrige nicht solare Wärmeverbräuche für die Warmwasserbereitung gemessen worden. Gründe sind hierbei die niedrigen Warmwasserverbräuche der Bewohner, die Wärmeeinspeisung der thermischen Solaranlagen, die begrenzten Verluste der Warmwasserspeicher und die niedrigen Warmwassertemperaturen. Berücksichtigt man zusätzlich die Arbeitszahlen (COP) der Wärmepumpen bei Warmwasserbereitung, liegt der Endenergieverbrauch für die Warmwasserbereitung noch deutlich darunter.



#### 10 Literatur

[AL-KO Therm 2012] Firma AL-KO Therm: Produktblatt zum Airqualitizer; abgerufen unter

http://www.al-ko.de/catalog/de-04-02/files/AL-KO Prospekt AIRQ dt.pdf am

24.09.2012

[DIN EN 13779] Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderun-

gen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007; Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2007

[DIN EN 15251] Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der

Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007; Deutsches Institut für Normung,

Beuth Verlag, Berlin, 2007

[Ebel et al. 2003] Ebel, W., Großklos, M., Knissel, J., Loga, T. und K. Müller (2003): Wohnen in

Passiv- und Niedrigenergiehäusern, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt,

2003

[ETR 2004] ETR GmbH, Dortmund: Produktdatenblatt XN-1000023-000 für VOC-Sensor im

M18-Gehäuse

[Frick 2011] Frick, Martin: Neue Wechselrichter-Generation steigert Aufnahmefähigkeit

aufnahmefae.html am 03.08.2012

[Gieseler, Wiegleb 2012] Gieseler, Udo; Wiegleb, Gerhard: Stabilität und Kalibrierfähigkeit von Kohlen-

dioxid Gassensoren für die Klima- und Lüftungstechnik, in cci Zeitung, 8/2012,

CCI Dialog GmbH, Karlsruhe, 2012

[Großklos, Knissel 2002] Großklos, Marc; Jens Knissel: Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen

Erkennung von Fensteröffnungen über die Lüftungsanlage; nicht veröffentlichter Teilbericht zu dem Forschungsvorhaben "Wohnen in Niedrigenergie und Passivhäusern" gefördert durch das Bundeswirtschaftsministerium Förder-

kennzeichen: 0327256A; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2002

[Großklos et. al 2011] Großklos, Marc; Ebel, Witta; Knissel, Jens: Entwicklung energieeffizienter Kom-

fortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes. Teilbericht 1: Einsatz des LuQaS-Triple-Sensors zur luftqualitätsgeführten Volumenstromregelung von mechanischen Lüftungsanlagen in Wohngebäuden. IWU, Darmstadt,

2011, 97 S.

[Hiller 2012] Schriftliche Mitteilung am 25.09.2012 von Herrn Hiller, Firma ETR-PS GmbH in

Dortmund zur Lieferbarkeit von LuQaS-Sensoren

[Knissel et. al 2011] Knissel, Jens; Großklos, Marc; Werner Johannes: Entwicklung energieeffizien-

ter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes. Teilbericht 2: Theoretische Untersuchungen zur Druckdifferenz-Methode. IWU, Darmstadt,

2011, 89 S.

[AL-KO 2012] Schriftliche Mitteilung am 02.10.2012 von Herrn Patzer, AL-Ko Therm GmbH in

Dortmund zur Lieferbarkeit von LuQaS- und AirQualitizer-Sensoren



[Peper et. al 2007] Peper, Sören, Kah, Oliver; Pfluger, Reiner, Schnieders, Jürgen: Passivhausschu-

le Frankfurt Riedberg; Messtechnische Untersuchung und Analyse; Bericht im Auftrag der Stadt Frankfurt und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Pas-

sivhaus Institut, Darmstadt 2007

[Pfluger 2012] Pfluger, Rainer: Beitrag zu einem Vortrag auf der "Lüft! – Lüftungs, und Haus-

techniksystem, Energieeffizienz, Innenraumluft, Behaglichkeit", Abdruck in

IBO-Magazin 1/12, Wien, 2012

[PHPP] Passivhaus-Projektierungs-Paket 2007, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2007

[Swegon 2012] Produktionformation der Firma Swegon zu Clean Air Control; abgerufen unter

http://www.swegon.com/Global/PDFs/Flow%20control/WISE/\_de/CAC.pdf

am 24.09.2012



# 11 Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Beispiele von Anpassungskurven für den VOC-Messwert: links Clean Air Control der Fa. [Swegon 2012] mit Zusammenhang von Messwert (CAC output in %) und CO <sub>2</sub> -Konzentration; rechts AirQualitizer der Fa. [AL-KO Therm 2012], Ausgabe der Luftqualität als Prozentsatz der mit der Luftqualität unzufriedener Testpersonen	17
Bild 2:	Funktionsschema von Regelungen und Datenerfassung im Forschungsprojekt	18
Bild 3:	Funktionsschema der Luftqualitätsregelung	19
Bild 4:	Schematische Darstellung der Berechnung der Schwellwerte auf Basis des Histogramms der ungestörten VOC-Werte der Abluft: hier Langfristschwellwerte komfortorientierte Betriebsweise für Haus 3 am 27.02.2012	20
Bild 5:	Dasylab-Schaltbild mit allen Hauptmodulen der Luftqualitätsregelung	21
Bild 6:	Schematische Darstellung von komfortorientierter und energieorientierter	
	Betriebsweise	22
Bild 7:	Ablaufplan der Feuchteregelung (links Sommerfall, rechts Winterfall)	23
Bild 8:	Ausschnitt aus Dasylab mit der Feuchteregelung	24
Bild 9:	Ablaufschema der Gesamtregelung	25
Bild 11:	Ablaufschema der Drd-Sequenz	27
Bild 12:	Ausschnitt aus dem Mess- und Regelprogramm: Ansicht der Steuerung der Drd-Sequenz	27
Bild 13:	Berechnung der Nutzerrückmeldung nach Abschluss der Drd-Sequenz	28
Bild 14:	Ansichten des Testraums und der Messtechnik	29
Bild 15:	Korrelation der von der LQ-Regelung berechneten Quellstärke der Verunreinigungslasten im Gebäude mit der Kontrollrechnung mit einer Tabellenkalkulation	30
Bild 16:	Exemplarische Darstellung der Messwerte des Teststandes für Volumenstrom, VOC, Stufe der Regelung und Zulufttemperatur für einen Tag und Reaktion der LQ-Regelung auf Veränderungen der Luftqualität am 17.09.2009	31
Bild 17:	Grundrisse eines der Feldtestgebäude	33
Bild 18:	Ansichten der Feldtestgebäude	34
Bild 19:	Anlagenschema der Feldtestgebäude	38
Bild 20:	Funktionsschema der Messdatenerfassung	40
Bild 21:	Fotos des Schrankes für die Messtechnik bei der Montage in einem der Feldtesthäuser	40
Bild 22:	VOC-Sensoren: links EvaKit in geöffnetem Zustand, rechts M18-Sensor im Zuluftkanal	41
Bild 23:	Einbau der VOC-Sensoren sowie der Temperatur-Feuchtesensoren in den Zimmern in einem Unterputzkasten mit einer Blechabdeckung	42
Bild 24:	Messwerte der Temperaturfühler bei Wandeinbau sowie der Temperatur der Raumluft und Ausgleichsfunktion	43
Bild 25:	Zusammenhang zwischen Messwerten der Raumluftfeuchte sowie korrigierten Werten	43
Bild 26:	Zu- und Ablufttemperaturen in Haus 4, erfasst mit unterschiedlichen Sensoren, für eine Woche im Januar 2012	44
Bild 27:	Verlauf der Monatsmittelwerte der Differenz zwischen Temperaturmessung zusätzlicher Fühler und Standardregelung in Haus 4 für gesamte die Messphase	45



Bild 28:	Übersicht über die aufgetretenen Datenlücken bei den Feldtestgebäuden	46
Bild 29:	Entwicklung der gewichteten mittleren VOC-Konzentration der Zulufträume relativ zum Bezugsmonat des Gebäudes	48
Bild 30:	Entwicklung der gewichteten mittleren VOC-Konzentration der Ablufträume relativ zum Bezugsmonat des Gebäudes	49
Bild 31:	Abweichung der mittleren VOC-Konzentrationen in den Zulufträumen von der Ausgleichsfunktion	50
Bild 32:	VOC-Messwerte der Zuluft (gemessen mit den LuQaS-Sensor) relativ zum Bezugsmonat des jeweiligen Hauses sowie mittlere monatliche Abweichung der VOC-Konzentration der Zuluft vom Mittelwert der gesamten Messperiode	51
Bild 33:	VOC-Konzentration der Zuluft in Haus 4 im Juni/Juli 2011	52
Bild 34:	Zuluftfeuchte und VOC-Werte LuQaS-Sensor in der Zuluft am 25.10.2011 in Haus 1 ohne Betrieb der Wärmepumpe, im Heizbetrieb und bei Warmwasserbereitung	53
Bild 35:	Monatsmittelwerte der VOC-Konzentration in Zu- und Abluft für zwei unterschiedliche Sensorarten sowie die volumenstromgewichteten Mittelwerte der Zu- und Ablufträume	54
Bild 36:	Exemplarische Darstellung der VOC-Messwerte in Ablufträumen und in der Abluft in Haus 1 am 07.02.2012	55
Bild 37:	VOC-Messwerte in ausgewählten Zulufträumen und in der Abluft in Haus 3 vom 23.02 25.02.2012	56
Bild 38:	VOC-Messwerte in ausgewählten Zulufträumen und in der Abluft in Haus 2 vom 10.02 12.02.2012	57
Bild 39:	VOC-Messwerte der Schlafzimmer aller vier Feldtestgebäude für den Zeitraum 01.03.2011 (01.04.2011) - 29.02.2012	58
Bild 40:	Schematische Darstellung von Ausfälle von Bauteilen [Frick 2011]	59
Bild 41:	Einbausituation der VOC-Sensoren in der Zuluft	60
Bild 42:	Zulufttemperatur und –feuchte sowie VOC-Werte M18 und LuQaS-EvaKit in der Zuluft Ende Dezember 2011 in Haus 4 vor Ausfall des M18-Sensors	60
Bild 43:	Verlauf der Monatsmittelwerte der CO2-Konzentration in Haus 3 in den unterschiedlichen Räumen	61
Bild 44:	Montage der $CO_2$ -Fühler auf der Abdeckung der VOC-/Temperatur- und Feuchtemesstechnik	62
Bild 45:	Stundenmittelwerte der CO₂-Konzetration im Schlafzimmer Haus 3	62
Bild 46:	Entwicklung von Kohlendioxid ( ${\rm CO_2}$ )-Konzentration und VOC-Messwerte in Haus 3 für den März 2010	63
Bild 47:	Detailauswertung eines Zeitraumes von 9 Tagen der VOC- und CO <sub>2</sub> -Messwerte im Wohnzimmer	64
Bild 48:	Vergleich der gewichteten Mittelwerte von ${\rm CO_2}$ und VOC im Zeitverlauf für Zu- und Ablufträume	65
Bild 49:	Auszug der Ergebnisse der Überprüfung der Kalibrierung der LuQaS-EvaKit-VOC-Sensoren: links Sensoren in Zu- und Abluft, rechts Sensoren aus Wohn- und Schlafzimmer für alle Feldtestgebäude	66
Bild 50:	Vergleich von sechs LuQaS-Sensoren mit dem AirQualitizer in Büroluft über drei Tage nach Abschluss der Feldphase (Signalpegel bei 0 ppm, 5 ppm und 20 ppm in Klammern)	66



Bild 51:	Beispiel der gemessenen VOC-Werte in der Ab- und Zuluft sowie die Lüftungsstufe für Haus 1 am 01.02.2012 (Drd-Sequenzen eliminiert)	68
Bild 52:	Beispiel der gemessenen VOC-Werte in der Ab- und Zuluft sowie die Lüftungsstufe für Haus 4 am 06.12.2011 (Drd-Sequenzen eliminiert)	69
Bild 53:	Detaildarstellung der Morgenstunden für Haus 4 am 06.12.2011 (Drd-Sequenzen eliminiert)	70
Bild 54:	VOC-Wert Abluft und Lüftungsstufe für Haus 4 vom 20.12.2011 -09.01.2012 mit Urlaubszeit	71
Bild 55:	VOC-Werte Zu- und Abluft und Lüftungsstufe für Haus 1 vom 19.06.2011 - 13.07.2011 mit Urlaubszeit im Sommer	72
Bild 56:	VOC-Wert Abluft und Lüftungsstufe für Haus 1 vom 05.07.2011 - 03.08.2011 nach Ender der Urlaubszeit im Sommer	73
Bild 57:	Darstellung der Lüfterstufen der vier Gebäude im Zeitraum 01.03.2011 bis 29.02.2012 (bzw. jeweils verfügbarer Zeitraum)	74
Bild 58:	Verlauf der VOC-Konzentration in der Abluft Haus 3 vom 1.3.11 bis 31.7.11	75
Bild 59:	Häufigkeitsverteilung der Lüfterstufen zu den unterschiedlichen Stunden des Tages, jeweils für den Zeitraum 01.06.2011 bis 31.05.2012 (außer Haus 4, hier nur von 01.04.2011-23.01.2012, Zeit mit komfortorientierter Betriebsweise)	76
Bild 60:	Lüftungsstufen am 20.04.2010 bei Haus 1 und Darstellung der Effekte der Glättung der Ausgabe durch die Mittelwertbildung bei der Gesamtregelung	77
Bild 61:	Entwicklung der VOC-Messwerte in Zu- und Abluft und Unterschreitung des Schwellwertes für "schlechte" Zuluft	78
Bild 62:	Entwicklung der Schaltschwellen für komfortorientierte Betriebsweise in Haus 1	80
Bild 63:	Entwicklung der Schaltschwellen für komfortorientierte Betriebsweise in Haus 2	81
Bild 64:	Entwicklung der Schaltschwellen für komfortorientierte Betriebsweise in Haus 3	82
Bild 65:	Entwicklung der Schaltschwellen für komfortorientierte Betriebsweise in Haus 4	83
Bild 66:	Entwicklung der Schaltschwellen für energieorientierte Betriebsweise in Haus 4	83
Bild 67:	LQ-Regelung und Gesamtregelung (entspricht Anlagenzustand) über vier Stunden am 06.03.2012 in Haus 2, an denen der Nutzer auf Intensivlüftung geschaltet hat.	85
Bild 68:	Zeitpunkte, zu denen die Nutzer die LQ-Regelung durch Intensivlüftung übersteuert hat sowie die Stufen der LQ-Regelung, Gesamtregelung, Zuluftqualität und Öffnung der Haustür kurz zuvor; Haus 2 im März 2012	86
Bild 69:	Monatssummen Intensivlüftung Haus 1 über Gesamtzeitraum	87
Bild 70:	Monatssummen Intensivlüftung Haus 2 über Gesamtzeitraum	87
Bild 71:	Monatssummen Intensivlüftung Haus 3 über Gesamtzeitraum	88
Bild 72:	Monatssummen Intensivlüftung Haus 4 über Gesamtzeitraum	89
Bild 73:	Auswirkungen auf die berechnete VOC-Konzentration im Gebäude bei Variation des VOC-Messwertes Zuluft; Ist-Wert (0 auf der X-Achse) liegt bei 120 Digits	90
Bild 74:	Auswirkungen auf die berechnete VOC-Konzentration im Gebäude bei Variation des VOC-Messwertes Abluft; Ist-Wert (0 auf der X-Achse) liegt bei 130 Digits	91
Bild 75:	Mittlere Lüftungsstufe bei Betriebsart Komfortlüftung für die vier Feldtestgebäude	92
Bild 76:	Berechneter monatsweiser Lüftungsstromverbrauch der Szenarien 1 und 2	93
Bild 77:	Tatsächlicher Lüftungsstromverbrauch sowie prozentuale Differenz zur Szenario 1	94



Bild 78:	Tatsächlicher Lüftungsstromverbrauch sowie prozentuale Differenz zur Szenario 2	95
Bild 79:	Haus 3: Verlauf der Feuchtemesswerte im Gebäude (unkorrigiert / zu gering) und in der Abluft für drei Wochen im Februar 2010	97
Bild 80:	Haus 3: Korrigierter Verlauf der Feuchtemesswerte im Gebäude und in der Abluft für drei Wochen im Februar 2010	98
Bild 81:	Haus 2: Minimale, mittlere und maximale Luftfeuchtigkeit je Monat	99
Bild 82:	Häufigkeitsverteilung der Abluftfeuchte im Zeitraum Juli 2010 bis Ende Mai 2012 für die vier Gebäude des Feldtests auf Basis von Tagesmittelwerten	100
Bild 83:	Haus 2: Reaktion der Feuchteregelung im Bereich der oberen Schwelle (75 % rel. Feuchte) am 04.09.2011	101
Bild 84:	Ansichten Kanalfühler R3 (links) und AirQualitizer (rechts) [AL-KO 2012]	102
Bild 85:	Vergleich der Messdaten des EvaKits mit dem AirQualitizer	103
Bild 86:	Differenz der Monatsmittelwerte VOC Abluft – VOC Zuluft in Abhängigkeit von der Bezugsdauer des Gebäudes und logarithmische Ausgleichskurven	104
Bild 87:	Vorschlag Funktionsschema vereinfachte LQ-Regelung	106
Bild 88:	Montage der Lüftungsanzeige im Wohnzimmer über dem Bedienteil der Lüftungsanlage/Wärmepumpe	107
Bild 89:	Schaltplan der Lüftungsanzeige	108
Bild 90:	Ansichten der Lüftungsanzeige	109
Bild 91:	Ansicht der zweiflügligen Kastenfenster, links beide Flügel geöffnet, rechts innerer Flügel gekippt und äußerer Flügel geschlossen	111
Bild 92:	Fensteröffnungsdauer der Feldtestgebäude je Fenster und Tag	112
Bild 93:	Zusammenhang von Fensteröffnungsdauer (Summe Fensteröffnung aller Fenster je Stunde) und Außentemperatur für alle vier Gebäude im Feldtest	113
Bild 94:	Geordnete Fensteröffnungsdauern der Feldtestgebäude (rot) und von 21 Passivhäusern der PH-Siedlung Wiesbaden-Dotzheim (blau) für die Kernheizmonate November bis März	114
Bild 95:	Exemplarische Darstellung des Ablaufs einer Drd-Sequenz	115
Bild 96:	Häufigkeit des Differenzdrucks innen-außen für alle vier Gebäude des Feldtests (Betriebszustände, bei denen der Differenzdrucksensor bereits vor der Messung am Messbereichsende angelangt war, wurden nicht berücksichtigt)	116
Bild 97:	Lage der Druckmesstellen Haus 1	117
Bild 98:	Lage der Druckmesstellen in Haus 2, 3 und 4	118
Bild 99:	Verteilung der gemessenen Windgeschwindigkeiten in allen Drd-Sequenzen sowie	
	fehlerhafter Erkennung des Fensteröffnungszustandes	119
Bild 100:	Verteilung der gemessenen Außentemperaturen in allen Drd-Sequenzen sowie fehlerhafter Erkennung des Fensteröffnungszustandes	120
Bild 101:	Verteilung der gemessenen Windrichtungen in allen Drd-Sequenzen sowie fehlerhafte Erkennung des Fensteröffnungszustandes	121
Bild 102:	Anteile der einzelnen Räume des Gebäudes an nicht erkannten offenen Fenstern sowie Anteile der Räume an der Gesamtfensteröffnung (mindestens ein Fenster geöffnet)	122



123
124
125
125
126
126
127
128
129
130
131
132
133
134
134
135
136
138
144
144
149
151
152
13 14 14 14



# 12 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Beteiligte im Forschungsprojekt und Aufgabenverteilung	13
Tab. 2:	Zeitlicher Ablauf des Projektes	15
Tab. 3:	Kurzprofile der Feldtestgebäude	33
Tab. 4:	Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen	35
Tab. 5:	Lage wesentlicher Leckagen an den Feldtestgebäuden	36
Tab. 6:	Messprotokoll der Volumenstrommessung von Haus 1	37
Tab. 7:	Messprotokoll der Volumenstrommessung von Haus 3	37
Tab. 8:	Messprotokoll der Volumenstrommessung in den einzelnen Räumen von Haus 1	37
Tab. 9:	Ergebnisse der Schallpegelmessungen Haus 1	37
Tab. 10:	Übersicht über die verwendeten Sensoren und Messgeräte	39
Tab. 11:	Differenzen zwischen Zusatzfühler und Fühler Standardregelung für Zu- und Ablufttemperatur	45
Tab. 12:	Überblick über die Räume und Messpunkte mit VOC-Sensoren	47
Tab. 13:	Sensorausfälle im Feldversuch	59
Tab. 14:	Quantile für die unterschiedlichen Schwellwerte	84
Tab. 15:	Randbedingungen für Variation der VOC-Sensor-Messwerte	90
Tab. 16:	Übersicht über die Anzahl der Kastenfenster und der konventionellen Fenster mit Drehkippbeschlag	110
Tab. 17:	Kennwerte der Fensteröffnungsdauer der Feldtestgebäude für Winter, Sommer und das gesamte Jahr in Stunden je Fenster und Tag [h/(Fen*d)]	112
Tab. 18:	Anmerkungen der Nutzer in der Befragung	137
Tab. 19:	Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 1 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)	145
Tab. 20:	Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 1 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)	146
Tab. 21:	Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 2 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)	146
Tab. 22:	Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 2 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)	147
Tab. 23:	Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 3 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken ergänzt)	147
Tab. 24:	Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 3 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken ergänzt)	148
Tab. 25:	Jahresverbräuche Elektroenergie für Haus 4 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)	148
Tab. 26:	Endenergie- und Primärenergieverbräuche für Haus 4 in Kilowattstunden je Quadratmeter und Jahr (Lücken wurden ergänzt)	148
Tab. 27:	Absolute Warmwasserverbräuche der Feldtestgebäude in m³ pro Jahr	150
Tab. 28:	Mittlere Warmwasserverbräuche der Feldtestgebäude Liter pro Person und Tag	150



Tab. 29:	Eingestellte Warmwassersolltemperatur Wärmepumpe	en für	die	Erwärmung	mit	Hilfe	der	151
Tab. 30:	Wärmeverbrach Warmwasser [kWh/(m²a)							153
Tab. 31:	Wärmeeinspeisung (ohne Solar) in den Wa	rmwass	erspei	cher [kWh/(m²	²a)]			153



# Anhang A Änderungen an den Regelparametern der LQ-Regelung während des Feldversuchs

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4
März bis August 2010	Optimierungen bei verschiedenen Para- metern und dem Messprogramm			
20.08.2010	Unteren Quantilswert für Schwelle Komfort- lüftung von 0,3 auf 0,25 gestellt; SW_K_u von Hand von 130 auf 125 verändert		Unteren Quantilswert für Schwelle Komfort- lüftung von 0,4 auf 0,25 gestellt	
20.09.2010			Oberer Schwellwert von Hand nach oben korrigiert (von 123 auf 126)	
07.10.10	Unteren Schwellwert von 125 auf 124 ge- setzt			
Anfang November 2010			Bewohner hatten Mess-PC abgeschaltet, da Luftqualität angeb- lich zu schlecht; im November 2010 Anlage im Handbetrieb	
02.12.2010	Unteren Schwellwert von Hand von 121 auf 118 gestellt			
22.12.2010	Regelung vor Weihnachten auf Handbetrieb geschaltet, Langfristschwellen unten von 0,25 auf 0,2 und oben von 0,7 auf 0,8 gestellt  Datenlücke 30.1222.02.	Langfristschwellwert unten von Hand auf 110 gestellt	Obere Schwelle von 132,7 auf 137 gestellt, Schwellwert oben lang von 132 auf 145 und Langfristschwellen unten von 0,25 auf 0,2 und oben von 0,7 auf 0,8 gestellt	
01.03.2011	Berechnungsdauer Histogramm lang von 85 d auf 41 d gestellt			
04.03.2011	Komfortregelung eingeschaltet			
12.04.2011				Start LQ-Regelung komfortorientiert



18.05.2011				Anpassung Langfrist- schwelle oben von 0,5 auf 0,8
07.06.2011	Anpassung Kurzfrist- schwellwert unten von 0,2 auf 0,15	Anpassung Langfrist- schwellwert unten von 0,2 auf 0,1	Anpassung Langfrist- schwellwert unten von 0,2 auf 0,1	Anpassung Langfrist- schwellwert unten von 0,3 auf 0,2 und Lang- fristschwelle oben von 0,8 auf 0,85
15.06.2011				
17.08.2011	Wegen angeblich schlechter Luft im OG Kurzfristschwelle auf Langfristschwelle redu- ziert			
03.09.2011	Kurzfristschwellen nach unten gesetzt			
15.09.2011	Nach Neuberechnung der Kurzfristschwell- werte, Kurz- und Lang- fristschwelle herunter- gesetzt			
15.11.2011		Vereistes Frischluftgit- ter außen, dadurch keine Zuluft vorhanden		
24.01.2012				Umstellung auf ener- gieorientierte Regelung
02.02.2012				LQ-Regelung von M18 auf LuQaS Umstellung und Schwellwerte von Hand angepasst



# Anhang B Verbrauchsdaten der Feldtestgebäude als Monatswerte

Haus 1

					Strom		Strom
	Strom Haushalt	Strom Lüftung	Strom WP	Strom PTC	Direktheizung	Strom WW	Messtechnik
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Jun. 09	176	51	9	0	0	32	101
Jul. 09	168	55	1	0	0	13	103
Aug. 09	150	59	3	0	0	8	102
Sep. 09	178	56	5	0	0	29	100
Okt. 09	170	51	61	0	1	66	107
Nov. 09	255	47	128	0	10	111	102
Dez. 09	254	56	268	0	38	144	113
Jan. 10	240	57	259	134	67	160	111
Feb. 10	199	46	232	65	35	139	100
Mrz. 10	236	50	124	11	12	72	110
Apr. 10	200	45	40	0	0	39	104
Mai. 10	175	45	41	0	5	52	106
Jahressumme	2402	616	1172	210	170	866	1259
Jun. 10	159	49	5	0	0	14	100
Jul. 10	144	51	0	0	0	2	102
Aug. 10	188	47	6	0	3	37	103
Sep. 10	180	37	7	0	124	38	102
Okt. 10	188	37	103	0	205	66	107
Nov. 10	228	39	209	0	139	130	106
Dez. 10	241	40	266	123	37	170	104
Jan. 11	338	50	402	75	16	252	60
Feb. 11	152	45	163	31	7	90	52
Mrz. 11	182	50	123	0	0	53	102
Apr. 11	184	48	18	0	0	34	96
Mai. 11	161	50	8	0	0	17	98
Jahressumme	2346	543	1309	228	532	901	1132
Jun. 11	134	48	7	0	0	27	95
Jul. 11	150	50	7	0	1	42	98
Aug. 11	181	50	7	3	0	33	106
Sep. 11	194	48	10	106	0	32	102
Okt. 11	152	50	53	205	0	56	106
Nov. 11	224	48	133	201	0	99	102
Dez. 11	258	50	194	233	0	140	106
Jan. 12	233	50	267	194	0	138	106
Feb. 12	240	47	245	147	0	134	99
Mrz. 12	212	50	118	151	0	75	106
Apr. 12	185	48	101	64	0	53	102
Mai. 12	181	50	8	24	0	33	106
Jahressumme	2342	591	1151	1328	1	862	1234

kursiv: Datenlücken wurden u. a. auf Basis von Handablesungen hochgerechnet



Haus 2

	Strom Haushalt [kWh]	Strom Lüftung [kWh]	Strom WP [kWh]	Strom PTC [kWh]	Strom Direktheizung [kWh]	Strom WW [kWh]	Strom Messtechnik [kWh]
Jun. 09		43	2	0	2	1	101
Jul. 09	68	44	7	0	1	1	103
Aug. 09	57	39	3	0	1	1	88
Sep. 09	11	7	2	0	0	0	16
Okt. 09	131	31	83	44	5	1	74
Nov. 09	288	43	216	36	7	66	104
Dez. 09	379	43	268	247	16	120	104
Jan. 10	410	46	286	509	44	130	111
Feb. 10	327	40	242	331	42	94	99
Mrz. 10	276	46	190	138	28	44	109
Apr. 10	147	45	79	22	17	16	103
Mai. 10	150	47	98	0	10	1	106
Jahresumme	2245	474	1475	1327	173	476	1117
Jun. 10	147	40	6	0	1	0	101
Jul. 10	140	46	7	0	1	0	103
Aug. 10	159	53	29	0	1	0	105
Sep. 10	172	39	58	0	2	0	102
Okt. 10	237	41	162	33	4	36	107
Nov. 10	209	33	203	144	10	132	106
Dez. 10	245	36	232	588	64	259	105
Jan. 11	237	45	234	390	33	224	102
Feb. 11	212	43	215	310	33	198	94
Mrz. 11	214	48	184	88	12	60	102
Apr. 11	195	47	50	1	1	11	96
Mai. 11	142	42	21	0	1	1	99
Jahresumme	2308	514	1401	1554	162	922	1221
Jun. 11	175	47	27	0	1	1	95
Jul. 11	172	41	29	0	1	0	98
Aug. 11	160	38	13	0	1	0	97
Sep. 11	195	48	25	12	2	0	95
Okt. 11	193	45	92	69	7	41	100
Nov. 11	190	41	206	189	24	112	98
Dez. 11	211	39	250	228	25	201	105
Jan. 12	204	38	247	301	27	200	106
Feb. 12	178	38	226	461	45	170	99
Mrz. 12	179	43	206	29	4	94	101
Apr. 12	131	38	157	12	2	55	97
Mai. 12	142	47	35	1	1	9	98
Jahresumme	2128	502	1513	1303	139	885	1189

Zeitraum enthält Datenlücken, die nicht ergänzt wurden



Haus 3

	Strom Haushalt [kWh]	Strom WP [kWh]	Strom Lüftung [kWh]	Strom PTC [kWh]	Strom Direktheizung [kWh]	Strom WW [kWh]	Strom Messtechnik [kWh]
Aug. 09	173	1	49	0	0	2	98
Sep. 09	177	4	47	0	0	2	95
Okt. 09	170	93	51	2	0	24	101
Nov. 09	171	117	51	3	0	33	101
Dez. 09	170	122	51	3	0	39	101
Jan. 10	194	258	44	28	17	76	97
Feb. 10	225	205	39	5	12	73	89
Mrz. 10	218	111	45	0	7	30	98
Apr. 10	176	57	46	0	0	2	95
Mai. 10	180	58	45	0	0	3	98
Jun. 10	126	1	45	0	0	0	95
Jul. 10	160	1	51	0	0	0	99
ahresumme	2140	1027	564	42	37	283	1164
Jun. 10	126	1	45	0	0	0	95
Jul. 10	160	1	51	0	0	0	99
Aug. 10	179	5	47	0	0	0	99
Sep. 10	156	25	41	0	0	1	96
Okt. 10	180	130	42	0	0	14	97
Nov. 10	205	205	44	1	1	10	84
Dez. 10	245	305	56	86	22	36	88
Jan. 11	231	268	45	7	2	33	88
Feb. 11	183	235	38	24	4	24	79
Mrz. 11	167	97	48	0	0	2	94
Apr. 11	136	16	47	0	0	2	91
Mai. 11	149	1	51	0	0	0	94
ahresumme	2120	1287	556	118	29	121	1104
Jun. 11	154	2	44	0	0	0	91
Jul. 11	158	5	41	0	0	0	94
Aug. 11	181	3	39	0	4	3	94
Sep. 11	176	2	36	0	0	107	91
Okt. 11	183	34	37	0	0	12	94
Nov. 11	172	139	38	1	0	7	91
Dez. 11	225	233	38	4	0	8	94
Jan. 12	217	271	24	8	0	19	94
Feb. 12	188	245	42	25	26	22	88
Mrz. 12	170	104	42	5	0	4	94
Apr. 12	95	138	42	1	0	2	91
Mai. 12	147	19	42	0	0	4	94

*kursiv*: Zeitraum wurde auf Basis von Mittelwerten hochgerechnet Zeitraum enthält Datenlückenvon 10 %, die nicht ergänzt wurden



#### Haus 4

	Strom Haushalt [kWh]	Strom WP [kWh]	Strom Lüftung [kWh]	Strom PTC [kWh]	Strom Direktheizung [kWh]	Strom WW [kWh]	Strom Messtechnik [kWh]
Jun. 11	159	0	29	0	0	2	99
Jul. 11	142	1	37	0	0	4	101
Aug. 11	163	0	50	0	0	2	101
Sep. 11	187	1	49	0	0	7	99
Okt. 11	195	18	43	0	0	22	95
Nov. 11	241	19	50	0	0	45	115
Dez. 11	182	182	41	0	4	67	110
Jan. 12	234	227	44	18	8	72	110
Feb. 12	441	150	42	328	5	56	102
Mrz. 12	217	56	48	0	1	42	104
Apr. 12	172	69	40	0	1	29	102
Mai. 12	138	2	41	0	0	0	101
Jahresumme	2471	725	514	346	18	348	1239



# Anhang C Gesprächsleitfaden – Bewohnerinterviews

#### Allgemeine Zufriedenheit mit dem Passivhaus

- 1. Zufriedenheit mit dem Leben im Passivhaus allgemein
- 1.1. Wie zufrieden sind Sie mit Ihrem Passivhaus ganz allgemein?
- 1.2. Wenn Sie nochmals vor der Wahl stünden, würden Sie sich wieder für ein PH entscheiden?
- 1.3. Würden Sie Ihren Verwandten oder Freunden ein Passivhaus empfehlen?
- 2. Sind Sie über die technischen Besonderheiten des Passivhauses (z.B. Nutzung der Lüftungsanlage; Heizung) ausreichend informiert worden?
- 3. Wie zufrieden sind Sie mit den Energiekosten (auch Strom)?

#### Zufriedenheit mit der Lüftung

- 4. Zufriedenheit mit dem Raumklima
- 4.1. Zufriedenheit mit Raumtemperatur
- 4.1.1. War die Raumtemperatur in Ihrem Haus im vergangenen Winter so wie von Ihnen gewünscht?
- 4.1.2. Wissen Sie, welche Raumtemperaturen Sie in den einzelnen Zimmern hatten?
- 4.2. Zufriedenheit mit der Luftqualität (Frische der Luft)
- 4.2.1. Wie zufrieden sind Sie mit der Luftqualität in Ihrem Haus ganz allgemein?
- 4.2.2. Ist die Luftqualität in allen Räumen gleich gut? Oder gibt es Räume, wo die Luftqualität auffällig abweicht?
- 4.2.3. Wie empfinden Sie die Luftqualität des Gebäudes, wenn Sie es nach Abwesenheit wieder betreten?
- 4.2.4. Gibt es Zeiten oder Situationen, in denen Sie mit der Luftqualität in Ihrem Haus nicht zufrieden sind?
- 4.2.5. Werden Gerüche (z. B. beim Kochen) schnell abgeführt?
- 4.3. Zufriedenheit mit der Luftfeuchtigkeit
- 4.3.1. Wie zufrieden sind Sie mit der Luftfeuchtigkeit in Ihrem Haus/in den einzelnen Zimmern?
- 4.3.2. Messen Sie die Luftfeuchtigkeit mit einem Hygrometer?
- 5. Geräuschentwicklung Lüftungsanlage (siehe auch 8.)
- 5.1. Nehmen Sie regelmäßige Geräuschänderungen der Lüftungsanlage wahr?
- 5.2. Fühlen Sie sich durch die regelmäßigen Geräuschänderungen der Lüftungsanlage gestört?
- 6. Finden Sie, dass Ihre Lüftungsanlage störungsfrei funktioniert?

#### Einstellung der Lüftung

- 7. Individuelle Programmierung/Bedienung
- 7.1. Vermissen Sie die Möglichkeit ein Zeitprogramm zu verwenden?



- 7.2. Hätten Sie gern Eingriffsmöglichkeiten bei der Einstellung Ihrer Lüftungsanlage oder präferieren Sie Automatikbetrieb?
- 8. Subjektive Wahrnehmung der Änderung der Lüftungsstufe
- 8.1. Wie häufig ändert sich bei Ihnen die Lüftungsstufe?
- 8.2. Empfinden Sie die wahrgenommenen Änderungen der Lüftungsstufe als störend? Wenn ja, variiert die empfundene Störung je nach Tages- oder Nachtzeit?
- 8.3. Werden Gerüche schnell abgeführt?
- 9. Partylüftung (Lüftungsstufe 3)
- 9.1. Wie oft und bei welchen Gelegenheiten benutzen Sie die Partylüftung?
- 9.2. Reicht diese für Sie aus (Stärke, Dauer)?

#### Lüftungsanzeige/Drd

- 10. Auswirkungen auf Verhalten
- 10.1. Haben Sie in letzter Zeit Änderungen der Anzeige bemerkt, die Ihre Fensterlüftung rückmeldet? Schauen Sie regelmäßig auf die Anzeige?
- 10.2. Hat sich Ihr Fensteröffnungsverhalten im Passivhaus im Vergleich zu Ihrer früheren Wohnung verändert? Wie lüften Sie Ihr Haus?
- 10.2.1. Hat die Fensteröffnungsanzeige daran einen Einfluss?
- 10.2.2. Empfinden Sie das Nicht-Mehr-Fensteröffnen-Müssen als komfortabel im Vergleich zu früher?
- 11. Funktionalität der Anzeige
- 11.1. Finden Sie die Anzeige über die Auswirkung des Fensteröffnens am Vortag verständlich (insbesondere auch im Hinblick darauf, dass die Fensteröffnungszeit in Abhängigkeit von der Außentemperatur bewertet wird)?
- 11.2. Ist der Zeitraum "Vortag" für Sie geeignet? Wünschen Sie sich mehr Anzeigemöglichkeiten (z.B. letzte Woche, letzter Monat)?
- 11.3. Finden Sie die Anzeige nützlich für Ihr Fensteröffnungsverhalten im Passivhaus?
- 11.4. Wenn Sie sich an Ihre frühere Wohnung zurückerinnern, halten Sie eine solche Anzeige für ein "normales" Haus für nützlich?

#### Verbesserungsvorschläge, Anmerkungen

- 12. Haben Sie Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge bezüglich der Lüftungsanzeige?
- 13. Haben Sie weitere Anmerkungen zu Ihrer Lüftungsanlage oder der Beheizung in Ihrem Haus?



# Anhang D Software Lüftungsanzeige

: Anzeige Lueftungsverhalten4a.bas

'name

Im Folgenden ist die BASCOM-Software dokumentiert, die in der Lüftungsanzeige den anzuzeigenden Wert vom Bus ausliest und entsprechend dem numerischen Wert die LEDs der Balkengrafik schaltet.

: IWU, MG 'copyright : Anzeige des Lüftungsverhaltens über serielle Schnittstelle 'purpose serial INPUT RS485 'micro : Mega8 'suited for demo : yes 'commercial addon needed: no \$regfile = "m8def.dat" ' specify the used micro Declare Sub Setzen(byval Wert As Byte) ' used crystal frequency \$crystal = 3686400 \$baud = 9600 ' use baud rate \$hwstack = 32 ' default use 32 for the hardware stack ' default use 10 for the SW stack \$swstack = 10 \$framesize = 40 ' default use 40 for the frame space Dim S As String \* 16 Dim Wert(16) As Byte At S Overlay Dim Ee\_wert As Eram Byte 'EEPROM Speicherung des Anzeigewertes Dim L\_wert As Byte 'Wert der letzten Einstellung Dim Etx\_jn As Byte , Fertig As Byte Dim I As Byte ' MC Initialisieren Ddrb = &B00111111 'PB0-PB5 Ausgang LED Ddrc = &B00001111 'PCO-PC2 Ausgang LED, PC3-PC5 Eingang Dipschalter Ddrd.2 = 1'für Lesen/schreiben MAX487 Portd.2 = 0'auf Ausgang 0 setzen: MAX 487 im Empfangsmodus Config Com1 = Dummy, Synchrone = 0, Parity = Even, Stopbits = 1, Databits = 7, Clockpol = 0 'letzten Wert aus EEPROM lesen L\_wert = Ee\_wert Call Setzen(I\_wert) 'Interupt für serielle Schnittstelle On Urxc Onrxd **Enable Urxc Enable Interrupts** 

If Fertig = 1 Then 'Auswertung beginnen

'Warten, sonst werden ggf. Zeichen übersprungen, ganz wichtig!!!!

' Endlosschleife

Betriebsanzeige Portb.0 = 1

Waitms 200

Do

Fertig = 0 ' Marker, dass Empfangsstring fertig ist löschen

Etx\_in = 0 ' Marker, dass <ETX> (Ende der Nachricht) löschen

If Wert(1) = Wert(2) Then beide gesendete Adressen gleich



```
If Wert(3) = Wert(4) Then
                                   ' beide gesendete Adressen gleich
  If Wert(4) = "5" Then
                                   ' gesendete und lokale Adresse gleich
  If Wert(5) = &H02 Then
   If Wert(7) = "W" Then
                                   ' Kennung, dass Wert gesendet wird
    'Auswerten
    Call Setzen(wert(8))
    ' in EEPROM speichern
    Ee_wert = Wert(8)
                                   'abspeichern
                                   ' if "W"
   End If
                                   ' if Wert(5) = &H02 <STX>
  End If
                                   ' if Wert(4) ist Standardadresse 5
  End If
                                   'if Wert(3)=Wert(4)
 End If
                                   ' if Wert(1)=Wert(2)
 End If
End If
                                   'if Fertig=1
'S Löschen, da schleife nur einmal durchlaufen werden soll, Fertig ist schon auf 0 gesetzt
Loop
Sub Setzen(byval Wert As Byte)
                                           ' Ausgabe, abhängig vom Zeichen in Wert(8)
   Select Case Val(wert)
                                           ' 1. LED ist immer an (Betriebsanzeige)
   Case 0 : Portb = &B00000001
                                           ' hier werden die Zusatz-LEDs (ab 2.) eingeschaltet
         Portc = &B00000000
                                           ' 0
    Case 1: Portb = &B00000011
         Portc = &B00000000
                                           ' 1
    Case 2 : Portb = &B00000111
                                           ' 2
         Portc = &B00000000
    Case 3 : Portb = &B00001111
                                           ۱3
         Portc = &B00000000
    Case 4 : Portb = &B00011111
                                           ١4
         Portc = &B00000000
    Case 5 : Portb = &B00111111
         Portc = &B00000000
                                           ' 5
    Case 6: Portb = &B00111111
                                           ' 6
         Portc = & B00000001
    Case 7 : Portb = &B00111111
                                           ' 7
         Portc = &B00000011
    Case 8: Portb = &B00111111
         Portc = &B00000111
                                           ' 8
    Case 9 : Portb = &B00111111
                                          ۱9
         Portc = &B00001111
                                    'Portb = &B00000001
   Case Else:
   End Select
End Sub
Onrxd:
'Auswertung Zeichen
 If Etx_jn = 1 Then
                                    ' noch ein Zeichen einlesen<CKS>
  Fertig = 1
                                    ' am Ende der Routine Auswertung anspringen
 End If
 I = Udr
                                   ' UDR wird gelöscht, wenn er abgefragt wurde, deswegen Zwischenvariable
 S = S + Chr(i)
                                    'im Buffer anhängen
 If I = &H04 Then
                                    ' <EOT> alle Verbindungen beenden
   S = ""
                                    ' Beginn der Nachricht, alte Zeichen verwerfen
   Etx_jn = 0
                                    ' Laufvariablen auf 0 setzen
                                    ' Laufvariablen auf 0 setzen
   Fertig = 0
 End If
 If I = &H03 Then
                                    ' <ETX> Ende der Nachricht
  Etx_jn = 1
 End If
Return
```

# Nachmessung SSM-VOC

Borchert Bearbeiter

25 Hausruf 0231-225 398

28 Telefax

0231-225 398

benedikt.borchert@al-ko.de Email

15.10.2012 Erstausgabe 16.10.2012 Änderungsstand

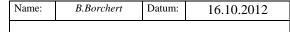


AL-KO Therm GmbH D-44319 Dortmund

# **Bericht**

Nachmessung der IWU SSM-VOC Sensoren

Einleitung	4
Meßgeräte	4
Hilfsmittel	4
Versuchsaufbau	5
Messungen	6
Messung 1 – Sensoren A	6
Messung 2 – Sensoren B	7
Messung 3 – Sensoren C	8
Messung 4 – Sensoren D	9
Eroebnis	10



Filename: 20121015-Nachmessung SSM IWU Rev0.doc





### $\ddot{A}n derungs dokument at ion$

Stand	Beschreibung der Änderung	Ersteller / Bearbeiter
15.10.2012	Erstausgabe	Borchert
16.10.2012	Weiterführung	Borchert

Name:	B.Borchert	Datum:	16.10.2012	Projekt:	
Filename	: 20121015-Nachme	essung SSM	1 IWU Rev0.doc	SSM-VOC	ALRO

# **Einleitung**

Die SSM VOC Sensoren wurden vom IWU nach Erprobung zurückgeschickt. Mit Prüfgas soll die Funktion der Sensoren überprüft werden.

# Meßgeräte

Gasmischer mit Prüfgas (CO; Synth. Luft)

# Hilfsmittel

PC mit Software "SSM-EvaKit V2"

# Durchführung

Die Sensoren wurden an 3 Punkten vermessen. Die Messpunkte lagen bei einer Konzentration von 0ppm, 5ppm und 20ppm CO. 5 ppm CO stellt den damaligen Kalibrierpunkt dar.

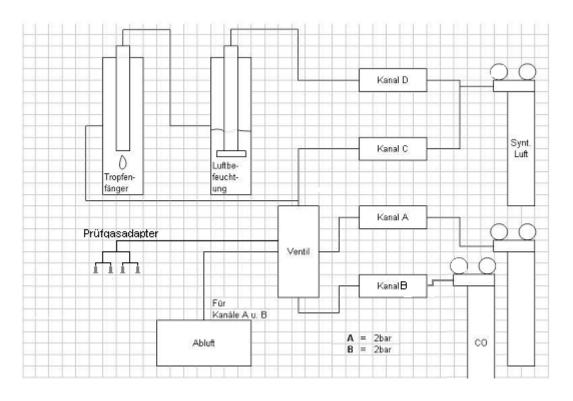
N	ame:	B.Borchert	Datum:	16.10.2012
Fi	lename:	: 20121015-Nachme	ssung SSN	И IWU Rev0.doc



Projekt: SSM-VOC

# Versuchsaufbau

#### Schematischer Aufbau



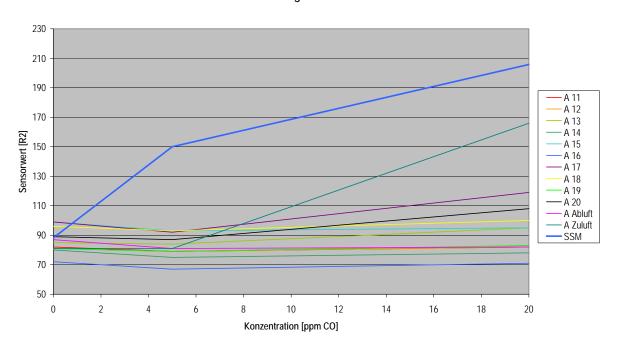
Name:	B.Borchert	Datum:	16.10.2012	Projekt:
Filename	: 20121015-Nachme	SSM-VOC		



# Messungen

Messung 1 – Sensoren A

#### Nachmessung Sensoren IWU



Datei: 20121016 IWU SSM Nachmessung.xls

Name: B.Borchert Datum: 16.10.2012

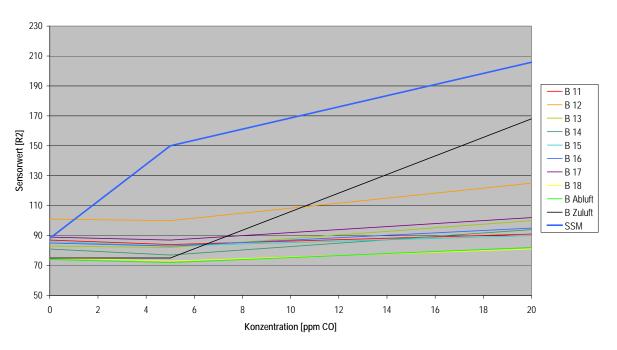
Filename: 20121015-Nachmessung SSM IWU Rev0.doc





# Messung 2 – Sensoren B

### Nachmessung Sensoren IWU



Datei: 20121016 IWU SSM Nachmessung.xls

Name: B.Borchert Datum: 16.10.2012

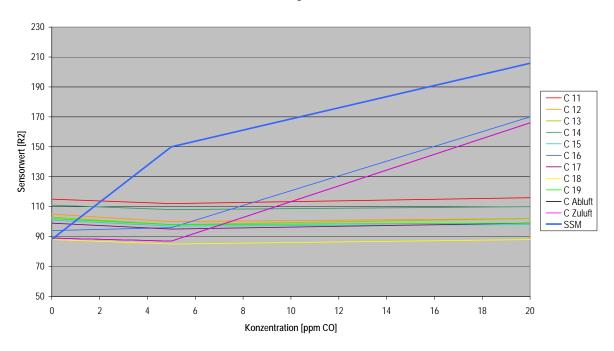
Filename: 20121015-Nachmessung SSM IWU Rev0.doc

Projekt: SSM-VOC



# **Messung 3 – Sensoren C**

#### Nachmessung Sensoren IWU



Datei: 20121016 IWU SSM Nachmessung.xls

Name: B.Borchert Datum: 16.10.2012

Filename: 20121015-Nachmessung SSM IWU Rev0.doc

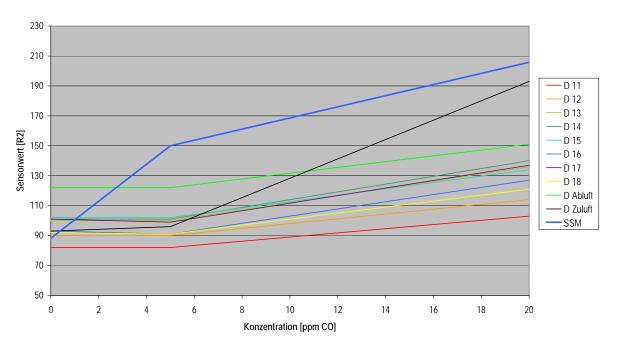
Projekt: SSM-VOC



SSM VOC Seite 9

#### Messung 4 – Sensoren D

#### Nachmessung Sensoren IWU



Datei: 20121016 IWU SSM Nachmessung.xls

Name:	B.Borchert	Datum:	16.10.2012
Filename	: 20121015-Nachme	ssung SSN	И IWU Rev0.doc





SSM VOC Seite 10

### **Ergebnis**

Die Sensoren weichen von der Kalibrierkennlinie ab.

Die Sensoren sprechen auf das Meß-/Kalibriergas CO nur sehr gering an.

In jedem Diagramm ist eine Kalibrierkennlinie "SSM" dargestellt die den typischen Sensorverlauf bei CO zeigt. Diese Werte werden von den Sensoren nicht erreicht.

Bei Raumluft verhalten sich die Sensoren anscheinend normal und liefern übliche Werte. Sie reagieren auf schlechte / gute Luft mit normalen Signalpegeln.

Offenbar haben die Sensoren eine selektive Unempfindlichkeit auf das Meßgas aufgebaut. Um dies Nachzuweisen müssten verschiedene Meßreihen mit unterschiedlichen Meßgasen durchgeführt werden. Dies kann im gegenwärtigen Rahmen der Arbeiten nicht geleistet werden.

Name:	B.Borchert	Datum:	16.10.2012

Filename: 20121015-Nachmessung SSM IWU Rev0.doc







Schellingstraße 4/2 72072 Tübingen Tel. 0 70 71 93 94 0 Fax 0 70 71 93 94 99 www.eboek-institut.de info@eboek-institut.de

# Luftdurchlässigkeitsmessungen Haus 1

Erstellt im: Juni 2012

im Auftrag von: Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt

Bearbeitung: Dipl.-Phys. Johannes Werner

Prof. Dr. Claus Kahlert

### Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Angaben	1
Aufgabenstellung	1
Untersuchtes Objekt	1
Vorhandene Unterlagen	
Heizung und Lüftung	
Datum der Messung	
Anwesende Personen	
7.1.1.000.100 1.01.001.01.11.11.11.11.11.11.11.11.11.1	
2 Luftdurchlässigkeitsmessung	2
2.1 Normen	2
2.2 Beschreibung der Messung	
Untersuchter Gebäudeteil	
Luftdichtende Bauteilschichten	2
Zustand des Gebäudes zum Messzeitpunkt	2
Gebäudepräparation	2
Bezugsgrößen	3
Lokalisieren von Undichtigkeiten	3
Quantitative Messung	3
2.3 Ergebnisse und Anforderungen	4
Undichtigkeiten	
Quantitative Ergebnisse	
Anforderungen	5
2.4 Bewertung	5
Energieeinsparverordnung	5
DIN 4108, Teil 7	
Zertifizierungskriterium Passivhausinstitut	

Empfehlungen	6
2.5 Hinweise auf kleinere Leckagen	6
Generelle	6
Einzelne	7
Anhang	8
A Wetterdaten	8
B Bezugsgrößen	9
C Messdaten und Auswertung Verfahren A	11
D Leckagekurve Verfahren A	12



# 1 Allgemeine Angaben

#### Aufgabenstellung

Luftdurchlässigkeitsmessung einschließlich Lokalisieren von Leckagen

#### **Untersuchtes Objekt**

Haus 1

Baujahr 2009

#### Vorhandene Unterlagen

Vermaßte Architekten-Pläne 1:100 vom Juli 2009

#### Heizung und Lüftung

Das Haus wird durch eine Frischluftheizung beheizt. Das Lüftungsgerät steht im Hautechnikraum DG innerhalb des belüfteten und beheizten Gebäudevolumens.

Wärmequelle sind eine im Lüftungsgerät integrierte Wärmepumpe sowie elektrische Nachheizregister in Kanälen und Zuluftdurchlässen einzelner Räume.

Innerhalb des Gebäudes gibt es keinen weiteren Wärmeerzeuger.

#### **Datum der Messung**

20. Juni 2012

#### **Anwesende Personen**

Bewohner,

Claus Kahlert und Johannes Werner, ebök, für die Messung.



# 2 Luftdurchlässigkeitsmessung

#### 2.1 Normen

Die Messung wurde nach der Norm DIN EN 13829 vom Februar 2001 durchgeführt. Die Gebäudepräparation erfolgte nach dem in der Norm beschriebenen Verfahren A — Test des Gebäudes im Nutzungszustand –.

### 2.2 Beschreibung der Messung

#### Untersuchter Gebäudeteil

Das gesamte Gebäude war Gegenstand der Untersuchung.

#### Luftdichtende Bauteilschichten

Boden gegen Erdreich: Beton

Außenwände: System Schwörer Passivhaus

 Dach: Folie unter der Dachkonstruktion mit innenseitigen Konterlatten fixiert. Die Dachflächen sind innenseitig mit Nut-Feder-Schalung verkleidet.

#### Zustand des Gebäudes zum Messzeitpunkt

Das gesamte Gebäude war fertig gestellt und seit mehreren Jahren bewohnt.

#### Gebäudepräparation

Die Fenster und die Außentüren wurden geschlossen, alle Innentüren geöffnet.

Die Lüftungsanlage wurde ausgeschaltet, da der Außen- und Fortluftkanal in der Ebene der luftdichten Hülle nur schwer zugänglich ist, erfolgte die Abdichtung mittels Klebeband im Zentralgerät.







Zur Messung wurde ein Gebläse in die linke Terrassentür im Wohnbereich EG eingesetzt.

#### Bezugsgrößen

Die Bezugsgrößen (Volumen und Hüllfläche) wurden nach den vorliegenden Plänen ermittelt (s. Anhang).

Aus den in den Plänen angegebenen Raumflächen und den zugehörigen Geschosshöhen ergibt sich ein belüftetes Gebäudevolumen von 450,72 m³.

#### Lokalisieren von Undichtigkeiten

Bei etwa 50 Pa Unterdruck im Gebäude wurden kritische Bereiche mit der Hand auf Undichtigkeiten untersucht. Die festgestellten Lecks wurden protokolliert.

#### **Quantitative Messung**

Mit dem Gebläse wurde im Gebäude ein Differenzdruck zur Außenluft erzeugt. Bei unterschiedlichen Druckdifferenzen wurde jeweils der geförderte Volumenstrom gemessen. Durch Ausgleichsrechnung erhält man den Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz.



Diese Messung wurde bei Unter- und Überdruck durchgeführt.

Durch Mittelung der Ergebnisse bei Unter- und Überdruck erhält man den Leckagestrom, d.h. den Volumenstrom bei 50 Pa. Dieser wird durch das lichte Gebäudevolumen dividiert, um die Luftwechselrate bei 50 Pascal,  $n_{50}$ , zu berechnen.

Die Messdaten und deren Auswertung sind im Anhang dargestellt.

## 2.3 Ergebnisse und Anforderungen

#### Undichtigkeiten

Die Situation an folgenden Leckagen sollten vor der nächsten Heizperiode verbessert werden:

- Die Haustür schließt nicht mehr dicht, ein Nachstellen der Beschläge kann eine deutliche Besserung erbringen.
- Die Revisionsöffnung im Außenluftkanal ist nicht dicht, damit wird auch Luft aus dem Haustechnikraum angesaugt.





#### **Quantitative Ergebnisse**

Die Kenngrößen nach Verfahren A sind:

Leckagestrom

 $\dot{V}_{50} = 270 \text{ m}^3/\text{h}$ 



Dies entspricht einer Leckfläche von etwa  $A_{50} = 135 \text{ cm}^2$ 

Luftwechselrate bei 50 Pascal  $n_{50} = 0,60 \text{ h}^{-1}$ 

Die Messunsicherheit beträgt typischerweise  $\pm$  10 %.

### Anforderungen

Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 und von DIN 4108, Teil 7 gelten als erfüllt, wenn bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen die Luftwechselrate bei 50 Pascal nicht größer als 1,5 h<sup>-1</sup> ist. Die Norm verlangt außerdem, dass die Luftdurchlässigkeit nicht mehr als 3,0 m³/(h m²) beträgt. Außerdem wird in der Norm für raumlufttechnische Anlagen mit Wärmerückgewinnung eine deutliche Unterschreitung des Grenzwertes empfohlen, die aktuelle Ausgabe vom Januar 2011 empfiehlt einen Wert von maximal 1,0 h<sup>-1</sup>. Ein nach Richtlinie des Passivhausinstituts zertifizierbares Gebäude muss einen Grenzwert von maximal 0,6 h<sup>-1</sup> einhalten.

### 2.4 Bewertung

#### Energieeinsparverordnung

Die Anforderungen der EnEV bezüglich Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle werden eingehalten.

#### **DIN 4108, Teil 7**

Der Grenzwert nach DIN 4108-7, Verfahren A, wird eingehalten.

#### Zertifizierungskriterium Passivhausinstitut

Der Grenzwert des Passivhausinstituts wird eingehalten.

#### **Empfehlungen**

S.O.



# 2.5 Hinweise auf kleinere Leckagen

#### Generelle

 Lufteintritt an der Durchführung der Betätigungskette des Sonnenschutzrollos nach Innen aus dem Zwischenraum der Kastenfenster. Die strömungsoffene Fläche liegt jeweils zwischen 0,5 und 1 cm².



• Leichter Lufteintritt im Bereich der Elektroinstallation.









#### Einzelne

• Bemerkenswerte einzelne Leckagen traten nicht auf.

Tübingen, den 20. Juni 2012 ebök Institut für angewandte Effizienzforschung GmbH gez. Dipl.-Phys. Johannes Werner



# **Anhang**

# A Wetterdaten

Windstärke während der Messung: windstill



# B Bezugsgrößen

Volumenberechnung						
	Länge	Breite	Fläche	Höhe 1	Höhe 2	Volumen
	m	m	m²	m	m	m³
EG						
Wohnen/Essen			29,790	2,6		77,45
Küche			8,690	2,6		22,59
HWR			7,800	2,6		20,28
Windfang			5,910	2,6		15,37
WC EG			0,000	2,6		0,00
Diele	3,161	3,482	11,007	2,6		28,62
Zwischensumme EG			63,197			164,31
OG						
Kind 1			12,610	2,56		32,28
Kind 2			11,330	2,56		29,00
Abstellraum			2,490	2,56		6,37
Schlafen			15,310	2,56		39,19
Bad OG			7,410	2,56		18,97
Flur	3,161	3,482	11,007	2,56		28,18
Zwischensumme OG			60,157			154,00
DG						
Brutto Innen	6,045	10,366	62,662	0,38	3,93	135,17
Wand 1 Du/WC	-2,314	0,212	-0,491	2	2,00	-0,98
Wand 2 Du/WC	-2,314	0,212	-0,491	0,38	2,00	-0,58



TW Studio/Technik	-4,320	0,122	-0,527	0,38	1,93	-0,61
TW Studio/Technik	-1,697	0,122	-0,207	0,38	1,93	-0,24
TW	-6,844	0,122	-0,835	0,38	0,47	-0,35
Trp/Studio+Technik						
			0,000	0,38	0,38	0,00
			0,000	0,38	0,38	0,00
Zwischensumme DG			60,112			132,41
Summe			183,465			450,72



# C Messdaten und Auswertung Verfahren A

Auswertung von Drucktests

letzte Anderung des Arbeitsblatts: e b ö k, Tübingen

11.01.2000

Umrechnungsfaktor: 1 CFM = 1,6990106 m3/h 0 °C = 273,16 K Kalibrierwerte des Gebläses:

Anzahl ver-schlos-Strö-Strö-Strömungs-exponent mungs-koeffimungs-koeffisene Löcher [CFM/Pa] [m3/(h\*Pa)] [1] [1] 0,5 0,5 0,5 0,5 108,50 184,34 70,37 26,84 10,75 41,42 15,80 1 2 3

Auswertung Drucktest

Auftraggeber:

e b ö k GbR Schellingstr. 4/2 72072 Tübingen Auftragnehmer:

Johannes Werner Objekt: Bearbeiter: Haus 1

Auswertung: 04.10.12 20.06.2012 450,7 m3 Datum der Messung: Gebäudevolumen Gebäudehüllfläche Minneapolis Duct Blaster Series B Ausrüstung: m2 17 °C 23 °C Außentemperatur Innentemperatur Genauigkeit: 3% Luftdruck 989 hPa Meereshöhe: m

Bemerkungen Regen, windstill Haustür verriegelt

äquivalente Leckfläche bei 50 Pa

UNTERDRUCK Differenzdruck am Gebäude	gemessener Druck am Gebläse	Volumenstrom- Reduzierung	Volumenstrom (unkorrigiert)	ÜBERDRUCK Differenzdruck am Gebäude	gemessener Druck am Gebläse	Volumenstrom- Reduzierung	Volumenstrom (unkorrigiert)
[Pa]	[Pa]		[m3/h]	[Pa]	[Pa]		[m3/h]
18 32,5 42,7 52,7 61,6 73,3 24,5 UNTERDRUCK	20,8 51,4 76,3 104,2 132,3 167,7 34,3	2 2 2 2 2 2 2 2 2	192 234 274 309 348		64,8 89,6 107,3	2 2 2 2 2 2 2 2 2	165 216 254 278 300
Strömungsexpone Koeffizient Koeff. korrigiert Standardabweich Kennwerte bei 50 Leckagestrom Luftwechsel Hüllflächenbezoge	ung Pa:	14,7 1,2	m3/(h*Pa) m3/(h*Pa) m3/h m3/h 1/h m/h			21,0 1,1	m3/(h*Pa) m3/(h*Pa) m3/h m3/h 1/h m/h
1	ber- und Unterdru Leckagestrom be Luftwechselrate b Luftdurchlässigke	i 50 Pa ei 50 Pa	V <sub>50</sub> n <sub>50</sub> q <sub>50</sub>	0,60	m3/h 1/h m/h		

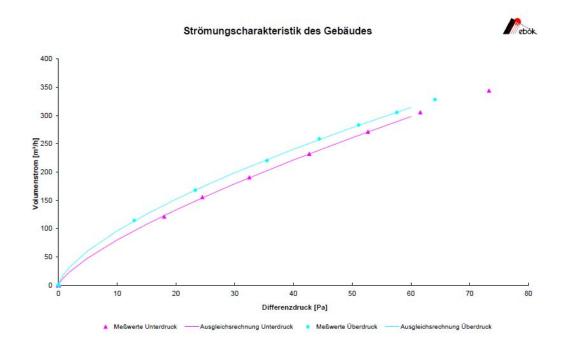
135 cm<sup>2</sup>

=(

12 cm)<sup>2</sup>



# D Leckagekurve Verfahren A





Schellingstraße 4/2 72072 Tübingen Tel. 0 70 71 93 94 0 Fax 0 70 71 93 94 99 www.eboek-institut.de info@eboek-institut.de

# Luftdurchlässigkeitsmessungen Haus 2

Erstellt im: Juni 2012

im Auftrag von: Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt

Bearbeitung: Dipl.-Phys. Johannes Werner

Prof. Dr. Claus Kahlert



#### Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Angaben	1
2 Luftdurchlässigkeitsmessung	2
2.1 Normen	2
2.2 Beschreibung der Messung	2
2.3 Ergebnisse	4
Anforderungen	9
2.4 Bewertung	9
Anhang	11
A Wetterdaten	11
B Bezugsgrößen	12
C Messdaten und Auswertung Haustür unverriegelt	13
D Leckagekurve Haustür unverriegelt	14
E Messdaten und Auswertung Haustür verriegelt	15
F Leckagekurve Haustür verriegelt	16



# 1 Allgemeine Angaben

#### Aufgabenstellung

Luftdurchlässigkeitsmessung einschließlich Lokalisieren von Leckagen

#### **Untersuchtes Objekt**

Haus 2

Baujahr 2009

#### Vorhandene Unterlagen

Vermaßte Architekten-Pläne 1:100 vom Oktober2008

Vermasste Grundrisse EG und OG, Schwörer Haus KG vom Februar 2009

#### **Heizung und Lüftung**

Das Haus wird durch eine Frischluftheizung beheizt. Das Lüftungsgerät steht im UG, außerhalb des belüfteten und beheizten Gebäudevolumens.

Wärmequelle sind eine im Lüftungsgerät integrierte Wärmepumpe sowie elektrische Nachheizregister in Zuluftdurchlässen einzelner Räume.

Innerhalb des Gebäudes gibt es keinen weiteren Wärmeerzeuger.

#### **Datum der Messung**

18. Juni 2012

#### **Anwesende Personen**

Bewohner,

Claus Kahlert und Johannes Werner, ebök, für die Messung.



# 2 Luftdurchlässigkeitsmessung

#### 2.1 Normen

Die Messung wurde nach der Norm DIN EN 13829 vom Februar 2001 durchgeführt. Die Gebäudepräparation erfolgte nach dem in der Norm beschriebenen Verfahren A — Test des Gebäudes im Nutzungszustand –.

### 2.2 Beschreibung der Messung

#### Untersuchter Gebäudeteil

Es wurde das gesamte Gebäude mit folgenden Ausnahmen untersucht:

UG komplett: außerhalb der luftdichten Gebäudehülle

#### Luftdichtende Bauteilschichten

Boden gegen UG: Beton

Außenwände: System Schwörer Passivhaus

• Dach: Folie

#### Zustand des Gebäudes zum Messzeitpunkt

Das gesamte Gebäude war fertig gestellt und seit mehreren Jahren bewohnt.

#### Gebäudepräparation

Die Fenster und die Außentüren wurden geschlossen.

Die Türen zu den Abseiten neben den 4 Räumen im DG wurden geöffnet.

Die Außentür des UG wurde geöffnet.

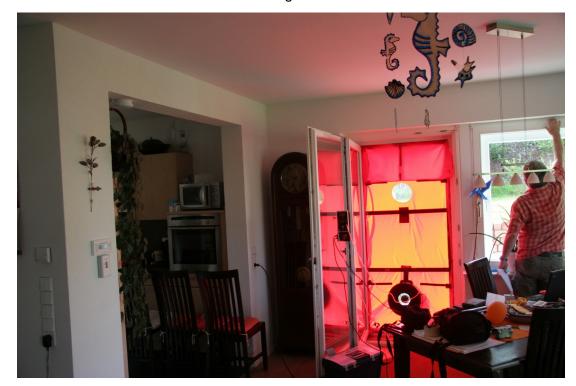
Die Lüftungsanlage wurde ausgeschaltet, der Außen- und Fortluftkanal wurde durch je einen aufgeblasenen Ballon an der Außenwanddurchführung abgedichtet.







Zur Messung wurde ein Gebläse in die südorientierte, einflügelige und geöffnete Terrassentür neben der Küche im EG eingesetzt.



### Bezugsgrößen

Die Bezugsgrößen (Volumen und Hüllfläche) wurden nach den vorliegenden Plänen ermittelt (s. Anhang).



#### Lokalisieren von Undichtigkeiten

Bei etwa 50 Pa Unterdruck im Gebäude wurden kritische Bereiche mit der Hand auf Undichtigkeiten untersucht. Die festgestellten Lecks wurden protokolliert.

#### **Quantitative Messung**

Mit dem Gebläse wurde im Gebäude ein Differenzdruck zur Außenluft erzeugt. Bei unterschiedlichen Druckdifferenzen wurde jeweils der geförderte Volumenstrom gemessen. Durch Ausgleichsrechnung erhält man den Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz.

Diese Messung wurde bei Unter- und Überdruck durchgeführt.

Durch Mittelung der Ergebnisse bei Unter- und Überdruck erhält man den Leckagestrom, d.h. den Volumenstrom bei 50 Pa. Dieser wird durch das lichte Gebäudevolumen dividiert, um die Luftwechselrate bei 50 Pascal,  $n_{50}$ , zu berechnen.

Die Messdaten und deren Auswertung sind im Anhang dargestellt.

## 2.3 Ergebnisse

#### Undichtigkeiten

Folgende Lufteintrittstellen wurden bei der Messung festgestellt:

• Schließfuge der Hauseingangstür im EG und zwar jeweils ca. 20 cm weit horizontal und vertikal von der oberen Türecke auf Seite des Schließblechs.



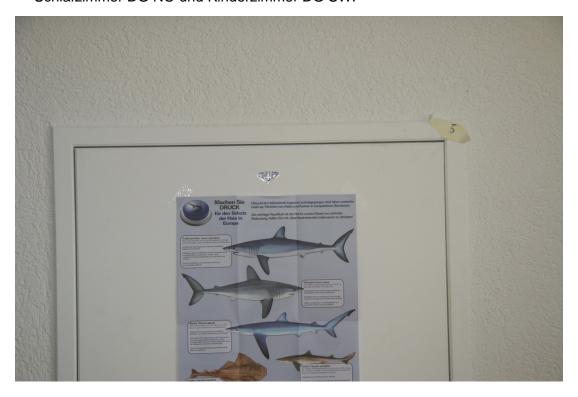


• Durchführung der Betätigungskette des Sonnenschutzrollos im Zwischenraum aller Kastenfenster (Leckfläche je ca 0,5 cm²).





- An der Abdeckmanschette unter dem Waschtisch im Bad EG.
- Sehr leichter Luftaustritt aus den geöffneten Türen zur Abseite neben Bad DG, Schlafzimmer DG NO und Kinderzimmer DG SW.



- Leichter Luftaustritt aus der geöffneten Abseitentür neben Kinderzimmer DG SO.
- Sehr leichter Luftaustritt aus Abluftventil Badezimmer DG.





• Luftströmung durch ein unverschlossenes Elektro-Leerrohr vom Elektroverteiler im Hauwirtschaftsraum EG zum Keller UG..

#### **Quantitative Ergebnisse**

Die Kenngrößen nach Verfahren A sind:

Leckagestrom  $\dot{V}_{50} = 197 \text{ m}^3/\text{h}$ 

Dies entspricht einer Leckfläche von etwa  $A_{50} = 99 \text{ cm}^2$ 

Luftwechselrate bei 50 Pascal  $n_{50} = 0,56 h^{-1}$ 

Mit geschlossener Verriegelung der Haustür wurde eine weitere Messreihe mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

Leckagestrom  $\dot{V}_{50} = 190 \text{ m}^3/\text{h}$ 

Dies entspricht einer Leckfläche von etwa  $A_{50} = 95 \text{ cm}^2$ 

Luftwechselrate bei 50 Pascal  $n_{50} = 0.54 h^{-1}$ 



Die Messunsicherheit beträgt typischerweise  $\pm$  10 %.

#### Abschätzung Volumenstrom durch Leerrohr zum Keller UG

Der lichte Leerrohrdurchmesser beträgt rund 30 mm. Bei einer Druckdifferenz von rund 60 Pa wurde am Austritt im Keller mittels Thermoanemometer eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von rund 3,5 m/s festgestellt. Daraus berechnet sich ein Volumenstrom von 8,9 m³/h.

#### Abschätzung Volumenstrom aus Abseite neben Raum SO DG

Zur quantitativen Abschätzung des Leckvolumenstroms aus der Abseitentür wurde die Tür so weit geschlossen, dass an der Vorderkante ein Spalt von rund 5 mm Breite und 95 cm Höhe entstand. Daraus resultiert eine offen Spaltfläche von 95 cm \* 0,5 cm = 47,5 cm<sup>2</sup>

An der Oberkante und Unterkante resultierte daraus eine dreiecksförmige offene Fläche von 61 cm Länge und einer Höhe von 5 mm, die zur Angel hin auf 0 mm abnahm. Daraus resultiert eine offen Spaltfläche von 2 \* 61 cm \* 0,5 cm \* 0,5 = 30,6 cm².





Bei einem Differenzdruck über der Gebäudehülle von 50 Pa wurde mittels Thermoanemometer eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0,55 m/s bestimmt. Der Volumenstrom beträgt dann (47,5 cm² + 30,6 cm²) \* 0,55 m/s = 15,5 m³/h.

Die beiden Lecks machen in der Summe etwa 12% des gesamten Leckagestroms aus.

### Anforderungen

Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 und von DIN 4108, Teil 7 gelten als erfüllt, wenn bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen die Luftwechselrate bei 50 Pascal nicht größer als 1,5 h<sup>-1</sup> ist. Die Norm verlangt außerdem, dass die Luftdurchlässigkeit nicht mehr als 3,0 m³/(h m²) beträgt. Außerdem wird in der Norm für raumlufttechnische Anlagen mit Wärmerückgewinnung eine deutliche Unterschreitung des Grenzwertes empfohlen, die aktuelle Ausgabe vom Januar 2011 empfiehlt einen Wert von maximal 1,0 h<sup>-1</sup>. Ein nach Richtlinie des Passivhausinstituts zertifizierbares Gebäude muss einen Grenzwert von maximal 0,6 h<sup>-1</sup> einhalten.

### 2.4 Bewertung

#### Energieeinsparverordnung

Die Anforderungen der EnEV bezüglich Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle werden eingehalten.

#### **DIN 4108, Teil 7**

Der Grenzwert nach DIN 4108-7, Verfahren A, wird eingehalten.

#### Empfehlungen

Die Beschläge der Hautür sollten bei Gelegenheit kontrolliert und nachgestellt werden.



Das Leerrohr für die Elektroinstallation zum Keller sollte am unteren Ende verschlossen werden, um eine teilweise Belüftung des Gebäudes aus Keller und Garage auszuschließen.

Tübingen, den 18. Juni 2012 ebök Institut für angewandte Effizienzforschung GmbH

gez. Dipl.-Phys. Johannes Werner



# **Anhang**

### **A Wetterdaten**

Windstärke während der Messung: 1 bis 2 Beaufort

Natürliche Druckdifferenz vor der Messung: -2,4 Pa

nach der Messung: -1,8 Pa

Mittelwert (gerundet): -2,1 Pa



# B Bezugsgrößen

#### Volumenberechnung

Dachneigung 35 ° Maßstab Plan 0,73

	Länge				Höhe 2	Volumen
UG	m	m	m²	m	m	m³
			0,000	0		0,00
			0,000	0		0,00
Zwischensumme U	G		0,000			0,00
<b>50</b>						
EG Raum NW			8,240	2.6		21 42
Diele + Treppe			16,030	2,6 2,6		21,42 41,68
Raum NO			0,000	2,6		0,00
Raum O			10,770	2,6		28,00
Wohnen Süd			36,720	2,6		95,47
Du/WC			4,150	2,6		10,79
Zwischensumme E	G		75,910	2,0		197,37
			. 0,0.0			,
DG						
Bad Schräge			4,766	1,24	2,56	9,06
Bad hoch			4,384	2,56	2,56	11,22
Abseite Bad			2,970	0,48	1,24	2,56
Flur			3,950	2,56	2,56	10,11
Treppe			3,620	0,48	2,56	5,50
Raum NO schräg	4,788	1,5	7,182	1,24	2,56	13,65
Raum NO hoch	3,496	2,034	7,111	2,56	2,56	18,20
Abseite NO			5,260	0,48	1,24	4,52
Raum SO schräg			8,430	1,24	2,56	16,02
Raum SO hoch			8,430	2,56	2,56	21,58
Abseite SO			5,240	0,48	1,24	4,51
Raum SW schräg			6,995	1,24	2,56	13,29
Raum SW hoch			6,995	2,56	2,56	17,91
Abseite SW			4,350	0,48	1,24	3,74
Zwischensumme D	G		79,683			151,87
Summe			155,593			349,23



# C Messdaten und Auswertung Haustür unverriegelt

Auswertung Dr	ucktest						<b>M</b> ebők
Auftraggeber:	IWU			Auftragnehmer:		e b ö k GbR Schellingstr. 4/2 72072 Tübinge	
Objekt:	Haus 2			Bearbeiter:		Johannes Werr	ner
Datum der Mes Gebäudevolum Gebäudehüllflä Außentemperat Innentemperatu Luftdruck	nen iche tur	18 24		Auswertung: Ausrüstung: Genauigkeit: Meereshöhe:		19.06.12 Minneapolis Duct Blaster Series B 3 %	m
Bemerkungen	Abseiten alle au Kabeldurchführt Blätter und Gras	•					
UNTERDRUCK Differenzdruck am Gebäude	gemessener Druck am Gebläse	Volumenstrom- Reduzierung	Volumenstrom (unkorrigiert)	1		Volumenstrom- Reduzierung	Volumenstrom (unkorrigiert)
[Pa]	[Pa]		[m3/h]		[Pa]		[m3/h]
57,1 49,8 40,1 31 26,8 21,5 12,8	333 238 167 3 129,5 5 90	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	213 196 166 139 122 102 66	   59,8   48   35,5   29,9   24,2   15,5	288 194,5 149,8 115	3 3 3 3	212 183 150 132 115 85
UNTERDRUCK	<b>&lt;</b>			I   ÜBERDRUCK			
Ergebnis der A	usgleichsrechnur	ng:		 			
Strömungsexpo Koeffizient Koeff. korrigiert Standardabwei Kennwerte bei Leckagestrom Luftwechsel Hüllflächenbeze	t chung 50 Pa:	9,9 2,6	m3/(h*Pa) m3/(h*Pa) m3/h m3/h 1/h m/h	 		22,8 22,4	m3/h
	: Über- und Unter	druckmessuna:					
	Leckagestrom b	-	V <sub>50</sub>	197	m3/h		
	Luftwechselrate	bei 50 Pa	n <sub>50</sub>	0,56	1/h		
	Luftdurchlässigk	ceit bei 50 Pa	q <sub>50</sub>	-	m/h		

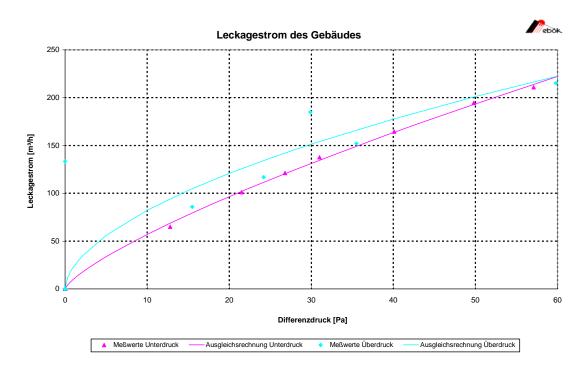
 $A_{50}$ 

äquivalente Leckfläche bei 50 Pa

10 cm)<sup>2</sup>



# D Leckagekurve Haustür unverriegelt





# E Messdaten und Auswertung Haustür verriegelt

e b ö k GbR Schellingstr. 4/2 72072 Tübingen Auftraggeber: IWU Auftragnehmer:

m

Objekt: Bearbeiter: Johannes Werner Haus 2

Auswertung: 19.06.12 18.06.2012 Ausrüstung: Datum der Messung: Minneapolis Gebäudevolumen 349,2 m3 Duct Blaster Gebäudehüllfläche m2 Series B Außentemperatur 18 °C Genauigkeit: 3 % Innentemperatur 24 °C 991 hpA

Meereshöhe:

Bemerkungen Abseiten alle auf

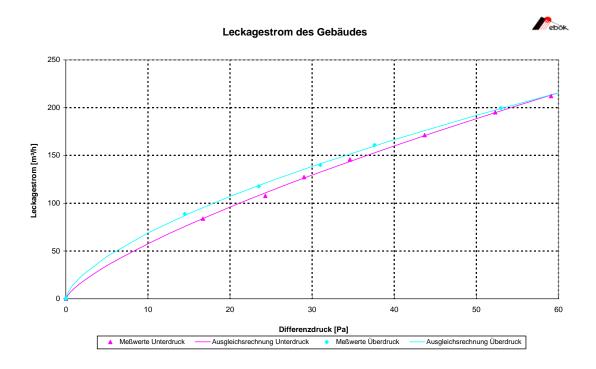
Luftdruck

Tür abgeschlossen, noch leicht undicht oben

UNTERDRUCK Differenzdruck gemessene am Gebäude Druck am Gebläse		Volumenstrom (unkorrigiert)	ÜBERDRUCK Differenzdruck am Gebäude		Volumenstrom- Reduzierung	Volumenstrom (unkorrigiert)
[Pa] [F	Pa]	[m3/h]	।   [Ра]	[Pa]		[m3/h]
	3	3			3	
59,1 3	96 3	3 214	61,3	399	3	215
52,3	35 3	3 197	53	332	3	196
43,7	58 3	3 173	37,6	216	3	158
- ,-	87 3		•			
	43 3		-/-	- /-		
, -	02 3		14,5	65,7		
16,7	62 3		!		3	
	3				3	
	3				3	
	3		l I		3	
UNTERDRUCK			UBERDRUCK			
Ergebnis der Ausgleichsrech	nung:		   			
Strömungsexponent	0,737		İ		0,637	
Koeffizient	10,6	m3/(h*Pa)	İ		15,6	m3/(h*Pa)
Koeff. korrigiert	10,5	m3/(h*Pa)	İ		15,9	m3/(h*Pa)
Standardabweichung	1,7	m3/h	1		1,2	m3/h
Kennwerte bei 50 Pa:			[			
Leckagestrom		m3/h	[			m3/h
Luftwechsel	0,54		!		0,55	
Hüllflächenbezogen	-	m/h	I		-	m/h
Mittelwerte aus Über- und U	•					
Leckagestro	m bei 50 Pa	V <sub>50</sub>	190	m3/h		
Luftwechseli	ate bei 50 Pa	n <sub>50</sub>	0,54	1/h		
Luftdurchläs	sigkeit bei 50 Pa	q <sub>50</sub>	-	m/h		
äquivalente	Leckfläche bei 50 Pa	A <sub>50</sub>	95	cm² =	( 10	cm) <sup>2</sup>



# F Leckagekurve Haustür verriegelt





Schellingstraße 4/2 72072 Tübingen Tel. 0 70 71 93 94 0 Fax 0 70 71 93 94 99 www.eboek-institut.de info@eboek-institut.de

# Luftdurchlässigkeitsmessungen Haus 3

Erstellt im: Juni 2012

im Auftrag von: Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt

Bearbeitung: Dipl.-Phys. Johannes Werner

Prof. Dr. Claus Kahlert



## Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Angaben	1
2 Luftdurchlässigkeitsmessung	2
2.1 Normen	2
2.2 Beschreibung der Messung	2
2.3 Ergebnisse und Anforderungen	4
Anforderungen	4
2.4 Bewertung	5
2.5 Hinweise auf kleinere Leckagen	5
Anhang	9
A Wetterdaten	9
B Bezugsgrößen	10
C Messdaten und Auswertung Verfahren A	11
D Leckagekurve Verfahren A	12



# 1 Allgemeine Angaben

#### Aufgabenstellung

Luftdurchlässigkeitsmessung einschließlich Lokalisieren von Leckagen

### **Untersuchtes Objekt**

Haus 3

Baujahr 2009

#### Vorhandene Unterlagen

Vermaßte Architekten-Pläne 1:100 vom Februar 2009

#### Heizung und Lüftung

Das Haus wird durch eine Frischluftheizung beheizt. Das Lüftungsgerät steht im Hautechnikraum EG innerhalb des belüfteten und beheizten Gebäudevolumens.

Wärmequelle sind eine im Lüftungsgerät integrierte Wärmepumpe sowie elektrische Nachheizregister in Zuluftdurchlässen einzelner Räume.

Innerhalb des Gebäudes gibt es keinen weiteren Wärmeerzeuger.

#### **Datum der Messung**

19. Juni 2012

#### **Anwesende Personen**

Bewohnerin,

Claus Kahlert und Johannes Werner, ebök, für die Messung.



# 2 Luftdurchlässigkeitsmessung

#### 2.1 Normen

Die Messung wurde nach der Norm DIN EN 13829 vom Februar 2001 durchgeführt. Die Gebäudepräparation erfolgte nach dem in der Norm beschriebenen Verfahren A — Test des Gebäudes im Nutzungszustand –.

## 2.2 Beschreibung der Messung

#### Untersuchter Gebäudeteil

Das gesamte Gebäude war Gegenstand der Untersuchung:

#### Luftdichtende Bauteilschichten

Boden gegen Erdreich: Beton

Außenwände: System Schwörer Passivhaus

 Dach: Folie unter der Dachkonstruktion mit innenseitigen Konterlatten fixiert. Dachflächen sind zum großen Teil innenseitig mit Nut-Feder-Schalung bzw. OSB-Platten verkleidet.

#### Zustand des Gebäudes zum Messzeitpunkt

Das gesamte Gebäude war fertig gestellt und seit mehreren Jahren bewohnt.

#### Gebäudepräparation

Die Fenster und die Außentüren wurden geschlossen, alle Innentüren geöffnet.

Die Lüftungsanlage wurde ausgeschaltet, der Außen- und Fortluftkanal wurde durch je einen aufgeblasenen Ballon an der Außenwanddurchführung abgedichtet.











Zur Messung wurde ein Gebläse in die den rechten Flügel der südorientierten Terrassentür neben der Küche im EG eingesetzt.

#### Bezugsgrößen

Die Bezugsgrößen (Volumen und Hüllfläche) wurden nach den vorliegenden Plänen ermittelt (s. Anhang).

Aus den in den Plänen angegebenen Raumflächen und den zugehörigen Geschosshöhen ergibt sich ein belüftetes Gebäudevolumen von 424,55 m³.

#### Lokalisieren von Undichtigkeiten

Bei etwa 50 Pa Unterdruck im Gebäude wurden kritische Bereiche mit der Hand auf Undichtigkeiten untersucht. Die festgestellten Lecks wurden protokolliert.

#### **Quantitative Messung**

Mit dem Gebläse wurde im Gebäude ein Differenzdruck zur Außenluft erzeugt. Bei unterschiedlichen Druckdifferenzen wurde jeweils der geförderte Volumenstrom



gemessen. Durch Ausgleichsrechnung erhält man den Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz.

Diese Messung wurde bei Unter- und Überdruck durchgeführt.

Durch Mittelung der Ergebnisse bei Unter- und Überdruck erhält man den Leckagestrom, d.h. den Volumenstrom bei 50 Pa. Dieser wird durch das lichte Gebäudevolumen dividiert, um die Luftwechselrate bei 50 Pascal,  $n_{50}$ , zu berechnen.

Die Messdaten und deren Auswertung sind im Anhang dargestellt.

## 2.3 Ergebnisse und Anforderungen

#### Undichtigkeiten

Es wurden keine Lufteintrittsstellen gefunden, bei denen Maßnahmen erforderlich wären.

#### **Quantitative Ergebnisse**

Die Kenngrößen nach Verfahren A sind:

Leckagestrom  $\dot{V}_{50} = 210 \text{ m}^3/\text{h}$ 

Dies entspricht einer Leckfläche von etwa  $A_{50} = 105 \text{ cm}^2$ 

Luftwechselrate bei 50 Pascal  $n_{50} = 0,50 h^{-1}$ 

Die Messunsicherheit beträgt typischerweise  $\pm$  10 %.

## Anforderungen

Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 und von DIN 4108, Teil 7 gelten als erfüllt, wenn bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen die Luftwechselrate bei 50 Pascal nicht größer als 1,5 h<sup>-1</sup> ist. Die Norm verlangt außerdem, dass die Luftdurchlässigkeit nicht mehr als 3,0 m<sup>3</sup>/(h m<sup>2</sup>) beträgt.

Außerdem wird in der Norm für raumlufttechnische Anlagen mit Wärmerückgewinnung eine deutliche Unterschreitung des Grenzwertes empfohlen, die aktuelle Ausgabe vom Januar 2011 empfiehlt einen Wert von maximal 1,0 h<sup>-1</sup>. Ein nach



Richtlinie des Passivhausinstituts zertifizierbares Gebäude muss einen Grenzwert von maximal 0,6 h<sup>-1</sup> einhalten.

## 2.4 Bewertung

#### Energieeinsparverordnung

Die Anforderungen der EnEV bezüglich Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle werden eingehalten.

#### **DIN 4108, Teil 7**

Der Grenzwert nach DIN 4108-7, Verfahren A, wird eingehalten.

#### Zertifizierungskriterium Passivhausinstitut

Der Grenzwert des Passivhausinstituts wird eingehalten.

#### **Empfehlungen**

keine

# 2.5 Hinweise auf kleinere Leckagen

#### Generelle

 Lufteintritt an der Durchführung der Betätigungskette des Sonnenschutzrollos nach Innen aus dem Zwischenraum der Kastenfenster. Die strömungsoffene Fläche liegt jeweils zwischen 0,5 und 1 cm².





#### Einzelne

 Küche / Wohnen EG: Terrassentür S (westlich), Verbundfensterkonstruktion: Mittelanschlag oben und unten punktueller Lufteintritt. An der baugleichen Terrassentür S (östlich) war im rechten Flügel die Blowerdoor eingebaut und der Rahmen deshalb abgeklebt. Die zweiflügligen Verbundfenster in den Kinderzimmern im OG an der Südfassade zeigen dort ebenfalls teilweise Leckagen auf.







 Kinderzimmer 1 OG: Mittelanschlag unten punktuell. An der Anschlussfuge der Rahmenaufdopplung unter dem unteren Querflügel. An den unteren Beschlägen des unteren Querfügels.







- Kinderzimmer 2 OG: wie Kizi 1 OG
- Kinderzimmer 3 OG: wie Kizi 1 OG. Zusätzlich aus dem Spalt im Kämpfer.
- Spitzboden: die Dachflächen im Spitzboden sind großenteils mit einer Nut-Feder- bzw. einer OSB- Beplankung verkleidet. Aus den Fugen der Beplankung zur Firstpfette ist sehr leichter Luftaustritt zu spüren. Durch die Hinterlüftung der Beplankung wird hier die Leckluft in Summe bemerkbar, die verteilt über die Dachflächen ins Gebäude



eintritt. Soweit die Folie noch zugänglich ist, lassen sich dort keine einzelnen undichten Anschlusspartien nachweisen.





 Die Haustür ist auch schon ohne Verriegelung durch Schlüssel rundum dicht. Die Schließfalle ist gut eingestellt, so dass die Dichtungen schon etwas komprimiert werden, sich die Tür aber ohne wesentlichen Kraftaufwand schließen lässt.

Tübingen, den 19. Juni 2012 ebök Institut für angewandte Effizienzforschung GmbH

gez. Dipl.-Phys. Johannes Werner



# **Anhang**

# **A Wetterdaten**

Windstärke während der Messung: 1 bis 2 Beaufort xxx

Natürliche Druckdifferenz vor der Messung: 0,2 Pa

nach der Messung: 0,6 Pa

Mittelwert (gerundet): 0,4 Pa



# B Bezugsgrößen

	Länge	Breite	Fläche	Höhe 1	Höhe 2	Volumen
	m	m	m²	m	m	m³
OG						
Kind 1, SO			15,77	2,56		40,37
Kind 2, Mitte			14,36	2,56		36,76
Kind 3, SW			14,20	2,56		36,35
Kind 4, NW			13,17	2,56		
Flur			7,25	2,56		
Bad			10,87	2,56		27,83
			0,00	2,56		0,00
Zwischensumme OG	}		75,62			141,31
EG						
Wohnen / Essen			32,63	2,6		84,84
Küche			10,56	2,6		27,46
Schlafen			14,13	2,6		36,74
Diele			7,40	2,6		19,24
Du/WC			4,20	2,6		10,92
Technik			7,44	2,6		19,34
Zwischensumme EG	ì		76,36			198,54
DG						
Dachboden			0,00		0,00	0,00
Länge N <-> S	8,47	10	84,70	0	2,00	84,70
•			0,00	0	0,00	0,00
			0,00	0	0,00	0,00
			0,00	0	0,00	0,00
			0,00	0	0,00	0,00
			0,00	0	0,00	0,00
			0,00	0	0,00	0,00
Zwischensumme DG	;		84,70			84,70
Summe			236,68			424,55

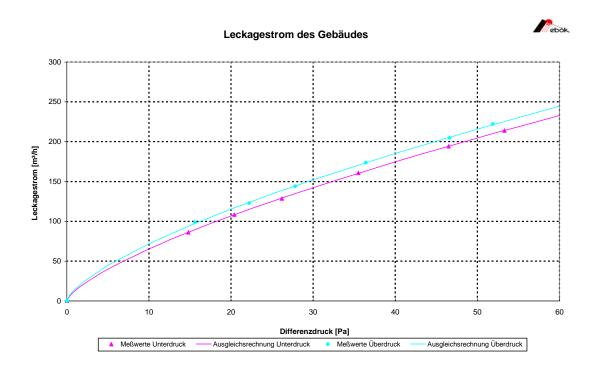


# C Messdaten und Auswertung Verfahren A

Auswertung Dr	rucktest						<b>P</b> ebők
Auftraggeber:	IWU Darmstadt			Auftragnehmer:		e b ö k GbR Schellingstr. 4/2 72072 Tübinge	
Objekt:	Haus 3			Bearbeiter:		Johannes Werr	ner
Datum der Mes Gebäudevolum Gebäudehüllfria Außentemperati Innentemperati Luftdruck Bemerkungen	nen äche itur	24		Auswertung: Ausrüstung: Genauigkeit: Meereshöhe:		19.06.12 Minneapolis Duct Blaster Series B 3 %	m
UNTERDRUCH Differenzdruck am Gebäude	K gemessener Druck am Gebläse	Volumenstrom- Reduzierung		ÜBERDRUCK Differenzdruck am Gebäude		Volumenstrom- Reduzierung	Volumenstrom (unkorrigiert)
[Pa	] [Pa]		[m3/h]	[Pa]	[Pa]		[m3/h]
53,3 46,6 35,5 26,2 20,4 14,8	5 333 5 228 2 146 4 103,5 3 65,5	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	216   196   162   130   109   87	46,6 36,4 27,8 22,2	172,5 125,5 81	3 3 3 3	218 201 170 141 120 97
	usgleichsrechnu	ng:	      	OBENDROCK			
Strömungsexpo Koeffizient Koeff. korrigier Standardabwei Kennwerte bei Leckagestrom Luftwechsel Hüllflächenbez	onent t ichung 50 Pa:	0,711 12,8 12,7 0,3	m3/(h*Pa)   m3/(h*Pa)   m3/h   m3/h   1/h   m/h			14,9 0,9	m3/(h*Pa) m3/(h*Pa) m3/h m3/h 1/h m/h
Mittelwerte aus	s Über- und Unter Leckagestrom b Luftwechselrate Luftdurchlässigl	ei 50 Pa bei 50 Pa	$V_{50} \\ n_{50} \\ q_{50}$	210 0,50			
		kfläche bei 50 Pa	A <sub>50</sub>	105		10	cm)²



# D Leckagekurve Verfahren A





Schellingstraße 4/2 72072 Tübingen Tel. 0 70 71 93 94 0 Fax 0 70 71 93 94 99 www.eboek-institut.de info@eboek-institut.de

# Luftdurchlässigkeitsmessungen Haus 4

Erstellt im: Juni 2012

im Auftrag von: Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt

Bearbeitung: Dipl.-Phys. Johannes Werner

Prof. Dr. Claus Kahlert



## Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Angaben	1
Aufgabenstellung	1
Untersuchtes Objekt	1
Vorhandene Unterlagen	1
Heizung und Lüftung	1
Datum der Messung	1
Anwesende Personen	1
2 Luftdurchlässigkeitsmessung	2
2.1 Normen	2
2.2 Beschreibung der Messung	2
Untersuchter Gebäudeteil	2
Luftdichtende Bauteilschichten	2
Zustand des Gebäudes zum Messzeitpunkt	2
Gebäudepräparation	2
Bezugsgrößen	4
Lokalisieren von Undichtigkeiten	4
Quantitative Messung	4
2.3 Ergebnisse und Anforderungen	4
Undichtigkeiten	4
Quantitative Ergebnisse	5
Anforderungen	5
2.4 Bewertung	5
Energieeinsparverordnung	5
DIN 4108, Teil 7	5
Zertifizierungskriterium Passivhausinstitut	5
Empfehlungen	6

## Luftdurchlässigkeitsmessung



2.5 Hinweise auf kleinere Leckagen	6
Generelle	6
Einzelne	7
Anhang	8
A Wetterdaten	8
B Bezugsgrößen	8
C Messdaten und Auswertung Verfahren A	9
D Leckagekurve Verfahren A	10



# 1 Allgemeine Angaben

#### Aufgabenstellung

Luftdurchlässigkeitsmessung einschließlich Lokalisieren von Leckagen

## **Untersuchtes Objekt**

Haus 4

Baujahr 2010

#### Vorhandene Unterlagen

Vermaßte Architekten-Pläne 1:100 vom Januar 2010

#### **Heizung und Lüftung**

Das Haus wird durch eine Frischluftheizung beheizt. Das Lüftungsgerät steht im Hautechnikraum DG innerhalb des belüfteten und beheizten Gebäudevolumens.

Wärmequelle sind eine im Lüftungsgerät integrierte Wärmepumpe sowie elektrische Nachheizregister in Kanälen und Zuluftdurchlässen einzelner Räume.

Innerhalb des Gebäudes gibt es keinen weiteren Wärmeerzeuger.

#### **Datum der Messung**

14. Juni 2012

#### **Anwesende Personen**

Bewohnerin,

Claus Kahlert und Johannes Werner, ebök, für die Messung.



# 2 Luftdurchlässigkeitsmessung

#### 2.1 Normen

Die Messung wurde nach der Norm DIN EN 13829 vom Februar 2001 durchgeführt. Die Gebäudepräparation erfolgte nach dem in der Norm beschriebenen Verfahren A — Test des Gebäudes im Nutzungszustand –.

## 2.2 Beschreibung der Messung

#### Untersuchter Gebäudeteil

Das gesamte Gebäude war Gegenstand der Untersuchung:

#### Luftdichtende Bauteilschichten

Boden gegen Erdreich: Beton

Außenwände: System Schwörer Passivhaus

 Dach: Folie unter der Dachkonstruktion mit innenseitigen Konterlatten fixiert.

#### Zustand des Gebäudes zum Messzeitpunkt

Das gesamte Gebäude war fertig gestellt und seit mehreren Jahren bewohnt.

#### Gebäudepräparation

Die Fenster und die Außentüren wurden geschlossen, alle Innentüren geöffnet.

Die Lüftungsanlage wurde ausgeschaltet, der Außen- und Fortluftkanal wurde jeweils mittels eines Ballons in der Ebene der Gebäudehülle abgedichtet.











Zur Messung wurde ein Gebläse in die rechte Terrassentür im Wohnbereich EG eingesetzt.





#### Bezugsgrößen

Die Bezugsgrößen (Volumen und Hüllfläche) wurden nach den vorliegenden Plänen ermittelt (s. Anhang).

Aus den in den Plänen angegebenen Raumflächen und den zugehörigen Geschosshöhen ergibt sich ein belüftetes Gebäudevolumen von 498,5 m³.

#### Lokalisieren von Undichtigkeiten

Bei etwa 50 Pa Unterdruck im Gebäude wurden kritische Bereiche mit der Hand auf Undichtigkeiten untersucht. Die festgestellten Lecks wurden protokolliert.

#### **Quantitative Messung**

Mit dem Gebläse wurde im Gebäude ein Differenzdruck zur Außenluft erzeugt. Bei unterschiedlichen Druckdifferenzen wurde jeweils der geförderte Volumenstrom gemessen. Durch Ausgleichsrechnung erhält man den Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz.

Diese Messung wurde bei Unter- und Überdruck durchgeführt.

Durch Mittelung der Ergebnisse bei Unter- und Überdruck erhält man den Leckagestrom, d.h. den Volumenstrom bei 50 Pa. Dieser wird durch das lichte Gebäudevolumen dividiert, um die Luftwechselrate bei 50 Pascal,  $n_{50}$ , zu berechnen.

Die Messdaten und deren Auswertung sind im Anhang dargestellt.

## 2.3 Ergebnisse und Anforderungen

#### Undichtigkeiten

Es wurden keine Lufteintrittsstellen gefunden, bei denen Maßnahmen erforderlich wären.

#### Quantitative Ergebnisse

Die Kenngrößen nach Verfahren A sind:



Leckagestrom  $\dot{V}_{50} = 332 \text{ m}^3\text{/h}$ 

Dies entspricht einer Leckfläche von etwa  $A_{50} = 166 \text{ cm}^2$ 

Luftwechselrate bei 50 Pascal  $n_{50} = 0,67 \text{ h}^{-1}$ 

Die Messunsicherheit beträgt typischerweise  $\pm$  10 %.

## Anforderungen

Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 und von DIN 4108, Teil 7 gelten als erfüllt, wenn bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen die Luftwechselrate bei 50 Pascal nicht größer als 1,5 h<sup>-1</sup> ist. Die Norm verlangt außerdem, dass die Luftdurchlässigkeit nicht mehr als 3,0 m³/(h m²) beträgt. Außerdem wird in der Norm für raumlufttechnische Anlagen mit Wärmerückgewinnung eine deutliche Unterschreitung des Grenzwertes empfohlen, die aktuelle Ausgabe vom Januar 2011 empfiehlt einen Wert von maximal 1,0 h<sup>-1</sup>. Ein nach Richtlinie des Passivhausinstituts zertifizierbares Gebäude muss einen Grenzwert von maximal 0,6 h<sup>-1</sup> einhalten.

## 2.4 Bewertung

#### Energieeinsparverordnung

Die Anforderungen der EnEV bezüglich Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle werden eingehalten.

#### **DIN 4108, Teil 7**

Der Grenzwert nach DIN 4108-7, Verfahren A, wird eingehalten.

#### Zertifizierungskriterium Passivhausinstitut

Der Grenzwert des Passivhausinstituts wird knapp nicht eingehalten.



## Empfehlungen

Die Beschläge der Haustür sollten bei Gelegenheit nachgestellt werden.



# 2.5 Hinweise auf kleinere Leckagen

#### Generelle

 Lufteintritt an der Durchführung der Betätigungskette des Sonnenschutzrollos nach Innen aus dem Zwischenraum der Kastenfenster. Die strömungsoffene Fläche liegt jeweils zwischen 0,5 und 1 cm².



#### Einzelne

• Am Küchenfenster leichter Lufteintritt an der Oberkante des Flügels.



• Im Haustechnikraum leichter Lufteintritt an den Leerrohren, diese wurden nach der Messung mit Klebeband verschlossen. Eine Wiederholung der Messung erbrachte eine Verbesserung auf  $n_{50} = 0,65 \; h^{\text{-}1}$ .

Tübingen, den 14. Juni 2012 ebök Institut für angewandte Effizienzforschung GmbH

gez. Dipl.-Phys. Johannes Werner



# **Anhang**

# **A Wetterdaten**

Windstärke während der Messung: 1 bis 2 Beaufort

# B Bezugsgrößen

	Länge m	Breite m	Fläche m²	Höhe 1 m	Höhe 2 m	Volumen m³
EG	111	111	111	111	""	""
Gast			12,51	2,6		32,53
Wohnen/Essen			33,96	2,6		88,30
Küche			10,79	2,6		28,05
Diele/Abstellraum			11,93	2,6		31,02
HWR/Technik			9,42	2,6		24,49
Du/WC			3,51	2,6		9,13
Zwischensumme EG			82,12			213,51
DG						
Arbeiten			19,71	2,55	2,55	50,26
Kind			22,18	2,55	2,55	56,56
Schlafen schräg			9,83	1,37	2,55	19,27
Schlafen hoch			9,83	2,55	2,55	25,07
Bad schräg Bad hoch			5,53 5,53	1,37 2,55	2,55 2,55	10,84 14,10
Flur+Trp Dspitz			8,33	2,55	2,55	21,24
Treppe schräg			1,81	1,37	2,55	3,55
Treppe hoch			1,81	2,55	2,55	4,62
Zwischensumme DG			84,56	,	,	205,50
Dachspitze						
·	6,4	10,8	69,12	0	2,30	79,49
			0	0	0,00	0,00
			0	0	0,00	0,00
			0	0	0,00	0,00
			0	0	0,00	0,00
			0	0	0,00	0,00
			0 0	0	0,00 0,00	0,00 0,00
Zwischensumme Dao	hspitze		69,12	J	0,00	79,49
Summe			235,80			498,50



# C Messdaten und Auswertung Verfahren A

Auswertung von Drucktests

letzte Anderung des Arbeitsblatts: e b ö k, Tübingen

11.01.2000

Umrechnungsfaktor: 1 CFM =

1,6990106 m3/h 273,16 K 0 °C =

Kalibrierwerte des Gebläses:

Anzahl ver- schlos- sene Löcher	Strö- mungs- exponent	Strö- mungs- koeffi- zient	Strö- mungs- koeffi- zient
[1]	[1]	[CFM/Pa]	[m3/(h*Pa)]
1 2 3	0,5 0,5 0,5 0,5	108,50 41,42 15,80 6,33	184,34 70,37 26,84 10,75

Auswertung Drucktest

**M**ebök

Auftraggeber: IWU

Auftragnehmer:

e b ö k GbR Schellingstr. 4/2 72072 Tübingen

Objekt: Haus 4 Bearbeiter:

Johannes Werner

Datum der Messung: Gebäudevolumen Gebäudehüllfläche Außentemperatur Innentemperatur 14.06.2012 498,5 m3 m2 18 °C 22 °C 1002 hPa Luftdruck

Auswertung: Ausrüstung:

04.10.12 Minneapolis Duct Blaster Series B 3 %

Genauigkeit:

Meereshöhe:

Haustür verriegelt Kabeleinführung offen Bemerkungen

m

UNTERDRUCK Differenzdruck am Gebäude	gemessener Druck am Gebläse	Volumenstrom- Reduzierung	Volumenstrom (unkorrigiert)
[Pa]	[Pa]		[m3/h]
20,1	32,6	2	153
13,6	17,1	2	111 j
37,6	88,5	2	253
47,5	122,5	2	297
55,5	157	2	336
73	235	2	412
29	56,5	2	202
UNTERDRUCK			i
Ernehnis der Ausr	aleichsrechnung.		

ÜBERDRUCK			
Differenzdruck	gemessener	Volumenstrom-	
am Gebäude	Druck am Gebläse	Reduzierung	(unkorrigiert)
[Pa]	[Pa]		[m3/h]
18	45,5	2	181
29	84,3	2	246
38,3	122,5	2	297
44	144	2	322
52,8	183	2	363
62	225	2	403
73,3	292	2	459
ÜBERDRUCK			

Strömungsexponent		0,769		
Koeffizient		15,3	m3/(h*Pa)	
Koeff. korrigiert		15,1	m3/(h*Pa)	
Standardabweichung		2,2	m3/h	
Kennwerte bei 50 Pa:				
Leckagestrom		307	m3/h	
Luftwechsel		0,61	1/h	
Hüllflächenbezogen	_		m/h	

	26,8	m3/(h*Pa) m3/(h*Pa) m3/h
-	357 0,72	m3/h 1/h m/h

Mittelwerte aus Über- und Unterdruckmessung:

Leckagestrom bei 50 Pa	V <sub>50</sub>	332 m3/h
Luftwechselrate bei 50 Pa	n <sub>50</sub>	0,67 1/h
Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa	$\mathbf{q}_{50}$	- m/h
äguivalente Leckfläche bei 50 Pa	Aso	166 cm <sup>2</sup>

13 cm)<sup>2</sup>



# D Leckagekurve Verfahren A

