

Forschungsbericht

# Luftqualität in Schulhäusern



Dezember 1990, rev. Mai 1992

Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)

Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

---

**Forschungsbericht**

# **Luftqualität in Schulhäusern**

**Th. Baumgartner  
D. Brühwiler  
H. Mayer**



**Dezember 1990, rev. Mai 1992**

**Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)**

**Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"**

---

## IMPRESSUM

---

**EFFENS-Projekt Luftqualität;**

Schlussbericht

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)  
3003 Bern

M. Zimmermann  
EMPA-KWH  
8600 Dübendorf

**EFFENS-Projektleitung:**

B. Wick (Projektleiter)  
Ing.-Büro  
8967 Widen

Th. Baumgartner  
Ing.-Büro  
8600 Dübendorf

P. Chuard  
SORANE SA  
1015 Lausanne

**Projekt Luftqualität:**

Projektleitung und  
Messdatenauswertung:

Th. Baumgartner  
Ingenieurbüro für Haustechnik  
Bettlistr. 35  
8600 Dübendorf

Simulationsrechnungen:

D. Brühwiler  
Informatik/Energietechnik  
Weiherweg 19  
8604 Volketswil

Messdatenerfassung:

H. Mayer  
Gabathuler AG  
Kirchgasse 23  
8253 Diessenhofen

Auflage:

50 Exemplare (rev. Mai 1992)

Vertrieb:

EMPA-KWH, 8600 Dübendorf

Copyright ©, Dezember 1990

Bundesamt für Energiewirtschaft

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>5</b>
<b>2. Projektziele und Messdatenerfassung</b>	<b>5</b>
2.1 Projektziele.....	5
2.2 Messdatenerfassung.....	6
<b>3. Messdatenauswertung</b>	<b>7</b>
3.1 Mittel- und Extremwerte der Messdaten.....	7
3.2 Raumluftqualität.....	8
3.3 Luftraten.....	10
3.4 Simulationen des Energieverbrauchs.....	12
<b>4. Folgerungen und Hinweise</b>	<b>15</b>
4.1 Folgerungen aus den Untersuchungen.....	15
4.2 Hinweise zum thermischen Raumkomfort und zur Luftfeuchtigkeit.....	16
4.3 Planungshinweise.....	17
<b>Anhang</b>	<b>19</b>
A. Literaturverzeichnis.....	21
B. Objektbeschriebe.....	22
C. Variable Randbedingungen der Simulationen.....	25
D. Uebersicht über die Simulationsergebnisse.....	27
E. Messstellenliste.....	28
F. Luftqualität und Komfort in Turnhallen.....	30
G. Wochengrafiken.....	34



## 1. Einführung

Das Forschungsprojekt EFFENS wird im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) von 1988 - 1991 durchgeführt. Das Ziel des Projektes ist die Untersuchung schulspezifischer Energiefragen und das Erarbeiten entsprechender Planungsrichtlinien, welche zu tiefen Energie- und Betriebskosten führen können. Das EFFENS-Projekt beinhaltet zwei Schwerpunkte:

- Vertiefte Untersuchung von drei aktuellen Problemstellungen in Schulbauten (**Luftqualität, Tages-/Kunstlicht, neue Regulierungskonzepte**)
- Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse und des vorhandenen schulspezifischen Wissens in für Planer und Behörden verständliche Form.

Der vorliegende Schlussbericht beinhaltet die vertiefte Untersuchung zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Lüftungsarten auf die Raumluftqualität und den Lüftungswärmebedarf in Schulen.

## 2. Projektziele und Messdatenerfassung

### 2.1 Projektziele

Im Rahmen des Forschungsprojektes "Schulhaus Gumpenwiesen" [Lit. 3.1] wurden erste Messerfahrungen mit der Luftqualität in einem mechanisch gelüfteten Primarschulhaus mit niedrigstem Energieverbrauch gemacht. Nach Abschluss dieses Forschungsprojektes stellte sich heraus, dass keine vergleichende Messinformationen in der Schweiz betreffend der Luftqualität in Schulen mit Fensterlüftung vorhanden waren. Im Rahmen des EFFENS-Projektes wurde versucht, diese Lücke zu schliessen.

Mit dem EFFENS-Projekt Luftqualität wurden folgende **Ziele** angestrebt:

- Messung der Luftqualität in fenstergelüfteten Klassenzimmern unter Berücksichtigung des Benutzereinflusses und der Beeinflussbarkeit des Lüftungsverhaltens.
- Vergleich mit der Luftqualität in mechanisch gelüfteten Objekten.
- Einfluss der Aussenluftversorgung auf den Energieverbrauch (DOE2.1C-Simulationsrechnungen)

#### Dank an alle am Projekt Beteiligten

Die Durchführung und der Erfolg des Projektes "Luftqualität" war nur dank der Mithilfe der Schulbehörden, Schulhausabwarte, beteiligten Lehrer und Schüler möglich. Das Projektteam möchte hiermit allen für Ihre Geduld und tatkräftige Mithilfe herzlich danken.

#### Gewählte Messobjekte

- Fenstergelüftetes Klassenzimmer in lärm-belasteter Umgebung (Dübendorf).
- Fenstergelüftetes Klassenzimmer in ländlicher Umgebung (Stammheim).
- Klimatisiertes Klassenzimmer ohne Möglichkeit der Fensterlüftung (KV-Zürich).

## 2.2 Messdatenerfassung

Die Messtellenliste und der Beschrieb der einzelnen Messgrössen sowie der Zeitschritt der Datenerfassung ist im Anhang E für die drei Messobjekte zusammengestellt.

Die Messdaten wurden ca. alle drei Wochen ausgelesen und einer Vorauswertung unterzogen:

- Kontrolle auf Messlücken
- Untersuchung auf Fehlfunktion von Messfühlern.

Die Messdauer ist für jedes Messobjekt in nebenstehendem Kasten angegeben. Die relativ kurze Messdauer beim KV-Zürich ist dadurch begründet, da keine Benutzerbeeinflussung durch Fensterlüftung bei diesem Objekt (Klimaanlage) möglich war.

### Randbedingungen bei der Objektwahl

Bei der Auswahl der Messobjekte wurde folgende Punkte berücksichtigt:

- Eignung des Klassenzimmers für die Messdatenerfassung (Fühler- und Datenloggerplatzierung).
- allfällige störende Umgebungseinflüsse
- Motivation der Lehrer zur Mitarbeit.
- Vorhandenes, unmotiviertes Lüftungsverhalten der Lehrer und Schüler.

### Messdauer

Dübendorf: 9.1.1989 - 23.3.1989 (11 Wochen)  
Stammheim: 26.12.1988-23.3.1989 (13 Wochen)  
KV-Zürich: 14.11.1988- 9.12.1988 (3 Wochen)

### 3. Messdatenauswertung

Für die Untersuchungen im Bereich Luftqualität wurde in vier Schulhäusern je ein Klassenzimmer ausgewählt (Tab. 3.1). Beim Schulhaus Gumpenwiesen wurden Daten aus einem früheren Messprojekt übernommen [Lit. 3.1], bei den andern drei wurden im Rahmen des EFFENS-Projektes Messungen durchgeführt. Kurze Beschriebe dieser drei Klassenräume finden sich im Anhang B.

Die folgende Auswertung der Messdaten umfasst:

- einen Kommentar zu den Mittel- und **Extremwerten**
- eine Beurteilung der **Luftqualität**
- eine Abschätzung des **Luftaustausches** in den fenstergelüfteten Klassenzimmern
- Resultate der **Energieverbrauchsberechnung** mittels dynamischer Simulationen

Im Anhang F sind zur Illustration der Messwerte typische Wochenverläufe beigefügt.

#### 3.1 Mittel- und Extremwerte der Messdaten

In Tab. 3.2 sind die Mittel- und Extremwerte der zentralen Messgrößen über die ganze Messperiode aufgeführt. Nur die effektiven Schulstunden wurden berücksichtigt.

Der Mensch gibt beim Atmen CO<sub>2</sub> an die Luft ab. Je weniger in einem belegten Raum gelüftet wird, desto höher ist die **CO<sub>2</sub>-Konzentration** (Masseinheit: ppm = parts per million) in der Raumluft. Daher dient die CO<sub>2</sub>-Konzentration als Mass für die Lüfterneuerung im Raum.

Die beiden **fenstergelüfteten** Objekte wurden parallel gemessen; zudem wurde die Messperiode in zwei Phasen unterteilt. Während der ersten acht Wochen lüfteten die Lehrer nach ihrer Gewohnheit (**unmotiviertes** Verhalten). Dann wurden sie **motiviert**, in den Pausen gezielt und massiv zu lüften. Der Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration liegt beim motivierten Verhalten um 600 ppm (Stammheim) bzw. um 350 ppm (Dübendorf) tiefer als beim unmotivierten Verhalten. Der Vergleich der Werte von Dübendorf

Objekt	Merkmale
Stammheim	- konventionelle Fensterlüftung
Dübendorf	- konventionelle Fensterlüftung
Gumpenwiesen	- mech. Lüftung mit raumweiser Klappensteuerung Stufe 1: Grundluftwechsel Luftmenge 100-140 m <sup>3</sup> /h Stufe 2: manuell bei Belegung Luftmenge 200-250 m <sup>3</sup> /h (10-11 m <sup>3</sup> /hPers.) - Fensteröffnung z.T. möglich
KV-Zürich	- Zweikanal-Klimaanlage - Luftmenge: 1750 m <sup>3</sup> /h - Min. Aussenluftanteil: 30 % (20-70 m <sup>3</sup> /hPers.) - Fensteröffnung nicht möglich

Tab. 3.1: Merkmale der Lüftungsart in den vier Schulhäusern

Objekt	CO <sub>2</sub> -Konz. [ppm]		Raumtemp. [°C]		Rel. Feuchtigk. [%]			
	Mittel	Max.	Mittel	Max.	Mittel	Max.	Min.	
Stammheim								
	unmotiv.	1778	3390	20.0	22.5	43	52	38
	motiviert	1181	2423	21.6	23.3	40	48	-
Dübendorf								
	unmotiv.	1404	4225	19.5	22.0	36	48	26
	motiviert	1068	2053	20.7	22.4	38	48	-
Gumpenwiesen								
		1100	2100	21.3	23.7	32	49	21
KV-Zürich								
		823	1866	22.2	23.2	37	48	24

Tab. 3.2: Messresultate: Mittel- und Extremwerte

und Stammheim untereinander zeigt, dass der Dübendorfer Lehrer beim unmotivierten Fall offenbar kräftiger lüftet als sein Stammheimer Kollege. Dieses Resultat konnte nicht unbedingt erwartet werden, da Dübendorf mit Militärfluglärm belastet ist, während Stammheim eine ruhige, ländliche Gegend darstellt. Es illustriert aber deutlich den **Benutzereinfluss** in Gebäuden mit Fensterlüftung.

Der **Schulraum des KVZ** weist mit 823 ppm einen Mittelwert auf, der noch deutlich tiefer liegt als bei der motivierten Fensterlüftung. Beim Schulhaus **Gumpenwiesen** ist der Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration vergleichbar mit der motivierten Fensterlüftung.

Die **Temperaturmittelwerte** und -maxima zeigen, dass die Raumlufttemperaturen im Komfortbereich liegen. Insbesondere bestand bei den fenstergelüfteten Klassenzimmern nie Veranlassung, Ueberschusswärme über die Fenster abzuführen. Die Fenster wurden also nur zur Lüfterneuerung geöffnet.

Die **relative Luftfeuchtigkeit** der Raumluft liegt idealerweise zwischen 40 und 45 %. Im Winter sollte sie nicht unter 30 % sinken. Die Minima in Tab. 3.2 zeigen, dass die relative Feuchtigkeit beim Schulhaus in Stammheim nicht unter 38 % fiel, während sie in Dübendorf mit 26 % unter dem Grenzwert von 30 % gemessen wurde. Im Schulhaus Gumpenwiesen mit 21 % relativer Luftfeuchtigkeit kann die Raumluft als sehr trocken bezeichnet werden.

### 3.2 Raumluftqualität

Aus den vier Gruppen von **Schadstoffquellen** in nebenstehendem Kasten geht hervor, dass in sehr vielen Schulräumen nur Verunreinigungen durch den Menschen eine Rolle spielen. Dann ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration ein guter Indikator zur Beurteilung der Raumluftqualität [Lit. 3.2]. Zur Beurteilung der Raumluftqualität werden **Grenzwerte** gemäss Tab. 3.3 herangezogen. Der Wert von 1500 ppm ist aus hygienischen Gründen ("riecht unangenehm") einzuhalten. Die beiden höheren Werte zeigen die Schwelle, ab der das menschliche Konzentrationsvermögen beeinträchtigt werden kann.

Bild 3.1 zeigt die Summenhäufigkeiten der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schulhaus **Stammheim** (Fensterlüftung). Beim **unmotivierten** Lehrerverhalten wird der CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 1500 ppm in 70 % der Schulstunden überschritten, beim **motivierten** Lehrerver-

#### Quellen von Schadstoffen und Verunreinigungen

Es sind viele Quellen vorstellbar, die Schadstoffe und Verunreinigungen an die Raumluft abgeben. Sie können in folgende vier Gruppen zusammengefasst werden:

- Externe Schadstoffquellen wie **Radon**, das in der Schweiz in alpinen Regionen vorkommt. Es kann aus dem Gesteinsuntergrund in die Raumluft gelangen. In solchen Gegenden müssen die Zugänge zu den Kellerräumen luftdicht abgetrennt werden können (keine Arbeitsräume im UG).
- Schadstoffe, die aus Baumaterialien und Inneneinrichtungen in die Raumluft gelangen wie **Formaldehyd**. Wie in allen Gebäuden ist diese Schadstoffquelle auch in Schulhäusern durch die Wahl geeigneter Materialien zu vermeiden.
- Schadstoffe, die durch die Tätigkeit des Menschen in die Raumluft gelangen wie **Zigarettenrauch, Lösungsmitteldämpfe** etc. Da Schulräume oft Nichtraucheräume sind und Arbeiten mit schadstoffhaltigen Materialien selten, spielt diese Gruppe eine untergeordnete Rolle (Ausnahme: Werkräume).
- Verunreinigungen, die durch die Anwesenheit des Menschen in die Raumluft gelangen wie **CO<sub>2</sub> und Ausdünstungen**.

Grenzwert [ppm]	Beschreibung
1500	Aus lufthygienischen Gründen für Räume mit Rauchverbot empfohlen [Lit. 3.2]
4000	Grenzwert für Columbus Raumstation [Lit. 3.2]
5000	MAK-Wert

Tab. 3.3: Verschiedene Grenzwerte für die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft

halten noch in 18 % der Schulstunden. Dieses Resultat zeigt, dass sich mit Fensterlüftung eine akzeptable Raumluftqualität erreichen lässt. Voraussetzung dürfte allerdings eine wiederholte Motivation des Lehrers sein, in den Pausen massiv zu lüften. Ohne Motivation ist ein "Rückfall" in die alte Gewohnheit zu erwarten.

Bild 3.2 zeigt die Summenhäufigkeiten der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schulhaus Dübendorf (Fensterlüftung). Beim **unmotivierten** Verhalten wurde der CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 1500 ppm in 40 % aller Schulstunden überschritten. Wie bei den Mittelwerten zeigt sich die Gewohnheit des Dübendorfer Lehrers, kräftiger zu lüften als sein Stammheimer Kollege. Beim **motivierten** Verhalten wird der Grenzwert noch in 20 % der Schulstunden überschritten. Dieses Resultat ist jenem in Stammheim vergleichbar.

Der Anhang F enthält von Stammheim und Dübendorf je ein Wochenverlauf der Messdaten bei unmotiviertem und motiviertem Lehrerverhalten. Jene Grafiken zeigen explizit, dass die Fenster nach der Motivation häufiger geöffnet wurden als vorher. In einer der dort dargestellten Wochen fand in Dübendorf ein Schulbesuchstag statt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration stieg höher als an gewöhnlichen Schultagen. Darauf sind auch die Werte über 4000 ppm in Bild 3.2 zurückzuführen.

Die Bilder 3.1 und 3.2 zeigen, dass die Einhaltung des **MAK-Wertes** von 5000 ppm CO<sub>2</sub> in fenstergelüfteten Schulen kein Problem darstellt.

Bild 3.3 zeigt die Summenhäufigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Schulraum des KV Zürich (Zwei-Kanal-Hochdruck-Klimaanlage). Weil dieses System mit Umluft betrieben wird, enthält Bild 3.3 auch die Summenhäufigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Zuluft. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft liegt praktisch nie über 1200 ppm. Der Grenzwert von 1500 ppm kann problemlos eingehalten werden.

Im Anhang F ist ein Wochenverlauf der Messdaten des KVZ beigefügt. In der dargestellten Woche ist die Lüftungsanlage einmal kurze Zeit ausgefallen. Deshalb enthält die Summenhäufigkeit in Bild 3.3 einige Werte über 1500 ppm.

Im Schulhaus **Gumpenwiesen** (mechanische Lüftung mit minimalen Luftraten) wurde der CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 1500 ppm in 10 % der Schulstunden überschritten (Bild 3.4). Dieser Wert ist etwas besser als bei den fenstergelüfteten Schulräumen und motivier-

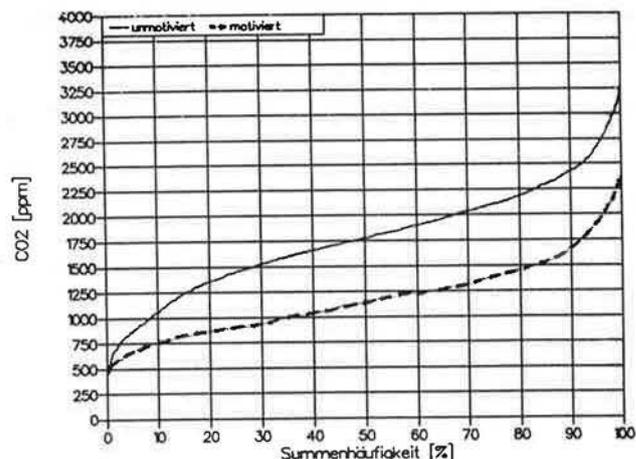


Bild 3.1: Summenhäufigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schulhaus Stammheim (Fensterlüftung)

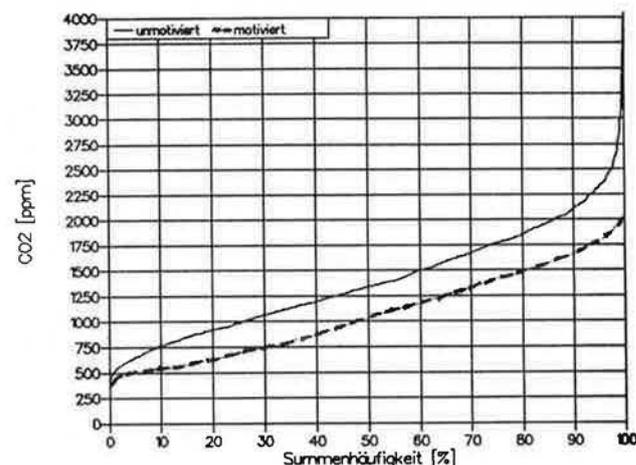


Bild 3.2: Summenhäufigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schulhaus Dübendorf (Fensterlüftung)

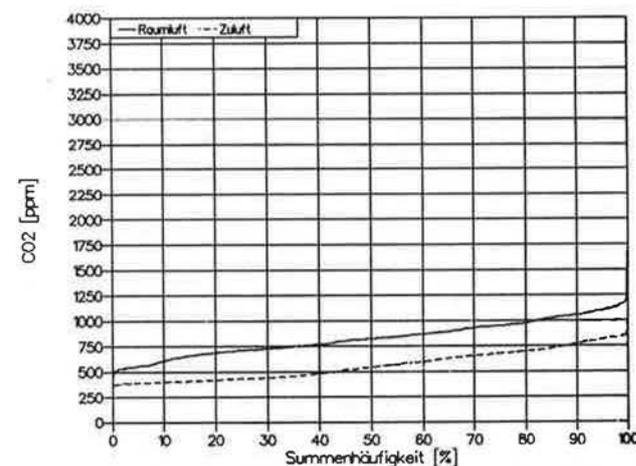


Bild 3.3: Summenhäufigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im KV Zürich (Zwei-Kanal-Klimaanlage)

tem Lehrerverhalten. Allerdings könnte der Grenzwert immer eingehalten werden, wenn die richtigen Zuluftmengen eingeblasen würden. Statt 11 m³/h und Person wären dazu ca. 15 m³/h Pers nötig.

### 3.3 Luftraten

Bei **mechanisch** gelüfteten Räumen sind die Luftraten normalerweise bekannt oder sie können im Luftkanal gemessen werden. Beim Schulraum im KVZ wurde die Zuluftmenge gemessen (Anhang F: Wochengrafiken), ebenfalls beim Schulhaus Gumpenwiesen [Lit. 3.1].

Bei **fenstergelüfteten** Räumen hängen die Luftraten von vielen Faktoren ab wie der Aussentemperatur, der Windgeschwindigkeit, der Gebäudedichtigkeit und dem Benutzereinfluss beim Öffnen der Fenster. Sogenannten **Spurengasmessmethoden** [Lit. 3.3] ermöglichen es, die Luftwechselrate direkt zu messen. Im EFFENS-Projekt wurde als Spurengas das von den Schülern an die Raumluft abgegebene CO<sub>2</sub> benutzt. So wurden Luftqualität und Luftwechselraten in einer Messung erfasst. Die Zahl der anwesenden Schüler wurde vom Lehrer während der Messperiode protokollarisch festgehalten. Die CO<sub>2</sub>-Produktion einer sitzenden Person beträgt 15 l/h [Lit. 3.4]. Damit ist die gesamte CO<sub>2</sub>-Produktion im Raum bekannt. Aus dem Zeitverlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration kann dann gemäss der Formel in Tab. 3.4 [Lit. 3.1] der **Luftwechsel** (n) berechnet werden. Die Formel wird dazu iterativ nach n aufgelöst.

Die so bestimmten Luftwechsel sind als **Abschätzung** zu betrachten. Eine genaue Bestimmung der Luftwechsel ist vor allem aus zwei Gründen nicht möglich:

- Da nicht alle Schüler den Raum gleichzeitig betreten oder verlassen, ist die CO<sub>2</sub>-Produktion zu Beginn und am Ende einer Lektion nicht genau bekannt. Dies führt zu fehlerhaften Luftwechselberechnungen.
- Die CO<sub>2</sub>-Konzentration wurde nur an einem Punkt im Raum gemessen. Unter der Voraussetzung der perfekten Durchmischung der Raumluft (überall gleiche Konzentration) ist dies unwesentlich. Insbesondere bei geöffneten Fenstern ist jedoch die Voraussetzung der perfekten Durchmischung nicht erfüllt und die Einzelmessung deshalb fehlerhaft.

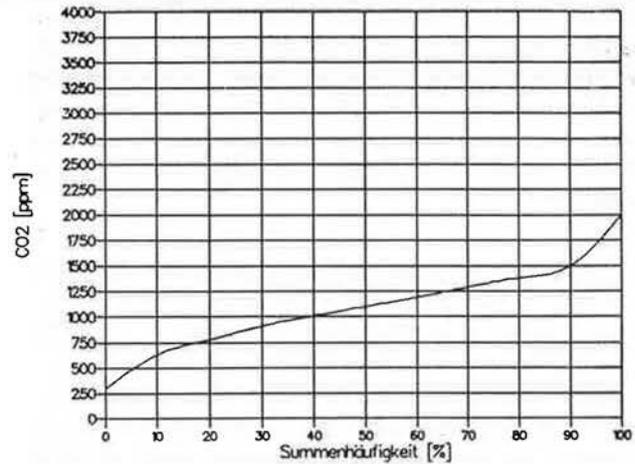


Bild 3.4: Summenhäufigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schulhaus Gumpenwiesen (mech. Lüftung mit minimalen Luftraten)

**Berechnungsformel**

$$K_t = K_a + (K_0 - K_a)e^{-nt} + \frac{C_{tot}(1 - e^{-nt})}{nI} \cdot 10^6 \quad (2)$$

- K<sub>t</sub> = CO<sub>2</sub>-Konz. im Raum zur Zeit t [ppm]
- K<sub>a</sub> = CO<sub>2</sub>-Konz. der Aussenluft (300 ppm)
- K<sub>0</sub> = CO<sub>2</sub>-Konz. im Raum zur Zeit 0 [ppm]
- C<sub>tot</sub> = CO<sub>2</sub>-Produktion im Raum [m<sup>3</sup>/h]
- n = Aussenluftwechsel [1/h]
- I = Raumvolumen [m<sup>3</sup>]
- t = Zeitdifferenz in [h]

Tab. 3.4: Berechnungsformel für die zeitabhängige CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft

Bild 3.5 zeigt in einem Streuplot den Zusammenhang zwischen **Luftwechsel** und **Fensteröffnung**. Die grosse Streuung sagt aus, dass der Luftwechsel nebst der Fensteröffnung noch von andern Grössen signifikant abhängt. Zudem ist der Streubereich durch die aufgezählten Fehlerquellen vergrössert. Trotzdem wird davon ausgegangen, dass eine statistische Auswertung der gesamten Datenmenge eine Abschätzung der Luftstraten ergibt, die zu einer genügend genauen Berechnung der **Lüftungswärmeverluste** (mittels Simulationen) in fenstergelüfteten Schulen führen.

Die statistische Auswertung der Messdaten hat gezeigt, dass die Aussenluftzufuhr und die Fensteröffnung in fenstergelüfteten Schulräumen vor allem von der **Anzahl Lektionen** und der daran beteiligten **Anzahl Schüler** abhängt. Grössen wie die Aussentemperatur bzw. die Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur spielen eine sehr untergeordnete Rolle.

Der Zusammenhang zwischen der Anzahl Personen im Raum und dem dazugehörigen Luftwechsel wurde mittels **linearer Regression** ermittelt. Die entsprechenden Koeffizienten sind in Tab. 3.5 zusammengestellt. Sie wurden aus den Messdaten der Schulhäuser Dübendorf und Stammheim für motiviertes und unmotiviertes Lüftungsverhalten ausgezogen. Das **Pausenlüften** (offene Fenster, wenn sich niemand im Schulzimmer aufhält) wurde separat berechnet.

Mit diesen Koeffizienten und der Formel in Tab. 3.5 kann bei bekannter Personenzahl der **stündliche Luftwechsel** berechnet werden. Die Formel enthält die Annahme, dass zu jeder Stunde während 50 Minuten aufgrund der Personenzahl gelüftet wird und während 10 Minuten ein Pausenlüften stattfindet. Beispiele für berechnete Luftwechsel enthält Tab. 3.6. Diese Art, den Luftwechsel zu bestimmen, erweist sich für **Simulationen** als günstig (s. Abschnitt 3.4).

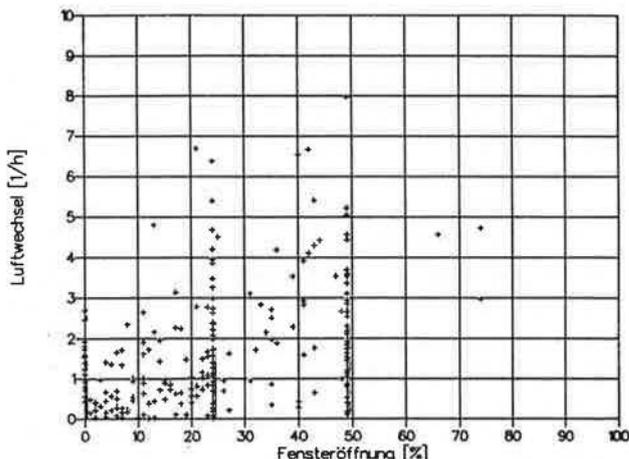


Bild 3.5: Streuplot: Luftwechsel in Abhängigkeit von der Fensteröffnung im Schulhaus Dübendorf

Um den Energiebedarf bei verschiedenen Lüftungsarten miteinander vergleichen zu können, war eine Abhängigkeit zwischen Luftwechsel und Personenbelegung nötig. Diese wurde mittels Regression aus den Messdaten wie folgt ermittelt:

$$LW = 5/6 * (a + b * PERS.) + 1/6 * (Pausen-LW)$$

LW = mittl. Luftwechsel [1/h]  
 a, b = Regressionskoeffizienten  
 PERS = Anzahl Personen  
 Pausen-LW = Luftwechsel während der Pausen [1/h]

Objekt	PERS > 0		Pausen LW
	a	b	
Stammheim unmotiviert	0.346	0.012	0.50
motiviert	-0.040	0.082	0.47
Dübendorf unmotiviert	0.335	0.016	1.09
motiviert	0.400	0.034	1.15

Tab. 3.5: Linearer Zusammenhang zwischen Raumbelegung und Luftwechsel

Objekt	Personenbelegung	
	10 [1/h]	23 [1/h]
Stammheim unmotiviert	0.47	0.60
motiviert	0.73	1.62
Dübendorf unmotiviert	0.59	0.77
motiviert	0.81	1.18

Tab. 3.6: Typische Luftwechsel, die sich mit der Formel aus Tab. 3.5 ergeben

### 3.4 Simulationen des Energieverbrauchs

Zur Ermittlung des Energieverbrauchs von Schulen bei unterschiedlichen Lüftungsarten wurden Simulationen durchgeführt. Dabei gelangte das Simulationsprogramm DOE 2.1C [Lit. 3.5] zum Einsatz. Es wurde ein einzelner **südorientierter Raummodul** simuliert (s. nebenstehenden Kasten). Die Bauteile weisen durchwegs gute **k-Werte** auf, die heute dem Stand der Technik entsprechen (s. Tab. 3.7). Es wurden Jahressimulationen mit den **Wetterdaten 1984** der Station Zürich-Kloten durchgeführt.

Die Resultate der Messungen sind in die Randbedingungen der Simulationen eingeflossen. Die **Wochenfahrpläne** für die **Personenbelegung** und den **Stromverbrauch** im Klassenzimmer wurden aus den umfangreichen Messdaten des Projektes "Gumpenwiesen" ausgezogen. Der Gesamtstromverbrauch des Messzimmers im Schulhaus Gumpenwiesen entspricht mit 21 W/m<sup>2</sup> installierter Beleuchtungsleistung nicht mehr dem Stand der Technik. Er wurde daher für die Simulationen reduziert. Die ausgezogenen Wochenprofile können Bild 3.6 entnommen werden.

Aus dem Wochenprofil der Personenbelegung und den Angaben in Tab. 3.5 wird ein Wochenprofil für die **stündlichen Luftwechsel bei Fensterlüftung** ermittelt. Der Anhang C enthält vier solche Profile (Dübendorf und Stammheim, je motiviert und unmotiviert). Ebenfalls dem Anhang C sind die **Zuluftmengen bei mechanischer Lüftung** zu entnehmen.

Für die südorientierten Fenster wurde eine bewegliche **Beschattung** (Aussenstoren) eingesetzt. Deren Durchlässigkeit beträgt 15 %. Im Winter ist das Fenster beschattet, wenn die Einstrahlung grösser ist als 450 W/m<sup>2</sup> (Vermeidung von Blendeffekten).

Die **Schulferien** wurden gemäss Tab. 3.8 eingesetzt (Kt. Zürich 1984). Während denselben verzeichnet das Klassenzimmer keinen Stromverbrauch, die Lüftungsanlage ist ausser Betrieb bzw. es findet keine Fensterlüftung statt und im Winter ist die Raumtemperatur reduziert (15 °C).

Die **variablen Randbedingungen** (Regelung der Wärmeabgabe, Luftmengen bei mechanischer Lüftung bzw. Luftwechsel bei Fensterlüftung) sind dem Anhang C zu entnehmen.

#### Randbedingungen der Simulation

Mit dem Simulationsprogramm DOE 2.1C wurde der Energieverbrauch *eines Klassenzimmers* für verschiedene Varianten (Fensterlüftung und mechanische Lüftung) berechnet.

Orientierung: Süd  
 Fläche (EBF): 74 m<sup>2</sup>  
 Fensterfläche Süd: 20 m<sup>2</sup> (27 % der EBF)  
 Raumvolumen: 223 m<sup>3</sup>  
 Belegung: max. 23 Personen

Südfassade (opaker Teil) A = 11.5 m <sup>2</sup> k = 0.38 W/m <sup>2</sup> K	Backstein 12 cm Mineralwolle 11 cm Backstein 15 cm Innenputz
Südfenster A = 20.0 m <sup>2</sup> k = 1.75 W/m <sup>2</sup> K (Glas) k = 1.50 W/m <sup>2</sup> K (Rahmen)	Glasanteil 80 %
Wand gegen Pausenhalle A = 31 m <sup>2</sup> k = 2.2 W/m <sup>2</sup> K	Putz Backstein 12 cm Putz
Decke, Boden und Seitenwände sind adiabatisch	

Tab. 3.7: Bauteile und ihre k-Werte

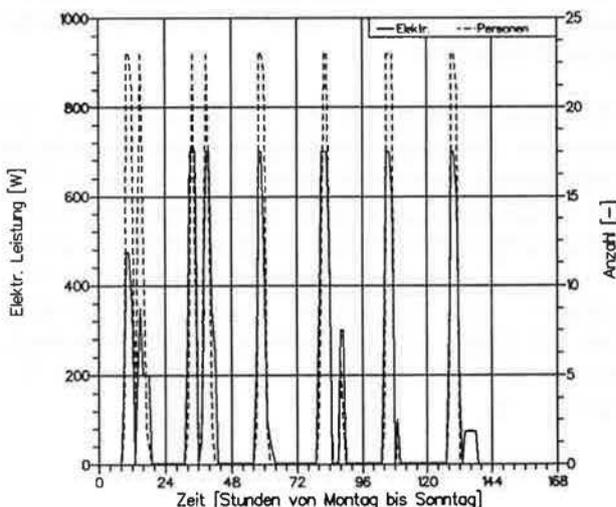


Bild 3.6: Wochenprofil für Stromverbrauch und Personenbelegung bei den DOE-Simulationen

Alle **Resultate** werden im folgenden als Endenergie dargestellt. Das Simulationsprogramm liefert die Resultate in Form von Nutzenergie. Für die Nutzungsgrade (Wärme- und Kälteerzeugung) wurden folgende Annahmen getroffen:

- Nutzungsgrad Wärme: 85 %
- Nutzungsgrad Kälte: 220 %

Bei mechanischen Lüftungsanlagen ist der Transportenergieverbrauch für das ganze Jahr berücksichtigt.

Tab. 3.9 gibt einen Ueberblick über sämtliche simulierte **Varianten**. Alle berechneten Energieverbräuche sind im Anhang D in tabellarischer Form zusammengefasst. Im folgenden werden die wichtigsten Resultate der Simulationen dargestellt und kommentiert.

Man spricht von **individueller Raumtemperaturregelung**, wenn die Regelung der Wärmeabgabe über **Thermostatventile** oder eine **programmierbare Einzelraumregelung** geschieht. Letztere bietet die Möglichkeit, zu jeden Raum einen Fahrplan für die Solltemperatur zu programmieren. Damit kann die Temperatur in jedem Raum separat abgesenkt werden, wenn dieser unbenutzt ist (freie Nachmittage etc.). Bei Thermostatventilen bietet sich nur die Möglichkeit, die Vorlauftemperatur global abzusenken (nachts, an Wochenenden etc.).

Bild 3.7 zeigt die Energiekennzahlen eines fenstergelüfteten Schulraumes (motivierte Fensterlüftung Dübendorf) bei **unterschiedlicher Regelung der Wärmeabgabe**. Im Vergleich zur Aussentemperaturregelung lassen sich mit Thermostatventilen 70 MJ/m<sup>2</sup>a (46 %) Heizenergie einsparen, mit einer programmierbaren Einzelraumregelung 88 MJ/m<sup>2</sup>a (58 %). Der Schritt von der Aussentemperaturregelung zur raumweisen Regelung der Wärmeabgabe hat also bedeutende Heizenergieeinsparungen zur Folge. Die aufwendigere programmierbare Einzelraumregelung ist dabei effizienter als Thermostatventile.

Im folgenden wird der Energieverbrauch eines Klassenzimmers mit **Fensterlüftung** (wiederum motivierte Fensterlüftung Dübendorf) mit einer ganzjährig betriebenen **mechanischen Lüftungsanlage** mit konstanter Raumzuluftmenge verglichen. Wenn die Wärmeabgabe über Thermostatventile erfolgt, beträgt die **Heizenergieeinsparung** beim Klassenzimmer mit mechanischer Lüftung (Bild 3.8):

- 14 MJ/m<sup>2</sup>a (WRG-Wirkungsgrad 40 %)
- 40 MJ/m<sup>2</sup>a (WRG-Wirkungsgrad 75 %).

Weihnachtsferien	1. Jan. - 8. Jan.
Sportferien	19. Feb. - 4. März
Frühlingsferien	8. Apr. - 23. Apr.
Sommerferien	8. Juli - 12. Aug.
Herbstferien	7. Okt. - 21. Okt.
Weihnachtsferien	23. Dez. - 31. Dez.

Während der Ferien ist der Schulraum unbenutzt, dh. kein Stromverbrauch, mech. Lüftung ausser Betrieb bzw. Fenster geschlossen, Raumsohltemperatur im Winter 15 °C.

Tab. 3.8: Schulferien während des Jahres 1984

Lüftungsart	2. Variationspar.	Regelung der Wärmeabgabe		
		Aussentemp.	Thermostatvent.	programm. Einzelraum
Fensterlüftung Dübendorf	unmotiv. motiviert	X	X	X
Fensterlüftung Stammheim	unmotiv. motiviert	X	X	X
Mechanisch 2-Kanal	----	X		
Mechanisch Gumpenwiesen		X		
Mechanisch Raumzuluft konstant	WRG=0.40 WRG=0.75		X	X
Mechanisch Raumzuluft 2-stufig	WRG=0.40 WRG=0.75		X	X

Tab. 3.9: Simulierte Varianten

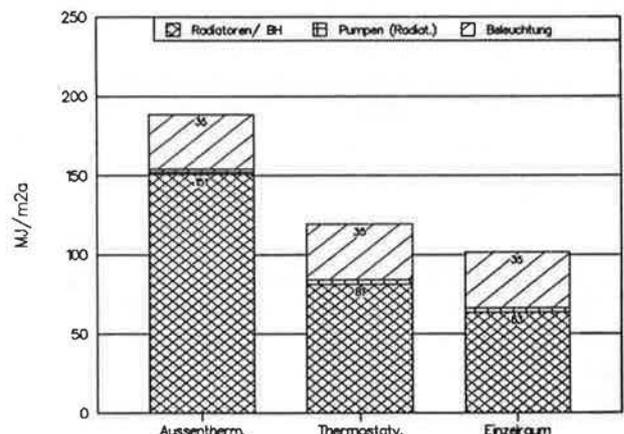


Bild 3.7: Energiekennzahlen bei unterschiedlicher Regelung der Wärmeabgabe (motivierte Fensterlüftung Dübendorf)

Beim tieferen WRG-Wirkungsgrad hebt der Stromverbrauch des Ventilators die Einsparung bei der Heizenergie auf, d.h. es resultiert keine **Gesamtenergieeinsparung**. Bei der Auslegung der WRG ist daher grosse Sorgfalt nötig, damit ein hoher Wirkungsgrad erzielt wird. Beim hohen WRG-Wirkungsgrad beträgt die **Gesamtenergieeinsparung** 26 MJ/m<sup>2</sup>a. Dies ist mehr als im fenstergelüfteten Klassenzimmer beim Uebergang von Thermostatventilen zur programmierbaren Einzelraumregelung eingespart wird.

Wenn die Wärmeabgabe über eine programmierbare Einzelraumregelung erfolgt, beträgt die **Heizenergieeinsparung** im mechanisch gelüfteten Klassenzimmer 39 MJ/m<sup>2</sup>a (WRG-Wirkungsgrad 75 %) (Bild 3.8).

Zu Vergleichszwecken wurde hier nur die motivierte Fensterlüftung herangezogen. Der Resultattabelle im Anhang D kann entnommen werden, dass bei unmotivierter Fensterlüftung der Energieverbrauch in der gleichen Grössenordnung liegt wie bei mechanischer Lüftung mit hohem WRG-Wirkungsgrad. Die schlechtere Luftqualität, die dabei in Kauf genommen werden muss, wurde weiter oben diskutiert.

Eine optimal einregulierte 2-Kanal-Hochdruck-Klimaanlage benötigt 10-20 mal mehr Transportenergie (183 MJ/m<sup>2</sup>a) und bis 4 mal mehr Heizenergie (66 + 90 MJ/m<sup>2</sup>a) als eine mechanische Aussenluftversorgung mit minimalen Luftmengen. Zusätzlich verbraucht die Kältemaschine 50 MJ/m<sup>2</sup>a elektrischen Strom zur Kühlung der Zuluft (Anhang D). Hochdruck-Lüftungsanlagen sollten deshalb heute nicht mehr eingebaut werden.

Mittels einer belegungsabhängigen Klappensteuerung (IR-Präsenzfühler bzw. programmierbarer Belegungsfahrplan) kann die Raumzuluftmenge 2-stufig variiert werden. Dies ist insofern interessant, als das zentrale Lüftungsgerät dadurch kleiner dimensioniert werden kann (Ausnutzung der Gleichzeitigkeit der Belegung). Der Heiz- und Transportenergiebedarf vermindern sich um je 2 MJ/m<sup>2</sup>a, also nur bescheiden (Bild 3.9).

Bei kleinerem Systemdruck der Zu- und Abluftanlage (Total 750 Pa statt 1000 Pa) und optimalem Ventilatorwirkungsgrad (75 % statt 60 %) lässt sich der Transportenergieaufwand auf 8 MJ/m<sup>2</sup>a senken. (Bild 3.9).

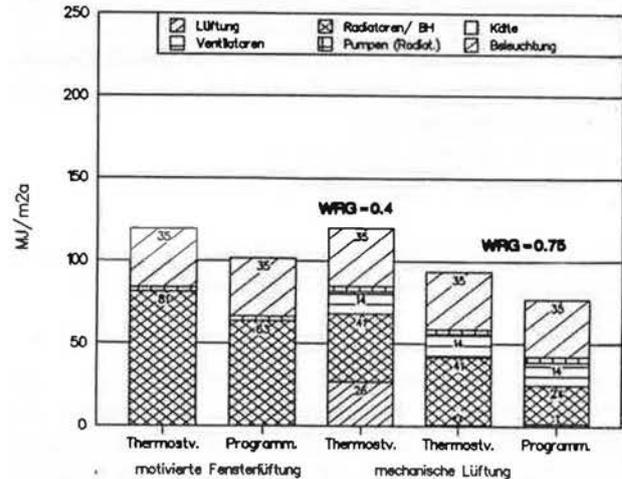


Bild 3.8: Energiekennzahlen bei Fensterlüftung (motivierter Fensterlüftung Dübendorf) und mechanischer Lüftung (konst. Zuluftmenge)

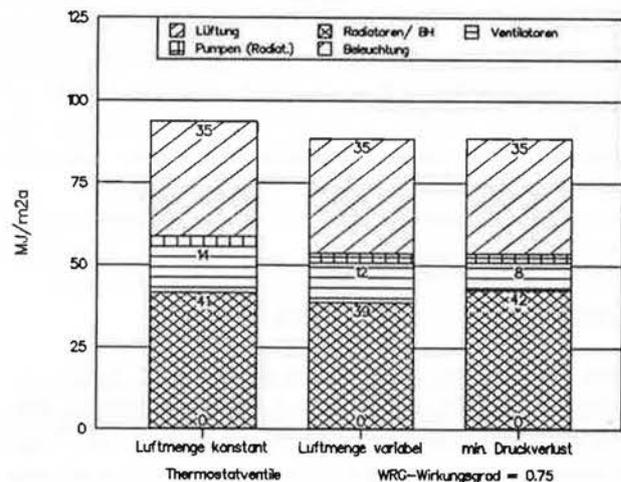


Bild 3.9: Energiekennzahlen bei unterschiedlich betriebenen mechanischen Lüftungsanlagen

**Mechanische Lüftung oder Wärmepumpe?**

Man kann für mechanische Lüftungsanlagen analog einer Wärmepumpe eine "Leistungsziffer" definieren, indem man die eingesparte Heizenergie (dank WRG) durch den Transportenergieaufwand dividiert. Bei einem optimal ausgelegten Luftsystem (WRG = 75 %) kann eine "Leistungsziffer" von ca. 5 erreicht werden. Mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe lassen sich Leistungsziffern von 2...3 erzielen.

## 4. Folgerungen und Hinweise

### 4.1 Folgerungen aus den Untersuchungen

Im Bereich **Luftqualität** lassen sich aus den dargestellten Messergebnissen folgende Schlüsse ziehen:

- Bei **mechanisch gelüfteten** Schulräumen kann eine bessere Luftqualität erwartet werden als bei fenstergelüfteten Schulräumen.
- Wenn nur Verunreinigungen durch den Menschen eine Rolle spielen, kann mit der **mechanischen Lüftung** insbesondere der CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 1500 ppm eingehalten werden. Die dazu nötige und deshalb empfohlene Luftmenge liegt bei 15 m<sup>3</sup>/hPers.
- Auch bei der **Fensterlüftung** liegt die CO<sub>2</sub>-Konzentration deutlich unter dem MAK-Wert von 5000 ppm. Die Fensterlüftung kann deshalb als gute Option eingesetzt werden.
- Ein Vorteil der **Fensterlüftung** ist die "Stosslüftung". Der Mensch kann damit auf alle wahrnehmbaren Schadstoffe reagieren und sie in kurzer Zeit ablüften. Unter anderem deshalb muss auch in mechanisch gelüfteten Schulräumen die Fensterlüftung ermöglicht werden (s. nebenstehenden Kasten).

Bei der **mechanischen Lüftung** wird die Luftqualität sozusagen bereits in der Planung sichergestellt. Abschnitt 4.3 enthält dazu die wesentlichen Planungshinweise. Während des Betriebes ist eine regelmäßige Wartung der Lüftungsanlage unerlässlich.

Bei der **Fensterlüftung** wird die Luftqualität dem Benutzer überlassen. Sie muss während des Betriebes sichergestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass der menschliche Geruchsinn bei langsam schlechter werdender Luftqualität an Empfindlichkeit verliert [Lit. 4.1]. Wenn in einem Schulzimmer gelüftet wird, weil die Benutzer die Luft als schlecht empfinden, so sind Ergebnisse zu erwarten, wie sie vorgängig bei unmotiviertem Lüftungsverhalten dargestellt wurden. Beim motivierten Lüftungsverhalten tritt die Wahrnehmung etwas in den Hintergrund; die Luftqualität wird besser, weil der Lehrer **sich erinnert**, die Fenster regelmässig zu öffnen. Der nebenstehende Kasten enthält Vorschläge, wie sich eine andauernde Motivation bei fenstergelüfteten Schulräumen erreichen lässt.

#### Kombination von mechanischer Lüftung und Fensterlüftung

Erfahrungen aus Messprojekten zeigen, dass bei mechanisch gelüfteten Schulhäusern die Fensterlüftung ermöglicht werden sollte; auch in diesen Schulhäusern gibt es Ereignisse, die eine Fensterlüftung nötig machen. Beispiele:

- Ausfall der Lüftungsanlage
  - Ueberbelegung (z.B. Schulbesuchstage)
  - Schularbeiten mit Lösungsmitteln, Farben,...
- Zudem empfinden die Benutzer einen Raum als angenehmer, wenn sie die Fenster öffnen können.

#### Motivierte Fensterlüftung

Die Messungen haben gezeigt, dass sich durch eine Motivation der Lehrer in fenstergelüfteten Schulen erhebliche Verbesserungen der Luftqualität ergeben. Da solche Motivationen kaum durchgeführt werden und zudem ihre Wirkung mit der Zeit wieder verlieren dürften, muss eine dauernde motivierte Fensterlüftung mit andern Mitteln erreicht werden.

Vorschläge:

- Das Fensterlüften könnte ähnlich wie das Tafelwischen als "Aemtlil" einem Schüler übertragen werden. Dadurch denken mehrere Personen an die Notwendigkeit des Lüftens. Dies bewirkt eine gegenseitige Motivation, die auch über längere Zeit aufrechterhalten werden kann.
- Denkbar ist auch eine Lösung, bei welcher der Lehrer über ein optisches Signal (oder eine allenfalls vorhandene Lautsprecheranlage) daran erinnert wird, die Fenster zu öffnen.

Im Bereich **Energieverbrauch** haben die Simulationen gezeigt, dass bei Lüftungsanlagen mit optimaler Wärmerückgewinnung in Schulen Energieeinsparungen erzielt werden. Als weitere wichtige Massnahme zur Energieeinsparung in Schulräumen hat sich die individuelle Raumtemperaturregelung erwiesen.

#### 4.2 Hinweise zum thermischen Raumkomfort und zur Luftfeuchtigkeit

Die Lüftungsart in einem Schulraum tangiert auch den thermischen Raumkomfort. Bei mechanisch gelüfteten Räumen sind insbesondere Zugerscheinungen zu vermeiden. Dazu ist es nötig, die Zuluft im Winter auf eine Temperatur von etwa 16-18 °C zu erwärmen. Bei den empfohlenen minimalen Luftmengen und den marktgängigen Luftauslässen ist dann eine zugfreie Lüftung problemlos machbar.

Bei der Fensterlüftung sind im Winter und bei starkem Wind Zugerscheinungen unvermeidbar. Man überlässt es dort dem Benutzer, diese störenden Einflüsse minimal zu halten.

Das Problem der Ueberhitzung im Sommer ist wegen der langen Sommerferien entschärft. Unabhängig von der Lüftungsart sind aber in allen Schulen ein guter, aussenliegender Sonnenschutz und ein Konzept zur Nachtlüftung unabdingbar, wenn komfortable Raumtemperaturen eingehalten werden sollen. In mechanisch gelüfteten Schulen ist dann eine mechanische Kühlung der Zuluft mit einer Kältemaschine nicht notwendig.

Die relative Luftfeuchtigkeit sollte idealerweise zwischen 40 und 55 % liegen. Im Winter sollte sie nicht unter 30 % sinken [Lit. 4.2]. Die Messungen im Schulhaus Gumpenwiesen haben relative Feuchtigkeiten deutlich unter 30 % ergeben. Diesem Umstand kann durch eine Wärmerückgewinnung mit Feuchteausaustausch (rotierender Wärmetauscher mit hygroskopischer Oberfläche) abgeholfen werden. Weitere Einrichtungen zur Befeuchtung der Zuluft bzw. zur Regelung der Luftfeuchtigkeit sind nicht zu empfehlen.

Bei den fenstergelüfteten Schulräumen liegt die gemessene relative Feuchtigkeit der Raumluft etwas höher als bei mechanisch gelüfteten. Sie kann allerdings im Winter auch unter 30 % sinken.

##### Nachtlüftung

Die Nachtlüftung im Sommer dient zum Auskühlen der Gebäudemasse während der Nacht; dadurch werden tiefere Raumlufttemperaturen tagsüber erreicht. Auch in mechanisch gelüfteten Schulen erfolgt die Nachtlüftung vorteilhaft über die Fenster. Bei der Fensterlüftung ist darauf zu achten, dass ein plötzlicher Wetterumschwung keine Schäden anrichten kann. In Schulen mit der Möglichkeit zur Nachtlüftung und gutem Sonnenschutz kann auf eine mechanische Kühlung der Zuluft (mit Kältemaschine) verzichtet werden.

##### Minimale Luftfeuchtigkeit

Zu tiefe Raumluftfeuchtigkeiten (unter 30 %) führen bei staubbelasteter Raumluft zu Reizungen der Schleimhäute infolge Austrocknung. In Schulen mit mechanischen Lüftungsanlagen genügt eine WRG mit Feuchteausaustausch (z.B. rotierender Wärmetauscher) zur Einhaltung minimaler Raumluftfeuchtigkeiten. Zudem ist die Staubbelastung in mechanisch belüfteten Räumen geringer, weil die Zuluft filtriert wird.

### 4.3 Planungshinweise

Die Aussenluftmenge ist nach der Personenbelegung und Art der Nutzung zu dimensionieren. In ein Klassenzimmer mit Rauchverbot sollten 15 m<sup>3</sup>/h Aussenluft pro Person zugeführt werden (CO<sub>2</sub>-Grenzwert: 1500 ppm).

Die **Raumtemperatur** sollte individuell geregelt werden können (Thermostatventile oder programmierbare Regelung). Die Wärmeabgabe erfolgt mit schnell reagierenden Heizkörpern (Radiatoren/Konvektoren). Auf den Einbau von Bodenheizungen sollte soweit als möglich verzichtet werden (Ausnahme in Räumen im EG als minimale Grundlastheizung). Die Lüftungsanlage übernimmt keine Regelfunktion im Bereich der Raumtemperatur.

Die **Zulufttemperatur** wird auf eine konstante minimale Einblastemperatur geregelt (ca. 16-18 °C). Der Nachwärmer der Zuluft kommt erst ab +5 °C Aussenlufttemperatur in Betrieb (WRG-Wirkungsgrad >75%).

Unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit der Belegung der Klassenzimmer kann in Verbindung mit einem Infrarot-Präsenzfühler die **Gesamtluftmenge** des zentralen Luftaufbereitungsgerätes kleiner als die Summe der Zuluftmengen aller Klassenzimmer gewählt werden (z.B. 75-80%).

Die **Kanalführung** ist so zu wählen, dass keine Schallübertragung von Raum zu Raum (Telefonischall) möglich ist. Die vertikale Zuluftverteilung erfolgt in Schächten, die horizontale Verteilung vorteilhaft in Rohren, die in der Decke einbetoniert sind.

Die **Zuluftzuführung** kann an der Decke oder über einen Brüstungskasten unter dem Fenster erfolgen. Die Luftzufuhr hat so zu erfolgen, dass im Raum eine "Luftwalze" entsteht und keine Zugerscheinungen auftreten. Der Zuluftzuführung in den Raum und der Wahl des Luftauslasses ist bei den hier vorgeschlagenen geringen Zuluftmengen die notwendige Beachtung zu schenken, damit keine Zonen mit ungenügender Aussenluftversorgung entstehen.

Die **Eingangshalle** (Pausenhalle) kann auch mit einer mechanischen Aussenluftversorgung versehen werden (eventuell nur Fensterlüftung).

#### Steuerung der Luftmenge

Die **Gesamtluftmenge** kann wie folgt geregelt werden:

- Konstante Luftmenge (ohne Mengenregelung). Dimensionierung unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit der Belegung.
- Stufenlose Zu- und Abluftmengenregelung (auf konstanten Systemdruck)

Die **Raumluftmenge** (Zu- und Abluft) des Einzelraumes wird mit einer belegungsabhängigen Klappensteuerung (IR-Präsenzfühler oder programmierbarem Belegungsfahrplan) 2-stufig variiert. Die Klappen müssen ohne störende Geräusche (Strömungsrauschen) die minimalen Luftmengen einhalten können.

Die **zusätzliche Fensterlüftung** muss auch in mechanisch gelüfteten Schulhäusern möglich sein.

#### Betriebs- und Laufzeiten

Eine Lüftungsanlage in Primar- oder Oberstufenschulen weist jährliche Laufzeiten von ca. 1600-1800 h/a auf. Die Anlage wird während des Unterrichts mittels einer Wochen- und/oder Jahresschaltuhr ein- und ausgeschaltet. Typische Betriebszeiten sind:

Montag, Dienstag:	7.30 - 16.30 Uhr
Mittwoch:	7.30 - 12.30 Uhr
Donnerstag, Freitag:	7.30 - 16.30 Uhr
Samstag:	7.30 - 12.30 Uhr
Sonntag, Ferien:	AUS

#### Wärmerückgewinnung mit Feuchteaustausch

Die Raumluftfeuchtigkeit wird nicht geregelt (keine Befeuchtungseinrichtungen). Mit der Wahl einer Wärmerückgewinnung mit Feuchteaustausch (z.B. rotierender Wärmetauscher) und der Filtrierung der Zuluft können die notwendigen hygienischen Raumzustände mit einer mechanischen Aussenluftversorgung eingehalten werden.

Der Betrieb der Anlage muss *bedienerfreundlich* sein. Der Abwart sollte die notwendigen manuellen Schaltungen der Lüftungsanlage an einem zentralen Schaltschrank vornehmen können.

Ein **Lufterdregister** [Lit. 4.3] bietet die Möglichkeit, die Aussenluft im Winter passiv vorzuwärmen und im Sommer passiv zu kühlen. Die Aussenluft wird über ein im Erdreich verlegtes Rohrregister angesaugt. Zur Aufbereitung der Zuluft muss bei Einblastemperaturen von ca. 18°C keine Heizenergie mehr zugeführt werden.

#### Typische Anlagekenngrößen (Primarschule)

(8 Klassenzimmer, Werkraum, Handarbeit)

##### 1 Klassenzimmer

Fläche (EBF):	74 m <sup>2</sup>
Raumvolumen:	223 m <sup>3</sup>
Belegung:	23 Personen
Aussenlufrate:	15 m <sup>3</sup> /h Person
max. Luftmenge:	345 m <sup>3</sup> /h
Grundluftwechsel:	120 m <sup>3</sup> /h (0.55 1/h)

##### Gesamte Lüftungsanlage (ohne Pausenhalle)

Luftmenge:	3000 m <sup>3</sup> /h
Belegung:	80% Gleichzeitigkeit
Investitionskosten:	Fr. 80000 - 90000.--

#### Wirtschaftlichkeit der Lüftungsanlage

Der Einbau einer Lüftungsanlage kann mit den heutigen Energiepreisen (Oel: 0.45 Fr./kg) nicht als wirtschaftlich bezeichnet werden (Rückzahlfristen > 50 Jahre). Die Mehrkosten lassen sich bei externen Lärmemissionen sowie zur Energieeinsparung und der dadurch verminderten Schadstoff-Emissionen vertreten.

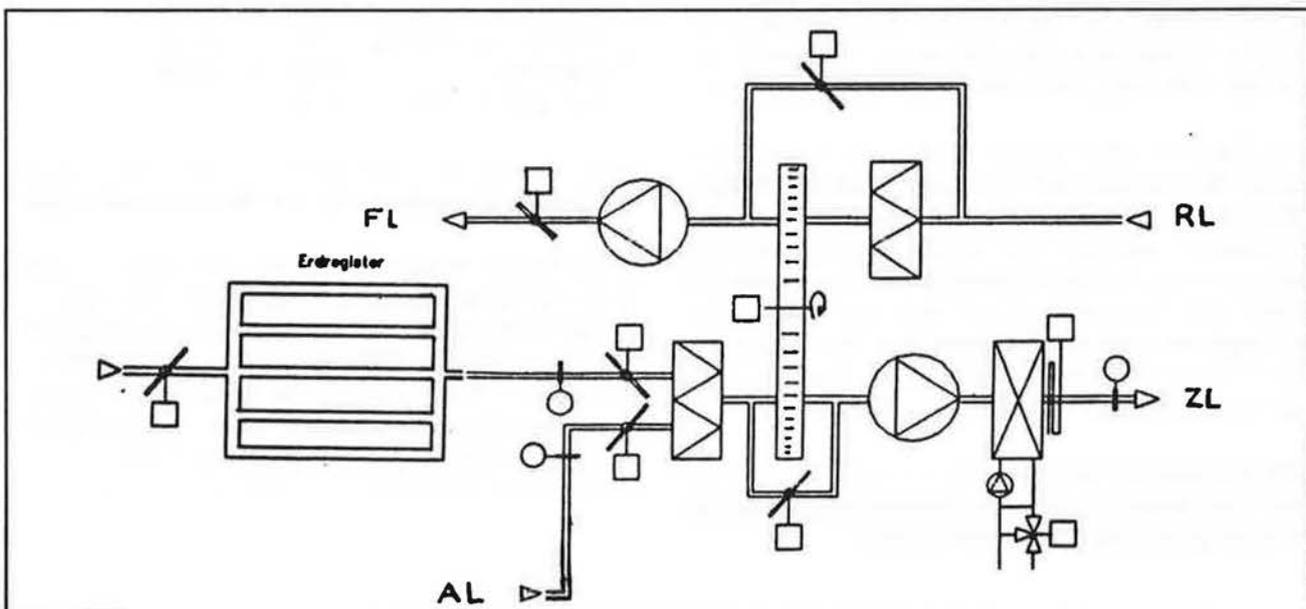


Bild 5: Prinzipschema einer mechanischen Aussenluftversorgungsanlage mit der Möglichkeit des Anschlusses eines Luft-Erdregisters.

**Anhang**



## A. Literaturverzeichnis

[3.1] "Demonstrationsprojekt Schulhaus Gumpenwiesen", SIA-Dokumentation D035, Zürich 1989.

[3.2] IEA-Annex 18 "Bedarfsgeregelte Lüftungsanlagen", Ueberblick über den Stand der Technik, EMPA Dübendorf, Juni 1989.

[3.3] Charlesworth P.S., "Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques - An Applications Guide", IEA Annex V, Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry 1988.

[3.4] "Handbuch der Klimatechnik" Bd. I, C.F. Müller Verlag, Karlsruhe 1989.

[3.5] Div. Autoren, IP-Haustechnik: Haustechnik in der integralen Planung, Band A, Kap. 5, S. 21-56, BFK, EDMZ, Bern 1987.

[3.6] Wick B., Meienhofer G.: "Realschulhaus Rain, Jona, Energetische Messungen" Baudepart. Kt. St. Gallen, 1991.

[3.7] Yuan X.: ETH-LES; "Numerical Simulation of Airflows in Gymnasia", Indoor Environment 1992; 1:224-233, Basel.

[3.8] Fanger P.O.: "Turbulence and Draft: The Turbulence of Airflow has a significant impact on the Sensation of Draft" ASHRAE Journal 31(7):18-23, 1989

[4.1] Fecker I., Wanner H.U., "Energieeinsparung bei Lüftungsanlagen durch eine kontrollierte Anpassung des Frischluftbedarfs" (Kurzbericht), ETH-Zürich 1987.

[4.2] Wanner H.U., "Komfort und Luftqualität", EFFENS-Tagungsband, Rapperswil, Mai 1990.

[4.3] Baumgartner Th., "Erdwärmenutzung für die Raumklimatisierung (NEFF 390)", 6. Schweiz. Status-Seminar Energieforschung im Hochbau, EMPA-KWH, 1990.

## B. Objektbeschriebe

### Schulhaus Dorf, Dübendorf

**Messperiode:** 9. 1. - 23. 3. 89

**Kenngrossen**

Fläche: 67 m<sup>2</sup>  
 Volumen: 213 m<sup>3</sup>

**Lüftung:** Fensterlüftung mit Querlüftungseffekt

**Fenster (öffnenbar):**

Nord: 1.0 m<sup>2</sup>  
 Ost: 3.8 m<sup>2</sup>

**Fenster (nicht öffnenbar):**

Nord: 6.6 m<sup>2</sup>  
 Ost: 6.2 m<sup>2</sup>

**Klasse:** 6. Primar  
**Belegung:** s. Stundenplan

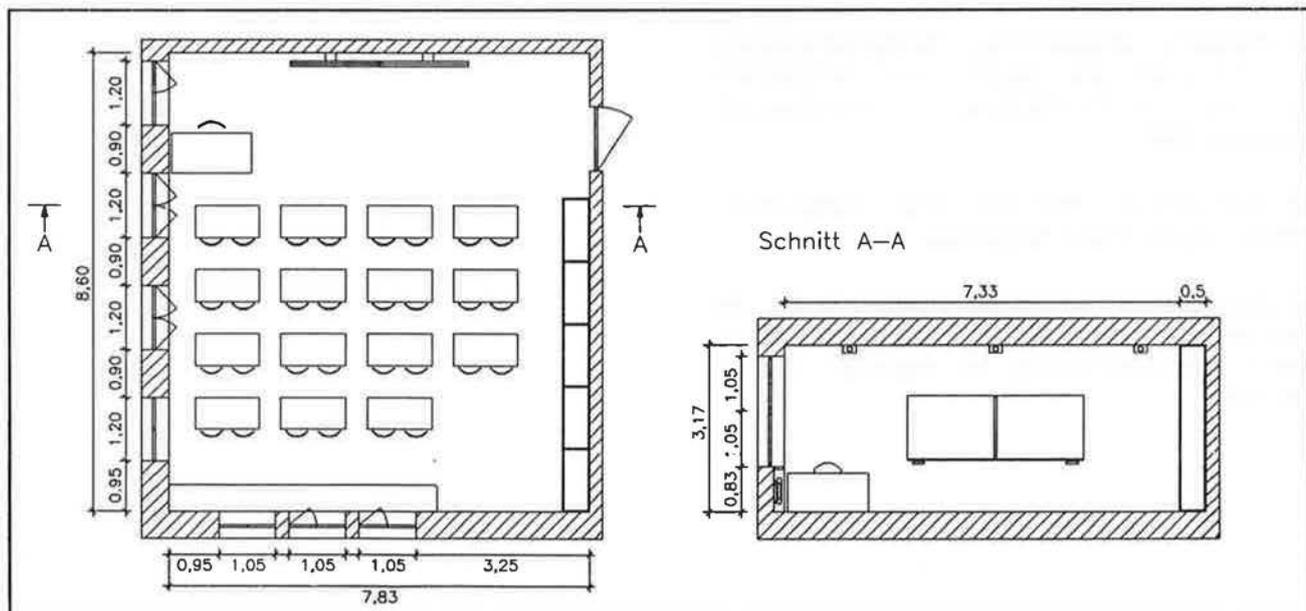
**Besonderes:**

- Agglomerationsgebiet
- Militärfluglärm



Zeit	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
08.00-08.50	24	14	11	22	23	34
09.00-09.45	24	14	13	22	23	34
10.10-10.50	--	11	24	21	22	18
10.55-11.45	1	11	--	21	--	3
13.40-14.30	23	--	--	--	23	--
14.40-15.30	23	--	--	--	23	--
15.40-16.30	1	--	--	--	6	--

Stundenplan und Anzahl Personen Schulhaus Dübendorf (Woche 9/89)



Grundriss und Schnitt des Klassenzimmers

### Schulhaus Stammheim

**Messperiode:** 26. 12. 88 - 23. 3. 89

**Kenngrößen**

Fläche: 75 m<sup>2</sup>  
 Volumen: 246 m<sup>3</sup>

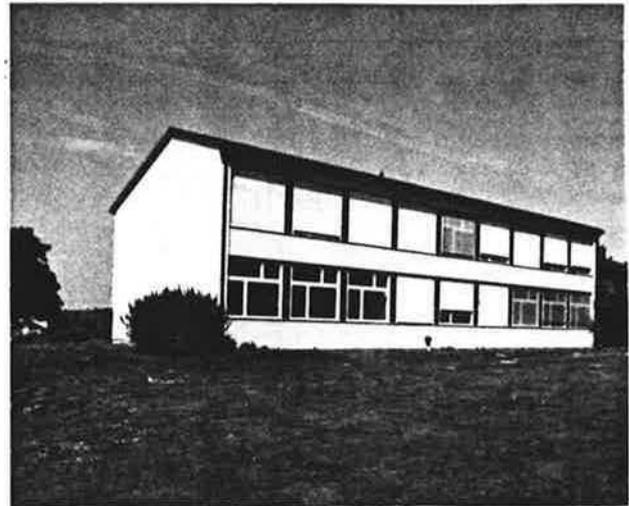
**Lüftung:** Fensterlüftung  
 Querlüftung nicht möglich

**Fenster (öffnbar):**  
 Süd: 6.7 m<sup>2</sup>

**Fenster (nicht öffnbar):**  
 Süd: 10.6 m<sup>2</sup>

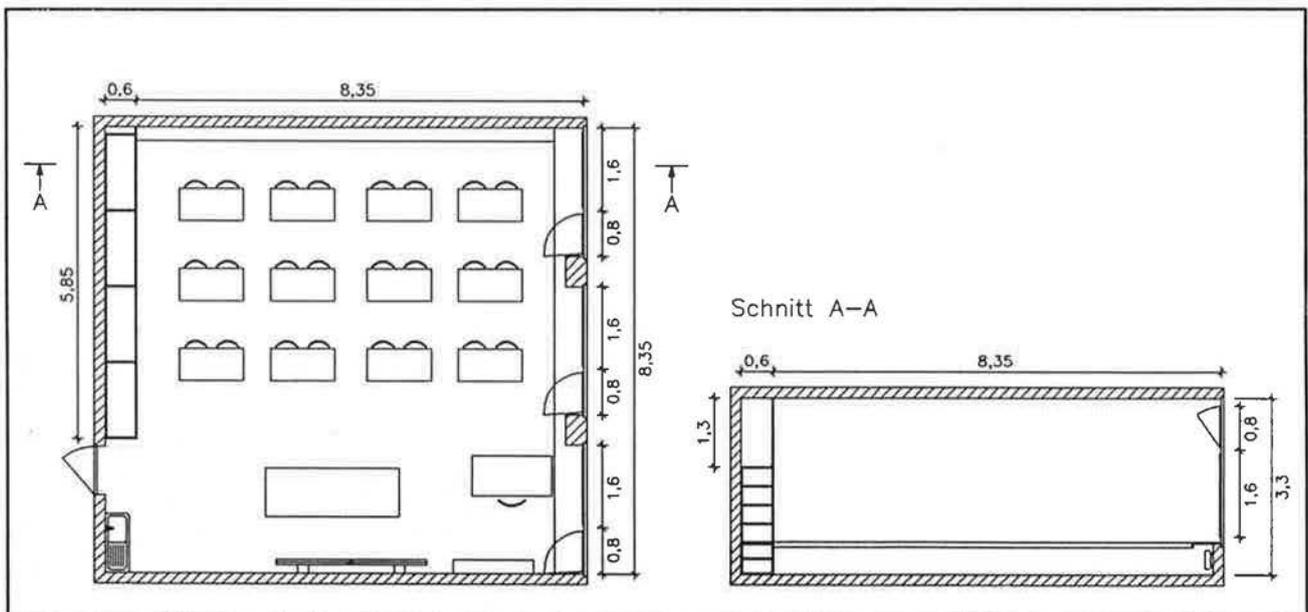
**Klasse:** 2. Real  
**Belegung:** s. Stundenplan

**Besonderes:**  
 ■ ruhige, ländliche Lage



Zeit	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
08.00-08.50	21	24	24	24	24	24
08.50-09.40	24	24	24	24	24	24
10.10-11.00	24	24	24	24	11	24
11.00-11.50	--	24	21	24	8	--
13.30-14.20	24	--	--	8	22	--
14.20.15.10	24	--	--	11	22	--
15.30-16.20	--	--	--	--	--	--

Stundenplan und Anzahl Personen Schulhaus Stammheim (Woche 7/89)



Grundriss und Schnitt des Klassenzimmers

**KV-Zürich**

**Messperiode:** 14. 11. - 9. 12. 88

**Kenngrossen**

Fläche: 56 m<sup>2</sup>

Volumen: 170 m<sup>3</sup>

**Lüftung:** Zwei-Kanal-Klimaanlage

Luftmenge 1750 m<sup>3</sup>/h

min. Aussenluftanteil 30 %

**Fenster (öffnbar):** keine

**Fenster (nicht öffnbar):**

Südwest: 14 m<sup>2</sup>

**Klasse:** diverse

**Belegung:** s. Stundenplan

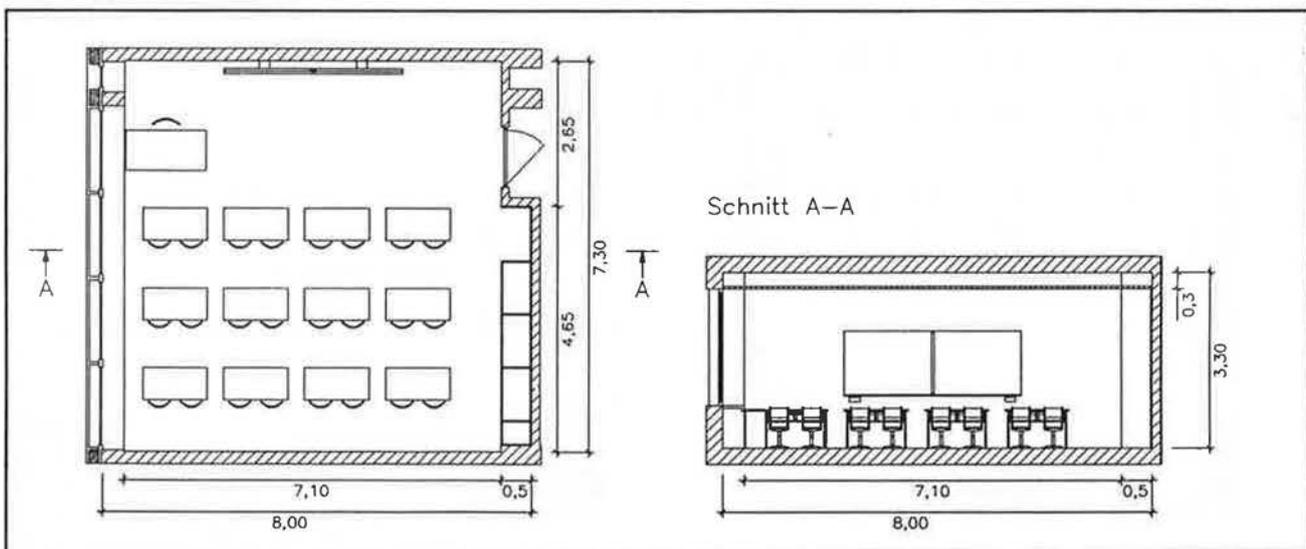
**Besonderes:**

- städtische Lage
- Strassenlärm



Zeit	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
07.30-08.15	22	--	20	18	17	--
08.20-09.05	22	19	20	18	17	--
09.10-09.55	22	19	19	18	18	--
10.15-11.00	22	18	19	20	18	--
11.05-11.50	22	21	22	22	22	--
11.55-12.40	--	21	20	22	--	--
13.00-13.45	--	--	--	18	22	--
13.50-14.35	22	18	21	23	22	--
14.40-15.25	23	18	20	23	20	--
15.45-16.30	--	--	20	20	10	--
16.35-17.20	--	--	20	20	10	--
17.40-18.25	26	--	--	11	--	--
18.30-19.15	26	--	--	11	--	--
19.20-20.05	--	19	23	19	--	--
20.10-20.55	--	19	23	19	--	--

Stundenplan und Anzahl Personen KVZ (Woche 48/89)



Grundriss und Schnitt des Klassenzimmers

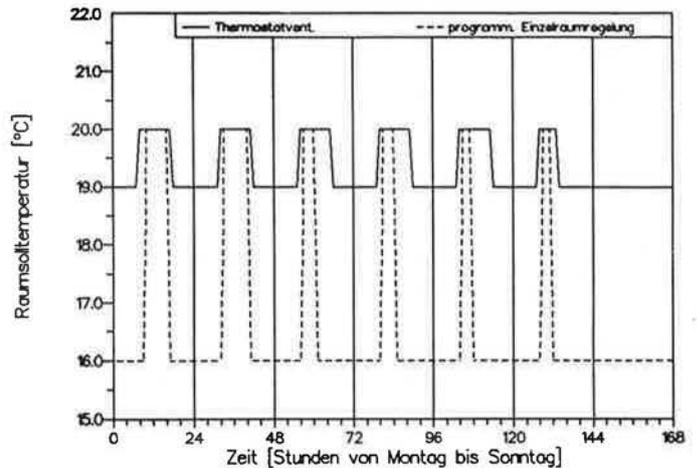
### C. Variable Randbedingungen der Simulationen

Die variablen Randbedingungen der Simulationen (Luftwechsel bei Fensterlüftung, Luftmengen bei mech. Lüftung, Regelung der Wärmeabgabe) werden grafisch dargestellt. Zur Regelung der Wärmeabgabe sind einige Bemerkungen nötig. Bei den Thermostatventilen kann eine Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur vorgesehen werden. Das Simulationsprogramm DOE2.1C lässt jedoch nur einen Fahrplan für die Raumsolltemperatur zu. Das Absenken der Vorlauftemperatur wurde in der Simulation mit einer tieferen nächtlichen Raumsolltemperatur näherungsweise berücksichtigt. Diese nächtliche Raumsolltemperatur wurde mit 19 °C angesetzt. Damit wurde ein Unterschied zur programmierbaren Einzelraumregelung geschaffen (abgesenkte Temperatur 16 °C). Der wichtigere Unterschied zwischen den beiden Regelungsarten dürfte jedoch sein, dass bei der programmierbaren Einzelraumregelung die tiefere Temperatur häufiger gefahren werden kann als bei Thermostatventilen.

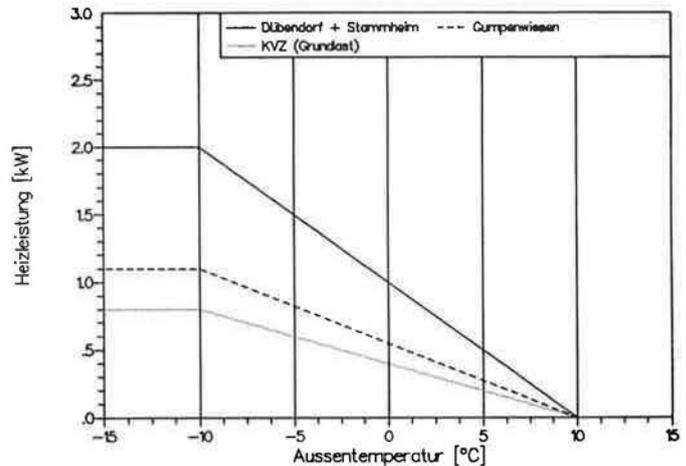
Die Heizkurven bei den Aussentemperaturgeregelten Systemen geben eine aussentemperaturabhängige Heizleistung an anstatt eine Vorlauftemperatur. Dies entspricht der Arbeitsweise des Simulationsprogrammes.

Bei den Luftmengen des mechanisch gelüfteten Schulraumes wird zwischen konstanter und zweistufiger Raumzuluftmenge unterschieden. Bei der Zweikanal-Anlage sieht der Fahrplan gleich aus wie bei der mechanischen Lüftung mit konstanter Raumzuluftmenge; jedoch beträgt die Luftmenge 1750 m³/h statt 345 m³/h.

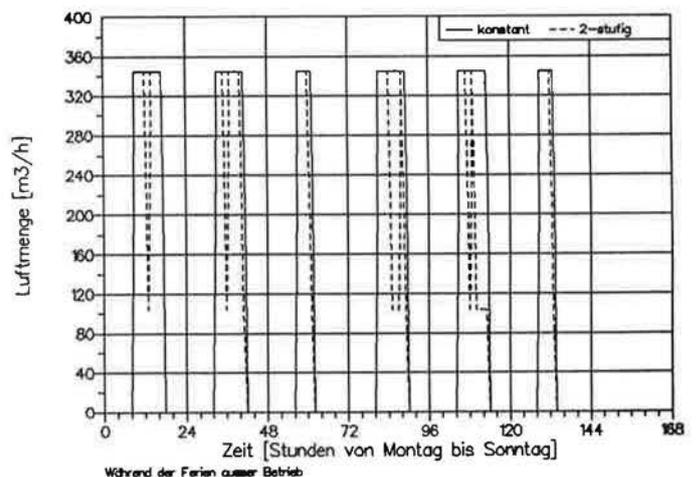
Bei den fenstergelüfteten Schulräumen wird ein Fahrplan für die Luftwechsel angegeben (nächste Seite). Die Ermittlung dieser Fahrpläne ist im Hauptteil des Berichtes beschrieben.



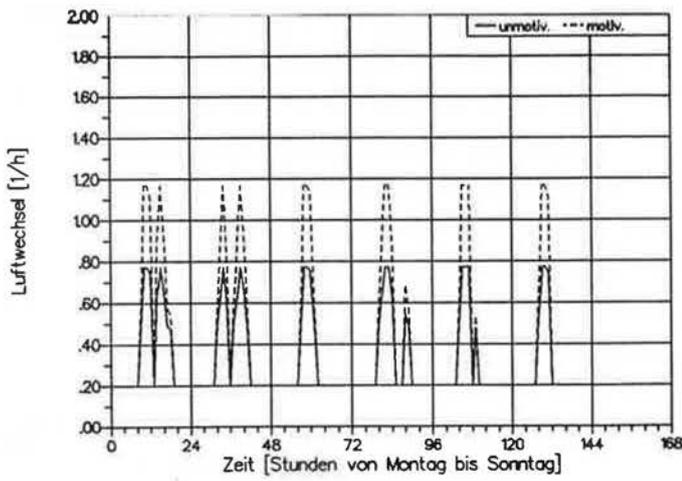
Fahrplan der Raumsolltemperaturen bei individueller Raumtemperaturregelung (DOE2-Eingabe)



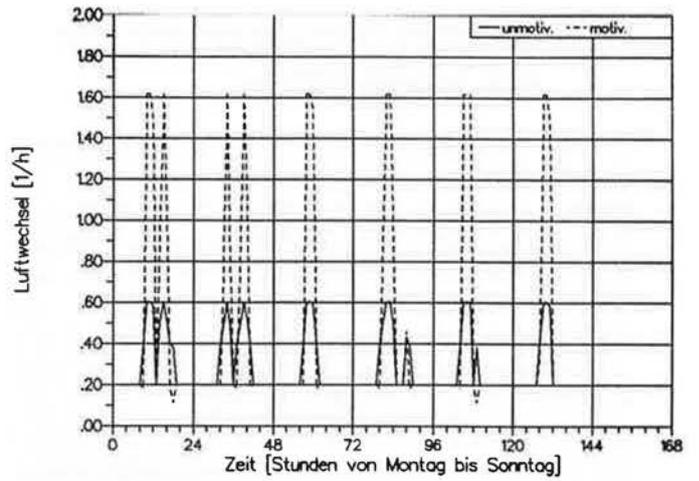
Heizkurven (DOE2-Eingabe)



Fahrplan für die Luftmengen bei mechanisch gelüfteten Schulräumen (DOE2-Eingabe)



*Fahrplan für den Luftwechsel im fenstergelüfteten Schulhaus Dübendorf (DOE2-Eingabe)*



*Fahrplan für den Luftwechsel im fenstergelüfteten Schulhaus Stammheim (DOE2-Eingabe)*

## D. Uebersicht über die Simulationsergebnisse

Die folgende Tabelle gibt eine vollständige Uebersicht über die Resultate der Simulationen mit dem Programm DOE2.1C.

Die Ausgaberesultate des Simulationsprogrammes bestehen in Nutzenergien. Diese wurden mit folgenden Nutzungsgraden auf Endenergien umgerechnet:

- Nutzungsgrad Wärme: 85 %
- Nutzungsgrad Kälte: 220 %

Lüftungsart	Zusatzparameter	Regelung Wärmeabgabe	ENDENERGIE [kWh]					ENERGIEKENNZAHL [MJ/m³a]					Total
			Heizung	Ventilatoren	Kälte	Haustech. Rest	Licht/Strom allg.	Elektrizität					
								Heizung	Ventilatoren	Kälte	Haustech. Rest	Licht/Strom allg.	
Fensterlüftung Dübendorf	unmot.	Thermost.	1321	---	---	62	722	64	---	---	3	35	102
	motiv.	Thermost.	1673	---	---	62	722	81	---	---	3	35	119
	motiv.	programm.	1307	---	---	62	722	64	---	---	3	35	102
	motiv.	Aussent.	3106	---	---	62	722	151	---	---	3	35	189
Fensterlüftung Stammheim	unmot.	Thermost.	1246	---	---	62	722	61	---	---	3	35	99
	motiv.	Thermost.	1475	---	---	62	722	72	---	---	3	35	110
	motiv.	programm.	1180	---	---	62	722	57	---	---	3	35	95
	motiv.	Aussent.	3106	---	---	62	722	151	---	---	3	35	189
Mechanisch 2-Kanal	ohne WRG	Aussent.	3201	3767	1028	248	722	156	183	50	12	35	436
Gumpenwiesen	WRG=.45	Aussent.	2898	206	---	62	1192	141	10	---	3	58	212
Mechanisch Raumzuluft konstant	WRG=.45	Thermost.	1395	288	---	62	722	68	14	---	3	35	120
	WRG=.70	Thermost.	858	288	---	62	722	42	14	---	3	35	94
	WRG=.70	programm.	516	288	---	62	722	25	14	---	3	35	77
Mechanisch Raumzuluft 2-stufig	WRG=.45	Thermost.	1219	247	---	62	722	59	12	---	3	35	109
	WRG=.70	Thermost.	799	247	---	62	722	39	12	---	3	35	89
	WRG=.70	programm.	487	247	---	62	722	24	12	---	3	35	74

## E. Messstellenliste

Bei den Messgrößen mit Messintervall fünf Minuten wurde der Kanal alle 10 Sekunden abgetastet und der Mittelwert alle 5 Minuten gespeichert. Bei den Messgrößen mit Messintervall 1 Stunde wurde der Kanal jede Minute abgetastet und der Mittelwert jede Stunde gespeichert.

### Schulhaus Dorf, Dübendorf

Nr.	Messgrösse	Abkürz.	Einheit	Messintervall	Bemerkungen
1	Fensteröffnung (Ostfenster)	Fe Vo	%	5 Min.	100 % = 6 Fensterflügel 5 Min. geöffnet
2	Fensteröffnung (Nordfenster)	Fe Hi	%	5 Min.	100 % = 2 Fensterflügel 5 Min. geöffnet
3	CO <sub>2</sub> -Konzentration Raumluft	CO <sub>2</sub> Raum	ppm	5 Min.	
4	CO <sub>2</sub> -Konzentration Aussenluft	CO <sub>2</sub> Aus- sen	ppm	5 Min.	nur zeitweise gemessen
6	Raumlufttemperatur 1	ti Raum	°C	1 Std.	
7	Aussenlufttemperatur	tä Dach	°C	1 Std.	
8	Relative Feuchte Raumluft	r.F. Raum	%	1 Std.	
9	Raumlufttemperatur 2	ti Raum	°C	1 Std.	Temperaturfühler des Feuchtemessgerätes (Kontrollgrösse)
10	Personenzahl	Pers	--		schriftl. Protokoll des Lehrers

**Schulhaus Stammheim**

Nr.	Messgrösse	Abkürz.	Einheit	Messintervall	Bemerkungen
1	Fensteröffnung (Fenster oben)	Fe Ob	%	5 Min.	100 % = 3 Fensterflügel 5 Min. geöffnet
2	Fensteröffnung (Fenster unten)	Fe Un	%	5 Min.	100 % = 3 Fensterflügel 5 Min. geöffnet
3	CO <sub>2</sub> -Konzentration Raumluft	CO <sub>2</sub> Raum	ppm	5 Min.	
4	CO <sub>2</sub> -Konzentration Aussenluft	CO <sub>2</sub> Aus- sen	ppm	5 Min.	nur zeitweise gemessen
6	Raumlufttemperatur 1	ti Raum	°C	1 Std.	
7	Aussenlufttemperatur	ta Dach	°C	1 Std.	
8	Relative Feuchte Raumluft	r.F. Raum	%	1 Std.	
9	Raumlufttemperatur 2	ti Raum	°C	1 Std.	Temperaturfühler des Feuchtemessgerätes (Kontrollgrösse)
10	Personenzahl	Pers	--		schriftl. Protokoll des Lehrers

**KV-Zürich**

Nr.	Messgrösse	Abkürz.	Einheit	Messintervall	Bemerkungen
1	Zuluftgeschwind. 1	v1 ZL	m/s	5 Min.	Zuluftkanal 1
2	Zuluftgeschwind. 2	v2 ZL	m/s	5 Min.	Zuluftkanal 2
3	CO <sub>2</sub> -Konzentration Zuluft 2	CO <sub>2</sub> ZL2	ppm	5 Min.	nur im Zuluftkanal 2 ge- messen
4	CO <sub>2</sub> -Konzentration Raumluft (BINOS)	CO <sub>2</sub> Raum-B	ppm	5 Min.	BINOS-Messgerät (Kontrollgrösse)
5	CO <sub>2</sub> -Konzentration Raumluft (Aritron)	CO <sub>2</sub> Raum-A	ppm	5 Min.	Aritron-Messgerät
6	Zulufttemperatur	t ZL(1+2)	°C	1 Std.	Mittel von Kanal 1 und 2
8	Relative Feuchte Raumluft	r.F. Raum	%	1 Std.	
9	Raumlufttemperatur	ti Raum	°C	1 Std.	
10	Aussenlufttemperatur	ta Dach	°C	1 Std.	
11	CO <sub>2</sub> -Konzentration Aussenluft	CO <sub>2</sub> Aus- sen	ppm	5 Min.	nur zeitweise gemessen
12	Personenzahl	Pers	--		schriftl. Protokoll des Lehrers
13	Zuluftvolumen	V ZL	m <sup>3</sup> /h	5 Min.	berechnet aus Nr. 1 und 2

## F. Luftqualität und Komfort In Turnhallen

### Einleitung

Im allgemeinen werden Turnhallen in der Schweiz natürlich gelüftet. In den letzten Jahren sind jedoch Turnhallen mit mechanischen Lüftungsanlagen gebaut worden [Lit. 3.1, 3.6]. Daher interessiert die Frage nach Luftqualität und Komfort in solchen Hallen.

Turnhallen werden in der Schweiz häufig für Veranstaltungen mit dichter Belegung (z.B. Gemeindeversammlungen) benutzt. Zur Einhaltung der Luftqualität werden bei solchen Anlässen grosse Luftmengen benötigt, und es stellt sich die Frage, wie diese Luftmengen in die Halle gebracht werden können, ohne Zug- und Komfortprobleme zu verursachen.

Es ist klar, dass für einen solchen Veranstaltungsbetrieb eine grössere und entsprechend teurere Lüftungsanlage benötigt wird als sie der Sportbetrieb allein erforderte. Ob die Lüftungsanlage für den Sportbetrieb oder für den Veranstaltungsbetrieb ausgelegt wird, verlangt einen Grundsatzentscheid in der Planungsphase; dieser dürfte u.a. davon abhängen, wie häufig Veranstaltungen mit dichter Belegung zu erwarten sind.

### Die Untersuchungen

Um Aufschluss über Luftqualität und Komfort in Turnhallen zu erhalten, wurden am Labor für Energiesysteme der ETH Zürich im Rahmen des EFFENS-Projektes Simulationen der Raumluftrömung durchgeführt [Lit. 3.7]. Die Untersuchungen wurden an einer Einfachturnhalle (Turnhalle Gumpenwiesen, [Lit. 3.1]) und an einer Dreifachturnhalle (Turnhalle Rain [Lit. 3.6]) durchgeführt (Randbedingungen: Tab. F1).

Für den Sportbetrieb und den Veranstaltungsbetrieb (mit dichter Belegung) wurden drei verschiedene Lufteinführungen in den Raum betrachtet (Tab. F2). Beim Sportbetrieb wurde zudem die Wärmeabgabe der Heizung variiert: Fussboden- und Radiatorenheizung. Beim Veranstaltungsbetrieb war infolge der hohen Personenwärme kein Heizbetrieb nötig.

	Einfach-Turnhalle	Dreifach-Turnhalle
Aussentemp. °C	-2.0	-2.0
mittl. Hallentemp. °C	16.0	16.0
Zulufttemp. °C	16.0	16.0
Zuluftgeschwind. m/s	nach Einlass	nach Einlass
Luftwechsel 1/h	0.7 / 0.36	0.14
Anz. Pers.	23	40

Tab. F1: Randbedingungen für den Sportbetrieb

Lufteinlass	Beschreibung
Typ 1	Lufteinlässe an der Hallendecke; Lufteinführung vertikal nach unten
Typ 2	Lufteinlässe an einer Längswand der Halle, 2.5 m über Boden; horizontale Lufteinführung
Typ 3	Lufteinlässe direkt über dem Boden; horizontale Lufteinführung

Als Wärmeabgabesystem wurden Bodenheizung und Radiatorenheizung in die Untersuchungen einbezogen.

Tab. F2: Kennzeichnung der Lufteinlässe, die untersucht wurden

Berechnungsformel
$PD = (34 - T)(v - 0.05)^{0.62}(3.14 - 0.37vI) \quad [\%]$
PD = Prozent Unzufriedene wegen Luftzug [%] T = Raumlufttemperatur [°C] v = Luftgeschwindigkeit [m/s] I = Turbulenz-Intensität [%]
Für $v < 0.05$ m/s setzt man $v = 0.05$ m/s Falls $PD > 100$ %, so gilt $PD = 100$ %

Tab. F3: Berechnungsformel für Luftzugprobleme (aus [Lit. 3.8])

## Ergebnisse - Sportbetrieb

Die Randbedingungen für den Sportbetrieb sind in Tab. F1 zusammengestellt. Die gewählten Luftmengen entsprechen dem tatsächlichen Betrieb der Turnhallen Gumpenwiesen und Rain. (Die Abluft der Turnhalle wird in beiden Fällen zur Belüftung der Garderoben verwendet. Die Luftmengen sind daher auf den Bedarf der Garderoben abgestimmt).

- Unabhängig vom Lufteinlass ergibt sich beim Sportbetrieb eine vollständige Durchmischung der Raumluft. Dies gilt für die Temperaturverteilung (Bild F1) und die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Eine Verdrängungslüftung lässt sich wegen der kleinen Luftwechsel auch mit Lufteinlässen vom Typ 3 nicht erreichen.

- Die vollständige Durchmischung der Raumluft weist darauf hin, dass **alle** drei Lufteinlastypen etwa die **gleiche** Luftqualität bieten.

- Bei den zwei untersuchten Beispielen (Luftmengen durch Bedarf der Garderoben bestimmt) stellt die Luftqualität während des Sportbetriebes kein Problem dar (grosses Zuluftvolumen pro Person). Zudem wird das Luftqualitätsproblem durch das grosse Raumvolumen weiter entschärft.

Die Beurteilung des thermischen Raumkomforts und allfälliger Zegerscheinungen (gemäss Tab. F3) während des Sportbetriebes ist nicht möglich. Bei beiden Grössen spielt die **Relativbewegung** zwischen Mensch und Umgebungsluft eine wichtige Rolle, d.h. die berechneten lokalen Luftgeschwindigkeiten sind für die Komfortbeurteilung während des Sportbetriebes gar nicht relevant.

Wenn die Sporttreibenden sitzen oder stehen (etwa während der Instruktion durch den Leiter), sind die berechneten Luftgeschwindigkeiten relevant für die Komfortbeurteilung. Für diesen Fall können die drei Lufteinlastypen verglichen werden.

- Der Vergleich zeigt, dass Zugprobleme (berechnet gemäss Tab. F3) kleiner werden, je kleiner die Lufteinblasgeschwindigkeit ist (vgl. Bild F2 und F3).

### Schlussfolgerung für den Sportbetrieb:

Kleine Lufteinblasgeschwindigkeiten sind zumindest für den Winterfall zu empfehlen. Sie minimieren Zegerscheinungen, ohne der Luftqualität abträglich zu sein. Einzig ein Strömungskurzschluss ist zu vermeiden; dies geschieht durch genügend grosse Distanz zwischen Luftein- und austritt.

Der thermische Komfort ist stark von der Aktivität abhängig. Diese ist bekanntlich beim Sport starken Schwankungen unterworfen und müssen durch Anpassen der Kleidung ausgeglichen werden.

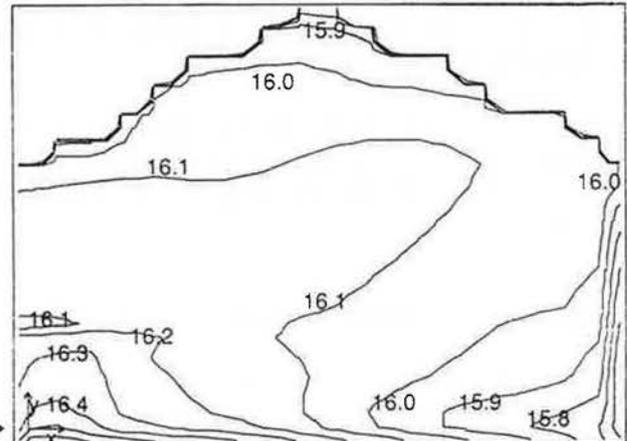


Bild F1: Temperaturverteilung in einem Schnitt der Einfach-Turnhalle (Einlass-Typ 3, Bodenheizung)

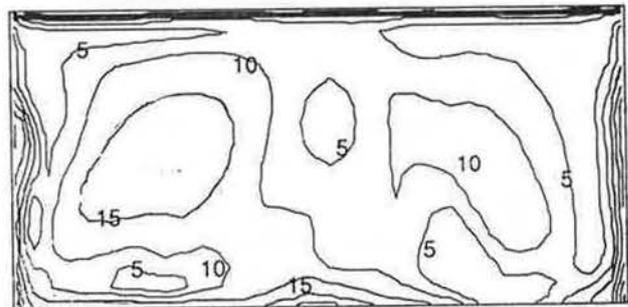


Bild F2: Prozent Unzufriedene wegen Luftzug gemäss Tab. F3 in der Einfach-Turnhalle (Einlass-Typ 3,  $v = 0.2 \text{ m/s}$ , 1.4m über Boden)

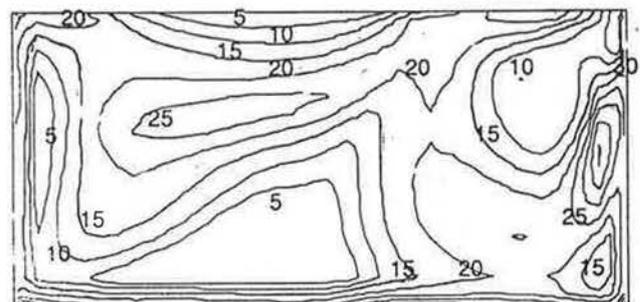


Bild F3: Prozent Unzufriedene wegen Luftzug gemäss Tab. F3 in der Einfach-Turnhalle (Einlass-Typ 2,  $v = 2.3 \text{ m/s}$ , 1.4m über Boden)

Eine einfache Komfortbetrachtung nach Fanger zeigt, dass dann die angenommene Raumlufttemperatur von 16 °C vollauf genügt.

Bild F1 zeigt, dass bei Bodenheizung der bekannte Kaltluftabfall unter Fenstern in Kauf genommen werden muss. Bei Radiatorenheizung kann er gebremst werden.

## Ergebnisse - Veranstaltungsbetrieb

Die nebenstehende Resultatübersicht zeigt in grafischer Form die wichtigsten Ergebnisse für den Veranstaltungsbetrieb mit den zugehörigen Randbedingungen.

- Beim Fall 16 (Einlass-Typ 1) ist lokal mit z.T. **starken Zegerscheinungen** zu rechnen (mehr als 30 Prozent Unzufriedene gem. Tab. F3). Die CO<sub>2</sub>-Konzentration deutet auf eine vollständige Durchmischung der Raumluft hin. Dank der Luftmenge von 25000 m<sup>3</sup>/h liegt sie jedoch durchwegs tiefer als 1500 ppm.
- Beim Fall 20 (Einlass-Typ 2) ergeben sich global **starke Zegerscheinungen** trotz kleinerer Luftmenge. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration liegt durchwegs über 1500 ppm (ebenfalls vollständige Durchmischung).
- Beim Fall 19 (Einlass-Typ 3) wirkt das Strömungsbild ruhiger als bei den Fällen 16 und 20. Es deutet auch darauf hin, dass sich in grossen Teilen der Halle eine Verdrängungsströmung einstellt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die wie gewünscht einen starken Gradienten von unten nach oben aufweist (Längsschnitt), bestätigt diesen Eindruck. Allerdings werden einige Randbereiche schlecht durchspült. Die Zugprobleme (berechnet nach Tab. F3) sind im Vergleich zu den Fällen 16 und 20 kleiner. Allerdings sind auch hier kritische Zonen auszumachen, vor allem im Bodenbereich.
- Beim Fall 19a wurden die Personen als lokale Wärmequellen (in Sitzreihen) berücksichtigt, während beim Fall 19 die Personenwärme homogen an die unterste Luftschicht abgegeben wurde. Dadurch scheint die Verdrängungslüftung noch gleichmässiger zu werden. Allerdings müsste dieses Phänomen in weiteren Untersuchungen genauer abgeklärt werden.
- Bei der Einfachturnhalle (Fall 21, Einlass-Typ 3) ist die Verdrängungslüftung weniger ausgeprägt, weil die Zuluft über die Schmalseite der Halle eingeführt wird. Betreffend Zugprobleme ist auch hier der Bodenbereich kritisch.

### Schlussfolgerungen für den Veranstaltungsbetrieb

Wenn grosse Luftmengen in die Halle gebracht werden, ist mit **Zegerscheinungen** in jedem Fall zu rechnen. Die Variante mit dem Einlass am Boden (Typ 3) bietet jedoch diesbezüglich die kleinsten Probleme und ist auch punkto **Luftqualität vorteilhaft**. Gute Realisierungsmöglichkeiten für diesen Einlasstyp ergeben sich unter einer Bühne oder bei einer mobilen Zuschauertribüne, die in der Wand versenkt werden kann. Bei diesen beiden Fällen kann die nötige Fläche für die Lufteinlässe günstig erschlossen werden.

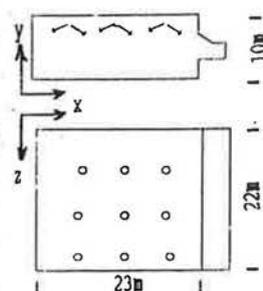
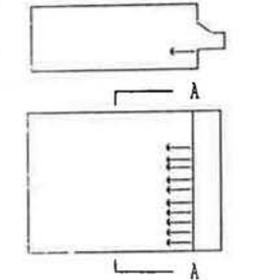
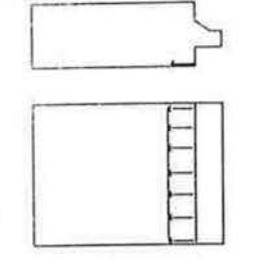
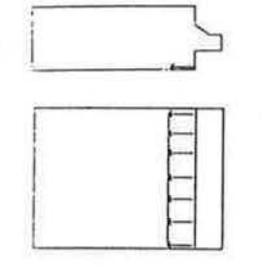
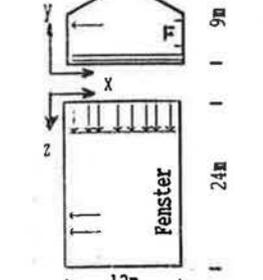
### Grenzen der Simulationen

Simulationen sind grundsätzlich nur so gut, wie die Randbedingungen, die ihnen zugrunde liegen. Die hier gewählten Randbedingungen gehen von einem Wintertag mit wenig Sonnenstrahlung aus. Andere Randbedingungen (z.B. Tag mit Sonnenstrahlung oder mit höherer Aussentemperatur oder auch ein Sommertag) würden insbesondere andere Oberflächentemperaturen ergeben. Diese üben vor allem beim Sportbetrieb einen grossen Einfluss auf die Raumluftströmung aus, sind aber auch beim Veranstaltungsbetrieb noch bedeutend. In diesem Sinn sind die hier vorgestellten Ergebnisse als ein Anfang zu bezeichnen.

### Rechenzeiten

Computerprogramme zur Berechnung der Raumluftströmung benötigen heute noch einen Grossrechner (z.B. für die vorliegende Arbeit einen Cray-Rechner der ETH Zürich) und auch auf diesen noch Rechenzeiten von mehreren Stunden.

Die Anwendung solcher Strömungsmodelle erfordert viel Know-how in der Strömungslehre, aber auch in der Rechentechnik (Stabilitäts- und Konvergenzprobleme). Strömungsrechnungen sind daher immer noch Gegenstand intensiver Forschung.

Luftzuführung/Randbedingungen	Luftc	Kommentar
<p>Fall 16</p>  <p>Aussentemp.: -2.0 °C Raumtemp.: 24.0 °C Zulufttemp.: 20.0 °C Einblas- geschw.: 5.1 m/s Luftmenge: 25000 m<sup>3</sup>/h Luftwechsel: 2.4 1/h Anz. Pers.: 1600 Heizung: Aus Personenwärme wird homogen abgegeben.</p>	<p>Ebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei dieser Luftführung ergibt sich ein vollständige Durchmischung der Raumluft. Tiefe CO<sub>2</sub>-Konzentration dank hoher Luftmenge.</li> <li>• Lokal ergeben sich z.T. starke Zugserscheinungen "von oben" (mehr als 30 % Unzufriedene).</li> </ul>
<p>Fall 20</p>  <p>Aussentemp.: -2.0 °C Raumtemp.: 24.0 °C Zulufttemp.: 20.0 °C Einblas- geschw.: 10.0 m/s Luftmenge: 18000 m<sup>3</sup>/h Luftwechsel: 1.8 1/h Anz. Pers.: 1600 Heizung: Aus Personenwärme wird homogen abgegeben.</p>	<p>Ebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei dieser Luftführung ergibt sich ein vollständige Durchmischung der Raumluft. Wegen der tieferen Luftmenge liegt die CO<sub>2</sub>-Konzentration höher als bei Fall 16.</li> <li>• In der ganzen Halle ist mit starken Zugserscheinungen zu rechnen (z.T. über 50 % Unzufriedene).</li> </ul>
<p>Fall 19</p>  <p>Aussentemp.: -2.0 °C Raumtemp.: 24.0 °C Zulufttemp.: 20.0 °C Einblas- geschw.: 0.2 m/s Luftmenge: 18000 m<sup>3</sup>/h Luftwechsel: 1.8 1/h Anz. Pers.: 1600 Heizung: Aus Personenwärme wird homogen abgegeben.</p>	<p>Ebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei dieser Luftführung wird eine Verdrängungslüftung realisiert. Starke Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration von unten nach oben (wie gewünscht). Einzelne Teile der Halle werden jedoch schlecht durchspült.</li> <li>• Zugserscheinungen bieten vor allem am Boden Probleme, mit Unzufriedenen ist auch hier zu rechnen.</li> </ul>
<p>Fall 19a</p>  <p>Aussentemp.: -2.0 °C Raumtemp.: 24.0 °C Zulufttemp.: 20.0 °C Einblas- geschw.: 0.2 m/s Luftmenge: 18000 m<sup>3</sup>/h Luftwechsel: 1.8 1/h Anz. Pers.: 1600 Heizung: Aus Personenwärme wird in "Sitzreihen" abgegeben.</p>	<p>Ebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundsätzlich gelten hier die Aussagen von Fall 19. Die Berücksichtigung der Tatsache, dass die Personenwärme lokal abgegeben wird, scheint sowohl die CO<sub>2</sub>-Konzentration (Lufthygiene) als auch die Zugserscheinungen positiv zu beeinflussen.</li> </ul>
<p>Fall 21</p>  <p>Aussentemp.: -2.0 °C Raumtemp.: 24.0 °C Zulufttemp.: 20.0 °C Einblas- geschw.: 0.2 m/s Luftmenge: 5100 m<sup>3</sup>/h Luftwechsel: 2.3 1/h Anz. Pers.: 450 Heizung: Aus Personenwärme wird in "Sitzreihen" abgegeben.</p>	<p>Ebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obwohl es sich hier um eine kleinere Halle handelt, ist eine Verdrängungslüftung weniger gut realisierbar als in der grossen Halle (Fall 19), weil die Luft über die Schmalseite eingeführt wird.</li> <li>• Bei den Zugserscheinungen gilt das gleiche wie bei Fall 19.</li> </ul>

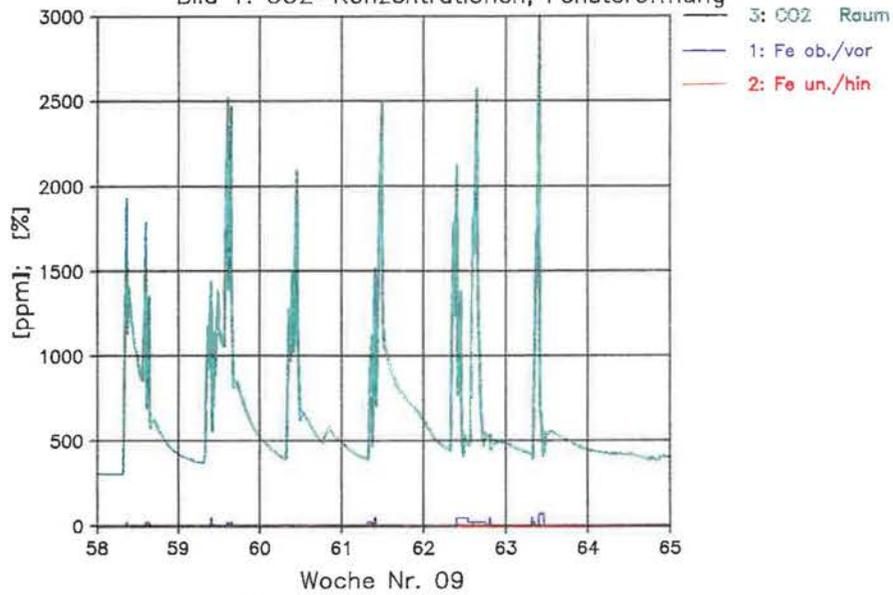
## G. Wochengrafiken

In den folgenden Grafiken sind die Verläufe der Messgrössen über ausgewählte Wochen dargestellt:

- Dübendorf, Woche 9 1989 (unmotiviertes Lüftungsverhalten)
- Dübendorf, Woche 11 1989 (motiviertes Lüftungsverhalten)
- Stammheim, Woche 7 1989 (unmotiviertes Lüftungsverhalten)
- Stammheim, Woche 11 1989 (motiviertes Lüftungsverhalten)
- KV Zürich, Woche 48 1988

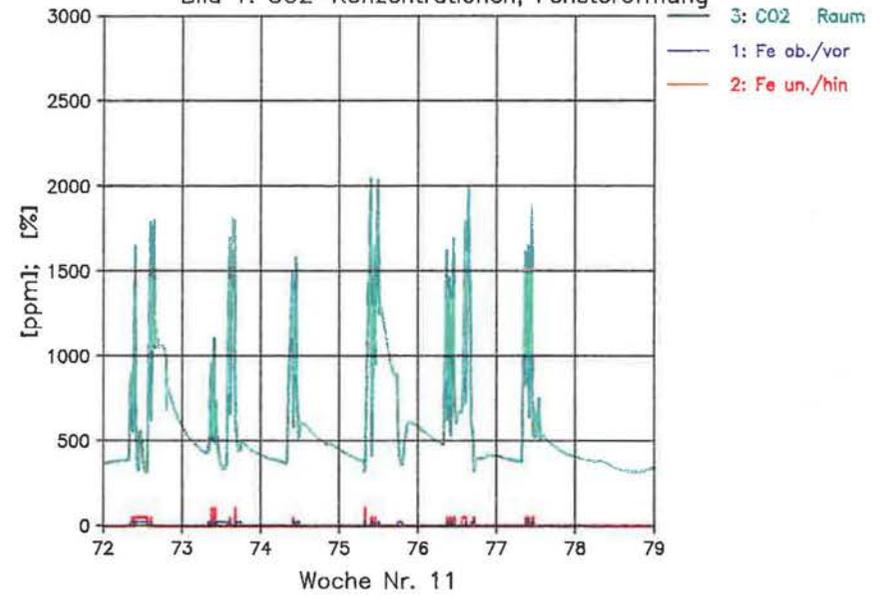
### EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

Bild 1: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen; Fensteröffnung



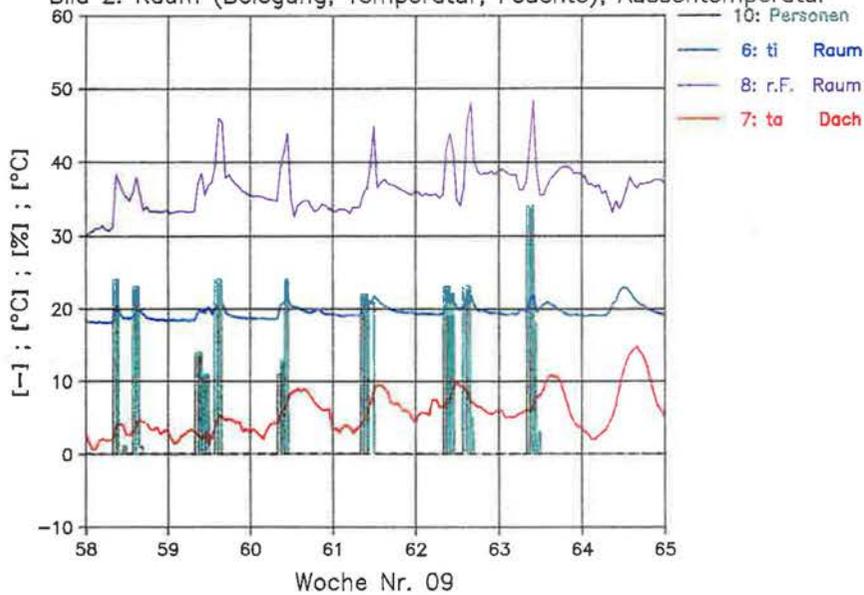
### EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

Bild 1: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen; Fensteröffnung



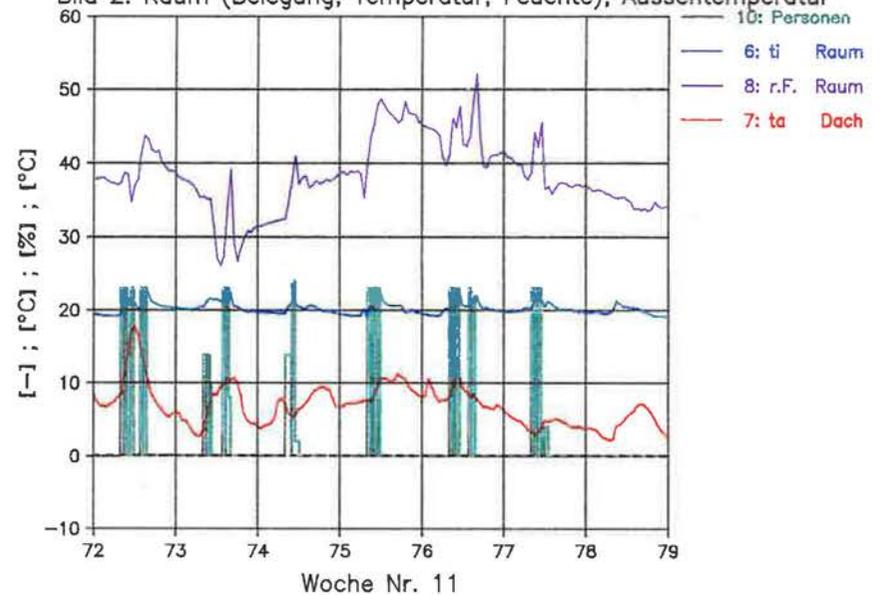
### EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

Bild 2: Raum (Belegung; Temperatur; Feuchte); Aussentemperatur



### EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

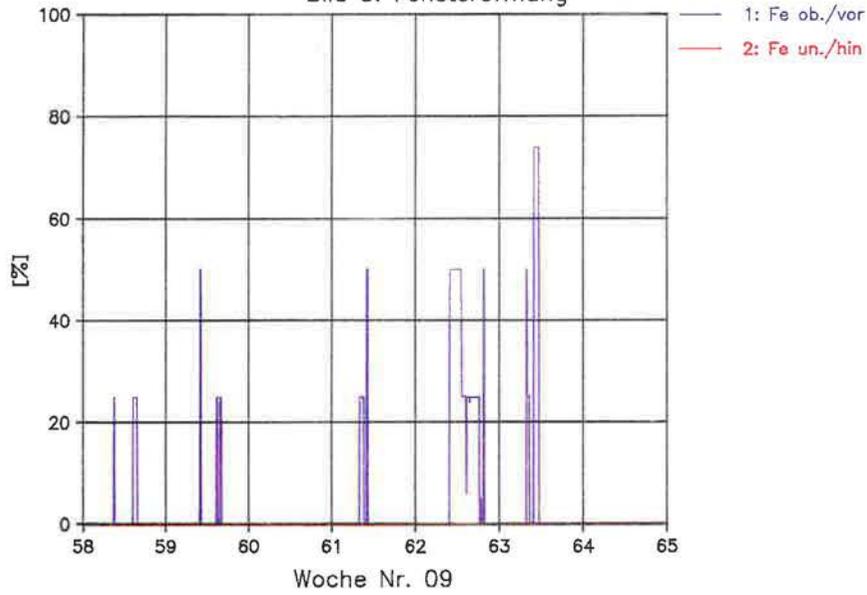
Bild 2: Raum (Belegung; Temperatur; Feuchte); Aussentemperatur





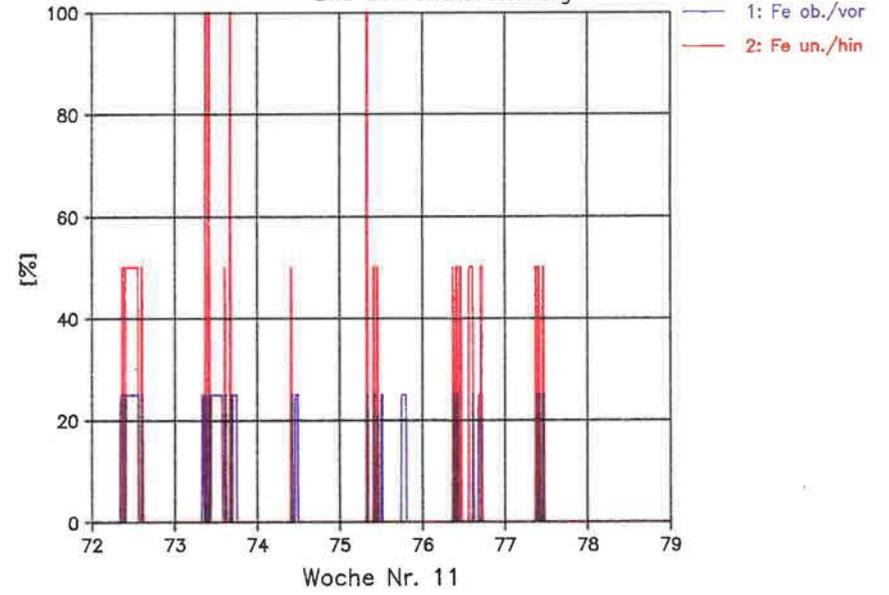
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

Bild 3: Fensteröffnung



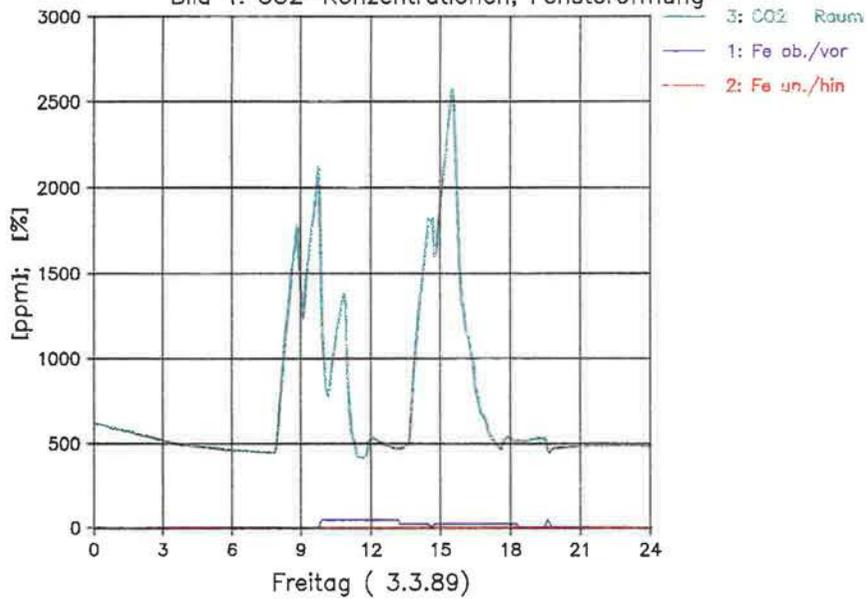
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

Bild 3: Fensteröffnung



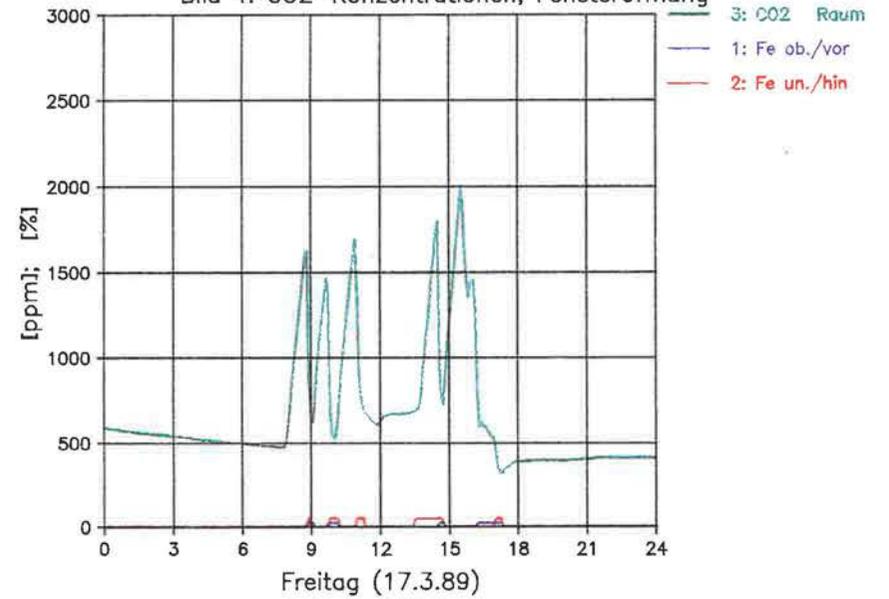
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

Bild 4: CO2-Konzentrationen; Fensteröffnung



# EFFENS: Luftqualitätsmessung Dübendorf 1989

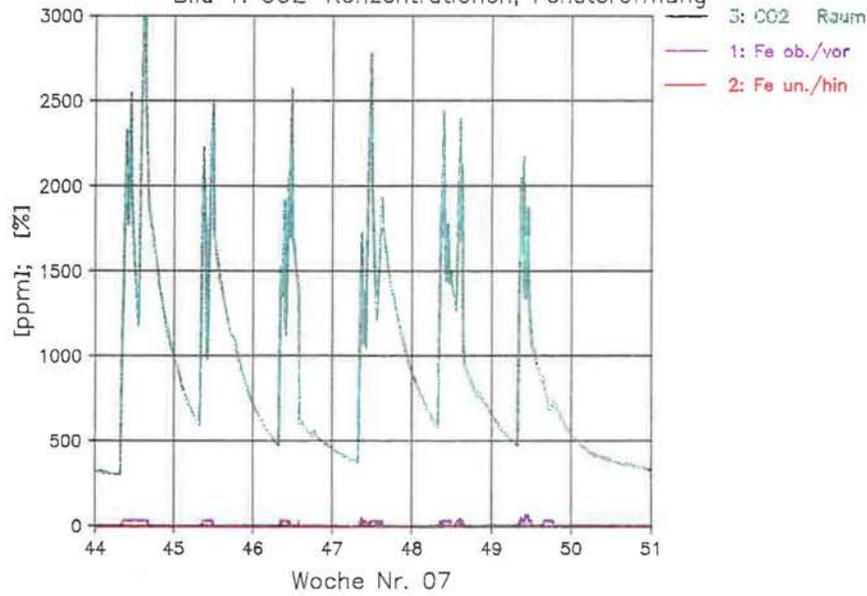
Bild 4: CO2-Konzentrationen; Fensteröffnung





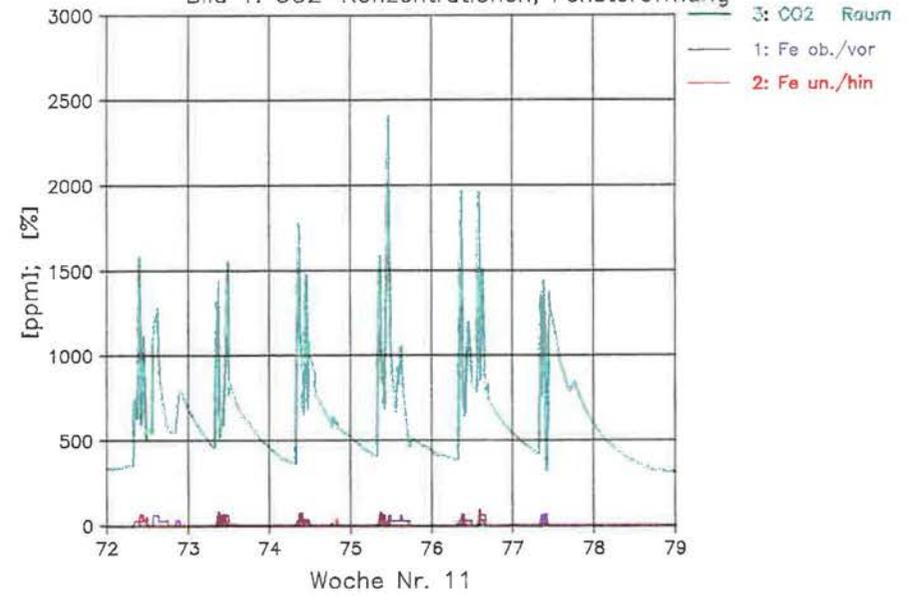
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

Bild 1: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen; Fensteröffnung



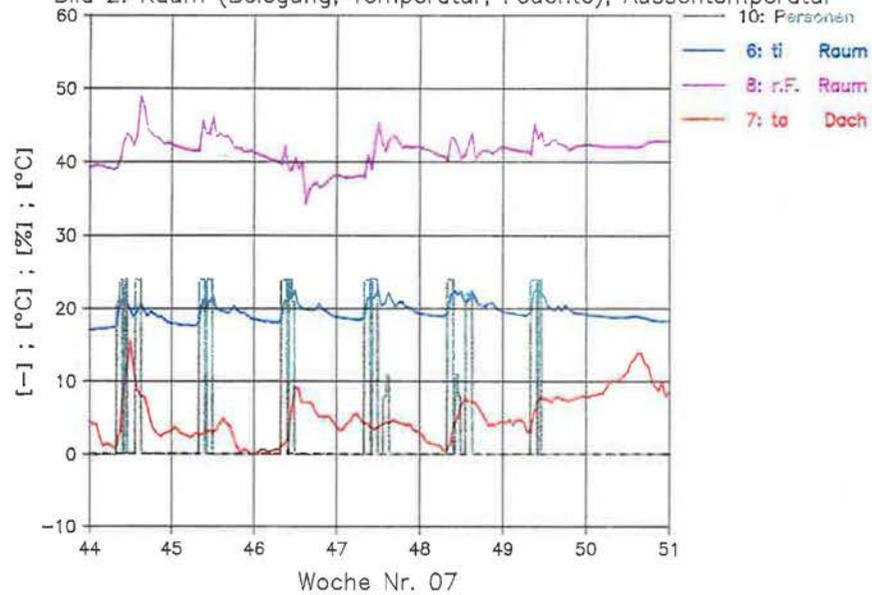
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

Bild 1: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen; Fensteröffnung



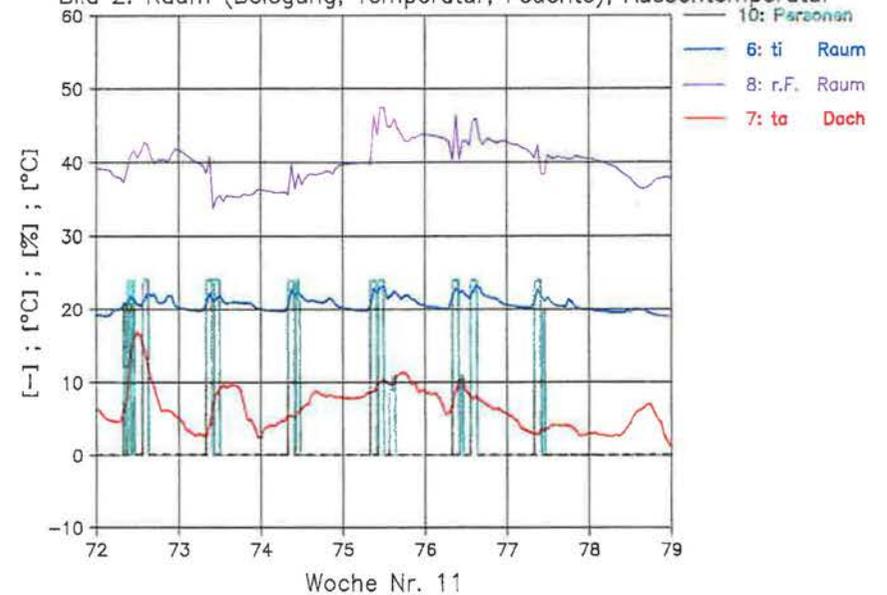
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

Bild 2: Raum (Belegung; Temperatur; Feuchte); Aussentemperatur



# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

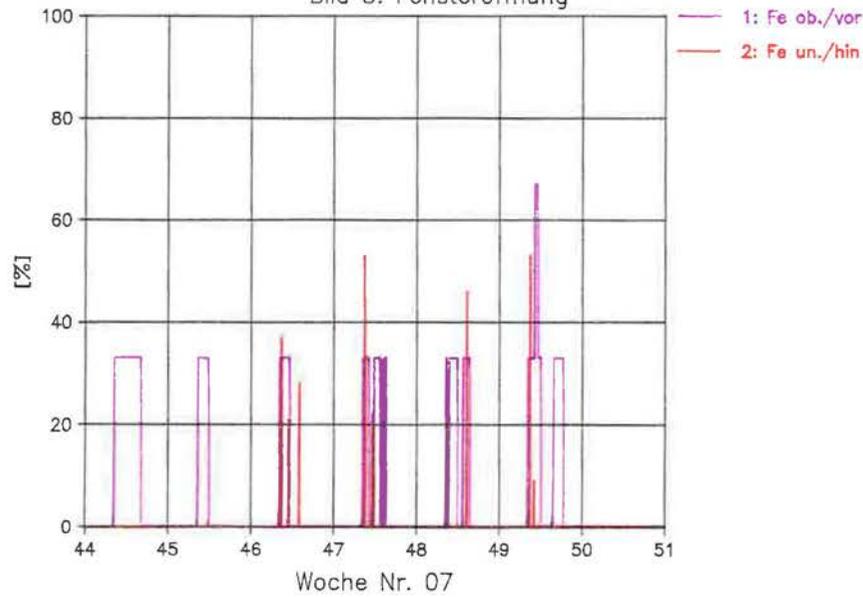
Bild 2: Raum (Belegung; Temperatur; Feuchte); Aussentemperatur





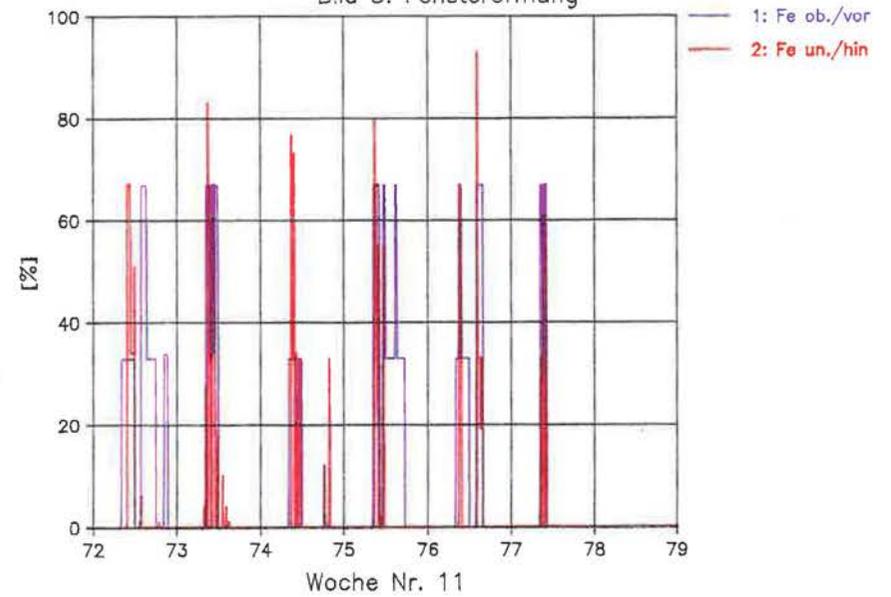
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

Bild 3: Fensteröffnung



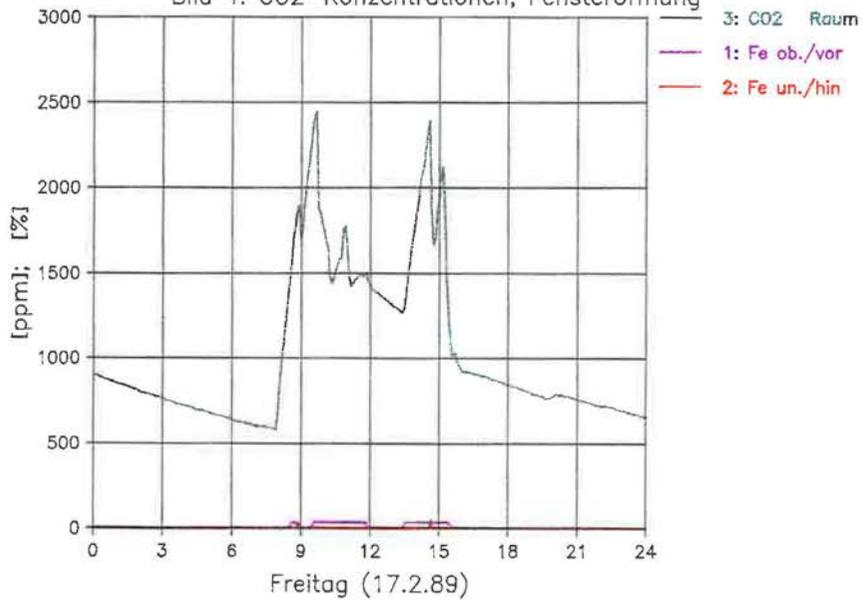
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

Bild 3: Fensteröffnung



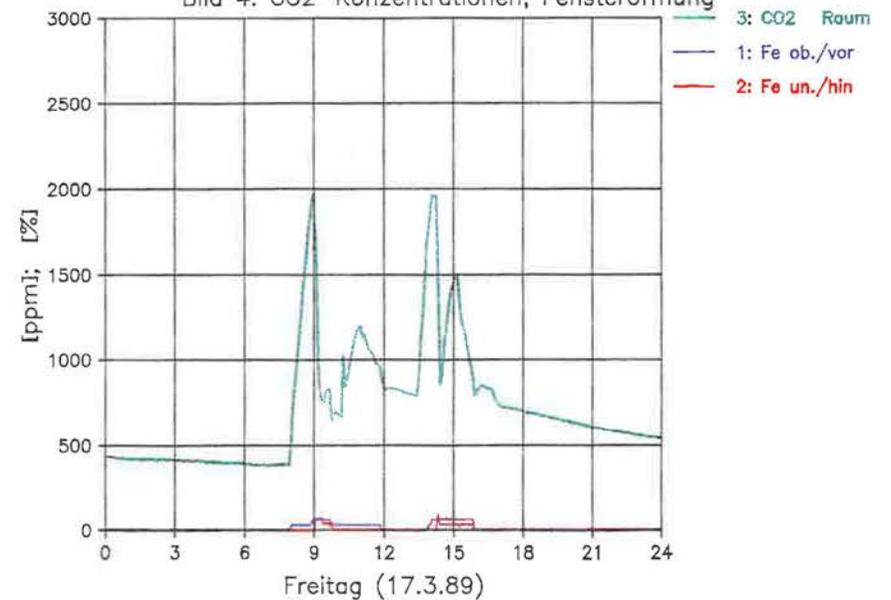
# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

Bild 4: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen; Fensteröffnung



# EFFENS: Luftqualitätsmessung Stammheim 1989

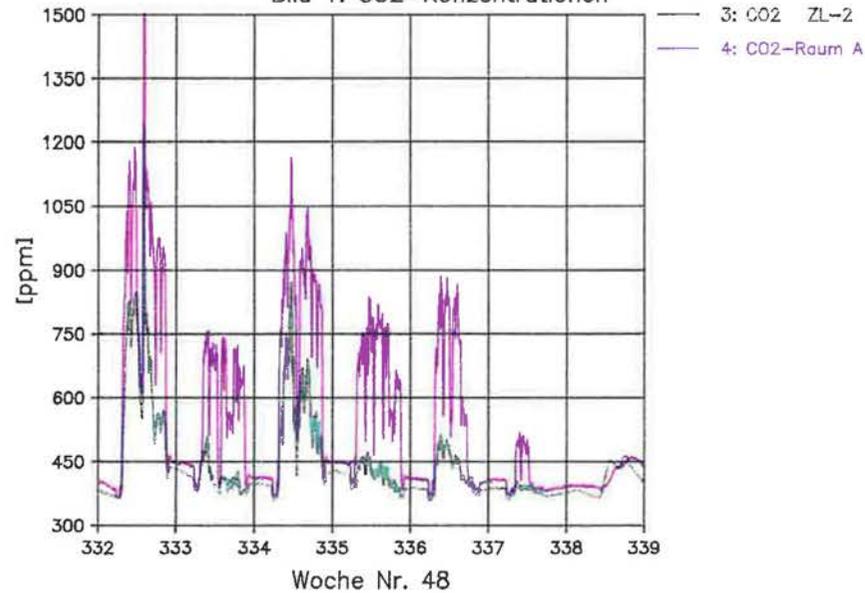
Bild 4: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen; Fensteröffnung





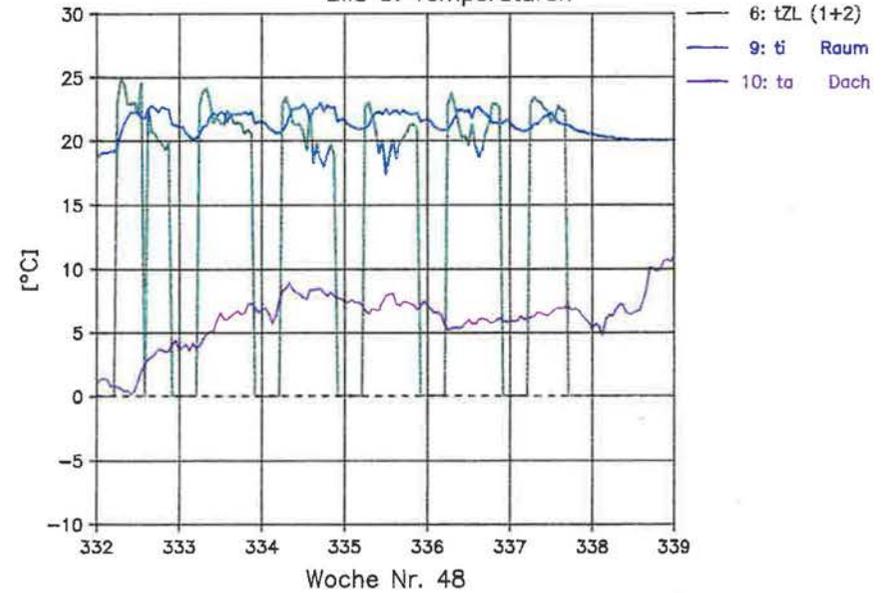
EFFENS: Luftqualitätsmessung KV-Zürich 1988

Bild 1: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen



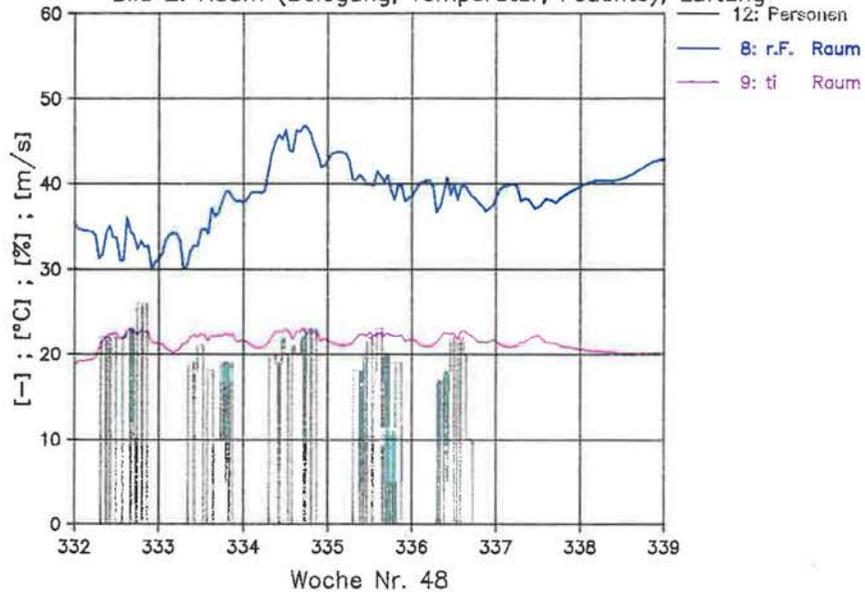
EFFENS: Luftqualitätsmessung KV-Zürich 1988

Bild 3: Temperaturen



EFFENS: Luftqualitätsmessung KV-Zürich 1988

Bild 2: Raum (Belegung; Temperatur; Feuchte); Lüftung



EFFENS: Luftqualitätsmessung KV-Zürich 1988

Bild 4: Zuluftmenge Zi 102

