



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Schlussbericht 17.07.2016**

---

## **Effiziente Abluft-Erdsonden-Wärmepumpe für die Gebäudeerneuerung**

**Wohnsiedlung Dettenbühl, Wetzwil a. Albis**

---



**Subventionsgeberin:**

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das  
Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Cleantech  
Pilot- und Demonstrationsprogramm  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Kanton Zürich, Baudirektion  
AWEL Amt für Umwelt Energie und Luft  
Abteilung Energie  
Stampfenbachstrasse 12  
CH-8090 Zürich  
[www.awel.zh.ch](http://www.awel.zh.ch)

**Subventionsempfänger:**

Lemon Consult AG  
Sumatrastrasse 10  
CH-8006 Zürich  
[www.lemonconsult.ch](http://www.lemonconsult.ch)

Baugenossenschaft Rotach  
Gertrudstrasse 69  
8003 Zürich  
[www.rotach.ch](http://www.rotach.ch)

**Autoren:**

Valentin Muller, Lemon Consult AG, [muller@lemonconsult.ch](mailto:muller@lemonconsult.ch)  
Lara Carisch, Lemon Consult AG, [carisch@lemonconsult.ch](mailto:carisch@lemonconsult.ch)  
Martin Ménard, Lemon Consult AG, [menard@lemonconsult.ch](mailto:menard@lemonconsult.ch)

**BFE-Programmleitung:**

Yasmine Calisesi, Leiterin P+D-Programm, [yasmine.calisesi@bfe.admin.ch](mailto:yasmine.calisesi@bfe.admin.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Marc Köhli, Stv. Leiter Forschungsprogramm Energie in Gebäuden, [koehli@enerconom.ch](mailto:koehli@enerconom.ch)

**BFE-Vertragsnummer:**

SI/501022-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> .....             | 3  |
| 1    Zusammenfassung.....                   | 5  |
| 1.1    Ausgangslage.....                    | 5  |
| 1.2    Anlagenbeschrieb.....                | 5  |
| 1.3    Vorgehen.....                        | 6  |
| 1.4    Ergebnisse.....                      | 6  |
| 1.5    Erkenntnisse.....                    | 7  |
| 1.6    Umsetzung .....                      | 9  |
| 2    Grundlagen .....                       | 10 |
| 2.1    Projektziele und Motivation .....    | 10 |
| 2.2    Anlagenbeschreibung.....             | 10 |
| 2.3    Heizungs- und Lüftungsanlagen.....   | 11 |
| 3    Energieeffizienz.....                  | 13 |
| 3.1    Grundlagen.....                      | 13 |
| 3.2    Vorgehen .....                       | 13 |
| 3.3    Resultate .....                      | 14 |
| 4    Thermische Behaglichkeit.....          | 20 |
| 4.1    Grundlagen.....                      | 20 |
| 4.2    Vorgehen .....                       | 20 |
| 4.3    Resultate .....                      | 21 |
| 5    Raumluftqualität .....                 | 24 |
| 5.1    Grundlagen.....                      | 24 |
| 5.2    Vorgehen .....                       | 24 |
| 5.3    Resultate .....                      | 24 |
| 6    Luftmengenbilanz.....                  | 26 |
| 6.1    Vorgehen .....                       | 26 |
| 6.2    Resultate .....                      | 27 |
| 7    Luftschalldämmung .....                | 31 |
| 7.1    Ausgangslage und Zielsetzung .....   | 31 |
| 7.2    Vorgehen .....                       | 31 |
| 7.3    Resultate .....                      | 33 |
| 8    Thermographie .....                    | 34 |
| 8.1    Ausgangslage und Zielsetzung .....   | 34 |
| 8.2    Resultate .....                      | 34 |
| 9    Wirtschaftlichkeit .....               | 36 |
| 9.1    Ausgangslage und Zielsetzung .....   | 36 |
| 9.2    Ergebnisse.....                      | 36 |
| 10    Schlussfolgerungen und Ausblick ..... | 38 |
| 10.1    Aussenluftdurchlässe .....          | 38 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 10.2 | Abluft-Wärmpumpen.....                                      | 38 |
| 10.3 | Fazit.....  | 38 |
| 10.4 | Ausblick .....  | 39 |
| 10.5 | Verbreitung der Ergebnisse.....                             | 39 |
| 11   | Thermischer Komfort und Raumluftqualität .....              | 40 |
| 11.1 | Messperioden .....  | 40 |
| 11.2 | Aussenluftbedingungen.....                                  | 41 |
| 11.3 | Detaillierte Analyse des Raumklimas pro Wohnung .....       | 45 |
| 11.4 | Detaillierte Analyse der CO2-Konzentration pro Wohnung..... | 64 |
| 11.5 | Messwerte Statistik.....                                    | 76 |
| 12   | Messeinrichtungen .....                                     | 79 |

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Ausgangslage

Abluftanlagen in Kombination mit Aussenluftdurchlässen und Abluft-Wärmepumpen sind platzsparend und kostengünstig. Aussenluft fliesst über Luftdurchlässe in der Fassade nach. Somit entfallen die horizontale Zuluftverteilung und der damit verbundene, besonders bei Bestandgebäuden oft erhebliche bauliche Zusatzaufwand.

In Deutschland und Frankreich sind Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen weit verbreitet. In der Schweiz dagegen bestehen unter Energiefachleuten grosse Vorbehalte. Aufgrund der über Fassadendurchlässe im Unterdruck nachströmenden Aussenluft werden insbesondere der thermische Komfort, der Lärmschutz, die Lüftungseffektivität und die Luftqualität kritisch beurteilt. Zudem wird die Energieeffizienz von Abluft-Wärmepumpen grundsätzlich in Frage gestellt (siehe z.B. „Kurzbericht: Abwärmenutzung bei Lüftungsanlagen“, <http://www.endk.ch/de/dokumentation/MuKEN>, Huber Energietechnik AG, Februar 2014).

Im Rahmen des vorliegenden BFE P+D-Projekts wurden detaillierte Messdaten zu Energieeffizienz, thermischem Komfort, Raumluftqualität, Lärmschutz, Investitions- und Betriebskosten von erneuerten Wohngebäuden mit Abluft-Wärmepumpen in Kombination mit Erdsonden bzw. Aussenluft-Wärmepumpen erhoben. Aus den Messergebnissen und Betriebserfahrungen werden Empfehlungen für Planer und Bauherren abgeleitet sowie Ansätze für die technische Weiterentwicklung vorgeschlagen.

## 1.2 Anlagenbeschrieb

Die Baugenossenschaft Rotach Zürich hat ihre Wohnsiedlung Dettenbühl in Wetzwil am Albis aus den 1970er Jahren mit insgesamt sieben Gebäuden und 120 Wohnungen schrittweise erneuert. Eine verhältnismässig bescheidene Aussendämmung der Fassade (8 cm Glaswolle) wurde bereits in den 90er Jahren ausgeführt. Die Wärmedämmung der Flachdächer sollte nun verbessert und die grossen, undichten Fensterfronten an der Südfassade ersetzt werden. In den ebenfalls zu erneuernden Bädern und Küchen musste aus bauhygienischen Gründen eine Abluftanlage eingebaut werden.

Dank einer optimalen Auslegung und Betriebsweise von sieben dezentralen Abluft-Wärmepumpen, sollen diese das gesamte Warmwasser und rund 40% der Heizwärme abdecken. Das Spitzenlastsystem – eine 320 kW Erdsonden-Wärmepumpe, welche den bisherigen 750 kW Ölkessel ersetzt – konnte daher kleiner dimensioniert werden. Dadurch konnten die Investitionskosten der gesamten Anlage reduziert und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

Die Investitionskosten für Heizung und Lüftung sind mit rund CHF 12'000 pro Wohnung verhältnismässig tief, weil an der Wärmeverteilung und -abgabe (Radiatoren) nur marginale Anpassungen gemacht wurden und weil die Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen in den Wohn- und Schlafzimmern nur geringe bauliche Eingriffe verursachen. Dank Aussenluftdurchlässen und Dauerbetrieb der Abluftanlagen konnte die Siedlung als Minergie-Modernisierung zertifiziert werden, was der Baugenossenschaft zusätzliche Förderbeiträge des Kantons Zürich eintrug.

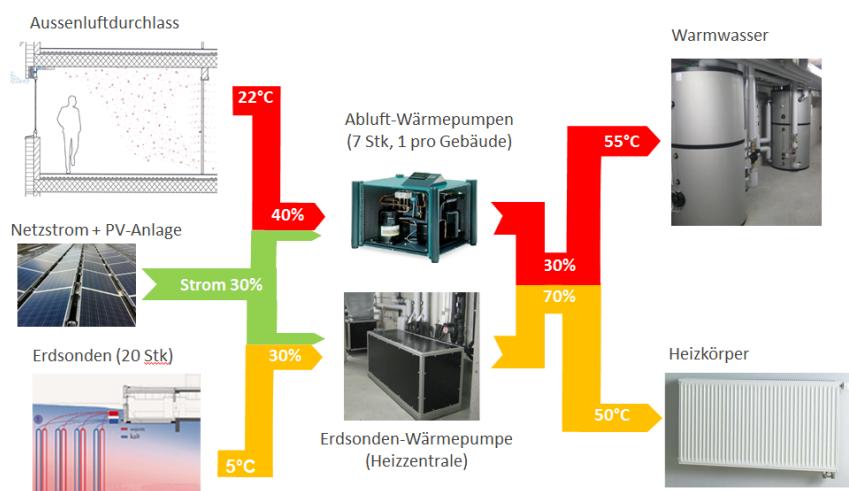


Abb. 1 : Schematische Darstellung des Energiekonzepts mit sieben dezentralen Abluft-Wärmepumpen und einer zentralen Erdsonden-Wärmepumpe

## 1.3 Vorgehen

Die folgenden Messdaten und Betriebserfahrungen wurden über zwei Heizperioden (Mai 2014 bis Juni 2016) erfasst:

- Wärmeproduktion pro Wärmeerzeuger
- Wärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser
- Elektrischer Energieverbrauch der Wärmepumpen inkl. aller Hilfsantriebe
- Vor- und Rücklauftemperaturen der Heiz- und Warmwassergruppen
- In ausgewählten Wohnungen jeweils im Schlaf- und Wohnzimmer: Raumlufttemperatur, relative Raumluftfeuchtigkeit, Luftmengen pro Aussenluftdurchlass und CO2-Konzentration
- Punktuell: Schwächung der Luftschalldämmung durch die Aussenluftdurchlässe im Wohn- und Schlafzimmer (nur Siedlung Dettenbühl)

Neben Leistungszahlen, Arbeitszahlen, Energiekennzahlen, thermischem Komfort und Luftqualität konnten auch die abgerechneten Investitionskosten (inkl. aller Nebenarbeiten) und Betriebskosten der Heizungs- und Lüftungsanlagen detailliert ausgewertet und mit den Planungswerten verglichen werden.

## 1.4 Ergebnisse

### 1.4.1 Thermischer Komfort und Raumluftqualität

In der Siedlung Dettenbühl sind in 19 Wohnungen jeweils im Wohn- und in einem Schlafzimmer während zwei Wochen die Raumlufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die CO2-Konzentration gemessen worden. Die Messung erfolgte in vier Messperioden im Zeitraum 2014 – 2016, davon eine vor der Sanierung. Der Median der Raumlufttemperatur über alle Räume und Messperioden lag bei 22.5 °C. Die Messwerte streuen relativ stark, was die unterschiedlichen Komfortbedürfnisse der Bewohner widerspielt. Diese können die Raumlufttemperatur individuell über die Thermostatventile der Heizkörper regeln. In drei Schlafzimmern lag die mittlere Raumlufttemperatur während der Messperiode unter 20 °C, in drei Wohnzimmern über 24 °C.

Neben der Raumlufttemperatur und der relativen Feuchtigkeit wurde auch die CO2-Konzentration in insgesamt 38 Wohn- und Schlafzimmern erfasst. Der Median über alle Räume liegt bei rund 600 ppm, was einer hohen Luftqualität entspricht (Aussenluft: 400 ppm). Allerdings wird in vier der 19 untersuchten Schlafzimmer die Grenze von 1350 ppm (RAL 4) nachts regelmäßig überschritten. Höhere Luftwechselraten wären hier anzustreben.

Die Luftqualität hängt massgeblich von der über die Aussenluftdurchlässe nachströmenden Luftmenge ab. Auf Wunsch der Minergie-Zertifizierungsstelle sind in einem Haus die Luftmengen pro Aussenluftdurchlass bei Nennvolumenstrom der Abluftanlage untersucht worden. Die Minergie-Anforderung von 30 m<sup>3</sup>/h pro Aussenluftdurchlass wird weitgehend eingehalten. Lediglich bei fünf von 38 Aussenluftdurchlässen lag der Messwert bis max. 7 % unter der Anforderung. Da bei Nennvolumenstrom vermehrt Klagen wegen trockener Luft und Zugserscheinungen auftreten, wird der Volumenstrom im Normalbetrieb in allen Häusern auf 70% des Nennvolumenstroms eingestellt. Bei Aussenluftdurchlässen ohne Luftvorwärmung muss ein Kompromiss zwischen optimaler Luftqualität und thermischem Komfort gesucht werden.

### 1.4.2 Energieeffizienz

Die sieben dezentralen Abluft-Wärmepumpen decken insgesamt 56 % des gesamten Wärmeverbrauchs der Siedlung. Der Rest wird durch die zentrale Erdsonden-Wärmepumpe über eine Fernleitung gedeckt. Der Wärmeverbrauch für Warmwasser liegt bei 27 kWh/m<sup>2</sup>, der Heizwärmeverbrauch bei 62 kWh/m<sup>2</sup>. Warmwasser- und Heizwärmeverbrauch entsprechen damit ziemlich genau den Planungswerten gemäss Minergie-Antrag. Die durchschnittliche monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpen schwankt je nach Jahreszeit zwischen 2.9 und 3.4. Die Jahresarbeitszahl von 3.3 ist unter Berücksichtigung der hohen benötigten Heizvorlauftemperatur (45 °C bei einer Außentemperatur von -8 °C) und dem hohen Warmwasseranteil von 30 % als hoch einzustufen.

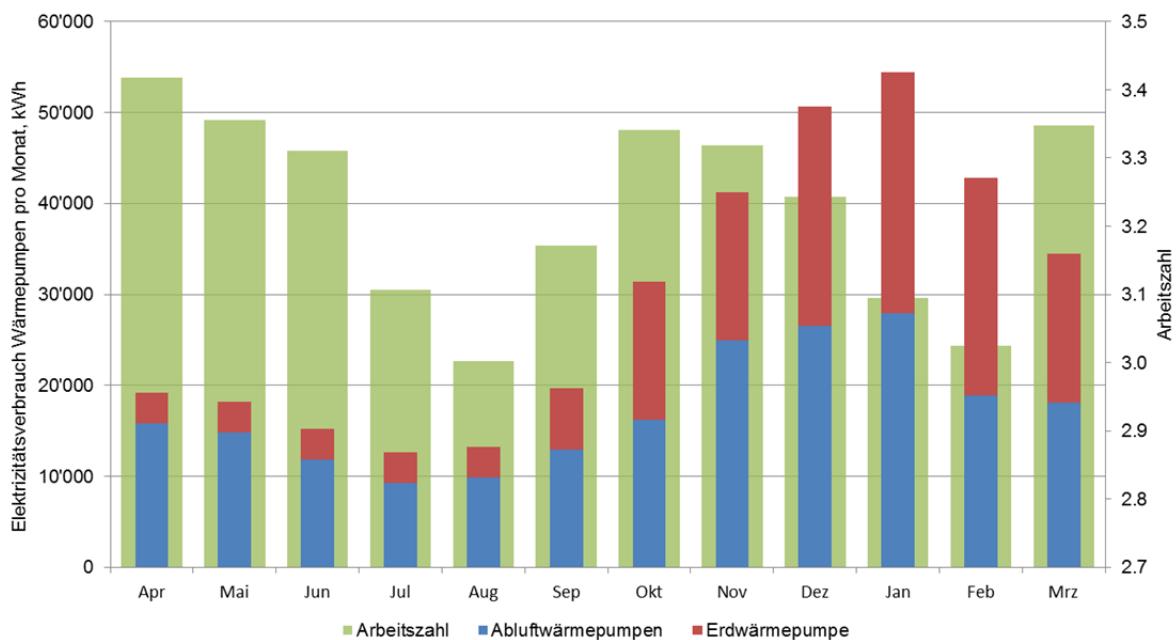


Abb. 2 : Monatlicher Anteil der Wärmeleitung durch Abluft- und Erdsonden-Wärmepumpen sowie durchschnittliche Arbeitszahl pro Monat (Jahre 2015/2016).

Die gewichtete Energiekennzahl der Siedlung konnte durch den Ersatz des Ölbeckens mit einer kombinierten Abluft-Erdsonden-Wärmepumpenanlage um gut 50 % auf 55 kWh/m<sup>2</sup> reduziert werden. Der Grenzwert Minergie Modernisierung wird im Betrieb eingehalten. Der Minergie-Planungswert wird nicht ganz erreicht, was unter anderem mit den höheren Raumtemperaturen und einem höheren Warmwasserverbrauch erklärt werden kann. Die Treibhausgasemissionen im Betrieb sinken von 34 auf 7 kg/m<sup>2</sup>, davon gut die Hälfte für Wärmepumpen und Abluftanlagen, der Rest für Haushalt- und Allgemeinstrom.

#### 1.4.3 Lärmschutz

Um den Einfluss der Außenluftdurchlässe auf die resultierende Luftschalldämmung der Fassade bestimmen zu können, wurde die Schalldämmung der Fassade mit und ohne Außenluftdurchlass gemessen. Die daraus resultierende Pegeldifferenz ist gleichbedeutend mit der Abminderung der Schalldämmung durch die Außenluftdurchlässe.

In der vorhandenen Situation vermindert der Außenluftdurchlass die resultierende Schalldämmung der Fassade um ca. 1-2 dB. Die Verminderung liegt dabei hauptsächlich im Frequenzbereich von ca. 1'000 Hz bis 2'500 Hz. Eine solche Pegeländerung ist vom Menschen kaum wahrnehmbar. In Situationen ohne besondere Anforderungen an die Schalldämmung der Fassade (Fenster mit  $R'w \leq$  ca. 35 dB) können Außenluftdurchlässe eingesetzt werden, ohne dass die Schalldämmung deutlich reduziert wird.

#### 1.4.4 Wirtschaftlichkeit

Der Ersatz des bestehenden Ölbeckens war im Rahmen der Erneuerung der Siedlung Dettenbühl ursprünglich nicht vorgesehen. Er kam für die Baugenossenschaft erst aufgrund der verhältnismässig geringen Investitionskosten und des geringen baulichen Eingriffs innerhalb der Wohnungen in Frage. Eine entscheidende Rolle spielten auch die namhaften Förderbeiträge für Minergie Modernisierungen durch den Kanton Zürich, welche nur dank der neuen Abluftanlage im Dauerbetrieb verfügbar wurden. Die jährlichen Heizkosten der Siedlung sind durch die energetische Erneuerung von rund 150'000 auf 60'000 CHF gesunken

### 1.5 Erkenntnisse

Die Erkenntnisse aus dem P+D-Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

#### 1.5.1 Außenluftdurchlässe

- Außenluftdurchlässe (ALD) werden bei Montage oberhalb der Fenster von den meisten Nutzern akzeptiert. Es gibt aber auch Klagen bezüglich Zugluft von schätzungsweise 10 – 15% der

Nutzer. Eine systematische Erhebung der Nutzerzufriedenheit konnte im Rahmen des Projekts leider nicht durchgeführt werden.

- Einige Nutzer kleben die ALDs zu. Das Gesamtsystem inkl. Abluft-Wärmenutzung scheint dadurch nicht beeinträchtigt zu werden.
- Bei einzelnen Wohnungen sind periodisch Probleme mit Geruchsübertragung über das Treppenhaus aufgetreten. Die Planetendichtung der Wohnungstüren sind teilweise nicht ganz dicht, weshalb ein Teil der Ersatzluft aus dem Treppenhaus nachströmt.
- Die gemessene Luftqualität streut stark, im Bereich von 600 – 1350 ppm, in einzelnen Schlafzimmern bis > 2000 ppm.
- Wenn ein Fenster offen steht, bricht die Nachströmung von Aussenluft über die ALD in allen Zimmer zusammen. Dies könnte ein Grund für die zum Teil hohen CO2-Konzentrationen sein.
- Die Luftpunktmassen werden im Betrieb gegenüber den normativen Vorgaben tiefer eingestellt (ca. 70 % des Nennvolumenstroms), sonst steigen die Klagen wegen zu trockener Luft und Zugluft.
- Die Luftschalldämmung der Fassade wird durch die eingesetzten ALD nicht wahrnehmbar geschwächt.
- Die Schaumstofffilter der eingesetzten ALD verschmutzen nur langsam. Nur an Standorten mit sehr hohen Staubimmissionen ist ein jährlicher Filterwechsel notwendig.

### 1.5.2 Abluft-Wärmepumpen

- Abluft-Wärmepumpen sind nicht nur platzsparend und preisgünstig sondern – sofern richtig dimensioniert – auch energieeffizienter als gemeinhin angenommen.
- Pro m<sup>3</sup>/h Abluftmenge können rund 11 W Wärmeleistung erzeugt werden. Dabei wird die Abluft auf nahezu 0 °C abgekühlt und die darin enthaltene Feuchtigkeit weitgehend auskondensiert.
- Die Abtauung des Verdampfers erfolgt direkt durch die warme Abluft.
- Die Abluft-Wärmepumpe deckt in der Siedlung Dettenbühl 56% des gesamten Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser. Bei Neubauten kann der Deckungsgrad auf nahezu 80% steigen. Das zusätzlich benötigte Spitzenlastsystem kann entsprechend klein und kostengünstig dimensioniert werden.
- Der Abluftventilator ersetzt den Ventilator der Ausseneinheit bei Aussenluft-Wärmepumpen.
- Der Stromverbrauch von Abluftanlagen im Dauerbetrieb liegt, bezogen auf die Energiebezugsfläche, in der Regel unter 1 kWh/m<sup>2</sup>. Bei zentralen Zu-/Abluftanlagen in Mehrfamilienhäusern liegt er in der Regel bei 3 – 4 kWh/m<sup>2</sup>.
- Der Minergie-Grenzwert-Modernisierung wird von beiden untersuchten Projekten im Betrieb eingehalten. Dies, obwohl die Gebäudehülle nur mässig bis gar nicht wärmegedämmt ist, die Wärmeabgabe über die bestehenden Heizkörper erfolgt und die Heizvorlauftemperaturen im Auslegungsfall bei 45 °C liegen.

### 1.5.3 Schlussfolgerungen

Die untersuchte Pilotanlage eignet sich insbesondere für Bestandsgebäude, bei denen aus Budgetgründen oder aufgrund von Auflagen der Denkmalpflege eine vollständige Wärmedämmung der Gebäudehülle oder der Einbau einer Zu-/Abluftanlage (Komfortlüftung) aus Platzgründen nicht möglich sind. Abluft-Wärmepumpen können somit einen relevanten Beitrag für die nachhaltige Transformation von Bestandsgebäuden ohne eine umfassende Gesamterneuerung leisten. Gemäss einer Studie zur Entwicklung des Gebäudeparks der Schweiz, werden im Jahr 2050 gut 40 % der Gebäude nicht oder nur teilweise energetisch erneuert sein. Damit auch diese Gebäude in Zukunft ohne fossile Brennstoffe beheizt werden können, sind Kompromisse bezüglich Energieeffizienz, Luftqualität und thermischem Komfort nötig. Für dieses Segment des Gebäudeparks eignen sich Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen und Abluft-Wärmepumpen besonders gut. Gegenüber energetisch optimalen Neubauten, werden diese teilsanierten Gebäude zwar eine höhere Energiekennzahl von rund 50 statt 30 kWh/m<sup>2</sup> aufweisen. Die anspruchsvollen Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft insbesondere im Bereich der Treibhausgasemissionen erfüllen sie aber dank der geringen baulichen Aufwendungen besser und zu tieferen ökonomischen und sozialen Kosten als der beste Ersatzneubau.

## 1.6 Umsetzung

Damit sich Abluft-Wärmepumpen mit Aussenluftdurchlässen (ALD) in der Schweiz als kostengünstige Lösung für die Gebäudeerneuerung durchsetzen können, müssen die Erkenntnisse aus dem vorliegenden P+D-Projekt sowie aus weiteren laufenden Studien zu Abluftanlagen mit den einschlägigen Fachkreisen (Energiefachstellen, HLK-Planer, Bauphysiker, Architekten) diskutiert werden. Kernfrage ist, welche minimalen Anforderungen wir an Komfort, Raumluftqualität und Energieeffizienz bei der Gebäudeerneuerung stellen wollen und ob diese mit Abluft-Wärmepumpen und Aussenluftdurchlässen erfüllt werden können.

Im Rahmen des vorliegenden P+D-Projekts sind folgende Beiträge zur Lancierung dieser Diskussion erfolgt bzw. geplant:

- Vortrag am Forum Energie Zürich und am Energie-Apéro Luzern zur Thematik „Mit etappierten Gebäudeerneuerungen die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft erreichen“ am 03. und 30.03.2015
- Vortrag an der Sitzung der Innovationsgruppe Komfortlüftung „Effiziente Abluft-Erdsonden-Wärmepumpen für die Gebäudeerneuerung“ am 21.04.2015
- Vortrag an der eco-Bau Fachtagung „Lowtech für die 2000-Watt-Gesellschaft: Sanierung der Siedlung Dettenbühl“ am 17.03.2016
- Artikel zur Siedlung Dettenbühl als Fallbeispiel in der SIA Dokumentation *Energetische Gebäudeerneuerung* (SIA 2047), Publikation September 2016
- Siedlung Dettenbühl als Übungsbeispiel im SIA Form Kurs „Gebäudeerneuerung Heute“ im Juni und Oktober 2015, weitere geplant ab Herbst 2016
- Artikel und Präsentation für das BFE Status-Seminar 2016 „Abluft- und Aussenluftwärmepumpen für die energetische Gebäudeerneuerung“ am 8./9. September 2016
- Artikel im TEC21 zu Aussenluftdurchlässen und Abluft-Wärmepumpen geplant Anfang 2017
- Siedlung Dettenbühl als Fallbeispiel für Abluftanlagen in der Gebäudeerneuerung in der vollständig überarbeiteten Neuausgabe des Buchs „Wohnungslüftung“, Faktor Verlag

## 2 Grundlagen

### 2.1 Projektziele und Motivation

In der Wohnsiedlung Dettenbühl aus den 70er Jahren werden die Betriebserfahrungen mit einer Kombination von neuen Abluft- und Erdsonden-Wärmepumpen als kostengünstige und energieeffiziente Lösung für die Erreichung des Minergie-Standards in der Gebäudeerneuerungen untersucht. Anhand von Messungen werden die Energieeffizienz der Anlagen sowie der thermische Komfort und die Raumlufthygiene in den Wohnungen erfasst. Das Pilotprojekt soll Stärken und Risiken dieser in der Gebäudeerneuerung noch wenig verbreiteten Lösung bei Bauherren und Planern besser bekannt machen und damit den Umstieg von Öl- und Gaskesseln zu Wärmepumpen auch bei bestehenden Wohngebäuden und grossen Siedlungen beschleunigen.

Der Umstieg vom bestehenden zentralen Ölessel mit jährlichen Betriebskosten von rund 160'000 CHF auf eine kombinierte Abluft-Erdsonden-Wärmepumpenanlage ist für die Baugenossenschaft Rotach wirtschaftlich interessant. Die Zielwerte gemäss SIA-Effizienzpfad Energie für das Etappenziel 2050 der 2000-Watt-Gesellschaft können gemäss den bisherigen Messergebnisse eingehalten werden.

Trotz dieser guten Bilanz gibt es zahlreiche Vorbehalte bezüglich der Energieeffizienz und dem thermischen und akustischen Komfort im Zusammenhang mit den eingesetzten Aussenluftdurchlässen. Das vorliegende Projekt wird durch eine umfassende Erfolgskontrolle die Einhaltung der Energieeffizienz und der Komfortanforderungen überprüfen und bei Bedarf notwendige Optimierungsmassnahmen auslösen.

### 2.2 Anlagenbeschreibung

Die Baugenossenschaft Rotach Zürich hat beschlossen, ihre Wohnsiedlung Dettenbühl aus den 70er Jahren mit insgesamt 7 Gebäuden und 120 Wohnungen schrittweise zu erneuern. Eine verhältnismässig bescheidene Aussendämmung der Fassade (8 cm Glaswolle) wurde bereits in den 90er Jahren ausgeführt. Die Wärmedämmung der Flachdächer soll nun verbessert und die grossen, undichten Fensterfronten an der Südfassade ersetzt werden. In den ebenfalls zu erneuernden Bädern und Küchen muss aus bauhygienischen Gründen eine Abluft-Anlage eingebaut werden. Diese Abluft wird zur Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser genutzt. Im Winter wird zudem eine zentrale Erdsonden-Wärmepumpe, welche den bestehenden Ölessel ersetzt, die Spitzenlast decken. Da die Fernleitung in Zukunft mit einer Vorlauftemperatur von 40 bis 50 statt 70 °C und nur im Winter betrieben wird, sinken auch die Verteilverluste erheblich. Die Baugenossenschaft prüft zudem die Installation einer rund 700 m<sup>2</sup> Photovoltaik-Anlage auf den Flachdächern der sieben Wohngebäude.

Die Realisierung der Erneuerungsmassnahmen erfolgt in Etappen im Zeitraum 2013 – 2015 (siehe Abb. 3). Die Hausnummern 7 und 9 wurden bereits vor Beginn des Messprojekts erneuert. Die restlichen Hausnummern und die Heizzentrale wurden 2014 – 2015 erneuert.

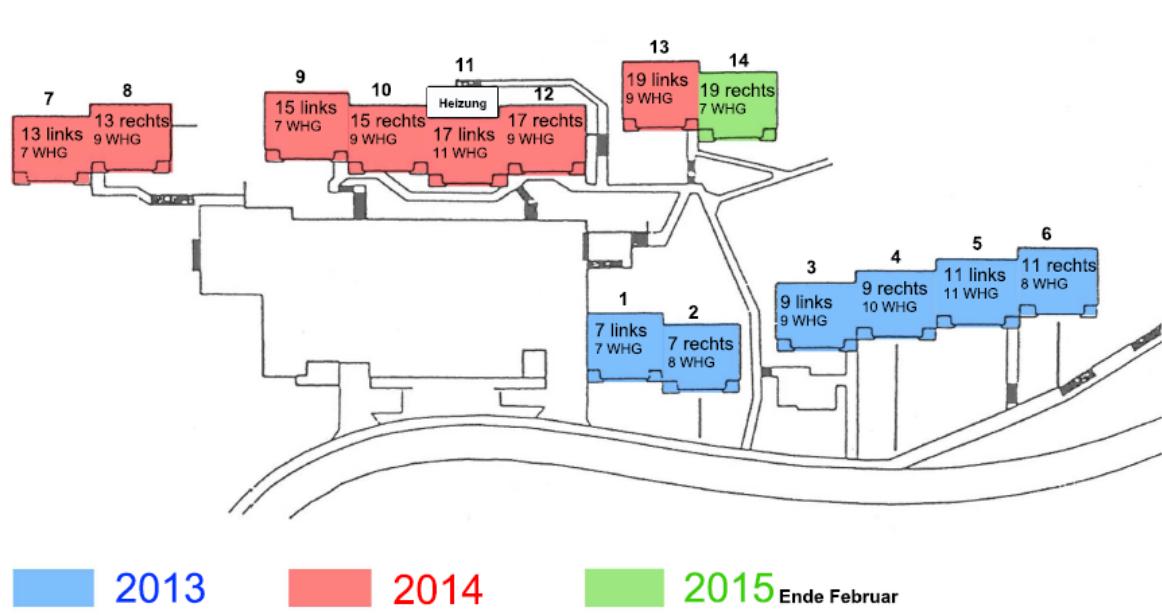


Abb. 3 : Abfolge der Erneuerungsmassnahmen

Tab. 1: Kennzahlen der sieben Mehrfamilienhäuser

| Haus          | Anzahl<br>Wohnungen | Energiebezugsfläche<br>(m <sup>2</sup> ) | Gebäudehüllzahl | Abluftvolumenstrom<br>(m <sup>3</sup> /h) |
|---------------|---------------------|--|-----------------|---|
| Kirchgasse 7  | 15                  | 1'597                                    | 1.09            | 1'600                                     |
| Kirchgasse 9  | 19                  | 2'003                                    | 0.91            | 2'200                                     |
| Kirchgasse 11 | 19                  | 2'001                                    | 0.91            | 2'200                                     |
| Kirchgasse 13 | 16                  | 1'672                                    | 1.08            | 1'800                                     |
| Kirchgasse 15 | 16                  | 1'675                                    | 1.08            | 2'200                                     |
| Kirchgasse 17 | 20                  | 2'068                                    | 0.86            | 1'800                                     |
| Kirchgasse 19 | 16                  | 1'700                                    | 1.08            | 1'600                                     |
| <b>Total</b>  | <b>121</b>          | <b>12'716</b>                            |                 | <b>13'600</b>                             |

### 2.3 Heizungs- und Lüftungsanlagen

Dank einer optimalen Auslegung und Betriebsweise der dezentralen Abluft-Wärmepumpen, sollen diese das gesamte Warmwasser und rund 40% der Heizwärme abdecken. Das Spitzenlastsystem – in diesem Fall die Erdsonden-Wärmepumpe – kann daher kleiner dimensioniert werden, wodurch die Investitionskosten der gesamten Anlage reduziert und die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert werden.

Die Investitionskosten für Heizung und Lüftung sind mit rund CHF 12'000 pro Wohnung verhältnismässig tief, weil an der Wärmeverteilung und -abgabe (Radiatoren) nur geringfügige Anpassungen gemacht werden und weil die Abluftanlage mit Aussenluftdurchlässen in den Wohn- und Schlafzimmern nur geringe bauliche Aufwände verursacht.

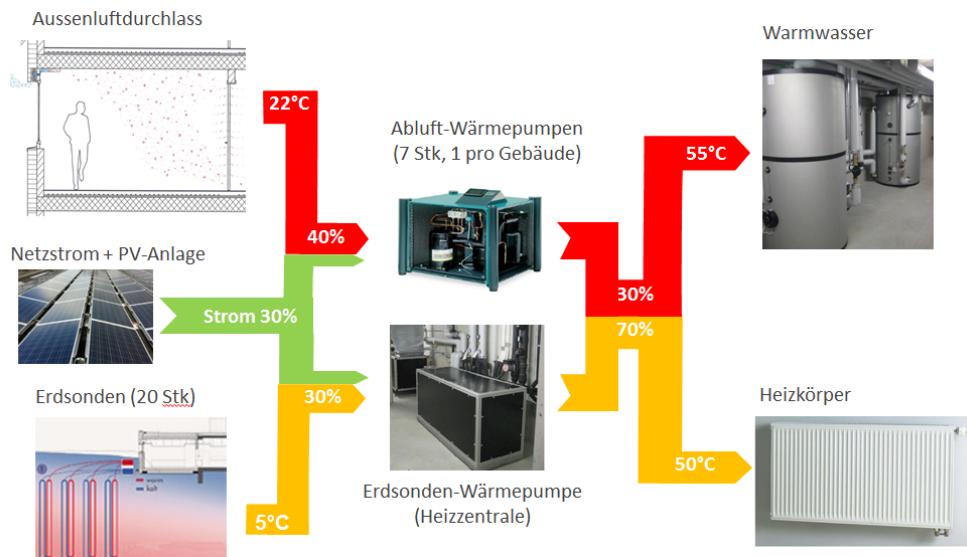


Abb. 4 : Energiekonzept



Abb. 5 : Eine von insgesamt 14 Abluftanlagen auf dem Dach



Abb. 6 : Rauchversuch am Aussenluftdurchlass im Wohnzimmer

# 3 Energieeffizienz

## 3.1 Grundlagen

### 3.1.1 Projekt- und Grenzwerte

Tab. 2: Planungs- und Grenzwerte gemäss Minergie-Antrag vom 02.05.2012

| Planwerte thermische Nutzenergie                 | kWh/m <sup>2</sup> |
|--|--------------------|
| Heizwärmebedarf ( $Q_h$ mit Standardluftwechsel) | 51.7               |
| Heizwärme ( $Q_h$ mit effektivem Luftwechsel)    | 56.4               |
| Warmwasser                                       | 20.8               |
| Gewichtete Energiekennzahl                       |                    |
| Planwert Minergie Antrag                         | 52.1               |
| Grenzwert Minergie Modernisierung                | 60.0               |

## 3.2 Vorgehen

Um die Energieeffizienz der einzelnen Heizanlagen zu beurteilen, wurden die Wärmepumpen-Wärme- und Elektrozähler monatlich abgelesen und ausgewertet. Zusätzlich wurde in der Unterstation von Kirchgasse 13 detaillierte Energie- und Leistungsmessungen durchgeführt, um das Zusammenspiel der zentralen und dezentralen Wärmeerzeugung besser zu verstehen. Es wurden auch Betriebstemperaturen der Wärmeerzeuger aufgezeichnet.

Da die Heizzentrale sowie die Unterstationen der Häuser 7 bis 11 bei Projektbeginn bereits fertig installiert waren und der Einbau von Wärmezählern entsprechend aufwendig gewesen wäre, wurde die Wärmeleitung mit mobilen Ultraschall-Wärmezählern erfasst (Modell HGLS-2000P-HTS-1 von JIANGSU HONGGUANG INSTRUMENT FACTORY CO., LTD).

In der Unterstation der Kirchgasse 13 sind gemäss Abb. 7 vier Wärme-, ein Elektro- und ein Kaltwasserzähler eingebaut (Für technische Daten siehe Anhang 12.1.3). Die Kernkomponente der Messeinrichtung ist ein Energilogger der Firma Huber Energietechnik AG, welcher die Temperaturen, Energie- und Leistungsdaten der Zähler viertelstündlich speichert und auf einer Web-Plattform anzeigt. Der Energilogger wurde am 19.05.2014 installiert.

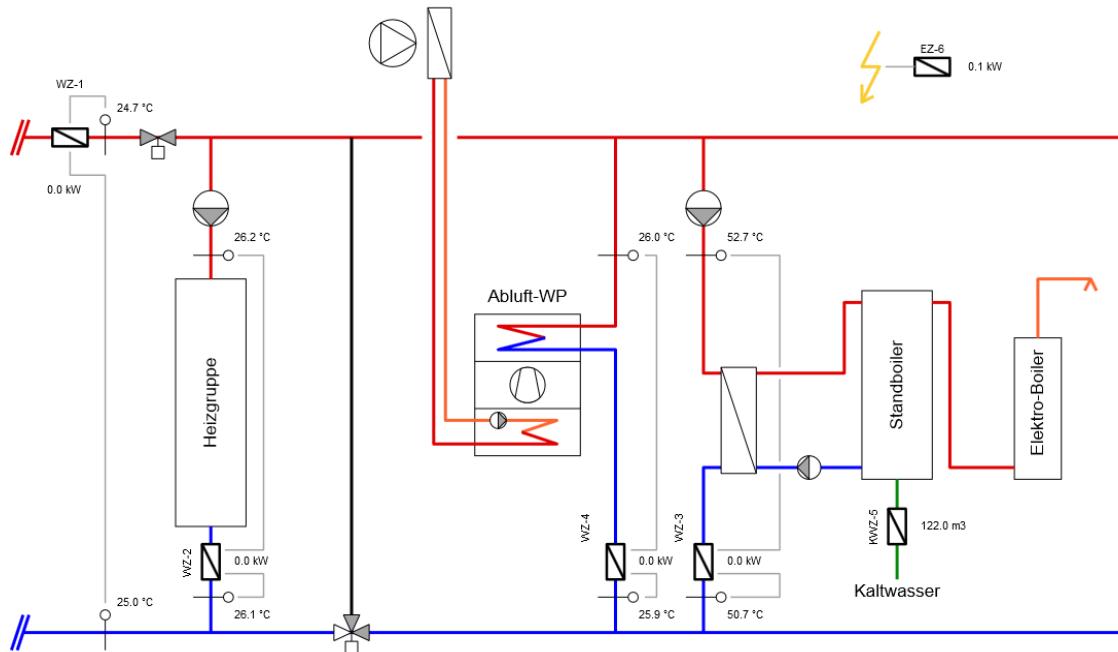


Abb. 7: Messschema der Unterstation 13; Quelle: netlogger.ch

### 3.3 Resultate

#### 3.3.1 Ganze Siedlung

Die sieben dezentralen Abluft-Wärmepumpen decken insgesamt 56 % des gesamten Wärmeverbrauchs. Der Rest wird durch die zentrale Erdsonden-Wärmepumpe über eine Fernleitung gedeckt (siehe Abb. 10). Abb. 8 zeigt den Stromverbrauch der Abluftwärmepumpen (inkl. Abluftventilator) pro Energiebezugsfläche von April 2015 bis März 2016. Der Ölkessel wurde im April 2015 abgestellt. Der spezifische Stromverbrauch reicht von 0.4 kWh/m<sup>2</sup> bis zu 2.6 kWh/m<sup>2</sup> pro Monat. Die Summe der Stromverbräuche aller Wärmepumpen inkl. Lüftungsstrom ist in Abb. 9 dargestellt. Die angegebenen Arbeitszahl entspricht dem Verhältnis der Summe der Wärmeproduktion zur Summe des Elektrizitätsverbrauchs aller Wärmepumpen.

Der mittlere Wärmeverbrauch des Areals für Warmwasser liegt bei 27 kWh/m<sup>2</sup>, der Heizwärmeverbrauch bei 62 kWh/m<sup>2</sup>. Warmwasser- und Heizwärmeverbrauch liegen somit über den Planungswerten gemäss Minergie-Antrag. Die durchschnittliche monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpen schwankt je nach Jahreszeit zwischen 2.9 und 3.4. Die Jahresarbeitszahl von 3.3 ist unter Berücksichtigung der hohen benötigten Heizvorlauftemperatur (45 °C bei einer Aussentemperatur von -8 °C) und dem hohen Warmwasseranteil von 30 % als hoch einzustufen.

Die gewichtete Energiekennzahl (Abb. 11) konnte durch den Ersatz des Ölheizkessels mit einer kombinierten Abluft-Erdsonden-Wärmepumpenanlage um gut 50 % reduziert werden. Der Grenzwert Minergie Modernisierung wird im Betrieb eingehalten. Der Minergie-Planungswert wird nicht ganz erreicht, was unter anderem mit den höheren Raumtemperaturen und dem höheren Warmwasserverbrauch erklärt werden kann.

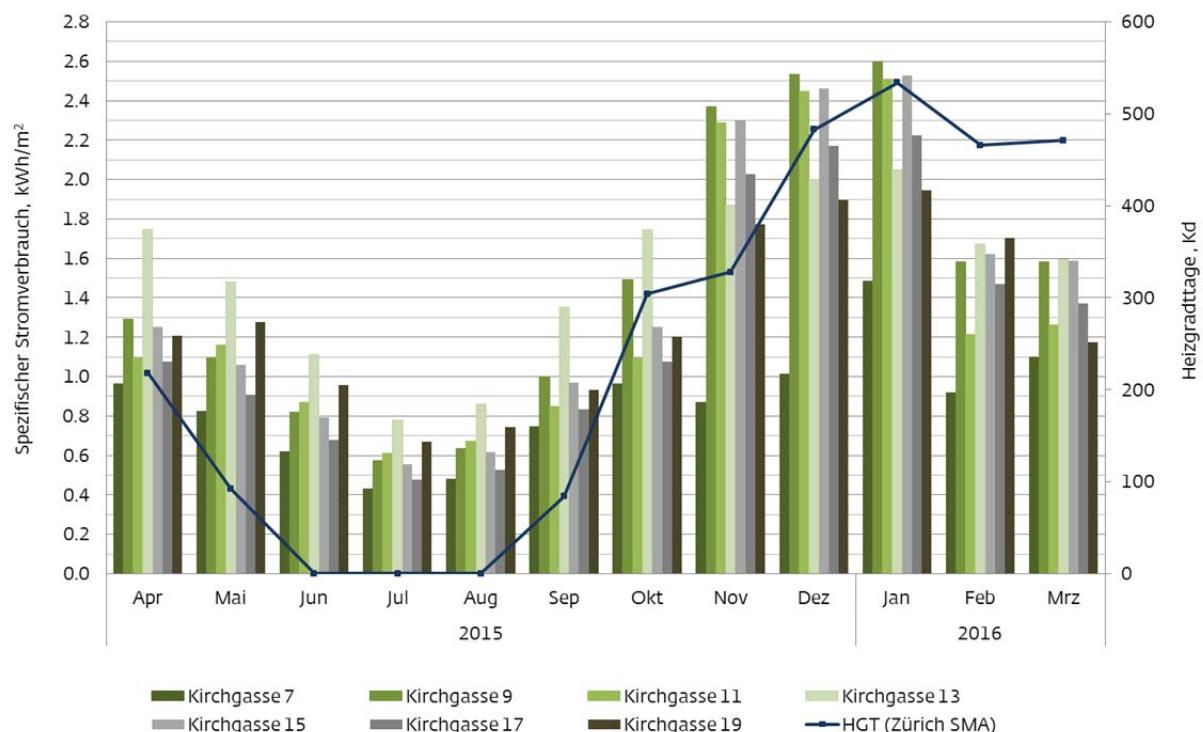


Abb. 8 : Flächenspezifischer elektrischer Energieverbrauch der Wärmepumpen

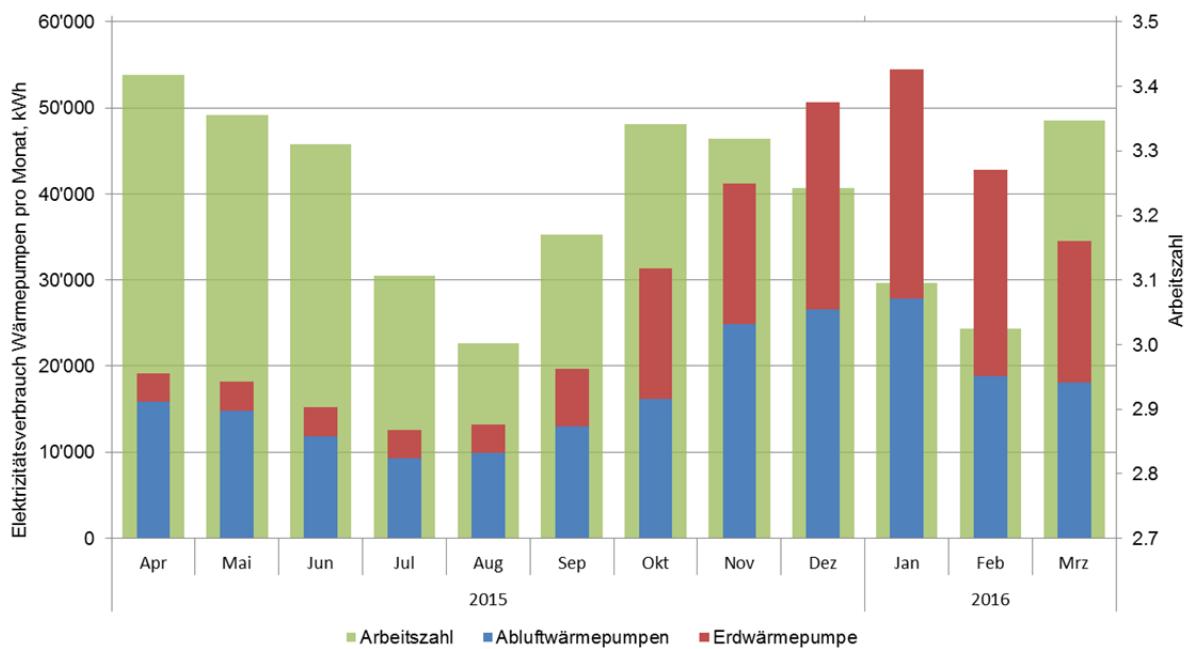


Abb. 9: Elektrizitätsverbrauch Wärmepumpen, inkl. Lüftung, April 2015 – März 2016; Arbeitszahl

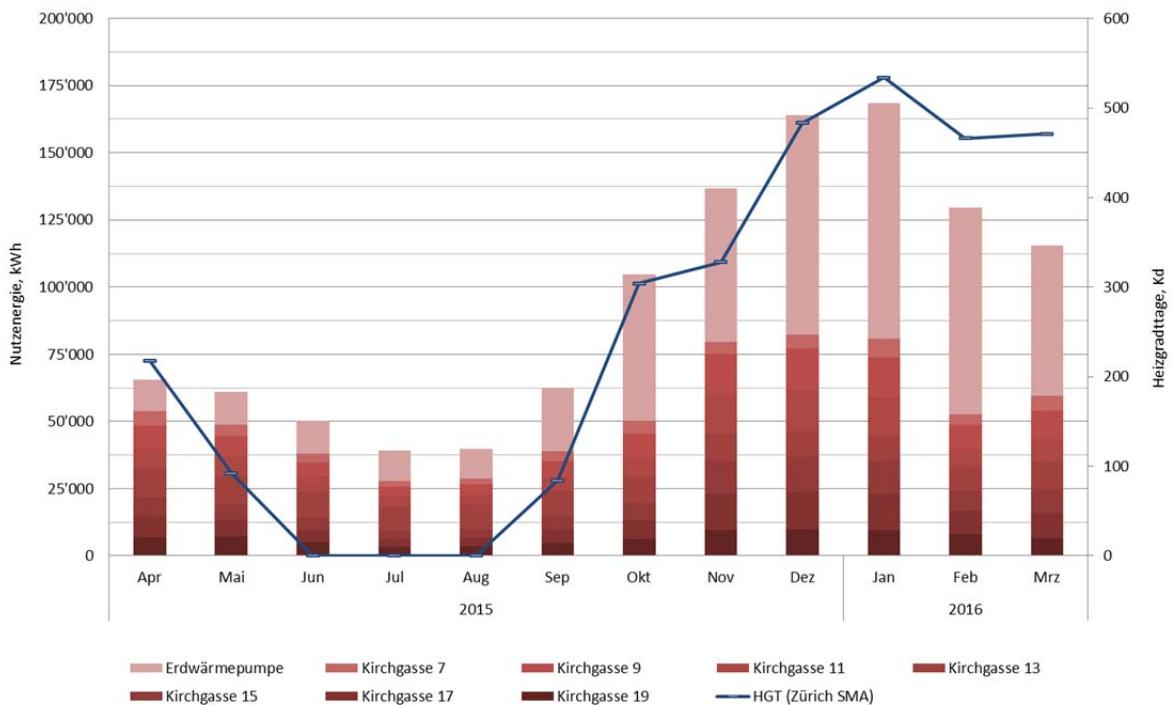


Abb. 10: Monatliche Wärmeproduktion kumuliert über alle Wärmepumpen

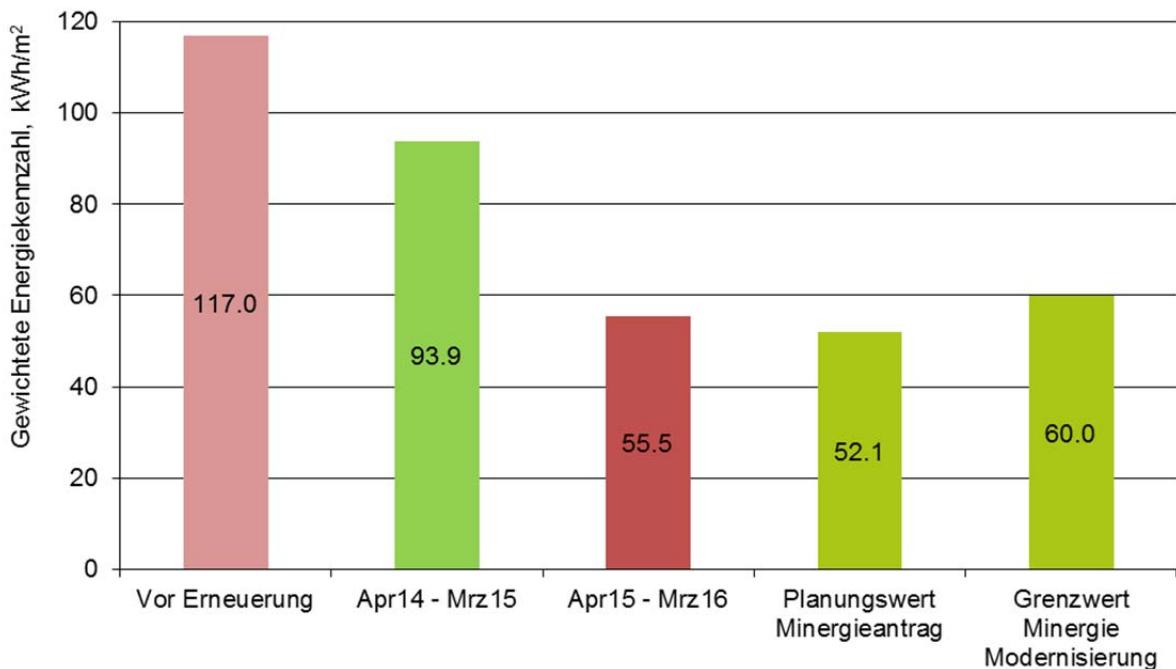


Abb. 11: Gewichtete Energiekennzahl, Minergie Plan- und Grenzwert

In Abb. 12 ist die Treibhausgasbilanz der Siedlung Dettenbühl vor und nach der Erneuerung dargestellt. Der anspruchsvolle Zielwert gemäss SIA 2040 ( $15.5 \text{ kg/m}^2$ ) wird unterschritten, wobei der eher bescheidene bauliche Aufwand (Erstellung) auch wesentlich zu dem guten Resultat beiträgt. Im Betrieb sinken die Treibhausgasemissionen von 34 auf  $7 \text{ kg/m}^2$ , davon gut die Hälfte für Wärmepumpen und Abluftanlagen, der Rest für Haushalt- und Allgemeinstrom. Die Baugenossenschaft prüft zudem die nachträgliche Installation einer  $700 \text{ m}^2$  grossen PV-Anlage, welche auf den Flachdächern der 7 Gebäude installiert werden könnte. Die Treibhausgasemissionen des Betriebs würden damit um  $1.5 \text{ kg/m}^2$  reduziert, jene der Erstellung um  $0.6 \text{ kg/m}^2$  erhöht.

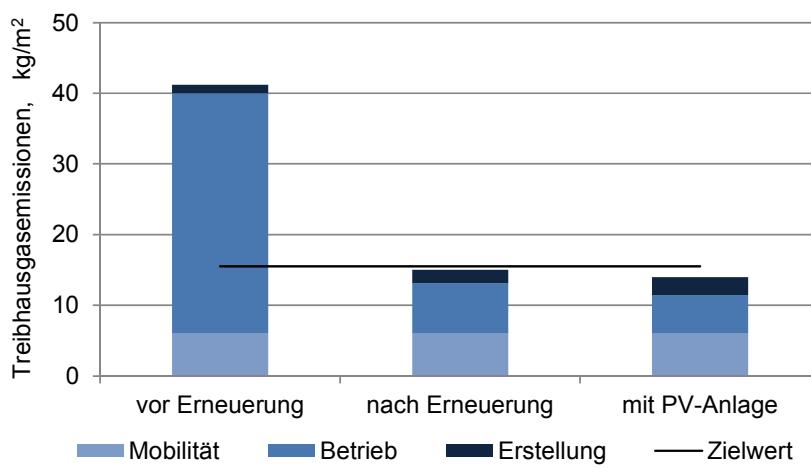


Abb. 12: Beurteilung der Treibhausgasemissionen gemäss SIA 2040: der Zielwert wird nach der Erneuerung eingehalten, eine  $700 \text{ m}^2$  Photovoltaik-Anlage könnte die Bilanz im Betrieb weiter verbessern; Annahme Stromprodukt: CH-Verbrauchermix

### 3.3.2 Kirchgasse13

Die detaillierten Messungen in der Unterstation von Kirchgasse 13 sind im folgendenden Unterkapitel dargestellt. Das Monatsdiagramm in Abb. 13 zeigt das Verhältnis zwischenspezifischem Heizwärme- und Warmwasserverbrauch. Abb. 14 zeigt für den gesamten Messzeitraum seit Mai 2014 die Arbeitszahl, welche im Winter 2015/2016 wegen eines defekten Temperatursensors auf unter 2.5 sank. Die Wärmeenergie für die Warmwasseraufbereitung wird vollständig von den Abluft-Wärmepumpen abgedeckt. In den Wintermonaten Dezember bis Februar werden rund 50% der Wärmeenergie durch die Erdwärmepumpe zur Heizungsunterstützung gedeckt.

Der monatliche Warmwasserbedarf der Kirchgasse 13 bewegt sich zwischen 2'560 kWh im Juli 2015 und 4'005 kWh im Januar 2016. Pro Jahr beträgt der spezifische Warmwasserverbrauch **23.6 kWh/m<sup>2</sup>** (Total 39'448 kWh/Jahr). Gemäss Minergie-Nachweis sollte der jährliche Warmwasserbedarf bei **20.8 kWh/m<sup>2</sup>** liegen. Für die gleiche Zeitperiode liegt der gemessene Heizwärmeverbrauch bei **57.3 kWh/m<sup>2</sup>** (Total 95'874 kWh/Jahr). Gemäss Minergie-Nachweis sollte der Heizwärmebedarf bei **52.1 kWh/m<sup>2</sup>** liegen.

Abb. 15 zeigt die in der Kirchgasse 13 gemessenen Vorlauftemperaturen der Fernleitung (Erdsonden-Wärmepumpe). Nach der Erneuerung der letzten Unterstation in Haus Nr. 19 konnte im April 2015 die Vorlauftemperatur der Fernleitung um 20°C reduziert und der Ölkessel definitiv ausser Betrieb gesetzt werden.

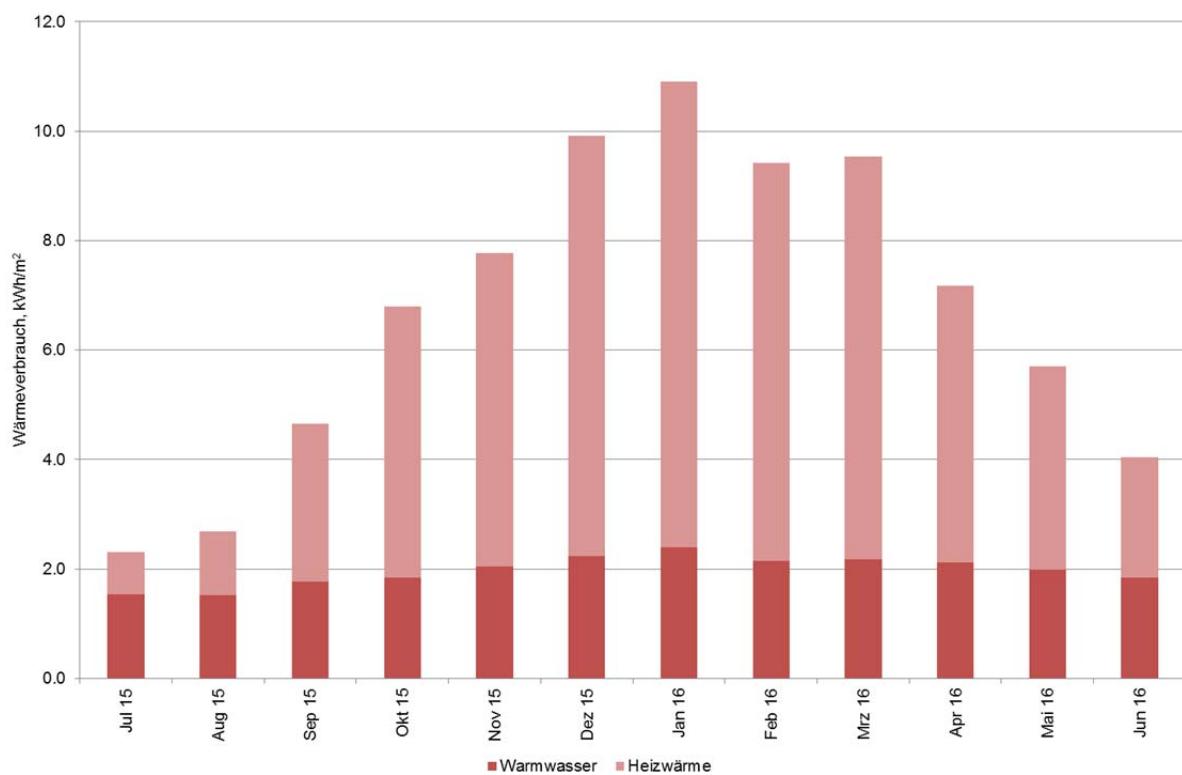


Abb. 13 : Kirchgasse 13: Spezifische Wärmeverbräuche für Warmwasser und Heizwärme, Juli 2015 – Juni 2016

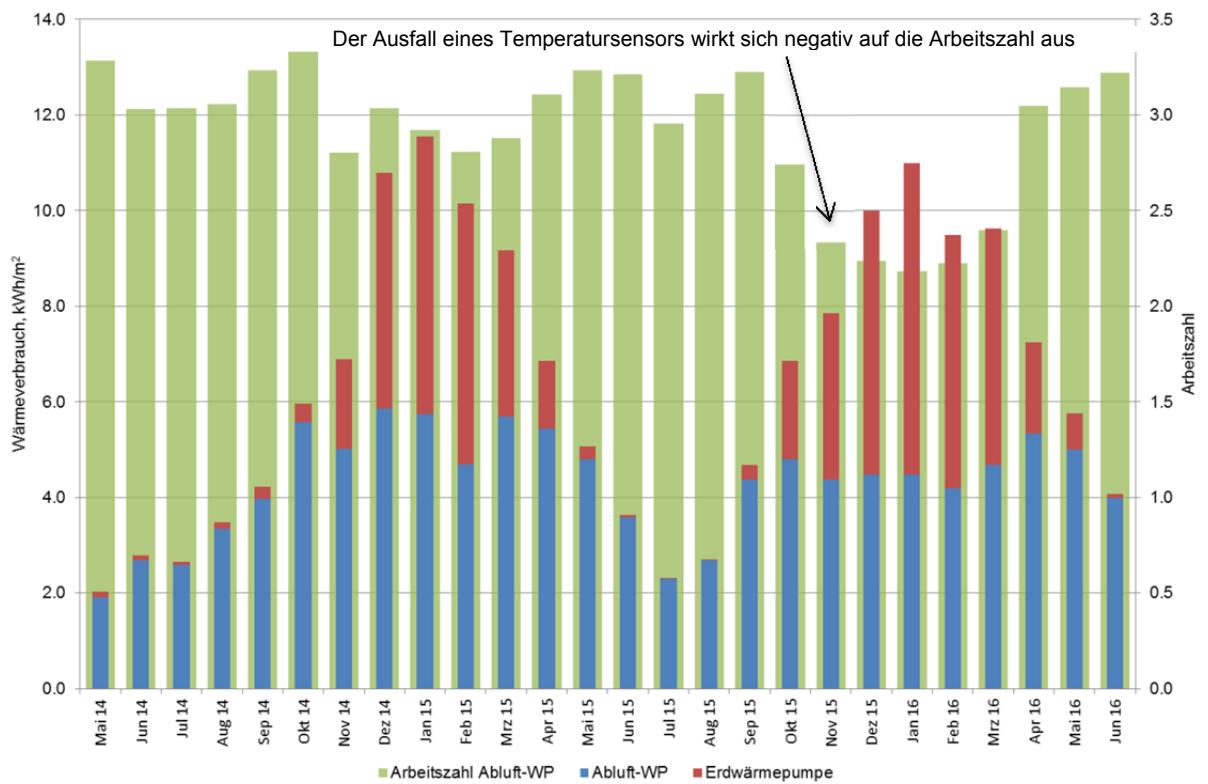


Abb. 14 : Kirchgasse 13: Spezifische Wärmeproduktion der Abluft-Wärmepumpe sowie Deckung der Spitzenlast über die Fernleitung (Erdwärmepumpe); Arbeitszahl der Abluft-Wärmepumpe; zwischen Oktober 2015 und März 2016 ist ein Temperatursensor in einem der zwei Verdampfer ausgefallen, was vorübergehend zu einer Reduktion der Arbeitszahl geführt hat

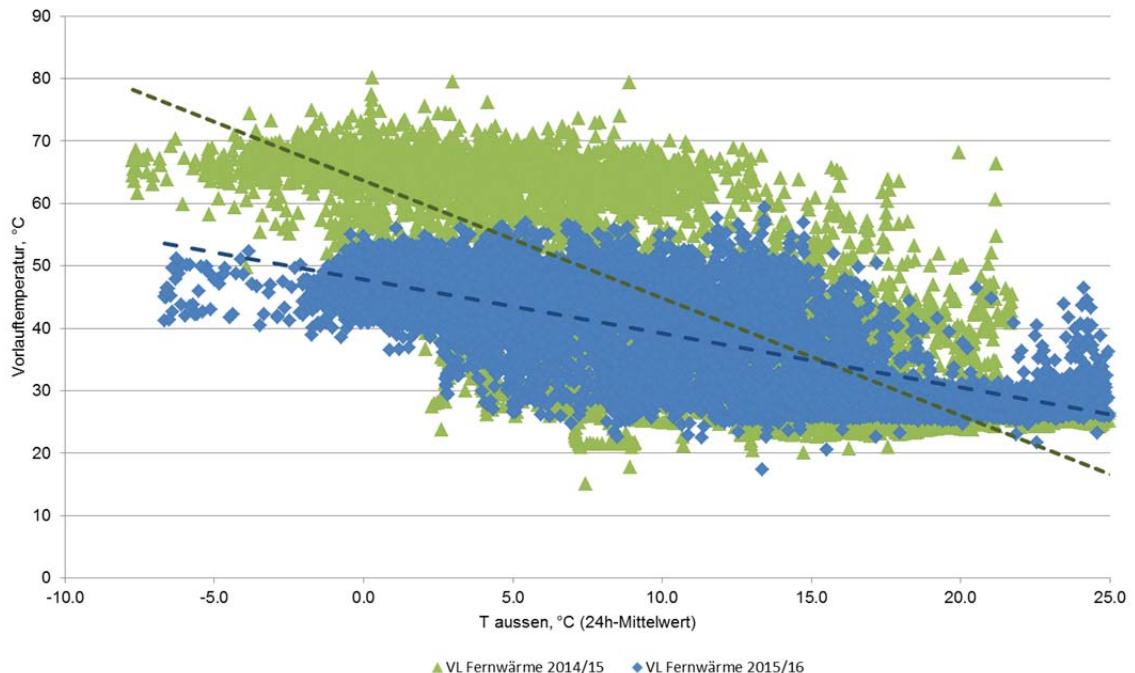


Abb. 15 Kirchgasse 13: Vorlauftemperatur Fernwärme vor und nach der Aussenbetriebssetzung des Heizölkessels

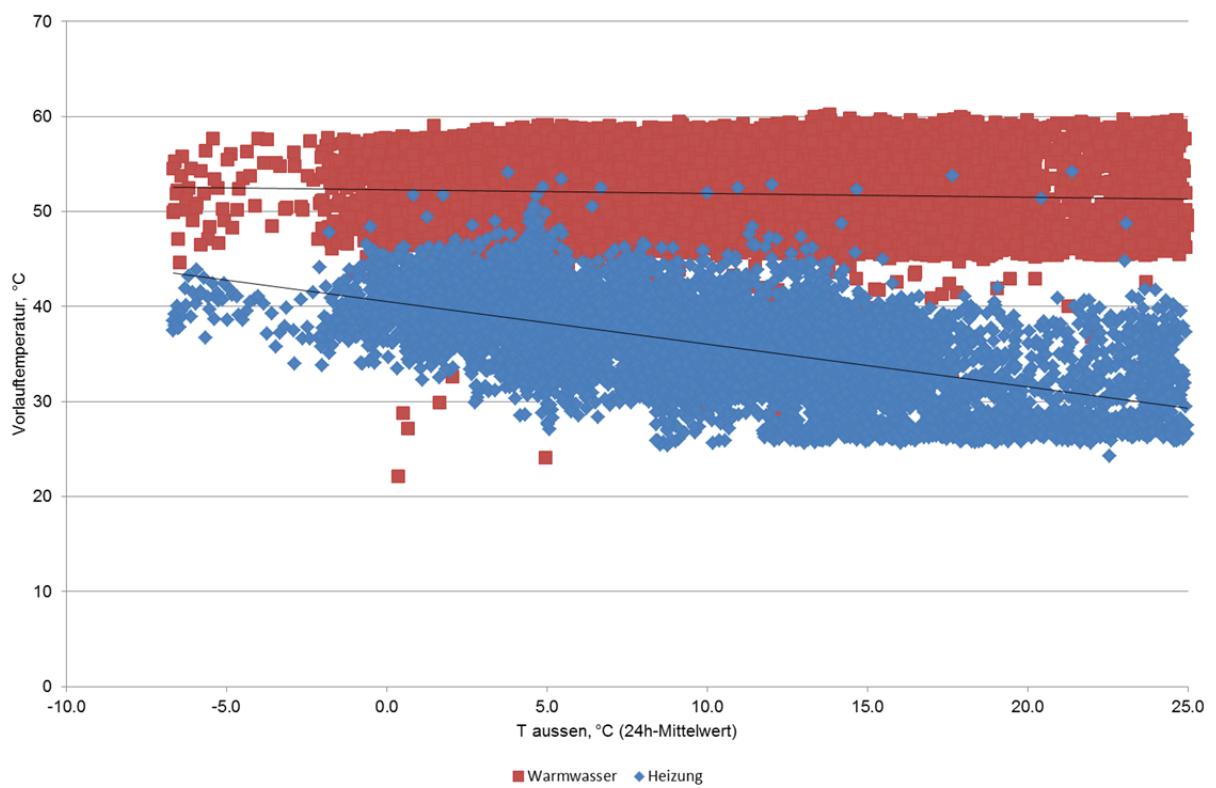


Abb. 16 Kirchgasse 13: Vorlauftemperaturen im Heiz- und im Warmwasserbetrieb (Juli 2015 bis Juni 2016)

## 4 Thermische Behaglichkeit

### 4.1 Grundlagen

#### 4.1.1 Bewertungskriterien

Die normativen Komfortbereiche für die Raumtemperatur ist in Tab. 3 dargestellt. Für die relative Raumluftfeuchte gilt der Ziffer 3.5.1.3 der SIA-Norm 180. In beheizten oder mechanisch belüfteten Räumen darf in Höhenanlagen bis 800 m ü.M. die relative Raumluftfeuchte eine Grenze von 30% während maximal 10% der jährlichen Nutzungszeit unterschreiten. Diese Feuchtegrenze gilt beim Auslegungswert für die Raumlufttemperatur im Winter.

Tab. 3: Temperaturanforderungen gemäss SIA-Normen

| SIA-Norm      | Auslegung Heizung |
|---------------|-------------------|
| SIA 2024:2015 | 21°C              |

### 4.2 Vorgehen

Die thermische Behaglichkeit wurde zwischen März 2014 und Februar 2015 in insgesamt 19 Wohnungen jeweils im Wohn- und Schlafzimmer während zwei Wochen gemessen. Die Messungen wurden in vier Etappen (Messperioden) durchgeführt (Tab. 3). Details zu den gemessenen Wohnungen befinden sich in Anhang 11.1. Als Messgeräte wurden Datenlogger mit 10 Min. Messintervall verwendet. Die Datenblätter der Messgeräte sind im Anhang 12 zusammengefasst.

Für eine ausgewählte Wohnung wurde zusätzlich während eines Monats (März/April 2014) die Temperatur am Aussenluftdurchlass (in der Wohnung) gemessen.

Tab. 4 : Messperioden I bis IV

| Messperiode | Start der Messperiode | Ende der Messperiode |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| I           | 24.03.2014            | 11.04.2014           |
| II          | 22.04.2014            | 15.05.2015           |
| III         | 10.11.2014            | 24.11.2014           |
| IV          | 10.02.2015            | 27.02.2015           |

Als Referenz wurden die Aussenluftbedingungen (Temperatur, rel. Feuchte) der Meteostation SMA festgehalten. Die Resultate für die vier Messperioden sind in Anhang 11.3 zu finden. Tab. 4 zeigt eine Zusammenfassung der Messdaten.

Tab. 5: Min-, Max- und Mittelwerte der Aussenlufttemperatur und der rel. Luftfeuchtigkeit

| Messperiode | Parameter                 | Einheit | Min. | Max. | Mittel |
|-------------|---------------------------|---------|------|------|--------|
| I           | Aufttemperatur            | °C      | -0.2 | 20.5 | 10.1   |
|             | Relative Luftfeuchtigkeit | %       | 19   | 97   | 65     |
| II          | Aufttemperatur            | °C      | 3.2  | 21.2 | 11.1   |
|             | Relative Luftfeuchtigkeit | %       | 33   | 97   | 77     |
| III         | Aufttemperatur            | °C      | 2.0  | 13.3 | 6.7    |
|             | Relative Luftfeuchtigkeit | %       | 0    | 100  | 88     |
| IV          | Aufttemperatur            | °C      | -5.8 | 9.9  | 0.4    |
|             | Relative Luftfeuchtigkeit | %       | 0    | 100  | 80     |

## 4.3 Resultate

### 4.3.1 Darstellung

Die Messergebnisse werden im Folgenden anhand der Minimal-, Median-, Maximal-, 0.10- und 0.90 Perzentil-Werten zusammengefasst dargestellt.

### 4.3.2 Raumlufttemperatur

Gemäss der Aufteilung der gemessenen Raumtemperaturen liegen fast alle Wohnungen im Komfortbereich zwischen 20 und 24°C. Die gemessenen Raumlufttemperaturen werden von der Sanierung nicht wesentlich beeinflusst. In den Wohnzimmern (WZ) werden zum Teil erhöhte Raumlufttemperaturen über 24 °C gemessen. Vor allem in den Schlafzimmern (SZ) werden zum Teil tiefe Raumlufttemperaturen unter 20°C gemessen. Die Raumlufttemperaturen werden durch die Bewohnenden mit den Heizthermostaten individuell eingestellt. Abb. 17 zeigt die statische Verteilung der gemessenen Raumtemperaturen. Der Komfortbereich (20-24°C) ist mit grüner Farbe dargestellt. Bei den bereits sanierten Wohnungen (Messperioden I, III und IV) liegen 68% der Messungen im grünen Bereich und halten somit die SIA-Normwerte ein. Überwärmungen treten nur punktuell auf. In den noch unsanierten Wohnungen (Messperiode II, Kirchgasse 15, 17,19) sind 63% der Messungen im Komfortbereich. Die tiefste gemessene Raumlufttemperatur lag bei 13°C und beruht vermutlich auf einer langen Fensterlüftung. Die Höchsttemperatur wurde mit 29°C gemessen. Insgesamt lagen in den unsanierten Wohnungen 38% der Messwerte im zu warmen Bereich (>24°C).

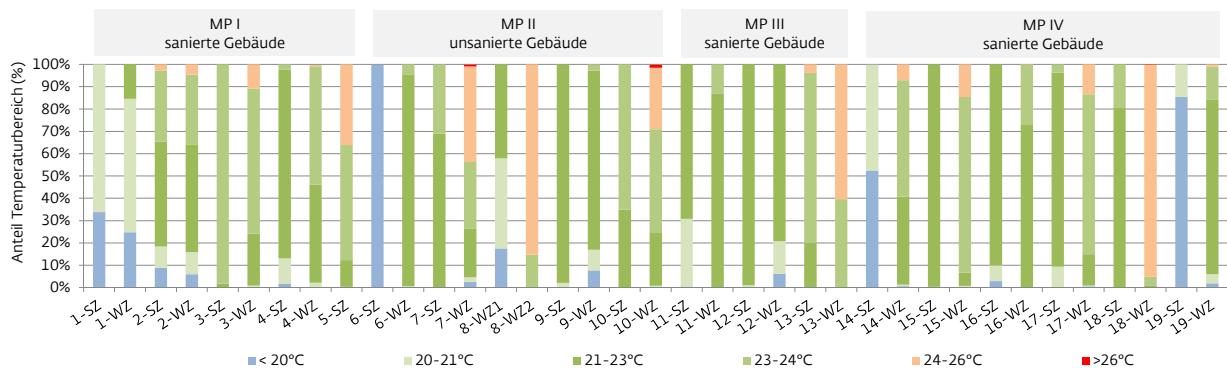


Abb. 17: Aufteilung der Raumtemperaturen

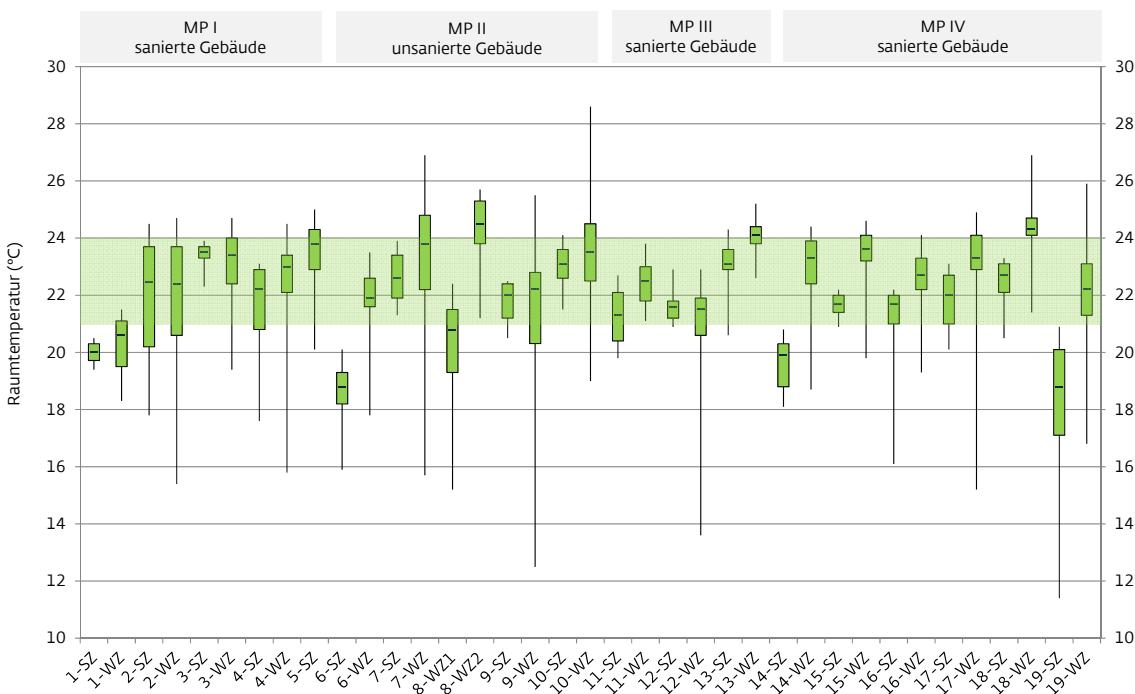


Abb. 18: Verteilung der Raumtemperatur (Min-, Max-, Median- und Perzentilwerte)

#### 4.3.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit bewegt sich im Durschnitt zwischen 39% bei den sanierten und 43% bei den unsanierten Wohnungen (siehe Abb. 19). In den sanierten Wohnungen sind die tiefere Messwerte auf den höheren Luftwechsel durch die Abluftanlage zurückzuführen. Die detaillierten Messergebnisse sind im Anhang dargestellt. 55,2% der Messwerte für die sanierten Wohnungen bewegen sich zwischen 30 und 40%. 37,9% der Messwerte liegen über 40%. Nur 6,9% weisen eine zu tiefe Raumluftfeuchtigkeit auf (< 30%).

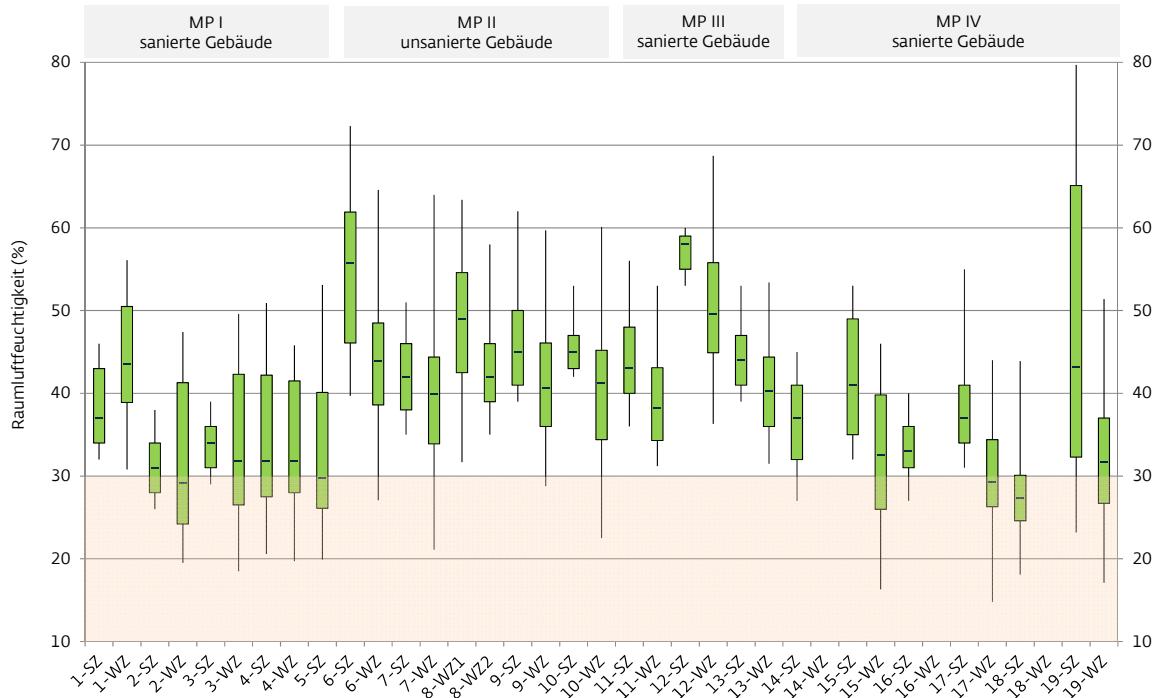


Abb. 19: Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit (Min-, Max-, Median- und Perzentilwerte)

Die gestrichelten Säulen weisen auf Messfehler hin (Ausfall des Feuchtigkeitssensors).

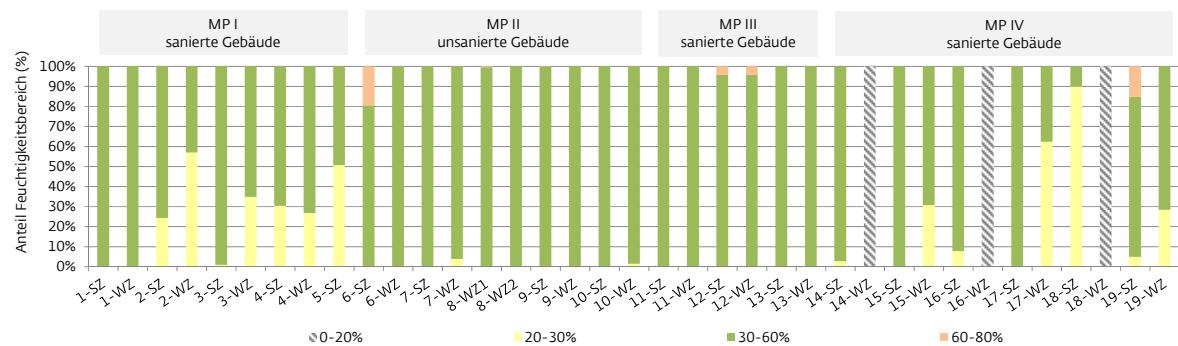


Abb. 20: Aufteilung der Raumluftfeuchtigkeit

#### 4.3.4 Detaillierte Analyse des Raumklimas pro Wohnung

Die Grafiken in Anhang 11.3 zeigen den Verlauf der Raumluftfeuchte in % (linke Achse, durchgezogene Kurven) und der Raumlufttemperatur in °C (rechte Achse, gestrichelte Kurven) für jede Wohnung in Abhängigkeit der Messperiode. Es ist jeweils die erste Woche jeder Messperiode dargestellt.

#### 4.3.5 Zulufttemperatur im Aussenluftdurchlass

Für einen ausgewählten Aussenluftdurchlass wurde vom 24.03.2013 und dem 25.04.2013 ein Temperaursensor mit Datenlogger installiert. Die Messwerte wurden mit dem Verlauf der Aussenlufttemperatur (Klimadaten SMA) verglichen und sind in Abb. 21 dargestellt. Die Zulufttemperaturen liegen nachts leicht (ca. 3 °C) und am Tag aufgrund der Erwärmung der

Aussenluft an der Südfassade deutlich (bis zu 10 °C) über den Aussentemperaturen. Eine Umkehrung der Strömungsrichtung von innen nach aussen tritt nie auf.

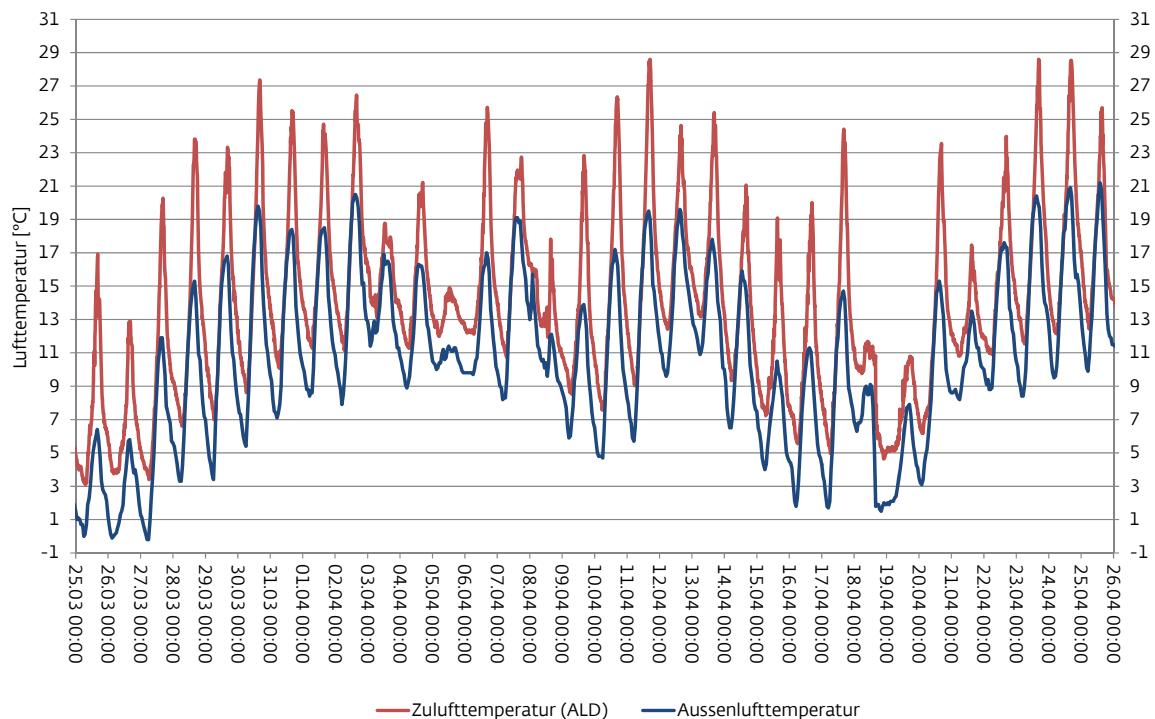


Abb. 21: Zulufttemperatur im Aussenluftdurchlass

# 5 Raumluftqualität

## 5.1 Grundlagen

Neben Luftfeuchtigkeit und Temperatur ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration ein wichtiger Parameter um den Raumkomfort zu beurteilen. Schlecht gelüftete Wohnungen weisen eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration auf. Die negativen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> sind spürbar: Unwohlsein, Konzentrationsschwäche und Leistungsabfall. Leistungsfähigkeit, Konzentration und Wohlbefinden werden bereits ab einer Konzentration von 800 ppm Kohlendioxid beeinträchtigt. Wirklich gute Raumluftqualität übersteigt einen Grenzwert von 1000 ppm CO<sub>2</sub> nicht. Ab 1200 ppm wird die Raumluft von 20% der Benutzer als unbefriedigend bezeichnet.



Abb. 22 : Typische CO<sub>2</sub>-Konzentration (in ppm) und ihre Auswirkungen für den Menschen

### 5.1.1 Klassifikation nach SIA 382/1:2007

Für die Beurteilung der Raumluftqualität werden die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Wohnungen nach SIA 382/1:2007 (EN 13779) klassifiziert (Siehe Tab. 6).

Tab. 6 : Klassifizierung der gemessenen CO<sub>2</sub>-Höchstkonzentration nach SIA 382/1:2007

| Kategorie | CO <sub>2</sub> -Höchstkonzentration (ppm) | Beschreibung   |
|-----------|--|--|
| RAL 1     | ≤ eine Angaben                             | spezielle Luftqualität (Labor- und Produktionsräume)                       |
| RAL 2     | ≤ 950                                      | hohe Luftqualität (spezielle Ansprüche an Gerüche)                         |
| RAL 3     | ≤ 150-1350                                 | Mittlere Luftqualität (typische Wohn- und Büroräume)                       |
| RAL 4     | ≥ 1350                                     | Niedrige Luftqualität (Lagerräume, Korridor, Räume in denen geraucht wird) |

## 5.2 Vorgehen

Die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration erfolgte parallel zu den Raumlufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessungen gemäss Kap. 4 mit den in Kap. 12.1.1 beschriebenen Messgeräten.

## 5.3 Resultate

Die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind in Abb. 23 dargestellt (0.1 Perzentil-, Min-, Median-, 0.9 Perzentil- und Maximal-Werte). Die RAL-Kategorien der Raumluftqualität gemäss SIA 382/1 werden mit grün- bis rosa- eingefärbten Bereichen markiert.

Die Messwerte für „7-WZ/7-SZ“ und „11-WZ/11-SZ“ beziehen sich auf die gleiche Wohnung an der Kirchgasse 17 vor und nach der Sanierung. Das gleiche gilt auch für die Messwerte „14-WZ/14-SZ“ und „18-WZ/18-SZ“ für eine Wohnung an der Kirchgasse 15.

Für die Wohnung an der Kirchgasse 17, zeigen die Messwerte eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität nach der Sanierung. Die Raumluftqualität im Schlafzimmer steigt von RAL 3 (gut) zu RAL 2 (sehr gut). Im Wohnzimmer ist die Verbesserung noch deutlicher; hier steigt die Raumluftqualität von RAL 4 (mässig/schlecht) zu RAL 2 (sehr gut). Insgesamt wurde die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration um 20% reduziert. Die Streuung um den Medianwert wurde ebenfalls deutlich reduziert.

In den Schlafzimmern der Wohnungen 6, 9, 12, 15 und 17 reicht das 0.9-Perzentil bis in RAL-4. Offensichtlich ist der Aussenluftvolumenstrom in diesen Zimmern zu gering.

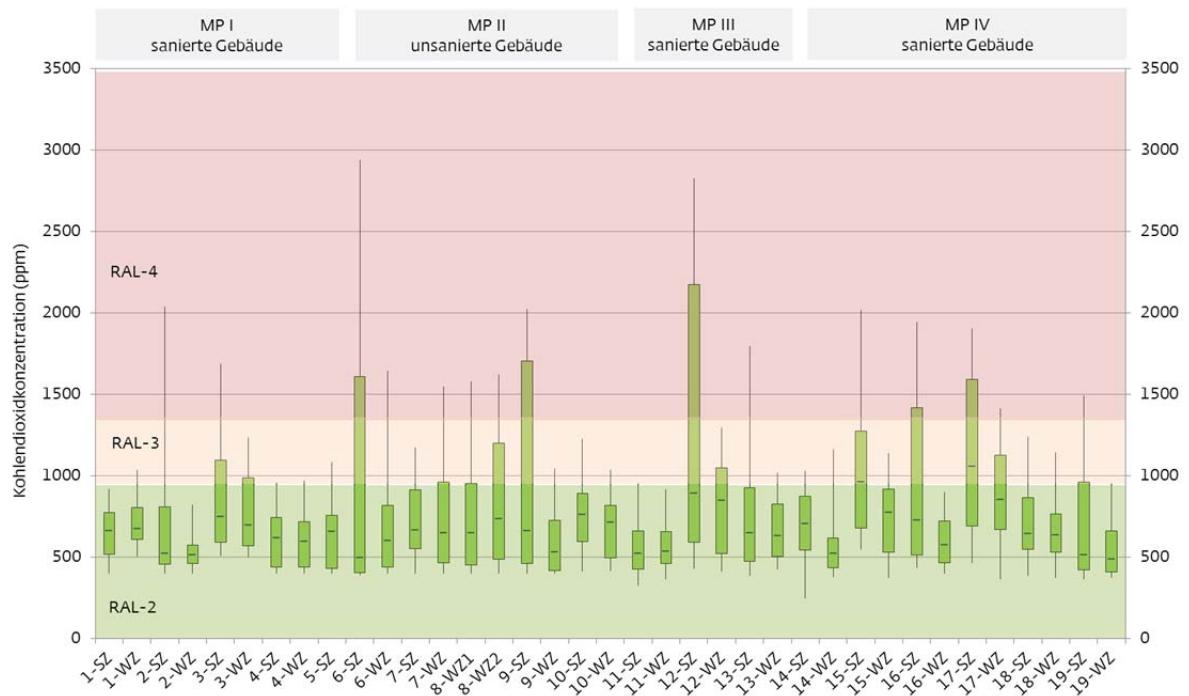


Abb. 23: Kohlendioxydkonzentration (Min-, Max-, Median- und Perzentilwerte)

Die Aufteilung der Räume in den RAL-Klassen ist in Abb. 24 dargestellt:

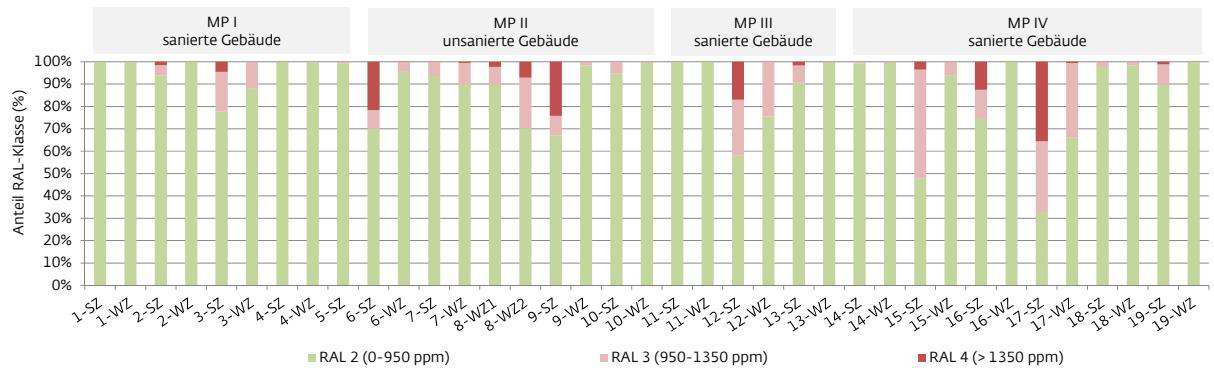


Abb. 24: RAL-Klasse Aufteilung pro Raum

# 6 Luftmengenbilanz

## 6.1 Vorgehen

Die Luftqualität hängt massgeblich von der über die Aussenluftdurchlässe nachströmenden Luftmenge ab. Auf Wunsch der Minergie-Zertifizierungsstelle sind in einem Haus die Luftmengen pro Aussenluftdurchlass bei Nennvolumenstrom der Abluftanlage untersucht worden. Die Minergie-Anforderung von  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  pro Aussenluftdurchlass wird weitgehend eingehalten. Lediglich bei fünf von 38 Aussenluftdurchlässen lag der Messwert bis max. 7 % unter der Anforderung.

Da bei Nennvolumenstrom vermehrt Klagen wegen trockener Luft und Zugserscheinungen auftreten, wird der Volumenstrom im Normalbetrieb in allen Häusern etwas tiefer, auf ca. 70% des Nennvolumenstroms eingestellt. Um die Funktion der Abluftanlage bzw. der Aussenluftdurchlässe zu beurteilen, wurde die Luftmengenbilanz in insgesamt 6 sanierten Wohnungen gemessen. Im August 2014 wurde die erste Messung der Luftmengenbilanz in einer leeren Wohnung an der Kirchgasse 13 durchgeführt. Im Februar 2015 die zweite Messung in fünf Wohnungen an der Kirchgasse 7, 13 und 15. Dabei wurden einerseits die Zuluft-Volumenströme durch die vier Aussenluftdurchlässe im Wohnzimmer und den drei Schlafzimmern und andererseits die Abluft-Volumenströme in Badezimmer, WC und Küche gemessen.

### 6.1.1 Versuchsanordnung – August 2014

Die Luftmengenbilanz soll in Abhängigkeit des Nutzerverhaltens (Fenster- und Zimmertüröffnung, Fallunterscheidung nach Tab. 6) die folgenden Punkte klären:

- Anteil der Aussenluft, welche durch die Aussenluftdurchlässe nachströmt.
- Anteil der Aussenluft, welche durch Leckagen (Infiltrationsanteil) bzw. durch offene Fenster nachströmt.
- Druckdifferenz über den Aussenluftdurchlässen.

Zuerst wird die Luftmengenbilanz mit geschlossenen Fenstern und Zimmertüren gemessen (Fall 1). Um die vermuteten Leckagen zu reduzieren werden im zweiten Schritt die Wohnungstür und eine Stoßfuge bei der Fensterrahmenverbreiterung im Wohnzimmer von innen mit Klebeband luftdicht abgedichtet (Fall 2).

Zusätzlich werden vier Fälle mit offenem bzw. gekipptem Fenster sowie jeweils mit geschlossener und offener Zimmertür im Schlafzimmer 1 untersucht (Fall 3 bis 6). Die Versuchsanordnung ist in Tab. 6 dargestellt. Die Messung des Luftvolumenstroms und der Druckdifferenz erfolgt mit Messgeräten von Testo (siehe Kap. 12.1.2). Der Einsatz eines anderen Messgeräts (Flow-Finder) war aufgrund des geringen Volumenstroms erfolglos.

Tab. 7: Versuchsanordnung August 2014

| Fall | Konfiguration |                |                |                |           |    |       |         |         |     |
|------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------|----|-------|---------|---------|-----|
|      | Wohnzimmer    | Schlafzimmer 1 | Schlafzimmer 2 | Schlafzimmer 3 | Badzimmer | WC | Küche | Fenster | Fenster | Tür |
| 1    | zu            | zu             | zu             | zu             | zu        | zu | zu    | zu      | zu      | zu  |
| 2    | zu            | zu             | zu             | zu             | zu        | zu | zu    | zu      | zu      | zu  |
| 3    | zu            | offen          | zu             | zu             | zu        | zu | zu    | zu      | zu      | zu  |
| 4    | zu            | gekippt        | zu             | zu             | zu        | zu | zu    | zu      | zu      | zu  |
| 5    | zu            | offen          | offen          | zu             | zu        | zu | zu    | zu      | zu      | zu  |
| 6    | zu            | gekippt        | offen          | zu             | zu        | zu | zu    | zu      | zu      | zu  |

### 6.1.2 Versuchsanordnung – Februar 2015

Im Oktober und Dezember 2015 wurden die Abluftmengen für die Kirchgasse 7 bis 15 mit dem Lüftungsinstallateur geprüft und korrekt eingestellt. Die Luftmengen mussten zum Teil deutlich erhöht werden. Parallel wird ein neuer Messtrichter für die Messung eingesetzt. Tab. 7 zeigt die Wohnungen, welche im Februar 2015 untersucht wurden:

Tab. 8 : Gemessene Wohnungen Luftmengenbilanz

| Bezeichnung       | Raumnummer |
|-------------------|------------|
| Whg 1 – K15, 3.OG | 14         |
| Whg 2 – K13, 1.OG | 15         |
| Whg 3 – K13, 2.OG | 16         |
| Whg 4 – K7, 1.OG  | 17         |
| Whg 5 – K15, 2.OG | 18         |

## 6.2 Resultate

### 6.2.1 Messung August 2014

Die Ergebnisse der Luftmengenbilanz sind in Tab. 9 zusammengefasst und in Abb. 25 grafisch dargestellt. Es lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Abluftvolumenstrom in der Küche konnte aufgrund der Einbausituation des Tellerventils im Küchenschrank nicht exakt gemessen werden und ist vermutlich höher, als der gemessene Wert.
- Der Abluftvolumenstrom ist insgesamt zu tief eingestellt.
- Der Infiltrationsanteil (Aussenluft, welche durch Infiltration über Leckagen in den Aussen- und Innenbauteilen nachfliesst) ist mit 55 % sehr hoch (Fall 1). Selbst nach Abdichtung der Leckagen bei Wohnungstür und Fensterrahmen (Fall 2) bleibt der Infiltrationsanteil mit 35 % hoch.
- Sobald ein Fenster geöffnet wird, erfolgt keine messbare Nachströmung mehr über die Aussenluftdurchlässe. Das bedeutet, dass nur noch das Zimmer mit dem geöffneten Fenster ausreichend mit Aussenluft versorgt wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Fenster vollständig geöffnet oder nur gekippt ist.
- Auch wenn die Zimmertür geschlossen bleibt, scheint die Aussenluft ausschliesslich durch das Zimmer mit offenem Fenster nachzuströmen.
- Die Abluftmenge muss noch überprüft und gemäss den Planungswerten eingestellt werden.
- Die Genauigkeit der Messeinrichtung und deren Anpassung an die Aussenluftdurchlässe muss überprüft werden.

Die gemessene Druckdifferenz über den Aussenluftdurchlässen (siehe

Tab. 10) liegt unterhalb des üblichen Einsatzbereichs des eingesetzten Messgeräts und ist daher mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren. Gemäss SIA 2023 wird eine maximale Druckdifferenz von 4 Pa gefordert. Allerdings erfüllen die wenigsten Aussenluftdurchlässe diese strenge Anforderung.

Der hohe Infiltrationsanteil könnte im vorliegenden Fall tatsächlich zu einer sehr tiefen Druckdifferenz von nur 1 Pa führen, allerdings bei einem deutlich zu kleinen Aussenluftvolumenstrom von nur rund 10 m<sup>3</sup>/h pro Durchlass.

Tab. 9: Volumenstrommesswerte

| Fall | Volumenstrom        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|      | Zuluft              |                     |                     |                     | Abluft              |                     |                     |
|      | Wohnzimmer          | Schlafzimmer 1      | Schlafzimmer 2      | Schlafzimmer 3      | Badzimmer           | WC                  | Küche               |
| Fall | [m <sup>3</sup> /h] |
| 1    | 8.0                 | 7.0                 | 5.5                 | 7.2                 | -27.0               | -28.0               | -10.0               |
| 2    | 7.3                 | 9.0                 | 10.5                | 10.8                | -22.0               | -29.0               | -11.3               |
| 3    | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | -25.0               | -29.0               | -11.0               |
| 4    | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | -25.0               | -28.5               | -11.0               |
| 5    | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | -27.0               | -28.0               | -12.3               |
| 6    | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 | -26.5               | -29.0               | -11.0               |

Tab. 10: Druckdifferenz über den Aussenluftdurchlässen

| Fall | Druckdifferenz |                |                |                |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|      | Zuluft         |                |                |                |
|      | Wohnzimmer     | Schlafzimmer 1 | Schlafzimmer 2 | Schlafzimmer 3 |
| 1    | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            |
| 2    | 1.0            | 1.2            | 0.0            | 0.0            |
| 3    | 0.0            | 0.0            | 0.0            | 0.0            |
| 4    | 0.0            | 0.0            | 0.0            | 0.0            |
| 5    | 0.0            | 0.0            | 0.0            | 0.0            |
| 6    | 0.0            | 0.0            | 0.0            | 0.0            |

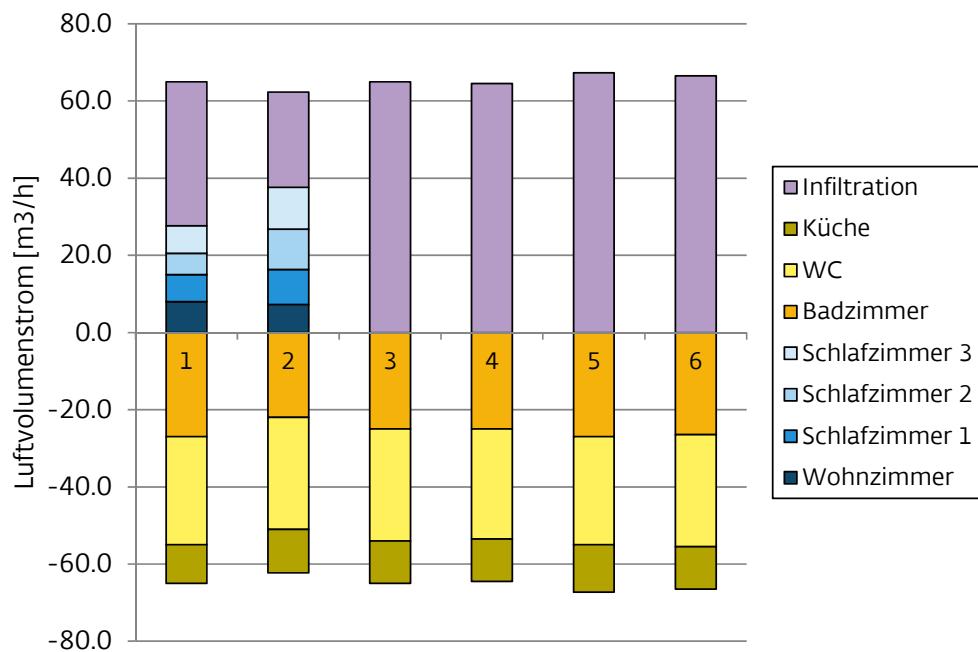


Abb. 25: Luftmengenbilanz der untersuchten Fälle



Abb. 26: Messung des Abluft-Volumenstroms in der Küche



Abb. 27: Druckdifferenz-messung beim Aussenluft-durchlass

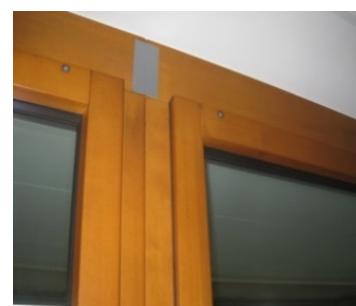


Abb. 28: Abdichtung eines Lecks in der Rahmen-verbreiterung



Abb. 29: Visualisierung der Luftströmung im Wohnzimmer

### 6.2.2 Resultate Februar 2015

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abb. 30 dargestellt. Es lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Abluftvolumenstrom liegt zwischen **100 m<sup>3</sup>/h** in den 3<sup>1/2</sup>-Zimmer-Wohnungen und **125 m<sup>3</sup>/h** in den 4<sup>1/2</sup>- bis 5<sup>1/2</sup>-Zimmer-Wohnungen. Die Planungswerte sind mit einer Ausnahme eingehalten. In der 5<sup>1/2</sup>-Zimmer-Wohnung ist der Abluftvolumenstrom zu tief.
- Der Aussenluftvolumenstrom liegt in den meisten Schlafzimmern zwischen **20** bis **30 m<sup>3</sup>/h**. In der 5<sup>1/2</sup>-Zimmer-Wohnung sind die Aussenluftvolumenströme aufgrund der zu geringen Abluftmenge generell zu tief.
- In den Wohnzimmern liegt der Aussenluftvolumenstrom – vermutlich aufgrund der zusätzlichen Schallschutzplatte auf der Aussenseite – tiefer als in den Schlafzimmern.
- Der Infiltrationsanteil liegt zwischen 25 und 30 % und entspricht damit den Erwartungen.

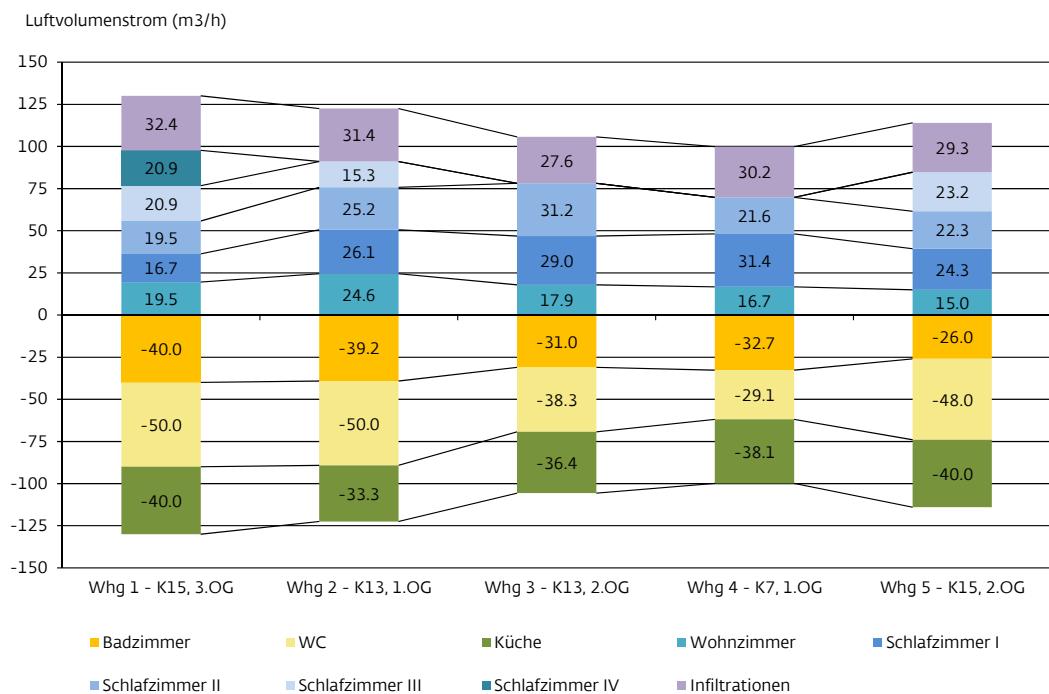


Abb. 30: Luftpengenbilanz von 5 Wohnungen; Fenster und Zimmertüren geschlossen

## 7 Luftschalldämmung

### 7.1 Ausgangslage und Zielsetzung

In der Siedlung Dettenbühl an der Kirchgasse 7 bis 19 in 8907 Wetzwil wird im Rahmen der Gebäudeerneuerung eine Abluft-Erdsonden-Wärmepumpen-anlage installiert. Dabei wird die Aussenluft direkt im Bereich der Fensterstürze (Rahmenverbreiterung) über Aussenluftdurchlässe ins Gebäude geführt.

Solche Aussenluftdurchlässe weisen systembedingt eine Verminderung der erreichbaren Luftschalldämmung der Fassade auf. Im Folgenden soll am konkreten Objekt der Einfluss dieser Aussenluftdurchlässe messtechnisch ermittelt werden.



Abb. 31: Foto Aussenluftdurchlass im Wohnzimmer

### 7.2 Vorgehen

#### 7.2.1 Messverfahren

Um den Einfluss der Aussenluftdurchlässe auf die resultierende Luftschalldämmung der Fassade bestimmen zu können, wird die Schalldämmung der Fassade mit und ohne Aussenluftdurchlass gemessen. Die daraus resultierende Pegeldifferenz ist gleichbedeutend mit der Abminderung der Schalldämmung durch die Aussenluftdurchlässe.

Gemessen wird gemäss SIA Norm 181 (Ausgabe 2006) respektive ISO 140-5 (Luftschall von Fassadenelementen) mit dem Lautsprecherverfahren. Bei den Messungen wird der energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  mit der Zeitkonstanten "fast" bestimmt. Die Messungen werden in den Terzbändern in einem Frequenzspektrum von 50 Hz - 20 kHz durchgeführt, wobei die Auswertung gemäss ISO 140-5 nur die Terzbänder von 100 Hz - 3.15 kHz berücksichtigt.

#### 7.2.2 Messgeräte

Für die Messung der Luftschalldämmung werden die folgenden Mess- und Kalibriergeräte verwendet, welche vom Eidgenössischen Amt für Messwesen beglaubigt sind:

| Gerätebezeichnung       | Typ                      | Serie-Nr. |
|-------------------------|--------------------------|-----------|
| Schallpegelmesser       | Norsonic Nor 140         | 1404975   |
| Mikrofon                | Norsonic Nor 1225        | 151282    |
| Schallquelle Dodekaeder | Stratenschulte D6-800_40 | 22155     |
| Verstärker              | Norsonic Nor280          | 2803604   |

#### 7.2.3 Randbedingungen

Die Messungen werden am 23.04.2014 durchgeführt. Gemessen wird an folgenden Orten respektive folgende Situationen:

- Wetzwil am Albis, Kirchgasse 11, rechtes Treppenhaus, Wohnung 2.OG rechts.
- Fassade mit Fenster und Aussenluftdurchlass im Wohn-/Esszimmer zum Balkon.
- Fassade mit Fenster, Aussenluftdurchlass sowie Rollladenkasten im Schlafzimmer.

- Bei beiden Räumen werden jeweils eine Messung mit vorhandenem Aussenluftdurchlass sowie eine Messung ohne Einfluss des Aussenluftdurchlasses durchgeführt.
- Für die Messung ohne Einfluss des Aussenluftdurchlasses wird dieser ausgebaut, mit Terostat-IX dicht zugekittet sowie von innen mit einer Holzleiste abgedeckt.

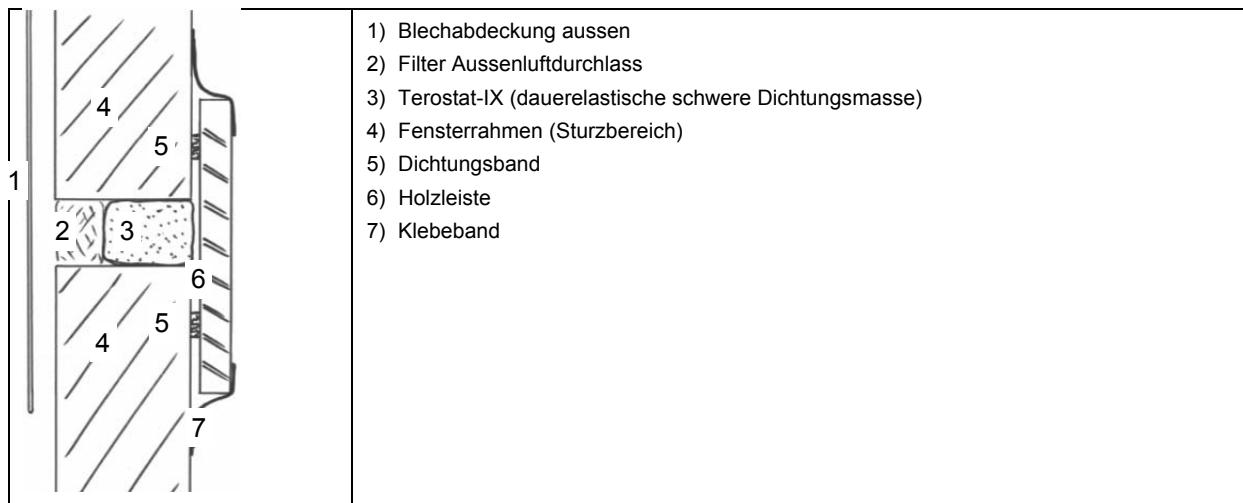


Abb. 32: Schemaskizze (Vertikalschnitt) Aussenluftdurchlass zugekittet und abgedeckt

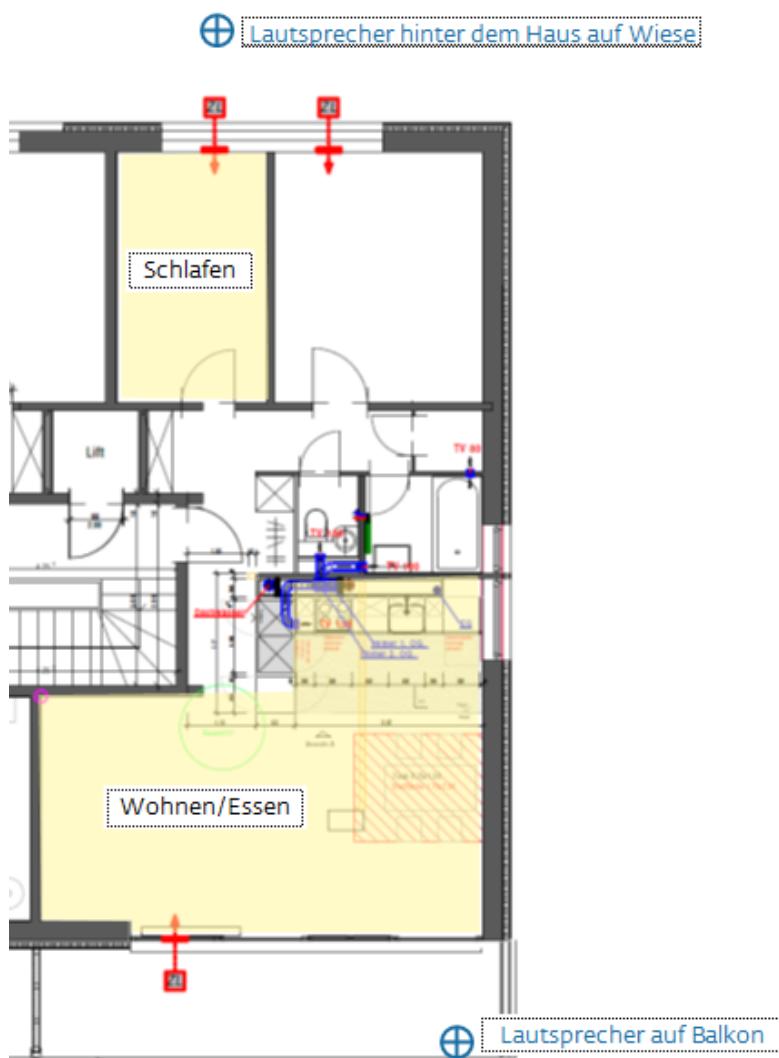


Abb. 33: Grundriss mit Messanordnung

## 7.3 Resultate

### 7.3.1 Messwerte

Die Messresultate der Luftschallmessungen (bewertetes Bau-Schalldämm-Mass  $R'_w$  sowie Spektrum-Anpassungswerte C und  $C_{tr}$ ) bei den beiden untersuchten Räumen betragen:

| Empfangsraum | Trennbauteil / Messsituation                                      | Messwerte                        |
|--------------|---|----------------------------------|
| Wohnen/Essen | Fenster zu Balkon mit Aussenluftdurchlass                         | $R'_w (C; C_{tr}) = 33 (-2; -5)$ |
| Wohnen/Essen | Fenster zu Balkon ohne Aussenluftdurchlass (zugekittet)           | $R'_w (C; C_{tr}) = 34 (-2; -5)$ |
| Schlafen     | Fenster mit Aussenluftdurchlass sowie Rollladenkasten             | $R'_w (C; C_{tr}) = 32 (-1; -3)$ |
| Schlafen     | Fenster mit Rollladenkasten ohne Aussenluftdurchlass (zugekittet) | $R'_w (C; C_{tr}) = 34 (-1; -4)$ |

### 7.3.2 Vergleich der Bau-Schalldämm-Masse $R'_w$

Das bewertete Bau-Schalldämm-Mass  $R'_w$  der gemessenen beiden Fassaden mit und ohne Aussenluftdurchlass weist eine Differenz von 1-2 dB auf. In der vorhandenen Situation vermindert der Aussenluftdurchlass die resultierende Schalldämmung der Fassade um ca. 1-2 dB. Die Verminderung liegt dabei hauptsächlich im Frequenzbereich von ca. 1'000 Hz bis 2'500 Hz.

### 7.3.3 Schallpegel direkt beim Aussenluftdurchlass

Die Schallpegel direkt beim Aussenluftdurchlass sind deutlich höher als die gemessenen Raumpegel. In ca. 5 cm Abstand raumseitig vor dem Aussenluftdurchlass werden bei Betrieb des Lautsprechers um etwa 8 - 11 dBA höhere Schalldruckpegel gemessen als im Raum. Es empfiehlt sich daher die Aussenluftdurchlässe oberhalb der Fenster zu positionieren, so dass der Abstand zum Aufenthaltsbereich der Benutzer möglichst gross ist. Damit können lokale Pegelerhöhungen im Aufenthaltsbereich vermieden werden.

### 7.3.4 Fazit

In der vorliegenden Situation wird durch den Aussenluftdurchlass die resultierende Schalldämmung der Fassade/Fenster um ca. 1-2 dB vermindert. Eine solche Pegeländerung ist vom Menschen kaum wahrnehmbar. In Situationen ohne besondere Anforderungen an die Schalldämmung der Fassade (Fenster mit  $R'_w \leq$  ca. 35 dB) können Aussenluftdurchlässe eingesetzt werden, ohne dass die Schalldämmung deutlich reduziert wird (Reduktion der resultierenden Schalldämmung um ca. 1-2 dB).

Bei stärker lärmbelasteten Standorten hingegen sind Fenster mit besserem Schallschutz erforderlich. In solchen Situationen würde eine grössere Pegelminderung resultieren. Ist ein hoher Schallschutz der Fassade gefordert, sind dafür geeignete Aussenluftdurchlässe mit höherem Bau-Schalldämm-Mass einzusetzen.

# 8 Thermographie

## 8.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Im Januar 2014 wurden bei einer Außentemperatur von 4 °C einige Thermografie-Aufnahmen in einem Wohnzimmer der Kirchgasse 11 und von der nördlichen Fassade der Kirchgasse 7 gemacht. Ziel dieser Aufnahmen war, allfällige Leckagen sowie den Einfluss der Außentluftdurchlässe (z.B. Kaltluftabfall) im Innenraum aufzuzeigen.

Mittels Wärmebildaufnahmen der Fassaden wurde zudem versucht, nachts die Anzahl der geöffneten bzw. gekippten Fenster in Funktion der Außentemperatur zu ermitteln. Da die thermische Qualität der bestehenden Fenster eher mittelmässig ist und in den Schlafzimmern meist nachts der Rollladen geschlossen ist, konnte auf diese Weise die Anzahl der geöffneten bzw. gekippten Fenster aber nicht zuverlässig ermittelt werden.

## 8.2 Resultate

Die gemessenen Oberflächentemperaturen am Außentluftdurchlass bewegen sich zwischen 10.5 °C und 12 °C bei einer Außentemperatur von 4 °C (siehe Abb. 34: 1-a, 1-b). Im Schlafzimmer erreicht diese Temperatur 13 °C (Abb. 34: 2-a). Sichtbar ist auch eine Leckage im Rollladenkasten oberhalb des Außentluftdurchlasses. Im Wohnzimmer wird Leckluft beim Stoss der Rahmenverbreiterung festgestellt (Abb. 35: 1-c). Die Aufnahme des Fensters in der Küche zeigt Leckluft am oberen Teil des Fensterrahmens (Abb. 35: 3-b). Die Aufnahmen der Nord- und Ostfassade zeigen keine offensichtlichen Mängel der Gebäudehülle. Einzelne gekippte Fenster sind ersichtlich (Abb. 36: 1-a, 2-a).

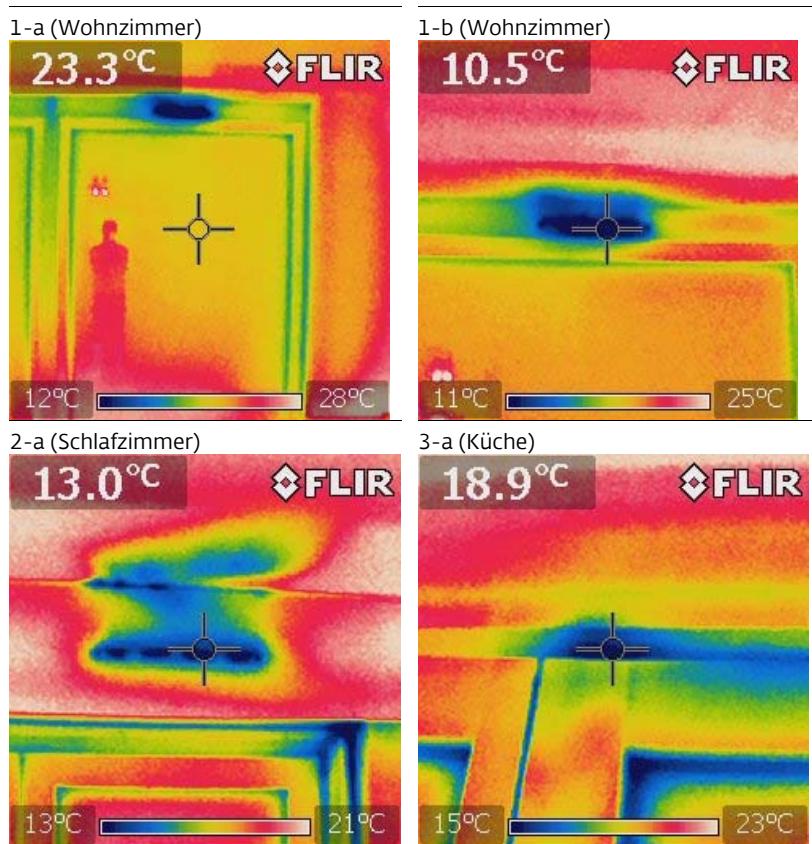


Abb. 34 Außentluftdurchlässe (Kirchgasse 11, Wohnung 2. OG)

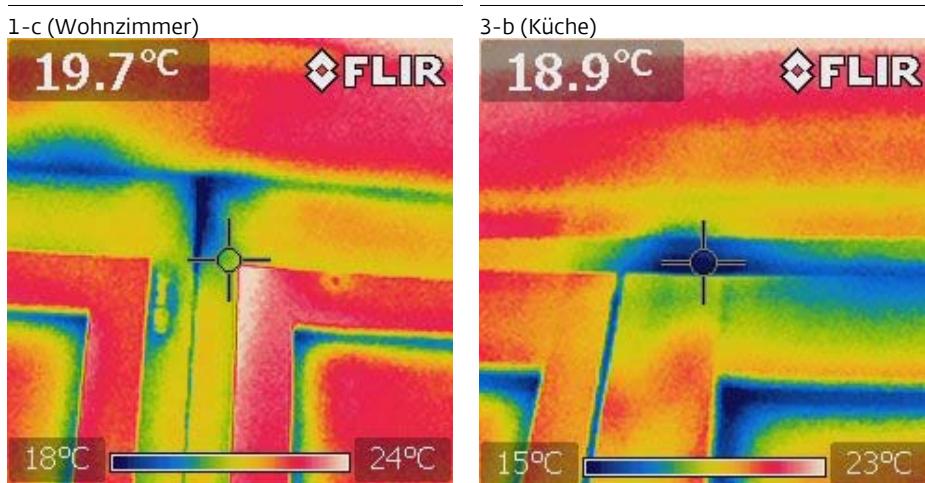


Abb. 35 Luftleckage am Fensterrahmen (Kirchgasse 11, Wohnung 2. OG)

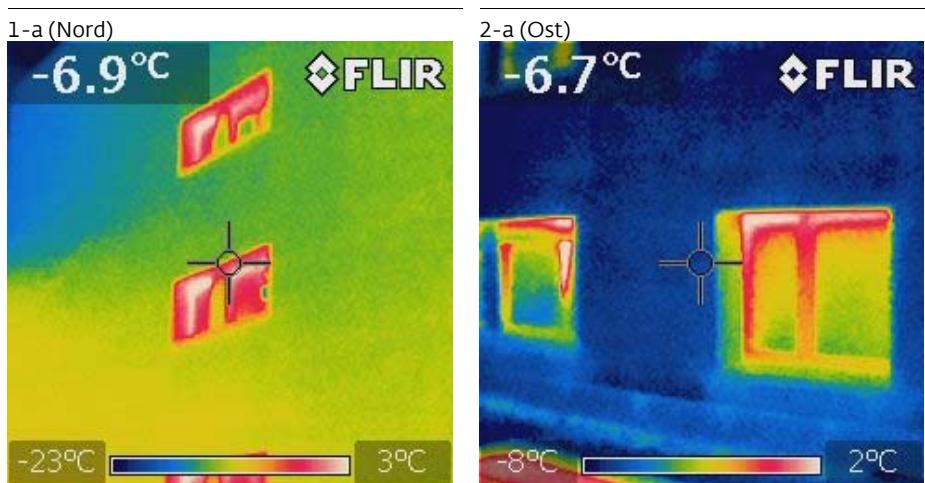


Abb. 36 Aussenfassade (Kirchgasse 7)

# 9 Wirtschaftlichkeit

## 9.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der Ersatz des bestehenden Ölkkessels war im Rahmen der Erneuerung der Siedlung Dettenbühl ursprünglich nicht vorgesehen. Er kam für die Baugenossenschaft erst aufgrund der verhältnismässig geringen Investitionskosten und des geringen baulichen Eingriffs innerhalb der Wohnungen in Frage. Eine entscheidende Rolle spielten auch die namhaften Förderbeiträge für Minergie Modernisierungen durch den Kanton Zürich, welche nur dank der neuen Abluftanlage mit Aussenluftdurchlässen im Dauerbetrieb verfügbar wurden.

## 9.2 Ergebnisse

Die Investitionskosten für Heizung- und Lüftungsanlagen sind gemäss Bauabrechnung<sup>1</sup> mit 1.5 Millionen CHF bzw. 12'000 CHF pro Wohnung verhältnismässig tief. Die jährlichen Heizkosten der Siedlung sind durch die energetische Erneuerung von rund 150'000 auf 60'000 CHF gesunken. Gegenüber einer Erneuerung mit Zu-/Abluftanlagen und Erdsonden-Wärmepumpe versursacht das umgesetzte Energiekonzept deutlich geringere Investitions- und Jahreskosten.

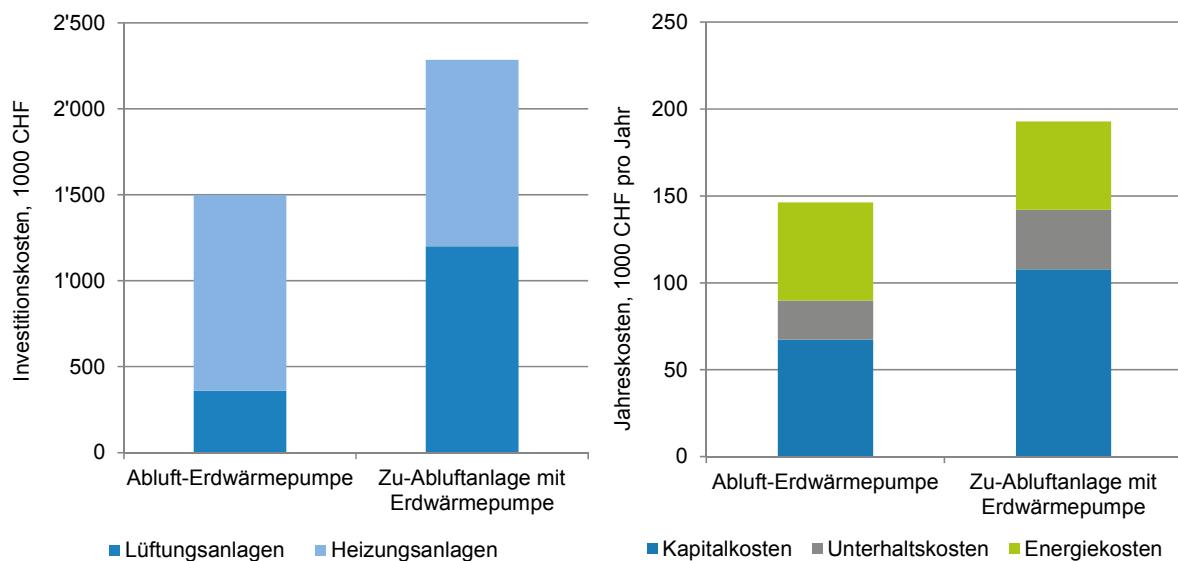


Abb. 37 Investitionskosten und Jahreskosten der neuen Heizungs- und Lüftungsanlagen der Siedlung Dettenbühl im Vergleich zu einer Zu-/Abluftanlage in Kombination mit einer Erdwärmepumpe; die Minergie Förderbeiträge sind in den Kosten noch nicht berücksichtigt

<sup>1</sup> Exkl. Abbruch bestehende Abluftanlagen und neue Handtuchradiatoren im Badzimmer

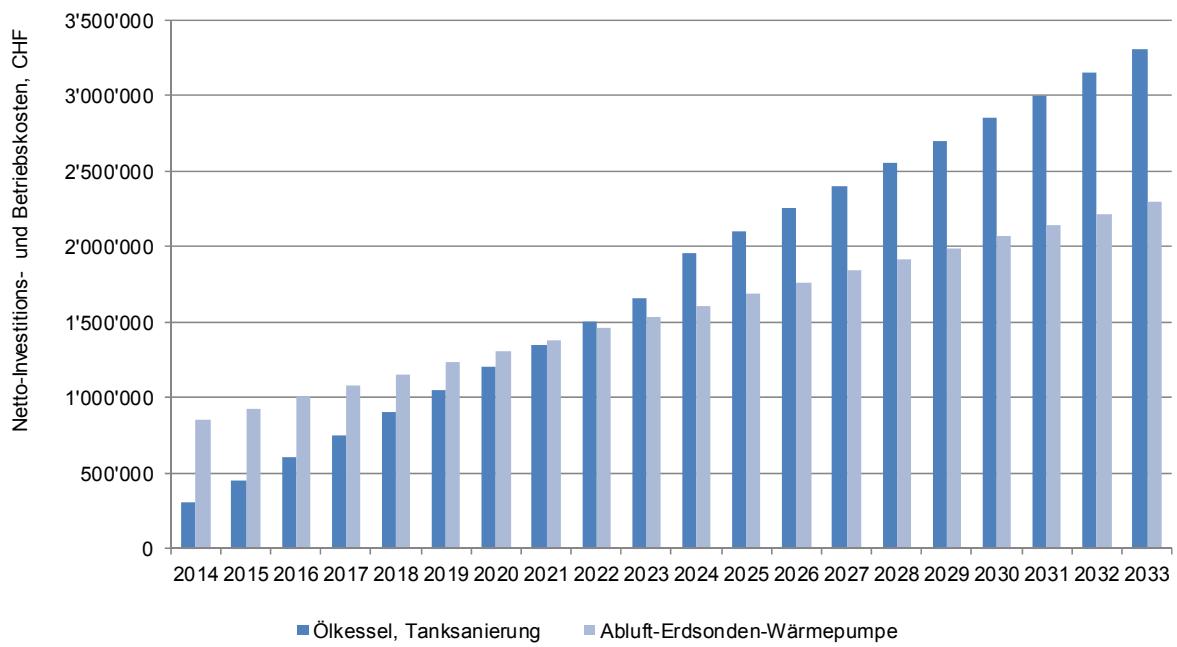


Abb. 38 Dank den Förderbeiträgen für die Minergie-Modernisierung ist das umgesetzte Energiekonzept sogar im Vergleich zum Ersatz des bestehenden Ölkkessels wirtschaftlicher. Die Netto-Mehrkosten für die Abluft-Erdsonden-Wärmepumpe sind bereits nach 8 Jahren amortisiert.

# 10 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Erkenntnisse aus dem P+D-Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

## 10.1 Aussenluftdurchlässe

- Aussenluftdurchlässe (ALD) werden bei Montage oberhalb der Fenster von den meistern Nutzern akzeptiert. Es gibt aber auch einzelne Klagen bezüglich Zugluft von schätzungsweise 10 – 15% der Nutzer. Eine systematische Erhebung der Nutzerzufriedenheit konnte im Rahmen des Projekts leider nicht durchgeführt werden. Einige Mieter haben die ALDs sogar teilweise oder ganz zugeklebt. Das Gesamtsystem insbesondere der Abluft-Wärmenutzung scheint dadurch nicht beeinträchtigt zu werden.
- Bei einzelnen Wohnungen sind periodisch Probleme mit Geruchsübertragung über das Treppenhaus aufgetreten. Die Planetendichtungen der Wohnungstüren sind teilweise nicht ganz dicht, weshalb ein Teil der Ersatzluft aus dem Treppenhaus nachströmt.
- Die gemessene Luftqualität streut stark, im Bereich von 600 – 1350 ppm, in einzelnen Schlafzimmern bis > 2000 ppm.
- Wenn ein Fenster offen steht, bricht die Nachströmung von Aussenluft über die ALD in allen Zimmern derselben Wohnung zusammen. Dies könnte ein Grund für die zum Teil hohen CO2-Konzentrationen sein.
- Die Luftmengen werden im Betrieb gegenüber den normativen Vorgaben tiefer eingestellt (ca. 70 % des Nennvolumenstroms), sonst steigen die Klagen wegen zu trockener Luft und Zugluft.
- Die Luftschalldämmung der Fassade wird durch die eingesetzten ALD nicht wahrnehmbar geschwächt.
- Die Schaumstofffilter der eingesetzten ALD verschmutzen nur langsam. Nur an Standorten mit sehr hohen Staubimmissionen ist ein jährlicher Filterwechsel notwendig.

## 10.2 Abluft-Wärmepumpen

- Abluft-Wärmepumpen sind nicht nur platzsparend und preisgünstig sondern – sofern richtig dimensioniert – auch energieeffizienter als gemeinhin angenommen.
- Pro m<sup>3</sup>/h Abluftmenge können rund 11 W Wärmeleistung erzeugt werden. Dabei wird die Abluft auf nahezu 0 °C abgekühlt und die darin enthaltene Feuchtigkeit weitgehend auskondensiert.
- Die Abtauung des Verdampfers erfolgt direkt durch die warme Abluft.
- Die Abluft-Wärmepumpe deckt in der Siedlung Dettenbühl 56% des gesamten Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser. Bei Neubauten kann der Deckungsgrad auf nahezu 80% steigen. Das zusätzlich benötigte Spitzenlastsystem kann entsprechend klein und kostengünstig dimensioniert werden.
- Der Abluftventilator ersetzt den Ventilator der Ausseneinheit bei Aussenluft-Wärmepumpen.
- Der Stromverbrauch von Abluftanlagen im Dauerbetrieb liegt, bezogen auf die Energiebezugsfläche, in der Regel unter 1 kWh/m<sup>2</sup>. Bei zentralen Zu-/Abluftanlagen in Mehrfamilienhäusern liegt er in der Regel bei 3 – 4 kWh/m<sup>2</sup>.
- Der Minergie–Grenzwert–Modernisierung wird von beiden untersuchten Projekten im Betrieb eingehalten. Dies, obwohl die Gebäudehülle nur mässig bis gar nicht wärmegedämmt ist, die Wärmeabgabe über die bestehenden Heizkörper erfolgt und die Heizvorlauftemperaturen im Auslegungsfall bei 45 °C liegen.

## 10.3 Fazit

Die untersuchte Pilotanlage eignet sich insbesondere für Bestandsgebäude, bei denen aus Budgetgründen oder aufgrund von Auflagen der Denkmalpflege eine vollständige Wärmedämmung der Gebäudehülle oder der Einbau einer Zu-/Abluftanlage (Komfortlüftung) aus Platzgründen nicht möglich sind. Abluft-Wärmepumpen können somit einen relevanten Beitrag für die nachhaltige Transformation von Bestandsgebäuden ohne eine umfassende Gesamterneuerung leisten.

Gemäss einer Studie zur Entwicklung des Gebäudeparks der Schweiz (M. Jakob et al., „Erweiterung des Gebäudeparkmodells gemäss SIA-Effizienzpfad Energie“, BFE-Vertragsnummer: SI/500984-01, Schlussbericht Juni 2016) werden im Jahr 2050 gut 40 % der Gebäude nicht oder nur teilweise energetisch erneuert sein. Damit auch diese Gebäude in Zukunft ohne fossile Brennstoffe beheizt werden können, sind Kompromisse bezüglich Energieeffizienz, Luftqualität und thermischem Komfort nötig. Für dieses Segment des Gebäudeparks eignen sich Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen und Abluft-Wärmepumpen besonders gut. Gegenüber energetisch optimalen Neubauten, werden diese teilsanierten Gebäude zwar eine höhere Energiekennzahl von rund 50 statt 30 kWh/m<sup>2</sup> aufweisen. Die anspruchsvollen Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft insbesondere im Bereich der Treibhausgasemissionen erfüllen sie aber dank der geringen baulichen Aufwendungen besser und zu vor allem zu deutlich tieferen ökonomischen, gesellschaftlichen und sozialen Kosten als der beste Ersatzneubau.

## 10.4 Ausblick

Damit sich Abluft-Wärmepumpen mit Aussenluftdurchlässen (ALD) in der Schweiz als kostengünstige Lösung für die Gebäudeerneuerung durchsetzen können, wären die folgenden technischen Weiterentwicklungen wünschenswert:

- Serienmässige Herstellung von Abluft-Wärmepumpen im Leistungsbereich von 5 bis 20 kW. Die Auslegung der Wärmepumpe sollte für eine Ablufttemperatur von 22 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 bis 50 % optimiert werden.
- Entwicklung eines standardisierten, für Abluft-Wärmepumpen optimierten Heizungsreglers für Raumheizung und Warmwasser sowie für die Einbindung eines Spitzenlastsystems.
- Kostengünstige, platzsparende und dennoch leise Einzelraumlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung, z.B. durch Pulslüftung, im Leistungsbereich von 10 bis 20 m<sup>3</sup>/h, als Ergänzung zur Abluftanlage. Die Abluftanlage übernimmt dann die Grundlüftung, insbesondere zur Sicherstellung des Feuchteschutzes in den Nasszellen. Die Einzelraumlüftungsgeräte ergänzen nachts die Frischluftzufuhr in den Schlafzimmern.

## 10.5 Verbreitung der Ergebnisse

Im Rahmen des vorliegenden P+D-Projekts sind folgende Beiträge zur Verbreitung der Ergebnisse erfolgt bzw. geplant:

- Vortrag am Forum Energie Zürich und am Energie-Apéro Luzern zur Thema „Mit etappierten Gebäudeerneuerungen die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft erreichen“ am 03. und 30.03.2015
- Vortrag an der Sitzung der Innovationsgruppe Komfortlüftung „Effiziente Abluft-Erdsonden-Wärmepumpen für die Gebäudeerneuerung“ am 21.04.2015
- Vortrag an der eco-Bau Fachtagung „Lowtech für die 2000-Watt-Gesellschaft: Sanierung der Siedlung Dettenbühl“ am 17.03.2016
- Artikel zur Siedlung Dettenbühl als Fallbeispiel in der SIA Dokumentation Energetische Gebäudeerneuerung (SIA 2047), Publikation September 2016
- Siedlung Dettenbühl als Übungsbeispiel im SIA Form Kurs „Gebäudeerneuerung Heute“ im Juni und Oktober 2015, weitere geplant ab Herbst 2016
- Artikel und Präsentation für das BFE Status-Seminar 2016 „Abluft- und Aussenluftwärmepumpen für die energetische Gebäudeerneuerung“ am 8./9. September 2016
- Artikel im TEC21 zu Aussenluftdurchlässen und Abluft-Wärmepumpen geplant Anfang 2017
- Siedlung Dettenbühl als Fallbeispiel für Abluftanlagen in der Gebäudeerneuerung in der vollständig überarbeiteten Neuausgabe des Buchs „Wohnungslüftung“, Faktor Verlag

# 11 Thermischer Komfort und Raumluftqualität

## 11.1 Messperioden

Tab. 11 : Messperiode I (24.03.14-11.04.14)

| Nr. | Hausnummer | Geschoss | Start der Messperiode | Ende der Messperiode | Zustand |
|-----|------------|----------|-----------------------|----------------------|---------|
| 1   | 7          | EG       | 24.03 - 12:00         | 11.04 - 10:45        | saniert |
| 2   | 11         | 4. OG    | 24.03 - 12:45         | 11.04 - 11:20        | saniert |
| 3   | 7          | EG       | 24.03 - 13:15         | 11.04 - 09:00        | saniert |
| 4   | 11         | 4. OG    | 24.03 - 14:00         | 10.04 - 20:52        | saniert |
| 5   | 9          | 5. OG    | 24.03 - 14:30         | 11.04 - 07:50        | saniert |

Tab. 12 : Messperiode II (22.04.14-14.05.14)

| Nr. | Hausnummer | Geschoss | Start der Messperiode | Ende der Messperiode | Zustand   |
|-----|------------|----------|-----------------------|----------------------|-----------|
| 6   | 11         | EG       | 30.04 - 15:30         | 14.05 - 17:50        | saniert   |
| 7   | 17         | 5. OG    | 22.04 - 11:00         | 08.05 - 00:00        | unsaniert |
| 8   | 19         | EG       | 22.04 - 11:30         | 06.05 - 00:00        | unsaniert |
| 9   | 19         | 4. OG    | 22.04 - 12:00         | 30.04 - 00:00        | unsaniert |
| 10  | 15         | 2. OG    | 25.04 - 11:00         | 08.05 - 00:00        | unsaniert |

Tab. 13 : Messperiode III (10.11-24.11)

| Nr. | Hausnummer | Geschoss | Start der Messperiode | Ende der Messperiode | Zustand |
|-----|------------|----------|-----------------------|----------------------|---------|
| 11  | 17         | 5. OG    | 10.11.14              | 24.11.14             | saniert |
| 12  | 15         |          | 10.11.14              | 24.11.14             | saniert |
| 13  | 17         | 5. OG    | 10.11.14              | 24.11.14             | saniert |

Tab. 14 : Messperiode IV (10.02.15-26.02.15)

| Nr. | Hausnummer | Geschoss | Start der Messperiode | Ende der Messperiode | Zustand |
|-----|------------|----------|-----------------------|----------------------|---------|
| 14  | 15         | 3. OG    | 10.02.15              | 27.02.15             | saniert |
| 15  | 13         | 1. OG    | 10.02.15              | 27.02.15             | saniert |
| 16  | 13         | 2. OG    | 10.02.15              | 27.02.15             | saniert |
| 17  | 7          | 1. OG    | 10.02.15              | 27.02.15             | saniert |
| 18  | 15         | 2. OG    | 10.02.15              | 27.02.15             | saniert |
| 19  | 17         | 1. OG    | 10.02.15              | 27.02.15             | saniert |

## 11.2 Aussenluftbedingungen

### 11.2.1 Messperiode I (24.03-11.04)

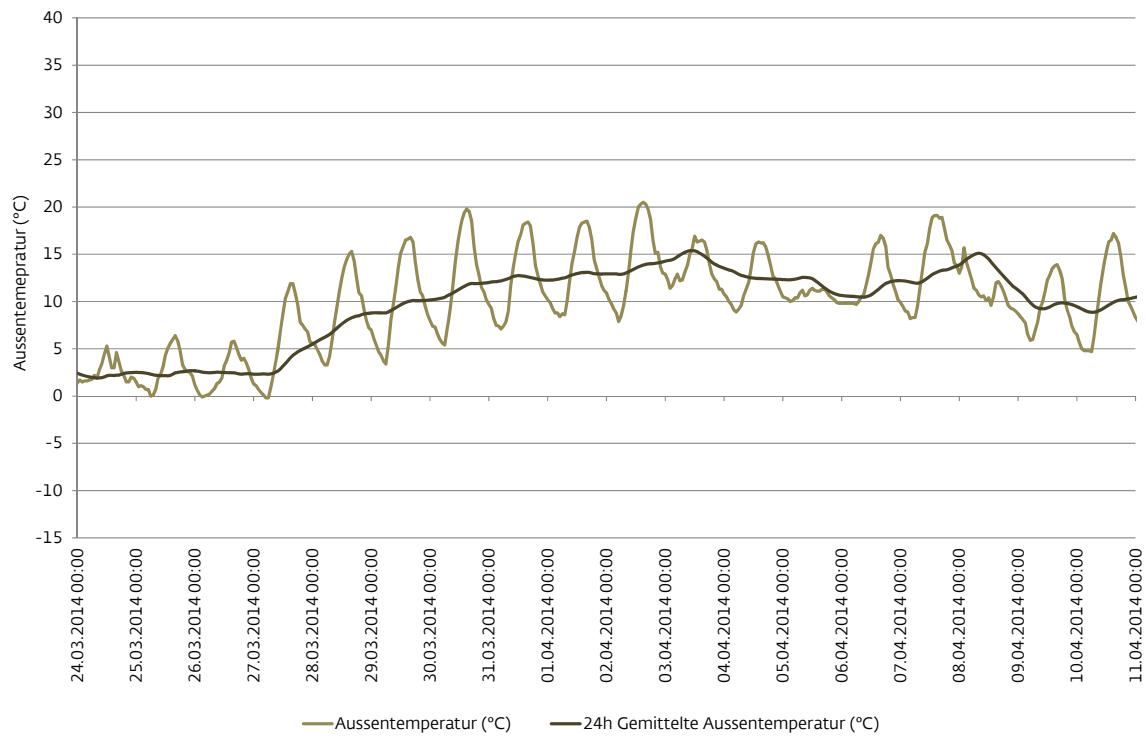


Abb. 39 : Aussenlufttemperaturen<sup>2</sup>

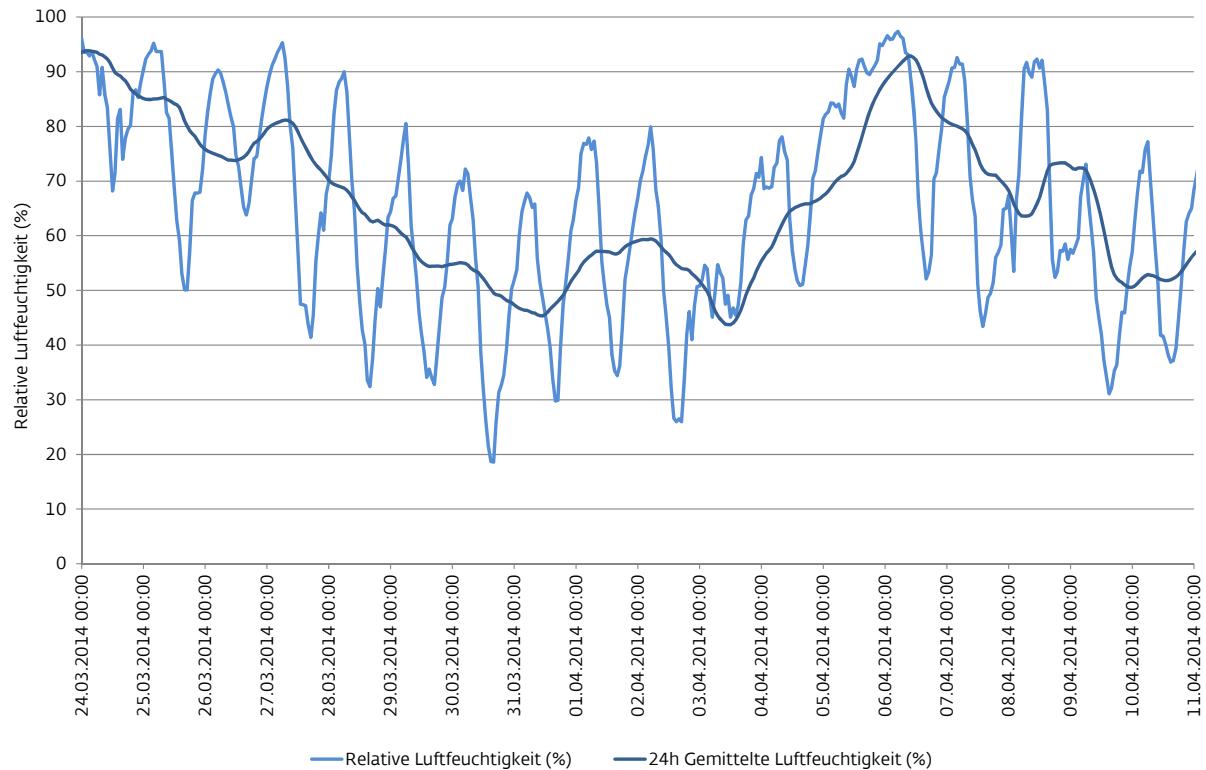


Abb. 40 : Relative Luftfeuchtigkeit<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Aussenlufttemperaturen, Meteoschweiz, Zürich SMA

<sup>3</sup> Relative Luftfeuchtigkeit, Meteoschweiz, Zürich SMA

### 11.2.2 Messperiode II (22.04-14.05)

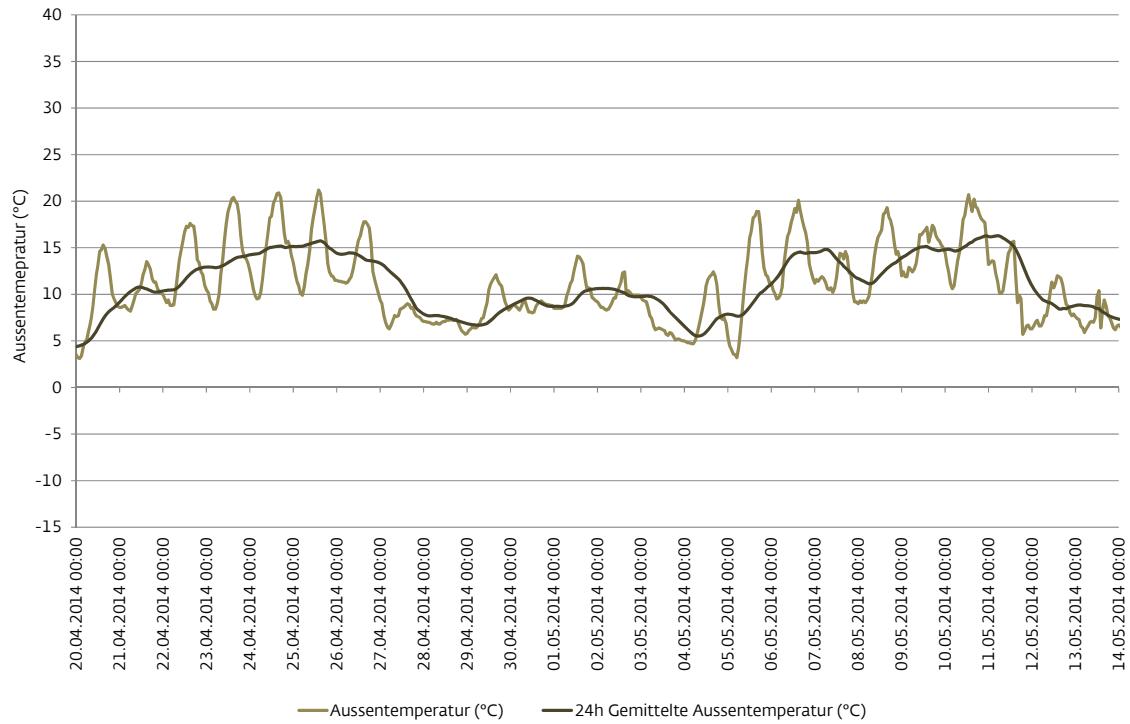


Abb. 41 : Aussenlufttemperaturen

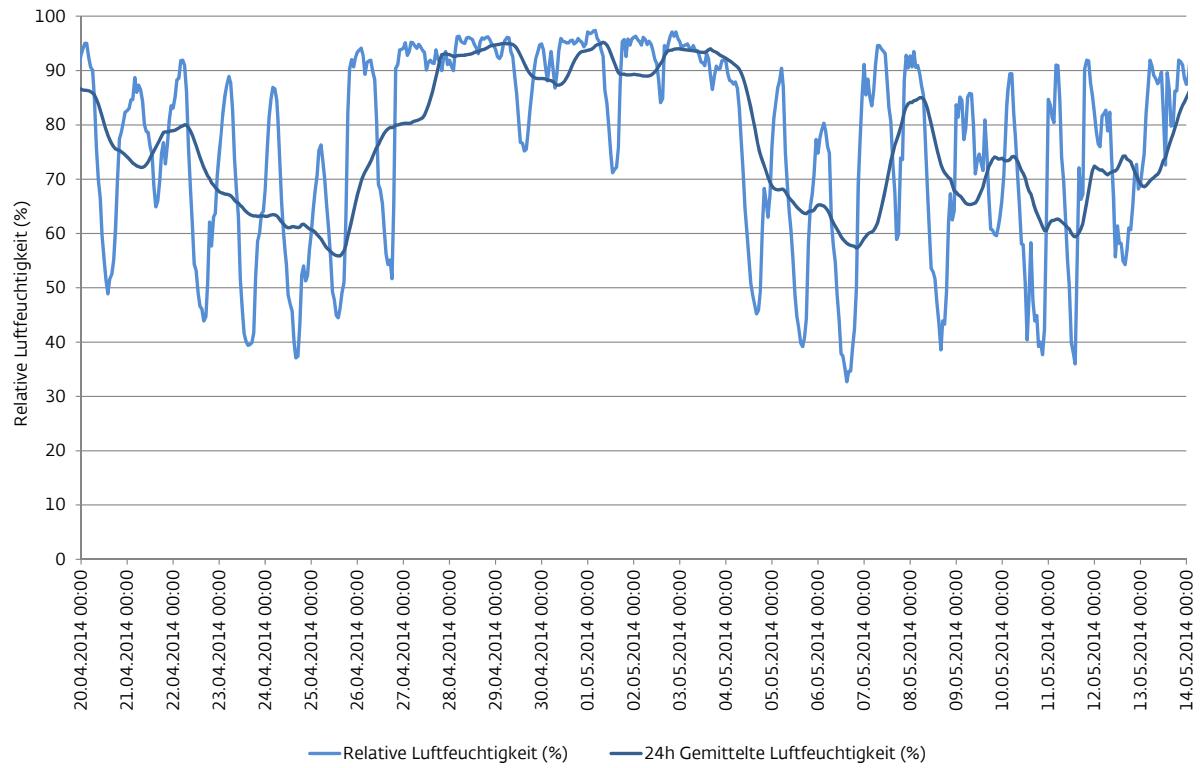


Abb. 42 : Relative Luftfeuchtigkeit

### 11.2.3 Messperiode III (10.11-24.11)

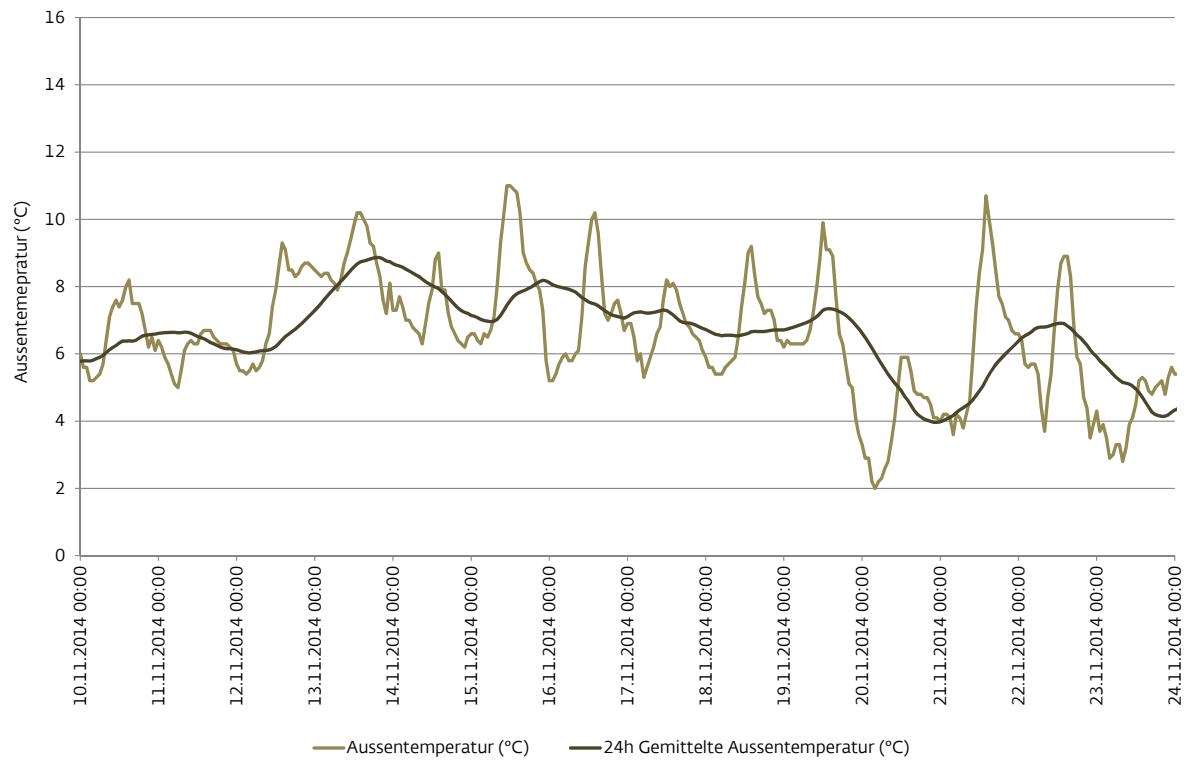


Abb. 43: Aussenlufttemperatur

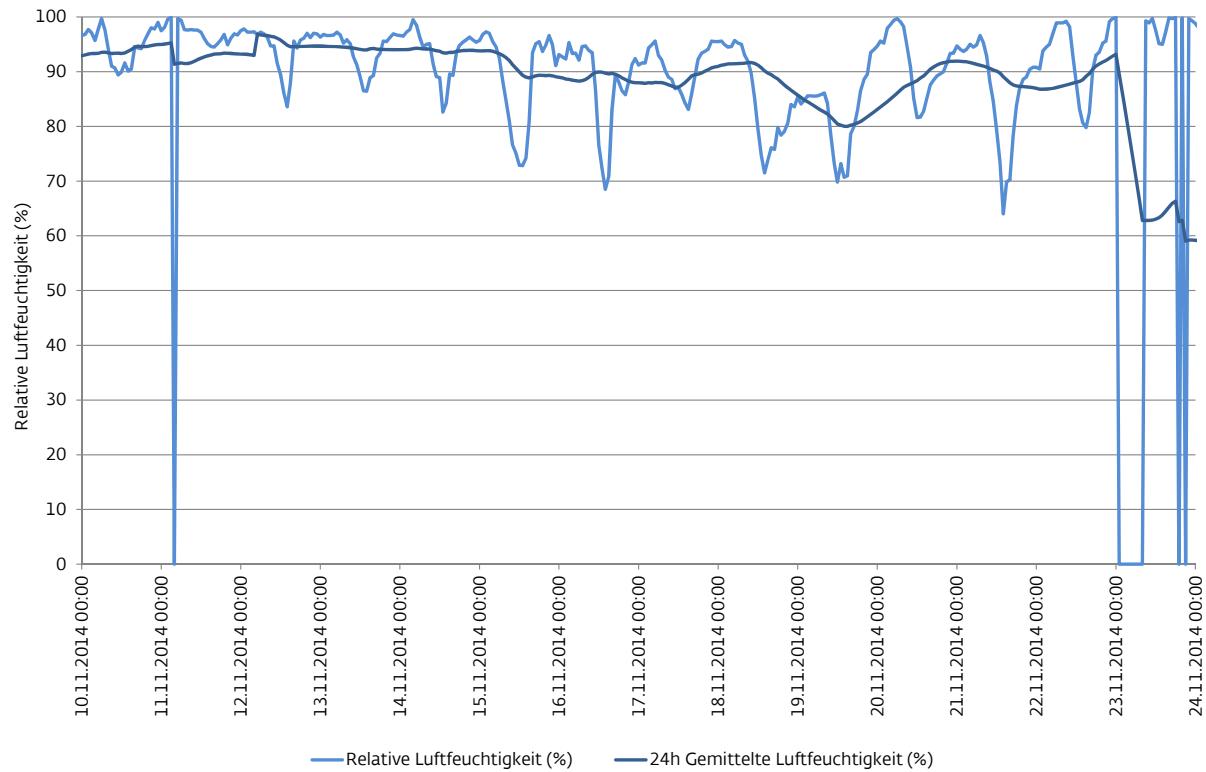


Abb. 44: Relative Luftfeuchtigkeit

#### 11.2.4 Messperiode IV (10.02-26.02)

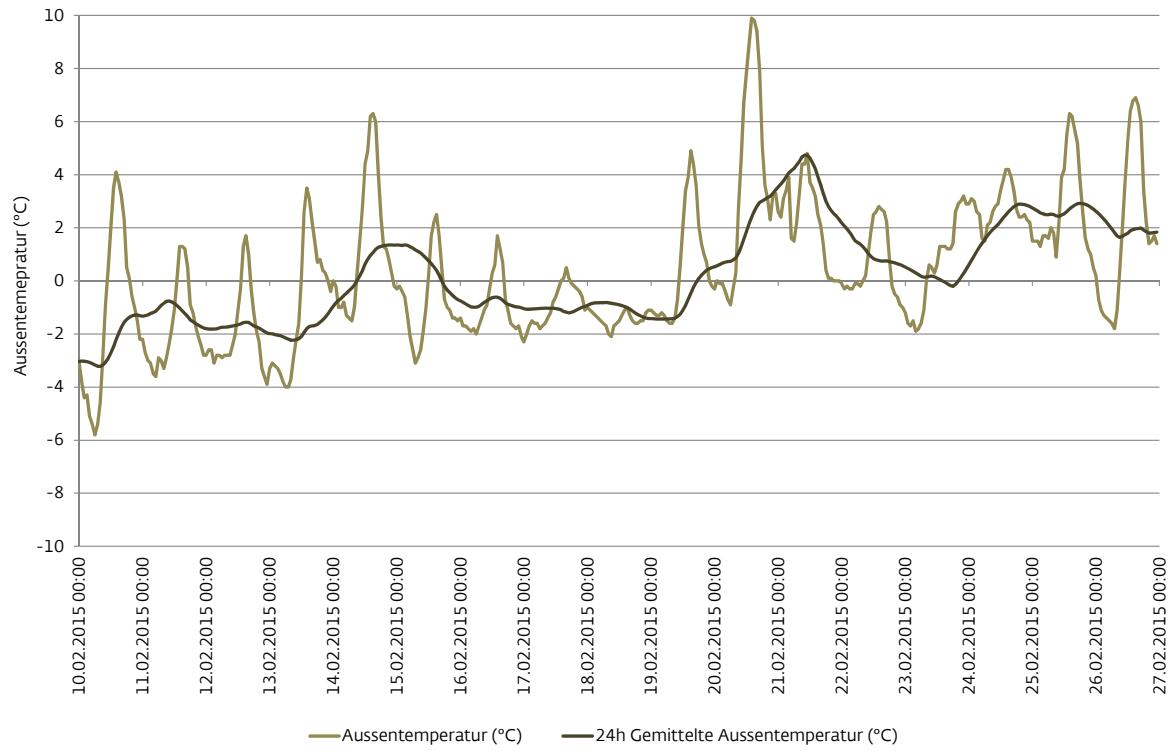


Abb. 45: Aussenlufttemperatur

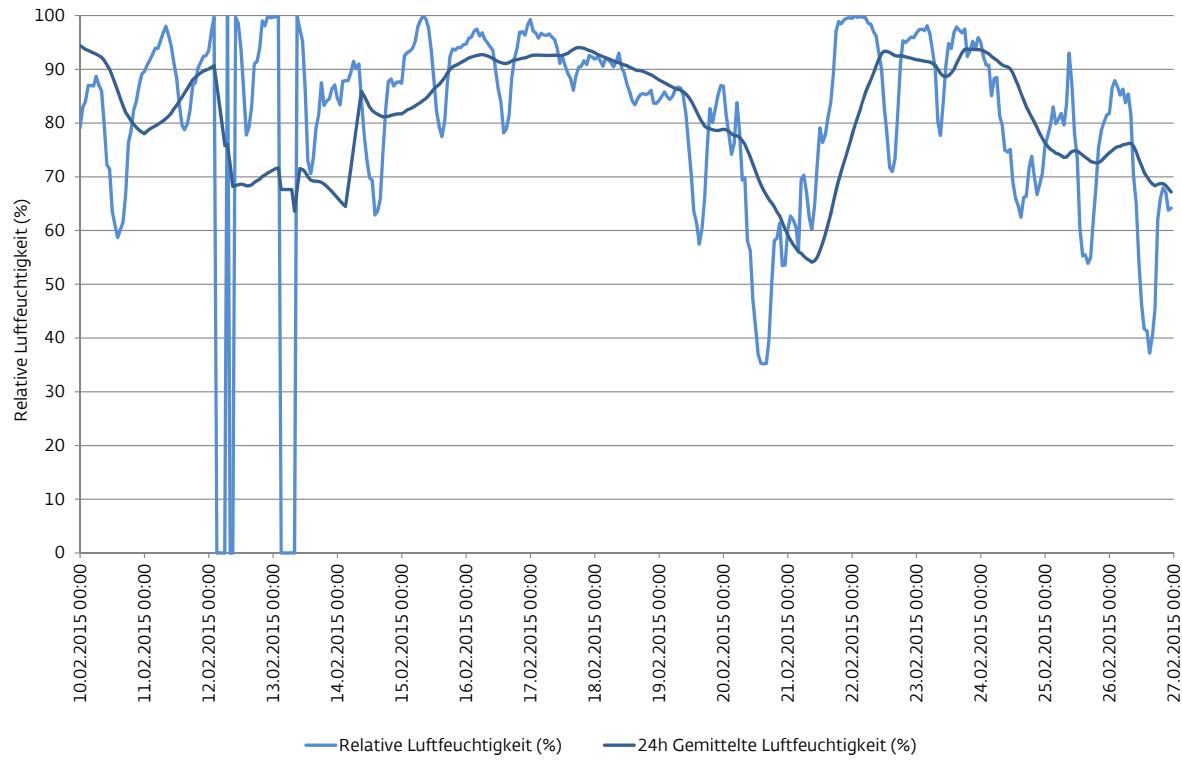


Abb. 46: Relative Luftfeuchtigkeit

### 11.3 Detaillierte Analyse des Raumklimas pro Wohnung

Die nachfolgenden Grafiken zeigen den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in (ppm) für jede Wohnung in Abhängigkeit der Messperiode. Für die Messperiode wird die erste Woche der Messung dargestellt. Jeder Grafik ist eine Aussage für die betrachtete Messdauer zugeordnet.



Abb. 47 : Thermisches Raumklima – Wohnung 1 (saniert)

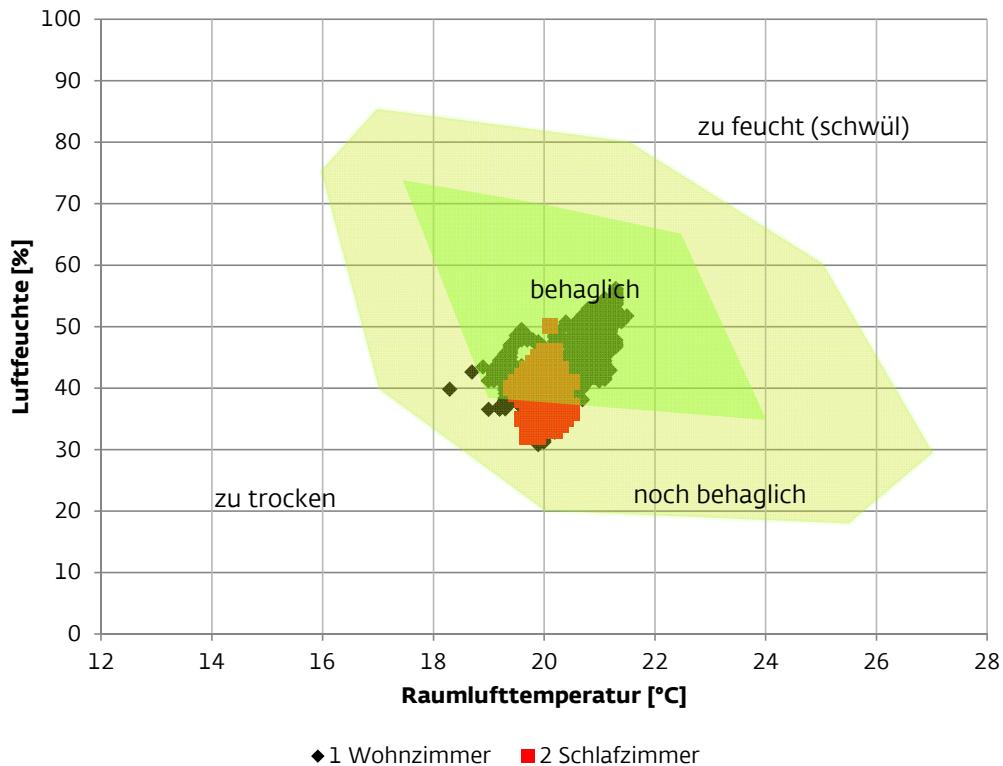


Abb. 48: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 1 (saniert)

Die Raumlufttemperaturen im Wohn- und Schlafzimmer sind nahezu deckungsgleich und betragen circa 20 °C was im Toleranzbereich der Norm ist. Die gemessene Raumluftfeuchte im Wohn- und Schlafzimmer (bzw. 38% und 44%) erfüllt ebenfalls Komfortbedingungen.

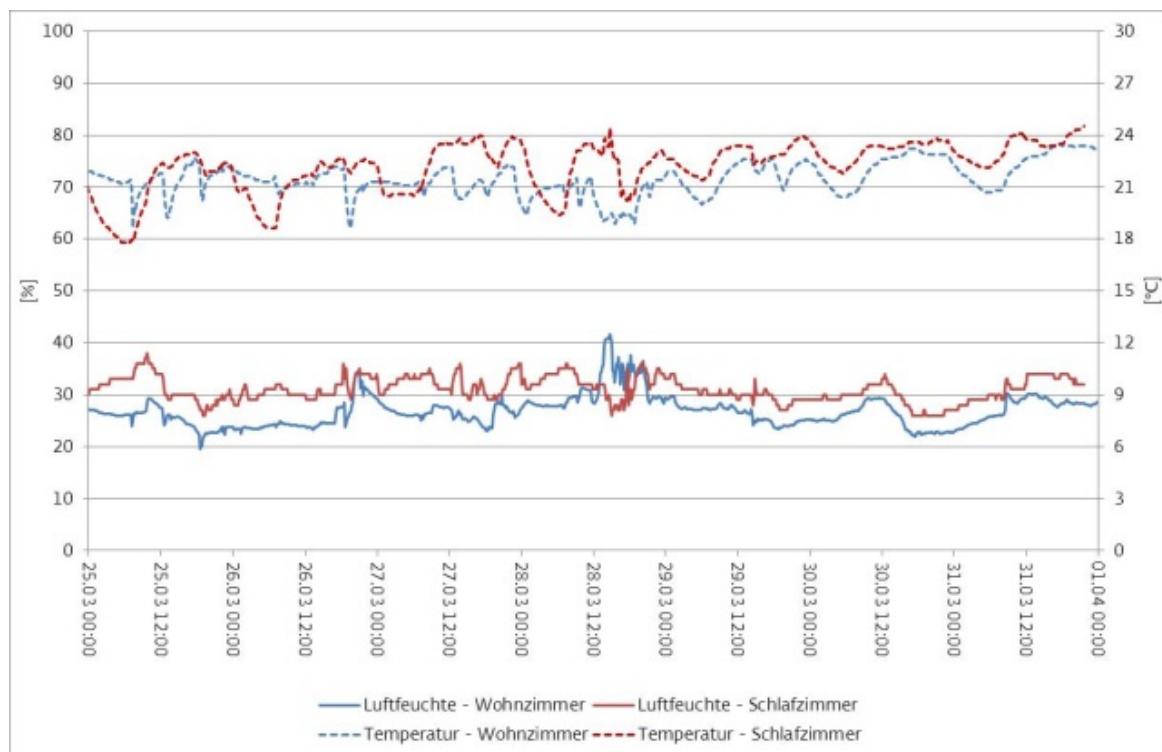


Abb. 49 : Thermisches Raumklima – Wohnung 2 (saniert)

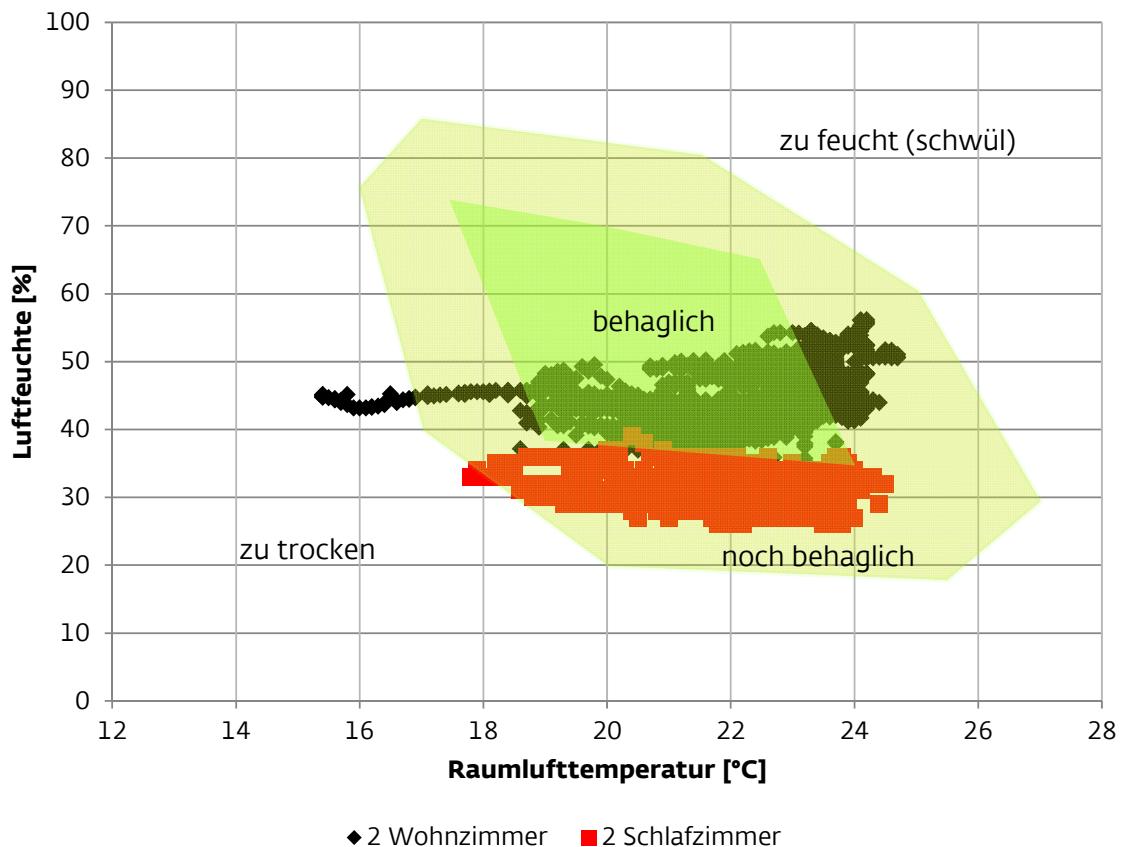


Abb. 50: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 2 (saniert)

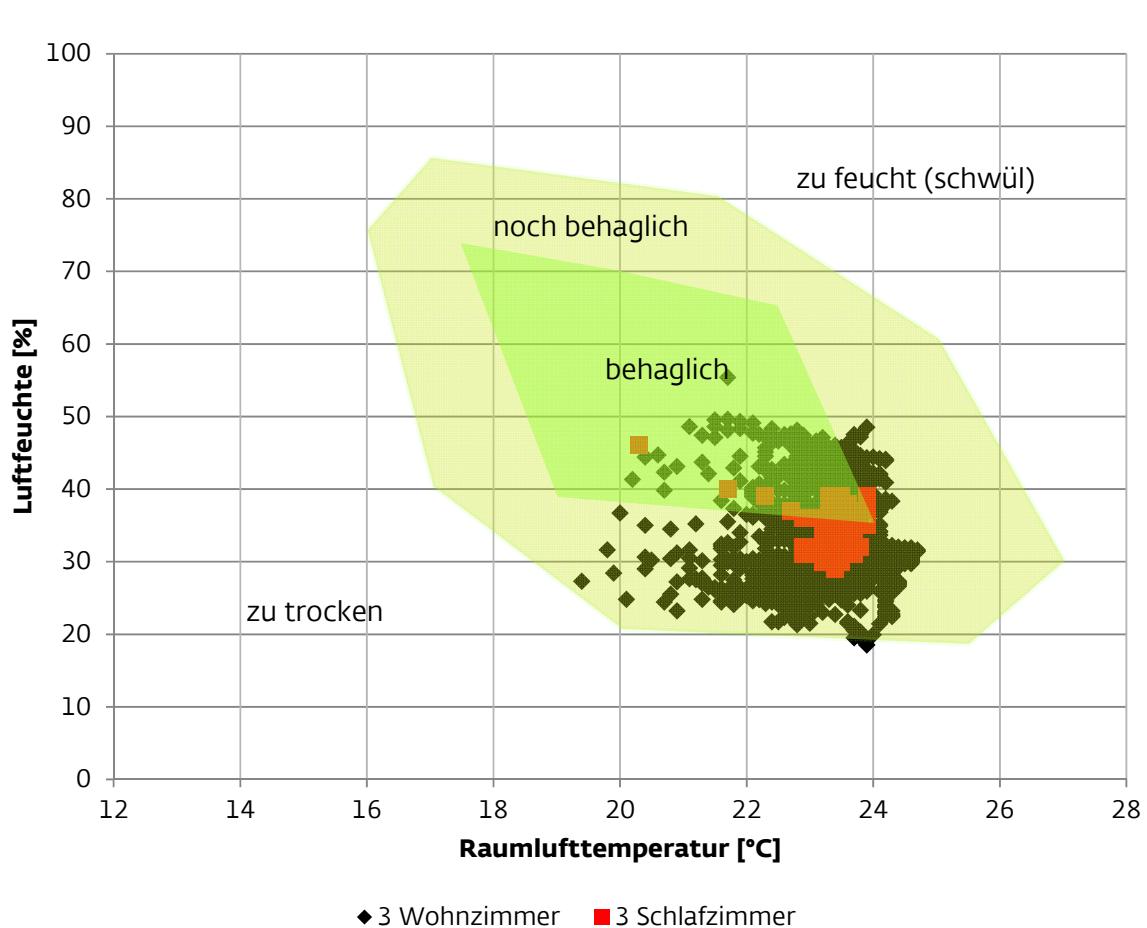
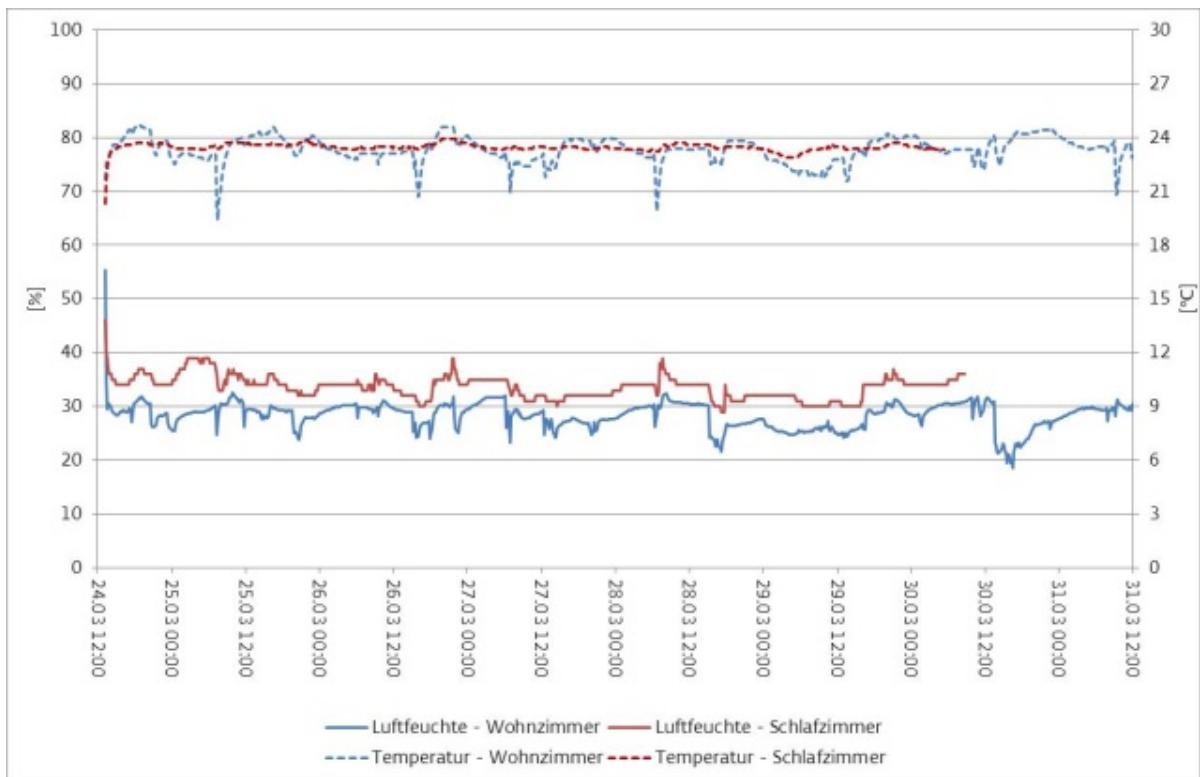


Abb. 52: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 3 (saniert)

Die Raumluft im Wohnzimmer ist eher trocken



Abb. 53 : Thermisches Raumklima – Wohnung 4 (saniert)

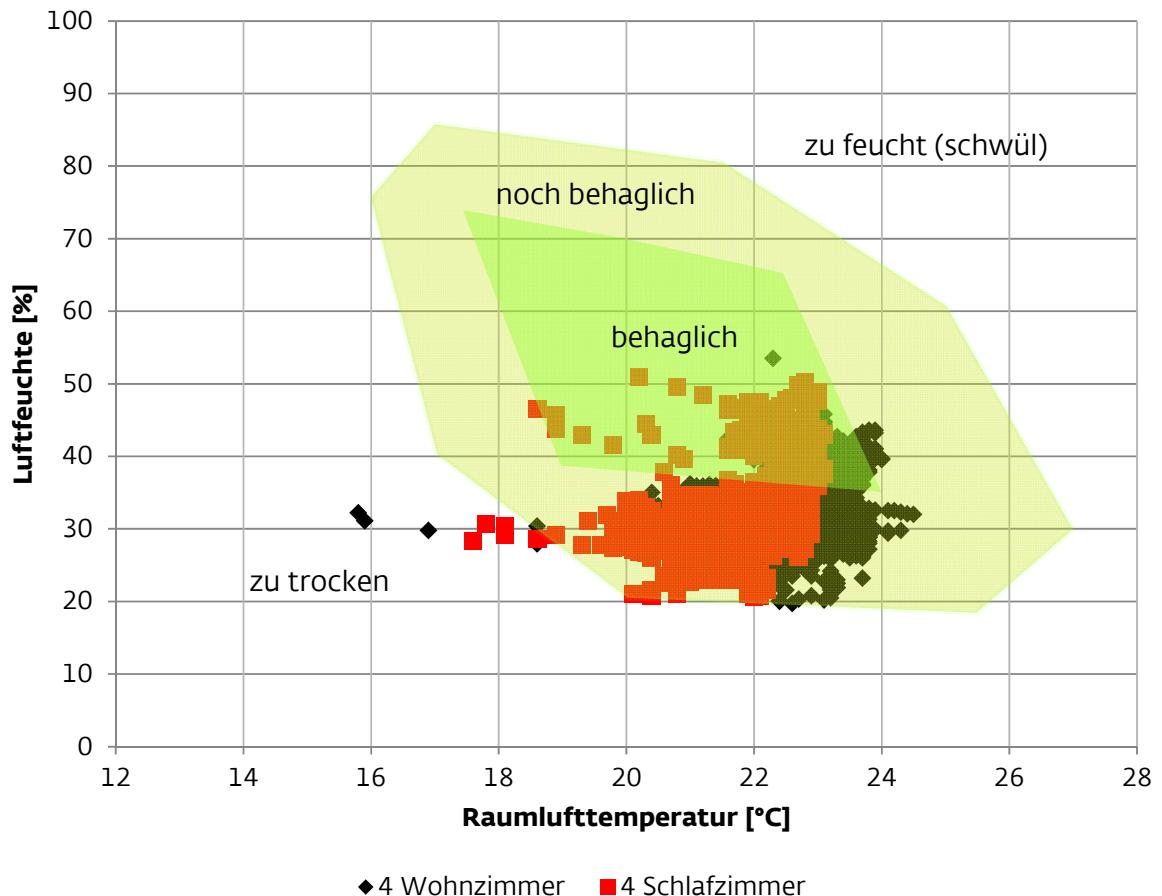


Abb. 54: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 4 (saniert)

Die Raumluft im Wohn- und Schlafzimmer ist eher zu trocken.

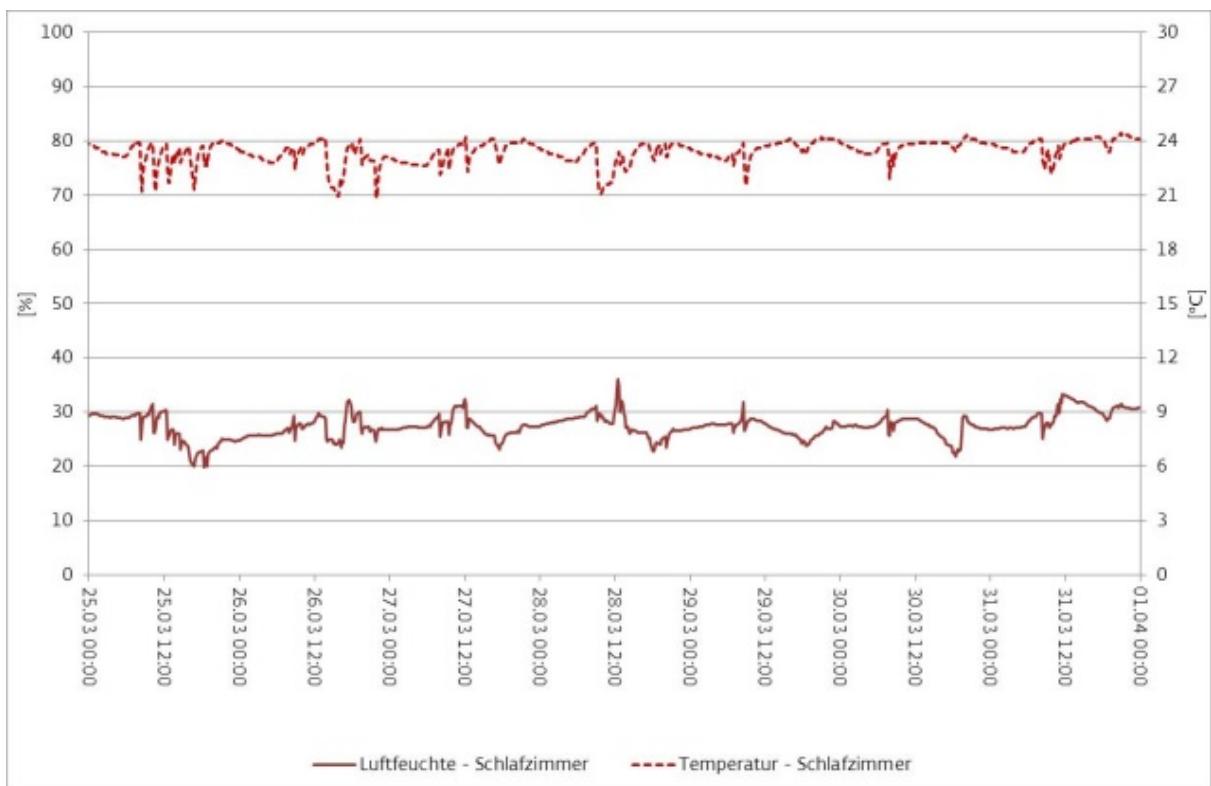


Abb. 55 : Thermisches Raumklima – Wohnung 5 (saniert)

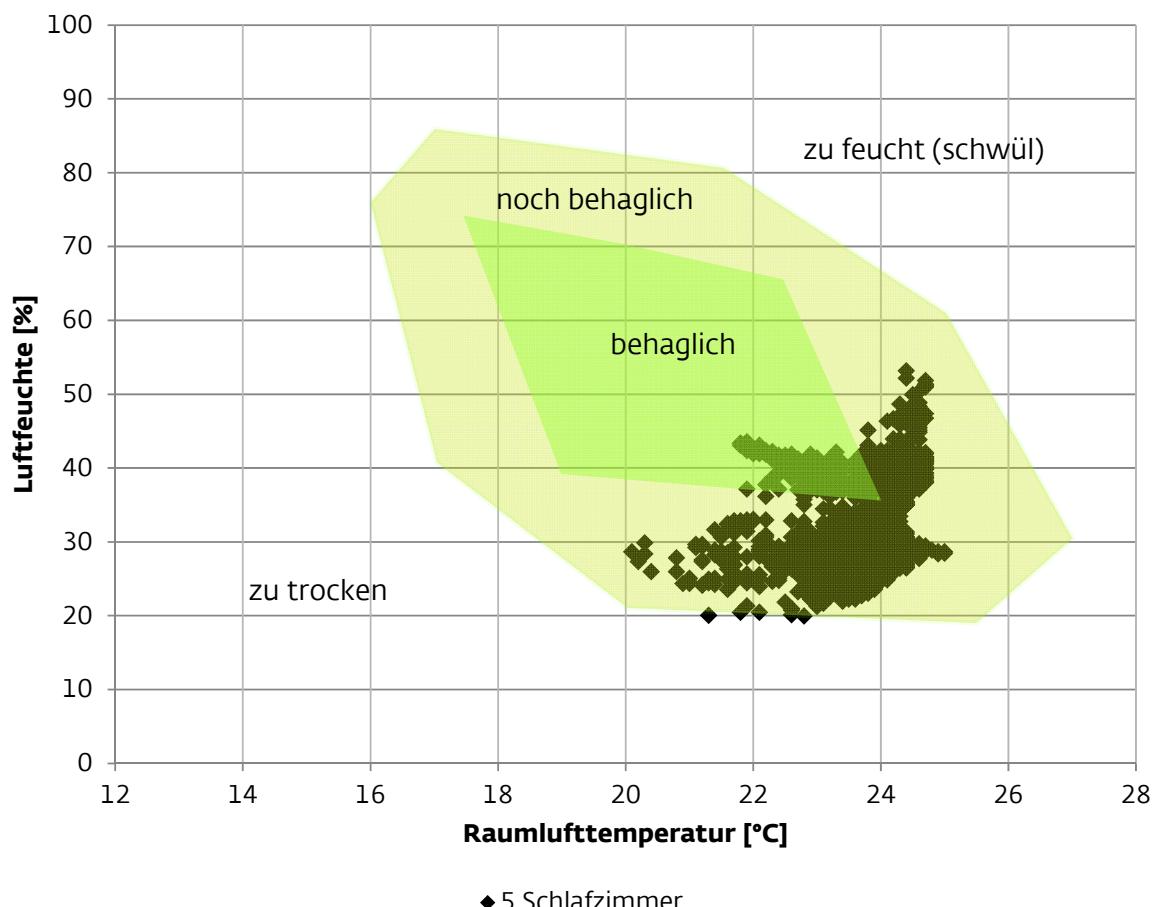


Abb. 56: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 5 (saniert)

Ausfall der Messung im Wohnzimmer. Im Schlafzimmer ist es zu warm und zu trocken.



Abb. 57 : Thermisches Raumklima – Wohnung 6

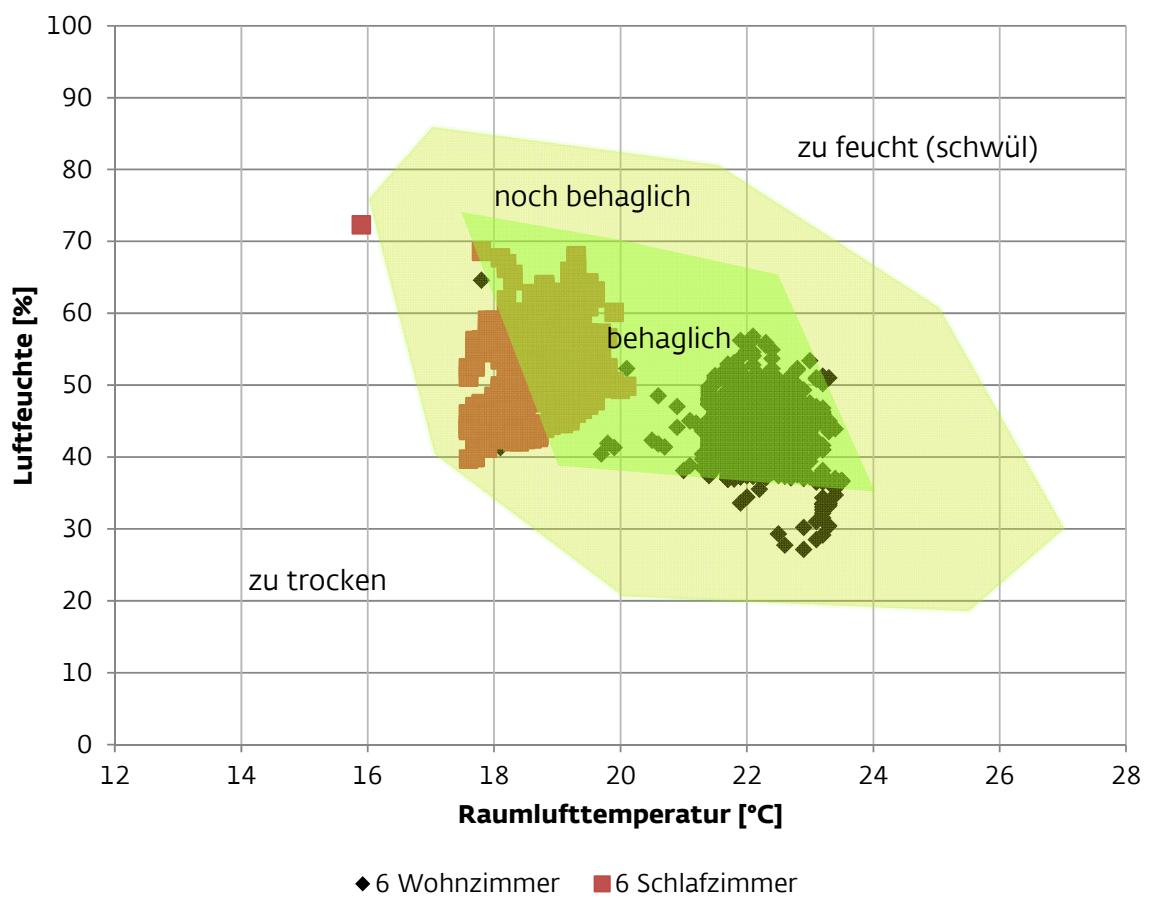


Abb. 58: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 6 (saniert)

Im Schlafzimmer ist es eher kühl.

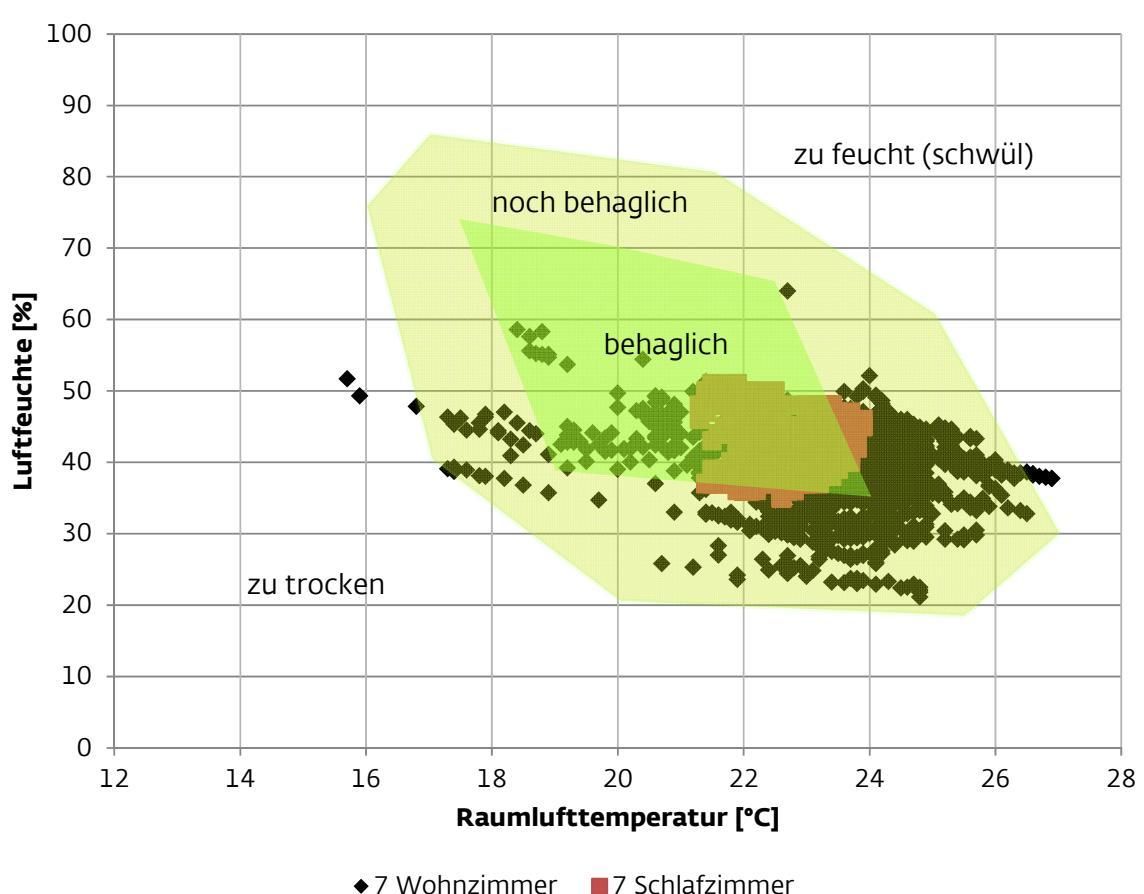


Abb. 60: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 7 (unsaniert)

Die Raumlufttemperatur im Wohnzimmer streut sehr stark.

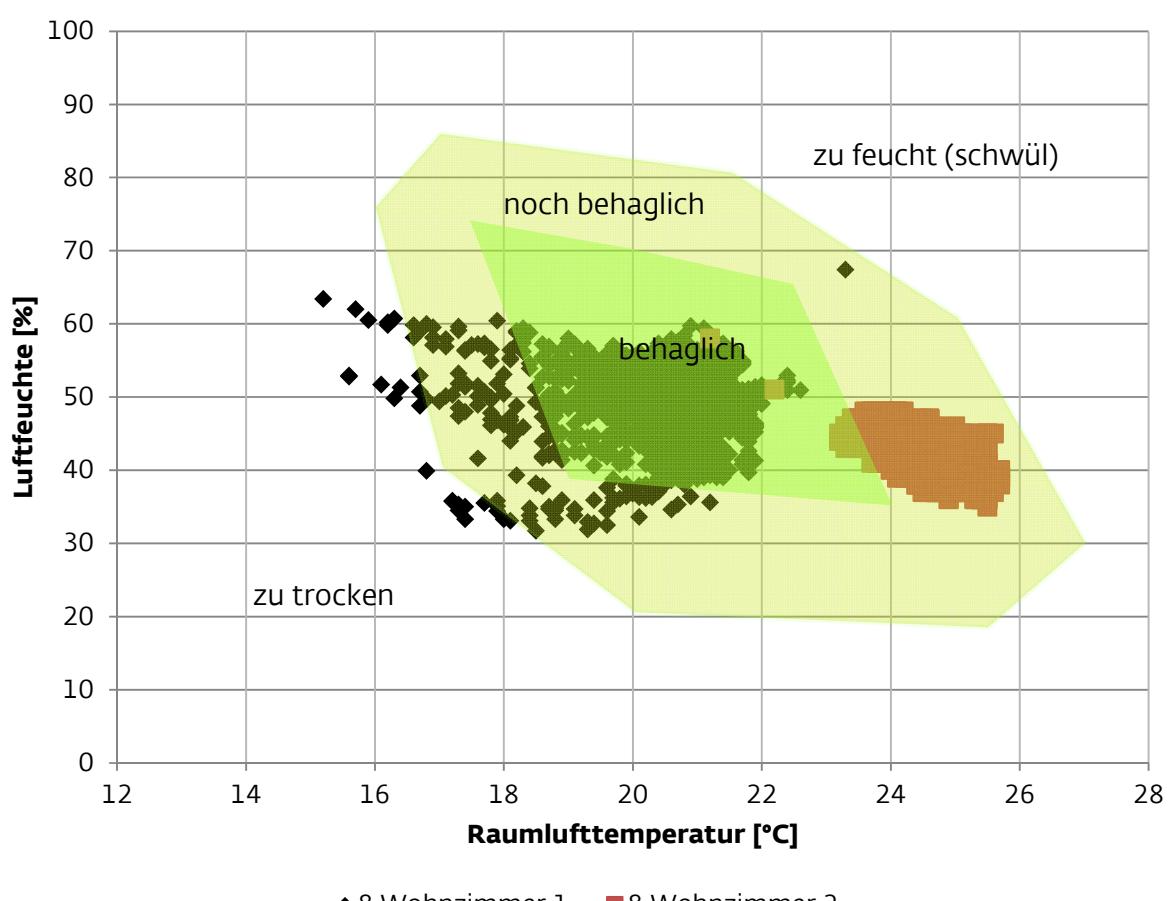
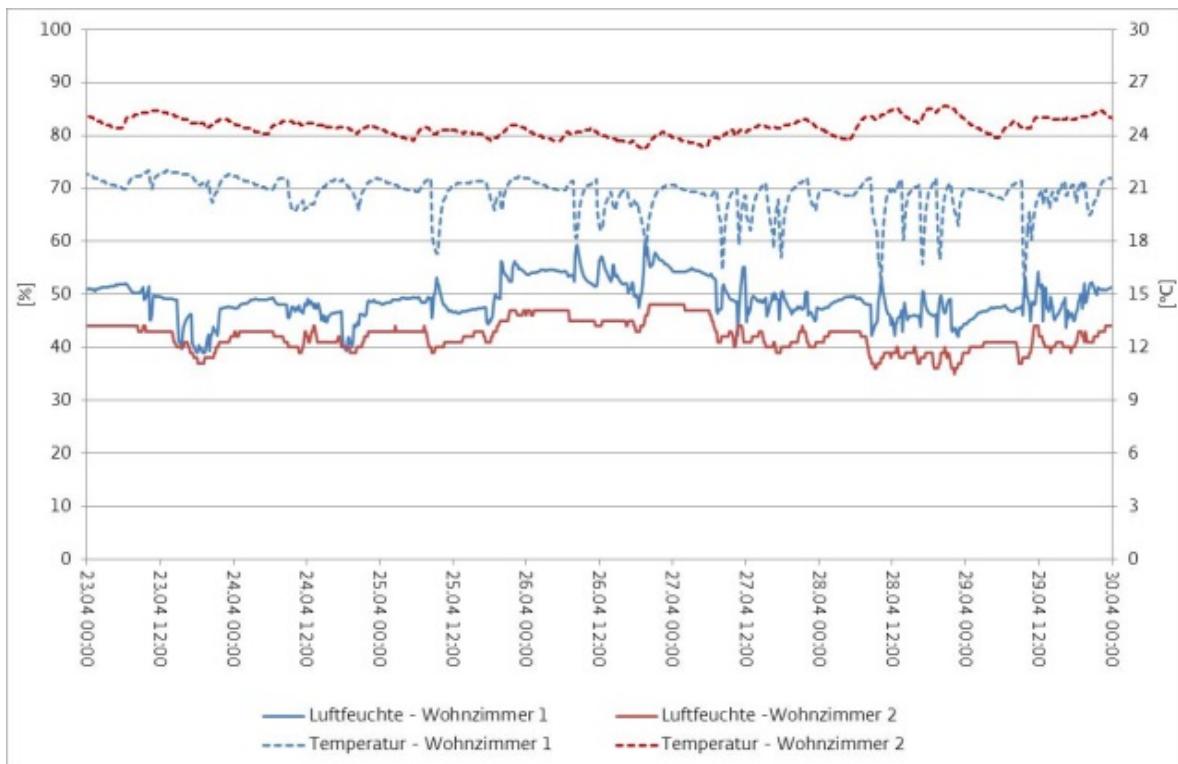


Abb. 62: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 8 (unsaniert)

Im Wohnzimmer ist es vermutlich aufgrund von längerem Fensterlüften phasenweise zu kühl. Im Schlafzimmer ist es eher zu warm.

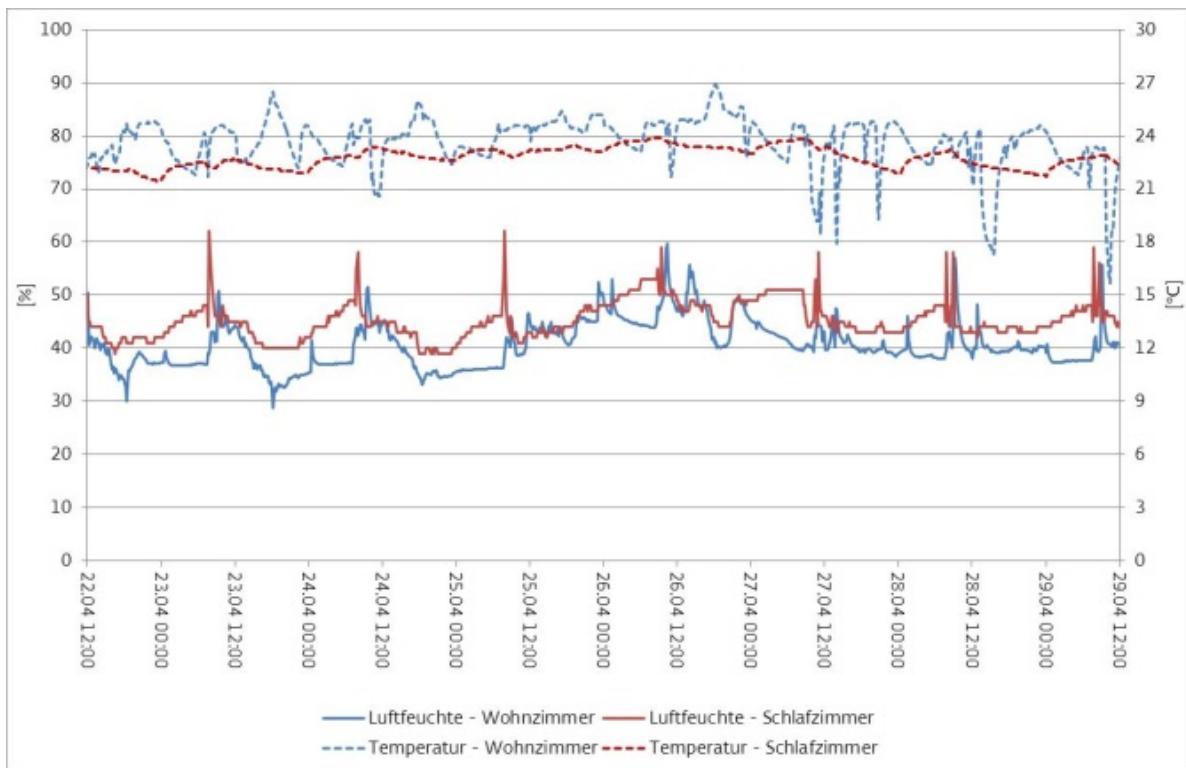


Abb. 63 : Thermisches Raumklima – Wohnung 9 (unsaniert)

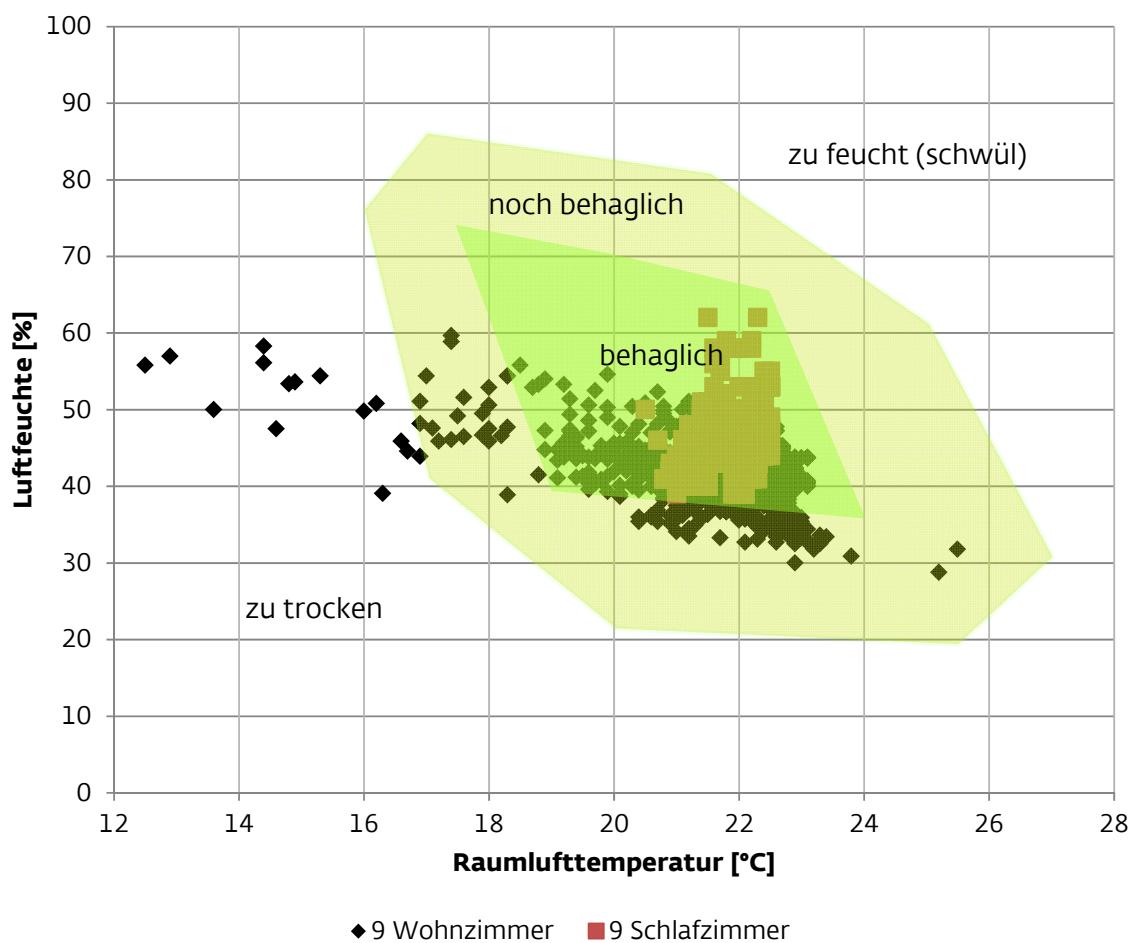
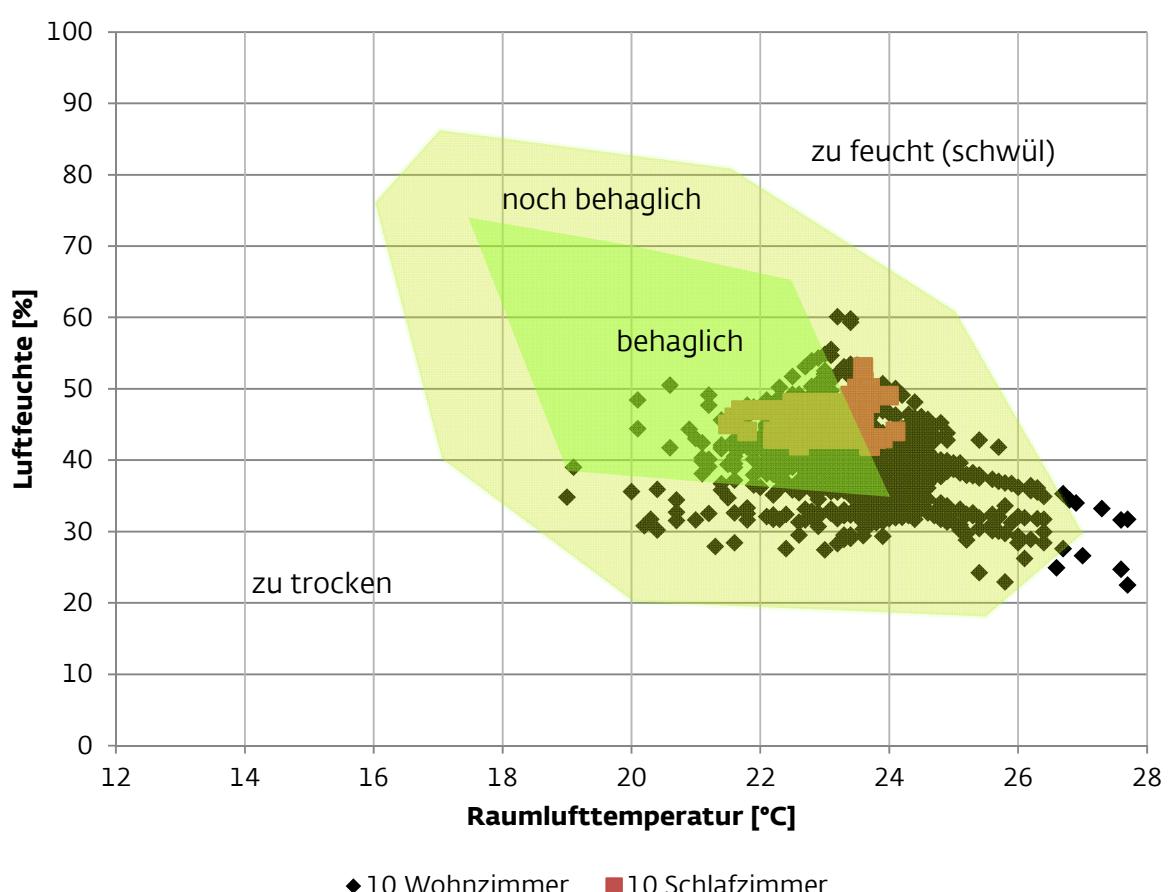
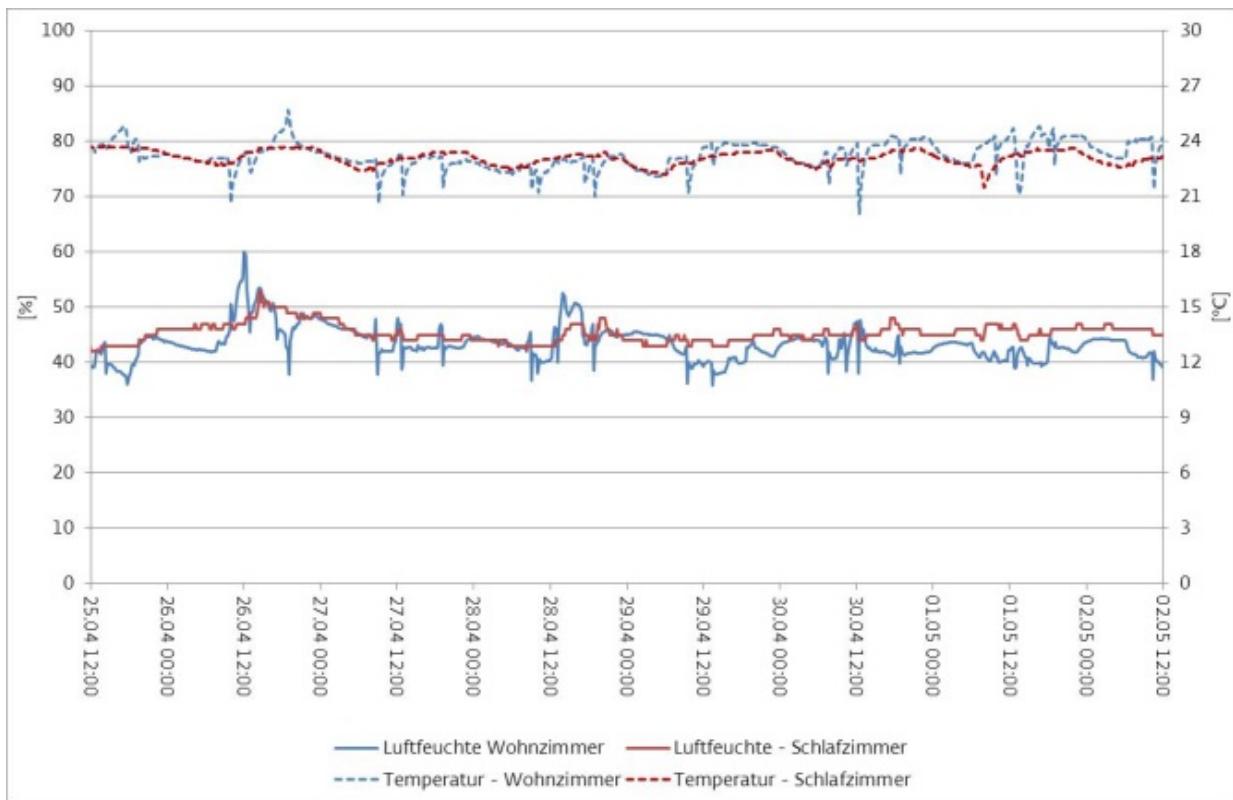


Abb. 64: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 9 (unsaniert)

Die Raumlufttemperatur ist im Wohnzimmer aufgrund von Fensterlüftung kurzzeitig sehr tief.



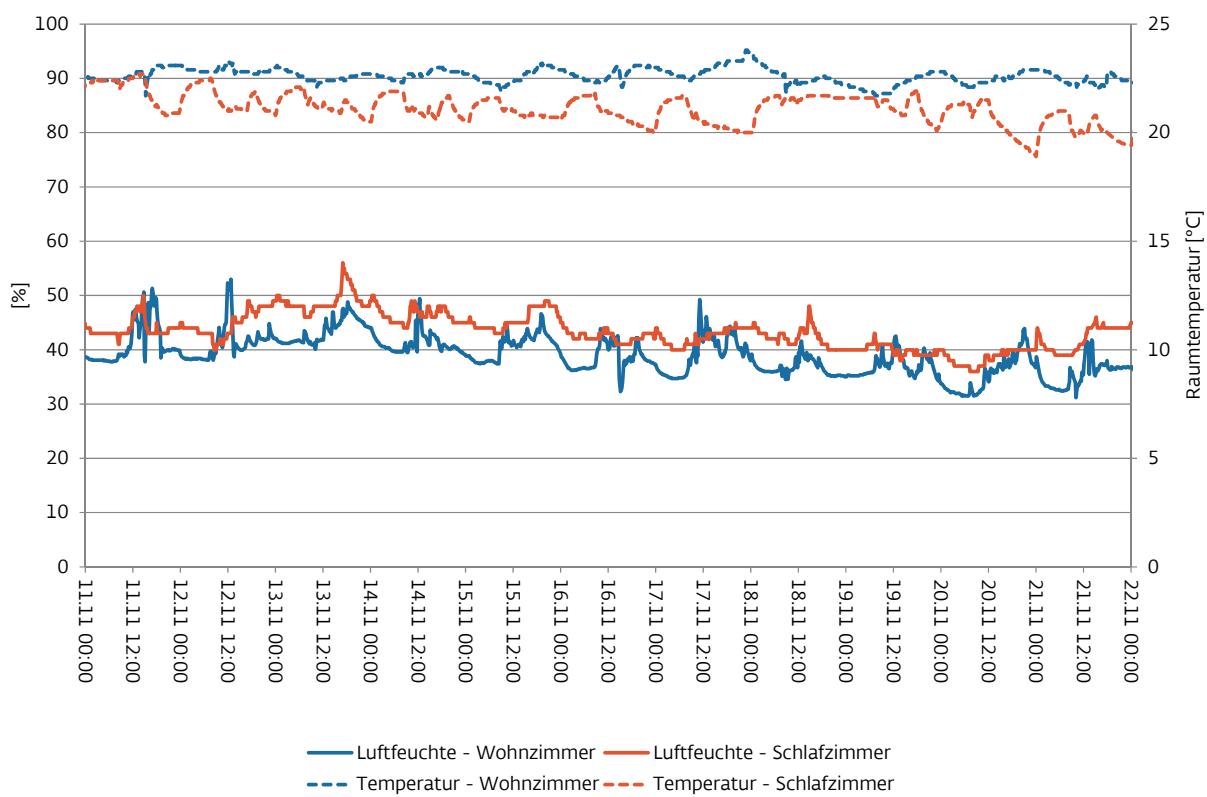


Abb. 67 : Thermisches Raumklima – Wohnung 11

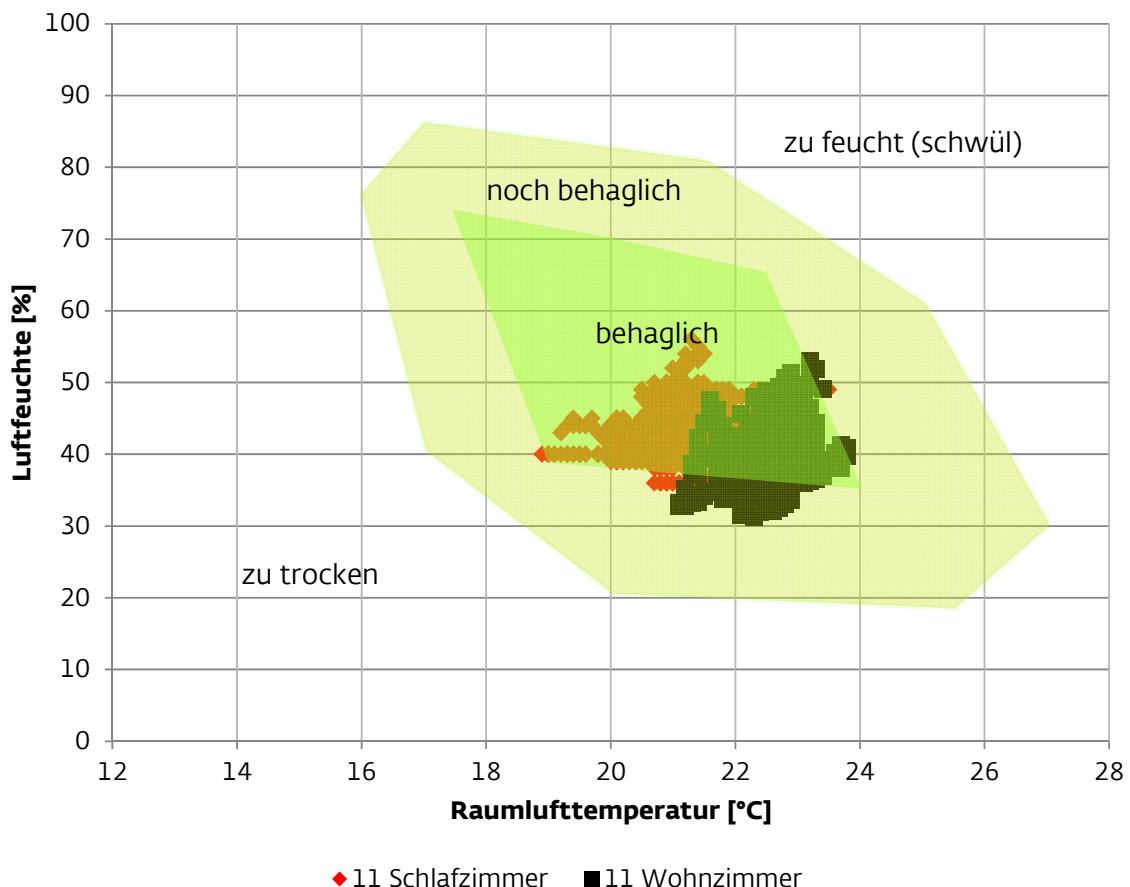


Abb. 68: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 11 (saniert)

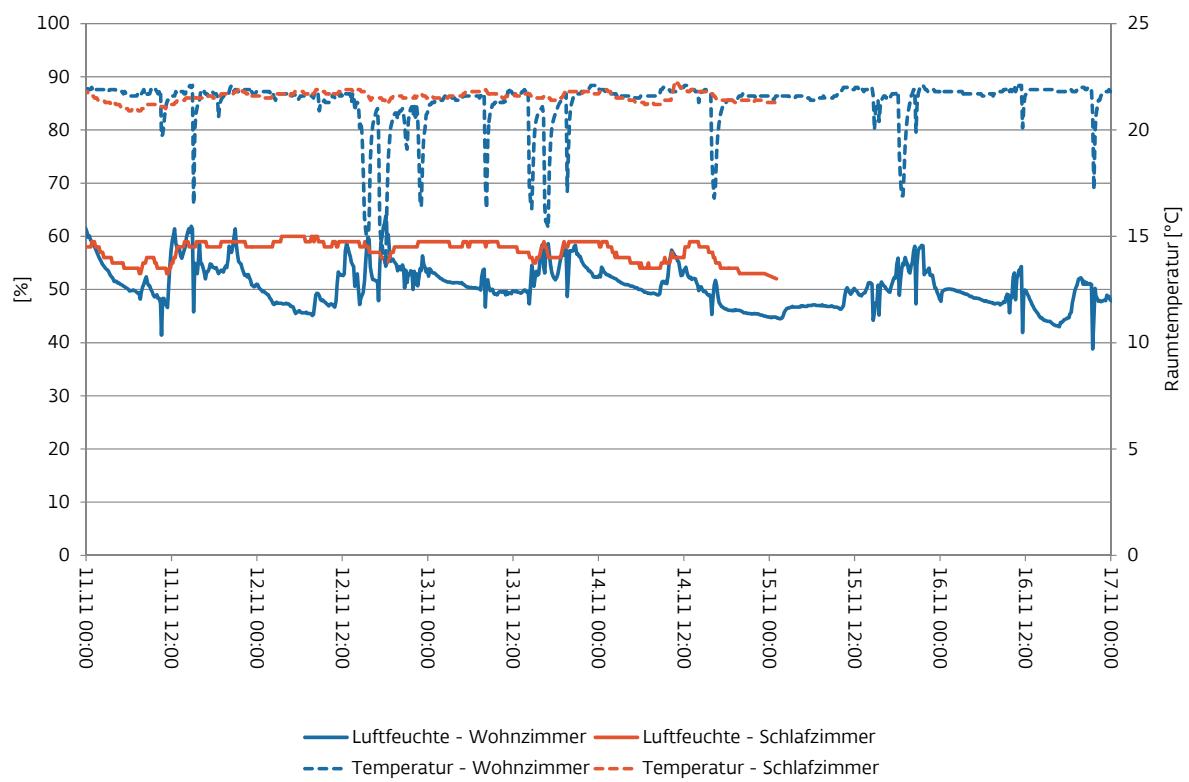


Abb. 69 : Thermisches Raumklima – Wohnung 12

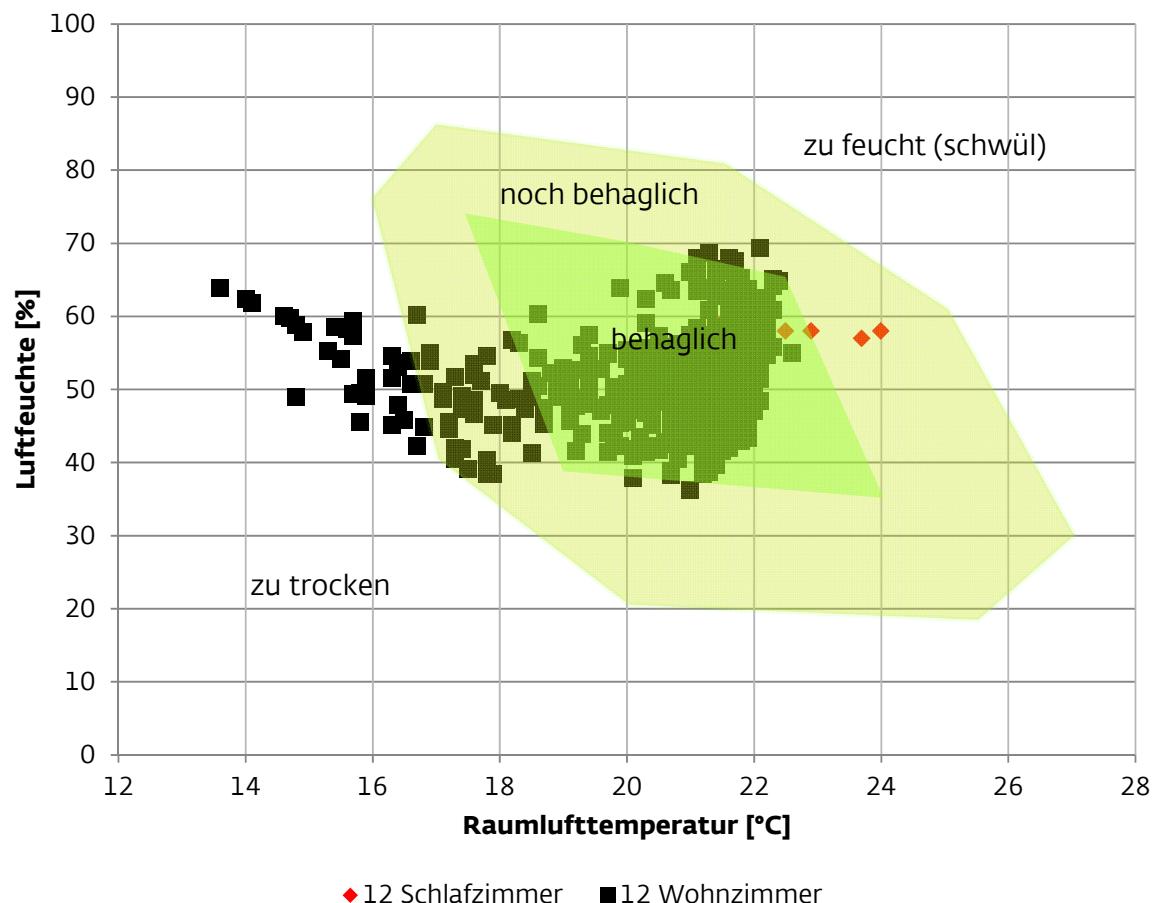


Abb. 70: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 12 (saniert)

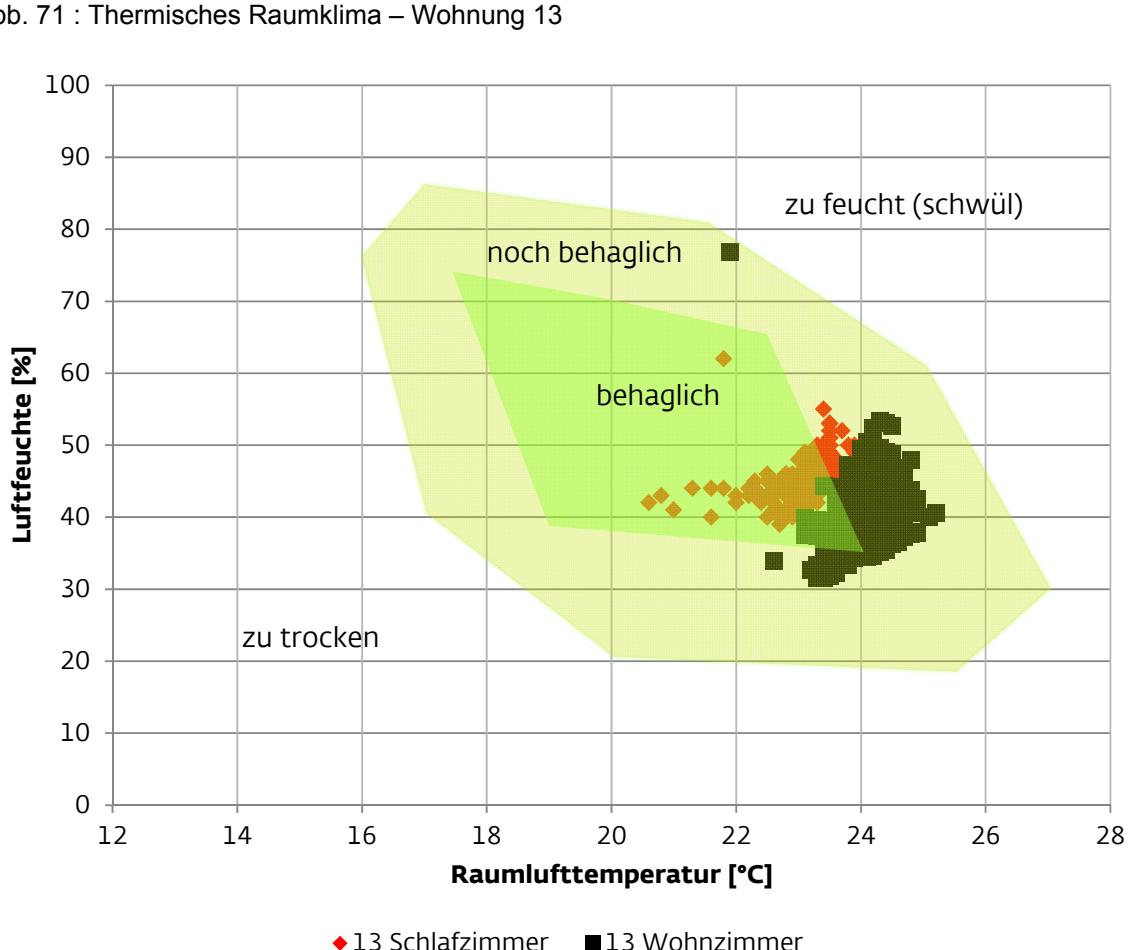
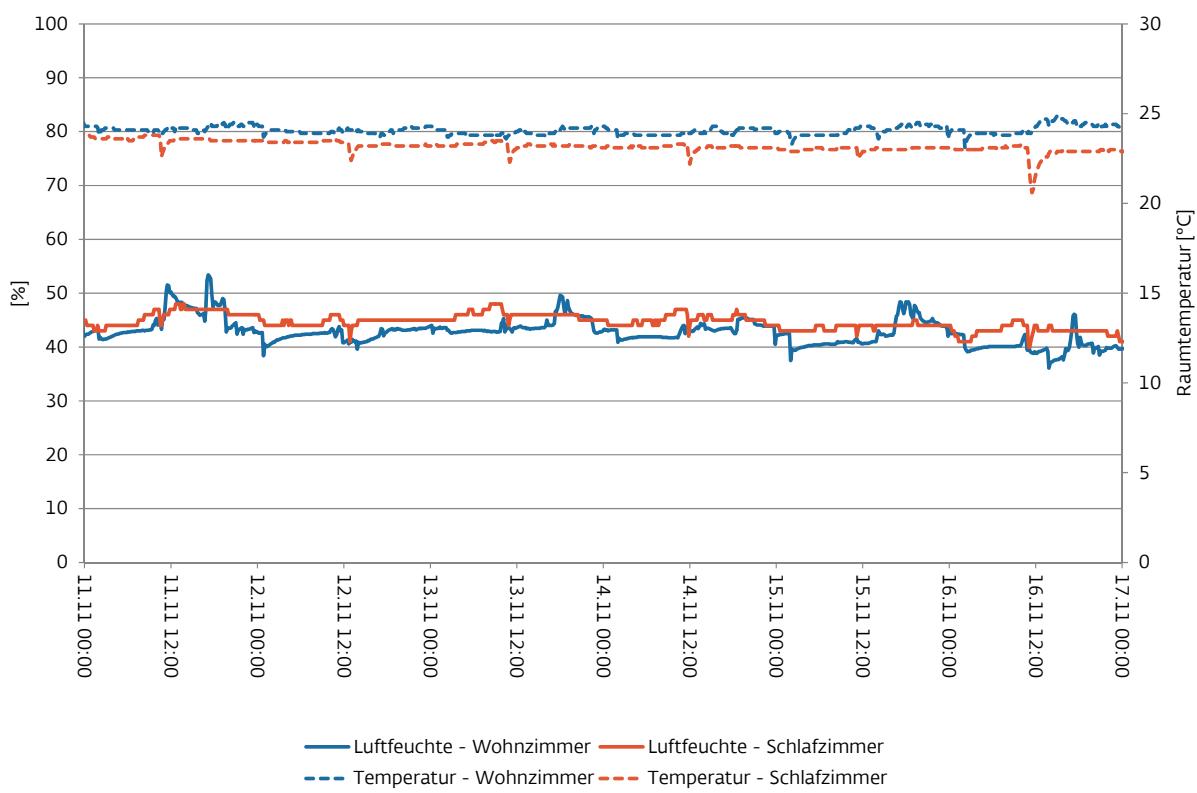


Abb. 72: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 13 (saniert)

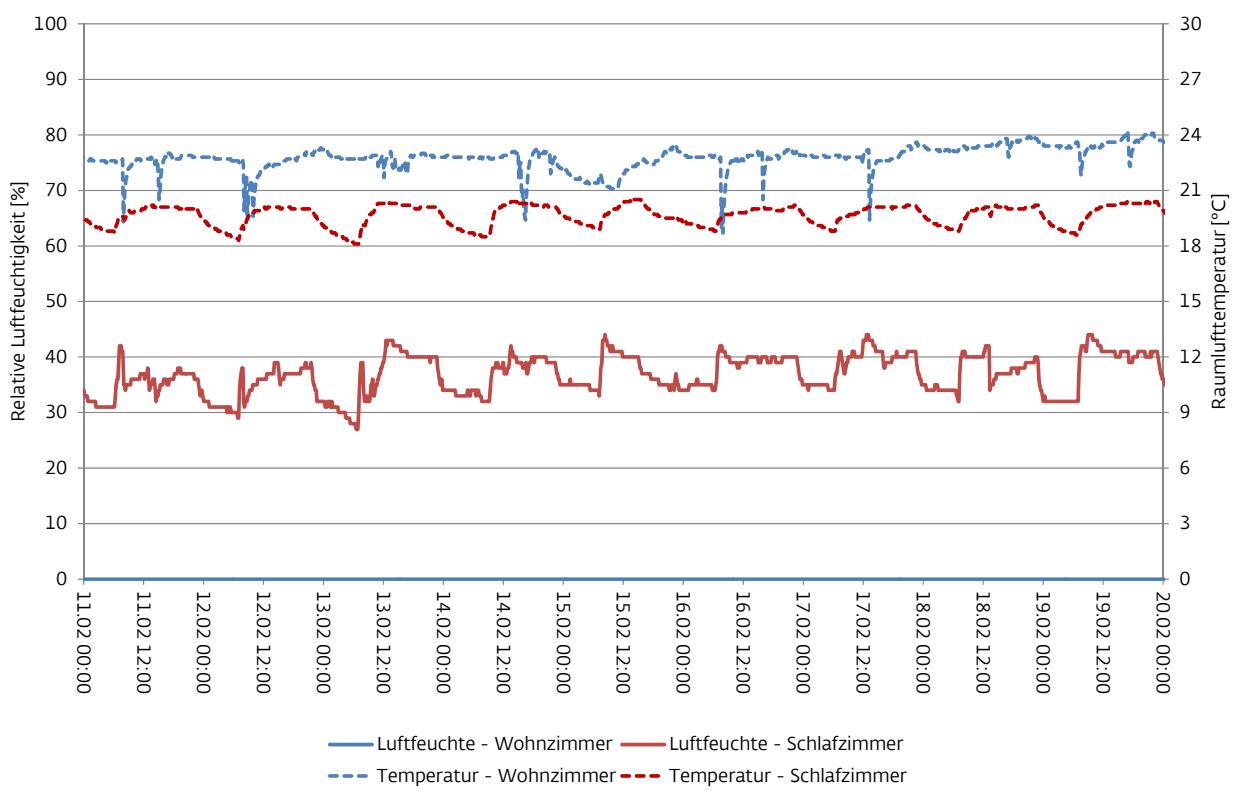


Abb. 73 : Thermisches Raumklima – Wohnung 14

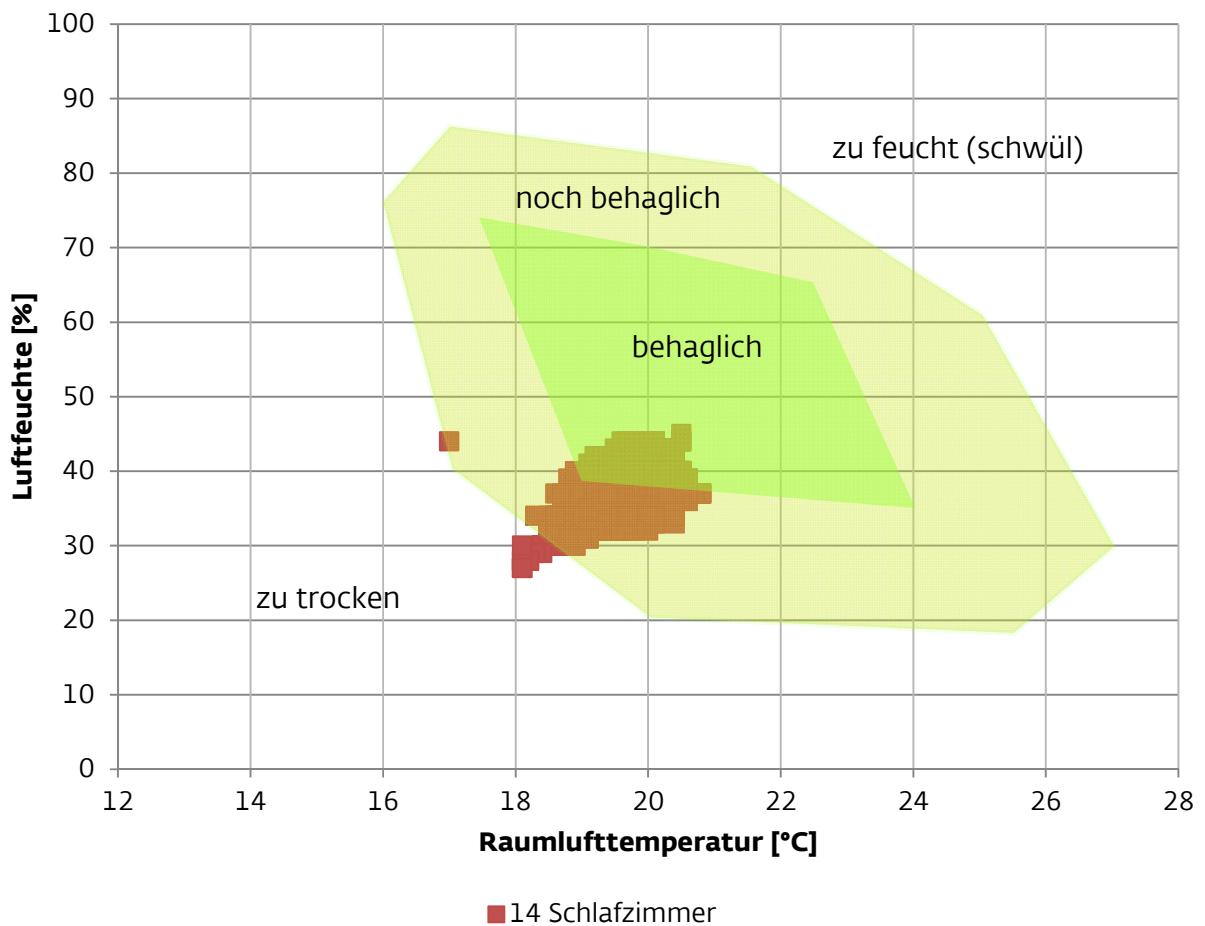


Abb. 74: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 14 (saniert)

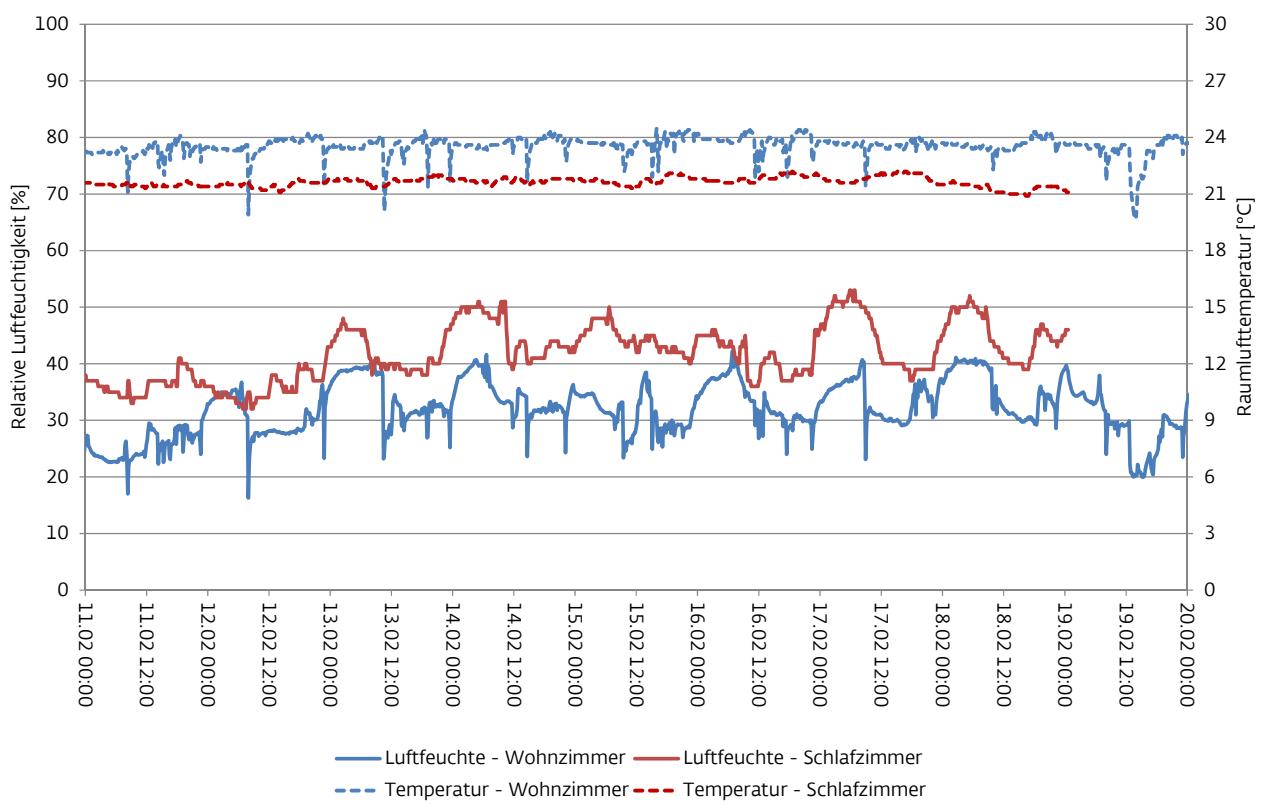


Abb. 75 : Thermisches Raumklima – Wohnung 15

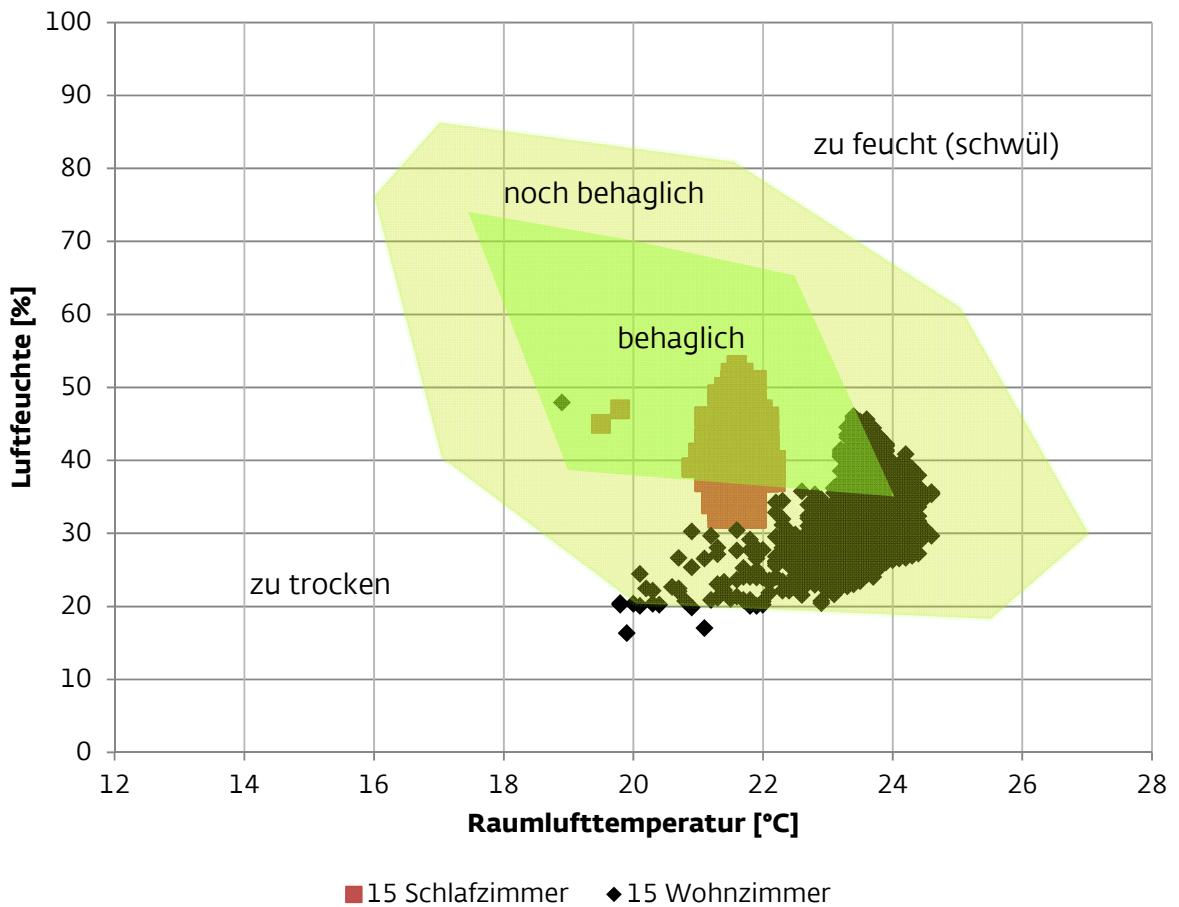


Abb. 76: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 15 (saniert)

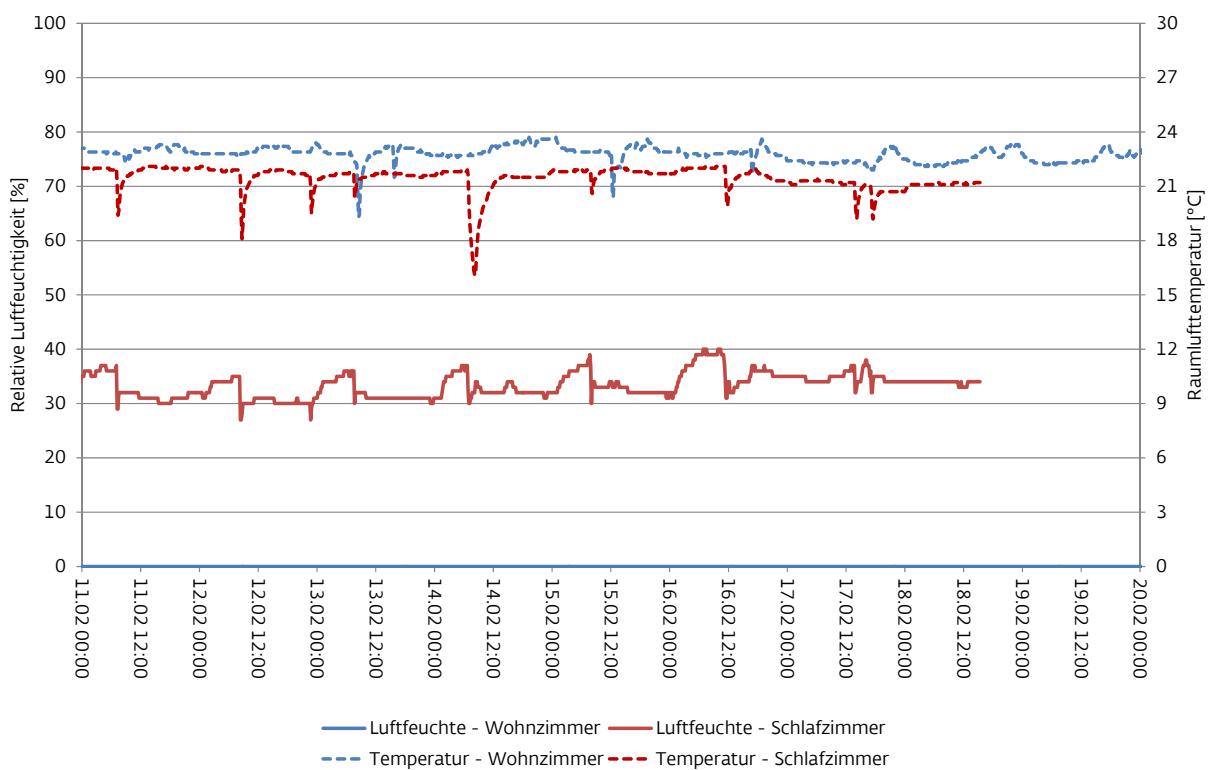


Abb. 77 : Thermisches Raumklima – Wohnung 16

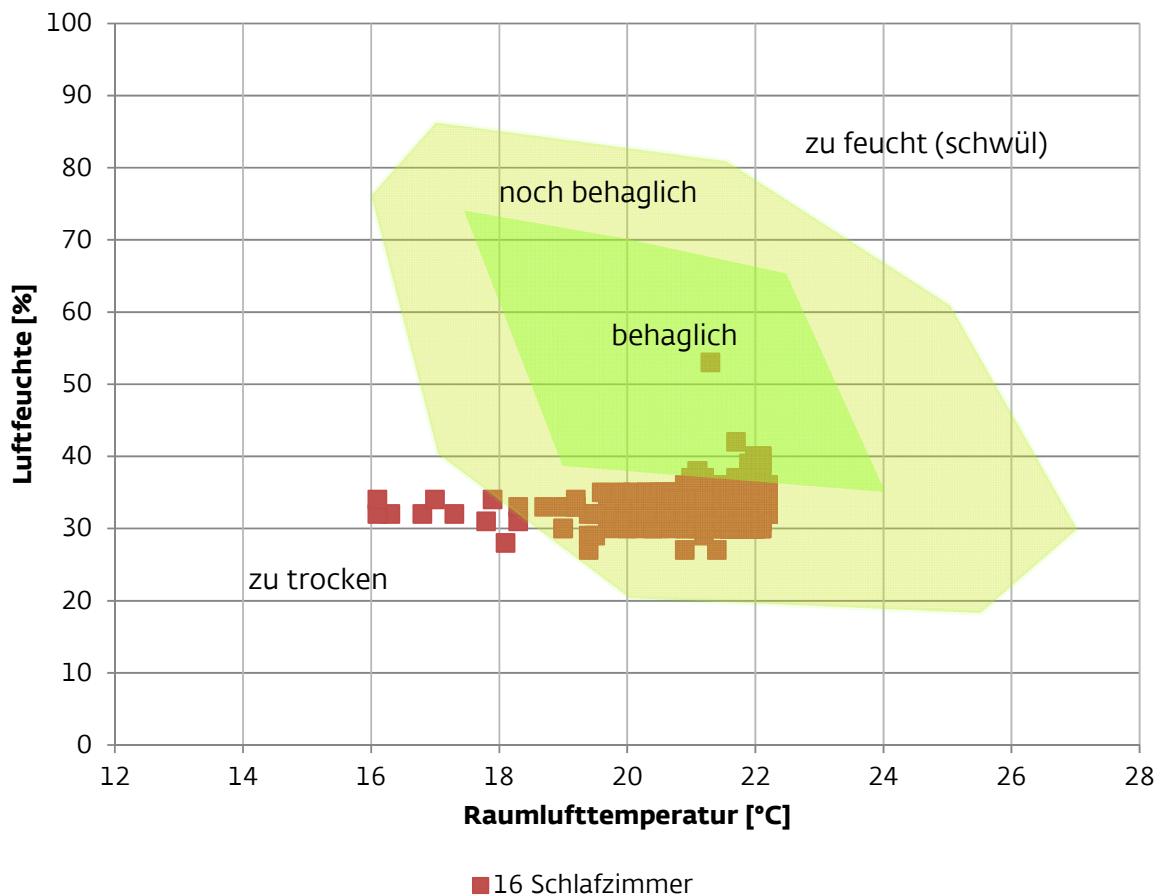


Abb. 78: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 16 (saniert)

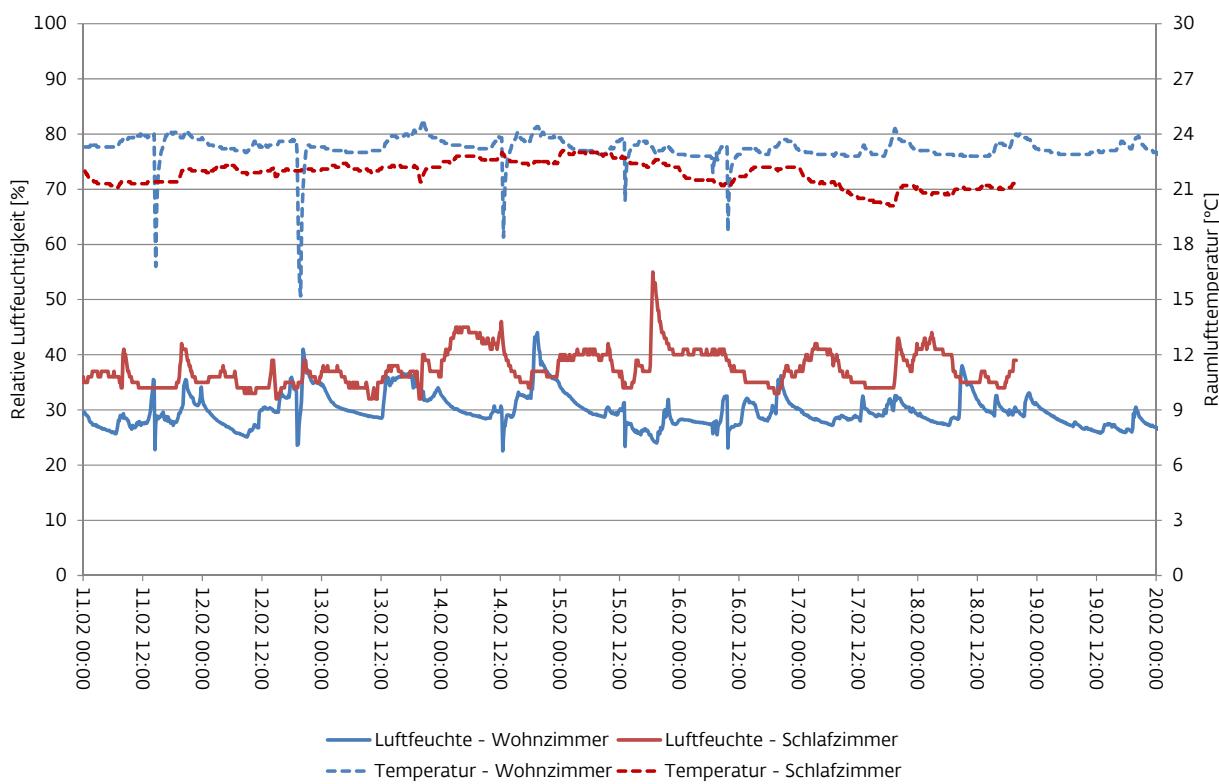


Abb. 79 : Thermisches Raumklima – Wohnung 17

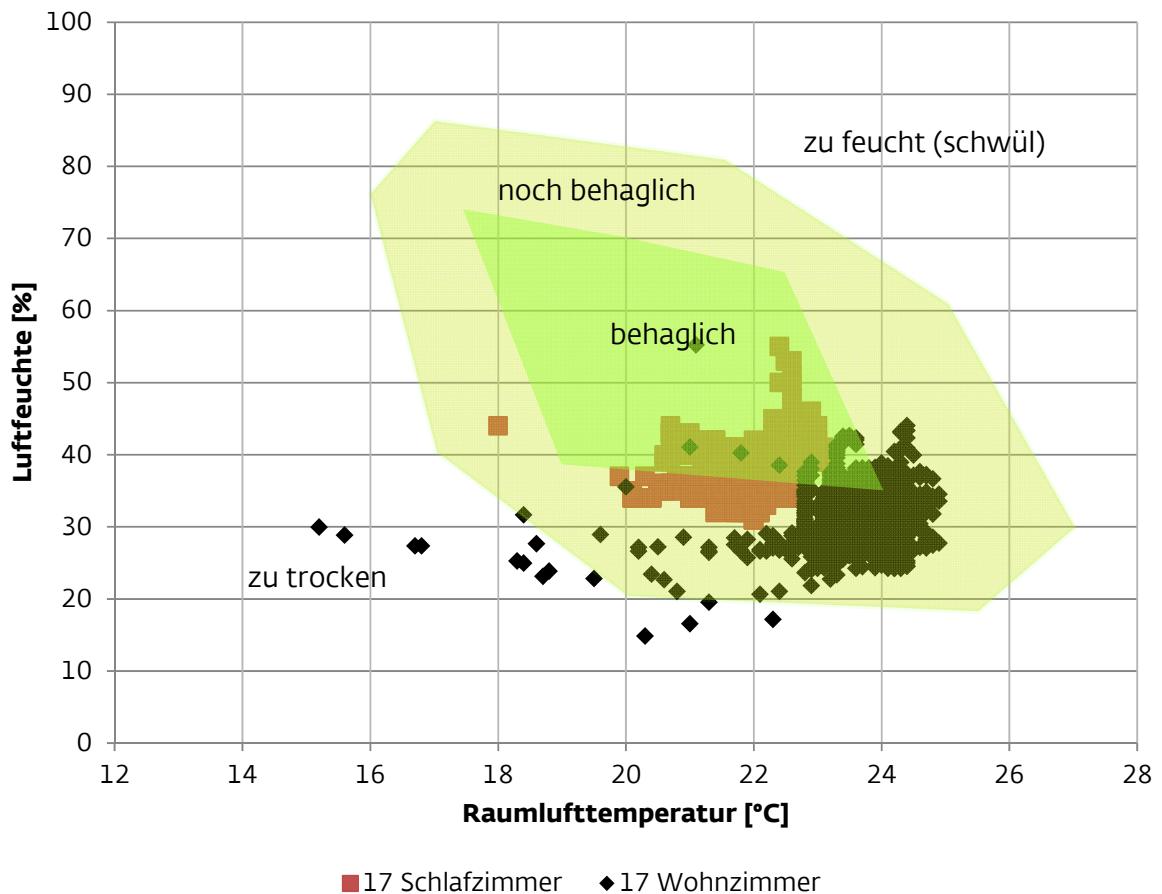


Abb. 80: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 17 (saniert)

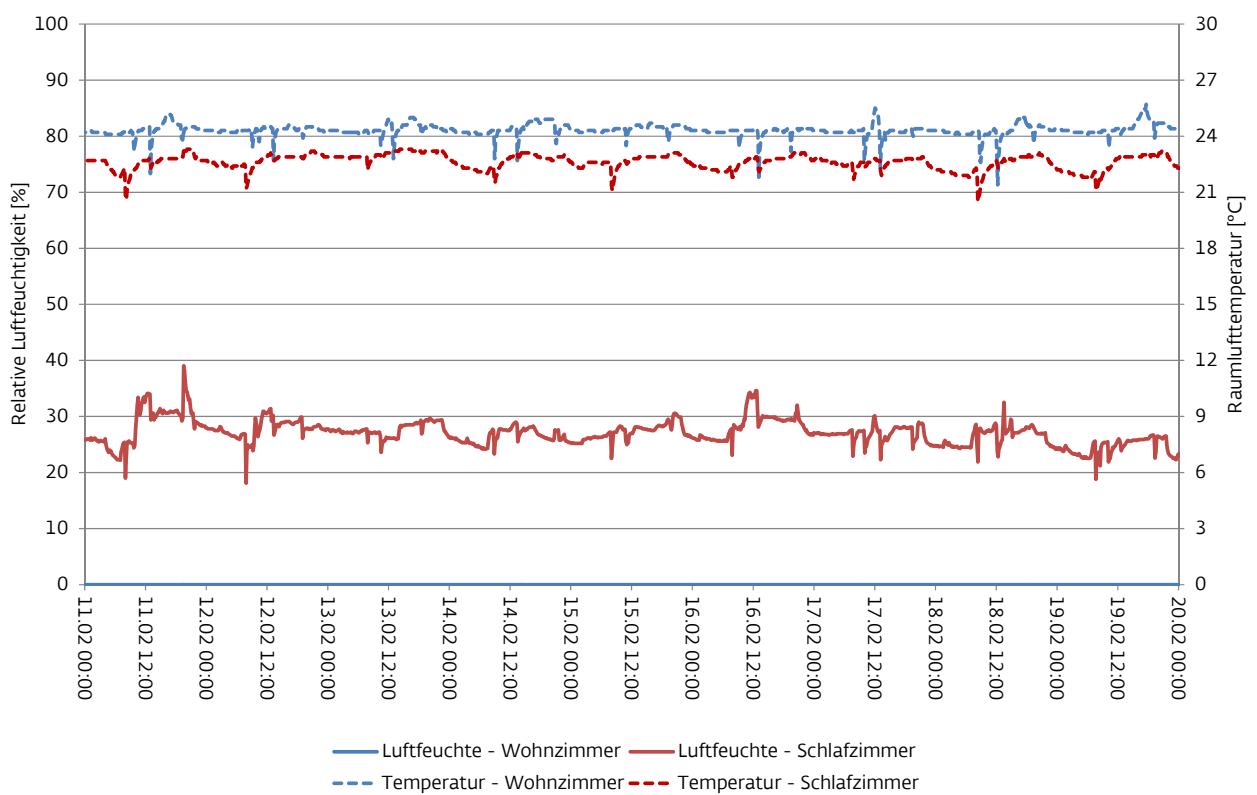


Abb. 81 : Thermisches Raumklima – Wohnung 18

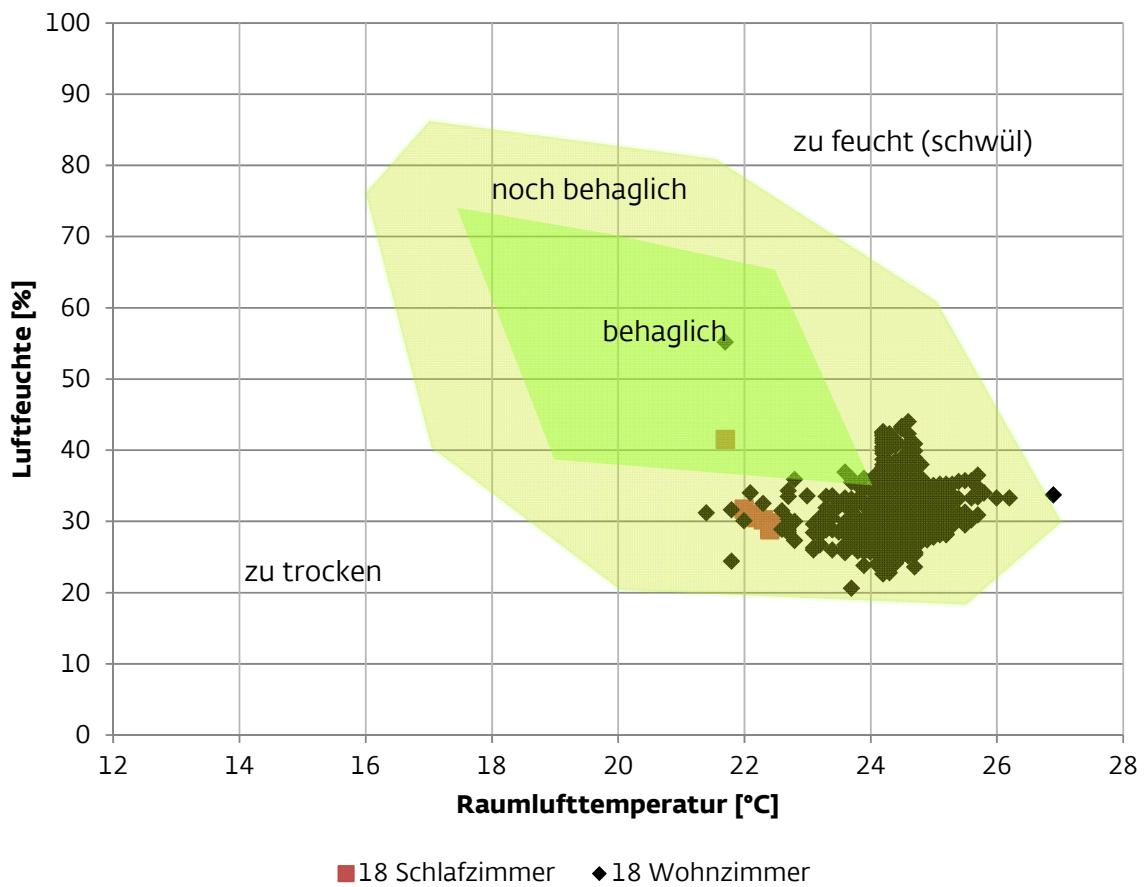


Abb. 82: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 18 (saniert)

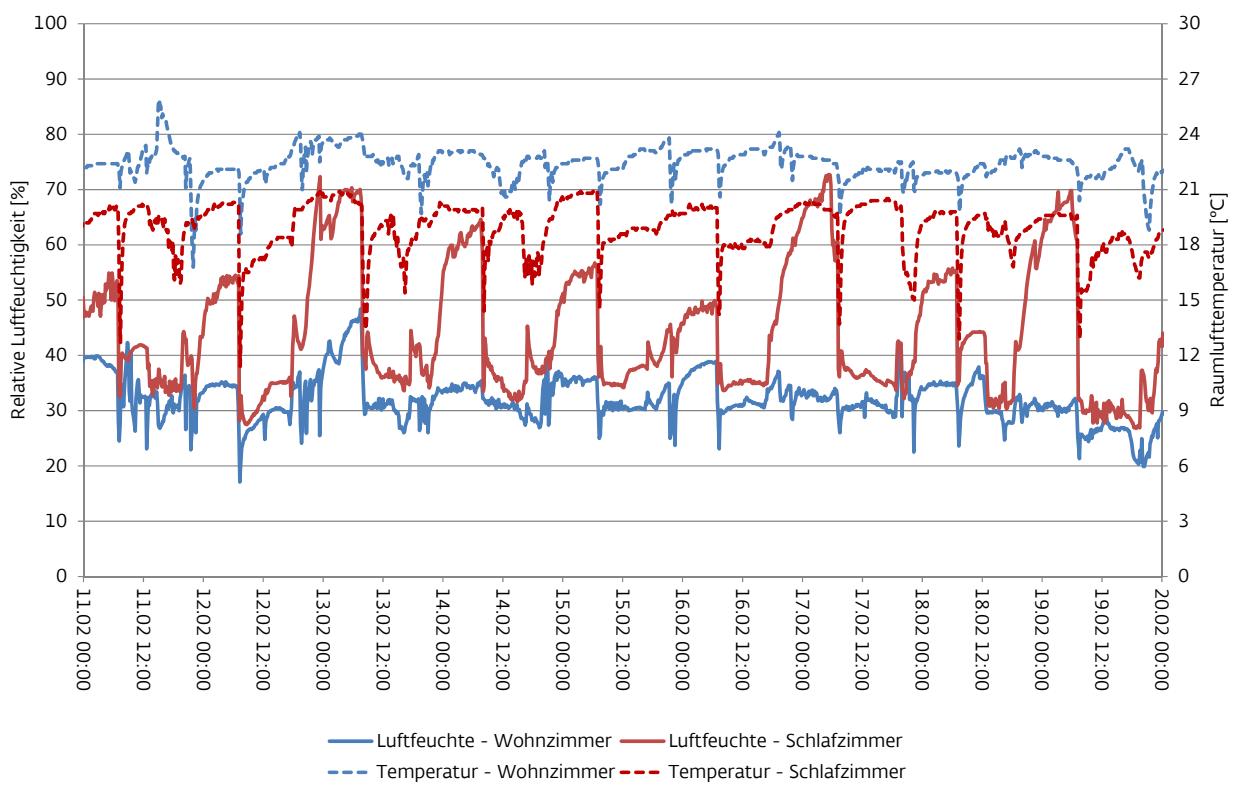


Abb. 83 : Thermisches Raumklima – Wohnung 19

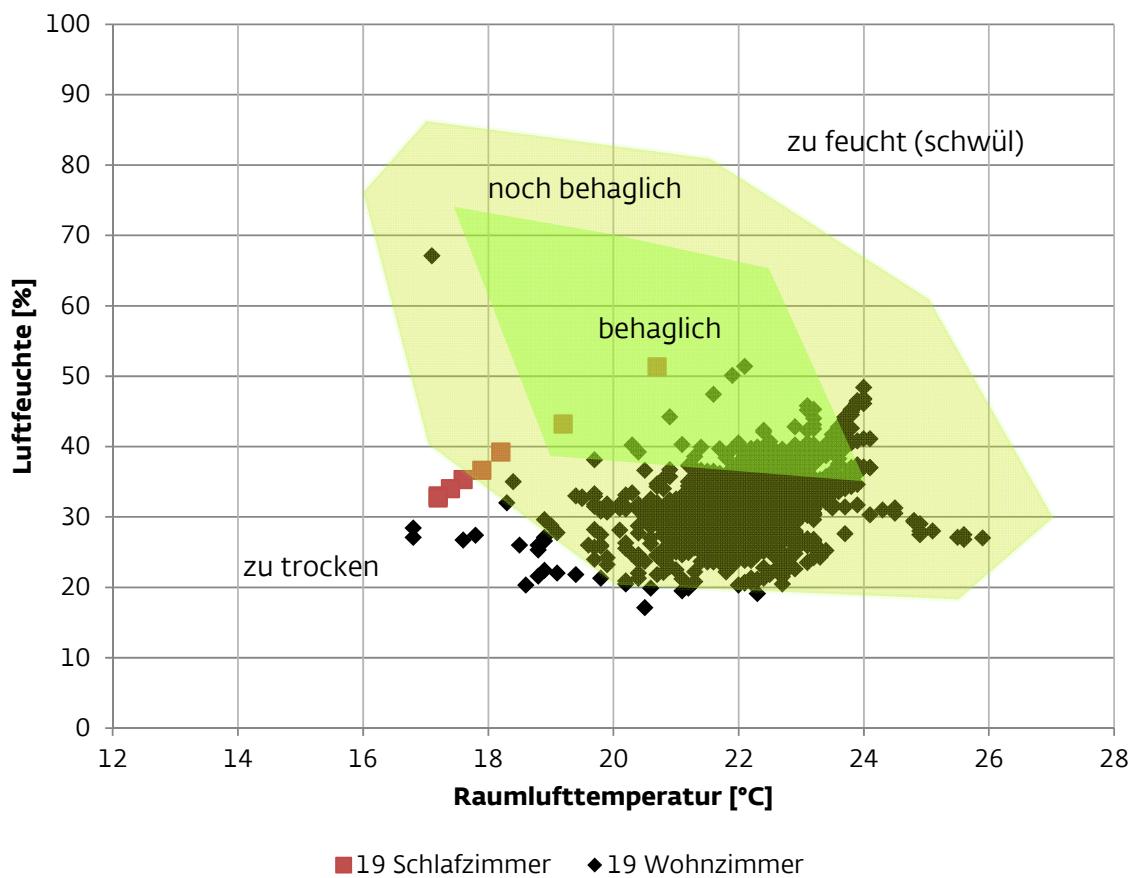


Abb. 84: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 19 (saniert)

## 11.4 Detaillierte Analyse der CO<sub>2</sub>-Konzentration pro Wohnung

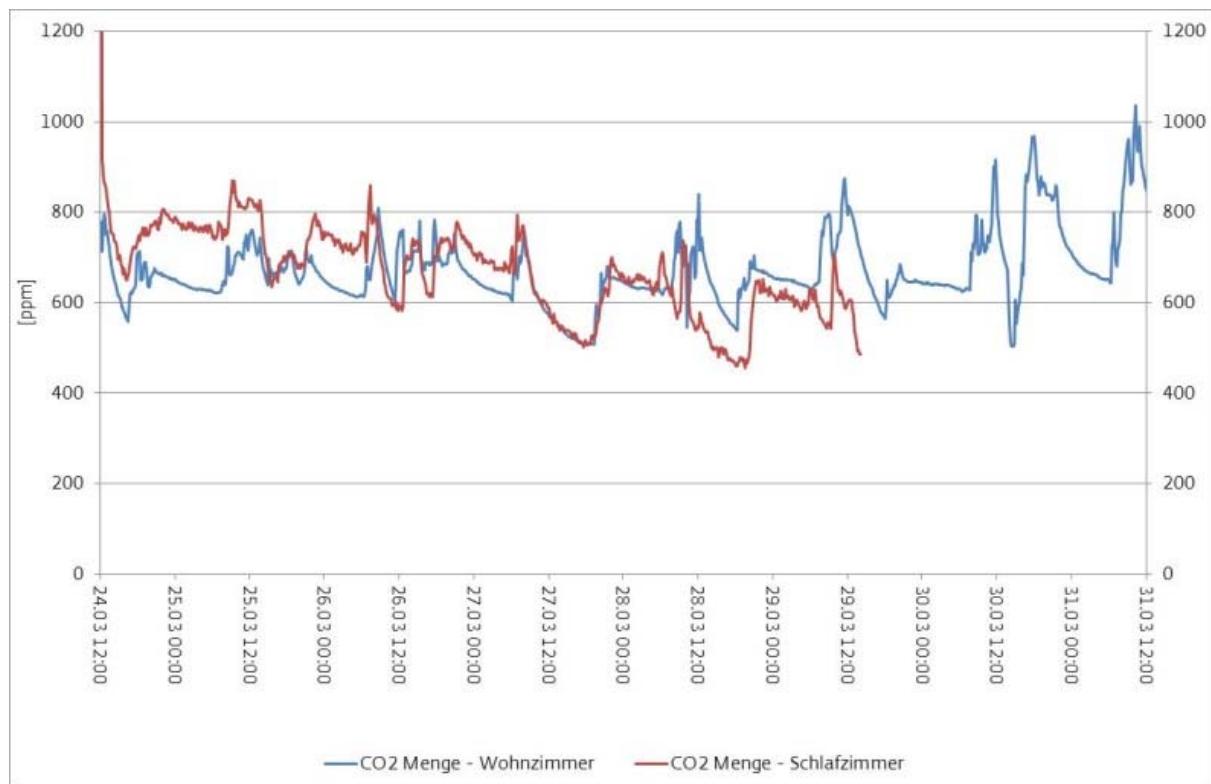


Abb. 85 : CO<sub>2</sub>-Konzentration – Wohnung 1

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohn- und Schlafzimmer bewegt sich zwischen 400 und 1000 ppm.

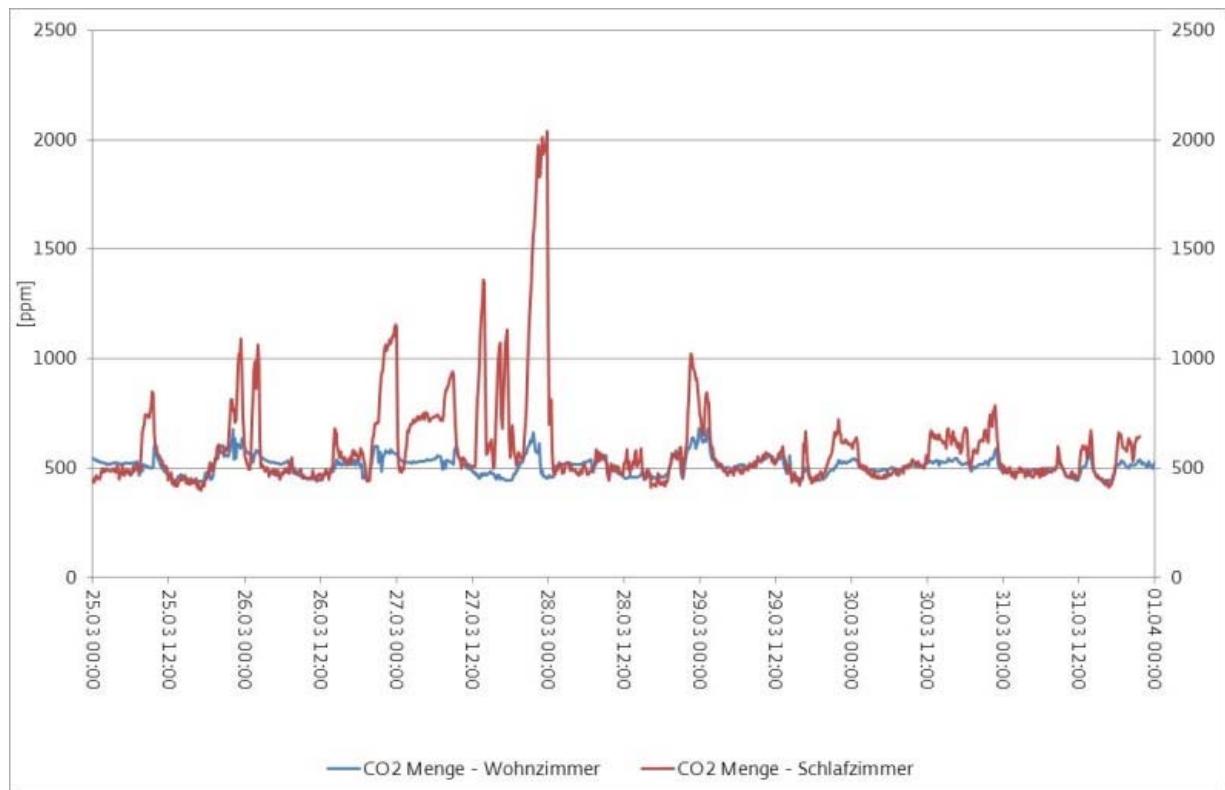
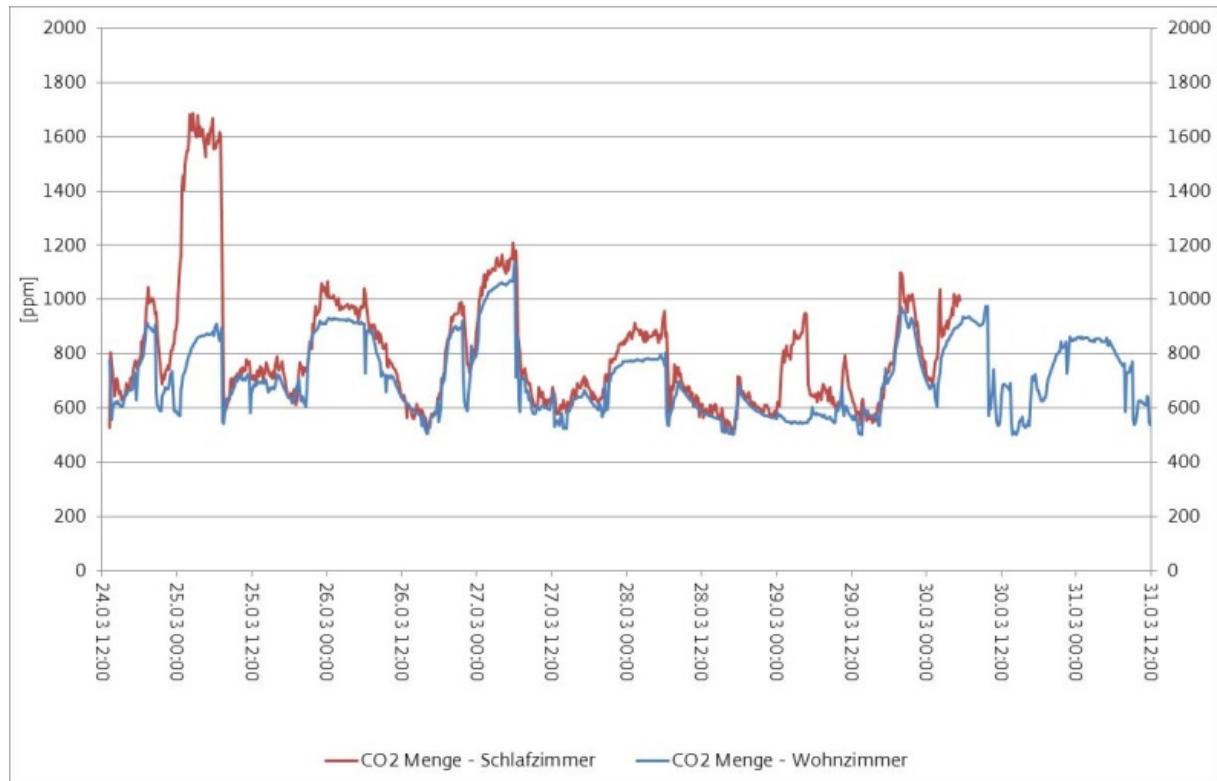


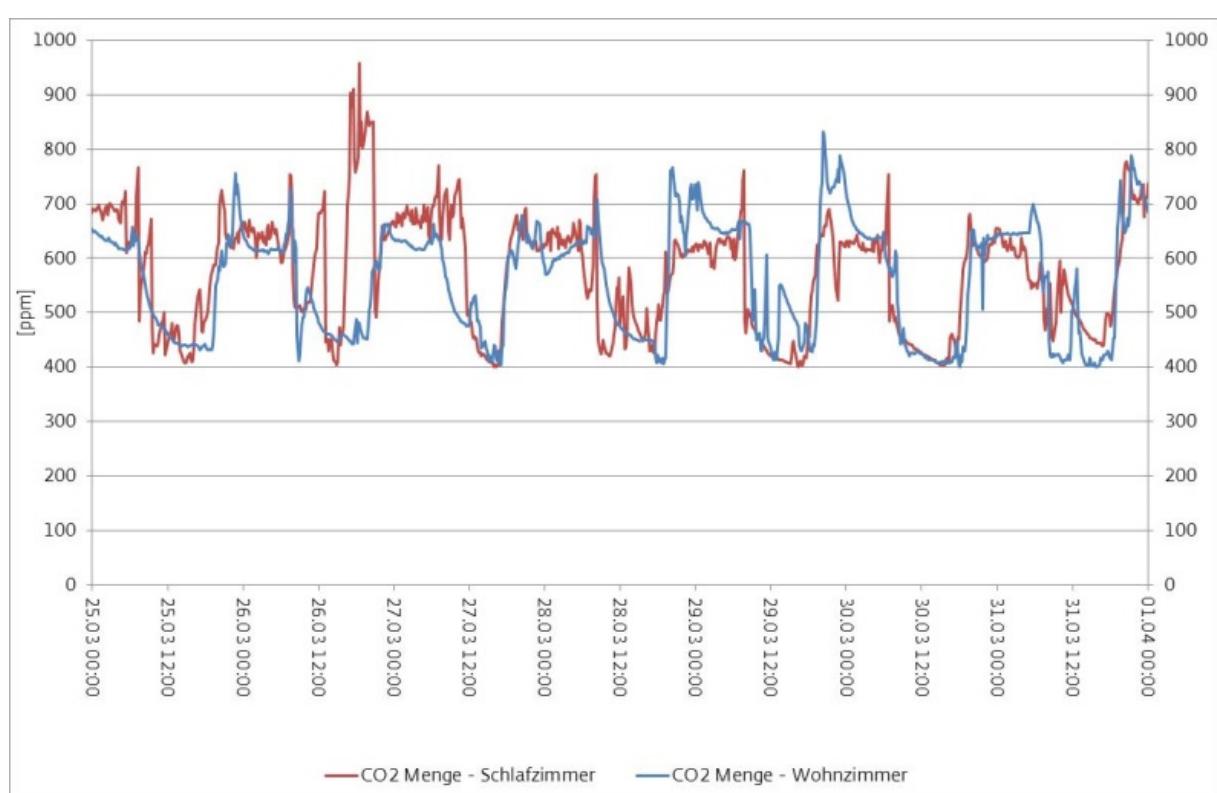
Abb. 86 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 2

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohn- und Schlafzimmer bewegt sich im Durschnitt zwischen 500 und 1000 ppm. Im Schlafzimmer steigt die Konzentration allerdings einmal auf bis zu 2000 ppm an (28.03

00:00 Uhr) was einer niedrigen Luftqualität entspricht. Im Wohnzimmer kann die Luftqualität als „sehr gut“ bezeichnet werden.



Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohn- und Schlafzimmer bewegt sich zwischen 600 und 1200 ppm. Eine Spitze von 1600 ppm wird am 25.03 um 00:00 Uhr im Schlafzimmer gemessen. Insgesamt kann die Raumluftqualität im Schlaf- und Wohnzimmer als „mässig“ bis „niedrig“ (Klasse: RAL 3-RAL 4) bezeichnet werden.



Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohn- und Schlafzimmer bewegt sich zwischen 400 und 950 ppm. Insgesamt kann die Raumluftqualität im Schlaf- und Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden.

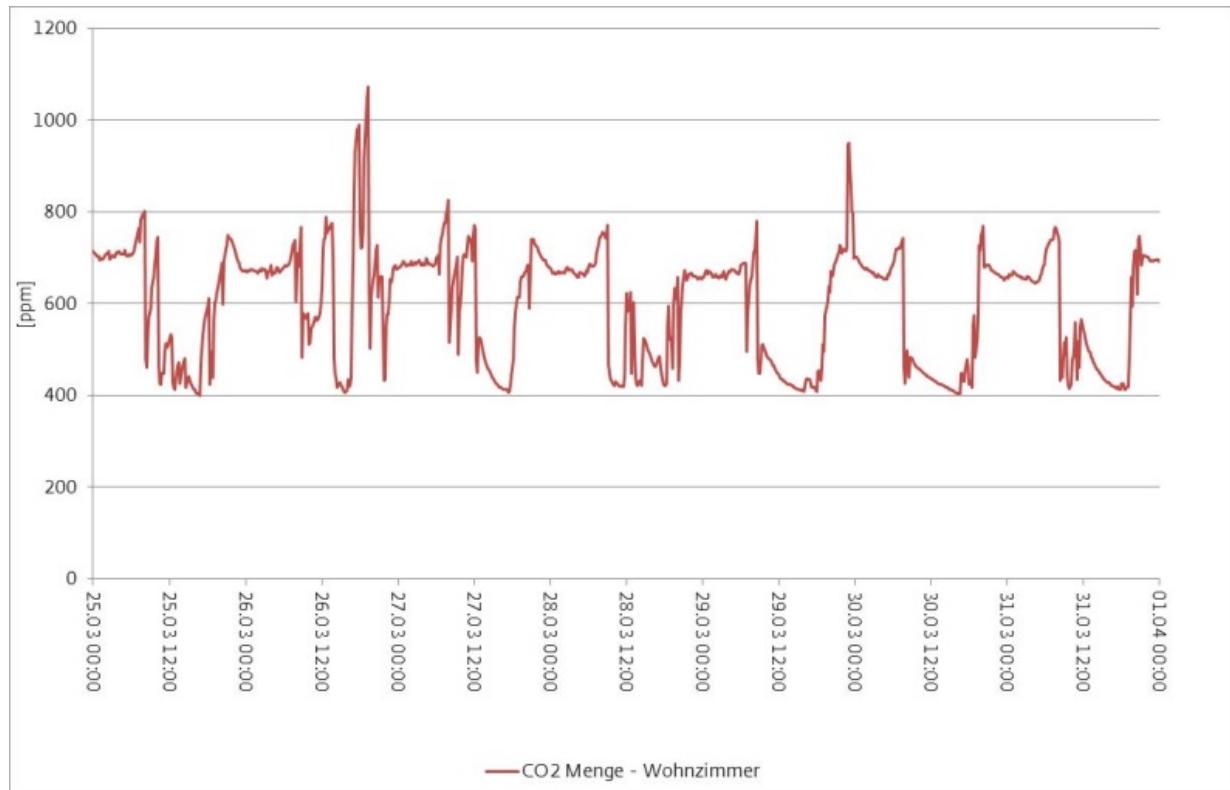


Abb. 89 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 5

Aufgrund eines Fehlers der Messeinrichtung kann nur die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohnzimmer dargestellt werden. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 1000 ppm. Insgesamt kann die Raumluftqualität im Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden.

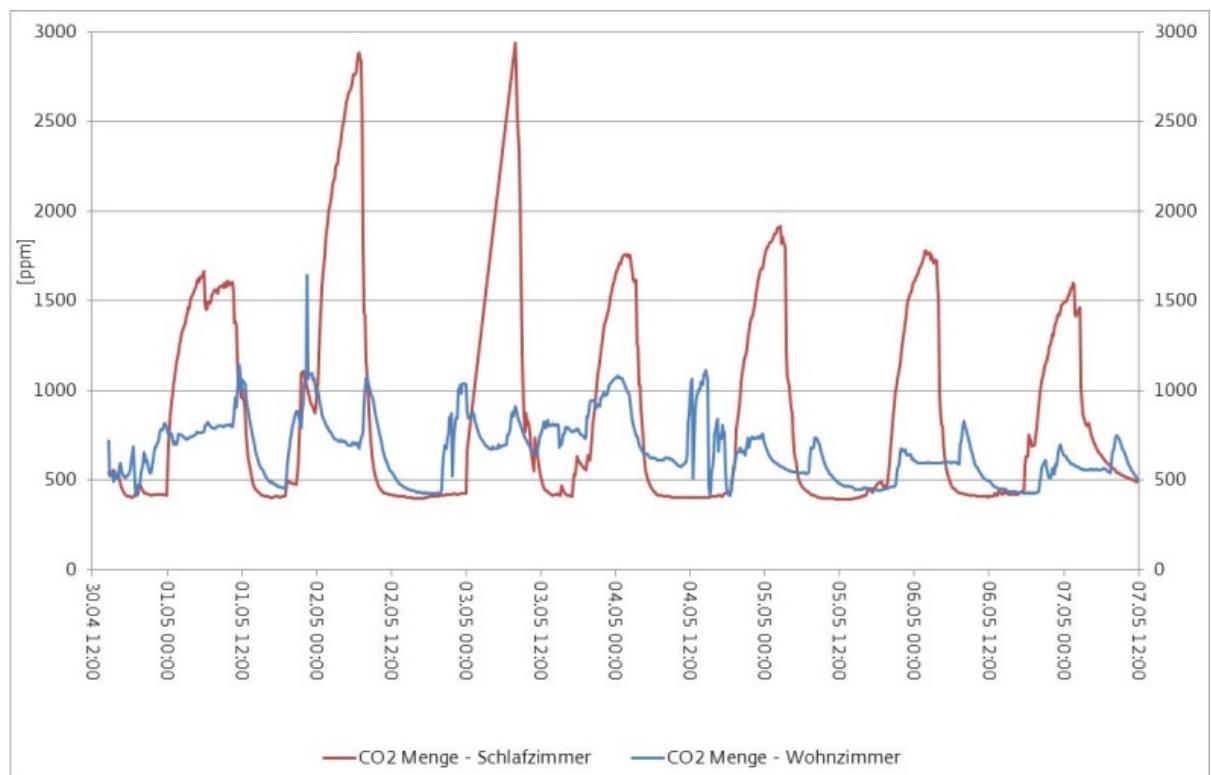


Abb. 90 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 6

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wohnzimmer bewegt sich zwischen 400 und 1100 ppm. Im Schlafzimmer treten dagegen jede Nacht sehr hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration auf. Die Bewohner hatten den Aussenluftdurchlass zugeklebt. Um die Luftqualität zu verbessern empfiehlt sich den Aussenluftdurchlass wieder zu öffnen. Infolgedessen kann die Luftqualität im Schlafzimmer als „niedrig“ (Klasse: RAL 4) bezeichnet werden. Im Wohnzimmer kann die Raumluftqualität als „mässig“ (Klasse: RAL 3) bezeichnet werden.

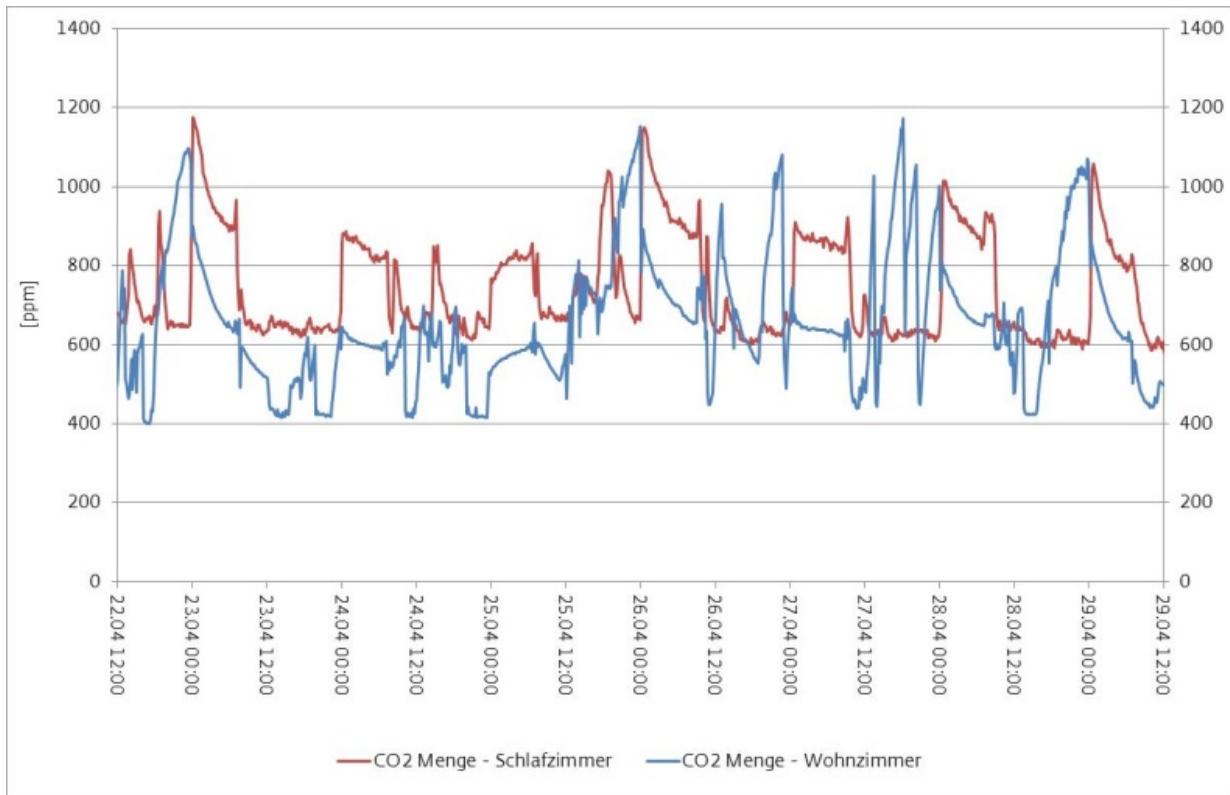


Abb. 91 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 7

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 1200 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze im Schlafzimmer liegt bei 1200 ppm. Insgesamt kann die Raumluftqualität als „niedrig“ (Klasse: RAL 4) bezeichnet werden.

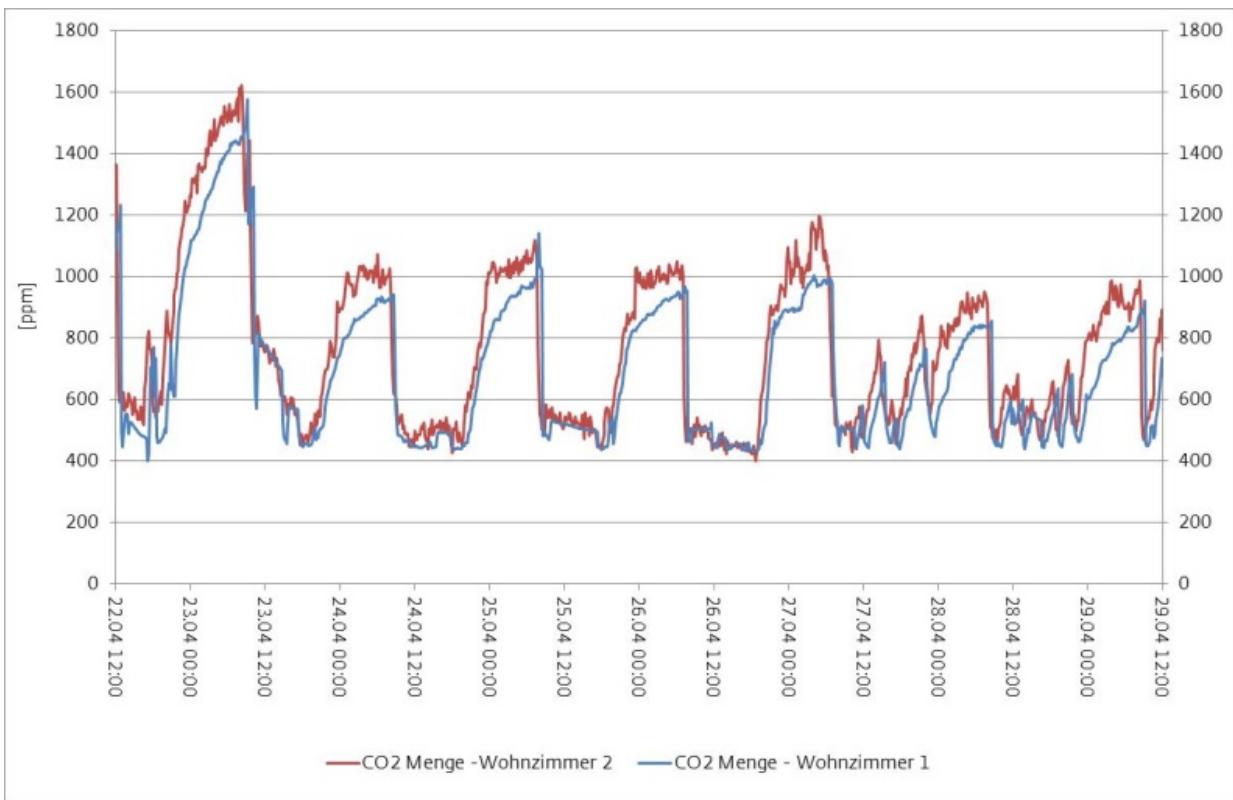


Abb. 92 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 8

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 1600 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1600 ppm. Insgesamt kann die Raumluftqualität als „niedrig“ (Klasse: RAL 4) bezeichnet werden.

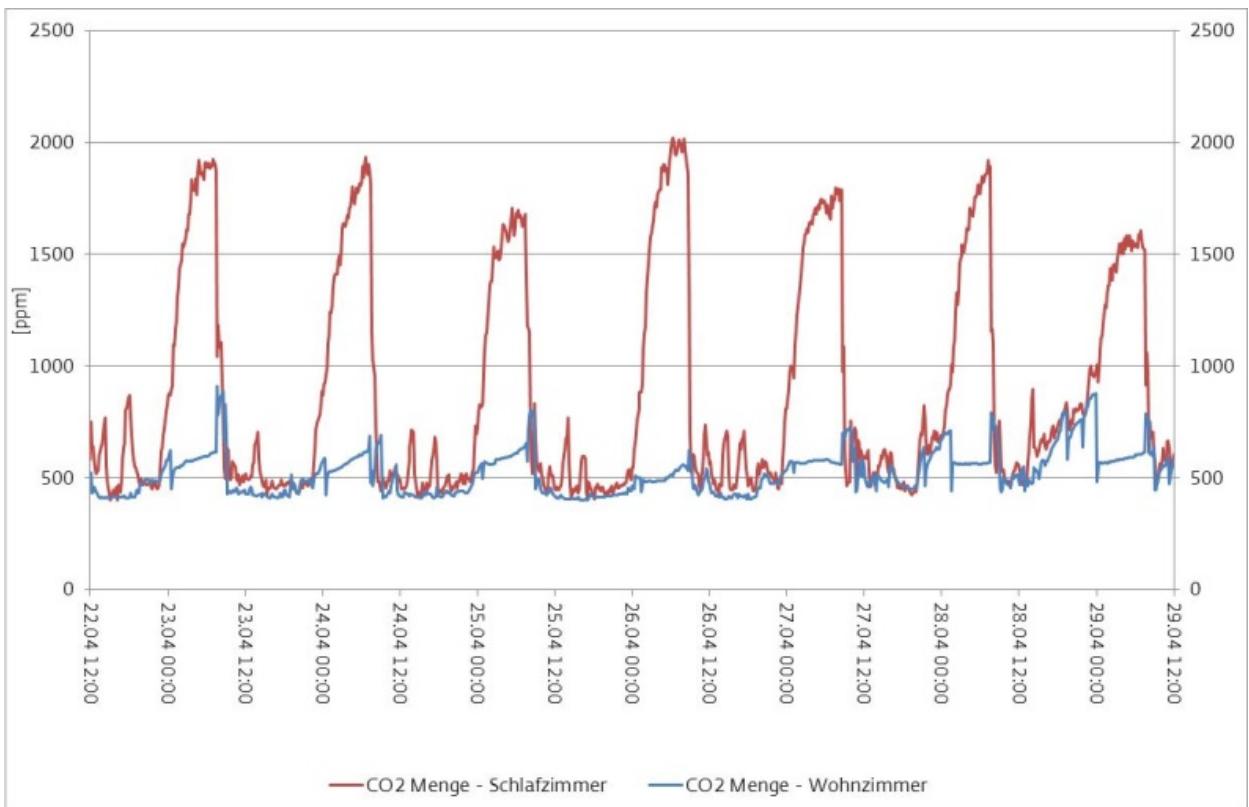


Abb. 93 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 9

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 2000 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 2000 ppm im Schlafzimmer. Insgesamt kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ (Klasse: RAL2) bezeichnet werden. Die Raumluftqualität im Schlafzimmer ist dagegen „niedrig“ (RAL 4).

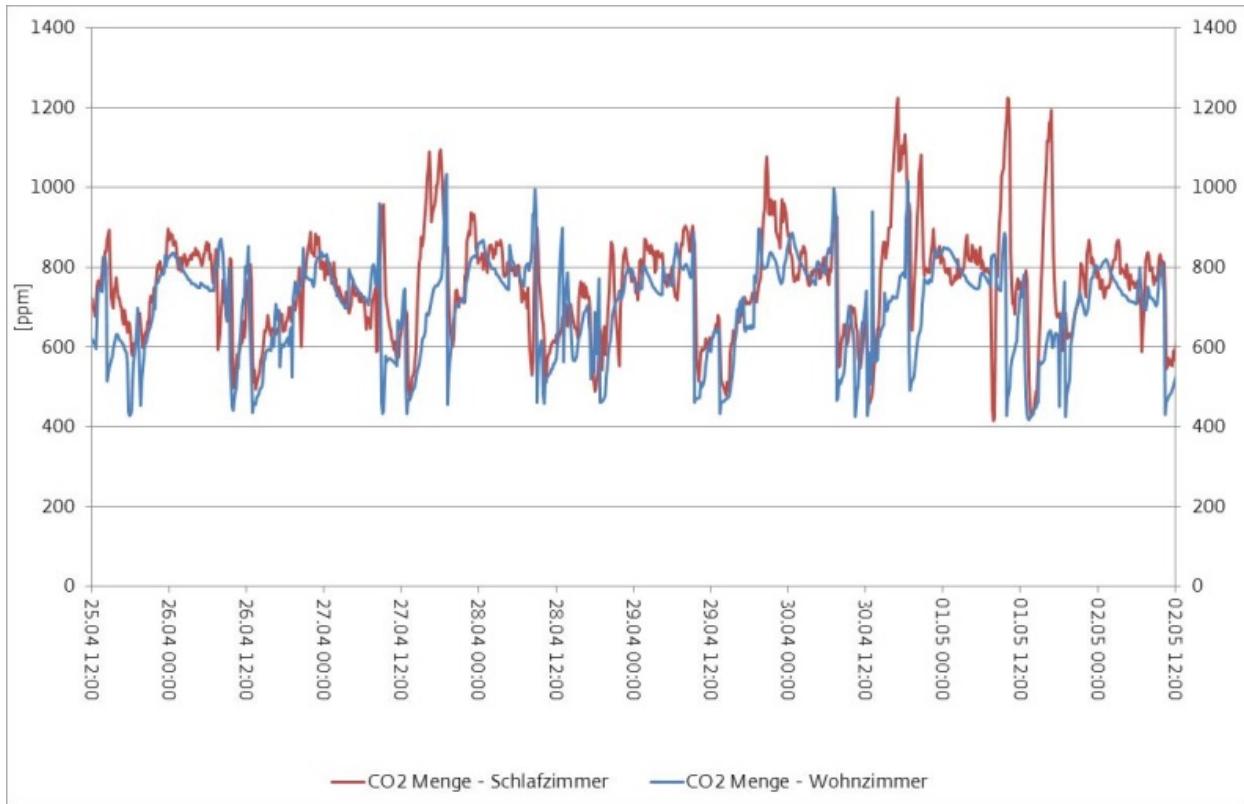


Abb. 94 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 10

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 1200 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1200 ppm im Schlafzimmer. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden. Die Raumluftqualität im Schlafzimmer kann als „mässig“ (RAL 3) bezeichnet werden.

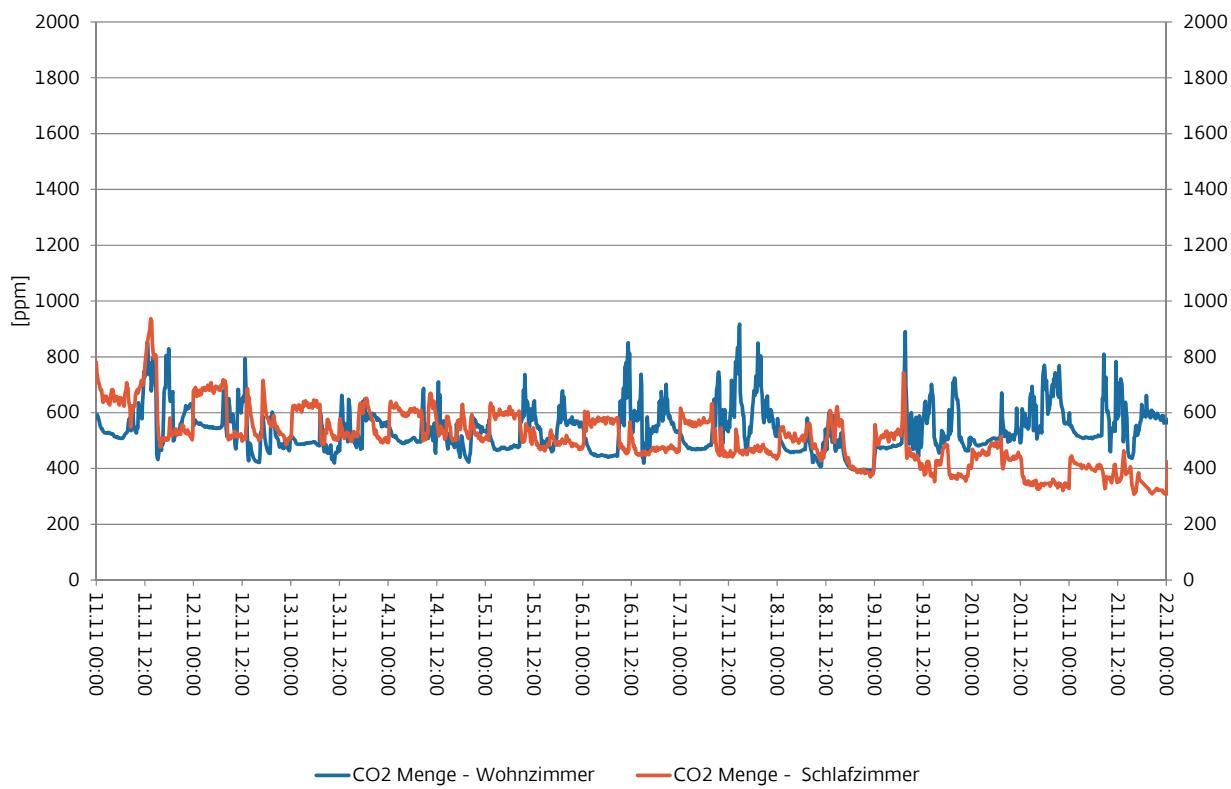


Abb. 95 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 11

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 900 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 900 ppm im Schlafzimmer. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Schlaf- und Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden.

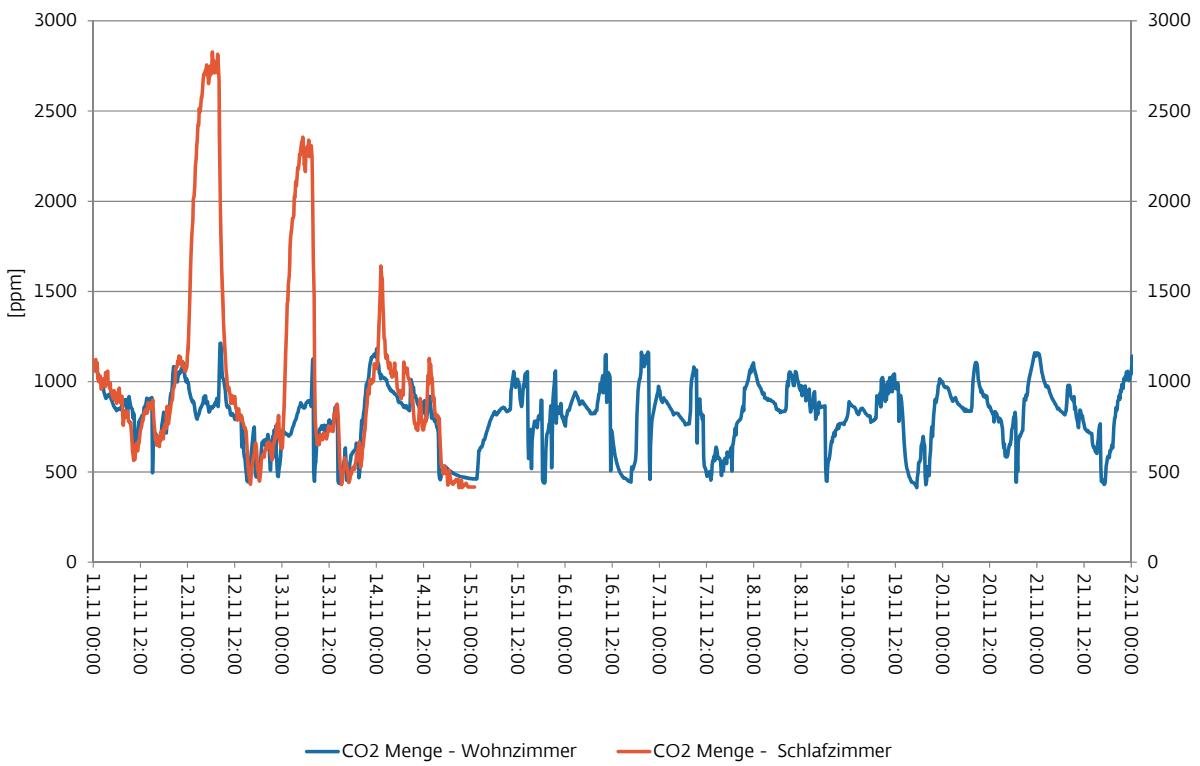


Abb. 96 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 12

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 500 und 2'800 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 2'800 ppm im Schlafzimmer. Aufgrund der Kapazität der Batterie konnte im Schlafzimmer

leider nicht länger gemessen werden. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „mässig“.

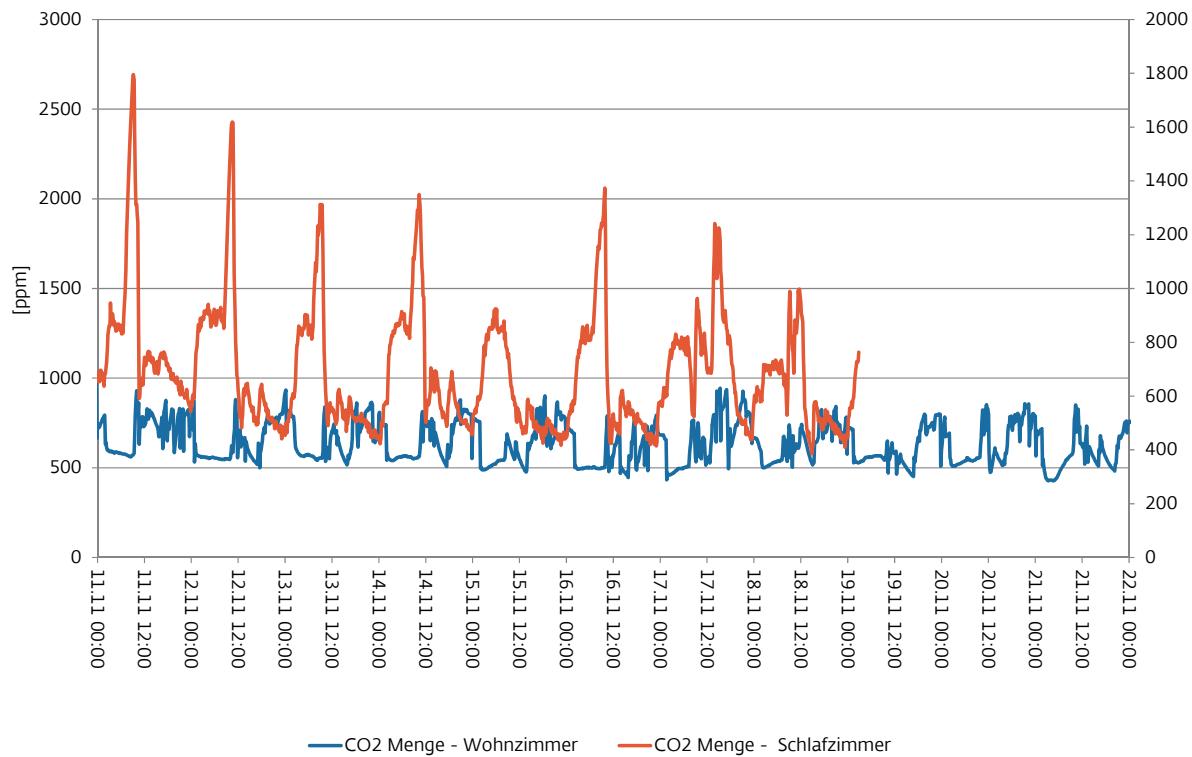


Abb. 97 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 13

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 490 und 2'700 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 2'700 ppm im Schlafzimmer. Aufgrund der Kapazität der Batterie konnte im Schlafzimmer leider nicht länger als eine Woche gemessen werden. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „mässig“.

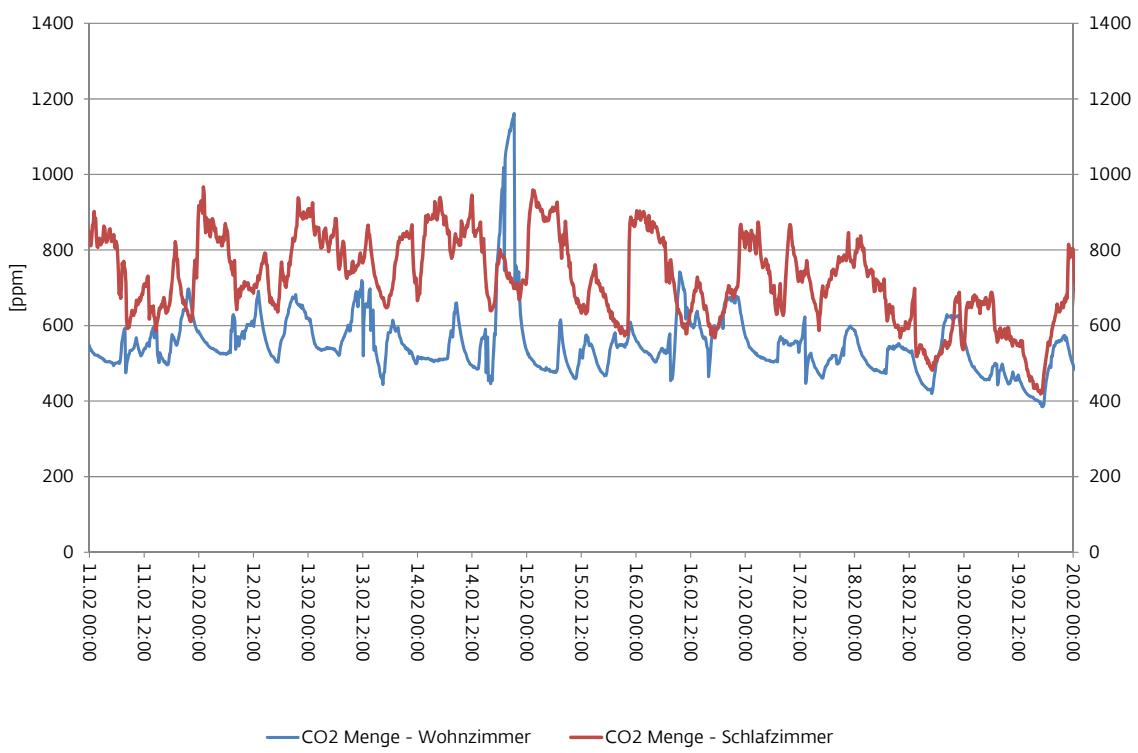


Abb. 98 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 14

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 250 und 1'200 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'200 ppm im Wohnzimmer. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „sehr gut“. Die Sanierung zeigte für diese Wohnung eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität.

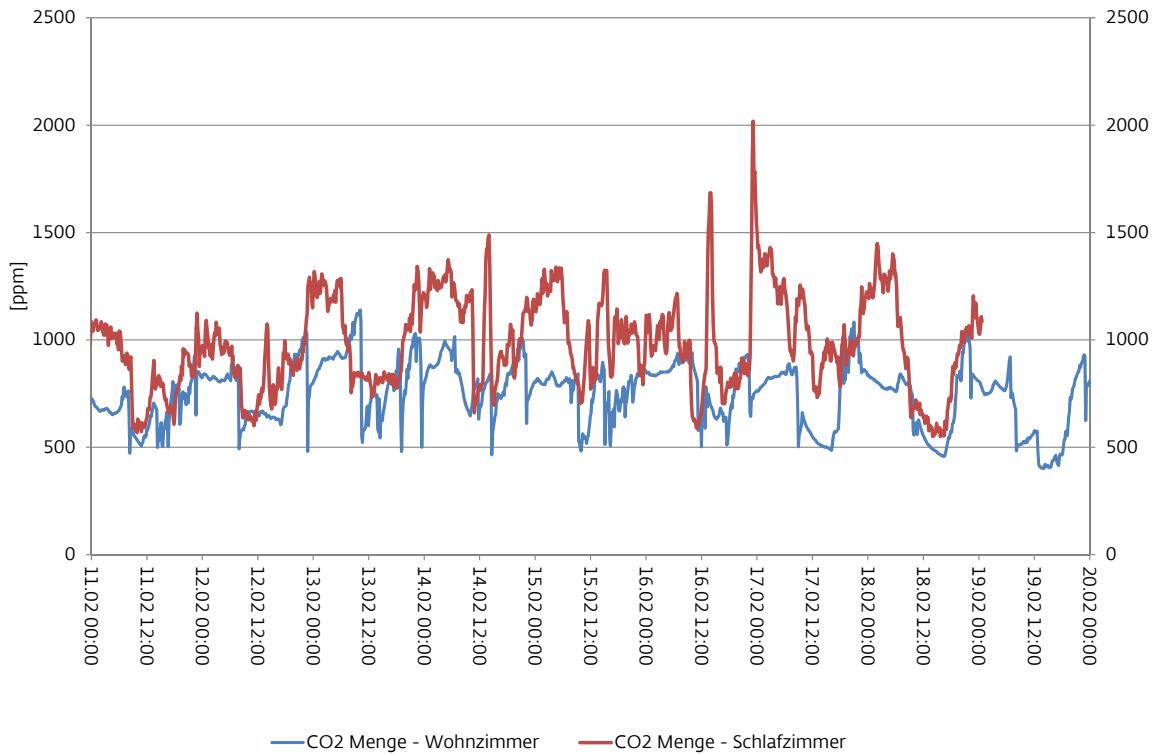


Abb. 99 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 15

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 375 und 2'018 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 2'018 ppm im Schlafzimmer. Aufgrund der Kapazität der Batterie konnte im Schlafzimmer leider nicht länger gemessen werden. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „mässig“.

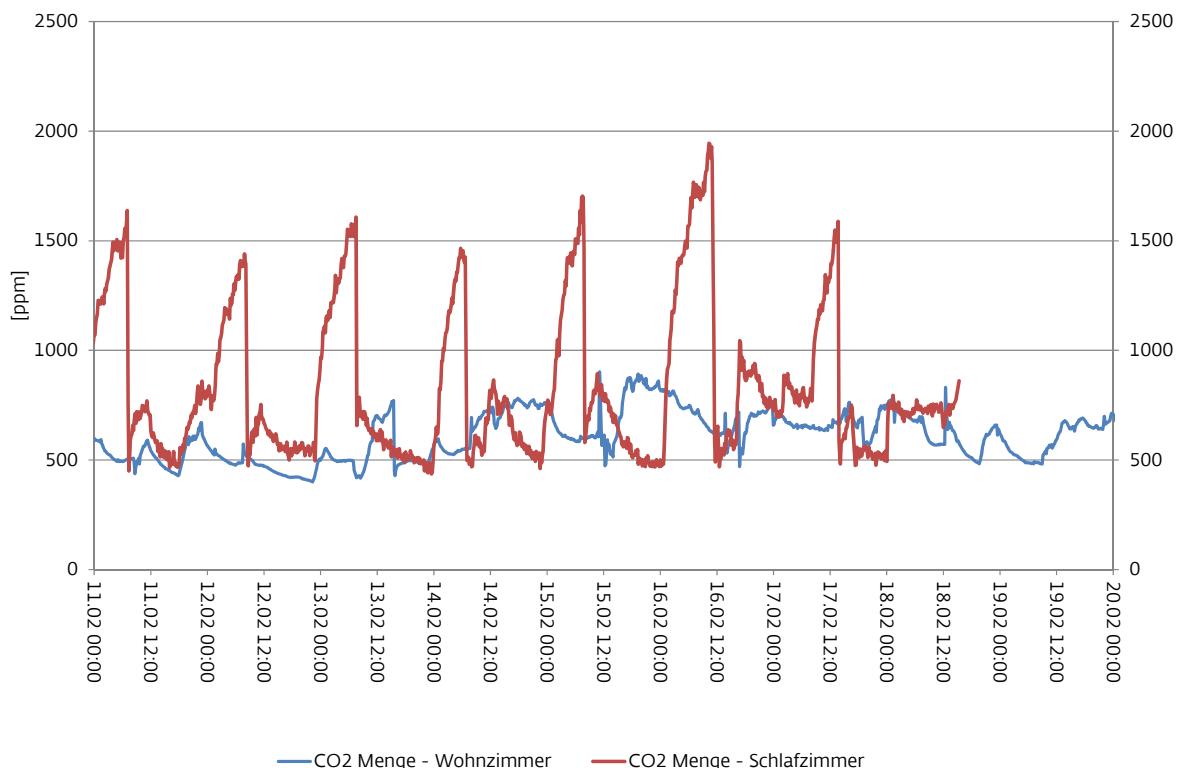


Abb. 100 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 16

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 1'944 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'944 ppm im Schlafzimmer und wird Mitte bis Ende Vormittag erreicht. Aufgrund der Kapazität der Batterie konnte im Schlafzimmer leider nicht länger gemessen werden. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „mässig“.

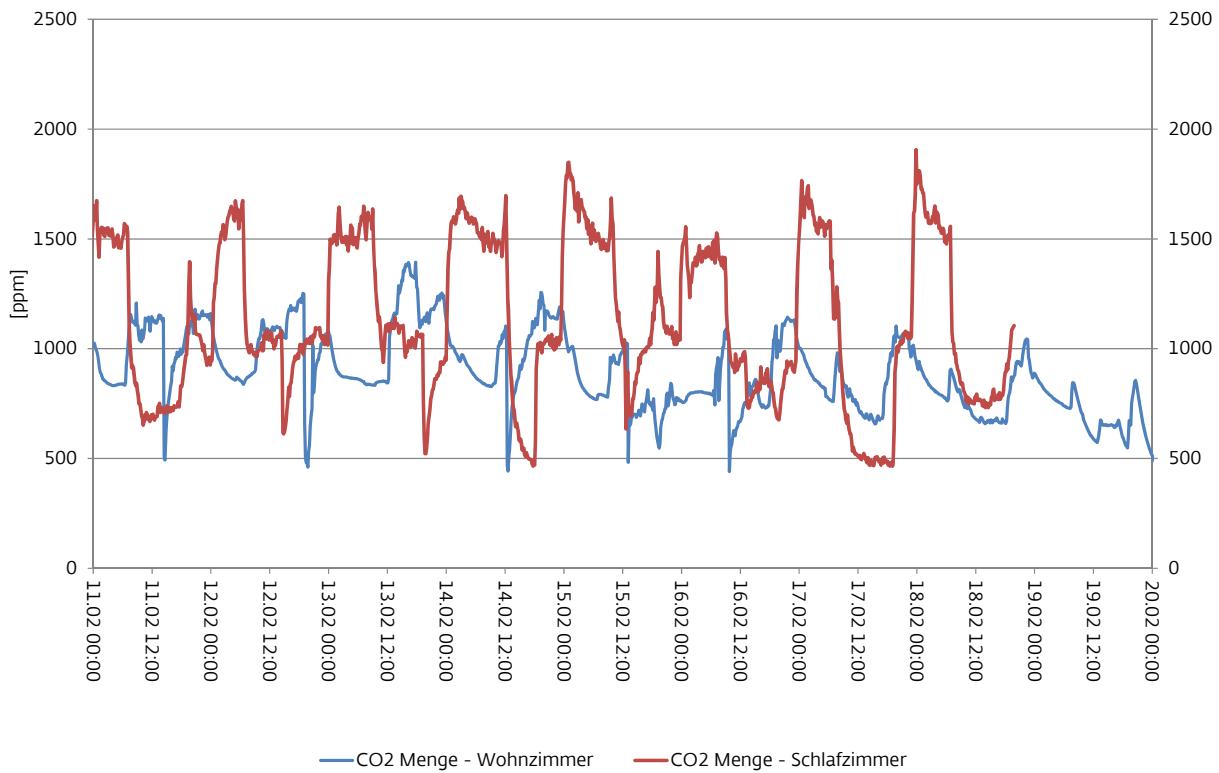


Abb. 101 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 17

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 366 und 1'906 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'906 ppm im Schlafzimmer und wird nachtsüber erreicht. Der Aussenluftdurchlass im Schlafzimmer wird durch die Bewohner zugeklebt. Die Thermographieaufnahme zeigt starke Infiltrationen im Schlafzimmer im Bereich des Störenkastens (siehe Tab. 19).

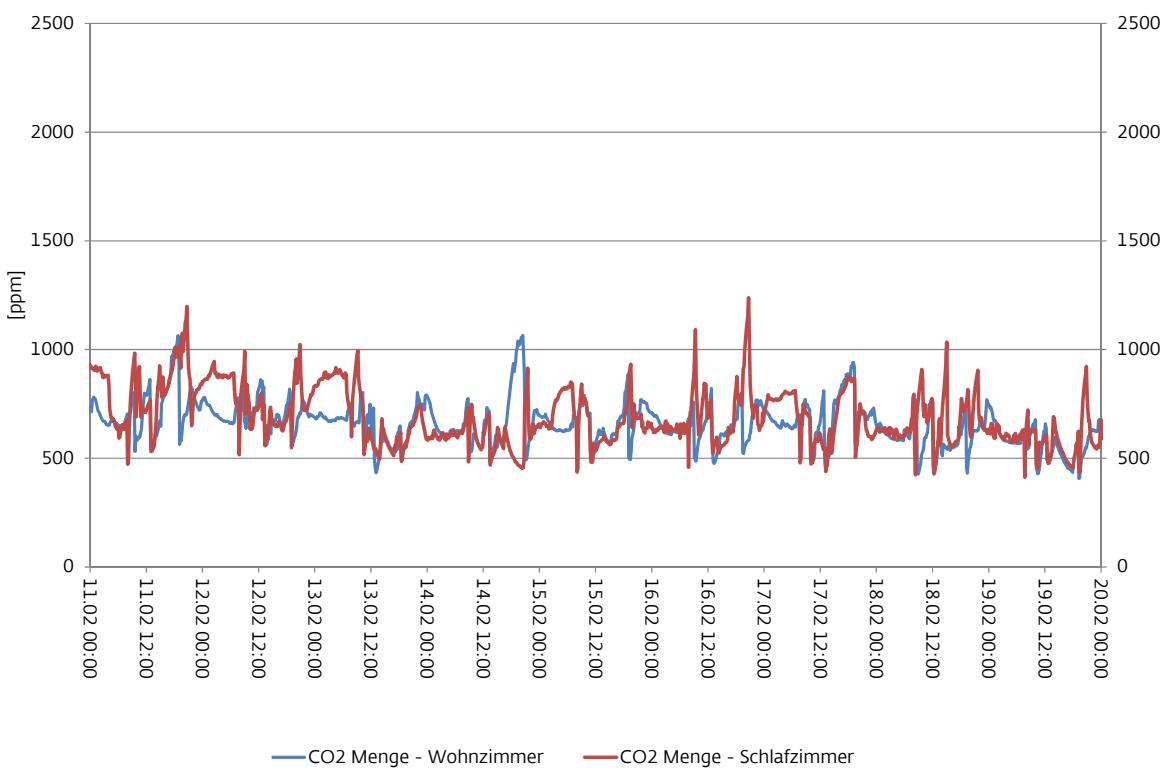


Abb. 102 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 18

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 390 und 1'240 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'240 ppm im Schlafzimmer. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „gut“. Die Sanierung zeigte für diese Wohnung eine Verbesserung der Raumluftqualität.

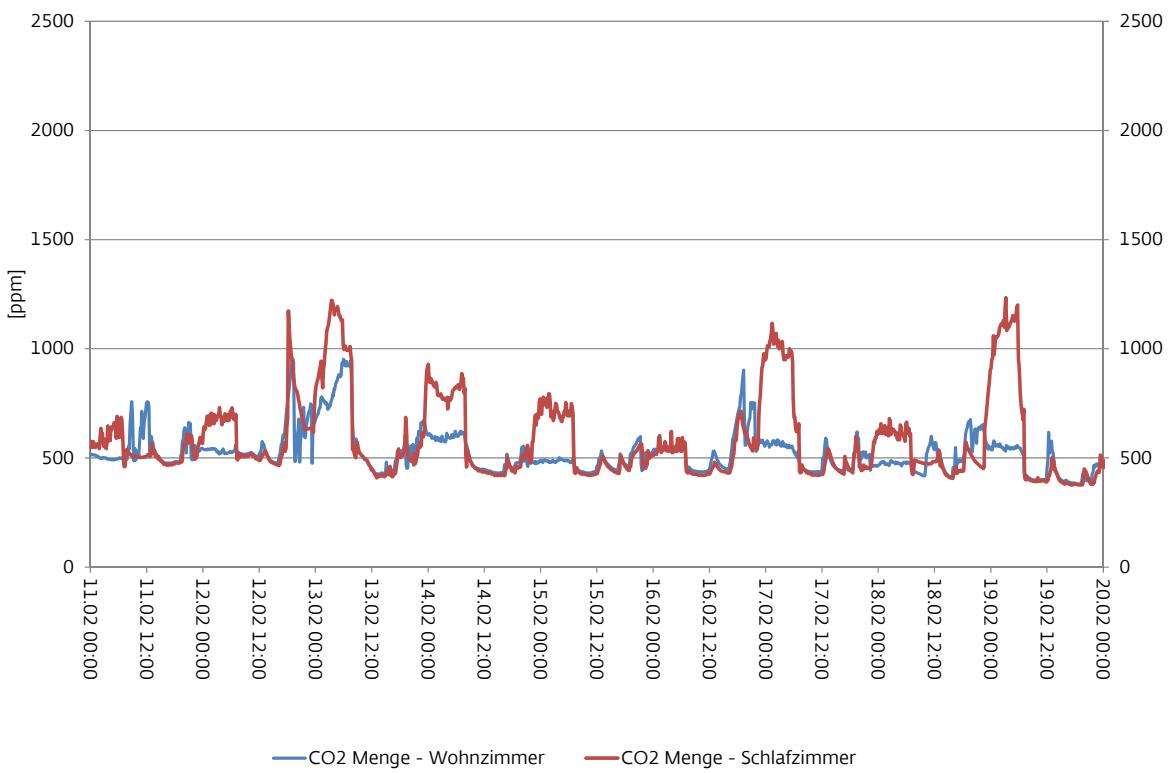


Abb. 103 : CO<sub>2</sub>-Konzentration - Wohnung 19

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegt sich zwischen 366 und 1'491 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'491 ppm im Schlafzimmer und wird nachtsüber erreicht. Im Ganzen kann die Raumluftqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „mässig“.

## 11.5 Messwerte Statistik

Tab. 15: Zusammenstellung der gemessenen Raumlufttemperatur (°C)

| Wohnung                           | Median (°C) | Oberes Quantil (°C) | Maximum (°C) | Minimum (°C) | Unteres Quantil (°C) | Normative Anforderung gemäss SIA 2024 |
|-----------------------------------|-------------|---------------------|--------------|--------------|----------------------|---------------------------------------|
| <b>Saniert – Messperiode I</b>    |             |                     |              |              |                      |                                       |
| 1-SZ                              | 20          | 20                  | 21           | 19           | 20                   | zu kalt                               |
| 1-WZ                              | 21          | 21                  | 22           | 18           | 20                   | Komfortbereich                        |
| 2-SZ                              | 22          | 24                  | 25           | 18           | 20                   | Komfortbereich                        |
| 2-WZ                              | 22          | 24                  | 25           | 15           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 3-SZ                              | 24          | 24                  | 24           | 22           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 3-WZ                              | 23          | 24                  | 25           | 19           | 22                   | Komfortbereich                        |
| 4-SZ                              | 22          | 23                  | 23           | 18           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 4-WZ                              | 23          | 23                  | 25           | 16           | 22                   | Komfortbereich                        |
| 5-SZ                              | 24          | 24                  | 25           | 20           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 6-SZ                              | 19          | 19                  | 20           | 16           | 18                   | zu kalt                               |
| 6-WZ                              | 22          | 23                  | 24           | 18           | 22                   | Komfortbereich                        |
| <b>Unsaniert – Messperiode II</b> |             |                     |              |              |                      |                                       |
| 7-SZ                              | 23          | 23                  | 24           | 21           | 22                   | Komfortbereich                        |
| 7-WZ                              | 24          | 25                  | 27           | 16           | 22                   | Komfortbereich, tendenziell überheizt |
| 8-WZ1                             | 21          | 22                  | 22           | 15           | 19                   | Komfortbereich                        |
| 8-WZ2                             | 25          | 25                  | 26           | 21           | 24                   | Komfortbereich, tendenziell überheizt |
| 9-SZ                              | 22          | 22                  | 23           | 21           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 9-WZ                              | 22          | 23                  | 26           | 13           | 20                   | Komfortbereich                        |
| 10-SZ                             | 23          | 24                  | 24           | 22           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 10-WZ                             | 24          | 25                  | 29           | 19           | 23                   | Komfortbereich, tendenziell überheizt |
| <b>Saniert – Messperiode III</b>  |             |                     |              |              |                      |                                       |
| 11-SZ                             | 21          | 22                  | 23           | 20           | 20                   | Komfortbereich                        |
| 11-WZ                             | 23          | 23                  | 24           | 21           | 22                   | Komfortbereich                        |
| 12-SZ                             | 22          | 22                  | 23           | 21           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 12-WZ                             | 22          | 22                  | 23           | 14           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 13-SZ                             | 23          | 24                  | 24           | 21           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 13-WZ                             | 24          | 24                  | 25           | 23           | 24                   | Komfortbereich                        |
| <b>Saniert – Messperiode IV</b>   |             |                     |              |              |                      |                                       |
| 14-SZ                             | 20          | 20                  | 21           | 18           | 19                   | zu kalt                               |
| 14-WZ                             | 23          | 24                  | 24           | 19           | 22                   | Komfortbereich                        |
| 15-SZ                             | 22          | 22                  | 22           | 21           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 15-WZ                             | 24          | 24                  | 25           | 20           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 16-SZ                             | 22          | 22                  | 22           | 16           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 16-WZ                             | 23          | 23                  | 24           | 19           | 22                   | Komfortbereich                        |
| 17-SZ                             | 22          | 23                  | 23           | 20           | 21                   | Komfortbereich                        |
| 17-WZ                             | 23          | 24                  | 25           | 15           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 18-SZ                             | 23          | 24                  | 24           | 22           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 18-WZ                             | 24          | 25                  | 29           | 19           | 23                   | Komfortbereich                        |
| 19-SZ                             | 19          | 20                  | 21           | 11           | 17                   | zu kalt                               |
| 19-WZ                             | 22          | 23                  | 26           | 17           | 21                   | Komfortbereich                        |

Tab. 16: Zusammenstellung der Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit (r.F. %)

| Wohnung                           | Median<br>(r.F. %) | Oberes<br>Quantil (r.F.<br>%) | Maximum<br>(r.F. %) | Minimum<br>(r.F. %) | Unteres Quantil<br>(r.F. %) | Normative Anforderung gemäss SIA 180 |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| <b>Saniert – Messperiode I</b>    |                    |                               |                     |                     |                             |                                      |
| 1-SZ                              | 37                 | 43                            | 46                  | 32                  | 34                          | erfüllt                              |
| 1-WZ                              | 44                 | 51                            | 56                  | 31                  | 39                          | erfüllt                              |
| 2-SZ                              | 31                 | 34                            | 38                  | 26                  | 28                          | nicht erfüllt                        |
| 2-WZ                              | 29                 | 41                            | 47                  | 20                  | 24                          | nicht erfüllt                        |
| 3-SZ                              | 34                 | 36                            | 39                  | 29                  | 31                          | erfüllt                              |
| 3-WZ                              | 32                 | 42                            | 50                  | 19                  | 27                          | nicht erfüllt                        |
| 4-SZ                              | 32                 | 42                            | 51                  | 21                  | 28                          | nicht erfüllt                        |
| 4-WZ                              | 32                 | 42                            | 46                  | 20                  | 28                          | nicht erfüllt                        |
| 5-SZ                              | 30                 | 40                            | 53                  | 20                  | 26                          | nicht erfüllt                        |
| 6-SZ                              | 56                 | 62                            | 72                  | 40                  | 46                          | erfüllt                              |
| 6-WZ                              | 44                 | 49                            | 65                  | 27                  | 39                          | erfüllt                              |
| <b>Unsaniert – Messperiode II</b> |                    |                               |                     |                     |                             |                                      |
| 7-SZ                              | 42                 | 46                            | 51                  | 35                  | 38                          | erfüllt                              |
| 7-WZ                              | 40                 | 44                            | 64                  | 21                  | 34                          | erfüllt                              |
| 8-WZ1                             | 49                 | 55                            | 63                  | 32                  | 43                          | erfüllt                              |
| 8-WZ2                             | 42                 | 46                            | 58                  | 35                  | 39                          | erfüllt                              |
| 9-SZ                              | 45                 | 50                            | 62                  | 39                  | 41                          | erfüllt                              |
| 9-WZ                              | 41                 | 46                            | 60                  | 29                  | 36                          | erfüllt                              |
| 10-SZ                             | 45                 | 47                            | 53                  | 42                  | 43                          | erfüllt                              |
| 10-WZ                             | 41                 | 45                            | 60                  | 23                  | 34                          | erfüllt                              |
| <b>Saniert – Messperiode III</b>  |                    |                               |                     |                     |                             |                                      |
| 11-SZ                             | 43                 | 48                            | 56                  | 36                  | 40                          | erfüllt                              |
| 11-WZ                             | 38                 | 43                            | 53                  | 31                  | 34                          | erfüllt                              |
| 12-SZ                             | 58                 | 59                            | 60                  | 53                  | 55                          | erfüllt                              |
| 12-WZ                             | 50                 | 56                            | 69                  | 36                  | 45                          | erfüllt                              |
| 13-SZ                             | 44                 | 47                            | 53                  | 39                  | 41                          | erfüllt                              |
| 13-WZ                             | 40                 | 44                            | 53                  | 32                  | 36                          | erfüllt                              |
| <b>Saniert – Messperiode IV</b>   |                    |                               |                     |                     |                             |                                      |
| 14-SZ                             | 37                 | 41                            | 45                  | 27                  | 32                          | erfüllt                              |
| 14-WZ                             | n. m.              | n. m.                         | n. m.               | n. m.               | n. m.                       | n. m.                                |
| 15-SZ                             | 41                 | 49                            | 53                  | 32                  | 35                          | erfüllt                              |
| 15-WZ                             | 33                 | 40                            | 46                  | 16                  | 26                          | erfüllt                              |
| 16-SZ                             | 33                 | 36                            | 40                  | 27                  | 31                          | erfüllt                              |
| 16-WZ                             | n. m.              | n. m.                         | n. m.               | n. m.               | n. m.                       | n. m.                                |
| 17-SZ                             | 37                 | 41                            | 55                  | 31                  | 34                          | erfüllt                              |
| 17-WZ                             | 29                 | 34                            | 44                  | 15                  | 26                          | nicht erfüllt                        |
| 18-SZ                             | 45                 | 47                            | 53                  | 42                  | 43                          | erfüllt                              |
| 18-WZ                             | 41                 | 45                            | 60                  | 23                  | 34                          | erfüllt                              |
| 19-SZ                             | 43                 | 65                            | 80                  | 23                  | 32                          | erfüllt                              |
| 19-WZ                             | 32                 | 37                            | 51                  | 17                  | 27                          | erfüllt                              |

Tab. 17 Zusammenstellung der Messwerte für die CO<sub>2</sub>-Konzentration (ppm)

| Wohnung                           | Median<br>(ppm) | Oberes<br>Quantil<br>(ppm) | Maximum<br>(ppm) | Minimum<br>(ppm) | Unteres<br>Quantil<br>(ppm) | RAL-Klasse nach SIA 382/1 |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| <b>Saniert – Messperiode I</b>    |                 |                            |                  |                  |                             |                           |
| 1-SZ                              | 663             | 775                        | 916              | 400              | 515                         | RAL-2                     |
| 1-WZ                              | 675             | 803                        | 1036             | 503              | 610                         | RAL-3                     |
| 2-SZ                              | 522             | 807                        | 2039             | 399              | 455                         | RAL-4                     |
| 2-WZ                              | 512             | 573                        | 820              | 400              | 463                         | RAL-2                     |
| 3-SZ                              | 747             | 1097                       | 1685             | 509              | 592                         | RAL-4                     |
| 3-WZ                              | 695             | 986                        | 1235             | 500              | 568                         | RAL-3                     |
| 4-SZ                              | 619             | 745                        | 957              | 400              | 441                         | RAL-3                     |
| 4-WZ                              | 597             | 717                        | 970              | 400              | 438                         | RAL-3                     |
| 5-SZ                              | 657             | 757                        | 1083             | 400              | 430                         | RAL-3                     |
| 6-SZ                              | 497             | 1610                       | 2941             | 392              | 405                         | RAL-4                     |
| 6-WZ                              | 598             | 818                        | 1643             | 399              | 440                         | RAL-4                     |
| <b>Unsaniert – Messperiode II</b> |                 |                            |                  |                  |                             |                           |
| 7-SZ                              | 667             | 911                        | 1176             | 400              | 551                         | RAL-3                     |
| 7-WZ                              | 649             | 960                        | 1547             | 400              | 465                         | RAL-4                     |
| 8-WZ1                             | 646             | 953                        | 1577             | 400              | 454                         | RAL-4                     |
| 8-WZ2                             | 736             | 1201                       | 1622             | 400              | 485                         | RAL-4                     |
| 9-SZ                              | 661             | 1703                       | 2021             | 400              | 459                         | RAL-4                     |
| 9-WZ                              | 529             | 725                        | 1044             | 400              | 416                         | RAL-3                     |
| 10-SZ                             | 760             | 890                        | 1224             | 415              | 595                         | RAL-3                     |
| 10-WZ                             | 715             | 819                        | 1034             | 417              | 494                         | RAL-3                     |
| <b>Saniert – Messperiode III</b>  |                 |                            |                  |                  |                             |                           |
| 11-SZ                             | 520             | 663                        | 951              | 326              | 428                         | RAL-2                     |
| 11-WZ                             | 534             | 658                        | 917              | 365              | 461                         | RAL-2                     |
| 12-SZ                             | 890             | 2173                       | 2827             | 430              | 593                         | RAL-4                     |
| 12-WZ                             | 848             | 1048                       | 1294             | 414              | 523                         | RAL-3                     |
| 13-SZ                             | 648             | 926                        | 1795             | 386              | 473                         | RAL-4                     |
| 13-WZ                             | 631             | 824                        | 1016             | 428              | 505                         | RAL-3                     |
| <b>Saniert – Messperiode IV</b>   |                 |                            |                  |                  |                             |                           |
| 14-SZ                             | 705             | 872                        | 1030             | 248              | 543                         | RAL-3                     |
| 14-WZ                             | 523             | 617                        | 1161             | 380              | 437                         | RAL-3                     |
| 15-SZ                             | 963             | 1272                       | 2018             | 550              | 679                         | RAL-4                     |
| 15-WZ                             | 774             | 919                        | 1139             | 375              | 529                         | RAL-3                     |
| 16-SZ                             | 725             | 1415                       | 1944             | 436              | 512                         | RAL-4                     |
| 16-WZ                             | 573             | 721                        | 902              | 398              | 467                         | RAL-2                     |
| 17-SZ                             | 1057            | 1592                       | 1906             | 465              | 694                         | RAL-4                     |
| 17-WZ                             | 852             | 1128                       | 1412             | 366              | 671                         | RAL-4                     |
| 18-SZ                             | 643             | 865                        | 1238             | 389              | 550                         | RAL-3                     |
| 18-WZ                             | 634             | 765                        | 1143             | 372              | 530                         | RAL-3                     |
| 19-SZ                             | 513             | 961                        | 1491             | 366              | 420                         | RAL-4                     |
| 19-WZ                             | 489             | 659                        | 954              | 372              | 411                         | RAL-2                     |

# 12 Messeinrichtungen

## 12.1.1 Messeinrichtung Raumluftqualität

Tab. 18: Technische Eigenschaften des CO<sub>2</sub>-Datenloggers (mit Batterie)

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Hersteller                | MOSWAY   |
| Messgrösse                | Temperatur, relative Feuchtigkeit, CO <sub>2</sub> |
| Messung CO <sub>2</sub>   | 0 – 5'000 ppm / Genauigkeit 5% vom Messwert        |
| Messung Temperatur        | 0 – 50 °C / Genauigkeit +/- 0.5 °C                 |
| Messung rel. Feuchtigkeit | 0 – 99 % rel. Feuchte / Genauigkeit ±3.5%          |
| Intervall Messung         | 10 min   |

Tab. 19: Technische Eigenschaften des CO<sub>2</sub>-Datenloggers (ohne Batterie)

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Hersteller                | WOEHLER   |
| Messgrösse                | Temperatur, relative Feuchtigkeit, CO <sub>2</sub>          |
| Messung CO <sub>2</sub>   | 0 – 2'000 ppm / Genauigkeit +/- 500 ppm +/- 5% vom Messwert |
| Messung Temperatur        | -10 – 60 °C / Genauigkeit +/- 0.6 °C                        |
| Messung rel. Feuchtigkeit | 5 – 95 % rel. Feuchte / Genauigkeit ±3.0%                   |
| Intervall Messung         | 10 min  |

Mosway Temperatur-, Feuchtigkeits- und CO<sub>2</sub>-Daten-Logger mit Display



Wöhler CO<sub>2</sub>-, Temperatur- und Feuchtigkeits-Datenlogger mit Display



Abb. 104: CO<sub>2</sub>-Datenlogger

## 12.1.2 Messeinrichtung Luftmengenbilanz

Tab. 20: Luftvolumenstrom-Messgerät

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Hersteller               | TESTO                                   |
| Model                    | TESTO 417                               |
| Messgrösse               | Luftvolumenstrom, Luftgeschwindigkeit   |
| Messung Luftvolumenstrom | 0.1 m/s / Genauigkeit 1.5% vom Messwert |

Tab. 21: Drucksonde

|                        |  |
|------------------------|--|
| Hersteller             | TESTO                                  |
| Model                  | TESTO Drucksonde 0638.1345             |
| Messgrösse             | Druckdifferenz                         |
| Messung Druckdifferenz | 0.3 Pa / Genauigkeit 0.5% vom Messwert |

Luftvolumenstrom-Messgerät



Drucksonde



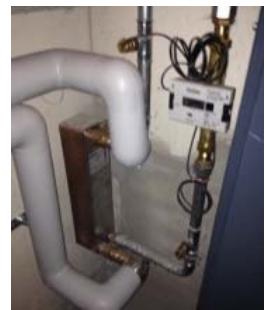
Abb. 105: Messeinrichtung Luftführung

### 12.1.3 Online-Messung in Unterstation Nr. 13 (netlogger)

Tab. 22: Beschreibung der Messinstallation für die Unterstation der Kirchgasse 13

| Bezeichnung                                   | Messgrösse / Technische Spezifikationen  | Übersicht   |
|---|--|---|
| Netlogger<br>Datenlogger mit Internet-Zugriff | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 8 Eingänge für Funk-Sensoren (8 bit, EnOcean für Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub>, Helligkeit, Energie, Leistung, Präsenz usw)</li> <li>- 1 Eingang für drahtgebundenen Temperatursensor (12 bit, für Pt1000)</li> <li>- 1 Eingang für drahtgebundenen Sensor 0..10 V (12 bit für Feuchte, CO<sub>2</sub> usw)</li> <li>- 10 Impulseingänge auf 24 V DC (zum Abgreifen potentialfreier Kontakte wie Energiezähler, Betriebsstundenzähler, Störmeldungen, Präsenzmelder usw)</li> </ul> |   |
| Abluft-<br>Wärmepumpe<br>Wärmezähler          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Energie (kWh)</li> <li>- Leistung (kW)</li> <li>- Vor-, Rücklauftemperatur (°C)</li> <li>- Durchfluss (m<sup>3</sup>/h)</li> </ul>  |  |
| Heizgruppe- und Fernwärme-<br>Wärmezähler     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Energie (kWh)</li> <li>- Leistung (kW)</li> <li>- Vor-, Rücklauftemperatur (°C)</li> <li>- Durchfluss (m<sup>3</sup>/h)</li> </ul>  |  |

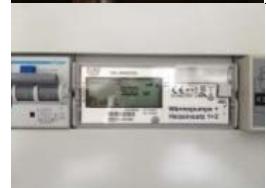
- Warmwasser      -    Energie (kWh)  
 Wärmezähler      -    Leistung (kW)  
                     -    Vor-, Rücklauftemperatur (°C)  
                     -    Durchfluss (m<sup>3</sup>/h)



- 
- Kaltwasserzähler    -    Durchfluss Frischwasser (m<sup>3</sup>/h)



- 
- Abluft-              -    Energie (kWh)  
 Wärmepumpe      -    Leistung (kW)  
 Elektrozähler      -    Spannung (V), Strom (A)



- 
- Ultraschall-           -    Wärmeleistung (kW)  
 Wärmezähler      -    Energie (kWh)  
 (Portable              -    Durchflussmenge (m<sup>3</sup>)  
 ultrasonic flow  
 meter  
 Typ:                HGLS-  
 2000P)

