



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, Wettswil a. Albis



Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech
Pilot- und Demonstrationsprogramm
CH-3003 Bern
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

Subventionsempfänger:

Lemon Consult AG
Sumatrastrasse 10
CH-8006 Zürich
www.lemonconsult.ch

Baugenossenschaft Rotach
Gertrudstrasse 69
8003 Zürich
www.rotach.ch

Autoren:

Valentin Muller, Lemon Consult AG, muller@lemonconsult.ch
Lara Carisch, Lemon Consult AG, carisch@lemonconsult.ch
Martin Ménard, Lemon Consult AG, menard@lemonconsult.ch

BFE-Programmleitung:

Yasmine Calisesi, Leiterin P+D-Programm, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung:

Marc Köhli, Stv. Leiter Forschungsprogramm Energie in Gebäuden, koehli@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/501022-01

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	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-Wärmepumpen.....	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 CO ₂ -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 Anlagenbeschreibung

Die Baugenossenschaft Rotach Zürich hat ihre Wohnsiedlung Dettenbühl in Wettswil 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.

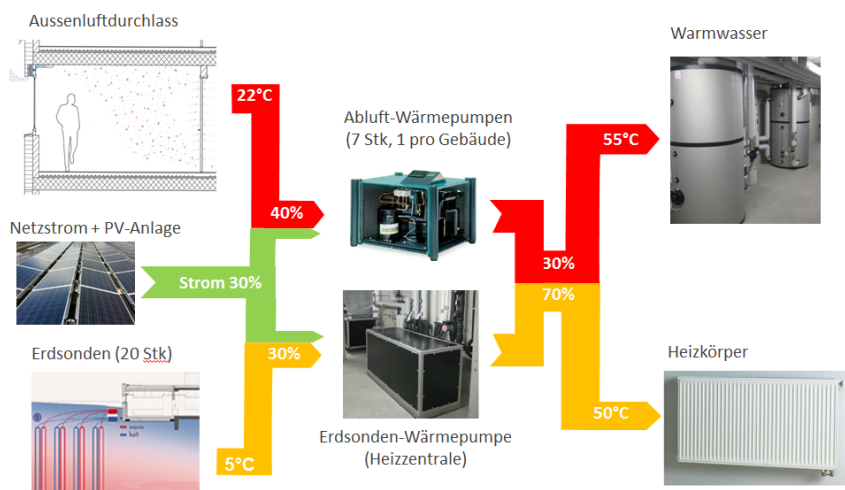


Abb. 1 : Schematische Darstellung des Energiekonzepts mit sieben dezentralen Abluft-Wärmepumpen und einer zentralen Erdsonden-Wärmepumpe

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 widerspiegelt. 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 m³/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 Zugerscheinungen 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/m², der Heizwärmeverbrauch bei 62 kWh/m². 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.

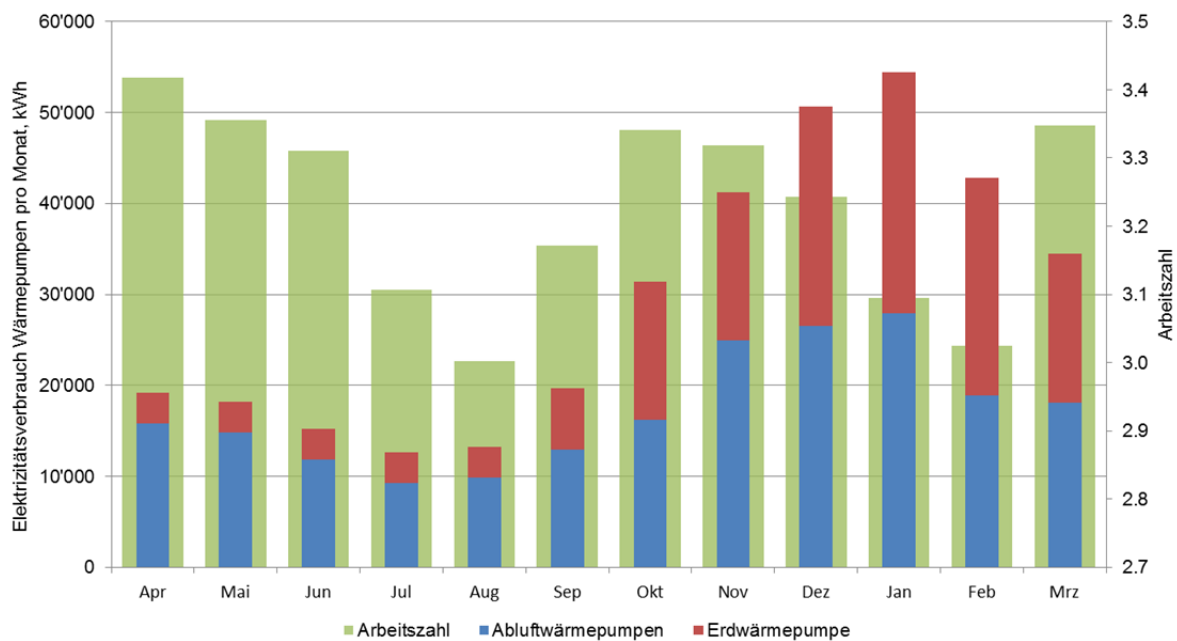


Abb. 2 : Monatlicher Anteil der Wärmeproduktion durch Abluft- und Erdsonden-Wärmepumpen sowie durchschnittliche Arbeitszahl pro Monat (Jahre 2015/2016).

Die gewichtete Energiekennzahl der Siedlung konnte durch den Ersatz des Ölkessels mit einer kombinierten Abluft-Erdsonden-Wärmepumpenanlage um gut 50 % auf 55 kWh/m² 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/m², 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 Ölkessels 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 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.

1.5.2 Abluft-Wärmepumpen

- Abluft-Wärmepumpen sind nicht nur platzsparend und preisgünstig sondern – sofern richtig dimensioniert - auch energieeffizienter als gemeinhin angenommen.
- Pro m³/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/m². Bei zentralen Zu-/Abluftanlagen in Mehrfamilienhäusern liegt er in der Regel bei 3 – 4 kWh/m².
- Der Minergie-Grenzwert-Modernisierung wird von beiden untersuchten Projekten im Betrieb eingehalten. Dies, obwohl die Gebäudehülle nur mässig bis gar nicht wärme gedämmt 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/m² 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 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 Neuauflage 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 Ölkessel 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 Ölkessel 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 m² 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.

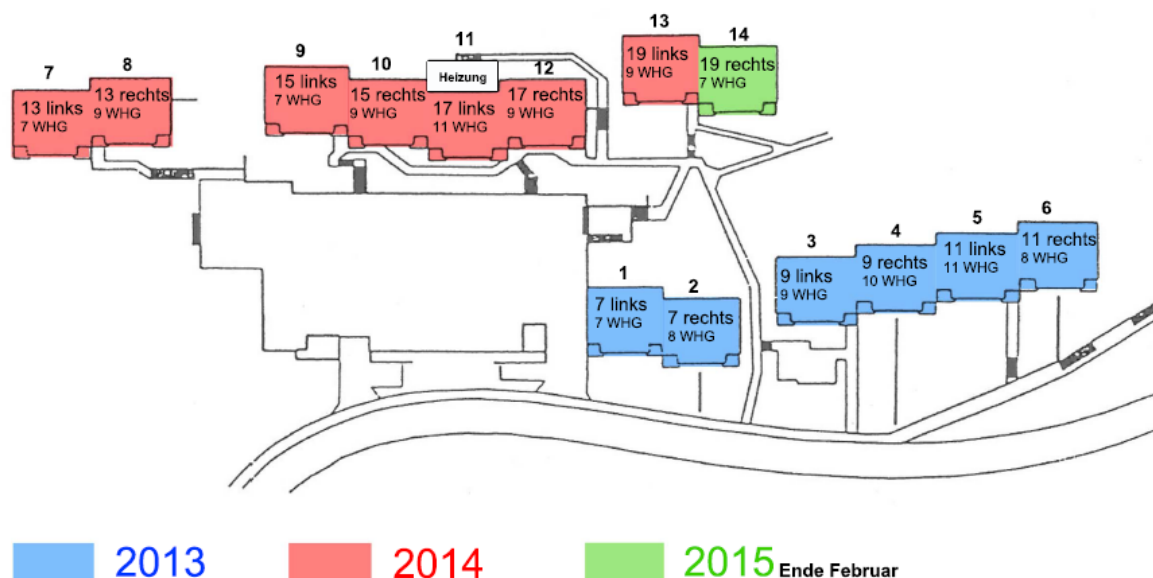


Abb. 3 : Abfolge der Erneuerungsmassnahmen

Tab. 1: Kennzahlen der sieben Mehrfamilienhäuser

Haus	Anzahl Wohnungen	Energiebezugsfläche (m ²)	Gebäudehüllzahl	Abluftvolumenstrom (m ³ /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
Total	121	12'716		13'600

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.

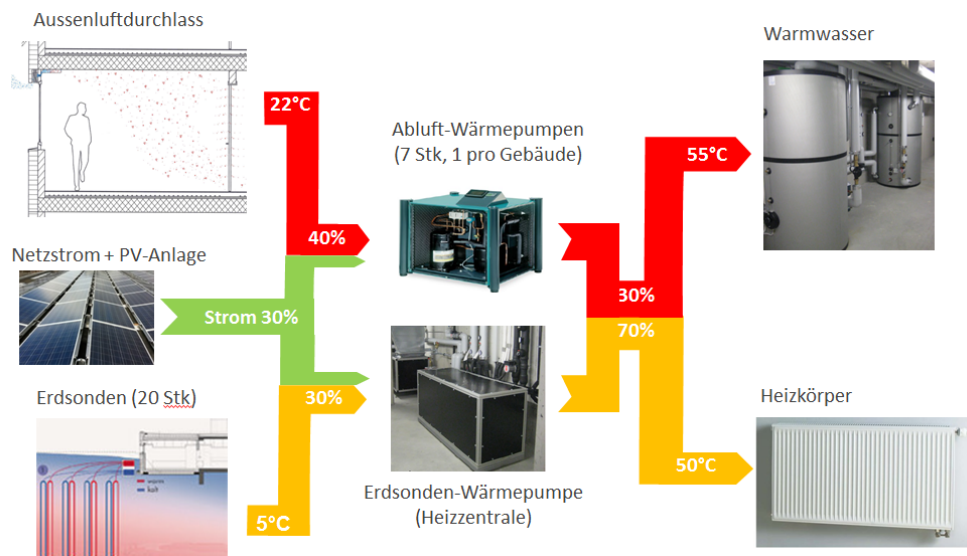


Abb. 4 : Energiekonzept



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 ²
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 Wärme- und Elektrozählern entsprechend aufwendig gewesen wäre, wurde die Wärmeproduktion 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 Energielogger der Firma Huber Energietechnik AG, welcher die Temperaturen, Energie- und Leistungsdaten der Zähler viertelstündlich speichert und auf einer Web-Plattform anzeigt. Der Energielogger wurde am 19.05.2014 installiert.

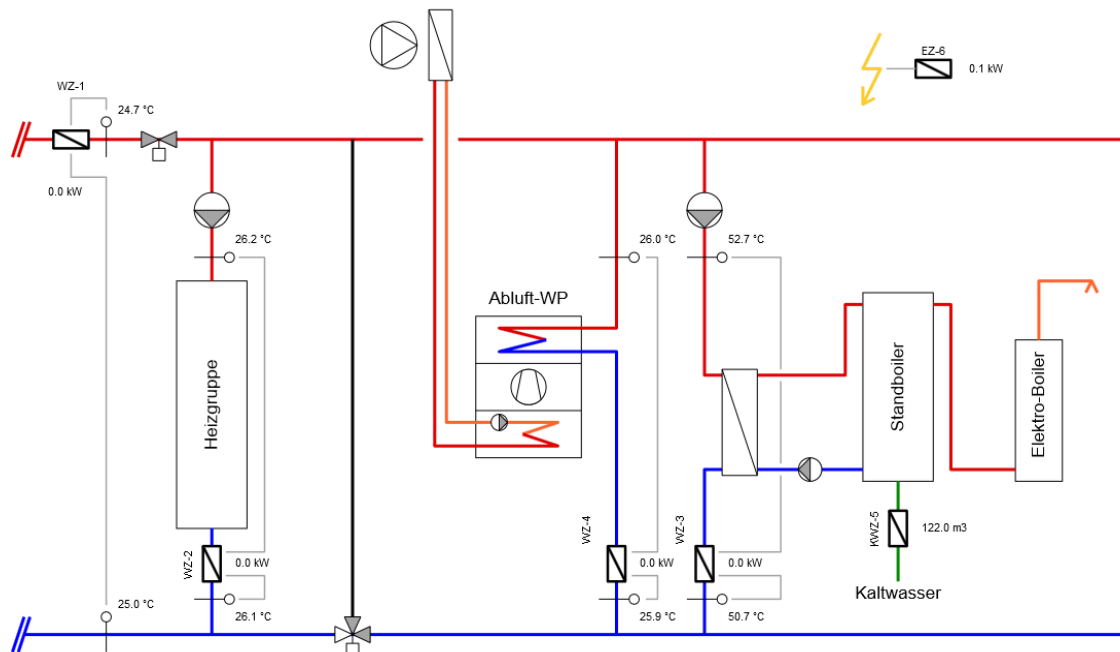


Abb. 7: Messschema der Unterstation 13; Quelle: netlogger.ch

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/m² bis zu 2.6 kWh/m² pro Monat. Die Summe der Stromverbräuche aller Wärmepumpen inkl. Lüftungsstrom ist in Abb. 9 dargestellt. Die angegeben 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/m², der Heizwärmeverbrauch bei 62 kWh/m². 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 Ölkessels 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.

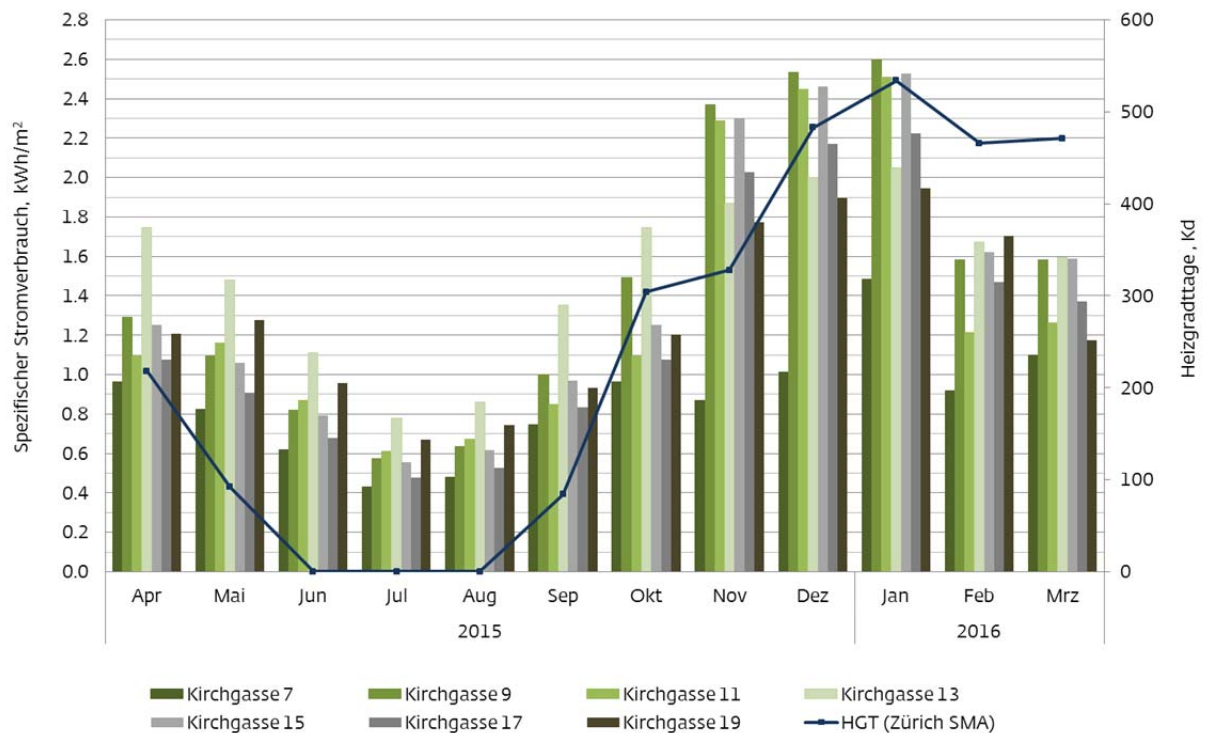


Abb. 8 : Flächenspezifischer elektrischer Energieverbrauch der Wärmepumpen

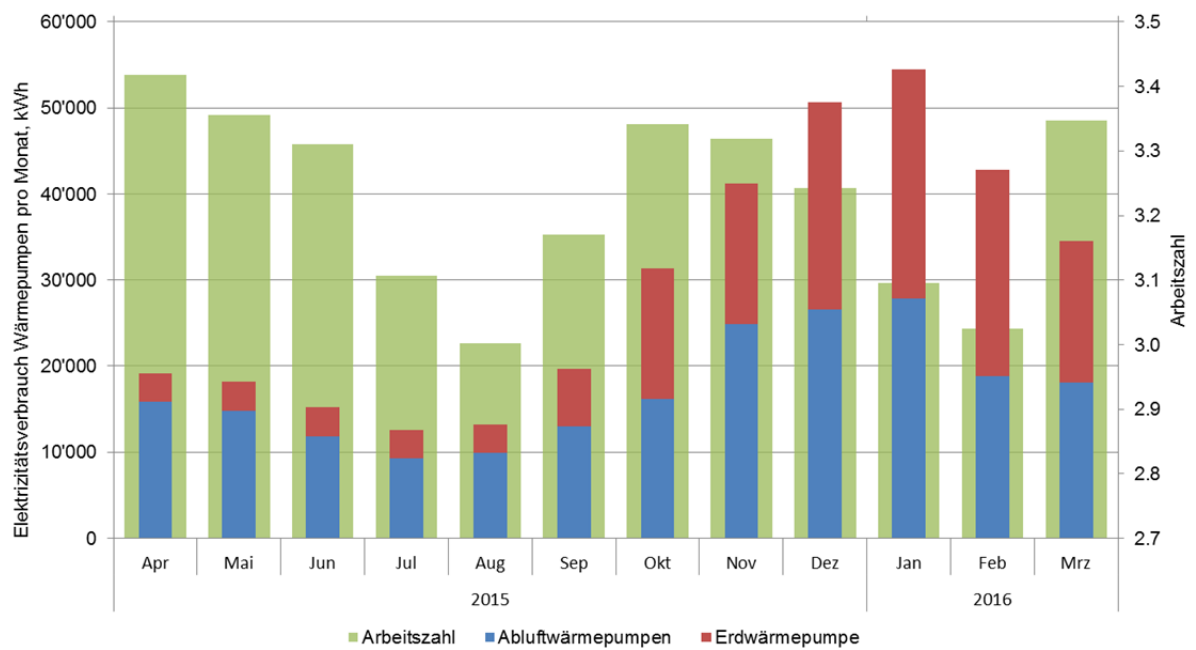


Abb. 9: Elektrizitätsverbrauch Wärmepumpen, inkl. Lüftung, April 2015 – März 2016; Arbeitszahl

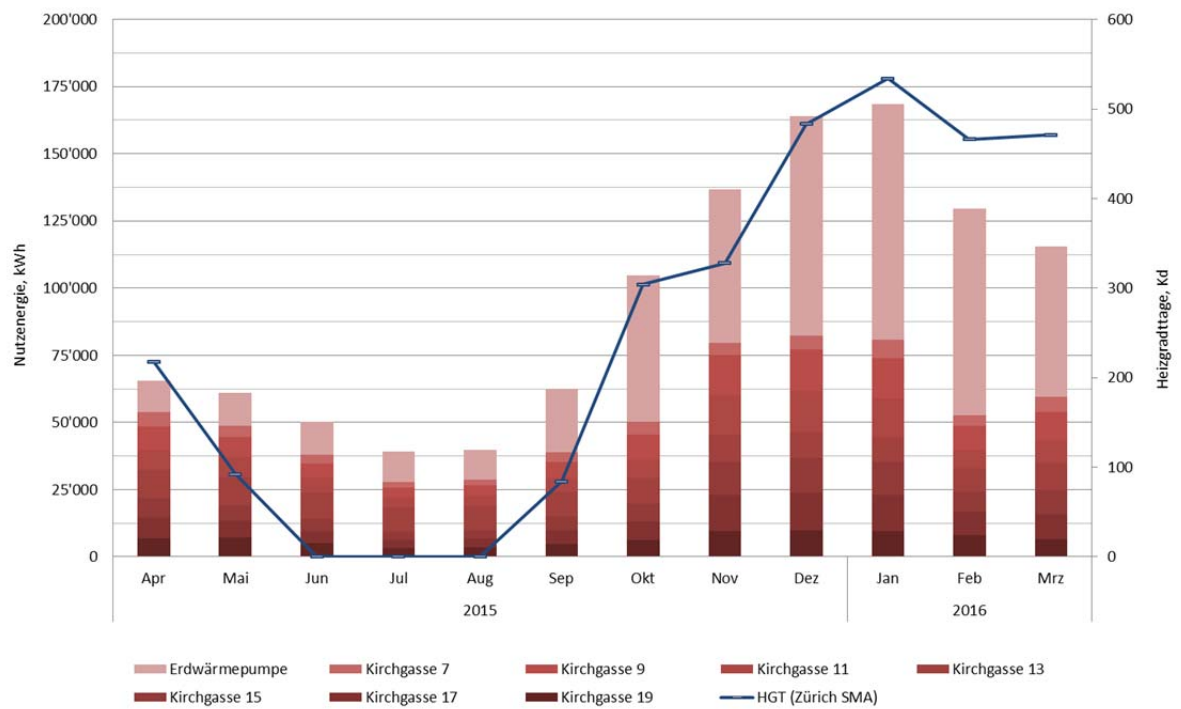


Abb. 10: Monatliche Wärmeproduktion kumuliert über alle Wärmepumpen

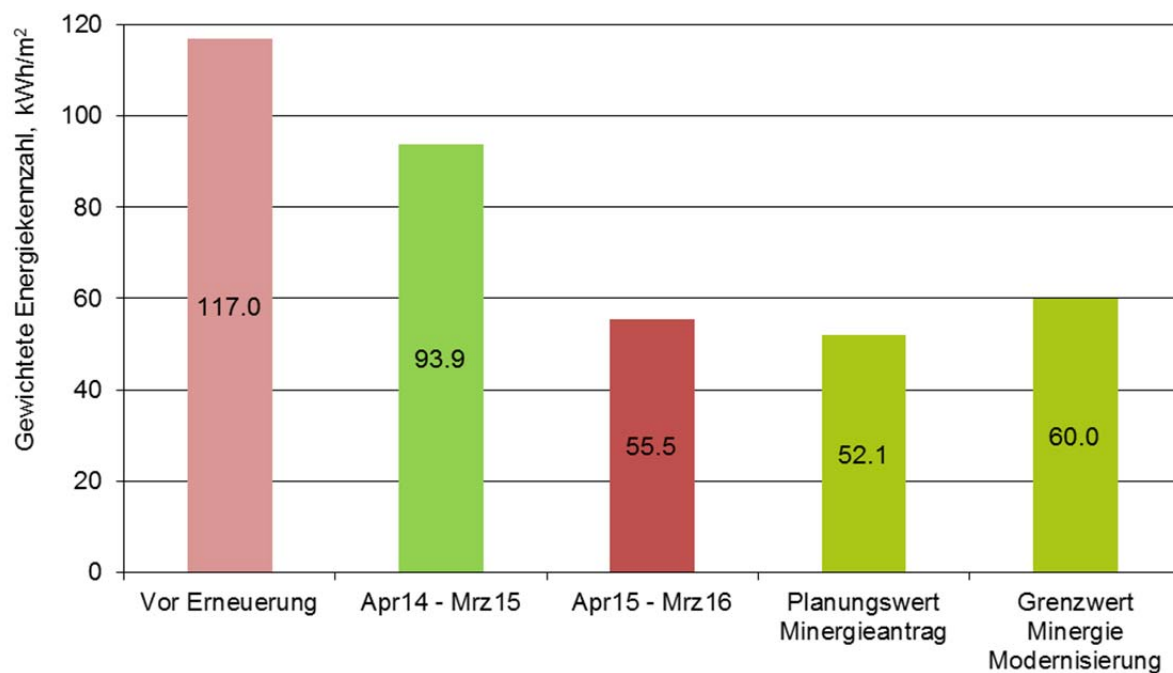


Abb. 11: Gewichtete Energiekennzahl, Minergie Plan- und Grenzwert

In Abb. 12 ist die Treibhausgasbilanz der Siedlung Dettenbühl vor und nach der Erneuerung dargestellt. Der anspruchsvolle Zielwert gemäss SIA 2040 (15.5 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 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 m^2 grossen PV-Anlage, welche auf den Flachdächern der 7 Gebäude installiert werden könnte. Die Treibhausgasemissionen des Betriebs würden damit um 1.5 kg/m^2 reduziert, jene der Erstellung um 0.6 kg/m^2 erhöht.

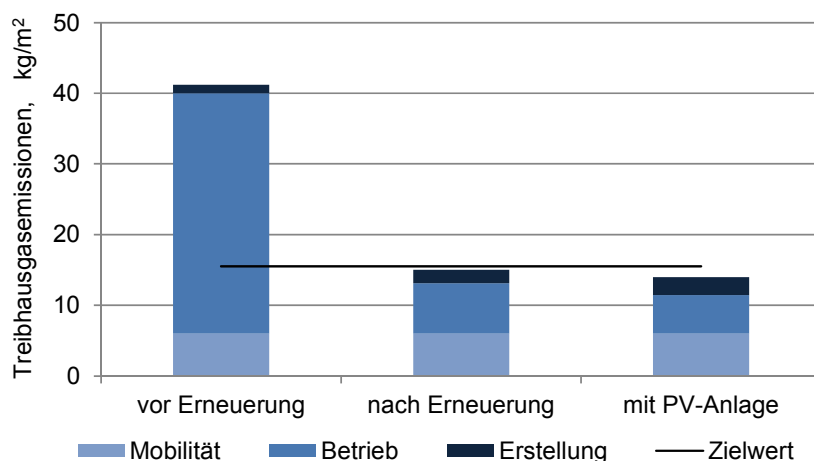


Abb. 12: Beurteilung der Treibhausgasemissionen gemäss SIA 2040: der Zielwert wird nach der Erneuerung eingehalten, eine 700 m^2 Photovoltaik-Anlage könnte die Bilanz im Betrieb weiter verbessern; Annahme Stromprodukt: CH-Verbrauchermix

3.3.2 Kirchgasse13

Die detaillierten Messungen in der Unterstation von Kirchgasse 13 sind im folgendenden Untekapitel 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/m²** (Total 39'448 kWh/Jahr). Gemäss Minergie-Nachweis sollte der jährliche Warmwasserbedarf bei **20.8 kWh/m²** liegen. Für die gleiche Zeitperiode liegt der gemessene Heizwärmeverbrauch bei **57.3 kWh/m²** (Total 95'874 kWh/Jahr). Gemäss Minergie-Nachweis sollte der Heizwärmebedarf bei **52.1 kWh/m²** 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.

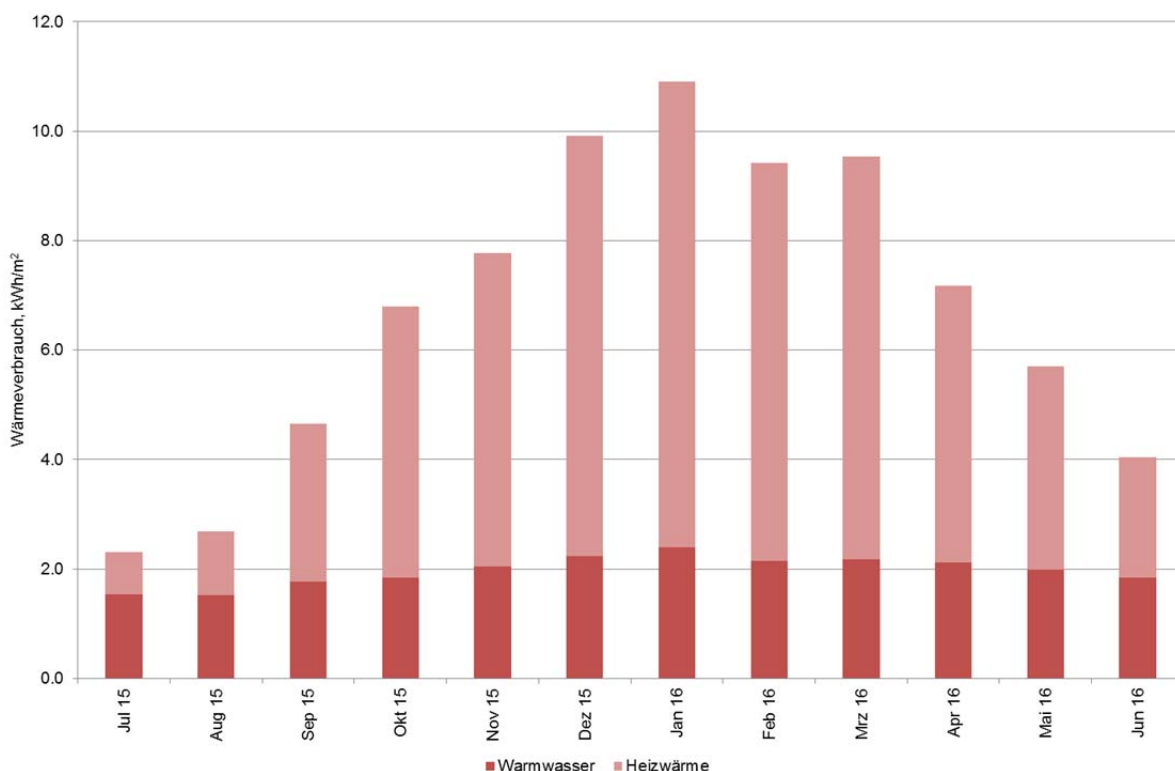


Abb. 13 : Kirchgasse 13: Spezifische Wärmeverbräuche für Warmwasser und Heizwärme, Juli 2015 – Juni 2016

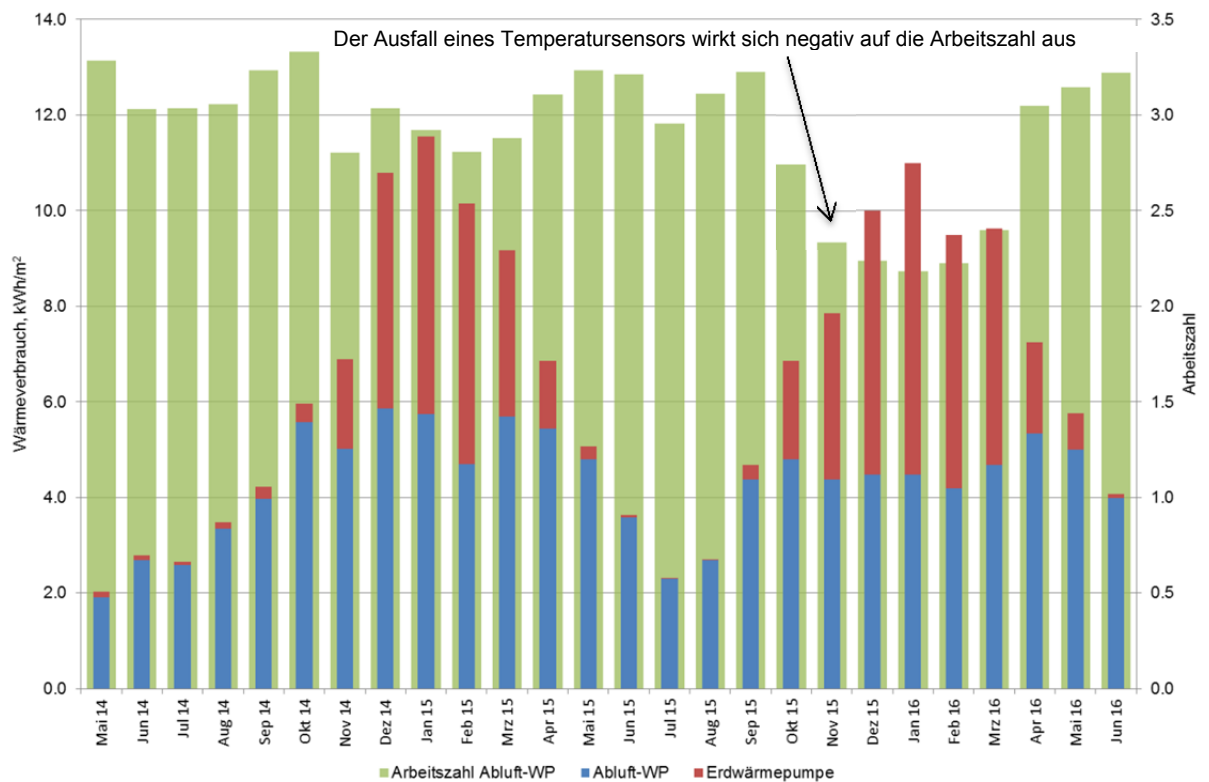


Abb. 14 : Kirchgasse 13: Spezifische Wärmeproduktion der Abluft-Wärmepumpe sowie Deckung der Spitzenlast über die Fernleitung (Erdwärmepumpe); Arbeitszahl der Abluft-Wärmepumpe; zwischen Oktober 2015 und März 2016 ist ein Temperatursensor in einem der zwei Verdampfer ausgefallen, was vorübergehend zu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

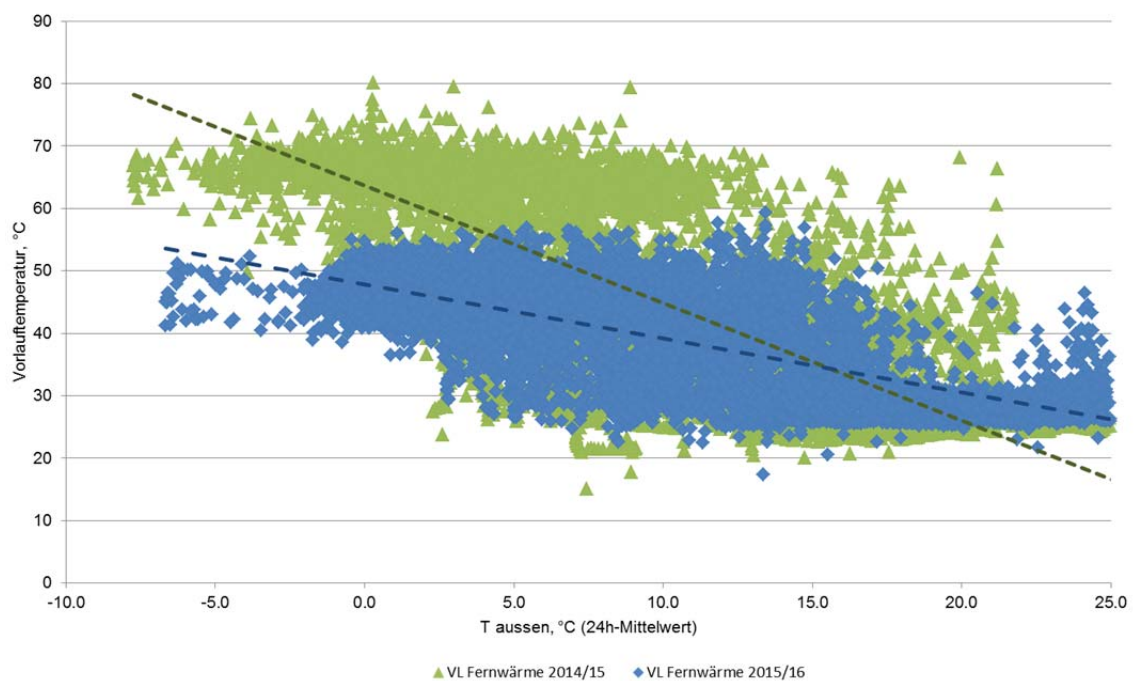


Abb. 15 Kirchgasse 13: Vorlauftemperatur Fernwärme vor und nach der Aussenbetriebssetzung des Heizölkessels

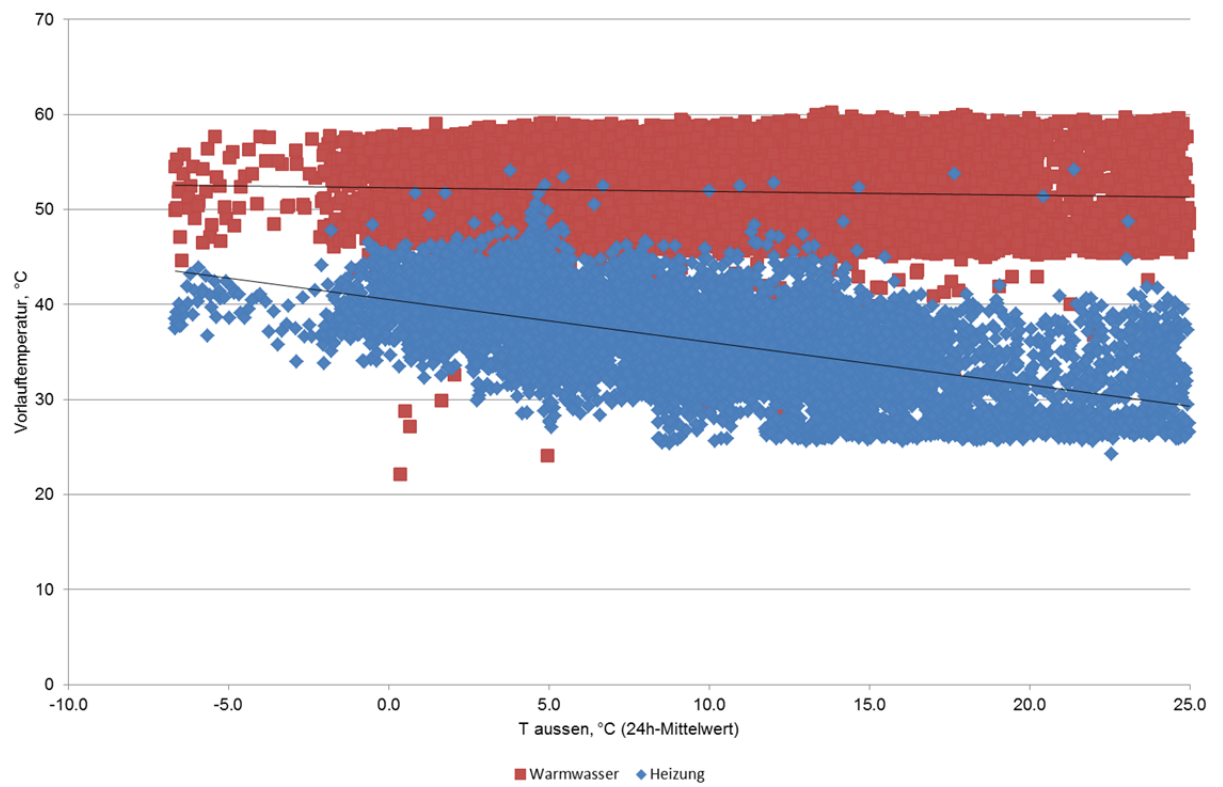


Abb. 16 Kirchgasse 13: Vorlauftemperaturen im Heiz- und im Warmwasserbetrieb (Juli 2015 bis Juni 2016)

4 Thermische Behaglichkeit

4.1 Grundlagen

4.1.1 Bewertungskriterien

Die normativen Komfortbereiche für die Raumtemperatur ist in Tab. 3 dargestellt. Für die relative Raumluftheuchte 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 Raumluftheuchte eine Grenze von 30% während maximal 10% der jährlichen Nutzungszeit unterschreiten. Diese Feuchtegrenze gilt beim Auslegungswert für die Raumluftheuchte 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	Lufttemperatur	°C	-0.2	20.5	10.1
	relative Luftfeuchtigkeit	%	19	97	65
II	Lufttemperatur	°C	3.2	21.2	11.1
	relative Luftfeuchtigkeit	%	33	97	77
III	Lufttemperatur	°C	2.0	13.3	6.7
	relative Luftfeuchtigkeit	%	0	100	88
IV	Lufttemperatur	°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).

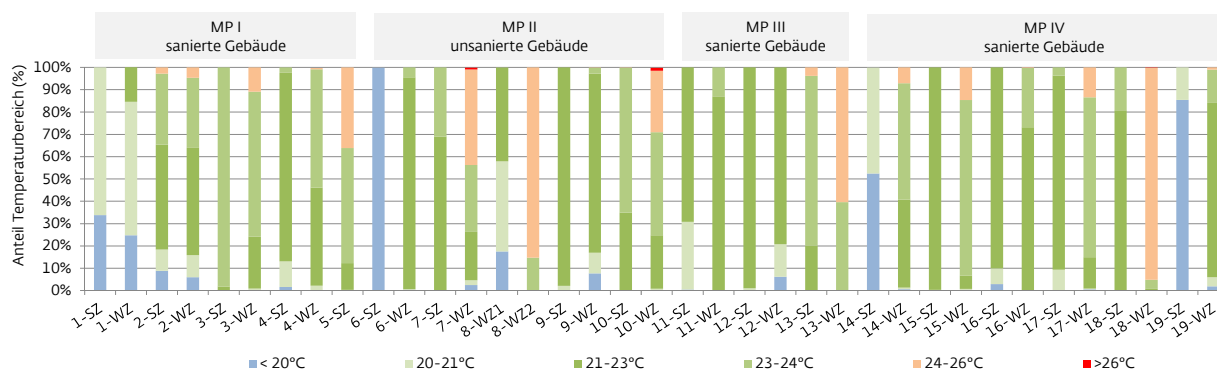


Abb. 17: Aufteilung der Raumtemperaturen

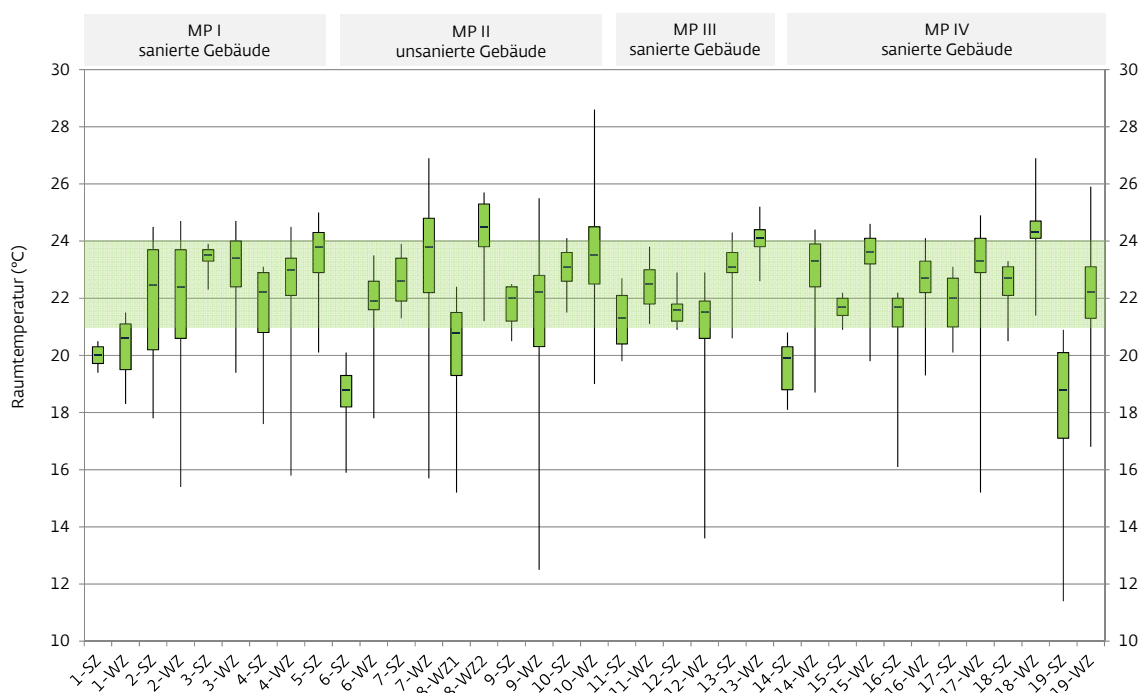


Abb. 18: Verteilung der Raumtemperatur (Min-, Max-, Median- und Perzentilwerte)

4.3.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit bewegt sich im Durchschnitt zwischen 39% bei den sanierten und 43% bei den unsanierten Wohnungen (siehe Abb. 19). In den sanierten Wohnungen sind die tieferen 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%).

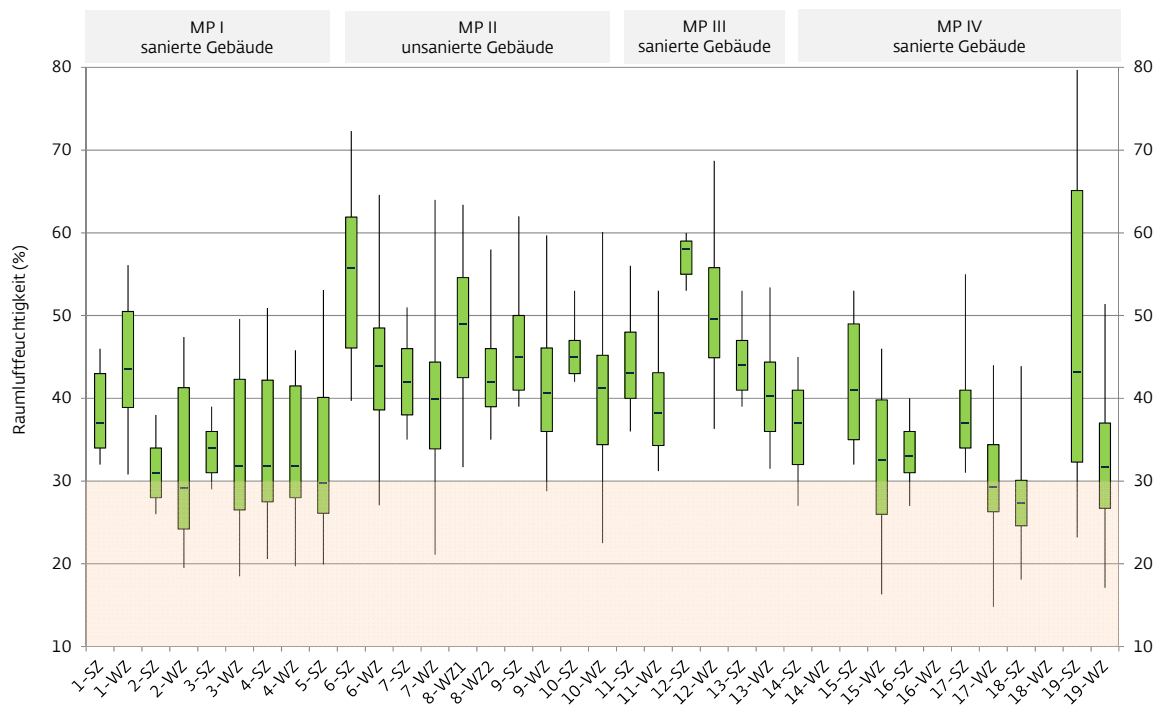


Abb. 19: Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit (Min-, Max-, Median- und Perzentilwerte)

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

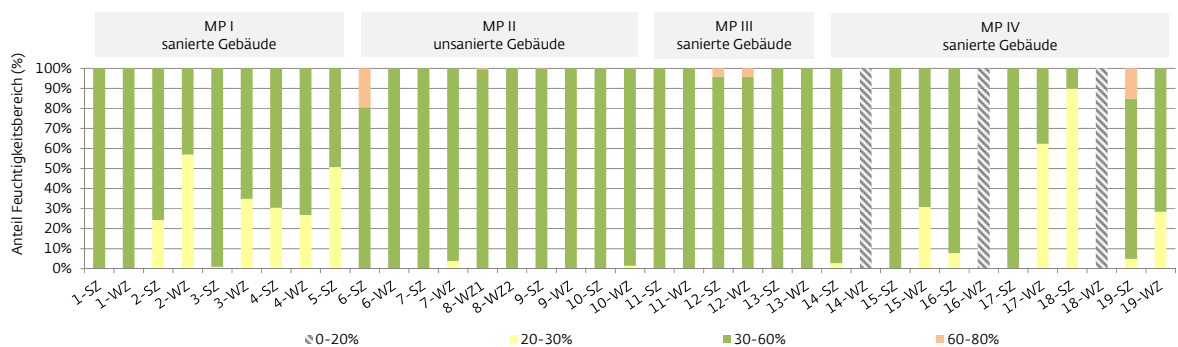


Abb. 20: Aufteilung der Raumluftfeuchtigkeit

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.

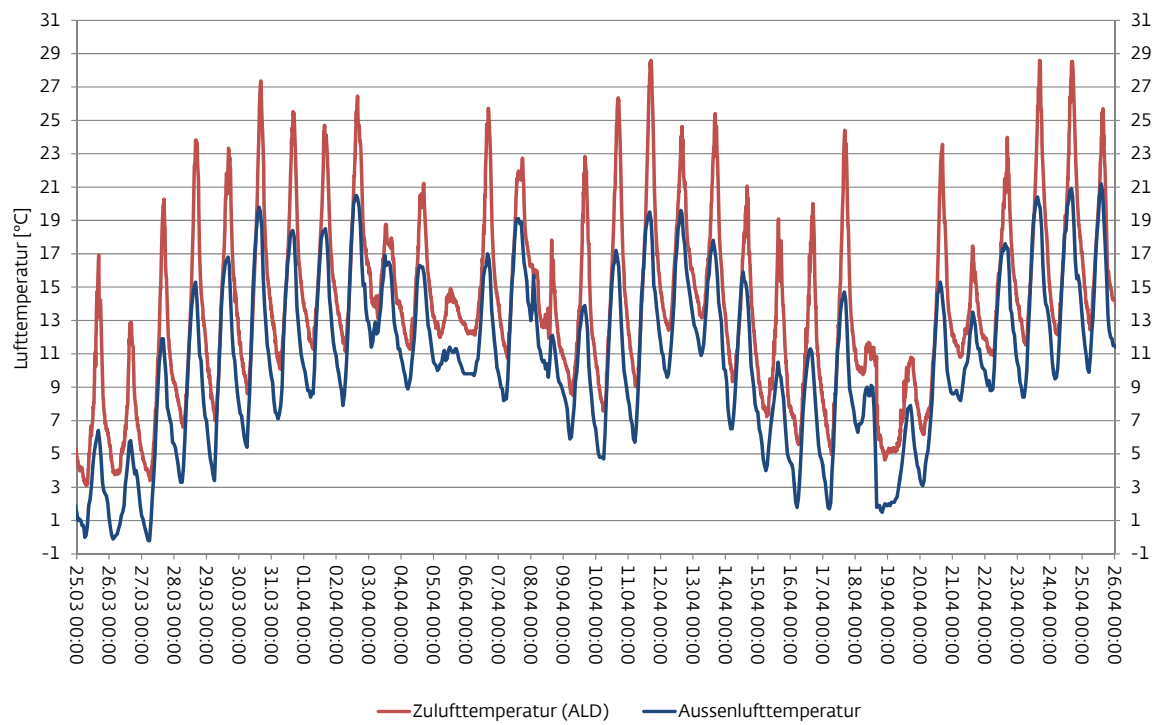


Abb. 21: Zulufttemperatur im Aussenluftdurchlass

5 Raumlufthqualität

5.1 Grundlagen

Neben Luftfeuchtigkeit und Temperatur ist die CO₂-Konzentration ein wichtiger Parameter um den Raumkomfort zu beurteilen. Schlecht gelüftete Wohnungen weisen eine hohe CO₂-Konzentration auf. Die negativen Eigenschaften von CO₂ sind spürbar: Unwohlsein, Konzentrationsschwäche und Leistungsabfall. Leistungsfähigkeit, Konzentration und Wohlbefinden werden bereits ab einer Konzentration von 800 ppm Kohlendioxid beeinträchtigt. Wirklich gute Raumlufthqualität übersteigt einen Grenzwert von 1000 ppm CO₂ nicht. Ab 1200 ppm wird die Raumlufth von 20% der Benutzer als unbefriedigend bezeichnet.



Abb. 22 : Typische CO₂-Konzentration (in ppm) und ihre Auswirkungen für den Menschen

5.1.1 Klassifikation nach SIA 382/1:2007

Für die Beurteilung der Raumlufthqualität werden die gemessenen CO₂-Konzentrationen in den Wohnungen nach SIA 382/1:2007 (EN 13779) klassifiziert (Siehe Tab. 6).

Tab. 6 : Klassifizierung der gemessenen CO₂-Höchstkonzentration nach SIA 382/1:2007

Kategorie	CO ₂ -Höchstkonzentration (ppm)	Beschreibung
RAL 1	keine Angaben	Spezielle Luftqualität (Labor- und Produktionsräume)
RAL 2	≤ 950	Hohe Luftqualität (spezielle Ansprüche an Gerüche)
RAL 3	950-1350	Mittlere Luftqualität (typische Wohn- und Büroräume)
RAL 4	> 1350	Niedrige Luftqualität (Lagerräume, Korridor, Räume in denen geraucht wird)

5.2 Vorgehen

Die Messung der CO₂-Konzentration erfolgte parallel zu den Raumlufthtemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessungen gemäss Kap. 4 mit den in Kap. 12.1.1 beschriebenen Messgeräten.

5.3 Resultate

Die gemessenen CO₂-Konzentrationen sind in Abb. 23 dargestellt (0.1 Perzentil-, Min-, Median-, 0.9 Perzentil- und Maximal-Werte). Die RAL-Kategorien der Raumlufthqualität 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 Raumlufthqualität nach der Sanierung. Die Raumlufthqualität im Schlafzimmer steigt von RAL 3 (gut) zu RAL 2 (sehr gut). Im Wohnzimmer ist die Verbesserung noch deutlicher; hier steigt die Raumlufthqualität von RAL 4 (mässig/schlecht) zu RAL 2 (sehr gut). Insgesamt wurde die mittlere CO₂-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.

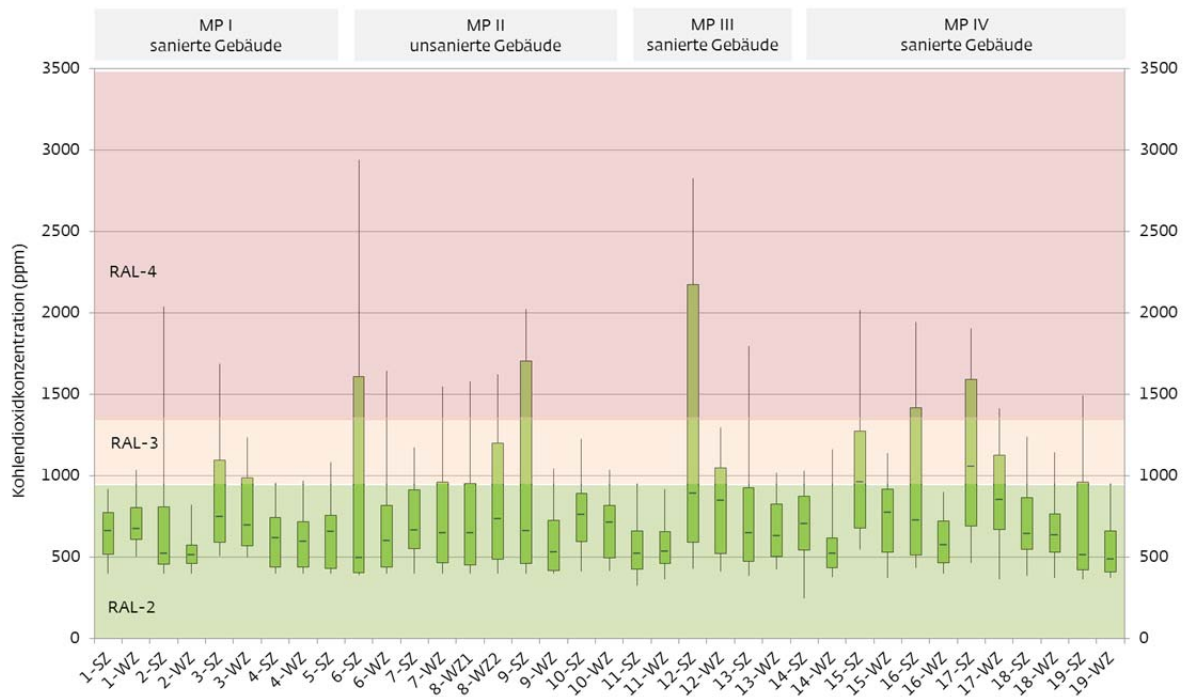


Abb. 23: Kohlendioxidkonzentration (Min-, Max-, Median- und Perzentilwerte)

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

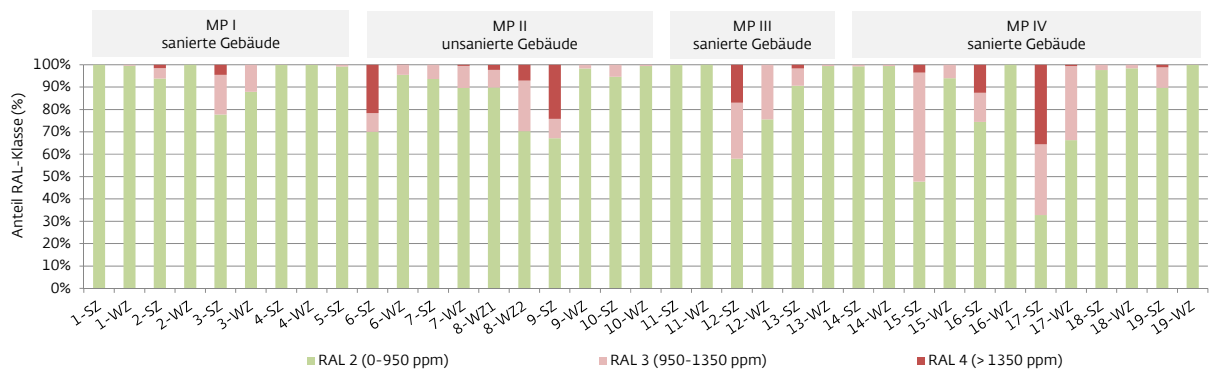


Abb. 24: RAL-Klasse Aufteilung pro Raum

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 m³/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 Zugerscheinungen 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

	Konfiguration										
	Wohnzimmer		Schlafzimmer 1		Schlafzimmer 2		Schlafzimmer 3		Badzimmer		Küche
Fall	Fenster	Fenster	Tür	Fenster	Tür	Fenster	Tür	Fenster	Tür	Tür	Fenster
1	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu
2	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu
3	zu	offen	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu
4	zu	gekippt	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu
5	zu	offen	offen	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu	zu
6	zu	gekippt	offen	zu	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 m³/h pro Durchlass.

Tab. 9: Volumenstrommesswerte

Fall	Volumenstrom						
	Zuluft				Abluft		
	Wohnzimmer	Schlafzimmer 1	Schlafzimmer 2	Schlafzimmer 3	Badzimmer	WC	Küche
	[m3/h]	[m3/h]	[m3/h]	[m3/h]	[m3/h]	[m3/h]	[m3/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
	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
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

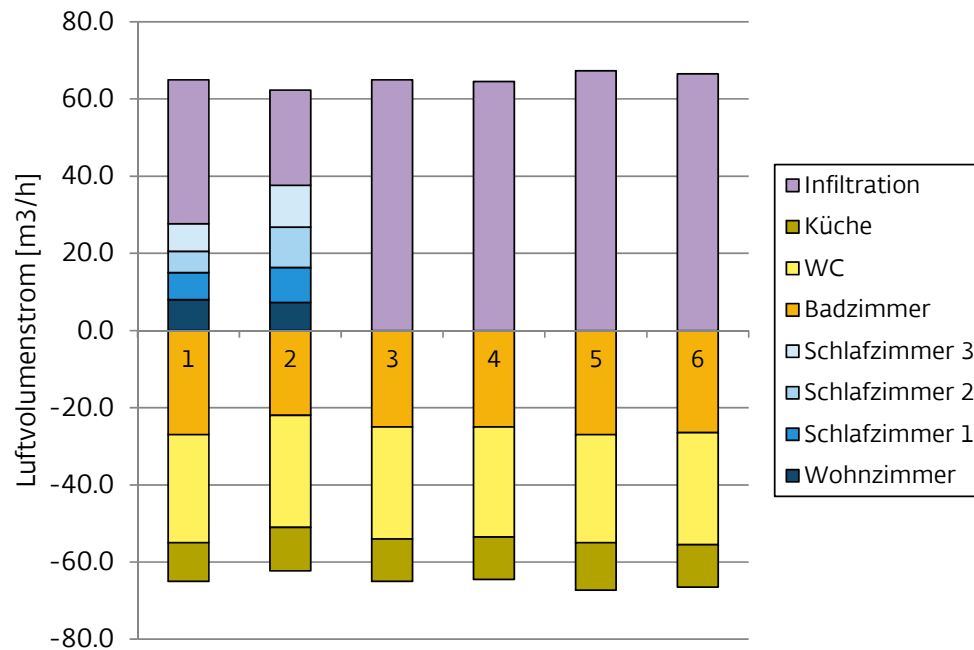


Abb. 25: Luftmengenbilanz der untersuchten Fälle



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



Abb. 27: Druckdifferenzmessung beim Aussenluft durchlass

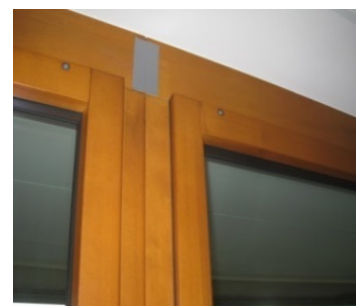


Abb. 28: Abdichtung eines Lecks in der Rahmenverbreiterung



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 m³/h** in den 3^{1/2}-Zimmer-Wohnungen und **125 m³/h** in den 4^{1/2}- bis 5^{1/2}-Zimmer-Wohnungen. Die Planungswerte sind mit einer Ausnahme eingehalten. In der 5^{1/2}-Zimmer-Wohnung ist der Abluftvolumenstrom zu tief.
- Der Aussenluftvolumenstrom liegt in den meisten Schlafzimmern zwischen **20 bis 30 m³/h**. In der 5^{1/2}-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.

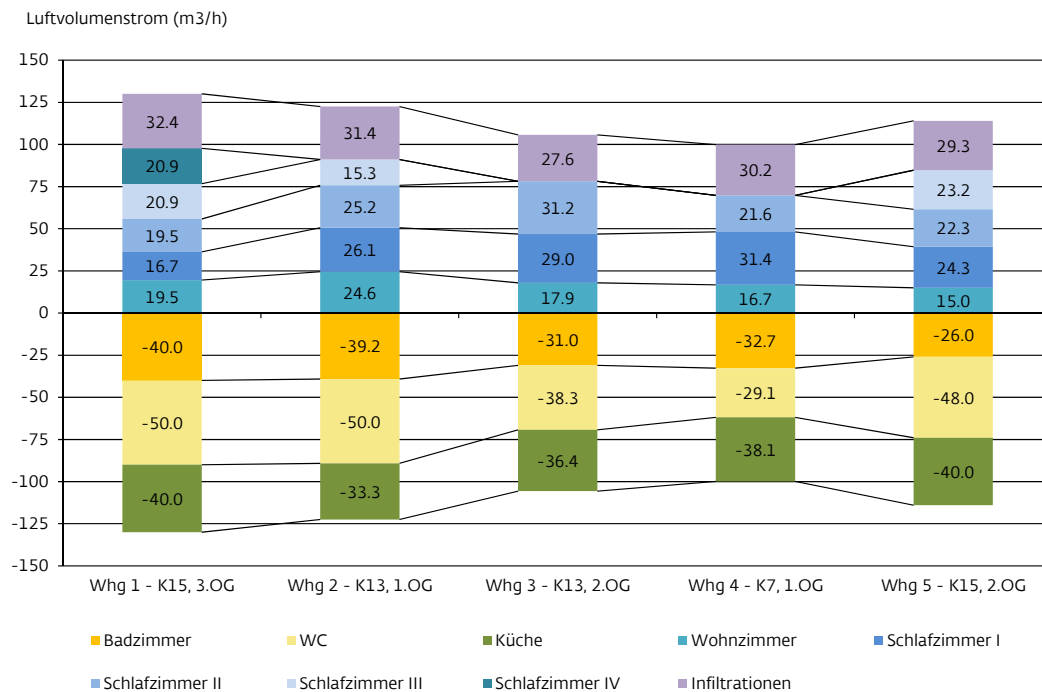


Abb. 30: Luftmengenbilanz von 5 Wohnungen; Fenster und Zimmertüren geschlossen

7 Luftschalldämmung

7.1 Ausgangslage und Zielsetzung

In der Siedlung Dettenbühl an der Kirchgasse 7 bis 19 in 8907 Wettswil 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:

- Wettswil 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.

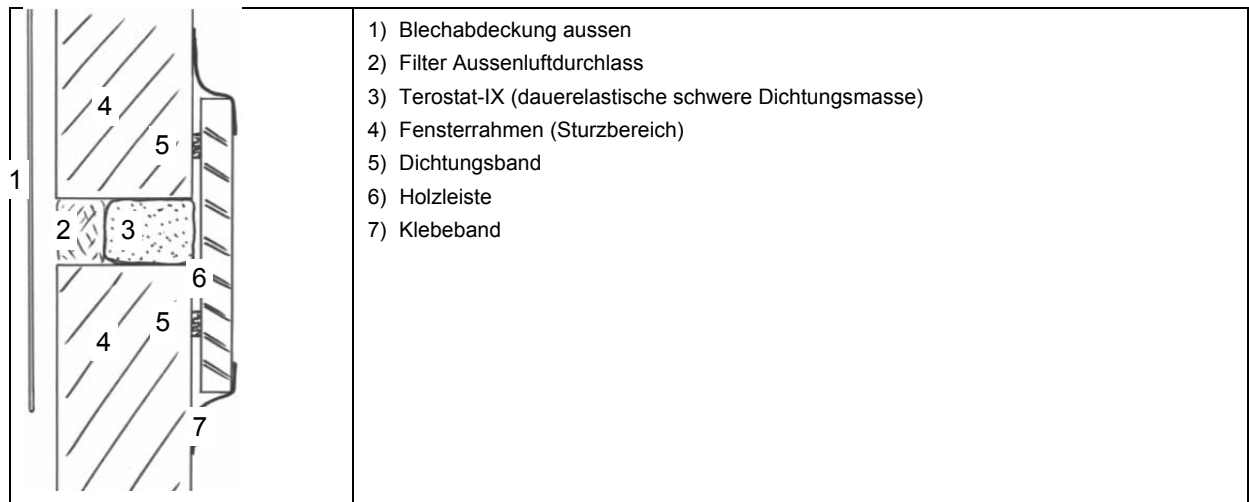


Abb. 32: Schemaskizze (Vertikalschnitt) Aussenluftdurchlass zugekittet und abgedeckt

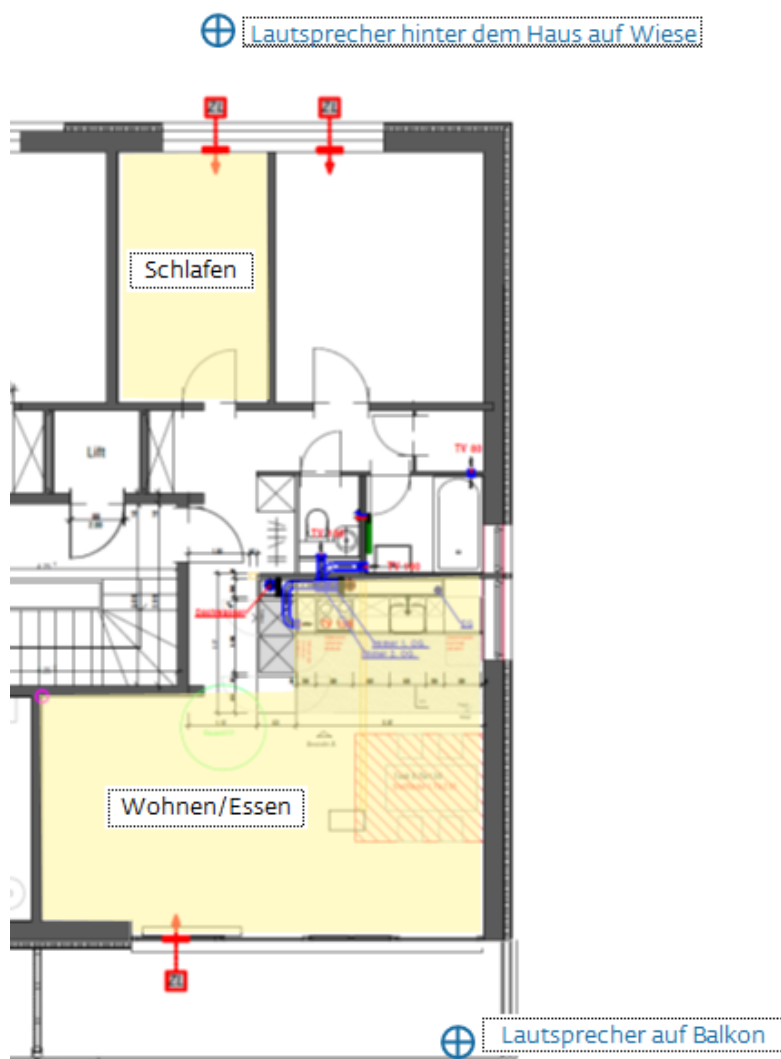


Abb. 33: Grundriss mit Messanordnung

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 Aussenluftdurchlässe (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 Rollläden 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 Aussenluftdurchlass 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 Aussenluftdurchlasses. 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).

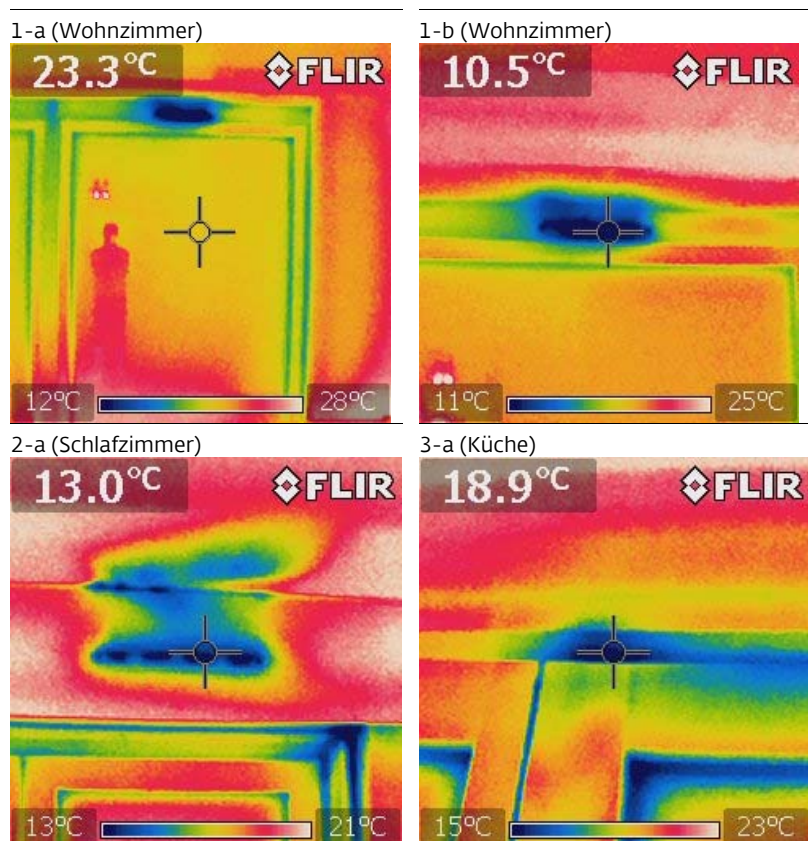
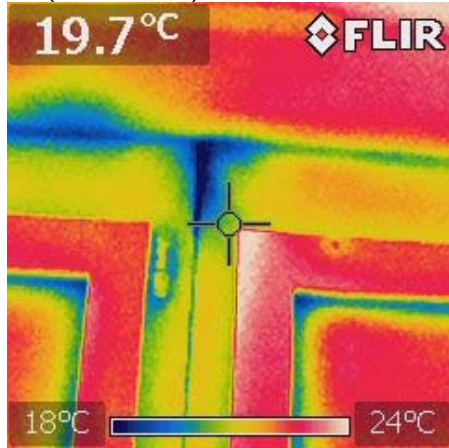


Abb. 34 Aussenluftdurchlässe (Kirchgasse 11, Wohnung 2. OG)

1-c (Wohnzimmer)



3-b (Küche)

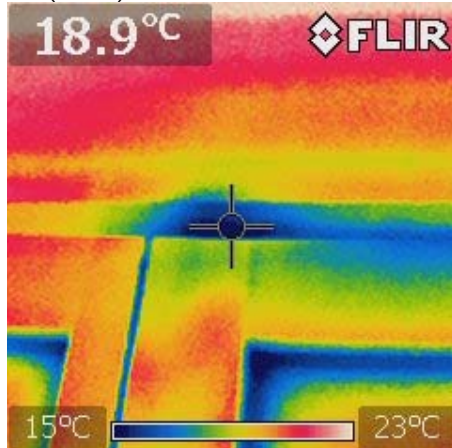
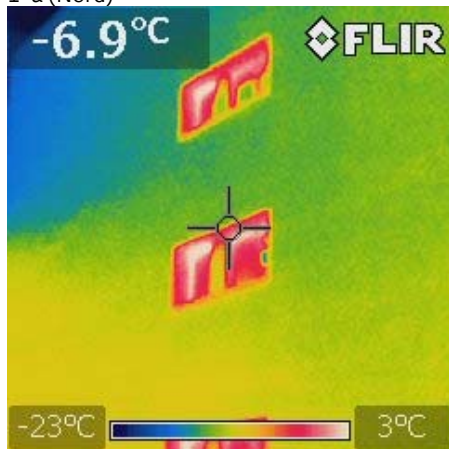


Abb. 35 Luftleckage am Fensterrahmen (Kirchgasse 11, Wohnung 2. OG)

1-a (Nord)



2-a (Ost)

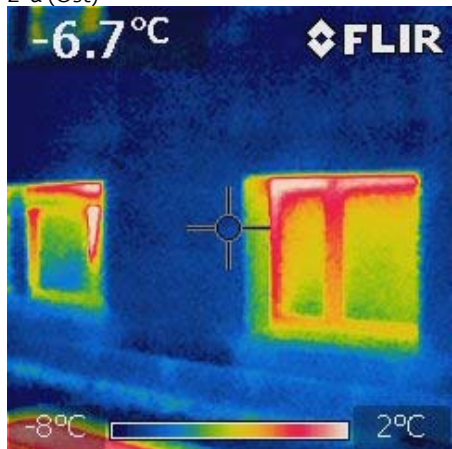


Abb. 36 Aussenfassade (Kirchgasse 7)

9 Wirtschaftlichkeit

9.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der Ersatz des bestehenden Ölkessels 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 Heizungs- und Lüftungsanlagen sind gemäss Bauabrechnung¹ 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 verursacht das umgesetzte Energiekonzept deutlich geringere Investitions- und Jahreskosten.

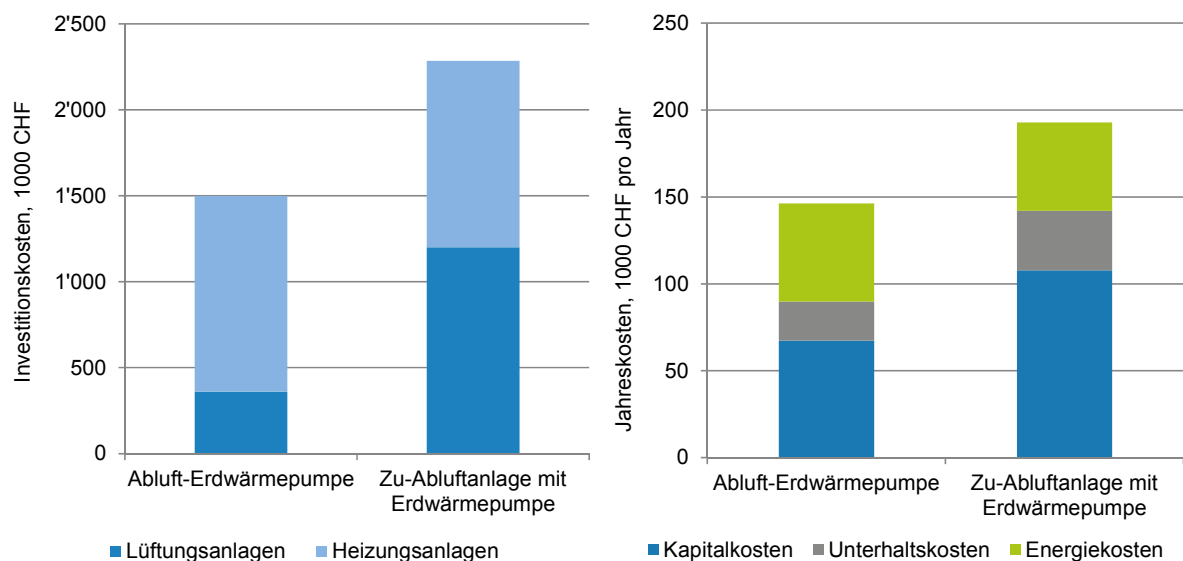


Abb. 37 Investitionskosten und Jahreskosten der neuen Heizungs- und Lüftungsanlagen der Siedlung Dettenbühl im Vergleich zu einer Zu-/Abluftanlage in Kombination mit einer Erdwärmepumpe; die Minergie Förderbeiträge sind in den Kosten noch nicht berücksichtigt

¹ Exkl. Abbruch bestehende Abluftanlagen und neue Handtuchradiatoren im Badzimmer

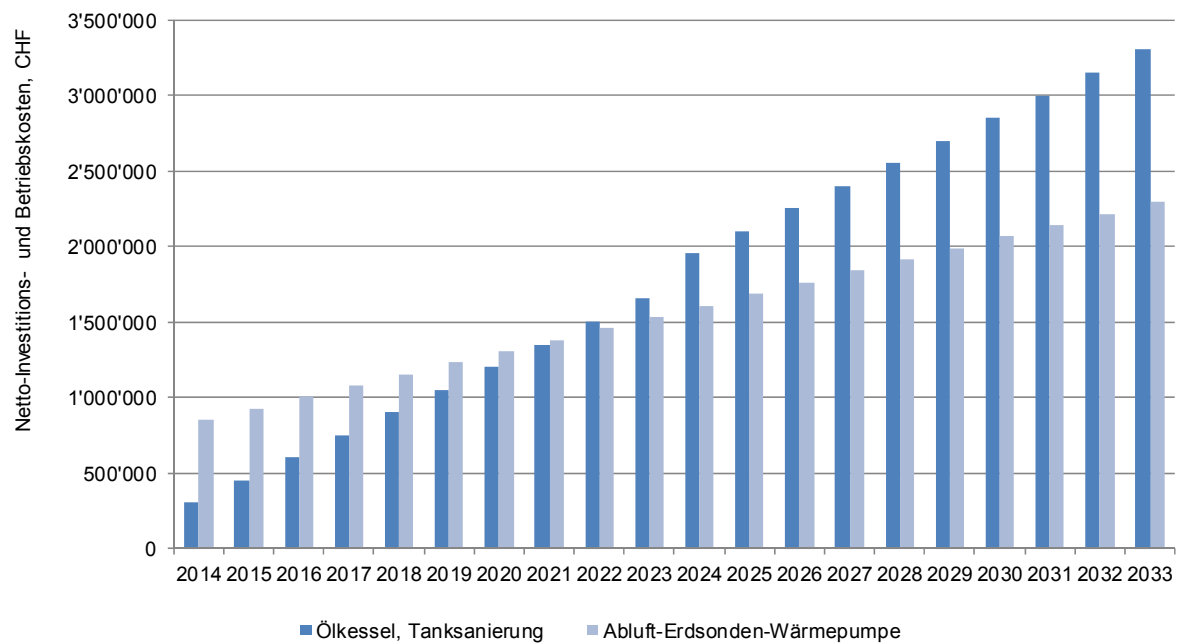


Abb. 38 Dank den Förderbeiträgen für die Minergie-Modernisierung ist das umgesetzte Energiekonzept sogar im Vergleich zum Ersatz des bestehenden Ölkessels wirtschaftlicher. Die Netto-Mehrkosten für die Abluft-Erdsonden-Wärmepumpe sind bereits nach 8 Jahren amortisiert.

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 meisten 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 m³/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/m². Bei zentralen Zu-/Abluftanlagen in Mehrfamilienhäusern liegt er in der Regel bei 3 – 4 kWh/m².
- Der Minergie-Grenzwert-Modernisierung wird von beiden untersuchten Projekten im Betrieb eingehalten. Dies, obwohl die Gebäudehülle nur mässig bis gar nicht wärmegeklämt 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/m² 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 m³/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 Neuauflage des Buchs „Wohnungslüftung“, Faktor Verlag

11 Thermischer Komfort und Raumlufthqualität

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)

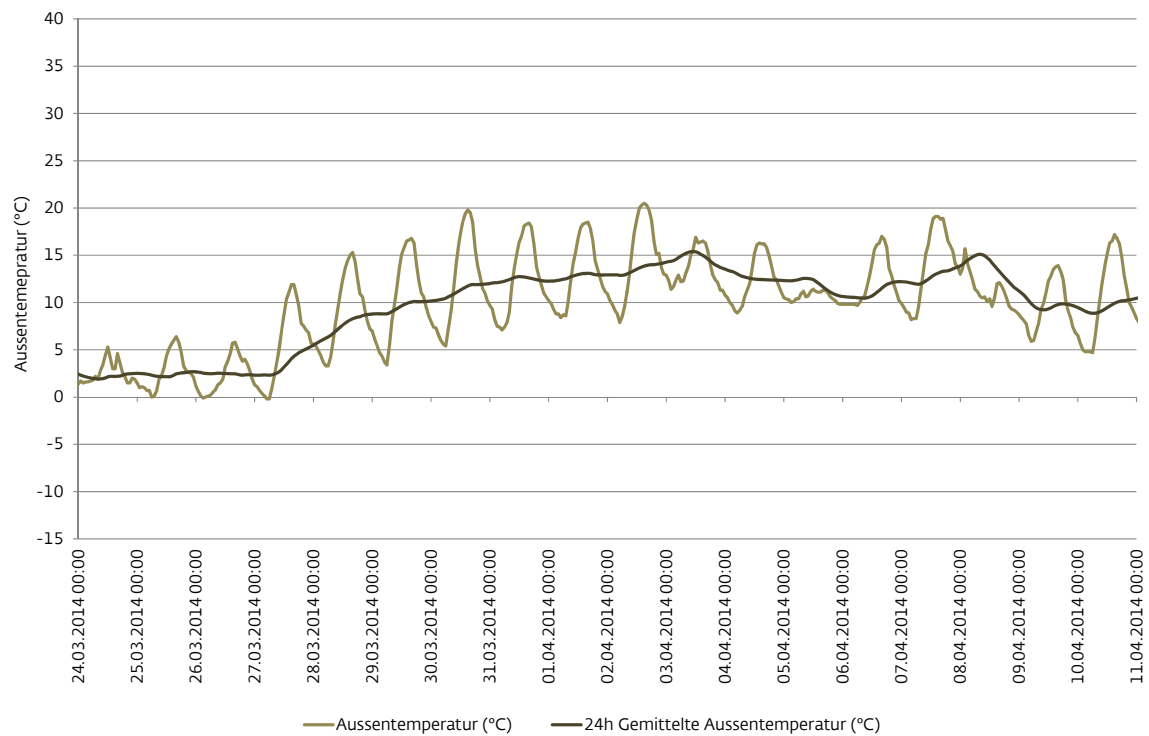


Abb. 39 : Aussenlufttemperaturen²

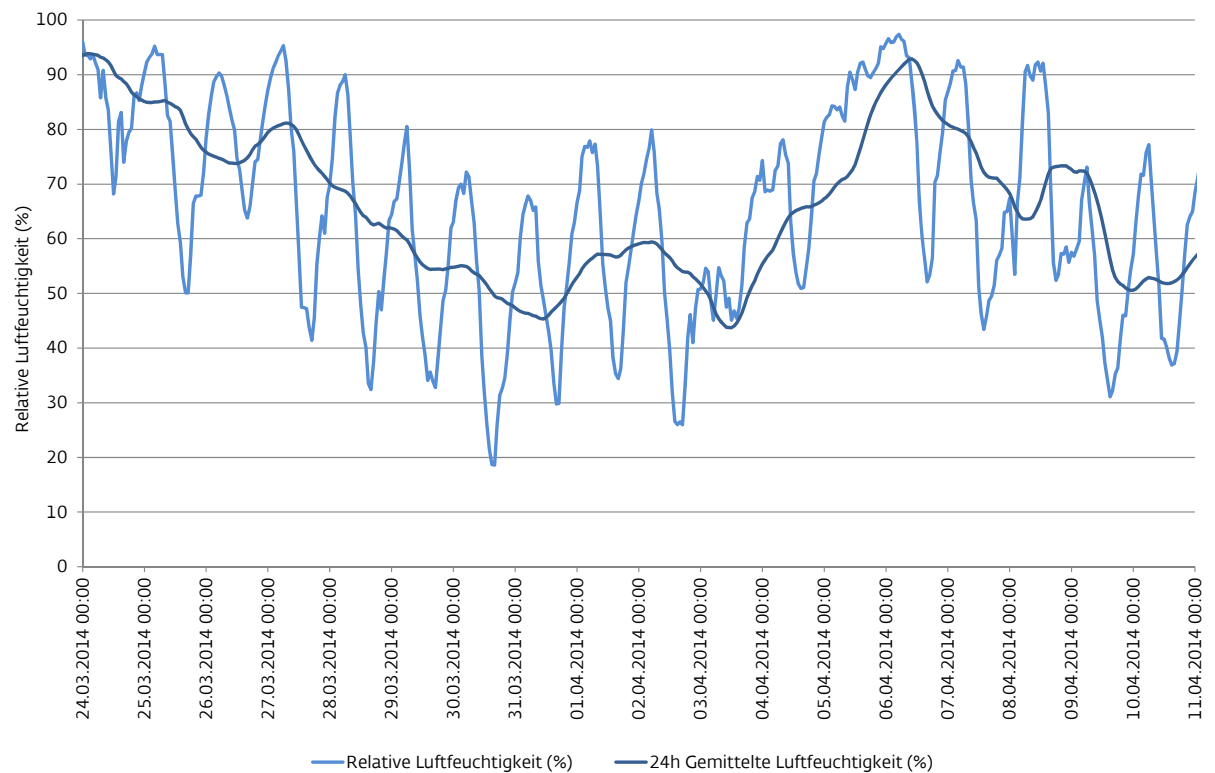


Abb. 40 : Relative Luftfeuchtigkeit³

² Aussenlufttemperaturen, Meteoschweiz, Zürich SMA

³ Relative Luftfeuchtigkeit, Meteoschweiz, Zürich SMA

11.2.2 Messperiode II (22.04-14.05)

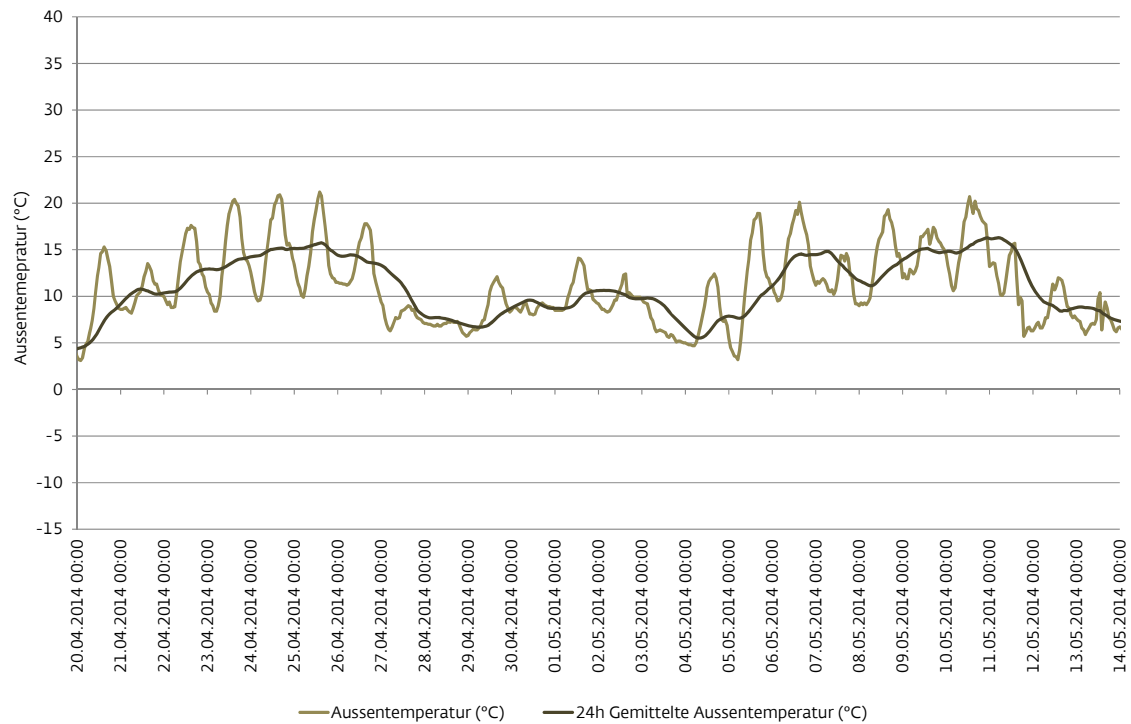


Abb. 41 : Aussenlufttemperaturen

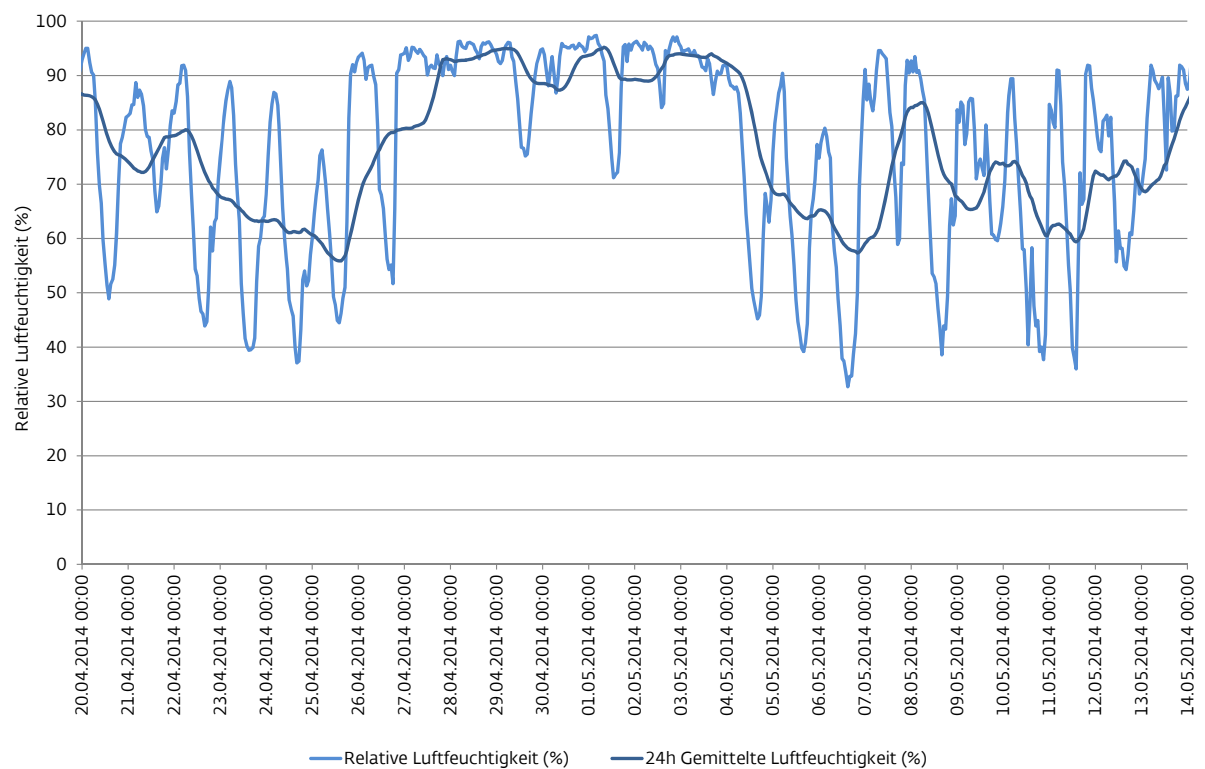


Abb. 42 : Relative Luftfeuchtigkeit

11.2.3 Messperiode III (10.11-24.11)

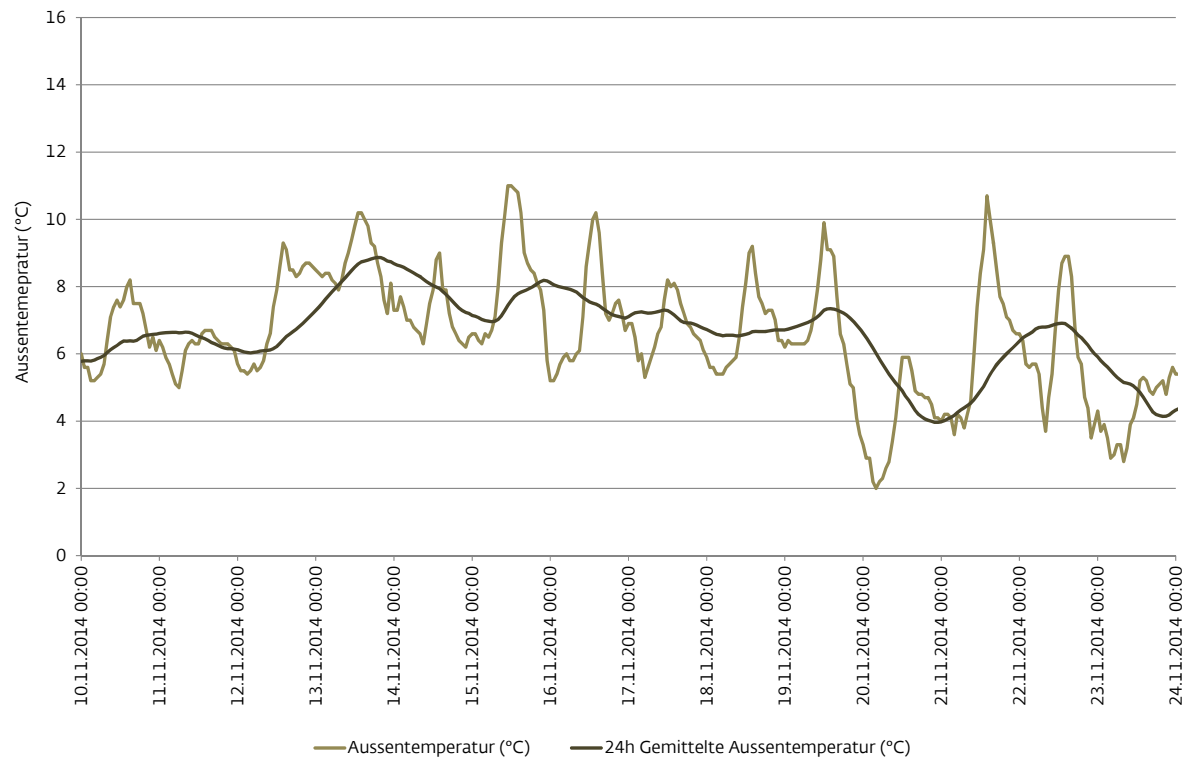


Abb. 43: Aussenlufttemperatur

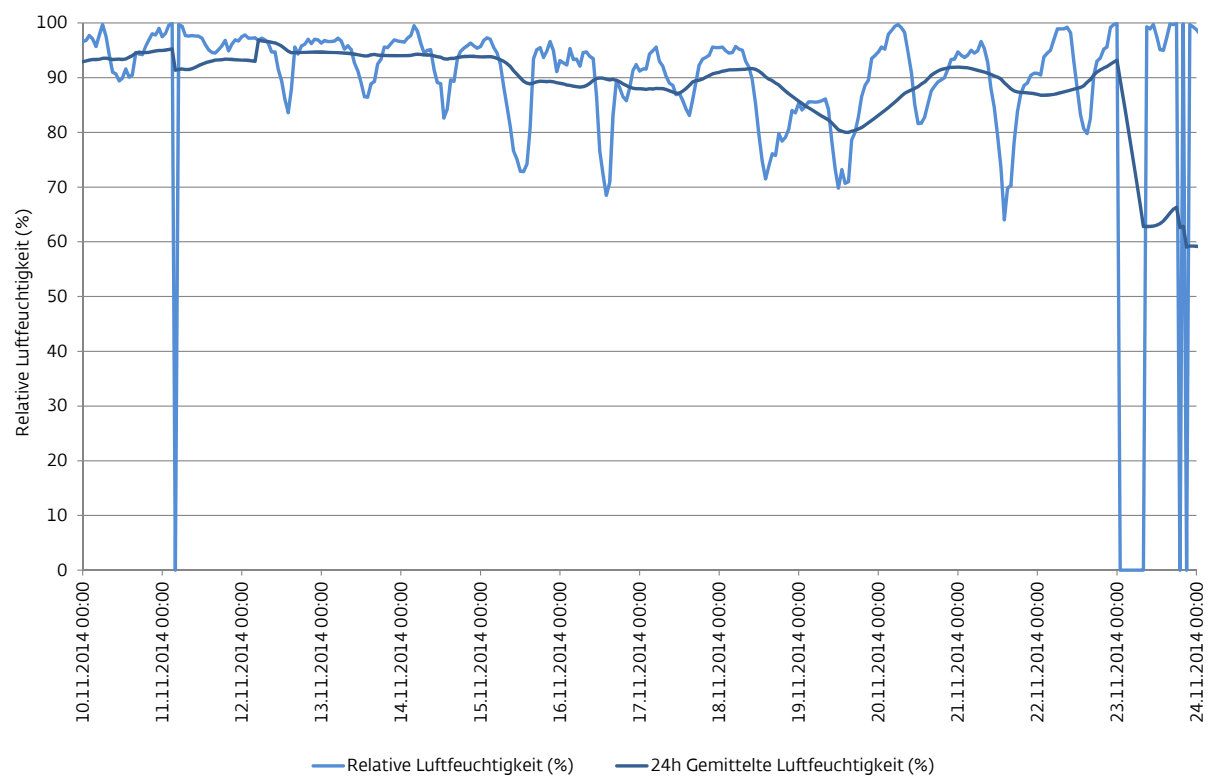


Abb. 44: Relative Luftfeuchtigkeit

11.2.4 Messperiode IV (10.02-26.02)

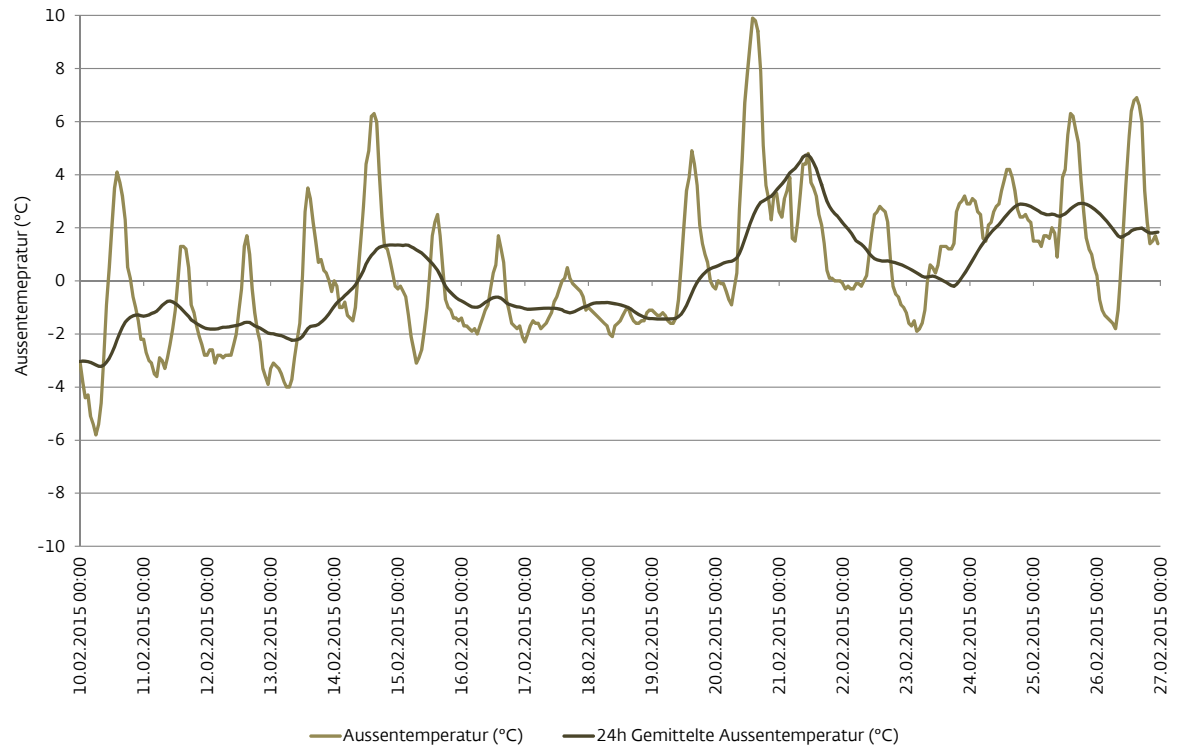


Abb. 45: Aussenlufttemperatur

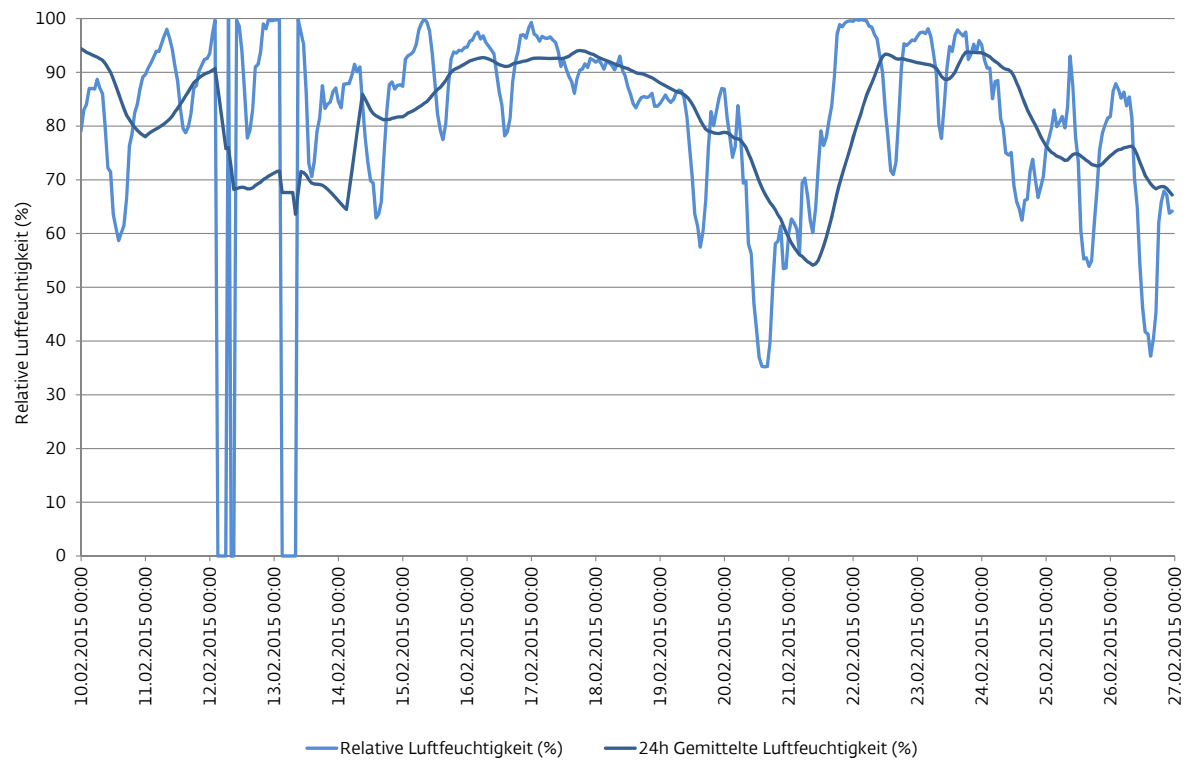


Abb. 46: Relative Luftfeuchtigkeit

11.3 Detaillierte Analyse des Raumklimas pro Wohnung

Die nachfolgenden Grafiken zeigen den Verlauf der CO₂-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)

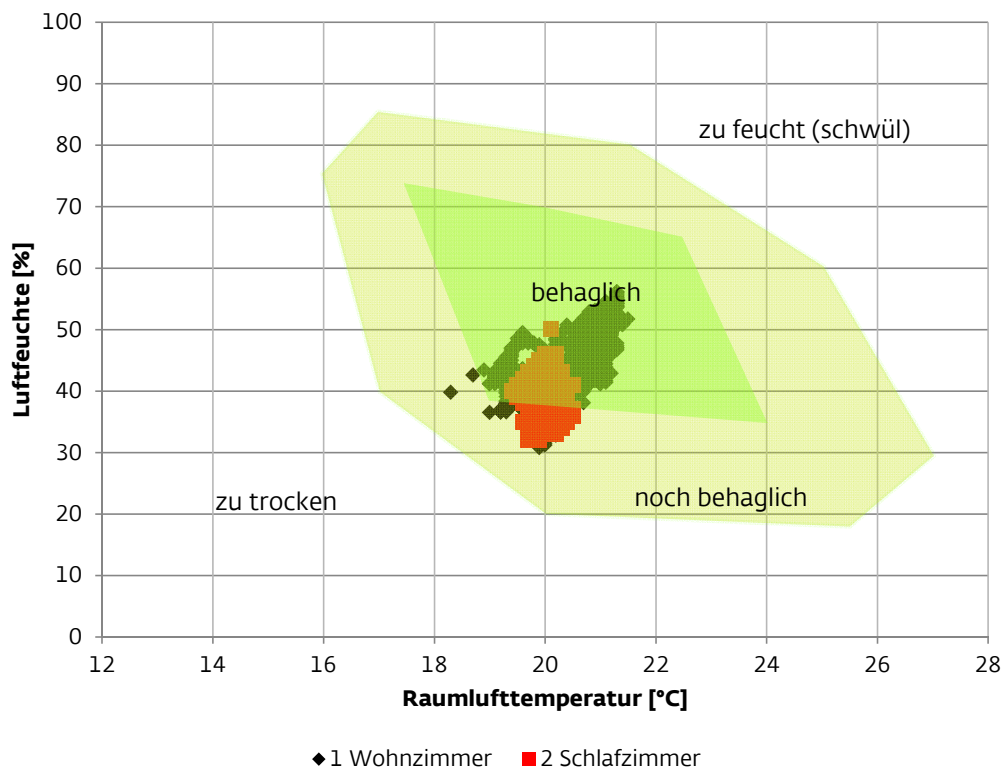


Abb. 48: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 1 (saniert)

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.

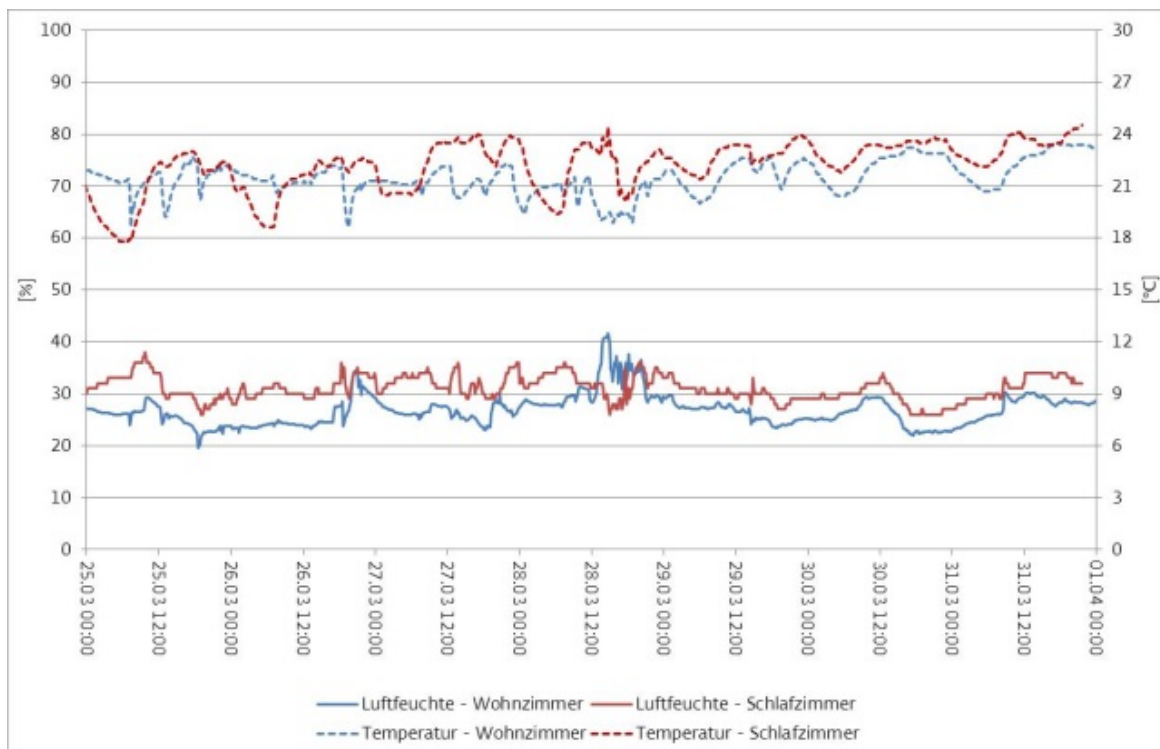


Abb. 49 : Thermisches Raumklima – Wohnung 2 (saniert)

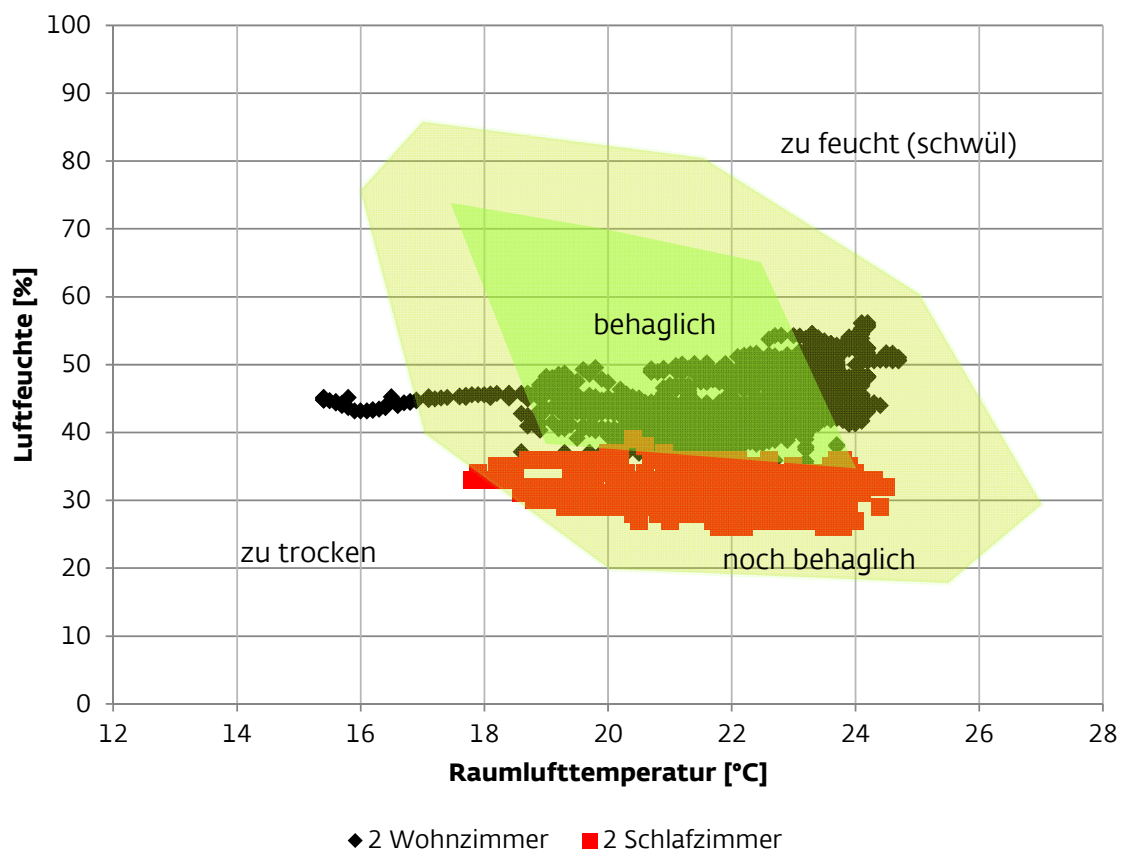


Abb. 50: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 2 (saniert)

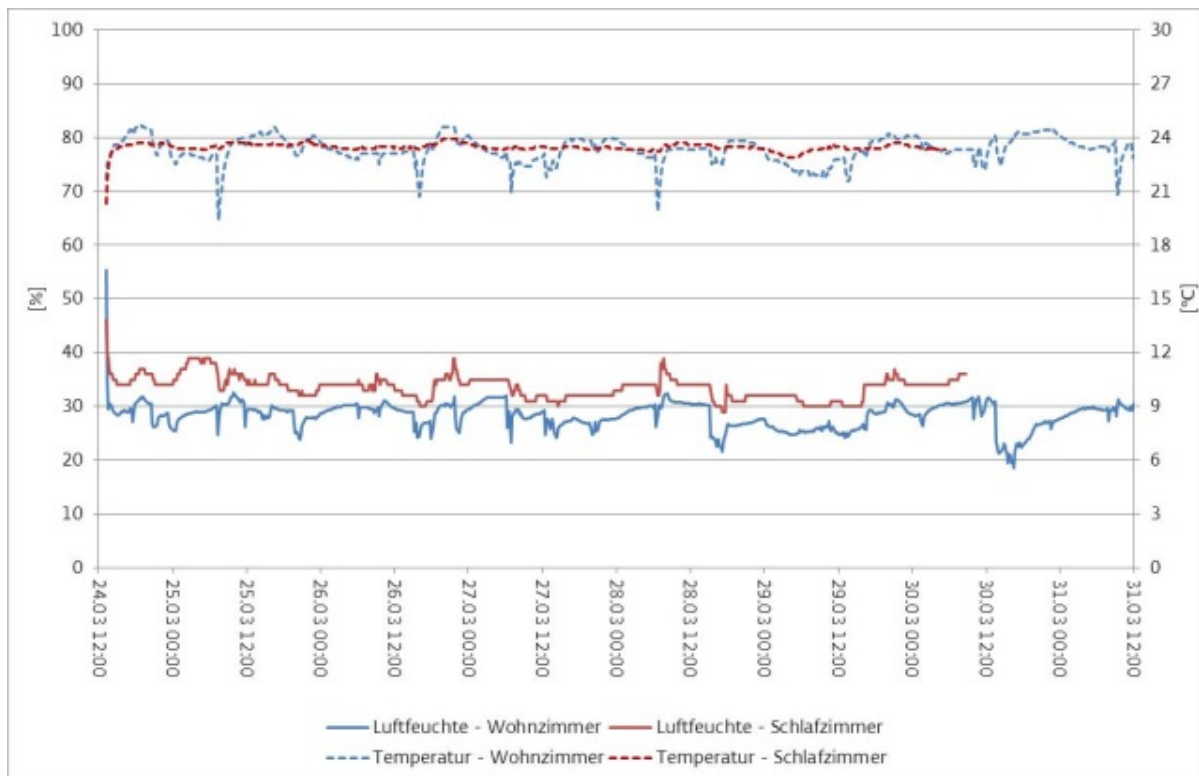


Abb. 51 : Thermisches Raumklima – Wohnung 3 (sanitiert)

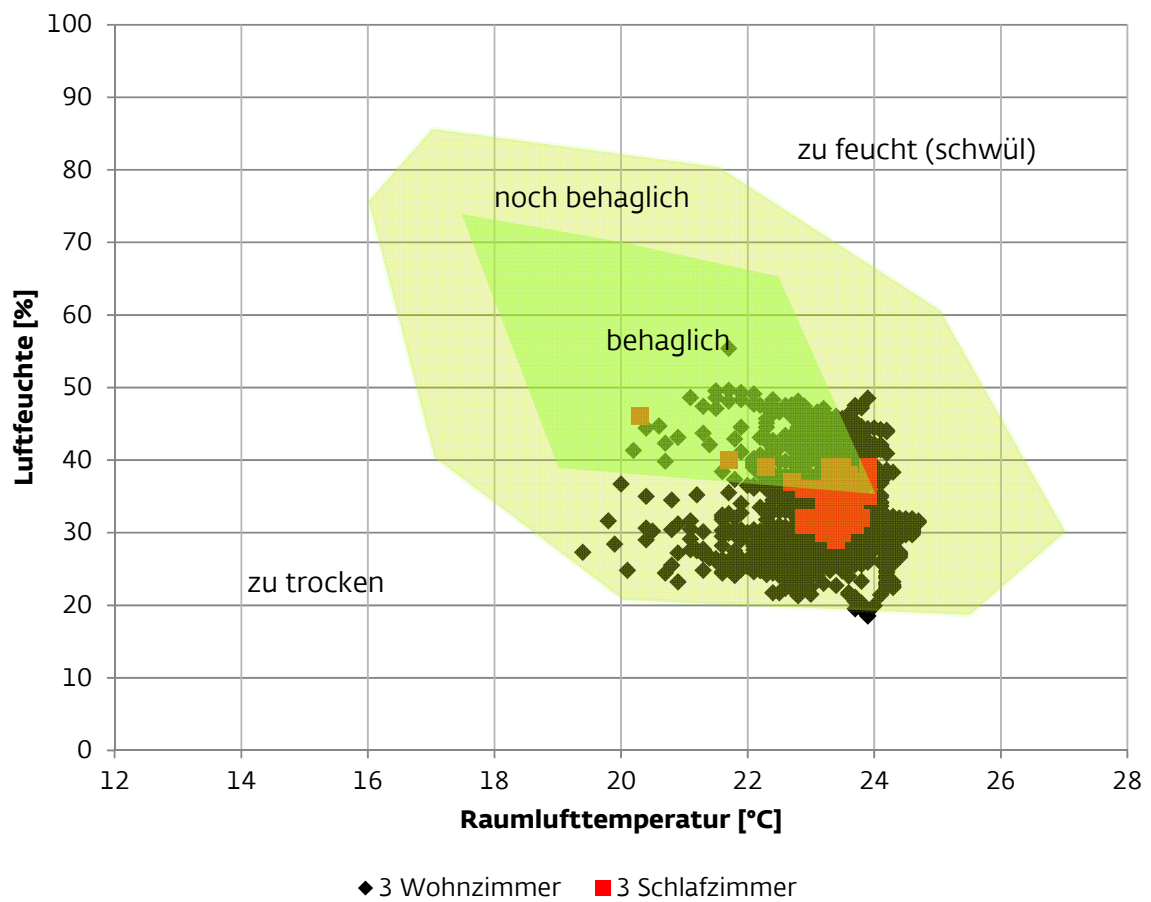


Abb. 52: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 3 (sanitiert)

Die Raumluft im Wohnzimmer ist eher trocken



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

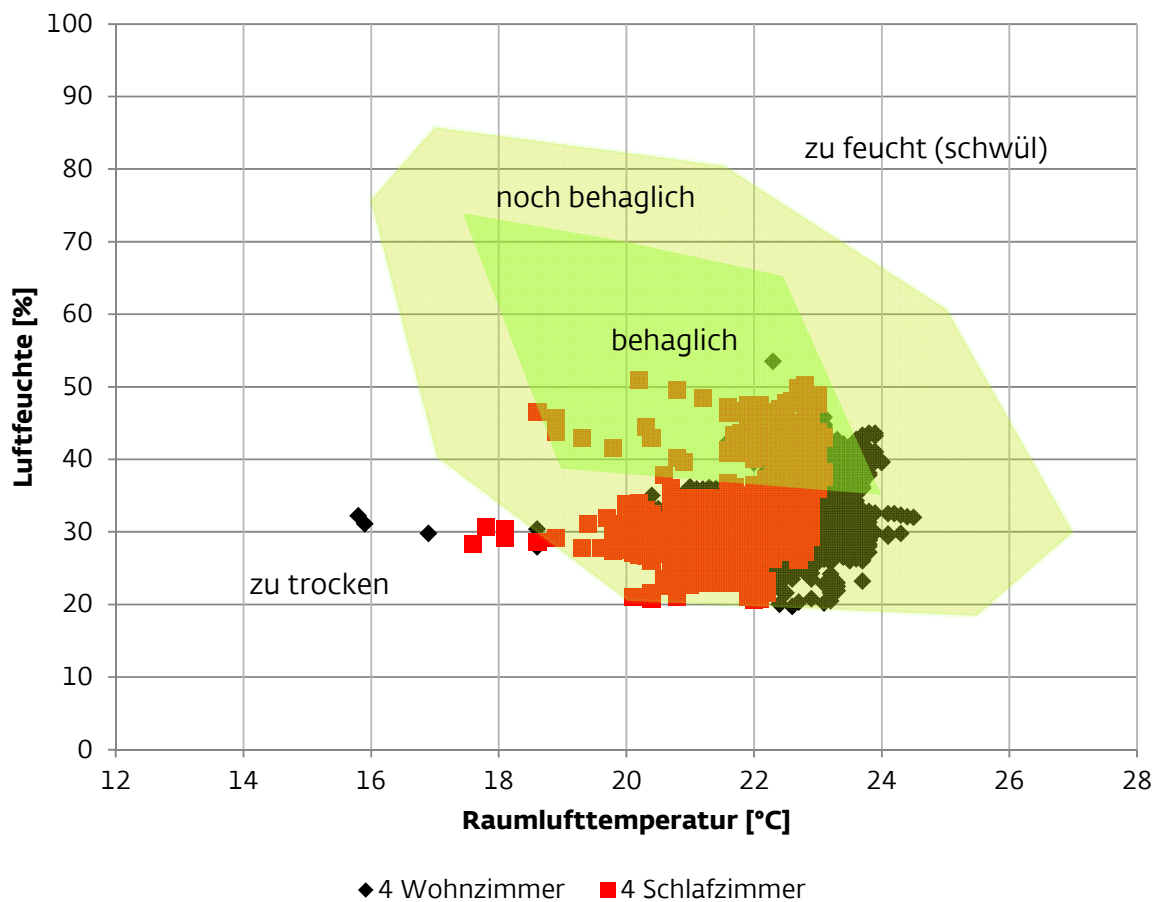


Abb. 54: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 4 (saniert)

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

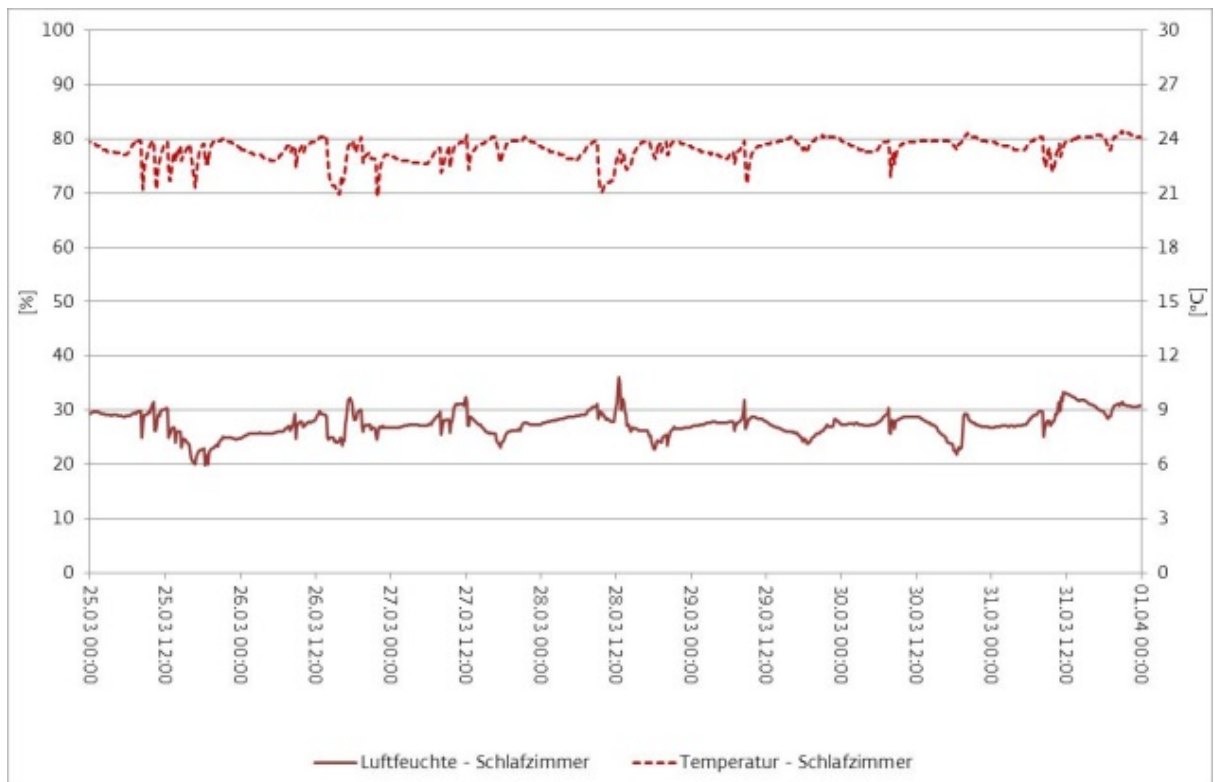


Abb. 55 : Thermisches Raumklima – Wohnung 5 (saniert)

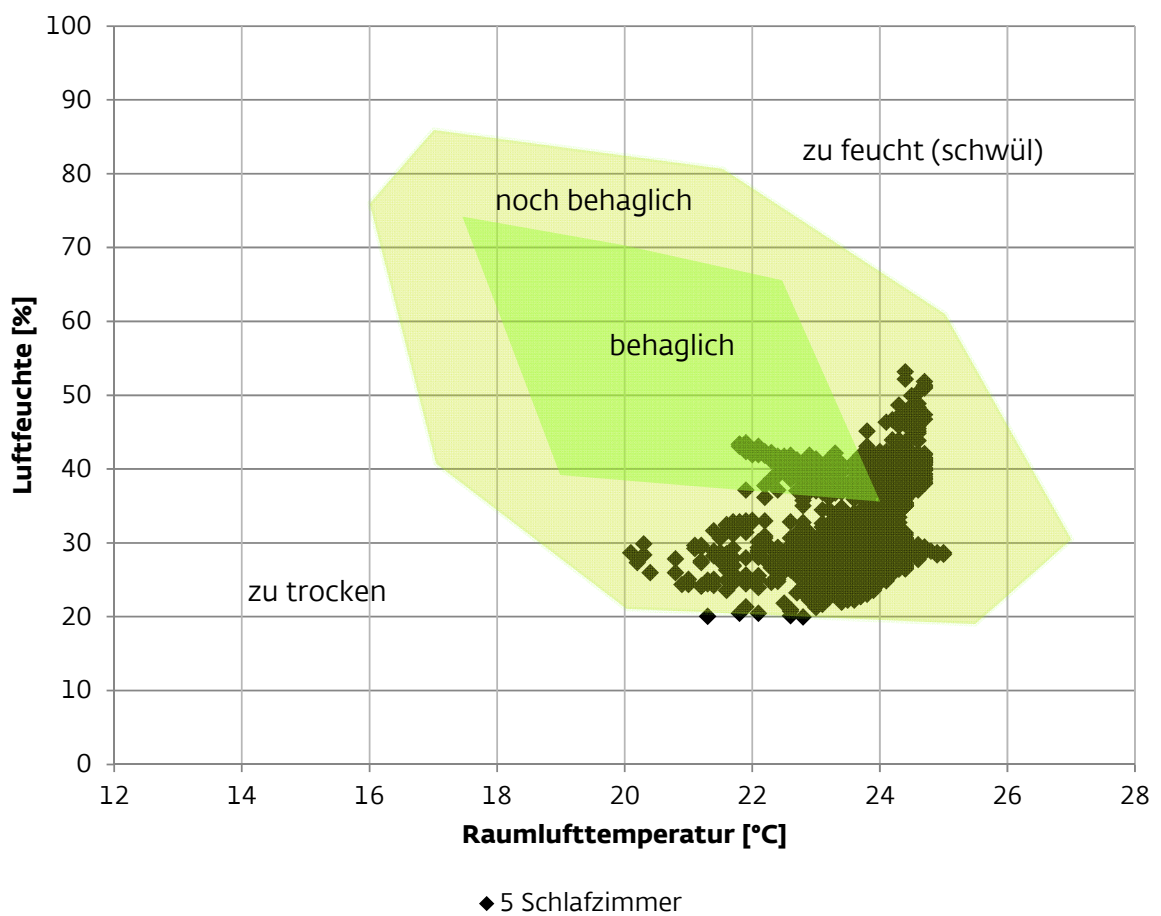


Abb. 56: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 5 (saniert)

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



Abb. 57 : Thermisches Raumklima – Wohnung 6

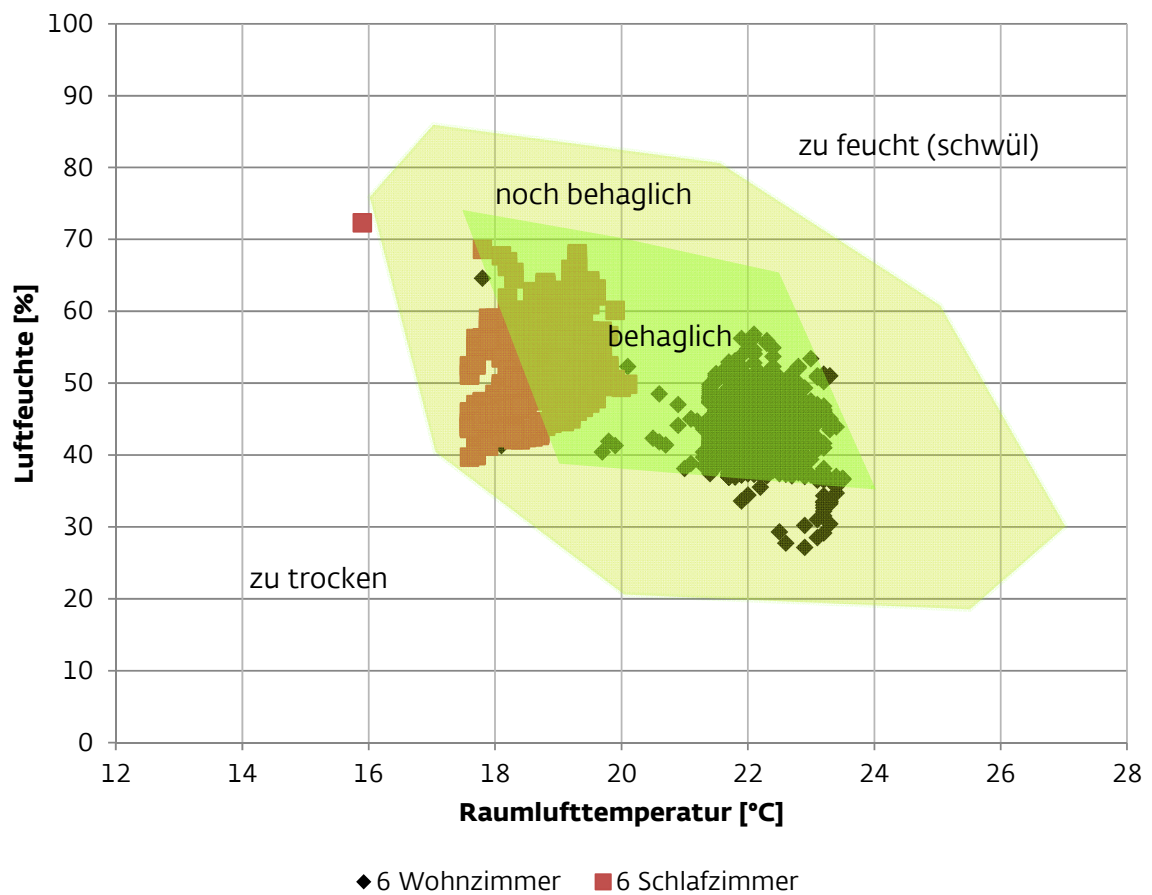


Abb. 58: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 6 (saniert)

Im Schlafzimmer ist es eher kühl.



Abb. 59 : Thermisches Raumklima – Wohnung 7

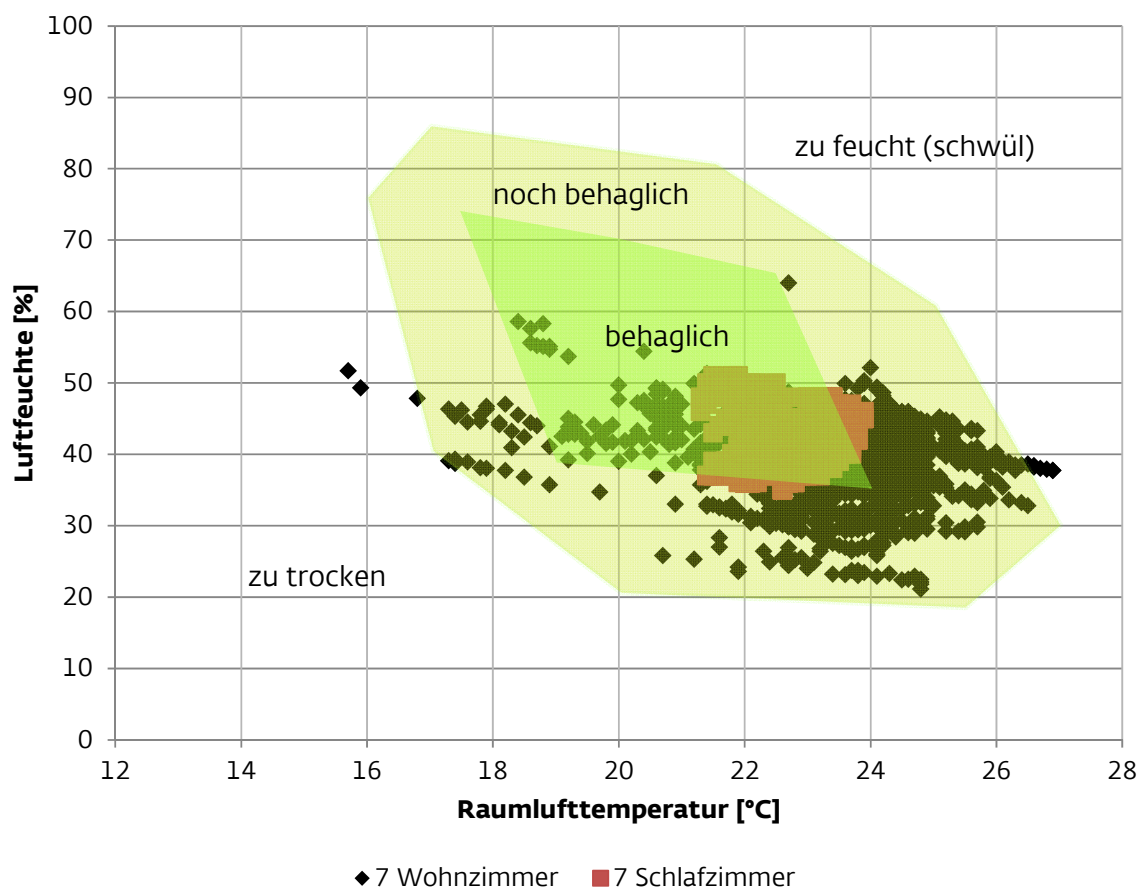


Abb. 60: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 7 (unsaniert)

Die Raumlufttemperatur im Wohnzimmer streut sehr stark.



Abb. 61 : Thermisches Raumklima – Wohnung 8

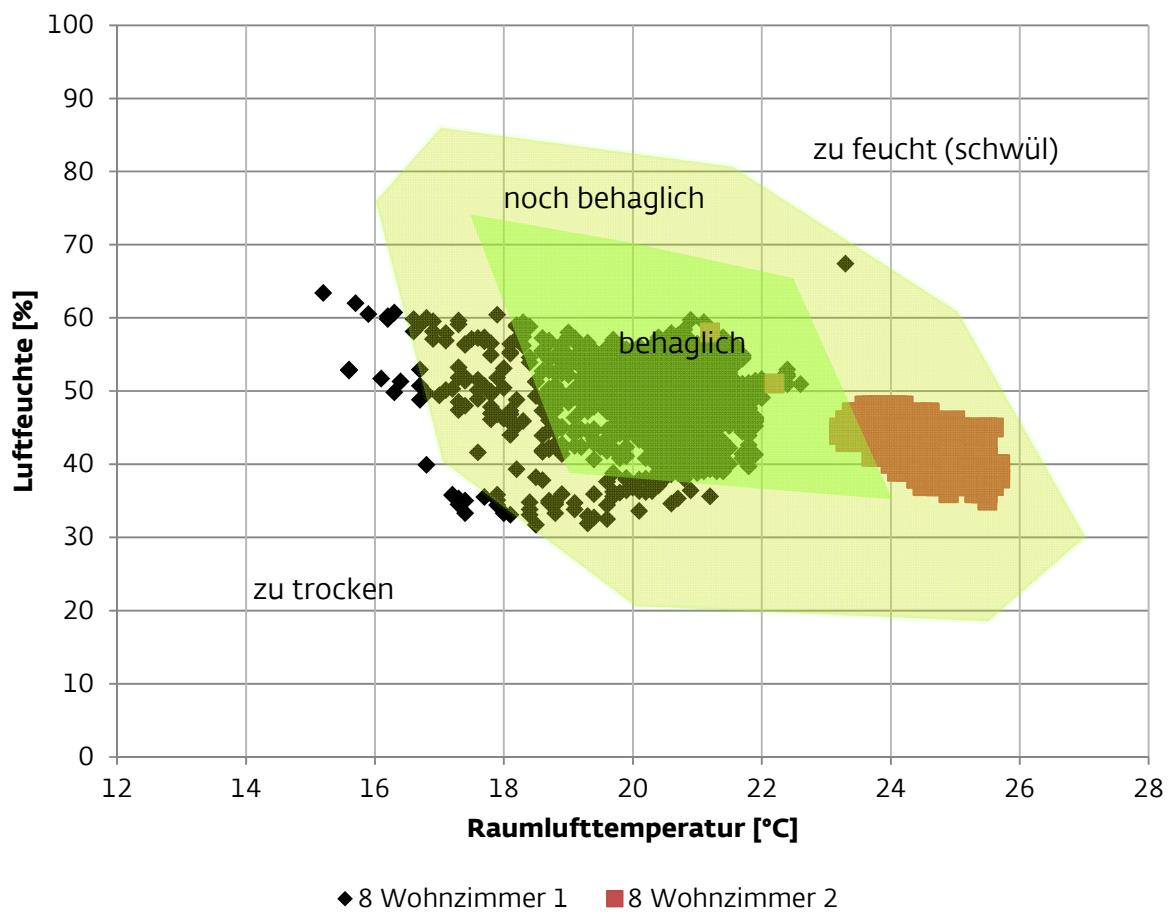


Abb. 62: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 8 (unsaniert)

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

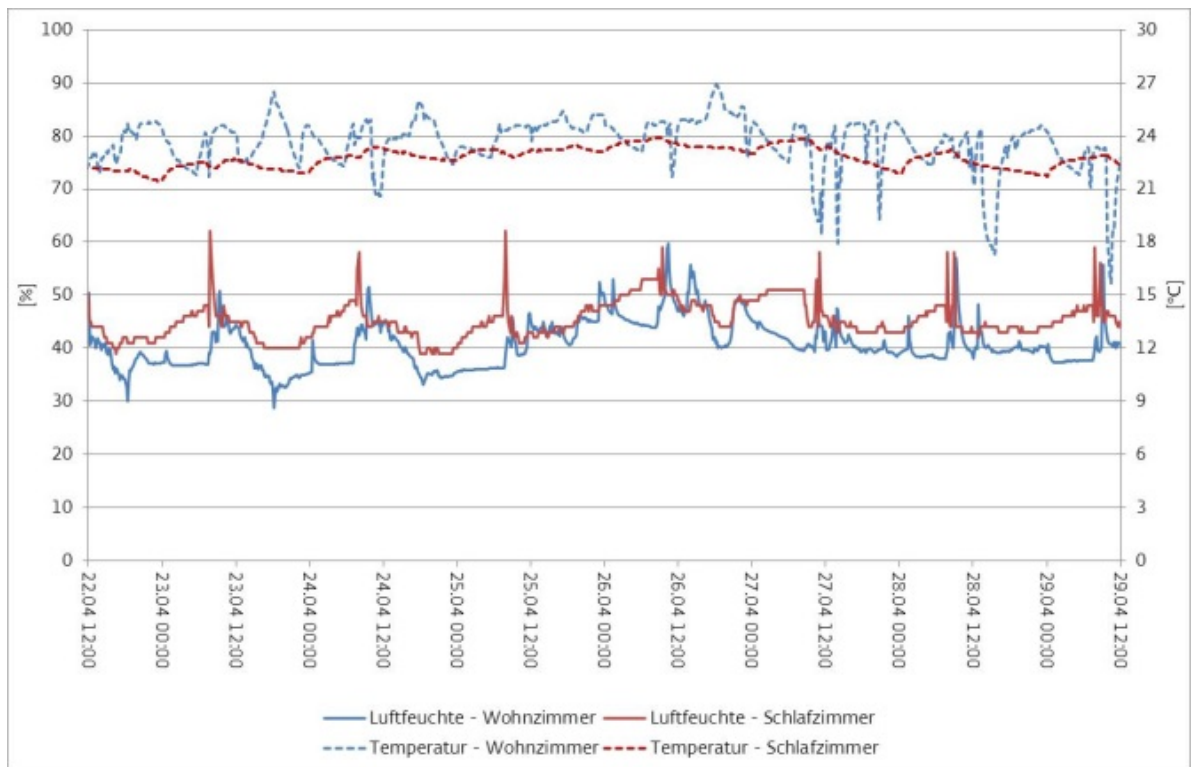


Abb. 63 : Thermisches Raumklima – Wohnung 9 (unsaniert)

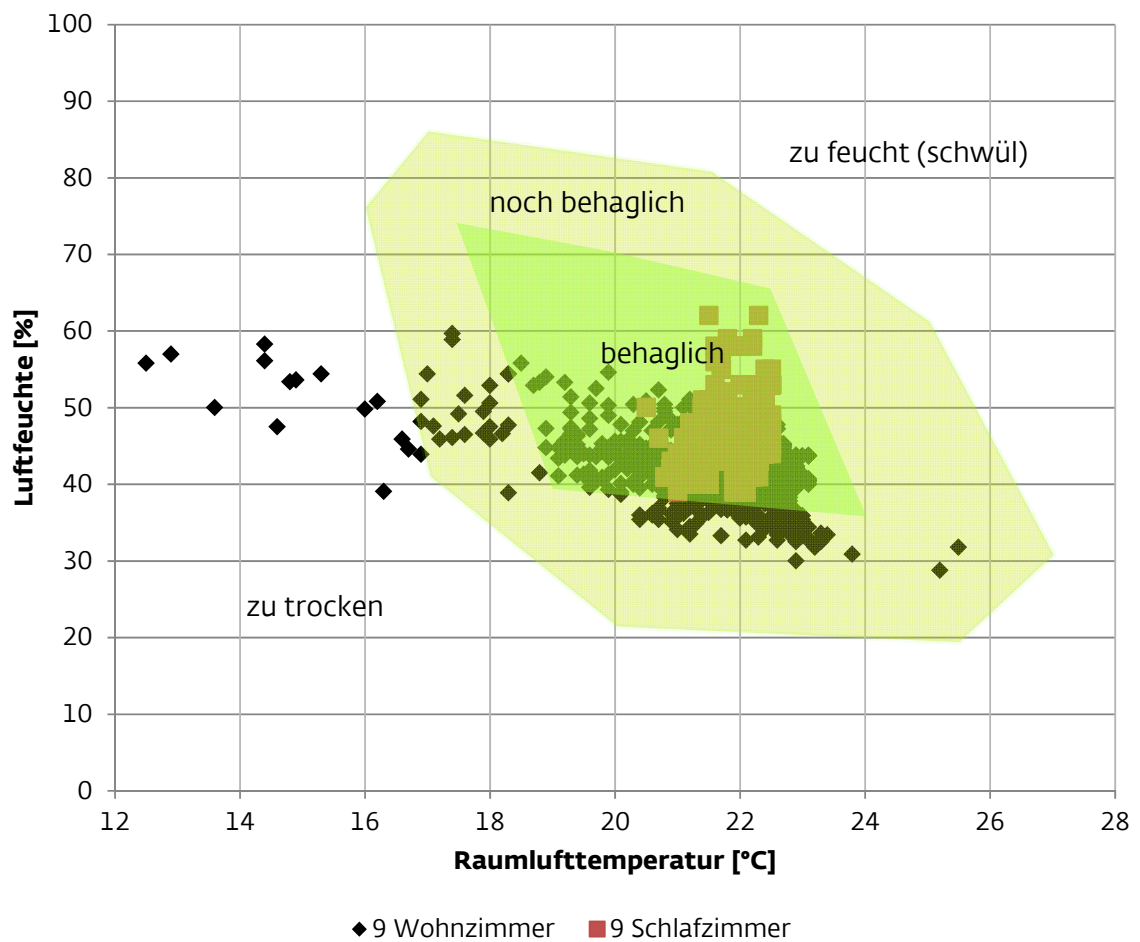


Abb. 64: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 9 (unsaniert)

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

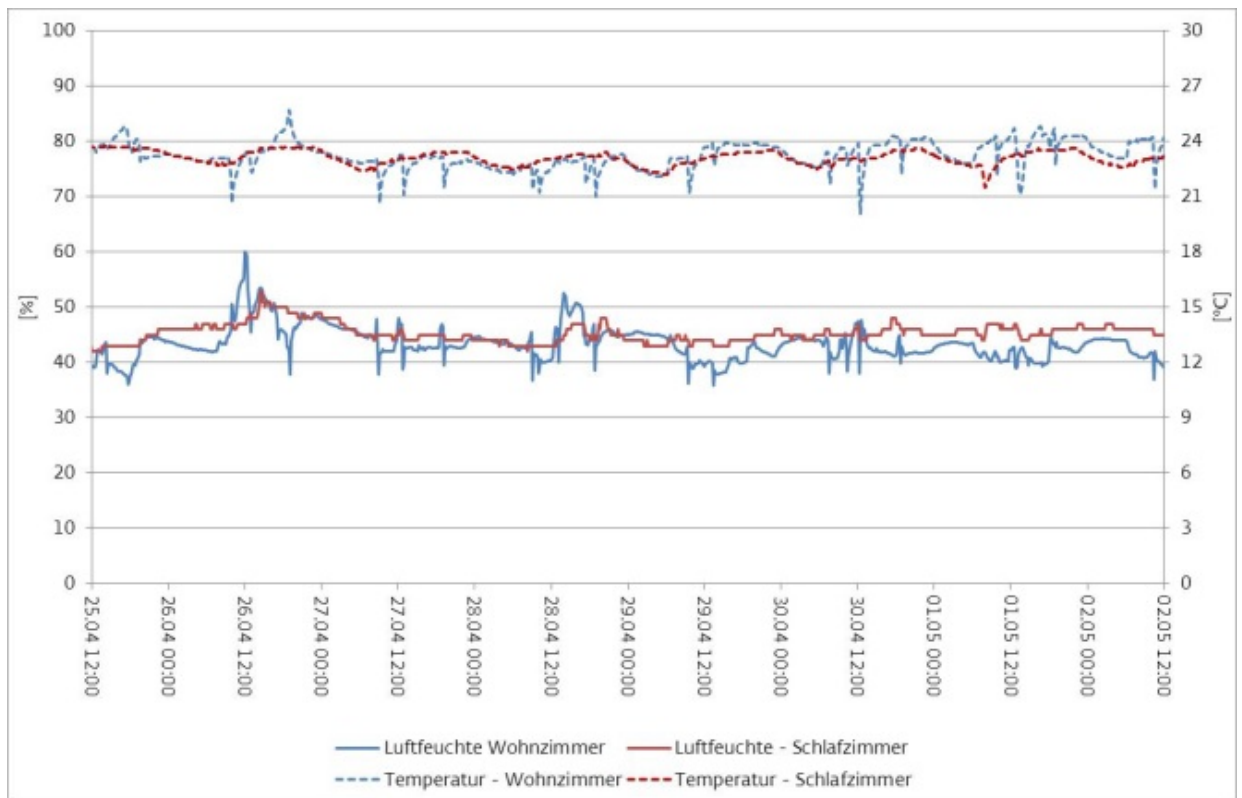


Abb. 65 : Thermisches Raumklima – Wohnung 10

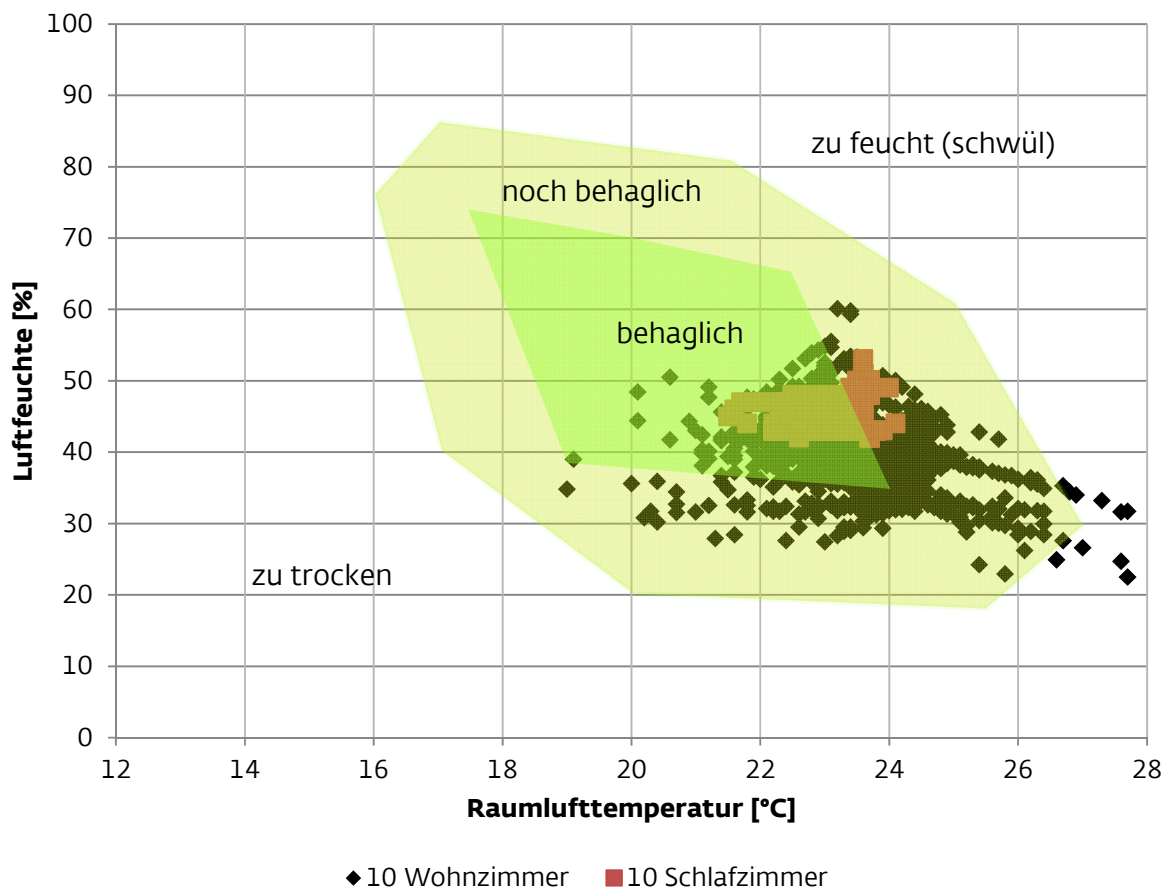


Abb. 66: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 10 (unsaniert)

Die Raumlufttemperatur ist im Wohnzimmer teilweise eher zu warm.

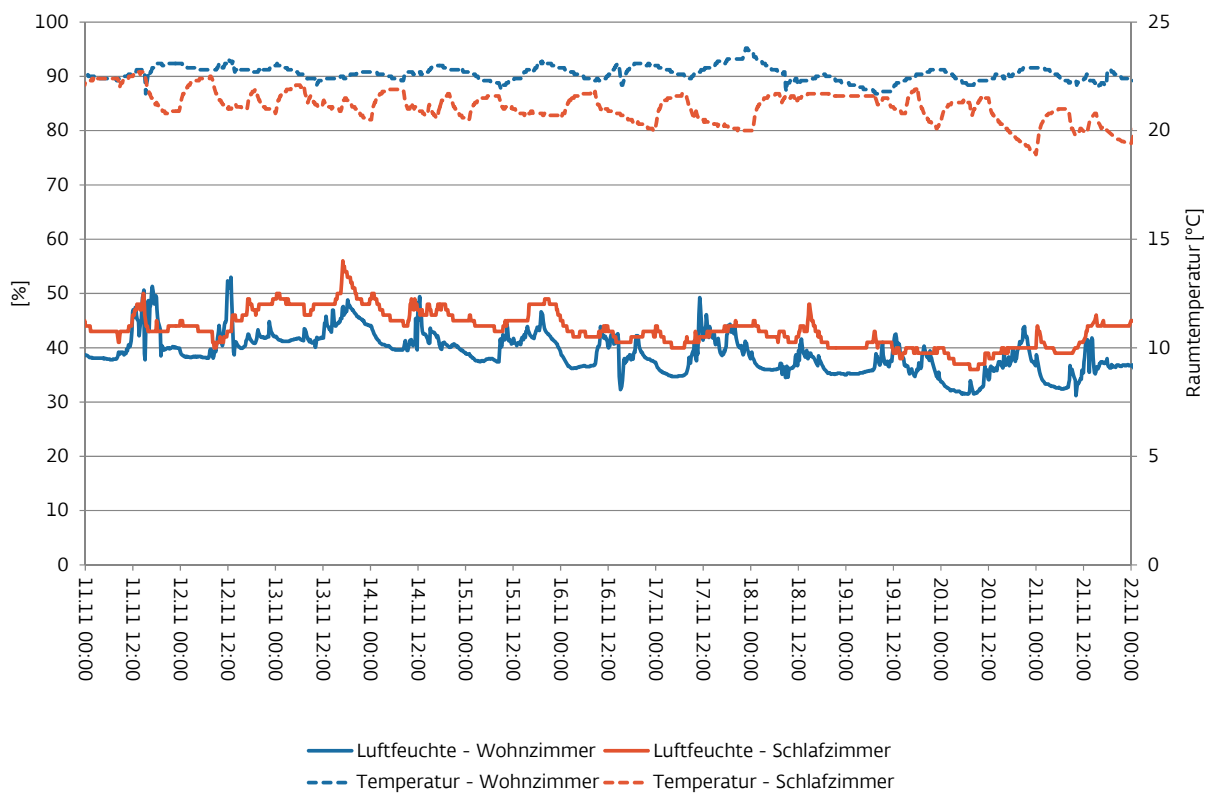


Abb. 67 : Thermisches Raumklima – Wohnung 11

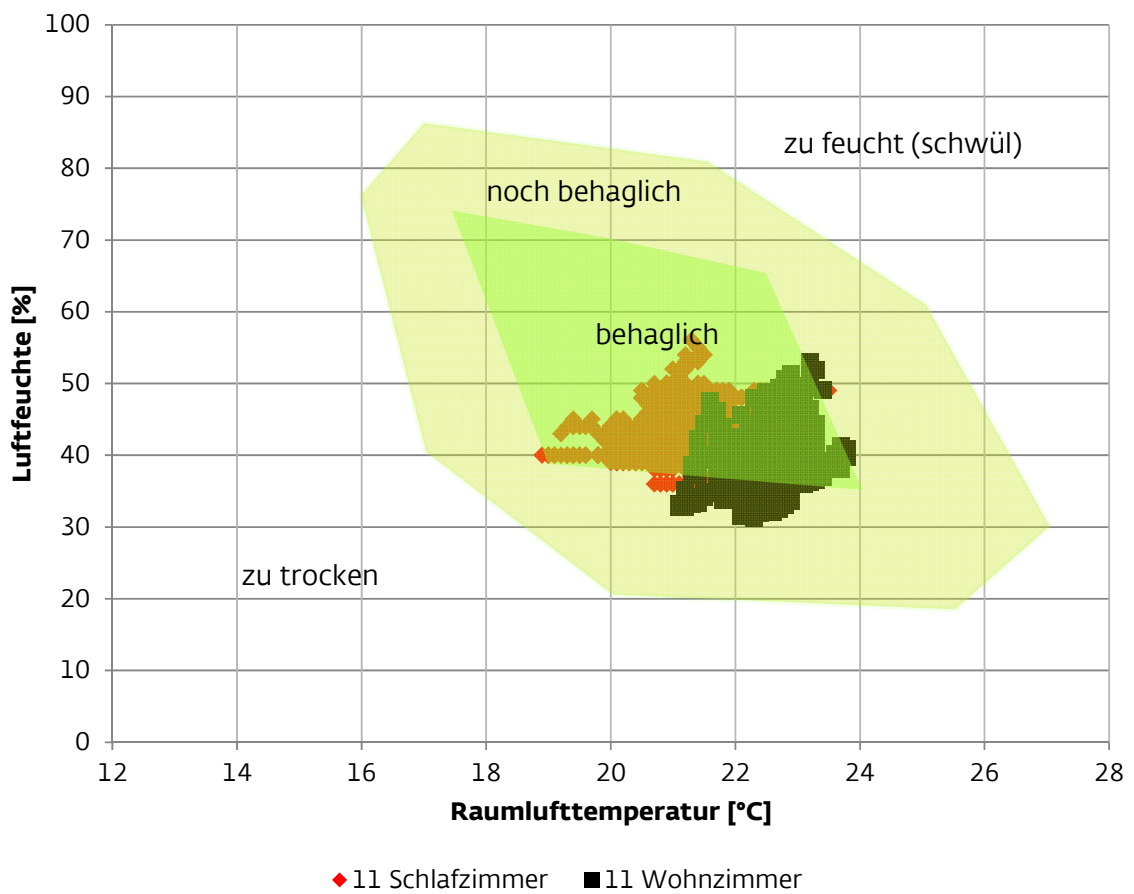


Abb. 68: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 11 (sanit)

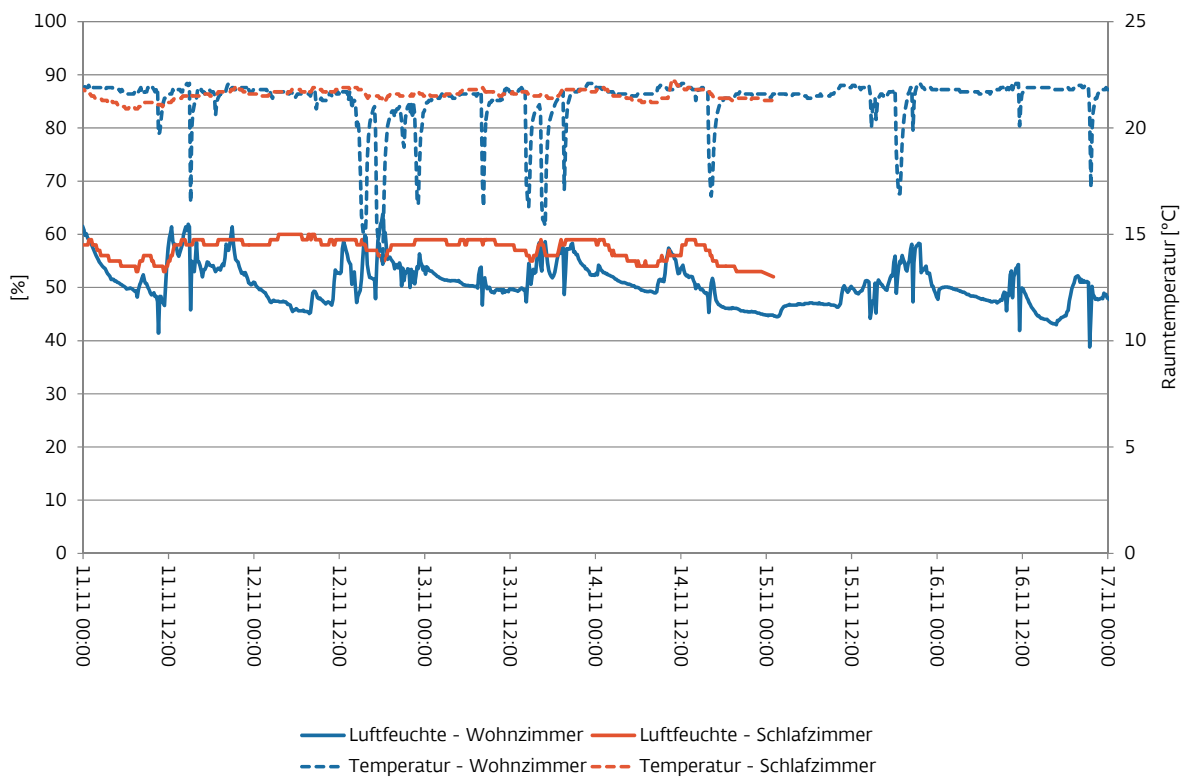


Abb. 69 : Thermisches Raumklima – Wohnung 12

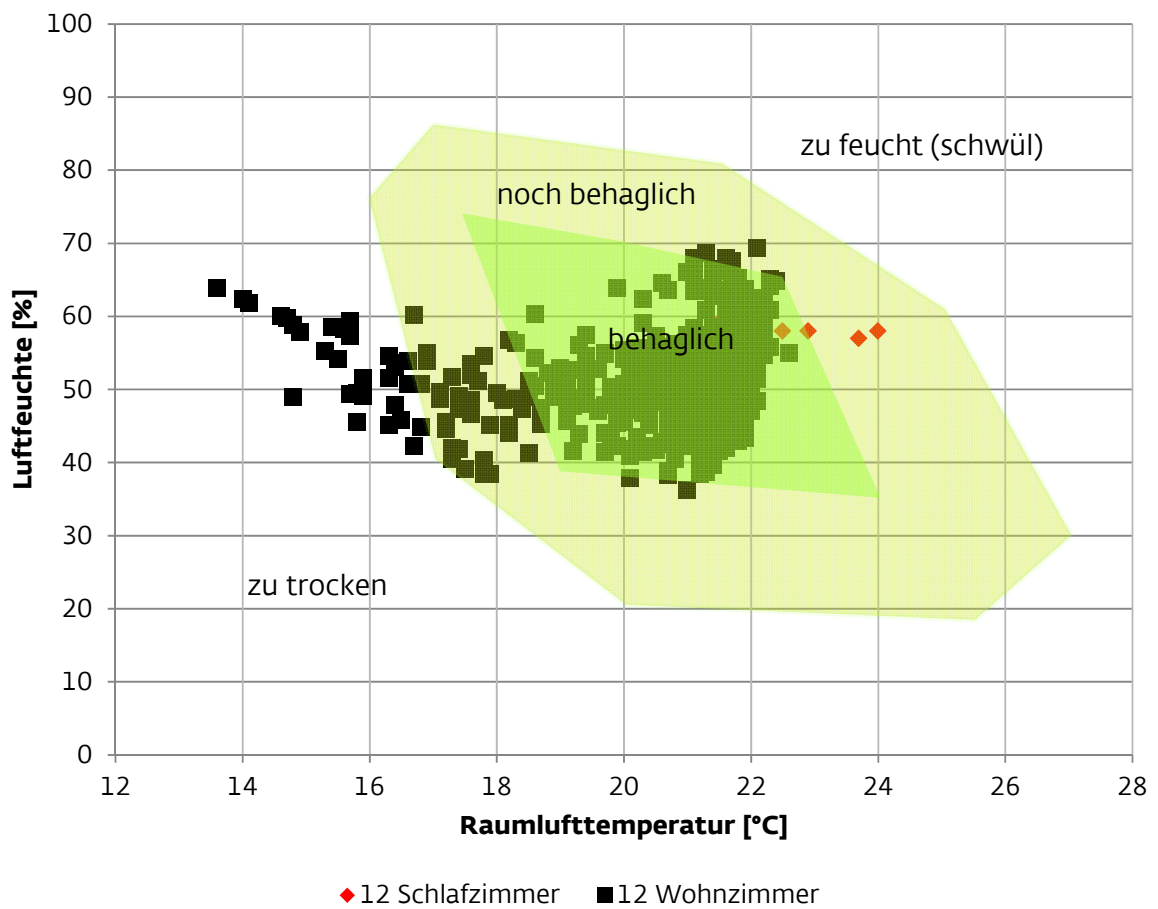


Abb. 70: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 12 (sanitert)

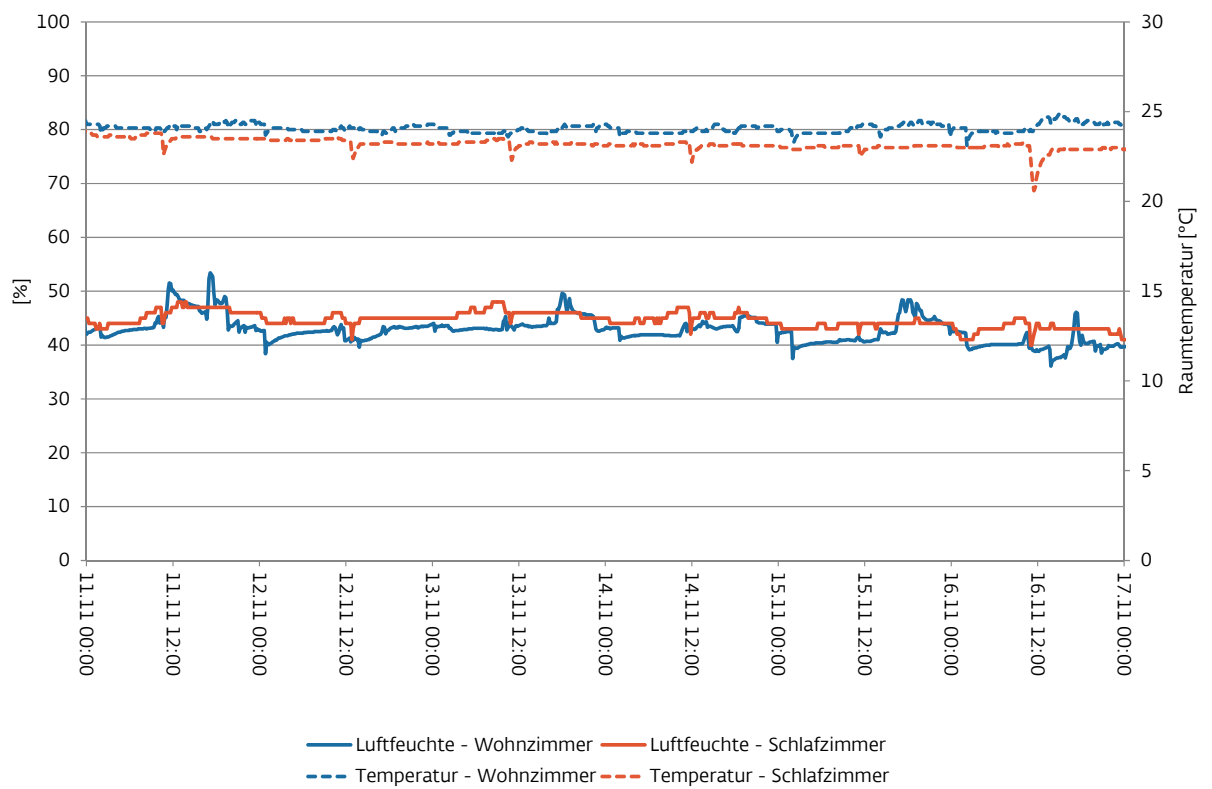


Abb. 71 : Thermisches Raumklima – Wohnung 13

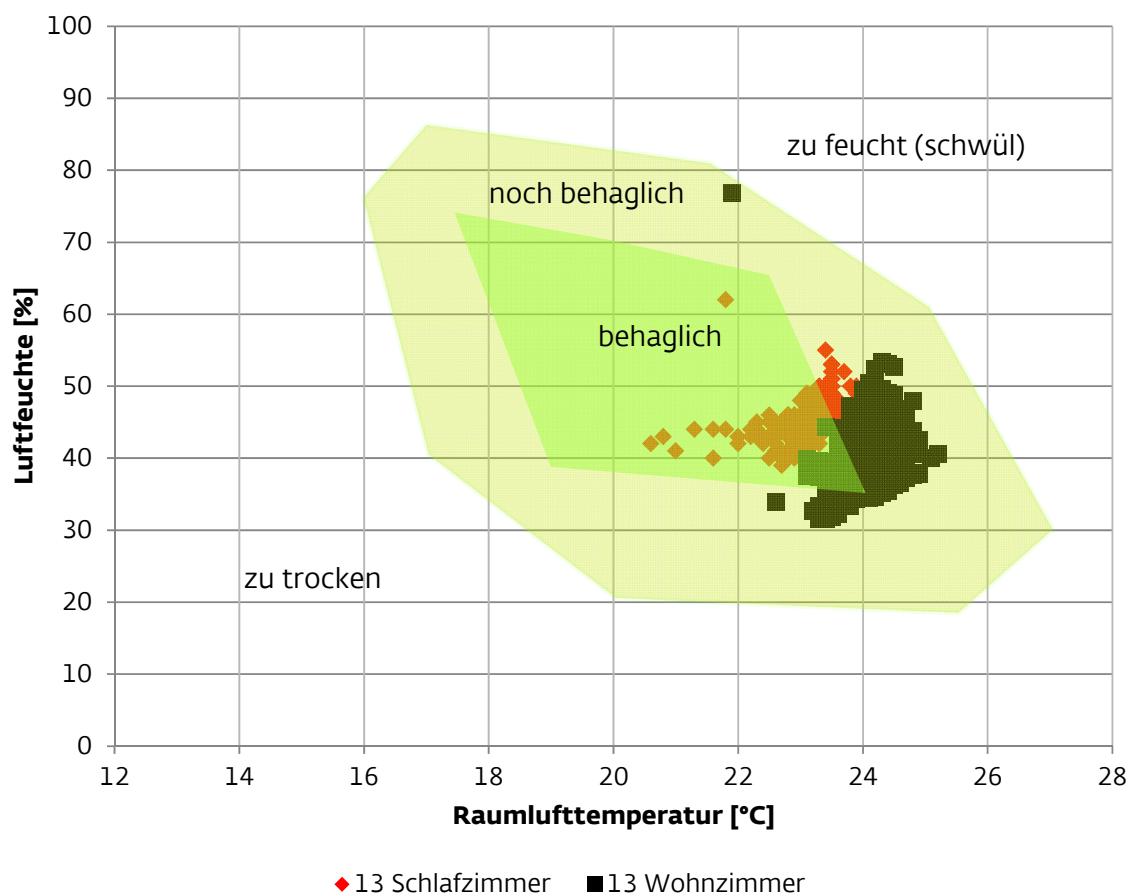


Abb. 72: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 13 (sanierter)

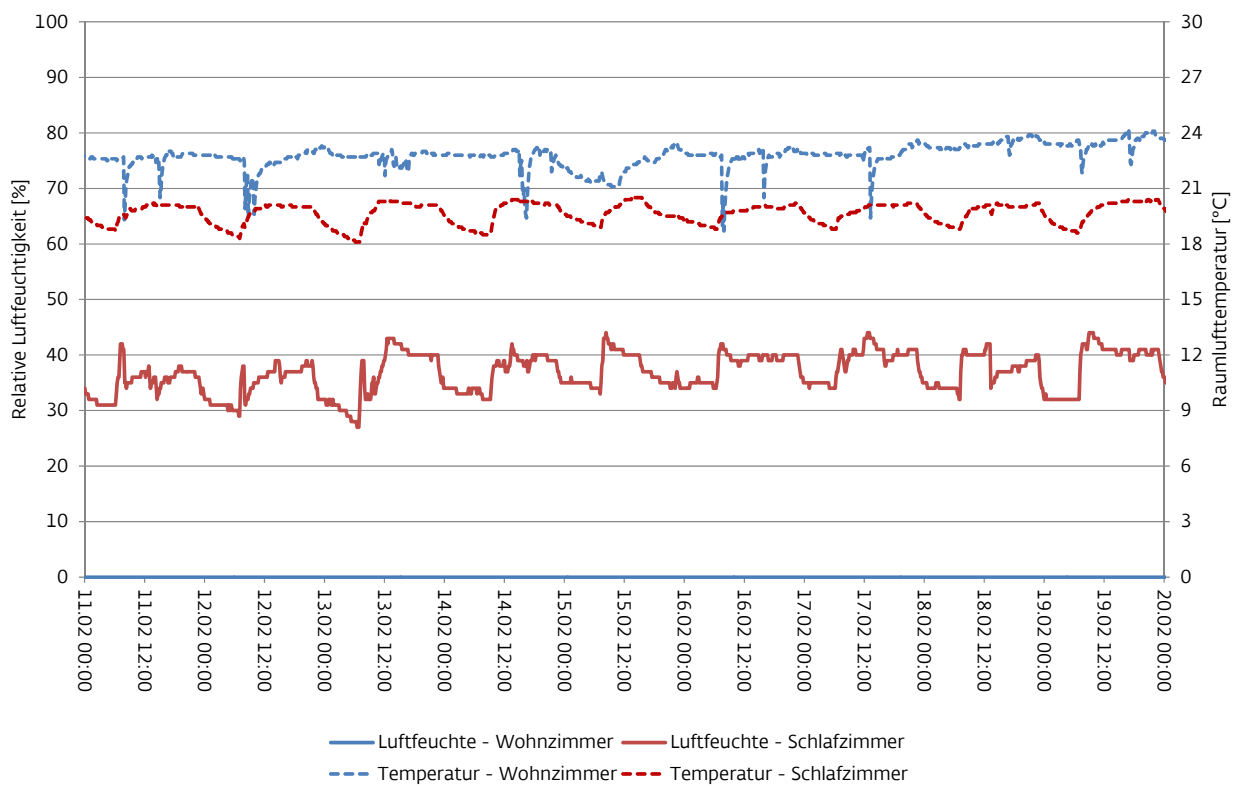


Abb. 73 : Thermisches Raumklima – Wohnung 14

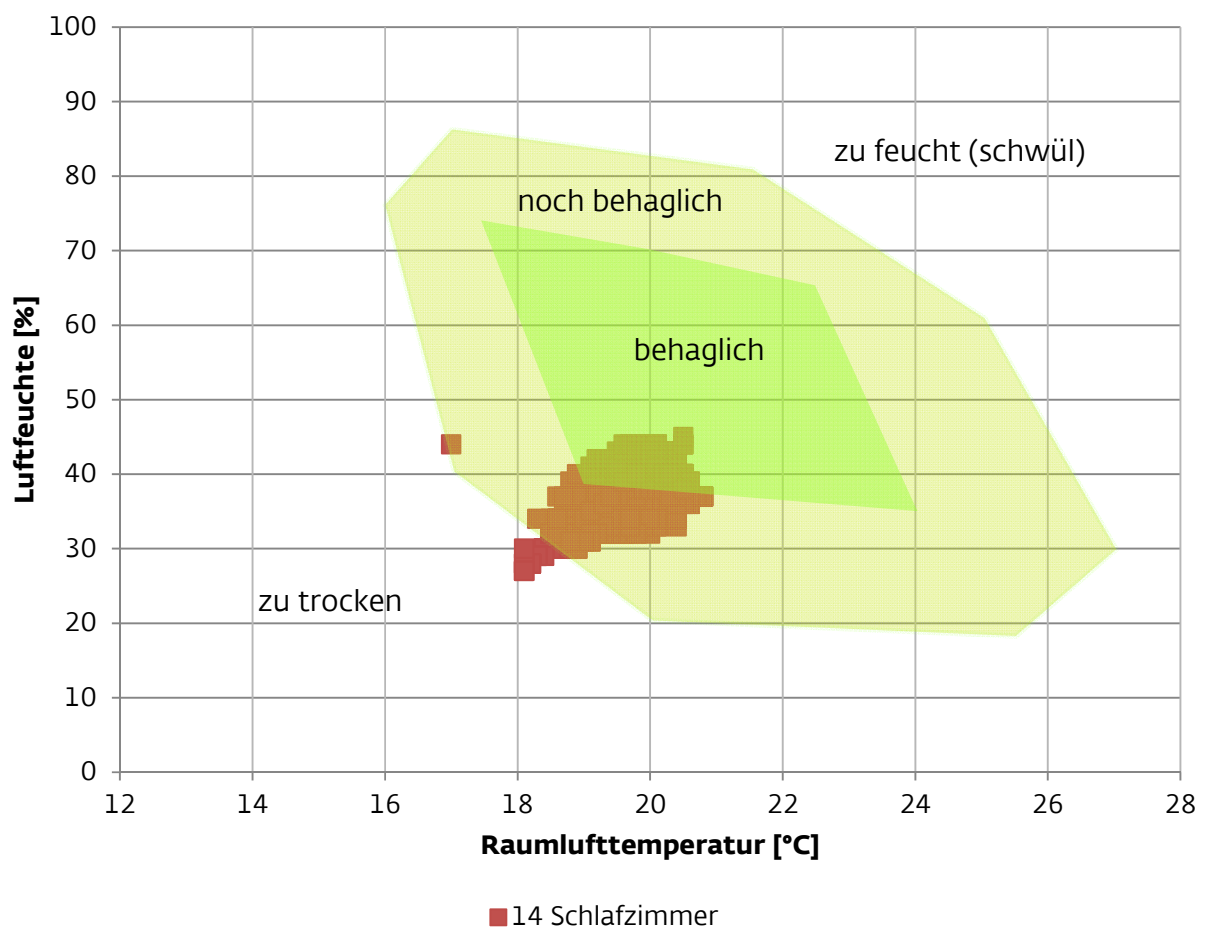


Abb. 74: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 14 (sanierter)

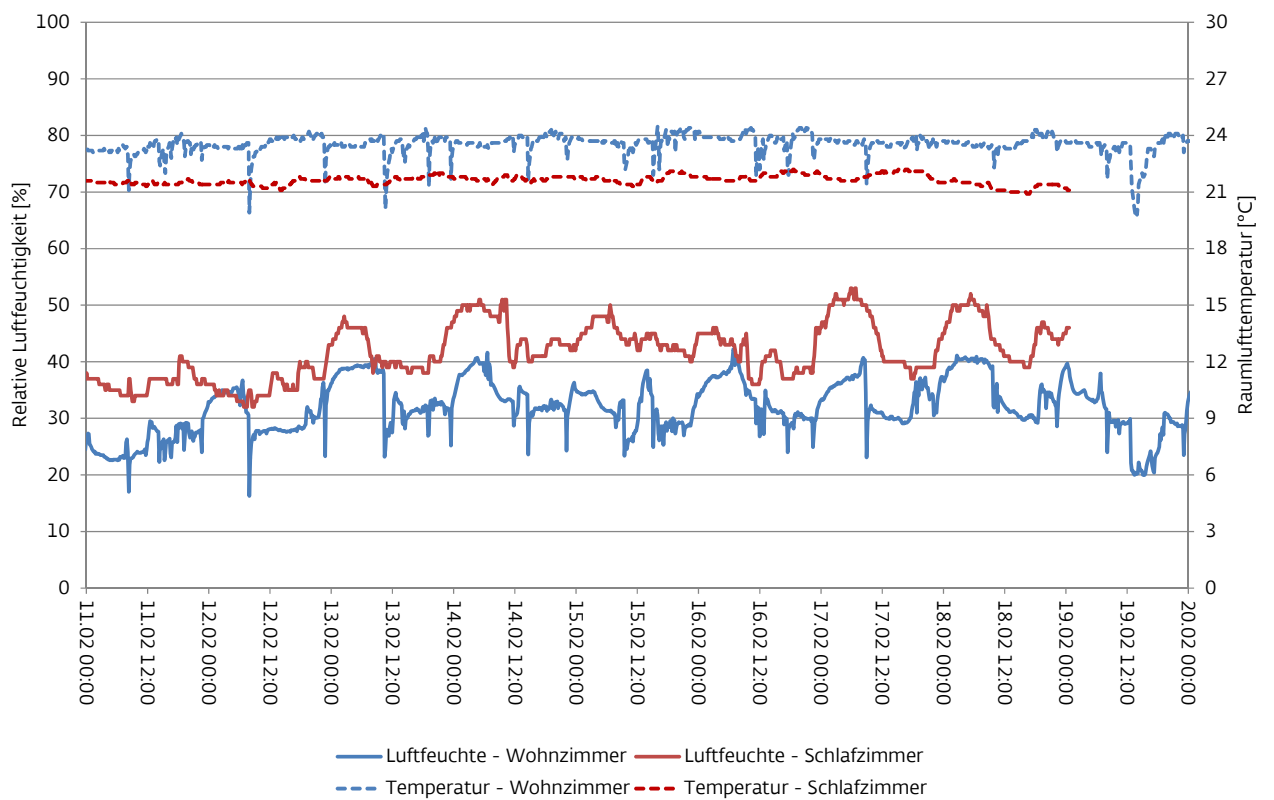


Abb. 75 : Thermisches Raumklima – Wohnung 15

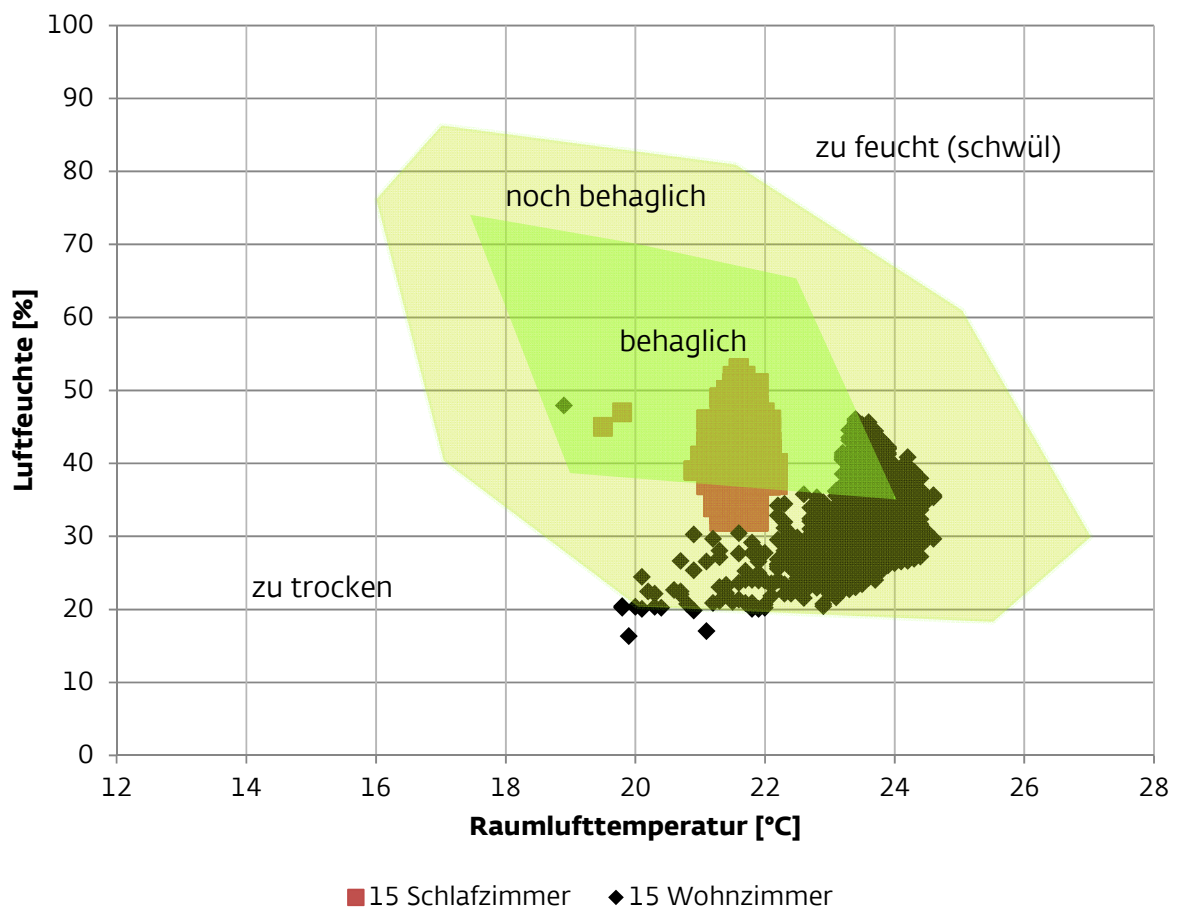


Abb. 76: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 15 (saniert)

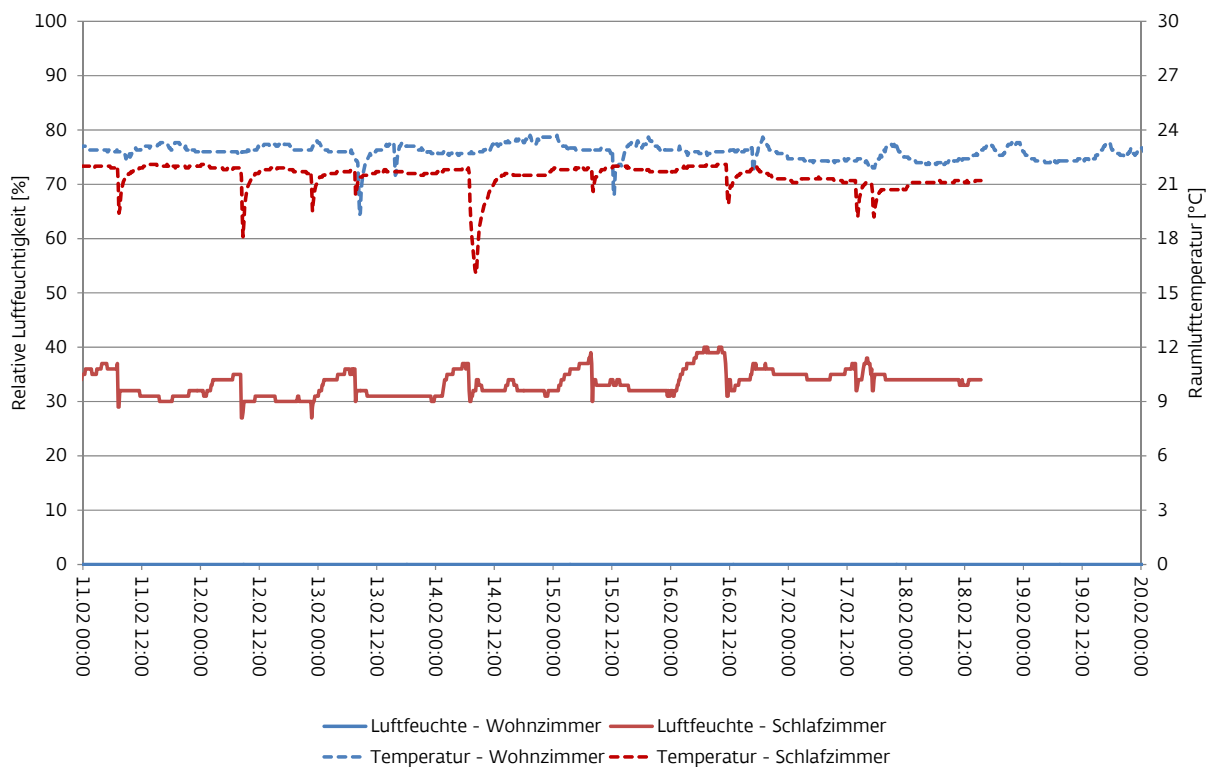


Abb. 77 : Thermisches Raumklima – Wohnung 16

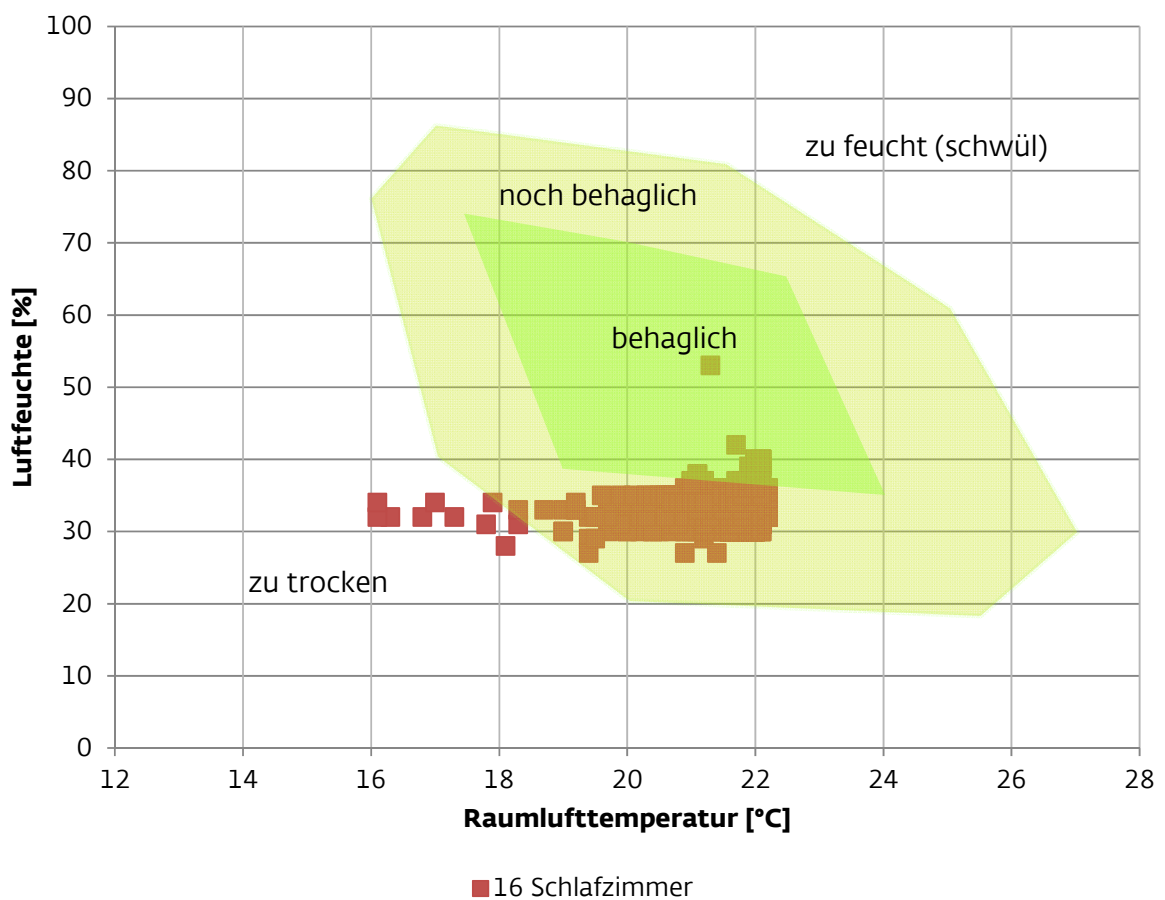


Abb. 78: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 16 (sanitert)

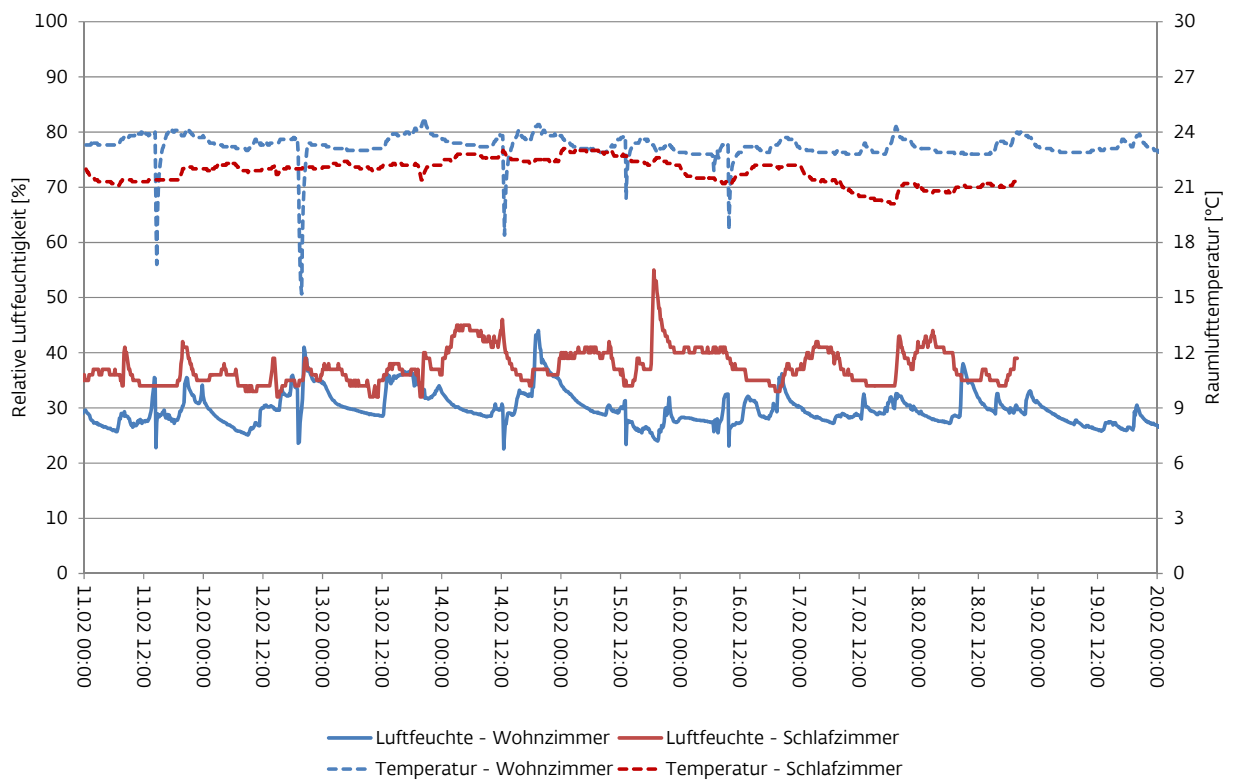


Abb. 79 : Thermisches Raumklima – Wohnung 17

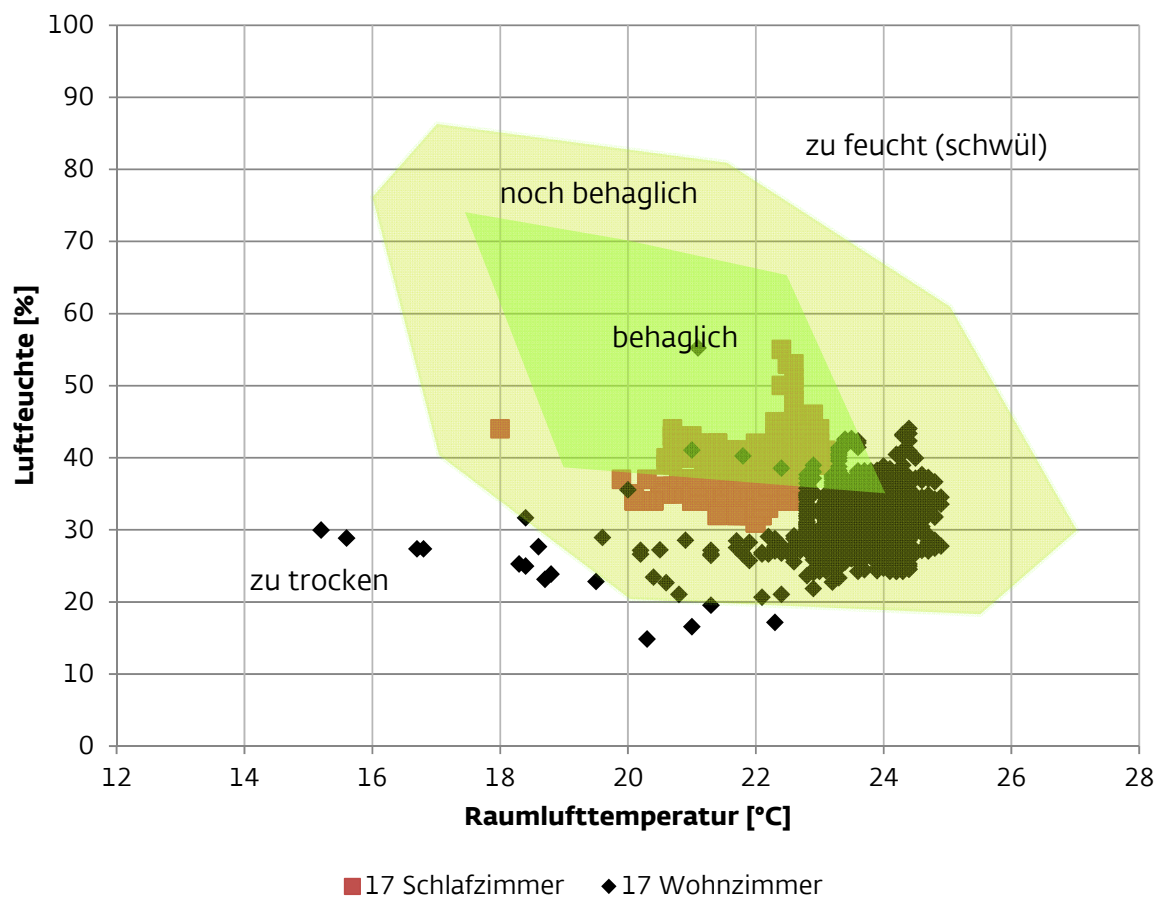


Abb. 80: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 17 (sanierter)

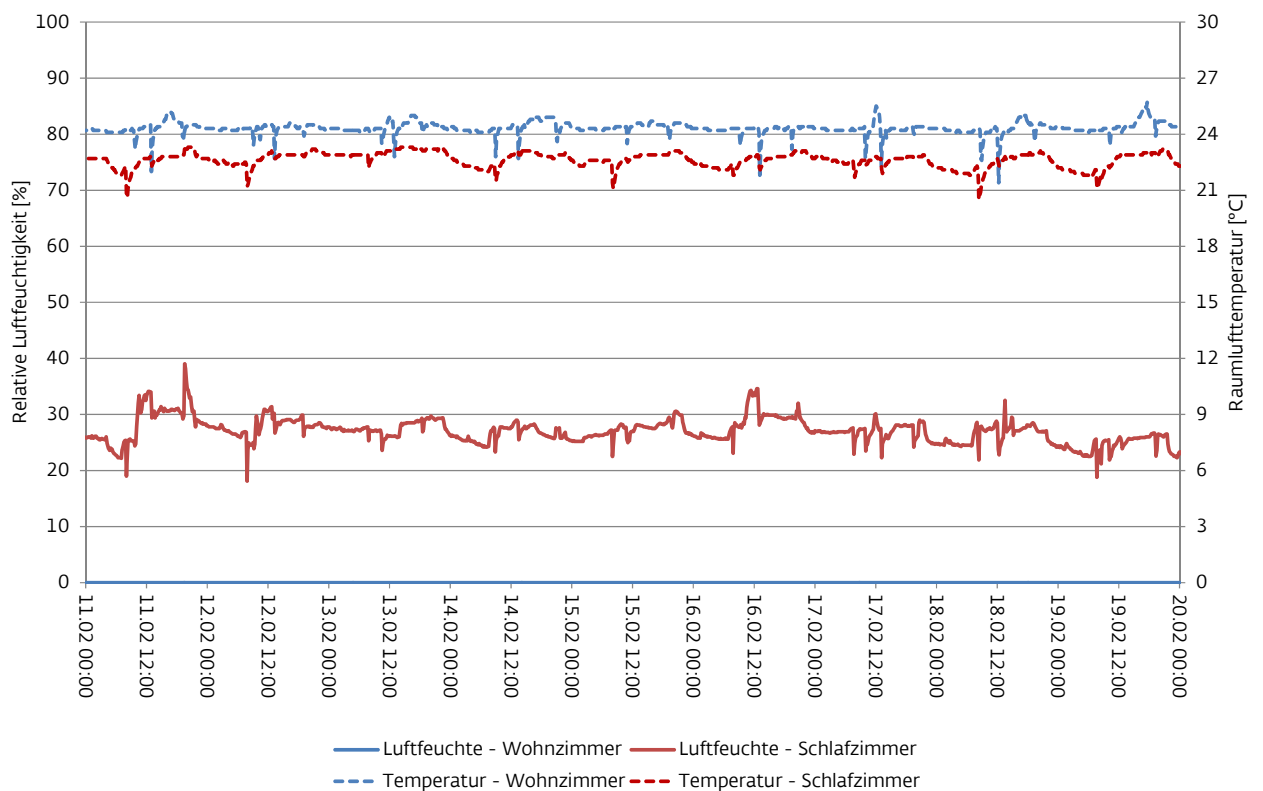


Abb. 81 : Thermisches Raumklima – Wohnung 18

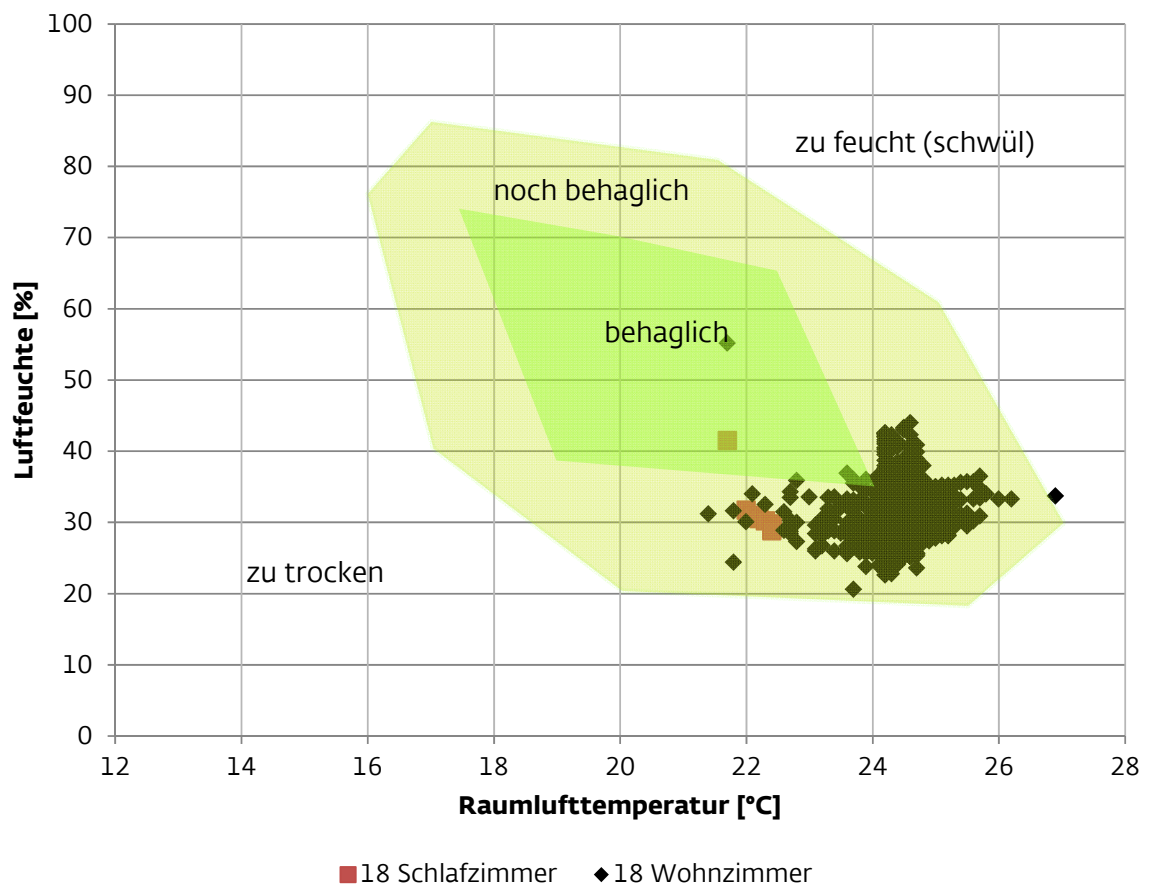


Abb. 82: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 18 (sanierter)

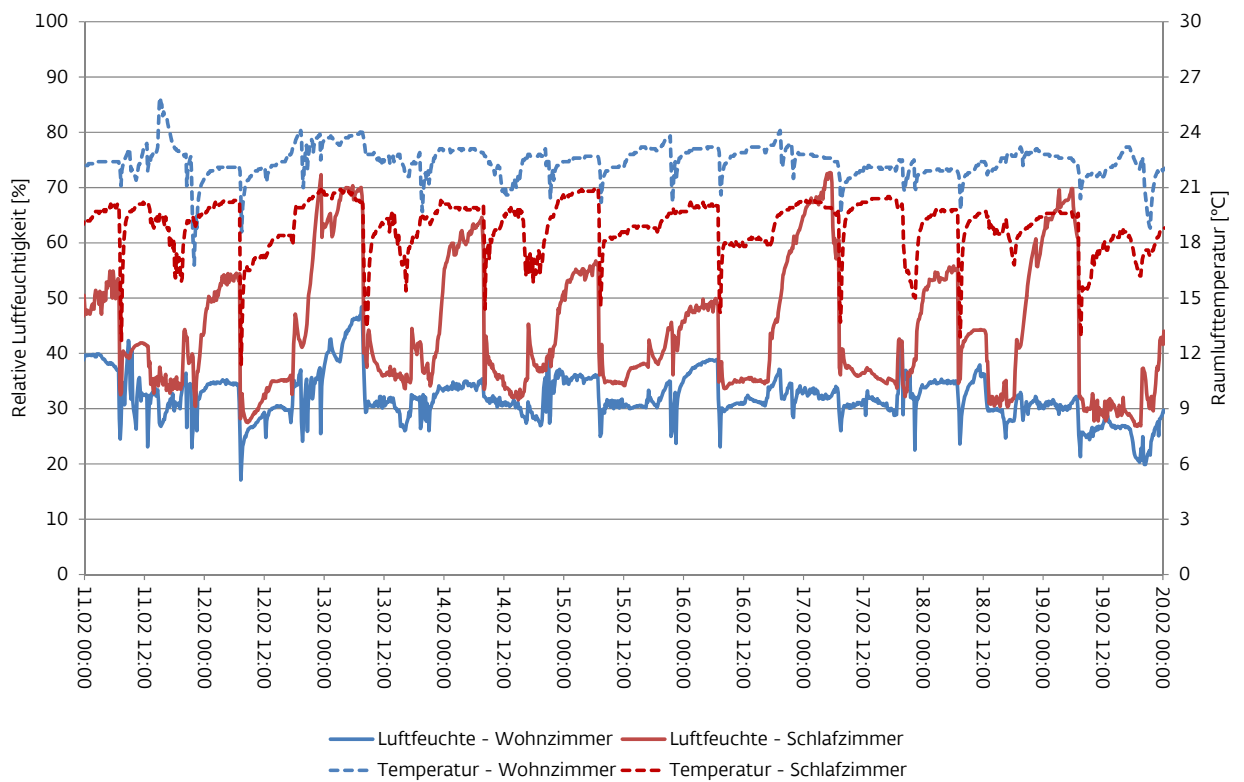


Abb. 83 : Thermisches Raumklima – Wohnung 19

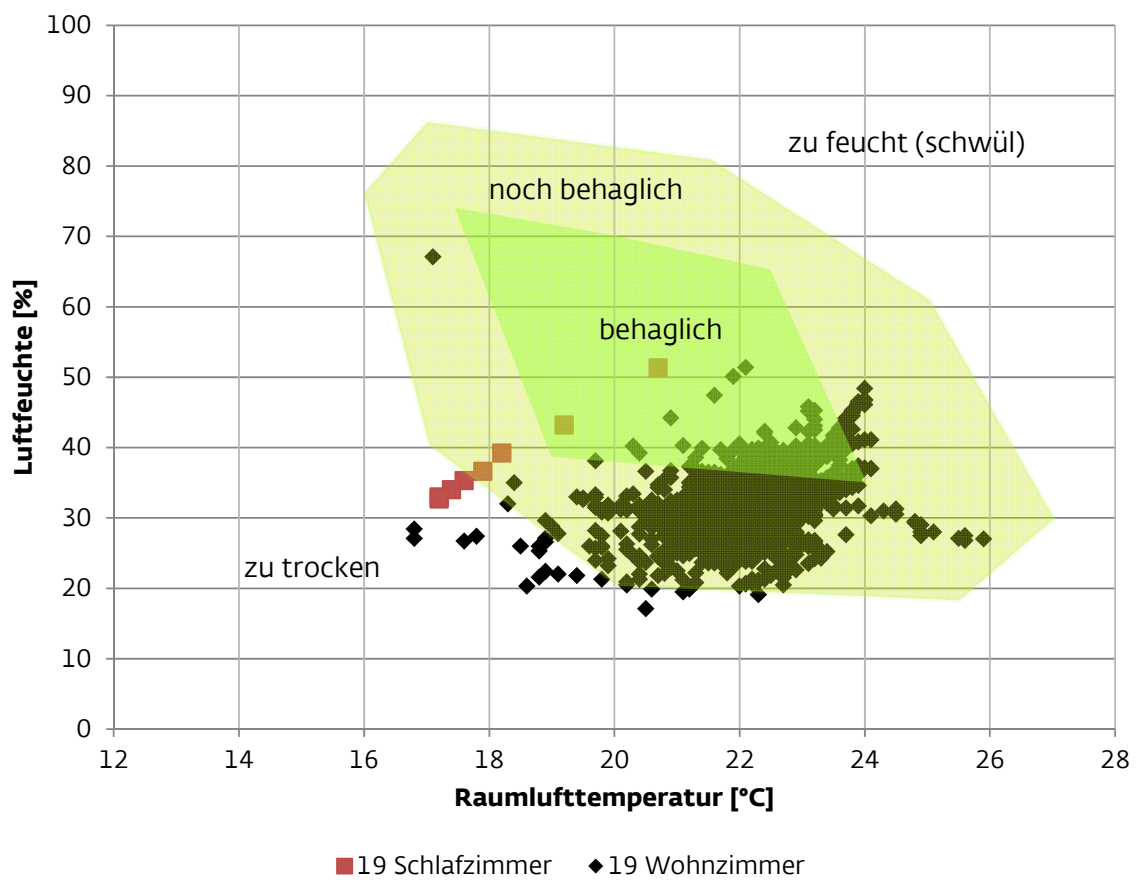


Abb. 84: Behaglichkeitsfeld – Wohnung 19 (saniert)

11.4 Detaillierte Analyse der CO₂-Konzentration pro Wohnung

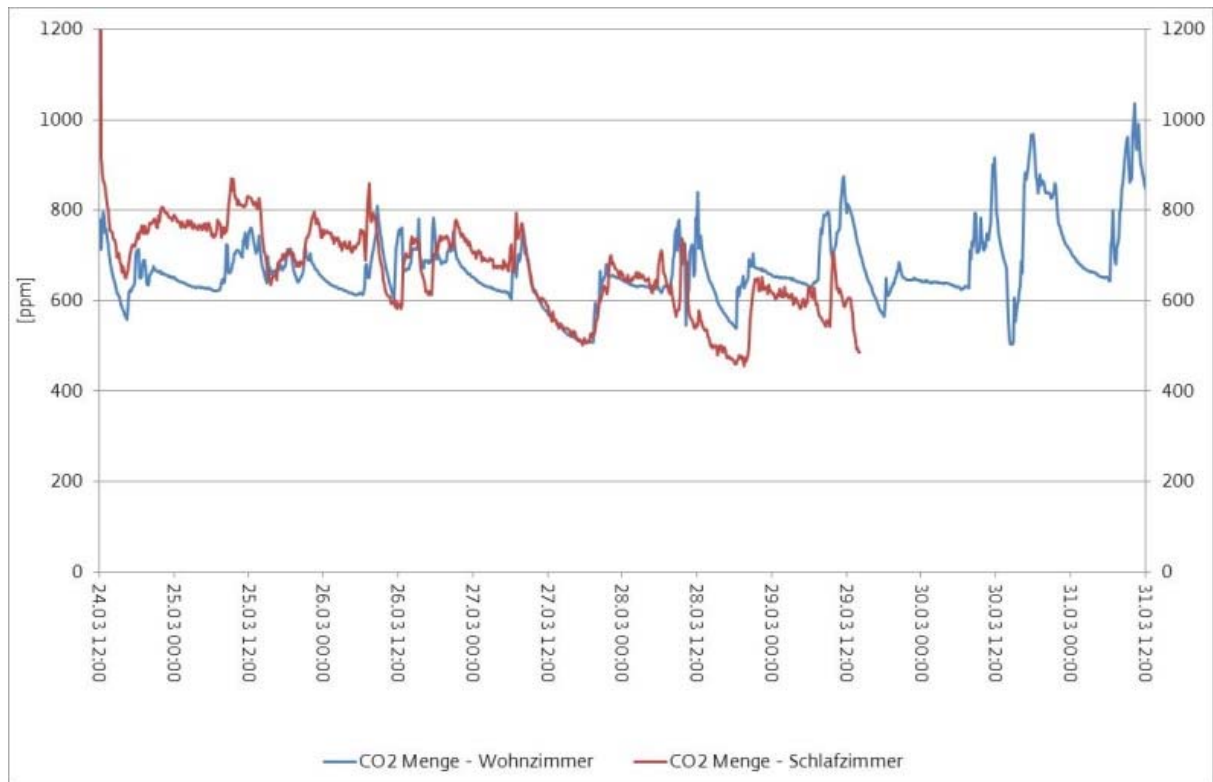


Abb. 85 : CO₂-Konzentration – Wohnung 1

Die CO₂-Konzentration im Wohn- und Schlafzimmer bewegt sich zwischen 400 und 1000 ppm.

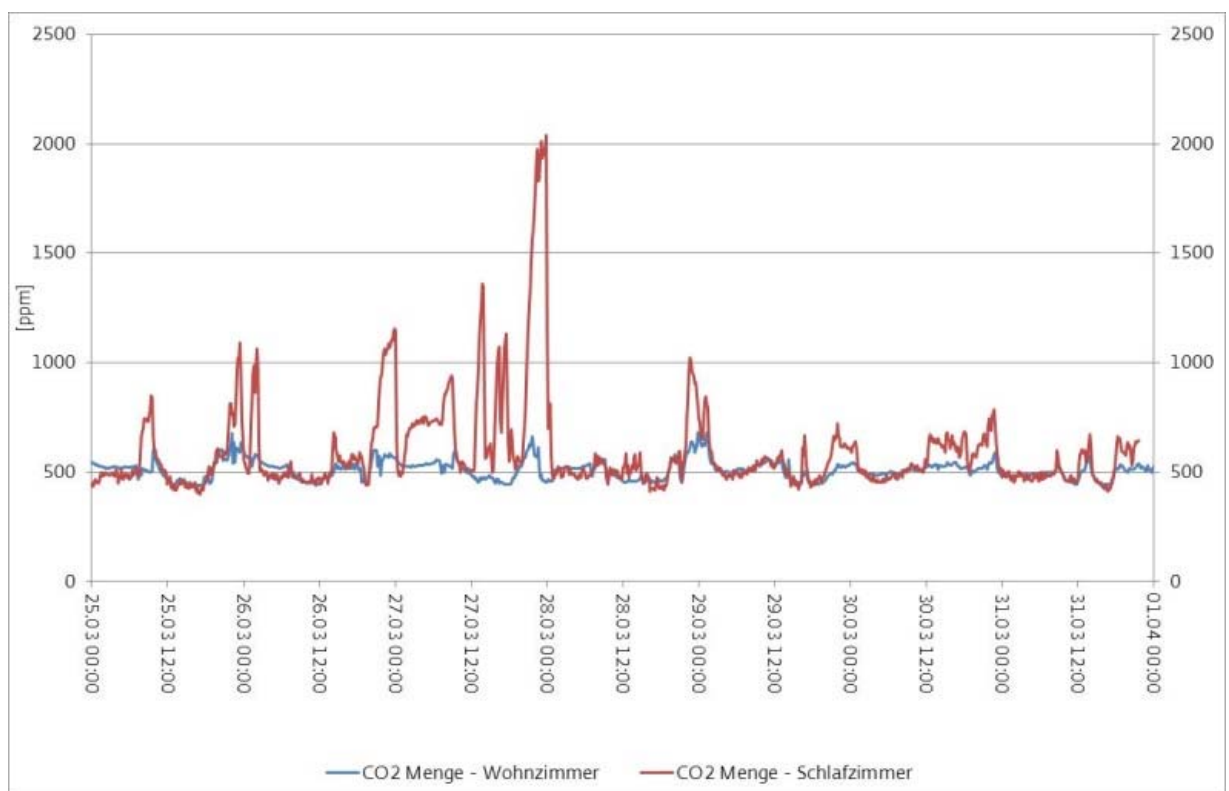


Abb. 86 : CO₂-Konzentration - Wohnung 2

Die CO₂-Konzentration im Wohn- und Schlafzimmer bewegt sich im Durchschnitt 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.

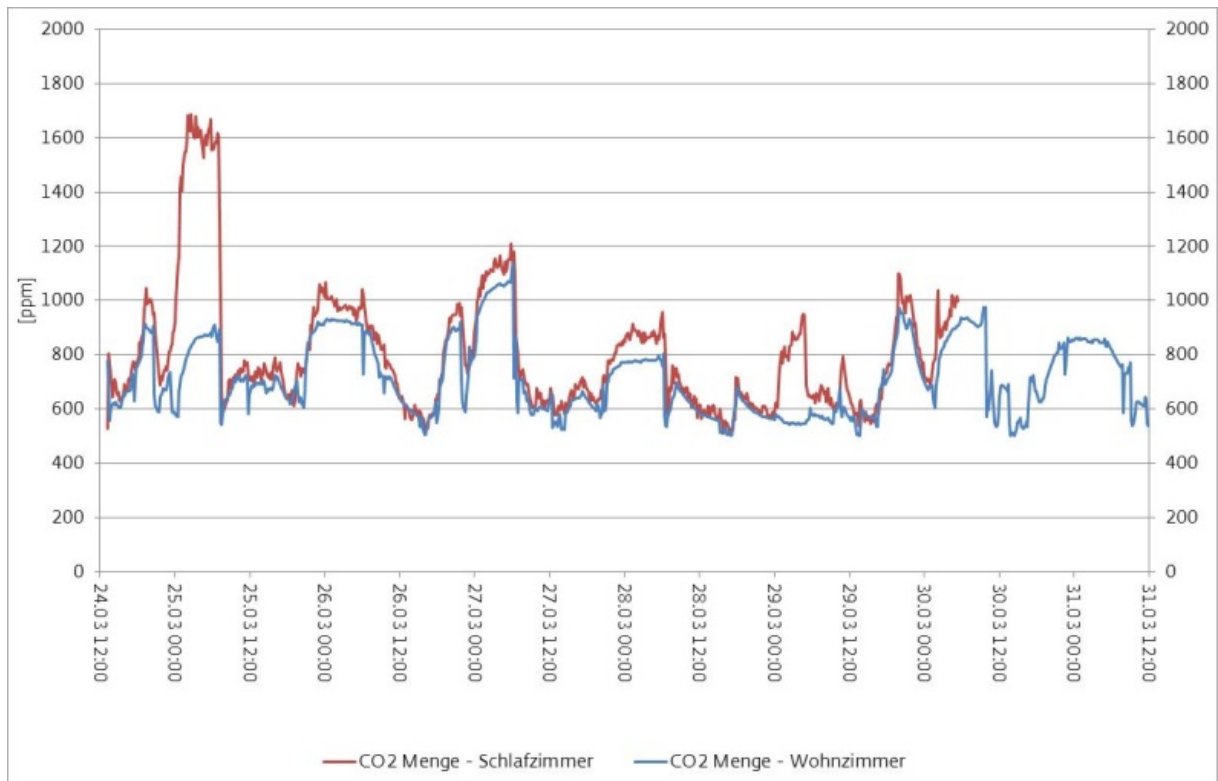


Abb. 87 : CO₂-Konzentration - Wohnung 3

Die CO₂-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.

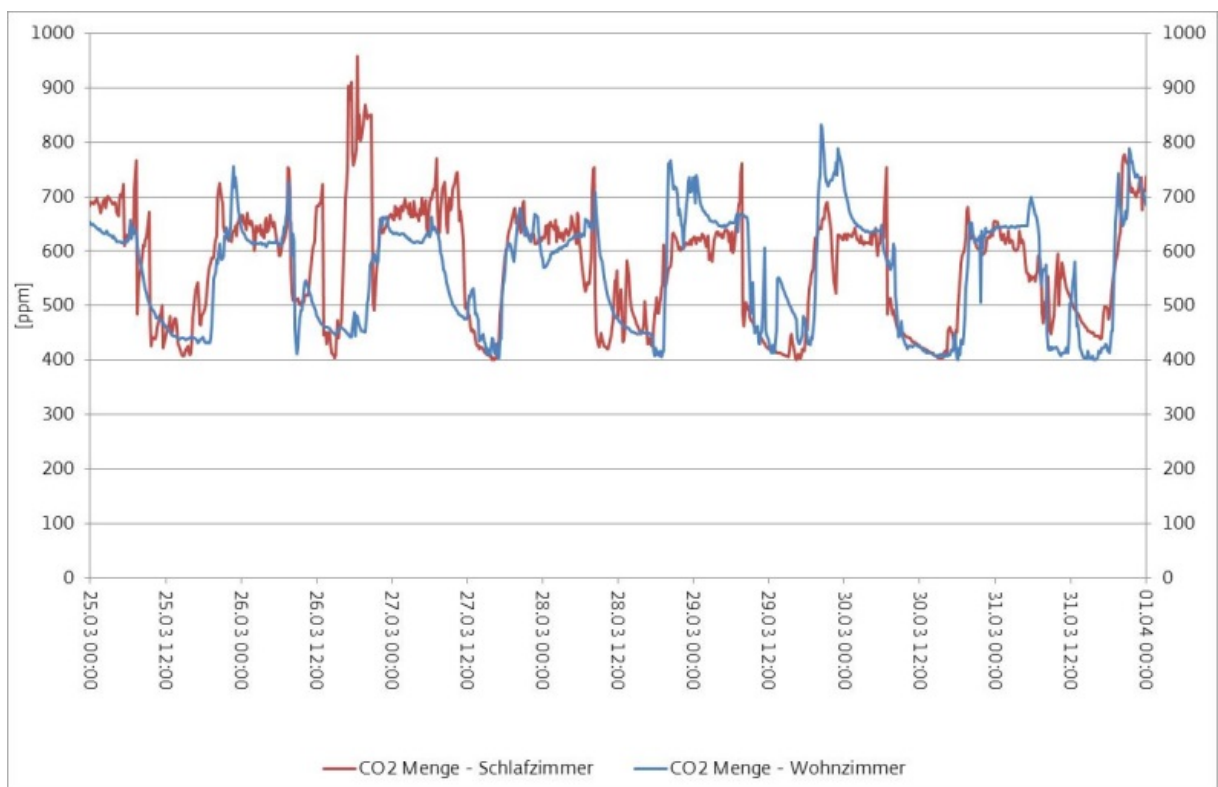


Abb. 88 : CO₂-Konzentration - Wohnung 4

Die CO₂-Konzentration im Wohn- und Schlafzimmer bewegt sich zwischen 400 und 950 ppm. Insgesamt kann die Raumlufthqualität im Schlaf- und Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden.

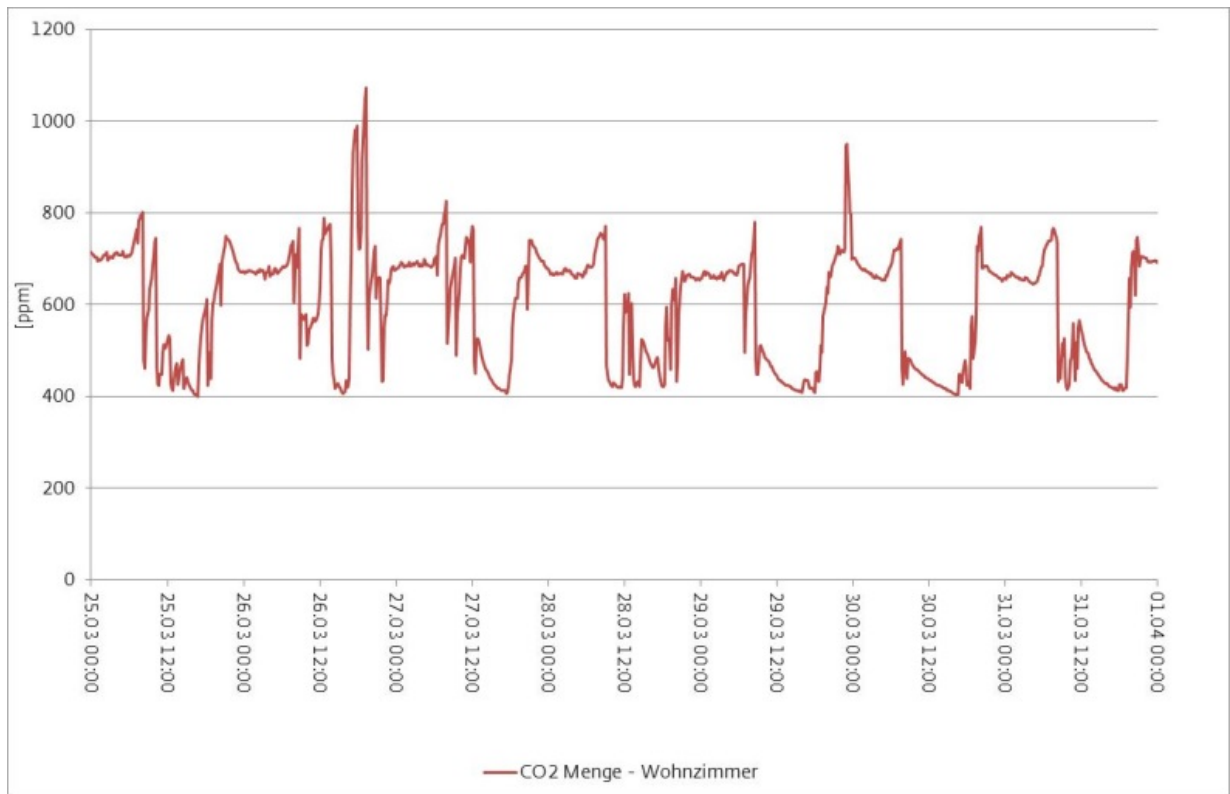


Abb. 89 : CO₂-Konzentration - Wohnung 5

Aufgrund eines Fehlers der Messeinrichtung kann nur die CO₂-Konzentration im Wohnzimmer dargestellt werden. Die CO₂-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 1000 ppm. Insgesamt kann die Raumlufthqualität im Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden.

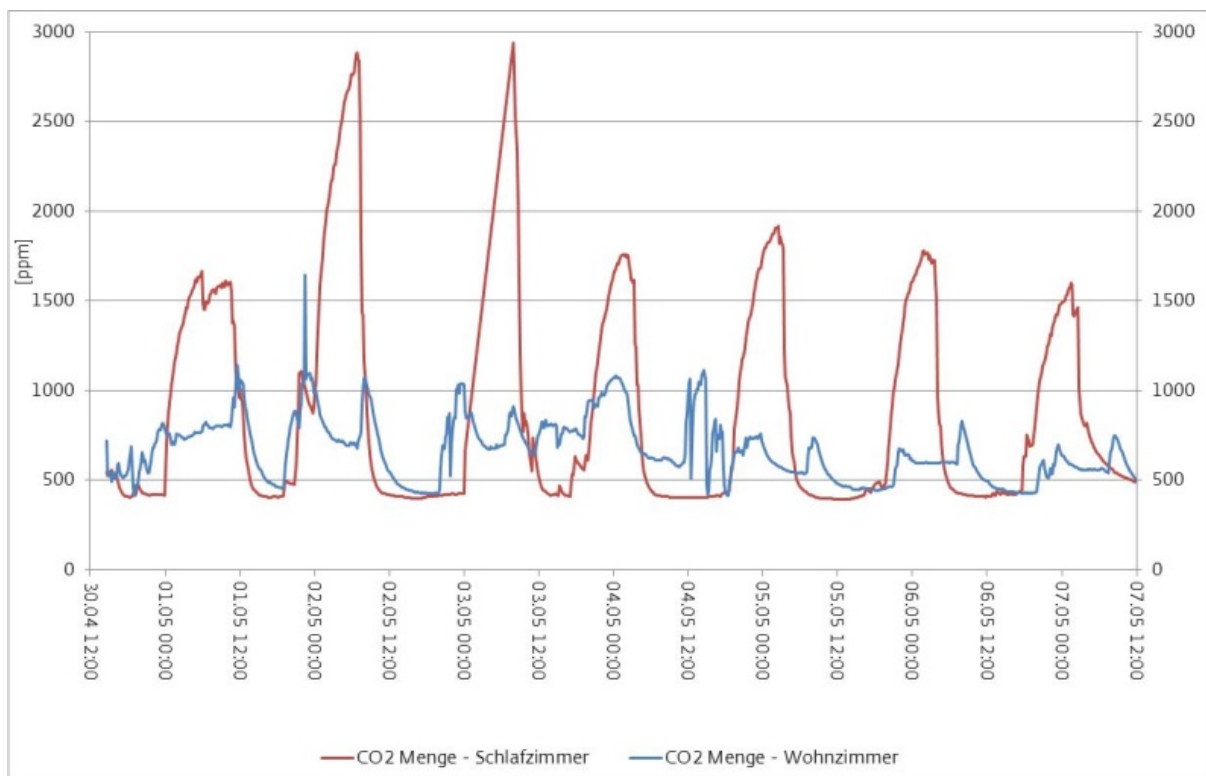


Abb. 90 : CO₂-Konzentration - Wohnung 6

Die CO₂-Konzentration im Wohnzimmer bewegt sich zwischen 400 und 1100 ppm. Im Schlafzimmer treten dagegen jede Nacht sehr hohe CO₂-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.

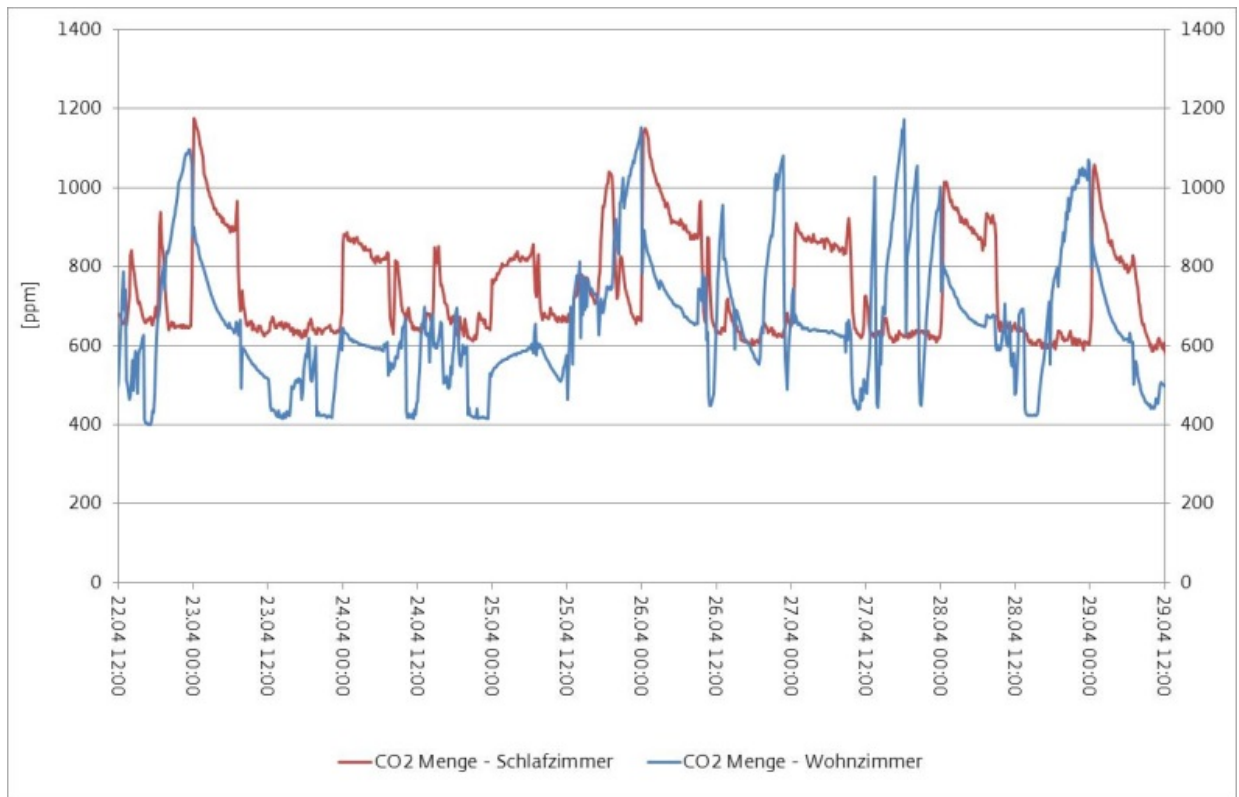


Abb. 91 : CO₂-Konzentration - Wohnung 7

Die CO₂-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.

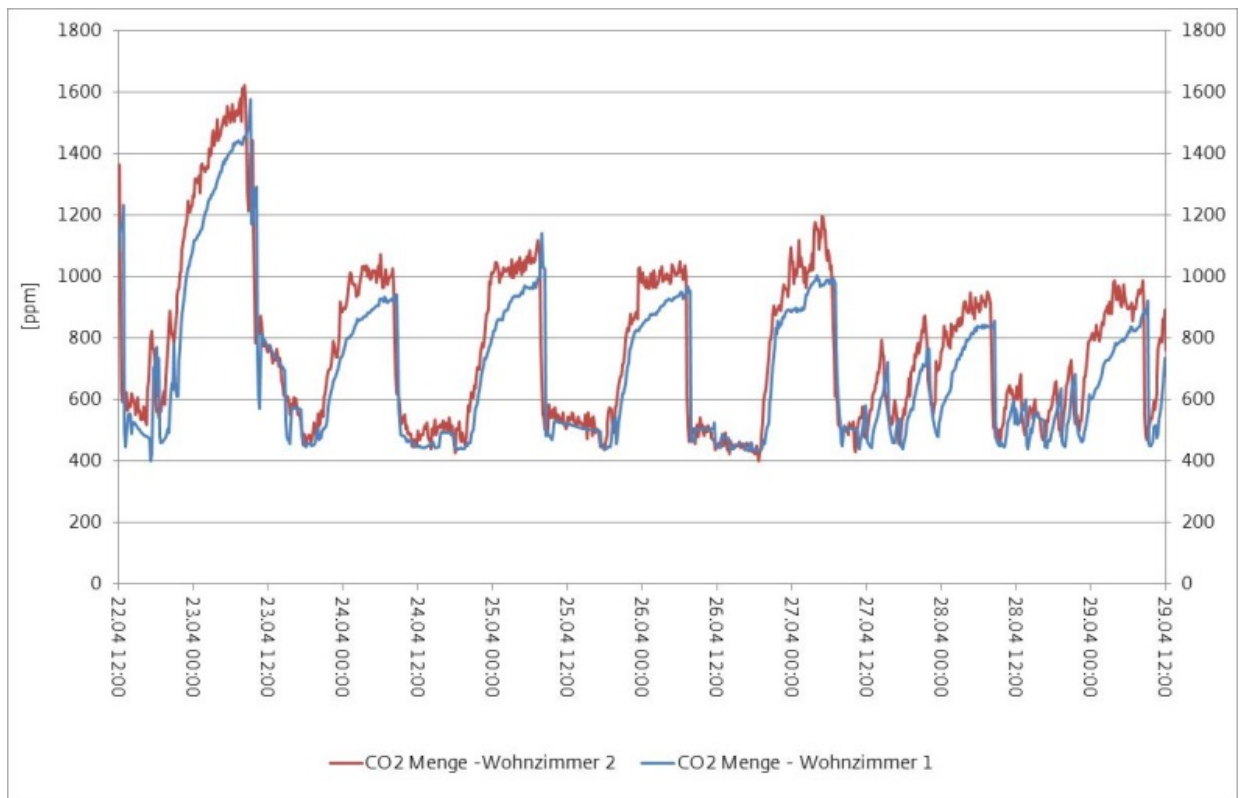


Abb. 92 : CO₂-Konzentration - Wohnung 8

Die CO₂-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.

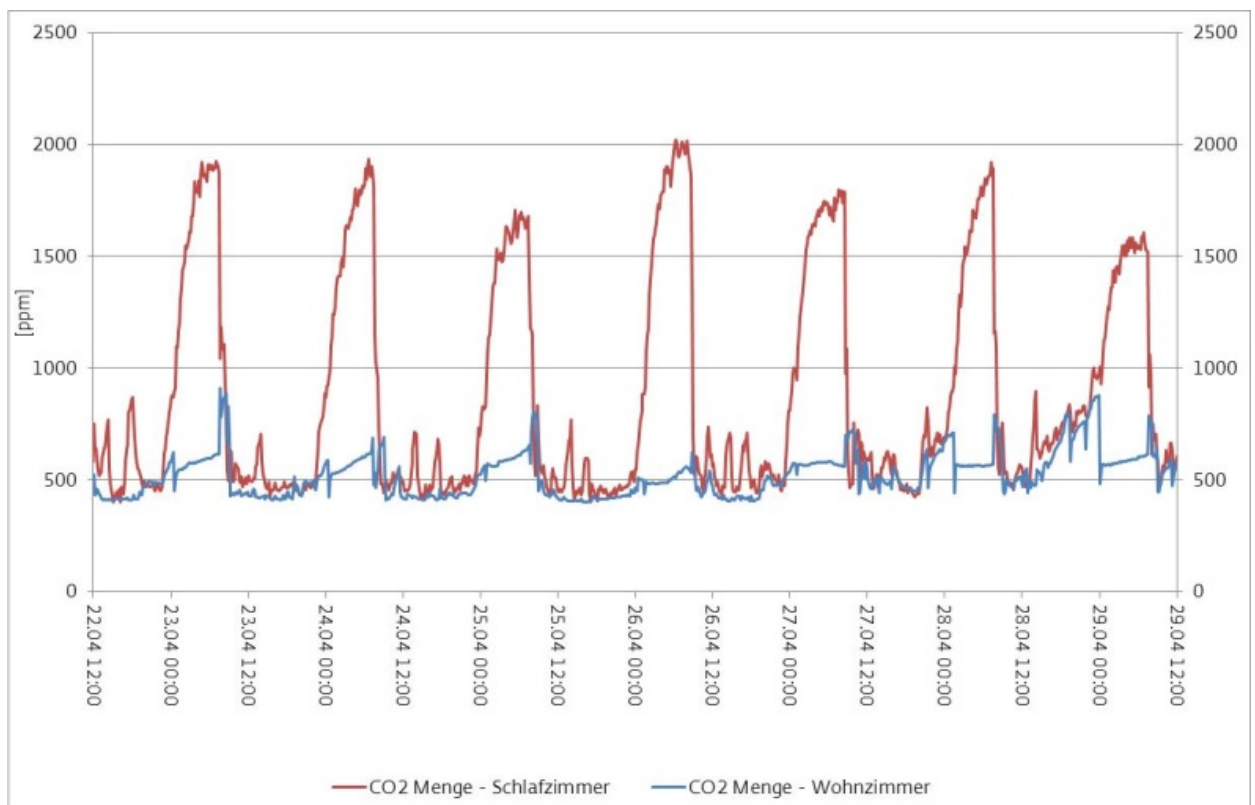


Abb. 93 : CO₂-Konzentration - Wohnung 9

Die CO₂-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 2000 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 2000 ppm im Schlafzimmer. Insgesamt kann die Raumlufthqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ (Klasse: RAL2) bezeichnet werden. Die Raumlufthqualität im Schlafzimmer ist dagegen „niedrig“ (RAL 4).

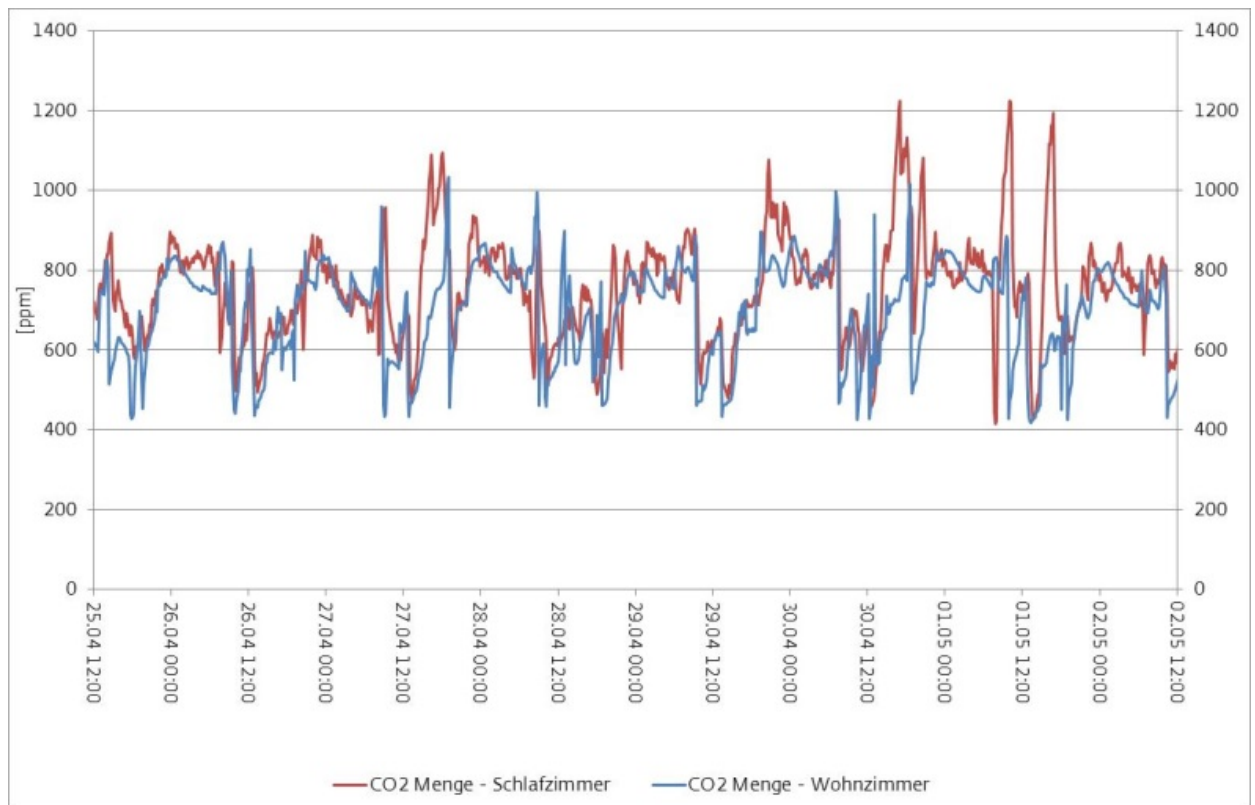


Abb. 94 : CO₂-Konzentration - Wohnung 10

Die CO₂-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 1200 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1200 ppm im Schlafzimmer. Im Ganzen kann die Raumlufthqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden. Die Raumlufthqualität im Schlafzimmer kann als „mässig“ (RAL 3) bezeichnet werden.

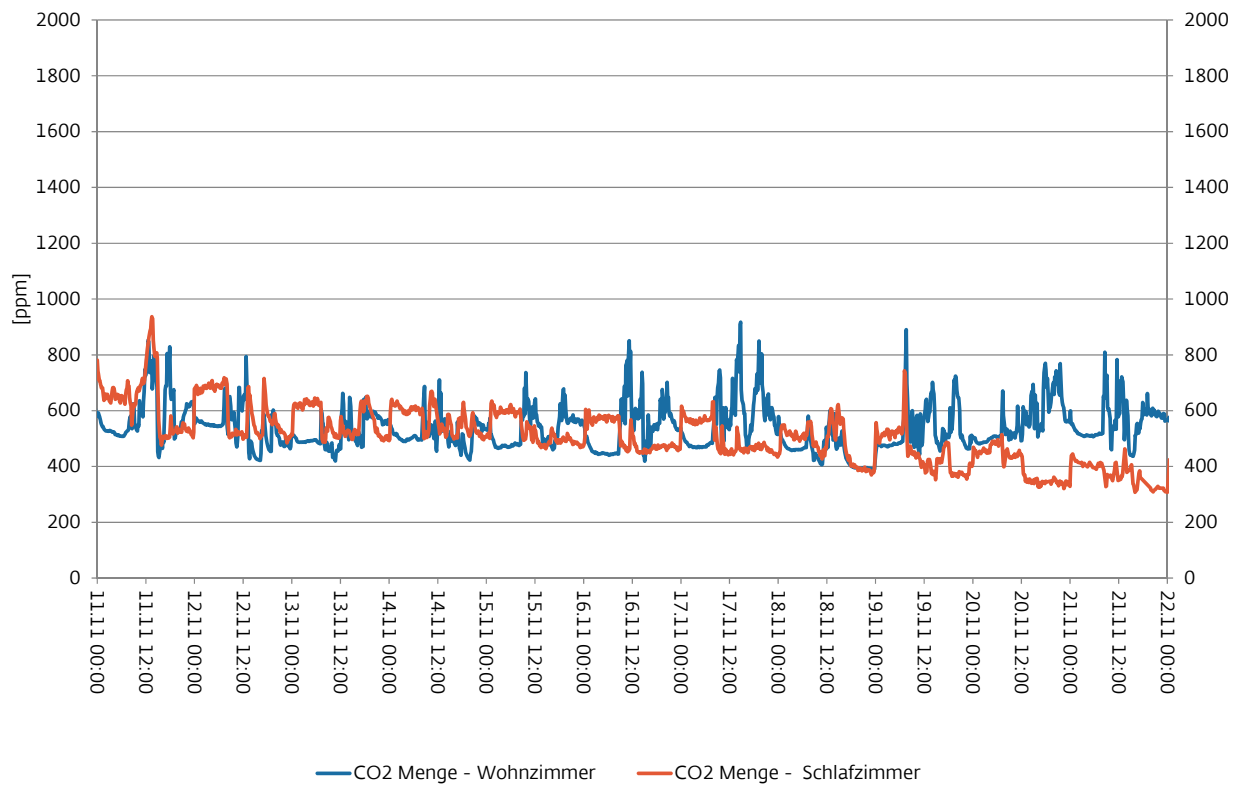


Abb. 95 : CO₂-Konzentration - Wohnung 11

Die CO₂-Konzentration bewegt sich zwischen 400 und 900 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 900 ppm im Schlafzimmer. Im Ganzen kann die Raumlufthqualität in dem Schlaf- und Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden.

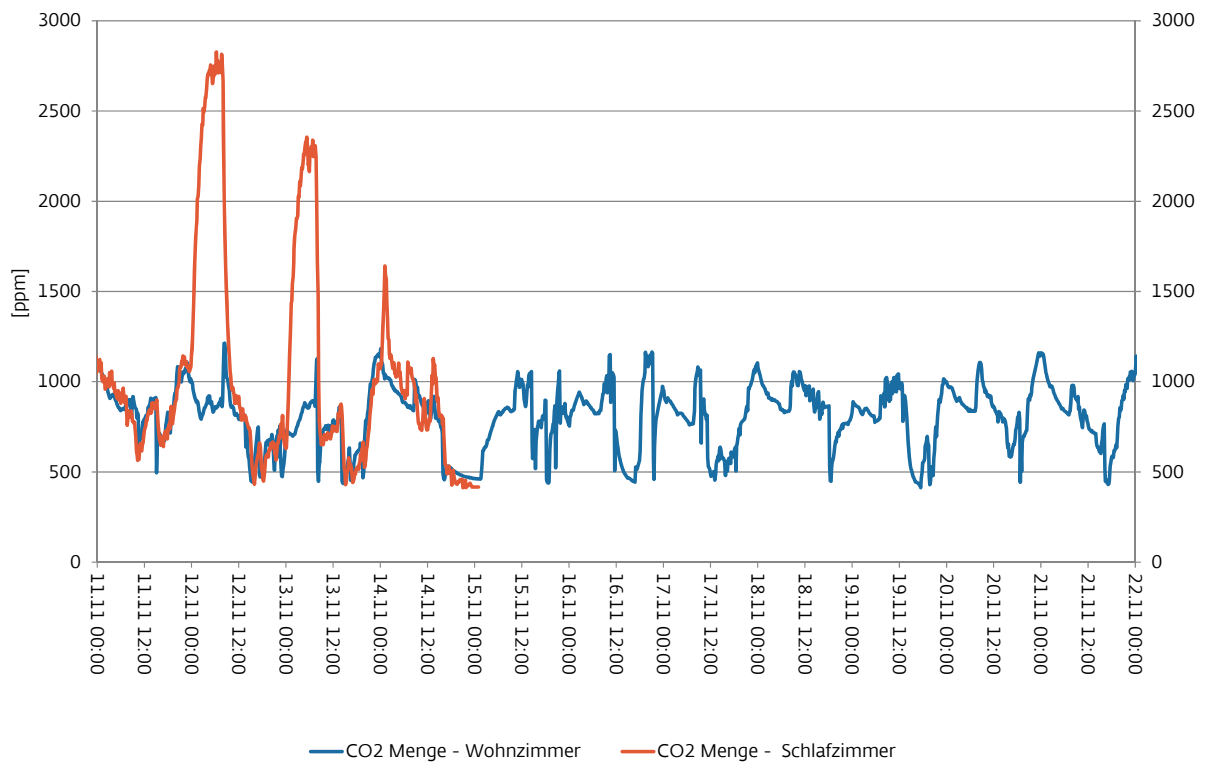


Abb. 96 : CO₂-Konzentration - Wohnung 12

Die CO₂-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“.

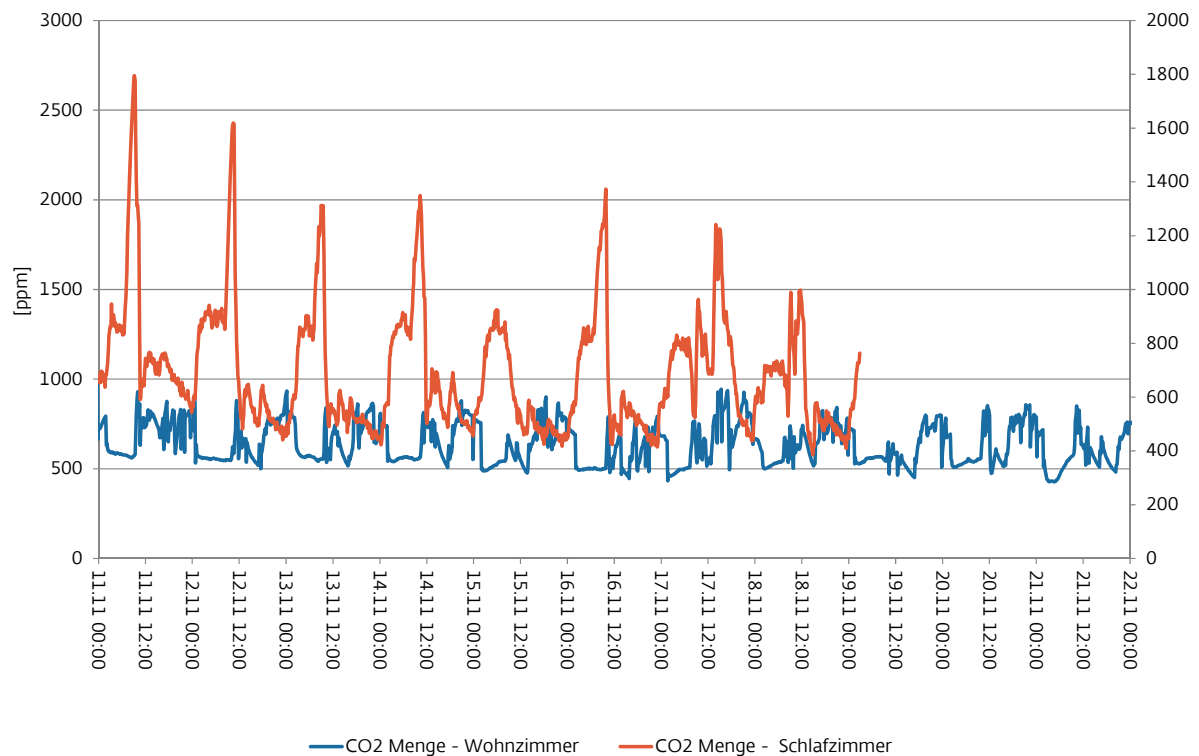


Abb. 97 : CO₂-Konzentration - Wohnung 13

Die CO₂-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“.

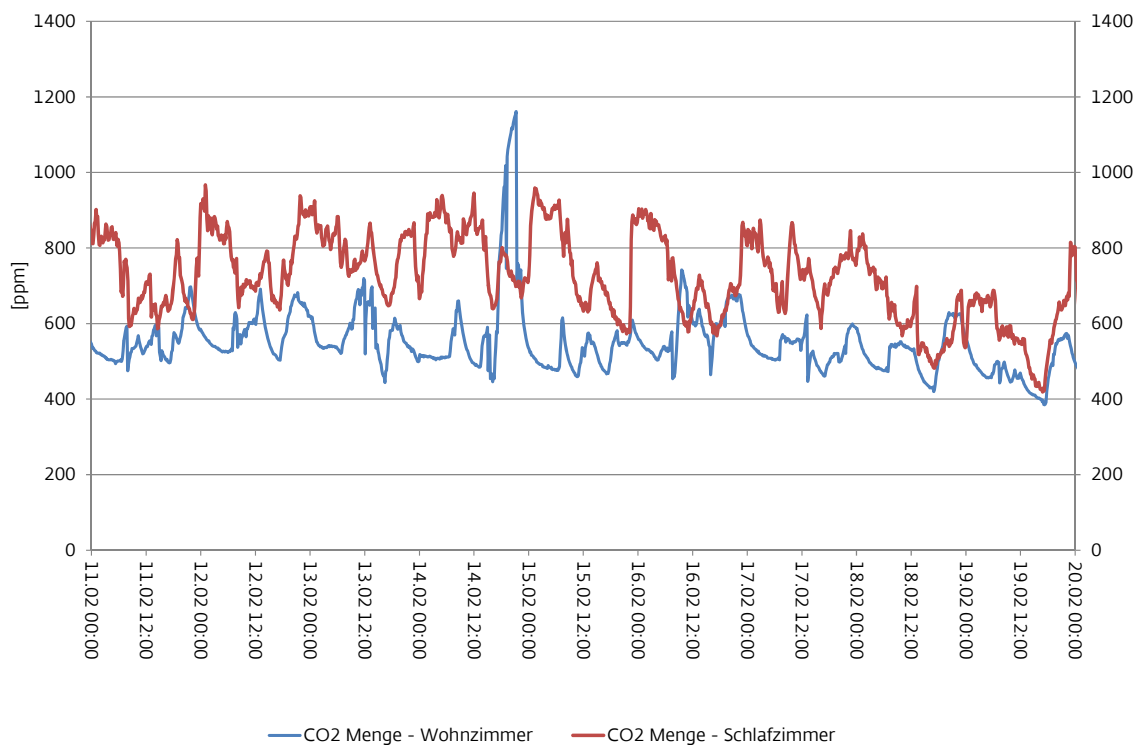


Abb. 98 : CO₂-Konzentration - Wohnung 14

Die CO₂-Konzentration bewegt sich zwischen 250 und 1'200 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'200 ppm im Wohnzimmer. Im Ganzen kann die Raumlufthqualität in dem Wohnzimmer als „gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „sehr gut“. Die Sanierung zeigte für diese Wohnung eine deutliche Verbesserung der Raumlufthqualität.

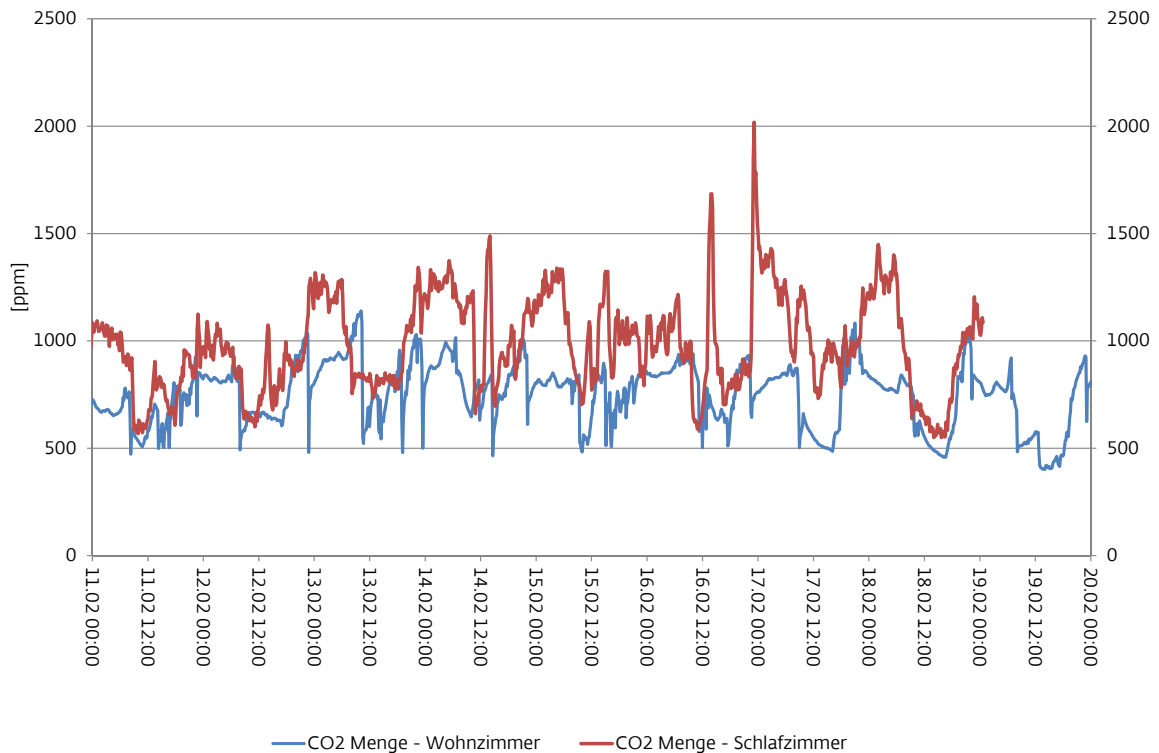


Abb. 99 : CO₂-Konzentration - Wohnung 15

Die CO₂-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 Raumlufthqualität in dem Wohnzimmer als „gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „mässig“.

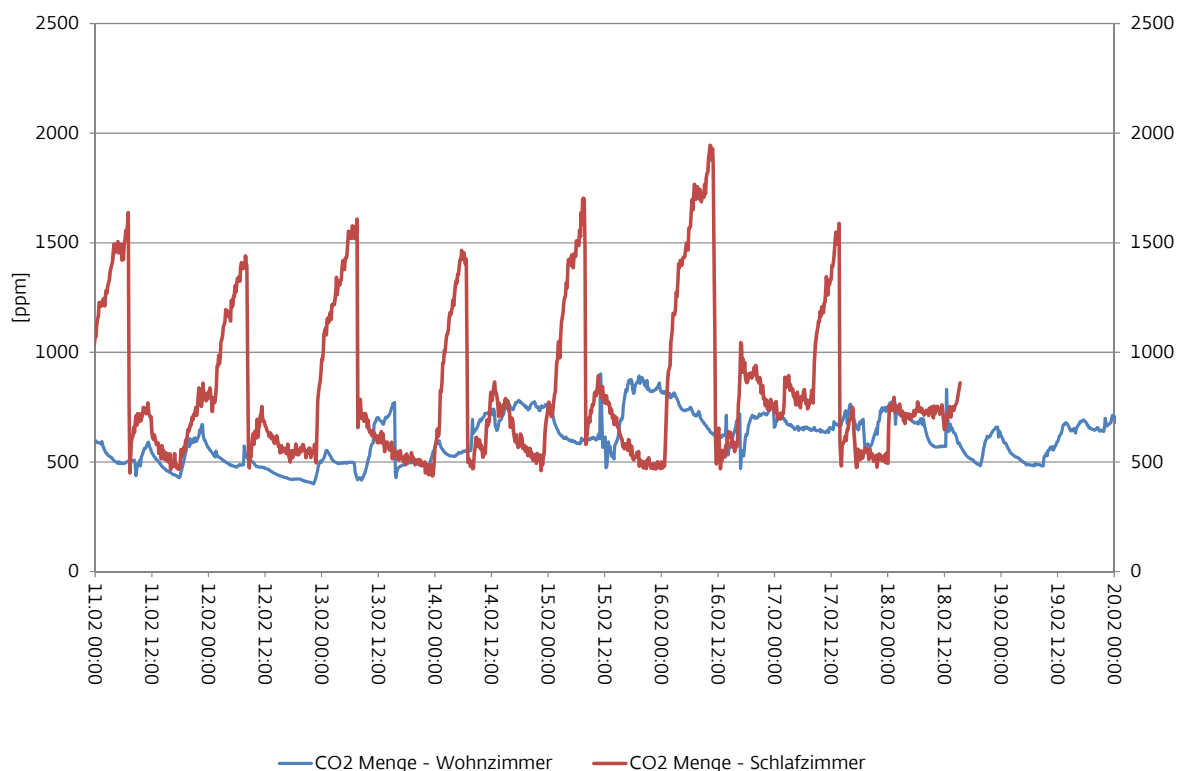


Abb. 100 : CO₂-Konzentration - Wohnung 16

Die CO₂-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“.

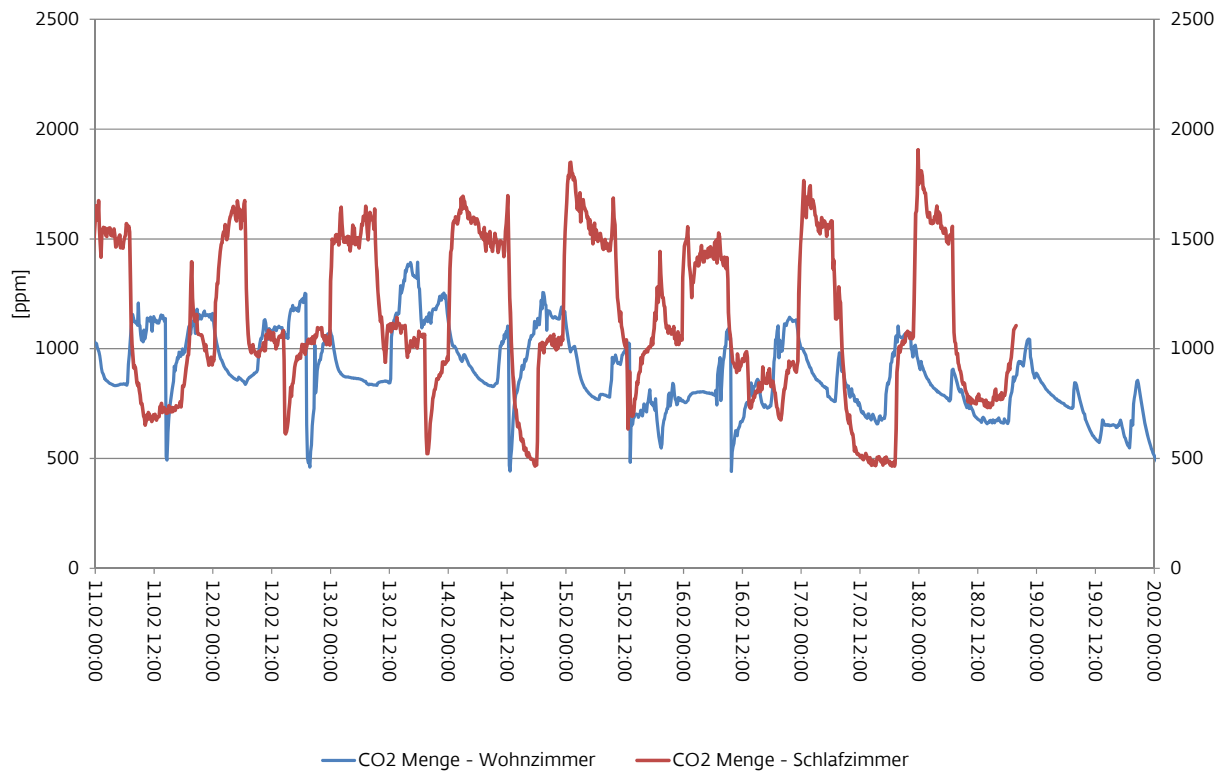


Abb. 101 : CO₂-Konzentration - Wohnung 17

Die CO₂-Konzentration bewegt sich zwischen 366 und 1'906 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'906 ppm im Schlafzimmer und wird nachts über erreicht. Der Aussenluftdurchlass im Schlafzimmer wird durch die Bewohner zugeklebt. Die Thermographieaufnahme zeigt starke Infiltrationen im Schlafzimmer im Bereich des Storenkastens (siehe Tab. 19).

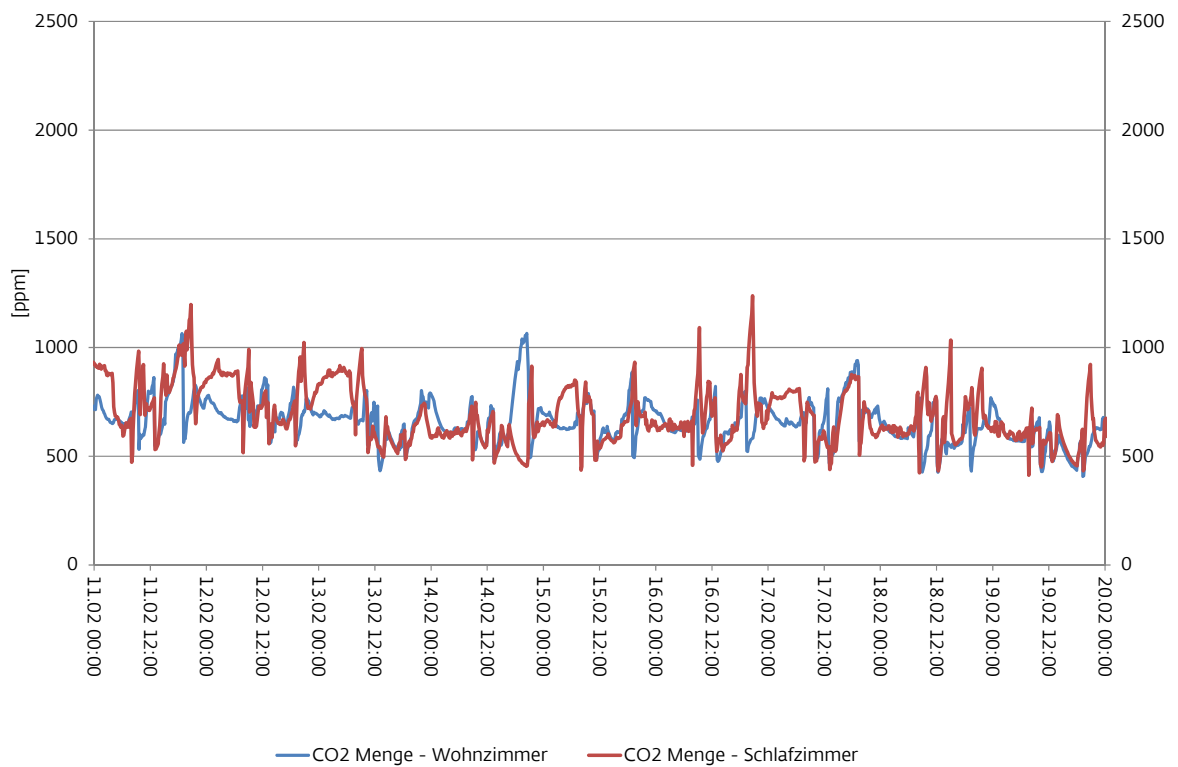


Abb. 102 : CO₂-Konzentration - Wohnung 18

Die CO₂-Konzentration bewegt sich zwischen 390 und 1'240 ppm. Die höchste Konzentrationsspitze liegt bei 1'240 ppm im Schlafzimmer. Im Ganzen kann die Raumlufthqualität in dem Wohnzimmer als „sehr gut“ bezeichnet werden. In dem Schlafzimmer eher als „gut“. Die Sanierung zeigte für diese Wohnung eine Verbesserung der Raumlufthqualität.

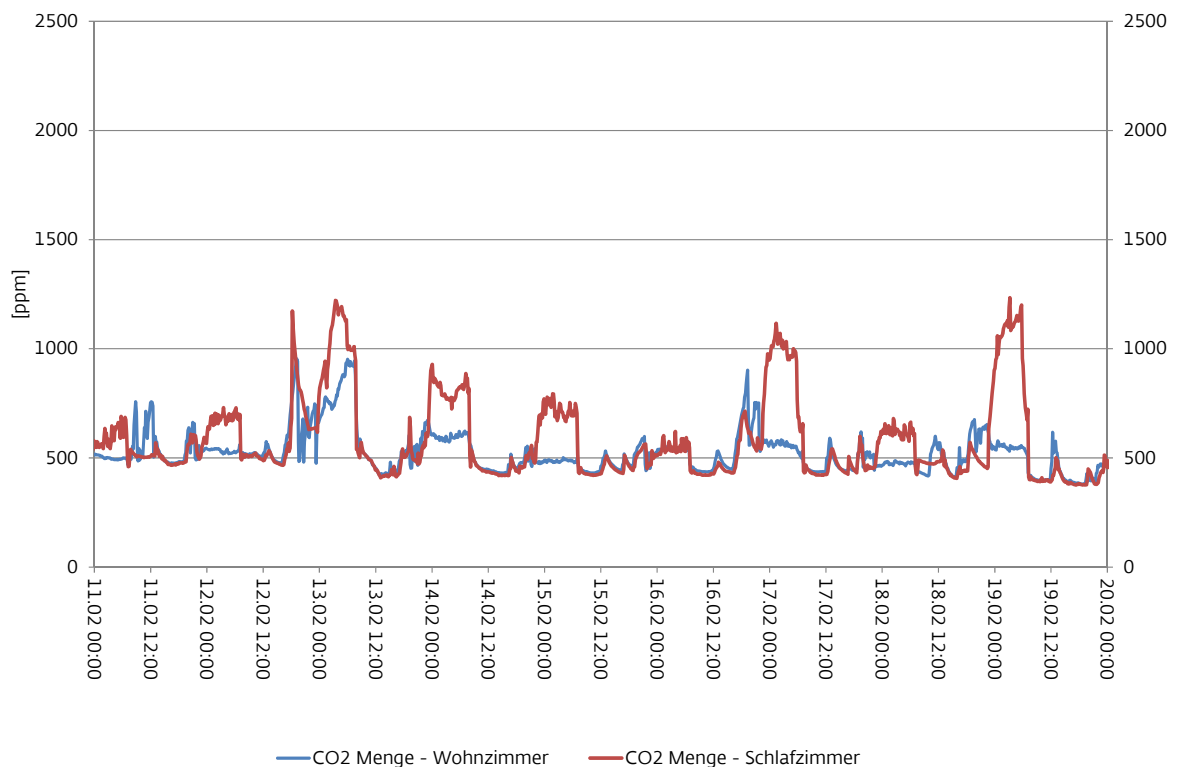


Abb. 103 : CO₂-Konzentration - Wohnung 19

Die CO₂-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 Raumlufthqualität 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
Saniert – Messperiode I						
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
Unsanziert – Messperiode II						
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
Saniert – Messperiode III						
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
Saniert – Messperiode IV						
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 (r.F. %)	Oberes Quantil (r.F. %)	Maximum (r.F. %)	Minimum (r.F. %)	Unteres Quantil (r.F. %)	Normative Anforderung gemäss SIA 180
Saniert – Messperiode I						
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
Unsanziert – Messperiode II						
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
Saniert – Messperiode III						
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
Saniert – Messperiode IV						
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 CO₂-Konzentration (ppm)

Wohnung	Median (ppm)	Oberes Quantil (ppm)	Maximum (ppm)	Minimum (ppm)	Unteres Quantil (ppm)	RAL-Klasse nach SIA 382/1
Saniert – Messperiode I						
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
Unsanert – Messperiode II						
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
Saniert – Messperiode III						
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
Saniert – Messperiode IV						
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 CO₂-Datenloggers (mit Batterie)

Hersteller	MOSWAY
Messgrösse	Temperatur, relative Feuchtigkeit, CO ₂
Messung CO ₂	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 CO₂-Datenloggers (ohne Batterie)

Hersteller	WOEHLER
Messgrösse	Temperatur, relative Feuchtigkeit, CO ₂
Messung CO ₂	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 CO₂-Daten-Logger mit Display



Wöhler CO₂-, Temperatur- und Feuchtigkeits-Datenlogger mit Display



Abb. 104: CO₂-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



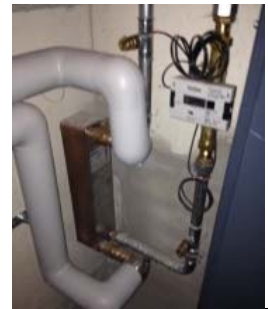
Abb. 105: Messeinrichtung Luftführung

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 Datenlogger mit Internet-Zugriff	<ul style="list-style-type: none"> - 8 Eingänge für Funk-Sensoren (8 bit, EnOcean für Temperatur, Feuchte, CO₂, Helligkeit, Energie, Leistung, Präsenz usw) - 1 Eingang für drahtgebundenen Temperatursensor (12 bit, für Pt1000) - 1 Eingang für drahtgebundenen Sensor 0..10 V (12 bit für Feuchte, CO₂ usw) - 10 Impulseingänge auf 24 V DC (zum Abgreifen potentialfreier Kontakte wie Energiezähler, Betriebsstundenzähler, Störmeldungen, Präsenzmelder usw) 	
Abluft- Wärmepumpe Wärmezähler	<ul style="list-style-type: none"> - Energie (kWh) - Leistung (kW) - Vor-, Rücklauftemperatur (°C) - Durchfluss (m³/h) 	
Heizgruppe- und Fernwärme- Wärmezähler	<ul style="list-style-type: none"> - Energie (kWh) - Leistung (kW) - Vor-, Rücklauftemperatur (°C) - Durchfluss (m³/h) 	

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



Kaltwasserzähler	- Durchfluss Frischwasser (m ³ /h)
------------------	---



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



Ultraschall-	- Wärmeleistung (kW)
Wärmezähler	- Energie (kWh)
(Portable	- Durchflussmenge (m3)
ultrasonic flow	
meter	
Typ: HGLS-	
2000P)	

