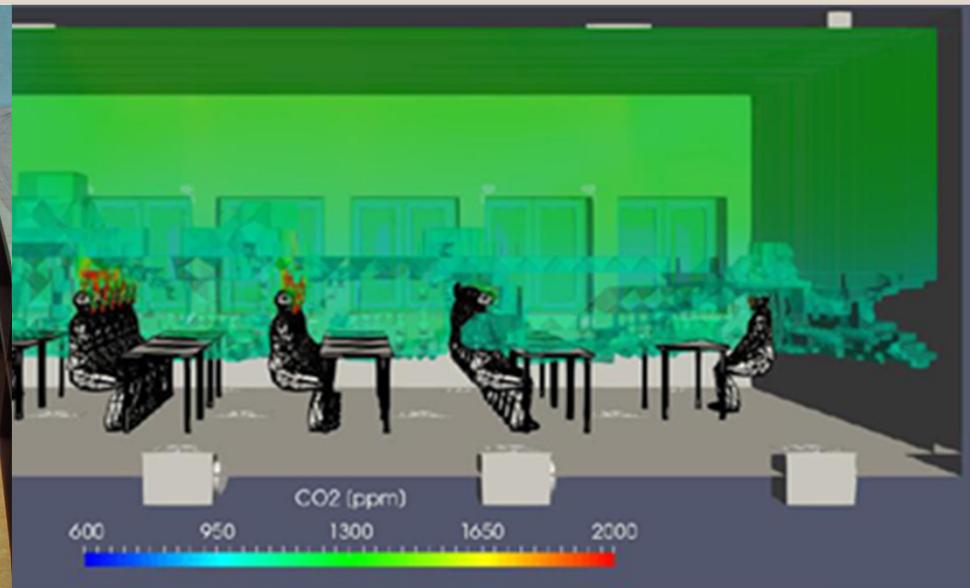


Messung der Raumluftqualität in Schulen 2016/2017 - Ergebnisse

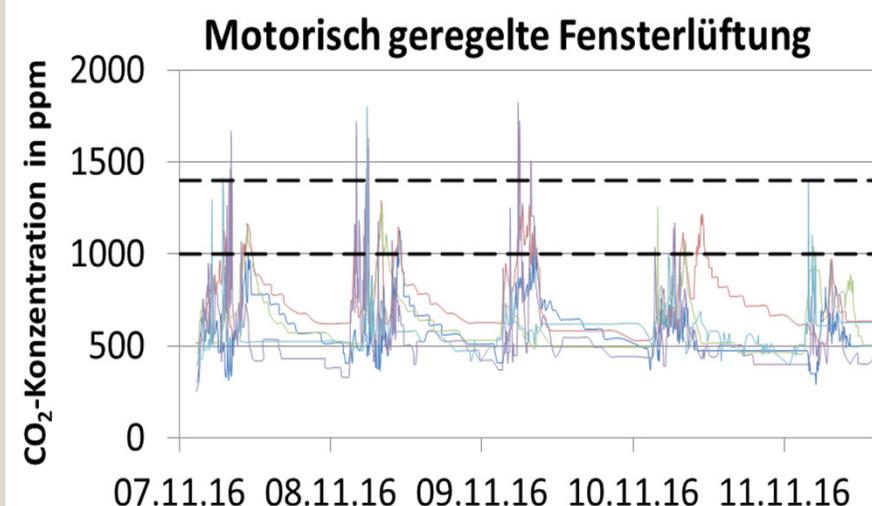
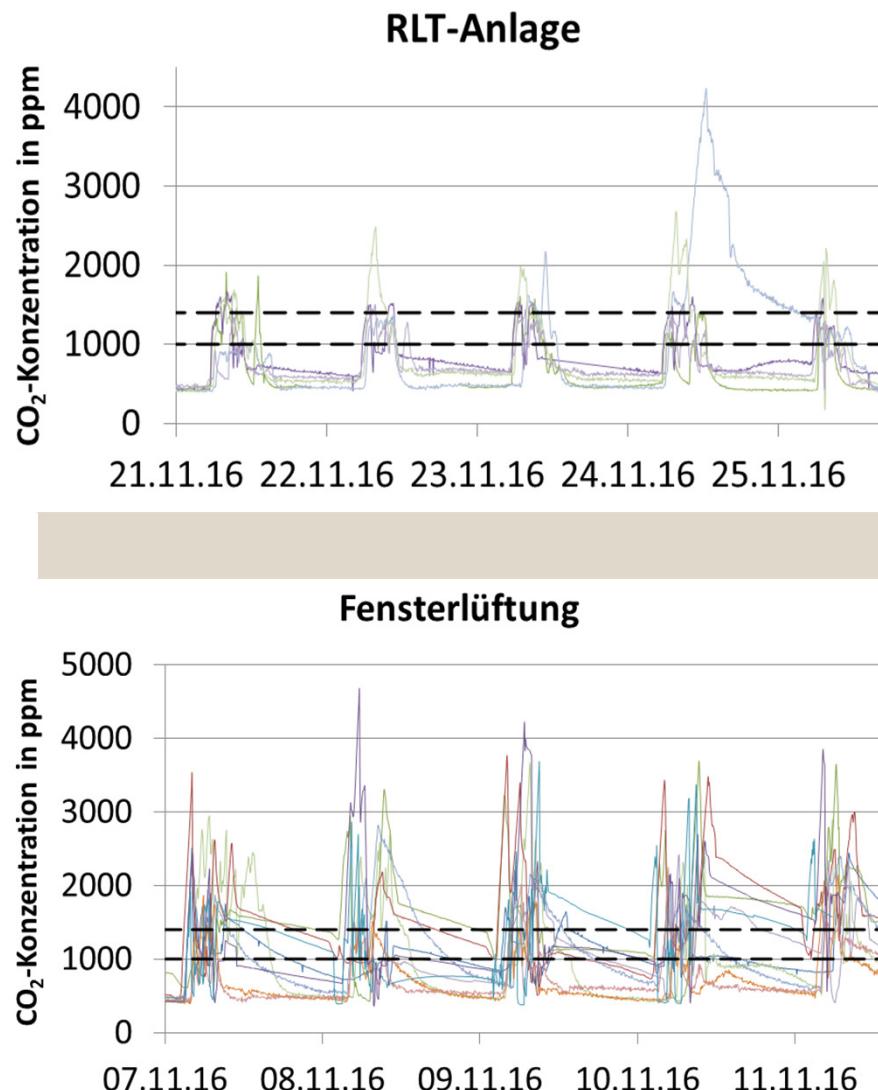
Eva Anlauf, Stadt Nürnberg, Hochbauamt/Kommunales Energiemanagement und Bauphysik
Dirk Schwede, Universität Stuttgart, ehemals Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren



- Messungen in 7 Städten
- in insgesamt 35 Unterrichtsräumen
- darunter: 12 Räume mit RLT-Anlage, idR. mit unterstützender Fensterlüftung in den Pausen
5 Räume mit motorischer Fenstersteuerung
18 Räume mit reiner Fensterlüftung (darunter 1 Raum mit Lüftungssampel)
- teilweise unterschiedliche Messzeiträume
- unterschiedlich gute Dokumentation der Daten und Randbedingungen
- Auswertungen mit dem gleicher gleichen Datengrundlage an Universität Stuttgart und Stadt Nürnberg/Hochbauamt
- Grundlage war Entwurf UBA-Lüftungsleitfaden für Bildungsgebäude mit Stand Juni 2017:
CO₂: Mittelwert je Unterrichtseinheit: 1.000 ppm, max. 1.400 ppm
rH: 30 bis 60%, mind. 20/25%

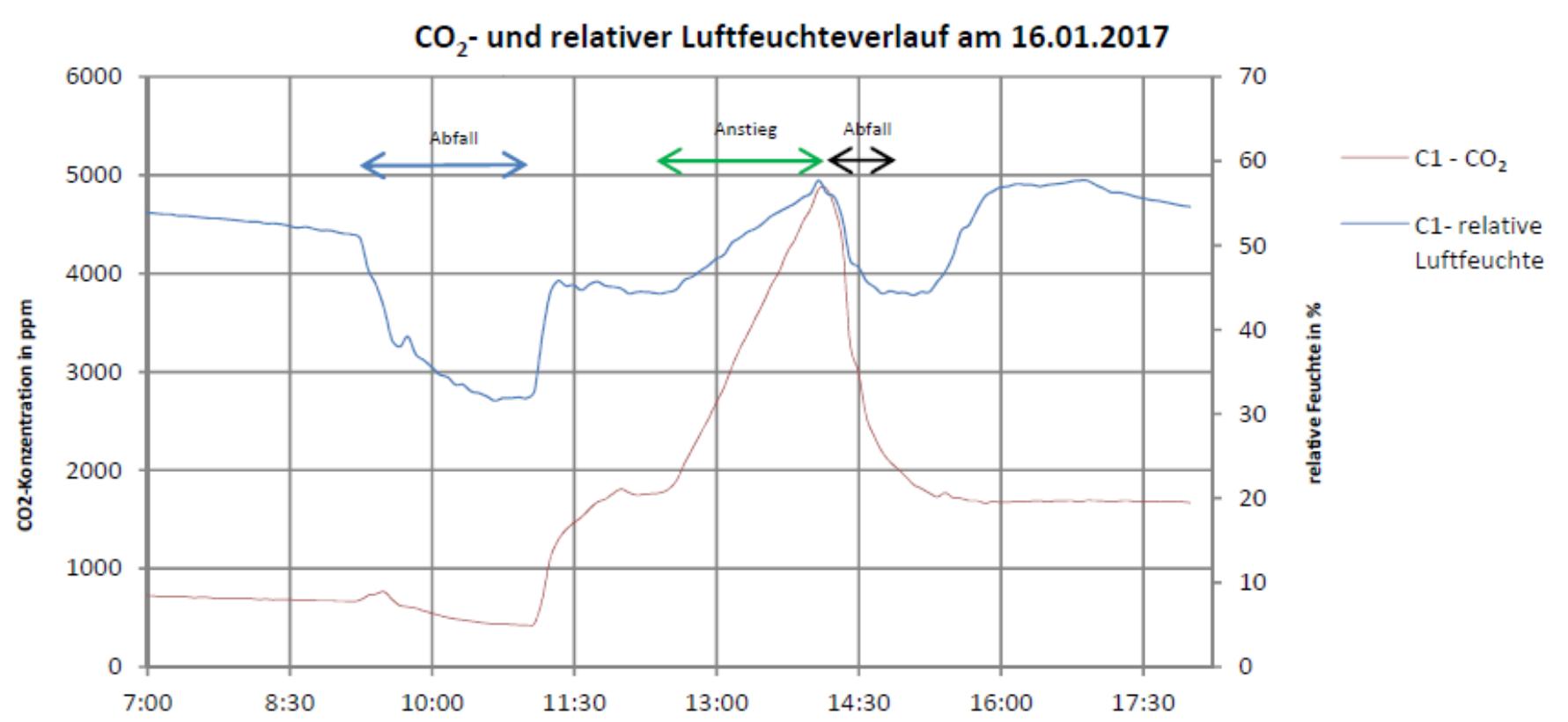
	Fenster-lüftung	Fensterlüftung unterstützt durch Lüftungssampel	Motorisch geregelte Fensterlüftung	RLT-Anlagen	Messzeiträume
Nürnberg (N)		1		2	Oktober 2016 bis Februar 2017
Wuppertal (W)	10			3	Oft nur eine zweiwöchige Messung Oktober 2016 bis Februar 2017
Köln (K)				2	Dezember 2016 und Januar 2017
Karlsruhe (KA)	1		5	3	Oktober 2016 bis Februar 2017
Frankfurt (F)	3			2	Oktober 2016 bis Februar 2017
Chemnitz (C)	2				Oktober 2016 bis Februar 2017
Heidelberg (HD)	1				Oktober 2016 bis Februar 2017
Gesamt	17	1	5	12	

Messergebnisse – CO₂-Konzentration



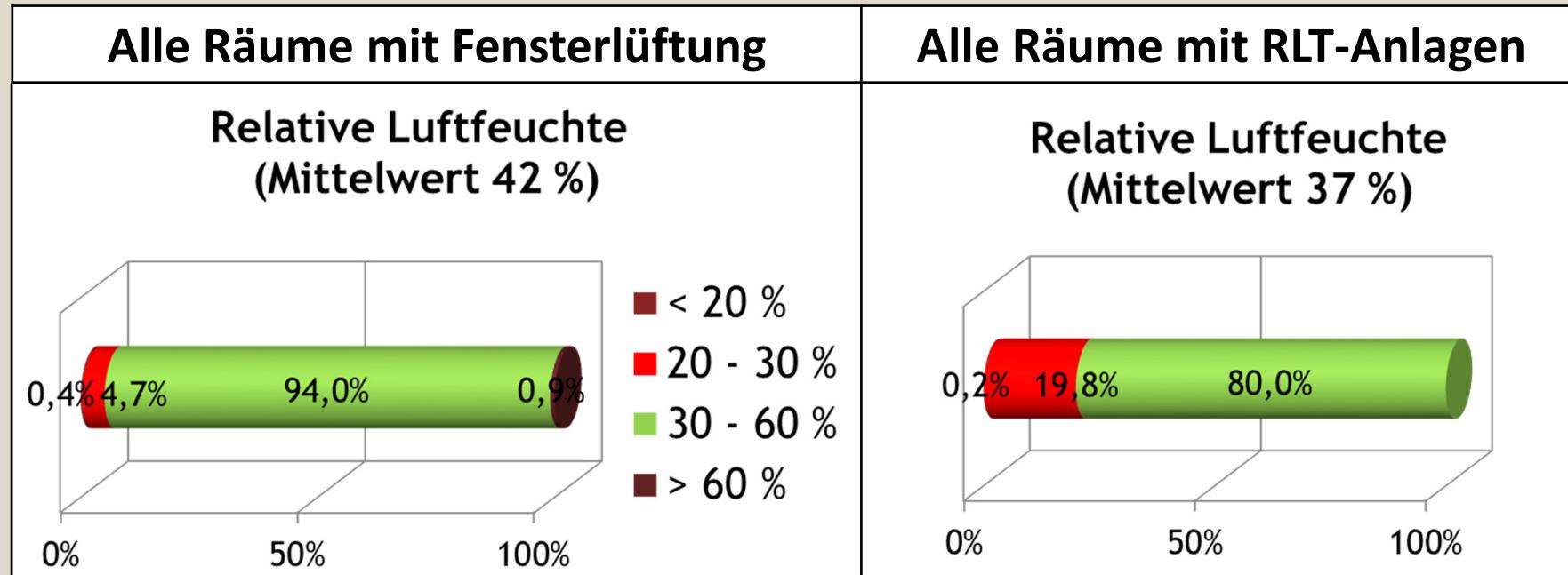
- niedrig bei RLT-Anlage und motorisch geregelte Fensterlüftung
- hoch bei Fensterlüftung

Zusammenhang CO₂-Konzentr. und relative Luftfeuchte



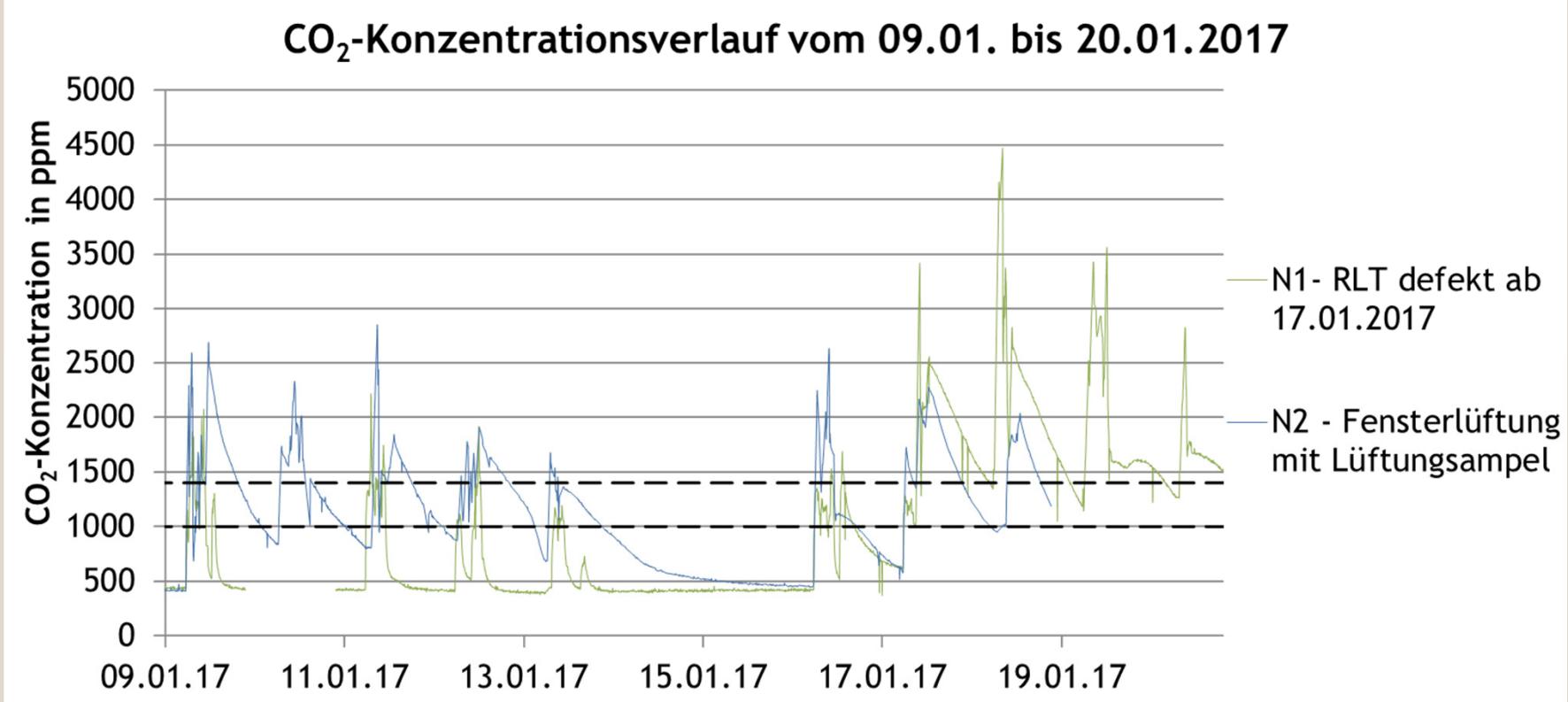
- gleichzeitiger Anstieg und Abstieg
- bei hoher CO₂-Konzentration hohe relative Luftfeuchte

Vergleich rel. Feuchte bei verschiedenen Belüftungsarten



- rH bei RLT-Anlagen häufiger kritisch
- RLT-Anlagen meist mit höherem Luftwechsel

Vergleich Lüftungsampel u. RLT-Anlage /teilweise defekt



- veränderte Wahrnehmung im Raum mit RLT
- sensibilisiertes Empfinden im Raum mit Lüftungsampel

Einfluss des Alters auf die CO₂-Konzentration



Schulart Raum	Raumvolumen pro Person	Anstieg der CO₂-Konzentration in ppm/min (Im Bereich von 500 ppm auf 1400 ppm)
Grundschule	10 m ³	18,4 ppm/min
Gymnasium	10,9 m ³	33,9 ppm/min

- deutlich schnellerer Anstieg bei Gymnasium
- Alter besitzt großen Einfluss

RLT-Anlagen mit und ohne zusätzliche Fensterlüftung



Lüftungsart	Personen-anzahl	Raum-volumen	Außenluftvolu- men- strom der RLT	CO ₂ -Stundenmittelwerte
Zentrale Lüftungsanlage Ohne Fensterlüftung	23	9,3 [m ³ /Person]	23,5 [m ³ /h]	<p>CO₂-Stundenmittelwerte - F1 (Mittelwert 1464 ppm)</p> <p>< 1000 ppm 1000 - 1400 ppm 1400 - 2000 ppm > 2000 ppm</p>
Zentrale Lüftungsanlage + Fensterlüftung	23	8,6 [m ³ /Person]	23,5 [m ³ /h]	<p>CO₂-Stundenmittelwerte - F2 (Mittelwert 953 ppm)</p> <p>< 1000 ppm 1000 - 1400 ppm 1400 - 2000 ppm</p>

→ hybride Lüftung wirkt sich positiv aus

Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten

ILEK

MASTERARBEIT

23 | 2017

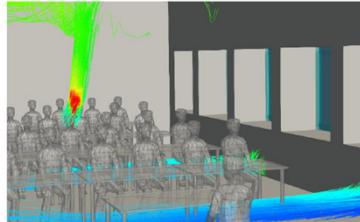
Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten

Bearbeiter: Jakob Rosin, B.Sc.

Betreuer: Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk Schwede, PhD

Prüfer: Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk Schwede, PhD

08 2017



University Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novak
Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD

Das Ziel dieser Arbeit ist es, vorhandene Messdaten zur Raumluftqualität (Zeitreihen zu CO₂-Gehalt, Lufttemperatur, Luftfeuchte) darzustellen und auszuwerten.

Dabei sollen die Daten hinsichtlich der Lüftungseffektivität, der verschiedenen Lüftungskonzepte, der Raumgestaltung, der installierten Lüftungstechnik, sowie der Nutzung eingeordnet werden.

In einem darauf aufbauenden Teil der Arbeit sollen zu den betrachteten Fällen Modellrechnungen mit einfachen Ansätzen (EXCEL Werkzeug) durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Rechnungen sollen mit den Messdaten verglichen werden und Hinweise zur Verbesserung des einfachen Rechenansatzes abgeleitet werden.

Jakob Rosin, M.Sc.

am
Institut für Leichtbau
Entwerfen und Konstruieren (ILEK)
Universität Stuttgart

Vergleich der Messung mit der einfachen Modellierung

Die Berechnung wird mit dem Excel-Simulationsprogramm „CO₂-Konzentration in Schulen Version 2.2 des Innenraum Mess- und Beratungsservice“ durchgeführt:

The screenshot shows a complex Excel spreadsheet with many tabs and formulas. The visible tabs include 'AutoSave', 'File', 'Home', 'Insert', 'Page Layout', 'Formulas', 'Data', 'Review', 'View', 'Help', 'Soda PDF Creator', and 'Tell me what you want to do'. The main content area is filled with data tables and formulas. Key sections include:

- Eingabeparameter:** Contains input values like 'Fläche des Klassenzimmers [m²]' (62.50) and 'Höhe des Klassenzimmers [m]' (3).
- Umweltparameter:** Contains values for 'Betrachtungszeit Anfang' (09.09.2015) and 'Betrachtungszeit Ende' (09.05.2016).
- Modellparameter:** Contains values for 'CO2-Ausluftkonzentration' (400 ppm), 'CO2-Emissionsrate Kind (6 a)' (10000 m³/h), and 'CO2-Emissionsrate Erwachsener' (18000 m³/h).
- Abgeleitete Werte:** Contains tables for 'Raumvolumen' (187.50 m³), 'CO2-Emissionsrate pro Kind' (16800 m³/h), 'CO2-Emissionsrate pro Erwachsene' (25200 m³/h), 'resultierende CO2-Emissionsrate im Raum' (443200 m³/h), 'Theoretische Sättigungskonz. ohne AL' (11872 ppm), and 'Startkonzentration' (500 ppm).
- Luftrreinigungsgeräte - Rückgewinnung:** Contains a table with columns for 'Somme Winter' and 'Somme Sommer'.

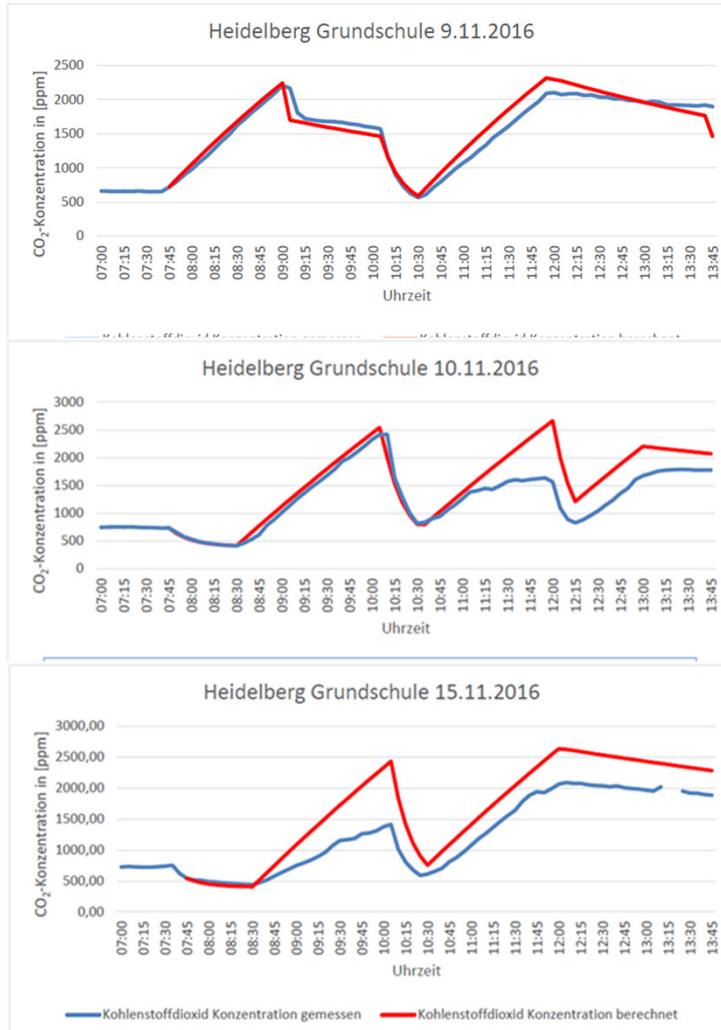


Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie. (2017a), CO₂-Rechner für Klassenräume, online verfügbar unter: raumluft.linux47.webhome.at/fileadmin/dokumente/co2_schulen.xls

Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

Vergleich der Messung mit der einfachen Modellierung

Grundschule Heidelberg, Fensterlüftung



Wie den Abbildungen entnommen werden kann, eignet sich die Berechnung mit dem einfachen Excel-Tool durchaus dazu, den CO₂-Gehalt in Räumen mit sowohl manueller als auch mit maschineller Lüftung abzuschätzen.

Die Qualität der Berechnungen variiert allerdings je nach der **Genauigkeit der Protokollierung**.

Die Abweichung könnte entweder durch ein gekipptes Fenster, eine geöffnete Tür oder durch die Abwesenheit einiger Schüler bzw. die Anwesenheit zusätzlicher Schüler erklärt werden.

Bauweise:

Lüftungsart:

Rahmenbedingungen:

NGF:

Höhe Klassenraum:

Raumvolumen:

Schüler:

2007, saniert

manuelle Fensterlüftung

2 Fenster, Maße: B x H = 1,1 m²

65,3 m²

ca. 3,3 m

215,49 m²

2. Klasse

Annahmen für die Berechnung mit dem Excel-Tool

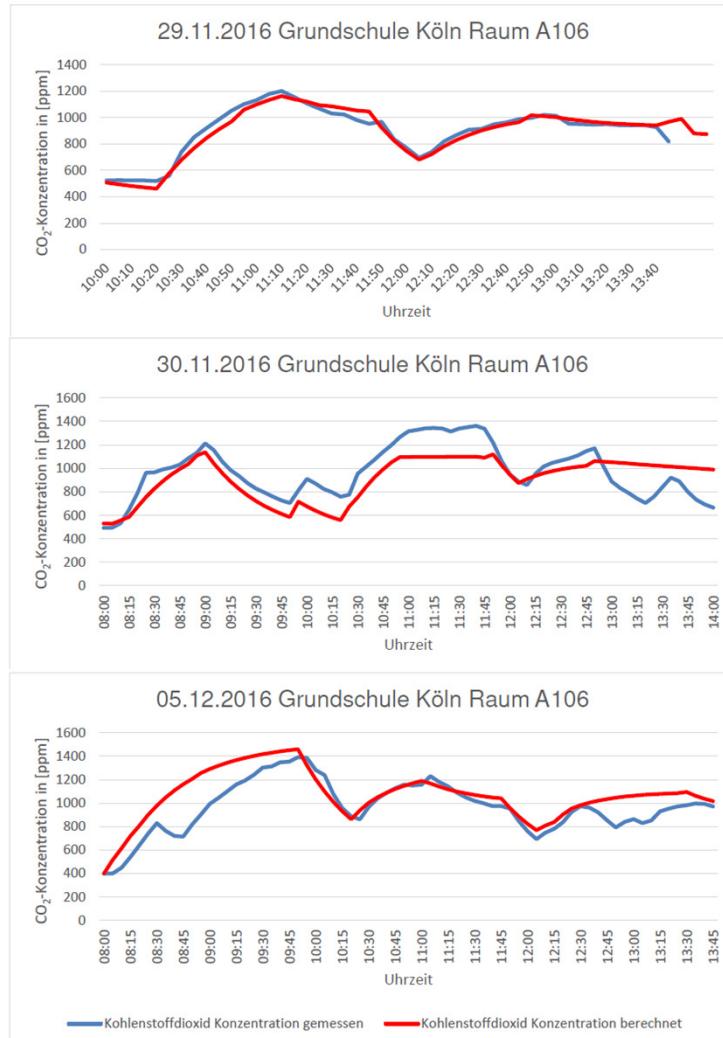
Außenlufttemperatur: 4,3 [°C]

Luftwechsel durch 1 geöffnetes Fenster: 2,1 [1/h]

Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

Vergleich der Messung mit der einfachen Modellierung

Grundschule Köln Raum A106, maschinelle Lüftung



Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

Wie den Abbildungen entnommen werden kann, eignet sich die Berechnung mit dem einfachen Excel-Tool durchaus dazu, den CO₂-Gehalt in Räumen mit sowohl manueller als auch mit maschineller Lüftung abzuschätzen.

Die Qualität der Berechnungen variiert allerdings je nach der **Genauigkeit der Protokollierung**.

Die Abweichung könnte entweder durch ein gekipptes Fenster, eine geöffnete Tür oder durch die Abwesenheit einiger Schüler bzw. die Anwesenheit zusätzlicher Schüler erklärt werden.

Bauweise:

Lüftungsart:

Rahmenbedingungen:

NGF:

Höhe Klassenraum:

Raumvolumen:

Schüler:

Neubau Passivbauweise

maschinelle Lüftung, Fensterlüftung möglich
2 Fenster, Maße: B x H = 108,5cm x 154cm,
Lüftungsquerschnitt bei Kipplüftung 8 cm

66,6 m²

3,4 m

226,44 m²

4. Klasse

Annahmen für die Berechnung mit dem Excel-Tool

Außenlufttemperatur: 2,1 [°C]
Luftwechsel durch gekipptes Fenster: 0,42 [1/h]
Lüftungsanlage 226,44 m³ / 377 m³/h: 1,66 [1/h]

Empfehlungen zur Protokollierung von Lüftungsereignissen

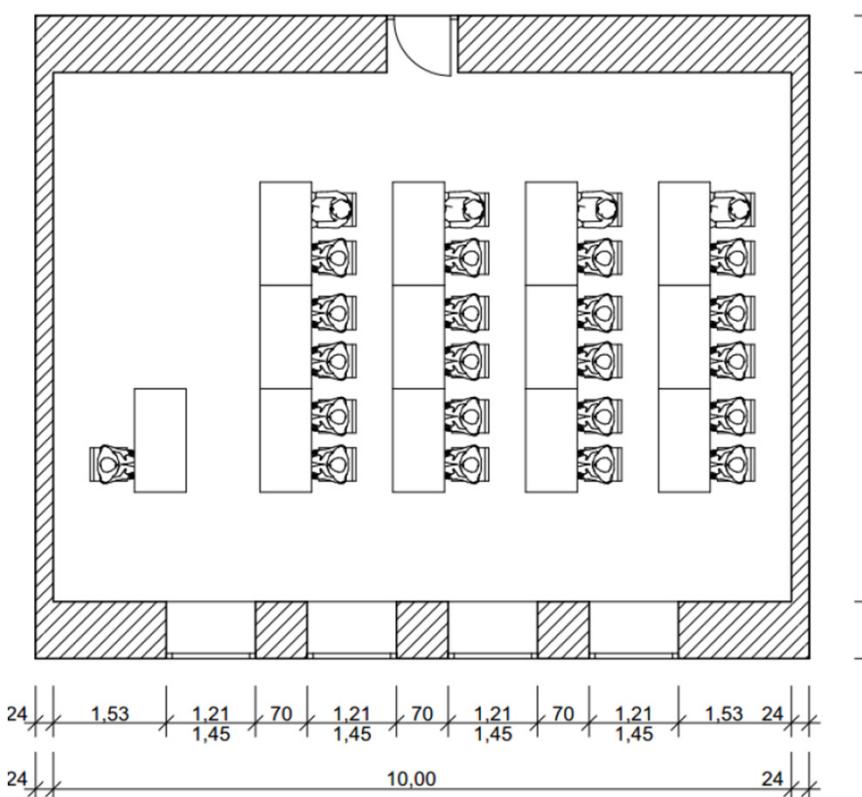
Das Ausfüllen des Lüftungs- und Ereignisprotokolls sollte vorzugsweise eine unabhängige Partei übernehmen, die sich gänzlich auf das Protokoll konzentrieren kann.

Notwendige Daten für die Auswertung:

- Datum
 - Uhrzeit
 - Temperatur innen und außen
 - CO_2 -Konzentration innen und außen
 - Windgeschwindigkeiten außen
 - Lüftungszeiträume mit Angabe der geöffneten Fenster
 - Angabe der Öffnungsbreite (Kippstellung)
 - Aktivitätsgrad der Schüler
 - Verlauf der Lüftungsrate der Lüftungsanlage
 - Angaben zum Vorlauf und Nachlauf der Anlage
 - Anzahl der Schüler über die gesamte Messdauer
 - Anzahl der Lehrer über die gesamte Messdauer
 - Angaben zur Anwesenheit
 - Angaben, ob die Tür offen oder geschlossen war

Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

Untersuchung verschiedener maschinellen Lüftungsvarianten mittels CFD-Simulation



Raum 113 der Textorschule

Der Modellraum hat eine NRF von 71,7 m² und eine Höhe von 3,63 m.

Somit ergibt sich ein Volumen von 260,27 m³.

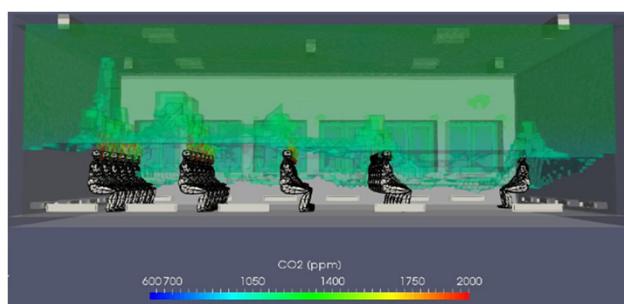
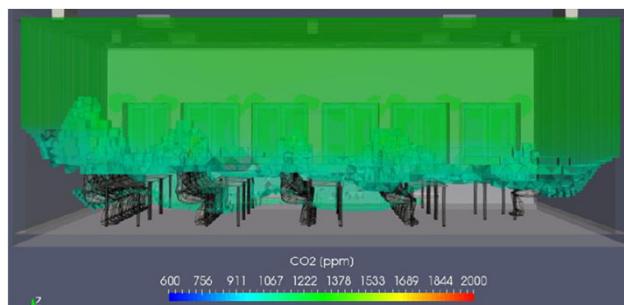
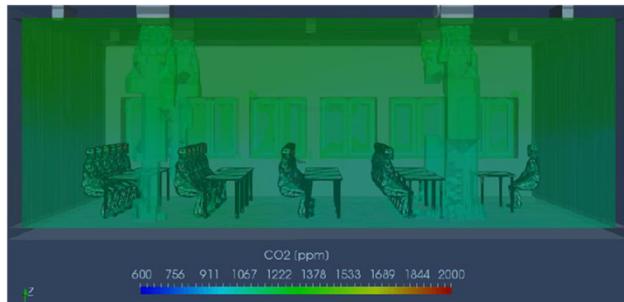
24 Schüler im Alter von 14 Jahren
1 Lehrer

gesamt 43 Liter CO₂ pro Stunde
Luftzufuhr (Ziel: 1000 ppm): 871,59 m³/h

Raumlufttemperatur zum Zeitpunkt 0:	20 °C
Fenstertemperatur:	16 °C
Außenwandtemperatur:	17 °C
Temperatur der ausgeatmeten Luft:	35,5 °C
Temperatur Hautoberfläche:	34,5 °C
Temperatur der Luft am Lufteinlass:	19 °C

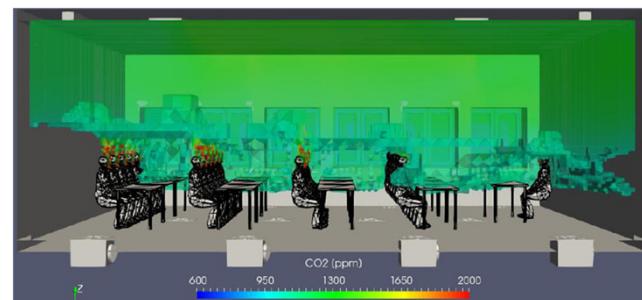
Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

Untersuchung verschiedener maschinellen Lüftungsvarianten mittels CFD-Simulation



CO₂-Konzentration über 1000 ppm

1. Mischlüftung mit Deckendurchlässen
2. Quelllüftung mit Wanddurchlässen
3. Quelllüftung mit erweiterten Wanddurchlässen
4. Quelllüftung mit Bodenauslässen



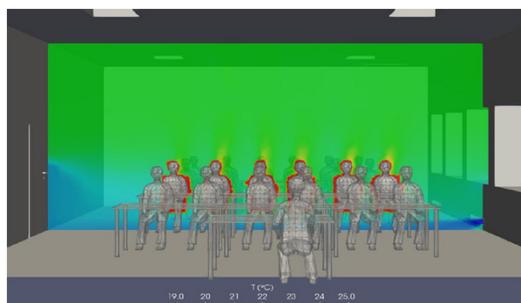
Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

Untersuchung verschiedener maschinellen Lüftungsvarianten mittels CFD-Simulation

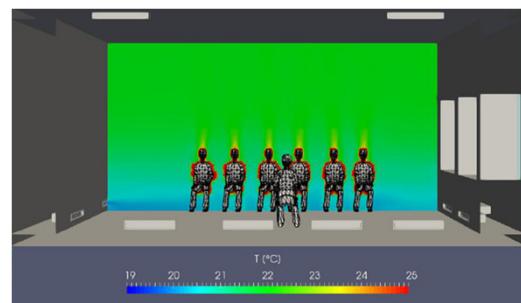
1



2



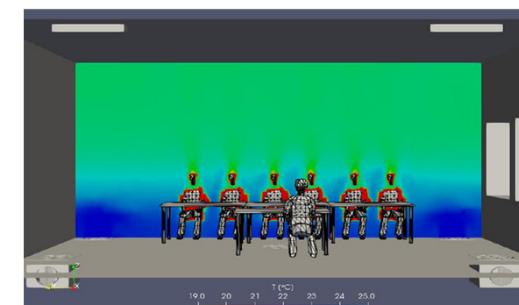
3



Raumlufttemperaturen

1. Mischlüftung mit Deckendurchlässen
2. Quelllüftung mit Wanddurchlässen
3. Quelllüftung mit erweiterten Wanddurchlässen
4. Quelllüftung mit Bodenauslässen

4



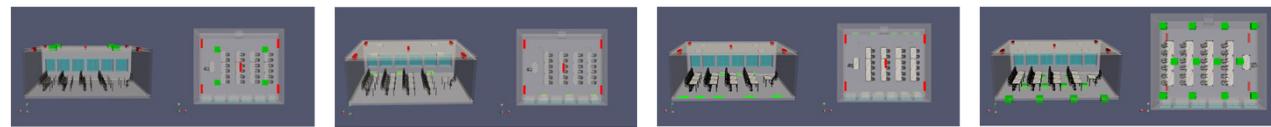
Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

Untersuchung verschiedener maschinellen Lüftungsvarianten mittels CFD-Simulation

gesamt 43 Liter CO₂/h

Luftzufuhr: 871,59 m³/h

Ziel: 1000 ppm



	1	2	3	4
Mischlüftung mit Deckendurchlässen	Quelllüftung mit Wanddurchlässen	Quelllüftung mit erweiterten Wanddurchlässen	Quelllüftung mit Bodenauslässen	
durchschnittliche CO ₂ -Konzentration	1219	1192	1013	1018
Abweichung von besten Wert	206	174	0	5
Verhältnis zum besten Konzept	0,83	0,85	1,00	1,00

Quelle: Jakob Rosin, Masterarbeit: Analyse der Luftqualität in Klassenräumen anhand von gemessenen Daten, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, betreut von Dr. Dirk Schwede

- RLT-Anlagen
 - » angemessene/ausreichende Raumluftqualität
 - » häufige Unterschreitungen bei der Raumluftfeuchte
 - » immer wieder Funktionsstörungen
 - Motorische Fensterlüftung
 - » angemessene/ausreichende Raumluftqualität
 - Fensterlüftung
 - » nicht ausreichende Raumluftqualität
 - Lüftungssampel unterstützte Fensterlüftung
 - » Verhindert hohe CO₂-Konzentrationen
- gute Ergebnisse mit hybrider Lüftung
- niedrige relative Luftfeuchte bei niedrigen CO₂-Konzentrationen
- Raumvolumen und Alter der Schüler sind wichtig

Broschüre – Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden – Teil I: Bildungseinrichtungen



Empfehlungen des Arbeitskreis Lüftung (AK Lüftung) am Umweltbundesamt

Der Arbeitskreis Lüftung ist eine Zusammenkunft aus Kommission Nachhaltiges Bauen (KNBau) und Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) beim Umweltbundesamt

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/anforderungen-an-lueftungskonzeptionen-in-gebaeuden>

Flyer: Besser lernen in guter Luft Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Bildungseinrichtungen



Empfehlungen des Arbeitskreis Lüftung
(AK Lüftung) am Umweltbundesamt

Der Arbeitskreis Lüftung ist eine Zusammenkunft aus Kommission Nachhaltiges Bauen (KNBau) und Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) beim Umweltbundesamt

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/flyer-besser-lernen-in-guter-luft>

Flyer: Besser lernen in guter Luft Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Bildungseinrichtungen



Folgende Grundsätze sind für die Planung und Nutzung von Lüftungsanlagen zu beachten:

1. Kohlendioxid (CO₂) ist die Leitgröße für die Luftqualität in Bildungseinrichtungen. **Die Konzentration von CO₂ in der Innenraumluft von Unterrichtsräumen darf im Mittel einer Unterrichtseinheit eine Konzentration von 1.000 ppm nicht überschreiten.**
2. Lüftung über Fenster allein reicht nicht aus, um in Schulen während des Unterrichts eine gute Innenraumluftqualität zu erreichen. **Der AK Lüftung empfiehlt daher dringend eine Grundlüftung über mechanische Lüftungsanlagen und eine zusätzliche Fensterlüftung in den Pausen („hybride Lüftung“).**
3. Für jedes Unterrichtsgebäude ist ein Lüftungskonzept zu erstellen, das sowohl Aspekte für die Planung und Ausführung von Neubauten und Sanierungsarbeiten im Bestand als auch für den täglichen Betrieb umfasst. Unabhängig von der Lüftungsart (mechanische Lüftung und / oder Fensterlüftung) sind Lüftungskonzepte für jeden Raumtyp sowie für den Sommer- und den Winterbetrieb getrennt zu erstellen.
4. Lüftung muss funktional, bedarfsgerecht und wirtschaftlich (Investition und Betrieb) sein und den Nutzern ermöglichen, den Betrieb einer Lüftungsanlage bereits in der Planung mit zu beeinflussen. Die Planung ist zwischen den beteiligten Fachplanerinnen und –planern, an der Baudurchführung beteiligten Ingenieuren, Bauherrn und Nutzern abzustimmen.

Flyer: Besser lernen in guter Luft Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Bildungseinrichtungen



Folgende Grundsätze sind für die Planung und Nutzung von Lüftungsanlagen zu beachten:

5. Die Lüftungsanlagen sollen über Wärme- und Feuchterückgewinnung verfügen und bedarfsgerecht regelbar sein. Neben der CO₂-Konzentration ist die relative Feuchte der Luft dabei ein weiteres Kriterium für gute bzw. angenehm empfundene Innenraumluftqualität. Sie soll vorzugsweise im Bereich zwischen 30 bis 60 Prozent liegen. Zugluftfreiheit und ausreichender Schallschutz sind sicherzustellen.
6. Eine sorgfältige Inbetriebnahme ist Voraussetzung für den Betrieb. Den Nutzern ist eine Einweisung in das jeweilige Lüftungskonzept mit klar verständlichen schriftlichen Handlungsempfehlungen zu übergeben.
7. In Schulbestandsbauten, die nicht sogleich mit einer Lüftungsanlage versehen werden können, ist auch während einer Unterrichtseinheit eine Lüftung über die Fenster unbedingt erforderlich. Die Verwendung eines CO₂-Sensors („Lüftungssampel“) kann dabei Hilfestellung für den „richtigen“ Lüftungszeitpunkt geben.
8. In der Betriebsphase sind vorhandene raumluftechnische Anlagen regelmäßig zu überprüfen und zu reinigen, um ihre ordnungsgemäße Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Dazu gehört auch der Nachweis auf die Einhaltung des o. g. CO₂-Leitwertes unter realen Nutzungsbedingungen.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit! Fragen?

Eva Anlauf
Hochbauamt der Stadt Nürnberg
Kommunales Energiemanagement und Bauphysik
Eva.anlauf@stadt.nuernberg.de
0911/231-4264

Dirk Schwede
ehemals: Institut für Leichtbau
Entwerfen und Konstruieren
Universität Stuttgart
mail@dirk-schwede.de