

# DIPLOMARBEIT Master Thesis

## **Nachweisführung der Kernlüftung von Gebäuden**

### **Modellbildung und experimentelle Validierung anhand des Hochhauses TU-Wien Getreidemarkt Bauteil BA**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

(Betreuer/-in) Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar  
und  
Proj.Ass. Dipl.-Ing. Hannes Konder  
E 206

Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

(Verfasser/-in) Thomas Hladky  
Matr.Nr.: 0325700  
Draschestr. 23/2/2  
1230 Wien

Wien, am 27.September 2015

## Danksagung

Dank gebührt meinen Betreuern Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar und Proj.Ass. Dipl.-Ing. Hannes Konder, die mich durch Ihre konstruktive Kritik und mit Ihrer großen Geduld durch diese Diplomarbeit begleitet haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen ehemaligen Studienkollegen Dipl.-Ing. Christoph Harreiter und Dipl.-Ing. Markus Leeb bedanken, die mich zu dem Projekt „Hochhaus Getreidemarkt“ hinzugezogen haben, im Rahmen dessen diese Arbeit entstanden ist.

Besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich durch mein ganzes Studium begleitet und laufend unterstützt haben. Auch beim Erstellen dieser Arbeit haben mich meine Eltern durch die sprachliche Durchsicht und Korrekturen unterstützt.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Freundin Birgit Kellner bedanken, die mich motiviert und mit Ihrer Geduld zum Abschluss dieser Arbeit begleitet hat.

Danke!

## Kurzfassung

### **Nachweisführung der Kernlüftung von Gebäuden**

#### **Modellbildung und experimentelle Validierung anhand des Hochhauses TU-Wien Getreidemarkt Bauteil BA**

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich damit, wie eine Nachweisführung für eine Kernlüftung gestaltet werden kann. Der Nachweis zur Kernlüftung wird auf ein Hochhaus angewandt und an durchgeführten Messungen validiert.

Der Nachweis des sommerlichen Verhaltens mit Kernlüftung kann mit den gängigen Verfahren nach ÖN B 8110-3 durch Berücksichtigung der erhöhten Luftwechselraten und dem damit verbesserten Wärmeabtransport geführt werden.

Im Zuge der Sanierung der Technischen Universität Wien war es möglich in einem Hochhaus Messungen des natürlichen Luftströmungsverhaltens über mehrere Geschosse durchzuführen. Bei den sechs durchgeführten Messungen wurden die Volumenströme im Gebäude durch Messen von Tracergas-Konzentrationen festgestellt. Als Tracergas wurde CO<sub>2</sub>, das aus Trockeneis verdampft wurde, verwendet. Gemessen wurde die Produktion des Tracergases, die Tracergas-Konzentration an verschiedenen Stellen im Gebäude, sowie in der zuströmenden und ausströmenden Luft aus dem Gebäude.

Das Mess-Setup für die nächste Messung wurde jeweils an die in den vorhergegangenen Messungen gewonnenen Erkenntnisse und neue Gegebenheiten angepasst. Bei der finalen Messung konnten konstante Volumenströme in Abhängigkeit von Öffnungsgrößen und Temperaturdifferenzen ermittelt werden. Die Messdaten dieser Messung dienen als Eingangs- bzw. Vergleichsdaten für die Simulation der Luftströmungen.

Für das Berechnungsmodell wurde mit Hilfe des Massenerhaltungssatzes eine Massenbilanz für das in Zonen eingeteilte Gebäude erstellt. Aus den daraus ermittelten Massenströmen wurden Volumenströme und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit Hilfe eines im Rahmen dieser Arbeit erstellten Matlab-Simulationsmodells errechnet, die mit der Messung verglichen wurden. Der Vergleich zeigt, dass die Vorhersagen des Berechnungsmodells gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

## Abstract

### **Verification of core ventilation of buildings**

#### **Modeling and experimental validation based on the high-rise building of UT Vienna campus Getreidemarkt part BA**

This diploma is about the validation of core ventilation systems. The validation is applied to a high-rise building and tested by means of measurements.

The validation of the prevention of summerly overheating with core ventilation may be performed with the usual method according to ÖN B 8110-3 considering increased airflow rates and thus improved heat transmission.

During the refurbishment of the University of Technology Vienna, it was possible to perform measurements of the natural air flow behavior over several floors in a high-rise building. In six measurements the volume flows were determined by measuring tracer gas concentrations in the building. CO<sub>2</sub> evaporated from dry ice, was used as tracer gas. Measurements took place at various points in the building, in the inflowing and outflowing air and at the locations of the tracer gas production.

The setup for the measurement was adjusted according to the findings obtained in the previous measurements and new circumstances. In the final measurement constant volume flow as a function of aperture size and temperature differences could be determined. The measurement data of this measurement are used as input and comparison data for the simulation of air flows.

For the computational model of the zoned building, the mass balance was built using the mass conservation law. From the determined mass flow, volume flow and CO<sub>2</sub> concentrations were calculated, which are compared with the measurement. The comparison showed that the predictions of the computational model fits well to the measured values.

**Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung und Grundlagen.....	1
1.1	Kernlüftung.....	2
1.1.1	Thermischer Auftrieb.....	2
1.2	Wind.....	3
1.3	Messung von Luftströmungen.....	4
1.4	Luftstromnetzwerke.....	5
2	Das Gebäude: Bauteil BA Getreidemarkt (Chemiehochhaus).....	6
2.1	Situationsbeschreibung.....	6
2.1.1	Gebäude.....	7
3	Nachweis der Kernlüftung nach Norm.....	9
3.1	Heizwärmebedarf und Kühlbedarf.....	9
3.1.1	HWB - Heizwärmebedarf.....	9
3.1.2	KB - Kühlbedarf.....	10
3.1.3	Sommerliches Verhalten.....	12
3.1.4	Lüftung.....	13
3.1.5	Zonierung des Gebäudes.....	14
4	Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Volumenströme durch thermischen Auftrieb.....	15
4.1	Strömungsgeschwindigkeit.....	15
4.2	Konzentrationen.....	16
4.3	Druckdifferenz.....	16
5	Berechnungsmodell.....	17
5.1	Modellaufbau.....	18
5.2	Verwendete Formeln.....	19
5.2.1	Massenbilanz.....	19
5.3	Massenströme.....	20
5.4	Druck.....	22
5.5	Volumenströme.....	22
6	Ergebnisse der Berechnung.....	23
6.1	Eingangsparameter.....	23
6.1.1	Temperaturen.....	23
6.1.2	Öffnungsgrößen.....	25
6.1.3	CO <sub>2</sub> -Produktion.....	26
6.2	Berechnete Volumenströme.....	27
7	Messen der Luftströmung.....	29
7.1	Messmethoden zur Bestimmung interzonaler Volumenströme in Gebäuden.....	30
7.1.1	Luft-Geschwindigkeit.....	30

7.1.2	Tracergas-Konzentrationen.....	30
7.2	Mess-Setup.....	34
7.2.1	Auslegung der Messanlage (MA) im 2. OG für die ersten 3 Messungen .....	35
7.2.2	Auslegung der MA im 6. OG für die ersten 3 Messungen .....	36
7.2.3	Auslegung der Messanlage für die weiteren Messungen.....	37
7.3	Messanlage.....	38
7.3.1	Aufbau.....	39
7.3.2	Sensoren und Geräte.....	41
7.3.3	CO <sub>2</sub> -Erzeugung.....	42
7.4	Ablauf und Auswertung der Messungen .....	43
7.4.1	Messungen August 2011 .....	44
7.4.2	Auswertung der Messdaten vom August 2011 [10].....	45
7.4.3	Messungen Anfang 2012 .....	52
7.4.4	Auswertung der Messdaten vom Februar 2012 .....	53
7.4.5	Auswertung der Messdaten vom 01. März 2012.....	57
7.4.6	Auswertung der Messdaten vom 16. März 2012.....	62
8	Validierung .....	71
8.1	Umrechnung Volumenstrom in CO <sub>2</sub> -Konzentrationen.....	71
8.2	Berechnete CO <sub>2</sub> -Konzentrationen.....	73
8.3	Variation der Eingangsparameter .....	75
8.4	Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen .....	77
8.4.1	Schacht.....	78
8.4.2	Obergeschoss.....	79
8.4.3	6. Obergeschoss.....	80
8.4.4	9. Obergeschoss.....	81
8.5	Anpassung der Parameter .....	82
9	Schlussfolgerungen.....	83
10	Anhang 1: Simulation – Matlab-Code.....	85
10.1	Beschreibung.....	85
10.2	Matlab-Code .....	88
10.2.1	Vorbereitung .....	88
10.2.2	Matlab-Steuerzeichen .....	89
10.2.3	Luftstrom.m.....	90
10.2.4	mbilanzZ5.m .....	92
10.2.5	mstromZ4.m.....	94
10.2.6	vstromZ4.m.....	96
10.2.7	co2con.m .....	97
10.2.8	excelausgabe.m.....	98
10.3	Ausgabe der Ergebnisse.....	99
11	Anhang 2: Berechnungsmodell zum Ausklappen .....	100
12	Literaturverzeichnis .....	101

# **1 Einleitung und Grundlagen**

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich damit, wie eine Nachweisführung für eine Kernlüftung gestaltet werden kann. Der Nachweis zur Kernlüftung durch Berechnung der Luftströmungen mittels eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Matlab-Simulationsmodells wird auf ein Hochhaus angewandt und an durchgeführten Messungen validiert.

Die Idee der Kernlüftung eines Gebäudes besteht darin die Temperaturunterschiede von kühler Außenluft zu warmer Innenluft zu nutzen um das Gebäude mit Hilfe des Kamineffekts zu kühlen und dadurch den Kühlenergiebedarf zu senken.

Das Konzept der Kernlüftung wird in dieser Arbeit für ein Hochhaus angepasst, nachdem es von Proj.Ass Dipl.-Ing. Hannes Konder bereits an einem kleineren Gebäude analysiert wurde. [1]

Im Zuge des Umbaus des ehemaligen Chemiehochhauses der TU-Wien am Getreidemarkt bot sich die Gelegenheit in dem leer stehenden Hochhaus Luftströmungen bei Kernlüftung zu messen und auszuwerten.

Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit werden für die Simulation des fertig umgebauten Hochhauses, das als Plus-Energie Gebäude konzipiert wurde, verwendet. Nach dem Umbau soll die sommerliche Überwärmung ohne konventionelle Klimatechnik vermieden werden. Die Simulation der Luft- und Wärmeströme im Gebäude dient der Einstellung der Haustechnikregelung im umgebauten Hochhaus.

Die Analysen und Simulationen dieser Arbeit beschränken sich auf die Luftströmungen und den Kühlbedarf des Gebäudes. Der Heizenergiebedarf bzw. Energieausweis des Gebäudes wird nicht betrachtet.

## 1.1 Kernlüftung

Die Kernlüftung beschreibt ein Lüftungssystem, bei dem die Abluft im Gebäudeinneren gesammelt und über den Kern abgeführt wird. Diese Entlüftung kann entweder durch Raumlüfttechnikanlagen angetrieben werden oder durch natürliche Luftströmungen erfolgen.

In der Natur findet man ein Beispiel für Kernlüftung im Aufbau eines Termitenhügels, wo der Nest- und Vorratsraum dadurch natürlich temperiert werden und die Temperatur relativ konstant gehalten wird. Erwärmt sich die Luft in den äußeren Gängen durch Sonneneinstrahlung, entsteht Auftrieb. Die warme Luft entweicht an der Spitze des Hügels, kühlere Luft wird auf der Schattenseite des Hügels eingesaugt. Durch die Wärmespeicherfähigkeit des Baumaterials bleibt die Luftströmung auch in der Nacht aufrecht und kühlt den Bau mit der kalten Nachtluft. [2]



Abb. 1.1 Schnitt durch einen Termitenhügel [2], zeigt die Nutzung von natürlichen Luftströmungen zur Kühlung.

### 1.1.1 Thermischer Auftrieb

Der Antrieb des thermischen Auftriebs sind Temperaturunterschiede in der Luft. Die Dichte der Luft ist temperaturabhängig. Je wärmer die Luft ist, umso geringer ist ihre Dichte. Warme Luft steigt auf, kühle Luft sinkt ab. Dadurch kommt es z.B. auch in Räumen zur Zirkulation der Luft. In der Heizperiode wird die Luft über der Heizung erwärmt und steigt auf, am Fenster wird sie abgekühlt und sinkt wieder ab.

Diese natürliche Luftzirkulation wird bei der Kernlüftung genutzt um das System anzutreiben. Wenn die Temperaturdifferenz der über den Tag durch Sonneneinstrahlung und innere Wärmegewinne aufgeheizten Luft im Gebäude zu der kühleren Außenluft um das Gebäude groß genug ist, kann diese genutzt werden um das Gebäude zu kühlen. Werden Öffnungen am Dach und in der Fassade geöffnet und im Gebäude zu einem Lüftungsweg verbunden, entsteht eine Zirkulation. Die schwerere kalte Außenluft drückt unten in das Gebäude und die warme leichtere Innenluft strömt oben aus dem Gebäude heraus. [3]

Ist die Zirkulation einmal in Gang, wird sie noch zusätzlich vom Kamineffekt verstärkt. Wenn die Luft im Kamin in Bewegung ist, entsteht ein Sog. Dadurch wird das System weiter aufrecht gehalten, auch wenn für einige Zeit kühlere Luft in den Kamin eingesaugt wird, die von selbst nicht aufsteigen würde. Der Kamineffekt beschreibt also eine Sogwirkung, durch die Trägheit des in Bewegung befindlichen Gases erhöht sich die Stabilität des Systems. Eine hohe Wärmespeicherfähigkeit oder zusätzliche Heizung der Kaminauskleidung erhöht diese Trägheit des Systems zusätzlich. Dieser Effekt wird z.B. bei Solarkaminen eingesetzt. Der über Dach führende Teil eines Solarkamins wird durch die Sonneneinstrahlung erwärmt und verstärkt den Kamineffekt.

Die Luftzirkulation endet nicht, wenn die gesamte Luft im Gebäude einmal ausgetauscht ist, da auch die Bauteile (Wände, Böden und Möblierung) Wärme gespeichert haben und diese an die einströmende Außenluft abgeben. Dadurch wird die einströmende Außenluft aufgeheizt, und dient weiter als Motor für die Luftzirkulation, bis auch die Bauteile auf Außenlufttemperatur abgekühlt sind.

Beispiele für eine Anwendung des Kamineffekts im Bauwesen findet man z.B. im Buch: *Bau-Bionik, Natur Analogien Technik* [4]

## 1.2 Wind

Die Messungen haben gezeigt, dass der Luftstrom in den einzelnen Zonen durch den Wind beeinflusst wird. Durch die Umströmung des Gebäudes entstehen unterschiedliche Druckverhältnisse an den verschiedenen Fassaden und am Dach. Sind im Gebäude Verbindungen zwischen den Fassaden oder auch der Fassade und dem Dach vorhanden, wie es für die Kernlüftung erforderlich ist, werden Druckunterschiede auch durch das Gebäude ausgeglichen. Es kommt zu Luftströmungen von außen in das bzw. durch das Gebäude.

Diese durch Winddruckunterschiede induzierten Luftströmungen können je nach Windgeschwindigkeit stärker als die durch den Kamineffekt induzierten Luftströmungen sein und diesen aufheben bzw. auch umkehren.

In der Literatur z.B. *Building Energy Management Systems* [5] findet man Formeln zur Berechnung der durch Winddruck resultierenden Luftströmungen.

Diese sind abhängig von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Exposition, Öffnungen, Gebäudehöhe und Form.

In der Arbeit *AIR MOVEMENT IN NATURALLY-VENTILATED BUILDINGS* [6] wurden durch Wind und Auftrieb verursachte Luftströmungen in einem anderen Zusammenhang untersucht. Es kann aber aus den Ergebnissen herausgelesen werden, dass die durch Auftrieb verursachten Luftströmungen bei großen Temperaturdifferenzen größer sein können, als die durch Wind verursachten Luftströmungen.

Die Effektivität der Kernlüftung wird durch diese zusätzlichen Strömungen nicht beeinflusst, da auch sie einen Austausch der Innenluft durch Außenluft bewirken und damit eine Luftströmung durch die Zonen sichergestellt wird.

Eine genauere Untersuchung der Winddruckverhältnisse am Gebäude und deren Einfluss auf die Luftströmungen im Gebäude wurde nicht durchgeführt, da es in dieser Arbeit um die Luftströmungen durch Auftrieb und Kamineffekt geht.

### **1.3 Messung von Luftströmungen**

Die Messungen und Simulation in dieser Diplomarbeit bauen auf Versuchen an einem kleineren Gebäude auf, die 2008 von Proj.Ass Dipl.-Ing. Hannes Konder durchgeführt wurden. [1]

Bei den Versuchen, die in einem Gebäude der NÖ-Landesregierung in St. Pölten durchgeführt wurden, konnte gezeigt werden, dass die zu erwartenden Luftströmungen durch die konstante Erzeugung von Tracergas (CO<sub>2</sub> aus Trockeneis) und Messen der Tracergas-Konzentrationen entlang der Luftströmungswege ermittelt werden können.

Dieses System wird in dieser Arbeit auf ein Hochhaus angewandt und erweitert.

## 1.4 Luftstromnetzwerke

Für Messungen in einem großen unterteilten Gebäude wie das untersuchte Hochhaus, wird das betrachtete System in mehrere Zonen aufgeteilt. Es bietet sich an das Gebäude geschossweise oder raumweise zu zonieren und die Luftströmungen zwischen diesen Zonen zu messen bzw. zu berechnen.

In der Literatur, z.B. *Building Energy Management Systems* [5] oder auch in *Fundamentals of the Multizone Air Flow Model - COMIS* [7] findet man Formeln und Beispielmodelle für die Berechnung eines Multi-Zonen-Luftstromnetzwerks sowie Informationen zu den für die Berechnung erforderlichen Parametern.

Die Parameter beinhalten zum Beispiel den Durchströmwiderstand und die Größe von Öffnungen sowie die Temperatur und den herrschenden Luftdruck in den Zonen.

## 2 Das Gebäude: Bauteil BA Getreidemarkt (Chemiehochhaus)

Im Zuge der Sanierung der Technischen Universität Wien (University 2015) war es möglich im Bauteil BA des Chemiehochhauses am Getreidemarkt Messungen des natürlichen Luftströmungsverhaltens über mehrere Geschosse durchzuführen.

Bei der Sanierung des Chemiehochhauses wird für das Gebäude ein Plus-Energie Bürogebäude-Konzept umgesetzt. Dabei soll die sommerliche Überwärmung ohne konventionelle Klimatechnik vermieden werden.

### 2.1 Situationsbeschreibung

Das Chemiehochhaus (Bauteil BA) der TU-Wien liegt im 6. Bezirk im Stadtkern Wiens in der Lehargasse 2-4 und ist eines der höchsten Gebäude in diesem Stadtteil.

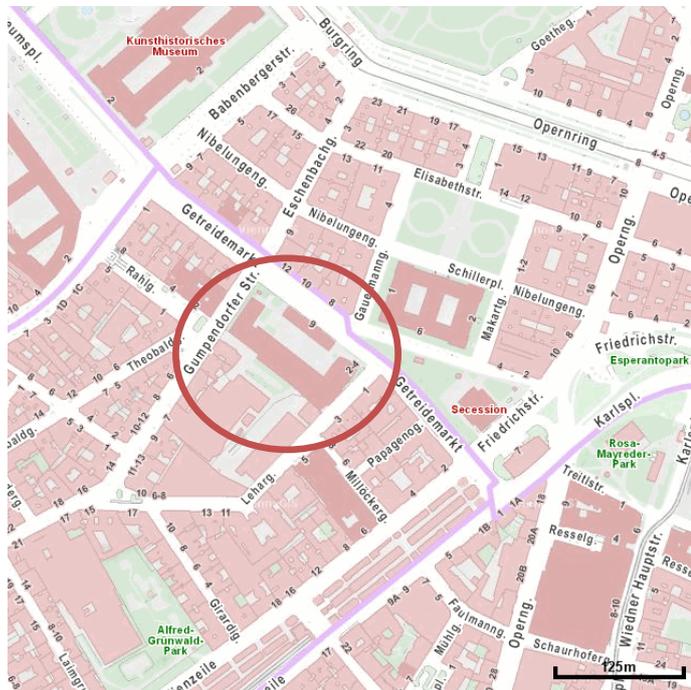


Abb. 2.1 Lage des Campus Getreidemarkt [9]

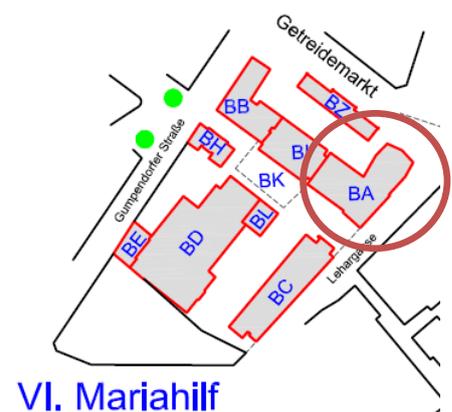


Abb. 2.2 Lage Bauteil BA [8]

### 2.1.1 Gebäude

Das Gebäude hat 11 oberirdische Geschosse mit einer Grundfläche von jeweils ca. 800m<sup>2</sup>. Es ist 53m hoch und steht auf 18,11m über Wiener Null bzw. 174,79m über Adria. [8]

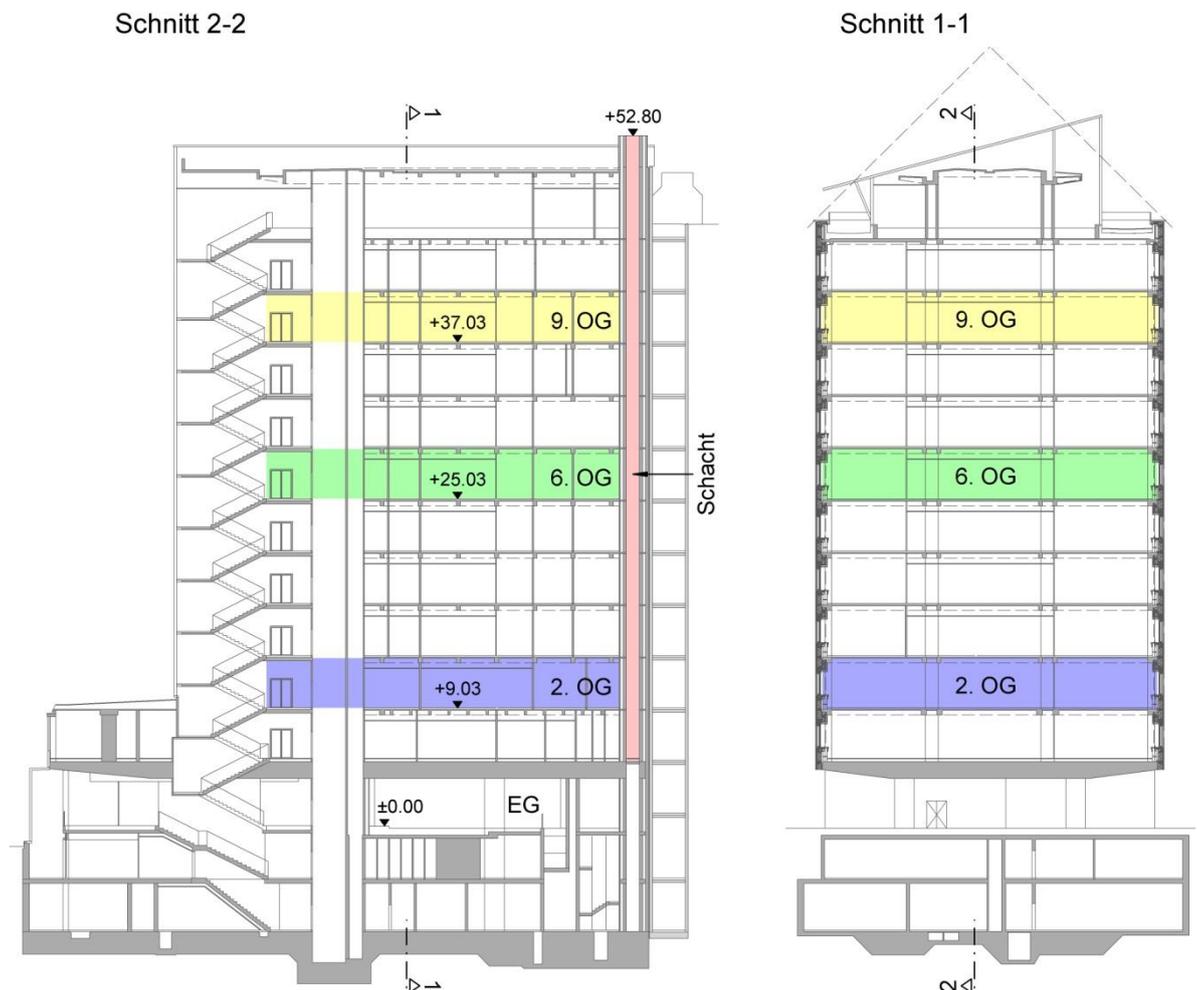


Abb. 2.3 Schnitte Chemiehochhaus mit farbig markierten Geschossen und Schacht

Um das natürliche Luftströmungsverhalten im Gebäude beurteilen zu können, wurde für die Messungen das 2., 6. und 9. Obergeschoss gewählt. In Abb. 2.3 *Schnitte Chemiehochhaus* sind zwei Übersichtsschnitte des Gebäudes dargestellt. Die Geschosse wurden jeweils durch eine Öffnung mit dem Schacht verbunden, damit der Kamineffekt, der durch die Temperaturdifferenz von Innen- zu Außenluft entsteht, genutzt werden kann. Der verwendete Haustechnikschacht war zum Zeitpunkt der Messung nicht in Verwendung. Alle vorhandenen Raumlufttechnikanlagen wurden über einen anderen Schacht betrieben.

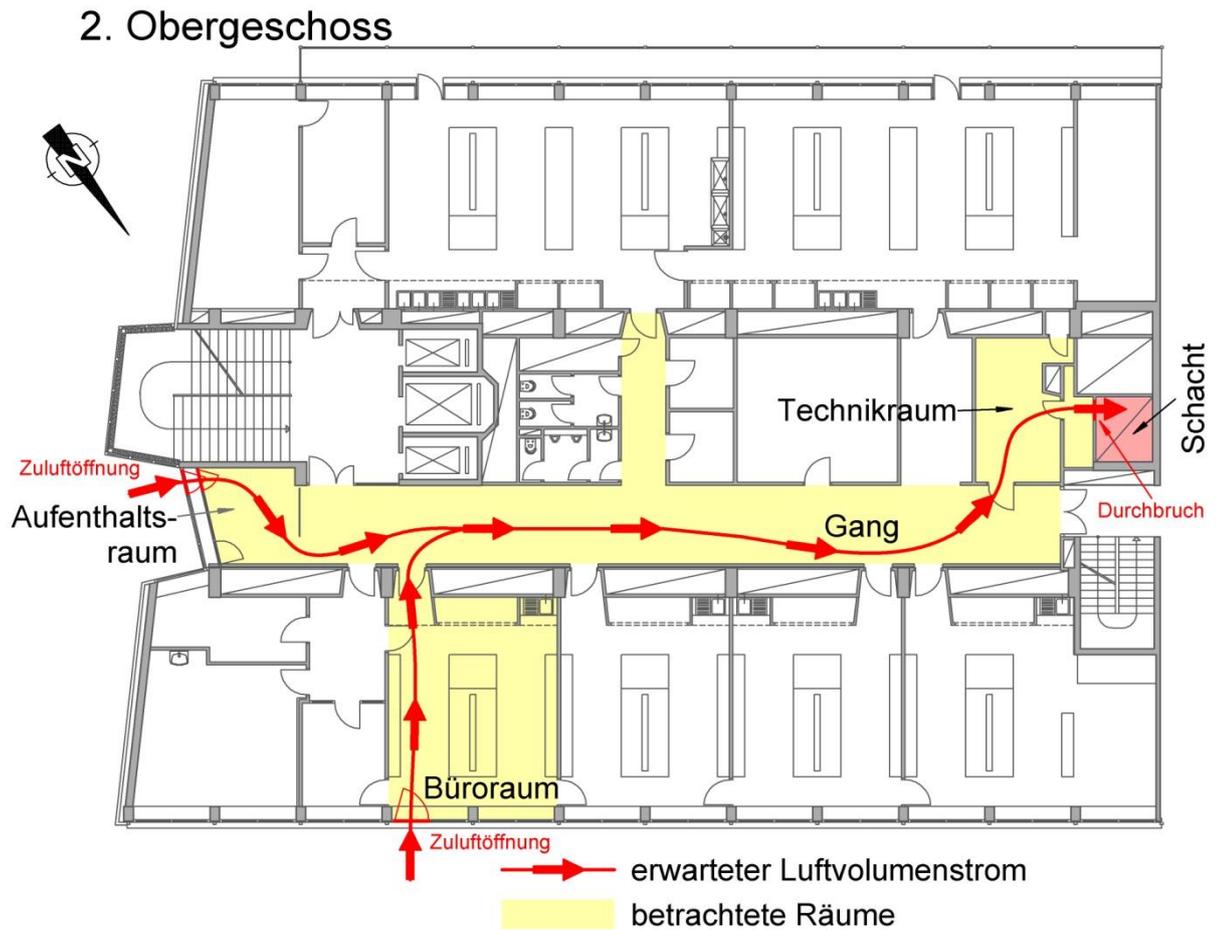


Abb. 2.4 Grundriss 2. OG Übersicht mit eingezeichnetem Luftströmungsweg

Abb. 2.4 zeigt eine Übersicht des 2. Obergeschosses stellvertretend für alle Geschosse. Die für die Messungen betrachteten Räume sind gelb hervorgehoben. Der erwartete Volumenstrom ist rot eingezeichnet. Zwischen Schacht und Technikraum wurde in jedem Stock ein Durchbruch hergestellt. Als Zuluftöffnungen wurden bestehende Fenster verwendet.

Aufgrund der Raumaufteilung bot es sich an, je Geschoss einen Büroraum an der Nordfassade in die Messung einzubeziehen, um auch das Potential einer Lüftung über an die Gänge angeschlossene Räume zu ermitteln. In jedem Geschoss wurde ein anderer Büroraum für die Messung verwendet. Sonst bleibt der Grundriss über die betrachteten Geschosse unverändert. Das Hauptaugenmerk der Messungen lag auf dem Volumenstrom durch den Gang.

## **3 Nachweis der Kernlüftung nach Norm**

### **3.1 Heizwärmebedarf und Kühlbedarf**

Die Nachweisführungen für den Energieausweis eines Gebäudes beschränken sich derzeit im Wesentlichen auf eine Abschätzung des Heizwärme- und Kühlbedarfs sowie auf Schallschutz-Nachweise. Diese Abschätzungen werden bei Errichtung, Verkauf und Vermietung gefordert und sind nach den aktuell gültigen Normen ÖN-B 8110 „*Wärmeschutz im Hochbau*„ und Richtlinien OIB 6 „*Energieeinsparung und Wärmeschutz*“ durchzuführen.

Im folgenden Kapitel wird die Nachweisführung bei Kernlüftung nach diesen Vorschriften betrachtet.

#### **3.1.1 HWB - Heizwärmebedarf**

Der Heizwärmebedarf ist ein Maß für die Effizienz der Heizanlage und Isolierung der Gebäudehülle. Je geringer der Energiebedarf pro m<sup>2</sup> Geschossfläche und Jahr ist, umso geringer sind die Heizkosten, und umso besser ist das Gebäude zu bewerten. [8]

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt durch Simulation des Gebäudes über ein Standardjahr mit Hilfe genormter standortbezogener Klimadaten.

Der Heizwärmebedarf kann durch eine kompakte Bauform (weniger Oberfläche), bessere Wärmedämmeigenschaften der Bauteile an der Gebäudehülle, Vermeidung von Wärmebrücken und eine dichte Gebäudehülle verringert werden. Durch den Einsatz von Wärmetauschern und mechanischen Lüftungsanlagen kann auch der Energieverlust durch die Abluft, die für den hygienischen Luftwechsel notwendig ist, vermindert werden.

Er ist also durch Wahl der Baustoffe, Bauweise und der Haustechnikanlage beeinflussbar.

Nachweis und Berechnung erfolgen nach ÖN B 8110 und OIB 6. Dafür stehen auch Softwarelösungen von verschiedenen Anbietern zu Verfügung.

### **3.1.2 KB - Kühlbedarf**

Der Kühlbedarf ist die rechnerisch ermittelte Wärmemenge (Nutzenergie), die zur Aufrechterhaltung einer vorgegebenen Innentemperatur benötigt wird. Nach Ö-Norm B 8110-6 „*Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf*“. [8]

Ein Kühlbedarf kann durch Sonneneinstrahlung in das Gebäude oder durch die Nutzung des Gebäudes entstehen. Durch beide Einflüsse steigen die Temperaturen im Inneren des Gebäudes. Ein Kühlbedarf tritt dann auf, wenn die Wärmegewinne größer als die Wärmeverluste sind. Laut Ö-Norm muss die so entstandene Wärme, sofern die operativen Temperaturen über 26 °C ansteigen, wieder abgeführt werden. Der Wärmeabtransport kann über Luftwechsel oder Abkühlen der Bauteile erfolgen.

Der Nachweis des Kühlbedarfs erfolgt nach ÖN B 8110-6 Kapitel 9.3 „*Jährlicher Kühlbedarf*“. Dafür werden die Monatssummen der Wärmegewinne und Wärmeverluste verglichen und die überschüssigen Wärmegewinne addiert.

Die Ermittlung der Wärmeverluste und Wärmegewinne erfolgt nach ÖN B 8110-6 Kapitel 7 und 8. „*Ermittlung der Gesamtwärmeverluste bzw. -gewinne*“.

Die Wärmegewinne setzen sich aus den inneren und solaren Wärmegewinnen zusammen. Innere Wärmegewinne entstehen z.B. durch elektrische Geräte, künstliche Beleuchtung und Körperwärme von Personen.

Die inneren Netto-Wärmegewinne werden gemäß ÖN B 8110-5 „*Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile*“ ermittelt. Die Summe aus den inneren Netto-Wärmegewinnen und der durchschnittlichen Leistung der Beleuchtung wird mit der Dauer des Monats multipliziert um die inneren Wärmegewinne je m<sup>2</sup> der konditionierten Bezugsfläche zu berechnen.

Solare Wärmegewinne treten durch Sonneneinstrahlung durch Glasflächen in der Gebäudehülle und durch Aufheizung opaker Bauteile auf. Die Sonneneinstrahlung durch Glasflächen kann durch die Anordnung von Verschattungsvorrichtungen bzw. durch Verschattung durch die Umgebung (Bäume, Gebäude, Topografie) vermindert werden und wird von den Verglasungseigenschaften beeinflusst.

Die Ermittlung des Energieeintrags durch transparente Bauteile erfolgt durch die Berechnung der durch die Sonneneinstrahlung eingebrachten Energie. Je Glasfläche wird die Orientierung, ein Faktor für die Verschattung und der Gesamtenergie-Durchlassgrad der Fläche berücksichtigt. Danach wird über alle Glasflächen summiert.

Die eingebrachte Energie durch opake Bauteile ist abhängig von der Oberflächenfarbe der Bauteile. Der solare Wärmeeintrag wird für jeden Bauteil aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten, der Orientierung und der Fläche errechnet und über alle Bauteile summiert.

Die Wärmeverluste setzen sich aus den Transmissions- und den Lüftungswärmeverlusten zusammen. Die Transmissionswärmeverluste sind Verluste über Bauteile und Wärmebrücken. Die Lüftungswärmeverluste berücksichtigen Luftwechsel durch offene Fenster bzw. Türen, aus Raumlufteinrichtungen (RLT-Anlagen) und durch Infiltration.

Als Wärmeverluste bei Nachtlüftung zählen laut ÖN B 8110-6 die Lüftungswärmeverluste im Kühlfall. Sie ergeben sich als Summe aus den Infiltrationsverlusten und den durch die Raumlufteinrichtung erzeugten Lüftungswärmeverlusten. Die Kernlüftung wird über Regelklappen bzw. die Fensteröffnungsgröße gesteuert. Sie kann daher als Teil der RLT-Anlage betrachtet werden.

Der Lüftungswärmeverlust wird über die Monatsmitteltemperaturen und den Lüftungsleitwert der RLT-Anlage errechnet. Dieser Lüftungsleitwert ergibt sich aus dem belüfteten Volumen, dem erzeugten Luftwechsel und Beiwerten für die Effektivität von Wärmetauschern und der Wärmespeicherkapazität von Luft.

### **3.1.3 Sommerliches Verhalten**

Der Nachweis zur Vermeidung der sommerlichen Überwärmung ist in der Ö-Norm B 8110-3 „*Wärmeschutz im Hochbau - Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse*“ geregelt. Diese ist nur für den Nachweis der sommerlichen Überwärmung gedacht, kann aber genauso für die Berechnung der Überwärmung in den Übergangszeiten verwendet werden.

Das vereinfachte Verfahren laut Ö-Norm B 8110-3 für die Ermittlung der sommerlichen Überwärmung darf für Nicht-Wohngebäude, wie Bürogebäude und Universitäten, nicht verwendet werden. Daher kann es auf das betrachtete Hochhaus nicht angewendet werden und wird nicht weiter betrachtet.

Die Nachtlüftung in der Übergangszeit ist besonders effektiv, da tagsüber durch die Sonneneinstrahlung die Gebäude aufgeheizt werden, und die Außentemperaturen in den Nachtstunden stark genug sinken um Gebäude mit der Außenluft effektiv kühlen zu können.

Der Nachweis der Vermeidung der sommerlichen Überwärmung nach ÖN B 8110-3 erfolgt durch die raumweise Berechnung des Tagesverlaufs der Innentemperaturen und den Vergleich des Ergebnisses mit den Anforderungen. Für Nicht-Wohn-Gebäude wie das betrachtete Hochhaus gilt er als erbracht, wenn die maximale operative Temperatur 27°C nicht übersteigt.

Betrachtet werden die als kritisch eingestuft Räume. Handelt es sich dabei um einen Raumverbund dürfen auch thermisch gekoppelte Nebenräume in die Berechnung einbezogen werden.

Die Berechnung der operativen Temperatur erfolgt mit EDV-Programmen, die nach ÖNORM EN ISO 13791 „*Thermisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Berechnungsalgorithmen*“ zertifiziert sein müssen. Für diese Berechnung werden hauptsächlich innere Lasten, Strahlungswärmegegewinne, Lüftungswärmeverluste und die speicherwirksamen Massen der Bauteile berücksichtigt. Als Stichtag für die Berechnung ist der 15. Juli gewählt.

Für die vorliegende Arbeit sind die geometrischen Daten, die Bauteile, deren Ausführung und die Nutzung der Zonen vorgegeben und können nicht beeinflusst werden. Die einzigen Parameter, die beeinflusst werden können, sind die

Lüftungswärmeverluste, die fast ausschließlich von der Luftwechselrate abhängen.

### **3.1.4 Lüftung**

Der minimale Luftwechsel ist mit dem hygienischen Luftwechsel begrenzt. Er kann durch Öffnen der Fenster oder eine RLT-Anlage gewährleistet werden und ist vor allem in der Heizperiode ausschlaggebend. Die Wärmeverluste durch die Lüftung können durch die Verwendung von Wärmerückgewinnungsanlagen (Wärmetauschern) vermindert werden.

In der Kühlperiode verringern die Wärmeverluste durch Lüftung den nötigen Kühlbedarf und gehen also in die Energiebilanz positiv ein. Hier ist ein möglichst hoher Luftwechsel mit der kühlenden Außenluft in der Nacht anzustreben.

Die laut Ö-Norm B 8110-5 (Tabelle 2 – Nutzprofile) anzusetzenden energetisch wirksamen Luftwechselraten bei Fensteröffnung sind je nach Gebäudetyp zwischen 0,4/h und 3,0/h angegeben. Für Bürogebäude ist der Luftwechsel mit 1,2/h und für Hochschulen mit 1,8/h angegeben.

Die Luftwechselrate gibt an, wie oft die gesamte Raumluft ausgetauscht wird. Eine Luftwechselrate von 1,5/h bedeutet, dass jede Stunde das 1,5 fache Rauminvolumen an Frischluft zugeführt und als Abluft abgeführt wird.

#### **3.1.4.1 Natürliche Nachtlüftung**

Im Fall einer Nachtlüftung durch Öffnen der Fenster ist laut Ö-Norm B 8110-5 (Tabelle 2 – Nutzprofile) mit einer Luftwechselrate von 1,5/h zu rechnen.

#### **3.1.4.2 Nachtlüftung mit Raumluftechnik-Anlage**

Mit einer RLT-Anlage kann der gewünschte Luftwechsel im Rahmen der technischen Möglichkeiten der Anlage eingestellt werden. Zusätzlich ist hier aber der Energieverbrauch der RLT-Anlage zu berücksichtigen und in den Kühlenergiebedarf mit einzurechnen.

#### **3.1.4.3 Nachtlüftung mit Kernlüftung**

Die für diese Arbeit durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die Luftwechselraten bei Kernlüftung im Vergleich zur „reinen“ Fensteröffnung stark erhöht werden können. Der erzeugte Luftwechsel bei Kernlüftung ist abhängig von der Temperaturdifferenz und kann durch eine Begrenzung der Öffnungsgrößen gut reguliert und an die Erfordernisse angepasst werden.

Die aus den Messwerten errechneten Luftwechselraten liegen bei einer Temperaturdifferenz von ca. 10°C bei 7,5/h, also dem 5 fachen Wert einer normalen Nachtlüftung laut Ö-Norm. Das Mess-Setup war nicht auf die maximal erreichbaren Luftwechselraten ausgelegt, sondern diente dazu konstante gut messbare CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu liefern. Werden die Öffnungsgrößen z.B. durch einen größeren Öffnungswinkel vergrößert, sind noch größere Luftwechselraten zu erwarten.

Die erhöhten Luftwechselraten durch die Kernlüftung bewirken einen größeren Wärmeabtransport und damit geringere Innentemperaturen für den Nachweis der sommerlichen Überwärmung. Durch die geringeren Innentemperaturen sinkt auch der Kühlbedarf des Gebäudes.

Der Nachweis des sommerlichen Verhaltens bei Kernlüftung kann mit den gängigen Verfahren durch Berücksichtigung der erhöhten Luftwechselraten und dem damit verbesserten Wärmeabtransport geführt werden.

### **3.1.5 Zonierung des Gebäudes**

Bei dem Nachweis des sommerlichen Verhaltens des Gebäudes nach Ö-Norm hat die Größe des betrachteten „Raumes“ einen starken Einfluss auf das Ergebnis. Räume, die durch offene Türen verbunden sind, können als thermisch gekoppelt betrachtet und als zusammenhängende Zone berechnet werden.

Bei den Messungen der Kernlüftung im Chemie-Hochhaus wurden alle Innentüren offen gehalten um die Luftzirkulation durch das Geschoss zu gewährleisten. Über einen Schacht sind auch die Geschosse untereinander verbunden und das Gebäude könnte als Einheit betrachtet werden. Die Berechnungen und Messungen haben aber gezeigt, dass sich die Geschosse großteils unabhängig voneinander verhalten.

Der betrachtete Gebäudeteil wurde deshalb in 4 Zonen aufgeteilt, siehe Abb. 2.3 *Schnitte Chemiehochhaus* auf Seite 7. Je eine Zone für die betrachteten Geschosse und eine Zone für den verbindenden Schacht. Die genaue Zoneneinteilung ist im Kapitel 5.1 *Berechnungsmodell* auf Seite 18 abgebildet.

Die Zonen sind in Unterzonen aufgeteilt, um die Messdaten den einzelnen Räumen zuordnen zu können. Diese weitere Aufteilung ist notwendig, da nicht alle Räume in Serie hintereinander angeordnet sind.

## **4 Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Volumenströme durch thermischen Auftrieb**

Der Volumenstrom ist ein Maß für Strömungen. Er gibt an, wie viele  $\text{m}^3$  Medium in einem vorgegebenen Zeitraum durch eine bestimmte Fläche oder ein bestimmtes Volumen fließen. Der Volumenstrom wird in  $\text{m}^3/\text{s}$  oder  $\text{m}^3/\text{h}$  angegeben. Über die Dichte des Mediums steht er in direktem Zusammenhang zum Massenstrom.

Es gibt mehrere Möglichkeiten Volumenströme zu berechnen. Am gängigsten sind Berechnungsverfahren, die mit Geschwindigkeiten, Druckdifferenzen oder Konzentrationen arbeiten.

### **4.1 Strömungsgeschwindigkeit**

Eine Möglichkeit, die vor allem in Rohrleitungen und Schächten Anwendung findet, ist die Berechnung des Volumenstroms aus der Strömungsgeschwindigkeit.

Ist die Strömungsgeschwindigkeit in einem Querschnitt der Leitung bekannt und konstant, kann durch Multiplikation der Geschwindigkeit mit der durchströmten Fläche der Volumenstrom errechnet werden. Die Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten in Leitungen kann z.B. durch Strömungsdrucksensoren gemessen werden.

Da in den großen Querschnitten, in den Gängen, Räumen und Schächten des betrachteten Hochhauses, keine konstanten Strömungsgeschwindigkeiten zu erwarten sind, wurden sie nicht gemessen. Die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten in diesen Öffnungen treten aufgrund von Turbulenzen, Verwirbelungen und unterschiedlichen Anströmverhältnissen auf.

## 4.2 Konzentrationen

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung des Volumenstroms besteht in der Rückrechnung aus dem Massenstrom. Durch Division des Massenstroms durch die Dichte des Mediums erhält man den Volumenstrom.

Der Massenstrom eines Gases kann z.B. durch die Messung der Konzentrationen eines damit vermischten Tracergases gemessen werden. Aus der Veränderung der Konzentration kann der Massen- und Volumenstrom errechnet werden. Für diese Berechnung müssen die Konzentrationen des ein- und ausströmenden Tracergases durch die Oberfläche eines Kontrollvolumens bekannt sein. Auch die Anfangskonzentration und produzierte Menge des Tracergases im Kontrollvolumen sowie die Größe des Kontrollvolumens müssen bekannt sein. Die Berechnungen aus den gemessenen Konzentrationen sind nur aussagekräftig, wenn eine vollständige Durchmischung von Tracergas und Raumluft sichergestellt ist. Sind die Öffnungsgrößen der Ein- und Ausströmöffnungen bekannt, kann auch die Strömungsgeschwindigkeit in den Öffnungen ermittelt werden.

Dieses Verfahren, das im Kapitel 7.1.2 auf Seite 30 genauer erklärt ist, wurde bei der Auswertung der Messdaten verwendet, siehe Kapitel 7.4.2.4.1 auf Seite 51.

## 4.3 Druckdifferenz

Eine weitere Möglichkeit der Berechnung des Massenstroms zwischen zwei Räumen ist der Vergleich des Luftdrucks in den Räumen. Sind Druckdifferenz, Öffnungsgröße und Dichte des Mediums bekannt, kann mittels Gleichung (1.5) (siehe Seite 20) der Massenstrom berechnet werden. Der Strom fließt immer vom Raum mit dem höheren Druckniveau in den Raum mit dem niedrigeren Druckniveau.

Dieses Verfahren der Berechnung der Massenströme wird in der Simulation des Gebäudes verwendet. Die verwendeten Gleichungen sind in Kapitel 5.2 ab Seite 19 abgebildet.

## **5 Berechnungsmodell**

Für die Luftströmungen, die bei der Kernlüftung auftreten, wird ein Berechnungsmodell für das Gebäude erstellt. Mit diesem Modell wird eine Prognose für die Luftströmungen errechnet.

Ziel ist, mit Hilfe des Modells eine Prognose der Luftströmungen bei Kernlüftung für das gesamte Haus zu errechnen. Für die Messungen und Validierung wurden in dieser Arbeit nur die betrachteten Geschosse und der Schacht im Modell abgebildet.

Zur Abbildung der Luftvolumenströme im Gebäude wird der Massenerhaltungssatz verwendet. Er besagt, dass in einem abgeschlossenen Volumen keine Massen verloren gehen oder generiert werden können. [3]

Aus dieser Annahme folgt, dass genau so viel Luft in das Gebäude einströmt wie ausströmt. Durch Unterschiede in Temperatur, Druck und Luftdichte zwischen einströmender und ausströmender Luft sind die Volumenströme nicht exakt gleich groß.

Zur Berechnung der Massenströme und der daraus resultierenden Volumenströme wird die Massenbilanz für das Gebäude erstellt und durch Anpassung des herrschenden Luftdrucks in den Räumen ausgeglichen.

Da das Lösen der Massenbilanzgleichung relativ komplex ist und die Massenbilanz für jeden neuen Temperaturzustand erneut gelöst werden muss, wurde für die Berechnungen in dieser Arbeit ein Matlab-Simulationsmodell (siehe Kapitel 10 *Anhang 1: Simulation – Matlab-Code* ab Seite 85) erstellt und getestet, das das auf den folgenden Seiten beschriebene Berechnungsmodell abbildet.

## 5.1 Modellaufbau

Das Berechnungsmodell umfasst drei Geschosse des Gebäudes und den Schacht. Um die Ergebnisse des Berechnungsmodells mit den Messergebnissen vergleichen zu können, wurde das Modell passend zu der Geometrie des gemessenen Gebäudes erstellt. Grundlage des Modells ist das in Abb. 2.3 *Schnitte Chemiehochhaus* auf Seite 7 dargestellte Gebäude. In jedem Geschoss wurde mit vier Zonen (Räumen) gerechnet. Eine Übersicht über das Zonenmodell zeigt die Abbildung: Abb. 5.1 Berechnungsmodell

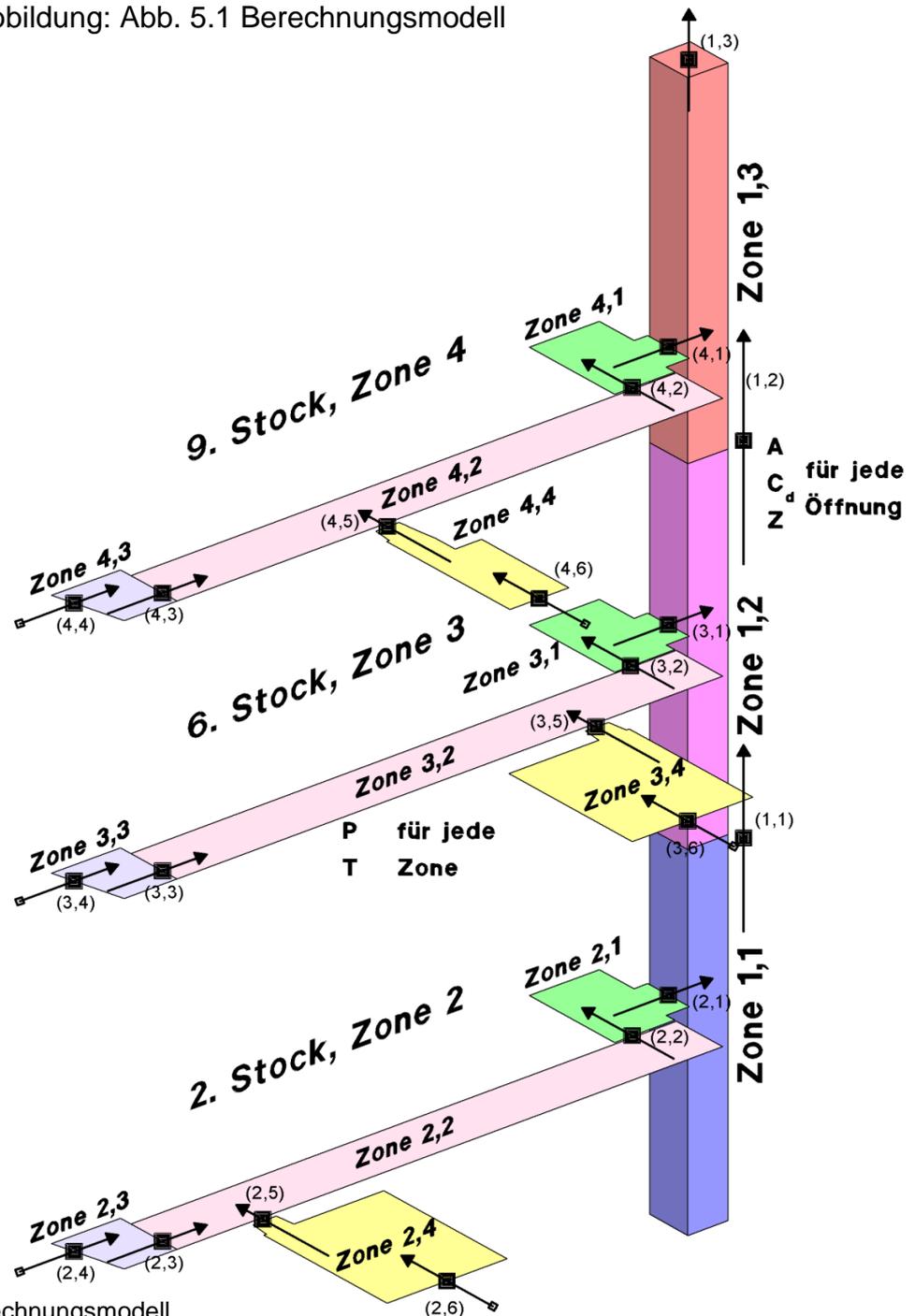


Abb. 5.1 Berechnungsmodell

## 5.2 Verwendete Formeln

### 5.2.1 Massenbilanz

Das Kernstück des Berechnungsmodells bildet die Massenbilanz, Gleichung (1.2). Sie wird durch eine Matrix symbolisiert, deren Wert bei einer ausgeglichenen Massenbilanz Null ist. Jeder Eintrag in der Massenbilanz steht für die Massenbilanz einer Zone und wird als Summe der in die Zone fließenden Massenströme gebildet, beispielhaft erklärt an der Zone 2,2. In Abb. 5.2 *Übersicht Massenströme für Zone 2,2* sieht man einen Ausschnitt aus dem Gesamtmodell, siehe Abb. 5.1 *Berechnungsmodell*

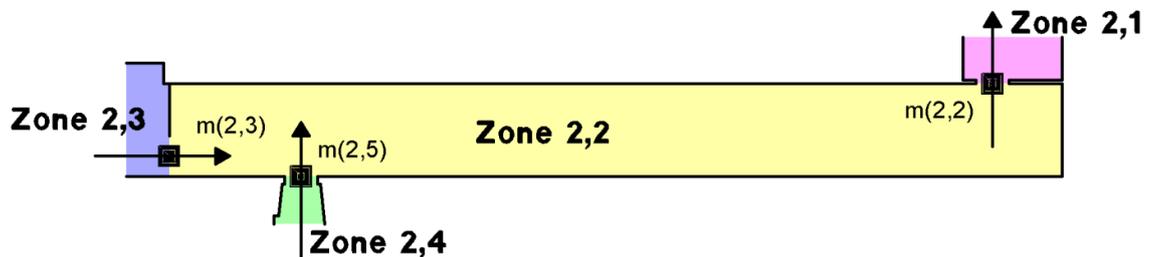


Abb. 5.2 Übersicht Massenströme für Zone 2,2

Die Einträge in die Zone:  $m_{(2,3)}$  und  $m_{(2,5)}$  und der Austrag aus der Zone:  $m_{(2,2)}$  ergeben die Massenbilanz für diese Zone, Gleichung (1.1).

$$M_{(2,2)} = m_{(2,3)} + m_{(2,5)} - m_{(2,2)} = 0 \quad (1.1)$$

$M_{(x,y)}$	Massenbilanz in kg/s
$m_{(x,z)}$	Massenstrom in kg/s
$x$	Geschossnummer
$y$	Zonennummer
$z$	Öffnungsnummer

Wird die Massenbilanz, Gleichung (1.1), über alle Zonen des Berechnungsmodells (siehe Abb. 5.1 *Berechnungsmodell*) erstellt, kommt man zu folgendem Ergebnis:

$$M = \begin{bmatrix} m_{(2,1)} - m_{(1,1)} & m_{(1,1)} + m_{(3,1)} - m_{(1,2)} & m_{(1,2)} + m_{(4,1)} - m_{(1,3)} & 0 \\ m_{(2,2)} - m_{(2,1)} & m_{(2,3)} + m_{(2,5)} - m_{(2,2)} & m_{(2,4)} - m_{(2,3)} & m_{(2,6)} - m_{(2,5)} \\ m_{(3,2)} - m_{(3,1)} & m_{(3,3)} + m_{(3,5)} - m_{(3,2)} & m_{(3,4)} - m_{(3,3)} & m_{(3,6)} - m_{(3,5)} \\ m_{(4,2)} - m_{(4,1)} & m_{(4,3)} + m_{(4,5)} - m_{(4,2)} & m_{(2,2)} - m_{(2,1)} & m_{(4,6)} - m_{(4,5)} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Die erste Zeile steht für die Zonen des Schachtes, die weiteren für die Geschosse. Da der Schacht nur drei Zonen hat, gibt es keine Zone (1,4). An dieser Stelle wird in die Massenbilanz eine 0 eingetragen. Jeder Eintrag in der Matrix, Gleichung (1.2), ergibt bei einer ausgeglichenen Massenbilanz eine Nullmatrix, Gleichung (1.3).

$$[0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Daraus folgt Gleichung (1.4)

$$M = [0] \quad (1.4)$$

Ein Auflösen der Gleichung (1.4) in ihre Bestandteile führt zu einem Gleichungssystem mit 16 Gleichungen und 21 unbekanntem Massenströmen.

### 5.3 Massenströme

Der Massenstrom ist eine gerichtete Größe. Das bedeutet, dass seine Wirkungsrichtung angenommen wird, bevor er bestimmt wird. Die positiven Richtungen sind im Berechnungsmodell, siehe Abb. 5.1 *Berechnungsmodell*, durch Pfeile in den Öffnungen gekennzeichnet.

Massenströme durch Öffnungen sind von mehreren Faktoren abhängig. Einfluss haben die Öffnungsgröße, die Druckdifferenz und der Durchflusskoeffizient. Der Massenstrom durch eine Öffnung wird mit der Gleichung (1.5) bzw. (1.6) berechnet.

$$\dot{m} = A * Cd * \sqrt{2 * \rho * \Delta P} \quad [5] \quad (1.5)$$

$\dot{m}$	Massenstrom in kg/s
$A$	Öffnungsgröße in m <sup>2</sup> ,
$Cd$	Durchflusskoeffizient (Dimensionslos)
$\rho$	Luftdichte in kg/m <sup>3</sup>
$\Delta P$	Druckdifferenz in Pa

Die Druckdifferenz  $\Delta P$  ist immer positiv einzusetzen, da sonst das Ergebnis der Wurzel irrational wird. Sie wird aus dem Druck im Ausgangsraum abzüglich des Drucks im Zielraum berechnet. Ist sie negativ, muss die Richtung oder das Vorzeichen des Massenstroms umgekehrt werden. Siehe Gleichung (1.6)

$$m = -A * Cd * \sqrt{2 * \rho * |\Delta P|} \quad (1.6)$$

Der Durchflusskoeffizient wird für die rechteckigen großen Öffnungen in diesem Berechnungsmodell mit 0,65 angesetzt. Werte und Überlegungen zum Durchflusskoeffizient  $C_d$  findet man unter anderem in *Energy and Buildings, Controlled natural ventilation for energy efficient buildings* [9]

Die Öffnungsgröße wird aus den ermittelten Abmessungen errechnet.

Die Luftdichte ist abhängig vom herrschenden Druck, der Temperatur und der Gaskonstanten. Sie wird mit der Gleichung (1.7) errechnet:

$$\rho = \frac{P}{R_s * T} \quad (1.7)$$

$\rho$	Dichte in $\text{kg}/\text{m}^3$
$P$	Druck in Pa
$T$	Temperatur in $^{\circ}\text{K}$
$R_s$	spezifische Gaskonstante in $\frac{\text{J}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{K}}$

Durch Einsetzen der Massenströme in die Massenbilanz bleiben als Unbekannte nur die Druckwerte in den 15 Zonen übrig. Mit 15 Gleichungen und 15 Unbekannten ist das Gleichungssystem lösbar.

Beispielhaft wird der erste Eintrag der Massenbilanz für eine positive Druckdifferenz  $\Delta P$  in der Gleichung (1.8) angeschrieben.

$$m_{(2,1)} - m_{(1,1)} = A_{(2,1)} * C_{d(2,1)} * \sqrt{2 * \frac{P_{(2,1)}}{R_s * T_{(2,1)}} * (P_{(2,1)} - P_{(1,1)})} - A_{(1,1)} * C_{d(1,1)} * \sqrt{2 * \frac{P_{(1,1)}}{R_s * T_{(1,1)}} * (P_{(1,1)} - P_{(1,2)})} \quad (1.8)$$

Alle Einträge der Massenbilanz sollen Null sein. Durch Nullsetzen und Umformen der Gleichung (1.8) zu Gleichung (1.9) ergibt sich folgende Berechnung für  $P_{(1,2)}$

$$P_{(1,2)} = P_{(1,1)} - \frac{A_{(2,1)}^2 * C_{d(2,1)}^2 * 2 * \frac{P_{(2,1)}}{R_s * T_{(2,1)}} * (P_{(2,1)} - P_{(1,1)})}{A_{(1,1)}^2 * C_{d(1,1)}^2 * 2 * \frac{P_{(1,1)}}{R_s * T_{(1,1)}}} \quad (1.9)$$

$P_{(1,2)}$  lässt sich somit aus den Druckwerten der angrenzenden Zonen errechnen. Stellt man die Gleichung (1.9) für eine Zone auf, die an die Außenluft grenzt, hat sie nur noch zwei Unbekannte, da der Außendruck als bekannt angenommen wird. Man könnte die Massenbilanz in dieser Weise schrittweise bearbeiten und dabei den jeweils zuvor ermittelten Ausdruck, siehe Gleichung (1.9) für den entsprechenden Druckwert einsetzen. Da am Anfang und

Ende des Systems der bekannte Außendruck herrscht, erhält man eine lösbare Gleichung mit einer Unbekannten. Die Menge an Variablen und Ausdrücken ist aber händisch kaum bewältig- und umformbar. Auch müsste für jede Druckkombination zu jedem Messzeitpunkt für die Berechnung bekannt sein, ob die Druckdifferenz  $\Delta P$  positiv ist oder der Massenstrom umgedreht werden muss.

Die Lösung der ausgeglichenen Massenbilanz, Gleichung (1.4) wird zumeist iterativ durch Variation der Druckwerte computerunterstützt ermittelt. Ist die Massenbilanz dann hinreichend genau gelöst, können durch Einsetzen der ermittelten Druckwerte in die Massenstromformeln, Gleichung (1.5) bzw. (1.6) die Massenströme ermittelt werden.

## 5.4 Druck

Der Druck ist eine absolute Größe, die eine Referenz braucht um sie quantifizieren zu können. Als Referenzdruck wurde für die Modellbildung der Außendruck auf der Höhe Null (Fußbodenoberkante Erdgeschoss) gewählt. Für die in der Massenstromformel verwendeten Druckdifferenzen ist der absolute Druck nicht wichtig. Hier ist nur sicherzustellen, dass von derselben Referenz ausgegangen wird bzw. der Druck auf derselben Höhe gerechnet wird.

Der Druck in einer Luftsäule kann mit der Gleichung (1.10) an jeder Höhe in der Luftsäule berechnet werden.

$$P_H = P_{\text{ref}} - \rho * g * H \quad (1.10)$$

<b>P<sub>H</sub></b>	Druck in der Höhe H in Pa
<b>P<sub>ref</sub></b>	Referenzdruck der Luftsäule in Pa
<b>ρ</b>	Dichte in kg/m <sup>3</sup>
<b>g</b>	Erdbeschleunigung in m/s <sup>2</sup>
<b>H</b>	Höhe über der Referenz in m

## 5.5 Volumenströme

Massenströme können in der Natur nur schwer gemessen werden. Um Vergleichswerte für die ermittelten Messdaten zu erhalten, werden alle Massenströme mit der Gleichung (1.11) in Volumenströme umgerechnet.

$$\dot{v} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (1.11)$$

$\dot{v}$	Volumenstrom in $\text{m}^3/\text{s}$
$\dot{m}$	Massenstrom in $\text{kg}/\text{s}$
$\rho$	Dichte in $\text{kg}/\text{m}^3$

## **6 Ergebnisse der Berechnung**

Um das Berechnungsmodell mit den Messwerten vergleichen zu können, wird mit den Parametern der Messung vom 16.03.2012 als Eingangsdaten eine Prognose für die auftretenden Volumenströme errechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung (siehe Kapitel 8 *Validierung* ab Seite 71) werden mit den gemessenen Werten verglichen. Um die Ergebnisse direkt mit den gemessenen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen vergleichen zu können, werden die errechneten Volumenströme in  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen umgerechnet.

Alle in diesem Kapitel gezeigten Daten und Diagramme wurden mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Berechnungsmodell erzeugt. Das Ergebnis der Berechnung ist der Verlauf der Volumenströme in den einzelnen Zonen des Gebäudes.

Die Bezeichnung der Zonen und Öffnungen erfolgt nach Abb. 5.1 *Berechnungsmodell*, siehe Seite 18, oder *Anhang 2: Berechnungsmodell zum Ausklappen* auf Seite 100.

Bei der Messung am 16.3.2012 fiel in der Zeit von 10:13 bis 10:55 die Messanlage aus, daher liegen für diesen Zeitraum keine Messdaten und damit Eingangsparameter für die Berechnung vor. Die folgenden Diagramme weisen in diesem Zeitraum Lücken auf.

### **6.1 Eingangsparmeter**

Eingangsdaten in das Berechnungsmodell sind die Gebäudeform, Innen- und Außentemperaturen, Aufteilung und Raumvolumen der Zonen, Öffnungsgrößen und Position der Verbindungen der Zonen und die  $\text{CO}_2$ -Produktionsraten des Tracergases.

#### **6.1.1 Temperaturen**

Die Temperaturen wurden an der Fassade des Gebäudes und in jeder Zone des Gebäudes gemessen. Aufgrund von Sonneneinstrahlung direkt auf den Sensor an der Fassade waren die Messwerte der Temperatur dort verfälscht und lagen teilweise über den im Gebäude gemessenen Temperaturen.

Für die Berechnung wurden daher die unverfälschten Temperaturdaten der Messstation am Lehartrakt im selben Gebäudekomplex der TU-Wien am Getreidemarkt herangezogen, die besser den an den Öffnungen herrschenden Temperaturen entsprachen. Der Temperaturverlauf ist in Diagramm Abb. 6.1 *Außentemperaturen* abgebildet.

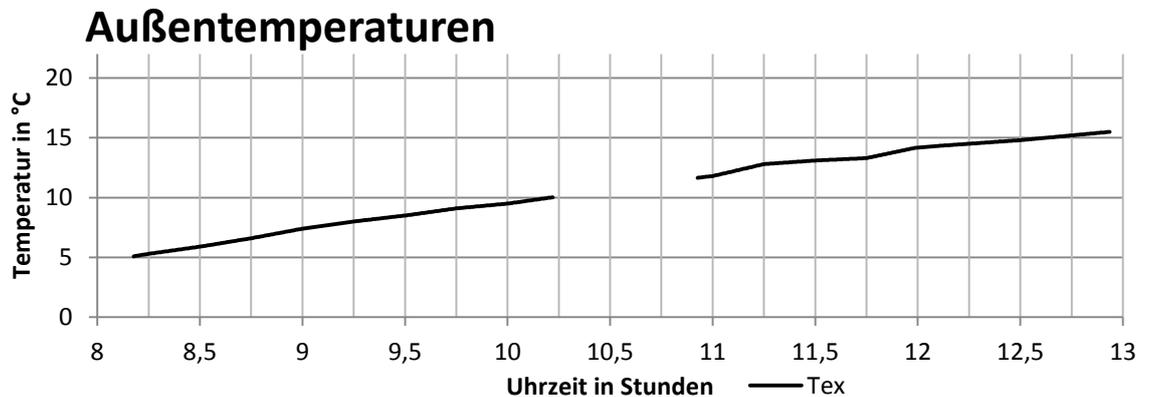


Abb. 6.1 Außentemperaturen, zeigt den Verlauf der Außentemperaturen über den Messzeitraum

Die Innentemperaturen wurden zusätzlich zu den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen durch die Messanlage aufgezeichnet. Die gemessenen Temperaturen sind in Diagramm Abb. 6.2 *Innentemperaturen* abgebildet. Diese Temperaturen haben Einfluss auf die Luftdichte und werden im Berechnungsmodell verwendet.

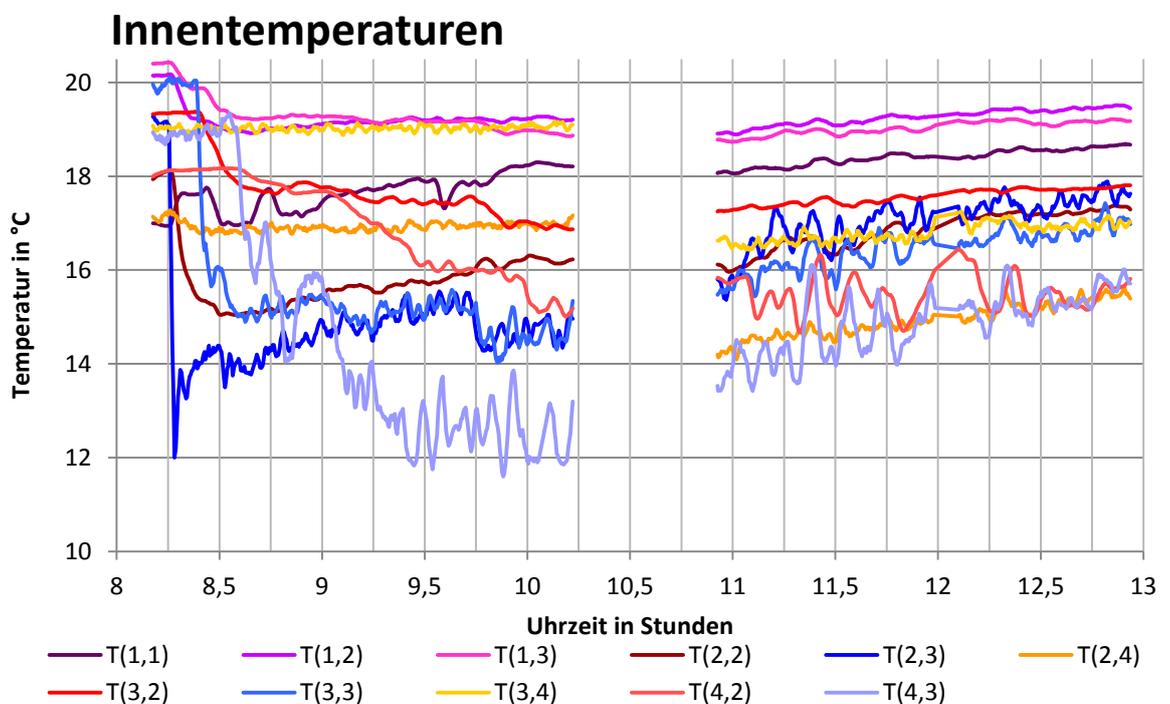


Abb. 6.2 Innentemperaturen, zeigt den Verlauf der Innentemperaturen in den verschiedenen Zonen über den Messzeitraum

### 6.1.2 Öffnungsgrößen

Die Öffnungsgrößen wurden im Gebäude vermessen. Die Öffnungsgrößen der Türen und Durchgänge blieben über den Messzeitraum unverändert. Die Öffnungswinkel der Fenster, und damit deren Öffnungsgröße, wurden an die Temperatur- und Strömungsverhältnisse angepasst. Die Türen der Büroräume waren zu Beginn der Messung geschlossen und wurden erst gegen 10:45 geöffnet. Die nachfolgenden Tabellen, Tab. 1: *konstante Öffnungsgrößen* und Tab. 2.: *variable Öffnungsgrößen* zeigen die verwendeten Öffnungsgrößen.

Tab. 1: Konstante Öffnungsgrößen

konstante Öffnungsgrößen:		
Nr.	Ort, (zwischen Zonen)	Öffnungsgröße in m <sup>2</sup>
1,1	Schacht, (1,1 und 1,2)	1,43
1,2	Schacht, (1,2 und 1,3)	1,43
1,3	Schacht, (1,3 und Außenzone)	1,43
2,1	2. OG Technikraum zu Schacht, (2,1 und 1,1)	0,96
2,2	2. OG Gang zu Technikraum, (2,2 und 2,1)	1,87
2,3	2. OG Aufenthaltsraum zu Gang, (2,3 und 2,2)	3,01
3,1	6. OG Technikraum, (3,1 und 1,2)	0,90
3,2	6. OG Gang zu Technikraum, (3,2 und 3,1)	1,87
3,3	6. OG Aufenthaltsraum zu Gang, (3,3 und 3,2)	3,01
4,1	9. OG Technikraum, (4,1 und 1,3)	0,72
4,2	9. OG Gang zu Technikraum, (4,2 und 4,1)	1,87
4,3	9. OG Aufenthaltsraum zu Gang, (4,3 und 4,2)	2,90
4,5	9. OG Büro zu Gang, (4,2 und 4,4)	0,01
4,6	9. OG Fenster Büro, (4,4 und Außenzone)	0,00

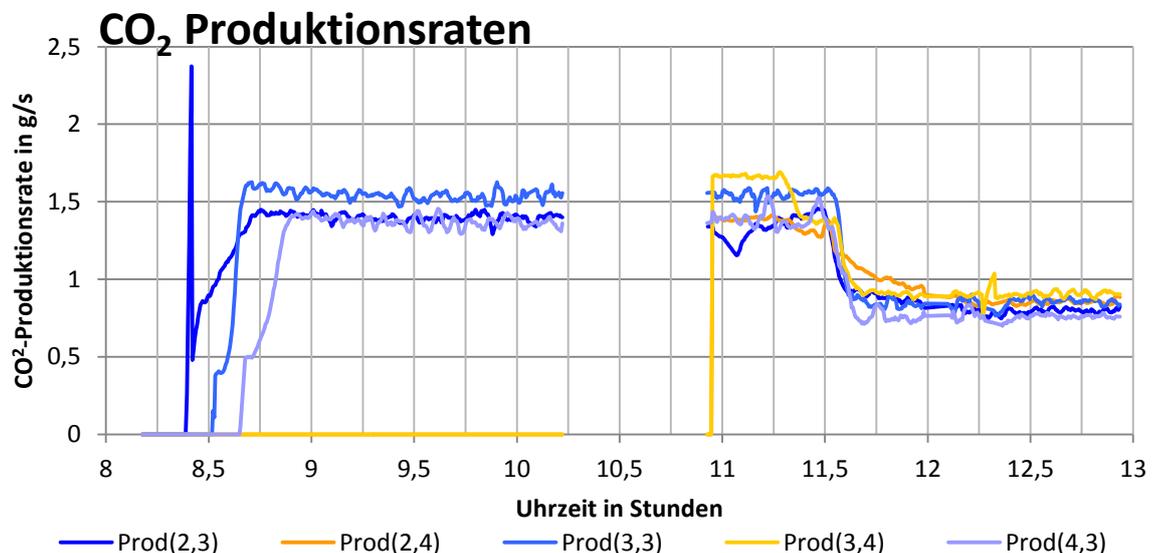
Tab. 2: variable Öffnungsgrößen

variable Öffnungsgrößen:			
Nr.	Ort, (zwischen Zonen)	Zeit	Öffnungsgröße in m <sup>2</sup>
2,4	2. OG Fenster Aufenthaltsraum, (2,3 und Außenzone)	8:09	0,22
		9:45	0,35
2,5	2. OG Tür Büro zu Gang, (2,2 und 2,4)	8:09	0,01
		10,55	1,60
2,6	2. OG Fenster Büro, (2,4 und Außenzone)	8:09	0,02
		10:55	0,207
3,4	6. OG Fenster Aufenthaltsraum, (3,3 und Außenzone)	8:09	0,35
		9:45	0,52
		13:00	1,45
3,5	6. OG Tür Büro zu Gang, (3,2 und 3,4)	8:09	0,01
		10,55	1,60
3,6	6. OG Fenster Büro, (3,4 und Außenzone)	8:09	0,02
		10,55	0,276
		13:00	1,725
4,4	9. OG Fenster Aufenthaltsraum, (4,3 und Außenzone)	8:09	1,34

Die Öffnungsgrößen wurden zur angegebenen Uhrzeit eingestellt und bis zur nächsten Änderung beibehalten.

### 6.1.3 CO<sub>2</sub>-Produktion

Um die berechneten Massenströme in CO<sub>2</sub>-Konzentrationen umzurechnen, werden CO<sub>2</sub>-Produktionsraten verwendet. Im Diagramm, *Abb. 6.3 CO<sub>2</sub>-Produktionsraten*, sind die CO<sub>2</sub>-Produktionsraten für die unterschiedlichen Zonen angegeben

Abb. 6.3 CO<sub>2</sub>-Produktionsraten

## 6.2 Berechnete Volumenströme

In den folgenden Diagrammen werden die berechneten Volumenströme für den Schacht und die verschiedenen Geschosse des Gebäudes gezeigt.

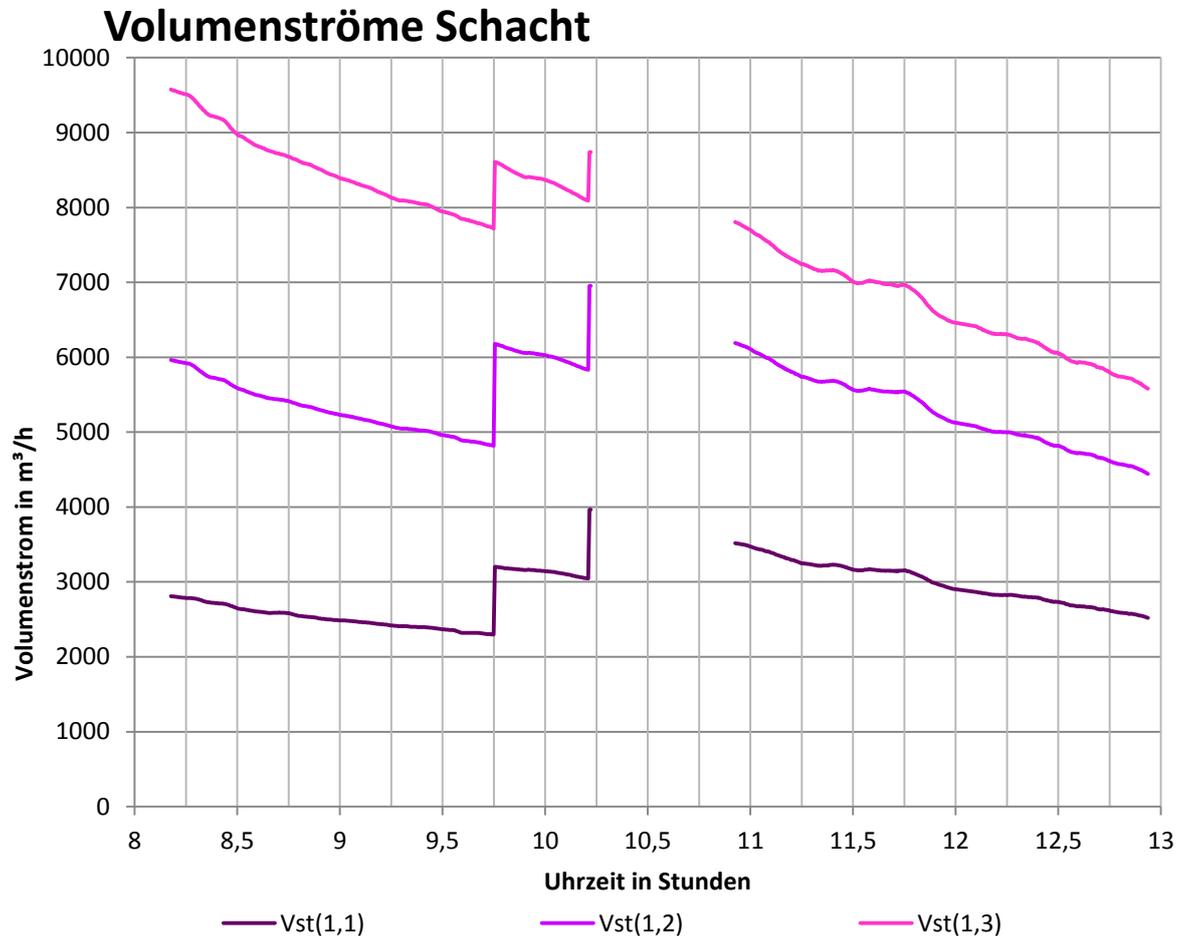


Abb. 6.4 Volumenströme im Schacht

Die Volumenströme im Schacht, siehe Diagramm *Abb. 6.4 Volumenströme im Schacht*, und in den Stockwerken, siehe *Abb. 6.5 bis Abb. 6.7*, weisen um 9:45 und zwischen 10:12 und 10:55 einen Sprung auf.

Beide Sprünge resultieren aus den geänderten Öffnungsgrößen der Fenster und Türen. Die Änderung der Öffnungsgröße, die den 2. Sprung bewirkt, tritt erst um 10:55 auf. Durch das Fehlen der Messdaten zwischen ca. 10:15 und 10:55 ist der Sprung nicht so deutlich erkennbar wie der erste.

### Volumenströme 2.OG

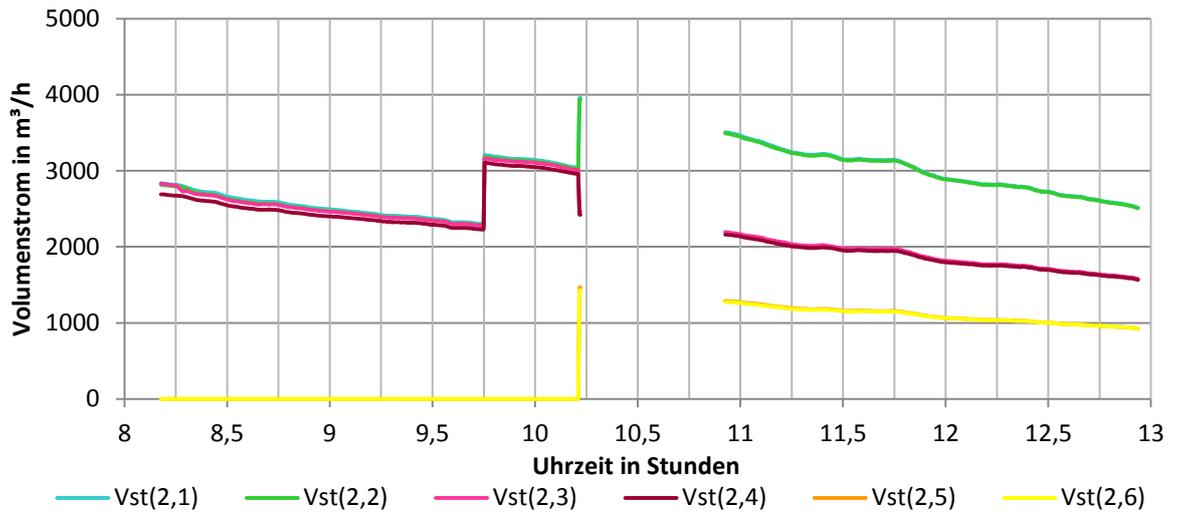


Abb. 6.5 Volumenströme im 2. Obergeschoss

### Volumenströme 6.OG

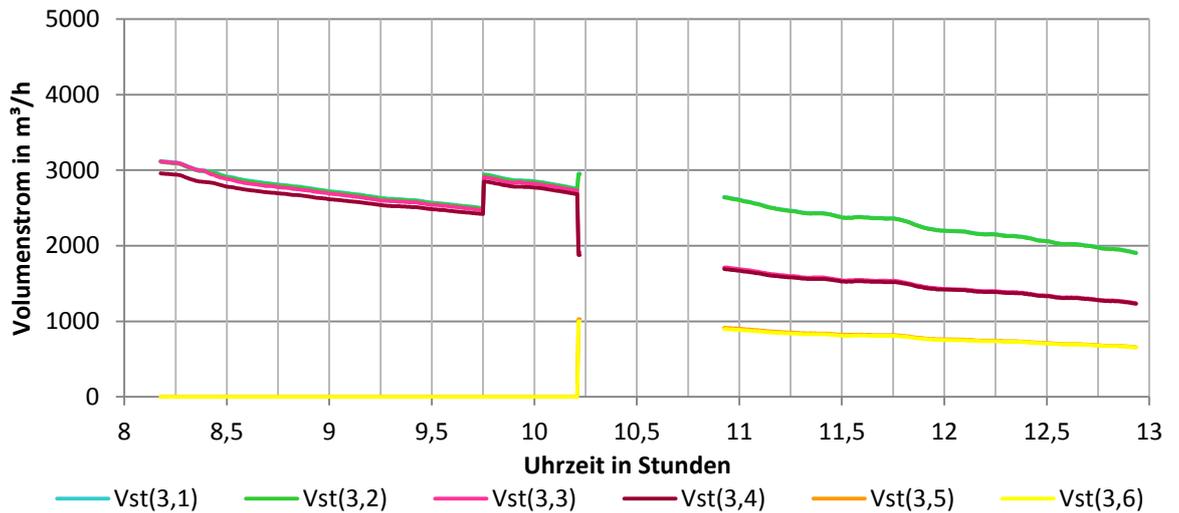


Abb. 6.6 Volumenströme im 6. Obergeschoss

### Volumenströme 9.OG

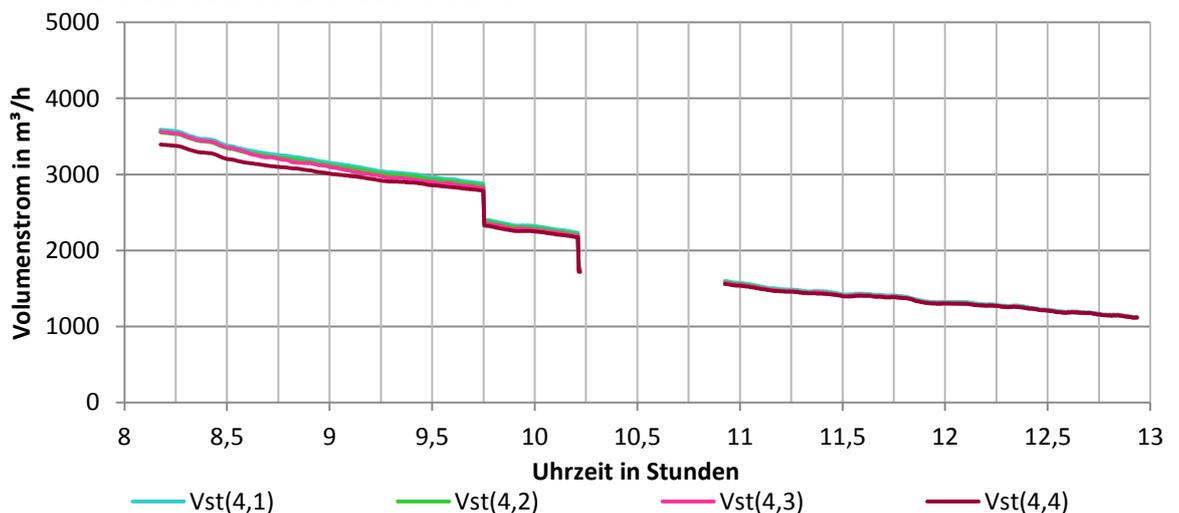


Abb. 6.7 Volumenströme im 9. Obergeschoss

Die Volumenströme können unter Berücksichtigung des herrschenden Drucks, der Temperatur und daraus folgend der Luftdichte in Massenströme umgerechnet werden. Die Verläufe der errechneten Massenströme unterscheiden sich nicht von denen der Volumenströme. Der Umrechnungsfaktor bewegt sich zwischen ca. 1,19 und 1,27 kg/m<sup>3</sup>.

## **7 Messen der Luftströmung**

Die Messungen des Luftströmungsverhaltens wurden durchgeführt um Nachlüftungskonzepte mit Kernlüftung zur Vermeidung der sommerlichen Überwärmung beurteilen zu können.

Dafür waren Temperaturdifferenzen von mehreren Grad Celsius und Windstille über einen längeren Zeitraum erforderlich. Die Messtermine waren daher stark vom Wetter abhängig.

Durch Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Innenluft kommt es im Gebäude durch thermischen Auftrieb zu einem Kamineffekt. Der dabei entstehende Luftstrom wurde gemessen.

Bei den Messungen wurde in drei Geschossen und einem vertikalen Schacht das Luftströmungsverhalten ermittelt. Gemessen wurde im 2., 6. und 9. Geschoss des 11-stöckigen Gebäudes. Die Geschosse wurden für dieses Vorhaben durch neue Wanddurchbrüche mit einem über das Dach führenden Schacht verbunden.

Alle Messungen wurden mit dem Team des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz des Instituts für Hochbau und Technologie (E206) unter der Leitung von Proj.Ass. Dipl.-Ing. Hannes Konder durchgeführt. Neben Proj.Ass. Dipl.-Ing. Hannes Konder und mir war auch Dipl.-Ing. Markus Leeb an den Messungen beteiligt. Technische Unterstützung bei Zusammenstellung, Kalibrierung und Aufbau der Messanlage bekamen wir von Dipl.-Ing. Manfred Grüner und Ing. Harald Hofbauer

## **7.1 Messmethoden zur Bestimmung interzonaler Volumenströme in Gebäuden**

Um die interzonalen Volumenströme in Gebäuden bestimmen zu können, werden verschiedene Messwerte benötigt.

Wichtig ist die Kenntnis über mögliche Wege, die für die Luftströme zwischen den Zonen vorhanden sind. Besonders ist darauf zu achten, dass Luftströmungen aus dem System heraus vermieden werden, z.B. Luftströmungen in nicht betrachtete Räume, durch RLT-Anlagen oder nach außen.

Um diese Nebenströmungen zu verhindern und eindeutige Messwerte zu erzielen, müssen alle Wege abseits der geplanten Hauptströmung abgedichtet werden. Die Öffnungsgrößen im betrachteten Strömungsweg müssen erfasst werden und sind Teil der Messdaten.

Die Volumenströme können durch die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in den bekannten Öffnungen oder die Messung von Tracergas-Konzentrationen und -Produktion ermittelt werden.

### **7.1.1 Luft-Geschwindigkeit**

Die exakte Messung der Strömungsgeschwindigkeit in Öffnungen erweist sich in Gebäuden als schwierig, da es sich bei den Öffnungen im Normalfall um Türen und Fenster mit großen Abmessungen handelt, in denen keine konstanten Strömungsgeschwindigkeiten herrschen. Durch Turbulenzen, unterschiedliche Strömungsrichtungen und Geschwindigkeiten sind die punktuell gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten verfälscht und für die Ermittlung des Gesamtstroms durch die Öffnung nicht ausreichend. Sie können aber zur Plausibilitätskontrolle der durch ein anderes Verfahren gemessenen Daten herangezogen werden.

### **7.1.2 Tracergas-Konzentrationen**

Die Ermittlung der Volumenströme im Gebäude kann durch den Einsatz von Tracergasen erfolgen. Gemessen werden dabei die Produktion des Tracergases und die Tracergas-Konzentration an verschiedenen Stellen im Gebäude, in der in das Gebäude zuströmenden und aus dem Gebäude ausströmenden Luft.

Für die Messungen der Tracergas-Konzentrationen ist durch eine ausreichend hohe und konstante Produktion des Gases sicherzustellen, dass die Konzentrationen an den Messstellen mit den eingesetzten Messgeräten nachweisbar sind und aufgezeichnet werden können. Als Tracergas wurde CO<sub>2</sub> eingesetzt.

Die Produktion von CO<sub>2</sub> aus Druckluftflaschen hat sich bei den vorangegangenen Versuchen von Proj.Ass. Dipl.-Ing. Hannes Konder als nicht zielführend erwiesen, da über einen großen Zeitraum die benötigten Tracergas-Mengen nicht konstant erzeugt werden können. Daher wurde für die Messungen die Erzeugung von CO<sub>2</sub> aus Trockeneis gewählt. Dieses Verfahren wurde bereits in vorangegangenen Versuchen erprobt und hat sich bewährt. [1]

Die verwendete Produktionseinrichtung und Funktionsweise ist in Kapitel 7.3.3 auf Seite 42 erläutert.

Besonders wichtig ist die gute Durchmischung der Raumluft mit dem Tracergas. Durch die Anordnung eines Ventilators bei der Auslassöffnung der Tracergas-Produktion wird die Durchmischung im Raum sichergestellt.

Der Volumenstrom durch die Zuluftöffnung wird durch einen Vergleich der Tracergas-Konzentrationen in der Zuluft, Abluft und im Produktionsraum errechnet. Die verwendeten Formeln können in Kapitel 7.4.2.4 auf Seite 51 nachgeschlagen werden.

### **7.1.2.1 Messverfahren mit Tracergas**

Für die Messung mit Tracergas gibt es mehrere Verfahren, die zur Ermittlung des Volumenstromes bzw. des Luftwechsels in Räumen eingesetzt werden können. Die Verfahren sind in der ÖNORM EN ISO 12569 „*Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung des Luftwechsels in Gebäuden – Indikatorgasverfahren*“ [10] beschrieben und normiert. In den folgenden Absätzen sind die wichtigsten Eckpunkte der Verfahren zusammengefasst.

#### **7.1.2.1.1 Verfahren mit abfallender Konzentration**

Bei diesem Verfahren wird der Luftvolumenstrom aus der abfallenden Konzentrationskurve nach Beenden der Tracergas-Produktion ermittelt.

Es kommt bei konstanten Luftwechselraten zur Anwendung. Durch Produktion bzw. Einleitung des Gases und Vermischen mit der Raumluft im Messraum wird eine gleichmäßige Konzentration des Tracergases erzeugt.

Nach Beenden der Tracergaszuleitung wird die Abklingkurve der Konzentration betrachtet und daraus auf den vorhandenen Luftwechsel rückgerechnet.

Das Verfahren benötigt keine konstante Aufzeichnung der Konzentration. Die Abklingkurve kann aus stichprobenartigen Messungen ermittelt werden. Es setzt aber konstante nicht zu hohe Luftwechselraten voraus und ist vor allem geeignet um die Funktion von RLT-Anlagen zu testen.

#### **7.1.2.1.2 Verfahren mit konstanter Injektion**

Bei diesem Verfahren wird der Luftvolumenstrom aus der Tracergas-Konzentration bei konstanter Tracergas-Produktion errechnet.

Durch konstante Produktion oder Einleitung des Tracergases und Vermischung mit der Raumluft und Zuluft entsteht eine Tracergas-Konzentration in der Abluft der Zone, die gemessen wird. Aus dieser Konzentration und dem bekannten Raumvolumen der Messzone kann der Luftvolumenstrom errechnet werden. Bei konstantem Luftvolumenstrom kann stichprobenartig gemessen werden.

Variiert der Volumenstrom, werden Messdaten in geringen Zeitabständen benötigt, um den Verlauf des Volumenstroms berechnen zu können

Dieses Verfahren kommt zur Anwendung, wenn die Tracergas-Konzentration in der Abluft und Zuluft gemessen werden kann und mit veränderlichen Luftwechselraten gerechnet wird.

#### **7.1.2.1.3 Verfahren mit konstanter Konzentration**

Bei diesem Verfahren wird aus der für eine konstante Konzentration nötigen Produktionsrate der Luftvolumenstrom errechnet.

Es wird verwendet um die durchschnittliche Luftwechselrate bei Räumen mit verschiedenen Luftwechselraten in verschiedenen Bereichen des Raumes zu ermitteln, z.B. bei großen Hallen oder Sälen, und ist nur mit Spezialausrüstung durchführbar.

Bei diesem Verfahren wird an mehreren Orten in der Zone Tracergas produziert und mit der Raumluft vermischt. Die herrschende Konzentration wird laufend gemessen und die Produktionsrate so angepasst, dass die Konzentration gleichbleibt. Aus der je Zeiteinheit benötigten Menge Tracergas und der Konzentration wird der Volumenstrom errechnet.

#### **7.1.2.1.4 Verwendetes Verfahren:**

Für die Messungen wurde das Verfahren mit konstanter Injektion gewählt, da nur dieses Verfahren durch die Anwendbarkeit bei variablen Luftvolumenströmen den Anforderungen an die konkrete Messung entspricht.

#### **7.1.2.2 Tracergase**

Als Tracergas kann z.B. Helium, Kohlendioxid, Schwefelhexafluorid, Perfluorkohlenstoff, Ethylen oder Stickstoffmonoxid eingesetzt werden.

Helium ist ein chemisch stabiles Gas, das bei der Messung mit Gas-Chromatografie-Geräten nachgewiesen werden muss. Für eine Messung mit Live-Auswertung ist es ungeeignet, da die Analyse der Zusammensetzung des Gasgemischs Zeit benötigt und nicht laufend durchgeführt werden kann.

Bei Schwefelhexafluorid, Perfluorkohlenstoff und Stickstoffmonoxid handelt es sich um Treibhausgase, die aus Umweltschutzgründen nicht in großen Mengen eingesetzt werden sollen. Ethylen ist brennbar und nur unter erhöhten Vorsichtsmaßnahmen zu verwenden.

CO<sub>2</sub> ist relativ einfach handhabbar und ungefährlich. Es ist dabei aber darauf zu achten, dass CO<sub>2</sub> von der Einrichtung absorbiert werden kann bzw. von anwesenden Personen produziert wird. Bei Messungen, die eine sehr hohe Genauigkeit erfordern, sollte CO<sub>2</sub> nicht eingesetzt werden.

Für die Messungen wurde CO<sub>2</sub> als Tracergas gewählt, da es relativ leicht über große Zeiträume in ausreichend hoher Konzentration herstellbar ist und auch in im Betrieb befindlichen Gebäuden einsetzbar ist. Die Genauigkeit der Messungen ist für die Bewertung der Luftströmungen im Gebäude ausreichend.

## 7.2 Mess-Setup

Bei den Messungen wurden 2 verschiedene Setups verwendet.

Bei den drei ersten Messungen ging es darum die Messanlage (Sensoren, Aufzeichnungsgeräte und Verkabelung) zu testen und erste Ergebnisse zu sammeln. Bei diesen Messungen stand das 9. Obergeschoss noch nicht zur Verfügung. Daher wurden im 6. Obergeschoss zusätzlich die für das 9.OG bestimmten Sensoren montiert.

Für drei weitere Messungen wurde das Mess-Setup auf Basis der Ergebnisse und Erfahrungen der ersten Messungen verändert und auch das 9.OG stand dabei zur Verfügung.

Zusätzlich zu den Sensoren in den Geschossen und an der Fassade wurde am Dach des Gebäudes eine Wetterstation eingerichtet.

## 7.2.1 Auslegung der Messanlage (MA) im 2. OG für die ersten 3 Messungen

### 2. Obergeschoss, Messung 1-3

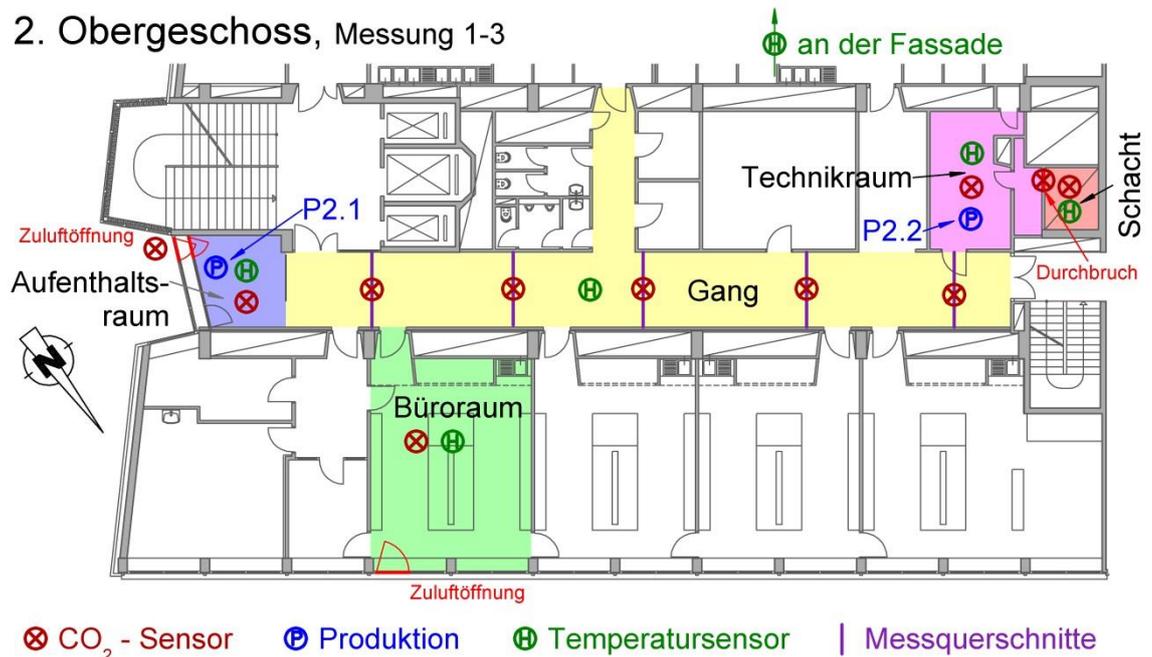


Abb. 7.1 Grundrissplan 2. OG

#### Sensoranordnung 2. OG:

##### Außen:

- 1 Humichip Temperatursensor an der Südfassade
- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor außen vor der Zuluftöffnung beim Aufenthaltsraum

##### Aufenthaltsraum:

- 4 CO<sub>2</sub>-Sensoren in unterschiedlichen Höhen
- 1 PT1000 Temperatursensor
- CO<sub>2</sub>-Produktion P2.1 mit Wiegeelement

##### Büroraum:

- 5 CO<sub>2</sub>-Sensoren auf ca. 2m Höhe
- 1 PT1000 Temperatursensor

##### Gang:

- 5 CO<sub>2</sub>-Sensoren, je 1 in den Messquerschnitten auf 2,1m Höhe
- 1 Humichip Temperatursensor in Raummitte

##### Technikraum:

- 1 CO<sub>2</sub>-Sensoren in Raummitte
- 1 Humichip Temperatursensor
- CO<sub>2</sub>-Produktion P2.2 mit Wiegeelement

##### Schacht:

- 3 CO<sub>2</sub>-Sensoren im Durchbruch zum Schacht
- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor 0,5m unter der Fußbodenoberkante (FBOK)
- 1 Humichip Temperatursensor 0,7m unter der FBOK



### 7.2.3 Auslegung der Messanlage für die weiteren Messungen

Die Sensorpositionen wurden für die weiteren Messungen im Wesentlichen in den drei Stockwerken gleich gewählt. Für die Temperaturmessung wurden statt den in den CO<sub>2</sub>-Sensoren eingebauten Temperaturfühlern die genaueren Humichip-Sensoren verwendet. Im 2. OG und 6. OG wurden wieder dieselben Büroräume gemessen.

Um Nebenströme und Lüftungsverluste zu minimieren, wurden bei diesen Messungen alle Türen und Öffnungen zu nicht betrachteten Räumen mit Klebeband und Folien abgedichtet.

Beispielhaft wird der Grundrissplan des 9. OG gezeigt:

#### 9. Obergeschoss, Messung 4-6

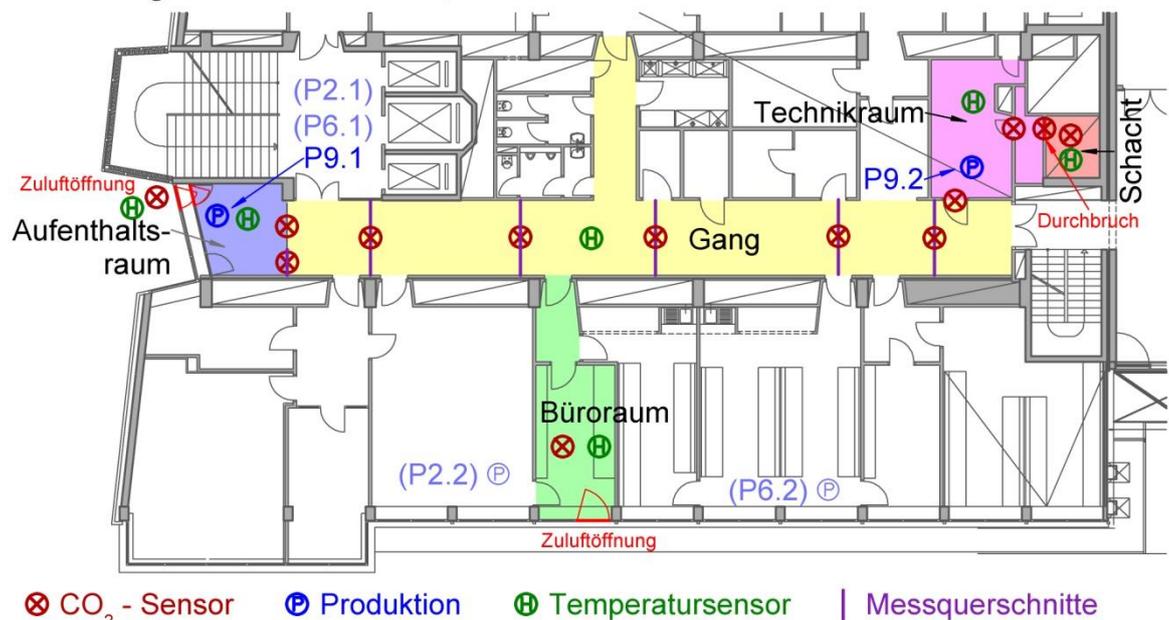


Abb. 7.3 Grundrissplan 9. OG

#### Sensoranordnung für alle Geschosse:

##### Außen:

- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor außen vor der Zuluftöffnung beim Aufenthaltsraum

##### Aufenthaltsraum:

- 3 CO<sub>2</sub>-Sensoren in unterschiedlichen Höhen im Messquerschnitt zum Gang
- 1 CO<sub>2</sub>-Sensoren in der abgehängten Decke über dem Gang
- 1 PT1000 Temperatursensor
- CO<sub>2</sub>-Produktion P2.1, P6 und P9.1 mit Wiegeelement

##### Bürraum:

- 5 CO<sub>2</sub>-Sensoren auf ca. 2m Höhe
- 1 PT1000 Temperatursensor

**Gang:**

- 5 CO<sub>2</sub>-Sensoren, je 1 in den Messquerschnitten
- 1 Humichip Temperatursensor in Raummitte

**Technikraum:**

- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor in der Tür zum Gang
- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor in der Tür vor dem Durchbruch
- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor im Durchbruch zum Schacht
- 1 Humichip Temperatursensor in der Raummitte

**Schacht:**

- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor 1,0m über dem Durchbruch
- 1 CO<sub>2</sub>-Sensor 1,0m unter dem Durchbruch
- 1 Humichip Temperatursensor 1,0m unter dem Durchbruch

**Geschossspezifische Anordnung:**

- 2 Humichip Temperatursensoren an der Südfassade im 2. OG und 6. OG
- 1 Humichip Temperatursensor vor der Zuluftöffnung beim Aufenthaltsraum im 9. OG

**Bürraum 2. OG:**

- Produktion P2.2 mit Wiegeelement im 2. OG

**Bürraum 6. OG:**

- Produktion P6.2 mit Wiegeelement im 6. OG

**Technikraum 9. OG:**

- Produktion P9.2 mit Wiegeelement im 9. OG

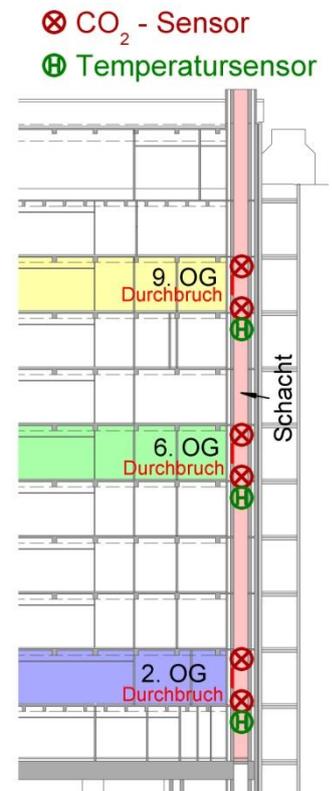


Abb. 7.4 Schnitt durch den Schacht

## 7.3 Messanlage

Die eingesetzte Messanlage bestand aus einem Aufzeichnungsgerät und 126 Sensoren, die in den drei Geschossen, im Schacht, auf dem Dach des Gebäudes und an der Fassade angeordnet wurden.

Gemessen wurden die CO<sub>2</sub>-Konzentration, Temperatur und Luftfeuchtigkeit im und rund um das Gebäude. Die Wetterstation am Dach des Gebäudes lieferte außerdem Daten über Strahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Von den Sensoren der Messanlage wurden nur 84 für dieses Projekt verwendet. Die Strahlungs- und Luftfeuchte-Sensoren sowie die in den CO<sub>2</sub>-Sensoren integrierten Temperatursensoren wurden nicht in die Auswertung integriert. Die Strahlungs- und Luftfeuchtigkeitsdaten wurden für ein anderes

Projekt erfasst. Die Temperatur konnte mit den installierten Humichip-Temperatur-Sensoren genauer erfasst werden.

Die Messanlage wurde über einen stationären PC gesteuert, der die Messdaten von den in jedem Geschoss angeordneten Datenloggern empfängt und gesammelt hat.

Die Datenerfassung erfolgte mit dem Programm Labview der Firma AMC-Analytik & Messtechnik GmbH Chemnitz, in einer eigens für die Messungen erstellten Maske. Dadurch war es möglich das Messintervall jederzeit anzupassen und die Messergebnisse live zu überwachen. Die Auswirkung der Änderungen von Öffnungsgrößen, Temperaturdifferenzen und CO<sub>2</sub>-Produktionsraten auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration an den einzelnen Sensoren wurden dadurch sofort ablesbar. Die Parameter Öffnungsgröße und CO<sub>2</sub>-Produktionsrate konnten so beeinflusst werden, dass die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen den für die Auswertung vorgesehenen Messbereich nicht verließen.



Abb. 7.5 Liveansicht der Messdaten

Zur Auswertung der ermittelten Messdaten wurde Microsoft Excel verwendet.

### **7.3.1 Aufbau**

Zu Beginn des Aufbaus wurden im 2. und 6. OG die Durchbrüche zwischen Schacht und Technikraum hergestellt um die Geschosse mit dem vertikalen Schacht zu verbinden. Der Durchbruch im 9. OG wurde erst im Jänner 2012 hergestellt, da erst dann entschieden wurde welches der oberen Geschosse für die Messungen freigegeben wird. Die Durchbrüche haben eine Fläche von 1,5m<sup>2</sup> und entsprechen damit in ihrer Größe etwa den für das umgebaute Gebäude geplanten Belüftungsöffnungen.

Bevor mit den Messungen im Gebäude begonnen werden konnte, wurden die Sensoren verkabelt, kalibriert, an die Messgeräte angeschlossen und

getestet. Diese Vorarbeiten fanden in den Werkstätten des Instituts für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz auf den Aspanggründen (Adolf-Blamauer-Gasse 1-3, 1030 Wien) statt. Da die Sensoren später im ganzen Geschoss des Hochhauses verteilt wurden, waren Kabellängen von bis zu 25m notwendig um die Sensoren mit den Datenloggern zu verbinden.

Insgesamt wurden 126 Sensoren in die Messanlage integriert. 60 CO<sub>2</sub>-Sensoren mit Temperaturfühler (davon 27 Temperaturfühler angeschlossen), 12 Humichips mit Temperatur und Luftfeuchtigkeitssensor, 6 PT1000, 6 Wiegeelemente, 3 Pyranometer

Nach dem erfolgreichen Test und der Kalibrierung der Messanlage in den Institutsgebäuden wurde die Messanlage in das Chemiehochhaus gebracht und aufgebaut. Die Sensoren wurden so verlegt, dass sie über den gesamten Versuchszeitraum im Gebäude verbleiben konnten.



Abb. 7.6 Vorrichtung für Kalibrierung und Test der CO<sub>2</sub>-Sensoren

Das Kalibrieren, Testen und der Aufbau der Messanlage erfolgte im August 2011.

Während der Messungen befanden sich die Sensoren mitten in den Querschnitten der Gänge, Räume und Türöffnungen. Nach den Messungen wurden die Sensoren so aus dem Weg geräumt, dass sie den normalen Gebrauch des Gebäudes nicht beeinträchtigten.

Um möglichst gute vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, mussten Nebenströme und Fremdluftströmungen verhindert werden. Dazu wurden bei den späteren Messungen die gemessenen Räume zum Rest des Gebäudes abgedichtet. Alle Türen und Schachtöffnungen wurden mit Klebeband und Folien abgedichtet und alle Zu- und Abluftanlagen abgeschaltet.

Vor den Messungen wurden die Abklebungen der Öffnungen kontrolliert und die Sensoren in Ihre Messpositionen gebracht. Das Trockeneis für die Tracergas-

Produktion wurde vor jeder Messung angeliefert und in die Produktionsstätten verteilt

### **7.3.2 Sensoren und Geräte**

#### **7.3.2.1 Messgerät**

Es wurden drei Messgeräte / Datenlogger vom Typ 34972A der Firma Agilent mit je zwei 20-Kanal-Multiplexern eingesetzt, an die alle Sensoren angeschlossen wurden. Bei den Messungen wurde nur die Messfunktion der Geräte eingesetzt. Die Messgeräte waren über Netzkabel mit dem PC verbunden, auf dem die Messdaten gespeichert wurden.

#### **7.3.2.2 CO<sub>2</sub> Sensoren**

Für die Messungen wurden CO<sub>2</sub>-Sensoren vom Typ EGQ222F001 der Firma Sauter verwendet. Die Sensoren messen die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Bereich von 0 bis 2000ppm und die Temperatur von 0°C bis 50°C. Die Messgenauigkeiten betragen für die CO<sub>2</sub>-Konzentration  $\pm 50$ ppm und für die Temperatur  $\pm 0,3$ °C.

Insgesamt wurden 60 CO<sub>2</sub> Sensoren auf 3 Geschossen eingesetzt.

Zur Kalibrierung der CO<sub>2</sub>-Sensoren wurde ein Windkanal gebaut, in den alle CO<sub>2</sub> Sensoren eingehängt wurden. Durch Justierung der Messwerte mittels Anpassungswerten im Messprogramm erfolgte die Kalibrierung.

Aufgrund der hohen Schwankung der gemessenen Temperaturen bei der Kalibrierung der Sensoren wurden diese Temperatur-Messdaten nicht für die Auswertung verwendet.

#### **7.3.2.3 Humichips**

Zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden Humichips vom Typ 17204HM der Firma Vaisala verwendet. Mit diesen Sensoren können Temperaturen zwischen -10°C und 50°C mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$ °C und Luftfeuchtigkeiten von 0 bis 100% mit einer Genauigkeit von  $\pm 4$ % gemessen werden. Es wurden 12 Humichips verwendet.

#### **7.3.2.4 PT1000**

Weiters wurden zur Temperaturmessung Platin-Temperatur-Sensoren des Typs M 222, PT1000 der Firma Heraeus verwendet. Mit diesen Sensoren können Temperaturen zwischen -70°C und 500°C mit einer Abweichung von max. 0,04% gemessen werden.

### 7.3.2.5 Waagen

Zur Messung der erzeugten CO<sub>2</sub>-Menge wurden Wiegezellen vom Typ MP71 der Firma Sartorius eingesetzt. Diese Wiegezellen können bis zu 100kg mit einer Abweichung von max. 0,02% messen.

### 7.3.3 CO<sub>2</sub>-Erzeugung

Für die Messungen waren höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen als die natürliche CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft notwendig. Die benötigten Konzentrationen wurden durch Verdampfen von Trockeneis in gezielt beheizbaren Behältern erzeugt.

Die Trockeneisbehälter wurden aus XPS-Dämmplatten hergestellt. Am Boden der Behälter wurde ein Heizelement mit 2000W Leistung eingebaut. Die Leistung konnte mittels Pulsung gesteuert werden. Der Behälterboden wurde mit Steinwolle geschützt.

Die Messung der pro Zeiteinheit erzeugten Menge CO<sub>2</sub> erfolgte mit Wiegeelementen. Dazu wurde der gesamte Behälter mit Beladung an der Wiegevorrichtung auf einem dafür vorgesehenen Gestell aufgehängt.

Um das erzeugte CO<sub>2</sub> gut im Raum zu verteilen, wurde bei jeder Produktion ein Ventilator angeordnet, siehe Abb. 7.7 *Produktionseinheit mit Behälter und Ventilator.*



Abb. 7.7 Produktionseinheit mit Behälter und Ventilator, gut erkennbar ist die Hängevorrichtung mit Wiegeelement

Durch die Pulsung des Heizelements konnten konstante Produktionsraten auf unterschiedlichen Niveaus erreicht werden. Beispielhaft wird hier der CO<sub>2</sub>-Produktionsverlauf für die 5. Messung gezeigt.

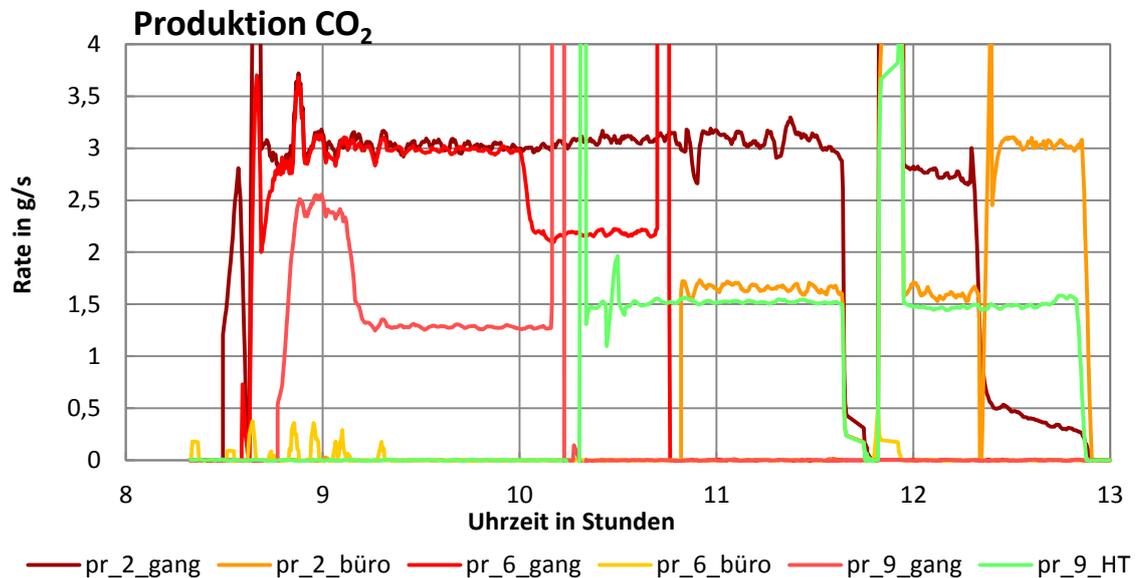


Abb. 7.8 Verlauf der CO<sub>2</sub>-Produktion bei der 5. Messung

## 7.4 Ablauf und Auswertung der Messungen

Vor Beginn der Messungen wurden die Sensoren in ihre Messpositionen gebracht, alle an den Messbereich anschließenden Türen und Öffnungen geschlossen bzw. abgedichtet, die Messanlage aktiviert und die Aufzeichnung der Messdaten gestartet.

Anschließend wurde das in Trockeneisform gelieferte CO<sub>2</sub> in die Produktionsboxen eingefüllt und in gasförmigen Zustand überführt.

Sobald in den Produktionsräumen die für die Messungen erforderlichen Konzentrationen erreicht wurden, wurden die Zuluftöffnungen geöffnet. Als Zuluftöffnungen wurden vorhandene Fenster verwendet. Der sich einstellende Luftvolumenstrom wurde über die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen an den Messstellen ermittelt.

### **7.4.1 Messungen August 2011**

Die ersten drei Messungen fanden am 18.08., 22.08. und 25.08.2011 statt. Gemessen wurde in der Nacht, wenn das Gebäude vom Tag aufgeheizt und die Außentemperatur bereits abgesunken war.

Bei diesen Messungen stand das 9. OG noch nicht für die Messungen zur Verfügung. Die Anordnung von Sensoren und CO<sub>2</sub>-Produktionen finden Sie im Kapitel 7.2 *Mess-Setup* ab Seite 34.

Bei der ersten Messung wurde nur in den Aufenthaltsräumen CO<sub>2</sub> produziert (P2.1 und P6) um so den Hauptvolumenstrom durch den Gang zu messen.

Nachdem die erwarteten Volumenströme über den Schacht nach oben nicht nachgewiesen werden konnten wurde bei den weiteren zwei Messungen auch in den Technikräumen CO<sub>2</sub> produziert, um die Volumenströme aus diesen Räumen besser beurteilen zu können. Die erwarteten Volumenströme traten jedoch nicht auf, das wurde auf einen zum Messtermin unbekanntem Ventilator am Schachtfuß und mechanische Abluftanlagen in den Chemielabors zurückgeführt.

Die Zuluftöffnungen in den Büroräumen wurden nicht geöffnet und die Türen zum Gang waren geschlossen. Die Messdaten der Büroräume konnten daher als Referenz für die nicht gemessenen Geschosse betrachtet werden.

Bei den ersten beiden Messungen zeigte sich, dass bei größeren Temperaturdifferenzen bessere Messergebnisse gewonnen werden konnten. Daher wurde die dritte Messung in den kühlest Nachtstunden von 3 bis 7 Uhr früh durchgeführt.

Für die Messung am 25.8. konnte ein Ventilator am Schachtfuß deaktiviert werden.

## 7.4.2 Auswertung der Messdaten vom August 2011 [10]

Zu den im vorigen Kapitel genannten Terminen ist es gelungen die CO<sub>2</sub>-Produktion jeweils über einen Zeitraum von mehreren Stunden konstant zu halten und erste auswertbare Messdaten zu sammeln.

Die ersten beiden Messungen mit einer Reihe von Versuchen dienten hauptsächlich der Vorbereitung der dritten Messung. Daher werden in der folgenden Auswertung hauptsächlich die Ergebnisse der dritten Messung vom 25.08.2011 betrachtet.

### 7.4.2.1 CO<sub>2</sub>-Produktion

Am 25.08.2011 wurden zuerst in einem Abstand von ca. 45 Minuten die Produktionen in den Heiztechnikräumen und erst gegen 6 Uhr früh jene in den Aufenthaltsräumen aktiviert. Produziert wurde über den gesamten Zeitraum mit ca. 1,7g/s.

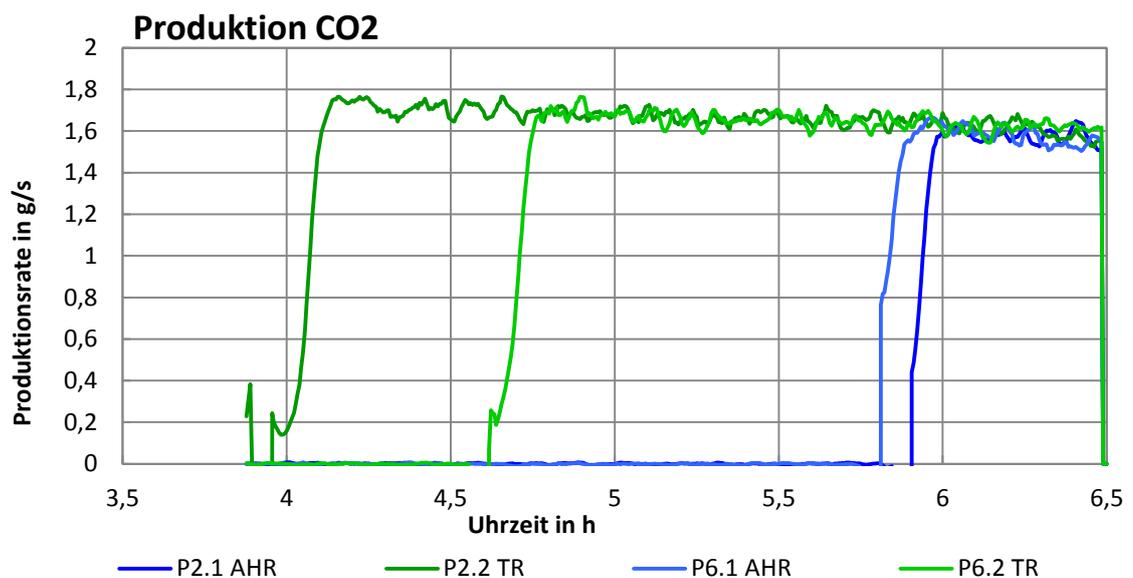


Abb. 7.9 Diagramm der CO<sub>2</sub>-Produktionsraten der Messung vom 25.08.2011

### 7.4.2.2 Temperaturen

Am Verlauf der Innentemperaturen nach Abb. 7.10, Abb. 7.11 und Abb. 7.12 können qualitative Aussagen über das Luftstromnetzwerk getroffen werden:

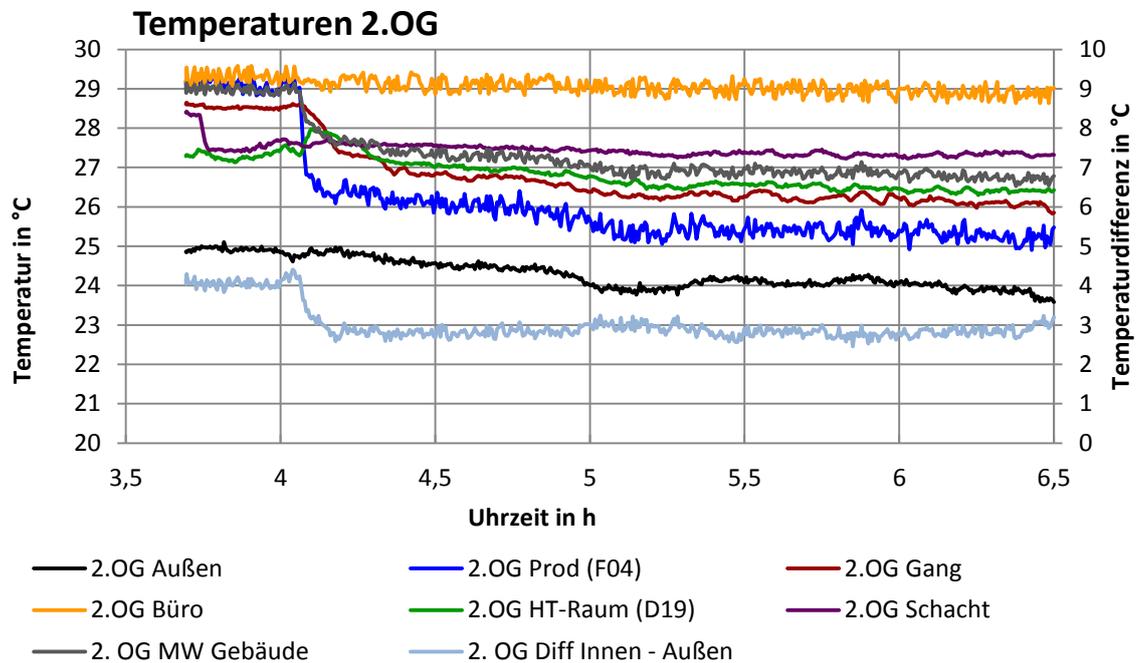


Abb. 7.10 Zeitverlauf der Innen- und Außentemperaturen im 2.OG

#### 2.OG: Diagramm Abb. 7.10

Die Außentemperatur ist während der Messung zuerst leicht fallend, ab 5 Uhr in der Früh praktisch gleichbleibend. Mit Öffnen der Fenster im Aufenthaltsraum (Prod. (F04)) kurz nach 4 Uhr nimmt dort die Innentemperatur stark ab. Mit ihr gehen auch die Temperatur im Gang und der Mittelwert für die Innentemperatur (MW Gebäude) im Geschoss nach unten. Die Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur nimmt mit Öffnen des Fensters sprunghaft von rund 4°C auf rund 3°C ab. Qualitativ ist durch den Temperatursprung ein Zuluft-Strom im 2. OG bei geöffnetem Fenster im Aufenthaltsraum nachgewiesen.

Im Büroraum gibt es keinen Temperatursprung beim Öffnen des Fensters im Aufenthaltsraum, da diese Zone aufgrund der geschlossenen Türe thermisch nicht an den Gang gekoppelt ist.

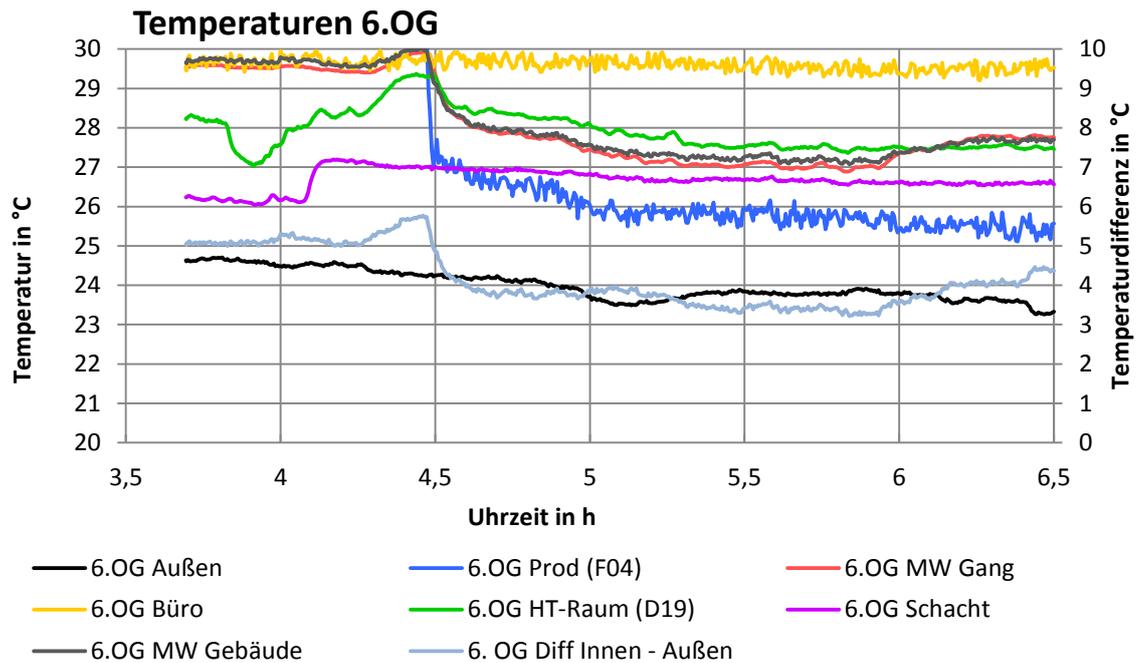


Abb. 7.11 Zeitverlauf der Innen- und Außentemperaturen im 6.OG

**6.OG:** Im 6. OG wird das Fenster im Aufenthaltsraum erst um 4:30 geöffnet. Bis zu diesem Zeitpunkt bleiben sämtliche Temperaturen im Gebäude mit Ausnahme des Technikraumes und des Schachtes auf über 29°C. Der Technikraum ist am Beginn der Messungen mit rund 28°C die kälteste Zone im 6.OG, die dort gemessene Temperatur nimmt mit dem Öffnen des Schachtdurchbruches kurz vor 4 Uhr noch weiter ab, kühlere Luft aus dem Schacht strömt für kurze Zeit ein. Mit Öffnen des Zuluft-Fensters im Aufenthaltsraum im 2.OG steigt die Schachttemperatur im 6.OG an. Das deutet auf einen Abluft-Strom im Schacht, vom 2.OG kommend und nach oben gerichtet, hin. (siehe Abb. 7.12).

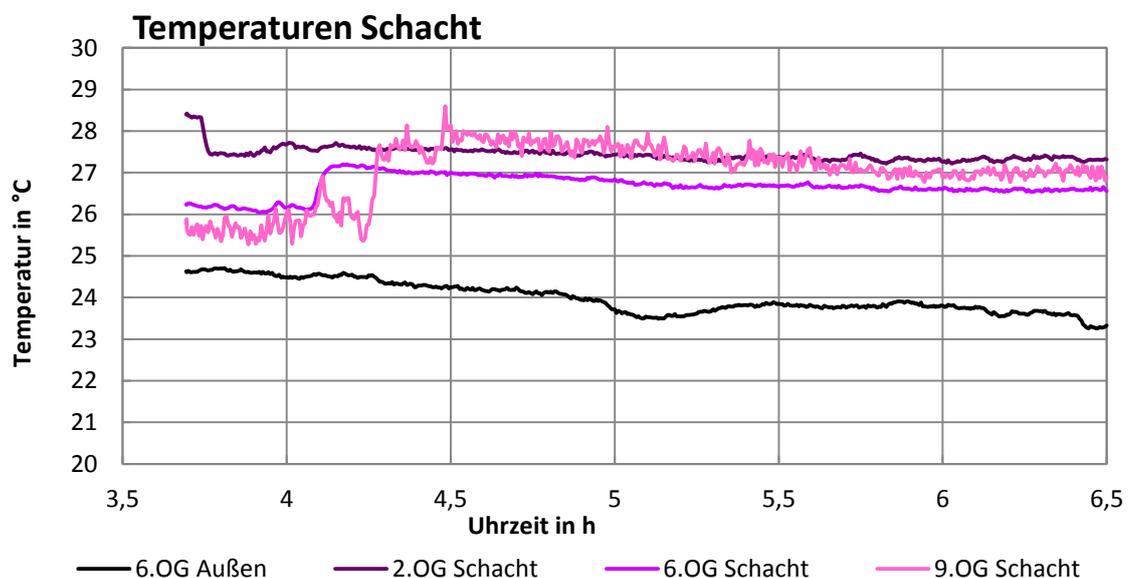


Abb. 7.12 Zeitverlauf der Außentemperatur sowie der Temperaturen im Schacht

### 7.4.2.3 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

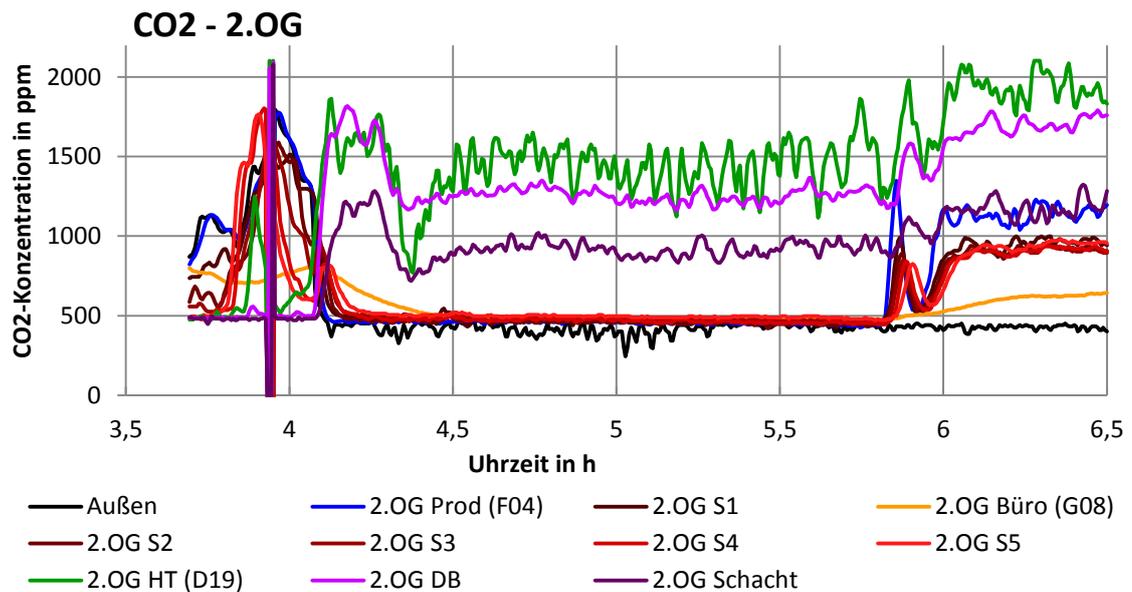


Abb. 7.13 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 2.OG

**2.OG:** Beim Befüllen der CO<sub>2</sub>-Produktion P2.2 im Technikraum des 2.OG kurz vor 4 Uhr steigen die Konzentrationen im gesamten Stockwerk auf nahe 2000 ppm an. Mit dem Öffnen des Fensters im Aufenthaltsraum kurz nach 4 Uhr senkt die einströmende Frischluft im Aufenthaltsraum und dem Gang die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Außenkonzentration ab. Durch die laufende Produktion im Technikraum bleibt die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Technikraum und im Durchbruch trotz der im Aufenthaltsraum einströmenden Luft hoch. Eine Luftbewegung um 4:20, die auch einen Temperaturanstieg im Schacht im 9.OG bewirkt, senkt diese Konzentrationen kurzfristig auf jenen Wert ab, der auch im Schacht im 2.OG gemessen wurde. Ab 4:30 bis ca. 5:45 bleiben die Konzentrationen im Technikraum, dem Durchbruch und im Schacht im 2.OG relativ konstant. Es hat sich ein stationärer Zustand eingestellt. Mit Inbetriebnahme der Produktion P2.1 im Aufenthaltsraum im 2.OG kurz vor 6 Uhr steigen die Konzentrationen im Gang (Messquerschnitt 1 bis 5) an. Aufgrund der gleichbleibenden Konzentration in allen Querschnitten kann ausgeschlossen werden, dass ein Zuluft-Strom über die angeschlossenen Büroräume in den Gang stattfindet. Umgekehrt weist der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Büroraum darauf hin, dass ein Volumenstrom vom Gang in den (durch Türen) verschlossenen Büroraum gegeben ist.

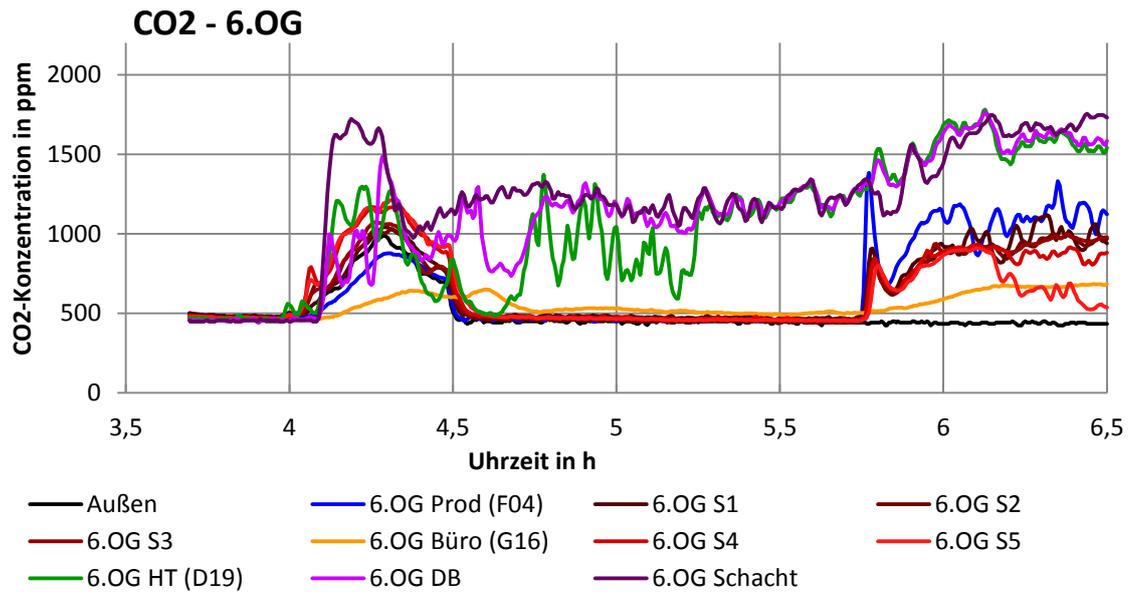


Abb. 7.14 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 6.OG

**6.OG:** Die Inbetriebnahme der Produktion P2.2. im Technikraum im 2. OG kurz nach 4 Uhr führt im Schacht im 6.OG zeitgleich mit dem Technikraum im 2.OG (siehe auch Abb. 7.13 *Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 2.OG*) zu einer Konzentrationsspitze, die bald wieder abklingt. In weiterer Folge verhält sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schacht im 6.OG ähnlich zu der im Durchbruch im 2. OG. Daraus kann eine Strömung vom 2.OG nach oben abgeleitet werden.

Durch die Aktivierung der Produktion P6.2 im Technikraum im 6. OG um 4:35 nähert sich die Konzentration im Durchbruch im 6.OG an den Wert im Schacht 6.OG an. Hier kann qualitativ nicht auf Strömungen geschlossen werden, da der Sensor im Schacht im 6.OG geringfügig unterhalb des Durchbruches positioniert ist und daher eher die Konzentrationen des aus dem 2.OG kommenden Stroms misst.

Die Daten im Büro im 6.OG zeigen, dass eine Strömung vom Technikraum in das Büro über einen noch unbekanntes Nebenweg gegeben sein muss, da die gemessenen Konzentrationen im Messquerschnitt des Gangs vor dem Technikraum nicht über den anderen gemessenen Konzentrationen im Gang liegen.

Bei Aktivierung der Produktion 6.1 im Aufenthaltsraum im 6. OG aktiviert, steigen auch im 6.OG die Werte aller Sensoren im Gang für ca. eine halbe Stunde gleichmäßig an. Aufgrund der anschließend leicht schwankenden Konzentrationen können keine eindeutigen Aussagen über die Qualität der

Volumenströme getroffen werden. Auffällig ist der Rückgang der Konzentration im Messquerschnitt im Gang der unmittelbar vor der Tür zum Technikraum im 6.OG liegt. Nur ein Außenlufteintrag durch eine Zuluft-Strömung aus einem Nebenweg kommt hier als Ursache in Frage. Im Büro steigt die Konzentration mit Inbetriebnahme der Produktion P6.1 wie im 2.OG an.

Mit den zusätzlichen Sensoren im 6. OG wurde auch die CO<sub>2</sub>-Verteilung in den Messquerschnitten im Gang und im Durchbruch zum Schacht gemessen. Die Daten von allen drei Messungen zeigen, dass alle fünf Sensoren an verschiedenen Positionen im Messquerschnitt (siehe Abb. 7.2 *Grundrissplan 6. OG* auf Seite 36) die gleiche Konzentration messen.

Daher wurde in den weiteren Messungen nur ein Sensor je Messquerschnitt im Gang angeordnet.

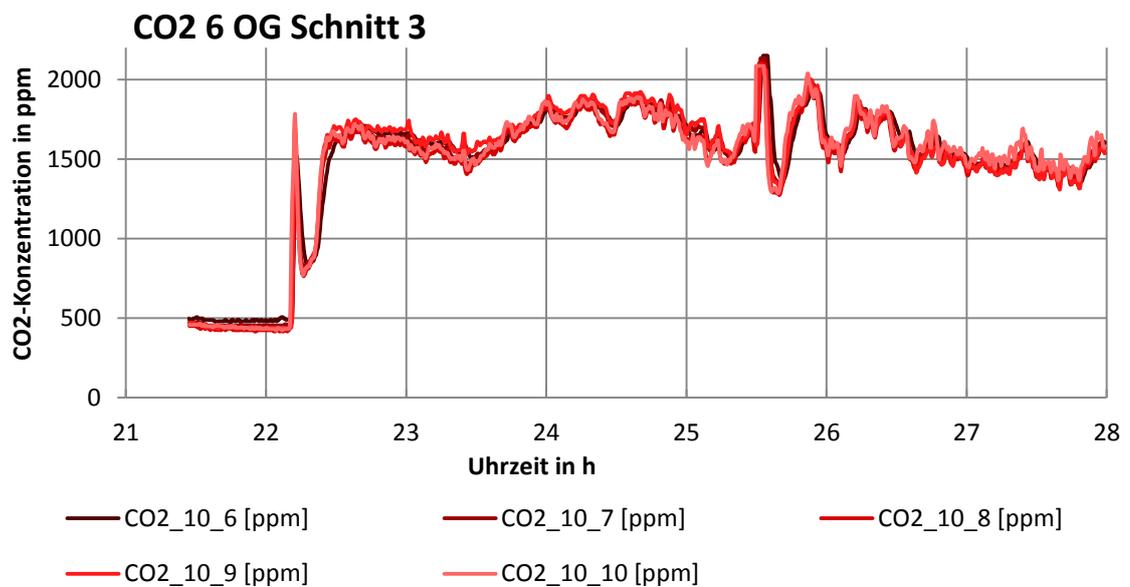


Abb. 7.15 Diagramm der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Messquerschnitt 3 im Gang, Messung am 22.08.2011

## 7.4.2.4 Quantitative Ergebnisse der Messung vom 25.08.2011

### 7.4.2.4.1 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgt über die Massenbilanz

$$V \cdot \dot{c}_i = \dot{p}_i + \dot{V} \cdot (c_a - c_i)$$

Mit dieser Massenbilanz ermitteln sich die nachfolgenden Abluft-Volumenströme aus den Technikräumen im 2. und 6.OG

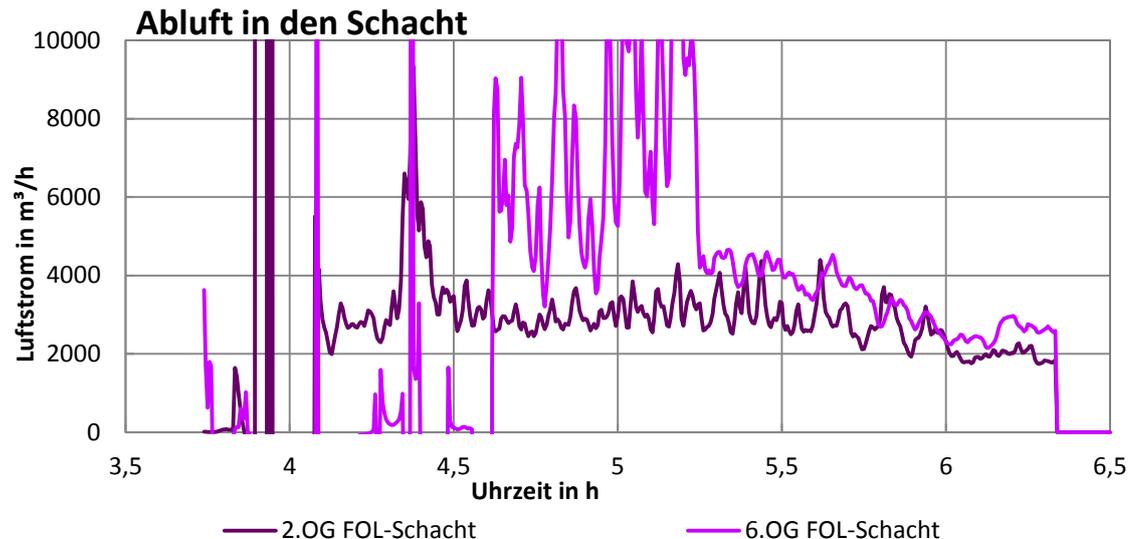


Abb. 7.16 Zeitverlauf der gerechneten FOL-Volumenströme aus den Technikräumen

Bei der Zuluft im Aufenthaltsraum ermittelt man die nachfolgenden Volumenströme:

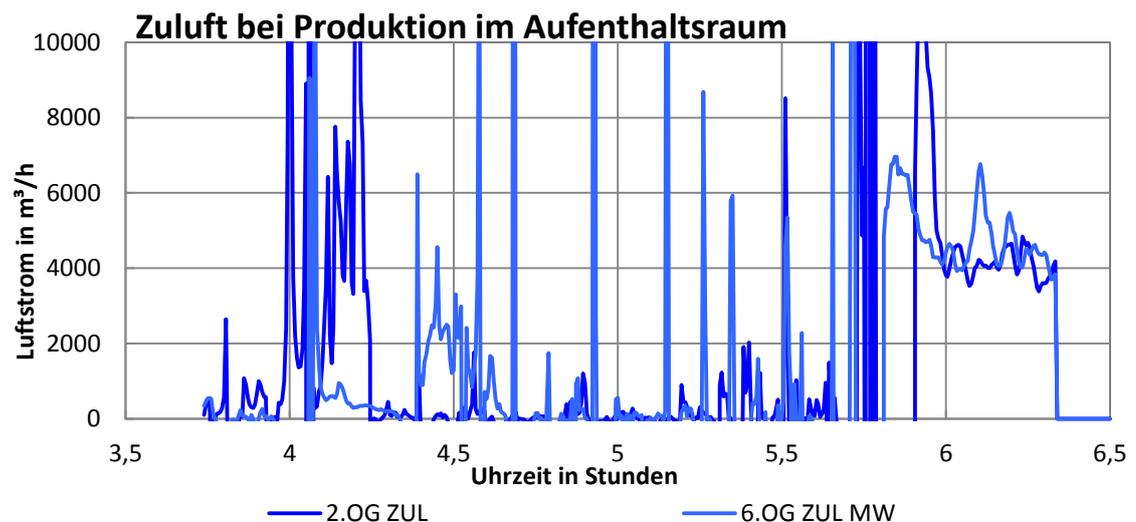


Abb. 7.17 Zeitverlauf der gerechneten Zuluft-Volumenströme in den Fensteröffnungen in den Aufenthaltsräumen

#### **7.4.2.4.2 Beurteilung durch Proj.Ass Dipl.-Ing. Hannes Konder**

„Die Auswertung zeigt im Abluftstrom im 2.OG einen relativ gleichmäßigen Volumenstrom von rund 3000 m<sup>3</sup>/h, der an die konstante Konzentration im Technikraum im 2.OG gekoppelt ist. Bei gleichbleibender Konzentration, wenn die Ableitung verschwindet, ist der Volumenstrom nur mehr von der Produktion abhängig. Die Kopplung des Volumenstromes an die Konzentration im Technikraum zeigt aber im 6.OG in der Zeit zwischen 4:45 und 5:15, dass ein Abluft- Volumenstrom im 6. OG ermittelt wird, der deutlich über dem anschließenden Wert liegt und der aufgrund der höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration im Durchbruch im 6. OG auszuschließen ist.

Bei der Zuluft wurden gleichmäßige Volumenströme von rund 4000 m<sup>3</sup>/h ermittelt. Insbesondere am Ende der Messungen „fehlen“ zwischen der Zuluft und der Abluft rund 2000 m<sup>3</sup>/h, die auf die mechanische Lüftung der Büroräume zurückzuführen ist. Diese mechanische Belüftung konnte nicht deaktiviert werden.“ [11]

### **7.4.3 Messungen Anfang 2012**

Die weiteren Messungen wurden im Frühjahr 2012 durchgeführt. Die Messtermine waren der 16. Februar, 1. März und 16. März 2012. In der kalten Jahreszeit treten während des Tages dieselben natürlichen Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Außenluft auf wie im Sommer in der Nacht. Die Messungen wurden daher in der Früh gestartet und dauerten bis in den Nachmittag hinein.

Der große terminliche Abstand der Messungen erklärt sich einerseits aus den Wetterverhältnissen, aber auch aus betriebstechnischen Gründen. Es wurde abgewartet bis alle Nutzer des Chemiehochhauses umgezogen waren und das Gebäude leer stand. Erst danach konnte ohne Nutzereinflüsse gemessen werden.

Zum Zeitpunkt der Messungen waren die betrachteten Geschosse bis auf zwei Büroräume im 6.OG leer. Auch die Benutzer des 9.OG waren ausgezogen und es konnte dort gemessen werden. In den dazwischen und darunter liegenden Geschossen wurden Umzugs- und Umbauarbeiten durch beauftragte Firmen durchgeführt.

Aus den Erfahrungen und Ergebnissen der Messungen im August 2011 wurde eine neue Sensoranordnung für alle Geschosse ermittelt. Im Schacht wurde nun die CO<sub>2</sub>-Konzentration über und unter jedem Geschoss gemessen und im Technikraum wurden die Sensoren in den Öffnungen platziert. Im Gang wurde je Messquerschnitt nur ein CO<sub>2</sub>-Sensor angeordnet. Die genauen Sensorpositionen für die Messungen im Frühjahr finden Sie im Kapitel 7.2.3.

Um den Zuluft eintrag bzw. Abluftaustrag über Nebenwege zu minimieren, wurden für diese Messungen alle aus den gemessenen Bereichen führenden Öffnungen und Türen mit Klebeband und Folien abgedichtet. Alle Zu- und Abluftanlagen in dem betrachteten Bauteil wurden deaktiviert.

Die als Zuluftöffnungen dienenden Fenster wurden bei diesen Messungen durch am Rahmen montierte Stahlbleche und Stellschrauben in ihrer Position gehalten. Dadurch konnte die Größe dieser Öffnungen besser reguliert werden.

Ziel der Messungen war Messdaten aufzuzeichnen, bei denen ein klarer Zusammenhang zwischen Öffnungsgrößen und resultierenden Volumenströmen erkennbar ist.

#### **7.4.4 Auswertung der Messdaten vom Februar 2012**

Die erste Messung am 16.02. diente dem Test der Messanlage auf ihre Funktionsfähigkeit nach der Pause und den Änderungen im Mess-Setup. Es wurde dabei nur in den Aufenthaltsräumen CO<sub>2</sub> produziert. Die Messung wurde zwischen 10 und 12 Uhr durchgeführt.

### 7.4.4.1 Temperaturen

Während der Messung herrschte eine konstante Außentemperatur von ca. 1°C

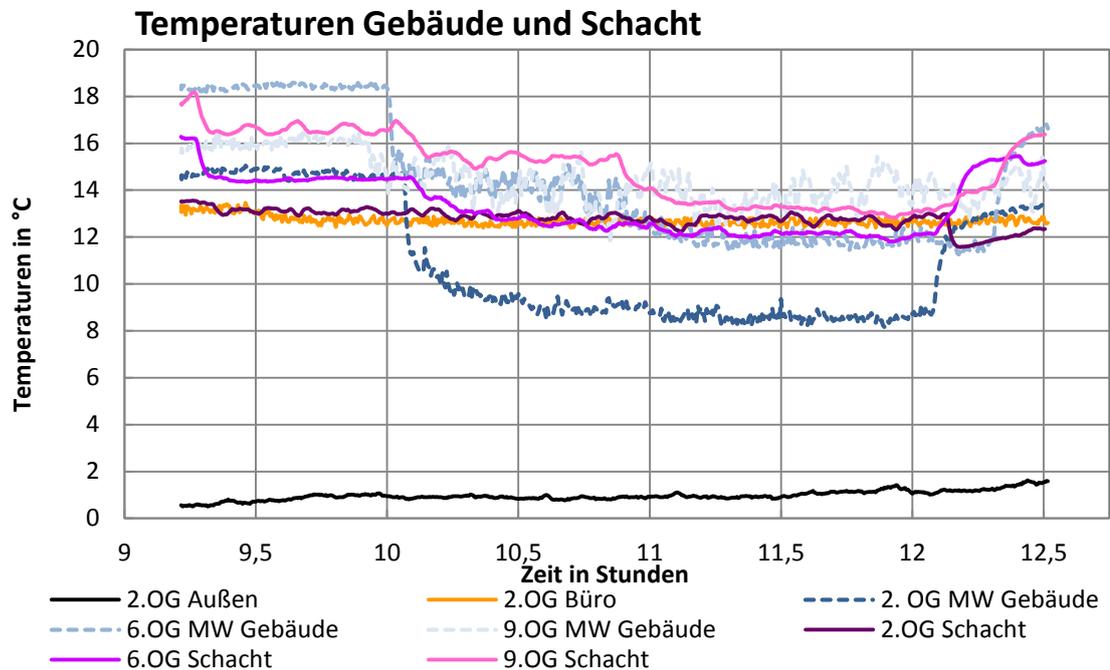


Abb. 7.18 Temperaturverlauf in Gebäude und Schacht der Messung am 16.02.2012

Mit dem Öffnen der Fenster um 10:00 sinkt die Temperatur im 2. und 6. OG deutlich ab. Sie bleibt dann im 2. OG auf 9°C und im 6.OG auf 12°C. Im 9. OG kommt es nur zu einer geringen Temperaturveränderung, was auf geringe Luftströmungen hindeutet. Mit dem Schließen der Fenster nach 12:00 steigt die Temperatur wieder bis auf 2° unter das Ausgangsniveau an. Die Temperatur im Schacht im 2. OG bleibt über den Messzeitraum unverändert, im 6. und 9. OG ist die Temperatur abgesenkt. Das deutet darauf hin, dass im Schacht keine abwärtsführende Luftströmung auftrat.

### 7.4.4.2 CO<sub>2</sub>-Produktion

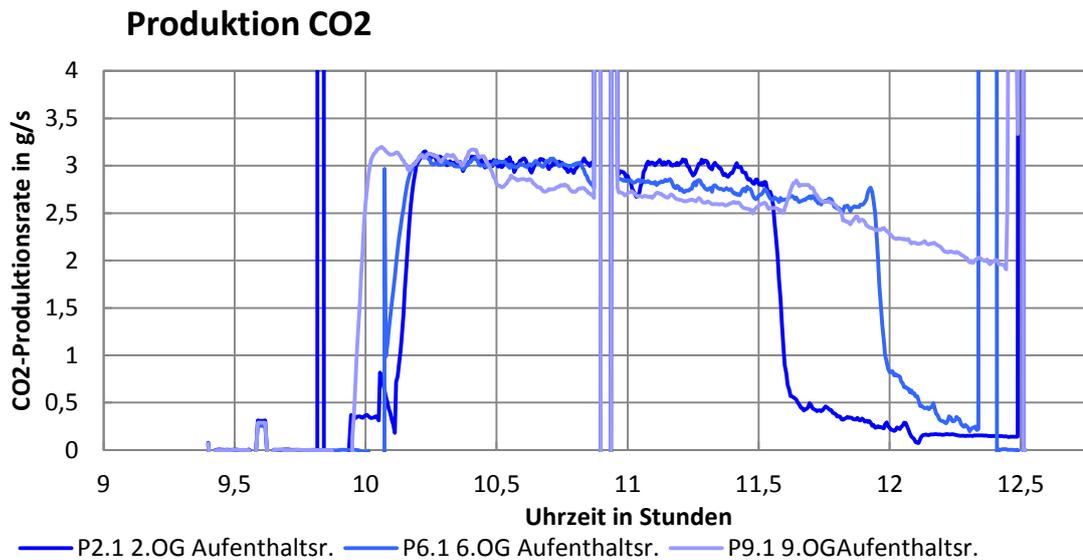


Abb. 7.19 Diagramm der CO<sub>2</sub>-Produktionsraten der Messung vom 16.02.2012

Die Produktionen wurden um 10 Uhr gestartet, und produzierten mit leicht absinkenden Produktionsraten zwischen 3 und 2g/s. Das Absinken der Produktionsrate kann mit der geringen Füllmenge und damit geringerer Effektivität des Heizelements erklärt werden.

### 7.4.4.3 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

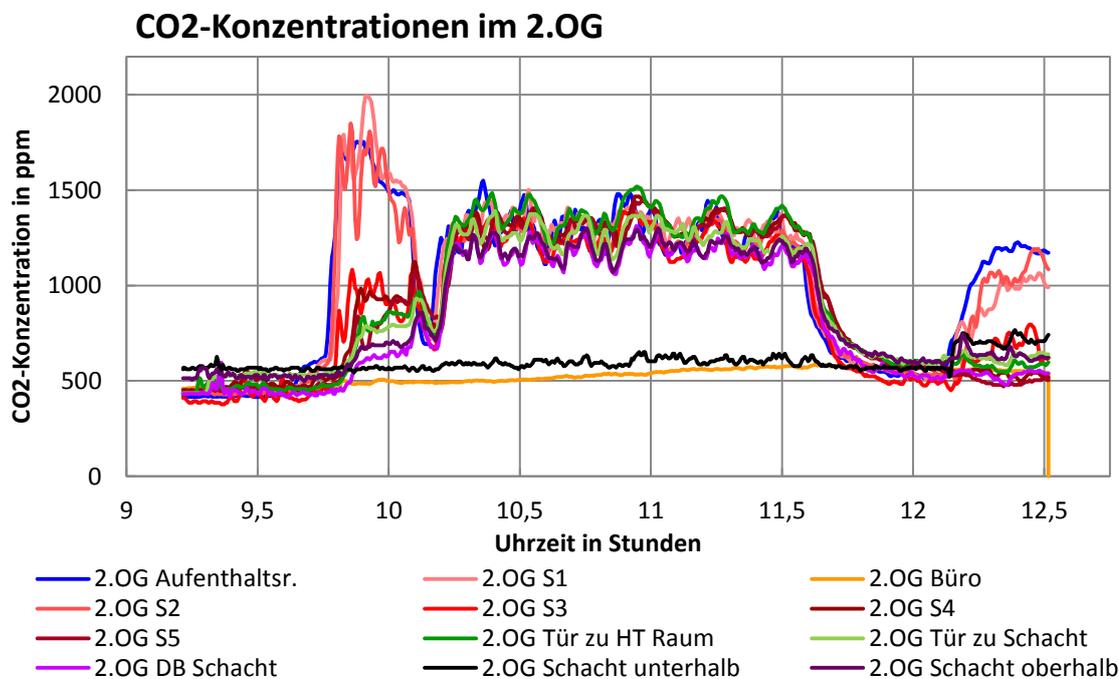


Abb. 7.20 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 2.OG

Nach Befüllen der CO<sub>2</sub>-Produktion und Öffnung der Fenster stellt sich im 2.OG eine konstante CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 1300ppm ein. Mit Ende der Produktion im 2.OG sinken die Konzentrationen auf Außenluftniveau ab. Durch

Schließen des Fensters und selbstständigem Verdampfen des restlichen Trockeneises steigen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gegen Ende im Aufenthaltsraum wieder an.

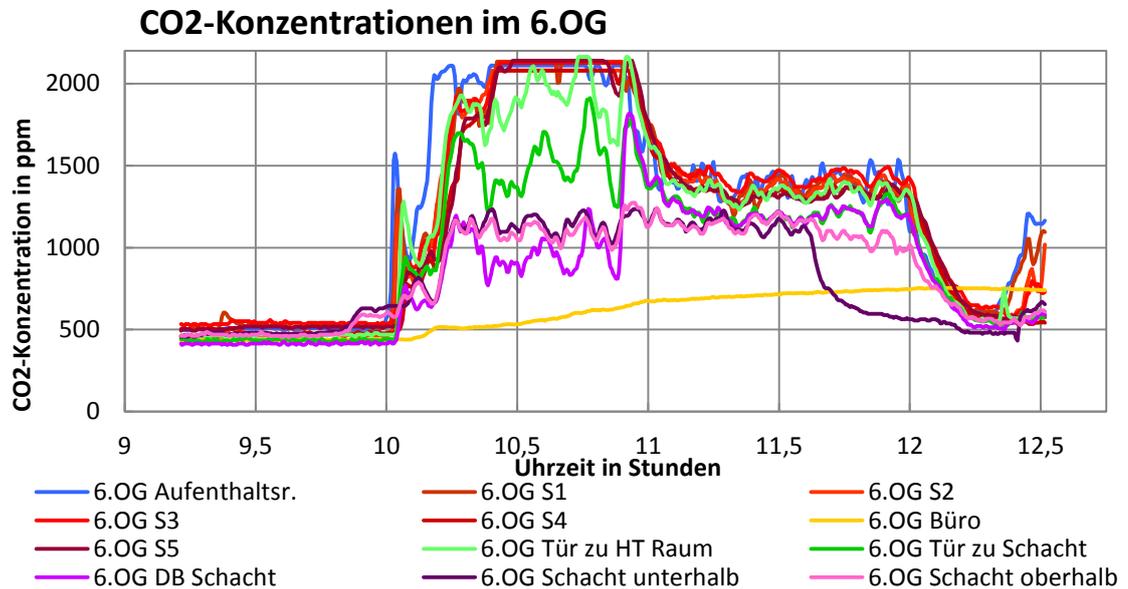


Abb. 7.21 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 6.OG

Im 6. OG steigen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nach Beginn der Messung über die Messgrenze an. Durch die anfängliche Luftströmung ist hier die Tür zwischen Gang und Technikraum zugefallen. Um 11 Uhr wurde die Tür wieder geöffnet, ab dann verhalten sich die Konzentrationen wie im 2. OG und pendeln sich bei 1400ppm ein.

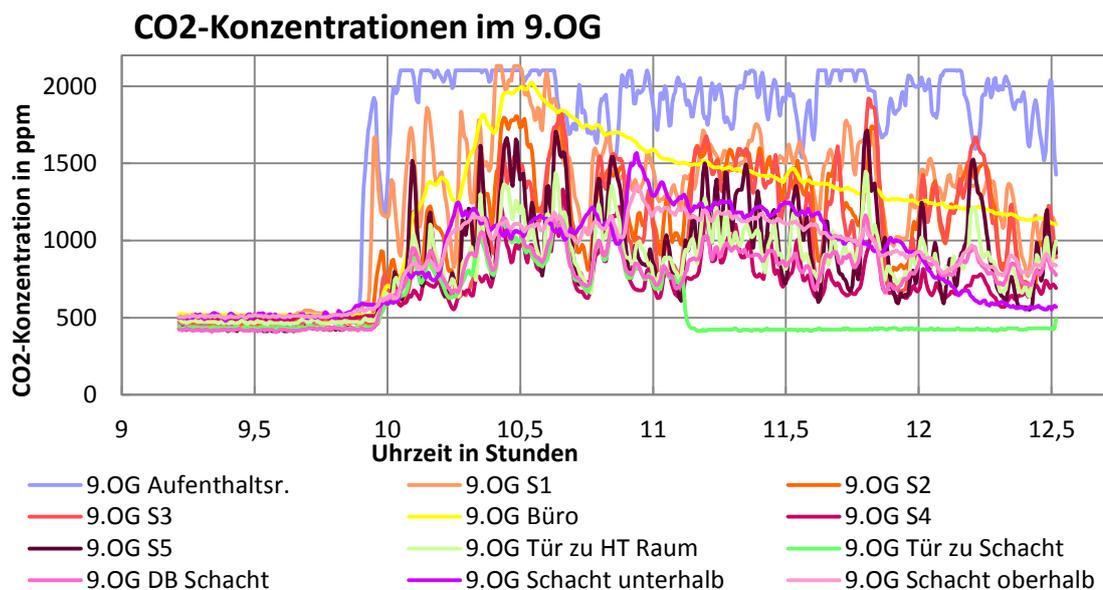


Abb. 7.22 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 9.OG

Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 9.OG zeigen sehr starke Schwankungen von bis zu 1500ppm. Das deutet auf unregelmäßige Luftvolumenströme hin.

#### 7.4.4.4 Beurteilung

Der Test der Messanlage war erfolgreich. Es konnten aus allen Geschossen Messdaten ermittelt werden. Durch die hohen Temperaturdifferenzen sind im 2.OG und 6.OG klare Strömungsverhältnisse aufgetreten. Im 9.OG war die Luftströmung dagegen sehr unruhig.

#### 7.4.5 Auswertung der Messdaten vom 01. März 2012

Bei der Messung am 1.März wurde die Komplexität des gemessenen Systems gesteigert, indem im 2.OG und 6.OG auch im Büroraum CO<sub>2</sub>-produziert und ein Fenster für Zuluft geöffnet wurde.

##### 7.4.5.1 Temperaturen

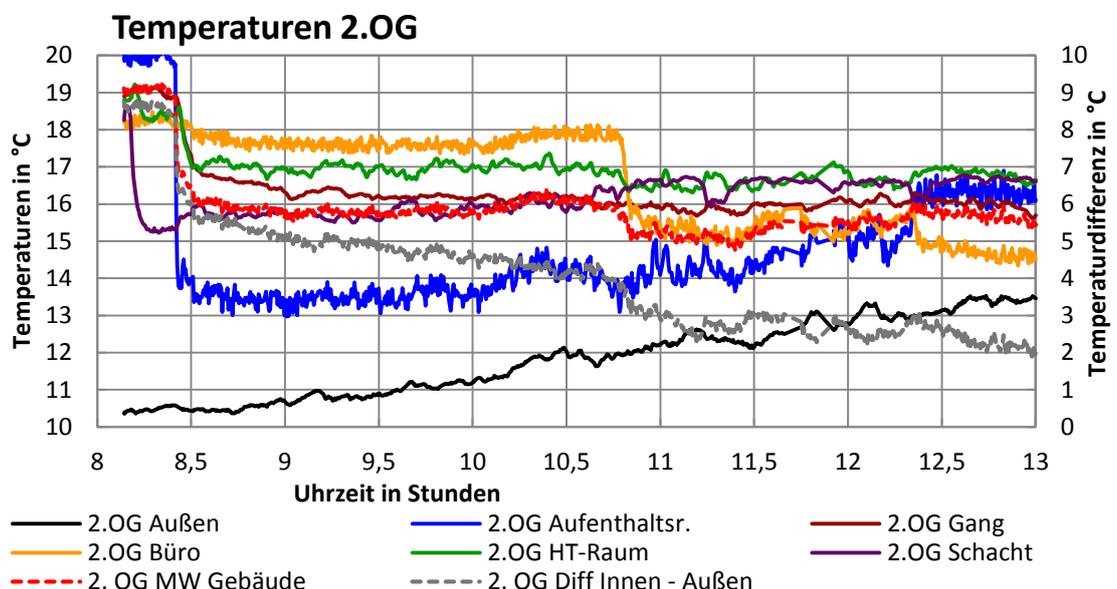


Abb. 7.23 Temperaturverlauf in 2.OG der Messung am 01.03.2012

Durch das Öffnen des Fensters im Aufenthaltsraum um 8:30 und des Fensters im Büro um 10:45 kommt es in diesen Räumen zu einem Temperaturabfall. Im Aufenthaltsraum steigt mit der Außentemperatur auch die Innentemperatur wieder an. Gegen Ende der Messung betragen die Temperaturdifferenzen nur mehr 1 bis 3°C. Die gemessenen Temperaturen steigen mit der Entfernung zur Zuluftöffnung an. Die höchste Temperatur wird im Technikraum gemessen, die geringste im Büro bzw. Aufenthaltsraum.

Das 6.OG weist bei dieser Messung höhere Ausgangstemperaturen auf, da es teilweise noch beheizt ist.

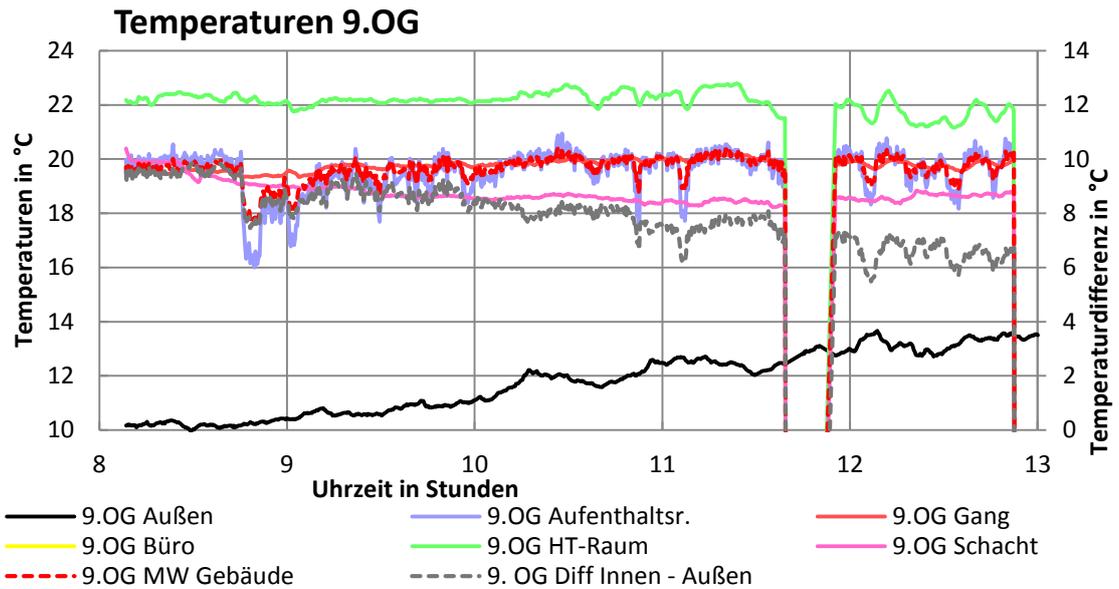
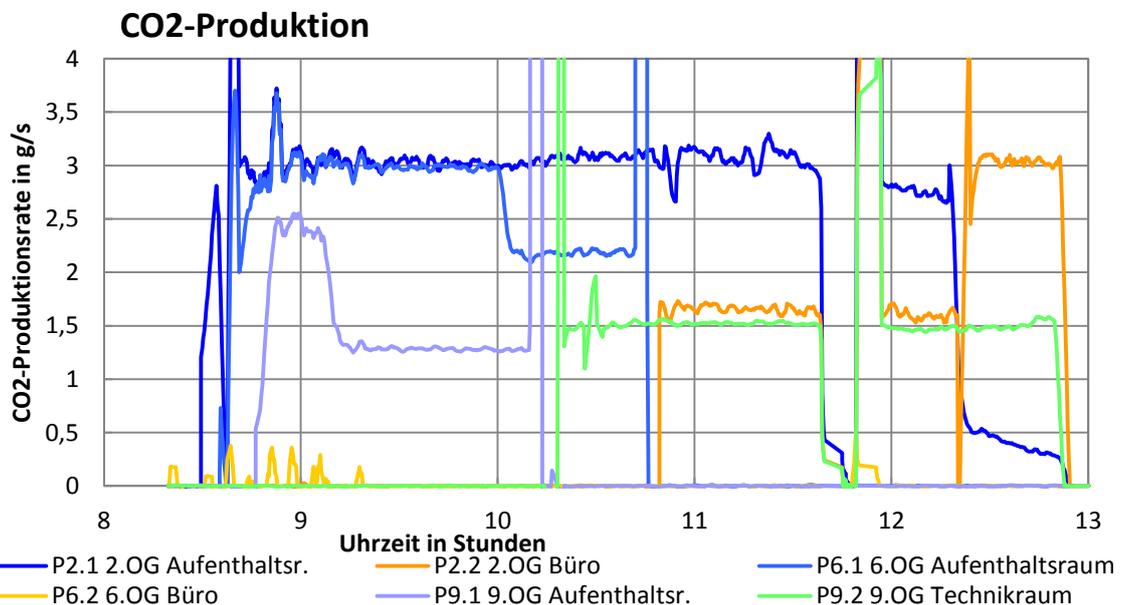


Abb. 7.24 Temperaturverlauf in 2.OG der Messung am 01.03.2012

Im 9. OG kommt es nur kurz zu einer Abkühlung bei der Fensteröffnung. Danach bleibt das 9.OG über den ganzen Messzeitraum auf 20°C, die der Ausgangstemperatur entsprechen, was auf einen Volumenstrom vom Schacht durch das Geschoss hindeutet.

## 7.4.5.2 CO<sub>2</sub>-Produktion

Abb. 7.25 Diagramm der CO<sub>2</sub>-Produktionsraten der Messung vom 01.03.2012

Nach 8:30 werden die Produktionen in den 3 Geschossen gestartet. Im 2.OG und 6.OG werden 3g/s CO<sub>2</sub> produziert, im 9.OG wird nach kurzer Zeit die Produktionsrate auf 1,3g/s gesenkt. Um 10:15 wird die Produktionseinheit vom Aufenthaltsraum im 9.OG in den Technikraum 9.OG gebracht. Dort produziert sie mit 1,5g/s konstant bis zum Ende der Messung. Die Produktion vom Aufenthalts-

raum im 6.OG wird um 10:45 in den Büroraum im 2. OG verlegt. Bis 12:20 wird dort zeitgleich mit der Produktion im Aufenthaltsraum im 2.OG mit 1,6g/s produziert. Um 12:15 wird die Produktion im Aufenthaltsraum im 2.OG gestoppt und die Produktion im Büro auf 3g/s erhöht.

### 7.4.5.3 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

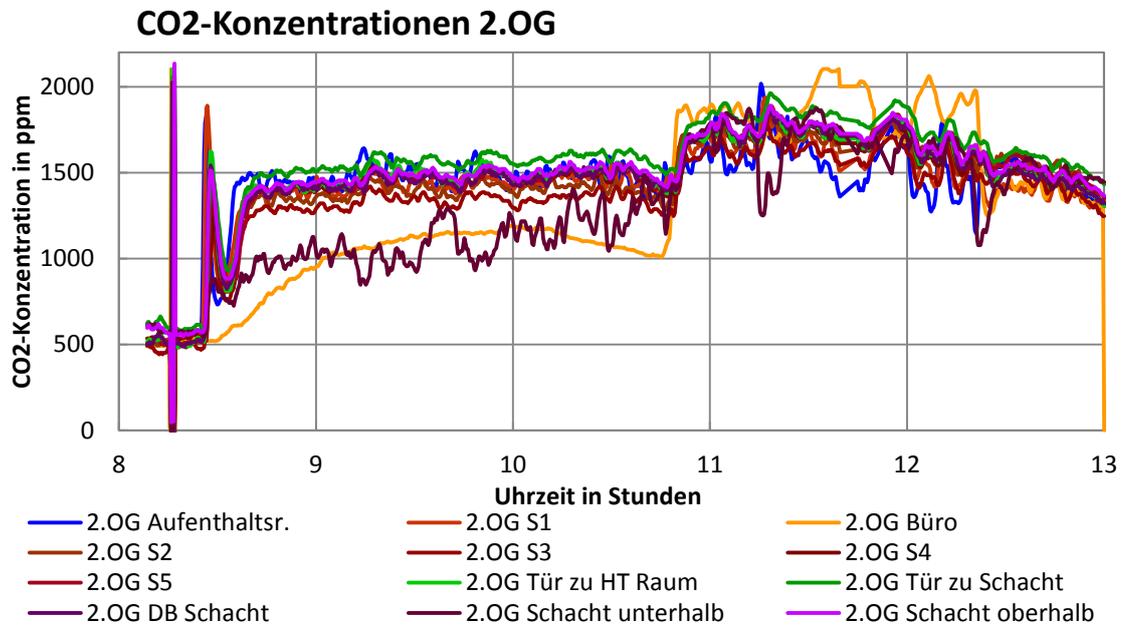


Abb. 7.26 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 2.OG

Nach Start der Produktionen und Öffnen der Fenster stellt sich im 2.OG eine Konzentration von ca. 1400ppm ein. Durch die zusätzliche Produktion im Büro ab 10:45 steigen die Konzentrationen im ganzen Geschoss auf ca. 1700ppm. Mit dem Produktionsende im Aufenthaltsraum um 12:15 beginnen die Konzentrationen langsam abzusinken. Die Schwankungen um die Mittagszeit können auf erhöhte Windaktivität zurückgeführt werden.

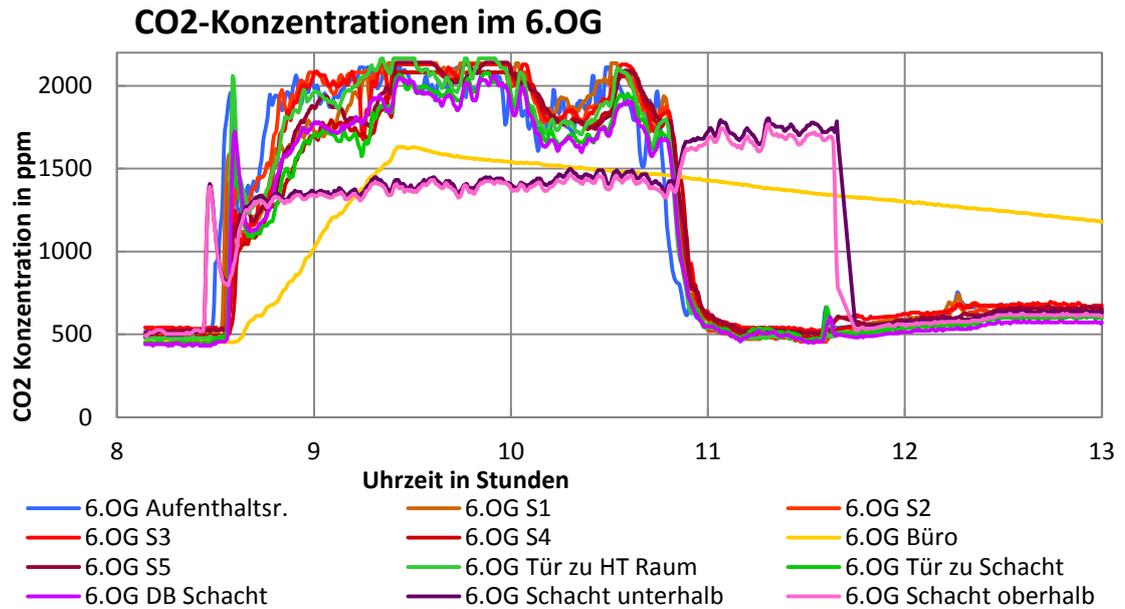


Abb. 7.27 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 6.OG

Im 6.OG werden von Anfang an sehr hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen. Ein Absenken der Produktionsrate um 10 Uhr senkt auch die Konzentrationen leicht ab. Mit Ende der Produktion im 6.OG sinken die CO<sub>2</sub> Konzentrationen sehr schnell auf Außenluftniveau ab. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Schacht folgen der Konzentration im 2.OG. Das Absinken der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schacht um 11:45 ist durch einen Ausfall der Messanlage bedingt. Danach werden im Schacht im 9.OG weiterhin CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die mit den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 2. OG übereinstimmen, gemessen.

Der Konzentrationsanstieg im Büro bis 9:30 deutet auf einen Nebenweg hin, der um 9:30 geschlossen wurde.

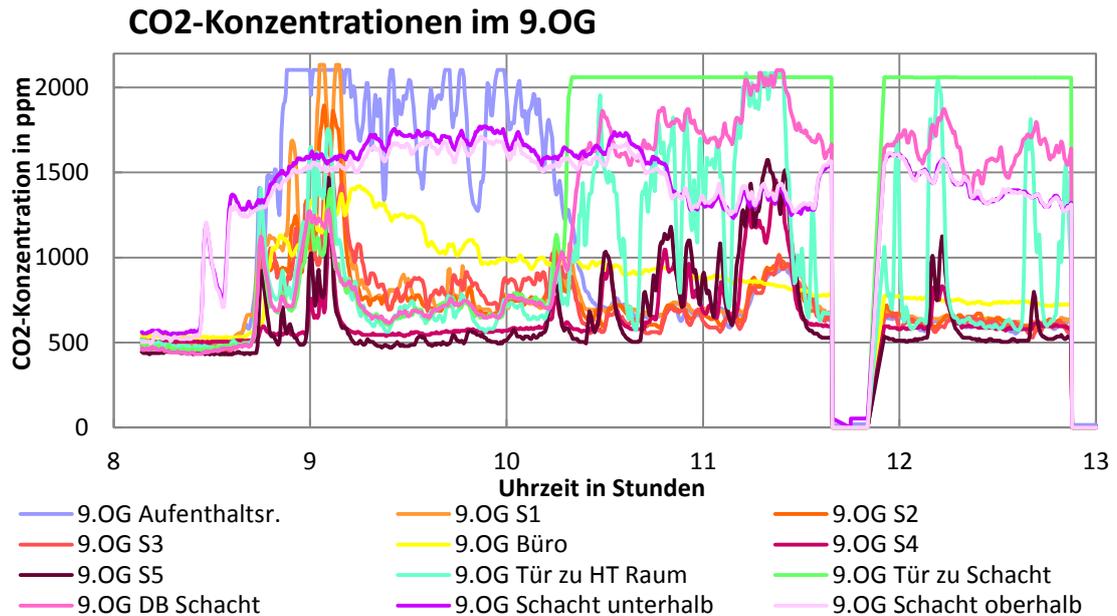


Abb. 7.28 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 9.OG

Mit dem Start der Produktion steigen bis ca. 9:00 die Konzentrationen im 9.OG an. Danach sinken sie wieder nahezu auf das Außenniveau ab. Mit dem Wechsel der Produktion vom Aufenthaltsraum in den Technikraum um 10:15 steigen die Konzentrationen im Technikraum und den Schnitten im Gang an, weisen aber große Schwankungen auf. Die Konzentration im Durchbruch zum Schacht bleibt gering, was auf eine unregelmäßige Strömung vom Technikraum über das Geschoss nach außen hinweist. Nach 12:00 bewegen sich die Konzentrationen im Gang wieder auf Außenniveau, es kommt nur mehr vereinzelt zu Spitzen in der Tür zum Technikraum. Ein gleichzeitiger Anstieg der Konzentration im Schacht oberhalb vom 9. OG deutet auf eine Strömung vom Technikraum über den Schacht nach außen hin.

#### 7.4.5.4 Beurteilung

Bei dieser Messung wurde mit Produktionen an verschiedenen Standorten experimentiert. Die Messdaten für das 2. OG sind deutlich und nachvollziehbar. Im 9. OG ist durch die häufigen Richtungswechsel der Strömung eine Auswertung schwierig.

### 7.4.6 Auswertung der Messdaten vom 16. März 2012

Bei der finalen Messung am 16. März wurde in allen Aufenthaltsräumen und in den Büros im 2.OG und 6. OG CO<sub>2</sub> produziert. Eine Messung bzw. Produktion im Büro im 9. OG war nicht mehr möglich, da bei den Umbauarbeiten die Sensorleitungen in das Büro gekappt wurden. Bei dieser Messung wurde mit unterschiedlichen Öffnungsgrößen und Produktionsraten gearbeitet.

Für den Zeitraum von 10:13 bis 10:55 liegen aufgrund eines Ausfalls der Messanlage keine Daten vor. Im Weiteren werden hauptsächlich die Messdaten dieser finalen Messung betrachtet.

#### 7.4.6.1 Öffnungsgrößen

Während der Messung wurden die Öffnungsgrößen der Zuluftöffnungen angepasst. Der Verlauf der Öffnungsgrößen ist in *Abb. 7.29 Öffnungsgrößen* dargestellt.

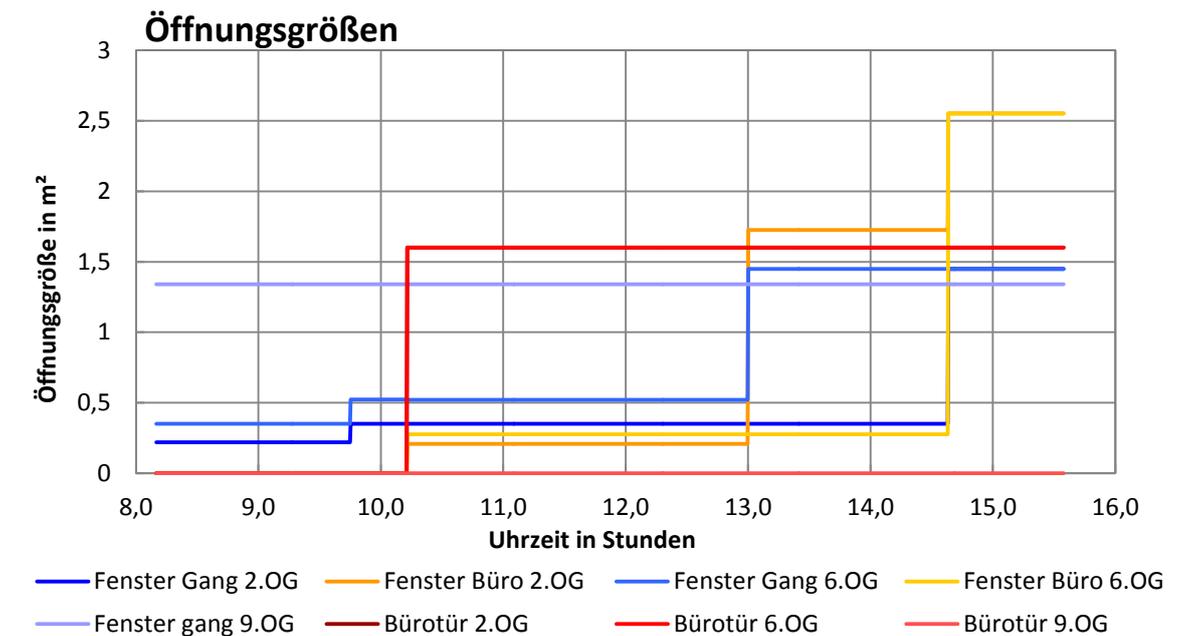


Abb. 7.29 Öffnungsgrößen, zeigt die Veränderung der Öffnungsgrößen während der Messung

#### 7.4.6.2 CO<sub>2</sub>-Produktion

Die CO<sub>2</sub> Produktion wurde zu Beginn der Messung in allen Aufenthaltsräumen gestartet und mit halber Leistung betrieben. Um 11 Uhr wurden zusätzlich die Produktionen in den Büroräumen aktiviert. Ab 11:30 wurden alle Produktionen auf ein Viertel Leistung gedrosselt. Um 13:00 wurden die Produktionsraten in den Aufenthaltsräumen wieder erhöht. Ab ca. 14:30 kam es in der Produktion P9.1 zu einer Dombildung im Trockeneis und damit zu

unregelmäßigen Produktionsraten. Um ca. 15:15 wird dieses Problem behoben, danach lief die Produktion wieder konstant.

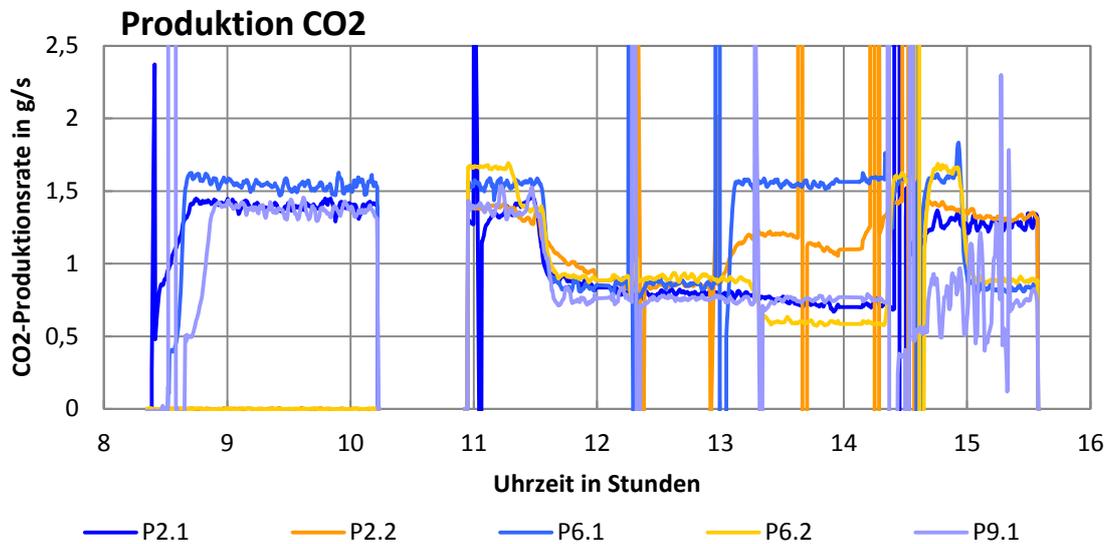


Abb. 7.30 Diagramm der CO<sub>2</sub>-Produktionsraten der Messung vom 16.03.2012

### 7.4.6.3 Temperaturen

Am Verlauf der Innentemperaturen nach Abb. 7.31, Abb. 7.32 und Abb. 7.33 können qualitative Aussagen über das Luftstromnetzwerk getroffen werden.

Die Außentemperaturen der in die Messanlage integrierten Temperatursensoren an der Gebäudeaußenseite können bei dieser Messung nur bedingt herangezogen werden, da die Messwerte durch direkte Sonneneinstrahlung verfälscht sind. Es wurden daher für den Messzeitraum Temperaturdaten der unverfälschten Sensoren am gegenüberliegenden Gebäude (Lehartrakt) verwendet.

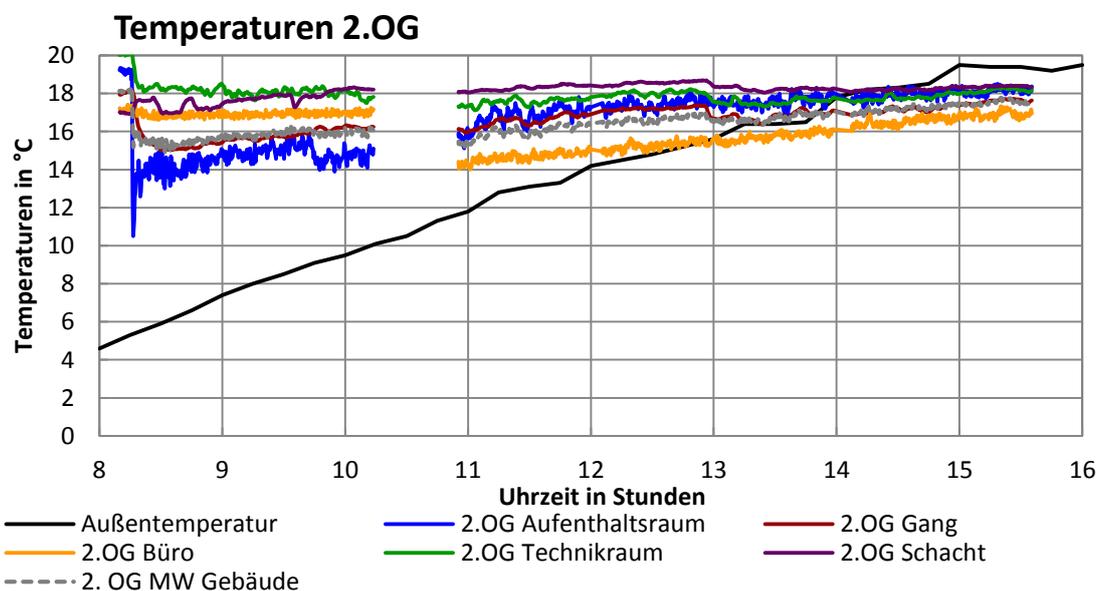


Abb. 7.31 Zeitverlauf der Innen- und Außentemperaturen im 2.OG

**2.OG:** Im 2. OG nimmt die Innentemperatur im Aufenthaltsraum mit Öffnen der Fenster kurz nach 8 Uhr stark ab, mit ihr gehen auch die Temperatur im Gang und der Mittelwert für die Innentemperatur (MW Gebäude) nach unten. Die Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur nimmt mit Öffnen des Fensters sprunghaft von rund 13°C auf rund 9,5°C ab. Qualitativ ist durch den Temperatursprung ein Zuluft-Strom im 2. OG bei geöffnetem Fenster im Aufenthaltsraum nachgewiesen. Der Büroraum ist zu diesem Zeitpunkt noch geschlossen. Im Büro werden um ca. 11 Uhr das Fenster und die Tür geöffnet, dann erfolgt auch dort der Temperatursturz. Die Temperaturdifferenz zwischen Büroraum und Aufenthaltsraum erklärt sich dadurch, dass die Zuluft im Aufenthaltsraum durch das davorliegende Dach des 1.OG aufgeheizt wird, der Büroraum an der Nordfassade ohne davorliegenden Bauteil liegt und dort kühlere Zuluft einströmt.

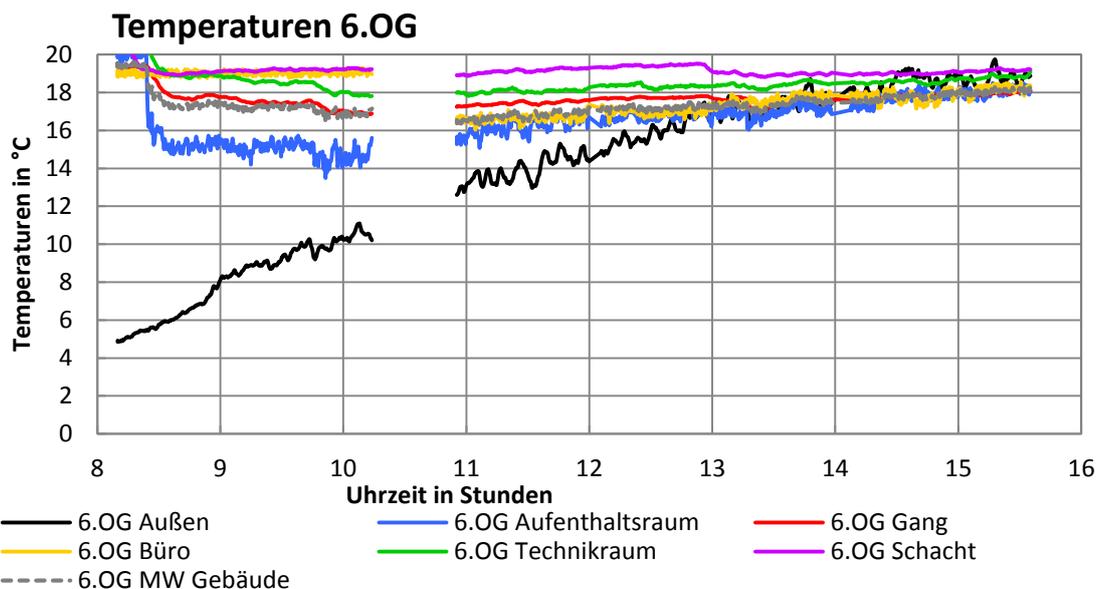


Abb. 7.32 Zeitverlauf der Innen- und Außentemperaturen im 6.OG

**6.OG:** Der Temperaturverlauf im 6. OG entspricht im Wesentlichen dem Temperaturverlauf im 2. OG. Der im 2. OG aufgrund eines Vordachs auftretende Effekt der höheren Temperatur im Aufenthaltsraum als im Büro ist hier nicht zu erkennen.

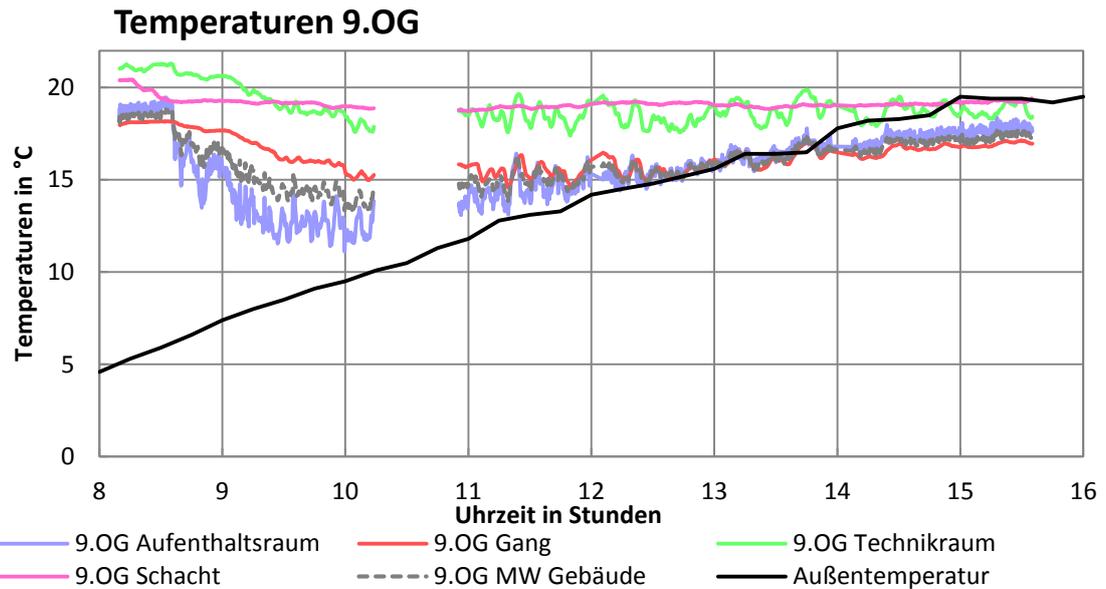
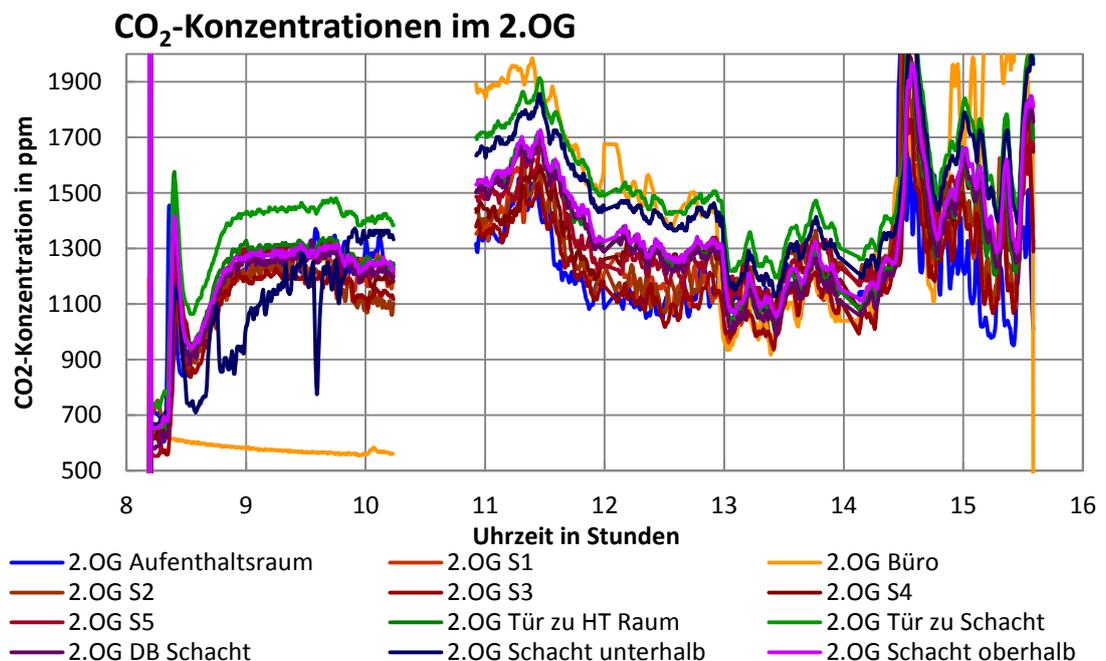


Abb. 7.33 Zeitverlauf der Innen- und Außentemperaturen im 9.OG

**9.OG:** Im 9. OG wird das Fenster im Aufenthaltsraum um 8:30 geöffnet, und die Temperatur sackt leicht ab. Anders als im 2. OG erfolgt die Abkühlung hier nicht unmittelbar, sondern verzögert sich bis ca. 10:00, was auf geringere bis wechselnde Luftströmungen durch die Zuluftöffnung schließen lässt. Die Temperaturen im Schacht bleiben über den gesamten Zeitraum nahezu unverändert.

#### 7.4.6.4 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Abb. 7.34 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 2.OG

**2.OG:** Beim Befüllen der CO<sub>2</sub>-Produktion P2.2 im Technikraum des 2.OG kurz nach 8 Uhr steigen die Konzentrationen im gesamten Stockwerk auf ca.

1500 ppm an. Mit dem Öffnen des Fensters im Aufenthaltsraum kurz nach dem Befüllen senkt die einströmende Frischluft im Aufenthaltsraum und dem Gang die CO<sub>2</sub>-Konzentration nahezu auf die Außenkonzentration ab. Nach einer Anpassung der Zuluftöffnungsweite auf 7,5cm und Start der Produktion steigen die Konzentrationen auf ca. 1300ppm an. Eine Vergrößerung der Fensteröffnungsweite auf 12cm lässt die Konzentrationen um 100ppm fallen. Aufgrund eines Ausfalls der Messanlage stehen zwischen 10 und 11 Uhr für eine Dreiviertelstunde keine Messdaten zur Verfügung. Während dieser Zeit wurde die 2. CO<sub>2</sub>-Produktion im Büroraum P2.2 aktiviert und die Zuluftöffnung auf 6cm geöffnet. Dadurch sind die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Büroraum auf ca. 1900ppm angestiegen und auch im restlichen Geschoss stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration durch die 2. Quelle. Eine Reduktion der Produktionsraten lässt die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wieder absinken. Die gemessenen Werte in den verschiedenen Messquerschnitten und Räumen liegen durch die unterschiedlichen Konzentrationen in Aufenthaltsraum und Büroraum weiter auseinander, im Mittel liegen sie bei 1300ppm. Eine Öffnung des Fensters im Büroraum um 13:00 auf 50cm lässt die Konzentrationen im Büroraum, Gang, Technikraum und Schacht fallen. Durch die geringeren Temperaturdifferenzen von Innen- zu Außenluft stellen sich keine konstanten Konzentrationen mehr ein. Die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Produktionsraten und Öffnung des Fensters im Aufenthaltsraum auf 50cm um 14:40 bewirkt größere Schwankungen bei den Konzentrationen, die sich bis zum Ende der Messungen um 15:35 nicht mehr beruhigen.

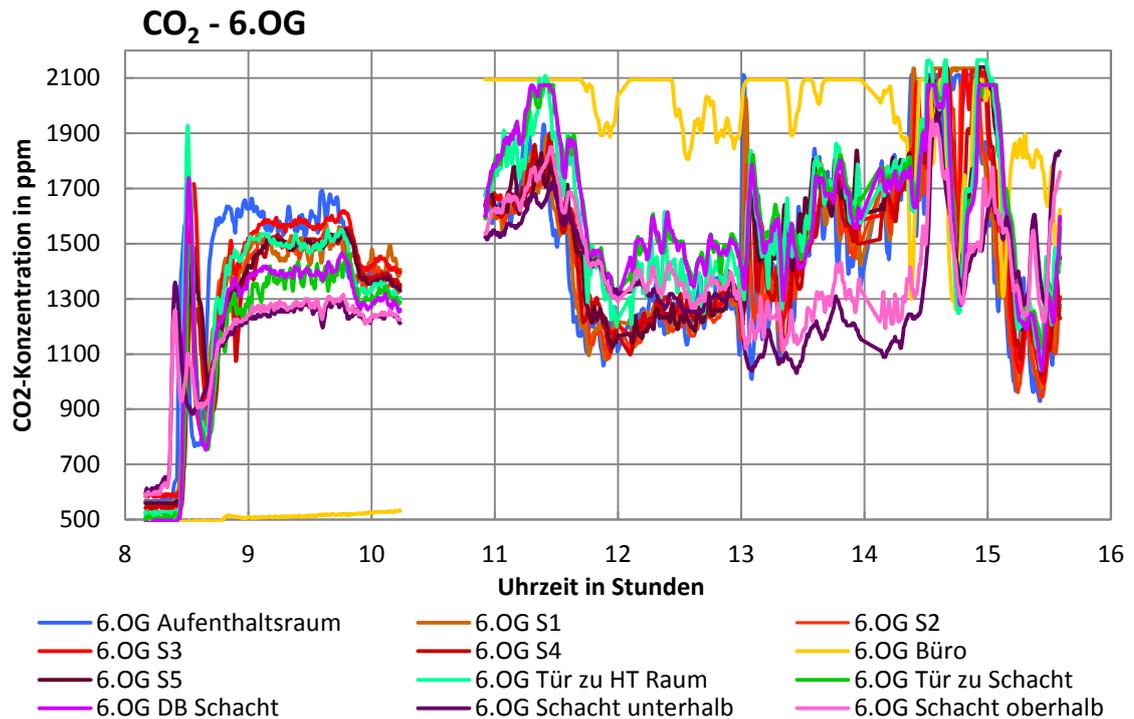


Abb. 7.35 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 6.OG

**6.OG:** Das 6. OG wurde bezüglich der Steuerung wie das 2. OG behandelt. Das Fenster im Aufenthaltsraum ist hier von Anfang an auf 12cm gestellt und wird um 9:45 auf 18cm erweitert. Im Büroraum ist mit Start der Produktion das Fenster 8cm geöffnet. Der entstehende Luftstrom reicht nicht aus um die produzierte CO<sub>2</sub>-Menge abzuführen, die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen übersteigen 2100ppm und verlassen damit den Messbereich der Sensoren. Erst durch komplettes Öffnen des Fensters um 14:40 sinken die Konzentrationen im Büro wieder ab. Die Konzentrationen im Schacht folgen dem Konzentrationsverlauf des 2. OG und scheinen vor allem ab 13:00 nicht mehr von den Konzentrationen im 6.OG beeinflusst zu werden.

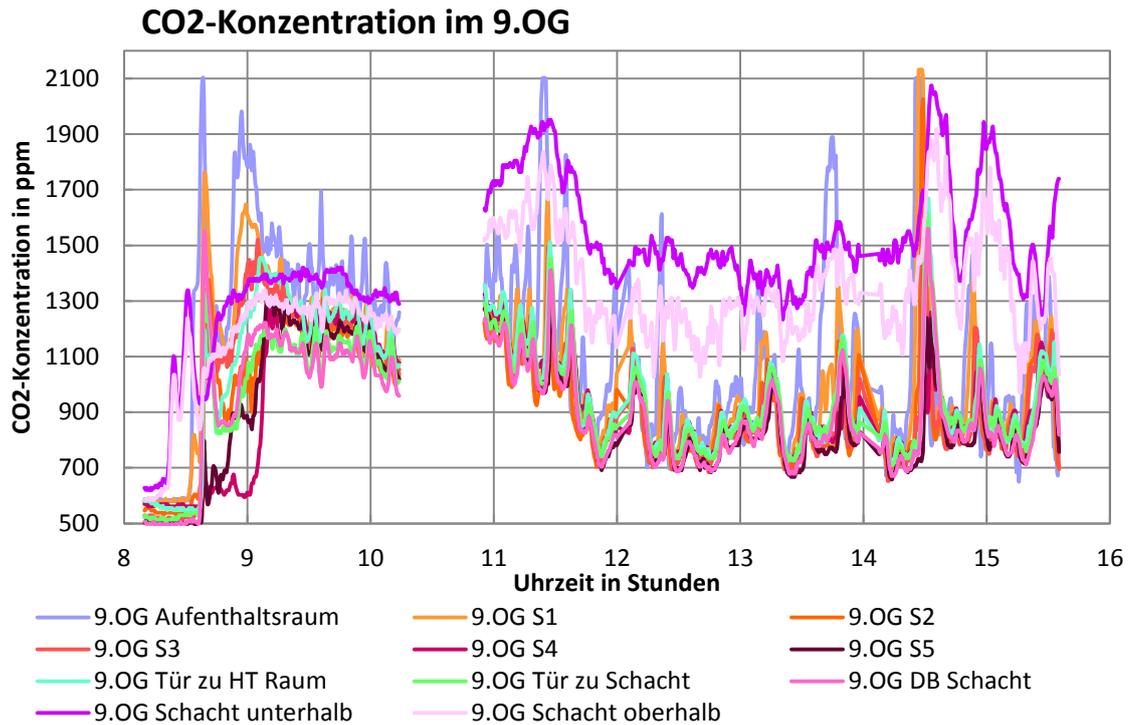


Abb. 7.36 Zeitverlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 9.OG

**9.OG:** Im 9.OG wurde nur im Aufenthaltsraum CO<sub>2</sub> produziert. Das Büro stand für diese Messung nicht mehr zur Verfügung. Das Fenster im Aufenthaltsraum ist hier von Anfang an auf 56cm komplett geöffnet und wird im Messzeitraum nicht verstellt. Am Anfang verhält sich das 9. OG ähnlich dem 2. OG und 6. OG. Obwohl hier keine Änderung der Öffnung oder Produktionsraten durchgeführt wird, folgen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen den anderen Geschossen und sinken um 9:40 etwas ab.

Mit Start der Produktionen und der Öffnung der Fenster sinkt die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schacht oberhalb des 9. OG auf ca. 100ppm unter die Konzentration im Schacht darunter. Das ist darauf zurückzuführen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im 9. OG geringer ist als im Schacht darunter, und dass es im Schacht oberhalb des 9. OG zur Vermischung der beiden Ströme kommt. Die Differenz nimmt im Verlauf der Messung zu und erreicht 300ppm. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in diesem Geschoss sind größeren Schwankungen unterworfen als die Konzentrationen in den anderen Geschossen, was auf einen ungleichmäßigeren Luftstrom hindeutet.

## 7.4.6.5 Quantitative Ergebnisse der Messung vom 16.03.2012

### 7.4.6.5.1 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgt über die Massenbilanz

$$V \cdot \dot{c}_i = \dot{\rho}_i + \dot{V} \cdot (c_a - c_i)$$

Bei der Zuluft im Aufenthaltsraum und Büro ermittelt man die nachfolgenden Volumenströme:

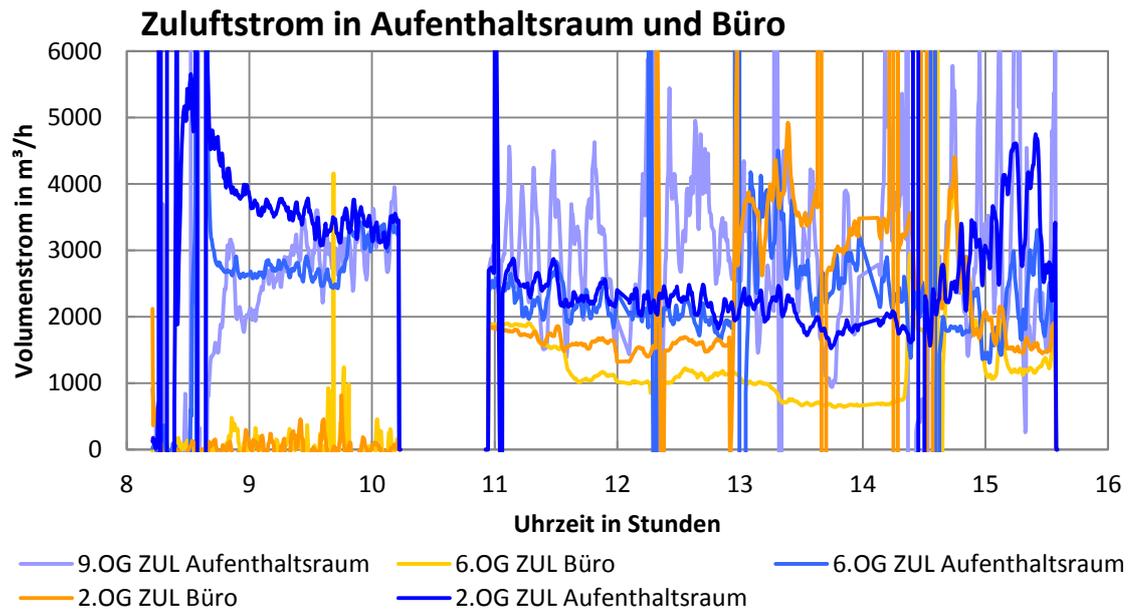


Abb. 7.37 Zeitverlauf der gerechneten Zuluft-Volumenströme bei den Fensteröffnungen in den Aufenthalts- und Büroräumen

### 7.4.6.5.2 Beurteilung

Die Auswertung zeigt im Zuluftstrom im 2.OG einen relativ gleichmäßigen Volumenstrom der von um 9:00 ca. 4000 m<sup>3</sup>/h auf 2000 m<sup>3</sup>/h um 14:30 abnimmt. Bei gleichbleibender Konzentration, wenn die Ableitung verschwindet (das bedeutet, dass die Steigung der Kurve null wird) ist der Massenstrom nur mehr von der Produktion abhängig. Durch das Vergrößern der Zuluftöffnungen um 9:45 wird das Absinken des Volumenstroms im 2.OG abgebremst, im 6.OG steigt der Volumenstrom um ca. 500m<sup>3</sup>/h an. Der Volumenstrom im 9.OG steigt in dieser Zeit, mit starken Schwankungen von bis zu 1000m<sup>3</sup>/h, von 2000m<sup>3</sup>/h auf 3400m<sup>3</sup>/h an.

Nach Aktivieren der Produktionen in den Büroräumen und Öffnen der dortigen Fenster um 11:00 pendeln sich die Zuluftströme in den Aufenthaltsräumen im 2. und 6. OG auf ca. 2200m<sup>3</sup>/h ein, der Zuluftstrom im Büro im 2. OG

beträgt ca. 1600m<sup>3</sup>/h. Um 11:20 kommt es zu einem Absinken der Zuluftströme, was vor allem beim Büro im 6. OG deutlich zu sehen ist. Um 13:00 werden die Zuluftöffnungen im Büro im 2.OG und in den Aufenthaltsräumen im 6.OG und 9.OG weiter vergrößert. Die Volumenströme unterliegen dadurch starken Schwankungen, sind aber tendenziell höher als mit den kleineren Öffnungen.

Die Zuluftströme ins Büro im 6.OG und in den Aufenthaltsraum im 2.OG bleiben relativ stabil, bis auch dort um 14:40 die Fenster weiter geöffnet werden.

## 8 Validierung

Um das entwickelte Berechnungsmodell (siehe Kapitel 5 *Berechnungsmodell* ab Seite 17) zu prüfen, werden die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit den Berechnungsergebnissen verglichen. Für den direkten Vergleich werden die berechneten Volumenströme in CO<sub>2</sub>-Konzentrationen umgerechnet.

### 8.1 Umrechnung Volumenstrom in CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Bei den Messungen wurde CO<sub>2</sub> als Tracergas verwendet. Um die Simulation mit den Messungen bestmöglich vergleichen zu können, werden die Volumenströme für die Zonen, die an die Außenluft grenzen, mit der Gleichung (1.13) und den Daten der CO<sub>2</sub>-Produktion in CO<sub>2</sub>-Konzentrationen umgerechnet. Die Abb. 8.1 *Skizze CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in einem Raum* zeigt die ein- und ausströmenden Volumenströme  $v$  sowie die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen  $c$  die dem Raum und der ausströmenden Luft zugeordnet ist. Aus der Massenbilanz für das abgeschlossene System Raum kann die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen  $c$  errechnet werden.

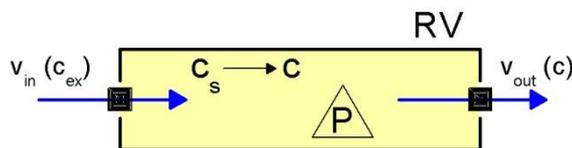


Abb. 8.1 Skizze CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in einem Raum

In Gleichung (1.12) wird die CO<sub>2</sub>-Bilanz in Gramm für den in Abb. 8.1 dargestellten Raum gebildet.

$$c * RV = c_s * RV + c_{ex} * v_{in} * \Delta t + \text{Prod}_c * \Delta t - c * v_{out} * \Delta t \quad (1.12)$$

Durch Umformen kann aus dieser Bilanz die CO<sub>2</sub>-Konzentration  $c$  ermittelt werden. Siehe Gleichung (1.13).

$$c = \frac{c_s + \frac{\text{Prod}_c + v_{in} * c_{ex}}{RV} * \Delta t}{1 + \frac{v_{out}}{RV} * \Delta t} \quad (1.13)$$

$c$	CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Zone in g/m <sup>3</sup>
$c_{ex}$	CO <sub>2</sub> -Konzentration Außenluft in g/m <sup>3</sup>
$c_s$	CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Zone Startwert bzw. Vorwert in g/m <sup>3</sup>
$v_{in}$	Volumenstrom in die Zone in m <sup>3</sup> /s
$v_{out}$	Volumenstrom aus der Zone hinaus in m <sup>3</sup> /s
$\text{Prod}_c$	CO <sub>2</sub> -Produktion in der Zone in g/s

**RV**      Raumvolumen in m<sup>3</sup>  
**Δt**      Zeit zwischen den Messungen in s

Für Räume, die nicht an die Außenluft grenzen und keine CO<sub>2</sub>-Produktion haben, kann die Gleichung (1.13) zu Gleichung (1.14) vereinfacht werden.

$$c = \frac{c_S + \sum \frac{v_{in} * c_{in} * \Delta t}{RV}}{1 + \frac{v_{out} * \Delta t}{RV}} \quad (1.14)$$

**c<sub>in</sub>**      CO<sub>2</sub>-Konzentration der einströmenden Luft in g/m<sup>3</sup>

Jeder Raum wirkt als Pufferspeicher und gibt Änderungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der einströmenden Luft erst verzögert weiter.

Die Sensoren, die bei den Messungen verwendet wurden, geben die Messdaten in ppm aus. Daher werden auch die Berechnungsergebnisse in ppm umgerechnet. Der Umrechnungsfaktor für CO<sub>2</sub> in Luft ist: 0,001965. Das bedeutet, dass 1ppm CO<sub>2</sub> 0,001965 g CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Luft entspricht

## 8.2 Berechnete CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wird mittels dem in Kapitel 5 beschriebenen Berechnungsmodell und Gleichung (1.14) aus den Temperaturen, Öffnungsgrößen, Volumenströmen, CO<sub>2</sub>-Produktionsraten und Raumgrößen errechnet.

Diese Berechnung erfolgt mit einem eigens für diese Arbeit in Matlab erstellten Programm-Code, der in Kapitel 10 *Anhang 1: Simulation – Matlab-Code* beschrieben ist. Dabei werden mit den Daten der 6. Messung für jeden Messzeitpunkt die Massenbilanz gelöst, Volumenströme ermittelt und diese in CO<sub>2</sub>-Konzentrationen umgerechnet.

In den folgenden Diagrammen werden die berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für die verschiedenen Zonen des Berechnungsmodells (Abb. 5.1 *Berechnungsmodell*) gezeigt. Die zwei Zahlen nach dem Kürzel geben die Sensorposition in der Form (X.Y) an. X steht dabei für den Bereich und Y für die Zone. Im Schacht ist Y der Höhenabschnitt beginnend von unten.

Werte für X: Schacht (1), 2. Geschoss (2), 6. Geschoss (3), 9. Geschoss (4)

Werte für Y: Heiztechnik Raum (1), Gang (2), Aufenthaltsraum (3), Büro (4)

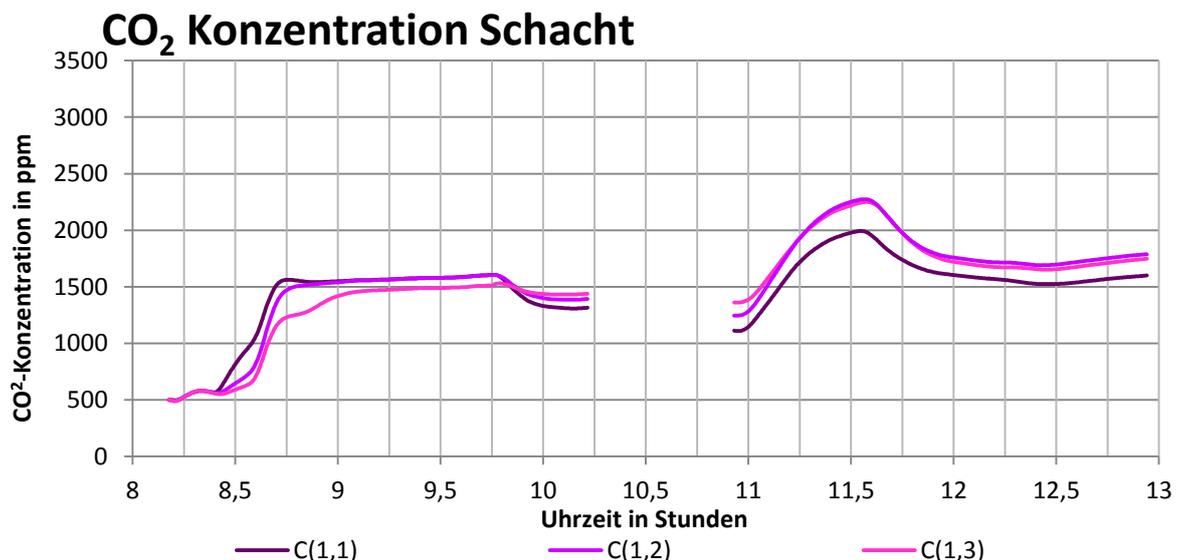
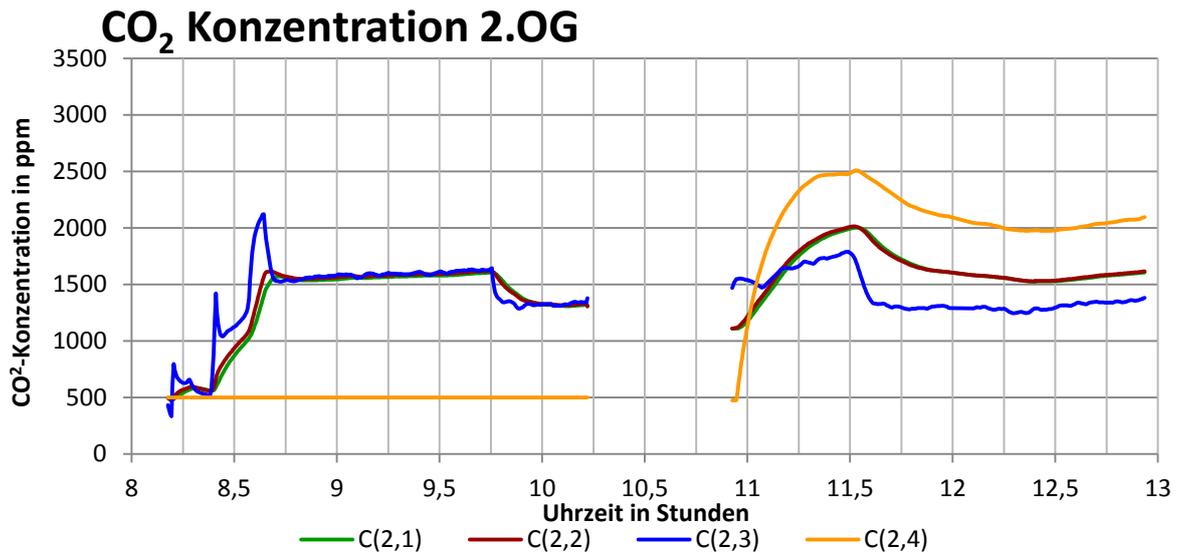
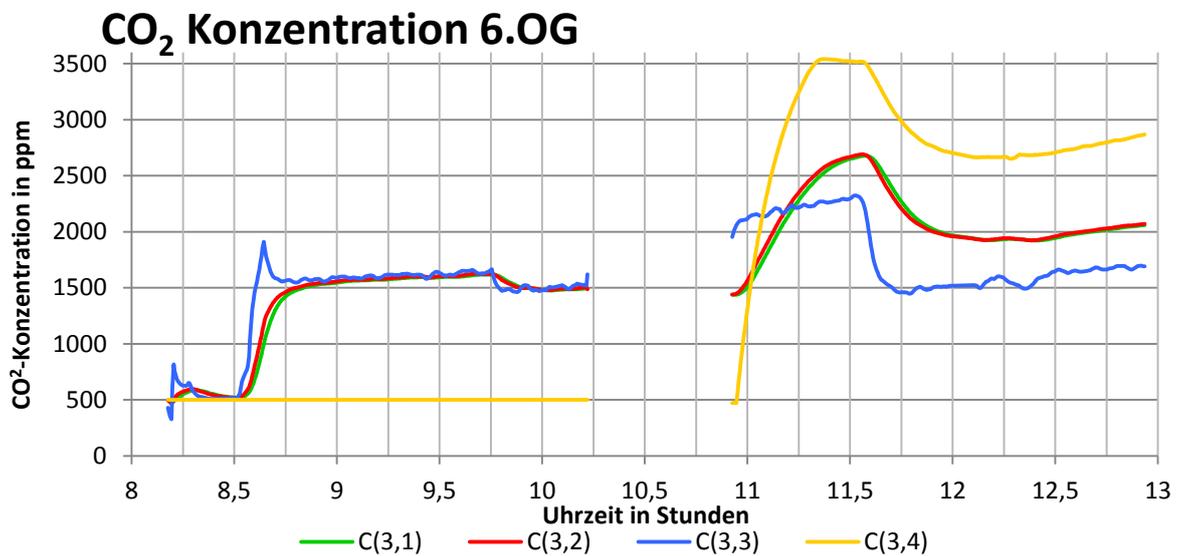
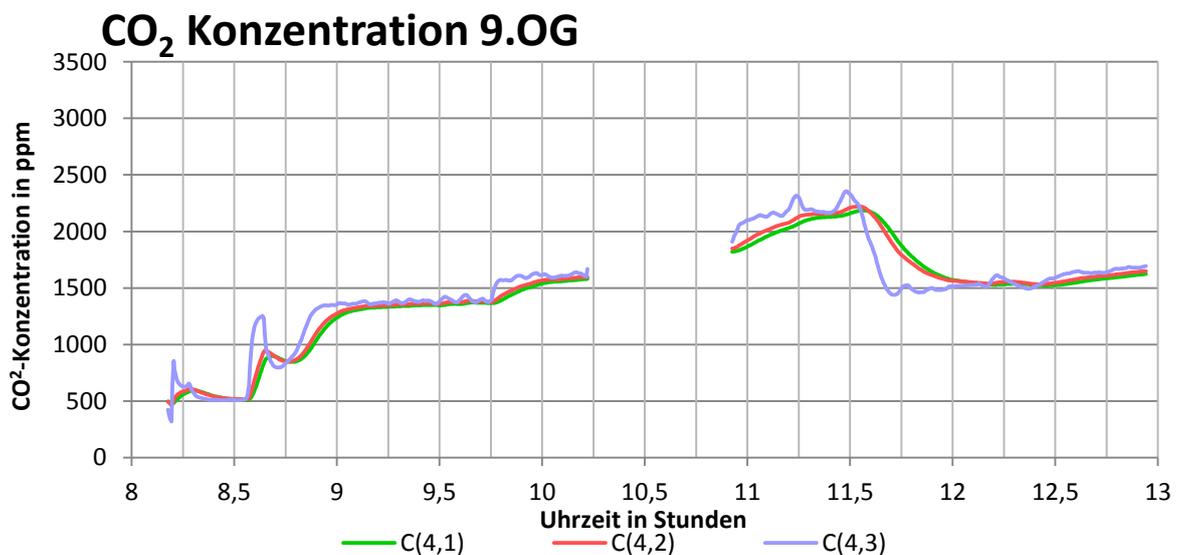


Abb. 8.1 Berechnete CO<sub>2</sub> Konzentrationen im Schacht

Abb. 8.2 Berechnete CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 2. ObergeschossAbb. 8.3 Berechnete CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 6. ObergeschossAbb. 8.4 Berechnete CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 9. Obergeschoss

### 8.3 Variation der Eingangsparameter

Durch eine Variation der Öffnungsgrößen um 10% in der Simulation soll die Sensibilität des Modells auf ungenaue bzw. veränderte Eingangsparameter getestet werden.

Eine Veränderung der Öffnungsgröße um 10% in Gleichung (1.5) zur Berechnung des Massenstroms entspricht einer Änderung des Cd-Werts um 10% bzw. einer Änderung der Druckdifferenz um ca. 20%. Eine Variation des Drucks oder der Cd-Werte liefert analoge Ergebnisse und muss nicht gesondert berechnet werden.

In den folgenden Diagrammen werden ausgewählte CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverläufe für die bei der Messung verwendeten und die mit dem Faktor 0,9 bzw. 1,1 multiplizierte Öffnungsgrößen gezeigt. Die Kurve mit dem Faktor 0,9 hat das Kürzel (AF 09 C) und ist punktiert dargestellt, die mit den bei der Messung verwendeten Öffnungsgrößen hat das Kürzel (AF 10 C) und ist durchgezogen dargestellt. Die Kurve mit dem Faktor 1,1 hat das Kürzel (AF 11 C) und ist strichliert dargestellt.

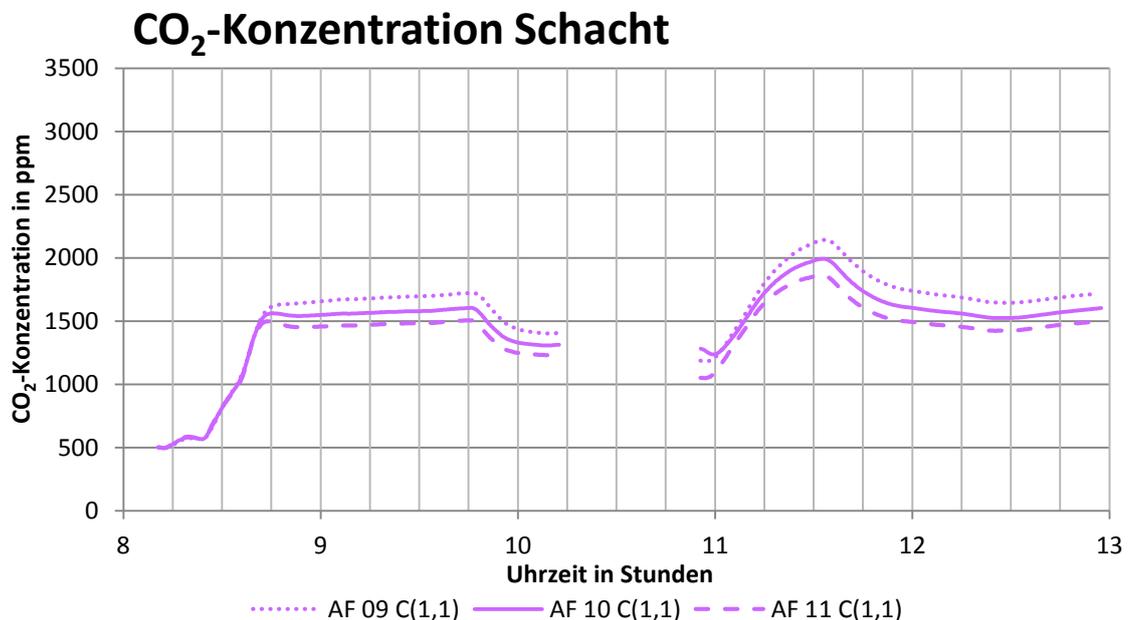
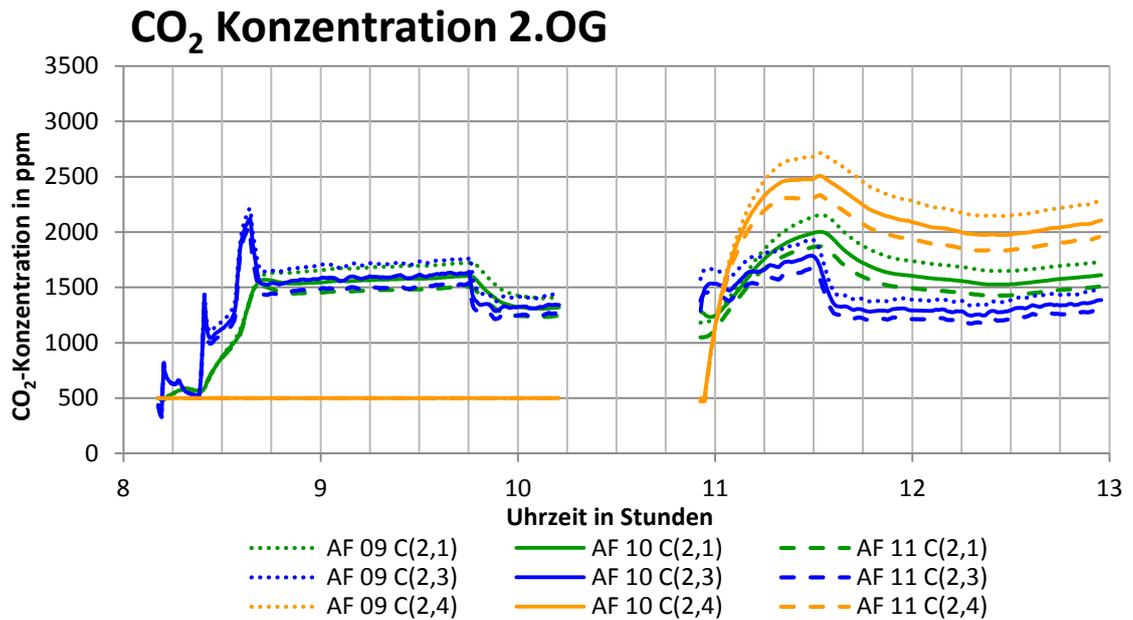
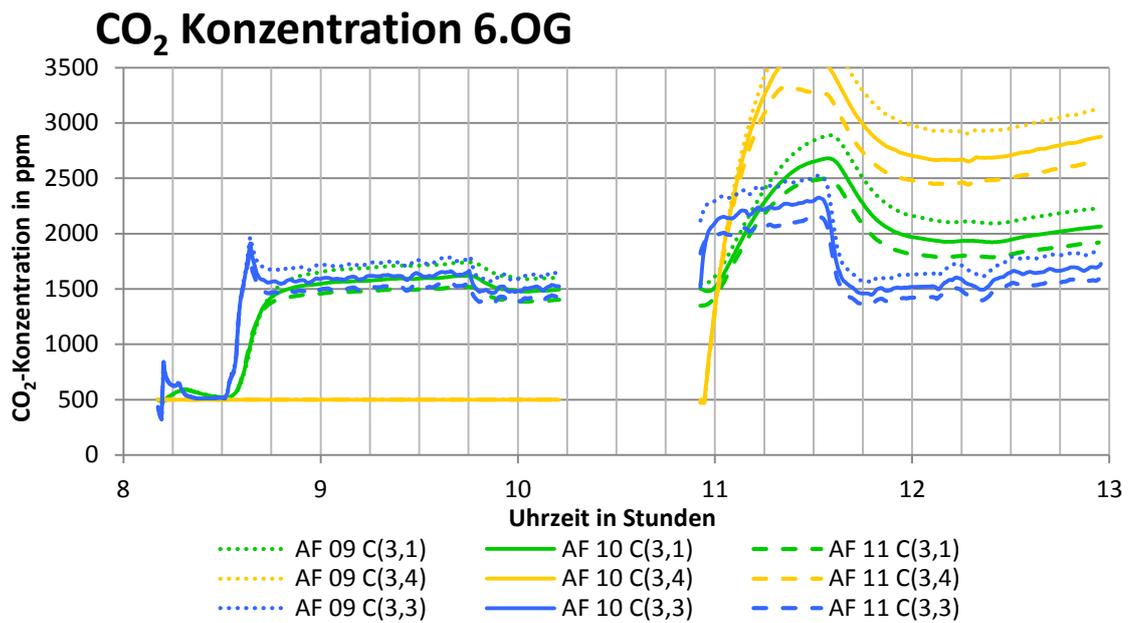


Abb. 8.5 Berechnete CO<sub>2</sub>-Konzentration Schacht mit variablen Öffnungsgrößen

Abb. 8.6 Berechnete CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 2.OG mit variablen ÖffnungsgrößenAbb. 8.7 Berechnete CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 6.OG mit variablen Öffnungsgrößen

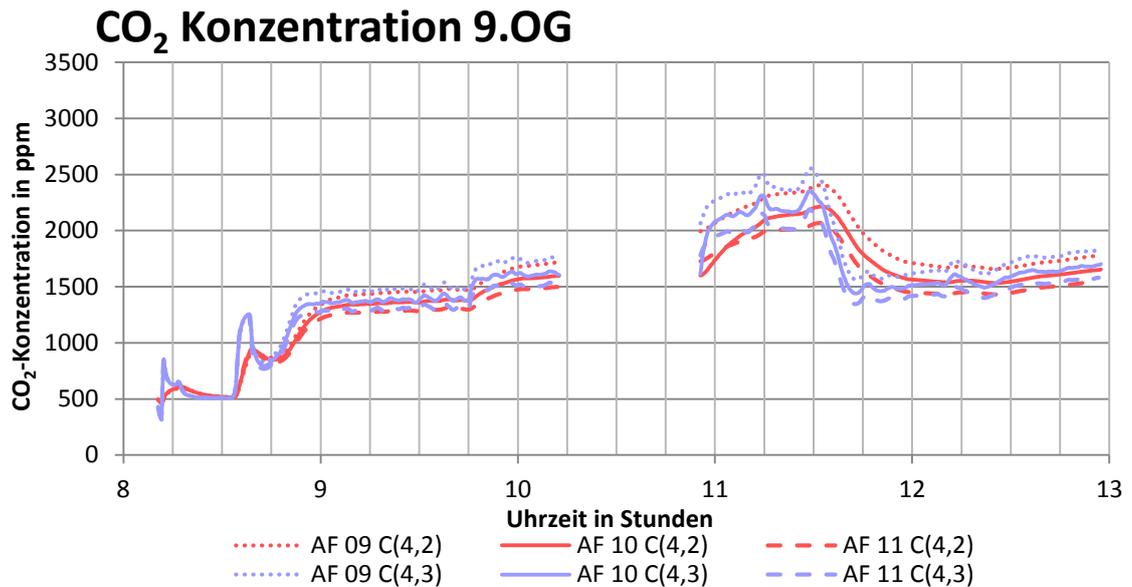


Abb. 8.8 Berechnete CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 9.OG mit variablen Öffnungsgrößen

Die Diagramme Abb. 8.5 bis Abb. 8.8 zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentrationskurven in ihrem Verlauf sehr ähnlich sind. Die Abweichung beträgt zwischen 50 und 300ppm und ist bei höheren Konzentrationen größer als bei niedrigen.

Größere Öffnungen erzeugen einen größeren Volumenstrom und damit eine niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Zonen. Die mit dem Öffnungsgrößenfaktor 0,9 berechnete CO<sub>2</sub>-Konzentrationskurve liegt über der mit den Faktor 1,0 berechneten Kurve (Original) und diese über der mit dem Faktor 1,1 berechneten Kurve.

## 8.4 Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen

Für den Vergleich werden die gemessenen und berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverläufe in den einzelnen Zonen betrachtet.

In den folgenden Diagrammen werden die gemessenen und berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für die verschiedenen Geschosse und den Schacht gezeigt.

Die durchgezogenen Linien zeigen die Messwerte (Kürzel M CO<sub>2</sub>). Die strichlierten Linien zeigen die Berechnungsergebnisse mit dem Faktor 1,0 für Öffnungsgrößen (Kürzel AF 10 C). Die zwei Zahlen nach dem Kürzel geben die Sensorposition (nach Abb. 5.1 *Berechnungsmodell*) an.

### 8.4.1 Schacht

#### CO<sub>2</sub>-Konzentrationen Schacht

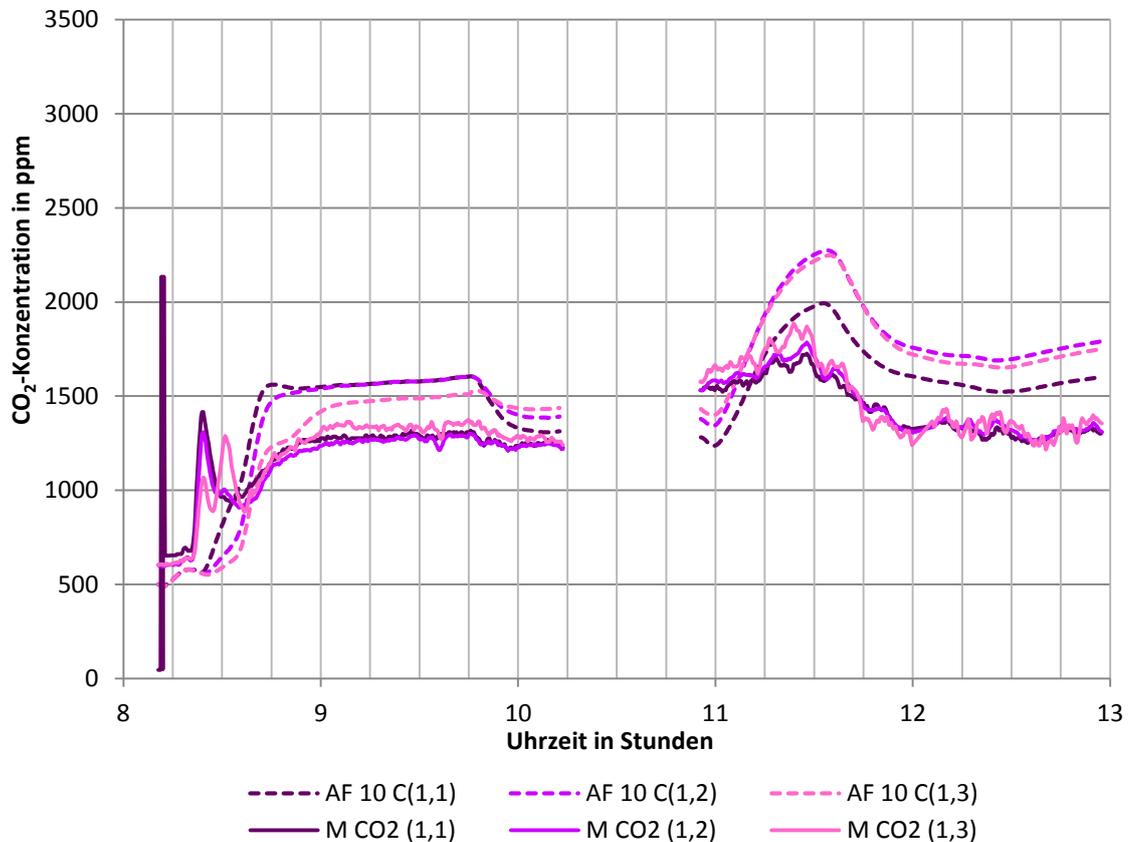


Abb. 8.9 Vergleich der berechneten und gemessenen CO<sub>2</sub> Konzentrationen im Schacht

Im Schacht weichen am Anfang der Messung die Messwerte stark von den berechneten Werten ab. Diese Abweichung kann durch die Störungen beim Befüllen der CO<sub>2</sub>-Produktion erklärt werden. Danach ist der Verlauf der Berechnungsergebnisse dem Verlauf der Messergebnisse ähnlich. Die berechneten Werte liegen generell über den Messwerten. Daraus folgt, dass die gemessenen Volumenströme größer als die berechneten Volumenströme sind, oder dass ein Teil des eingebrachten CO<sub>2</sub> auf einem anderen Weg das Gebäude verlässt.

Auch die Diagramme für die einzelnen Geschosse zeigen einen ähnlichen Verlauf der berechneten und gemessenen Werte und höhere Werte bei der Berechnung.

## 8.4.2 Obergeschoss

### CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 2. OG

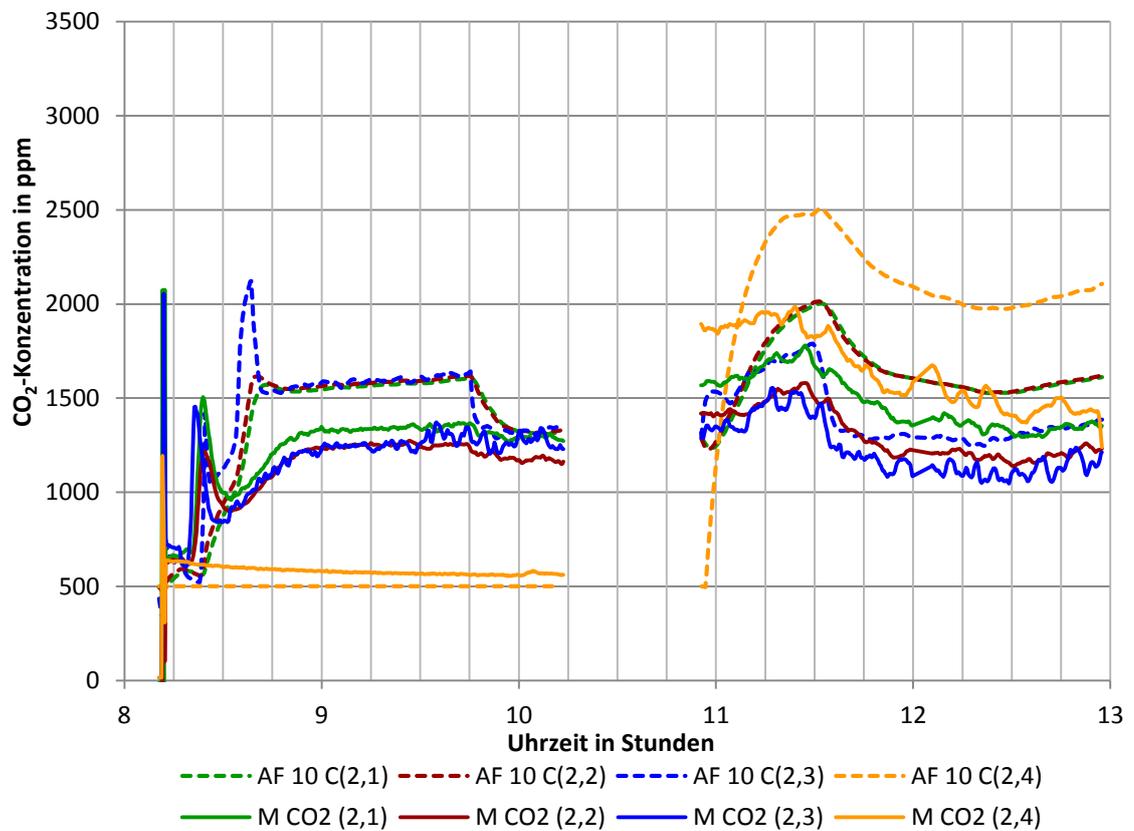


Abb. 8.10 Vergleich der berechneten und gemessenen CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 2. Obergeschoss

Im Diagramm Abb. 8.10 Vergleich *der berechneten und gemessenen* CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 2. Obergeschoss werden die berechneten und gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im 2. Obergeschoss gezeigt.

### 8.4.3 6. Obergeschoss

#### CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 6. OG

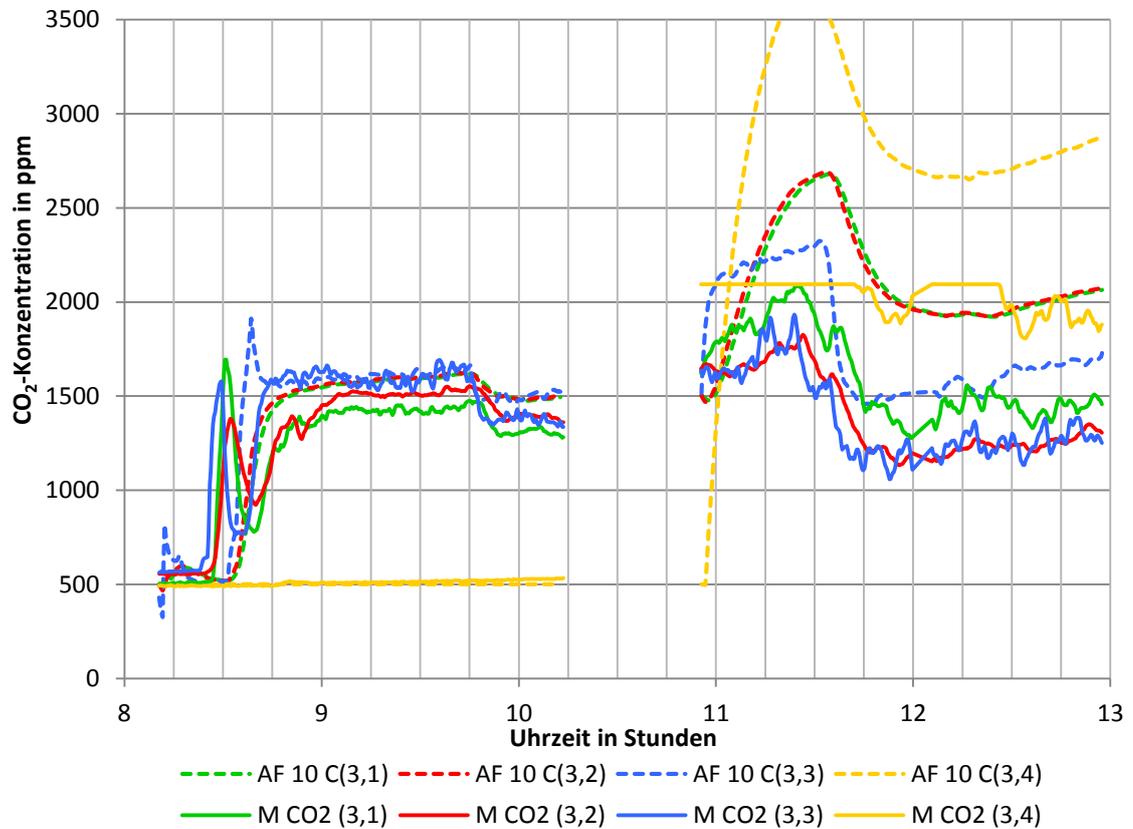


Abb. 8.11 Vergleich der berechneten und gemessenen CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 6. Obergeschoss

Im 6. Obergeschoss passen in der ersten Hälfte der Messung die berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sehr gut zu den gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. In der zweiten Hälfte der Messung gibt es auch hier größere Abweichungen, der generelle Verlauf der Kurven stimmt aber überein. Die Messwerte im Büro (M CO<sub>2</sub> (3,4)) erreichen den maximal mit den Sensoren aufzeichnenbaren Wert von 2100ppm. Die tatsächlichen Werte in diesem Bereich liegen vermutlich höher als im Diagramm gezeigt.

### 8.4.4 9. Obergeschoss

## CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 9. OG

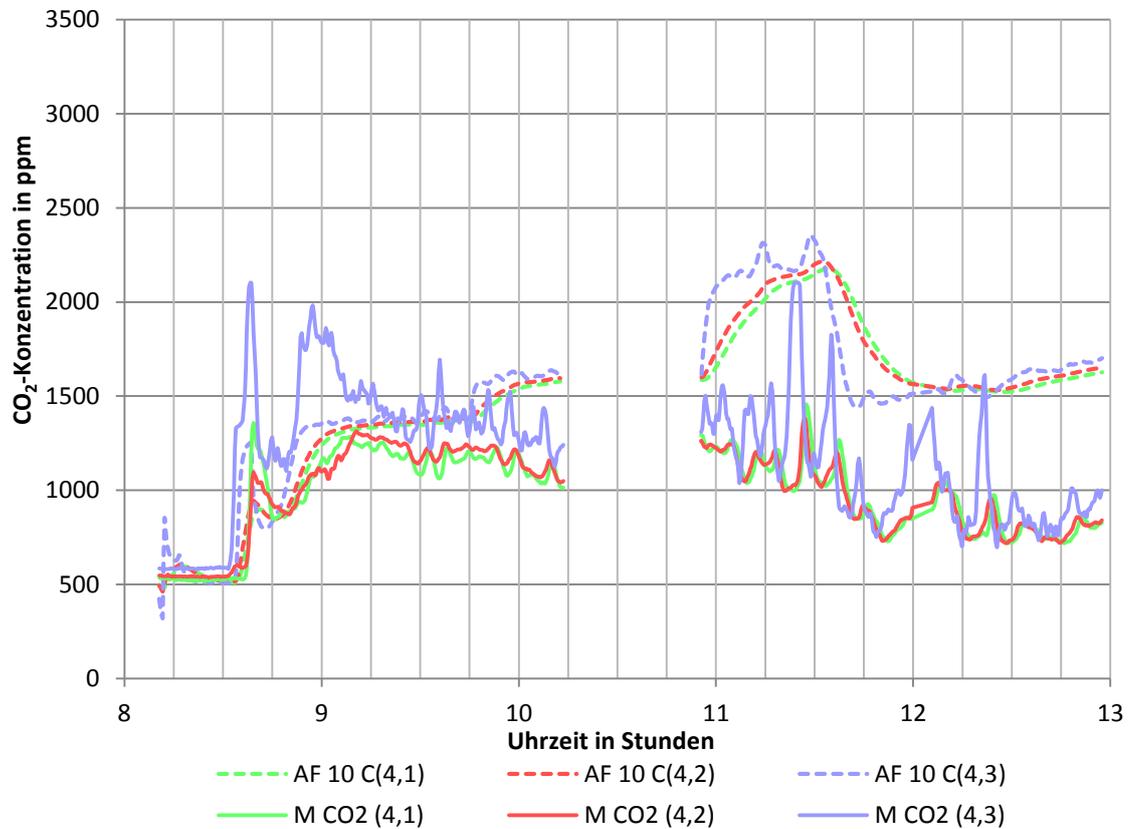


Abb. 8.12 Vergleich der berechneten und gemessenen CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 9. Obergeschoss

Im 9. Obergeschoss gibt es wie im 6. Obergeschoss zu Anfang der Messung eine gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Gegen Ende der Messung werden die gemessenen Konzentrationen immer unruhiger und befinden sich sehr nahe an der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft. In diesem Bereich ist die Abweichung zwischen berechneter und gemessener CO<sub>2</sub>-Konzentration mit ca. 900ppm am größten. Die Spitzen der gemessenen Konzentrationen liegen in der Nähe der berechneten Konzentrationen.

## 8.5 Anpassung der Parameter

Die Variation der Eingangsparameter in Kapitel 8.3 hat gezeigt, dass die berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit den Eingangsparametern justiert werden können.

Um eine gute Übereinstimmung von berechneter und gemessener CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erreichen, wird der Cd-Wert, der den Durchströmwiderstand für Luft beim Durchströmen der Öffnungen angibt, in der Simulation auf 0,75 angepasst. Das entspricht einer Anhebung um ca. 15%. Wobei beim Durchlasswiderstand ein größerer Wert für einen kleineren Widerstand und größeren Strom steht, siehe Gleichung (1.5).

In Abb. 8.13 *Vergleich der berechneten und gemessenen CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 2. OG und im Schacht für Cd=0,75* sind die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für ausgewählte Zonen dargestellt.

### CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 2. OG und Schacht

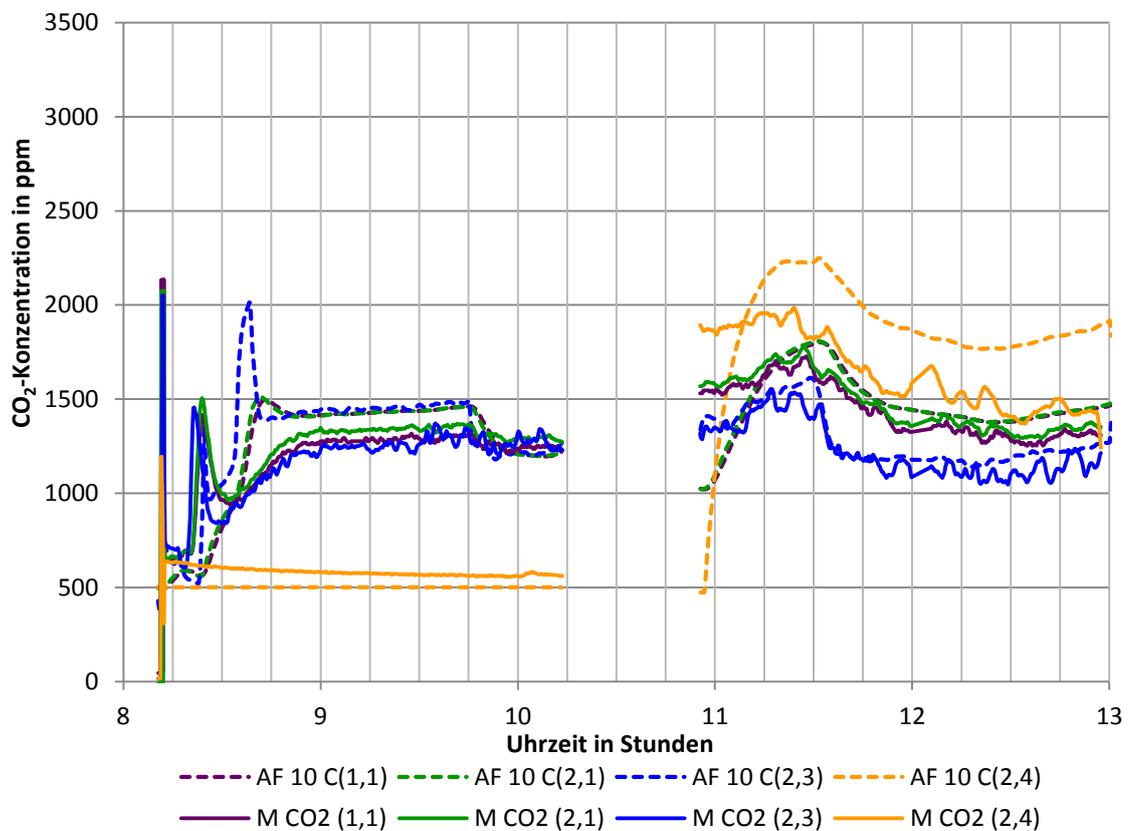


Abb. 8.13 Vergleich der berechneten und gemessenen CO<sub>2</sub> Konzentrationen im 2. OG und im Schacht für Cd=0,75

## 9 Schlussfolgerungen

Die für diese Arbeit durchgeführten Versuchsreihen haben gezeigt, dass die Luftwechselraten in den Räumen für die Berechnung des Kühlbedarfs und den Nachweis der sommerlichen Überwärmung bei Kernlüftung im Vergleich zu Fensteröffnung bei Nachtlüftung stark erhöht werden können. Der erzeugte Luftwechsel bei Kernlüftung ist abhängig von der Temperaturdifferenz und kann durch eine Begrenzung der Öffnungsgrößen gut reguliert und an die Erfordernisse angepasst werden. Die Wirksamkeit der Kernlüftung wird durch Wind nicht beeinflusst, da auch durch Wind ein Austausch der Innenluft durch Außenluft und damit ein Luftwechsel in den Zonen sicherstellt.

Mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit erstellten Vorhersagemodells (siehe Kapitel 5 *Berechnungsmodell*) konnten die zu verwendenden Öffnungsgrößen für die Messungen bestimmt werden. Als besonders wichtig hat sich herausgestellt, dass bei den Messungen alle ins Gebäude integrierten Haustechnikanlagen deaktiviert sind, damit es zu keinem Tracergastransport über nicht gemessene Nebenwege kommt. Alle Verbindungen zu Nebenräumen, anderen Gebäudeteilen und vor allem der Außenluft müssen während der Messungen abgedichtet sein. Die Tracergas-Produktion aus Trockeneis mit regelbaren Heizelementen war gut steuerbar, messbar, konstant und zuverlässig.

Durch das Anpassen des Mess-Setups an die in den vorhergegangenen Messungen gewonnenen Erkenntnisse und neue Gegebenheiten konnten bei der finalen Messung konstante Volumenströme in Abhängigkeit von Öffnungsgrößen und Temperaturdifferenzen ermittelt werden.

Die Messdaten der finalen Messung wurden als Vergleichs- und Eingangsdaten für das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulationsmodell für Luftströmungen verwendet. Die gemessenen Innen- und Außentemperaturen, die verwendeten Öffnungsgrößen und die Gebäudegeometrie waren die wichtigsten Eingangsdaten für das Simulationsmodell, das in Matlab abgebildet, getestet und mit den Messdaten validiert wurde.

Die Simulation der Luftströmungen für den gemessenen Zustand im Berechnungsmodell liefert Volumenströme, die gut mit den durch die Tracergas-Messung bestimmten Volumenströmen zusammenpassen.

Einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnung haben die Durchströmwiderstände der Öffnungen (Cd-Werte). In der Literatur sind keine speziellen Werte für Fensteröffnungen bzw. nur teilweise geöffnete oder gekippte Fenster zu finden. In dieser Arbeit wurde mit den Werten für größere rechteckige Öffnungen gearbeitet. Für eine genauere Berechnung der Luftvolumenströme kann vorab eine Untersuchung über die Durchströmwiderstände von Fenster und Türöffnungen durchgeführt werden.

Bei der Durchführung der Simulation mittels Matlab traten aufgrund der je nach Randbedingung unterschiedlich zu verwendenden Formeln, Probleme in der numerischen Lösung des Gleichungssystems auf, die zu nicht auswertbaren bzw. stark abweichenden Ergebnissen für einzelne Messzeitpunkte geführt haben. Das Ausscheiden der nicht auswertbaren Messzeitpunkte war sehr zeitaufwändig.

Um schneller zu verwertbaren Ergebnissen zu kommen und um auch den Windeinfluss abzubilden, müsste das Matlab-Simulationsmodell (siehe Kapitel 10 *Anhang 1: Simulation – Matlab-Code*) noch erweitert werden.

## **10 Anhang 1: Simulation – Matlab-Code**

Zur Simulation des Berechnungsmodells für die Luftströmungen wurde Matlab verwendet.

Matlab ist ein Software-Programm der Firma The MathWorks, Inc. Es wird zur Simulation technischer mathematischer Berechnungen verwendet. Die Eingabe in das Programm erfolgt mittels Skript-Dateien. Für die Ausgabe bietet Matlab mehrere Möglichkeiten. [14]

### **10.1 Beschreibung**

Das Berechnungsmodell umfasst drei Geschosse des Gebäudes und den Schacht. In jedem Geschoss wurde mit vier Zonen (Räumen) gerechnet. Eine Übersicht über das Zonenmodell bietet die Abb. 5.1 *Berechnungsmodell*, die auf der nächsten Seite noch einmal eingefügt ist.

Der Matlab-Code wurde in zwei wesentlichen Schritten entwickelt. Im ersten Schritt wurde er als Prognosemodell für die bei den Messungen zu erwartenden Luftströmungen entwickelt. Mit diesem Modell wurden, bei der gegebenen Geometrie des Chemiehochhauses und den erwarteten Temperaturdifferenzen für verschieden Öffnungsgrößen, die zu erwartenden Luftvolumenströme vorhergesagt.

Nach Abschluss der Messungen wurde das Modell verfeinert und so angepasst, dass die gemessenen Temperaturen als Eingangsdaten verwendet werden können. Mit diesem verbesserten Simulationsmodell wurden die in dieser Arbeit gezeigten Diagramme erstellt.

Wie in Kapitel 8 *Validierung* ab Seite 71 beschrieben, wurden die Berechnungsergebnisse aus dem Simulationsmodell mit den Daten der Messung verglichen. Für diesen Vergleich wurde das Simulationsmodell um die Umrechnung der Volumenströme in CO<sub>2</sub>-Konzentrationen erweitert.

Die in diesem Kapitel folgenden Matlab-Code-Dateien zeigen das Endergebnis des durch viele Tests und Variationen erarbeiteten Simulationsmodells. Bei der Überarbeitung des Simulationsmodells nach den Messungen wurden auch verschiedene Algorithmen zur Lösung der Massenbilanz-Gleichung (1.4) getestet. Schließlich wurde der Algorithmus „levenberg-

marquardt“ aus Matlab verwendet, der die schnellsten Ergebnisse mit einer ausreichenden Genauigkeit brachte.

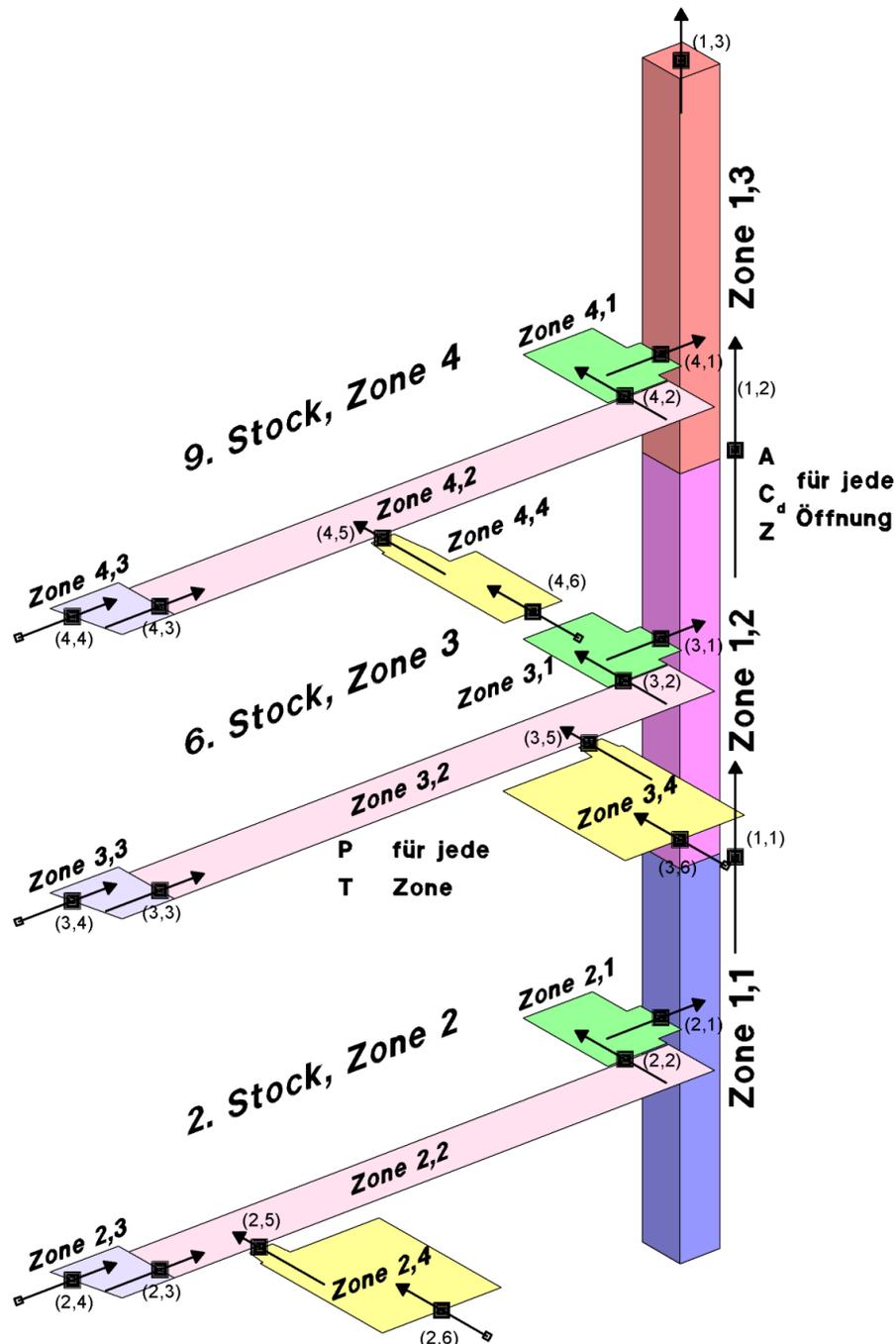


Abb. 10.1 Berechnungsmodell

Alle Zonen und Öffnungen bzw. Werte in den Zonen oder Öffnungen sind entsprechend der Grafik bezeichnet. Z.B.  $m(2,5)$  für den Massenstrom zwischen Zone 2,4 und 2,2 in der Öffnung 2,5. Die erste Zahl steht dabei für das Geschoss. Um besser Schleifen in den Code einbauen zu können, wurden für die Geschosse fortlaufende Nummern gewählt wobei der Schacht die Geschossnummer 1 bekam. Die Zonenaufteilung in den Geschossen ist gleichartig gewählt worden und entspricht dem Messungsaufbau.

Der Referenzdruck der Außenzone wurde auf der Höhe Null (FBOK im Erdgeschoss) gewählt. Für die Berechnung der Druckdifferenzen wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass alle Öffnungen in einem Geschoss in der gleichen Höhe liegen. Der Druck in den Zonen wird ebenfalls auf der Höhe der Öffnungen dieses Geschosses angenommen. Durch diese Annahmen ist keine Umrechnung des Druckes auf die Höhe des Geschosses bzw. der Öffnung bei der Berechnung des Differenzdruckes notwendig. Für die Berechnung der Druckdifferenz an den Öffnungen im Schacht wurde die Höhe der Öffnung als Referenzhöhe verwendet.

Die in Abb. 10.2 gezeigte Übersicht zeigt die gewählten Referenzhöhen für den Druck und die Öffnungshöhe in den Geschossen und im Schacht.

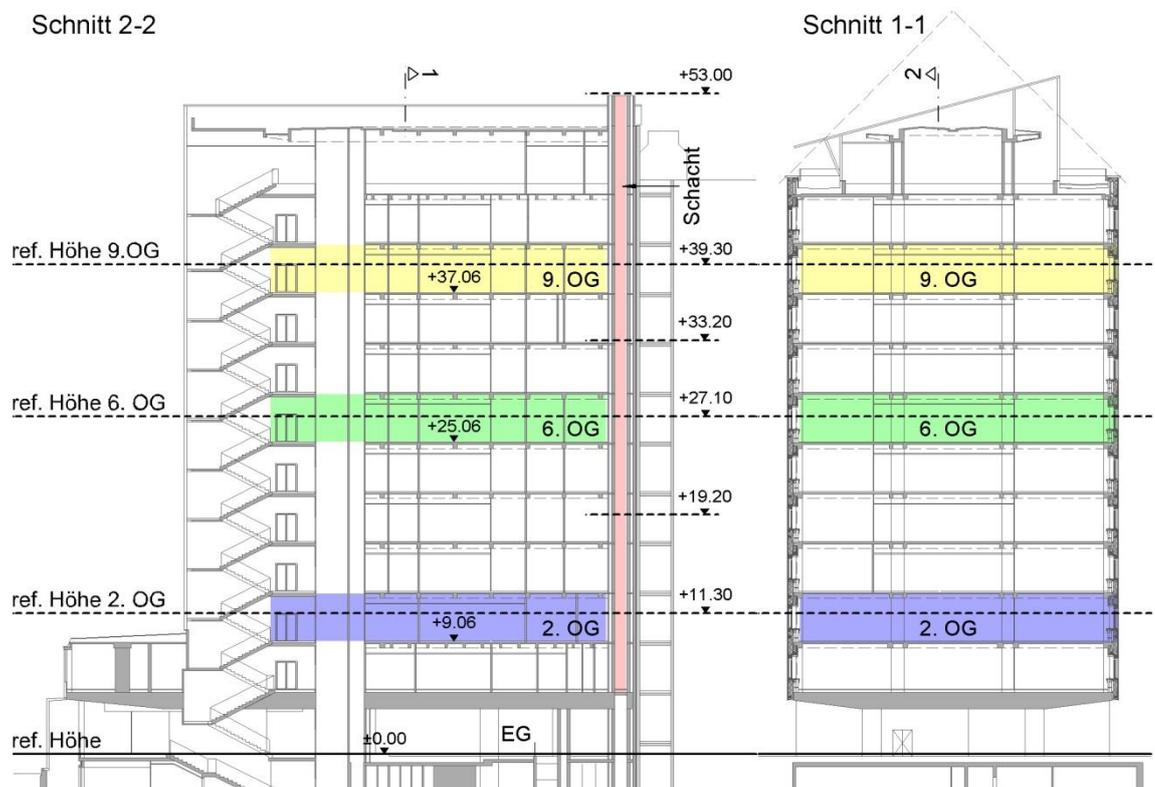


Abb. 10.2 Referenzhöhen für den Druck

## 10.2 Matlab-Code

Matlab-Dateien haben die Endung **.m**. Sie können entweder Funktionen oder einen Programmablauf enthalten. In diesem Simulationsmodell sind beide Varianten verwendet. Die Beschreibung der einzelnen Dateien des Simulationsmodells erfolgt in den folgenden Unterkapiteln. Dabei ist in der linken Spalte der Matlab-Code und in der rechten Spalte eine Beschreibung der Funktion der Codezeile.

### 10.2.1 Vorbereitung

Das Simulationsmodell arbeitet mit den während der Messungen ermittelten Temperaturdaten, Öffnungsgrößen und CO<sub>2</sub>-Produktionsraten. In einem ersten Schritt werden diese Daten in zwei Matrizen eingelesen. Die erste Matrix ist Matlab intern als **xlsi.mat** gespeichert. Sie hat eine Zeile je Messzeitpunkt und 31 Spalten mit folgendem Inhalt:

Tab. 3: Spalten xlsi.mat

Spalten für die xlsi.mat Datei			
1	Zeit in Stunden [Dezimal]	17	9.OG Temperatur Büro
2	Außentemperatur	18	9.OG Temperatur Technikraum
3	2.OG Temp. Aufenthaltsraum	19	9.OG Temperatur Schacht
4	2.OG Temperatur Gang	20	9.OG Temp. MW Gebäude
5	2.OG Temperatur Büro	21	Nicht verwendet
6	2.OG Temperatur Technikraum	22	Nicht verwendet
7	2.OG Temperatur Schacht	23	Nicht verwendet
8	2.OG Temp. MW Gebäude	24	2.OG Öffnungsgr. Aufenthaltsr.
9	6.OG Temp. Aufenthaltsraum	25	2.OG Öffnungsgr. Fenster Büro
10	6.OG Temperatur Gang	26	6.OG Öffnungsgr. Aufenthaltsr.
11	6.OG Temperatur Büro	27	6.OG Öffnungsgr. Fenster Büro
12	6.OG Temperatur Technikraum	28	9.OG Öffnungsgr. Aufenthaltsr.
13	6.OG Temperatur Schacht	29	2.OG Öffnungsgröße Türe Büro
14	6.OG Temp. MW Gebäude	30	6.OG Öffnungsgröße Türe Büro
15	9.OG Temp. Aufenthaltsraum	31	9.OG Öffnungsgröße Türe Büro
16	9.OG Temperatur Gang		

Die Temperaturen sind in °C und die Öffnungsgrößen in m<sup>2</sup> einzutragen.

Die zweite Matrix mit den CO<sub>2</sub> Produktionsdaten wird als **prod.mat** gespeichert. Sie hat eine Zeile je Messzeitpunkt und 7 Spalten:

Tab. 4: Spalten prod.mat

Spalten für die prod.mat Datei			
1	Zeit in Stunden [Dezimal]	5	CO <sub>2</sub> Produktion 2.OG Büro
2	CO <sub>2</sub> Prod. 2.OG Aufenthaltsr.	6	CO <sub>2</sub> Prod. 2.OG Aufenthaltsr.
3	CO <sub>2</sub> Produktion 2.OG Büro	7	CO <sub>2</sub> Konzentration Außen
4	CO <sub>2</sub> Prod. 2.OG Aufenthaltsr.		

Die CO<sub>2</sub> Produktionen sind in g/s und die CO<sub>2</sub>-Konzentration Außen in ppm einzutragen.

### 10.2.2 Matlab-Steuerzeichen

**% Kommentare** in Grün dargestellt.

**;** symbolisiert ein Zeilenende ohne Ausgabe.

**,** ein Zeilenende mit Ausgabe.

**...** steht für die Fortsetzung einer Zeile in der nächsten Zeile

Ein Aufruf anderer Funktionen/Dateien ist in **rot** dargestellt.

Matlab Funktionen sind in **blau** dargestellt.

## 10.2.3 Luftstrom.m

```

%Raumsteuerung
Startzeit=rem(now,1);
Ng = 3;%Anzahl der Geschosse
%Berechnungszeitraum:
sz=2;%Startzeile
ez=701;%Endzeile 701

%Eingangsdatenvariation
AF=1.1; %Faktor für Öffnungsgrößen
%Öffnungen
%1,1  1,2  1,3
Cd = [0.65 0.65 0.65 0 0 0;
      %2,1  2,2  2,3  2,4  2,5  2,6
      0.65 0.65 0.65 0.65 0.65 0.65;
      %6,1  6,2  6,3  6,4  6,5  6,6
      0.65 0.65 0.65 0.65 0.65 0.65;
      %9,1  9,2  9,3  9,4  9,5  9,6
      0.65 0.65 0.65 0.65 0.65 0.65];
% Cd dimensionslos

%1,1  1,2  1,3
Z = [19.2 33.2 53.0 0 0 0;
      %2,1  2,2  2,3  2,4  2,5  2,6
      11.3 11.3 11.3 11.3 11.3 11.3;
      %6,1  6,2  6,3  6,4  6,5  6,6
      27.1 27.1 27.1 27.1 27.1 27.1;
      %9,1  9,2  9,3  9,4  9,5  9,6
      39.3 39.3 39.3 39.3 39.3 39.3];
% Z in m

Tref = 273.15; %=0°C
pref = 101300; %Pa
%1,1  1,2  1,3  1,4
p0 = [101280 101280 101280 101280; %1
      %2,1  2,2  2,3  2,4
      101300 101300 101300 101300; %2
      %6,1  6,2  6,3  6,4
      101290 101290 101290 101290; %6
      %9,1  9,2  9,3  9,4
      101280 101280 101280 101280]; %9
Rs = 287.058; %J/kgK
g = 9.81; %m/s²

k = pref*g/Rs;

%1,1  1,2  1,3
A1 = [1.43 1.43 1.43 0 0 0;
      %2,1  2,2  2,3  2,4  2,5  2,6
      0.96 1.87 3.01 0.22 0 0.2;
      %6,1  6,2  6,3  6,4  6,5  6,6
      0.9 1.87 3.01 0.35 0 0.2;
      %9,1  9,2  9,3  9,4  9,5  9,6
      0.72 1.87 2.90 1.34 0 0];
%A in m²

RZ(sz-1)=0;

fprintf(...
'Betrachtete Zeilen: %4.0f bis %4.0f\n'...
,sz,ez)
for y = sz:ez
RZa(y)=rem(now,1);
RZaH(y)=(RZa(y))*24;
RZaM(y)=(RZaH(y)-floor(RZaH(y)))*60;
RZaS(y)=(RZaM(y)-floor(RZaM(y)))*60;

```

## Führt die Berechnung der Luftströmung durch

Zeitnehmung für die Berechnung  
Anzahl der betrachteten Geschosse

Zeilenauswahl gemäß Messdaten aus  
xlsi.mat

Faktor für Öffnungsgrößenvariation  
Definition der Öffnungen  
Strömungsbeiwerte  
Öffnungsbezeichnung nach  
Berechnungsmodell

Höhenlage der Öffnung [m]

Grad Celsius zu Grad Kelvin  
Außendruck

Startwerte für den Innendruck  
Zonen laut Grafik Berechnungsmodell

Gaskonstante  
Erdbeschleunigung

Startwerte Öffnungsgrößen

Rechenzeit Startwert

Ausgabe in Matlab, Kontrolle der Eingabe

Berechnungsschleifenanfang für die  
Messzeitpunkte  
Zeitnehmung für die Rechenzeit

<pre> fprintf(... 'Zeile %4.0f von %4.0f, %2.0f:%2.0f:%2.0f ...     letzte Rechenzeit: %4.0fs\n'... ,y-sz+1,ez-sz+1,floor(RZaH(y)),floor(RZaM(y)),RZaS(y),...     RZ(y-1)) Time(y) = xlsi(y,01); %Zeitstempel  %veränderliche Öffnungsgrößen: A1(2,4)= xlsi(y,24); A1(2,6) = xlsi(y,25); A1(2,5)= xlsi(y,29); A1(3,4)= xlsi(y,26); A1(3,6) = xlsi(y,27); A1(3,5)= xlsi(y,30); A1(4,4)= xlsi(y,28); A1(4,5) = xlsi(y,31);  A=A1*AF;  Tex = xlsi(y,02) ; %°C Außenluft     %1          2          3          4 Unterzone Tz = [xlsi(y,07) xlsi(y,13) xlsi(y,19) 0;     %Zone1     xlsi(y,06) xlsi(y,04) xlsi(y,03) xlsi(y,05);     %2 Stock     xlsi(y,12) xlsi(y,10) xlsi(y,09) xlsi(y,11);     %6 Stock     xlsi(y,18) xlsi(y,16) xlsi(y,15) xlsi(y,17)];     %9 Stock  T_ex = Tref + Tex; T = Tz + Tref; Tempex(y)=Tex; Temp(:, :, y)=Tz(:, :); rhoref = pref / (Rs*T_ex); %Luftdichte kg/m³  M = @(p)mbilanzZ5(Cd, A, rhoref, pref, p, k, Z, T_ex, T,...     Ng, Rs);  options = optimset('TolFun',1e-008,'TolX', 1e-008,...     'MaxFunEvals',1200000,'MaxIter',1000000,'Display','off',...     'Algorithm','levenberg-marquardt'); % deaktivierte Optionen: 'Display','iter',... 'trust-region-reflective' [p,fval,exitflag] = fsolve(M,p0,options); ef(y)=exitflag;  [m,dp] = mstromZ4(Cd, A, rhoref, pref, p, k, Z, T_ex, T,...     Ng, Rs); vs = vstromZ4(m, dp, pref, p, k, Z, T_ex, T, Ng, Rs);  mt(:, :, y) = m(:, :); vst(:, :, y) = vs(:, :);  B = [m(2,1) - m(1,1)    m(1,1) + m(3,1) - m(1,2)    m(1,2) +...     m(4,1) - m(1,3)    0;     m(2,2) - m(2,1)    m(2,3) + m(2,5) - m(2,2)    m(2,4) -...     m(2,3)    m(2,6) - m(2,5);     m(3,2) - m(3,1)    m(3,3) + m(3,5) - m(3,2)    m(3,4) -...     m(3,3)    m(3,6) - m(3,5);     m(4,2) - m(4,1)    m(4,3) + m(4,5) - m(4,2)    m(4,4) -...     m(4,3)    m(4,6) - m(4,5)]; Bt(:, :, y) = abs(B(:, :)); RZe(y)=rem(now,1); RZ(y)=(RZe(y)-RZa(y))*24*60*60;  end Finishzeit=rem(now,1); </pre>	<p>Fortschrittsanzeige während der Simulation und benötigte Zeit für die letzte Zeile</p> <p>Übernahme der veränderlichen Öffnungsgrößen aus den eingelesenen Messdaten</p> <p>Faktor für Eingangsdatenvariation</p> <p>Übernahme Außenlufttemperatur</p> <p>Übernahme Temperaturen in den Zonen</p> <p>Umrechnung °C in °K</p> <p>Erstellen der Temperaturmatrix Luftdichte zum Messzeitpunkt</p> <p>Definition der Massenbilanzgleichung als Funktion</p> <p>Optionen für die Iterative Berechnung</p> <p>Iterative Lösung der Massenbilanz durch Variation des Drucks in den Zonen</p> <p>Ausgabe der ermittelten Massenströme</p> <p>Berechnung der entsprechenden Volumenströme</p> <p>Erstellen der Matrix über den Messzeitraum</p> <p>Auswertung der Massenbilanz</p> <p>Berechnung der Rechenzeit</p> <p>Ende der Berechnungsschleife Zeitnehmung Gesamtrechenzeit</p>
---	---

<pre> %für Ausgabe [Btm,maxI] = max(Bt, [], 3); [Ugm1,UmI] = max(Btm); [Ugm2,UmI2] = max(Ugm1); UmI1=UmI(1,UmI2);  DauerM=(Finishzeit-Startzeit)*24*60; DauerS=((DauerM)-floor(DauerM))*60; STimeH=Time(sz); STimeM=(STimeH-floor(STimeH))*60; STimeS=((STimeM)-floor(STimeM))*60; FTimeH=Time(ez); FTimeM=(FTimeH-floor(FTimeH))*60; FTimeS=((FTimeM)-floor(FTimeM))*60; DRZ=(Finishzeit-Startzeit)*24*60*60/(ez-sz+1);  fprintf(...     'Berechnungszeit: %2.0f m %2.2f s\n'...     ,DauerM,DauerS) fprintf(...     'Druchschnittliche rechenzeit: %4.2f s\n'...     ,DRZ) fprintf(...     'maximale einzelrechenzeit: %2f s\n'...     ,max(RZ)) fprintf(...     'betrachteter Zeitraum: %2.0f:%2.0f:%2.0f bis ...     %2.0f:%2.0f:%2.0f\n \n'...     ,STimeH,STimeM,STimeS,FTimeH,FTimeM,FTimeS) disp('Massenbilanz: Maximale ungenauigkeit'),     Btm = Btm(:, :) disp('Bei Massenströmen von:'),     mtx = mt(:, :, maxI(1,2))     UTimeH=Time(maxI(UmI1,UmI2));     UTimeM=(UTimeH-floor(UTimeH))*60;     UTimeS=((UTimeM)-floor(UTimeM))*60; fprintf(...     'für Ungenauigkeit in Zone %i,%i; Zeile %d um ...     %2.0f:%2.0f:%2.0f\n',UmI1,UmI2,maxI(UmI1,UmI2), ...     floor(UTimeH),floor(UTimeM),UTimeS) UP = Btm(UmI1,UmI2)/mt(UmI1,UmI2,maxI(UmI1,UmI2))*1000; fprintf(...     'Ungenauigkeit in Promille: %4f\n'...     ,UP) </pre>	<p>Ermittlung der maximalen Abweichung von einer ausgeglichenen Massenbilanz</p> <p>Umrechnung der Zeiten in h, m, s</p> <p>Ausgabe der Berechnungszeit</p> <p>Ausgabe der durchschnittlichen Berechnungszeit</p> <p>Maximale Rechenzeit für einen Messzeitpunkt</p> <p>Betrachteter Messzeitraum</p> <p>Matrix der maximalen Abweichung</p> <p>Angabe des Massenstroms zum Zeitpunkt der Abweichung</p> <p>Angabe des Zeitpunkts und der Stelle der maximalen Ungenauigkeit</p> <p>Angabe des Fehlers in Promille</p> <p>Ende der Ausgabe</p>
---	--

## 10.2.4 mbilanzZ5.m

<pre> function M = mbilanzZ5(Cd, A, rhoref, pref, p, k, Z, T_ex, T,...     Ng, Rs) %2-3 Stöcke-Modell einfach  for v=1:Ng+1     for i=1:4         rho(v,i) = p(v,i) / (Rs*T(v,i));     end end  %mlex (1) dp(1,3) = (p(1,Ng) - k*(Z(1,3)-Z(Ng+1,1))/T(1,Ng)) - (pref -...     k*Z(1,3)/T_ex); if dp(1,3) &gt;=0     m(1,3) = Cd(1,3)*A(1,3)*sqrt(2*rho(1,Ng)*(dp(1,3))); else     m(1,3) = -Cd(1,3)*A(1,3)*sqrt(2*rhoref*(abs(dp(1,3)))); end; </pre>	<p>Funktions- und Variablendefinition</p> <p>Luftdichte in den Zonen</p> <p>Massenstrom vom Schacht nach außen Druckdifferenz</p> <p>Formeln für den Massenstrom</p>
---	--

## Aufstellung der Massenbilanz

```

%Zone 1 intern
for i = 1:2
    j = i+1;
    dp(1,i) = (p(1,i) - k*(Z(1,i)-Z(j,1))/T(1,i)) - (p(1,j) +...
        k*(Z(j+1,1)-Z(1,i))/T(1,j));
    if dp(1,i) >=0
        m(1,i) = Cd(1,i)*A(1,i)*sqrt(2*rho(1,i)*(dp(1,i)));
    else
        m(1,i) = -Cd(1,i)*A(1,i)*sqrt(2*rho(1,j)*(abs(dp(1,i))));
    end;
end

for v = 2:1+Ng
    %Massenströme in Geschoss
    i=1; %Geschoss nach Schacht
    j=v-1; %Unterzone Schacht
    x=1; %Stelle
    dp(v,x) = p(v,i) - p(1,j);
    if dp(v,x) >=0
        m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,i)*dp(v,x));
    else
        m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(1,j)*(abs(dp(v,x))));
    end;

    %Raum nach Raum
    for i = 1:2;
        j = i+1;
        x = i+1; %Stelle
        dp(v,x) = p(v,j) - p(v,i);
        if dp(v,x) >=0
            m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)*dp(v,x));
        else
            m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,i)*...
                (abs(dp(v,x))));
        end
    end
end
i=2;
j=4;
x=5;
dp(v,x) = p(v,j) - p(v,i);
if dp(v,x) >=0
    m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)*dp(v,x));
else
    m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,i)*(abs(dp(v,x))));
end

%Außen nach Raum
j=3;
x=4; %Stelle
dp(v,x) = (pref - k*Z(v,x)/T_ex) - p(v,j);
if dp(v,x) >=0
    m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rhoref*dp(v,x));
else
    m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)*(abs(dp(v,x))));
end
j=4;
x=6; %Stelle
dp(v,x) = (pref - k*Z(v,x)/T_ex) - p(v,j);
if dp(v,x) >=0
    m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rhoref*dp(v,x));
else
    m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)*(abs(dp(v,x))));
end
end

```

Massenstrom im Schacht zwischen den Stockwerken

Massenströme von den Geschossen in den Schacht

Massenstrom zwischen den Zonen in den Geschossen  
Gang zu Technikraum und Aufenthaltsraum zu Gang

Büro zu Gang

Massenstrom von Außen in die Geschosse

Fenster Gang

Fenster Büro

```

%Massenbilanz für Zonen 1, 2, 3 und 4 (außen ist Zone 0)
MA = [m(2,1) - m(1,1)    m(1,1) + m(3,1) - m(1,2)    m(1,2) +...
      m(4,1) - m(1,3)    0;
      m(2,2) - m(2,1)    m(2,3) + m(2,5) - m(2,2)    m(2,4) -...
      m(2,3)    m(2,6) - m(2,5);
      m(3,2) - m(3,1)    m(3,3) + m(3,5) - m(3,2)    m(3,4) -...
      m(3,3)    m(3,6) - m(3,5);
      m(4,2) - m(4,1)    m(4,3) + m(4,5) - m(4,2)    m(4,4) -...
      m(4,3)    m(4,6) - m(4,5)];

if A(2,5) < 0.1,
    MA(2,2) = m(2,3) - m(2,2);
    MA(2,4) = 0;
end
if A(3,5) < 0.1,
    MA(3,2) = m(3,3) - m(3,2);
    MA(3,4) = 0;
end
if A(4,5) < 0.1,
    MA(4,2) = m(4,3) - m(4,2);
    MA(4,4) = 0;
end
M=MA;

```

Aufstellung der Massenbilanzmatrix

Nullsetzen der Massenströme durch geschlossene Türen

## 10.2.5 mstromZ4.m

```

function [m,dp] = mstromZ4(Cd, A, rhoref, pref, p, k, Z,...
    T_ex, T, Ng, Rs)
%2-3 Stöcke-Modell einfach

for v=1:Ng+1
    for i=1:4
        rho(v,i) = p(v,i) / (Rs*T(v,i));
    end
end

%mlex (1)
dp(1,3) = (p(1,Ng) - k*(Z(1,3)-Z(Ng+1,1))/T(1,Ng)) - (pref...
    k*Z(1,3)/T_ex);
if dp(1,3) >=0
    m(1,3) = Cd(1,3)*A(1,3)*sqrt(2*rho(1,Ng)*(dp(1,3)));
else
    m(1,3) = -Cd(1,3)*A(1,3)*sqrt(2*rhoref*(abs(dp(1,3))));
end;

%Zone 1 intern
for i = 1:2
    j = i+1;
    dp(1,i) = (p(1,i) - k*(Z(1,i)-Z(j,1))/T(1,i)) - (p(1,j) +
        k*(Z(j+1,1)-Z(1,i))/T(1,j));
    if dp(1,i) >=0
        m(1,i) = Cd(1,i)*A(1,i)*sqrt(2*rho(1,i)*(dp(1,i)));
    else
        m(1,i) = -Cd(1,i)*A(1,i)*sqrt(2*rho(1,j)*(abs(dp(1,i))));
    end;
end

```

## Auswertung der Massenbilanz

Funktions- und Variablendefinition

Massenstromberechnung wie in der Aufstellung der Massenbilanz

```

for v = 2:1+Ng
    %Massenströme in Geschoss
    i=1; %Geschoss nach Schacht
    j=v-1; %Unterzone Schacht
    x=1; %Stelle
    dp(v,x) = p(v,i) - p(1,j);
    if dp(v,x) >=0
        m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,i)*dp(v,x));
    else
        m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(1,j)*(abs(dp(v,x))));
    end;

    %Raum nach Raum
    for i = 1:2;
        j = i+1;
        x = i+1; %Stelle
        dp(v,x) = p(v,j) - p(v,i);
        if dp(v,x) >=0
            m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)*dp(v,x));
        else
            m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,i)*...
                (abs(dp(v,x))));
        end
    end
    i=2;
    j=4;
    x=5;
    dp(v,x) = p(v,j) - p(v,i);
    if dp(v,x) >=0
        m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)* dp(v,x));
    else
        m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,i)*...
            (abs(dp(v,x))));
    end

    %Außen nach Raum
    j=3;
    x=4; %Stelle
    dp(v,x) = (pref - k*Z(v,x)/T_ex) - p(v,j);
    if dp(v,x) >=0
        m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rhoref*dp(v,x));
    else
        m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)*(abs(dp(v,x))));
    end
    j=4;
    x=6; %Stelle
    dp(v,x) = (pref - k*Z(v,x)/T_ex) - p(v,j);
    if dp(v,x) >=0
        m(v,x) = Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rhoref*dp(v,x));
    else
        m(v,x) = -Cd(v,x)*A(v,x)*sqrt(2*rho(v,j)*(abs(dp(v,x))));
    end
end
end

```

## 10.2.6 vstromZ4.m

```
function vs = vstromZ4(m, dp, pref, p, k, Z, T_ex, T, Ng, Rs)
%2-3 Stöcke-Modell einfach

%mlcx (1)
if dp(1,1) >=0
    vs(1,3) = m(1,3) / ((p(1,3) - k * (Z(1,3) - ...
        Z(4,1)) / T(1,3)) / (Rs * T(1,3))) * 3600;
else
    vs(1,3) = m(1,3) / ((pref - k * Z(1,3) / T_ex) / (Rs * T_ex)) * 3600;
end;
%Zone 1 intern
for x = 1:2
    v = 1;
    j = x+1;
    if dp(v,x) >=0
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,x) / (Rs * T(v,x))) * 3600;
    else
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,j) / (Rs * T(v,j))) * 3600;
    end
end
for v = 2:1+Ng
    %Massenströme in Geschoss
    i=1; %Geschoss nach Schacht
    j=v-1; %Unterzone Schacht
    x=1; %Stelle
    if dp(v,x) >=0
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,i) / (Rs * T(v,i))) * 3600;
    else
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(1,j) / (Rs * T(1,j))) * 3600;
    end
    %Raum nach Raum
    for i = 1:2;
        j = i+1;
        x = i+1; %Stelle
        if dp(v,x) >=0
            vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,j) / (Rs * T(v,j))) * 3600;
        else
            vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,i) / (Rs * T(v,i))) * 3600;
        end
    end
    i = 2;
    j = 4;
    x = 5; %Stelle
    if dp(v,x) >=0
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,j) / (Rs * T(v,j))) * 3600;
    else
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,i) / (Rs * T(v,i))) * 3600;
    end

    %Zone Außen nach Raum
    j=3;
    x=4; %Stelle
    if dp(v,x) >=0
        vs(v,x) = m(v,x) / ((pref - k * Z(v,x) / T_ex) / (Rs * T_ex)) * 3600;
    else
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,j) / (Rs * T(v,j))) * 3600;
    end
    j=4;
    x=6; %Stelle
    if dp(v,x) >=0
        vs(v,x) = m(v,x) / ((pref - k * Z(v,x) / T_ex) / (Rs * T_ex)) * 3600;
    else
        vs(v,x) = m(v,x) / (p(v,j) / (Rs * T(v,j))) * 3600;
    end
end
end
```

## Berechnung der Volumenströme

Funktions- und Variablendefinition

Volumenstrom vom Schacht nach Außen  
Stromrichtung  
Volumenstromformel

Volumenströme im Schacht

Volumenstrom vom Geschoss in den  
Schacht

Volumenströme zwischen den Zonen

Gang zu Technikraum und Aufenthaltsraum  
zu Gang

Büro zu Gang

Volumenstrom von Außen in die Geschosse

Fenster Gang

Fenster Büro

## 10.2.7 co2con.m

```

%CO2 Konzentration
%Umrechnung ppm->g/m³
ppm=1.965/1000;
%Wertübernahme
j=1;
for i=sz:ez
    th(j)=prod(i,1);
    ts(j)=prod(i,1)*3600;
    prodc(2,3,j)=prod(i,2);
    prodc(2,4,j)=prod(i,3);
    prodc(3,3,j)=prod(i,4);
    prodc(3,4,j)=prod(i,5);
    prodc(4,3,j)=prod(i,6);
    cex(j)=prod(i,7)*ppm;
    j=j+1;
end
for i=2:ez-sz+1
    dt(i)=ts(i)-ts(i-1);
end
%Raumvolumen m³
RV = [58.58    58.58    83.50        0; %Zone1
      62.33    231.09   37.26    166.54;%2 Stock
      62.33    231.09   37.26    165.85;%6 Stock
      62.33    231.09   37.26    165.85];%9 Stock

%Startwert CO2 Konzentration im Raum
C(1:4,1:4,1)=500*ppm;
C1(1:4,1)=C(1:4,1,1)/ppm;
C2(1:4,1)=C(1:4,2,1)/ppm;
C3(1:4,1)=C(1:4,3,1)/ppm;
C4(1:4,1)=C(1:4,4,1)/ppm;
%Geschosse:
for i=2:ez-sz+1
    for v=2:3
        C(v,3,i)=(C(v,3,i-1)+prodc(v,3,i)*dt(i)/...
            RV(v,3)+vst(v,4,i)/3600*cex(i)*dt(i)/RV(v,3))/...
            (1+vst(v,3,i)/3600*dt(i)/RV(v,3));
        C3(v,i)=C(v,3,i)/ppm;
        C(v,4,i)=(C(v,4,i-1)+prodc(v,4,i)*dt(i)/...
            RV(v,4)+vst(v,6,i)/3600*cex(i)*dt(i)/RV(v,4))/...
            (1+vst(v,5,i)/3600*dt(i)/RV(v,4));
        C4(v,i)=C(v,4,i)/ppm;
        C(v,2,i)=(C(v,2,i-1)+vst(v,3,i)/3600*(C(v,3,i)*dt(i)/...
            RV(v,2))+vst(v,5,i)/3600*(C(v,4,i)*dt(i)/RV(v,2)))/...
            (1+vst(v,2,i)/3600*dt(i)/RV(v,2));
        C2(v,i)=C(v,2,i)/ppm;
        C(v,1,i)=(C(v,1,i-1)+vst(v,2,i)/3600*(C(v,2,i)*dt(i)/...
            RV(v,1)))/(1+vst(v,1,i)/3600*dt(i)/RV(v,1));
        C1(v,i)=C(v,1,i)/ppm;
    end
    v=4;
    C(v,3,i)=(C(v,3,i-1)+...
        prodc(v,3,i)*dt(i)/RV(v,3)+vst(v,4,i)/3600*...
        cex(i)*dt(i)/RV(v,3))/(1+vst(v,3,i)/3600*dt(i)/RV(v,3));
    C3(v,i)=C(v,3,i)/ppm;
    C(v,4,i)=(C(v,4,i-1)+vst(v,6,i)/3600*cex(i)*...
        dt(i)/RV(v,4))/(1+vst(v,5,i)/3600*dt(i)/RV(v,4));
    C4(v,i)=C(v,4,i)/ppm;
    C(v,2,i)=(C(v,2,i-1)+vst(v,3,i)/3600*(C(v,3,i)*dt(i)/...
        RV(v,2))+vst(v,5,i)/3600*(C(v,4,i)*dt(i)/RV(v,2)))/...
        (1+vst(v,2,i)/3600*dt(i)/RV(v,2));
    C2(v,i)=C(v,2,i)/ppm;
    C(v,1,i)=(C(v,1,i-1)+vst(v,2,i)/3600*(C(v,2,i)*dt(i)/...
        RV(v,1)))/(1+vst(v,1,i)/3600*dt(i)/RV(v,1));
    C1(v,i)=C(v,1,i)/ppm;
end

```

## Berechnung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Umrechnung ppm in g/m<sup>3</sup>

Umrechnung Zeit

Übernahme der Produktionsdaten

Umrechnung der Außenkonzentration

Zeitberechnung zwischen den  
Messzeitpunkten

Eingabe der Raumvolumen in den  
Produktionsräumen

Berechnung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen  
Geschoss 2 und 6

Geschoss 9

```

v=1;%Schacht
C(v,1,i)=(C(v,1,i-1)+vst(2,1,i)/3600*(C(2,1,i)*dt(i)/...
RV(v,1)))/(1+vst(v,1,i)/3600*dt(i)/RV(v,1));
Cs(1,i)=C(1,1,i)/ppm;
C(v,2,i)=(C(v,2,i-1)+vst(v,1,i)/3600*(C(v,1,i)*dt(i)/...
RV(v,2))+vst(3,1,i)/3600*(C(3,1,i)*dt(i)/RV(v,2)))/...
(1+vst(v,2,i)/3600*dt(i)/RV(v,2));
Cs(2,i)=C(1,2,i)/ppm;
C(v,3,i)=(C(v,3,i-1)+vst(v,2,i)/3600*(C(v,2,i)*dt(i)/...
RV(v,3))+vst(4,1,i)/3600*(C(4,1,i)*dt(i)/RV(v,3)))/...
(1+vst(v,3,i)/3600*dt(i)/RV(v,3));
Cs(3,i)=C(1,3,i)/ppm;

end
plot(th(:),C3(2,:),th(:),C4(2,:),th(:),C1(2,:))

```

Schacht

Ausgabe ausgewählter CO<sub>2</sub>-  
Konzentrationsverläufe

## 10.2.8 excelausgabe.m

```

%Excel Ausgabe
for i=sz:ez-1
j=i+1;
xlsaus(i,1)=th(i);
n=2;
%CO2-Konzentration in der Zone in ppm
for v=1:4
for x=1:4
xlsaus(i,n)=C(v,x,i)/ppm;
n=n+1;
end
end
%Volumenstrom in der Öffnung in m3/h
for v=1:4
for x=1:6
xlsaus(i,n)=vst(v,x,j);
n=n+1;
end
end
%Massenstrom in der Öffnung in kg/h
for v=1:4
for x=1:6
xlsaus(i,n)=mt(v,x,j)*3600;
n=n+1;
end
end
%Temperatur in der Zone in °C
xlsaus(i,n)=Tempex(j);
n=n+1;
for v=1:4
for x=1:4
xlsaus(i,n)=Temp(v,x,j);
n=n+1;
end
end
for v=2:4
for x=3:4
xlsaus(i,n)=prodc(v,x,i);
n=n+1;
end
end
end
end

```

## Zusammenfassen der Rechenergebnisse für Excel

Schleife über den Messzeitraum  
1. Spalte  
Zeit in Stunden dezimal2. bis 17. Spalte  
CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Zonen18. bis 41. Spalte  
Volumenströme in den Öffnungen42. bis 65. Spalte  
Massenströme in den Öffnungen66. bis 81. Spalte  
Temperaturen in den Zonen82. bis 87. Spalte  
CO<sub>2</sub>-Produktion in den Zonen

## 10.3 Ausgabe der Ergebnisse

Die Ausgabe und Erstellung von Ergebnisdiagrammen erfolgt durch Einlesen und Weiterbearbeiten der `xlsaus.mat` Matrix in Excel

**11 Anhang 2: Berechnungsmodell zum Ausklappen**

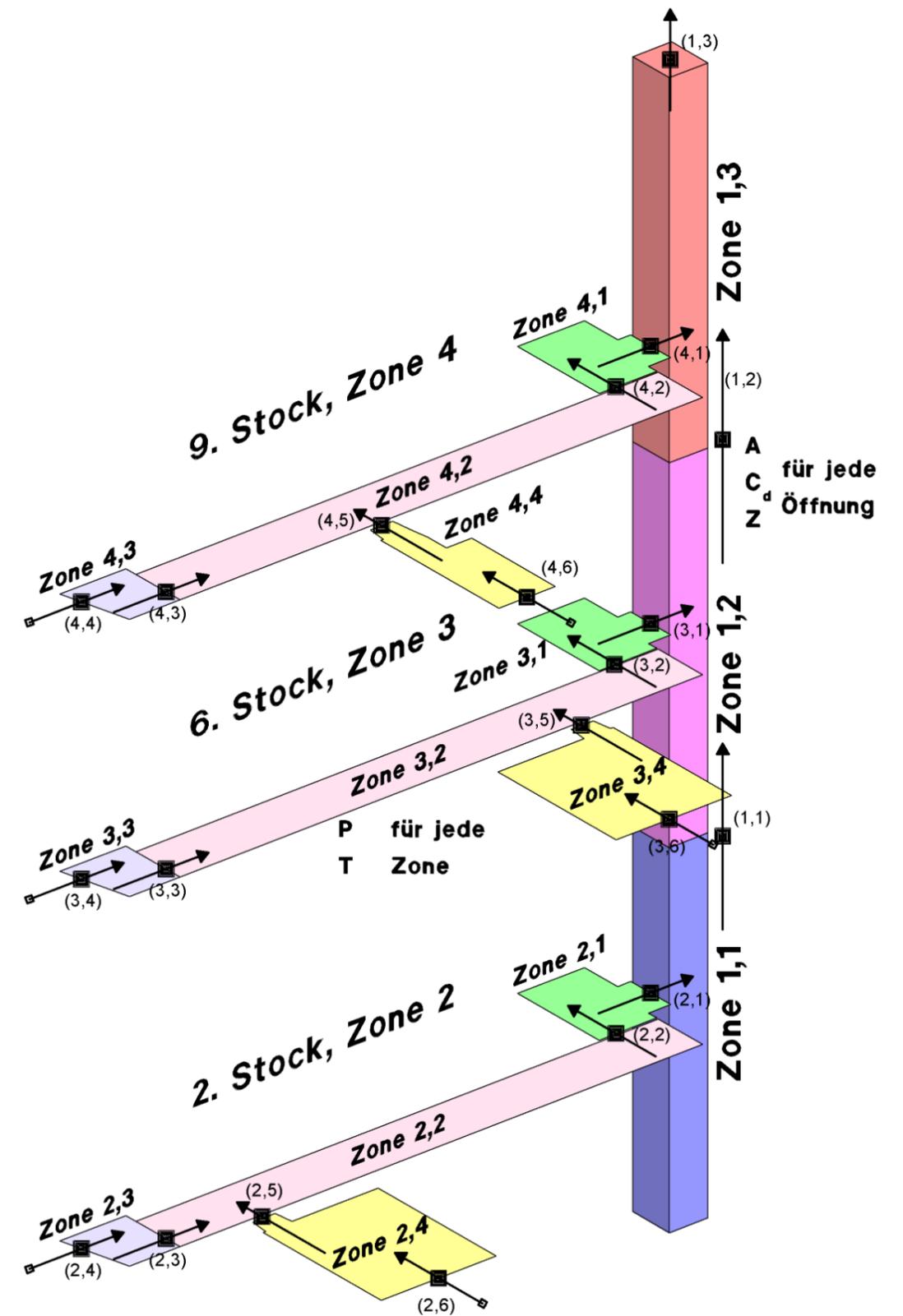


Abb. 11.1 Berechnungsmodell zum Ausklappen

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] H. Konder und T. Bednar, „Estimation of Airflow rates in large buildings based on measurements,“ Kopenhagen, 2008.
- [2] M. v. Roosmalen, „Sustainable Systems & Design,“ 2009. [Online]. Available: [www.ics.ele.tue.nl/~akash/maartje/getSystemDetail.php?ID=139](http://www.ics.ele.tue.nl/~akash/maartje/getSystemDetail.php?ID=139).
- [3] H. Awbi, „Ventilation,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews 2, pp. 157-188, 1998.
- [4] G. P. Werner Nachtigal, *Bau-Bionik*, Saarbrücken: Springer, 2012.
- [5] G. J. Levermore, *Building Energy Management Systems: Applications to Low-energy HVAC and Natural Ventilation Control*, E & FN Spon, 2000, p. 15.
- [6] H. Awbi, „AIR MOVEMENT IN NATURALLY-VENTILATED BUILDINGS,“ Department of Construction Management & Engineerien, The University of Reading, Reading RG6 6AW, UK, 1996.
- [7] Air Infiltration and Ventilation Centre, *Fundamentals of the Multizone Air Flow Model - COMIS*, University of Warwick Science Park, Barklays Venture Centre, Sir William Lyons Road, Coventry CV4 7EZ, Great Britain: International Energy Agency, 1990.
- [8] „Stadtplan Wien,“ 2012. [Online]. Available: [www.wien.gv.at/Stadtplan](http://www.wien.gv.at/Stadtplan). [Zugriff am 28 04 2012].
- [9] „Gebäude und Technik TU-Wien,“ 2012. [Online]. Available: <http://www.gut.tuwien.ac.at/index.php?id=8312>. [Zugriff am 28 04 2012].
- [10] Austrian Standards Institute, *ÖNORM B 8110-6: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf*, Austrian Standards Institute, 2010.
- [11] U. E. Tobias Schulze, „Controlled natural ventilation for energy efficient buildings,“ Energy and Buildings, pp. 221-232, 18 Juli 2012.
- [12] Austrian Standards Institute, *ÖNORM EN ISO 12569: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden - Indikatorgasverfahren*, Austrian Standards Institute, 2013.
- [13] H. Konder, „Zwischenbericht über die Messungen des Luftvolumenstroms im Objekt BA der TU-Wien am Getreidemarkt,“ 2011.
- [14] The MathWorks, Inc, „MATLAB and Simulink for Technical Computing - MathWorks Deutschland,“ The MathWorks, Inc, 1994-2015. [Online]. Available: <http://de.mathworks.com>. [Zugriff am 27 September 2015].
- [15] Österreichisches Institut für Bautechnik, *OIB-Richtlinie 6*, OIB, 2011.
- [16] Österreichisches Institut für Bautechnik, *OIB-Richtlinie 6 – Erläuternde Bemerkungen*, OIB, 2011.

- 
- [17] *Austrian Standards Institute, ÖNORM B 8110-5: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile, Austrian Standards Institute, 2011.*
- [18] *Austrian Standards Institute, ÖNORM B 8110-3: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung, Austrian Standards Institute, 2012.*
- [19] *Austrian Standards Institute, ÖNORM EN ISO 13791: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren, Austrian Standards Institute, 2012.*