

## Niedersächsisches Landesgesundheitsamt



## Niedersächsisches Schulmessprogramm:

Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität  
in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-  
Verläufen

**Danksagung:**

Für die Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich bedanken:

bei Herrn Willi Frank für zahlreiche Anregungen und technische Tipps im Rahmen der Schuluntersuchungen,  
beim Niedersächsischen Landesamt für Ökologie (NLÖ) für die freundliche Bereitstellung der Klimawerte,  
bei den beteiligten Gesundheitsämtern, insbesondere dem GA Hannover für die kooperative Zusammenarbeit,  
sowie bei den Direktoren/Direktorinnen, Lehrern/Lehrerinnen und den Hausmeistern der beteiligten Schulen.

Bearbeitung:

Herbert Grams

Dr. Oliver Hehl

Dr. Johannes Dreesman

Projektbericht 12/2002

ergänzende Korrekturen: 11/2004

## Inhalt

1) Einleitung.....	3
2) Projektdurchführung.....	4
2.1 Schulauswahl .....	4
2.2 Messplanung und Messung.....	4
2.3 Instrumente .....	4
2.3.1 Messinstrumente .....	4
2.3.2 Verwendete Computerprogramme .....	5
2.3.3 Erhebungsbogen .....	5
3) Ergebnisse .....	6
3.1 Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) .....	7
3.1.1 CO <sub>2</sub> -Messungen in Klassenräumen .....	8
3.1.2 CO <sub>2</sub> -Messungen in künstlich belüfteten Räumen.....	11
3.1.3 CO <sub>2</sub> -Verteilung und Einflussfaktoren .....	12
3.1.4 Luftwechselberechnungen.....	16
3.1.5 CO <sub>2</sub> -Rechenmodell.....	17
3.2 Temperaturmessungen.....	19
3.2.1 Temperaturmessungen in Klassen- und Fachräumen .....	20
3.2.2 Temperaturmessungen in künstlich belüfteten Räumen.....	21
3.3 Luftfeuchtemessungen .....	21
3.3.1 Luftfeuchtemessungen in Klassen- und Fachräumen.....	21
3.3.2 Luftfeuchtemessungen in künstlich belüfteten Räumen .....	22
3.4 Flächen- und Volumenbezug .....	22
3.5 Weitere Ergebnisse .....	23
3.5.1 Leihverkehr.....	23
3.5.2 Vernetzung.....	23
4) Diskussion .....	24
4.1 Statistische Auswertung der CO <sub>2</sub> -Daten.....	24
4.2 Physikalische Haupteinflußfaktoren auf CO <sub>2</sub> in Unterrichtsräumen.....	25
4.3 Temperatur .....	28
4.4 Luftfeuchte .....	28
5) Zusammenfassung und Empfehlungen .....	30
6) Literatur .....	32
7) Anhang .....	33

## 1) Einleitung

Nach Angaben des Niedersächsischen Landesamtes für Statistik (Stand: 9/1999) werden in Niedersachsen 968.535 Schüler und Schülerinnen an 4.522 Schulen von 66.915 Lehrkräften unterrichtet.

Um einen orientierenden Überblick über die lufthygienische Situation für diese große, im schulischen Bereich tätige Gruppe zu erhalten, wurde im Niedersächsischen Landesgesundheitsamt (NLGA) eine orientierende Untersuchungsreihe in Zusammenarbeit mit dem Niedersächsischen Landesinstitut für Fort- und Weiterbildung im Schulwesen und Medienpädagogik (NLI) durchgeführt.

Für die Untersuchungen wurden 7 Schulen ausgewählt, in denen Temperatur, relative Luftfeuchte sowie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) gemessen wurde. Bei der Auswertung wurden auch Außenklimawerte berücksichtigt, die durch das Niedersächsische Landesamt für Ökologie (NLÖ) bereitgestellt wurden.

Untersuchungsziele:

- 1) Systematische Erfassung der Raumluftverhältnisse in Klassenräumen am Beispiel von  $\text{CO}_2$  sowie der Raumklimafaktoren Temperatur und Luftfeuchtigkeit.
- 2) Deskriptive Beschreibung der Raumklimafaktoren sowie Bestimmung der wichtigsten Einflußfaktoren auf die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in Klassenräumen mittels einer multivariaten statistischen Analyse.
- 3) Entwicklung eines Computerprogrammes, das die  $\text{CO}_2$ -Entwicklung in einem Klassenraum unter Berücksichtigung der wesentlichen Parameter berechnet und darstellt. Dieses Programm – oder der Programmalgorithmus – könnte in Schulen in den unterschiedlichen Unterrichtsfächern Verwendung finden.
- 4) In Einzelfällen Bestimmung von Luftwechselraten (Luftaustausch) in geschlossenen Klassenräumen aus den  $\text{CO}_2$ -Verlaufskurven. Der Luftaustausch in geschlossenen Räumen ist im Wesentlichen abhängig von der Dichtigkeit von Tür- und Fensterfugen und den Außenklimaverhältnissen und eine wichtige Größe zur Beschreibung von  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in Räumen.
- 5) Gewinnung von Multiplikatoren im Bereich der Lehrerschaft der Schulen, bei den Gesundheitsämtern und den Bezirksregierungen zur Verbreitung der Ergebnisse dieses Berichtes und anderer schulisch relevanter Gesundheitsinformationen.

## 2) Projektdurchführung

### 2.1 Schulauswahl

Die 7 niedersächsischen Schulen mit Schwerpunkt im Raum Hannover wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Gebäudealter
- Schultyp (Grundschulen und Gesamtschulen/Gymnasien)
- Gebäudetyp (gemauertes Gebäude, Tafelbauweise)
- Technische Ausstattung (Raumlufthygiene-Anlagen, Alter der Fenster)

Mit der Auswahl dieser Kriterien wurde der Versuch unternommen, einen Überblick über CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Raumklimaverhältnisse in verschiedenen Schulen zu erhalten. Eine repräsentative Auswahl von Schulen war im Rahmen des Projektes allerdings nicht möglich.

### 2.2 Messplanung und Messung

Die Projektdauer betrug ca. ein Jahr, um jeweils in allen Schulen Messungen sowohl in der Heiz- als auch in der Nicht-Heizperiode durchführen zu können.

Um einen Überblick über die raumlufthygienische Situation an den Schulen zu erhalten, wurde in jeder Schule jeweils in Absprache mit Lehrervertretern eine Auswahl an Räumen getroffen, die dann sowohl im Sommer- als auch im Wintermesszyklus untersucht wurden. Auswahlkriterien waren hierbei:

- Primär sollten Klassenräumen untersucht werden.

Ergänzend sollte berücksichtigt werden:

- die Belegungszahl der Klassen
- die (empfundene) raumklimatische Situation der Klassen.

Es wurde üblicherweise mit zwei Messgeräten gemessen und ein Messgerät/Raum aufgestellt (Ausnahme: große Seminarräume). Die Messungen erfolgten in der Regel über 2 Schultage/Raum über einen Zeitraum von ca. 8 Tagen/Schule.

Es wurde gebeten, in den Klassen so zu lüften wie es üblicherweise geschieht, allerdings sollten die letzten 2 Unterrichtsstunden bei geschlossenen Fenstern und geschlossener Tür unterrichtet werden. Der Unterrichtsraum sollte nach der letzten Stunde zügig verlassen und danach wieder verschlossen werden.

Die Absicht dieser Bitte war, eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration zum Unterrichtsende zu induzieren, wie sie möglicherweise bei ungünstigen Unterrichtssituationen entstehen kann, und die CO<sub>2</sub>-Abklingkurve zur Berechnung von Luftwechselzahlen zu verwenden. Die Lehrer der ausgewählten Klassenräume wurden an den Messtagen noch einmal schriftlich informiert und um Einhaltung der Randbedingungen gebeten. Desweiteren wurde gebeten, eine Stundenübersicht mit Angabe der Personenzahl und des durchschnittlichen Alters der Schüler für die Messtage auszufüllen (Anhang 1).

Die Schulen wurden nach Abschluss jeder Messreihe über die Messergebnisse informiert.

### 2.3 Instrumente

#### 2.3.1 Messinstrumente

Für die Messungen standen folgende Geräte zur Verfügung:

- Almemo-Messgerät 2290-8 mit Temperatur-/Feuchtefühler und CO<sub>2</sub>-Fühler
- testo 400 mit Temperatur-/Feuchtefühler und CO<sub>2</sub>-Fühler
- Metrosonic aq 501 mit kombiniertem Temperatur-/Feuchte-/CO<sub>2</sub>-Fühler

Bei allen Geräten handelte es sich um Messgeräte mit elektronischer Messwertaufzeichnung.

Zur Ermittlung der sinnvollsten Datenaufzeichnungsrate wurden Messreihen mit Aufzeichnungsraten von einem Wert/Minute, einem Wert/3 Minuten und einem Wert/5 Minuten erprobt.

Eine zufriedenstellende Datendichte wurde mit einer Einstellung von einem Wert/3 Minuten erzielt. Diese Einstellung ergab 20 Datenpunkte/Messparameter/Unterrichtsstunde.

Die aufgezeichneten Gerätedaten wurden auf einen PC übertragen und mit Excel weiter bearbeitet.

### **2.3.2 Verwendete Computerprogramme**

Die multivariate statistische Analyse wurde mit S-Plus 4,5 durchgeführt. Die Berechnung der Luftwechselraten erfolgte mit Excel 97. Das Computerprogramm zur Berechnung von CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverläufen in Klassenräumen wurde mit Delphi Version 6 erstellt.

### **2.3.3 Erhebungsbogen**

Die Lehrkräfte wurden gebeten, für jeden Unterrichtstag eine Stundenübersicht auszufüllen (s. Anhang 1), aus der sich die Zahl der Unterrichtsstunden des Tages, die jeweils anwesende Personenzahl und das Durchschnittsalter der Schüler ersehen ließ. Dieser Stundenübersicht war jeweils eine Kurzinformation über die Messungen und die Messvorgaben für die Lehrkräfte beigelegt.

Im Rahmen eines Vorgesprächs, das in jeder Schule vor Beginn einer Messreihe geführt wurde, wurden Angaben zur Schule abgefragt. Die Klassen, in denen Messungen stattfanden, wurden ausgemessen, um Fläche und Volumen bestimmen zu können.

Insgesamt wurden folgende Parameter erhoben bzw. gemessen:

- Innenraummessungen: CO<sub>2</sub>, Temperatur und Luftfeuchtigkeit;
- Außenklimawerte: Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchtigkeit.
- Gebäudealter in den Kategorien „vor 1930“, „nach 1930“, „nach 1995“;
- das Fensteralter in den Kategorien „> 5 Jahre“ und „< 5 Jahre“;
- die Messperiode als Heiz- und Nicht-Heizperiode;
- das Schüleralter in den Kategorien Grundschüler und ältere Schüler;
- Fläche und Volumen der Räume;
- die Personenzahl im Raum;
- die Unterrichtsdauer am Messtag; aus dieser Aufstellung waren auch die Unterrichts- und Freistunden am Unterrichtstag inklusive Pausenzeiten ersichtlich;

### 3) Ergebnisse

Messungen wurden an 7 Schulen sowohl in der Heiz- als auch in der Nicht-Heizperiode durchgeführt. Es handelte sich um 4 Schulen in Hannover und 3 Schulen außerhalb Hannovers. In Hannover wurden folgende vier Schulen untersucht:

2 neugebaute Grundschulen, die beide weniger als 5 Jahre in Betrieb sind, ein Gymnasium, das etwa zu Beginn des 20. Jahrhunderts gebaut wurde und ein Gymnasium, das Teil eines Schulzentrums ist und in zwei Bauabschnitten in den 50er und 70er Jahren errichtet wurde.

Die drei außerhalb Hannovers gelegenen Schulen waren ein ca. Anfang der 80er Jahre errichtetes Schulzentrum in Garbsen bei Hannover, eine in den 60er und 70er Jahren errichtete Gesamtschule in einem Schulzentrum in Hildesheim und ein in den 70er Jahren errichtetes Gymnasium (Teil eines Schulzentrums) in Duderstadt.

In der Schule in Duderstadt waren wenige Jahre vor Durchführung dieser Untersuchungsreihe die Fenster ausgetauscht worden; mit Ausnahme der neu gebauten Grundschulen lag das Alter der Fenster in den übrigen Schulen jeweils deutlich über 10 Jahre.

**Tabelle 1:** Zahl der durchgeführten Messtage in den beprobten Schulen

Schulen	Sommer			Winter		
	Klassen/ Fachräume *	Seminar- räume	Sonstiges **	Klassen/* Fachräume	Seminar- räume	Sonstiges
Kro	8		4	8		
Glü	10			7		
Sophi	9			7		
RBG	6			9		
Dud	6	2		5	2	
Beren	5			10		
K-Sch	4	2		4	2	
<b>Summe:</b>	<b>48</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>50</b>	<b>4</b>	

\* 78 Messtage in Klassenräumen und 20 Messtage in Fachräumen

\*\* Lehrerzimmer, Kantinenbereich

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Messtage in den verschiedenen Schulen und unterschiedlichen Räumen von Schulen. Für die weiteren Auswertungen wurden ausschließlich Klassenräume berücksichtigt, da hier eine einheitliche Belegungszahl und Altersstruktur während des Unterrichtstages gegeben war.

Von den aufgeführten Messtagen in Klassenräumen sind allerdings 19 Sommermessungen und 1 Wintermessung mangels Stundenprotokoll nicht auswertbar, so daß Messwerte von 58 Messtagen für die weiteren Betrachtungen zur Verfügung stehen.

### 3.1 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Für die Beurteilung der Qualität von Innenraumluft wurde von Pettenkofer bereits 1858 in einer Veröffentlichung über den „Luftwechsel in Wohngebäuden“ CO<sub>2</sub> als Indikator genannt. Nach Pettenkofer sollten aus Gründen der Geruchsbelastung und somit des Wohlbefindens in Räumen ein CO<sub>2</sub>-Wert von 1.000 ppm nicht überschritten werden (CO<sub>2</sub>-Hintergrundwerte nach Lahmann, 91, und Beilke, 99, in Deutschland ca. 360 ppm). Der von Pettenkofer nicht toxikologisch begründete CO<sub>2</sub>-Wert galt lange Zeit als Standard für die Beschreibung der Qualität von Innenraumluft, gilt aber aufgrund geänderter Wohnraumhygiene und Belegungsdichten als nicht mehr zeitgemäß. Anstelle der „Pettenkofer-Zahl“ wird heute üblicherweise der in der DIN 1946-2 genannten Wert von 1.500 ppm als einzuhaltender Wert (für klimatisierte Räume) verwendet (DIN 1946-2, 1994). Dieser Wert steht allerdings nicht für Geruchsfreiheit in Räumen: bei 1.500 ppm geben ca. 35% der Raumnutzer eine Geruchsbelästigung an (VDI 4300/7).

Die Orientierung der Lüftung von Räumen an CO<sub>2</sub>-Werten hat die Funktion, Gerüche zu reduzieren sowie eine ausreichende Frischluftzufuhr zu gewährleisten. Darüberhinaus wird durch regelmäßiges Lüften erreicht, das mögliche oder vermutete luftgetragene Innenraumbelastungen nicht künstlich durch unterlassene oder reduzierte Lüftung erhöht werden.

Im Rahmen dieses Untersuchungsprojektes erfolgt eine Orientierung der Messwerte an den Vorgaben der DIN 1946-2 (im weiteren Text nur noch „DIN“ genannt).

Um einen Bezug der CO<sub>2</sub>-Messwerte zu den Raummaßen herzustellen, wird als Vergleich die in Niedersachsen allgemein verwendete aber nicht mehr offiziell gültige „Schulbauhandreichung“ herangezogen, die pauschal 2 m<sup>2</sup> Fläche/Schüler als Minimum vorschreiben. Bei einer mittleren Höhe in Schulräumen von 3 m ergibt sich ein Volumen von 6 m<sup>3</sup>/Schüler.

Als weitere Bezugsgröße seien die Angaben der Arbeitsstättenverordnung genannt, die in § 23 „Raumabmessung, Luftraum“ als Mindestluftraum für Arbeitsräume für ständig anwesende Arbeitnehmer 12 m<sup>3</sup> bei überwiegend sitzender Tätigkeit festlegen. Weitere im Raum anwesende Personen sollten einen Luftraum von 10 m<sup>3</sup> zur Verfügung haben.

Für die CO<sub>2</sub>-Werte wurden jeweils folgende statistische Größen – bezogen auf den Unterrichtstag - bestimmt:

- Minimum, Maximum, Mittelwert, Median, 95%-Perzentil,
- die Überschreitungshäufigkeit des DIN-Wertes im Unterrichtszeitraum in Prozent (Berechnung: Anzahl der DIN-Überschreitungen im Unterrichtszeitraum geteilt durch die Gesamtzahl der Messpunkte im Unterrichtszeitraum\* 100)
- die neu geschaffene Vergleichsgröße „Überschreitungsmittelwert“ ( $\bar{U}_{Mw}$ ; Erläuterung s. Kästchen).

Für die Berechnung des „ $\bar{U}_{Mw}$ “ werden die Messwerte, die > 1.500 ppm liegen, berücksichtigt, d.h. es wird die Summe der jeweiligen Differenzen (Messwert-1.500 ppm) geteilt durch die Anzahl der Messpunkte in denen Überschreitungen aufgetreten sind gebildet. Beispiel: Eine Messung liefert 6 Messpunkte mit folgenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen:

1.900 ppm, 1.800 ppm, 1.700 ppm, 1.600 ppm, 1.500 ppm und 1.400 ppm.

Die Summe der Differenzwerte zu 1.500 ppm beträgt dann 1000 ppm (die Messwert ≤ 1.500 ppm werden in der Rechnung nicht berücksichtigt); geteilt durch 4 Messungen (bei denen Überschreitungen registriert wurden) ergibt einen  $\bar{U}_{Mw}$  von 250 ppm.

### 3.1.1 CO<sub>2</sub>-Messungen in Klassenräumen

Die Messergebnisse werden im Folgenden in zwei Gruppen unterteilt: Messwerte mit bzw. ohne DIN-Wert-Überschreitungen.

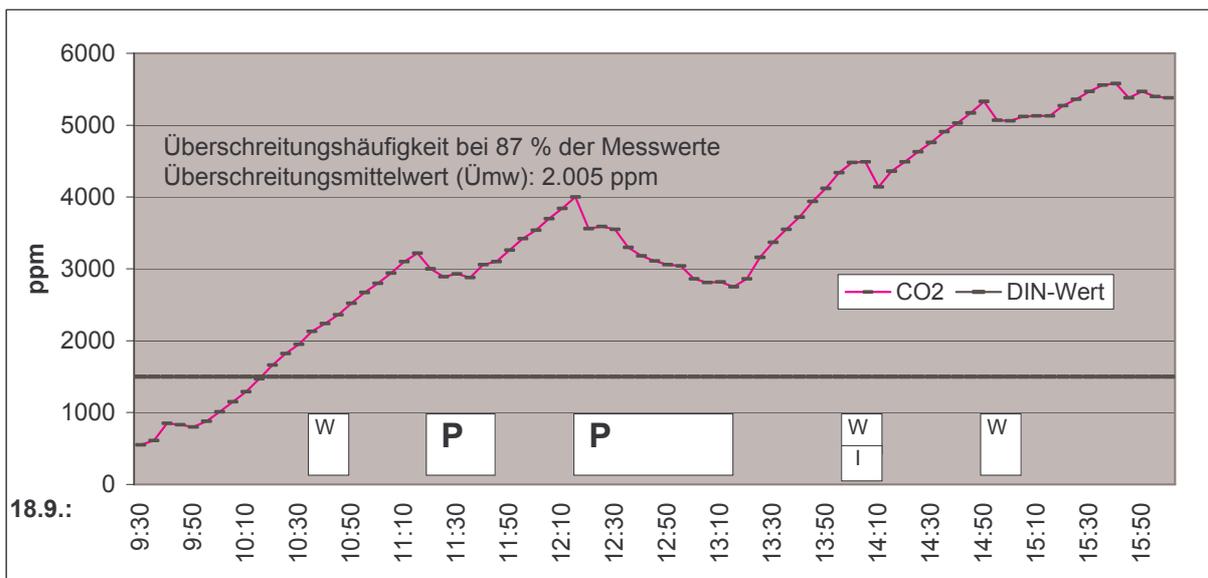
Tabelle 2: Darstellung der CO<sub>2</sub>-Messwerte in 2 Kategorien

	Sommer (n=22)	Winter (n=36)
DIN-Unterschreitungen	68 % (15 Fälle)	11 % (4 Fälle)
DIN-Überschreitungen	32 % ( 7 Fall)	89 % (32 Fälle)

#### CO<sub>2</sub>-Messverlauf über einen Unterrichtstag

Grafik 1 zeigt exemplarisch eine CO<sub>2</sub>-Messwertdarstellung; die Messung erfolgte bei kühler Außenwitterung in einer 5. Klasse, die von 9.50 Uhr – 15.45 Unterricht hatte. Die CO<sub>2</sub>-Werte liegen bei Unterrichtsbeginn bereits bei ca. 800 ppm. Vor Ablauf der ersten Unterrichtsstunde ist bereits der Vergleichswert der DIN 1946-2 von 1.500 ppm (durchgehender Strich in der Grafik) überschritten. Während der Pausen steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zu Beginn der letzten zwei Unterrichtsstunden, bei denen nach Möglichkeit nicht gelüftet werden soll, auf ca. 4.500 ppm. Der stark abflachende Anstieg der Kurve während der letzten Unterrichtsstunde deutet daraufhin, dass während der letzten Unterrichtsstunden Lüftungsaktivitäten erfolgten.

Mit den Größen Überschreitungshäufigkeit des DIN-Wertes und Überschreitungsmittelwert lassen sich Messkurven vergleichend beschreiben. Die Überschreitungshäufigkeit des DIN-Wertes gibt an, dass bei 87% des Unterrichtstages eine unbefriedigende Luftsituation vorlag. Der Überschreitungsmittelwert ( $\bar{U}_{Mw}$ ) gibt an, dass der DIN-Wert während der Unterrichtszeit im Mittel um 2.005 ppm überschritten wurde.



**Grafik 1:** CO<sub>2</sub>-Messung in einer 5. Klasse; Unterrichtsdauer von 9.50 Uhr – 15.45 Uhr; W = Stundenwechsel; 5-min-Pause; P = Pause (15 bzw. 55 min); I = Intervention d.h. Bitte Fenster ab jetzt geschlossen zu halten.

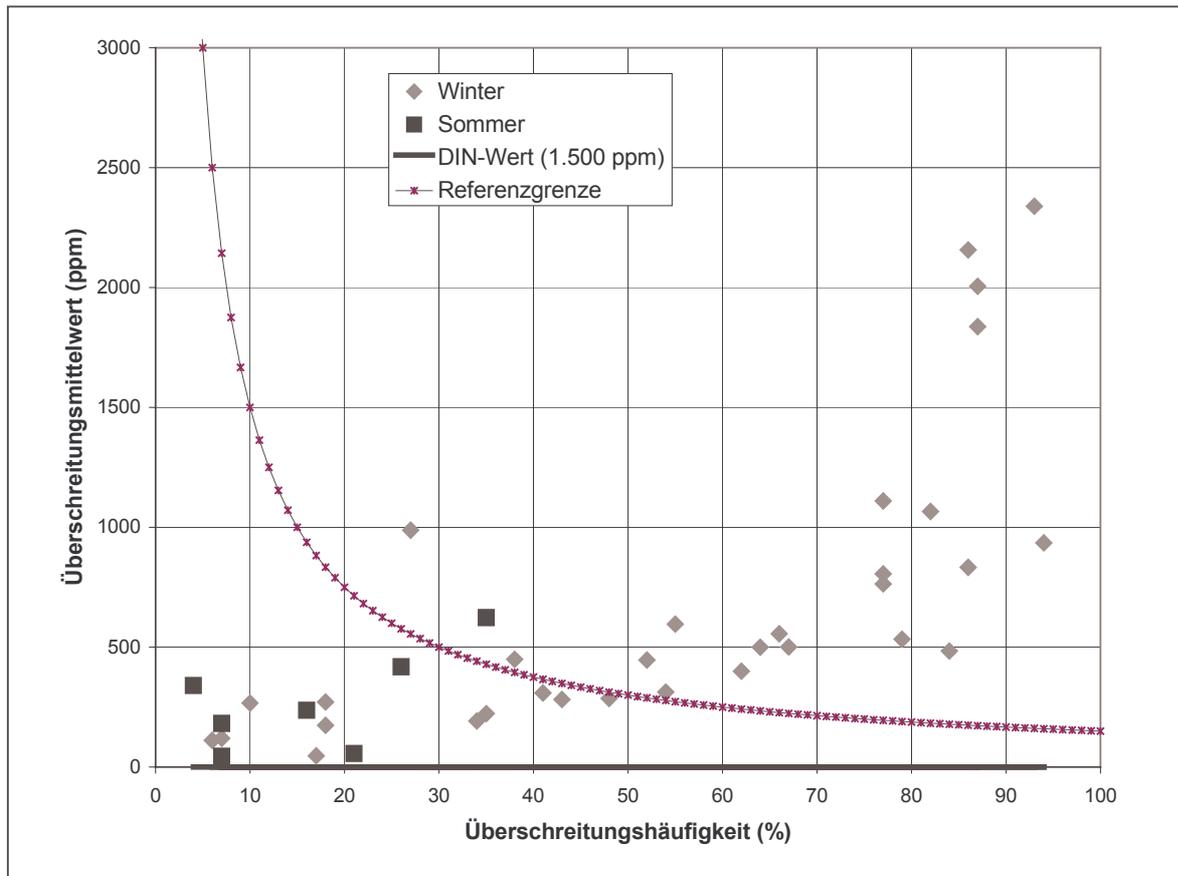
### **Luftgüte-Schema**

Bei 39 von 58 Messtagen zeigten sich während des Unterrichtsverlaufes DIN-Wert-Überschreitungen (s. Tabelle 2). Die DIN-Wert-Überschreitungen variierten sowohl in der zeitlichen Dauer als auch in der Höhe. Dies lässt die Einteilung der Messwerte in ein zweistufiges Schema, „gut“ für alle Messungen, bei denen der DIN-Wert im gesamten Unterrichtsverlauf unterschritten wurde, und „unbefriedigend“ für den gesamten Rest der Messungen, als zu grob strukturiert erscheinen. In einer dritten, mittleren Kategorie „zufriedenstellend“ sollen DIN-Wert-Überschreitungen dargestellt werden, die sowohl kurzzeitig und dann ggf. hoch ausfallen können, sowie Überschreitungen über einen längeren Zeitraum, dann aber nur mit geringer Höhe. Diese Kombinationsmöglichkeiten lassen sich am Besten in Form einer Kurvendarstellung realisieren.

Ein Punkt der Kurve sei die maximale Überschreitung des DIN-Wertes in 30% der Unterrichtszeit bei einer maximalen Höhe von 500 ppm. Durch Multiplikation dieser beiden Zahlen entsteht ein Referenzprodukt mit dem Wert 15.000 ppm\*%. Die weiteren Punkte der Kurve ergeben sich aus den weiteren Kombinationsmöglichkeiten der beiden Größen zu dem Produktwert „15.000“. (Kurvenverlauf in Grafik 2).

Ist das Produkt der beiden Größen = 0 (d. h. der DIN-Wert ist im gesamten Unterrichtsverlauf unterschritten), liegen „gute“ Luftwerte vor; ist das Produkt > 15.000 so sei die Luftqualität als „unzureichend“ einzustufen.

**Beispiel:** In einer der Schulen wurde bei einem Messtag im Sommer für 26% der Unterrichtszeit eine Überschreitung des DIN-Wertes registriert. Der Überschreitungsmittelwert lag während dieser Unterrichtszeit im Mittel bei 418 ppm. Die Luftgütezahl beträgt  $418 \cdot 26 = 10.868 \text{ ppm}\cdot\%$ ; die Luftqualität ist nach dem oben beschriebenen Schema als „zufriedenstellend“ zu bezeichnen.



**Grafik 2:** Überschreitungsmittelwert (in ppm) vs. Überschreitungshäufigkeit (in %) der 39 von 58 Messtagen (67 %), an denen DIN-Wert-Überschreitungen auftraten. Die Kurve „Referenzgrenze“ grenzt den Bereich unzureichender Luftgüte von dem Bereich „zufriedenstellender“ Luftgüte ab.

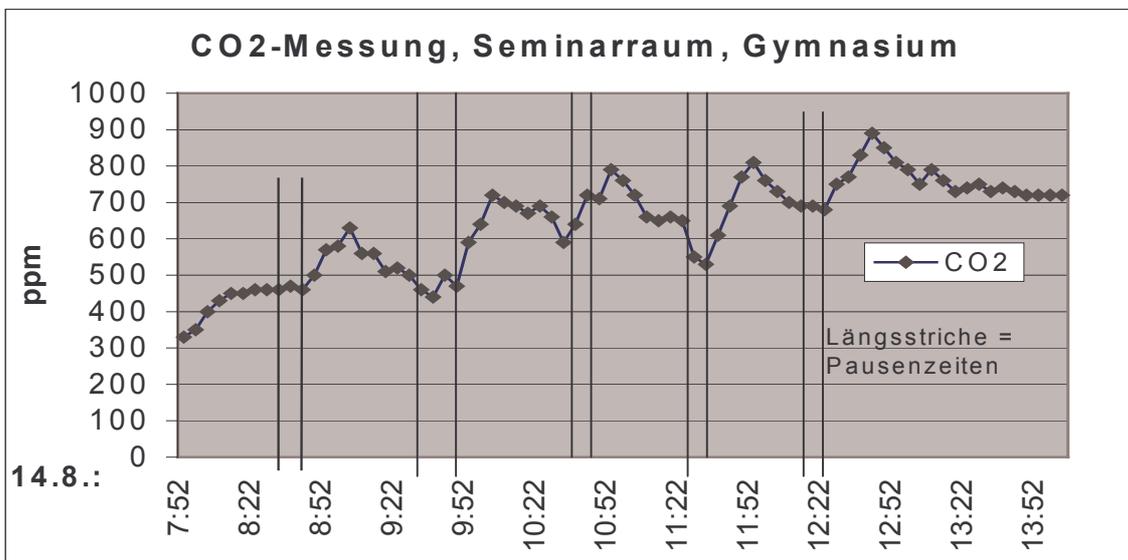
### 3.1.2 CO<sub>2</sub>-Messungen in künstlich belüfteten Räumen

Bei den insgesamt 8 Messungen in künstlich belüfteten Seminarräumen konnten keine auffälligen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen festgestellt werden.

Mit Hilfe der CO<sub>2</sub>-Messungen können unter Umständen Mängel im sachgerechten Betrieb von klimatechnischen Anlagen festgestellt werden. Die Raumlufthilfs-Anlage (RLT-Anlage), die den Seminarraum belüftet, in dem die in Grafik 2 dargestellten Messungen stattfanden, wurde im Messzeitraum jeweils zeitgesteuert zu jedem Stundenbeginn an- und zu jedem Stundenende abgeschaltet.

Es ist erkennbar, dass jeweils für ca. 20 min nach Ende einer Pause die CO<sub>2</sub>-Werte ansteigen und dann - während des weiteren Unterrichtes - wieder fallen. Unklar blieb, ob die Ursache dieses Rhythmus in einer falsch gestellten Zeitschaltuhr oder in der Trägheit des Lüftungssystems liegt, das nach dem jeweiligen Anfahren eine Weile braucht, um die volle Luftleistung zu erbringen.

Die genannten Einstellungen der Zeitsteuerung waren aus Energiespargründen gewählt worden. Nach Durchführung der ersten Messreihe wurde die Zeitsteuerung der Anlage so umgestellt, dass die Anlage deutlich vor der ersten Stunde kontinuierlich bis zum Unterrichtsende läuft. Weiter wurde bei einer in Auftrag gegebenen technischen Wartung festgestellt, dass die Drehrichtung der Ventilatoren in der RLT-Anlage falsch gepolt war, so dass die Anlage Luft nicht von außen ansaugte sondern aus dem Raum nach außen beförderte. Mittlerweile berichteten die Lehrkräfte über eine deutliche subjektive Verbesserung der Luftsituation in diesem Raum.



Grafik 3: CO<sub>2</sub>-Messungen in einem künstlich belüfteten Seminarraum

### 3.1.3 CO<sub>2</sub>-Verteilung und Einflussfaktoren

Tabelle 4 zeigt eine Darstellung der Innenraum-Messwerte als Gesamtdatensatz und hieraus abgeleitet die Teildatensätze „Sommer“ (genauer: Nicht-Heizperiode), „Winter“ (genauer: Heizperiode) und Unterrichtstage „ab 5 h Unterricht“. Tabelle 5 zeigt Angaben zur Belegung von Klassenräumen.

Anschließend erfolgt eine multivariate Betrachtung mit ausgewählten potentiellen Einflussfaktoren.

**Tabelle 3:** Mittelwerte und 95%-Perzentile der Innenraum-Messwerte CO<sub>2</sub>-, Temperatur- und Luftfeuchte

	CO <sub>2</sub> -Konz. - MW (ppm)	CO <sub>2</sub> -Konz.- 95% (ppm)	Raumtemp- MW (°C)	Raumtemp- 95% (°C)	Raumluft- feuchte- MW (%)	Raumluft- feuchte- 95% (%)
Sommer-/ Winter (n=58)	1.316	2.026	21,7	23,1	50,7	55,1
Sommer (n=22)	766	1.216	22,9	24,1	54,3	58,1
Winter (n=36)	1.652	2.521	20,9	22,5	48,5	53,2
Sommer-/ Winter ab 5 h Unterricht (n=20)	1.481	2.269	21,4	23,3	50,3	54,8

Die CO<sub>2</sub>-Werte der Tabelle 4 zeigen deutlich höhere Messwerte im Winter als im Sommer, in dem verstärkt auch außerhalb der Pausenzeiten Lüftungseinflüsse zu erwarten sind. Das Verhältnis der 95%-Perzentilen zu den Mittelwerte beträgt für CO<sub>2</sub> in allen 4 Datengruppen ca. 1,5.

Die Temperatur- und Luftfeuchtwerte in den Klassenräumen zeigen ebenso eine Abhängigkeit von der betrachteten Periode; bei diesen Parametern sind die sommerlichen Werte etwas höher als die winterlichen Messwerte. Das Verhältnis der 95%-Perzentile zu den Mittelwerten zeigt mit dem Faktor < 1,1 einen geringen Unterschied. Die jahreszeitliche Differenz zwischen den Messperioden ist ebenfalls gering, die Sommerwerte liegen sowohl bei den Temperatur- als auch bei den Luftfeuchtwerte um einen Faktor von ca. 1,1 über den entsprechenden Winterwerten.

**Tabelle 4:** Mittelwert, Minimum und Maximum der Raumbelegung der untersuchten Klassen (n=58)

	Mittelwert	Minimum	Maximum
Personenzahl/Klasse	25,1	21	29
Raumvolumen/Person in m <sup>3</sup>	8,5	5,9	12,6
Fläche/Person in m <sup>2</sup>	2,9	1,8	6,7

Die Mittelwerte Raumvolumen/Person (und somit auch Fläche/Person) werden z.T. durch vereinzelte, große Räume sowie durch z.T. gering belegte Klassen beeinflusst. Die Tabelle zeigt, daß die Einhaltung der Vorgaben der Schulbauhandreichung im Einzelfall grenzwertig ist.

## Analyse der Einflussfaktoren auf die CO<sub>2</sub>-Variabilität zwischen den Messtagen

Die Bedeutung von Einflussfaktoren, wie z.B. Wetterbedingungen oder Gebäudetyp, auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Klassenräumen wurde mittels uni- und multivariater Regression untersucht. Untersuchungseinheiten waren dabei die 58 Messtage. Zielgröße der Regressionsanalysen waren die CO<sub>2</sub>-Mittelwerte der Messtage. Neun Einflussgrößen bzw. Regressoren wurden berücksichtigt: 1.: Jahreszeit (In den Kategorien: Sommer bzw. Nicht-Heizperiode / Winter bzw. Heizperiode); 2.: Außentemperatur in °C; 3.: Windstärke in m/sek.; 4.: Innentemperatur in °C; 5.: Raumvolumen in m<sup>3</sup>/Person; 6.: Alter der Schüler (Primarstufe / Sekundarstufen); 7.: Gesamte Unterrichtsdauer am Messtag in Stunden; 8.: Fensteralter (neu / alt); 9.: Gebäudealter (neu / mittel / alt).

Bei der Windstärke, der Außen- und der Innentemperatur, deren Messwerte über den Tagesverlauf variierten, wurden jeweils die Tagesmittelwerte verwendet. Die Regressoren Jahreszeit, Alter der Schüler, Fensteralter und Gebäudealter wurden als zwei- (0, 1) bzw. dreiwertige (0, 1, 2) Variablen codiert.

Zur Vorbereitung der Regressionsanalysen wurden die paarweisen Korrelationskoeffizienten zwischen den Regressoren ermittelt. Die univariaten Regressionsanalysen wurden mit allen 9 Regressoren separat durchgeführt. In das multivariate Regressionsmodell gingen zunächst alle 9 Regressoren gemeinsam ein, und durch eine automatische schrittweise Vorwärts-Rückwärts-Selektion wurden anschließend die maßgeblichen Einflussfaktoren ermittelt. Weil unterschiedliche Einflussmechanismen zwischen Winter und Sommer zu erwarten waren, wurden die Messtage der beiden Perioden zusätzlich getrennt analysiert.

Die Berechnungen erfolgten unter Verwendung der Statistik Software S-Plus<sup>®</sup>. Dabei wurden drei Prozeduren verwendet: „cor“ für die Korrelationsrechnung, „lm“ für die univariaten Regressionsanalysen und „step“ für die multivariaten Regressionsanalysen mit schrittweiser Variablenselektion.

Als Ergebnisse der Regressionsanalysen werden die Regressionskoeffizienten sowie die p-Werte dargestellt. Bei der univariaten Analysen erfolgt diese Darstellung für alle Regressoren. Bei dem multivariaten Modell werden nur die im Modell selektierten Regressoren dargestellt. Für die Interpretation der p-Werte ist zu berücksichtigen, dass die Messtage eine Gruppenstruktur aufweisen, weil mehrere Messtage jeweils in derselben Schule durchgeführt wurden. Im Regressionsmodell wurde diese Struktur nicht berücksichtigt, da dafür die Anzahl der Messtage nicht ausreichend erschien. Aufgrund dieser Abweichung von den Modellvoraussetzungen können die p-Werte nicht als exakter Ausdruck der Signifikanz angesehen werden, sondern nur zur Orientierung dienen.

Die vorbereitende Korrelationsanalyse ergab teilweise hohe Korrelationen zwischen einzelnen Regressoren. Speziell zwischen den Regressoren Gebäudealter, Fensteralter und Schüleralter bestanden paarweise Korrelationen in der Größenordnung von 0,8. Die Korrelation zwischen der Jahreszeit und der Außentemperatur betrug -0,73.

Bei den uni- und multivariaten Regressionsanalysen (Tabellen 5+6) sind drei Ansätze unterschieden: Erstens die Analyse aller 58 Messtage, zweitens die Analyse der 36 Messtage im Winter und drittens die Analyse der 22 Messtage im Sommer. Auf die multivariate Analyse der Sommer-Messtage wurde verzichtet, da die

Datenbasis von 22 Messtagen bei 8 Variablen keine stabilen Ergebnisse ermöglichte.

Die stärksten Zusammenhänge mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration wiesen in der Regressionsanalyse die Jahreszeit (CO<sub>2</sub> im Winter höher als im Sommer), die Außentemperatur (CO<sub>2</sub> geringer bei höherer Außentemperatur) und Fensteralter (CO<sub>2</sub> höher bei älteren Fenstern) auf. Diese Zusammenhänge zeigten sich sowohl in den uni- als auch den multivariaten Analysen, und sowohl im Winter als auch im Sommer. Bei der getrennten Analyse nach Jahreszeit konnte diese naturgemäß nicht mehr gleichzeitig als Regressor berücksichtigt werden.

Ein deutlicher Zusammenhang ergab sich auch für das Schüleralter (CO<sub>2</sub> höher bei älteren Schülern), nur dass diese Einflussgröße im multivariaten Modell für die Winter-Messtage keine Berücksichtigung fand. Das Gebäudealter war ebenfalls in den univariaten Modellen signifikant und auch relevant für das multivariate Modell über alle Messtage, dabei änderte sich jedoch das Vorzeichen des Effektes, so dass eine inhaltliche Interpretation problematisch ist. Vielmehr erklärt sich der Effekt durch Korrelationen zwischen den Einflussgrößen, z.B. mit dem Fensteralter.

Die Regressoren Innentemperatur und Unterrichtsdauer waren zwar im univariaten Modell über alle Messtage signifikant bzw. grenzwertig signifikant, diese Effekte bestätigten sich allerdings nicht in den multivariaten Modellen oder bei Betrachtung der einzelnen Jahreszeiten. Für die Regressoren Windstärke und Raumvolumen konnten keine relevanten Zusammenhänge mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration festgestellt werden.

**Tabelle 5:** Ergebnisse der uni- und multivariaten Regressionsanalysen, für alle Messtage.

	Alle Messtage			
	univariat		multivariat	
	Koeff.	p-Wert	Koeff.	p-Wert
Absolutglied	-	-	1247	0,001
Jahreszeit (Sommer / Winter)	888	<0,001	441	0,065
Außentemperatur in Grad	-69	<0,001	-40	0,017
Windstärke in m pro Sek.	24	0,61		
Innentemperatur in Grad	-109	0,043		
Raumvolumen in m <sup>3</sup> pro Person	-59	0,30		
Schüleralter (Primar / Sek I)	517	0,010	520	0,10
Unterrichtsdauer in Std.	171	0,073		
Fensteralter (neu / alt)	559	0,004	403	0,10
Gebäudealter (neu / mittel / alt)	241	0,076	-317	0,15

**Tabelle 6:** Ergebnisse der uni- und multivariaten Regressionsanalysen, unterteilt für Winter- und Sommer-Messtage.

	Winter				Sommer	
	univariat		multivariat		univariat	
	Koeff.	p-Wert	Koeff.	p-Wert	Koeff.	p-Wert
Absolutglied	-	-	1684	0,001	-	-
Außentemperatur in Grad	-58	0,011	-38	0,088	-36	0,041
Windstärke in m pro Sek.	-49	0,40			-22	0,62
Innentemperatur in Grad	-47	0,16			136	0,20
Raumvolumen in m <sup>3</sup> pro Person	-16	0,84			12	0,75
Schüleralter (Primar / Sek I)	725	0,003			289	0,034
Unterrichtsdauer in Std.	90	0,50			-40	0,55
Fensteralter (neu / alt)	708	0,004	544	0,03	378	0,002
Gebäudealter (neu / mittel / alt)	437	0,015			169	0,041

### 3.1.4 Luftwechselberechnungen

Die Luftwechselrate "n" für geschlossene Räume gibt an, in welcher Zeit das Luftvolumen eines Raumes z.B. aufgrund von Fugenundichtigkeiten ausgetauscht wird. Definiert ist die Luftwechselrate als Quotient aus dem pro Zeiteinheit ausgetauschtem Luftvolumen ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) und dem Raumvolumen ( $\text{m}^3$ ). Somit ist die Einheit "n" für die Luftwechselrate =  $1/\text{h}$ . Der Prozess der Konzentrationsabnahme erfolgt insgesamt allerdings nicht linear sondern exponentiell.

Beispiel: Ein Raum von  $50 \text{ m}^3$  hat aufgrund sehr undichter Fugen eine Luftwechselrate von  $1/\text{h}$ . Das bedeutet, dass in einer Stunde ein Luftvolumen von  $50 \text{ m}^3$  durch die Fugen in den Raum strömt. Aufgrund der fortwährenden Mischung von "alter" und "neuer" Luft wird in dieser Stunde aber nicht die "alte" Luft komplett verdrängt sondern bleibt als stetig kleiner werdender Teil in der Innenraumluft. Bei der hier angenommenen Luftwechselrate von  $1/\text{h}$  fällt die Konzentration in dem Beispielszeitraum auf die Hintergrundkonzentration + 37% der anfänglichen Konzentration.

Mit Hilfe von  $\text{CO}_2$ -Verlaufskurven kann der Luftwechsel eines Raumes bestimmt werden, indem die Änderung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration/Zeiteinheit betrachtet wird. Zur Berechnung wird die Abklingkurve verwendet, d.h. die Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in einem leeren, verschlossenen Raum. In einer solchen Situation ist die Luftwechselrate von den Druckunterschieden zwischen dem Raum und dem Außenbereich und der Dichtigkeit des Raumes abhängig.

Zur Simulation einer Periode reduzierter Lüftung (wie z.B. in einer Kältephase) und um  $\text{CO}_2$ -Kurven zu erhalten, mit denen Luftwechselbestimmungen möglich sind, wurde mit den Lehrern vereinbart, dass die letzten zwei Unterrichtsstunden möglichst bei geschlossenen Türen und Fenstern durchgeführt werden und das der Klassenraum nach Unterrichtsende zügig verlassen und wieder verschlossen wird. Die Beachtung dieser Absprache konnte anhand des Verlaufes der  $\text{CO}_2$ -Messkurven grob kontrolliert werden. Aus den Kurven war aber nicht ersichtlich, ob nach der letzten Unterrichtsstunde z.B. Kippfenster im Klassenraum noch offen standen oder ob die Tür nach dem Unterricht erst verzögert verschlossen wurde.

An einigen Messtagen wurde der Öffnungszustand der Türen und Fenster durch einen Mitarbeiter des NLGA, der dann während des Unterrichtes anwesend war, protokolliert. Die Messwerte, bei denen es plausibel schien, dass die Messbedingungen eingehalten wurden, dienten zur Berechnung von Luftwechselzahlen.

Die ermittelten Luftwechselzahlen schwankten zwischen  $< 0,1/\text{Stunde}$  und  $0,4/\text{Stunde}$  und sind damit sehr niedrig (Ergebnisse s. Anhang 2).

### 3.1.5 CO<sub>2</sub>-Rechenmodell

Wie die Messungen zeigen, übersteigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen in Abhängigkeit der Klassenbelegung, dem Raumvolumen und dem Luftwechsel vor allem bei kühler Witterung häufig bereits während der ersten Unterrichtsstunden den in der DIN 1946-2 genannten Wert von 1.500 ppm. Aufgrund von kurzen und z.T. recht mangelhaften Lüftungen in den Pausen steigen die Werte im Unterrichtsverlauf weiter an.

Um unterschiedliche Nutzungsbedingungen von Klassenräumen und deren Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration simulieren zu können, wurde das numerische Modell „Quirl“ (Qualität der Innenraumluft) entwickelt. In diesem Modell können die Parameter „Grundfläche“, „Höhe“, „Luftwechselrate“, „Raumbelegung“, „CO<sub>2</sub>-Abgaberate“, „CO<sub>2</sub>-Anfangs- und -Außenkonzentration“ sowie die „Start- und Stoppzeit“ verändert werden. Die Variablen können auch in einem Skript zu einem zeitgesteuerten Programmablauf zusammengestellt werden, um einen beliebigen Unterrichtsablauf simulieren zu können. (Details zur Modellbeschreibung s. Anhang 5).

In einem ersten Validierungs-Schritt des Modells wurden die Daten eines Unterrichtstages verwendet, an dem der Öffnungszustand von Türen und Fenstern protokolliert worden war, um mit diesen eine Modellierung durchführen zu können. Diese Versuche wurden in Büros des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes und somit unter gut kontrollierbaren Bedingungen wiederholt.

Geplant ist eine weitere Validierung des Modells und eine Verbesserung des Bedienkomfort und Erweiterung des Funktionsumfangs des Programms, um es - ergänzt mit weiteren Schulmaterialien – im Unterricht einsetzen zu können. Auf diese Weise kann dem Hygiene-Thema „Lüftung in Schulen“ mehr Aufmerksamkeit verliehen und das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Luftqualität und Lüftungsverhalten in Schulen gefördert werden.

#### **Erläuterungen zu den Grafiken 3-6:**

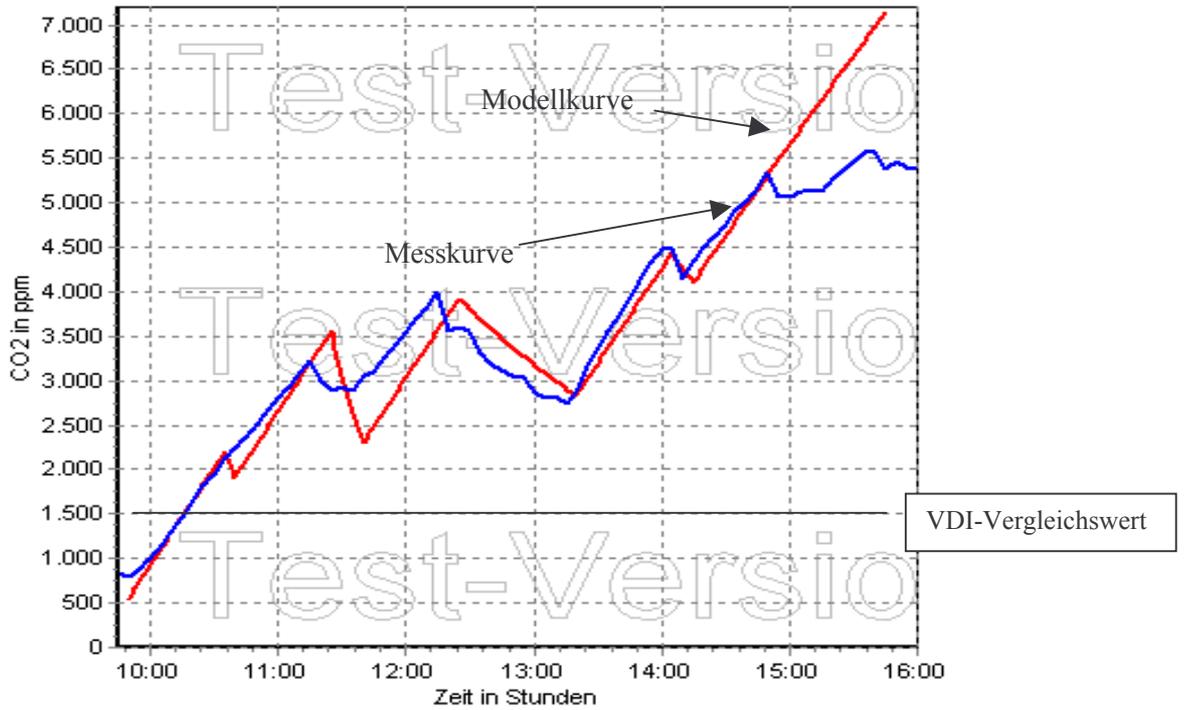
Die Grafiken 3 und 4 zeigen jeweils Messkurve und Simulation in einem Klassenraum bzw. einem Büro im Landesgesundheitsamt.

Grafik 5 und 6 zeigen Simulationen für eine Klasse älterer bzw. jüngerer Schüler bei der im ersten Fall (Grafik 5) eine regelmäßige Lüftung in allen Pausen erfolgt.

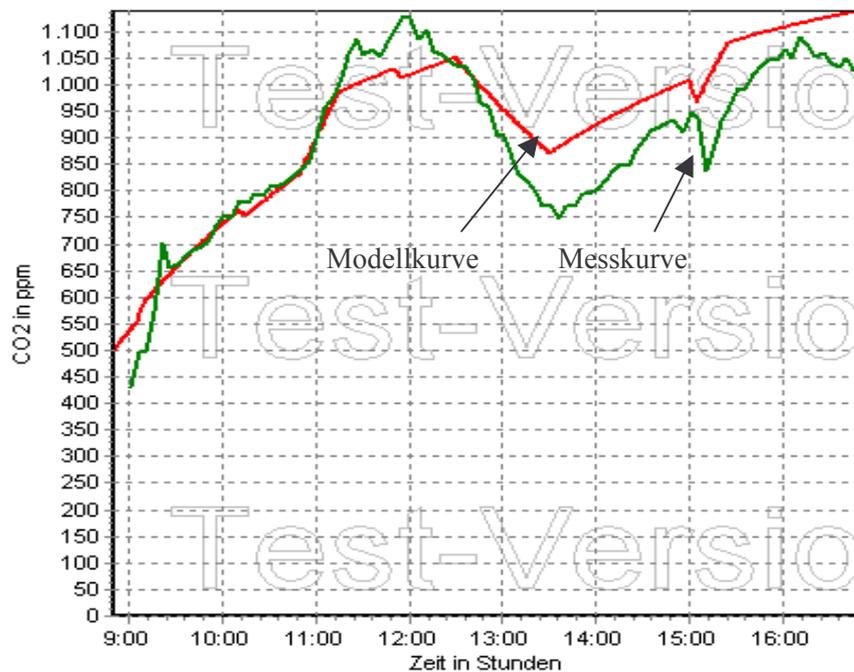
Grafik 6 zeigt bei sonst gleichen Vorgaben einen CO<sub>2</sub>-Verlauf, bei dem in einer großen Pause das Lüften weitgehend „vergessen“ wurde.

Modellannahmen für Grafik 5 u. 6: Raumfläche 60 m<sup>2</sup>, Raumhöhe 3 m; Personenzahl 25 Personen, Luftwechselrate: 0,2/h, Pausenluftwechsel: 6/h; Anfangskonzentration CO<sub>2</sub>: 500 ppm, CO<sub>2</sub>-Abgaberate: 15 bzw. 7,5 l/(Person\*h). In den 5 min. Pausen sind jeweils 15 Personen, in den großen Pausen noch 5 Personen im Klassenraum.

Die Annahmen zu Atemraten und CO<sub>2</sub>-Produktion orientieren sich an der DIN 4300/7, in der CO<sub>2</sub>-Produktionsraten von 15-20 l/h bei sitzender Tätigkeit genannt werden, sowie an Forscher und Koos (1997). In diesem Artikel werden Atemraten für ca. 6 jährige mit 0,5 m<sup>3</sup>/h und für die Gruppe der ab 20 jährigen mit 1,2 m<sup>3</sup>/h angegeben werden, d.h. die CO<sub>2</sub>-Produktion unterscheidet sich um den Faktor 2,4.

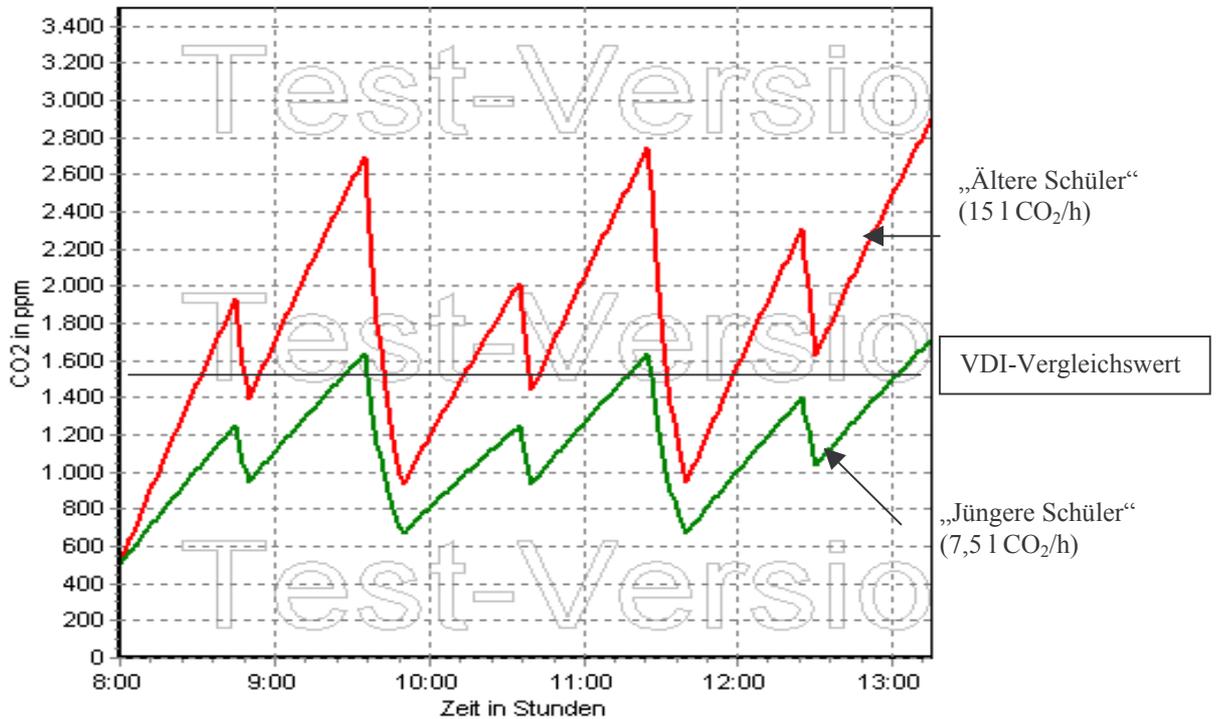


**Grafik 4:** Darstellung von Messwerten und Simulation der Messwerte. Klassenbelegung: 27 Schüler ( $7,1 \text{ m}^3/\text{Person}$ ); Luftwechsel:  $< 0,1/\text{h}$



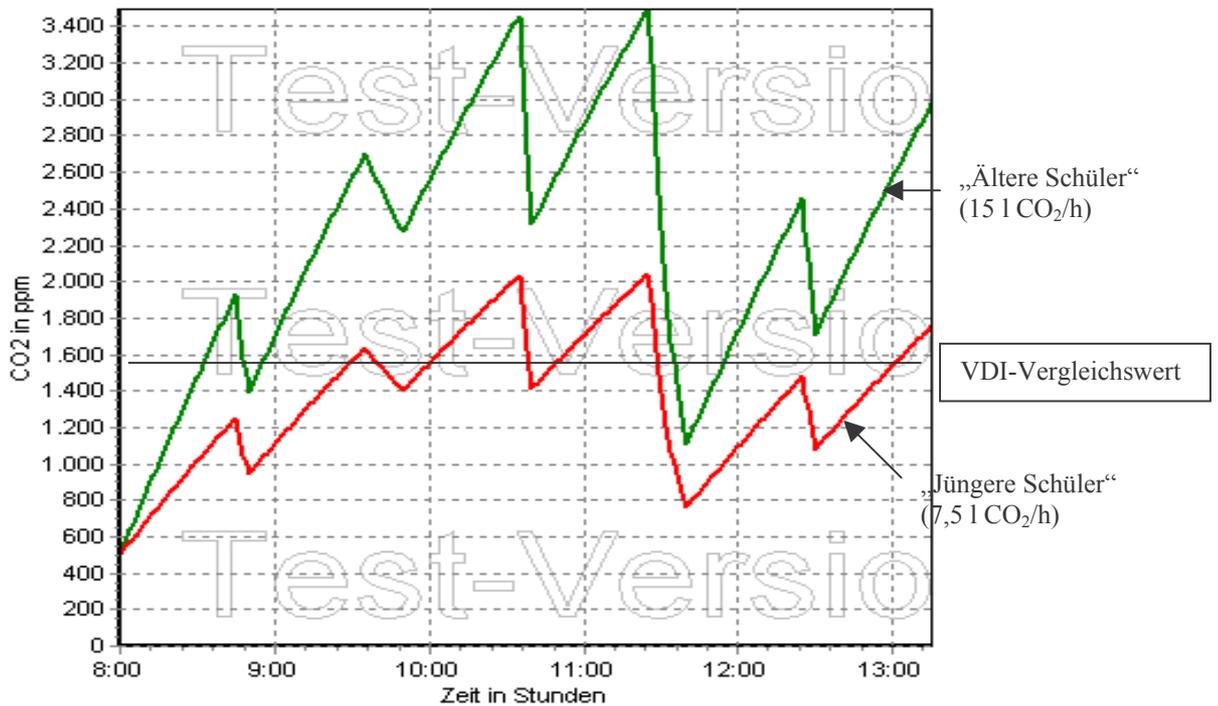
**Grafik 5:** Darstellung von Messwerten und Simulation in einem Büroraum (NLGA)

Die Raumbellegung beträgt üblicherweise 1 Person ( $37 \text{ m}^3$ ), der für diesen Tag bestimmte Luftwechsel ca.  $0,6/\text{h}$ ; die unterschiedliche Raumnutzung (Arbeitsgespräche, Pausenzeit und sonstige Abwesenheiten sowie Lüftung) wurden dokumentiert.



**Grafik 6:** Unterrichtsmodellierungen mit regelmäßiger Lüftung auch in den 5 Minuten-Pausen.

Personenzahl: 25 ( $7,2 \text{ m}^3/\text{Person}$ ); Luftwechsel:  $0,2/\text{h}$ ;  $\text{CO}_2$ -Abgaberate:  $15 \text{ l/h}$  („ältere Schüler“; obere Kurve) bzw.  $7,5 \text{ l/h}$  („jüngere Schüler“; untere Kurve); weitere Angaben s. S. 18



**Grafik 7:** Unterrichtsmodellierung mit unregelmäßiger Lüftung; die Modellparameter entsprechen Grafik 6, lediglich in einer großen Pause wird das Lüften „nachlässig“ durchgeführt

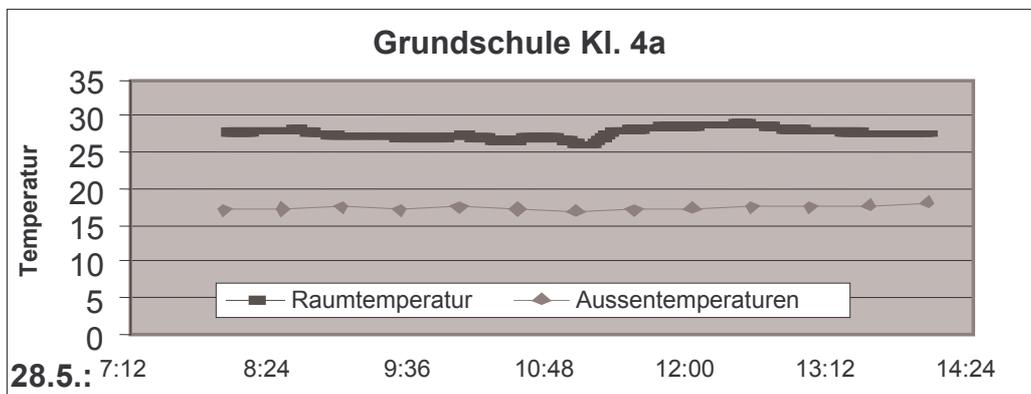
### 3.2 Temperaturmessungen

Die im Projekt ermittelten Temperaturmesswerte wurden mit Werten aus der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR, 1979) und - bei klimatisierten Räumen - mit Werten aus der DIN 1946-2 bzw. der VDI 6022-1 (VDI, 1998) verglichen. Die ASR gibt einen Temperaturrahmen von 19 ° Celsius bzw. 26 ° Celsius vor, der eingehalten werden sollte; die VDI 6022 legt einen Temperaturbereich von 22 ° Celsius +/- 1° Celsius fest und die DIN 1946-2 spricht von einer empfohlenen operativen Raumtemperatur“ von 22-25° C.

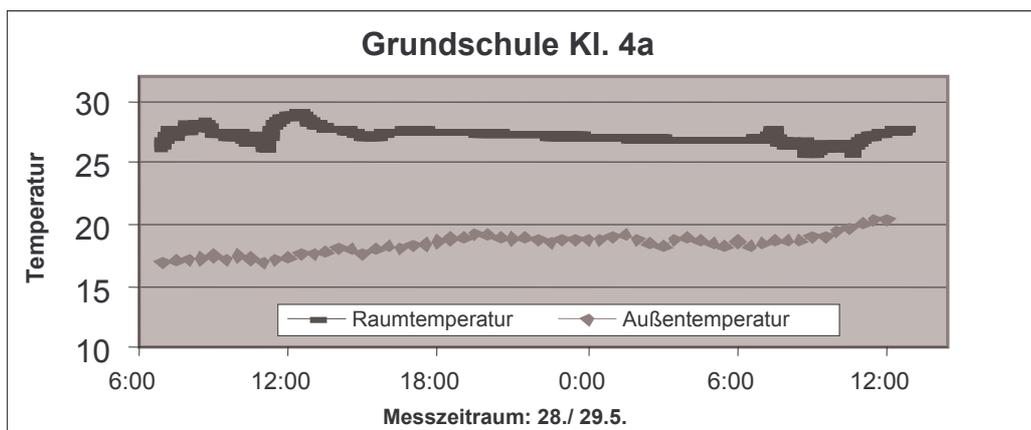
Die im Schulprojekt ermittelten Raumtemperaturen lagen im Winter im Mittel bei 20,9° C und im Sommer bei 22,9° C (s. Tab. 4).

#### 3.2.1 Temperaturmessungen in Klassen- und Fachräumen

Die folgenden Grafiken zeigen das Beispiel einer neu errichteten Grundschule ohne Sonnenschutzvorrichtungen an den Fenstern. Die Außentemperaturen waren im Messzeitraum relativ niedrig, die Innentemperaturen liegen auf und fallen auch über Nacht nur sehr zögerlich im Gebäude ab.



**Grafik 8:** Temperaturmessung in Räumen einer Grundschulklasse mit Fenster ohne Sonnenschutzvorrichtungen



**Grafik 9:** Temperaturmessung in Räumen einer Grundschulklasse mit Fenstern ohne Sonnenschutzvorrichtung, 2-Tages-Übersicht

### 3.2.2 Temperaturmessungen in künstlich belüfteten Räumen

Die Temperaturmessungen in künstlich belüfteten Seminarräumen zeigten keine auffälligen Werte.

### 3.3 Luftfeuchtemessungen

Die im Projekt ermittelten Luftfeuchtwerte wurden mit Werten aus der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR) und - bei klimatisierten Räumen - mit Werten aus der DIN 1946-2 bzw. der VDI 6022-1 verglichen.

Die ASR gibt folgenden Größen vor: Bei 20° C sollen 80% und bei 26° C 55% relative Feuchte nicht überschritten werden, ein unterer Wert wird nicht konkret benannt. Gemäß der ASR soll die relative Luftfeuchte 30% im Allgemeinen nicht unterschreiten, ein Absinken auf 20% sei kurzzeitig vertretbar.

In der DIN 1946-2 werden 65% relative Luftfeuchte als oberer Wert angegeben, eine feste untere Grenze wird nicht genannt; allerdings sollten 30% Luftfeuchtigkeit nur gelegentlich unterschritten werden. Die VDI 6022 gibt einen Wertebereich von 30 – 65 % Luftfeuchte vor; gelegentliche Unter- bzw. Überschreitungen gelten als tolerabel.

Die im Schulprojekt ermittelten mittleren Luftfeuchtwerte lagen im Winter bei 48,5 % und im Sommer bei 54,3 % (s. Tab. 4).

In Tabelle 6 sind Temperaturen von 0 – 25 °C aufgeführt sowie die dazugehörigen Angaben, welche absolute Luftfeuchte bei 10% ... 100% relative Luftfeuchte vorliegt.

Beispiel: Bei 0 °C und 90 % relativer Feuchte enthält die Luft 3,4 g Wasser/kg Luft. Steigt die Lufttemperatur auf 20 °C, ohne dass sich der absolute Wassergehalt ändert, so sinkt die relative Luftfeuchte auf ca. 25%.

Eine vergleichbare Situation, ist in Grafik 9 zu sehen: Hier wird kühle Außenluft, die eine relative Feuchte von ca. 90 % hat, angesaugt und durch die Erwärmung im Innenraum sinkt die relative Feuchte der Luft deutlich auf ca. 25% ab.

**Tabelle 7:** Wasserdampfgehalte in Luft

Luft-temp. [°C]	Wasserdampfgehalt in g/kg trockener Luft bei einer relativen Feuchte von:									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
+/- 0	0,4	0,8	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,0	3,4	3,8
+ 5	0,6	1,0	1,6	2,1	2,7	3,3	3,8	4,4	4,9	5,5
+ 10	0,7	1,5	2,3	3,0	3,8	4,6	5,3	6,1	6,8	7,6
+ 15	1,1	2,1	3,2	4,2	5,3	6,4	7,4	8,5	9,5	10,6
+ 20	1,4	2,9	4,3	5,8	7,2	8,6	10,1	11,5	13,0	14,4
+ 25	2,0	3,9	5,9	7,9	9,9	12,0	14,0	16,0	17,8	20,0

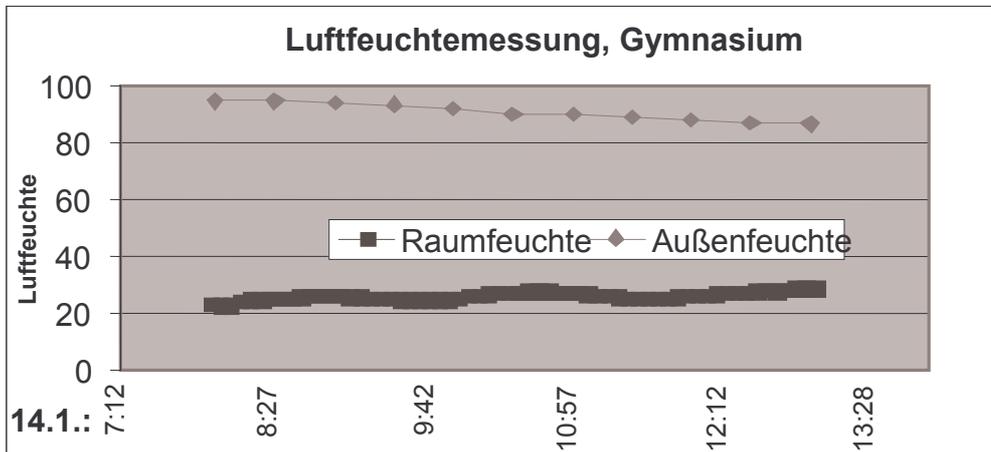
aus: „Kenngrößen zu Beurteilung raumklimatischer Parameter; LASI, 1999

#### 3.3.1 Luftfeuchtemessungen in Klassen- und Fachräumen

Die Luftfeuchtemessungen in Klassen- und Fachräumen zeigten keine auffälligen Werte.

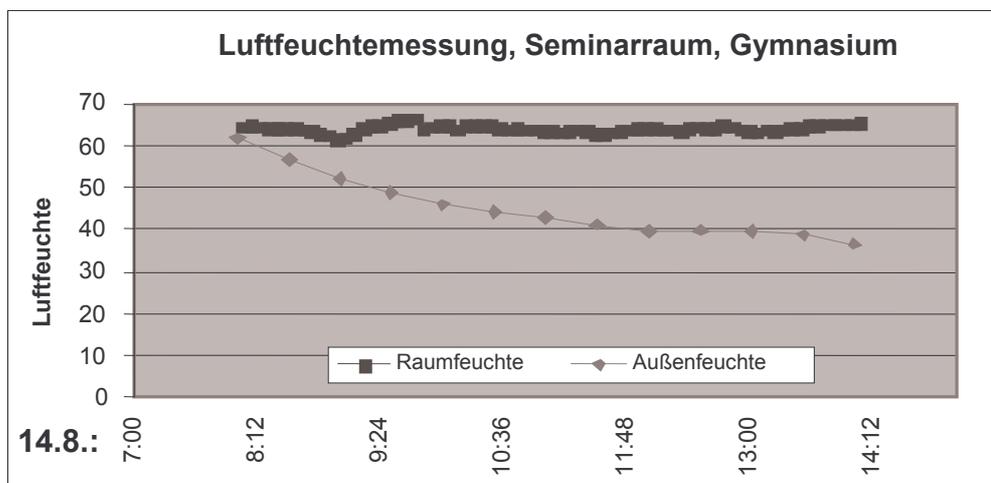
### 3.3.2 Luftfeuchtemessungen in künstlich belüfteten Räumen

Im folgenden ist ein Beispiel für eine Wintermessung in einem künstlich belüfteten Seminarraum dargestellt. Bei geringen Außentemperaturen im Unterrichtszeitraum (Mittelwert: ca. 1,5 Grad Celsius) und hoher relativer Außenluftfeuchte (Mittelwert: ca. 90%) ist die Innenraumluft im Messzeitraum durchgehend unter 30% relativer Feuchte!



**Grafik 10:** Winterliche Luftfeuchtemessung in einem künstlich belüfteten Seminarraum

Grafik 11 zeigt ein Beispiel für eine Sommermessung in einem künstlich belüfteten Seminarraum. Die relative Feuchte im Raum liegt weitgehend konstant bei ca. 65%. Die Vergleichswerte der Außenluft bewegen sich von 61% u. 22,5 °C (morgens) zu 36% und 29,5 °C (mittags). Die Konstanz der Innenraumwerte ist dadurch bedingt, dass die absoluten Außenfeuchtwerten weitgehend konstant bleiben; lediglich die relative Feuchte sinkt aufgrund des Temperaturanstiegs im Freien.



**Grafik 11:** Sommer-Klimamessung in einem künstlich belüfteten Seminarraum

### **3.4 Flächen- und Volumenbezug**

Parallel zu den Raumluf-Messungen wurden die Flächen- und Volumenmaße der Untersuchungsräume bestimmt und ins Verhältnis zu der Anzahl der anwesenden Personen gesetzt.

Die in den Unterrichtsräumen bestimmten Flächen/Person bewegten sich zwischen 1,8 – 3,3 m<sup>2</sup>/Person; die Raumvolumina/Person variierten von 5,9 – 12,6 m<sup>3</sup>/Person.

### **3.5 Weitere Ergebnisse**

Das Schulmessprogramm konnte auch vor Abschluss des Projektes bereits einige Impulse erzeugen. Hierbei handelte es sich um die Anschaffung von Messgeräten, die Schulen im Rahmen eines Leihverkehrs zur Verfügung gestellt werden können, sowie um die lose Vernetzung von unterschiedlichen Institutionen (Gemeindeunfallversicherung, Bezirksregierung, Gesundheitsämter, Gewerbeaufsichtsamt Hannover, NLGA, NLI) mit ihren verschiedenen Interessen an der Raumlufproblematik in Klassenräumen.

#### **3.5.1 Leihverkehr**

Durch die Projektpartner NLGA und NLI wurden ein CO<sub>2</sub>- und mehrere Temperatur-/ Feuchtemessgeräte angeschafft, die vom Schulbiologiezentrum Hannover verwaltet und verliehen werden. Darüberhinaus ist die Anschaffung von zwei weiteren CO<sub>2</sub>-Messgeräte durch die Gemeindeunfallversicherung geplant, die ebenfalls voraussichtlich durch das Schulbiologiezentrum für den Leihverkehr bereitgestellt würden.

#### **3.5.2 Vernetzung**

Im Rahmen eines Erfahrungsaustausches im NLGA wurden Zwischenergebnisse des Projektes vorgestellt sowie Fragen zum Thema Lüftung in Schulen mit Vertretern von Bezirksregierung, GUV, verschiedenen Gesundheitsämtern, Mitarbeitern der Gewerbeaufsicht Hannover, dem NLI sowie Mitarbeitern des NLGA diskutiert.

Es wurde deutlich, dass das Thema Lüften in Schulen eine Reihe Elemente enthält, deren Verzahnung über die Zuständigkeit und Kompetenz der Einzelinstitution hinausgeht. Als Beispiel seien hier die Bereiche Sicherheit, Gesundheit, Technik in Schulen und Organisation von Abläufen sowohl durch die Schulen als auch durch die Bezirksregierungen genannt.

Es wurde festgestellt, dass häufig schulrelevante Fragen unabhängig voneinander bearbeitet würden; der Erfahrungsaustausch wurde nicht zuletzt deshalb als hilfreich betrachtet, weil er die verschiedenen Gruppen, die mit dem Thema Schule und Lüftung in Schulen betraut sein können, zusammengebracht hat.

## 4) Diskussion

Der Schwerpunkt der folgenden Diskussion liegt auf den Ergebnissen der CO<sub>2</sub>-Messungen.

### 4.1 Statistische Auswertung der CO<sub>2</sub>-Daten

Die mittlere Raumbelastung bei den untersuchten Klassenräumen beträgt 2,9 m<sup>2</sup>/Schüler und liegt somit im Bereich der Flächenvorgaben der Schulbauhandreichungen (2 m<sup>2</sup>). Im Minimum beträgt die Fläche/Schüler nur 1,8 m<sup>2</sup>, womit die Vorgaben der Schulbauhandreichungen vereinzelt grenzwertig unterschritten werden. Wird als Vergleichsmaßstab zur Bewertung des Raumangebotes in Klassenräumen die Arbeitsstättenverordnung gewählt, die 12 m<sup>3</sup>/Arbeitnehmer und 10 m<sup>3</sup> für jede weitere im Raum anwesende Person festlegt, so ist eine regelmäßige Unterschreitung dieser Vergleichsgröße festzustellen. Der Mittelwert bei den untersuchten Schulen liegt bei 8,5 m<sup>3</sup>/Person mit Minimalwerten von 5,9 m<sup>3</sup>/Person und Maximalwerten von 12,6 m<sup>3</sup>/Person.

Die stärksten Zusammenhänge zur CO<sub>2</sub>-Konzentration wiesen in der Regressionsanalyse die Einflussgrößen Jahreszeit, Außentemperatur und Fensteralter auf.

Bereits der einfache Mittelwertvergleich hatte ergeben, dass die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration an den Messtagen im Winter um 886 ppm höher war als im Sommer. Von dieser Differenz erklärt das multivariate Regressionsmodell 441 ppm als reinen Effekt der Jahreszeit bei sonst gleichbleibenden Bedingungen. Hinzu kommt der Einfluss der Außentemperatur. Bei sinkender Außentemperatur ist pro °C ein durchschnittlicher Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration um 40 ppm zu beobachten (Tab. 5).

Dies entspricht der Erwartung, dass im Winter seltener und weniger intensiv gelüftet wird als im Sommer und somit höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen entstehen. Der zusätzliche Effekt der Außentemperatur lässt vermuten, dass auch innerhalb der Jahreszeiten Unterschiede bei der Lüftungsintensität existieren derart, dass bei niedrigerer Außentemperatur weniger intensiv gelüftet wird.

Die Beobachtung, dass die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen mit älteren Fenstern um ca. 544 ppm über der Konzentration in Räumen mit neueren Fenstern liegt, widerspricht der Vermutung, dass bei älteren Fenstern aufgrund der Fugenlüftung die CO<sub>2</sub>-Konzentration niedriger ist (Wegner, 1983). Hierfür sind mehrere Erklärungen denkbar:

1) In den älteren Schulgebäuden lassen sich die Fenster konstruktiv bedingt häufig nicht über die gesamte Fensterfläche öffnen. Es finden sich z.B. gegenläufige Schiebekonstruktionen, die bei der Öffnung eines „Halbfensters“ die angrenzende Hälfte überdecken. Häufig sind Sicherungen an den Fenstern vorhanden, die z.T. nur ein Kippen der Fenster ermöglichen.

2) Zwei der drei untersuchten Schulen mit neueren Fenstern waren Grundschulen, die in neueren Gebäuden untergebracht waren. Darin liegt auch die hohe Korrelation zwischen den drei Einflussgrößen Fensteralter, Gebäudealter und Schüleralter begründet. Das durchschnittliche Atemvolumen ist altersabhängig, so dass in den Grundschulklassen deutlich weniger CO<sub>2</sub>/(Stunde\*Person) produziert wird. Die mittlere Atemrate und somit die CO<sub>2</sub>-Produktion unterscheidet sich zwischen 6jährigen und 20jährigen Schülern um den Faktor 2,4 (Forschner und Koss, 1997).

3) Einzelne, aber nicht repräsentative Beobachtungen ergaben, dass in den Grundschulen häufiger die Klassentür geöffnet wird, wodurch sich ebenfalls eine Verbesserung der Lüftungssituation ergibt.

Um die problematische Korrelation zwischen den Einflussgrößen Fensteralter, Gebäudealter und Schüleralter zu eliminieren, sollte bei einer eventuellen Weiterführung der Messreihe darauf geachtet werden, dass die Stichprobe vorrangig um Grundschulen in alten Gebäuden oder Sekundarstufen in neuen Gebäuden ergänzt wird.

#### **4.2 Physikalische Haupteinflußfaktoren auf CO<sub>2</sub> in Unterrichtsräumen**

Bei der Diskussion der CO<sub>2</sub>-Messwerte ist zunächst zwischen den fensterbelüfteten Klassenräumen und den Unterrichtsräumen zu unterscheiden, die ausschließlich durch Klimatechnik belüftet werden. Während bei letzteren durch kontinuierliche Be- und Entlüftung eine CO<sub>2</sub>-Gleichgewichtskonzentration eingestellt werden kann, die sich idealerweise an der DIN 1946-2 orientiert, ist bei den fensterbelüfteten Klassenräumen – vor allem bei kühler Außenwitterung – verstärkt eine diskontinuierliche Lüftungssituation gegeben. Diese bedingt ein Ansteigen der CO<sub>2</sub>-Werte im Unterricht und ein m.o.w. starkes Absenken der CO<sub>2</sub>-Werte in den Pausen durch Reduzierung der Klassenbelegung und verstärktes Lüften.

Zu diskutieren ist nun, welche physikalischen Haupteinflußfaktoren auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration in fensterbelüfteten Klassenräumen vorliegen. Wie lassen sich darüberhinaus die Unterschiede zwischen physikalischer Modellvorstellung und statistischer Analyse, die zum Teil erkennbar werden, erklären?

Als physikalische Haupteinflußfaktoren auf die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in fensterbelüfteten Klassenräumen lassen sich folgende Größen benennen (Froelich, 1980; Rigos, 1981; Wegner, 1984; Schulze et. al, 1994; Schumann, 1994; Forscher und Koos, 1997; VDI 4300/7, 1999; Raatschen, 1999).

- a) Raumebelegung (Raumvolumen/Person)
- b) Lüftungsdauer (Vor Unterrichtsbeginn und in den Pausen)
- c) Luftwechsel durch Fugendichtigkeit von Fenster u. Türen im geschlossenen Zustand
- d) Alter der Schüler

##### a) Belegungszahlen (Raumvolumen/Schüler)

Für die Raumebelegung, bei der aus physikalischer Sicht ein positiver Zusammenhang zwischen Personenzahl/m<sup>3</sup> und CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erwarten ist, zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang. Da die Lüftungsintensität, wie gezeigt werden konnte, im wesentlichen durch den Außentemperaturverlauf gesteuert wird, kommt es vermutlich zu einer Überlagerung des Faktors Belegungszahl durch das Lüftungsverhalten.

Der Einfluß der Raumebelegung durch Schüler unterschiedlichen Alters ist in Grafik 5 dargestellt. Grafik 5 zeigt zwei simulierte Raumnutzungen, die sich ausschließlich in der CO<sub>2</sub>-Produktion/ Schüler unterscheiden. Bei der Annahme einer CO<sub>2</sub>-Produktion von 15 l CO<sub>2</sub>/h (ältere Schüler) ist nach ca. 30 min. der DIN-Wert überschritten und wird im Laufe der Simulation nur noch kurzzeitig unterschritten; die CO<sub>2</sub>-Spitzen liegen bei ca. 2.800 ppm. Bei Annahme einer CO<sub>2</sub>-Produktion von 7,5 l CO<sub>2</sub>/h (jüngere Schüler) unter sonst gleichen Voraussetzungen übersteigen die

CO<sub>2</sub>-Werte nur jeweils kurzzeitig den DIN-Wert und erreichen Maxima von ca. 1.600 ppm.

Die Zusammenhänge zwischen CO<sub>2</sub>-Quellen und –Senken in Unterrichtsräumen, wie sie in Grafik 5 dargestellt sind, sind in der Literatur mehrfach beschrieben. Bei den durchgeführten Messungen ist auch häufiger zu sehen, dass die CO<sub>2</sub>-Werte im Unterricht zum Teil schon nach wenigen Minuten die Vergleichswerte von 1.000 ppm („Pettenkofer-Zahl“) oder auch von 1.500 ppm („DIN-Wert“) übersteigen. Hier sei beispielhaft auf Grafik 1 verwiesen.

Es wird deutlich, dass die statischen Vorgaben der Schulbauhandreichung, die unabhängig vom Schüleralter eine Raumbelastung von 2m<sup>2</sup>/Schüler (bei Flächenbezug) bzw. ca. 6 m<sup>3</sup>/Schüler (bei Volumenbezug) vorgeben, den physikalischen (physiologischen) Gegebenheiten nicht ausreichend gerecht werden.

#### b) Lüftungsverhalten (vor Unterrichtsbeginn und in den Pausen)

Die Lüftungsdauer, bei der ein negativer Zusammenhang zwischen Dauer der Lüftung und CO<sub>2</sub>-Konzentration erwartet wird, konnte im Rahmen der Untersuchung nicht regelmäßig erfasst und somit statistisch nicht ausgewertet werden.

Das Lüftungsverhalten während des Unterrichtes wird von unterschiedlichen, nicht normierbaren Größen wie Außenlärm und Witterungsverhältnissen (Jahreszeit) in Verbindung mit der jeweiligen Arbeitssituation im Unterrichtsraum bestimmt und ist somit von außen kaum beeinflussbar. Diese Beschränkungen entfallen weitgehend in den Pausen, so daß diese für die Lüftung der Unterrichtsräume genutzt werden können.

Erfolgt in den Pausen eine mangelhafte Lüftung oder unterbleibt diese, so kommt es zu einer ungenügenden Abfuhr von CO<sub>2</sub>, das sich im Verlaufe des Unterrichtes im Unterrichtsraum aufkonzentriert. Die folgende Unterrichtsstunde wird dann von einem erhöhten CO<sub>2</sub>-Level (d.h. „verschlechterter“ Luft) begonnen, in der natürlich wiederum CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Setzt sich die unzureichende Lüftung über einen längeren Zeitraum fort, so können bei längerem Unterricht CO<sub>2</sub>-Konzentrationen entstehen, die deutlich über den DIN-Vergleichswerten liegen (s. Grafik 1).

Weiter wurde aus den Untersuchungen ersichtlich, dass die Raumluftsituation durch Schüler und Schülergruppen, die sich z.T. vor Unterrichtsbeginn oder in Freistunden in Klassenräumen aufhalten, beeinträchtigt wird. Wird nicht vor Unterrichtsbeginn gelüftet, liegen bereits zum Unterrichtsbeginn erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vor. Erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu Unterrichtsbeginn können auch vorliegen, wenn weder nach Unterrichtsende eines Schultages noch am folgenden Morgen vor Unterrichtsbeginn gelüftet wird. Letzteres gilt in erhöhtem Maße für dicht schließende Räume bzw. Gebäude mit dicht schließender Gebäudehülle.

#### c) Luftwechselraten (Fugendichtigkeit von Türen und Fenstern)

Die Zahl der bestimmten Luftwechselraten war für eine statistische Auswertung zu gering. Bei der Auswertung der Variable Fensteralter zeigte sich aber statistisch signifikant eine CO<sub>2</sub>-Erhöhung bei Räumen mit älteren Fenstern, ein Zusammenhang, der entgegengesetzt der physikalischen Erwartungen ausfällt. Eine Interpretation dieses Ergebnisses ist unter Kapitel 4.1 nachzulesen.

Mit zunehmender Gebäude-/Raumisolierung reduziert sich die Frischluftzufuhr durch Fugenlüftung. Für den Baubereich wurden eine Reihe Vorschriften entwickelt, die Mindeststandards für die Fugendichtigkeit von Türen und Fenstern festschreiben und die primär energetische Aspekte berücksichtigen (z.B. die „Wärmeschutzverordnung“, die „Umweltrichtlinien öffentliches Auftragswesen“, oder die „Energieeinsparverordnung“).

Es ist zu befürchten, dass die angestrebte Energieeinsparung durch die energetisch effektive Bauweise durch verstärkte, unregelmäßige Lüftung unterlaufen wird. Dies kann zwar nicht durch das Messprogramm belegt werden, lässt sich aber aus Gesprächen und Beobachtungen schlussfolgern.

#### d) Schüleralter

Wie bereits mehrfach ausgeführt, erhöht sich das Atemvolumen und somit die CO<sub>2</sub>-Freisetzung mit zunehmendem Alter. Im Rahmen der statistischen Untersuchung konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden. Es sei in diesem Zusammenhang nochmals auf die Schulbauhandreichungen verwiesen, die mindestens 2 m<sup>2</sup>/ Schüler unabhängig vom Schüleralter vorgeben, was der Erhöhung der Atemrate mit zunehmendem Schüleralter nicht gerecht wird.

**Künstlich belüftete Seminarräume:** Es war nicht Ziel der Untersuchung, den ordnungsgemäßen Zustand der Klimatechnik in den Schulen zu untersuchen. Allerdings entstanden nach den Begehungen der untersuchten Schulen, in denen Klimatechnik eingesetzt wird, Zweifel am regelrechten Betrieb der Anlagen gemäß der einschlägigen DIN und VDI-Normen.

In den beiden Schulen mit Klimatechnik, in denen im Rahmen des Messprogrammes Untersuchungen durchgeführt wurden, erfolgte die Frischluftansaugung nicht durch einen frei stehenden Ansaugschacht, sondern – abweichend von der DIN 1946-2 - durch Ansaugöffnungen, die jeweils im Keller am Schulgebäude angebracht waren. Es konnte nicht geklärt werden, ob die Frischluftmengen, die bei Konzeptionierung der Anlagen zugrundegelegt worden waren, noch angesaugt und den belüfteten Räumen zur Verfügung gestellt werden.

In einer Schule wurde bis zur Durchführung der ersten Messung die Klimaanlage aus Energiespargründen mittels Zeitschaltuhr ausschließlich während des Unterrichtes betrieben und in den Pausen ausgestellt (s. Grafik 2). Durch die Messungen in der Schule angeregt, wurde die Anlage überprüft und festgestellt, dass die Luft nicht in den Raum hinein sondern aus dem Raum hinausgesaugt wurde. Nachdem dies korrigiert und ein Dauerbetrieb der Anlage während des Unterrichtes (inklusive Pausen) aufgenommen wurde, kam es subjektiv zu einer deutlichen Verbesserung der Raumluft.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Bei den Messungen in den Seminarräumen ließen sich keine auffälligen CO<sub>2</sub>-Werte feststellen, allerdings waren die Belegungszahlen während der Messungen jeweils relativ gering.

### 4.3 Temperatur

**Fensterbelüftete Klassenräume:** Die Raumtemperaturen in fensterbelüfteten Klassenräumen werden im Winter im Wesentlichen durch die Intensität des Heizens und im Sommer durch Außentemperaturverhältnisse und die Strahlungsintensität des Sonnenlichtes bestimmt.

Die Messergebnisse des Schulprojektes ergaben für den Sommer mittlere Innenraumtemperaturen von 22,9° C, für den Winter von 20,9° C. Bei Betrachtung des 95%-Perzentils lagen die Sommertemperaturen bei 24,1° C in den Klassenräumen und im Winter bei 22,5° C. Die Temperaturen waren somit überwiegend unauffällig und bewegen sich in den meisten untersuchten Klassen im Rahmen der Werte der Arbeitsstättenverordnung, die Temperaturen zwischen 19° und 26° C toleriert.

Auffällig hohe Temperaturen ließen sich bei zwei Grundschulen in Hannover messen, bei denen der Sonnenschutz in einem Fall unzureichend und in der zweiten Schule fehlend war.

In der letzteren Grundschule konnte ganztägig unreguliert Licht durch die großzügige Verglasung in die Räume fallen. Auch bei relativ niedrigen Außentemperaturen konnten sich bei hoher Strahlungsintensität sehr hohe Innenraumtemperaturen entwickeln (s. Grafik 7 und 8).

In der zweiten Grundschule waren der Kantinenbereich und die westlich gelegenen Klassenräume ohne Lichtschutz. Im Kantinenbereich traten im Messzeitraum Temperaturen von über 30° C auf (bei Außentemperaturen von ca. 20° C). Die Klassenräume erhitzen sich bei Sonneneinstrahlung nachmittags, wenn sie nicht für den regulären Schulunterricht genutzt wurden. Die starke Aufheizung führte an den auf Sonnentage folgenden Schultagen z.T. zu sehr warmen Klassenräumen.

Die beiden angeführten Grundschulen sind Neubauten mit großen Glasflächen, die eine schnelle Aufheizung des Gebäudeinnern ermöglichen und mit einer Gebäudehülle, die Energieverluste minimiert, so daß die hohen Innentemperaturen auch bei sinkenden Außentemperaturen über längere Zeit „gespeichert“ werden.

**Künstlich belüftete Seminarräume:** Die Temperaturverläufe in künstlich belüfteten Räumen werden vor allem im Winter durch die Klimatechnik und die Gebäudetemperatur fortlaufend bestimmt und waren bei den Messungen unauffällig.

### 4.4 Luftfeuchte

**Fensterbelüftete Klassenräume:** Die Luftfeuchtigkeit in fensterbelüfteten Unterrichtsräumen ist im Sommer primär von den Außenklimaverhältnissen abhängig und im Winter von der Kombination aus Innenraumtemperatur und Außenluftfeuchte.

Die im Messzeitraum aufgezeichneten Luftfeuchtwerte lagen im Winter im Mittel bei 48,5 % relativer Feuchte und im Sommer im Mittel bei 54,3% rel. Feuchte. Die 95%-Perzentile lagen im Winter bei 53,2 % und im Sommer bei 58,1 %. Im Vergleich mit der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR), die einen oberen Luftfeuchtwert von 80 % vorschlägt (ein unterer wird nicht als feste Größe vorgeschlagen, jedoch sollen Werte unter 30% nicht längerfristig auftreten) waren die Luftfeuchtwerte der Klassenräume unauffällig.

**Künstlich belüftete Seminarräume:** Die Luftfeuchtemessungen in den fensterlosen, mit Klimatechnik belüfteten Seminarräumen ohne Luftbefeuchtung zeigten im Winter Auffälligkeiten.

Bei kühler Außenwitterung im Winter ließen sich z.T. mehrtägig Luftfeuchtwerte von 30% und weniger registrieren (s. Grafik 9).

Die weitgehende Konstanz der Innenraumfeuchte ließ sich auch in einer Sommermessung finden. In einer sommerlichen Luftfeuchtemessung in einem künstlich belüfteten Seminarraum waren über einen Zeitraum von ca. 2 Tagen relativ konstante Luftfeuchtwerte von ca. 60-65% zu messen (Grafik 10).

Weitgehend konstante Innenraumfeuchten ergeben sich – soweit die absolute Luftfeuchte im Freien einigermaßen konstant ist – daraus, dass die angesaugte Luft in einen Raum verbracht wird, der relativ konstante Temperaturverhältnisse aufweist.

## 5) Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Rahmen eines einjährigen Messprojektes an 7 niedersächsischen Schulen wurden CO<sub>2</sub>, Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit in Unterrichtsräumen gemessen.

Das Projekt ergab folgende Ergebnisse:

- Die Lüftung von Klassenräumen ist witterungsabhängig und erfolgt nicht regelmäßig.
- Es ließ sich ein Zusammenhang zwischen Schüleralter und der CO<sub>2</sub>-Freisetzung finden.
- Es wurde ein Rechnermodell entwickelt, mit dem der Einfluss der Klassenbelegung (Personen/m<sup>3</sup>) auf die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen modellhaft dargestellt wird.
- Es konnte ein 3-stufiges Luftgüteschema zum Vergleich der erhobenen Messdaten entwickelt werden.

Um Schulen in die Lage zu versetzen, eigene, gesundheitsorientierte Messungen durchführen zu können wurden Messgeräte beschafft. Diese Messgeräte können über das Schulbiologiezentrum Hannover von Schulen ausgeliehen werden. Die Messungen sollten nach einem vergleichbaren Schema durchgeführt und die Daten dem NLGA zur Verfügung gestellt werden. Über die verbesserte Datenlage kann so in Zukunft ein differenzierteres Bild von den Lüftungsproblemen in Schulen gezeichnet und es können angemessenere Lösungsvorschläge erarbeitet werden.

Mit dem entwickelten Rechenmodell lassen sich Klassenraumnutzungen simulieren und die CO<sub>2</sub>-Situation in der Klasse anschaulich darstellen. Es ist geplant, diese Software weiter zu validieren, für Unterrichtszwecke anzupassen und Schulen zur Verfügung zu stellen.

Es konnte über einen Erfahrungsaustausch ein zunächst noch loses Netzwerk von Vertretern verschiedener öffentlicher Einrichtungen geknüpft werden, die aus jeweils unterschiedlichen Perspektiven mit den Aspekten Lüftung und Raumklima in Schulen betraut sind. Dieses Netzwerk soll für die weitere Arbeit gepflegt werden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass für alle 3 Messparameter Defizite festgestellt werden konnten. Es ist zu vermuten, dass die Defizite, die im Rahmen der Messreihe festgestellt wurden, nicht auf die untersuchten Schulen beschränkt sind. Defizite in Lüftung oder Raumklima können Ursache von Befindlichkeitsstörungen und aufwendigen Messprogrammen sein (Kimmel et. al., 2000). Diese Probleme können durch die nachfolgend aufgeführten Empfehlungen vermieden oder aber zumindest reduziert werden.

### Allgemeine Empfehlung:

Alle niedersächsischen Schulen sollten nach einem möglichst vergleichbaren Schema begangen werden, um den Gebäudezustand zu erfassen und mögliche Mängel zu dokumentieren. Diese Dokumentationen sollten in den Schulen aufbewahrt und in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden.

Umfang und Aufbau des Begehungsschema, das so aufgebaut sein sollte, dass es möglichst auch von geschulten Laien genutzt werden kann, sollte von Vertretern von Bau-, Gesundheits- und Schulverwaltung festgelegt und z.B. von Sicherheitsfachkräften in Schulen eingeführt und koordiniert werden. Durch einen modularen Aufbau des Begehungs-Schemas könnte die Arbeit innerhalb der Schulen aufgeteilt und delegiert werden.

### **Empfehlungen zum Bereich Kohlendioxid:**

Zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in fensterbelüfteten Unterrichtsräumen werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- a) Entwicklung und Aufbau eines von den Schulen selbst organisierten Lüftungsdienstes. Es sollte vor Unterrichtsbeginn und möglichst in allen Pausen gelüftet werden. Auf das Lüften ist außerdem zu achten, wenn sich Schüler in den Pausen oder in Freistunden vor dem Unterricht in Klassenräumen aufhalten. Lüftungsdienste sind vermutlich neue Arbeitsabläufe, die in den meisten Schulen neu eingeführt werden müssten. Dies kann nur unter Berücksichtigung von schul- und altersspezifischen Aspekten realisiert werden. Zum Beispiel liegen auch in Schulklassen – wie in Büros – Papiere lose auf Tischen oder es sind Bastelarbeiten an Decken und Wänden befestigt, so dass z.B. „Durchzug“ i.d.R. zu vermeiden sein dürfte.
- b) Senkung der Belegungszahlen der Klassen und Berücksichtigung des Alters der Schüler. Dies kann in mehreren Stufen erfolgen
  - kurzfristig, indem soweit möglich bei der schulinternen Raumplanung Personenbelegung und Schüleralter stärker berücksichtigt wird. Das Atemvolumen und damit die CO<sub>2</sub>-Freisetzung ist altersabhängig und differiert zwischen 6-jährigen und 20-jährigen ca. um den Faktor 2,4.
  - mittel- und langfristig, indem das verfügbare Raumvolumen/Person in den Klassenräumen erhöht wird.
- c) Berücksichtigung des Lüftungsaspektes beim Einbau von Fenstern bzw. Fenstersicherungen, so dass eine ausreichende Lüftung von Klassenräumen möglich ist.
- d) Die Minimierung des Luftwechsels erfolgt zur Zeit ausschließlich unter energetischen Aspekten. Neben der Beachtung regelmäßiger Raumlüftung ist auch die Einhaltung eines Mindestluftwechsels für Räume zu fordern, wie er z.T. auch in Bauvorschriften wie der DIN 4108 („Wärmeschutz im Hochbau“) vorgeschrieben wird.
- e) Analog zur DIN 1946-6 („Lüftung von Wohnungen“) könnte eine DIN-Vorschrift für die Lüftung von Schulen entwickelt werden.

### **Empfehlungen zum Bereich Raumtemperatur:**

Zur Verbesserung der Situation wird folgendes vorgeschlagen: Die Schulen sollten darauf hingewiesen werden, dass Sonnenschutz ein notwendiger Raumbestandteil bei Räumen mit Fenstern ist. Der Zustand bzw. Mängel sollten für jede Schule dokumentiert und wenn nötig an die zuständigen Stellen gemeldet werden.

### **Empfehlungen zur relativen Luftfeuchte:**

Auffälligkeiten wurden bei den Luftfeuchtemessungen ausschließlich in fensterlosen, künstlich belüfteten Seminarräumen gemessen. Zur Verbesserung der Situation wird folgendes vorgeschlagen:

- Bei Schulneubauten Verzicht auf innenliegende Unterrichtsräume, die künstlich belüftet werden müssen.
- Erstellung von gestuften Nutzungsempfehlungen für Seminarräume (z.B. Beschränkung der maximalen Unterrichtszeit für Schüler oder Lehrer in künstlich belüfteten Seminarräumen bei Unterschreitung einer festzulegenden Mindestfeuchte) .

## 6) Literatur

- E. Rigos; „CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Klassenzimmer“; Umschau (1981) Heft 6
- S. Forschner, G. Koss; „Beurteilung und Erfordernisse der natürlichen Raumlüftung“; Gesundheitswesen 59 (1997) 577-582
- H.-D. Schulze, F. Rudloff, G. Schuschke; „Lüftungsprobleme in Wohnungen und Schulen in den neuen Bundesländern“; VDI-Bericht Nr. 1122 (1994) 889-898
- M. Schumann; „Kohlendioxid in Innenräumen“, VDI-Bericht Nr. 1122 (1994) 253-268
- Kimmel et.al; „Mangelhafte Lüftung als Auslöser von Befindlichkeitsstörungen in einer Grundschule“, Gesundheitswesen 2000; 62; 660-664
- E. Lahmann, K.-E. Prescher, R. Lacombe; „Kohlenstoffdioxid in atmosphärischer Luft“, Bundesgesundhbl. 2/91; 58-60
- S. Beilke, K. Uhse; „ Jahresbericht 1999 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes“, UBA-Texte 58/00
- J. Wegner; „Schadstoffanfall, Luftwechsel in Wohnungen, freie Lüftung“, Gesundheits-Ingenieur 105 (1984) Heft 3
- J. Wegner; „Untersuchungen des natürlichen Luftwechsels in ausgeführten Wohnungen, die mit sehr fugendichten Fenstern ausgestattet sind“, Gesundheits-Ingenieur 104 (1983) Heft 1
- H. Froelich, Fenster und Fassade „Wohnraumbelüftung aus Gründen der Raumhygiene, des Tauwasserschutzes und des Betriebes von Feuerstätten“, 3/80
- W. Raatschen; „Luftwechsellmessungen nach ISO/CD 12569 und nach VDI 4300 Blatt 7“, VDI-Bericht 1443 (1999) 347-359
- Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL); „VDI 4300/7, Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen Entwurf 10/99
- Kömmerling, DIN 4108 zitiert in „Raumlüftung“, 7/99
- Länderausschuß für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI); „Kenngrößen zur Beurteilung raumklimatischer Grundparameter“, 1999
- „DIN 1946-2“ Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1994
- „VDI 6022, Hygienische Anforderungen an Raumlüfttechnische Anlagen Büro- und Versammlungsräume“, 7/98“
- „Schulbauhandreichungen“ nach dem Erlaß des MK vom 18.08.1988
- Verordnung über Arbeitsstätten, 3/75
- Arbeitsstätten-Richtlinie, 10/79

## **7) Anhang**

### **Anhang 1: Lehrerinformation und Stundenübersicht (folgende Seite)**

#### **Information zur Messung:**

Die Messung läuft in der Regel über einen Zeitraum von etwa 2 Schultagen in Ihrem Klassenraum. Bei den Messgeräten handelt es sich um elektronische Messgeräte, die Lufttemperatur, Luftfeuchte und Kohlendioxid messen und die Messwerte automatisch speichern.

Temperatur und Luftfeuchte geben Auskunft über die Behaglichkeit des Raumklimas, die gemessene Kohlendioxidkonzentration ist ein Hilfsmittel zur Beurteilung, wie „verbraucht“ die Luft ist.

Die Messungen werden durchgeführt, um einen Überblick über die Luftqualität in Schulen im Sommer- und im Winterhalbjahr zu erhalten.

#### **Bitte an die Lehrer:**

Die Anwesenheit der Messinstrumente sollte das Lüftungsverhalten insgesamt nur wenig beeinflussen.

Wenn möglich sollten allerdings folgende Punkte beachtet werden:

- Vor Unterrichtsbeginn bitte die Klasse gut durchlüften.
- Für die letzte Unterrichtsstunde des Tages die Fenster und die Klassentür geschlossen halten und nach Unterrichtsende die Klasse bitte zügig verlassen (aus Sicherheitsgründen möglichst verschließen).

Zur sinnvollen Auswertung der Messungen bitte wir abschließend noch um das Ausfüllen des beigefügten Formulars!

Vielen Dank



Messung von Kohlendioxid, Luftfeuchte und Lufttemperaturen  
in niedersächsischen Schulen

Klasse:

Etage:

Raum-Nr.:

Datum	Std.	Uhrzeit	Klasse	Anwesende Personenzahl ...	Mittleres Schüleralter	Lehrer/in
				<i>während der Messung</i>	<i>üblicherweise anwesend</i>	
	1					
	2					
	Pause					
	3					
	4					
	Pause					
	5					
	6					

Datum	Std.	Uhrzeit	Klasse	Anwesende Personenzahl ...	Mittleres Schüleralter	Lehrer/in
				<i>während der Messung</i>	<i>üblicherweise anwesend</i>	
	1					
	2					
	Pause					
	3					
	4					
	Pause					
	5					
	6					

## Anhang 2: Luftwechselzahlen in Klassenräumen

Schule, Klasse	Messdatum	Luftwechsel, „ältere“ Schüler (1/h)	Luftwechsel, Grund- schulen (1/h)	mittlere Wind- geschw. im Messzeitraum (m/sec)	Gebäudeinformationen
RBG, 5. Klasse	18.9.	0,06		3,3	Anfang der 70er Jahre gebaut, alte Fenster
Glü, 1. Klasse	31.11.		0,06	3,7	ca. 1998 gebaut
Glü, 3. Klasse	1.-2.6.		0,07	3,8	ca. 1998 gebaut
K-Sch, 10. Klasse	15./16.1.	0,08		5,2	50er Jahre gebaut, ältere Fenster
Glü, 3. Klasse	30.5.		0,11	2,2	ca. 1998 gebaut
Ber, 8. Klasse	15.11.	0,1		5,9	Anfang der 70er Jahre gebaut, alte Fenster
K-Sch, 9. Klasse	14.6.	0,1		3,4	70er Jahre gebaut, ältere Fenster
RBG, 11. Klasse	18.9.	0,2		2,9	Anfang der 70er Jahre, alte Fenster, Kl. 11
Ber, 8. Klasse	15.11.	0,2		5,9	Anfang der 70er Jahre gebaut, alte Fenster
K-Sch, 9. Klasse	14.6.	0,2		3,7	50er Jahre gebaut, ältere Fenster
K-Sch, 7. Klasse	17.1.	0,2		5,3	70er Jahre gebaut, ältere Fenster
RBG, 10. Klasse	21.9.	0,4		4,6	Anfang der 70er Jahre gebaut, alte Fenster,
Sophi, 7. Klasse	19.12.	0,4		7,8	Ca. Beginn 20. Jahrhundert gebaut; ältere Fenster

### **Anhang 3: Liste der Grafiken**

<b>Grafik 1:</b> CO <sub>2</sub> -Messung in einer 5. Klasse; Unterrichtsdauer von 9.50 Uhr – 15.45 Uhr; W = Stundenwechsel; 5-min-Pause; P = Pause (15 bzw. 55 min); I = Intervention d.h. Bitte Fenster ab jetzt geschlossen zu halten.....	8
<b>Grafik 2:</b> Überschreitungsmittelwert (in ppm) vs. Überschreitungshäufigkeit (in %) der 39 von 58 Messtagen (67 %), an denen DIN-Wert-Überschreitungen auftraten. Die Kurve „Referenzgrenze“ grenzt den Bereich unzureichender Luftgüte von dem Bereich „zufriedenstellender“ Luftgüte ab.....	10
<b>Grafik 3:</b> CO <sub>2</sub> -Messungen in einem künstlich belüfteten Seminarraum .....	11
<b>Grafik 4:</b> Darstellung von Messwerten und Simulation der Messwerte. ....	18
<b>Grafik 5:</b> Darstellung von Messwerten und Simulation in einem Büroraum (NLGA) .....	18
<b>Grafik 6:</b> Unterrichtsmodellierungen mit regelmäßiger Lüftung auch in den 5 Minuten-Pausen. ....	19
<b>Grafik 7:</b> Unterrichtsmodellierung mit unregelmäßiger Lüftung; die Modellparameter entsprechen Grafik 5, lediglich in einer großen Pause wird das Lüften „nachlässig“ durchgeführt.....	19
<b>Grafik 8:</b> Temperaturmessung in Räumen einer Grundschulklasse mit Fenster ohne Sonnenschutzvorrichtungen.....	20
<b>Grafik 9:</b> Temperaturmessung in Räumen einer Grundschulklasse mit Fenstern ohne Sonnenschutzvorrichtung, 2-Tages-Übersicht .....	20
<b>Grafik 10:</b> Winterliche Luftfeuchtemessung in einem künstlich belüfteten Seminarraum.....	22
<b>Grafik 11:</b> Sommer-Klimamessung in einem künstlich belüfteten Seminarraum.....	22

### **Anhang 4: Tabellenübersicht**

<b>Tabelle 1:</b> Zahl der durchgeführten Messtage in den beprobten Schulen.....	6
<b>Tabelle 2:</b> Darstellung der CO <sub>2</sub> -Messwerte in 2 Kategorien.....	8
<b>Tabelle 3:</b> Mittelwerte und 95%-Perzentile der Innenraum-Messwerte CO <sub>2</sub> -, Temperatur- und Luftfeuchte .....	12
<b>Tabelle 4:</b> Mittelwert, Minimum und Maximum der Raumbelastung der untersuchten Klassen (n=58).....	12
<b>Tabelle 5:</b> Ergebnisse der uni- und multivariaten Regressionsanalysen, für alle Messtage. ....	14

<b>Tabelle 6:</b> Ergebnisse der uni- und multivariaten Regressionsanalysen, unterteilt für Winter- und Sommer-Messtage.....	<b>15</b>
<b>Tabelle 7:</b> Wasserdampfgehalte in Luft.....	<b>21</b>

## Anhang 5: Beschreibung der Luftwechsel-Modellsoftware

### Simulationsprogramm zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Innenraumluft

Die Masse eines Stoffes und bei konstantem Raumvolumen auch dessen Konzentration (= Masse pro Volumen) sind – wie aus der Physik bekannt ist – Erhaltungsgrößen. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Raum kann sich also nur dann ändern, wenn der ursprünglichen Menge CO<sub>2</sub> entweder durch Quellen weiteres CO<sub>2</sub> hinzugefügt oder aber durch Senken entnommen wird. Der Zusammenhang zwischen zeitlicher Änderung der Konzentration einerseits sowie Quellen und Senken andererseits wird als Massenbilanz bezeichnet und kann sprachlich ausgedrückt werden als:

$$(1) \quad \frac{\text{Massenänderung}}{\text{Zeiteinheit}} = + \frac{\text{Massenzunahme}}{\text{Zeiteinheit}} \Bigg|_{\text{durch Quellen}} - \frac{\text{Massenabnahme}}{\text{Zeiteinheit}} \Bigg|_{\text{durch Senken}}$$

Zur Vereinfachung der Berechnungen werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Das in der Raumluft befindliche CO<sub>2</sub> wird als chemisch stabiler Stoff betrachtet, d.h. es gibt keine chemischen Reaktionen, die CO<sub>2</sub> produzieren oder umwandeln.
- Es gibt keine Adsorption (Anlagerung) von CO<sub>2</sub> an Oberflächen wie z.B. den Wänden oder dem Mobiliar des Raums.
- Die Raumluft wird als vollständig durchmischt angenommen, d.h. die CO<sub>2</sub>-Konzentration hat überall im Raum den gleichen Wert. Die Konzentration kann somit durch eine einzige Zahl für den ganzen Raum angegeben werden. Sie kann sich aber sehr wohl im Verlauf der Zeit ändern.

Unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahmen sind die folgenden Quellen und Senken für die Konzentration in der Raumluft relevant (die Bezeichnung Quelle und Senke beziehen sich immer auf die Sichtweise vom Raum aus):

- Senke: Transport von CO<sub>2</sub> von der Raumluft in die Außenluft.
- Quelle: Transport von CO<sub>2</sub> von der Außenluft in die Raumluft.
- Quelle: Emission (Abgabe) von CO<sub>2</sub> im Raum durch evtl. anwesende Raumnutzer.

Damit lässt sich die Massenbilanz für das CO<sub>2</sub> in der Luft des Modellraums schließlich beschreiben als:

$$(2) \quad V \frac{\partial C_i}{\partial t} = nVC_a - nVC_i + S$$

mit C<sub>i</sub>: CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft

V: Raumluftvolumen

C<sub>a</sub>:CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Außenluft

n: Luftwechselrate

S:Pro Zeit in die Raumluft abgegebene CO<sub>2</sub>-Masse

t: Zeit

Für feste Randbedingungen lässt sich Gl. (2) analytisch leicht lösen. Will man jedoch den zeitlichen Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration auch bei sich ändernden Luftwechselraten und Emissionen berechnen, ist es praktischer, Gl. (2) zeitlich zu diskretisieren und dann numerisch zu integrieren. Eine nähere Erläuterung der mathematischen und numerischen Vorgehensweise würde hier zu weit führen. Es sei daher an dieser Stelle nur auf die Dokumentation des für diesen Bericht verwendeten Simulationsmodells QUIRL/CO<sub>2</sub> verwiesen.