



**PASSIV  
HAUS  
INSTITUT**

*Dr. Wolfgang Feist*

---

# Passivhausschule Frankfurt Riedberg

Messtechnische Untersuchung und Analyse



Auftraggeber  
Hochbauamt der Stadt Frankfurt a.M.

Mit Fördermitteln  
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Juli 2007



**PASSIV  
HAUS  
INSTITUT**

*Dr. Wolfgang Feist*

# Passivhausschule Frankfurt Riedberg

Messtechnische Untersuchung und Analyse

**Autoren:**

Dipl.-Ing. Søren Peper  
Dipl.-Phys. Oliver Kah  
Dr. Ing. Rainer Pfluger  
Dipl.-Phys. Jürgen Schnieders

**Unter Mitarbeit von:**

Patrick Möller  
Dipl.-Ing. Wolfgang Hasper  
Matthias Nagel  
Cornelia Baumgärtner  
Dipl.-Ing. Vahid Sariri  
Dipl.-Ing. Zeno Bastian

**Herausgeber:**

PASSIVHAUS INSTITUT  
Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstr. 44/46  
D-64283 Darmstadt  
Tel: 06151 / 82699-0  
Fax: 06151 / 82699-11  
E-Mail: mail@passiv.de  
www.passiv.de

**Darmstadt Juli 2007**

Dieser Bericht entstand im Auftrag der Stadt Frankfurt a.M. / Hochbauamt mit Fördermitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Az 20708.

**Titel des Forschungsauftrages:**

„Neubau Grundschule und Kindertagesstätte in Frankfurt am Main / Riedberg in Passivhaus-Qualität“

**Wir danken insbesondere den Schulhausverwaltern Hr. Twedell und Hr. Laubenbacher für Ihre stete Unterstützung vor Ort.**

**Den Lehrerinnen und der KiTa- und Schulleitung danken wir für die Mitarbeit bei der Befragung sowie für das Erdulden der vielen Störungen. Außerdem geht unser Dank an Hr. Preisendörfer für fortwährende Bereitstellung der GLT-Messdaten.**

Dieser Bericht ist beim Passivhaus Institut zu beziehen

[...]  
„Wenn ich der König wär', man würde was erleben,  
es würde nirgendwo mehr VIP-rooms geben,  
auch Unbekannte sind sehr interessant.  
Und ein Palast für mich wär' völlig übertrieben,  
aus einem Haus, wo Heizungskosten niedrig blieben,  
regierte ich mein Reich mit fester Hand,  
wenn ich König wär' in meinem Land“  
[...]

„König von meinem Land“  
Text: W. Wilmink, dt. Text: T. Woitkewitsch  
Musik: v. Veen, Wurff, Reijnders



# 1 Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>PROJEKT- UND GEBÄUDEVORSTELLUNG</b> .....	<b>7</b>
4.1	Projektdaten .....	7
4.2	Gebäudekurzvorstellung .....	9
4.2.1	Außenwände, Fassade, Fenster und Gründung .....	16
4.2.2	Haustechnik .....	20
4.3	Luftdichtheit.....	23
<b>5</b>	<b>ZIELSETZUNGEN UND MESSKONZEPT</b> .....	<b>25</b>
5.1	Aufbau der Messtechnik.....	26
5.2	Position und Spezifikation der Messstellen .....	28
5.2.1	Zentrale Hauptzähler und Sensoren .....	28
5.2.1.1	Wärmemengenzähler .....	28
5.2.1.2	Elektrozähler.....	31
5.2.2	Temperaturmessungen .....	31
5.2.2.1	Messungen im Erdreich .....	35
5.2.2.2	Lüftungsgeräte.....	38
5.2.2.3	Raumluftqualität.....	40
5.3	Tabellarische Übersicht der Messgeräte .....	43
<b>6</b>	<b>MESSDATENAUSWERTUNG</b> .....	<b>45</b>
6.1	Klimadaten .....	45
6.2	Lüftungsanlagen.....	47
6.2.1	Energetische Bewertung .....	54
6.2.1.1	Zulufterwärmung bei Defrosterschaltbetrieb .....	56
6.2.1.2	Wärmeverlust durch Außen- und Fortluftluftkanal .....	59
6.2.1.3	Stromeffizienz.....	60
6.2.1.4	Andere Lüftungsgeräte im Gebäude.....	63
6.3	Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser .....	66
6.3.1	Belegungszahlen und Personenwärme.....	67
6.3.2	Heizwärmeverbrauch .....	68
6.3.2.1	Vergleich der PHPP-Berechnung zu den Messdaten .....	73
6.3.3	Heizleistung.....	76
6.3.3.1	Heizkurve.....	79
6.3.4	Warmwassererzeugung .....	80
6.4	Stromverbrauch.....	81
6.4.1.1	PV Strom .....	83
6.4.2	Teilbereich: Elektrische Beleuchtung .....	84
6.5	Energiebilanz.....	88
6.5.1	Primärenergieverbrauch nach EnEV 2004.....	90



6.6	Behaglichkeitsuntersuchungen.....	92
6.6.1	Temperaturen.....	92
6.6.1.1	Sommertemperaturen.....	98
6.6.1.2	Oberflächentemperaturen.....	101
6.6.1.3	Zusatzmessung KiTa und Treppenhaus Schule .....	106
6.6.2	Raumluftfeuchte .....	111
6.6.3	CO <sub>2</sub> -Messungen.....	114
6.6.3.1	CO <sub>2</sub> -Konzentrationen nur während der Nutzungsstunden.....	119
6.6.3.2	Tagesgang der CO <sub>2</sub> -Konzentration und Vergleichsmessung .....	122
6.6.4	VOC Messungen.....	124
6.6.4.1	Optimiertes Zeitprogramm.....	127
6.6.4.2	Zeitdrift der VOC-Sensoren .....	128
6.6.5	Analyse in der Nutzerbefragungswoche.....	131
6.7	Luftwechsel in Klassenräumen - Planungsempfehlung .....	139
6.7.1	Tatsächliche Luftvolumenströme.....	139
<b>7</b>	<b>WÄRMEVERLUSTE ZUM ERDREICH .....</b>	<b>142</b>
7.1	Konstruktion der Bodenplatte .....	142
7.2	Methode .....	142
7.3	Vergleich von Messung und Simulation .....	145
7.4	Schlussfolgerungen zum Wärmeschutz der Bodenplatte .....	150
<b>8</b>	<b>LUFTWECHSEL IM EINGANGSBEREICH .....</b>	<b>151</b>
8.1	Untersuchte Eingangsbereiche .....	151
8.2	Durchführung der Messung.....	152
8.3	Aufzeichnung der Türöffnungsvorgänge .....	153
8.3.1	Hochrechnung der Türöffnungsdauern zu Schulbeginn .....	158
8.4	Temperaturmessung .....	160
8.5	Messung des Luftaustauschs für typische Türöffnungsvorgänge.....	161
8.6	Ergebnisse .....	163
8.7	Diskussion.....	167
<b>9</b>	<b>QUELLENANGABEN .....</b>	<b>168</b>
<b>10</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>172</b>



## 2 Einleitung

Das Passivhaus Konzept erlebt - nach der erfolgreichen Umsetzung im Wohnbau - bereits seit einigen Jahren eine rasche Ausweitung auch auf den Nichtwohnbereich. So entstanden Verwaltungsgebäude, Fabrikgebäude, Gemeindezentren und vieles mehr. Auch im Bereich von Schulneubauten und Schulsanierungen gibt es seit einigen Jahren erste Projekte. Die systematisch untersuchten Randbedingungen wurden im letzten Jahr im Rahmen des Protokollbandes „Passivhaus-Schulen“ vom „Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser“ veröffentlicht [Feist 2006]. Dort sind auch Erfahrungen der ersten realisierten Projekte eingeflossen.

Mit der Riedbergschule inkl. der Kindertagesstätte in Frankfurt am Main schlägt die Stadt ihren Kurs Richtung Passivhaus-Standard ein: Beschlüsse der Stadtverordnetenversammlung aus dem Jahr 2002 lauteten bereits: „Alle zukünftigen zu bauenden Kindertagesstätten und Schulen werden in Passivhausbauweise gebaut“. Diese Entscheidungen finden sich im Magistratsbericht von 2003 und im Koalitionsvertrag von 2006 wieder. Dabei stehen die Gründe der besseren Raumluftqualität mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und die niedrigen Betriebskosten bei erheblich verbessertem Klimaschutz im Vordergrund.

Den Erfolg der städtischen Entscheidung in der Umsetzung zu überprüfen ist unter anderem Ziel der systematischen Untersuchung eben dieser realisierten Schule. Die Begleitforschung hat darüber hinaus noch weitergehende Schwerpunkte, wie die Untersuchung einer Lüftungsanlage, der energetischen Auswirkungen von Türöffnungsvorgängen am Eingangsbereich und der Überprüfung der Dämmschürzenwirkung bei großen Gebäuden. Die Ergebnisse betreffen wichtige, immer wieder kontrovers diskutierte Fragen. Antworten stehen mit diesem Bericht für Folgeprojekte zur Verfügung.

Die Forschungsarbeit wurde durch einen Auftrag der Stadt Frankfurt a.M., mit Fördermitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) ermöglicht.



### 3 Kurzfassung

Die Passivhaus Grundschule und Kindertagesstätte Frankfurt a.M. Riedberg wurde nach nur rund 14 Monaten Bauzeit im November 2004 eröffnet. Das Gebäude mit Zweifeld-Sporthalle wurde nach Entwürfen der Architekten 4a aus Stuttgart gebaut. Die Mehrkosten für den Passivhausstandard betragen nach [Bretzke 2006] moderate 5,3 % gegenüber dem gültigen Standard. Neben der Planungsberatung und Qualitätssicherung während der Ausführungsphase wurde im Auftrag der Stadt Frankfurt vom Passivhaus Institut eine Begleitforschung durchgeführt. Die Messdatenerfassung wurde über etwa 30 Monate durchgeführt und durch zahlreiche Sondermessungen ergänzt. Die Forschungsarbeiten wurden gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU).

#### Ergebnisse der Messungen

Es ergaben sich hohe thermische **Behaglichkeiten** während der Winterzeiten in den Klassenräumen, die Raumluft- und Oberflächentemperaturen weichen nur gering voneinander ab. Die Temperaturen während der Nutzung (8:00 bis 13:00 Uhr) lagen im Winter 2005/2006 zwischen 19,5 und 20,6 °C. Die rel. Raumluftfeuchte liegt in einem niedrigen, aber noch akzeptablen Bereich.

Die **Überhitzungsstunden** während der beiden untersuchten Sommer 2005 und 2006 lagen in den untersuchten Klassenräumen im EG deutlich unterhalb der zulässigen Grenzwerte. Die Temperaturgrenze von 27 °C wurde überwiegend gar nicht erreicht, sie dürfte maximal 10 % der Nutzungszeit sogar überschritten werden. Im wärmeren Sommer 2006 lag die mittlere Sommertemperatur während der Nutzungszeit bei 22,9 °C. Es konnte eine hohe Sommerbehaglichkeit nachgewiesen werden und damit eine Funktion des Sommerlüftungskonzeptes über die jeweils zwei Fassadenklappen je Unterrichtsraum.

Bei ordnungsgemäßem Betrieb der **Lüftungsanlagen** stellen sich im Schulbetrieb bei Luftmengen von 16,4 m<sup>3</sup>/h/Person akzeptable Luftqualitäten in den Klassenräumen ein. Die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen lagen fast immer unter dem Grenzwerte von 1500 ppm. Die realen Luftwechsel wurden mit einer Tracergas-Untersuchung gemessen. Die Planungsempfehlung aus [Pfluger 2006-2] von 15 bis maximal 20 m<sup>3</sup>/h/Person konnte damit aus der Praxis bestätigt werden.

Die Untersuchung von handelsüblichen **Mischgas- („VOC“) und CO<sub>2</sub>-Sensoren** zeigte, dass sich solche Messaufnahme derzeit nicht zur Steuerung von Lüftungsanlagen eignen. Die immer noch zwingend notwendigen Kalibrierungen wären zu aufwendig.

Die **Lüftungsanlage** erbringt bei der Feldmessung in der Winterzeit mit einem Wärmebereitstellungsgrad von 84,2 % ein gutes Ergebnis. Dabei wird das Stromeffizienzkriterium mit 0,43 Wh/m<sup>3</sup> eingehalten. Durch die langen Leitungsführung der kalten Lüftungsleitungen durch das Gebäude reduziert sich der effektive Wärmebereitstellungsgrad jedoch deutlich auf 74 %. Hier zeigt sich, dass die kalten Leitungen - trotz Dämmung - nach Möglichkeit wesentlich kürzer durch das Gebäude geführt



werden müssen. Dadurch würden darüber hinaus auch noch Investitionskosten eingespart.

Der **Heizwärmeverbrauch** von Schule und KiTa inkl. der Küche zeigt mit 25,4 kWh/m<sup>2</sup> im Winter 2005/2006 niedrige Verbrauchswerte mit einer Einsparung gegenüber anderen Schulen im Gebäudebestand um 90 %. In der Küche gab es unnötige Wärmeverbräuche durch Zusatzlüftung. Werden diese nicht berücksichtigt, so ergibt sich ein Verbrauch von 22,0 kWh/(m<sup>2</sup>a). Im milden Folgewinter wurden nur 14,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) verbraucht. Ein gewisser bestehender Mehrverbrauch gegenüber der Projektierung konnte trotz Berücksichtigung der geringeren Belegung, der thermischen Erdreichbelastung der ersten Jahre (Dämmschürzenkonzept), der Gebäudetrocknung und einigen fehlenden Optimierungen nicht vollständig aufgeklärt werden.

In der gesamten Untersuchung wird die Energiebezugsfläche (EBF = 5541 m<sup>2</sup>) des Gebäudes zugrunde gelegt. Die nach EnEV bestimmte Fläche  $A_N$  ist mit 9037 m<sup>2</sup> um 63 % deutlich größer. Diese wird hier nicht verwendet.

Die tagesmittleren **Heizleistungen** lagen mit maximal 12,2 W/m<sup>2</sup> in der Schule und 15,1 W/m<sup>2</sup> in der KiTa wie erwartet niedrig.

Der **Jahresstromverbrauch** ohne Lüftungsstrom beträgt 13,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Schule/Küche/KiTa. Der Lüftungsstrom beträgt im Bilanzjahr 5,8 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Die **Energiebilanz** ergibt einen Endenergiewert für alle Anwendungen (Heizung, Warmwasser, gesamter Strom) von nur 50,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) und primärenergetisch unter Berücksichtigung der Pelletheizung von nur 59,2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Damit sind die Anforderung an den Passivhausstandard mehr als erfüllt (Primärenergie max. 120 kWh/(m<sup>2</sup>a)).

Der nach der EnEV 2004 zulässige - auf das Gebäudevolumen bezogene - primärenergetische Grenzwert beträgt **18,3 kWh/(m<sup>3</sup>a)**. Der Wert berücksichtigt nur die Heizwärme sowie den Hilfs- und Lüftungsstrom. Der entsprechende Messwert für die Schule ergibt sich zu **5,8 kWh/(m<sup>3</sup>a)**. Der Grenzwert nach EnEV 2004 wird damit deutlich - um 68 % - unterschritten.

Die Untersuchung der **Eingangsluftwechsel** mit Windfang ergab hochgerechnet auf Vollbelegung der Schule einen zusätzlichen geringen Wärmeverlust von 0,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Je Schüler und Schuljahr beträgt der zusätzliche Lüftungswärmeverlust 4,7 kWh/(Person a). Aufgrund der spezifischen Eingangssituation mit langen Schließzeiten der motorisch betriebenen Türflügel ist der Einfluss vom Windfang gering. Würden alle Personen einzeln und nicht in Gruppen den Eingang durchlaufen, reduziert ein Windfang hingegen deutlich die Wärmeverluste (bis zu 50 %).

Die Überprüfung der Wirkung der **Dämmschürzen** als eine denkbaren Gründungsalternative zur Verbesserung der mäßig gedämmten Bodenplatte zeigt, dass das Konzept wie geplant funktioniert. Für die künftige Planung ähnlicher Konstruktionen ist zu beachten, dass die Verwendung von Dämmschürzen in Verbindung mit reduziertem Wärmeschutz der Bodenplatte stets gewisse Unsicherheiten beinhaltet, weshalb entsprechende Sicherheiten einzuplanen sind.



**Fazit**

Mit der Begleitforschung konnte gezeigt werden, dass die Zielsetzungen des Projektes eingehalten wurden. Es ergaben sich hohe Behaglichkeiten bei einer Heizenergieeinsparung von 90 % und eine sehr gute primärenergetische Bewertung. Die Raumluftqualitäten bei Betrieb der Lüftungsanlage - gemessen als CO<sub>2</sub>-Konzentrationen - war durchgängig gut. Die Ergebnisse aus der Untersuchung zu Passivhaus Schulen [Feist 2006] wurden durch diese Evaluation bestätigt.



## 4 Projekt- und Gebäudevorstellung

Bei der Schule handelt es sich um ein 3-geschossiges und nur unwesentlich durch andere Bauwerke verschattetes U-förmiges Gebäude mit einer Kindertagesstätte (KiTa) und Zweifeld-Sprothalle in exponierter Lage am Hang. Das Gebäude befindet sich in Frankfurt am Main. Für die Projekt- und Gebäudevorstellung wurden u.a. Teile aus [Pfluger 2006-1] verwendet.

### 4.1 Projektdaten

Nach intensiven Beratungen wurde im Frühjahr 2003 von der Stadt Frankfurt beschlossen, den Neubau der Grundschule und Kindertagesstätte im Baugebiet Riedberg in Passivhausbauweise durchzuführen. Die Stadt Frankfurt fasste bereits 2003 den Grundsatzbeschluss, alle zukünftigen Neubauten im Bereich Schulen und Kindertagesstätten im Passivhaus-Standard zu errichten, wenn die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall nachgewiesen werden kann.

Die geplanten Mehrkosten für eine Ausführung in Passivhausbauweise liegen bei dem Projekt bei ca. 4 % gegenüber einer Ausführung gemäß den gültigen Vorschriften. Die Gesamtinvestitionskosten betragen ca. 16,7 Mio. € (die Baukosten (Kostengruppe 300 + 400) allein betragen 11,3 Mio €). Das hinsichtlich Energieeffizienz beispielhafte Bauvorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit einer Förderung von 250 T€ (inkl. wissenschaftliche Begleitung und Messungen) unterstützt.

Tabelle 1: Projektdaten Schule, Kita und Turnhalle

<b>Schultyp</b>	Grundschule und Kindertagesstätte
<b>Nutzer (Planung)</b>	400 Grundschüler in 16 Klassen 100-125 Kinder KiTa 50 Personen Schule, KiTa, Verwaltung
<b>Baubeginn</b>	9/2003
<b>Fertigstellung</b>	10/2004
<b>Fläche (NGF) Schulgebäude und Kita (Passivhaus-Bauweise)</b>	5707 m <sup>2</sup>
<b>Energiebezugsfläche (EBF) (Schulgebäude und Kita)</b>	5541 m <sup>2</sup>
<b>Gebäudenutzfläche A<sub>N</sub> (nach EnEV) (Schulgebäude und Kita)</b>	9037 m <sup>2</sup>
<b>Fläche (NGF) Turnhalle (NEH-Bauweise)</b>	ca. 1833 m <sup>2</sup>
<b>A/V-Verhältnis</b>	0,35
<b>Bruttovolumen</b>	41.000 m <sup>3</sup>
<b>Wärmeversorgung</b>	vollautomatischer Holzpellet-Kessel (2 x 60 kW),
<b>Architekten</b>	Architekten 4 a, Stuttgart



Die Entscheidung über die Wärmeversorgung fiel auf einen Holzpellet-Kessel (2 x 60 kW), welcher vom Land Hessen mit 10 T€ gefördert wurde.

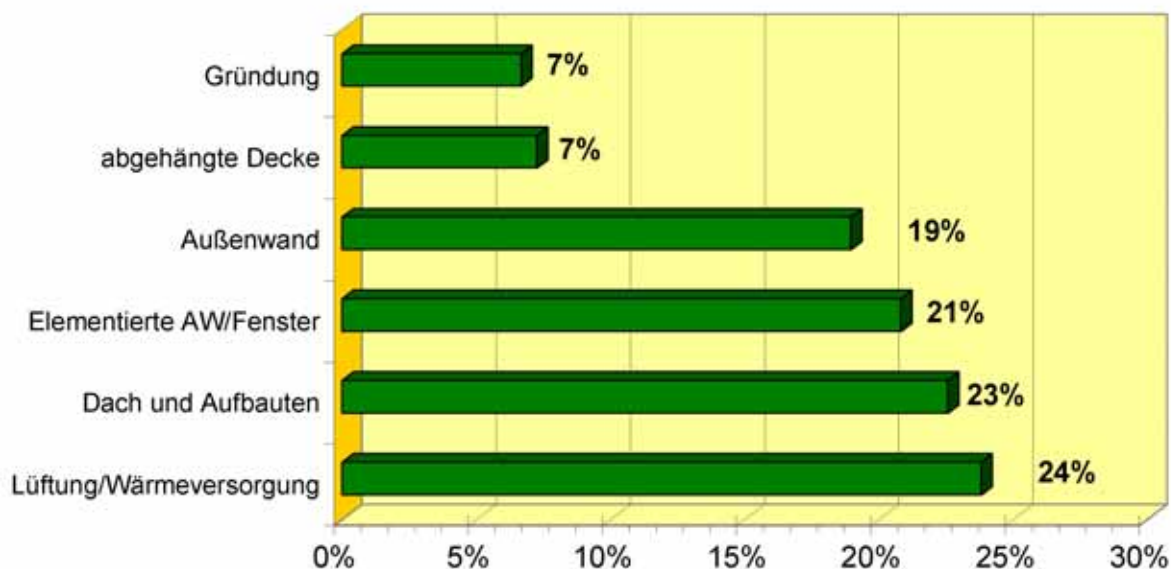
Der sehr ambitionierte Zeitplan führte zu einer Bauzeit von nur etwas über einem Jahr. Der Baubeginn erfolgte im September 2003, die Schule wurde bereits am 1. November 2004 mit den ersten vier Klassen eröffnet.

Trotz der höheren Investition (siehe Tabelle 2) sowie des Mehraufwandes an Wartung und Instandhaltung ergibt sich für diese PH-Schule eine Neutralität der Gesamtkosten gegenüber einer Schule nach Standard Frankfurt auf Grundlage der Mehrkosten nach Kostenberechnung (Kapitalkosten 5,5 %, Preissteigerung 3 %, 40 Jahre) [Bretzke 2006].

**Tabelle 2: Investitionskosten nach [Bretzke 2006]**

<b>Gesamtkosten (Brutto)</b>	Schule + Kita + Zweifeldsporthalle 16,7 Mio €
<b>Baukosten (300+400)</b>	11,1 Mio €
<b>PH-Mehrkosten</b>	ca. 900 T€ (5,3 % der Gesamtkosten)

Die Aufteilung der Mehrkosten geht aus Abbildung 1 hervor. Zu erkennen ist der relativ geringe Anteil der Gründung, hier verwendete günstige Lösung wurde durch sogenannte Dämmschürzen (siehe Abschnitt 7) möglich.



**Abbildung 1: Aufteilung der PH-Mehrkosten nach Baugruppen (nach [Bretzke 2006])**

Die Projektbeteiligten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Projektbeteiligte

<b>Bauherr</b>	Stadt Frankfurt
<b>Projektsteuerung</b>	Hochbauamt Frankfurt
<b>Architekten</b>	Architekten 4 a, Stuttgart
<b>Haustechnik</b>	ICRZ Ing. Cons. Ruth + Zimmermann (HKL)
<b>Wissenschaftliche Begleitung und Messtechnik</b>	Passivhaus Institut, Darmstadt
<b>Förderungen</b>	Land Hessen, DBU

## 4.2 Gebäudekurzvorstellung

Die Schule befindet sich im nördlichen Frankfurter Stadtteil Riedberg, welcher sich noch in der Aufbauphase befindet. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Lage des Baugebietes im Stadtgebiet von Frankfurt a.M. Das Gebäude ist auf einem nach Südosten abfallenden Hanggrundstück (11 m Gefällehöhe) errichtet. Die U-förmig angeordneten Gebäudetrakte der KiTa (Süd-Flügel) und der Schule (West- und Nord-Flügel) werden von der Sporthalle im Osten abgeschlossen, wodurch eine Hofsituation entsteht.

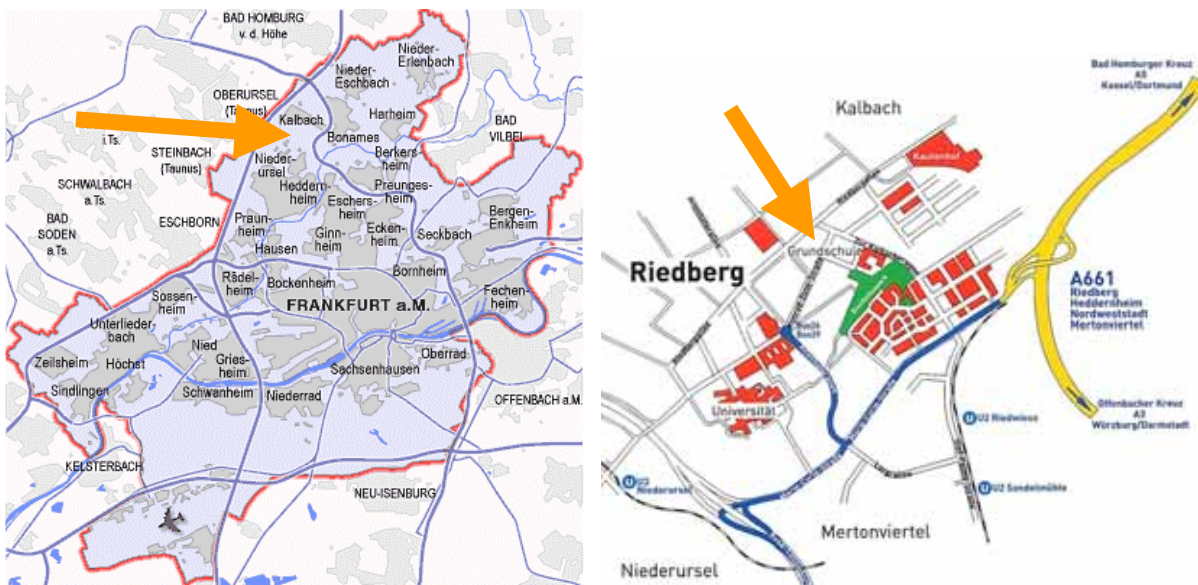
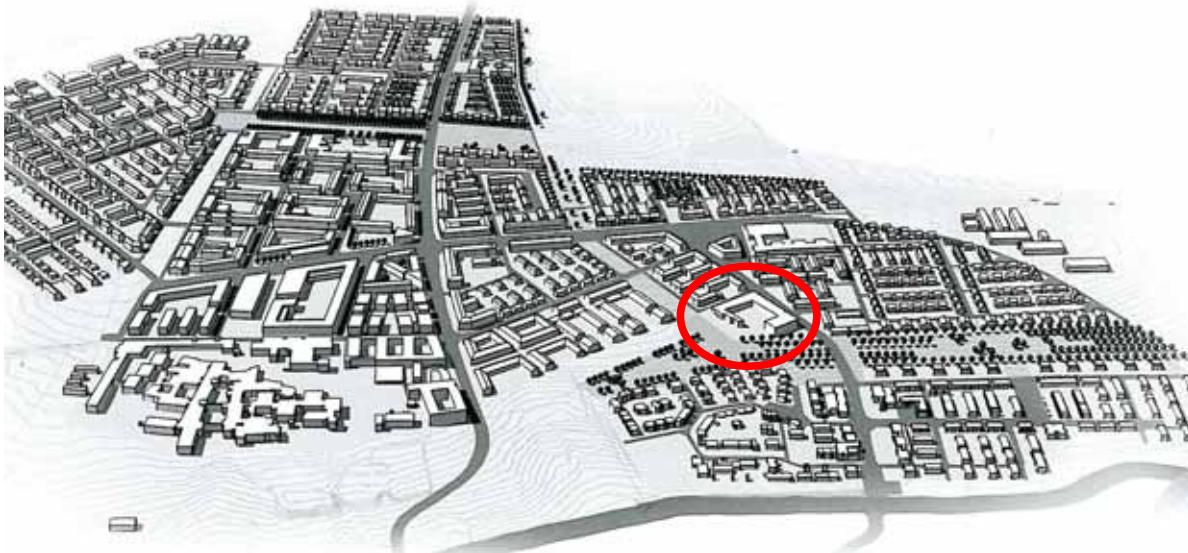


Abbildung 2: Lagekarte der Riedbergschule im Stadtteil Riedberg (Quellen: Links: Vermessungsamt der Stadt Frankfurt. Rechts: Hessenagentur)



**Abbildung 3: Lageplan des Neubaugebietes Frankfurt Riedberg mit der Passivhaus-Schule (Quelle: Hessenagentur). Die Bebauung des Gebietes ist noch nicht fertiggestellt.**

Die Anordnung des Gebäudes und der Nutzungsbereiche ist aus dem beschrifteten EG-Grundriss zu entnehmen. Gebäudeschnitte, Ansichten und weitere Grundrisse sind im Anhang dargestellt.

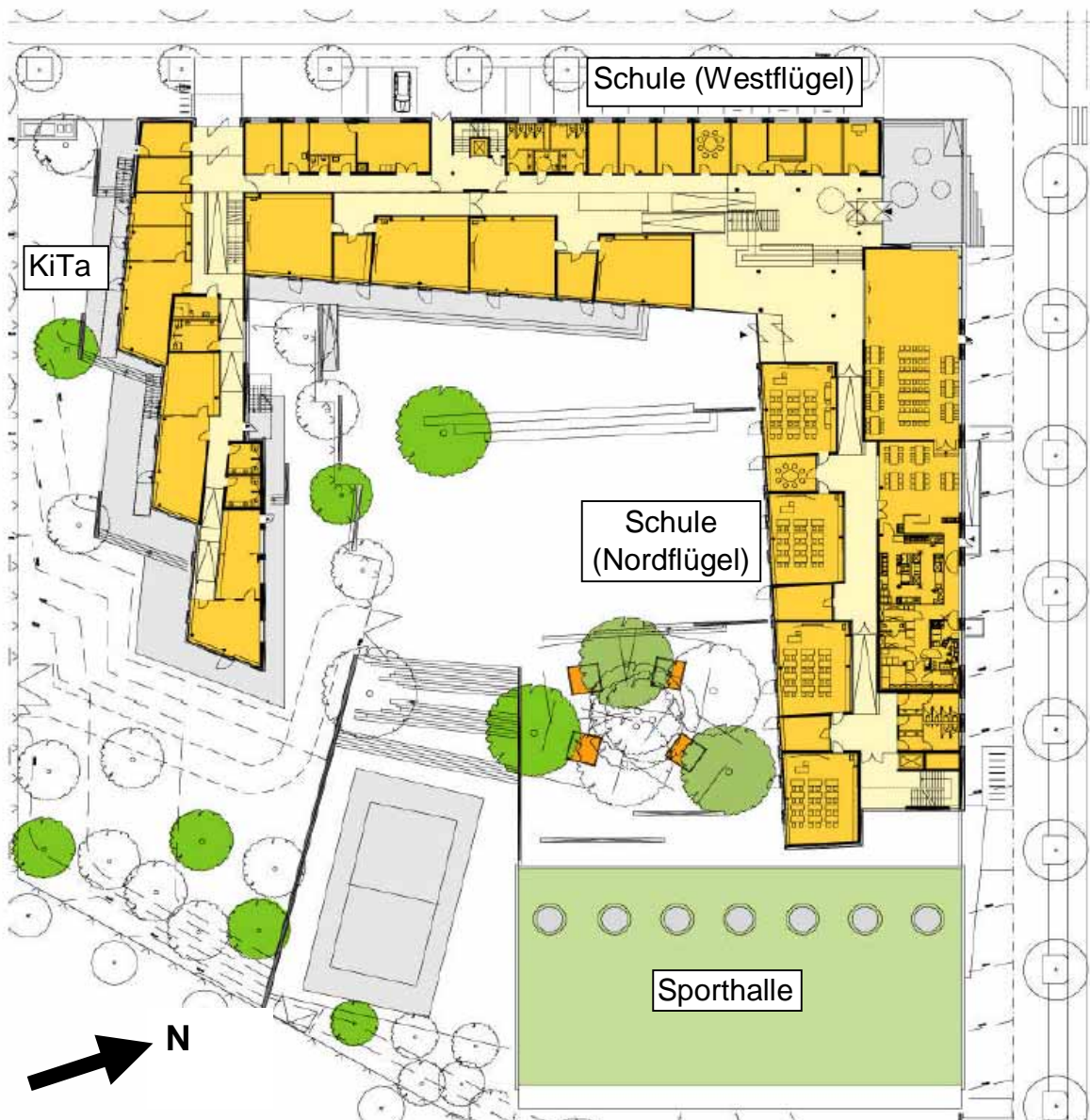


Abbildung 4: Grundriss EG von Schule, KiTa und Sporthalle (Quelle: Architekturbüro 4a)

Um einen Eindruck von dem Gebäude zu bekommen, sind im folgenden Außenansichten dargestellt (Abbildung 5 bis Abbildung 13).



**Abbildung 5: Hofansicht von der KiTa in Richtung Norden auf den Schulteil.**



**Abbildung 6: Winterliche Ansicht vom Haupteingang (Nord-West).**



**Abbildung 7: Ansicht Nord-West Fassade.**



**Abbildung 8: Ansicht Nordfassade (ohne Turnhalle)**



**Abbildung 9: Ansicht von Osten auf die KiTa und Turnhalle (Foto: Bretzke)**



**Abbildung 10: Südfassade der KiTa**





**Abbildung 11: Hofansicht der KiTa (EG) mit Blick nach Osten.**



**Abbildung 12: Pausenhof mit Blick auf den Nordflügel der Schule.**



**Abbildung 13: Außenansicht der Ostfassade vom 2. OG**



Die angrenzende Turnhalle wurde in der Qualität eines guten Niedrigenergiehauses erbaut. Sie ist nicht Gegenstand der Untersuchung und wird hier daher nicht näher beschrieben. Einige Innenansichten des Gebäudes sind in Abbildung 14 bis Abbildung 17 dargestellt.



**Abbildung 14: Eingang- und Pausenhalle mit Besuchergruppe (Quelle: Bretzke)**



**Abbildung 15: Flur im 1. OG im Westflügel der Schule mit Treppenaufgang.**



Abbildung 16: Flur im 2. OG mit der großzügigen Ostverglasung.



Abbildung 17: Typischer Klassenraum (noch ohne Einrichtung).

#### 4.2.1 Außenwände, Fassade, Fenster und Gründung

Die Stahlbetonkonstruktion mit massiven Außenwänden ist mit einer wärmege-  
dämmten Vorhangfassade bekleidet. Die Vorhangfassade wurde mit einer Dämm-  
stärke von 280 mm Mineralwolle ausgeführt. Die Dämmung ist mit einem diffusions-

offenen Fließ abgedeckt. Die vorgehängte Verkleidung ist hinterlüftet (Spaltweite 20 mm). Die Befestigung der Vorhangfassade wurde mittels Edelstahl-U-Profilen auf Thermostopp (8 mm) realisiert. Die Verkleidung aus Eternitplatten auf Konstruktionsvollholz wurde gewählt, um eine robuste Konstruktion der Verkleidung zu erreichen, weil diese bei Schulgebäuden und Kindertagesstätten erfahrungsgemäß erhöhten Belastungen ausgesetzt sind.



**Abbildung 18: Aufbau der vorgehängten Fassade mit zweilagigem Dämmstoff.**

Für die Unterkonstruktion der Vorhangfassade wurde vom PHI eine dreidimensionale Wärmebrückenberechnung durchgeführt, um die vom Architekten vorgeschlagene Lösung auf ihre thermischen Eigenschaften hin prüfen zu können.

Die realisierte Unterkonstruktion weist im Vergleich mit üblichen Konstruktionen verhältnismäßig geringe Wärmeverluste auf. Verglichen mit einer wärmebrückenfreien Dämmung wie etwa einem Wärmedämmverbundsystem ergeben sich jedoch deutliche zusätzliche Dämmstoffstärken zu gleichem U-Wert. Das gilt auch für die hier gewählte Verbindung mit Edelstahlwinkeln. Im Falle einer Außenwanddämmung ohne Unterkonstruktion (WDVS) wären nur etwa 200 mm Dämmung notwendig gewesen. Bessere Lösungen werden jedoch in Zukunft verfügbar sein (vgl. [AkkP 2007]).

In Tabelle 4 sind die thermischen Eckdaten der Gebäudehülle zusammengestellt.



Tabelle 4: Übersicht der thermischen Kennwerte der Passivhaus-Gebäudehülle

Bauteil	U-Wert [ $\text{W/m}^2 \text{K}$ ]
Dach (30 cm Gefälldämmung)	0,11
Außenwand (Vorhangfassade)	0,16
Boden Zusammen mit Frostschräge (20 cm Dämmung, 2 m unter der Bodenplatte)	0,35 Reduktionsfaktor 0,22
Fenster	$U_w = 0,74 / U_g = 0,6 / g = 41\%$

Der **Fenstereinbau** in der Dämmebene erfolgte mittels Winkeln auf PU-Recycling-Blöcken. Die Fenster weisen einen Gesamt-U-Wert (inkl. Rahmen) von  $U_w = 0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf, der Verglasungs-U-Wert beträgt  $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei einem Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$  von 41%.



Abbildung 19: Links: Fenstereinbau auf einem Dämmklotz und angrenzend vorgezogener Einbaurahmen für eine Tür zum Hof. Rechts: Einbau einer großen Dreifach-Verglasung.

Für die **Dachfenster** waren hochwärmedämmende Konstruktionen erforderlich, welche noch nicht als Gesamtkomponente am Markt verfügbar sind. Sie wurden daher aus Einzelkomponenten zusammengestellt. Die Einbindung der Dachhauben in die Wärmedämmung des Dachaufbaus ist in Abbildung 21 dargestellt. Auf der Stahlbetondecke, also bereits in der Dämmebene wurde eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung (mit VSG-Sicherheitsverglasung) als Festverglasung eingesetzt. Die Lichtkuppel ist hinterlüftet, um Kondensatbildung zu vermeiden. Bei den **RWA-Öffnungen** handelt es sich um eine thermisch verbessertes Produkt einer am Markt erhältlichen Standardlösung.



Abbildung 20: Lichtkuppel und RWA-Klappe auf dem Dach der Eingangshalle.

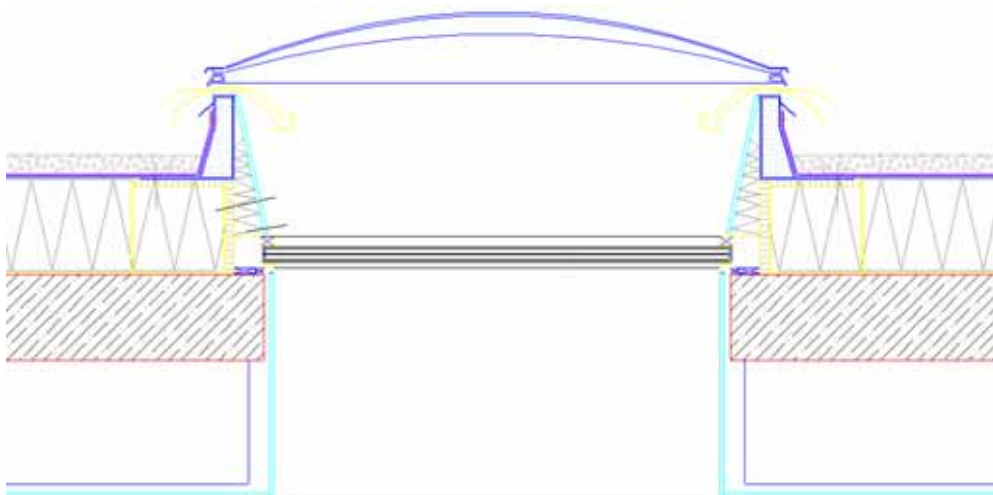


Abbildung 21: Schnitt durch die Lichtkuppel mit zusätzlicher horizontaler Dreifachverglasung (Quelle Architekten 4a).

## Gründung

Die Bodenplattendämmung hat für ein hochwärmegedämmtes Gebäude eine relativ geringe thermische Qualität ( $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ). Die aussteifenden Betonwände und Säulen gehen ohne thermische Trennung bis auf die Bodenplatte, wobei die Dämmung auf der Bodenplatte liegt. Um diese Dämmung zu optimieren und die Wärmebrückeneffekt abzuschwächen, wurden umlaufenden 2 m tiefe Dämmschürzen ausgebildet. Die Betonteile der Schürzen waren aus statischen Gründen (Lage am Hang) notwendig und konnten so verwendet werden, um den Dämmstoff zu fixieren. Die auftretenden Schubspannungen bei der Hanglage hätten z.B. von einer Schaumglas-Dämmung mit Bitumeneinbettung nicht aufgenommen werden können. Daher wurde die möglicherweise kostengünstigere Lösung mit der Verlängerung der sowie so notwendigen Frostschürzen realisierte. Dafür wurde die Trittschalldämmung um 10 cm Wärmedämmung ergänzt. Die Situation der realisierten Dämmschürzen ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Wirksamkeit der Lösung wird in Abschnitt 7 überprüft.



**Abbildung 22:** Links: Dämmschürze (Betonteil mit 20 cm Dämmstoff). Rechts: Verlängerung der Dämmschürze im Bereich der KiTa mit Blick auf die fertige Sauberkeitsschicht.

#### 4.2.2 Haustechnik

Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über zwei kaskadierte Holzpelletkessel mit automatischer Pelletförderung aus einem Lagerbunker neben dem Heizraum (im 2. UG). Die Kessel verfügen über je 60 kW Leistung. Der Heizungsraum ist gegenüber dem Technikkeller mit einer Stahltür begrenzt, zur Außenluft gibt es größere Öffnungen zur Versorgung mit Verbrennungsluft. Die Pellet-Versorgung stellte sich kostengünstiger dar als die Versorgung mit dem Fernwärmeanschluss vom Müllheizkraftwerk. Die Wärmeverteilung wird in Abschnitt 5.2.1.1 näher vorgestellt. Die Räume werden - abweichend vom „klassischen“ Passivhauskonzept - einzeln über kleine Heizkörper beheizt.



**Abbildung 23: Pelletkessel im Heizungsraum.**

Die Beschreibung der Lüftungstechnik mittels 6 zentraler Lüftungsgeräte erfolgt in Abschnitt 6.2.

Über die zentrale Gebäudeleittechnik (GLT) werden über Zeitprogramme die gewünschten Raumnutzungen eingestellt und darüber z.B. die Heizung, Lüftung, Lüftungsklappen und die Außenverschattung gesteuert. In den Räumen können die Nutzer über ein Bediengerät für den jeweiligen Raum die Sollwerttemperatur um  $\pm 2$  K verändern (keine Kühlung). Außerdem können sie die GLT-Steuerung vom Sonnenschutz und von den Lüftungsklappen individuell übersteuern.



**Abbildung 24: Einzelraum Bediengerät mit Anzeige der Ist- und der Solltemperatur.**

Zur Realisierung einer ausreichenden „freien“ Sommerlüftung sind die Klassenräume mit je zwei Lüftungsklappen ausgerüstet. Bei „Übertemperatur“ im Sommer (innen 2 K wärmer als außen) und wenn es die Wetterbedingungen (Wind/Regen) erlauben,





werden die Klappen in den Räumen und die RWA-Klappen des Gebäudes außerhalb der Nutzungszeit automatisch geöffnet. Dadurch kann Wärme abgeführt werden. Die Außenverschattung des Gebäudes (Jalousien) wird im Sommer tagsüber nur so weit geschlossen, dass noch Tageslichtnutzung möglich ist. Außerhalb der Nutzungszeit sollen sie im Sommer auch geschlossen gehalten werden [Schnieders 2004-1]. Die Nutzer wurden über die wichtigsten Bedienungen bei einer Informationsveranstaltung informiert. Dabei wurde ihnen auch eine „Kurzanleitung für die Nutzer“ [Schnieders 2004-2] übergeben.



**Abbildung 25: Sommerlüftungsklappen (2 Stück je Klassenraum) im weit geöffneten Zustand.**



**Abbildung 26: Südfassade des Nordflügels mit heruntergelassener Außenverschattung.**

## 4.3 Luftdichtheit

Die Luftdichtheit des Gebäudes ohne die Turnhalle wurde bei der Luftdichtheitsmessung am 23.10.2004 vom Passivhaus Institut überprüft. Vorausgegangen waren intensive Beratungen während der Qualitätssicherungsphase (siehe dazu auch [Schieders 2006]). Das gesamte Gebäude konnte mit zwei Geräten, welche in der Hoftür der Eingangshalle eingebaut wurden, geprüft werden. Im gesamten Gebäude wurde bei 50 Pa Unterdruck eine Leckagesuche z.T. mit Einsatz einer Thermographiekamera (für unzugängliche Bereiche) durchgeführt.

Aus dem Drucktestprotokoll (Abbildung 28) wird deutlich, dass der maximale geförderte Volumenstrom bei 56 Pa Überdruck 9670 m<sup>3</sup>/h betrug. Das Endergebnis der Messung betrug  $n_{50} = 0,46$  1/h. Der Passivhaus-Grenzwert für die Luftdichtheit von  $n_{50} = 0,6$  1/h wurde damit deutlich unterschritten. Bei großen Gebäuden ist der sog.  $q_{50}$ -Wert (Bezug auf die Hüllfläche des Gebäudes) von Interesse. Dieser beträgt 0,84 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h und ist noch verbesserungswürdig. In der Ausführungsphase zeigten sich eine Reihe von Mängeln, die z.T. auf falsche Materialwahl und zum großen Teil auf fehlende oder fehlerhafte Detailplanung hindeutet. Als Beispiel wird hier das „luftdichte“ Verbinden der Außenfassade mit dem EG-Fussboden genannt: Hier wurde nicht, wie es sinnvoll wäre, auf die Rohbetondecke verklebt sondern regelmäßig auf die Trockenestrichplatten, welche sich auf der Perliteschüttung des Fußbodenaufbaues befinden. Zu dieser Zeit war der Betonboden nicht mehr zugänglich. An solchen Punkten konnten deutliche Leckagen nachgewiesen werden. Zum Teil sind diese Mängel durch den Zeitdruck aufgrund der sehr kurzen Bauzeit entstanden.

Die Sporthalle wurde kurze Zeit später (am 27.10.2004) ebenfalls vom PHI auf ihre Luftdichtheit hin überprüft. Hier ergab sich ein Messwert von  $n_{50} = 0,73$  1/h entsprechend einem  $q_{50} = 1,9$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h.



Abbildung 27: Blower Door Messung mit zwei Gebläsen.



## BlowerDoor-Prüfprotokoll

### Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Objekt : Riedbergschule und KiTa 60439 Frankfurt am Main	Prüfer/in: S. Peper Datum: 23.10.2004 FLIB-Nr.: 24400
---	--

#### Klimadaten

Innentemperatur: 21 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 1.5 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 19 °C	Windstärke: 2	Gebäudestandort: C
Luftdruck (Standard): 101300 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 3 %	

#### Unterdruck

Natürliche Druckdiff.	$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$
	-	-	-	-

#### Überdruck

Natürliche Druckdiff.	$\Delta p_{01+}$	$\Delta p_{01-}$	$\Delta p_{02+}$	$\Delta p_{02-}$
	-	-	-	-

#### Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom $V_f$	Abwei- chung
0 ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	0 ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
$\Delta p_{01}$	-1.2	—	—	—	$\Delta p_{01}$	-0.5	—	—	—
0	-57	156	8510	0.45	0	56	202	9672	3.06
0	-50	128	7693	-1.34	0	49	162	8651	-1.95
0	-43	111	7161	1.63	0	39	142	8100	3.57
0	-29	65	5473	0.81	0	31	97	6706	-3.48
0	-25	50	4819	-0.89	0	20	69	5651	1.49
0	-62	174	8986	0.11	0	39	130	7763	-0.75
0	-52	136	7931	-0.75	0	50	165	8750	-1.73
$\Delta p_{02}$	-1.0	—	—	—	$\Delta p_{02}$	-2.1	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.989	Vertrauensintervall	
$C_{nV}$ [m³/(h Paⁿ)]	616	max. 699	min. 542	$C_{nV}$ [m³/(h Paⁿ)]	1153	max. 1606	min. 828
$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	617	max. 701	min. 543	$C_L$ [m³/(h Paⁿ)]	1152	max. 1605	min. 827
n [-]	0.65	max. 0.68	min. 0.62	n [-]	0.52	max. 0.61	min. 0.43

#### Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	18051 m³	+/- 5 %	Nettogrundfläche:		Hüllfläche:	9936 m²	+/- 5 %
---------------	----------	---------	-------------------	--	-------------	---------	---------

	$V_{50}$ m³/h	Unsicher- heit %	$n_{50}$ h⁻¹	Unsicher- heit %	$W_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %	$q_{50}$ m³/m²h	Unsicher- heit %
Unterdruck	7847	+/- 8 %	0.43	+/- 9 %			0.79	+/- 9 %
Überdruck	8790	+/- 8 %	0.49	+/- 10 %			0.88	+/- 10 %
Mittelwert	8319	+/- 8 %	0.46	+/- 10 %			0.84	+/- 10 %

Anforderungen nach:	PHI	0,6	1/h		
---------------------	-----	-----	-----	--	--

**Bemerkung:** Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

**Auftragnehmer :**  
Passivhaus Institut PHI  
Rheinstraße 44/46  
64283 Darmstadt

**Bearbeiter/in :** S. Peper  
Tel : 06151-826 99 18

Unterschrift

Abbildung 28: Messprotokoll der Blower Door Messung vom 23.10.2004.

## 5 Zielsetzungen und Messkonzept

Die Forschungsziele der Begleitforschung gliedern sich in die folgenden Schwerpunkte: wissenschaftliche Analyse

- des Wärme- und Endenergieverbrauchs,
- der thermischen Behaglichkeit und des Sommerverhaltens,
- der Raumluftqualität und der in der Gebäudeleittechnik hierfür verwendeten Messeinrichtungen,
- des Wärmehaushaltes des Bodens unter dem Gebäude
- sowie des energetischen Einflusses des Luftaustausches durch Türöffnungen im Eingangsbereich.

Mit der Begleitmessung sollen die Verbrauchsdaten für Heizwärme, Strom und Warmwassererwärmung vollständig erfasst werden. Diese Daten dienen der Erfolgskontrolle des Projektes, des Weiteren können die Projektierungsdaten überprüft werden. Über die Erfassung der Wärmeverbräuche werden die Endenergieverbräuche ermittelt. Die Erfassung der gesamten vom Wärmeerzeuger gelieferten Energie dient der Bestimmung der Primärenergieverbräuche. Die Temperaturmessung in sechs Klassenräumen sowie an zwei Stellen im Flur ist zur Untersuchung der thermischen Behaglichkeit und zur Beurteilung der Wärmeverbräuche erforderlich.

Um Aussagen über das thermische Verhalten des Gebäudes und die Wirksamkeit der Maßnahmen zur Vermeidung von sommerlicher Überhitzung treffen zu können, sind neben der Messung der Raumlufttemperaturen auch Informationen zur Außentemperatur, der Solarstrahlung sowie der internen Wärmequellen (elektrische Verbräuche) notwendig. Die elektrischen Verbräuche werden durch vorhandene Hauptzähler des Versorgers erfasst, während zusätzliche interne Zwischenzähler eine Aussage über die weitere Verteilung des Verbrauchs ermöglichen. Die Außentemperaturmessdaten werden von der Wetterstation der Gebäudeleittechnik verwendet. Die Global-Strahlungsinformationen werden von einer Wetterstation in der Nähe bezogen. Zum Abgleich der Temperatur-Wetterdaten wurden eigene Referenzmessungen durchgeführt.

Zur Klärung der Planungsfragen bei großen hochwärmegedämmten Gebäuden zum Bereich Wärmebrücken im Gründungs- und Bodenplattenbereich sind Temperatursensoren im Erdreich sowie Messstellen zur direkten Erfassung des Wärmestroms durch die Bodenplatte vorgesehen. Die Messdaten des Gebäudes sollten über die Verhältnisse im realen Gebäude Aufschluss geben und zeigen, ob der gewählte Ansatz zur Reduzierung der Wärmebrückenverluste erfolgreich war. Damit konnte für



zukünftige Planungen geprüft werden, ob ein erhebliches Potenzial für kostengünstige Entwürfe vorhanden ist.

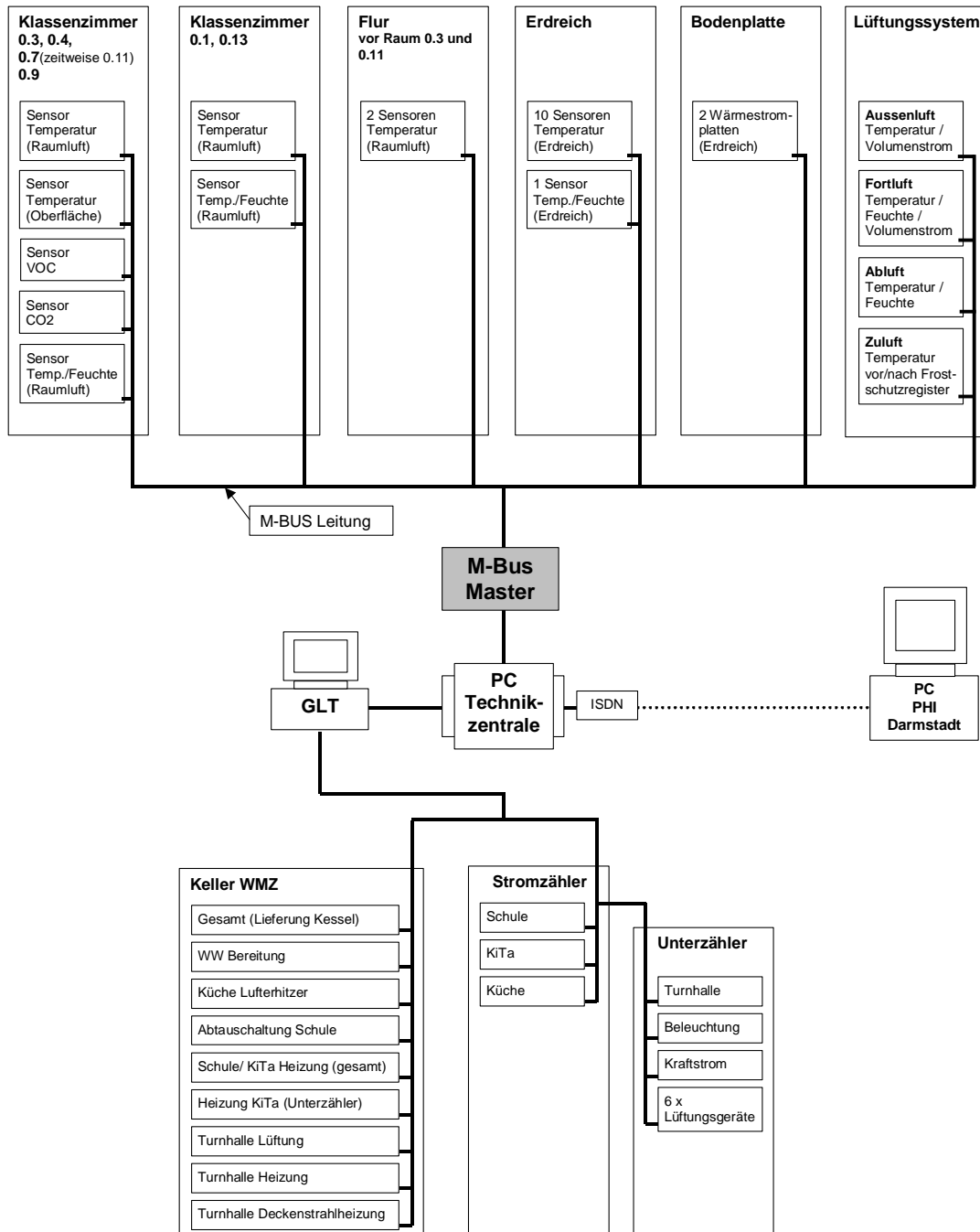
## 5.1 Aufbau der Messtechnik

Die Messungen teilen sich räumlich auf in Messungen im EG (Klassenräume/Flure) und die im Technikeller (2. UG). Die für die nähere Untersuchung ausgewählten Klassenräume befinden sich alle im EG des Gebäudes. Diese Wahl hat mehrere Ursachen:

- Ein Klassenraum und ein Flur im EG waren notwendig, um die Wärmestrommessung durch die Bodenplatte und die Messung der Temperaturbedingungen in der angrenzenden Zone der Messplatten zu erfassen.
- Bei der Planung war noch nicht bekannt, welche Räume der neuen Schule zuerst belegt werden. Daher wurde sicherheitshalber das EG gewählt.
- Einfachere und kostensparende Verkabelung durch die Verlegung nur in einer Ebene plus ein Strang zum Keller.
- Die GLT ist ebenfalls im EG angeordnet. Die Verbindung zur GLT konnte so ganz einfach ausgeführt werden.

Die sechs näher untersuchten Klassenräume sind zur Hälfte im Westflügel (Ostfenster) und zur anderen Hälfte im Nordflügel (Südfenster) angeordnet.

Im Gebäude wurde ein Zweidraht-M-Bus-Messnetz (gem. [DIN EN 1434-3]) installiert. Ein sog. „M-Bus-Master“ (Pegelwandler) ist mit dem zentralen Messrechner verbunden. Alle Sensoren des Messnetzes (Raumluft- und Oberflächentemperatur, relativer Feuchte, VOC, CO<sub>2</sub>, Erdreichtemperatur und Wärmestrom) sind direkt oder über Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) mit dem M-Bus-Netz verbunden. Nach der Installation können alle Einzelgeräte über ihre dreistellige Primäradresse und 8-stellige Sekundäradresse angesprochen und die Daten ausgelesen werden. Es handelt sich dabei um eine direkte digitale Übertragung der Werte. Die Messstellen werden zeitlich hochaufgelöst in 10-minütigen Intervallen mit 2400 Baud abgefragt und die Daten auf dem zentralen PC abgespeichert. Dieser ist mit einer ISDN-Karte zur Datenfernübertragung über das Telefonnetz und regelmäßigen Kontrolle der Messdaten ausgestattet. Zur sicheren Abschaltung und selbstständigen wieder Aufnahme der Messung ist der Messrechner über eine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung (USV) angeschlossen. Der schematische Aufbau des Messnetzes ist in Abbildung 29 dargestellt.



**Abbildung 29: Schematische Darstellung des M-Bus-Systems mit der Datenerfassung über die GLT sowie der Fernübertragung zum Passivhaus Institut.**

Der Messrechner und der M-Bus-Master sind im Büro des Schulhausverwalters im EG positioniert. Von dort ist das Netz in zwei Hauptsträngen in die beiden angeschlossenen Gebäudeflügel sowie in den Technikkeller geführt. Alle M-Bus-Temperatur Sensoren werden über zwei weitere separate Litzen von einem zentralen Netzteil mit 17 V Betriebsspannung versorgt. Eingesetzte A/D-Wandler beziehen die benötigte Energie aus Netzteilen direkt am Einsatzort.



**Abbildung 30: Zentraler Messrechner mit Bildschirm und Unterbrechungsfreier Spannungsversorgung (USV) im Büro des Schulhausverwalters (rechts unter dem Tisch: GLT-Rechner und PC des Schulhausverwalters).**

Da die zentrale Gebäudeleittechnik (GLT) auf die Zähler des Gebäudes zugreift, stehen die Zähler für die Wärme-, Wasser- sowie Stromverbräuche nicht dem Messnetz zur Verfügung. Diese Zähler werden von der GLT ausgelesen; durch ein lokales Netzwerk werden diese Daten manuell vom GLT-Rechner auf den zentralen Messrechner des M-Bus-Systems übertragen und stehen dann zur Auswertung zur Verfügung. Die GLT erfasst diese Zähler normalerweise im Stundenraster. Andere Daten von der GLT, auf die ebenfalls zurückgegriffen wurde, liegen z.T. auch in höherer Auflösung auf der GLT vor.

Zur Datensicherheit und Kontrolle wurden die Zähler bei Ortsterminen vom PHI und regelmäßig vom Schulhausverwalter auch manuell abgelesen.

## **5.2 Position und Spezifikation der Messstellen**

Die für die Begleitmessung benötigten Messeinrichtungen werden in diesem Abschnitt spezifiziert. Dabei wird unterschieden nach Zähler- und Messeinrichtungen für Verbräuche des Gesamtgebäudes, allgemeinen Messungen (z.B. Erdreichtemperaturen), sowie den raumweisen Temperatur- und Luftqualitätsmessungen.

### **5.2.1 Zentrale Hauptzähler und Sensoren**

#### **5.2.1.1 Wärmemengenzähler**

Die zentrale Wärmeversorgung wird über zwei kaskadierte Holzpelletkessel mit Pufferspeicher im 2. Untergeschoss realisiert. Die gesamte erzeugte Wärmemenge der Kessel wird in den Pufferspeicher geladen, die Messung erfolgt über den zentralen Wärmemengenzähler (WMZ).



Acht weitere WMZ messen die Wärmemengen, welche aus dem Pufferspeicher über eine hydraulische Weiche entnommen werden. Dabei werden folgende Bereiche getrennt erfasst:

**Tabelle 5: Vorhandene Wärmezähler im Gebäude**

#	Bereich	Messung
1	Schule und KiTa	Heizung gesamt
2	Schule	Nachheizregister Lüftungsgerät „Schule 1“
3	KiTa	Heizung inkl. Nachheizregister Lüftungsgerät „KiTa“ (Unterzähler)
4	Turnhalle	Heizkörper
5	Turnhalle	Deckenstrahlheizung
6	Turnhalle	Nachheizregister
7	Küche	Nachheizregister
8	Schule/Turnhalle	Warmwasserbereitung (thermisch)

Die sog. „Nachheizregister“ in den Lüftungsgeräten dienen in der Konzeption der Haustechnik nur der Beheizung des Luftstroms im Fall der „Defrosterschaltung“ der Wärmeübertrager (vgl. Abschnitt 6.2). Daher werden die Nachheizregister - leicht irreführend - auch als „Frostschutz Lüftung“ bezeichnet, obwohl sie im Gerät nach den Wärmeübertragern, vor dem Zuluftkanal-Abgang montiert sind. Sie dienen zur Temperaturanhebung der Zuluft bei der (Teil-) Umgehung der Wärmeübertrager. Nur in der Küche wird - aufgrund des erhöhten Luftwechsels - die Beheizung ausschließlich über Nachheizregister ohne Heizkörper durchgeführt.

Die schematisch vereinfachte Anordnung der WMZ (Fa. Landis + Gyr) kann Abbildung 31 entnommen werden. Die Baugrößen der Zähler unterscheiden sich bedingt durch den unterschiedlichen Einsatzzwecke.



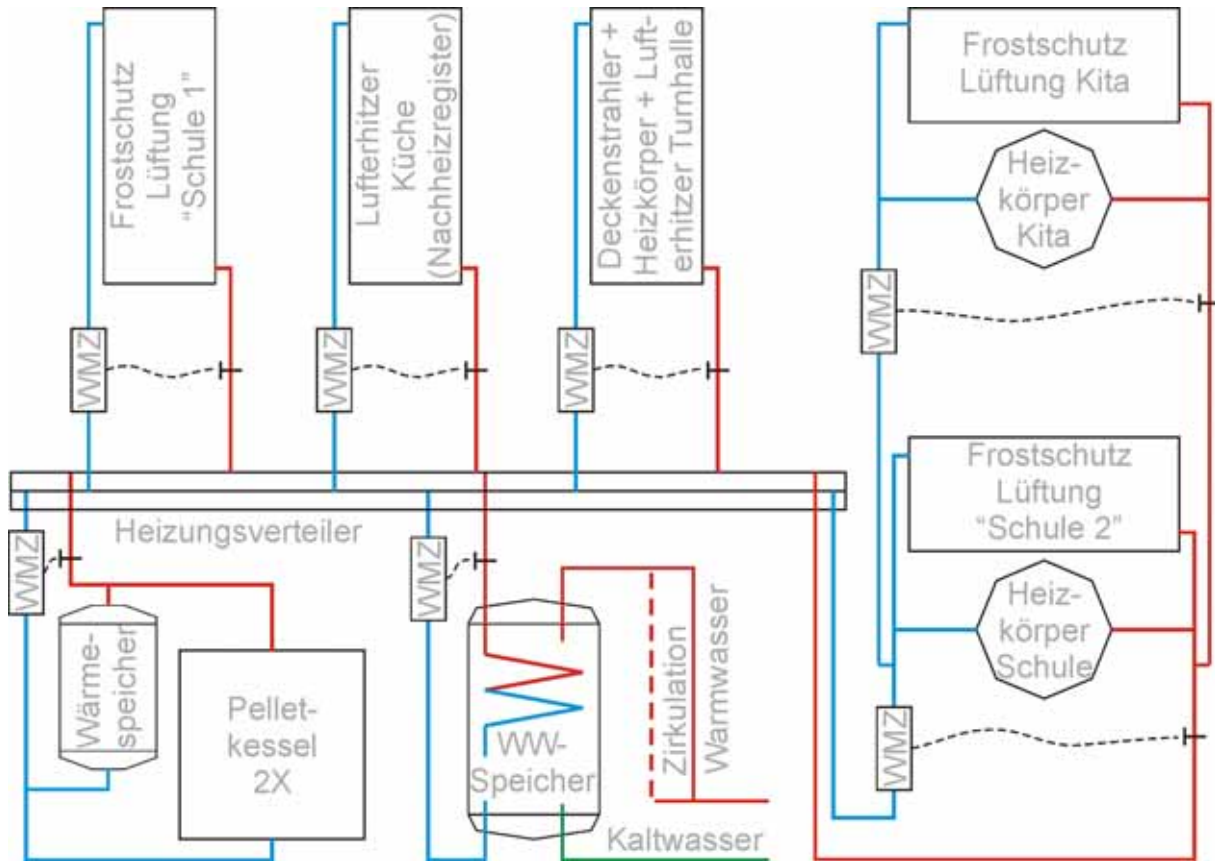


Abbildung 31: Vereinfachtes schematisches Hydraulikschema der Wärmeversorgung mit den Zählereinrichtungen (WMZ).



Abbildung 32: Wärmemengenzähler und Teilansicht der hydraulischen Weiche im Technikeller.

Durch die zentrale Anordnung der WMZ werden die überwiegenden Anteile der Leitungswärmeabgaben der Rohrleitungen mit erfasst. Die Wärmeabgabe des Speichers und der Rohrleitungen zwischen dem Speicher und den acht WMZ im Technikraum wird als Differenzmenge zwischen Wärmelieferung der Kessel (Haupt-WMZ) und der Summe der gemessenen acht Wärmemengen berechnet.

Eine genaue Erfassung des Brennstoffeinsatzes ist beim Medium Holzpellets schwierig zu realisieren und musste daher entfallen. Alle WMZ wurden erst deutlich nach Inbetriebnahme des Gebäudes montiert: sie waren erst ab Ende Februar 2005 bzw. Ende Mai 2005 betriebsbereit und wurden aufgrund fehlender Schnittstellen erst ab Ende Juni 2005 per Fernablesung auf der GLT erfasst.

### 5.2.1.2 Elektrozähler

Für die Erfassung der gesamten Stromverbräuche im Gebäude gibt es drei zentrale Zähler des Elektrizitätsversorgers für die Bereiche Schule, KiTa und Küche. Als hausinterne Unterzähler sind noch folgende Elektrozähler für die Messung berücksichtigt bzw. extra vorgesehen worden: Turnhalle, Sondermessung Licht- und sog. Kraftstrom (für den Bereich Nordflügel EG der Schule) sowie in allen sechs Lüftungsanlagen. Die jeweiligen Zählerstände werden über die Gebäudeleittechnik im Stundenraster ausgelesen und gespeichert, so dass Verbrauchsprofile über die Zeitachse erstellt werden können. Zur Erfassung der Einspeisung der PV-Solarstromanlage ist vom regionalen Versorger ein Einspeisezähler montiert. Dieser wurde bei Ortsterminen von PHI-Mitarbeitern abgelesen.



Abbildung 33: Hauptstromzähler und rechts der PV-Einspeisezähler im Hausanschlussraum.

## 5.2.2 Temperaturmessungen

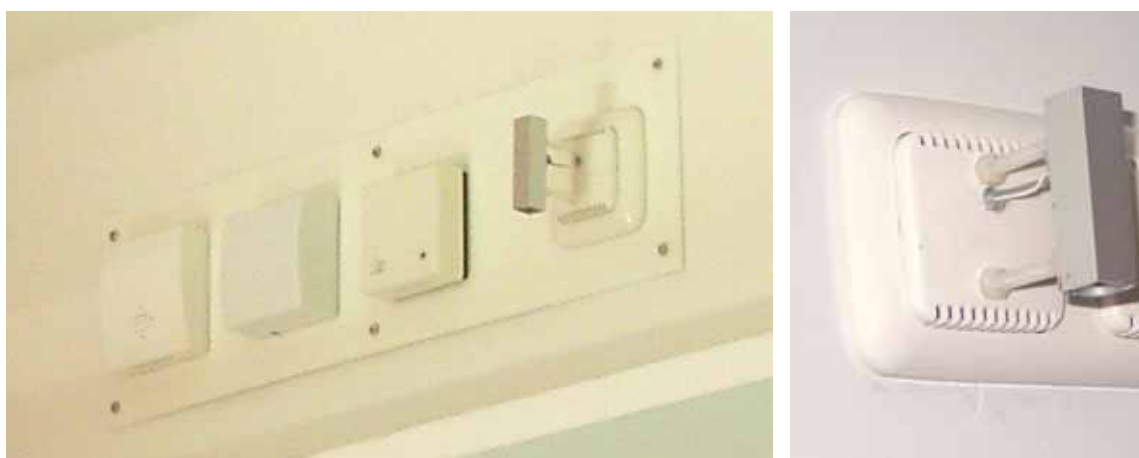
Zur Messung der Raumtemperaturen wurden M-Bus Temperatursensoren eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Sonderentwicklung nach Vorgaben des Passivhaus Instituts. Als Mess-Sensor für die Raumluftmessung werden langzeitstabile Platin-Widerstände (Pt 100) der höchsten Genauigkeitsklasse (Klasse: 1/10 DIN) verwendet. Die Temperatursensoren geben alle 6:40 Minuten eine Mittelwerttemperatur aus. Die Elektronik der Sensoren sind in Unterputzdosen montiert und mit



geschlitzten Deckeln (Belüftung) abgedeckt. Die Lage der Temperatursensoren kann den Grundrissen im Anhang entnommen werden.

Bei den Messstellen für die **Raumlufttemperaturen** in den Klassenräumen befindet sich der Pt100-Sensor im Abstand von ca. 5 cm vor der Wandoberfläche in einem vertikalen Aluminium-Strahlungsschutzrohr. Das Schutzrohr ist an der Ober- und an der Unterseite offen, damit es ungestört von der Raumluft durchströmt werden kann. Die Messposition ist aus Schützgründen in 2,9 m Höhe an der vertikalen Fläche der Deckenabkofferung positioniert. Die zwei Messpositionen im Flur sind ohne Strahlungsschutzrohr ausgestattet - der Sensor befindet sich unter dem geschlitzten Deckel. Sie sind niedriger angebracht und wären sonst nicht ausreichend geschützt gewesen.

Zusätzlich sind in vier Klassenräumen Unterputz-Pt100-Sensor für die Messung der **Wandoberflächentemperatur** eingeputzt worden. Die Oberflächentemperatursensoren wurden vor dem Verspachteln der Betonwände mit etwas Gips ca. 10 bis 15 cm von der Unterputzdose entfernt oberflächennah aufgebracht. In einem Fall musste auf eine angrenzende Gipskartonwand ausgewichen werden. Alle vier Sensoren befinden sich etwa in 2 m Höhe.



**Abbildung 34:** Links: Sensorplatte in einem Klassenraum an der Stirnseite der Deckenabkofferung mit vier Sensoren (VOC, CO<sub>2</sub>, rel. Feuchte und Temperatur). Rechts: Einzelner Temperatursensor mit Strahlungsschutzrohr.



Abbildung 35: Klassenraum mit der Sensorplatte (rechts) und dem Zuluft-Ventil.

### Kalibrierung der Temperatursensoren und Messung der Temperaturschichtung (Raumluft)

Vor dem Einsatz der Temperatursensoren wurden diese im Passivhaus Institut kalibriert. Die Kalibrierung wurde in einem Kellerraum mit nur sehr geringen tageszeitlichen Temperaturschwankungen und minimierten Störeinflüssen (z.B. wechselnder Wärmestrahlung) durchgeführt. Um die spätere Einbausituation der Sensoren möglichst realitätsnah abzubilden, wurden die Module jeweils in eine Unterputzdose in einem Kalksandsteinblock eingebaut und dort kalibriert. Zur Messung der Referenz-Temperaturen wurde ein Laborgerät (ALMEMO Typ 3290-8 Fa. Ahlborn) eingesetzt. Dabei wurden zwei Referenz-Messwerte aufgezeichnet:

1. Ref.-Wert: in Höhe des Pt100, 10 cm vor dem Modul
2. Ref.-Wert: auf der Steinoberfläche (Oberflächen-Pt100)

Der Messwert des jeweiligen M-Bus-Moduls wurden ausgelesen, mit den Referenzmesswerten verglichen und Kalibrierwerte ermittelt.

Bei Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Messwerte der M-Bus-Module mit Pt100-Widerstand im Strahlungsschutzrohr (Aluminium) einem gewichteten Mittel aus etwa 80 % die Lufttemperatur und 20 % der Oberflächentemperatur entsprechen. Bei den Sensoren im Flur ohne Schutzrohr ist das Verhältnis gerade umgekehrt. In den Fluren gibt es keine zusätzlichen Oberflächensensoren. Der Messwert stellt eine gute Näherung für die operative Temperatur im Flur dar.

Die vier Sensoren für die Messung der Oberflächentemperaturen in den Klassenräumen wurde ebenfalls - für ihren Anwendungszweck - kalibriert.

Um die Lufttemperaturmessung im Objekt bei realen Bedingungen zu überprüfen, und um Aussagen über die Temperaturschichtung machen zu können, wurden in Raum 0.4 Kontrollmessungen durchgeführt. Mit stand-alone Datenloggern (Fa.



Onset, Typ HoBo H8) wurden Temperaturen in unterschiedlichen Höhen und Positionen im Raum an einem Wintertag mit normalem Schulbetrieb gemessen. Die Geräte wurden dort vor dem Unterrichtsbeginn positioniert. Die Messdaten sind in Abbildung 36 dargestellt. Dabei handelt es sich bei dem 03.03.2006 um den gleichen Tag, an dem auch die CO<sub>2</sub>-Messung in diesem Raum näher untersucht wurde (vgl. Abschnitt 6.6.3.2). Daher ist hier die zeitliche Belegung des Raumes genau bekannt. Es ist eine gute Übereinstimmung der Temperatur bei der Dauermessstelle in 2,9 m Höhe festzustellen.

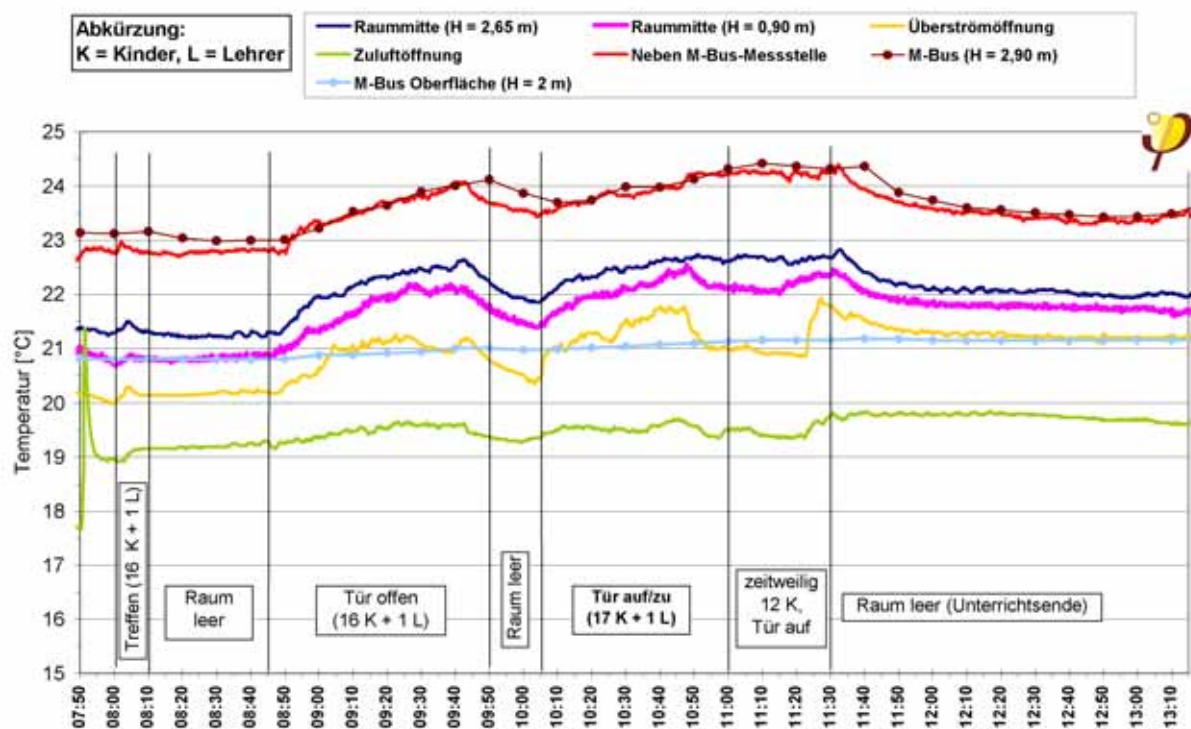


Abbildung 36: Temperaturmessungen am 03.03.2006 in Raum 0.4 zur Überprüfung der Dauermessung sowie der Temperaturschichtung im Raum.

Im Sommer wurden zwei weitere Sonder-Temperaturmessungen in Raum 0.3 und 0.4 mit Sensoren in 0,9 m Höhe über sechs Tage durchgeführt (06.07. bis 12.07.2006). Dabei war während des einen Teils der Messzeit Schulbetrieb und während des zweiten Wochenende bzw. Ferienzeit ohne Belegung.

Die Analyse der Messungen im Winter und im Sommer zeigt Temperaturschichtungen im Raum zwischen 0,3 K/m im Sommer und 1 K/m im Winter. Bei den Winterwerten von 1 K/m handelt es sich um eine typische Größenordnung für hochwärmegedämmte Gebäude. Während dieser Messungen bestand im Sommer im Mittel eine Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Außenlufttemperatur von 2,1 K, im Winter von 26,0 K. Für die Auswertungen der Dauermessung wurden die Dauer-Lufttemperaturmessungen (M-Bus) alle auf die - für die SchülerInnen -

relevante Höhe von 0,9 m umgerechnet. Für die Umrechnung wurde die jeweilige Differenz der Raumtemperatur zur Außentemperatur berücksichtigt.

An den beiden Temperatursensoren in den Fluren wurden - ergänzend zur Kalibrierung vor der Montage - am 14.02.2006 Kalibriermessungen durchgeführt. Für diese wurden tagsüber jeweils einige Stunden Messdaten aufgezeichnet. Die Ergebnisse wurden bei der Auswertung der Temperaturdaten berücksichtigt.



**Abbildung 37: Kalibriermessung vom Temperatursensor im Flur vor Raum 0.3.**

### **5.2.2.1 Messungen im Erdreich**

Zur Bestimmung der Wirksamkeit der Dämmschürzen werden an zehn Punkten Erdreichtemperaturen gemessen. Dazu wurden zehn Pt100 Sensoren mit Erdkabeln eingesetzt. Diese wurden am 13.10.2003 und am 17.06.2004 im Bereich unter der späteren Bodenplatte und im Außenbereich in unterschiedlichen Tiefen positioniert und räumlich eingemessen. Außerdem wurde auch eine Messstelle zur Bestimmung der relativen Bodenfeuchte in einem Kunststoffrohr montiert und im Bereich unter der späteren Bodenplatte eingebaut.

Um die Überdeckung der Erdsensoren durch die später fertiggestellte Pausenhof-Oberfläche (Rasengittersteine und Stufen) zu ermitteln, wurde am 28.06.2006 mit einer Schlauchwaage der Hof-Bereich vermessen (Höhe gegenüber der Oberfläche Fertigfußboden von Raum 0.3).



**Abbildung 38: Montage der Erdreichtemperatursensoren (hier in Nähe der Dämmschürze) unter der späteren Bodenplatte in unterschiedlichen Tiefen.**



**Abbildung 39: Sensor zur Messung der relativen Feuchte im Erdreich. Links: Im Kunststoffrohr montierter Sensor. Rechts: Montage des Sensors im Bereich unter der späteren Bodenplatte.**

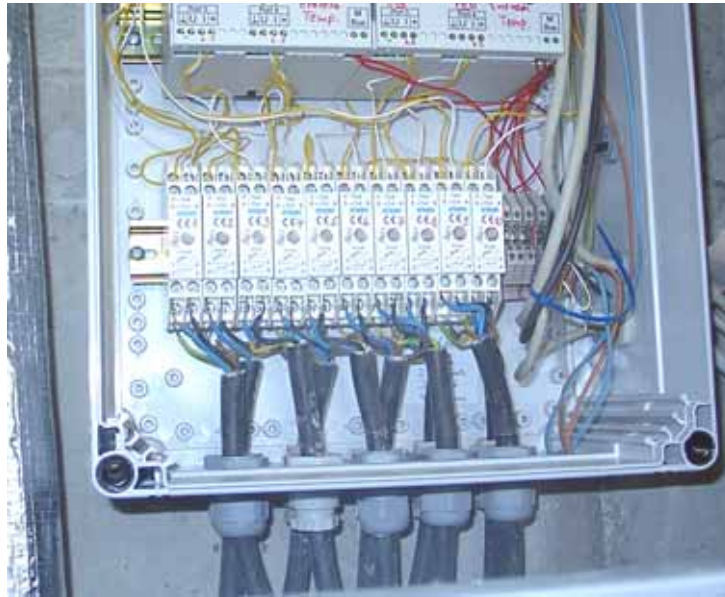


Abbildung 40: Unterer Teil des Schaltkastens in Raum 0.3 der u.a. zur Messung der Erdreichtemperaturen dient (unterste Reihe: Umsetzer für die Pt100-Vierleiter-Messung mit eingeführten Erdkabeln der Pt100-Sensoren).

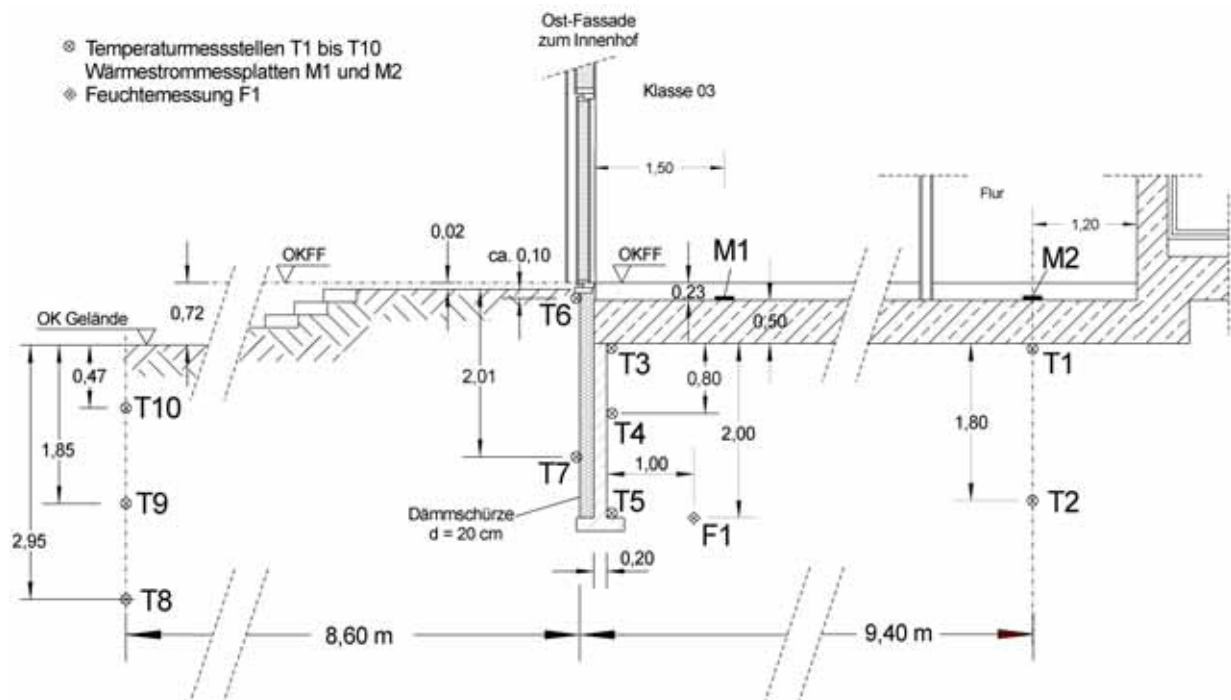


Abbildung 41: Positionen der Erdreichtemperatursensoren und der Feuchtemessstelle im Bereich unter Raum 0.3 und im Hof. Die beiden Wärmestrommessplatten sind ebenfalls markiert. (Ursprüngliche Zeichnung vom Architekturbüro 4a ergänzt)

Um die Messdaten der Erdreichtemperaturen und Bodenfeuchte in einer Simulation nachvollziehen zu können, werden Daten über die thermische Bodeneigenschaften benötigt. Aus diesem Grund wurden bei der Verlegung der Sensoren zwei Erdreichproben (gewachsener Boden und aufgeschütteter Boden) genommen. Diese wurden an der Brandenburgischen TU Cottbus am Lehrstuhl für angewandte Physik auf ihre Wärmeleitfähigkeit und ihre spezifische Wärmekapazität bei unterschiedlichen Feuchten untersucht (siehe dazu Abschnitt 7).





## Wärmestrom

Um den Wärmestrom durch die Bodenplatte bestimmen zu können, wurden im Raum 0.3 und im thermisch „ungestörten“ Kern des Gebäudes - im Flur vor Raum 0.3 - zwei kalibrierte Wärmestrom-Messplatten (Fa. Phymeas) im Bodenaufbau montiert (am 20.07.2004 und am 24.08.2004). Die Wärmestrommessplatten sind über Signalverstärker mit den Digital/Analog-Wandlern im Schaltschrank von Raum 0.3 verbunden.



Abbildung 42: Montage der Wärmestrommessplatten in Raum 0.3 (vor dem Einbringen der Dämmung) und im Bodenaufbau im Flur vor Raum 0.3.

### 5.2.2.2 Lüftungsgeräte

Zur Untersuchung des Lüftungsgerätes „Schule 1“ wurden folgende Sensoren im Gerät bzw. in den entsprechenden Lüftungskanälen im Technikkeller montiert:

- Temperaturen (Außenluft vor dem Gerät, Zuluft vor Nachheizregister, Zuluft nach Nachheizregister, Fortluft)
- Relative Luftfeuchte (Abluft, Fortluft)
- Volumenstrom (Außenluft, Fortluft)

Die Temperatur- und Feuchtemessungen wurden mit Sensoren der Fa. Airflow und der Fa. Thermokon ausgeführt.

Aufgrund der fehlenden Einlaufstrecke wurde der Volumenstrom Außenluft vor dem Gerät mittels eines Strömungsmessgerätes (Fa. Airflow) gemessen. Der Fortluftstrom

konnte mit einem Staukreuz und einer hochaufgelösten Druckdifferenzmessung (Fa. Setra, Messbereich 0...50 Pa, Genauigkeit +/- 1 %) realisiert werden.

Der Stromverbrauch aller sechs Geräte wird über die geräteinternen Stromzähler auf der GLT erfasst.



**Abbildung 43:** Links: Lüftungsgerät „Schule 1“ im Technikkeller mit dem darüber montierten Schaltkasten mit der Messtechnik. Rechts: Temperatursensor „Außenluft vor dem Gerät“ während der Montage.



**Abbildung 44:** Staukreuz im Fortluftkanal vor der Montage der Revisionsklappe und der zugehörige Differenzdrucksensor im Schaltkasten.



**Abbildung 45: Nachheizregister (auch „Frostschutzregister“) im geöffneten Lüftungsgerät vor dem Abgang der Zuluft.**

### 5.2.2.3 Raumlufthqualität

Zur Beurteilung der Raumlufthqualität wurden neben der oben beschriebenen Messung der Raumlufth- und Oberflächentemperaturen folgende Parameter aufgenommen: relative Feuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentration und VOC-Konzentrationen. Die weiter oben in Abbildung 34 dargestellten Sensorplatten zeigen die Sensoren. Dabei wurden in vier Klassenräumen neben den Temperaturmessungen CO<sub>2</sub>, VOC und die relative Feuchte gemessen (Vier-Sensor-Platten) und in zwei weiteren Räumen, neben der Raumlufthtemperatur noch die relative Feuchte (Zwei-Sensor-Platten).

Die Sensorplatte in Raum 0.11 wurde am 11. Oktober 2005 demontiert und in Raum 0.7 (Förderunterricht) montiert. Dort konnte sie ebenfalls mit dem M-Bus-Netz und der Spannungsversorgung verbunden werden. Raum 0.11 wird durch die Kirchengemeinde genutzt, wodurch keine schultypischen Daten gemessen werden konnten.

### CO<sub>2</sub>-Sensoren

Zur Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wurden Sensoren der Fa. Dittrich (Gasmesssystem MF420-IR-LC), mit einem Messbereich von 0 bis 3000 ppm eingesetzt. Dabei handelt es sich um „Zweistrahlinfrarotsensor“ mit Messküvette mit linearem Ausgangssystem und 24 Volt Versorgungsspannung. Die Genauigkeit wird mit +/- 2 % (entspricht +/- 60 ppm) angegeben.



**Abbildung 46: Eingesetzte CO<sub>2</sub>-Sensoren (Foto: Hersteller)**

Im Hersteller-Datenblatt zu dem Sensoren wird angegeben: „In normalen Anwendungen ist eine Kalibrierung nicht notwendig, sie kann jedoch bei Bedarf durch den Fachmann erfolgen“.

Die Sensoren wurden am 23.08.2006 und 05.04.2007 im PHI kalibriert. Bei der Untersuchung der Sensoren vom gleichen Hersteller und Typ in einem anderen Messprojekt zeigte sich, dass nur zwei von zwölf Sensoren die vom Hersteller angegebenen Genauigkeit einhalten. Bei der Kalibrierung der zwölf Sensoren wurden bei der Prüfgas-Konzentration von 1515 ppm maximale Abweichungen von minus 390 und plus 450 ppm festgestellt!

Die Kalibrierung der vier Sensoren für die Riedbergschule wurde jeweils mit zwei Prüfgasen (Sollwerte 0 ppm und 1500 ppm CO<sub>2</sub>) in einem Kalibriergehäuse durchgeführt. Für jeden Sensor wurde während der mehrstündigen Messung jeweils ein Kalibrierwert (lineare Abweichung und Offset) bestimmt. Diese wurden für die Auswertung verwendet um aus den Rohmesswerten einen korrigierten Messwert zu bestimmen.

Die Dauermessungen zeigten dann, dass die Drift des einen Sensors (Raum 0.9) sehr groß war. Er konnte nicht bei der Auswertung berücksichtigt werden. Glücklicherweise handelt es sich dabei um einen fast nicht benutzten Klassenraum (Abstell- bzw. Lagerraum).

Üblicherweise werden solche Sensoren - wie der Hersteller ausdrücklich empfiehlt - unkalibriert montiert und dann jahrelang verwendet. Die hohen absoluten Abweichungen vom Realwert und die z.T. sehr hohe Drift zeigen, dass sich diese CO<sub>2</sub>-Sensoren nicht zur Steuerung der Lüftungstechnik eignen. Es wäre nur mit regelmäßigen aufwendigen Kalibrierungen sinnvoll - dies ist im normalen Gebäudebetrieb viel zu aufwendig. Eine Steuerung der Anlagen nach Zeitplan ist bei Klassenräumen erfolgreich und ausreichend. Die Auswertung der Messdaten ist in Abschnitt 6.6.3 dokumentiert.



## VOC-Sensoren

In vier Klassenräumen sind kontinuierliche VOC-Messungen (Volatile organic compounds = flüchtige organische Verbindungen) durchgeführt worden. „VOC“ ist die Sammelbezeichnung für organische, also kohlenstoffhaltige Stoffe, die leicht flüchtig sind bzw. schon als Gas bei niedrigen Temperaturen (z.B. Raumtemperatur) vorliegen. Alle Lebewesen (Menschen, Tiere, Pflanzen, Mikroorganismen) emittieren organische Verbindungen in die Umwelt. Bei der vom Menschen verursachten Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen dominieren die Verwendung von Lösemitteln und der Straßenverkehr. Quellen für VOC in der Innenraumluft sind u.a. Baustoffe, Möbel und Teppiche, Reinigungsmittel, Kosmetika, Medikamente sowie der Konsum von Tabakprodukten.

Bei den durchgeführten Messungen handelt es sich nicht um eine klassische VOC-Messung im chemischen Sinne (chromatographische Analyse nach VDI-Richtlinie 4300 Blatt 6). Es wurden vielmehr handelsübliche „VOC-Sensoren“ verwendet, wie sie üblicherweise bei GLT-Anlagen für die Gebäudeautomation eingesetzt werden. Der Hersteller bezeichnet die Sensoren auch als „Mischgassensoren“ und „Luftqualitätssensoren“. Die Sensoren geben nur ein qualitatives Messsignal aus (0 bis 10 Volt), welches in der Auswertung einheitenlos als Messwert zwischen 0 und 1000 dargestellt wird. In diesem Bereich wird trotzdem zur einfacheren Handhabung von gemessenen VOC-„Konzentrationen“ gesprochen.

Eingesetzt wurden „Luftqualitätsfühler LW04“ vom Hersteller Thermokon, welche auf Sensoren mit einem beheizten Zinndioxid-Halbleiter basieren. Das Ausgangssignal eines jeden Sensors wurden vor der Montage an der Außenluft nach Hersteller-vorgabe über einen „Trimpoti“ auf einen Vorgabewert (entspricht „guter Luftqualität“) eingestellt.

Während der Dauermessungen zeigte sich eine sehr starke Drift der Mischgas-Sensoren (Ergebnisse siehe Abschnitt 6.6.4.2). Dies machte eine Nachstellung an dem „Trimpoti“ zunächst des einen Gerätes notwendig (es wurde fast dauerhaft der Maximalwert ausgegeben). Wäre der Luftwechsel des Raumes nach diesem Sensor geregelt worden, hätte es dauerhaft eine Anforderung gegeben. Damit wurde dann ggf. eine deutlich längere Lüftungszeit entstehen, die deutliche energetische Auswirkungen hätte (vgl. dazu auch die Berechnungen in [Kah 2006]).

Vergleichbare Aussagen über einen längeren Zeitraum oder zwischen zwei Sensoren von Raum zu Raum mit absoluten Werten sind so nicht zu erzielen. Die Sensoren sind aus unserer Sicht und unseren Erfahrungen aus dieser Messung nicht sinnvoll einsetzbar für die Steuerung von Lüftungsanlagen. Eine regelmäßige Nachjustierung halten wir für zu aufwendig und selbst für die Regelung der Klassenraumluftqualität zu ungenau. Besser, verlässlicher und kostengünstiger ist die Lüftungsregelung nach Belegungszeitplan und etwa bekannter Nutzerzahl.

## 5.3 Tabellarische Übersicht der Messgeräte

Tabelle 6: Zusammenstellung der Messgeräte mit Angaben zu Messzweck und –ort, Hersteller und Messgenauigkeit.

Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
<b>Messungen Klassenräume und Flure</b>					
Lufttemperatur	abgehängter Decke Klassenzimmer	C°	PT 100, Unterputzdose + Alurohr	Fa. DENEG	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Lufttemperatur	Leichtbauwand Flur	C°	PT 100, Unterputzdose	Fa. DENEG	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Oberflächen- temperatur	Betonwand Klassenzimmer	C°	PT 100, Unterputzsensoren	Fa. DENEG	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Feuchte, Lufttemperatur	abgehängter Decke Klassenzimmer	% / C°	Hygro-Temp- Sensor KWL3/5	Fa. Galltec	+/- 3% r.F. +/- 1C°
VOC-Konzentration	abgehängter Decke Klassenzimmer	keine	Luftqualitätsfühler LW04, TRV	Fa. Thermokon	n.A.
CO <sub>2</sub> -Konzentration	abgehängter Decke Klassenzimmer	ppm CO <sub>2</sub>	MF420IR-LC- CO <sub>2</sub> -3000	Fa. J. Dittrich	+/- 2% entspricht +/-60ppm
Wärmestrom Bodenplatte	Klassenzimmer, Flur	W/m <sup>2</sup>	Wärmeflussmes- splatte Typ 7	Fa. Phymea	+/- 5%
<b>Messung Erdreich</b>					
Erdreichtemperatur	Erdreich unter Bodenplatte und Pausenhof	C°	Pt 100/0 RM-Typ RL-13018	Fa. Rössel Messtechnik	Pt 100 DIN Klasse A
Feuchte, Erdreichtemperatur	Erdreich unter Bodenplatte	r.F. / C°	PT 100, Compact Messumformer	Fa. testo	+/- 2% r.F. / Pt 100 DIN Klasse B
<b>Messung Lüftungsgerät</b>					
Volumenstrom Aussenluft	Technikkeller	m/s	D12-66 V	Fa. Airflow	+/- 0,1m/s + 3% v.MW
Volumenstrom Fortluft	Technikkeller	Pa	Messkreuz mit Druckmessdose	Fa. Airflow / Fa. Setra	+/- 1%
Luftfeuchte Abluft	Technikkeller	r.F. / C°	D12-20 FT	Fa. Airflow	+/- 2% r.F. +/- 0,3C°
Luftfeuchte Fortluft	Technikkeller	r.F. / C°	D12-20 FT	Fa. Airflow	+/- 2% r.F. +/- 0,3C°
Lufttemperatur Abluft	Technikkeller	r.F. / C°	D12-20 FT	Fa. Airflow	+/- 2% r.F. +/- 0,3C°
Lufttemperatur Fortluft	Technikkeller	r.F. / C°	D12-20 FT	Fa. Airflow	+/- 2% r.F. +/- 0,3C°
Lufttemperatur Aussenluft	Technikkeller	C°	D12-20 T	Fa. Airflow	+/- 0,3C°
Lufttemperatur Zuluft vor Frostschutzregister	Technikkeller	C°	Kanal-Tempera- tursensor AKF10 TRA3	Fa. Thermokon	Pt100 +/- 1%
Lufttemperatur Zuluft nach Frostschutzregister	Technikkeller	C°	Kabeltemperatur- fühler TF14 TRA1	Fa. Thermokon	Pt100 +/- 1%



Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
<b>Zähler (Erfassung über die GLT)</b>					
WMZ WW-Bereitung	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Küche-Lüftung	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Abtauschaltung Schule	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Turnh.-Lüftung	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Turnh.-Deckenstrahlzlg.	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Turnh. statisch	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Schule+KiTa statisch	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Gesamt	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
WMZ Kita	Technikkeller	MWh	ULTRAHEAT 2WR5	Fa. Landis & Gyr	max 1,5%
Strom Kraftstrom	Technikkeller	kWh	Diris A m	Fa. Socomec	Wirkenergie +/- 1% Blindenergie +/- 2%
Strom Beleuchtung	Technikkeller	kWh	Diris A m	Fa. Socomec	Wirkenergie +/- 1% Blindenergie +/- 2%
Strom KiTa	Technikkeller	kWh	Kombizähler VDEW 4-Quadranten/LZKJ	Fa. EMH	Wirkenergie Klasse 1 Blindenergie Klasse 2
Strom Küche	Technikkeller	kWh	Kombizähler VDEW 4-Quadranten/LZKJ	Fa. EMH	Wirkenergie Klasse 1 Blindenergie Klasse 2
Strom Schule	Technikkeller	kWh	Kombizähler VDEW 4-Quadranten/LZKJ	Fa. EMH	Wirkenergie Klasse 1 Blindenergie Klasse 2
Strom Turnhalle	Technikkeller	kWh	Diris A m	Fa. Socomec	Wirkenergie +/- 1% Blindenergie +/- 2%

## 6 Messdatenauswertung

In diesem und den beiden Folgeabschnitten werden die Messdaten bezüglich der Fragestellungen des Projektes ausgewertet. Die Daten im Rahmen der Messungen wurden im Zeitraum von 16. November 2004 bis 01. Mai 2007, also über einen Zeitraum von rund 29 Monaten, aufgezeichnet. Die über die GLT des Gebäudes erfassten Daten der Wärme- und Stromzähler sind erst später verfügbar. Die jeweiligen Besonderheiten und Datenverfügbarkeiten werden in den betreffenden Abschnitten angegeben.

### 6.1 Klimadaten

Die Messdaten der Außenlufttemperatur der Wetterstation der Riedbergschule wurden für die Auswertungen verwendet. Die Daten werden von der GLT-Anlage des Gebäudes als 30-Minuten bzw. ab dem 03. November 2005 als 60-Minuten Daten abgespeichert. Fehlende Daten wurden mit Messdaten der Station „Frankfurt Hoechst“ vom Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HulG) ergänzt. Diese Daten sind unter [www.hulg.de](http://www.hulg.de) herunterzuladen. Eine Übersicht über die tagesmittleren Außentemperaturen während der Gesamtzeit der Untersuchung zeigt Abbildung 47.



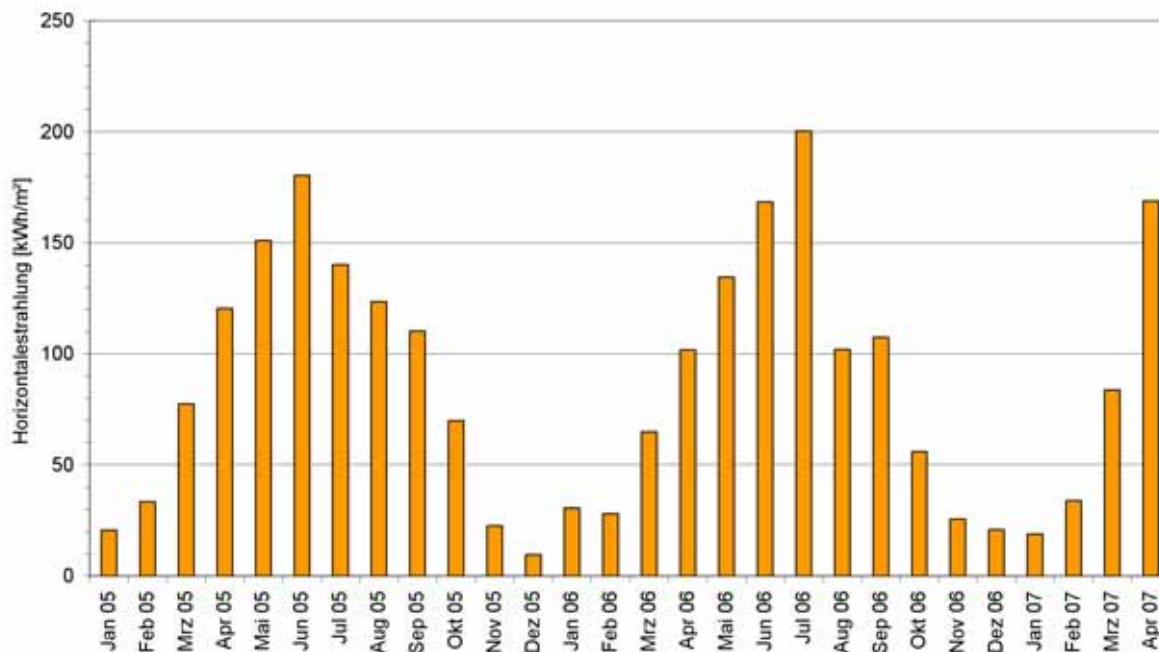
**Abbildung 47: Tagesmittlere Außenlufttemperatur vom 16.11.2004 bis zum 01.05.2007 (Messung GLT Wetterstation Riedbergschule).**

Die Strahlungsmessung der GLT-Wetterstation war fast dauerhaft unbrauchbar. Aus diesem Grund wurde die nächstliegende Wetterstation des HulG-Mess-Netztes verwendet. Die horizontale Solarstrahlung wird von der ca. 20 km entfernten Station auf dem Kleinen Feldberg (825 m über NN) gemessen (die Schule befindet





sich auf der Höhe von 140 m über NN). Die Daten wurden überarbeitet und für die PHPP-Gebäudebilanzen verwendet. Die Monatssummen von Januar 2005 bis zum April 2007 sind in Abbildung 48 dargestellt:



**Abbildung 48: Monatssummen der horizontalen Strahlung (Station „Kleiner Feldberg“) vom Januar 2005 bis zum April 2007.**

Für die beiden untersuchten Heizperioden 2005/06 und 2006/07 (jeweils 1. Oktober bis 30. April) sowie die beiden vollständigen Jahre 2005 und 2006 werden hier die Außentemperatur-Mittelwerte und die Globalstrahlungssummen aufgelistet und mit den Standarddaten nach DIN 4108 Teil 6 verglichen.

**Tabelle 7: Wetterdaten der Außenlufttemperatur (Mittelwerte) und der Summen der horizontalen Strahlung in den unterschiedlichen Zeiträumen innerhalb der Messzeit.**

	Außentemperatur (Mittelwerte) [°C]	Horizontale Strahlung (Summen) [kWh/m²]
Heizperiode 2005/06	4,3	327
Heizperiode 2006/07	8,5	408
Jahr 2005	10,6	1059
Jahr 2006	10,9	1041
Standardjahr (DIN 4108-T 6, Frankfurt)	9,7	1046

## 6.2 Lüftungsanlagen

In dem Gebäude sind insgesamt 6 zentrale Lüftungsgeräte der Firma Menerga Apparatebau GmbH im Einsatz. Diese sind den verschiedenen Nutzungsbereichen des Gebäudes zugeordnet. In Tabelle 8 sind die Geräte aufgelistet:

**Tabelle 8: Lüftungsgeräte mit Nennvolumenstrom und Aufstellort**

	<b>Gerät</b>	<b>Nennvolumenstrom [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>Aufstellort</b>
1	Schule 1	4770	Technikkeller
2	Kantine/ Mehrzweckraum	2800	Technikkeller
3	Turnhalle	1900	Technikkeller
4	Küche	6440	Technikkeller
5	Schule 2	4650	Staffelgeschoss (Nordraum)
6	KiTa	2665	Staffelgeschoss (Südraum)

Das Gerät „Schule 1“ vom Typ „Trisolair“ (Wärmeübertrager: Kreuz-Gegen-Kreuzstrom) mit einer Nennluftleistung von 4770 m<sup>3</sup>/h versorgt alle Räume im Nord-Flügel der Schule. Die Lüftungsanlagen sind als Zuluftsystem mit Wärmerückgewinnung (WRG) ohne Heizregister ausgelegt. Die Zuführung der Restwärme erfolgt konventionell über kleine Heizflächen je Raum. Ein im Lüftungsgerät integriertes Heizregister im Zuluftstrom dient ursprünglich nur der Lufterwärmung im Falle der Abtastung der Wärmeübertrager (Rekuperatoren). In diesen Fällen strömt ein Teilvolumenstrom der kalten Außenluft kurzzeitig über eine Bypassklappe an den Wärmeübertragern vorbei. Damit diese dann nicht direkt in die Räume eingeblasen wird, ist das Heizregister notwendig. So wird der Zuluftvolumenstrom auch im Fall der Abtastung nicht unterbrochen. Während dieses Betriebszustandes kann die Fortluft die Wärmeübertrager wieder abtauen. Da es in einigen Räumen Klagen über zu kalte Zuluft gab, wurde in der ersten vollständigen Heizperiode (2005/2006) die Steuerung dahingehend geändert, dass ein Teil der Energie durch die Heizregister der Zuluft zugeführt werden kann. Die Klagen über kalte Zuluft betrafen den Unterrichtsbeginn. Es wurde dabei jeweils eine Stunde vorher vorgespült. Wegen fehlender interner Lasten war dadurch die Zulufttemperatur zunächst geringer, so dass beim Vorspülen die Zuluft beheizt wird.

Die Lüftungsgeräte werden differenzdruckgeregelt nach dem Druck im Zuluftkanal betrieben. Dieser Druck wird bei Betrieb kontinuierlich aufrecht erhalten. Um die Anforderungen nach VDI 6022 zur Lufthygiene zu erfüllen, ist eine Schaltung zur Trocknung der Außenluftfilter realisiert worden. Es muss sichergestellt werden, dass die relative Luftfeuchte der Filter im Mittel über drei Tage nicht über 80% beträgt und dass es keinen Stillstand bei feuchtem Filter geben kann. Dazu ist ein Kanal mit



Absperrklappe zwischen dem Zuluft und dem Außenluftkanal montiert. Über die Freigabe der Klappe kann wärmere Zuluft eine zeitlang über den Außenluftfilter im Gerät geführt werden, um diesen zu trocknen.

Die Vermessung des Lüftungsgerätes „Schule 1“ ist Bestandteil der Begleitforschung. Dazu wurden an diesem Gerät Temperaturen, relative Feuchten, Stromverbrauchswerte sowie Volumenströme im 10-Minuten-Intervall gemessen.



**Abbildung 49: Vermessenes Lüftungsgerät „Schule 1“ im Technikeller der Schule. Rechts im Bild der Zu- und der Abluftkanal. Bei dem runden Kanal über dem Gerät handelt es sich um die Zulufrückführung zur Filtertrocknung.**

Die Gebäudeleittechnik (GLT) steuert nach einem Wochenprogramm die Lüftungsanforderung der Räume und öffnet bei Anforderung die Konstantvolumenregler der einzelnen Zulufräume. Das Zeitprogramm für die Räume mit der Zuordnung „Klassenzimmer belegt“ gibt eine Lüftung der Klassenräume am Montag von 5:00 bis 13:00 Uhr und dienstags bis freitags von 7:00 bis 13:00 vor. Die Zeiten vor Unterrichtsbeginn (8:00 Uhr) dienen zum „Vorspülen“ der Räume nach den ungelüfteten Nacht- bzw. Wochenendstunden.

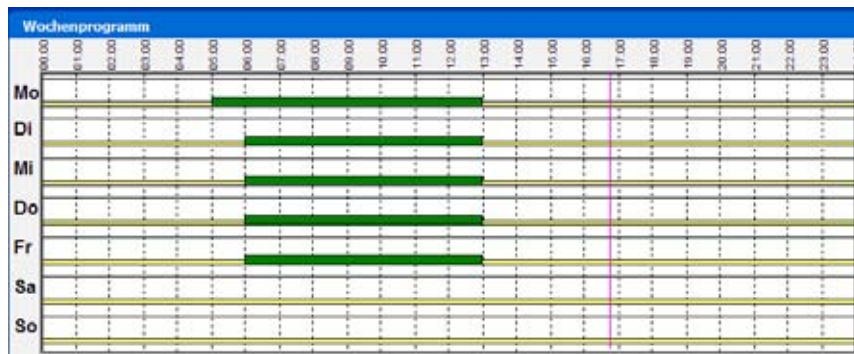


Abbildung 50: Beispiel des Wochen-Zeitprogramms von einem typischen genutzten Klassenraum der Schule.

In dem Gebäudeteil (Flügel Schule Nord) sind, im Bereich der durch das Lüftungsgerät „Schule 1“ versorgten Räume, neben den schulgenutzten Räumen auch noch andere Nutzer eingemietet. Es gibt die Büronutzung der „Hessenagentur“, die Schulnutzung der „aktiven Schule“ sowie die Nutzung als Gemeindezentrum und Kirchenbüro der ev. Kirchengemeinde. Für diese Nutzer sind in der GLT jeweils andere Nutzungsprofile hinterlegt.

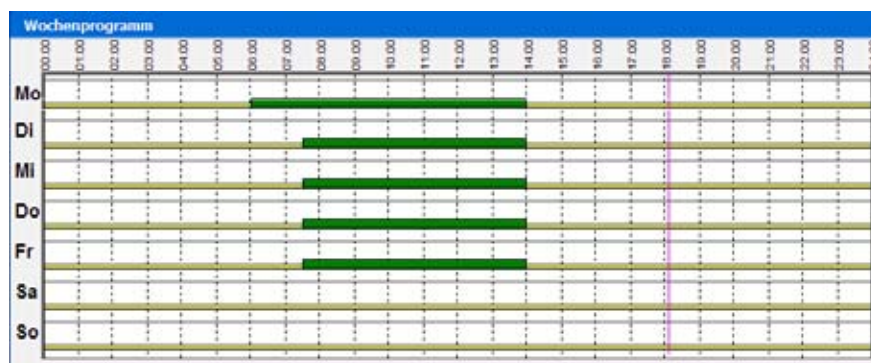


Abbildung 51: Beispiel des Wochen-Zeitprogramms der „aktiven Schule“ im 1. OG Nordflügel der Schule.

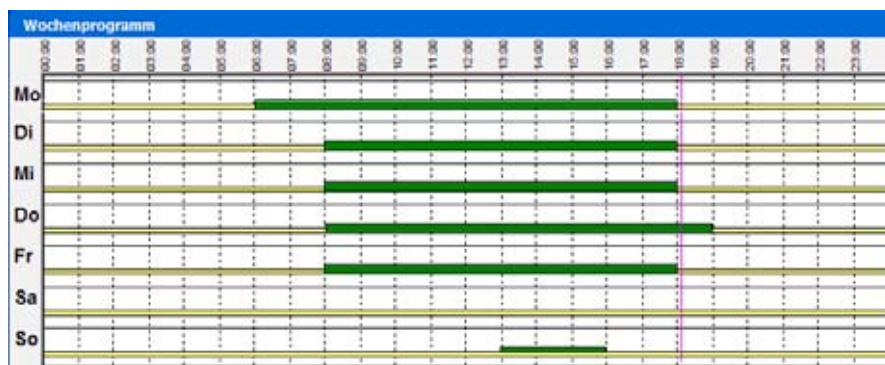
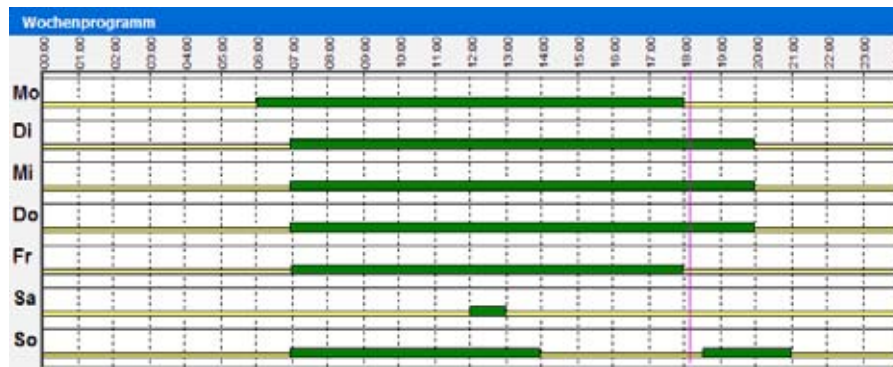


Abbildung 52: Beispiel des Wochen-Zeitprogramms der „Hessenagentur“ im UG Nordflügel der Schule.



**Abbildung 53: Beispiel des Wochen-Zeitprogramms der „ev. Kirche“ im EG Nordflügel der Schule.**

Die dargestellten Zeitprogramme waren in der ersten Heizperiode als Standard eingestellt. Bei „Sondernutzungen“ wie z.B. Elternabenden werden die Zeitprogramme durch den Schulhausverwalter angepasst. Jedem Zeitprogramm ist eine unterschiedlich große Anzahl von unterschiedlich großen Räumen zugeordnet.

Durch die verschiedenen Zeitprogramme fördert das Lüftungsgerät zeitabhängig unterschiedlich große Volumenströme. In der Kernzeit (5:00 bzw. 7:00 bis 13:00 Uhr) werden im Regelfall die größten Volumenströme, in den Nachmittagsstunden und am Wochenende geringere bis keine Volumenströme benötigt. Einen typischen Verlauf der Volumenströme zeigt Abbildung 54. Im hier näher untersuchten Winterzeitraum 01.10.2005 bis 30.04.2006 gab es allerdings auch längere Perioden, in denen – z.B. bedingt durch Fehleinstellungen oder einen Ausfall der GLT - die Lüftungsanlage als Minimum auch in der Nacht dauerhaft über 1000 m<sup>3</sup>/h gefördert hat (siehe Abbildung 55). In der Weihnachtsferienzeit lief die Anlage ungewollt im Normalbetrieb weiter.

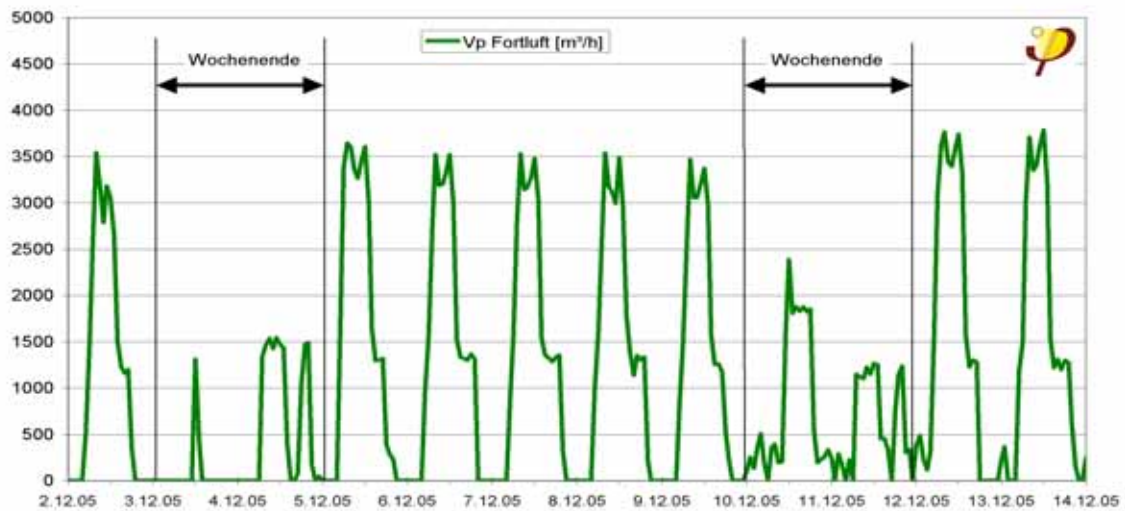


Abbildung 54: Typischer Verlauf der Luftvolumenströme vom Gerät „Schule 1“ (Stundenmittelwerte).

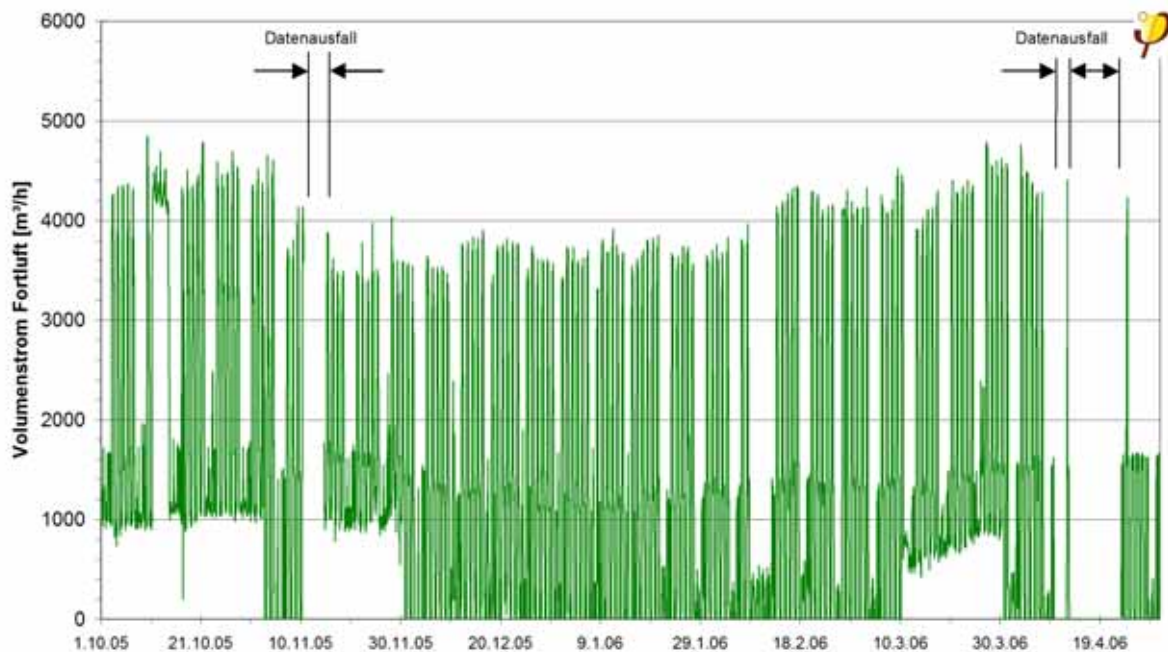


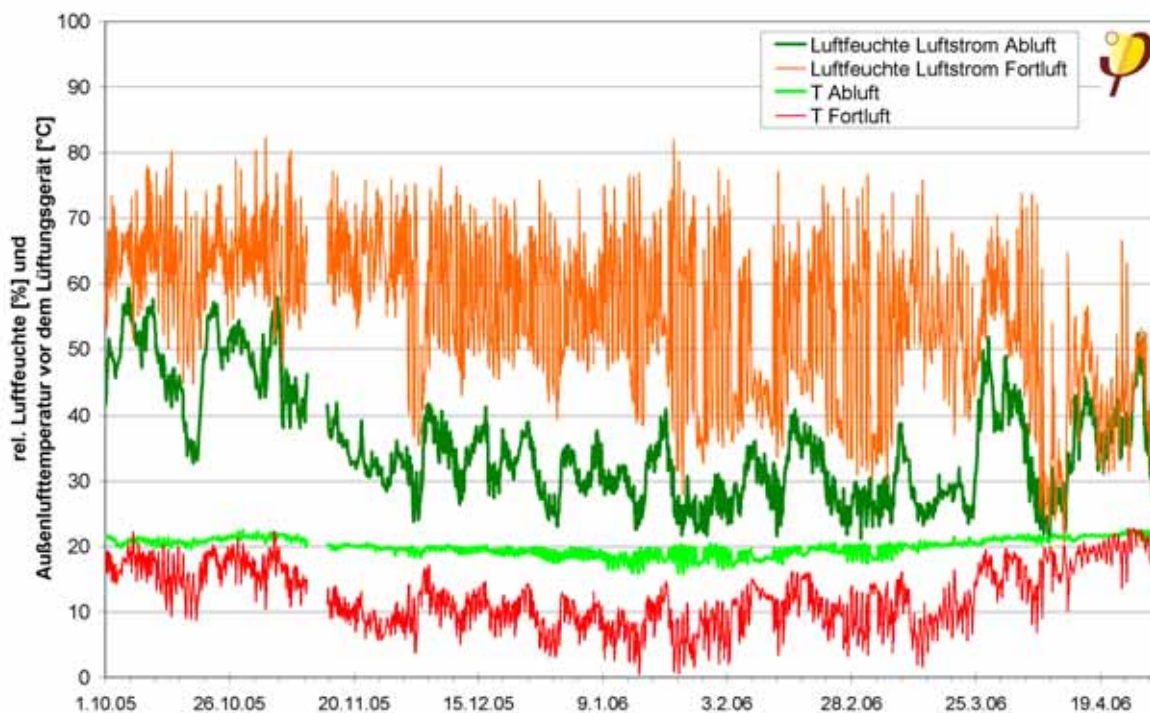
Abbildung 55: Fortluft-Luftvolumenströme vom Gerät „Schule 1“ im gesamten Zeitraum der Heizperiode 2005/2006 (Stundenmittelwerte).

Die häufigsten Betriebszustände vom Gerät „Schule 1“ in den genauer untersuchten 6 Monaten sind Volumenströme zwischen 1000 und 2000 m<sup>3</sup>/h (44,5% der ausgewerteten Stunden) und zwischen 3000 und 4000 m<sup>3</sup>/h (23,2%). Dabei konnten die Zeiträume, in denen keine auswertbaren Daten gemessen wurden, nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der Messgenauigkeit wurden nur die relevanten Volumenströme ab 500 m<sup>3</sup>/h berücksichtigt. Die Häufigkeitsverteilung (siehe auch im nächs-



ten Abschnitt Abbildung 58) deckt sich mit den Volumenströmen im typischen Zeitraum aus Abbildung 54.

Die relativen Luftfeuchtigkeiten vom Ab- und Fortluftvolumenstrom zeigen während der Heizperiode 2005/2006 einen typischen Winterverlauf (Abbildung 56). Der Zusammenhang der Temperatur und der relativen Feuchte ist deutlich zu erkennen.



**Abbildung 56: Relative Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen der Luftvolumenströme Ab- und Fortluft der Lüftungsanlage „Schule 1“ im Zeitraum 01.10.2005 bis 30.04.2006 (Stundenmittelwerte).**

In dem Diagramm werden alle Messdaten aus diesem Zeitbereich gezeigt. Von Interesse sind allerdings nur Daten während das Gerät auch in Betrieb war und das Gebäude auch bestimmungsgemäß genutzt wurde. Der unbeabsichtigte Betrieb der Anlage während Winterferien ist dabei nicht von Interesse (keine Personen als „Feuchtequellen“ im Gebäude). Daher werden hier die Mittel- und Extremwerte nur während der Hauptbetriebszeiten (Mo. bis Fr., 8:00 bis 18:00 Uhr, ohne Ferienzeiten und nur bei Volumenströmen der Anlage „Schule 1“ größer 500 m<sup>3</sup>/h) betrachtet. Dann ergeben sich die Werte, welche in Tabelle 9 gelistet sind: Die relative Feuchte der Abluft beträgt im Mittel 35,7 %, im Kernwinter 33,4 %. Die Fortluft nach der Abkühlung im Wärmeübertrager 60,0 % bzw. im Kernwinter im Mittel 64,3 %. Während dieser Betriebszeiten gab es damit keine Überschreitungen der 80 % der rel. Fortluftfeuchte. Der höchste Wert der Fortluftfeuchte während der gesamten Zeit der Heizperiode betrug 82,3 %.

**Tabelle 9: Relative Luftfeuchte und Temperaturen vom Ab- und Fortluftvolumenstrom vom Lüftungsgerät „Schule 1“ in der Heizperiode 2005/2006.**

Daten: Mo. bis Fr, 8:00 bis 18:00 ohne Ferienzeiten $V_p > 500 \text{ m}^3/\text{h}$	Abluft		Fortluft	
	Rel. Luftfeuchte [%]	Temperatur [°C]	Rel. Luftfeuchte [%]	Temperatur [°C]
<b>Mittelwert Winter</b> (1.10.05 bis 30.4.06)	35,7	20,4	60,0	8,6
<b>Mittelwert Kernwinter</b> (1.11.05 bis 28.2.06)	33,4	19,8	64,3	5,6
<b>Minimalwert</b>	22,7	17,9	20,5	1,0
<b>Maximalwert</b>	59,4	22,6	77,9	22,7

Wird aus der relativen Feuchte und der Temperatur die absolute Feuchte (in g Wasser pro  $\text{m}^3$  Luft) in den Luftströmen berechnet, kann untersucht werden, ob im Gerät Feuchte auskondensiert ist und damit in der Energiebilanz berücksichtigt werden muss. In Abbildung 57 ist der Verlauf der absoluten Feuchte der Ab- und Fortluft im gesamten Zeitraum der Heizperiode 2005/06 dargestellt. Die Differenz der absoluten Feuchten (Abluft minus Fortluft) ist ebenfalls dargestellt (Differenzbildung nur bei Volumenströmen größer  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Es zeigt sich nur ein „Rauschen“, was im Bereich der Messgenauigkeit der Feuchtemessung liegt. Damit sind keine nennenswerten Mengen Kondensat angefallen und so kann auch keine Kondensationsenergie in der Energiebilanz berücksichtigt werden.



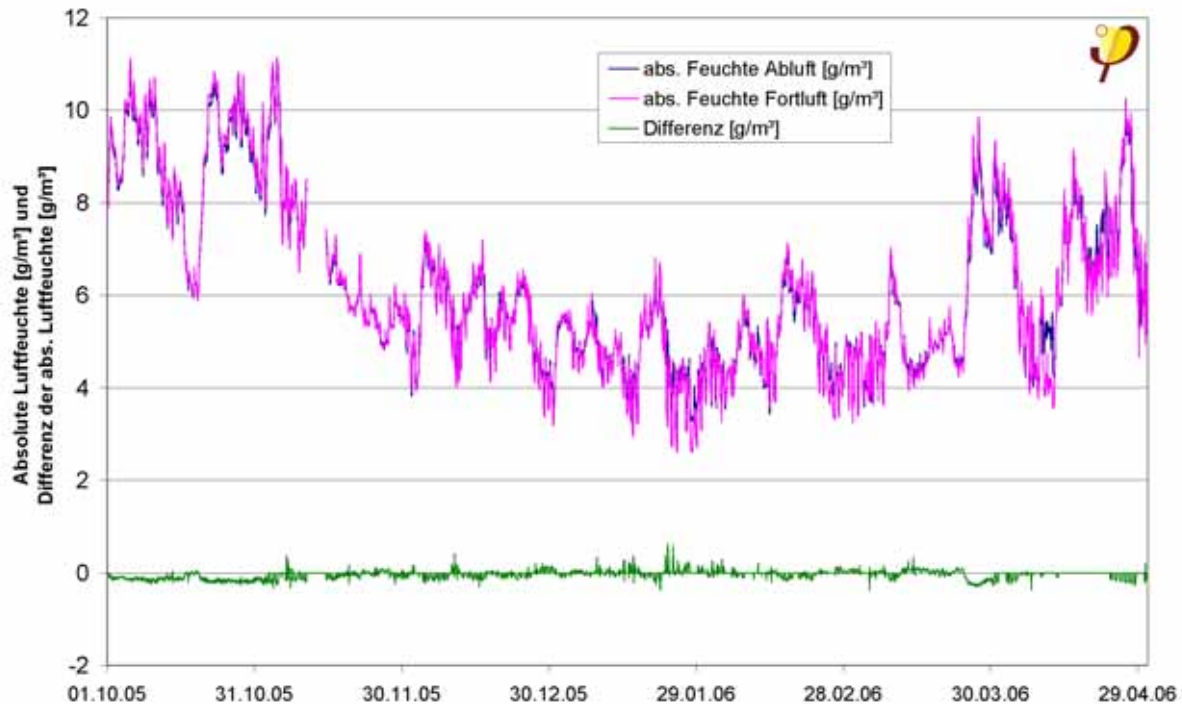


Abbildung 57: Absolute Feuchten der Ab- und Fortluft sowie deren Differenz in der Heizperiode 2005/2006.

### 6.2.1 Energetische Bewertung

Für die Untersuchung der Wärmebereitstellungsgrade des Gerätes wurden nur vollständige Datensätze verwendet, bei denen die Außenlufttemperatur im Kanal vor dem Gerät höchstens 16 °C, die rel. Fortluftfeuchte max. 80% und der Volumenstrom mehr als 500 m<sup>3</sup>/h betragen haben. Der in der Energiebilanz des Gebäudes wirksame Wärmebereitstellungsgrad berechnet sich unter Berücksichtigung der variierenden Luftströme zu  $\eta = \frac{Q_{ohneWRG} - Q_{mitWRG}}{Q_{ohneWRG}}$  mit

$$\eta = \frac{Q_{ohneWRG} - Q_{mitWRG}}{Q_{ohneWRG}} \text{ mit}$$

$$Q_{ohneWRG} = \int (m_p \cdot c_p \cdot (T_{Abluft} - T_{Außenluft})) dt \quad \text{und}$$

$$Q_{mitWRG} = \int (m_p \cdot c_p \cdot (T_{Fortluft} - T_{Außenluft}) - P_{el}) dt .$$

Damit ergibt sich aus den Messdaten (Stundenmittel) ein Wert von  $\eta = 84,2 \%$ , für den Kernwinter (Dezember und Januar) ist er mit  $\eta = 85,4\%$  noch etwas höher. Dieser Wert kann in der PHPP-Gebäudebilanz verwendet werden. Der als gut zu bewertende Messwert für den gesamten Winter liegt etwa 5 bis 8 % unter dem nach Vorgaben des DiBT berechneten Wärmebereitstellungsgrades. Dieser wird nach der

folgenden Formel berechnet:  $\eta = \frac{T_{Zuluft} - T_{Außenluft}}{T_{Abluft} - T_{Außenluft}}$  und darf **nicht** unverändert in der Gebäudebilanz verwendet werden.

Untersucht man die Wärmebereitstellungsgrade zu den unterschiedlichen Betriebszuständen - sprich den unterschiedlichen Volumenstrombereichen - des Gerätes, so ergeben sich  $\eta$ -Werte von 77 bis 85 %. Die bzgl. ihrer Häufigkeit nicht so relevanten Volumenstrombereiche zeigen dabei die niedrigeren Wirkungsgrade. Zu 17 % der Zeit wurden Volumenströme zwischen 500 und 1000 m<sup>3</sup>/h gefördert. Für diese zeigt sich mit  $\eta = 77$  % der niedrigste Wert. Bei geringen Volumenströmen ist die thermische Effizienz der Anlage deutlich geringer.

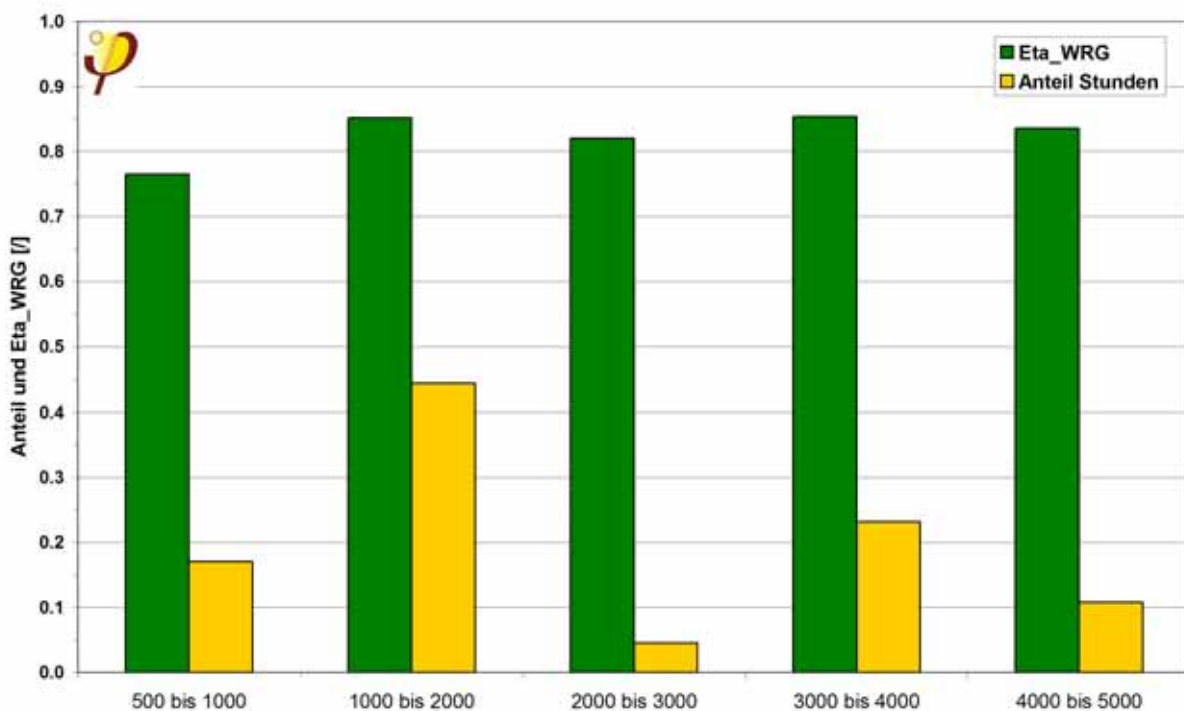


Abbildung 58: Häufigkeit der Volumenstrom-Bereiche vom Lüftungsgerät „Schule 1“ und die in diesen Bereichen wirksamen Wärmebereitstellungsgrade ( $\eta$ -Werte).

Die Wärmebereitstellungsgrade der unterschiedlichen Monate zeigen in Abbildung 59 - wie zu erwarten war - eine klare Abhängigkeit von der monatsmittleren Außentemperatur (gemessen am Eintritt des Außenluftstroms vom Gerät): In den kälteren Monaten des Winters werden höhere Wärmebereitstellungsgrade erzielt. Mit abnehmender Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager sinkt auch die übertragene Wärmemenge aber auch der Lüftungswärmeverlust ohne WRG. Daher ist die relativ große Veränderung des Wärmebereitstellungsgrades von ca. 3 Prozentpunkten überraschend.

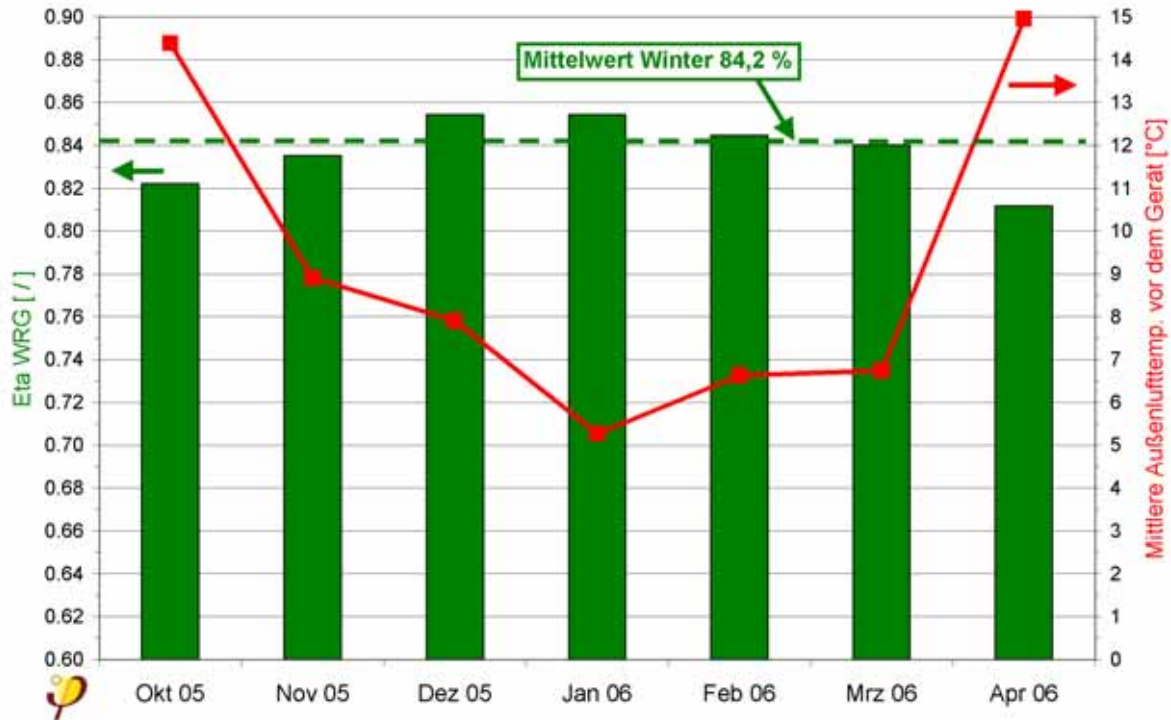


Abbildung 59: Darstellung der Wärmebereitstellungsgrade der Lüftungsanlage „Schule 1“ in den unterschiedlichen Wintermonaten und der jeweiligen mittleren Temperatur der Außenluft kurz vor dem Eintritt in das Lüftungsgerät. Achtung: Der Nullpunkt der Ordinate für den Wärmebereitstellungsgrad ist mit unterdrücktem Nullpunkt dargestellt.

### 6.2.1.1 Zulufterwärmung bei Defrosterschaltbetrieb

Um den Wärmeübertrager des Lüftungsgerätes an kalten Tagen im Bedarfsfall abtauen zu können ohne den Zuluftvolumenstrom zu unterbrechen, verfügt das Gerät über eine besondere Betriebsweise. Würde zum Defrosten zeitweise der Außenluftvolumenstrom unterbrochen werden, ergäbe sich eine unerwünschte Disbalance zwischen dem Außen- und dem Fortluftvolumenstrom (Infiltration über die Gebäudehülle und kein ausreichender Außenluftvolumenstrom). Daher wird unter Beibehaltung der Außenluftmenge die Bypassklappe zur Umgehung des Wärmeübertragers (normalerweise für den Sommerbetrieb) teilgeöffnet und ein Teilvolumenstrom strömt direkt in den Zuluftkanal (siehe Abbildung 60). Die Ab-/Fortluftseite kann dann den Übertrager in kurzer Zeit wieder abtauen. Damit bei dieser kurzzeitigen Betriebsweise nicht zu kalte Zuluft in die Räume strömt, ist ein hydraulisches Nachheizregister (Leistung 35 KW) im Gerät montiert. Dieses erwärmt die Zuluft, wenn die Grenze von 10 °C unterschritten wird.

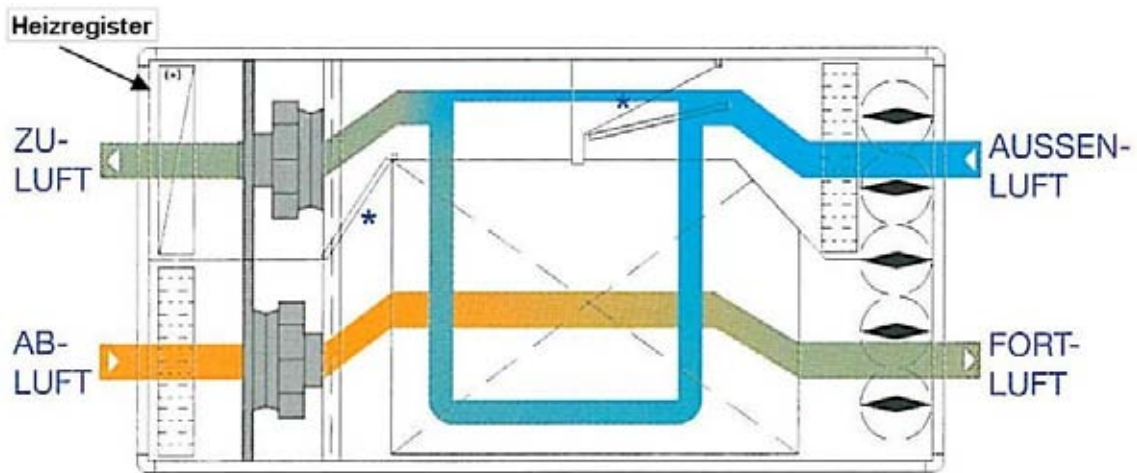


Abbildung 60: Prinzipskizze Lüftungsgerät „Trisolair“ im Betriebsfall „Abtastung Wärmeübertrager“ mit teilgeöffneter Bypassklappe (Quelle: Menerga, ergänzt).

Der Heizenergieverbrauch dieses Vorheizregisters vom Gerät „Schule 1“ wird über einen Wärmemengenzähler gesondert gemessen. In der hier näher untersuchten Heizperiode (1.10.2005 bis 30.4.2006) betrug der Heizenergieverbrauch **180,1 kWh**. Der von diesem Gerät be- und entlüftete Teil der Energiebezugsfläche beträgt **1829 m<sup>2</sup>**, woraus sich ein spezifischer Verbrauchswert für die Luftheritzung bei Defrosterbetrieb von knapp **0,1 kWh/m<sup>2</sup>** ergibt. Bei der Untersuchung der gesamten Heizenergieverbräuche der Schule sind die Verbräuche durch die Vorheizregister der Lüftungsanlagen bereits berücksichtigt.

Abbildung 61 zeigt, dass auch in den wärmeren Monaten wie Oktober und Mai geringe Heizwärmeverbräuche des Heizregisters gemessen wurden. In diesen Zeiten ist kein Defrosterbetrieb notwendig gewesen. Die Ursache liegt in der Umgehung der WRG als „Sommerbetrieb“-Schaltung, also zur „Kühlung“ des Gebäudes. Wenn die Abluft aus den Räumen zu warm ist wird der Bypass zur Umgehung der WRG aufgefahren. Wenn in einem solchem Fall die Zulufttemperatur weniger als 10 °C beträgt, öffnet das Ventil vom Nachheizregister um einen optimalen Komfort zu garantieren. Kurz danach wird der Bypass wieder geschlossen (Telefonische Auskunft Fa. Menerga vom 23.05.2007). Wünschenswert wäre hier eine schnellere Reaktion der Bypassklappe, damit das Heizregister nicht angefordert wird. Im Sommer und in der Übergangszeit sollte diese Funktion daher generell deaktiviert werden.

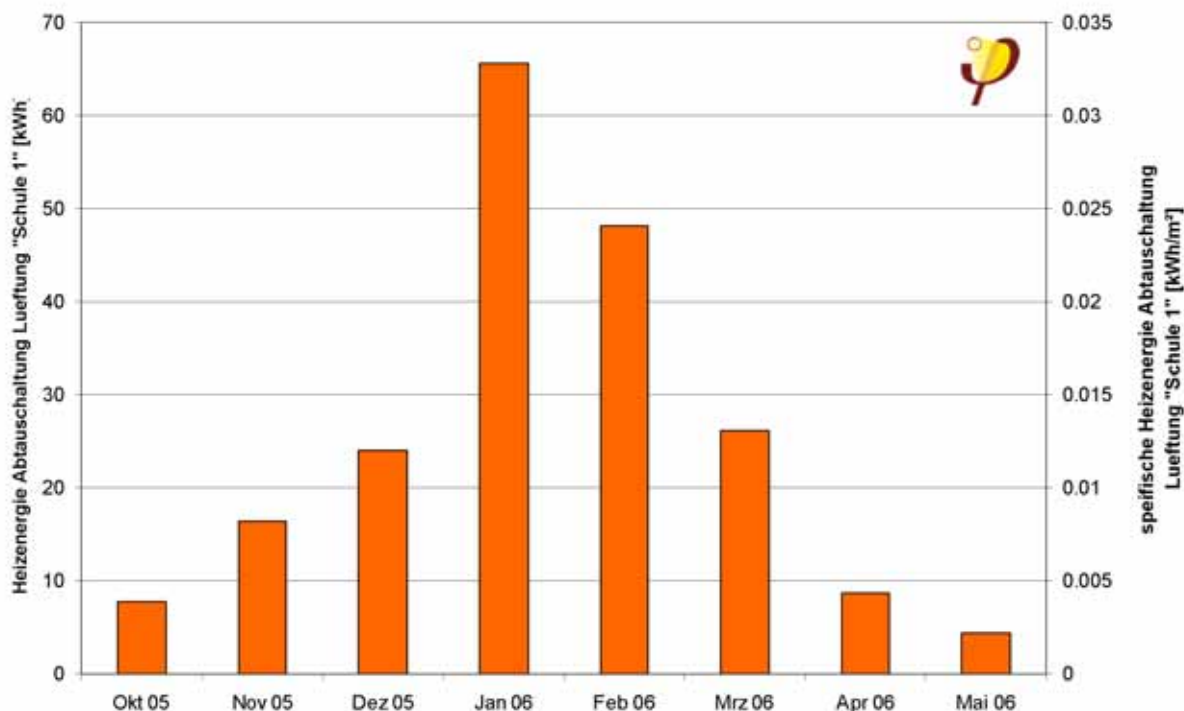
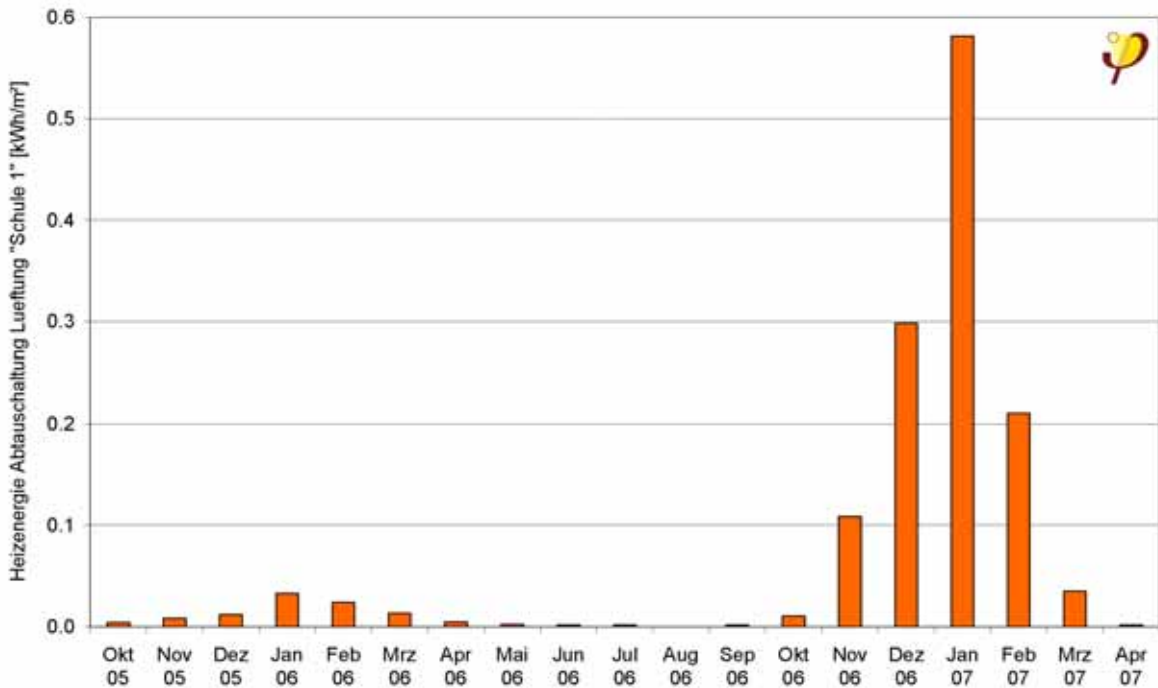


Abbildung 61: Absoluter und Spezifischer Heizwärmeverbrauch für die Zuluftnacherwärmung bei Defrosterbetrieb des Lüftungsgerätes „Schule 1“.

In den kalten Wintermonaten hatte es von Lehrkräften vereinzelte Klagen über zu kühl eingeblasene Zuluft gegeben. Daher wurde vor der Heizperiode 2006/2007 die Ansteuerung des Heizregister verändert, um es zusätzlich zur Anhebung des Temperaturniveaus der Zuluft („Mindesteinblastemperatur“) einzusetzen. Die bei dieser erhöhten Einstellung verbrauchte Wärmemenge hat sich in dem Zeitraum Oktober 2006 bis April 2007 auf 2279 kWh, bzw. spezifisch auf 1,2 kWh/m<sup>2</sup> erhöht (vgl. Abbildung 62). Für das Gebäude macht diese Veränderung in der Gesamtwärmebilanz bei gleicher Temperaturanforderung keinen nennenswerten Unterschied. Es handelt sich nur um das Einbringen der notwendigen Heizwärme an anderer Stelle.



**Abbildung 62: Spezifischer Heizwärmeverbrauch für die Zuluftnacherwärmung beim Lüftungsgerätes „Schule 1“ bei Defrosterbetrieb und zusätzlich ab der Heizperiode 2006/2007 zur Sicherstellung einer Mindest-Zulufttemperatur.**

Ab etwa Sommer 2006 wurde aufgrund der VDI-Richtlinie 6022 zur Filterhygiene (rel. Luftfeuchtigkeit vor dem Filter darf nicht länger als drei Tage 80% betragen) alle 70 bzw. 72 Stunden für 15 Minuten mit dem Vorheizregister Zuluft erwärmt und über einen gesonderten Bypasskanal in die Außenluftansaugung vor dem Gerät eingeblasen. Dadurch entstand ebenfalls ein geringer zusätzlicher Energieverbrauch des Vorheizregisters.

### 6.2.1.2 Wärmeverlust durch Außen- und Fortluftluftkanal

Bereits in der Entwurfsphase des Gebäudes wurden unterschiedliche Varianten der Kanalführung der kalten Außen- und Fortluftleitungen diskutiert. Die Wärme, die an die Fortluftkanäle abgegeben wird, geht dem Gebäude vollständig verloren. Die an die Außenluftkanäle abgegebene Wärme wird weitgehend „zurückgewonnen“. Die ursprüngliche Variante von ca. 2 x 30 m ungedämmten Leitung wurde schnell verworfen. Simulationsrechnungen zeigten, dass die entstehenden Wärmeverluste extrem groß gewesen wären. Der Gesamt-Wärmebereitstellungsgrad hätte sich so drastisch reduziert, dass die gesamte Wärmerückgewinnung fraglich gewesen wäre. (vergl. dazu [Schnieders 2006]).

Ausgeführt wurde eine Variante mit 2 x 23,9 m Außen- und Fortluftrohr mit umlaufend 100 mm Dämmung. Die Außenluft wird auf dem Dach (über dem 1. OG) angesogen, der Fortluftausblasbereich ist im 1. OG auf der Nord-Ost Fassade. Der Außenluftkanal hat im vertikalen Bereich die Abmessungen 600 x 1450 mm (Länge = 14,2 m), im horizontalen von 1000 x 1000 mm (Länge = 9,7 m).



Durch Messungen und Berechnungen wurde der Wärmeverlust der Leitungen abgeschätzt. Es wurden die Temperaturdifferenz der gemessenen Außentemperatur (Messung mit Datenlogger auf dem Dach der Schule) gegenüber der Temperatur der angesaugten Außenluft kurz vor dem am weitest entfernten Gerät „Schule 1“ ausgewertet. Dabei wurden nur Zeiträume berücksichtigt mit Volumenströmen des Gerätes „Schule 1“ größer 1000 m<sup>3</sup>/h.

Die Wärmeaufnahme der Luft im Kanal hängt ab vom Volumenstrom, bzw. der Luftgeschwindigkeit im Kanal. Der Einfluss der anderen Geräte kann hier aufgrund der fehlenden Volumenstromdaten dieser Geräte nicht berücksichtigt werden. Mit der gemessenen Temperatur vor dem Gerät gegenüber der Außenlufttemperatur können aber Aussagen über das einzelne Gerät gemacht werden.

Im untersuchten Winterzeitraum (15.2.2007 16:00 bis 17.03.2007 22:00) ergibt sich folgende Wärmeaufnahme aus dem Gebäude durch die angesaugte Außenluft:

**Tabelle 10: Wärmeabgabe an die Außenluft im gedämmten Außenluftkanal.**

	<b>mittlerer Volumenstrom [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>mittlere Temperatur- differenz [K]</b>	<b>mittlere Leistungs- aufnahme [W]</b>
<b>Zeitraum</b> (15.2.07 16:00 bis 17.3.07 22:00)	3045	1.7	<b>1759</b>

Die Wärmeübergabe an die kalte Luft im Kanal ist vermutlich durch stellenweise geringere Dämmstärken und Wärmebrückeneffekte höher als in der Planung angenommen. Werden die für den Außenluftkanal berechneten Werte vereinfacht auch für den Fortluftkanal angesetzt reduziert sich der effektive Wärmebereitstellungsgrad des Lüftungsgerätes deutlich: Die aus den Messdaten berechneten  $\eta=84\%$  reduzieren sich auf **effektive  $\eta_{\text{eff}} = 74\%$**  also um rund 10 Prozentpunkte! Damit wird der Einfluss der Dämmungsqualität der kalten Lüftungsleitungen im Gebäude deutlich. Hier sollte ein noch größeres Augenmerk auf Planung und Realisierung gelegt werden. Kurze, sehr gut gedämmte Kanäle sind eine zwingende Voraussetzung für die effiziente Lüftungstechnik.

### 6.2.1.3 Stromeffizienz

Die Stromeffizienz der Lüftungsanlagen ist ein wesentliches Kriterium für das energetische Konzept insbesondere von Schulgebäuden, da hier im Vergleich zum Wohnungsbau deutlich höhere Volumenströme benötigt werden. Werden hier nicht enge Grenzen eingehalten, können durch die Anlagen exergetisch hochwertige hohe elektrische Verbräuche entstehen und der Primärenergieaufwand stark ansteigen. Bereits in der frühen Planung muss daher ein geringer Stromverbrauch der Lüftungsanlagen angestrebt werden.

Der durch die Anlage zu überwindende Druckverlust setzt sich zusammen aus dem Druckverlust des Gerätes (Wärmeübertrager, Filter, Nachheizregister) und dem des Leitungsnetzes mit allen Einbauten (Volumenstromregler, Brandschutzklappen, etc.). Zur Beurteilung der Stromeffizienz werden die gesamten Stromverbräuche in dem näher untersuchten Zeitraum (7 Monate) aufsummiert und durch die im gleichen Zeitraum insgesamt transportierte Zuluftmenge geteilt.

Das Stromeffizienzkriterium wird bei der Anlage im Winter 2005/2006 mit **0,43 Wh/m<sup>3</sup>** eingehalten (Vorgabe Ausschreibung: max. 0,45 Wh/m<sup>3</sup>). Damit zeigt sich, dass die vorab geforderten und vom Planer berechneten Werte eingehalten wurden. Die Anlage erfüllt die Anforderungen an eine energieeffiziente Lüftungsanlage für Passivhäuser. Diese ehrgeizige Anforderungen einzuhalten war bei diesem Projekt eine besondere Herausforderung, da nach der eigentlichen Planung des Leitungsnetzes eine geänderte Anforderung an den Brandschutz die Nachrüstung einer großen Zahl von Brandschutzklappen erforderte. Diese verursachten einen weiteren nennenswerten Druckverlust des Gesamtnetzes, was weitere Optimierungen notwendig machte.

Werden die elektrischen Leistungen des Lüftungsgerätes über den Volumenströmen aufgetragen (gleitende Mittelwerte) ergibt sich Abbildung 63: Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge - maßgeblich durch die Druckverluste im Rohrnetz - ist zu erwarten, dass die elektrische Antriebsleistung vereinfacht nach der Formel  $P_{el} = k \times Vp^3$  gegenüber dem Volumenstrom in der dritten Potenz anwächst. Dies würde einen überproportionalen Zuwachs der elektrischen Leistung erwarten lassen, welcher allerdings nicht zu erkennen ist. Es zeigt sich ein nahezu konstanter Zuwachs (linear) der elektrischen Leistung bei zunehmendem Volumenstrom, was zunächst verwundert.

Wird die Stromeffizienz über dem Volumenstrom dargestellt (Abbildung 64) zeichnet sich ein nahezu waagerechter Verlauf ab: Es ist damit nicht effizienter mit dem Gerät bei dem bestehenden Netz kleinere Luftmengen zu transportieren. Die Ursache für dieses „Verhalten“ liegt in der Betriebsweise der Anlage begründet: Die Anlage wird mit einer Konstantdruckregelung befahren, das Gerät hält bei Betrieb immer den gleichen Vordruck im Zuluftstrang aufrecht. Dies ist notwendig, da raumweise mit Konstantvolumenstromreglern gearbeitet wird, die für ihre Funktion einen ausreichenden Vordruck benötigen.

Damit ist die Möglichkeit der weiteren Effizienzsteigerung durch die Fahrweise von zeitweise kleineren Volumenströmen (Abschalten einzelner Klassenräume) bei dieser Anlage so nicht gegeben. Die geringeren Volumenströme führen nicht zu spezifisch niedrigeren Stromverbräuchen. Dies ließe sich durch eine intelligente Regelung deutlich verbessern, allerdings wären hierzu Erweiterungen in der Steuerung (MSR) notwendig.

Die energetische Arbeitszahl (COP) der Anlage setzt die zurückgewonnene Energie mit dem eingesetzten Strom ins Verhältnis. Aus den Daten ergibt sich für die Heizzeit ein COP von 8,9 (entsprechend der Aufwandszahl 0,11). Das bedeutet, dass für jede eingesetzte Kilowattstunde Strom 8,9 kWh Wärme zurückgewonnen werden. Auch





bei Berücksichtigung des Herstellungsaufwandes (Primärenergieansatz) von 2,7 kWh/kWh für Strom ergibt sich die gute primärenergetische Arbeitszahl von 3,3. Diese könnte insbesondere durch die Verringerung der Stand-by Stromverbräuche der Anlage noch weiter verbessert werden.

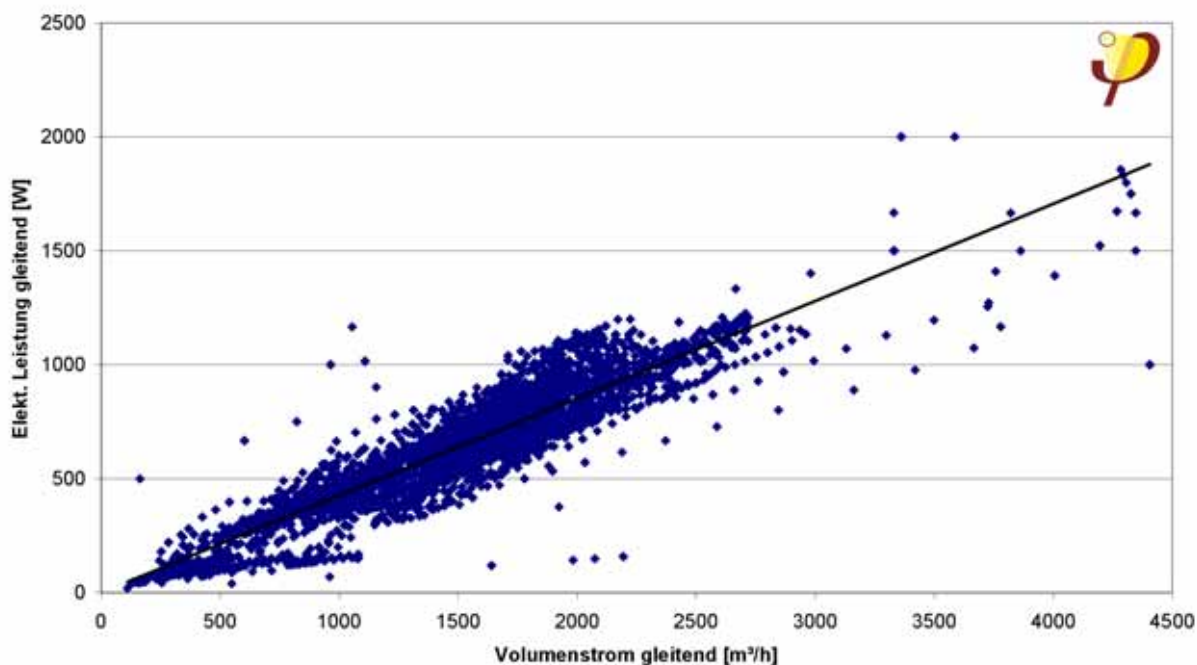


Abbildung 63: Elektrische Leistung des Lüftungsgerätes „Schule 1“ über dem Volumenstrom in der Zeit vom 1. Oktober 2005 bis 30. April 2006 (gleitende Mittelwerte).

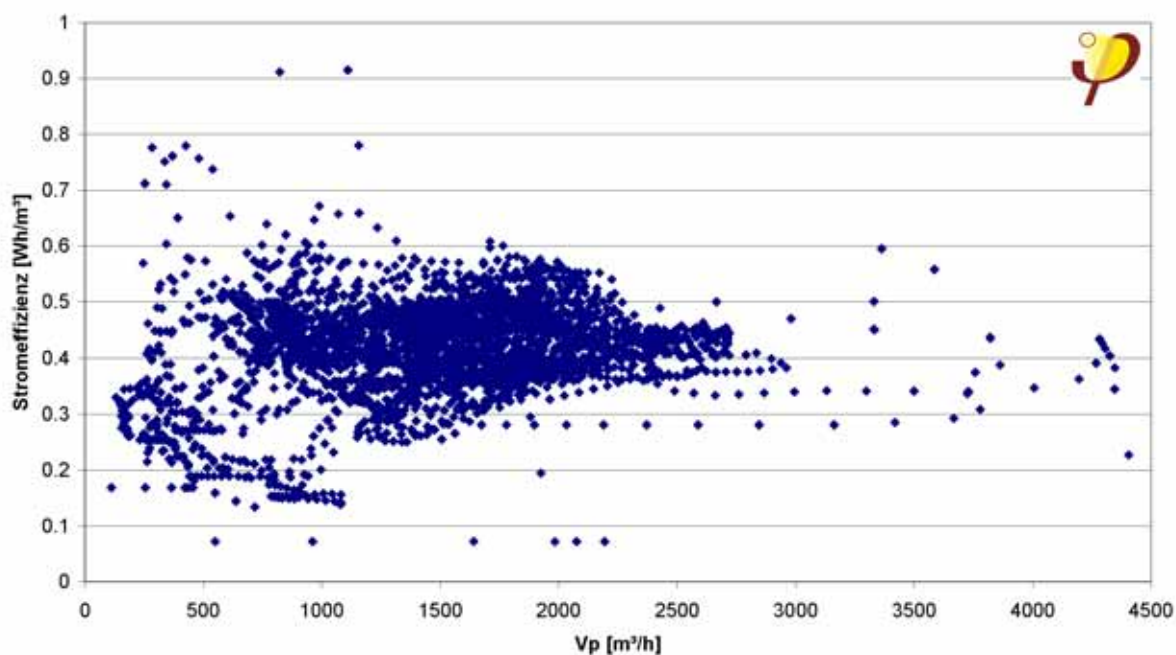


Abbildung 64: Stromeffizienz über dem Volumenstrom vom Lüftungsgerät „Schule 1“ in der Zeit vom 1. Okt. 2005 bis 30. April 2006 (gleitende Mittelwerte).

#### 6.2.1.4 Andere Lüftungsgeräte im Gebäude

Bisher wurden hier nur die Ergebnisse für die näher untersuchte Lüftungsanlage „Schule 1“ untersucht und dargestellt. Der Stromverbrauch der anderen Lüftungsgeräte wurde in der GLT ebenfalls etwa ab April 2005 auswertbar aufgezeichnet. Um einen Überblick über die anderen Geräte zu bekommen, werden die Stromverbräuche aller Geräte im Vergleich dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Geräte für ganz unterschiedliche Nennvolumenströme ausgelegt sind (vgl. Tabelle 8) und Räume mit ganz unterschiedlicher Nutzung - sprich unterschiedlichen Zeitprogrammen - betrieben werden. Nicht immer kann von einer ungestörten, beabsichtigten Betriebsweise gesprochen werden: Zum Teil wurden z.B. Ferienzeiten sinnvoll durch Abschaltung oder Laufzeit-Reduzierung der Anlagen berücksichtigt, zum Teil liefen die Anlagen in den Ferien aber ungewollt einfach weiter.

Bei den sechs Geräten handelt es sich um unterschiedliche Gerätetypen:

**Tabelle 11: Übersicht Lüftungsgeräte**

Anlagen	Hersteller/Typ	Prinzip
Schule 1 und 2 und KiTa	Menerga/Trisolair	Plattenwärmeübertrager (3 fach)
Kantine/Mehrzweckraum	Menerga/Resolair	Wärmerad (mit Feuchterückgewinnung)
Küche und Turnhalle	Menerga/Adsolair	Plattenwärmeübertrager, mit adiabater Kühlung

Die Summen der Monatsverbräuche der sechs Geräte ergeben sich aus den beiden folgenden Grafiken Abbildung 65 und Abbildung 66. Eine Übersicht über die Monatsmittelwerte und Summen der Stromverbräuche in unterschiedlichen Zeiträumen ist in Tabelle 12 dargestellt.

Der Unterschied zwischen Sommerbetrieb (Betrieb nur der Abluftventilatoren) gegenüber dem Winterbetrieb ist in den Verbrauchswerten zum einen von April bis September 2005 und zum anderen von Oktober 2005 bis März 2006 bei allen drei Geräten erkennbar. Auffällig ist insbesondere im Dezember 2006 der niedrige Verbrauch vom Gerät „Schule 2“ und der extrem hohe Verbrauch bei dem Gerät „Schule 1“. Die Ursache ist der Ausfall der GLT am 20.11.2006 nach einer Brandschutzübung. Das Gerät „Schule 2“ war danach ausgefallen, die Geräte „Schule 1“ und „KiTa“ liefen auf hoher Leistungsstufe dauerhaft („Schule 1“ vom 24.11. bis 14.12.2006 mit dauerhaft fast 4000 m<sup>3</sup>/h). Andere Störungen haben sich nicht in diesem Umfang auf die Stromverbräuche ausgewirkt.

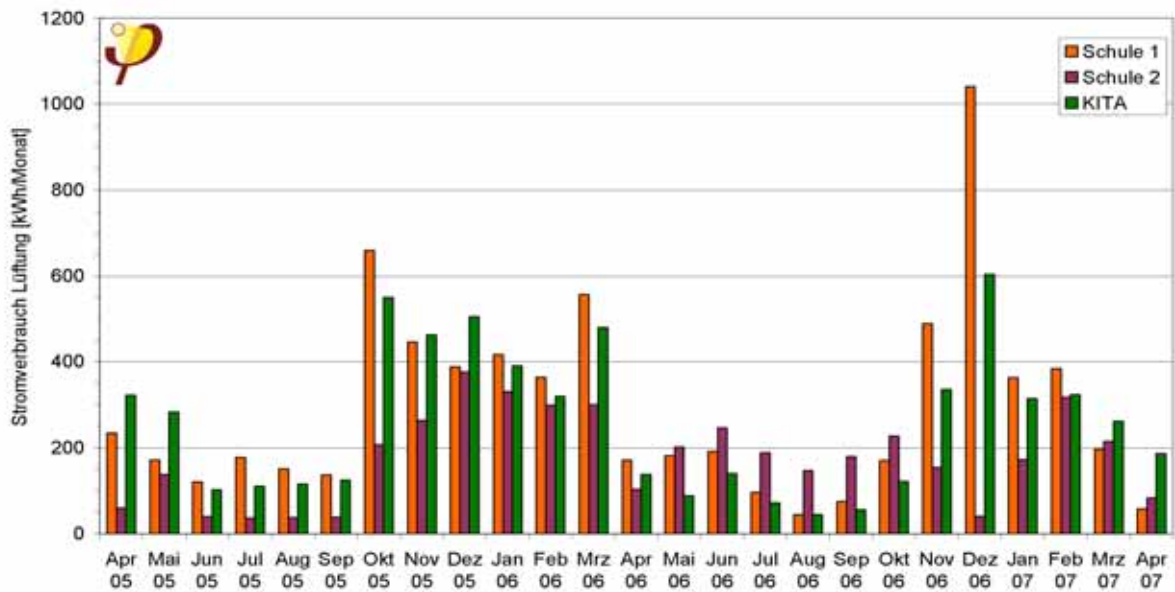


Abbildung 65: Monatliche Stromverbräuche der Lüftungsgeräte Schule 1, Schule 2 und KiTa.

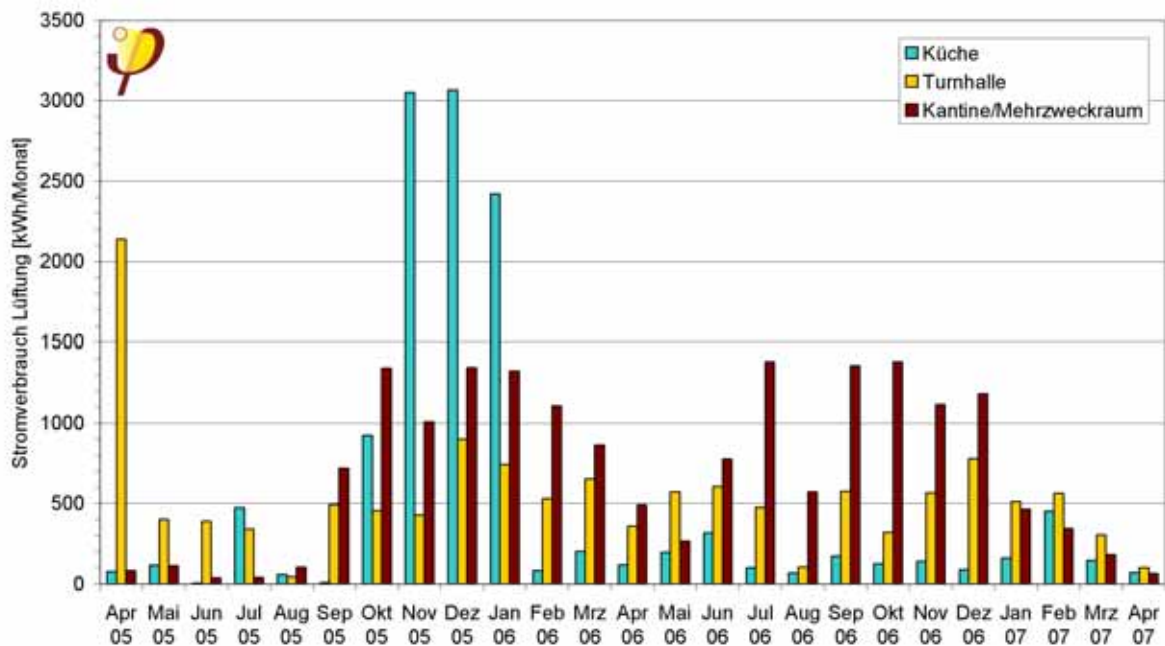


Abbildung 66: Monatliche Stromverbräuche der Lüftungsgeräte Küche, Turnhalle und Kantine / Mehrzweckraum.

Bei den drei Geräten in Abbildung 66 fällt zunächst das insgesamt höhere Verbrauchsniveau auf. Dabei ist nur der Nennvolumenstrom des Gerätes „Küche“ - bedingt durch die Nutzungsart - mit 6440 m<sup>3</sup>/h besonders groß (vergleiche Tabelle 8). Zum Teil wurden die Geräte - meist wohl ungewollt - im Dauerbetrieb auf hoher Stufe betrieben. In der (bis heute unbenutzten!) Küche führte eine fehlende Dichtung o.ä. eines Bodenablaufs zu Geruchsbelastungen. Daher wurde die Anlage im



Oktober 2005 bis zum 07.02.2006 mit erhöhtem Volumenstrom und langen Laufzeiten betrieben. Alarmiert durch die hohen Verbrauchswerte (Strom und Wärme, da hier mit Luftvorerwärmung und ohne Heizkörper gearbeitet wird) hat das PHI auf den Sachverhalt hingewiesen, sodass dieser abgestellt werden konnte.

Die Anlage „Kantine/Mehrzweckraum“ versorgt einen vergleichsweise kleinen Teil des Gebäudes, der auch nur sehr wenig genutzt wird. In dem Mehrzweckraum finden nur unregelmäßig Sonderveranstaltungen statt, in der Kantine werden von einer Gruppe Schülern zur Mittagszeit gelieferte Speisen verzehrt. Hier fallen die für diese Nutzung sehr hohen Stromverbräuche auf, welche durch regelmäßig viel zu lange Laufzeiten verursacht wurden. Zusätzlich gab es technische Defekte: So hat z.B. der besonders hohe Wert im Juli 2006 seine Ursache in einer Störung der GLT, welche zum Dauerbetrieb des Gerätes auf der Leistungsstufe zur Zeit des Ausfalls führte. Erst im Januar bzw. März 2007 wurde mit dem neuen Schulhausverwalter und der GLT-Firma die Regelung von den Räumen geklärt und die Zeiten wurden drastisch reduziert.

Die Verbräuche aller sechs Geräte zu Beginn 2007 zeigen die Optimierungsanstrengungen des Schulhausverwalters und der GLT Firma und lassen zukünftig niedrigere Verbräuche bei gezielten Laufzeiten erwarten.

**Tabelle 12: Mittelwert und Summen der Stromverbräuche der unterschiedlichen Lüftungsgeräte in unterschiedlichen Zeiträumen (Als Heizperiode wird der Zeitraum 01.10. bis 30.04. ausgewertet).**

[kWh]	Schule 1	Schule 2	KITA	Küche	Turnhalle	Kantine / Mehrzweckraum
<b>Monats-Mittelwerte</b> (April 05 bis April 07)	291,2	175,8	257,8	506,0	534,9	707,0
<b>Summen</b>						
Mai 05 bis Apr 06	3757	2167	3579	10523	5747	8506
Mai 06 bis Apr 07	3289	2169	2544	2049	5486	9086
Heizperiode 05/06	3002	1879	2844	9864	4073	7485
Heizperiode 06/07	2701	1208	2145	1190	3150	4731

Setzt man die sparsamere angepasste Betriebsweise der Geräte von Januar bis April 2007 voraus und rechnet diese auf 12 Monate hoch, liegt man auf der sicheren Seite. Es handelt sich um vier „Wintermonate“, die Sommerzeiten mit reduzierten Verbräuchen durch den reinen Abluftbetrieb sind nicht enthalten. Voraussetzung ist eine ähnliche Nutzung (in der Küche bisher kein Betrieb!). Es ergeben sich die in der folgenden Tabelle genannten hochgerechneten reduzierten Jahresverbräuche der sechs Lüftungsanlagen:



**Tabelle 13: Hochgerechnete reduzierte Jahresstromverbräuche der sechs Lüftungsanlagen (Grundlage: Gemessene Verbräuche von Januar bis April 2007).**

[kWh]	Schule 1	Schule2	KiTa	Küche	Sport- halle	Kantine / Mehr- zweckraum
Hochrechnung reduzierter Jahresverbrauch	3000	2360	3260	2505	4450	3160

### 6.3 Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser

Der Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser wird für das gesamte Gebäude durch die beiden Pelletkessel mit jeweils 60 KW Leistung gedeckt. Zur Bewertung der Verbräuche werden die Bereiche Heizung und Warmwasser getrennt dargestellt.

Zur Berechnung der spezifischen Verbräuche wurden folgende Teilflächen der Energiebezugsflächen verwendet:

**Tabelle 14: Energiebezugsflächen für die Bewertung der Wärmeverbräuche**

	Energiebezugsfläche [m <sup>2</sup> ]
Schule (ohne Küche)	4238
Küche	108
KiTa	1195
Turnhalle (TH)	1429
Teilbereich der Schule, der vom Lüftungsgerät „Schule 1“ versorgt wird	1829
Gesamtgebäude (Schule, KiTa und Küche <u>ohne</u> TH)	5541

In der gesamten Untersuchung wird die Energiebezugsfläche (EBF = 5541 m<sup>2</sup>) des Gebäudes (bzw. entsprechend Teilflächen dieser) zugrunde gelegt. Die nach EnEV bestimmte Fläche  $A_N$  ist mit 9037 m<sup>2</sup> um 63 % deutlich größer. Diese wird hier nicht verwendet.

Die Messdaten zu den Wärmeverbräuche liegen - bedingt durch die späte Montage der Wärmezähler und der Schnittstellen zur GLT - belastbar ab Oktober 2005 vor. Da die Personenbelegung des Gebäudes einen direkten Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch hat, werden hier zunächst die Daten dazu vorangestellt.

### 6.3.1 Belegungszahlen und Personenwärme

Die Belegung der Schule wirkt sich direkt auf den Heizwärmeverbrauch aus, da die Personen bei der hohen Belegungsdichte in einem Klassenraum hohe innere Wärmequellen darstellen. Wie oben erwähnt wurde die Schule als Ganztagschule für 423 SchülerInnen geplant (Vollbelegung). Die Schule startete im November 2004 mit einer Teilbelegung des Gebäudes. Im Bereich der eigentlichen Grundschule waren dies zunächst nur vier erste Klassen und die Verwaltung im Erdgeschoss. Zusätzlich wurden Räume an „Fremdnutzer“ vermietet. Dieses sind die „Hessenagentur“, eine ev. Kirchengemeinde und später eine Förderschule. Die Nutzungszeiten der „Fremdnutzer“ sind zum Teil deutlich abweichend von der typischen Schulnutzung (Hessenagentur und Kirche zum Teil ganztags und am Wochenende).

Durch die Befragung aller Nutzergruppen konnte für die drei Schuljahreszeiträume die Belegung der Räume festgestellt werden. Aus den Personenzahlen und Anwesenheitszeiten wurden die Personen-Nutzungsstunden berechnet und auf den Zeitraum der „Kern- Nutzungszeit“ des Gebäudeteils bezogen (Schule 5 Stunden pro Werktag, KiTa 9 Stunden pro Werktag). Dies ist notwendig, da einige Nutzer eine von der schüler-typischen Anwesenheit deutlich abweichende Aufenthaltszeit im Gebäude haben (z.B. Sekretariat oder Schulhausverwalter). Dabei wurden auch Sondernutzungen am Wochenende etc. berücksichtigt. Diese Zahlen dienen zum Vergleich mit der ursprünglichen Planungszahl der Ganztagschule (423 Schüler) sowie zur Bestimmung der internen Wärmequellen.

Berücksichtigt für den Wärmeeintrag durch Personen wurden 60 Watt für ein Kind und 100 Watt für einen Erwachsenen. Der Wärmeeintrag wird als „Dauerleistung“ (365 Tage/ Jahr) unter Berücksichtigung (Minderung) der jährlichen Ferienzeiten angegeben.

**Tabelle 15: Personenbelegung und Wärmeabgabe durch die Personenbelegung**

Schuljahr	Personen (Halbtags) )	Personen (Ganztags) )	Wärmeeintrag durch Personen [W/m <sup>2</sup> ] **)	Wärmeeintrag durch Personen [W/m <sup>2</sup> ] **)
	Schule	KiTa	Schule	KiTa
<b>2004/2005</b>	166	40	0,25	0,58
<b>2005/2006</b>	234	86	0,46	1,38
<b>2006/2007</b>	292	88	0,58	1,38

\*) Ganztagsnutzer auf Halbtagsnutzung umgerechnet (5 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche).

\*\*) Personennutzung auf Ganztagsnutzung umgerechnet (9 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche).

\*\*\*) Wärmeabgabe durch Personen als dauerhafte Leistung (365 Tage/Jahr) berechnet (Ansatz: Kinder 60 W, Erwachsene 100 W, nach Nutzungszeit abzüglich der Ferien)



### 6.3.2 Heizwärmeverbrauch

Die Heizwärmeverbrauchswerte der unterschiedlichen Nutzungsbereiche werden getrennt mit Wärmemengenzählern erfasst. Hier werden die Bereiche KiTa, Schule, Küche und Turnhalle unterschieden (vergleiche dazu auch Abbildung 31). Betrachtet man die Monatssummen des gesamten Messzeitraumes dieser vier Bereiche „verschwinden“ die Verbrauchsmengen geradezu hinter den dominanten spezifischen Energiemengen der Küche im Oktober 2005 bis zum Januar 2006 (Abbildung 67). Hier wurde - wie im Abschnitt über die Lüftungsanlage bereits erwähnt - die Lüftungsanlage „Küche“ auf sehr lange Betriebszeiten eingestellt, um eine Geruchsbelastung durch einen unvollständigen Bodeneinlauf abzulüften.

Die Küche wird nicht mit Heizkörpern, sondern ausschließlich über ein Vorheizregister in der Zuluft (Mindestlufttemperatur) beheizt. Durch das angeforderte viel größere Lüftungsvolumen steigt daher auch direkt die notwendige Heizwärme des flächenmäßig relativ kleinen Bereichs (Energiebezugsfläche 108 m<sup>2</sup>). Aufgrund des Hinweises durch das PHI wurde dieser Zustand im Januar 2006 behoben. In den drei Monaten wurden 20.400 kWh Wärme für die Küche verbraucht. Der Durchschnitt der beiden Folgemonate Februar und März 2006 (nach der Änderung auf „normale Nutzung“) zeigt einen Durchschnittswert von ca. 300 kWh/Monat. Bei normalem Betrieb wären damit während der vier Wintermonate rund 1.200 kWh verbraucht worden. So wurden durch die „Zusatzlüftung“ thermisch rund 19.200 kWh Wärme zusätzlich verbraucht. Der Strom der Lüftung muss hier noch zusätzlich berücksichtigt werden. Besonders beachtlich ist dies, da die Küche nur zeitweise minimal genutzt wird (bisher wird das Essen angeliefert). Dies zeigt deutlich wie sinnvoll ein Monitoring zumindest der wichtigsten Verbrauchswerte eines komplexen Gebäudes ist und welche wichtige Aufgabe dem Schulhausverwalter zukommt.

Die Monatsverbräuche der Heizwärmeversorgung zeigen - wenn die beschriebene „besondere“ Nutzung in der Küche nicht berücksichtigt wird - eine typische Sommer-Winterkurve. Der höchste Monats-Einzelwert ohne die Küche wurde mit 7,6 kWh/m<sup>2</sup> in der KiTa gemessen (Januar 2006).

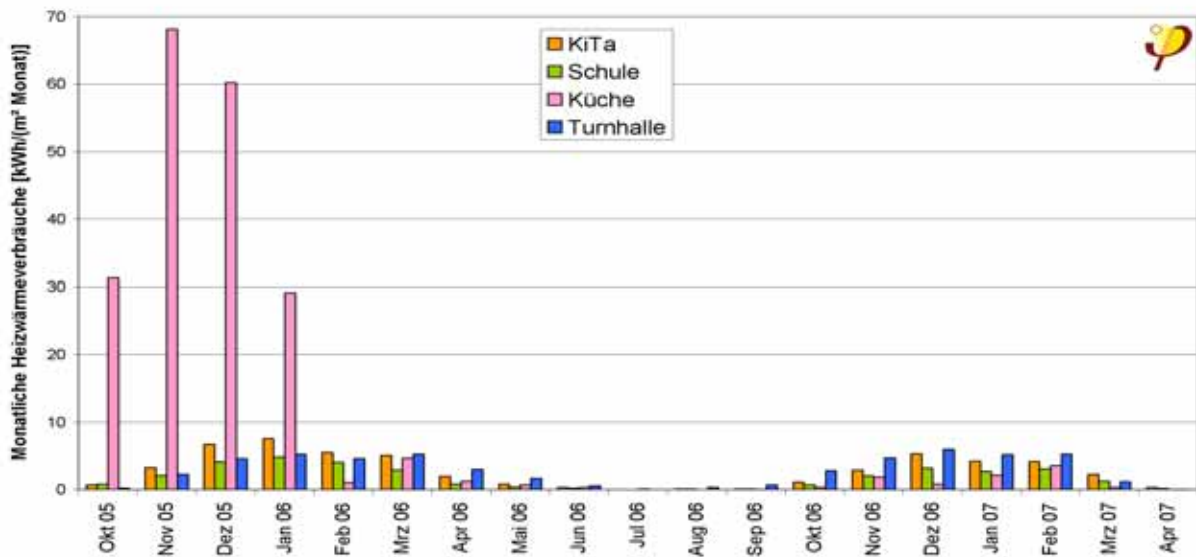


Abbildung 67: Spezifische Monatsverbräuche für Heizwärme der vier Teilbereiche Schule, Küche, KiTa und Turnhalle von Oktober 2005 bis April 2007.

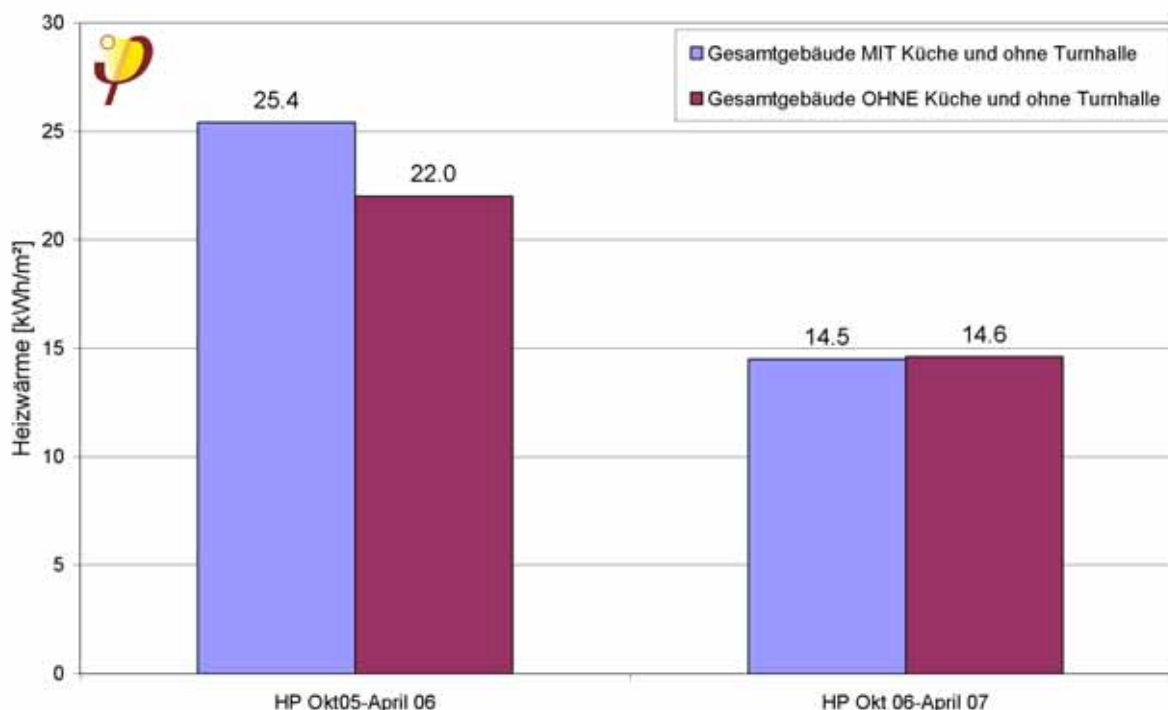
Für das Gesamtgebäude Schule/KiTa inkl. Küche (ohne die Turnhalle) ergeben sich

**gemessene Verbrauchswerte von 25,4 bzw. 14,5 kWh/m<sup>2</sup>**

in den beiden Heizperioden (Abbildung 68). Die Heizperiode 2006/2007 bot überdurchschnittlich mildes Winterklima und kann damit nicht als typische Heizperiode betrachtet werden. Im Winter 2005/2006 wurden 78 kWh/a Heizgradstunden festgestellt, im Winter 2006/2007 dagegen nur 58 kWh/a.

Der Einfluss der „Zusatzlüftungs-Verbräuche“ der Küche ist hier in der ersten Heizperiode 2005/2006 nochmals deutlich zu erkennen: Der Heizwärmeverbrauch für das Gesamtgebäude sinkt von 25,4 auf **22,0 kWh/m<sup>2</sup>** wenn die Küche nicht berücksichtigt wird.





**Abbildung 68: Heizwärmeverbrauch des Gesamtgebäudes ohne Turnhalle in der Heizperiode 2005/2006 und 2006/2007.**

Werden die KiTa und die Schule gesondert betrachtet (Schule ohne die Küche und ohne die Turnhalle) ergibt sich das folgende Bild: Im Winterzeitraum 01. Oktober 2005 bis 30. April 2006 wurde der

#### **Heizwärmeverbrauch der KiTa von 30,7 und der Schule von 19,6 kWh/m²**

gemessen. Das Schulgebäude ohne KiTa war zu dieser Zeit mit halbtags etwa 170 Personen nur sehr gering belegt (Planung für Ganztagschule 423 Personen). Damit lagen die internen Wärmequellen deutlich unterhalb der Planwerte, was den Energieverbrauch erhöhte. Die KiTa zeigt trotz der höheren Belegungsdichte deutlich höhere Verbrauchswerte. Die Belegungsdichte und die damit verbundenen Wärmeeinträge sind auch Tabelle 15 zu entnehmen.

In der danach folgenden sehr milden Heizperiode 2006/2007 sind die Verbräuche mit **20,2 (KiTa) und 13,0 kWh/m² (Schule)** deutlich gesunken. Beide Verbrauchswerte sind ziemlich gleichmäßig um 34 (KiTa) bzw. 33 % (Schule) zurückgegangen. Das milde Klima ist der Hauptgrund für den Rückgang der Heizwärmeverbräuche.

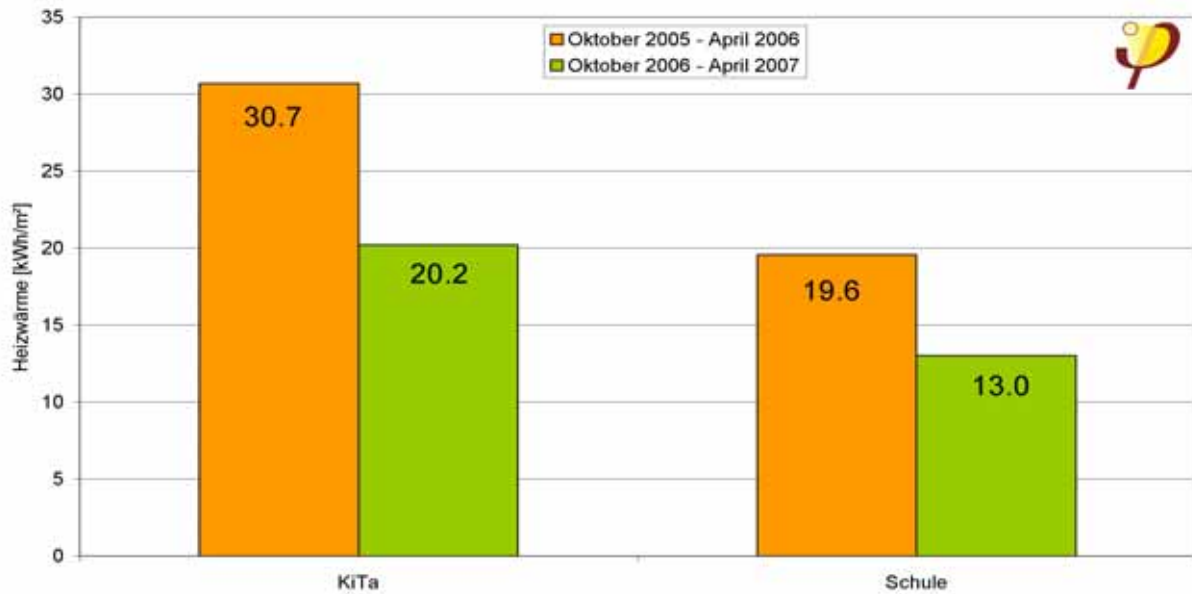


Abbildung 69: Heizwärmeverbrauch von KiTa und Schule (ohne Küche und ohne Turnhalle) in den beiden Heizperioden 2005/2006 und 2006/2007 (jeweils Oktober bis April).

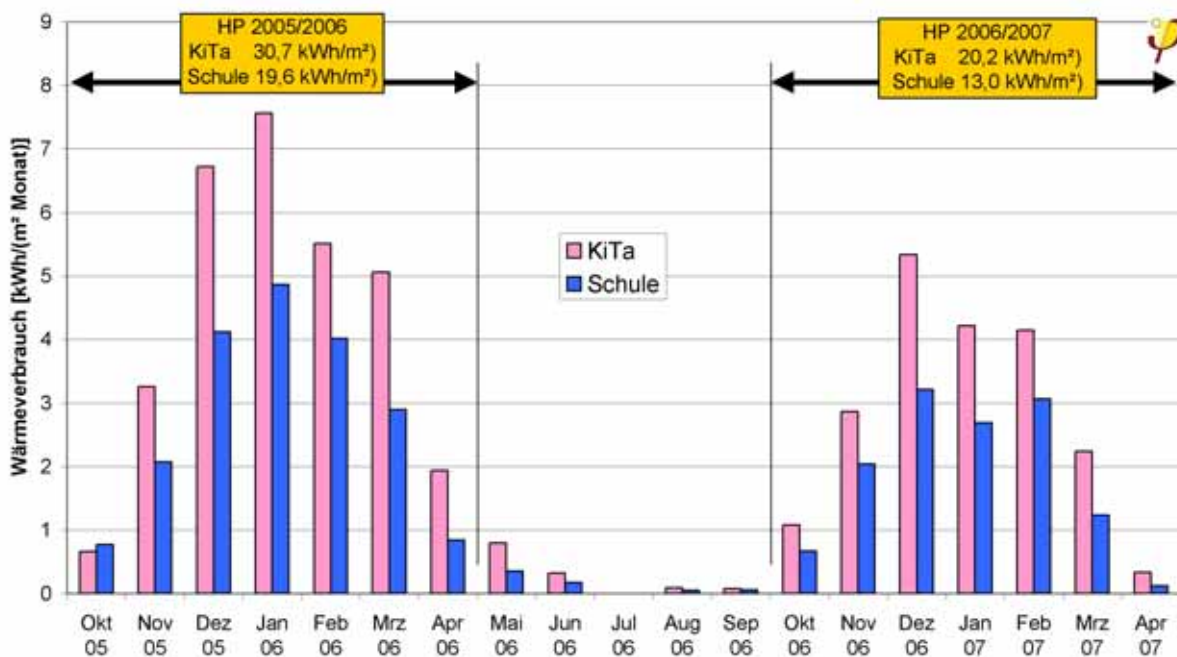


Abbildung 70: Monatliche Heizwärmeverbräuche von KiTa und Schule (ohne Küche und ohne Turnhalle) im Zeitraum Oktober 2005 bis April 2007.

Die geringen - vermutlich ungewollten regelungsbedingten - Verbräuche in der verbleibenden Übergangszeit und den Sommermonaten verändern das Ergebnis für die Gesamtjahreszeiträume nur geringfügig. Im Sommerzeitraum Mai bis September 2006 betragen diese „Sommerverbräuche“ in der Schule 0,63 und in der KiTa 1,28 kWh/m².



**Tabelle 16: Jahres-Heizwärmeverbräuche von Schule und KiTa sowie dem Gesamtgebäude (die Jahreszeiträume überschneiden sich).**

Jahres- heizwärme- verbräuche [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Schule (ohne TH)		KiTa	Gesamtgebäude (ohne TH)	
	ohne Küche	mit Küche		ohne Küche	mit Küche
Okt. 2005 bis Sep. 2006	20,2	24,6	32,0	22,8	26,2
Jan. 2006 bis Dez. 2006	19,2	19,7	30,6	21,7	22,0

In der Literatur ist als Vergleichswert für den Heizwärmeverbrauch von 177 Schulen im Bestand in [Kluttig 2001] der Wert von 230 kWh/(m<sup>2</sup> a) mit einer Standardabweichung der Stichprobe von +/- 143 kWh/(m<sup>2</sup> a) zu finden. Vergleicht man den Jahresmesswert (Okt. 2005 bis Sep. 2006) für Heizwärme der Riedbergschule (ohne Küche) inkl. der KiTa mit diesem Wert der Bestandsschulen ergibt sich eine **Heizenergie-Einsparung von 90 %**. Das ist vergleichbar mit den Einsparungen, die aus dem Wohnungsbau im Passivhausstandard bekannt sind. Auch wenn der Vergleich mit dem etwas höheren Verbrauchswert inkl. der Küche (mit der „erhöhten“ Lüftung) gezogen wird, ergibt sich mit einer Einsparung von fast 89 % nahezu der gleiche Wert. Der Vergleich zu 30 Frankfurter Schulen im Bestand [HBA 2001] ergibt mit einer Einsparung von **88 %** einen Wert in der gleichen Größenordnung (Abbildung 71).

Die dargestellten Heizwärme-Verbrauchswerte der Riedbergschule beinhalten die beschriebenen „Fehlbedienungen“ wie z.B. dem Durchheizen in den Winterferien sowie die Auswirkungen der deutlich geringeren Personenbelegung. Um so erfreulicher ist das gute Ergebnis mit den hohen erzielten Einsparungen.

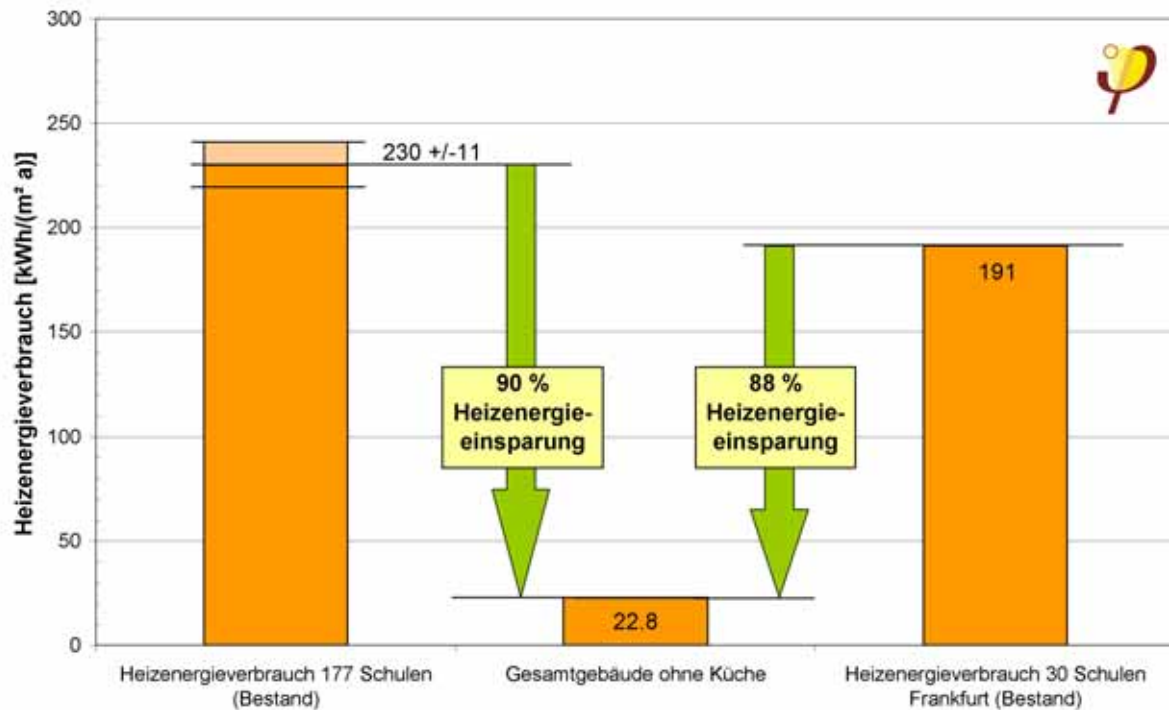


Abbildung 71: Vergleich vom Heizenergieverbrauch des Gebäudes (Schule + KiTa, ohne Küche und ohne Turnhalle im Zeitraum Okt. 05 bis Sep. 06) mit 177 Schulen im Bestand und mit 30 Bestandsschulen in Frankfurt.

### 6.3.2.1 Vergleich der PHPP-Berechnung zu den Messdaten

Der Winter-Wärmeverbrauch von 22,8 kWh/(m²a) ist für das Gesamtgebäude (Schule + KiTa, ohne Küche) ein gutes Ergebnis, insbesondere wenn der Messwert mit herkömmlichen Schulgebäuden verglichen wird. Er ist allerdings höher als der mit dem PHPP vorab prognostizierte Wert von 15 kWh/(m²a). Die Erstellung der PHPP-Berechnung erfolgte hauptsächlich im Planungszustand mit einigen Änderungen während der Bauphase. Für die Bilanzierung zu dieser Zeit mussten einige Annahmen z.B. im Bezug auf die Belegungszahlen, die Stromverbräuche, den Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlagen und den Luftwechsel gemacht werden.

Die PHPP-Bilanzierung wurde nun im Rahmen der Messdatenauswertung dem aktuellen Zustand des Gebäudes im Messzeitraum angepasst. Dafür wurden neue Bilanzmodelle des Gebäudes mit den Bereichen „Schule inkl. Küche“ und „KiTa“ erstellt. In diesen beiden Teilgebäude-Modellen wurden die erhobenen Randbedingungen der Heizperiode 2005/ 2006 eingegeben. Die wichtigsten Veränderungen fasst Tabelle 17 zusammen.


**Tabelle 17: Planungsdaten und Messdaten der PHPP-Bilanzierung.**

	PHPP-Bilanz Gesamtgebäude (Planungsphase)	Messung 2005/2006	Messung 2005/2006
	<b>Gesamtgebäude</b>	<b>Schule</b> (inkl. Küche)	<b>KiTa</b>
Innentemperatur [°C]	20,0	19,4	20,1
mittlerer Luftaustausch [m³/h]	5418	6900	1190
Luftwechsel [1/h]	0,34	0,45	0,43
effektiver Wärmebereit- stellungsgrad [/]	0,74	0,74	0,74
Personenbelegung	596 (ganztags)	234 (halbtags)	86 (ganztags)
Interne Wärmequellen (Personen, Stromverbrauch, Warmwasser, etc.) [W/m²]	2,8	2,6	3,6
Gradtagsstunden [kKh/a]	84	78	78

Die beiden mit den Werten aus der Tabelle aktualisierte PHPP-Bilanzen für die Schule (inkl. Küche) und für die KiTa führen auf die Heizwärmebedarfswerte der KiTa von 13,7 und der Schule (inkl. Küche) 15,8 kWh/(m²a). Damit bleibt immer noch ein erheblicher Unterschied zu den gemessenen Verbrauchswerten bestehen.

Auch die Berücksichtigung der „ungewollten“ regelungsbedingten Sommerverbräuche, welche auch in der PHPP-Energiebilanz nicht vorhanden sind (da sie für das Gebäude nicht notwendig gewesen wären), ändern den großen Unterschied zwischen den Werten nur wenig.

**Tabelle 18: Vergleich der Heizwärmeverbräuche der angepassten PHPP-Bilanz mit den Messwerten (Okt. 05 bis Sep. 06) von KiTa und Schule**

	[kWh/(m² a)]	KiTa	Schule (inkl. Küche)
1	PHPP-Bilanz	<b>13,7</b>	<b>15,8</b>
2	Messung (Gesamtjahr)	32,0	24,6
3	Messung (ohne Sommerverbrauch)	<b>30,7</b>	<b>24,0</b>
	Differenz (Zeile 3 minus Zeile 1)	17,0	8,2

Es gibt eine ganze Reihe von Besonderheiten, die in der Gebäude-Bilanzierung nicht berücksichtigt werden konnten. Als Beispiele werden hier einige aufgelistet, die den Heizwärmeverbrauch erhöht haben:

- Sturmschaden (weggerissene Lichtkuppeln) vor der Heizperiode 05/06, bei dem erhebliche Mengen Regenwasser in das OG der Schule eingedrungen sind.



- Diverse regelungstechnische Problem in der Heizperiode 2005/06, die u.a. dazu führten, dass Nacht-, Wochenend- und Ferienabsenkungen nicht oder nicht vollständig erfolgten.
- Umschalten vom Sommer- auf Winterbetrieb der Lüftungsanlage „Schule 2“ konnte nicht zeitgemäß erfolgen (erst Mitte/Ende Oktober 2005). Das machte Zusatzlüftung in den Räumen 0.3 und 0.4 notwendig.
- Bei Ortsterminen im Winter wurde beobachtet, dass Sommer-Lüftungsklappen in einigen Räumen unbemerkt bzw. ungewollt offen standen (Schule und KiTa).
- Ein WC-Fenster im Bereich der Kirchennutzer stand im Winter langzeit offen, genau wie die Eingangstür zwischen Schule und Turnhalle (Treppenhaus).
- In der KiTa stand die Eingangstür und auch mehrere Gruppenraum-Außentüren im Winter lange offen (Beobachtungen von Schulhausverwalter und vom Heizungsfachplaner sowie Zusatzmessung vgl. Abschnitt 6.6.1.3)
- Zusätzliche Temperaturmessungen in der KiTa (vgl. Abschnitt 6.6.1.3) zeigen in zwei Gruppenräumen dauerhaftes Nachtlüften in je einer Nacht.
- Störung der Heizung im Januar 2006
- Die Außenverschattung wurde über die GLT zeitweise auch während der Heizperiode 2005/2006 heruntergefahren.

Nicht berücksichtigt in der Bilanz wurden z.B. auch Querwärmeströme von der KiTa zur Schule (Die KiTa ist auf ein etwas höheres Temperaturniveau beheizt als die Schule, siehe auch dazu Abschnitt 6.6.1.3).

Die Wärmeverluste des Gesamtgebäudes ans Erdreich sind in den ersten Jahren höher als im langjährigen Mittel, da das Erdreich zunächst aufgeheizt werden muss. Dabei fließt eine größere Energiemenge durch die Bodenplatte ins Erdreich als im „eingeschwungenen“ Zustand des Gebäudes nach einigen Jahren. Der Wärmeverlust durch das Erdreich, der sich aufgrund dieses Effekts für die Periode von Oktober 2005 bis September 2006 ergibt, wird nachfolgend abgeschätzt.

Der gesamte Wärmeverlust ans Erdreich während der Heizperiode beträgt laut PHPP im eingeschwungenen Zustand 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>a). Dieser Wert basiert auf ungünstigeren Erdreichdaten ( $\lambda = 1,7 \text{ W/(mK)}$ ,  $\rho c = 2,7 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ ), als sie in der Auswertung der Messungen festgestellt wurden (zwei verschiedene Schichten, mittlere Eigenschaften ca.  $\lambda = 1,1 \text{ W/(mK)}$ ,  $\rho c = 1,1 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ ). Mit den letztgenannten Erdreicheigenschaften würde der Wärmeverlust während der Heizperiode im eingeschwungenen Zustand 3,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) betragen.

In [Schnieders 2004-3] wurde der Einschwingvorgang bei zwei Schürzenlösungen auf verschiedenen Erdreicharten und mit verschiedenen Dämmstoffstärken untersucht. In der zweiten Heizperiode lag der Wärmeverlust in diesen Beispielen um 10 bis 40% über dem Wert im eingeschwungenen Zustand. Die Simulationen für die Messdatenauswertung deuten auf eine ähnliche Größenordnung hin. Unter der Annahme, dass der Wärmestrom ans Erdreich in der untersuchten Heizperiode um 50% über dem Wert im eingeschwungenen Zustand lag, ergibt sich damit ein zusätzlicher Heizwärmebedarf gegenüber dem PHPP von 1,5 kWh/(m<sup>2</sup>a).



Die Trocknungseffekte (Verdunstungswärme) des Gebäudes, in dem große Mengen an Ortbeton verbaut wurden, können auch im zweiten Winter Zusatzwärmemengen in der Größenordnung um 1 kWh/(m<sup>2</sup>a) benötigen.

Auch mit der Abschätzung dieser bekannten Einzeleffekte ist der große Unterschied zwischen den Bedarfs-Bilanzen und den Verbrauchswerten jedoch noch nicht vollständig zu erklären. Dies ist insbesondere auffällig im Vergleich zu allen bisher vermessenen Passivhaus Gebäuden. Bei diesen wurde regelmäßig eine sehr gute Übereinstimmung von Mess- und Bilanzrechnungswerten festgestellt (als Beispiele: [Peper 2001], [Peper 2004] und [Peper 2005]).

Die großen Unterschied in z.B. der KiTa könnten sich - von der Größenordnung her - durch drei im Winter dauerhaft (Tag und Nacht) offenstehenden Türen erklären lassen. Dies kann allerdings nicht als realistische Annahme gelten. Es wird vermutet, dass eine andere Eingangsgröße der Gebäude-Bilanz nicht der Realität entspricht. Denkbar wäre z.B. auch, dass die Dämmwirkung der Außenwand mit Vorhangfassade einen höheren U-Wert besitzt als angenommen, weil die Dämmung möglicherweise stellenweise hinterströmt wird. Derartige Vermutungen könnten aber nur durch weitere Untersuchungen am Gebäude (z.B. thermographische Aufnahmen) geklärt werden. Die Abweichung sind jedoch auch nicht so hoch, dass sie einen großen Aufwand zur Abklärung der Ursache rechtfertigen würden.

### 6.3.3 Heizleistung

Die Räume der Schule und der KiTa werden über Heizkörper beheizt. Für „typische“ Wohngebäude im Passivhaus-Standard wird häufig eine reine Zuluftbeheizung realisiert, welche erst durch die sehr gut wärmegeämmte Hülle möglich wird. Die maximale Heizleistung für luftbeheizte Passivhäuser wird durch die (hygienisch notwendige) Zuluftmenge begrenzt. Speziell in Schulgebäuden kann die Beheizung über Heizflächen aufgrund der stark schwankenden inneren Lasten Vorteile haben.

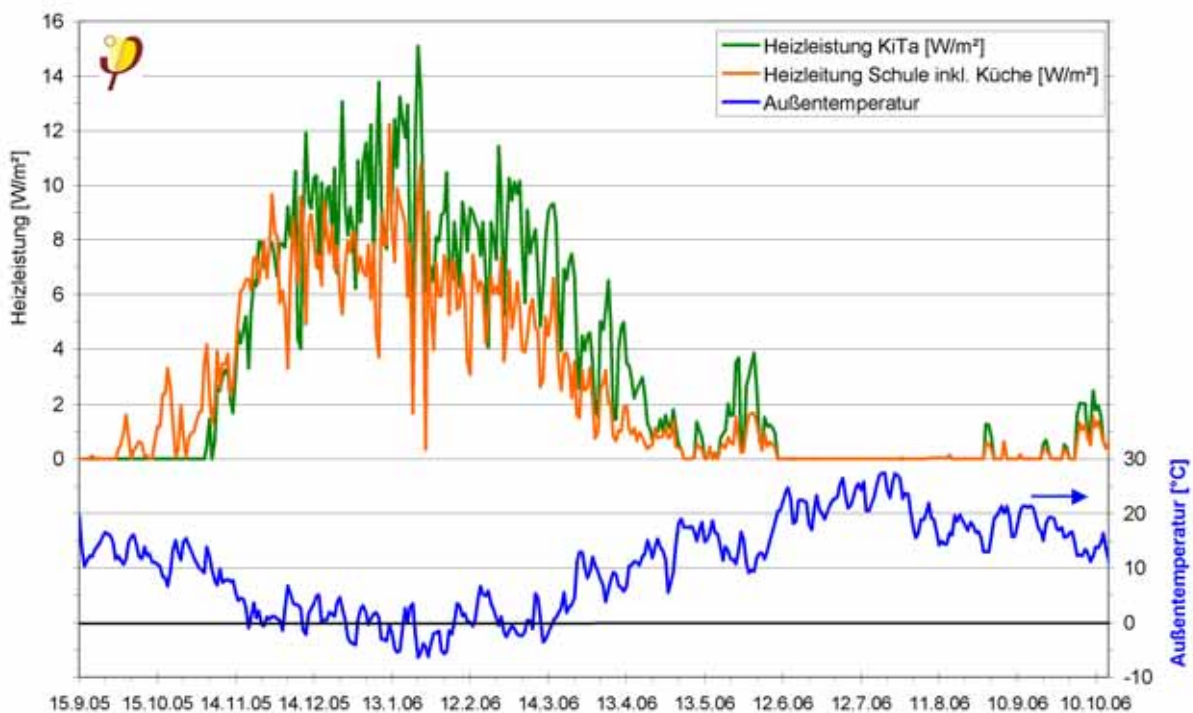
In der Riedbergschule betragen die maximalen Heizleistungen laut PHPP-Berechnung der Schule 10,9 W/m<sup>2</sup> und der KiTa 11,7 W/m<sup>2</sup>. Bei einem Gebäude mit statischen Heizflächen zur Heizwärmeversorgung stellen die maximalen Leistungen der theoretisch über die Zuluft einbringbaren Wärmemengen keine technische Begrenzung dar. Zur Beurteilung der Heizenergieverbräuche und der Qualität der Gebäudehülle ist die Heizleistung jedoch eine wichtige Kenngröße.

Untersucht man die gemessenen tagesmittleren Heizleistungen in der Heizperiode 2005/2006, zeigt sich ein tagesmittlerer Spitzenwert der Schule inkl. der Küche von **12,2 W/m<sup>2</sup>** am 12. Januar 2006 und von **15,1 W/m<sup>2</sup>** am 23.01.2006 in der KiTa. Insgesamt benötigt die KiTa deutlich höhere spezifische Heizleistungen als der Schulteil des Gebäudes. In Abbildung 72 ist zu erkennen, dass die tagesmittlere Heizleistung der KiTa fast durchgängig über der der Schule liegt. Die außerordentlichen Heizleistungen der Küche durch den stark erhöhten Luftwechsel sind bei der Schule mit enthalten. Dargestellt ist der Zeitraum vom 15.09.2005 bis zum 15.10.2006 - also ein Zeitraum etwas länger als ein Jahr. Auffällig ist, dass die Schule bereits Anfang Oktober 2005 und damit deutlich vor der KiTa mit der Heiz-

anforderung beginnt. Dies hat seine Ursache vermutlich durch die noch geringe Belegungsdichte der Schule und den damit verbundenen geringeren Wärmeeinträgen. Am 2.10.2005 sinkt die tagesmittlere Außentemperatur bereits auf 10,7 °C ab.

Auffällig ist auch ein Heizanforderung noch im Mai 2006, nachdem die eigentliche Heizleistungs-Winterkurve bereits wieder abgeklungen ist. Die Außentemperatur hat sich hier nochmals auf tagesmittlere Temperaturen unter 13 bis 14°C abgekühlt. Erst ab 12.06.2006 fängt ein eigentlicher „Sommerbetrieb“ ohne Heizleistung an. Die mittlere Gebäude-Innentemperatur steigt allerdings bereits ab 6. Juni 2006 deutlich über 20 °C an (nicht dargestellt). Hier hätte ein Beenden der Beheizung ab einem festgelegten Datum („Winterende“) unnötige Heizenergie eingespart. Sinnvoll wäre eine über die GLT oder eine Jahresschaltuhr gesteuerte Abschaltung der Heizkreispumpen vom z.B. 30. April bis zum 01. November. Diese Funktion sollte nachgerüstet werden.

Die tagesmittleren Heizleistungen der Schule liegen damit in einer Größenordnung wie bei Passivhäusern, welche ausschließlich über die Zuluft beheizt werden. Diese Analyse zeigt, dass das Schulgebäude von der Heizlast her wie ein klassisches Passivhaus allein über die Zuluft beheizbar wäre. Die zusätzlichen Heizflächen wären aus Gründen der Beheizbarkeit nicht erforderlich.



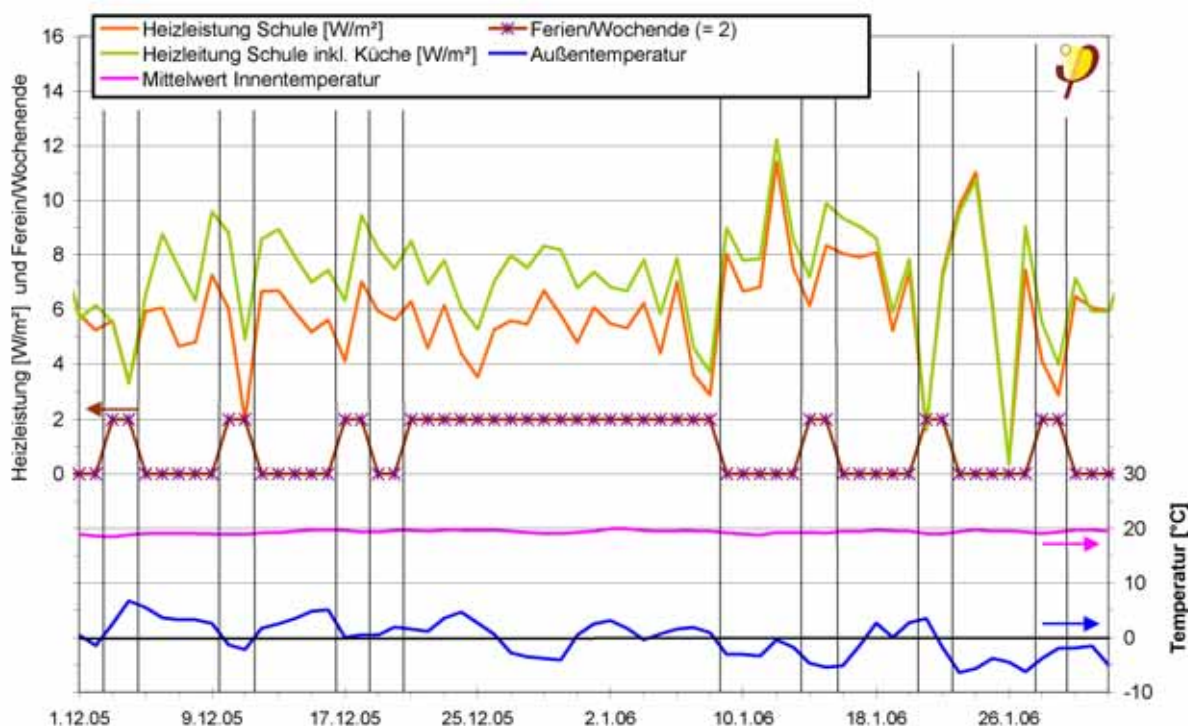
**Abbildung 72: Tagesmittlere Heizleistungen der KiTa und der Schule sowie die tagesmittleren Außentemperaturen vom 15.09.2005 bis zum 15.10.2006.**

Die relativ starken Schwankungen der Heizleistung deuten auf stark schwankende Anforderungen durch z.B. den Unterschied von Schultagen auf der einen Seite und Wochenenden und Ferien mit Absenkbetrieb auf der anderen Seite hin. Um dies besser beurteilen zu können, wird der Zeitbereich der kältesten Phase (Dezember





2005 und Januar 2006) für die Schule detailliert dargestellt (Abbildung 73). Die Ferien- und Wochenendzeiten und die mittlere Innentemperatur der Schule im EG sind zusätzlich eingetragen.



**Abbildung 73:** Tagesmittlere Heizleistungen der Schule (mit und ohne Küche) sowie die Außentemperatur vom 01.12.2005 bis zum 01.02.2006. Zusätzlich sind noch die Schulferien und Wochenenden sowie die mittlere Innentemperatur im EG eingetragen. Die vertikalen Gitternetzlinien begrenzen die Wochenenden und Ferienzeiten.

Während der Winterferien wurde die Schule (und die KiTa) „ungewollt“ dauerhaft weiter beheizt. Die tagesmittlere Temperatur ist nicht - wie der Ferienbetrieb es vorsieht - abgesenkt worden. Die unterschiedlichen Heizleistungen haben überwiegend eine Korrelation mit der Außenlufttemperatur. In der Zeit außerhalb der Schulferien gibt es z.T. Heizleistungsreduzierungen am Ende der Woche und eine Steigerung zum Wochenbeginn. Dieser Effekt wird allerdings überlagert durch die mit der Schwankung der Außentemperatur verbundene veränderte Heizleistungsanforderung. Besonders deutlich wird dies am Wochenende 21. und 22. Januar 2006: Vom Freitag (20.1.) zum Samstag (21.1.) sinkt die Heizleistung deutlich, zum Sonntag (22.1.) und Montag (23.1.) steigt sie wieder deutlich an. Zu dieser Zeit sinkt die Tagesmitteltemperatur um 9,9 K auf  $-6,5^{\circ}\text{C}$ . Die mittlere Innentemperatur der vermessenen Räume und Flure im EG des Gebäudes sinkt an diesem Wochenende von 19,6 auf 18,9  $^{\circ}\text{C}$  nur um 0,7 K ab und erreicht am Montag wieder 19,4  $^{\circ}\text{C}$ .

Die beschriebenen Effekte werden nochmals überlagert von Heizanforderungen durch Sondernutzungen während der Ferien und Wochenenden über die es keine detaillierte Protokollierungen durch den Schulhausverwalter gibt. Dies macht eine Beurteilung einzelner Effekte im Leistungsverlauf schwierig.

### 6.3.3.1 Heizkurve

Die theoretische Heizkurve eines Gebäudes wird aus den Daten der Gebäudehülle (Flächen, U-Werte), der Lüftungsanlagen (Luftmengen und Wärmerückgewinnung) und der inneren Wärmequellen (Stromverbräuche, Personen) sowie der mittleren Innentemperatur bestimmt. Sie ist zur Beurteilung der Abhängigkeit der Heizlast von der Außentemperatur hilfreich. Neben der theoretischen Heizkurve werden die Messwerte der tagesmittleren Heizleistung über der Außentemperatur in einem Diagramm aufgetragen (Abbildung 74). Der Abstand der gemessenen tagesmittleren Leistungen von der Geraden senkrecht nach unten ist vor allem auf passiv genutzte Solarstrahlung zurückzuführen. Punkte, die über der Geraden liegen, zeigen Aufheizvorgänge (z.B. nach Heizungsabsenkungen am Wochenende) an. Diese sind bei dem z.T. intermittierenden Betrieb der Schule zu erwarten.

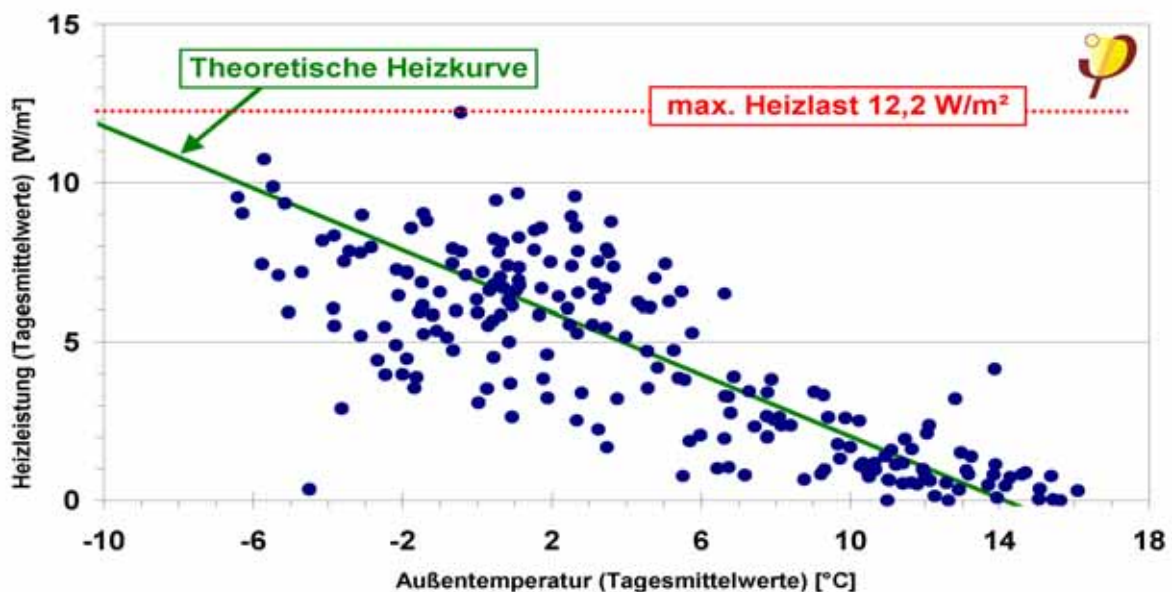


Abbildung 74: Tagesmittlere Heizleistungen der Schule (inkl. Küche) über der Außentemperatur und die berechnete theoretische Heizkurve des Schulgebäudes (Heizzeit 01.10.2005 bis 30.04.2006).

Die tagesmittleren Heizleistungen zeigen, dass ab etwa 14 °C Außentemperatur - bis auf einen Ausreißer - kaum noch nennenswerte Heizleistungen gemessen wurden. Werden die Aufheizvorgänge näher betrachtet, so zeigt sich, dass sich tatsächlich eine knappe Mehrheit der montäglichen Heizleistungen über der Heizkurve, sich der Rest aber fast ausschließlich sehr nah unter der „Kurve“ befindet.

Die maximale tagesmittlere Heizlast von 12,2 W/m<sup>2</sup> stellt einen Ausreißer dar, der bei einer Temperatur um 0 °C an einem Donnerstag gemessen wurde. Ohne diesen Extremwert wird das Feld der tagesmittleren Leistungen oberhalb durch die Leistung von 10,8 W/m<sup>2</sup> begrenzt. In der betrachteten Heizperiode sind auch die zusätzlichen Heizleistungen durch die übermäßige Küchenlüftung enthalten. Diese verschieben die Heizleistungen in der Zeit vom 02. November 2005 bis zum 30. Januar 2006 deutlich nach oben. Die maximale Heizleistung ohne die Berücksichtigung der Küche beträgt 11,4 W/m<sup>2</sup>. Der Einfluss der Küche ist bereits in Abbildung 73 ablesbar.



### 6.3.4 Warmwassererzeugung

Die Warmwassererzeugung erfolgt nur für die im Nordteil der Schule gelegenen Zapfstellen (Küche, Waschbecken, Putzräume) und für die Turnhalle (Duschen, Waschbecken, Putzräume). Die restlichen Waschbecken im Schulgebäude und in der KiTa (inkl. Wirtschaftsküche) werden durch direkt-elektrische Warmwassergeräte bedient, da die Entfernung zur Warmwasserbereitung im Technikkeller sehr groß ist und damit die Leitungsverluste zu groß wären.

Die Wärmemengen für die Warmwasserbereitung werden im Kreislauf zwischen dem Heizungsverteiler und dem Warmwasserspeicher (800 Liter) mit Wärmeübertrager gemessen (primärseitig). Damit werden die Umwandlungsverluste und die Speicher- verluste mit erfasst. Die Warmwasserversorgung verfügt über Zirkulationsleitungen. Die zusätzlichen energetischen Aufwendungen für den Betrieb der Zirkulations- leitungen sowie die Speicher- und Umwandlungsverluste sind in den Messdaten der Warmwassererwärmung durch die Messanordnung ebenfalls enthalten.

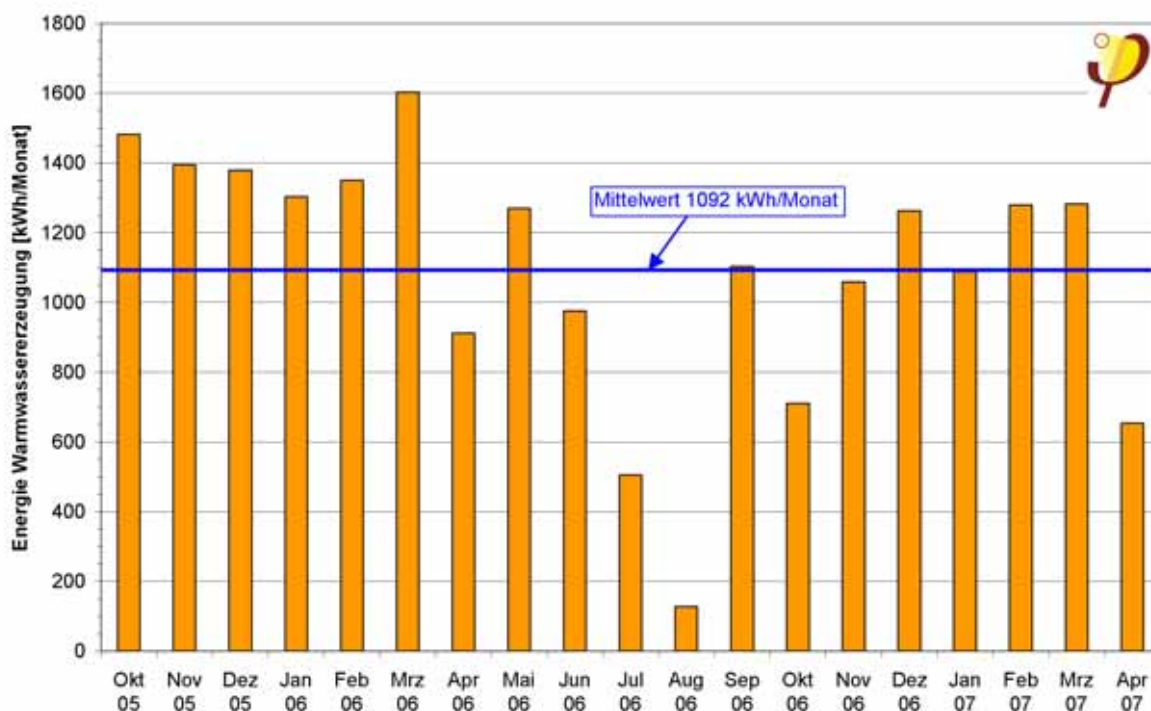


Abbildung 75: Monatssummen des Energieeinsatzes zur Warmwassererzeugung.

Die monatlichen Verbräuche zur Warmwasserversorgung schwanken zwischen 127 (Ferienzeit) und 1603 kWh/Monat. Im Mittel über den Zeitraum Oktober 2005 bis April 2007 werden monatlich 1092 kWh/Monat verbraucht.

Da keine belastbaren Messungen der Warmwassermenge und auch keine Aufteilung nach Nutzungsbereichen Schule/Turnhalle vorliegen, können keine spezifischen Werte für die Warmwasserbereitung angegeben werden. Für die Verwendung in der Gebäudeenergiebilanz (PHPP) wird angenommen, dass die Schule 40 % dieser



Energiemenge benötigt werden und 60 % die Turnhalle. Wird nach diesem Aufteilungsschlüssel verfahren, werden in der Schule für die nichtelektrische Warmwassererzeugung und Speicherung in der Heizperiode 2005/06 0,87 kWh/m<sup>2</sup> und im Gesamtjahr (1.10.2005 bis 30.06.2006) 1,23 kWh/(m<sup>2</sup>a) benötigt.

**Tabelle 19: Energieverbrauch zur thermischen Warmwassererwärmung in unterschiedlichen Zeiträumen (die Jahreszeiträume überschneiden sich).**

	<b>Warmwasser- erwärmung</b>	<b>spez. Verbrauch</b> (bei 40 % Anteil Schule inkl. Küche)
<b>Verbrauch Heizperiode</b>	<b>[kWh]</b>	<b>[kWh/m<sup>2</sup>]</b>
Okt. 2005 bis April 2006	9.427	0,87
Okt. 2006 bis April 2007	7.338	0,68
<b>Jahresverbrauch</b>	<b>[kWh/a]</b>	<b>[kWh/(m<sup>2</sup> a)]</b>
Okt. 2005 bis Sep. 2006	13.408	1,23
Jan. 2006 bis Dez. 2006	12.183	1,12

## 6.4 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch im Gesamtgebäude wird getrennt nach den Bereichen Schule, Küche und KiTa gemessen. Zusätzlich gibt es einen Unterzähler für den Verbrauch in der Turnhalle. Dadurch können diese Bereiche getrennt ausgewertet werden. Der Stromverbrauch der Lüftungsgeräte ist bereits im Abschnitt 6.2.1.4 dargestellt worden. Er wurde bei der Berechnung des Wärmebereitstellungsgrades bereits berücksichtigt. Daher werden die Verbrauchswerte hier jeweils abgezogen und nur der Stromverbrauch OHNE Lüftungsstrom dargestellt. Der gesamte übrige Technikstrom der Steuerung, Kessel, Pumpen etc. ist in den Messwerten enthalten.

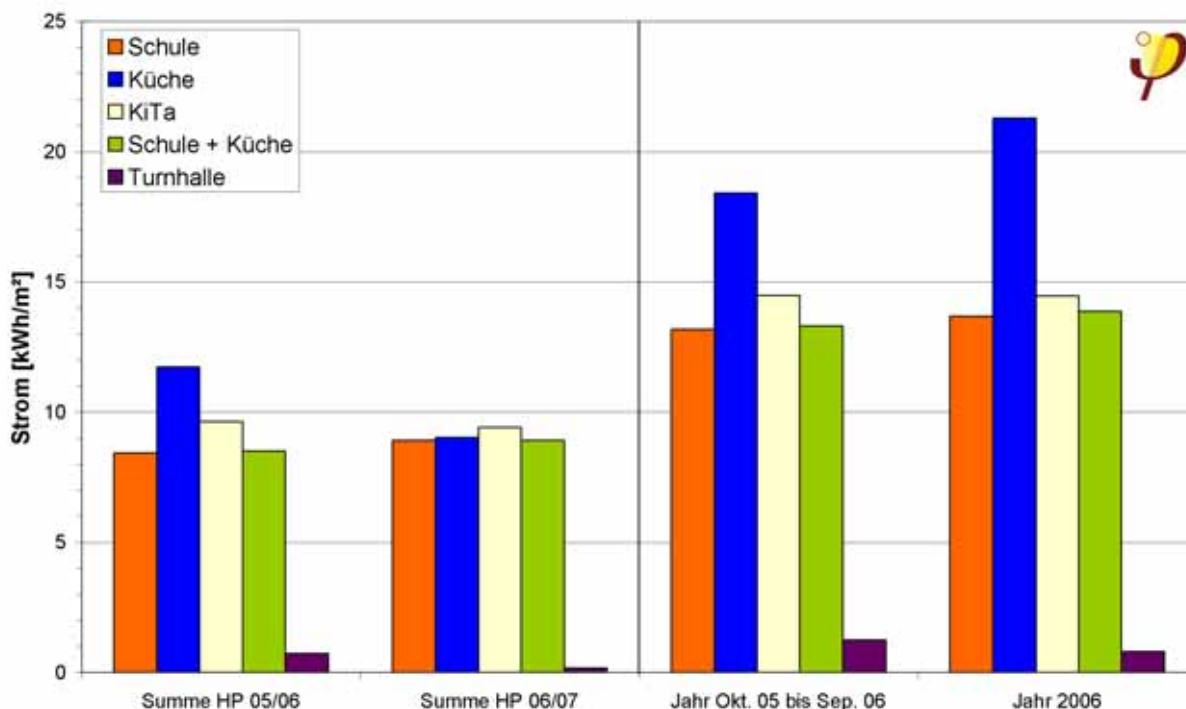


Abbildung 76: Spezifischer Stromverbrauch der unterschiedlichen Gebäudeteile ohne den Lüftungsstrom während der beiden Heizperioden und in zwei Jahreszeiträumen (überlappend).

Tabelle 20: Daten vom spezifischen Stromverbrauch aus Abbildung 76 und Angabe der jeweiligen Bezugsflächen.

	Schule	Küche	KiTa	Schule + Küche	Schule + Küche + KiTa	Turnhalle
Fläche [m²]	4238	108	1195	4346		1429
<b>Verbrauch Heizperiode [kWh/m²]</b>						
Okt. 2005 bis April 2006	8,4	11,7	9,6	8,5	8,8	0,7
Okt. 2006 bis April 2007	8,9	9,0	9,4	8,9	9,0	0,2
<b>Jahresverbrauch [kWh/(m² a)]</b>						
Jahr Okt. 05 bis Sep. 06	13,2	18,4	14,5	13,3	13,6	1,3
Jahr 2006	13,7	21,3	14,5	13,9	14,0	0,8

Zum Vergleich wurden die Stromverbrauchswerte von 56 Grund- und Hauptschulen aus Frankfurt a.M. aus dem Jahr 2003 bis 2005 herangezogen. Als Datengrundlage wurden die Jahresverbrauchsdaten der Schulen vom Energiereferat der Stadt Frankfurt verwendet ([www.Energiereferat.stadt-frankfurt.de](http://www.Energiereferat.stadt-frankfurt.de)). Ausgewertete wurden die Stromverbrauchswerte aller Schulen der Gruppe „Grund- und Hauptschulen“ bei denen Werte ungleich Null angegeben waren. Es wurden folgende mittlere spezifische Strommengen in den drei Jahren bezogen: 22,6 (2003), 23,7 (2004) und **24,1 kWh/(m²a) (2005)**. Für 2005 sind die Einzelwerte in Abbildung 77 aufsteigend sortiert dargestellt. Ohne den extremen Ausreißer einer Schule ergibt sich ein Mittelwert von

**21,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Diese Bestandsschulen verfügen mit hoher Wahrscheinlichkeit über keine Lüftungsanlagen. Es wird daher für einen Vergleich der Stromverbrauch der Riedbergschule ebenfalls ohne Lüftungsstrom herangezogen. Dieser beträgt von Oktober 2005 bis September 2006 13,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Damit wird der Durchschnittswerte der Bestandsschulen um **44 % unterschritten**. Selbst unter Berücksichtigung der Lüftungsanlagen mit 5,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) verbraucht die Schule mit dann 19,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) noch weniger Strom als die Vergleichsgebäude. Da die Schule zu dieser Zeit noch nicht vollständig belegt war, wird sich der Abstand vermutlich noch etwas verringern.

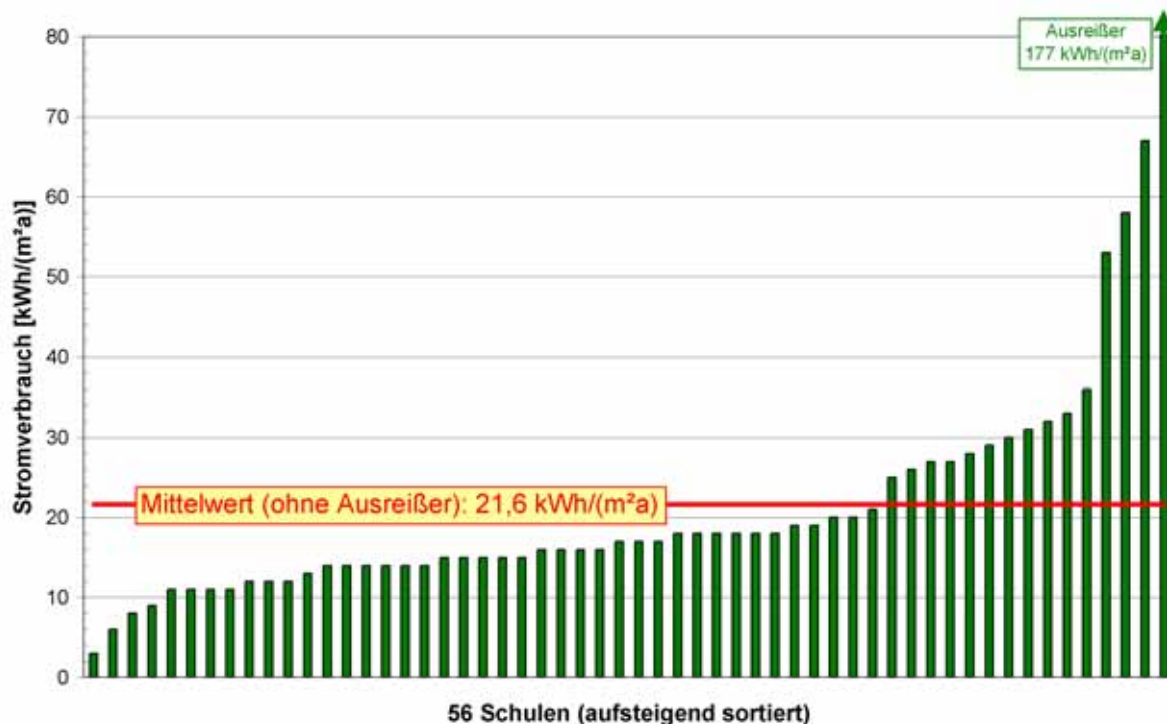


Abbildung 77: Stromverbrauch von 56 Grund- und Hauptschulen in Frankfurt im Jahre 2005 (Datengrundlage aus [www.energiereferat.stadt-frankfurt.de](http://www.energiereferat.stadt-frankfurt.de)).

#### 6.4.1.1 PV Strom

Die 7,4 kW<sub>peak</sub> Solarstromanlage auf dem Flachdach des Nordflügels des Schulgebäudes wird von einem externen Investor errichtet und betrieben. Der Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist. Von der Anlage liegen Zählerablesungen vor, welche bei Ortsterminen vom PHI aufgenommen wurden. Aus der Differenz der Ablesungen von über einem Jahr (30.09.2005 bis 05.10.2006, entspricht 370 Tage) wurde der mittlere Stromertrag für das Bilanzjahr (01. 10.2005 bis 30.09.2006) berechnet. Er beträgt 5.374 kWh/a, entsprechend 0,97 kWh/(m<sup>2</sup> a) wenn die Fläche von der Schule inkl. Küche und der KiTa als Bezugsgröße gewählt wird. Damit deckt die Anlage etwa 7,2 % des jährlichen Stromverbrauchs der Schule und KiTa ohne Berücksichtigung des Lüftungsstromes.



Abbildung 78: PV-Solarstromanlage auf dem Gebäudedach (Nordflügel).

#### 6.4.2 Teilbereich: Elektrische Beleuchtung

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Gesamtstrom-Verbräuchen des Gebäudes wurden im EG Nordflügel Unterzähler montiert um den Beleuchtungs- und den sog. „Kraftstrom“ (Steckdosen mit z.B. einem größeren Kaffeeautomaten, Verschattungsvorrichtung, Sommer-Lüftungsklappen, Volumenstromregler, Türöffner, etc.) getrennt beurteilen zu können. Vom Hochbauamt werden strenge Auflagen zur Beleuchtungseffizienz von Schulgebäuden vorgegeben. In der Planungsphase wurde für diese Sondermessung ein Bereich im Nordflügel EG ausgewählt. Der Bereich umfasst 4 Klassenräume mit je knapp 70 m<sup>2</sup> (0.7, 0.9, 0.11 und 0.13), drei Gruppenräume, den Speisesaal, den unregelmäßig genutzten Mehrzweckraum, einen Putzraum sowie die zugehörigen Toiletten und Flure (keine Treppenhäuser). Die Fläche der Räume für die der Stromverbrauch getrennt nach den beiden Anwendung erfasst wird beträgt insgesamt 755 m<sup>2</sup>.

Tabelle 21: Zusammenstellung der Räume und Flächen in welchen bei der Strom-Sondermessung (Licht- und Kraftstrom) der elektrische Verbrauch gemessen wird.

Anzahl	Raum- bzw. Flächenart	Summe Flächen [m <sup>2</sup> ]
4	Klassenräume	278,3
3	Gruppenräume	56,9
2	Toiletten	29,7
1	Speisesaal	77,4
1	Mehrzweckraum	184,6
1	Flure	124,7
1	Putzraum	3,7
<b>Gesamtsumme</b>		<b>755,3</b>

In den Klassenräumen sind jeweils parallel zur Außenfassade zwei einzelne schaltbare Lichtbänder mit je 4 Leuchten installiert. Vor der Tafel sind zwei weitere Lampen installiert. Dabei handelt es sich um moderne, effiziente Beleuchtungseinrichtungen (Spiegelraster Dreibandlampen mit gelochtem Raster).

Für die Versorgung der Klassenräume mit 300 lx wurde eine spezifische Leistung von 5,6 W/m<sup>2</sup> entsprechend 1,9 W/(m<sup>2</sup> 100 lx) installiert. Die Zielvorgabe nach den Leitlinien der Stadt Frankfurt [Leitlinien FFM] waren 2 bis 2,5 W/(m<sup>2</sup> 100 lx). Gemessen wurden nach der Realisierung über 400 lx. Die Räume werden über eine zentrale Tageslichtschaltung gesteuert (Ausschaltung in jeder Pause). Die Beleuchtung in den Fluren werden mit tageslichtabhängigen Bewegungsmeldern geschaltet. Auch hier gelten die 2 W/(m<sup>2</sup> 100 lux) nach den Leitlinien der Stadt Frankfurt. Die Informationen zur installierten Leistung und der Beleuchtungsstärke sind [Bretzke] und einer persönlichen Mitteilung von Herrn Bretzke (Energiemanagement Stadt Frankfurt) vom 25.5.2007 entnommen.



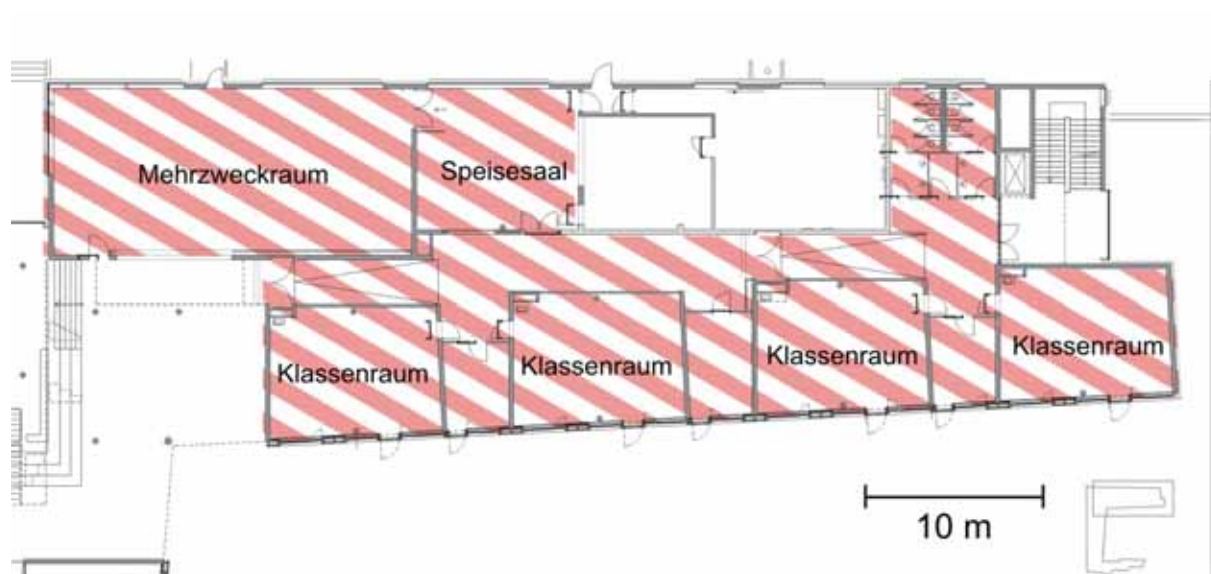
**Abbildung 79: Typischer Klassenraum in der Riedbergschule mit zwei Lichtbänder über den Tischgruppen parallel zur Außenfassade.**

Erst nach Bezug des Gebäudes wurde bekannt, dass in dem gemessenen Bereich zwei Klassenräume und ein Gruppenraum von der Kirchengemeinde genutzt werden. Dort ist eine kleine Küche mit Kaffeemaschine etc. aufgestellt worden. Der Gruppenraum wird als Büro mit PC-Ausstattung benutzt. Die beiden anderen Klassenräume werden von der Grundschule als Frühbetreuungsraum und als Vorbereitungs- bzw. Lagerraum genutzt. Der Speisesaal wird nur am Mittag kurzzeitig genutzt, der Mehrzweckraum wird unregelmäßig durch die Schule aber auch





für externe Vorträge und z.B. Parteitreffen genutzt. Von einer typischen Schullnutzung der Räume kann damit nicht gesprochen werden.



**Abbildung 80: Bereich im Nordflügel EG der Schule, in welchem die Strom-Sondermessung durchgeführt wurde.**

Die mehr oder weniger regelmäßige Nutzung durch Kirchengruppen ist vermutlich im Bezug auf die Beleuchtung nicht grundlegend anderes die einer Schulklasse zu bewerten, sie findet allerdings zu anderen Zeiten statt. Auch die anderen, als normale Klassenräume genutzten Räume der Schule verfügen jeweils über eine PC-Ausstattung, die vermutlich geringere Betriebszeiten aufweisen als der PC im Kirchenbüro. Jede Schule verfügt heutzutage allerdings über einen Verwaltungsteil mit Büronutzung, wobei eine sehr ähnliche Nutzung und Ausstattung wie bei dem Kirchenbüro angenommen werden kann. In anderen Schulen wird es ebenfalls einen Mehrzweck- und Speiseraum geben, der allerdings an der Fläche einer gesamten Schule einen geringeren Anteil einnehmen wird als hier im Bereich der Sonderstrommessung. Eine genauere Abschätzung zum Vergleich der Nutzungen zur Beurteilung der Messwerte ist im Rahmen der Untersuchung nicht möglich.

Mit diesen Überlegungen und Einschränkungen müssen die gemessenen elektrischen Verbräuche von Licht- und Kraftstrom beurteilt werden. Bei den Messungen haben sich die folgenden Messwerte ergeben:

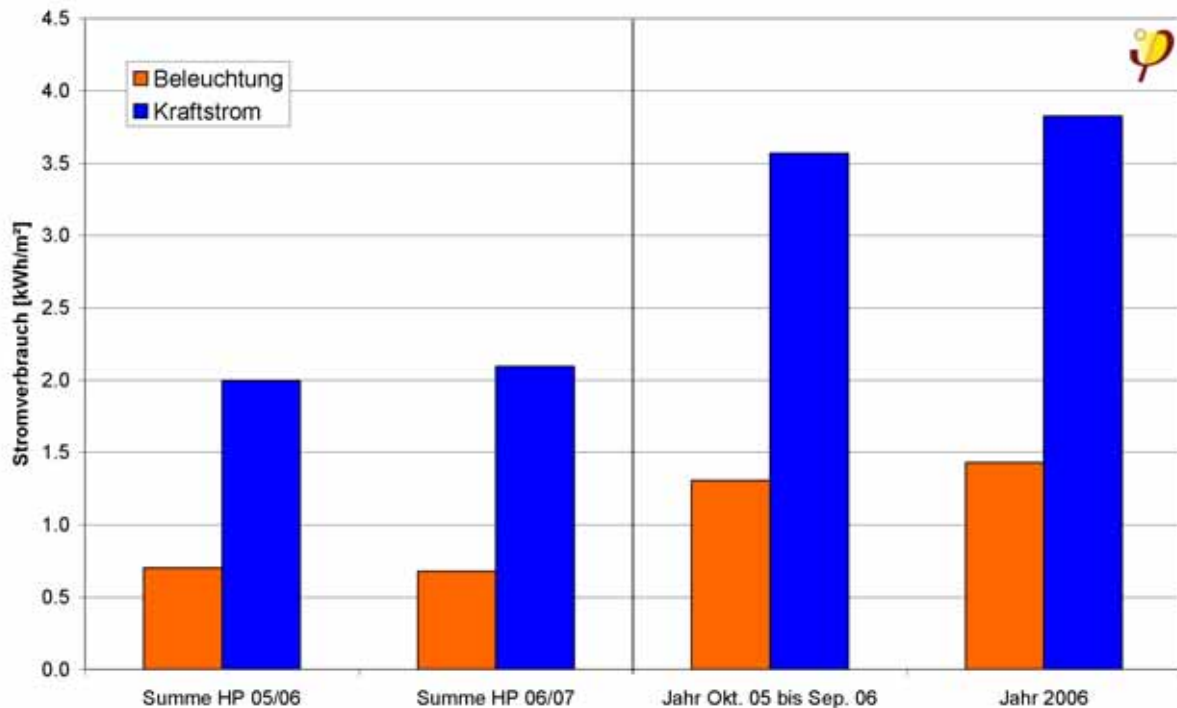


Abbildung 81: Spezifischer Stromverbrauch von Licht- und Kraftstrom in einem Teil der Schule (EG Nord) während der beiden Heizperioden und in zwei Jahreszeiträumen (überlappend).

Tabelle 22: Daten vom spezifischer Stromverbrauch aus Abbildung 81.

	Lichtstrom	Kraftstrom
Verbrauch Heizperiode	[kWh/m²]	[kWh/m²]
Okt. 2005 bis April 2006	0,70	2,00
Okt. 2006 bis April 2007	0,68	2,10
Jahresverbrauch	[kWh/(m² a)]	[kWh/(m² a)]
Okt. 2005 bis Sep. 2006	1,31	3,57
Jan. 2006 bis Dez. 2006	1,43	3,83
Mittlerer Jahres-Verbrauch (April 2005 bis April 2007)	1,22	3,45

Es wird deutlich, dass die Beleuchtung deutlich geringere Verbräuche aufweist als der Kraftstrom. Im Mittel über die gesamte auswertbaren Messzeit dieser beiden Zähler (April 2005 bis April 2007) beträgt der spezifische **Lichtstrom 1,22 kWh/(m² a)**. Der Anteil vom Lichtstrom am gesamten gemessenen Stromverbrauch (Licht + Kraftstrom) in diesem Gebäudebereich beträgt **26,0 %**.

Zur Einschätzung der Messdaten wurde berechnet, in welcher Höhe Jahresverbräuche zur Beleuchtung zu erwarten sind. Dabei wurde der Wert der tatsächlich installierten Leistung von 1,9 W/(m² 100 lx) nach [Bretzke] für den gesamten Bereich



verwendet und den Teilflächen jeweils eine entsprechende Nenn-Beleuchtungsstärke zugeordnet (nach [Pflichtenheft 1996]). Werden dann 40 Schulwochen mit je 10 Benutzungsstunden angesetzt (vgl. [Kah 2006]) ergibt sich ein Wert von 1,5 kWh/(m<sup>2</sup> a) bzw. 1 kWh/(m<sup>2</sup>a), wenn eine Teilbelegung angenommen wird. Diese Werte passen gut zu dem Messwerten von im Mittel 1,2 kWh/(m<sup>2</sup> a). Dabei ist zu bemerken, dass es sich bei der installierten Leistung von nur 1,9 W/(m<sup>2</sup> 100 lx) um einen sehr ambitionierten Wert handelt, der - zusammen mit der realisierten Lichtsteuerung - diese niedrigen Verbrauchswerte bei ausreichender Beleuchtungsstärke möglich macht.

Setzt man diesen Mittelwert des spezifischen Lichtstromverbrauches von 1,2 kWh/(m<sup>2</sup> a) für das gesamte Schulgebäude an, beträgt der Anteil am gesamten Stromverbrauch der Schule (ohne Lüftungsstrom) nur **8,7 %**. Der Wert ist als grober Anhaltswert zu interpretieren. So sind z.B. im Bereich der Förderschule (1. OG Nordflügel) mehrerer kleine Küchenzeilen eingebaut worden. Die Nutzung im Unterricht stellt keine typische Unterrichtsform in Bezug auf den Stromverbrauch dar, sie erhöht diesen sicherlich untypisch gegenüber einer normalen Grundschule. Dies erschwert die Interpretation der Stromverbräuche für das gesamte Gebäude.

## 6.5 Energiebilanz

Die Endenergiebilanz des Gebäudes wird für den intensiv untersuchten Jahreszeitraum 01. Oktober 2005 bis zum 30. September 2006 aufgestellt. Bilanziert werden damit die *gesamten gemessenen Verbräuche inkl. aller Stromverbraucher* im kälteren gemessenen Winter inkl. der untypischen „Zusatzlüftung“ in der Küche.

Wärmeseitig wurde die Wärmemenge gemessen, die dem Gebäude insgesamt von den Kesseln zugeführt wurde. Für die Energiebilanz muss jedoch die gesamte gelieferte Energiemenge berücksichtigt werden. Da die Holzpelletsmengen nicht in der notwendigen zeitlichen Auflösung erfasst werden konnten, wird der Wirkungsgrad der Kessel berücksichtigt. Der Jahresnutzungsgrad wird aus den Herstellerangaben (Fa. KWB, Gerät USV 60) zu knapp 92 % abgeschätzt. Mit dem Wert ergeben sich geringfügig höhere Endenergiemengen. Die Kessel stehen innerhalb der thermischen Hülle, allerdings in einem separaten Aufstellraum mit größeren Lüftungsöffnungen zur notwendigen Verbrennungsluftzuführung. Daher wird der Großteil der Abwärme der Kessel nach außen abgeführt und kommt nicht dem Gebäude zugute.

Die Differenz aus der gelieferten Gesamtwärmemenge und der Summe der Wärmemengen-Unterzähler wird hier als „Umwandlung/Speicher etc.“ bezeichnet. Sie wird insgesamt in der Bilanz aufgeführt, obwohl der Wärmeverbrauch der Turnhalle in der Bilanz herausgerechnet wird - eigentlich müsste ein Teil der Turnhalle zugerechnet werden. Da aber die gesamte Haustechnik inkl. des Pufferspeichers im Technikkeller der Schule untergebraucht ist, werden diese Anteile als Vereinfachung insgesamt dem Bilanzbereich Schule/KiTa zugerechnet.

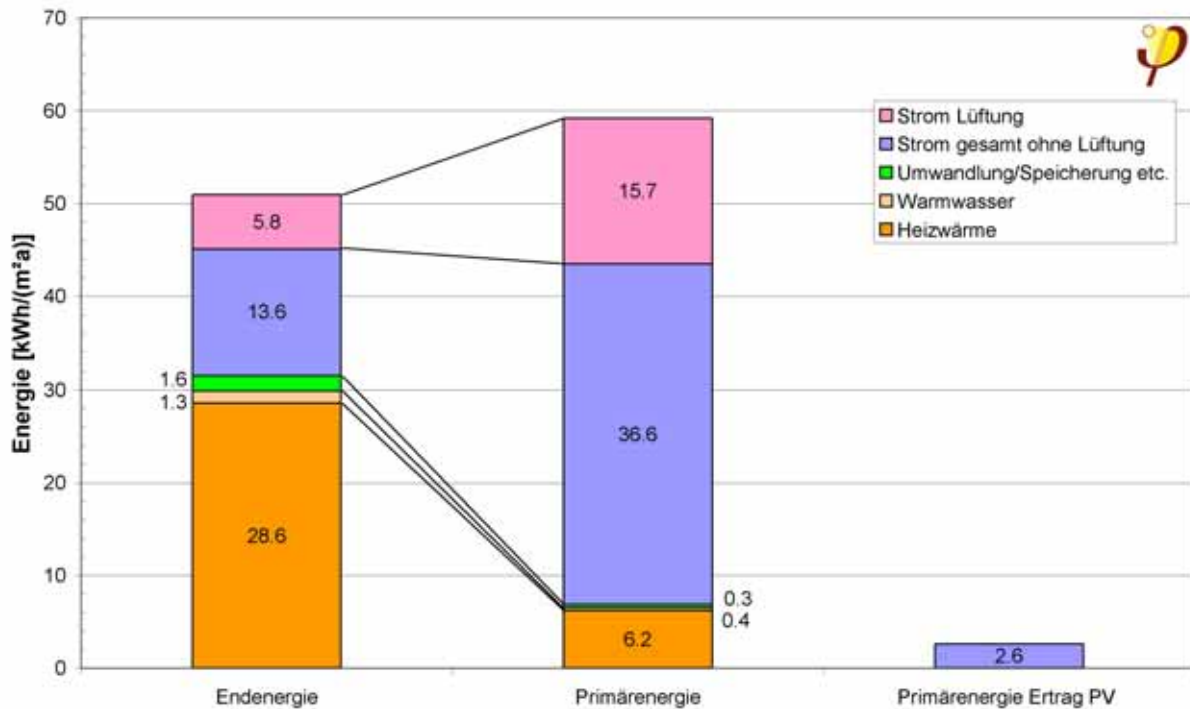


Abbildung 82: End- und Primärenergiebilanz des Gesamtgebäudes (Schule, Küche, KiTa) im Zeitraum 01. Oktober 2005 bis zum 30. September 2006.

Die Endenergieverbräuche im Jahreszeitraum betragen insgesamt **50,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)**, wobei (immer noch) der Heizwärmeverbrauch mit ca. 56 % dominiert. Der gesamte Stromanteil (Strom Lüftung plus Strom gesamt) entspricht 38 % der Endenergie. Der thermische Warmwasseranteil ist - im Gegensatz zur Wohnnutzung - mit 2,6 % nahezu unbedeutend. Der Anteil der Energie zur elektrischen Warmwasserbereitung (z.T. Untertischgeräte o.ä.) ist im Sektor „Strom gesamt“ enthalten.

Für die ökologische Bewertung des Gebäudes ist die primärenergetische Beurteilung der Endenergieverbräuche maßgeblich. Nur diese zeigen an, wie groß die Umweltbelastungen durch den Betrieb des Gebäudes einzuordnen sind bzw. wie hoch die Einsparung sich gegenüber herkömmlichen Gebäuden darstellt.

Die gesamten Endenergieverbräuche des Gebäudes (Bilanzgrenze: thermische Hülle) werden dazu primärenergetisch bewertet. Diese Bewertung erfolgt mit sog. Primärenergiefaktoren, welche die Herstellungenergie der unterschiedlichen Energieträger berücksichtigen. Nach [Gemis] betragen die Faktoren für den Strommix in Deutschland 2,7 kWh/kWh und für Holzpellets als nachwachsender Rohstoff 0,2 kWh/kWh. Werden die Endenergieverbräuche (siehe oben) mit den Faktoren bewertet, ergibt sich ein **Primärenergiewert von 59,2 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Der Grenzwert von 120 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Schulen in Passivhausbauweise (nach [Feist 2006-1]) wird damit nur zur Hälfte ausgeschöpft, was ein sehr gutes Ergebnis darstellt. Dabei muss beachtet werden, dass dieser Primärenergieverbrauch alle Energieanwendungen des Gebäudes (auch Lichtstrom, und alle weitere schulische Anwendungen wie PC's, Kopierer, Heißwassergeräte, etc. enthält.



Bei diesem Ergebnis fallen nun die Stromverbräuche eindeutig am stärksten ins Gewicht: Sie stellen zusammen fast 90 % der primärenergetischen Aufwendungen. Damit wird auch deutlich, wo nach Optimierung der Gebäudehülle der Fokus weiterer Einspar-Bemühungen liegen sollte.

Würde das Gebäude statt mit Holzpellets mit Erdgas beheizt (Primärenergiefaktor Erdgas 1,1 kWh/kWh), so würde sich ein immer noch sehr guter Primärenergiewert von 85,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) ergeben.

Wird die von einem externen Investor betriebene PV-Solarstromanlage auf dem Gebäudedach rechnerisch berücksichtigt, muss der Anteil des erzeugten und eingespeisten Solarstromes ebenfalls primärenergetisch mit dem Faktor 2,7 bewertet werden. Er beträgt dann 2,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) für den Bilanzzeitraum. Dieser Ertrag könnte bei der Beurteilung dem Gebäude gutgeschrieben, also vom gesamten Primärenergieverbrauch abgezogen werden. Die Primärenergie-Summe reduziert sich dann nur sehr wenig auf **56,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)**.

### 6.5.1 Primärenergieverbrauch nach EnEV 2004

Zum Vergleich wird nach der **EnEV 2004** der zulässige Jahres-Primärenergiebedarf des Gebäudes bestimmt. Für Nichtwohngebäude bezieht sich dieser auf das beheizte Gebäudevolumen und wird nach dem A/V-Verhältnis berechnet. Die Schule hat ein A/V-Verhältnis von 0,35 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> womit sich die Jahres-Primärenergiebedarfsobergrenze nach der EnEV 2004 zu **18,3 kWh/(m<sup>3</sup>a)** ergibt. Die EnEV berücksichtigt für den Jahres-Primärenergieverbrauch neben der Heizenergie (inkl. Umwandlungs- und Speicherverluste) nur den Hilfsstrom (inkl. Lüftungsstrom). Auch hier wird der oben angegebene Jahresnutzungsgrad der Kessel mit knapp 92 % angesetzt. Da der Hilfsstrom für die Haustechnik nicht separat erfasst wurde, wird hier ein relativ hoher Wert von 1 kWh/(m<sup>2</sup>a) angenommen. Für die Riedberg-Schule ergibt sich daraus ein tatsächlicher Jahres-Primärenergieverbrauch von **5,8 kWh/(m<sup>3</sup>a)**. Der Grenzwert nach EnEV 2004 wird damit deutlich - um 68 % - unterschritten. Wenn anstelle der Holzpellets der Energieträger Gas (Brennwertkessel) eingesetzt worden wäre, müsste ein schlechterer Primärenergiefaktor angesetzt werden (1,1 anstelle 0,2). Damit würde sich ein Jahres-Primärenergieverbrauch von 10,4 kWh/(m<sup>3</sup>a) ergeben, was aber immer noch einer Unterschreitung der Anforderung um 43 % entspricht.

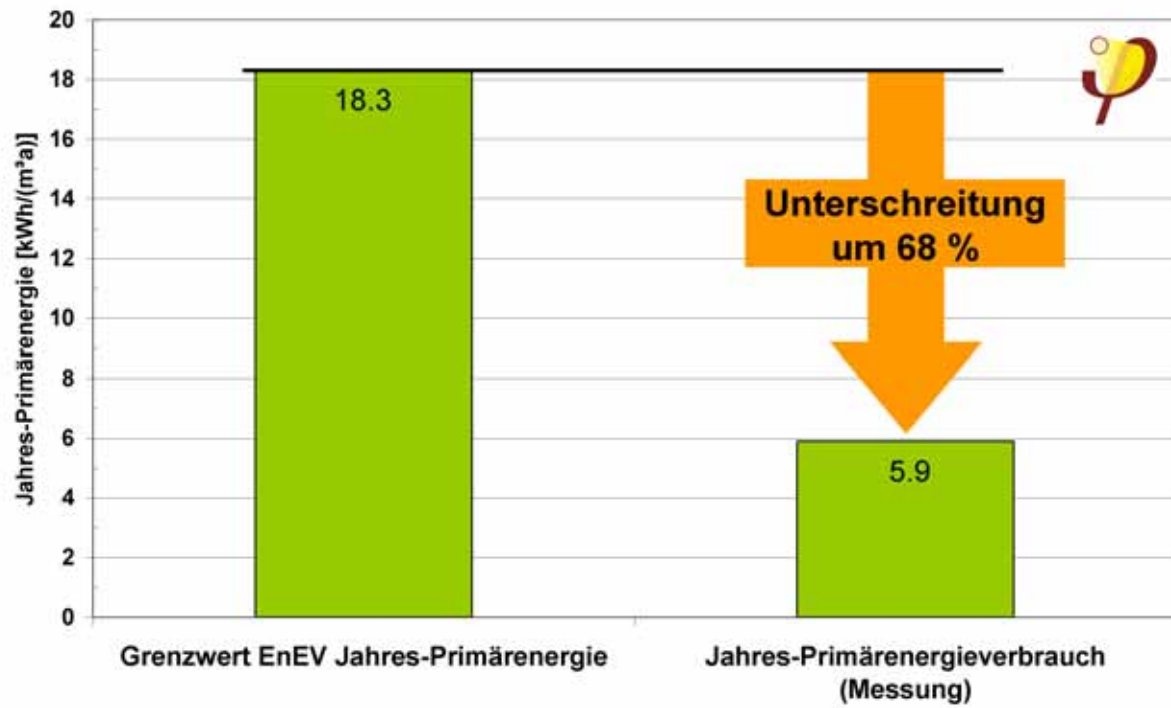


Abbildung 83: Vergleich der Jahres-Primärenergie-Anforderung nach EnEV 2004 (Heizung, Hilfsstrom) mit dem tatsächlichen Jahres-Primärenergie-Verbrauch der Schule.



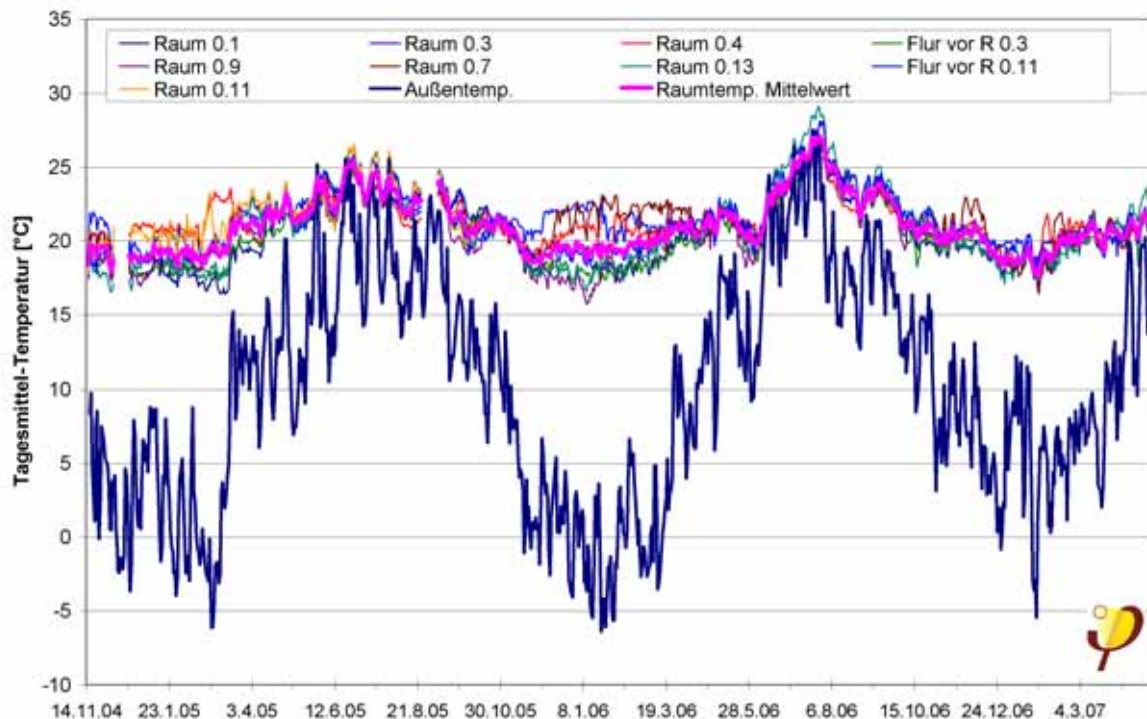
## 6.6 Behaglichkeitsuntersuchungen

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen der Raumluft- und Oberflächen-temperaturen sowie die CO<sub>2</sub>- und VOC-Messdaten analysiert, um Aussagen zur Behaglichkeit in der Schule machen zu können. Neben den Parametern wurde in einer Woche im Februar 2006 eine Nutzerbefragung zu Aufenthaltszeiten, Personenbelegung und dem Nutzerverhalten durchgeführt. Mit diesen Angaben werden die unterschiedlichen Behaglichkeits-Messdaten interpretiert. Im Normalfall wird mit Tages- und Stundenmittelwerten gearbeitet. Für den Bereich der Nutzerbefragung und der einer Sonder-CO<sub>2</sub>-Messung werden auch die 10 Minuten Messdaten direkt verwendet

### 6.6.1 Temperaturen

Während der gesamten Messzeit wurden die Raumlufttemperaturen in acht Klassenräumen gemessen. Alle Räume befinden sich im EG des Gebäudes, im Nord- bzw. Westflügel.

Am 11.10.2005 wurde der Raumlufttemperatur-Sensor vom Raum 0.11 (Kirchennutzung) in den Raum 0.7 (Schulnutzung) umgebaut um eine typische Schulnutzung messen zu können. Zum Überblick werden die tagesmittleren Temperaturmesswerte mit der Außentemperatur während des gesamten Messzeitraumes dargestellt:

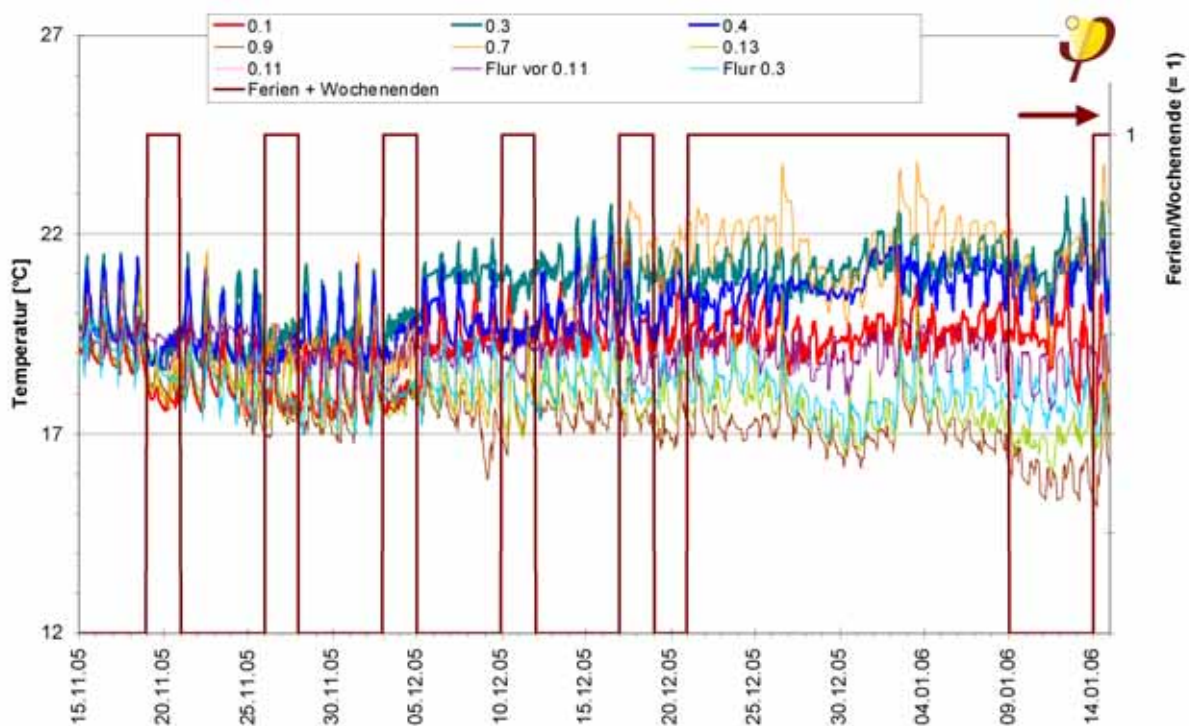


**Abbildung 84:** Tagesmittlere Raumlufttemperaturen und die Außenlufttemperatur im gesamten gemessenen Zeitraum 16.11.2004 bis zum 01.05.2007.

Es zeigen sich typische Sommer-Winter Temperaturverläufe. Der Sommer 2005 erreicht niedrigere Spitzenwerte als der Sommer 2006. So wie auch der Winter

2005/2006 deutlich kühler war als der Folgewinter 2006/2007. Bei dem Verlauf der Innentemperaturen fällt weiter auf, dass die Temperaturen im Winter 2005/2006 deutlich inhomogener sind als die im Folgewinter. Das hat seine Ursache in der zu dieser Zeit noch nicht voll funktionsfähigen Regelung sowie in der noch geringeren Belegung der Räume. So wurden die Räume 0.7 und 0.9 nur sporadisch genutzt. Bei den Räumen 0.11 und 0.13 handelt es sich um die von der Kirchengemeinde genutzten Räume mit anderem Nutzungsanforderungen und -zeiten.

Bei der näheren Betrachtung der Temperaturen in der Heizperiode 2005/2006 wird deutlich, dass es während der Winterferien keine zentrale Temperaturabsenkungen für alle Räume gegeben hat. In den Wochen vorher kann man erkennen, dass nur z.T. Wochenend-Absenkungen durchgeführt wurden.



**Abbildung 85: Stundenmittelwerte der Raumtemperaturen im EG der Schule und Wochenend- und Ferienzeiten im Zeitraum vom 15.11.2005 bis zum 15.01.2006.**

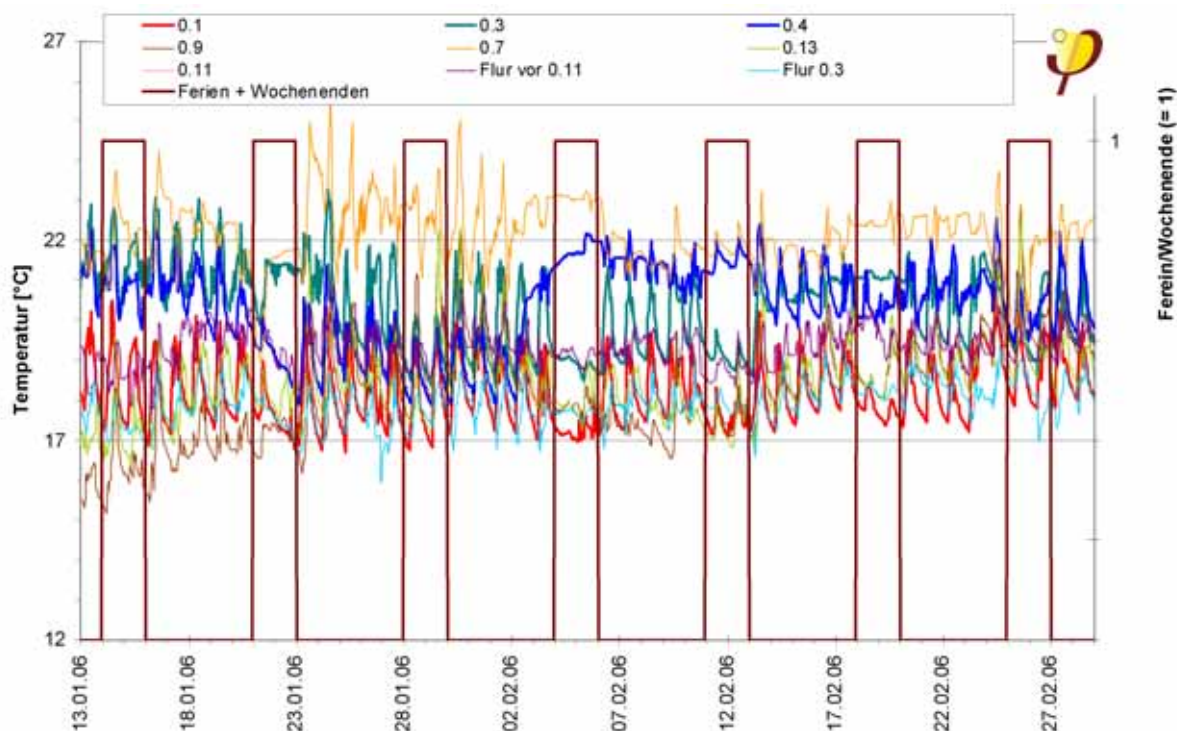
Bei der Höhe der Raumlufttemperaturen ist zu beachten, dass es sich zum Teil um unbenutzte Räume und um zwei Flure (Überströmbereich) handelt. Als „normale“ Klassenräume wurden nur die Räume 0.1, 0.3 sowie 0.4 genutzt. Die Kurven dieser Messwerte sind daher in Abbildung 85 etwas kräftiger dargestellt.

Auch im Folgezeitraum (Abbildung 86) sind deutliche Unterschiede zwischen den Raumtemperaturen in den unterschiedlichen Räumen zu erkennen. Zum Beispiel gibt es vom 2. bis zum 5. Februar 2006 in Raum 0.4 einen deutlichen Temperaturanstieg um etwa 2,7 K, der vermutlich auf eine erhöhte Temperaturanforderung zurückzuführen ist. An diesem Wochenende 4./5. Februar 2006 liegen die Temperaturen der beiden Räume 0.4 (ca. 21,6 °C) und 0.7 (etwa 23 °C) - obwohl vermutlich keine





Wochenendnutzung stattfand - deutlich höher als die der anderen Räume. Der kälteste Raum an diesem Wochenende ist Raum 0.1 mit etwa 17,3 °C. Damit zeigt sich die große Bandbreite der möglichen Raumlufttemperaturen im EG der Schule.



**Abbildung 86: Stundenmittelwerte der Raumtemperaturen im EG der Schule und Wochenend- und Ferienzeiten im Zeitraum vom 13.01. bis zum 28.02.2006.**

In der folgenden Heizperiode 2006/07 waren viele Parameter der Gebäudesteuerung optimiert oder überhaupt erst richtig in Betrieb gesetzt worden. Die Temperaturgänge zeigen, dass in den Winterferien für alle Räume ein deutlich niedrigeres Temperaturniveau gefahren wurde. Hier ist augenscheinlich der Absenkbetrieb wie geplant umgesetzt worden. Eine Ausnahmen macht nur der „Flur vor 0.11“, welcher als Überströmbereich nicht direkt beheizt werden kann. Ob das Temperaturniveau dort so hoch ist, weil Raum 0.11 selber relativ hoch beheizt wurde (wurde zu dieser Zeit nicht mehr gemessen) ist nicht bekannt. Besonders große solare Einträge durch die großflächige Verglasung auf der Ostseite des anschließenden Treppenhauses waren zu dieser Zeit nach den Solarstrahlungsdaten nicht vorhanden.

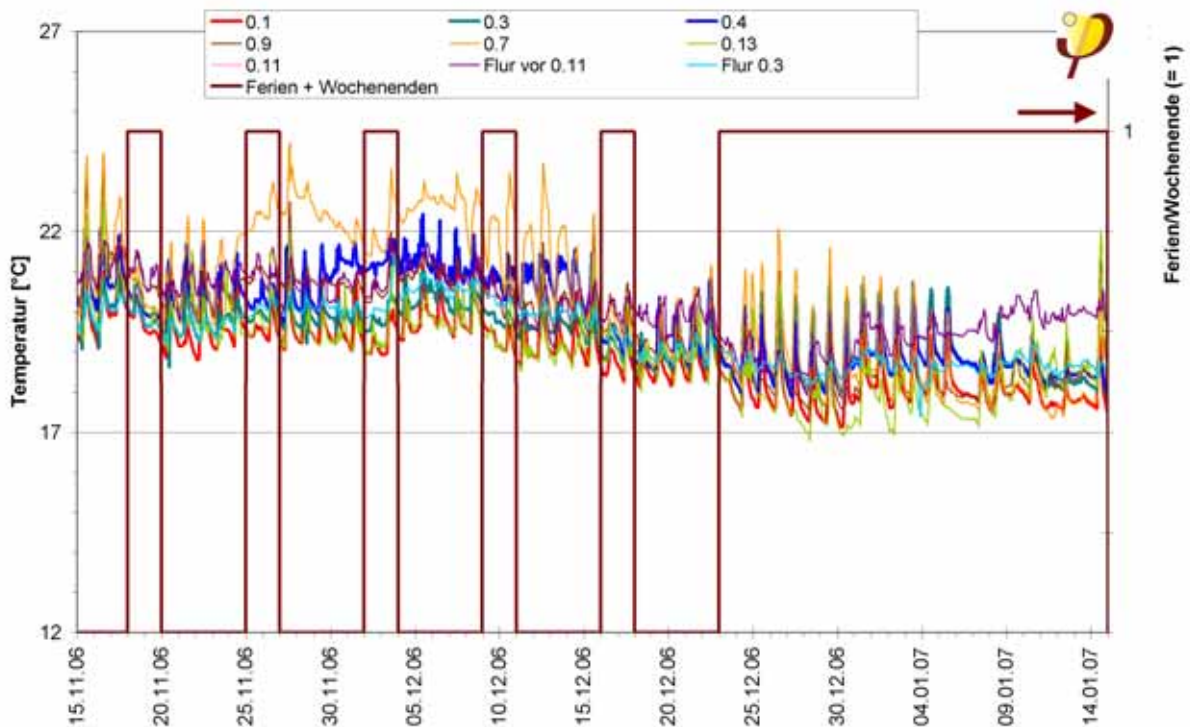
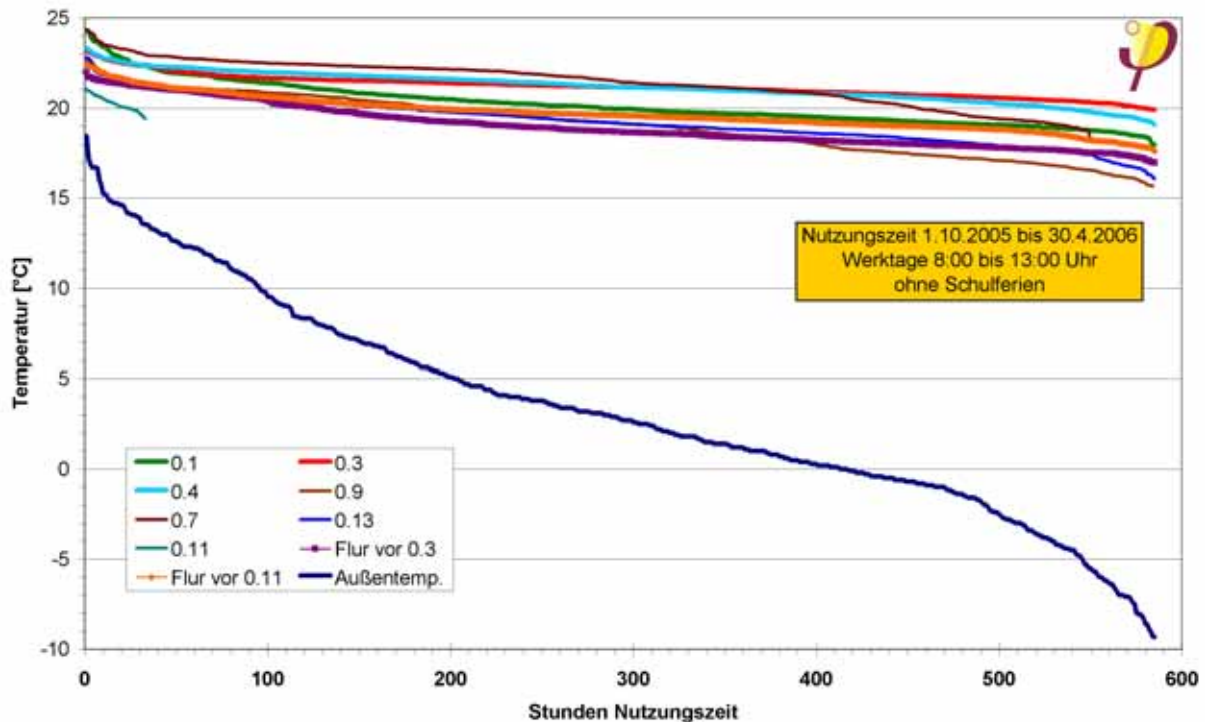


Abbildung 87: Stundenmittelwerte der Raumtemperaturen im EG der Schule und Wochenend- und Ferienzeiten im Zeitraum vom 15.11.2006 bis zum 15.01.2007.

### Temperaturen während der Nutzungszeit

Für die Untersuchung der Behaglichkeit ist nur die Nutzungszeit der Schule von Interesse. Hier wird wieder der Zeitraum der Werkzeuge von 8:00 bis 13:00 Uhr ohne Schulferienzeiten untersucht. Für den Zeitraum 01.10.2005 bis zum 30.04.2006 ergeben sich 585 Nutzungsstunden. Werden die Temperaturen dieser Zeit von der Heizperiode 2005/2006 absteigend sortiert dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:



**Abbildung 88:** Absteigend sortierte Stundenmittelwerte der Temperaturen während der Nutzungszeit (Werktage 8:00 bis 13:00 Uhr, ohne Ferien) vom 01.10.2005 bis zum 30.04.2006.

Die Temperaturen der Flure liegen niedriger als die der drei belegten Klassenräume. Die Kurve von Raum 0.11 ist nur sehr kurz, da der Sensor dann in Raum 0.7 umgebaut wurde, wodurch die Kurve (Stundenzahl der Messung in dem Raum) von Raum 0.7 auch etwas verkürzt ist. Die nicht oder nur selten benutzten Räume setzen sich von den „normalen“ Klassenräumen in der Temperaturhöhe deutlich nach unten ab (zeitweise Ausnahme Raum 0.7). Die untersuchte Hauptnutzungszeit der Schule ist nicht identisch mit den Nutzungszeiten der Kirchengemeinde. Die Temperaturkurven von Raum 0.11 und 0.13 sagen daher nur bedingt etwas über die Behaglichkeit in diesen Räumen aus. Die genauen Nutzungszeiten der Kirchenräume sind nicht bekannt und die Raumlufttemperaturen außerhalb der Schulnutzungszeit werden hier nicht weiter untersucht.

Die Mittelwerte der Messungen in der Heizperiode 2005/2006 sind in der folgenden Tabelle dargestellt.



**Tabelle 23: Mittlere Raumluft- und Außentemperaturen in der Heizperiode 2005/06 während der Nutzungszeiten an Werktagen (8:00 bis 13:00 Uhr) ohne Ferienzeiten.**

Temperatur-Mittelwerte Nutzungszeit [°C]	Messort bzw. Raum									
		Westflügel EG				Nordflügel EG				
	Außenluft	0.1	0.3	0.4	Flur vor 0.3	0.9	0.7	0.13	Flur vor 0.11	
Nutzung		<b>Klassenräume</b>					quasi unbenutzt	Kirche		
Heizperiode (1.10.05 bis 30.4.2006)	4.3	<b>19.5</b>	<b>20.6</b>	<b>20.6</b>	19.1	19.1	21.3	19.3	19.9	
Kernwinter (1.11.05 bis 28.2.2006)	1.4	<b>18.9</b>	<b>20.5</b>	<b>20.3</b>	18.3	18.2	21.0	18.4	19.3	

In den belegten Klassenräumen wurden in der Nutzungszeit mittlere Temperaturen zwischen 19,5 und 20,6 in der Heizperiode 2005/06 festgestellt. In der Kernwinterzeit liegen diese etwas niedriger. In Raum 0.1 wurden deutlich niedriger Temperaturen gemessen als in den anderen beiden Klassenräumen (0.3 und 0.4). Die Nutzer können die Solltemperatur der Räume in der Nutzungszeit um +/- 2 K verändern. Ob die niedrigeren Temperaturen in Raum 0.1 durch die Nutzer beabsichtigt waren oder technische Ursachen hatten ist nicht bekannt. Das generell höhere Temperaturen möglich sind, zeigen die anderen Räume. Sogar in den selten genutzten Raum 0.7 ist eine deutlich höhere mittlere Temperatur als in Raum 0.1 gemessen worden. Dort wäre eine niedrigere Raumtemperatur ausreichend. Über die GLT sollten unbenutzte Räume über das Zeitprogramm abgesenkt werden.

Die Temperaturen während der Nutzungszeit in gesamten Jahren lagen in den drei Klassenräumen 2005 zwischen 20,8 und 21,7 °C und 2006 zwischen 20,8 und 21,4 °C.

**Tabelle 24: Mittlere Raumluft- und Außentemperaturen in den Jahren 2005 und 2006 während der Nutzungszeiten an Werktagen (8:00 bis 13:00 Uhr) ohne Ferienzeiten.**

Temperatur-Mittelwerte Nutzungszeit [°C]	Messort bzw. Raum									
		Westflügel EG				Nordflügel EG				
	Außenluft	0.1	0.3	0.4	Flur vor 0.3	0.9	0.7	0.13	Flur vor 0.11	
Nutzung		<b>Klassenräume</b>					quasi unbenutzt	Kirche		
2005	11,1	<b>20,8</b>	<b>21,2</b>	<b>21,7</b>	20,8	21,0	20,0 *)	21,2	21,3	
2006	10,6	<b>20,8</b>	<b>21,1</b>	<b>21,4</b>	20,6	20,9	22,0	21,2	21,6	

\*) Tagesmittlere Messdaten ab 12.10.2005



### 6.6.1.1 Sommertemperaturen

Zur Beurteilung, ob behagliche Raumlufftemperaturen in der Nutzungszeit vorlagen, wird neben der obigen Untersuchung der Heizzeit auch die Sommerperiode näher beleuchtet.

In der Sommerperiode sollten die Lüftungsanlagen während der Nutzungszeiten nur noch im Abluftbetrieb laufen und damit keine Wärmerückgewinnung mehr erfolgen. Die Außenverschattungen (Jalousien) sollen in der überhitzungs-kritischen Zeit (etwa Juni bis Mitte September) über die GLT geschlossen werden. Dies gilt auch für Wochenenden und Ferien. Während der Nutzung sollten die Lamellen nur soweit gekippt werden, dass noch eine ausreichende Tageslichtversorgung (Diffuslicht) gewährleistet ist. Die Verschattung kann vom Nutzer jederzeit individuell verstellt werden.

Zusätzlich wird in jedem Klassenraum eine Sommer- oder Nachtlüftung über zwei Lüftungsklappen ermöglicht. Diese und die RWA-Klappen (in der Eingangshalle und im 1. bzw. 2. OG) sollen nach PHI-Vorgaben geöffnet werden, wenn keine Nutzung in der entsprechenden Zone stattfindet (nach GLT-Zeitprogramm), die mittlere Raumlufftemperatur über 21 °C beträgt und die Außenlufttemperatur min. 2 K unter der Innentemperatur liegt. Gleichzeitig darf kein starker Wind wehen und es nicht regnen. Dann soll über die zwei Klappen pro Klassenraum eine freie Lüftung realisiert werden. Die Klappen können auch vom Nutzer individuell per Schlüsselschalter genutzt werden (Übersteuerung der GLT).

Die Umsetzung der Anforderungen, insbesondere der Steuerung der Außenverschattungen und der Lüftungsklappen machte nach Bezug des Gebäudes einige Probleme. Im Laufe des Jahres 2005 und z.T. 2006 konnten viele Probleme beseitigt und der Betrieb optimiert werden.

Zur Beurteilung der Sommertemperaturen in der Schule wird die Anzahl der sogenannten „Überhitzungsstunden“ untersucht. In der [DIN 4108] ist der Grenzwert für die sommerlichen Innentemperaturen nach Sommer-Klimaregionen festgelegt. Frankfurt zählt zur wärmsten Klimaregion („sommerheiß“), was bedeutet, dass maximal 10 % der Jahresnutzungsstunden über dem Grenzwert der Innentemperatur von 27 °C liegen sollten. In der „gemäßigten“ Sommer-Klimaregion wären es 26, in der „sommerkühlen“ 25 °C.

Werden die mittleren Studententemperaturen eines gesamten Jahres absteigend sortiert, so kann das sommerliche Temperaturniveau gut beurteilt werden. In Abbildung 89 ist der obere Teil der sortierten Jahresstunden aus dem Jahr 2005 dargestellt. Das Jahr 2005 verfügte über 970 Nutzungsstunden (Werktage 8:00 bis 13:00 Uhr, ohne Ferien), womit der 10 %-Grenzwert bei 97 Nutzungsstunden liegt. Untersucht man die 27 °C-Anforderung, so zeigt sich, dass keiner der drei Klassenräume überhaupt diese stundenmittlere Temperatur erreicht. Selbst die 25°C-Grenze für „sommerkühle“ Regionen werden nur in sehr wenigen Stunden erreicht: Bei den Klassenräumen liegen nur 26 (Raum 0.1), 9 (Raum 0.3) bzw. 27 Stunden der Nutzungszeit (Raum 0.4) über 25 °C.

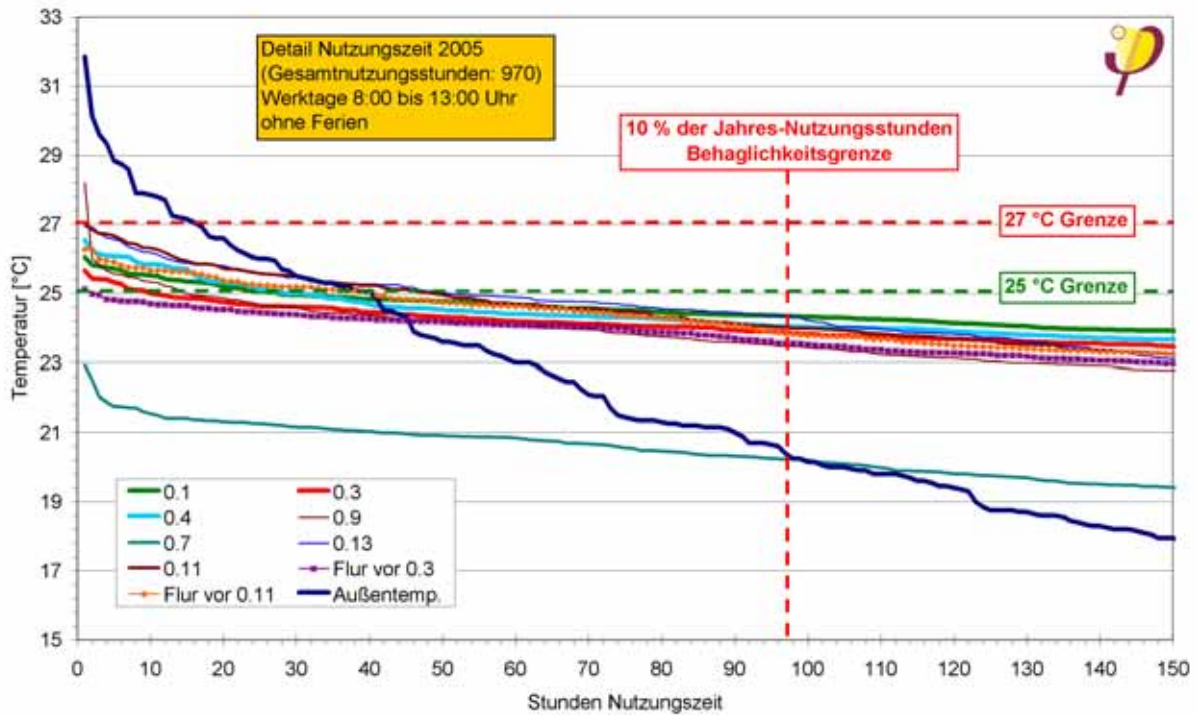


Abbildung 89: Oberer Ausschnitt der absteigend sortierten Temperaturen aller Jahresstunden in der Nutzungszeit (Werktag 8:00 bis 13:00 Uhr, ohne Schulferien) des Jahres 2005 (Stundenmittelwerte). Die Grenzwerte 25°C/10% und 27°C/10% sind eingetragen.

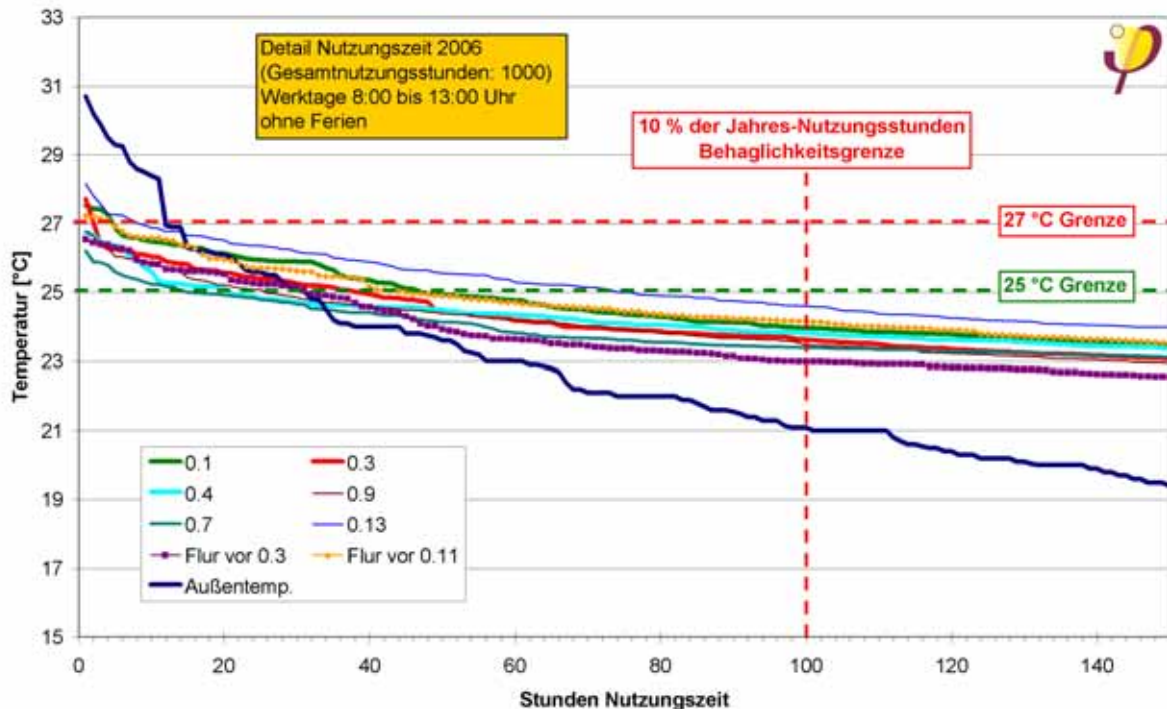
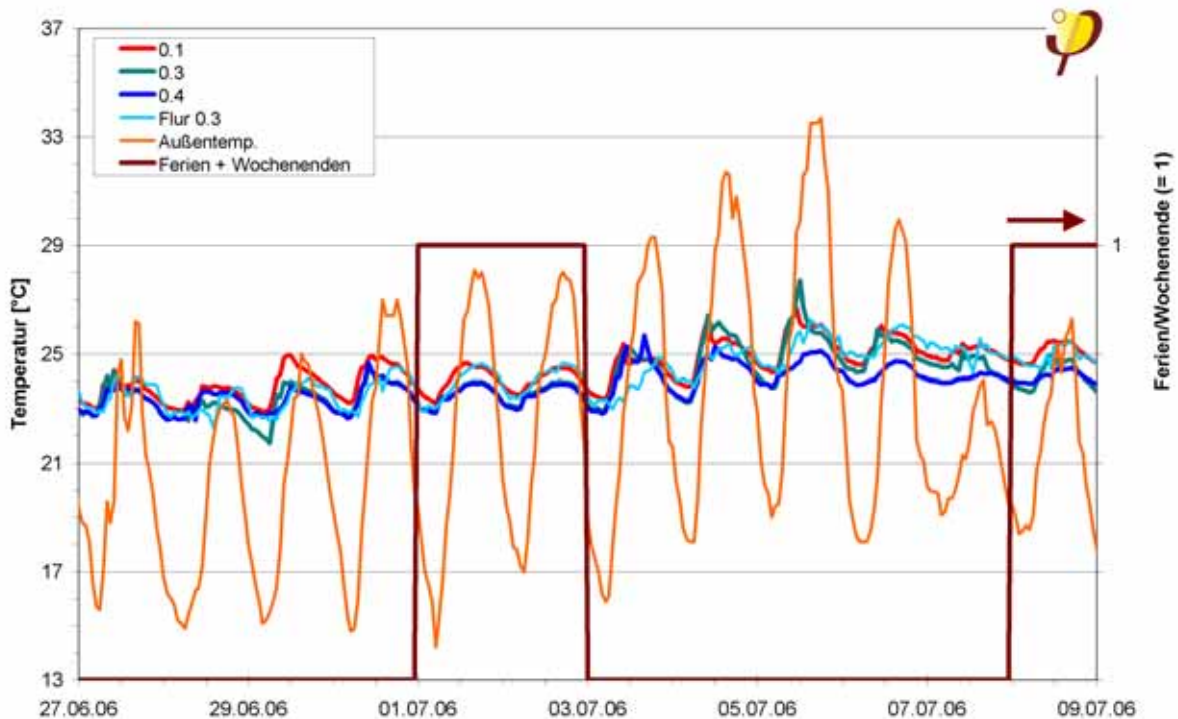


Abbildung 90: Oberer Ausschnitt der absteigend sortierten Temperaturen aller Jahresstunden in der Nutzungszeit (Werktag 8:00 bis 13:00 Uhr, ohne Schulferien) des Jahres 2006 (Stundenmittelwerte). Die Grenzwerte 25°C/10% und 27°C/10% sind eingetragen.



Für das Jahr 2006 (1000 Nutzungsstunden) ergeben sich nach Abbildung 90 bei dem wärmeren Sommer noch immer sehr gute Ergebnisse für die Klassenräume: Die 27 °C-Grenze wird überhaupt nur wenige Stunden überschritten. Nur 20 bis 46 Stunden liegen über der 25 °C-Grenze. Die Normanforderung werden also weit unterschritten. In dem Sommer 2006 betrug die mittlere Temperatur in den drei belegten Klassenräumen während der Nutzungszeit moderate 22,9 °C.

Die maximale stundenmittlere Außentemperatur außerhalb der Schulferienzeit in den beiden untersuchten Jahre betrug 33,7 °C und wurde am 05. Juni 2006 gemessen. Die Außentemperaturgänge in Abbildung 91 zeigen wie sich ab dem 29.6.2006 die Außenlufttemperatur langsam bis zum 5.7.2006 hochschwingt. In den Nachtstunden kühlt sich die Temperatur deutlich ab (Tag-Nacht-Schwankungen über 11 K) und bietet gutes Nachtlüftungspotential. Nach dem Wochenende 1./2.7.2006 steigen am Montagmorgen die Raumtemperaturen deutlich steiler und mit etwa doppelter Amplitude an als am Wochenende. Die Ursache sind die Personen in den Klassenräumen und deren Wärmeabgabe. Am Sonntag ist der Tag-Nacht Unterschied noch etwa 0,8 K in Raum 0.4, am Montag beträgt er bereits 2,4 K. Die Temperatur im fensterlosen Flur im Kern des Gebäudes (hellblaue Kurve) ist etwas zeitverzögert in ihrem Temperaturgang. Der Einfluss durch die Nutzung ist in der wärmsten Schulwoche zu erkennen: Am Montag, dem 3.7.06 erreicht Raum 0.4 noch die höchste Temperatur und wird dann an den folgenden vier Tagen zum kühlfsten der drei Klassenräume. Raum 0.3 dagegen zeigt die stärkste Kopplung an den Außentemperaturgang in den Vormittagsstunden. Möglicherweise war hier längere Zeit die Außentür zum Hof geöffnet, bzw. wurde die Außenverschattung nicht genutzt. Die Lage der Räume in dem Westflügel (Raum 0.1 Nord, Raum 0.3 Mitte, Raum 0.4 Süd) führt nicht zu den Temperaturunterschieden.



**Abbildung 91: Wärmste gemessene Außentemperaturen außerhalb der Ferienzeit und Klassenraum- sowie Flurtemperaturen im Westflügel (Stundenmittelwerte vom 27.6. bis zum 08.07.2006)**

Die Untersuchung der Sommertemperaturen zeigt, dass äußerst komfortable sommerliche Temperaturen während der für die Nutzer maßgeblichen Zeiten vorliegen. Würden die Klassenräume auch in den Nachmittagsstunden genutzt (Ganztagschule) würde das Temperaturniveau etwas höher liegen. Auch eine Vollbelegung mit Küchenbetrieb würde das Sommerniveau noch etwas anheben. Die Temperatur in den Räumen im 1. und 2. OG wird aufgrund der geringeren Verschattung durch das Gebäude und im 2. OG aufgrund der sehr großen Verglasungsflächen ebenfalls etwas höher liegen. Es ist aber davon auszugehen, dass immer noch gute Sommertemperaturen ermöglicht werden können. Wichtig ist die volle Funktionsfähigkeit und Ausnutzung der Außenverschattung besonders im 2. OG.

Das Sommerlüftungskonzept für das massive Gebäude mit den Nachtlüftungsklappen kann damit - trotz anfänglicher Regelungsprobleme - als erfolgreich beurteilt werden.

### 6.6.1.2 Oberflächentemperaturen

Auf die Behaglichkeit wirkt sich neben der Raumlufttemperatur auch die Oberflächentemperatur der Umfassungsflächen eines Raumes aus. Die empfundene „operative“ Temperatur setzt sich zur einen Hälfte aus der Luft- und zur anderen Hälfte aus der Oberflächentemperatur aller Umfassungsfläche zusammen. Zur Beurteilung der operativen Temperaturen wurden in vier Räumen die Oberflächentemperaturen in der Putzoberflächen jeweils einer Wand dauerhaft gemessen. Die





Sensoren sind in den Räumen 0.3, 0.4, 0.9 und 0.11 installiert. Um Aussagen zur Schulnutzung machen zu können, sind davon wieder die beiden Räume mit normaler Schulnutzung 0.3 und 0.4 von Interesse.

Ein wichtiges Qualitätskriterium für Gebäude sind nur kleine Temperaturunterschiede zwischen der Oberflächentemperatur der Umfassungsflächen und der Raumlufttemperatur. Dies bewirkt eine hohe Behaglichkeit beim Nutzer. Der Unterschied zwischen der Raumluft- und der mittleren Oberflächentemperatur sollte nach [Recknagel 2003] nicht mehr als etwa 3 K betragen.

Durch die hohe thermische Fensterqualität der Schule (3-fach Verglasung und gedämmte Fensterrahmen) ist die Oberflächentemperatur auch der Fenster sehr hoch. So wird eine niedrige Strahlungstemperatur-Asymmetrie in den Räumen realisiert.

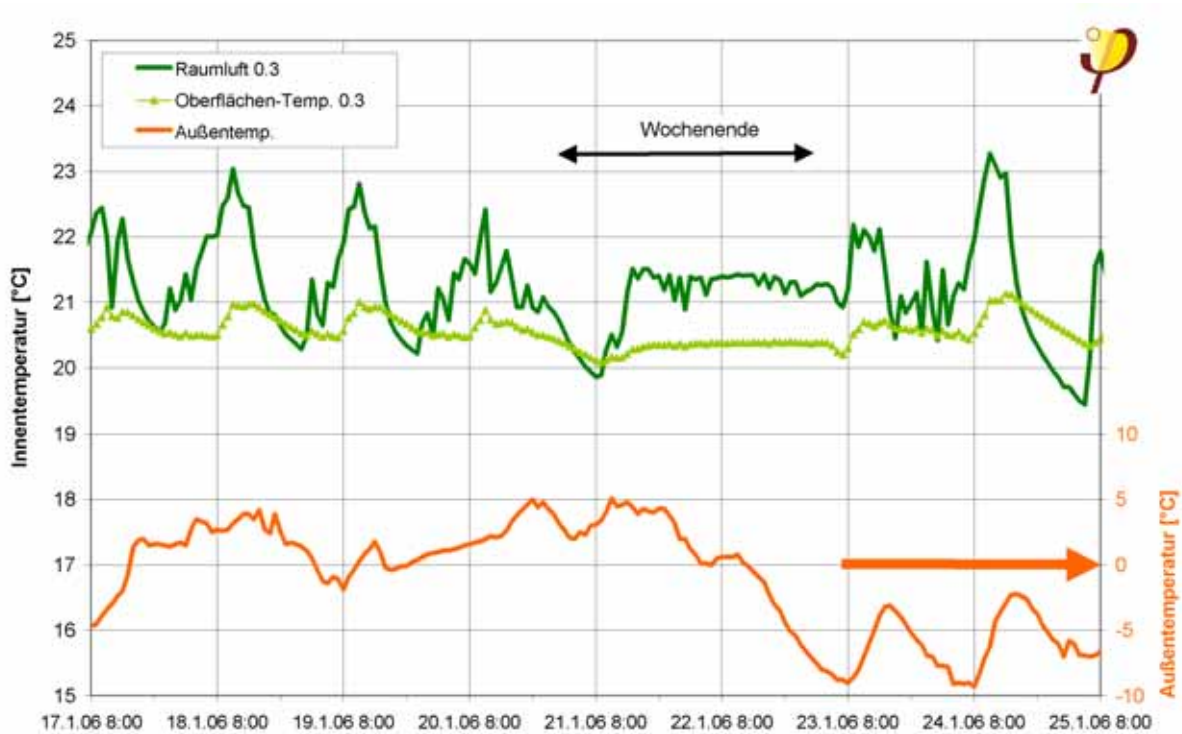
Für die Detailuntersuchung werden Beispielwochen im Winter und im Sommer ausgewählt.

### **Untersuchung in der Winterperiode**

Die niedrigste stundenmittlere Außentemperatur wurde am 24.1.06 mit  $-9,3\text{ °C}$  gemessen. Der Zeitraum 17.1. bis 25.1.2006 wurde daher ausgewählt, um den Verlauf der Oberflächentemperaturen näher zu betrachten. In Raum 0.3 ist der Oberflächentempersensor in der Spachtelung auf der Oberfläche der Beton-Innenwand in der Nähe der Klassenraumtür positioniert. Das bedeutet, er hat eine starke Temperaturkopplung zu der Masse der Betonwand. Diese ist ohne thermische Trennung mit der Betonbodenplatte verbunden (Die Fußbodendämmung liegt raumseitig auf der Bodenplatte und wird durch die Dämmschürzen ergänzt. Siehe dazu auch Abschnitt 7).

Der Temperaturverlauf des Oberflächensensors (Abbildung 92) zeigt erwartungsgemäß einen wesentlich „ruhigeren“ Verlauf mit geringeren Amplituden als der der Raumluft. Die Aufheiz- und Abkühlvorgänge erfolgen zeitverzögert. An Werktagen erfolgt etwa ab 8:00 Uhr eine Temperaturerhöhung, wogegen die Raumluft bereits 3 bis 11 Stunden zuvor wieder ansteigt. Dieser Anstieg führt in der Wandoberfläche zunächst noch zu keiner messbaren Temperaturerhöhung. Kurz vor der Zeit, in der dann die Schüler kommen, erwärmt sich auch die Wandoberfläche.

Am Samstag, den 21.1.06 fällt die Wandtemperaturerhöhung deutlich geringer aus, wobei der Raum ab etwa 9:00 Uhr auch beheizt wird. An diesem Wochenende wird eine Temperatur von etwa 21 bis  $21,5\text{ °C}$  gehalten (was anzeigt, dass keine Temperaturabsenkung erfolgte). Am Vergleich „Werktag“ zu den beiden „Wochenendtagen“ zeigt sich, dass der größere Teil der Temperaturspitzen eines Werktages auf die Wärmeabgabe der Personen zurückzuführen ist (Die Solarstrahlung war vom 17. bis zum 23.1.2006 nur sehr gering).



**Abbildung 92: Temperaturverlauf der Luft- und der Oberflächentemperatur (Stundenmittelwerte) in Raum 0.3 vom 17.1. bis zum 25.1.06 (jeweils 8:00 Uhr). Am 24.1.06 wurde die kälteste Temperatur in der gesamten Messzeit festgestellt.**

Die Lufttemperatur (in 0,9 m Höhe) liegt in dieser Winterzeit bis auf einige Nachtstunden (bei Abkühlung der Raumluft) immer über der Wandoberflächentemperatur. Das hat seine Ursache zum einen darin, dass die Beheizung über den Heizkörper zunächst an die Luft erfolgt und erst dann die Luft die Wand erwärmt (abgesehen von der Strahlungswärme der kleinen Heizkörperplatte, welche direkt die Umfassungsflächen erwärmt). Zum anderen verfügt die Betonwand über eine starke Kopplung an den kühleren Flur und an die kältere Betonbodenplatte. Von dort wird die Betonmasse abgekühlt. Die Masse der massiven Umfassungsflächen puffert die Temperaturspitzen der Raumlufttemperatur ab.

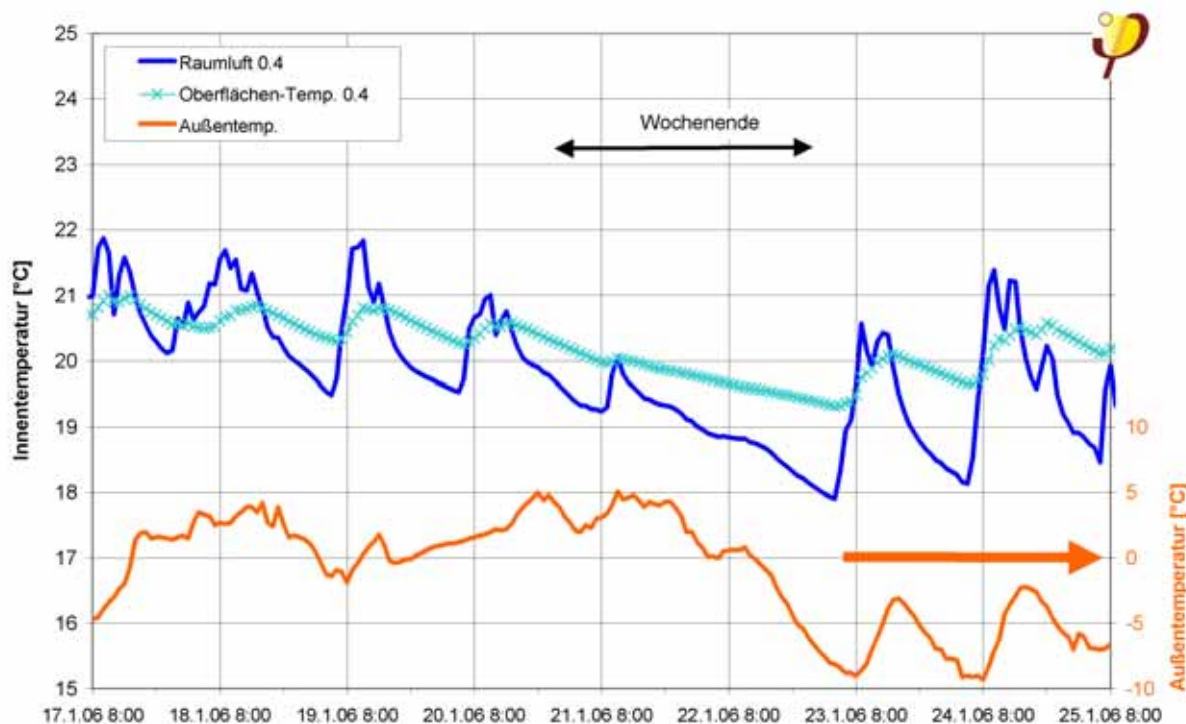
Betrachte man die Unterschiede zwischen der Raumlufttemperatur und der an der Innenwand gemessenen Oberflächentemperatur, so beträgt der Abstand zwischen beiden in der hier betrachteten kalten Periode maximal 2,2 K und im Mittel 0,6 K.

Ganz ähnlich ist das Verhalten der Temperaturen in Raum 0.4 (Abbildung 93). Hier muss allerdings abweichend ergänzt werden, dass der Oberflächentempersensor aus Platzgründen nicht direkt in der Betonwand eingebaut werden konnte. Er befindet sich in der Oberfläche einer angrenzenden Gipskartonplatte (vor dem Installationsschacht) etwa 10 cm von der Betonwand entfernt. Die Betonwand und die Gipskartonplatte sind mit Putz direkt verbunden. Die Ankopplung des Sensors an die Betonwand ist damit geringer als in Raum 0.3.

Im Prinzip ist ein ähnliches Temperaturverhalten wie in Raum 0.3 zu erkennen. Allerdings ist der Raum stärker an die Außentemperatur angekoppelt, er kühlt sich beim Absinken der Außentemperatur deutlich stärker ab als Raum 0.3.



Möglicherweise ist eine Sommerlüftungsklappe nicht dicht geschlossen. Die Oberflächentemperatur liegt damit häufiger über der Raumlufthtemperatur. Die maximale Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Raumlufthtemperatur beträgt hier 1,2 K, der Mittelwert in der betrachteten Zeit beträgt 0,6 K.



**Abbildung 93: Temperaturverlauf der Luft- und der Oberflächentemperatur (Stundenmittlwerte) in Raum 0.4 vom 17.1. bis zum 25.1.06 (jeweils 8:00 Uhr). Am 24.1.06 wurde die kälteste Temperatur in der gesamten Messzeit festgestellt.**

Für beide Räume kann damit festgestellt werden, dass die Anforderung an möglichst geringe Unterschiede zwischen den Raumlufth- und den Oberflächentemperaturen in der Winterzeit sehr gut eingehalten wird. Die geringen Unterschiede zwischen Luft- und Wandoberflächen-Temperatur führen zu einer hohen Behaglichkeit der Nutzer.

### Untersuchung in der Sommerzeit

Für die Sommerzeit wird der Zeitraum näher untersucht, in dem die wärmste gemessene Temperatur aufgetreten ist. Es ist in beiden Räumen zu erkennen (Abbildung 94 und Abbildung 95), dass sich die Oberflächentemperaturen an den warmen Tagen nur sehr langsam erwärmt. Die Tages-Lufthtemperaturspitzen liegen deutlich oberhalb der Oberflächentemperaturen. Nach der Spitzentemperatur am 5.7.06 nimmt die geringe Tagesschwankung der Oberflächentemperatur noch weiter ab und die Oberfläche kühlt langsam wieder ab. Die Oberflächentemperatur ist ebenfalls wieder zeitverzögert zur Raumlufthtemperatur. Das Temperaturniveau in Raum 0.4 ist - bei nahezu identischen Startwerten - während der „Hitzetage“ deutlich niedriger. Die Amplitude ist minimal.



Die maximal Differenz zwischen Oberflächen- und Raumlufttemperatur beträgt in dem wärmsten Zeitraum in Raum 0.3 **2,3 K** in Raum 0.4 **1,4 K**. Der Mittelwert der Abweichungen zwischen Raumluft- und Oberflächentemperatur im betrachteten Zeitraum beträgt in Raum 0.3 **0,6 K** und in Raum 0.4 **0,5 K**.

Damit zeigen diese Klassenräume ebenfalls sehr gute Ergebnisse durch geringe Temperaturunterschiede zwischen Oberflächen- und Lufttemperaturen.

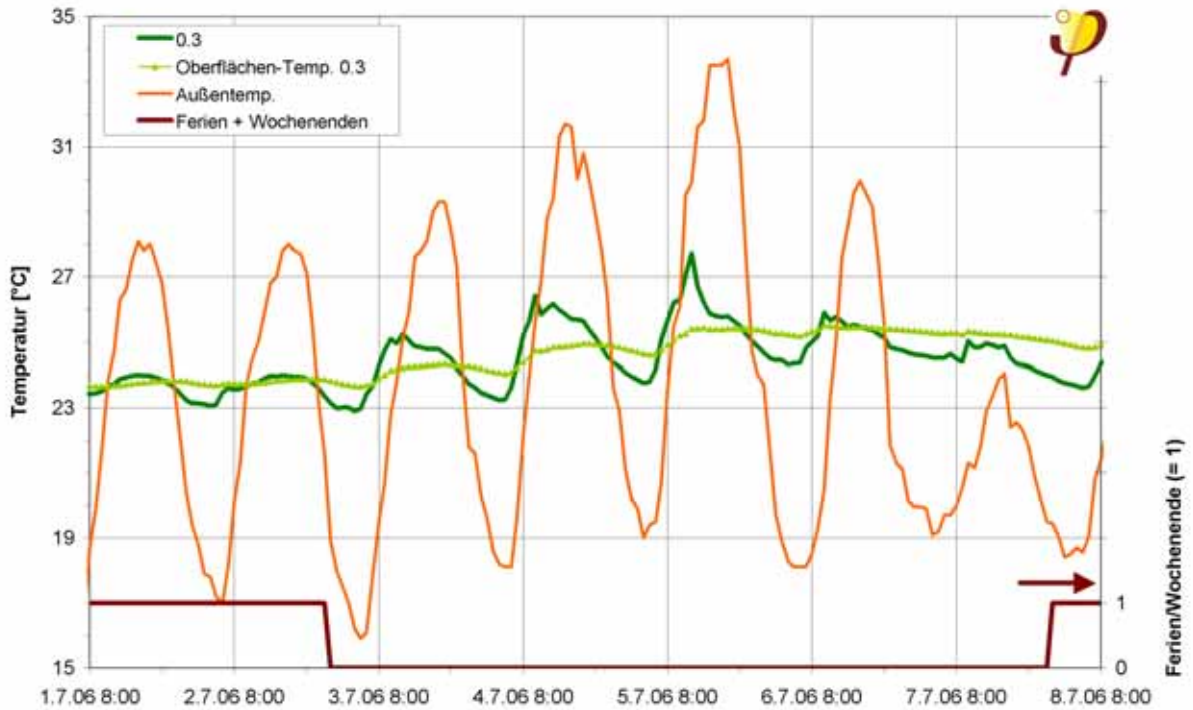


Abbildung 94: Temperaturverlauf der Luft- und der Oberflächentemperatur (Stundenmittelwerte) in Raum 0.3 vom 01.07. bis zum 08.07.06 (jeweils 8:00 Uhr). Am 05.07.06 wurde die wärmste Temperatur in der gesamten Messzeit außerhalb der Ferienzeit festgestellt. Zusätzlich ist die Wochenend- und Ferienzeit eingetragen.

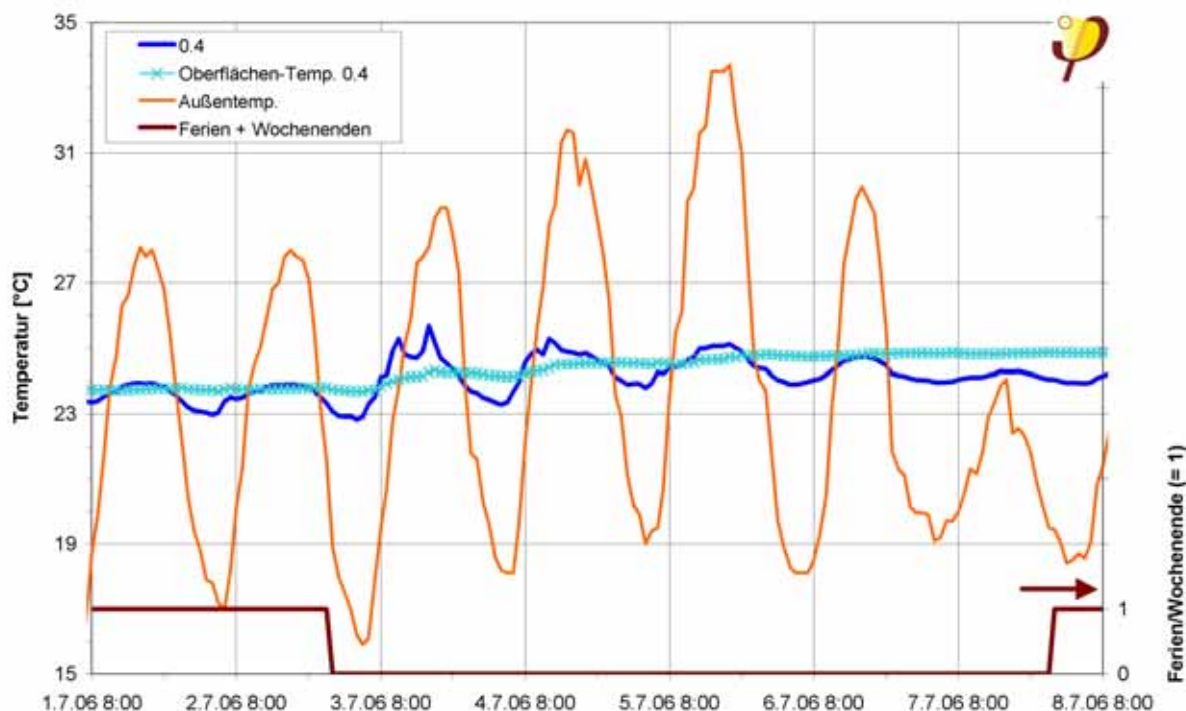


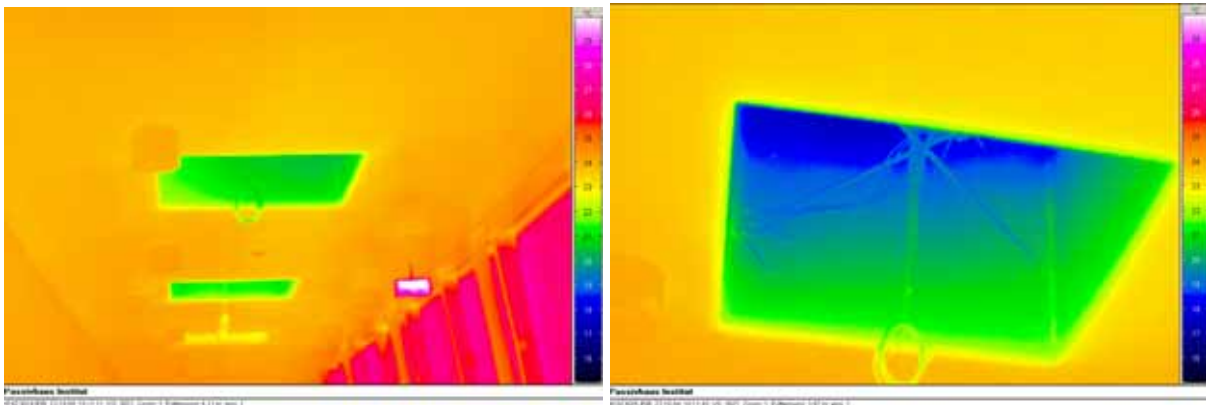
Abbildung 95: Temperaturverlauf der Luft- und der Oberflächentemperatur (Stundenmittelergebnisse) in Raum 0.4 vom 01.07. bis zum 08.07.06 (jeweils 8:00 Uhr). Am 05.07.06 wurde die wärmste Temperatur in der gesamten Messzeit außerhalb der Ferienzeit festgestellt. Zusätzlich ist die Wochenend- und Ferienzeit eingetragen.

### 6.6.1.3 Zusatzmessung KiTa und Treppenhaus Schule

Der Fokus der Untersuchungen zur Behaglichkeit im Gebäude liegt auf dem Schulbereich. Für die energetischen Untersuchungen ist das Temperaturniveau auch der KiTa von Interesse. Daher wurden mit autarken Datenloggern in der KiTa zusätzliche Temperaturmessungen durchgeführt. In der Zeit vom 15. Februar 2007 bis zum 17. März bzw. 20. März 2007 sind in der KiTa vier Gruppenräume, der Flur im EG sowie das Treppenhaus im OG im 2-Minuten-Raster gemessen worden. Gleichzeitig wurden auch in der Schule ergänzend weitere Datenlogger vom gleichen Typ und mit gleicher Programmierung montiert. Die Positionen sollten in Ergänzung zu den Dauermessungen im EG die Situation über die Höhe des Gebäudes im Kernbereich des Treppenhauses widerspiegeln. Die Messorte waren im EG in der Eingangshalle, im Treppenhaus 1. OG sowie im 2. OG direkt unter der opaken RWA-Klappe (siehe Abbildung 96). Ein baugleicher Logger wurde außen unterhalb der Wetterstation zur Messung der Außentemperatur montiert.



**Abbildung 96: Position des Temperaturdatenloggers in der „Dachöffnung“ für die RWA-Klappe im 2. OG der Schule (Westflügel).**

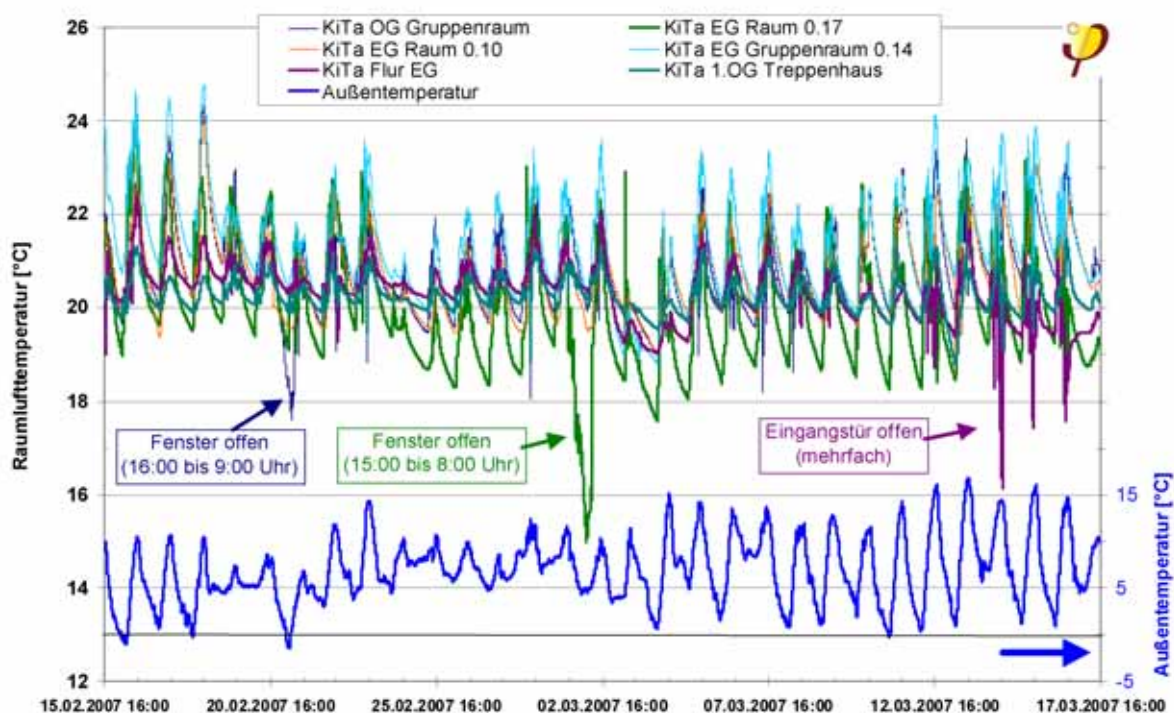


**Abbildung 97: Thermographien der RWA-Klappen im Flur im 2. OG während der Unterdruckmessung des Gebäudes.**

Die Temperaturmessungen in der KiTa zeigen deutliche Tag-Nacht-Gänge in den Gruppenräumen, etwas abgeschwächt auch im Flur und Treppenhaus. Auffällig sind einige deutliche länger anhaltende „Untertemperaturen“. In zwei Gruppenräumen war vermutlich jeweils über Nacht ein Fenster geöffnet, an einigen Tagen stand die Eingangstür der KiTa längere Zeit offen, sodass sich im gesamten Flur die Temperatur deutlich abgesenkt hat.

Der Gruppenraum 0.17 im EG fällt insgesamt durch seine niedrigeren Temperaturen auf. Es handelt sich dabei um den exponiertesten Raum Richtung Osten, welcher am meisten Außenflächen besitzt. Ob die Ursache des tieferen Temperaturniveaus in diesem Raum eine geringeren Beheizung und/oder eine geringere Nutzung war, ist nicht bekannt. Die Nutzer hatten im Jahr zuvor die mangelnde Beheizbarkeit beklagt.

Die Tagestemperaturspitzen in der KiTa sind mit Werten zwischen 23 und z.T. über 24 °C deutlich höher als in den Klassenräumen der Schule.



**Abbildung 98: Temperatur Zusatzmessung in der KiTa und von der Außenluft vom 15.02. bis zum 17.03.2007 (jeweils 16:00 Uhr) mit Datenloggern (2 Minuten Daten).**

Die Messung des Treppenhaus-Bereiches in der Schule in den unterschiedlichen Höhen ist in Abbildung 99 dargestellt. Hier zeigt sich neben dem ebenfalls deutlichen Tag-Nach-Gängen insbesondere die sehr große Amplitude der Messung bei der RWA-Klappe im 2. OG. Diese Messstelle stellt keine typische Temperatur des Gebäudes dar: Zum einen sammelt sich hier am höchsten Punkt die warme - z.T. solarerwärmte - Luft des Treppenhauses, was zu hohen Spitzenwerten bis 29 °C führt. Zum anderen stellt die Klappe selber einen thermischen Schwachpunkt der Gebäudehülle dar. Wie die Thermographiebilder bei Unterdruck zeigen (Abbildung 97) schließt die Klappe auch nicht zuverlässig luftdicht. Die Abkühlung der Außenluft in der Nacht machen sich daher deutlich bemerkbar.

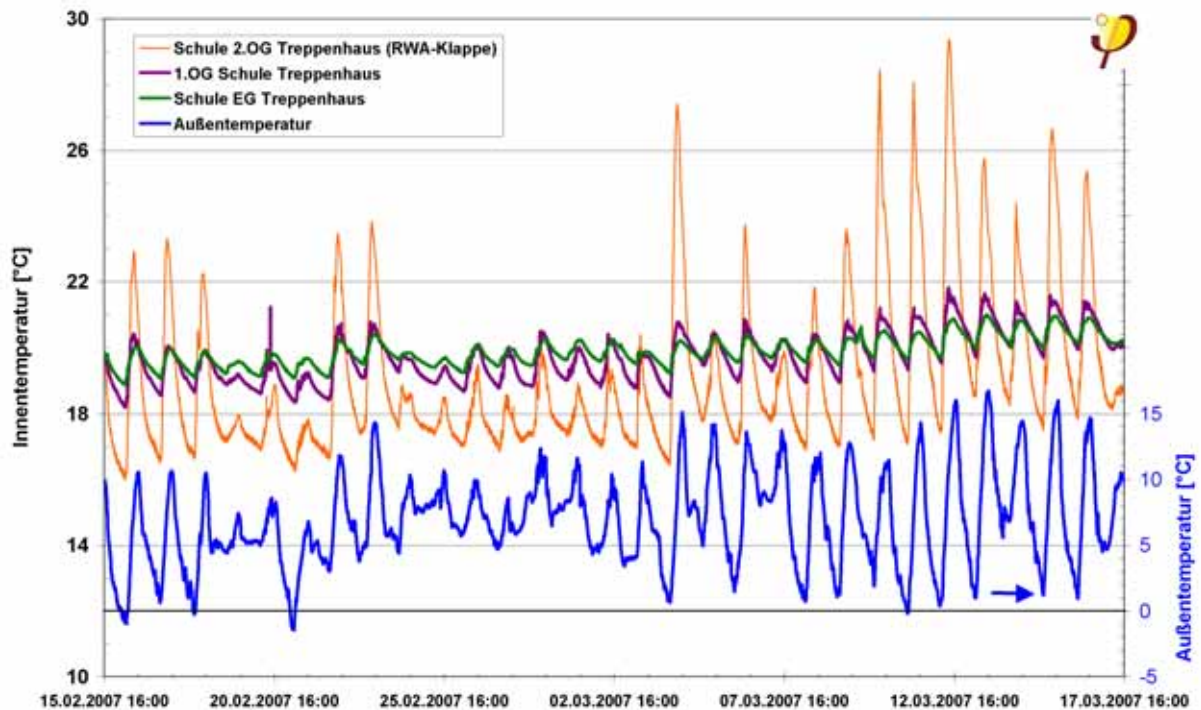


Abbildung 99: Temperatur Zusatzmessung im Treppenhaus der Schule und der Außenluft vom 15.02. bis zum 17.03.2007 (jeweils 16:00 Uhr) mit Datenloggern (2 Minuten Daten).

Von Interesse ist der Vergleich der Temperaturen KiTa zur Schule sowie der Vergleich zu den Dauermessungen in der Schule. Zur besseren Anschauung werden die Temperaturmittelwerte der einzelnen Bereiche als Tagesmittelwerte dargestellt. Dafür werden die folgenden Temperaturzonen gebildet:

- KiTa Gruppenräume,
- KiTa Flur/Treppenhaus,
- Schule Räume (alle im EG vermessenen Räume, egal wie sie genutzt wurden) und
- Schule Flure/Treppenhaus (inkl. Sensor unter RWA-Klappe).

In der kälteren Anfangszeit des gut einmonatigen Zeitraums der Sondermessung liegen die KiTa-Temperaturen beider Zonen über denen der Schule. Ab dem 10. bzw. 11. März 2007 liegen die Schultemperaturen über denen der KiTa (Abbildung 100). Die folgenden Mittelwerte der Zonen in der Zeit vom 16.02. bis inkl. zum 16.03.2007 haben sich ergeben:

Tabelle 25: Temperaturmittelwerte der Zonen in KiTa und Schule während der Sondermessung

	Temperaturmittelwerte [°C]
Schule Räume	20,5
KiTa Gruppenräume	20,7
Schule Treppenhaus/Flure	19,7
KiTa Treppenhaus/Flur	20,3
Außentemperatur	7,0





Auch wenn die Messdaten der exponiert gelegenen RWA-Klappe in der Schule beim Mittelwert nicht berücksichtigt wird, zeigt sich kaum eine Veränderung des Ergebnisses. In dem hier untersuchten Zeitraum liegt der Gesamt-Mittelwert in der KiTa mit 20,5 °C etwa 0,4 K über dem der Schule.

Die Messdaten wurden in den angepassten Energiebilanzen (PHPP) der beiden Gebäudeteile verwendet.

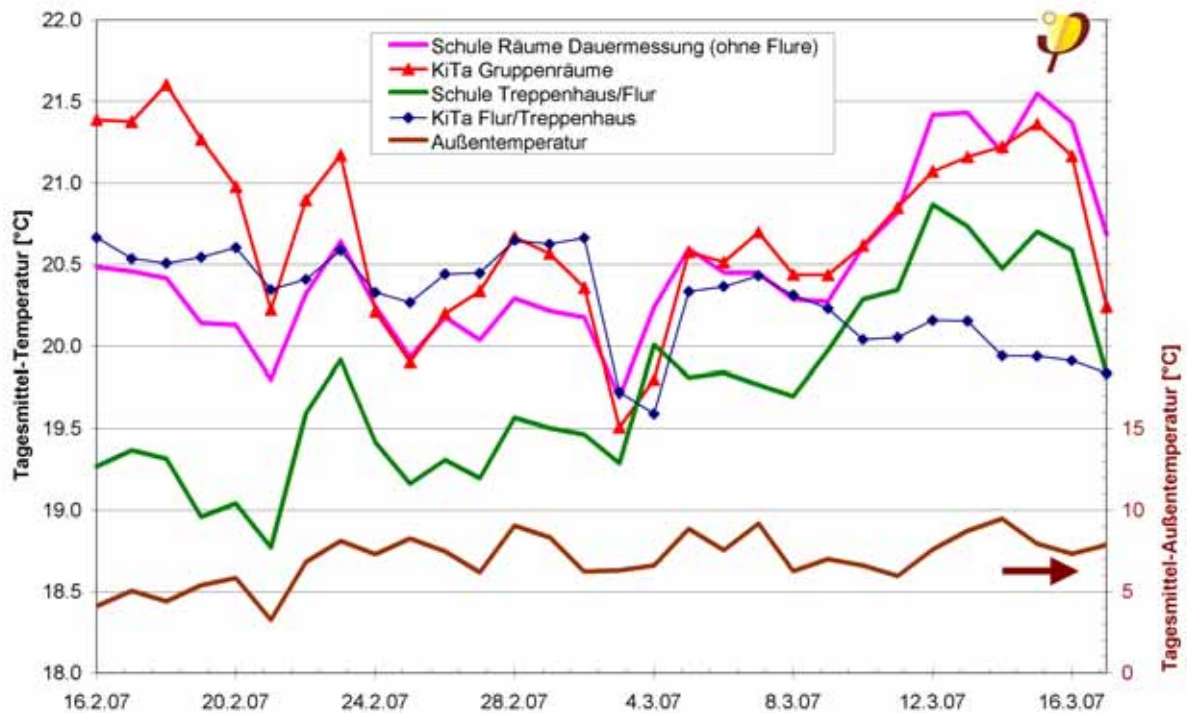
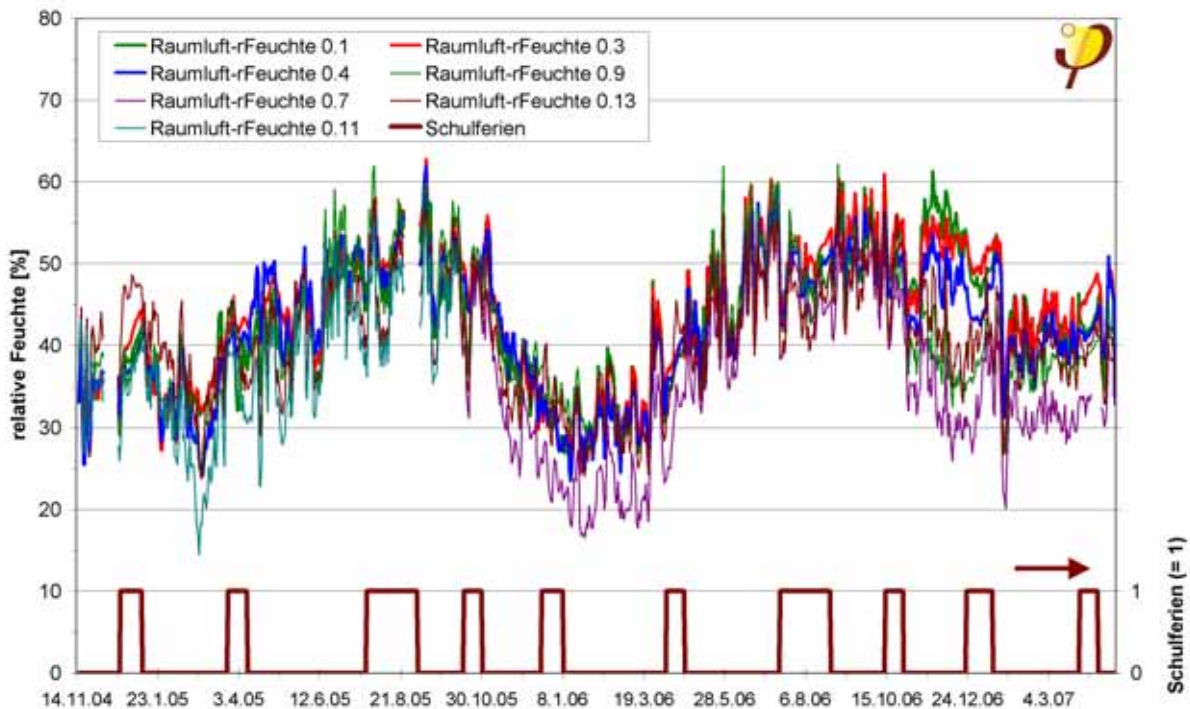


Abbildung 100: Tagesmittlere Temperaturen der unterschiedlichen Gebäudezonen (Daten aus der Sondermessung mit Datenloggern und der Dauermessung) im Zeitraum 16.2. bis 16.3.2007.

## 6.6.2 Raumlufffeuchte

Ein weiterer Parameter zur Beurteilung der Behaglichkeit im Raum ist die relative Raumlufffeuchte. Diese wurde ebenfalls in sechs Räumen im EG des Gebäudes während der gesamten Untersuchungszeit gemessen. Der Sensor aus Raum 0.11 wurde am 11.10.2005 in Raum 0.7 verlegt (vgl. dazu Information im Abschnitt Temperaturmessungen). Einen Überblick über die Tagesmittelwerte der gesamte Messzeit zeigt Abbildung 101.



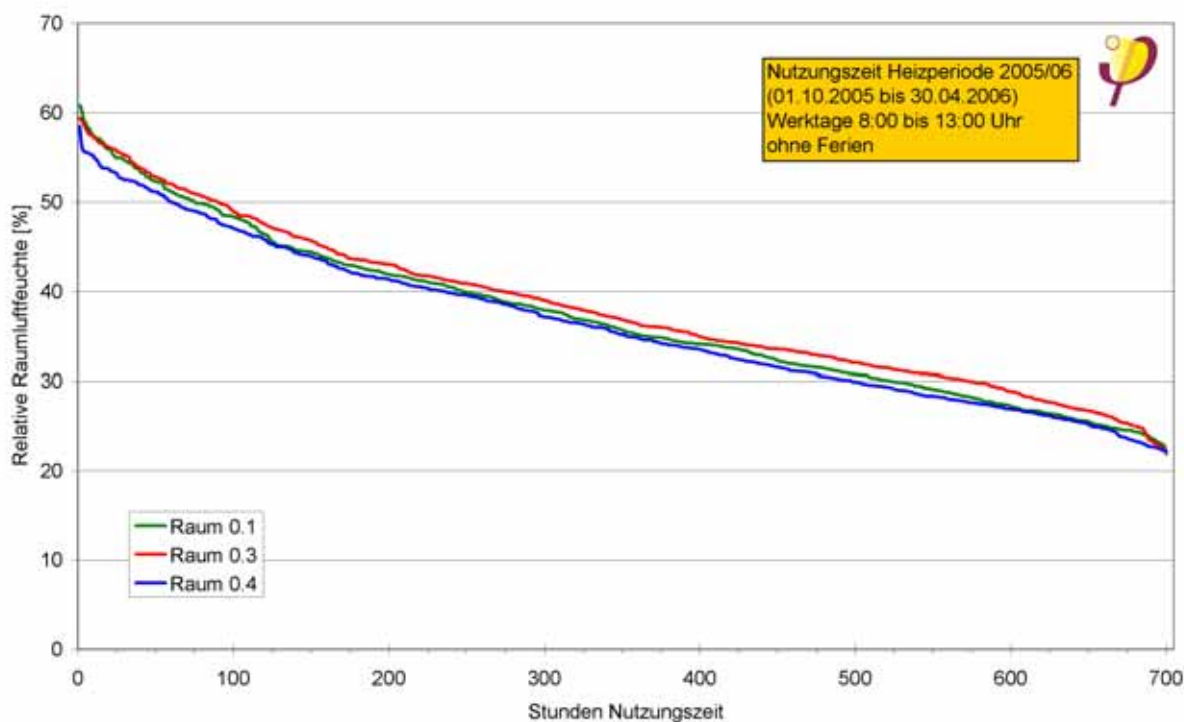
**Abbildung 101:** Verlauf der tagesmittleren relativen Raumlufffeuchten während der gesamten Messzeit (16.11.2004 bis 1.5.2007) in sieben Räumen im EG (Umbau Sensor aus Raum 0.11 in Raum 0.7 am 11.10.2005).

In der Darstellung der tagesmittleren relativen Luftfechtigkeiten sind bereits nur gering genutzte Räume durch niedrigere Feuchten in der Winterzeit zu erkennen. Von besonderem Interesse im Zusammenhang mit der Raumlufffeuchte sind die Winterperioden, insbesondere die drei belegten Klassenräume. Der maßgebliche winterliche Feuchteeintrag erfolgt in einer Schule allein durch die Personen, da keine weiteren nennenswerten Feuchtequellen (Duschen, Baden, Kochen, Pflanzen) vorhanden sind.

Betrachtet werden auch hier wieder die als Anwesenheitszeiten „bezeichneten“ Stunden von 8:00 bis 13:00 Uhr an Werktagen (ohne Ferien). Die Daten der Heizperiode absteigend sortiert zeigt Abbildung 102. Es liegen zwischen 126 und 201 Stunden der insgesamt 700 Nutzungsstunden unter 30 % relativer Luftfeuchte. Im Durchschnitt der Heizperiode lagen die relativen Feuchten im Mittel während der Nutzungszeit bei 36,5 bis 37,3 %. Im milderen Folgewinter betrug die rel. Feuchte der drei Räume 46,5 %.



Eine etwas höhere Luftfeuchte wäre wünschenswert, diese kann sich allerdings durch den hygienisch notwendigen Luftaustausch und die fehlenden Feuchtequellen nicht einstellen. Es ist hilfreich, die Lüftungszeiten am Nachmittag auf ein Minimum zu reduzieren, bzw. das tägliche Ende der Lüftungsanforderung gut an das durchschnittlichen Unterrichtsende anzupassen. Die längere Be- und Entlüftung unbe nutzter Klassenräume führt im Winter zu unnötig niedrigen relativen Raumluftfeuchten: die in den Oberflächen von den Raumumfassungsflächen und Möbeln etc. gespeicherte Feuchte wird noch weiter reduziert.



**Abbildung 102: Stundenmittelwerte der relativen Feuchte in drei Klassenräumen absteigend sortiert in der Heizperiode 2005/2006 (01.10.2005 bis 30.4.2006, nur Nutzungsstunden an Werktagen 8:00 bis 13:00 Uhr ohne Ferien).**

Betrachtet man in Abbildung 103 den Verlauf der relativen Feuchte in der Raumluft der drei Klassenräumen in der kältesten - und damit in Bezug auf die Feuchte kritischsten Zeit - zeigt sich deutlich der Einfluss durch die Nutzer, die Lüftungsanlage und die Außentemperatur: An Werktagen sinkt die Luftfeuchte mit dem Beginn der Lüftungszeit (5:00 Uhr bzw. 6:00 Uhr) aufgrund der eingeblasenen trockenen Außenluft zunächst ab. Ab etwa 8:00 befeuchten die anwesenden Personen die Luft wieder und sie steigt bei Außentemperaturen um den Nullpunkt wieder auf Werte zwischen 35 bis 41 %. Die Tagesspitzen werden zwischen 9:00 und 12:00 Uhr festgestellt. Nach dem die Schulklasse den Raum wieder verlassen hat, sinken die Feuchten erwartungsgemäß wieder ab. Bei abgeschalteter Lüftung am Nachmittag und über Nacht halten sich die Feuchten relativ konstant. Am Montag, den 23.01.06 macht sich dann der starke Außentemperaturabfall deutlich bemerkbar. Mit dem Beginn der Lüftungszeit sinkt die relative Feuchte auf minimale Werte ab, bis die Personen wieder eine „Luftbefeuchtung“ um etwa 5 bis 6 % verursachen. Die am



Tag um etwa 6 K auf  $-3,1\text{ °C}$  angestiegene Außentemperatur bringt wieder deutlich feuchtere Luft mit in den Raum, sodass in der Nacht zwischen etwa 28 bis 31 % vorhanden sind. Am nächsten Tag wiederholt sich der Vorgang wieder in etwa gleicher Form.

Es wird damit deutlich, dass nur die kalten Außentemperaturen von deutlich unter minus  $5\text{ °C}$  zu niedrigen Raumlufffeuchten führen. Eine strenge Begrenzung der Lüftungszeiten an das hygienisch notwendige Maß (inkl. ausreichender Vorspülzeit) ist eine anzurathende Maßnahme. In gewissem Umfang ist es hilfreich, wenn in den Klassenräumen einige Pflanzen gehalten werden würden. Diese geben das Gießwasser zum allergrößten Teil über die Blätter wieder an die Raumluff ab, was einen positiven - wenn auch begrenzten - Effekt auf die Raumlufffeuchte hätte. Aufgrund der Messwerte kann aus unserer Sicht nicht zu einer Raumluffbefeuchtung geraten werden. Diese könnte ggf. zu ganz anderen, aus hygienischer Sicht problematischeren, Raumluffqualitätsproblemen führen.

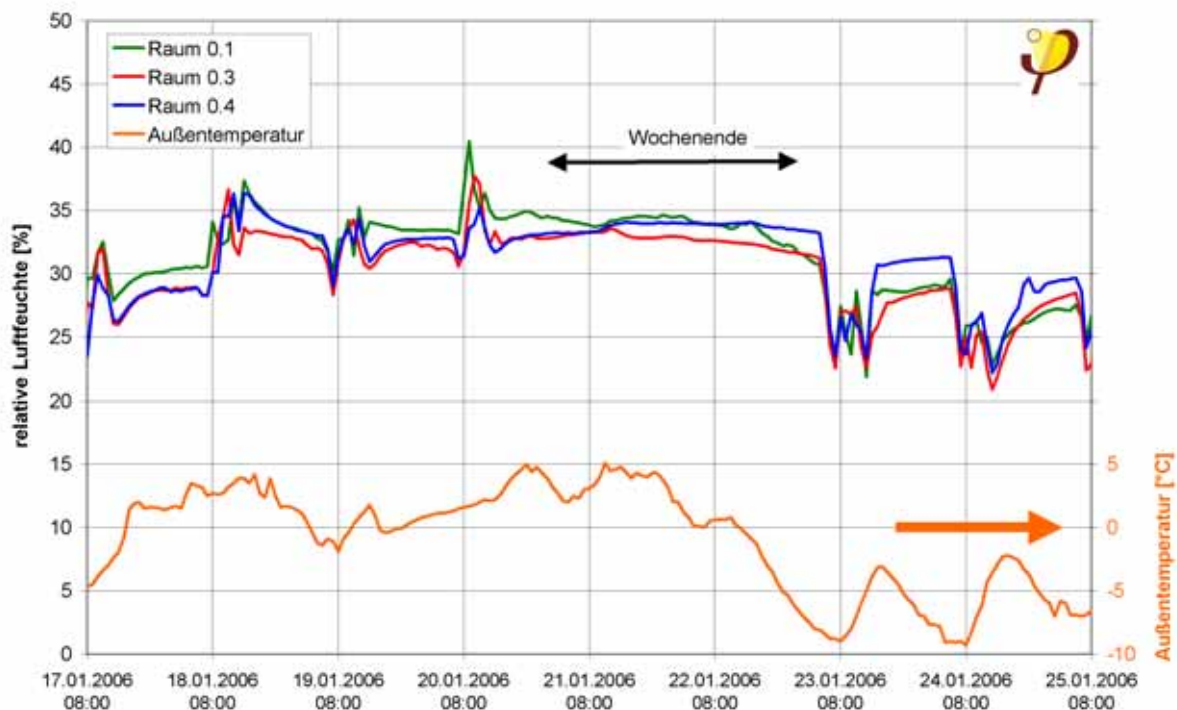


Abbildung 103: Stundenmittlere relative Raumlufffeuchten in drei Klassenräumen vom 17.1. bis zum 25.1.06 (jeweils 8:00 Uhr). Am 24.1.06 wurde die kälteste Temperatur in der gesamten Messzeit festgestellt.

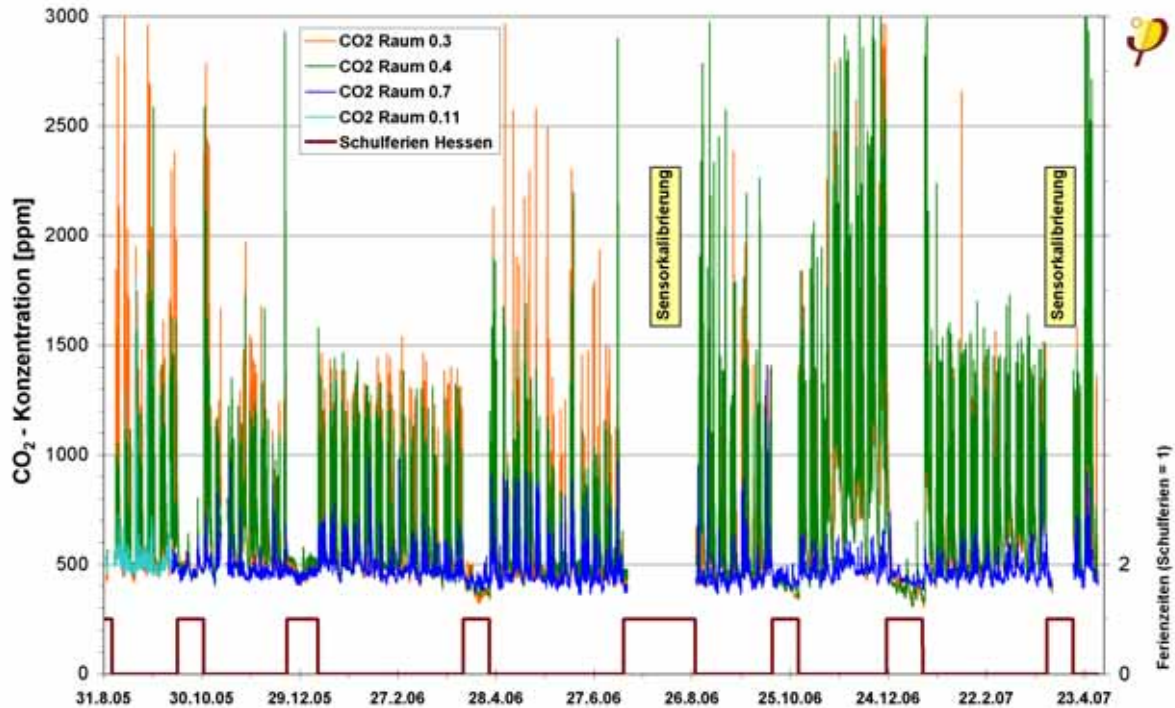


### 6.6.3 CO<sub>2</sub>-Messungen

Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wurde in vier Klassenräumen im EG der Schule im 10 Minuten-Intervall gemessen. Der Sensor im nahezu ungenutzten Raum 0.9 zeigte über die Messzeit eine starke Drift und konnte daher nicht ausgewertet werden. Am 11.10.2005 wurde ein CO<sub>2</sub>-Sensor vom Raum 0.11 (Kirchennutzung) in den Raum 0.7 (Schulnutzung) umgebaut, um eine typische Schulnutzung messen zu können.

Die Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentration dienen als einfach messbare Parameter zur Beurteilung der Luftqualität („Leitgas“). Studien zeigen, dass die Konzentrationsfähigkeit von Personen bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen höher ist [Myhrvold 1996] [Wargocki 2000] und [Shaughnessy 2005]. Bei höheren Konzentrationen können vereinzelt Müdigkeit, Konzentrationsschwäche etc. auftreten [UBA 2000]. Für Arbeits- und Versammlungsräume, welche über raumluftechnische Anlagen verfügen, legt die [DIN 1946-2], in ihren gesundheitstechnischen Anforderungen daher fest, dass der Luftaustausch so geregelt sein muss, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration 1500 ppm nicht überschreitet. In der aktuellen Norm EN 13779 werden vier „RAL-Klassen“ zur Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft angegeben. Diese RAL-Klassen geben Konzentrationen über der Außenluft von bis zu 400 ppm („RAL 1“) bis über 1000 ppm („RAL 4“) an.

Dargestellt werden die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vom Zeitraum 05. September 2005 bis zum 01. Mai 2007. Einen Gesamtüberblick gibt Abbildung 104. Durch die eingetragenen Schulferienzeiten sind die niedrigen Konzentrationen zu diesen Zeiten verständlich. Auffällig ist, dass Bereiche mit ganz unterschiedlichen maximalen Konzentrationen zu erkennen sind. Daher wird der gesamte Zeitraum zunächst in vier Teilen vergrößert dargestellt und untersucht.

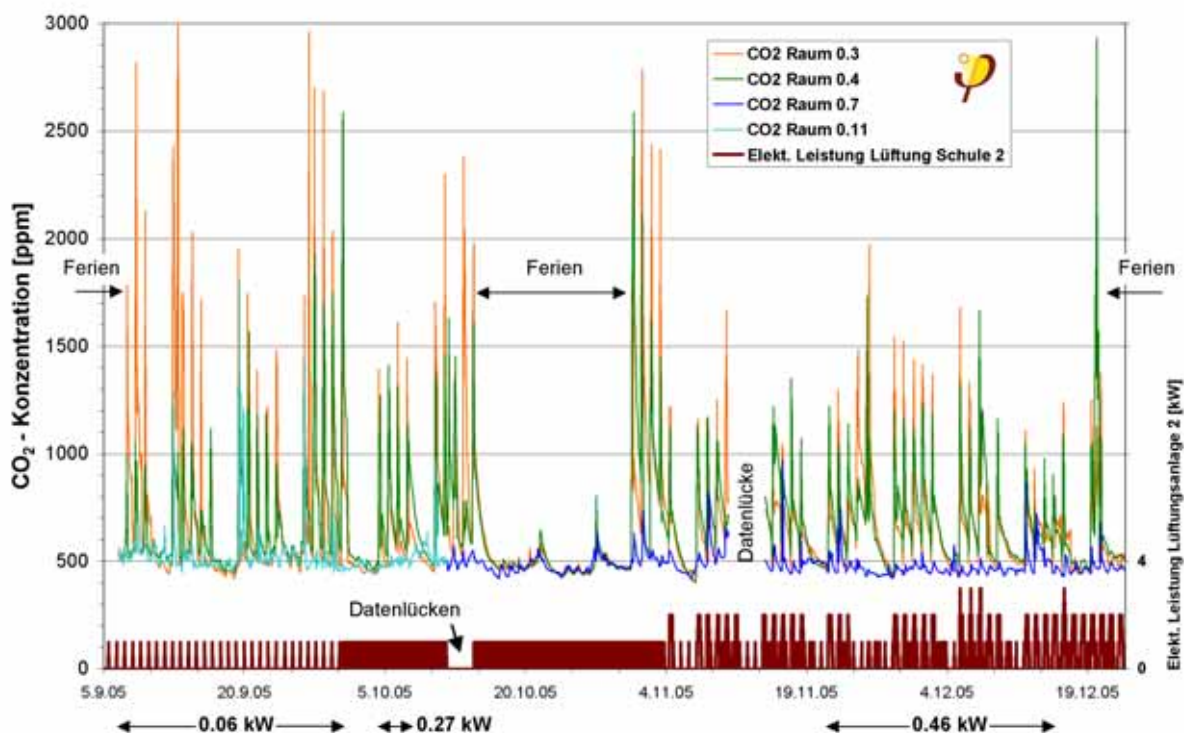


**Abbildung 104: Stunden-Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von vier Räumen und den Schulferienzeiten im Zeitraum 05.09.2005 bis 01.05.2007.**

Im ersten Teilzeitraum vom 5.9. bis zum 23.12.2005 sind zunächst deutlich die Unterschiede zwischen Wochentagen und Wochenenden zu erkennen: Die Wochenblöcke mit höheren Konzentrationen setzen sich deutlich ab. Weiterhin zeigt sich, dass es Zeiten mit Stundenmittelwerten deutlich über dem angestrebten Grenzwert von 1500 ppm gibt. In einigen Wochen werden regelmäßig die 2000 ppm überschritten, kurzzeitig sogar die 2500 ppm Grenze (z.B. 06.09. bis 01.10.2005). Wenn es sich dabei auch nur um einzelne Stunden handelt, ist klar, dass hier kein optimaler Betrieb der Anlage vorliegt, da es auch Wochen mit sehr guten Ergebnissen gibt (21.11. bis 17.12.2005). Um die Ursache für die zeitweise erhöhten Konzentrationen klären zu können, sind Daten über den Luftwechsel der einzelnen Räume notwendig. Diese wurden allerdings raumweise nicht gemessen, auch der Gesamtvolumenstrom der Lüftungsgeräte liegt auf der GLT nur in Fragmenten vor. Daher wurde der weitgehend auswertbare Stromverbrauch der Lüftungsanlage „Schule 2“ herangezogen (GLT-Daten). Die Anlage versorgt unter anderem die beiden als Klassenräume genutzten Räume 0.3 und 0.4. Die anderen beiden Räume wurden nicht schultypisch genutzt (Raum 0.7 an einigen Tagen Frühbetreuung von Schülern und Raum 0.11 Nutzung durch die Kirchengemeinde). Auch wenn die Stromzähler mit einer Kilowattstunde über eine recht grobe Auflösung verfügen, können die Daten hier helfen, um die Ursache zu klären. Da die Räume über das Wochen-Zeitprogramm für genutzte Schulräume angefordert werden (vergleiche dazu auch Abbildung 50) kann davon ausgegangen werden, dass die Räume jeweils bei Betrieb während der normalen Nutzungsstunden (hier 8:00 bis 13:00 Uhr, später bis 14:00 Uhr) von der Anlage mit Zuluft versorgt werden. So können für die beiden Klassenräume 0.3 und 0.4 Rückschlüsse vom Stromverbrauch der Anlage (hier:



elektrische Leistung) zur Raumluftqualität in Punkto CO<sub>2</sub>-Konzentration gezogen werden.

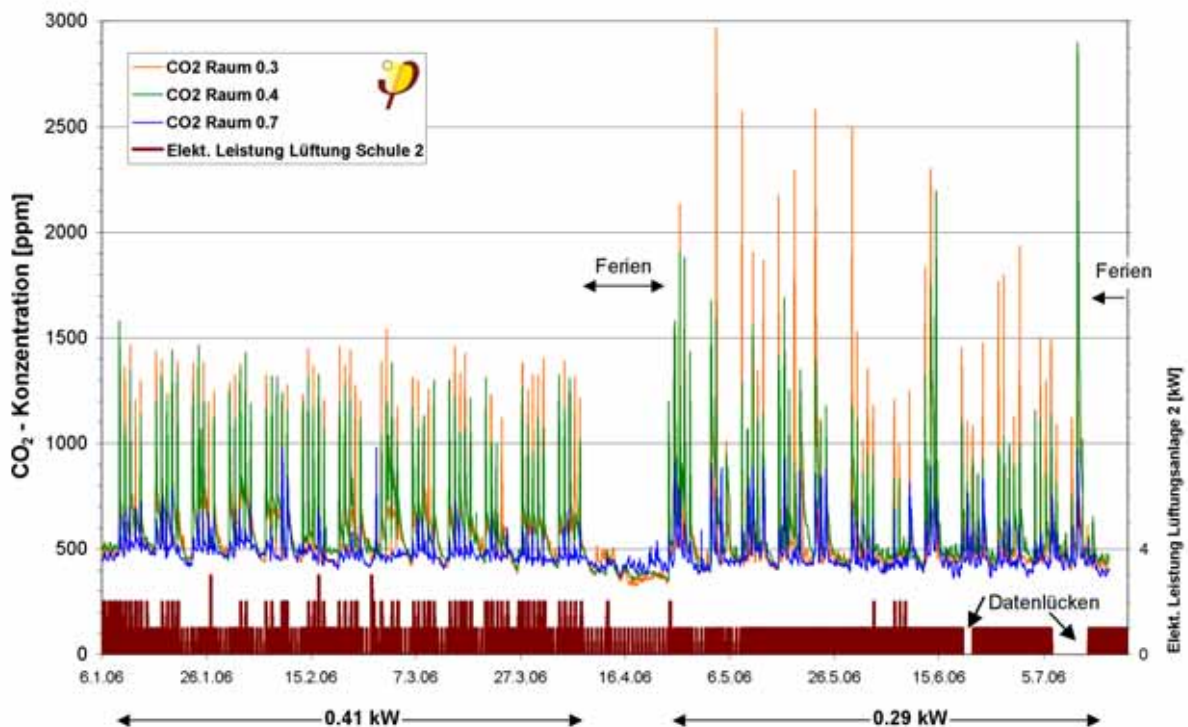


**Abbildung 105: Stunden-Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von vier Räumen und der elektrischen Leistung der Lüftungsanlage „Schule 2“ im Zeitraum 05.09.2005 bis 23.12.2005.**

Die Mittelwerte der elektrischen Leistung für drei Zeitbereiche sind unter der Grafik dargestellt. Hier wird deutlich, dass nur im letzten Zeitbereich (21.11. bis 16.12.2005) mit  $P_{el} = 0,46 \text{ kW}$  der planungsgemäße „Normalbetrieb“ der Lüftungsanlage vorlag: Hier gab nur vereinzelte kurzzeitige Überschreitungen der 1500 ppm - Marke. Die anderen beiden Bereiche zeigen erhöhte Konzentrationen bei deutlich niedrigeren mittleren elektrischen Leistungen. Die Ursachen der „gestörten“ Betriebsweise der Lüftungsanlage sind ganz unterschiedlich und können hier nicht im Detail beleuchtet werden. Festzustellen ist auf jeden Fall der kausale Zusammenhang zwischen dem Zustand den wir hier als planungsgemäßen „Normalbetrieb“ bezeichnen und der dann guten Luftqualität im Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration als Leitgas. Die Grafik zeigt daneben auch, dass in den Herbstferien die Anlage betrieben wurde, obwohl keine Nutzung durch die Schulklassen vorhanden war (Stromverbrauch der beiden Lüftungsgeräte „Schule 1“ und „Schule 2“ während der Herbstferien 416 kWh, obwohl vermutlich nur in den Kirchenräumen und in der Hessenagentur Nutzung stattfand).

Einzelne Überschreitungen der 1500 ppm können ganz unterschiedliche Ursachen haben: Wenn Sondernutzungen außerhalb der Lüftungszeiten mit vielen Personen (z.B. Elternabend, AG-Treffen) nicht im Zeitprogramm der GLT hinterlegt werden, ist der Raum nicht mit Zuluft versorgt. Oder aber der Raum ist „überbelegt“, indem z.B. 30 oder 40 Personen anwesend sind, anstelle der ca. 22, für welche die Luftmenge ausgelegt wurde.

Ein solches Beispiel zeigt die Überschreitung am 25.11.2005 in Raum 0.3 mit knapp 2000 ppm. Der Spitzenwert wurde um 17:00 Uhr, also außerhalb der normalen Nutzungs- und damit Lüftungszeit gemessen. Die Eingabe der Sondernutzungszeiten durch den Schulhausverwalter ist sinnvoll und wünschenswert. Allerdings ist es nicht anzustreben, die Lüftungsanlage auf den Volumenstrom für eine „Überbelegung“ auszulegen. In solchen seltenen Einzelfällen kann problemlos auch das Fenster geöffnet werden (Insbesondere da dann auch eine Temperaturerhöhung durch die vielen Personen vorliegt. Das kann in diesem Fall bei der Temperaturmessung tatsächlich nachgewiesen werden). Bei der Überdimensionierung einer Lüftungsanlage und der Annahme, dass diese dann nicht nur zu den wirklich notwendigen Zeiten höhere Volumenströme einbläst, könnten andere, gravierendere Probleme entstehen: Höhere Investition- und Betriebskosten, deutlich höhere Lüftungswärmeverluste, erhöhte elektrische Energieverbräuche für die Lüftungsanlage und - besonders wichtig für die Nutzer - trockene Luft. Bei der Riedbergschule sind Konstantvolumenstromvorrichtungen für die Klassenräume eingesetzt worden, sodass der Volumenstrom ohne Nachrüstung nicht weiter erhöht werden könnten.



**Abbildung 106: Stunden-Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von drei Räumen und der elektrischen Leistung der Lüftungsanlage „Schule 2“ im Zeitraum 06.01.2006 bis 15.07.2006.**

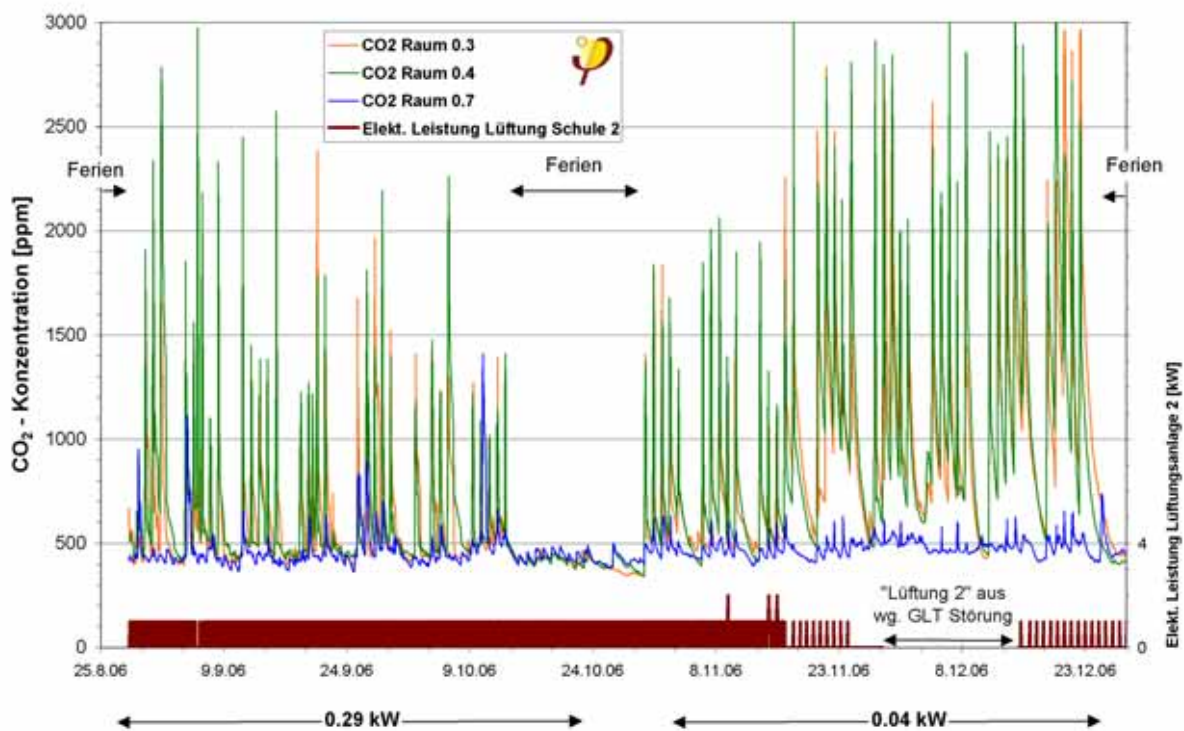
Auch der Zeitraum 06.01. bis 15.07.2006 zeigt die gleichen Ergebnisse: Betriebszeiten mit zu geringen elektrischen Leistungen - sprich zu niedrigen Luftwechsell - ergeben Überschreitungen der 1500 ppm Grenze. Der Normalbetrieb (hier im Mittel vom 09.01. bis zum 08.04.2006  $P_{el} = 0,41$  kW) zeigt sehr gute Luftqualitäten für Klassenräume.





## CO<sub>2</sub>-Konzentrationen während der Ausfallzeit der Lüftungsanlage

Der Einfluss der Lüftungsanlage auf die Raumluftqualität zeigt sich besonders eindrucksvoll in Zeiträumen, in denen eben diese ausgefallen ist. Im November 2006 ist nach einer Brandschutzübung durch eine GLT Störung die Lüftungsanlage „Schule 2“ komplett über Wochen ausgefallen. Der Stromverbrauch wurde eine Zeit lang nicht aufgezeichnet (Ausfall einer GLT Schnittstelle) bzw. zeigt nur noch Stand-by-Verbräuche der Anlage. Da die Unterrichtsräume normal weitergenutzt wurden, kann dieser Zeitraum als Vergleich für den Betrieb ohne Lüftungsanlage herangezogen werden (Abbildung 107). Die maximalen Stundenmittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration erreichen täglich Werte zwischen 2000 und 3000 ppm. Diese liegen damit deutlich zu hoch. Die schlechte Luftqualität wurde durch die Lehrerinnen bemerkt und als Mangel an den Schulhausverwalter gemeldet. Die Lehrerinnen haben während der Ausfallzeit der Anlage zusätzlich über die Fenster gelüftet (telefonische Information vom 04.07.2007 nach Befragung der Lehrkräfte von Frau Pandrick / Sekretariat). Ein Teil dieses Zeitraumes ohne Lüftungsfunktion ist weiter unten in Abbildung 114 vergrößert dargestellt.



**Abbildung 107: Stunden-Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von drei Räumen und der elektrischen Leistung der Lüftungsanlage „Schule 2“ im Zeitraum 29.08.2006 bis 23.12.2006. Ab 17.11.2006 wurde die Lüftungsanlage „Schule 2“ nicht mehr bestimmungsgemäß betrieben.**

Ab etwa 23. Januar 2007 wurde die Anlage wieder im Normalbetrieb gefahren, was sich wieder deutlich an den sehr guten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und den höheren elektrischen Leistungen zeigt (Abbildung 108). Der eine herausragende CO<sub>2</sub>-Peak am 06.02.2007 mit über 2500 ppm kennzeichnet wieder eine Sondernutzung, er wurde um 21:00 Uhr gemessen.

Im Vergleich zu fenstergelüfteten Klassenräumen mit Werten bis deutlich über 4500 ppm und Überschreitungen der 1500 ppm Grenze zu 66% der Unterrichtszeit [Pfluger 2006-2] zeigt sich hier der Vorteil der kontrollierten Lüftung sehr eindrucksvoll.

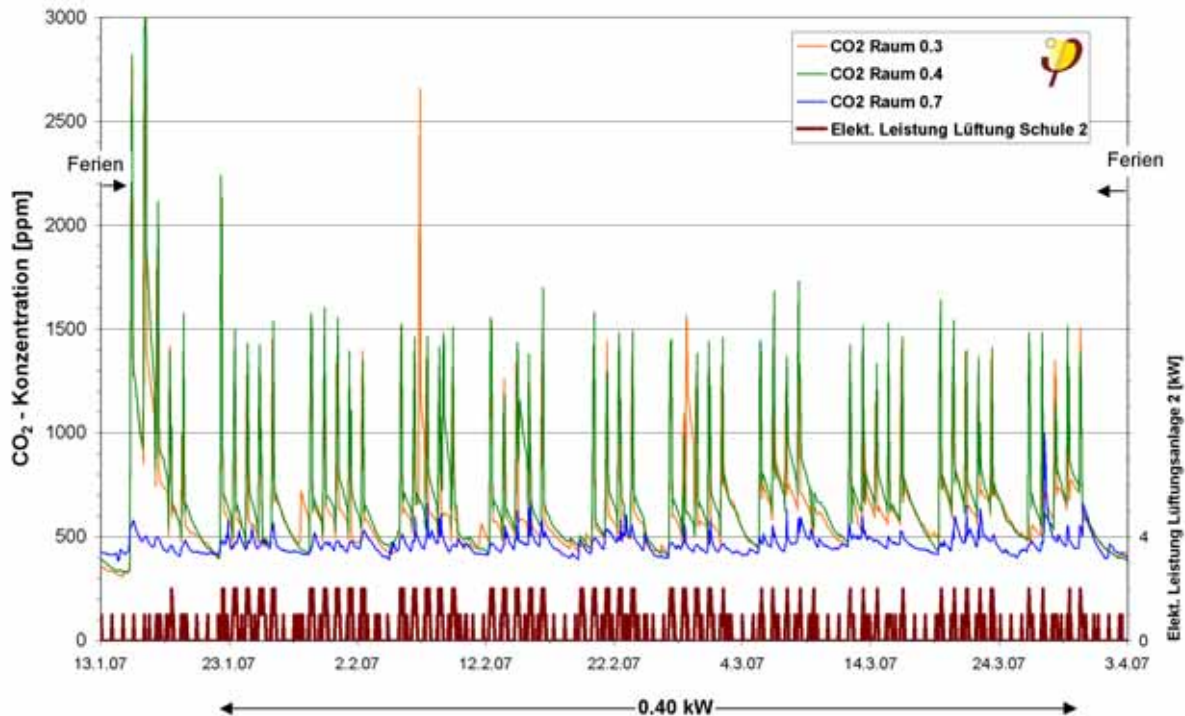


Abbildung 108: Stunden-Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von drei Räumen und der elektrischen Leistung der Lüftungsanlage „Schule 2“ im Zeitraum 13.01.2007 bis 03.04.2007.

### 6.6.3.1 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nur während der Nutzungsstunden

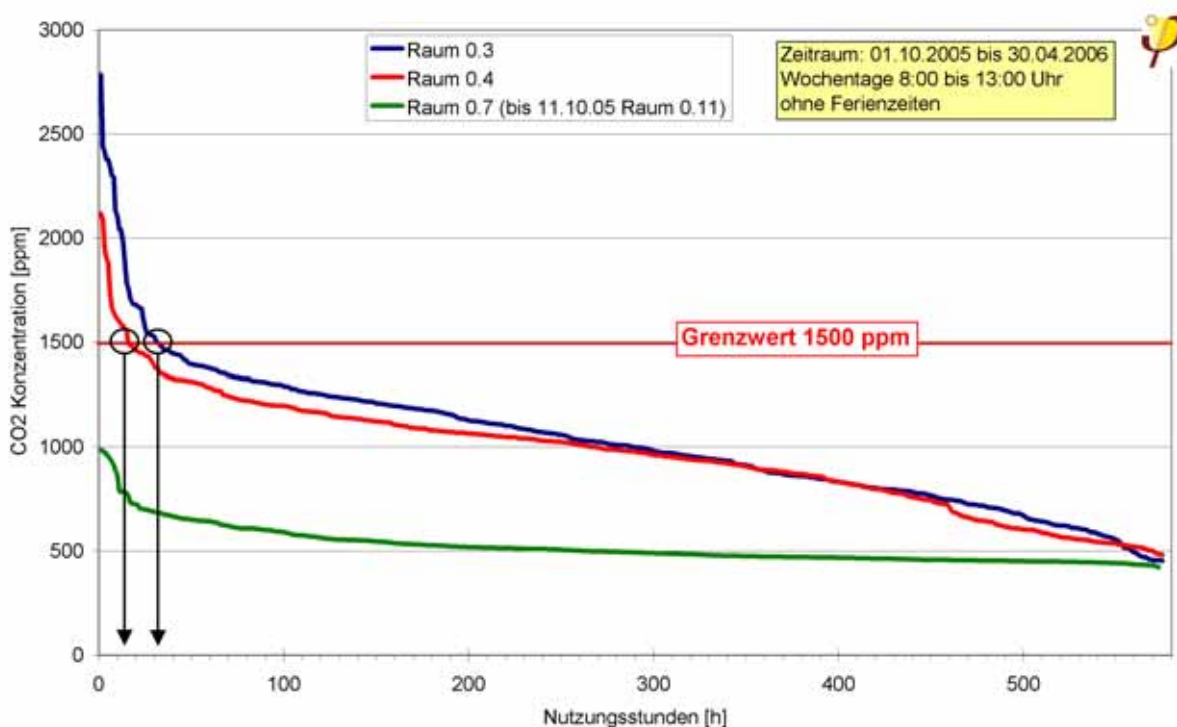
Zur Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Klassenräumen ist die Betrachtung der Nutzungszeiten an den Werktagen von 8:00 bis 13:00 Uhr sinnvoll. Die Ferienzeiten bleiben unberücksichtigt. Nur die Luftqualität während dieser Nutzungszeiten sind für die Schulkinder und Lehrkräfte von Interesse. Die Zeiträume der seltenen Sondernutzungen (ggf. AG-Arbeit, Elternabende o.ä.) werden nicht berücksichtigt. Dies ist auch sinnvoll, da es sich zum einen nicht um die Standard-Schulnutzung handelt und zum anderen die Luftqualität zu diesen Zeiten maßgeblich davon abhängt, ob die Zeiten in der GLT hinterlegt worden sind um die Lüftung dann entsprechend anzufordern.

Betrachtet man in Abbildung 109 die Nutzungsstunden der gesamten Heizperiode 2005/2006 (01.10.2005 bis 30.04.2006), so wird zunächst deutlich, wie gering der Raum 0.7 genutzt wird. Während der ersten 11 Tage (01.10. bis zum 11.10.2005) befand sich der Sensor aus „Raum 0.7“ noch im Raum 0.11 (Kirchennutzung). Diese 11 Tage sind hier in der Kurve für 0.7 integriert.



Die sortierten Stundendaten zeigen in nur wenigen Stunden die Überschreitung des 1500 ppm Grenzwertes. Von den 575 Nutzungsstunden in der Heizperiode zeigen in Raum 0.3 genau 31 Stunden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über dem Grenzwert. Dies entspricht **5,4 %** der Nutzungszeit. Nur eine Stunde liegt über 2500 ppm. Bei Raum 0.4 sind es bei 15 Stunden über dem Grenzwert von 1500 ppm, entsprechend **2,6 %**. Dabei handelt es sich um sehr geringe Überschreitungen mit der maximalen Konzentration von 2100 ppm und nur zwei Stunden über 2000 ppm.

Insgesamt zeigt diese Heizperiode während der Nutzungszeit gute - sprich niedrige - Konzentrationen des Leitgases CO<sub>2</sub>. Dies zeigt die hohe Raumluftqualität der Klassenräume in einer Schule mit Lüftungsanlage. Nähere Informationen über die Gründe für die geringen Überschreitungen der 1500 ppm Grenze liegen nicht vor.



**Abbildung 109: Absteigend sortierte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen während der Heizperiode 2005/2006 (1.10.2005 bis zum 30.4.2006). Berücksichtigt sind nur Messdaten aus der Nutzungszeit (Werktags 8:00 bis 13:00 Uhr, ohne Ferienzeiten).**

Der Vergleich mit den absteigend sortierten Konzentrationen aus dem Zeitbereich in dem die Lüftungsanlage ausgefallen war, gibt eine Andeutung von der Luftqualität in „üblichem“ Klassenräumen ohne Lüftungsanlagen (Abbildung 110):

In den 145 Nutzungsstunden während des Ausfalls der Lüftungsanlage waren in Raum 0.3 insgesamt 86 Stunden über dem Grenzwert, was **59 %** entspricht. In Raum 0.4 waren es sogar 102 Stunden, also **70 %** der Nutzungszeit. In Raum 0.3 wurde in 6 Stunden der Messbereich des Sensors von 3000 ppm überschritten.

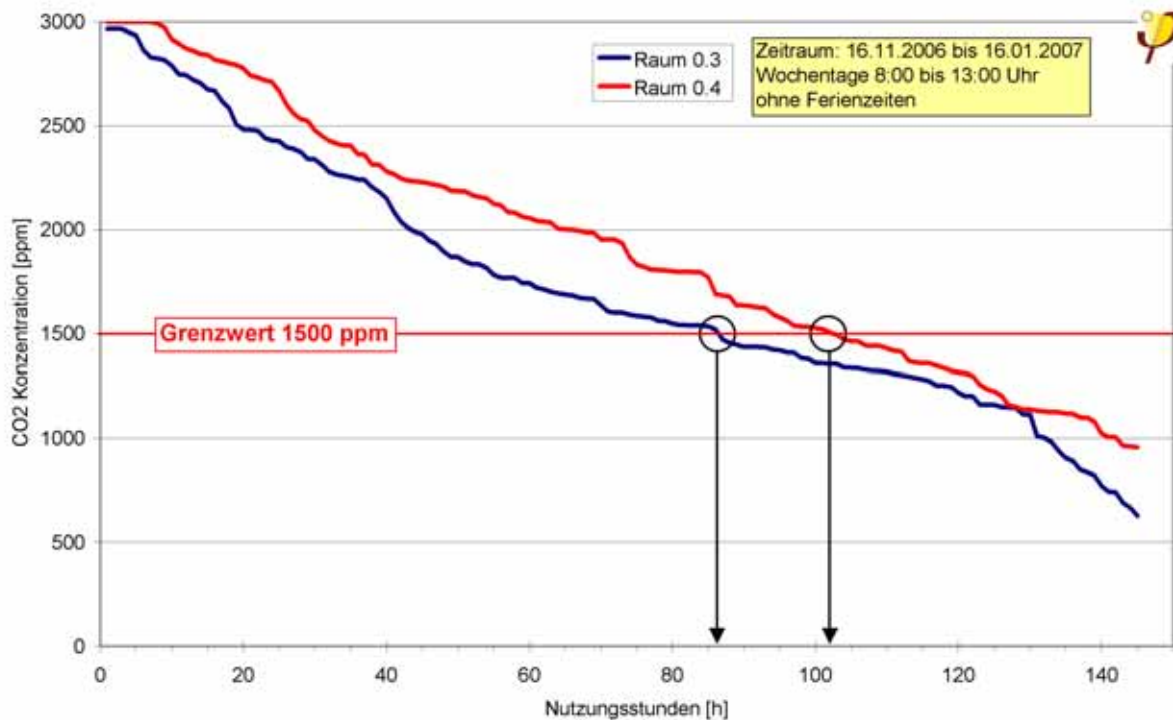


Abbildung 110: Absteigend sortierte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vom 16.11.2006 bis zum 16.01.2007, in dem Zeitraum war die Lüftungsanlage „Lüftung 2“ ausgefallen. Berücksichtigt sind nur Messdaten aus der Nutzungszeit (Werktags 8:00 bis 13:00 Uhr, ohne Ferienzeiten).

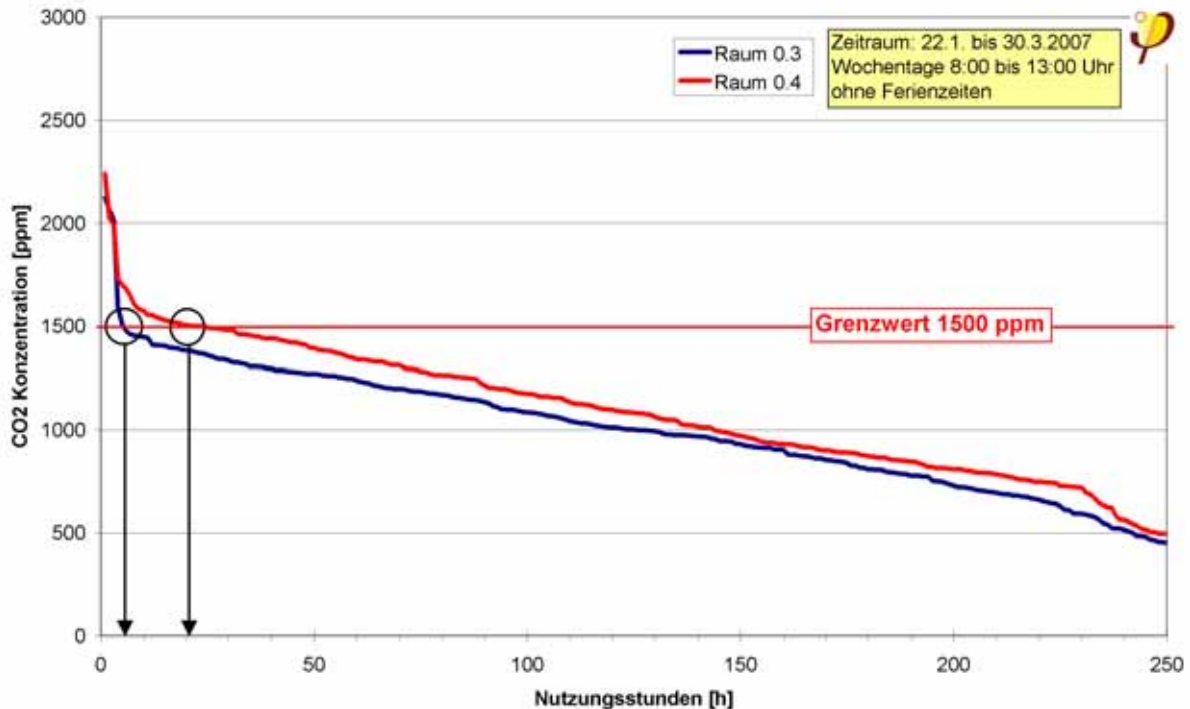


Abbildung 111: Absteigend sortierte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vom 22.01.2007 bis zum 30.03.2007, in dem Zeitraum war die Lüftungsanlage „Lüftung 2“ im Normalbetrieb. Berücksichtigt sind nur Messdaten aus der Nutzungszeit (Werktags 8:00 bis 13:00 Uhr, ohne Ferienzeiten).



Nachdem die Anlage „Schule 2“ dann ab Anfang 2007 wieder im Normalbetrieb gefahren werden konnte, normalisierten sich die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sofort wieder. In der Zeit vom 22.01. bis zum 30.03.2007 (Beginn der Osterferien) gibt es wieder gute bis sehr gute Ergebnisse der Raumluftqualitätsmessung. Von den 250 Stunden Nutzungszeit überschreiten nur 2 % in Raum 0.3 (entspricht 5 Stunden) und 8.4 % in Raum 0.4 (entspricht 21 Stunden) den Grenzwert von 1500 ppm. Die maximalen Konzentrationen betragen 2790 bzw. 2090 ppm.

### 6.6.3.2 Tagesgang der CO<sub>2</sub>-Konzentration und Vergleichsmessung

Zusätzlich zu der 10-minütigen Dauermessung in den vier Klassenräumen wurde in Raum 0.4 während eines normalen Schultages die CO<sub>2</sub>-Konzentration an drei weiteren Punkten gemessen. Die Dauermessung ist in 2,9 m Höhe montiert, die Zusatzmessungen wurden in der Raummitte 1 m über dem Boden, neben der Dauermessstelle in 2,9 m Höhe und direkt bei der bodennahen Überströmöffnung neben der Klassenraumtür positioniert. Für die Kinder entspricht die Messhöhe in einem Meter etwa der Kopfhöhe beim Sitzen. Der Messständer mit den Sensoren zwischen den Schultischen ist in Abbildung 112 dargestellt.



Abbildung 112: Klassenraum mit dem Messständer für die CO<sub>2</sub>-Messungen und der Zuluftöffnung an der Stirnseite der abgehängten Decke.

Während der Messungen am 03. März 2006 wurde vom PHI festgehalten, wie viele Personen sich jeweils im Klassenraum aufgehalten haben. Den Verlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Messwerte sowie die Personenbelegungen zeigt Abbildung 113. Der

Unterricht fand zum Teil mit geschlossener, zum Teil mit geöffneter Klassenraumtür (zum Flur hin) statt. Während der ersten Stunde (nach dem Treffen der Klasse haben alle Personen den Raum wieder verlassen) und in der einen Pause (9:50 bis 10:05 Uhr) befinden sich keine Personen im Klassenraum. Die Zeiträume sind durch ruhig abklingende Konzentrationen gut zu erkennen. Die Personenbelegung schwankt zwischen 11:00 und 11:30 Uhr, weil Kleingruppen auf dem Flur und im Nebenraum gearbeitet haben. An diesem Vormittag sind maximal 17 Kinder und eine Lehrkraft im Raum anwesend. Um 11:30 war Unterrichtsende und alle Personen haben den Raum verlassen.

Die Messwerte der zeitlich niedriger aufgelösten Dauermessung über das M-Bus System passen gut zu den Daten der anderen Vergleichs-Messstellen. Damit sind die Daten der Dauermessstelle kurz unterhalb der Decke gegenüber der Messhöhe in 1 m Höhe vergleichbar; es konnte im Rahmen der Messgenauigkeit keine nennenswerte Schichtung festgestellt werden. Die maximalen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aller Messpunkte überschreiten den Wert von 1200 ppm nicht. Der in der Norm DIN 1946 Teil 2 geforderte Grenzwert von 1500 ppm wird damit deutlich unterschritten. Auch nach der aktuellen DIN EN 13779 ergibt sich, dass die gemessene Raumluftqualität im Bereich RAL 2 (hohe Raumluftqualität) und RAL 3 (mittlere Raumluftqualität) liegt.

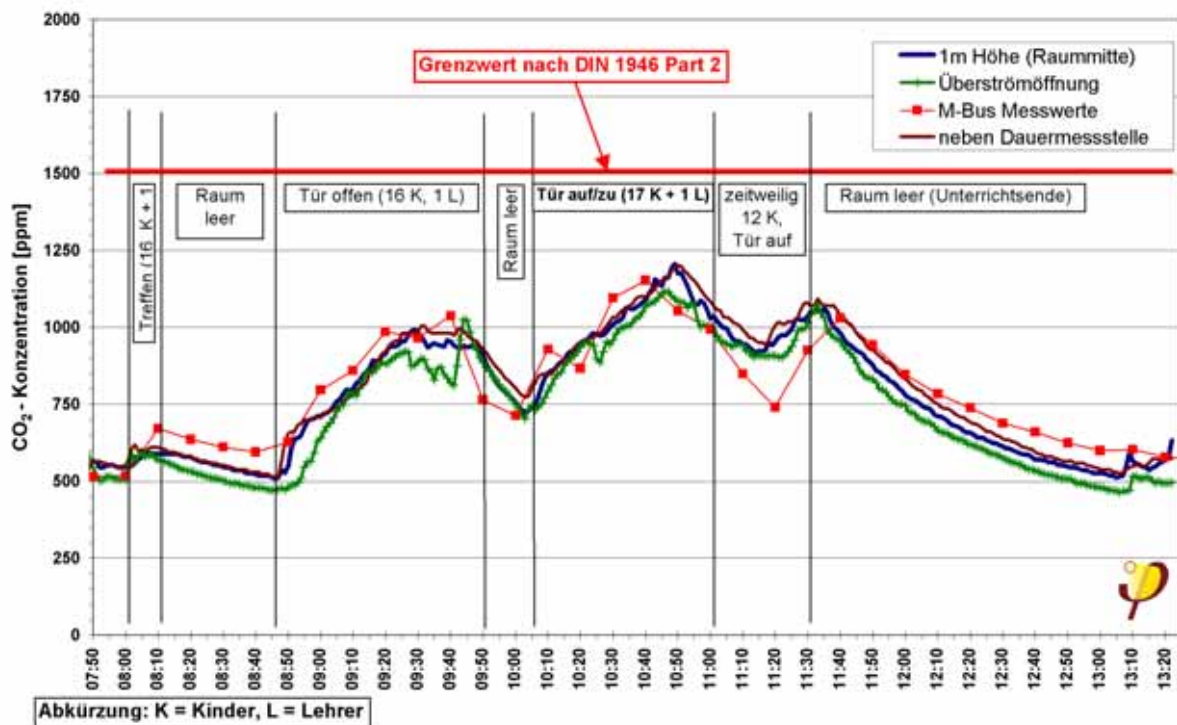


Abbildung 113: CO<sub>2</sub>-Konzentration an unterschiedlichen Messorten und Belegungszahlen in einem Klassenraum 0.4 am 03.03.2006. Die M-Bus Daten sind in 10-Minutenauflösung, die Vergleichsmessungen in Minutenauflösung aufgezeichnet und dargestellt.

Zum Vergleich mit dieser Sonder-Messungen am 03.03.2006 mit den guten Luftqualitäts-Ergebnissen wird der Fall „keine Lüftungsanlage“ herangezogen: Dazu



wird hier aus Abbildung 107 ein Zeitabschnitt gezeigt, während dem die Lüftungsanlage „Schule 2“ aufgrund einer Störung nicht betrieben wurde (nur Stand-by Stromverbrauch). Es handelt sich um eine Schulwoche mit normaler Belegung. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen liegen für beide Räume täglich über 2000 ppm und überschreiten am 19.12.2006 sogar für 3 Stunden den Messbereich von 3000 ppm. Dies zeigt nochmals deutlich den Einfluss und die Vorteile der kontrollierten Lüftung für Klassenräume. Auch durch regelmäßiges Stoßlüftungen in den Pausenzeiten würde keine gleichmäßig gute Luftqualität ermöglicht werden.

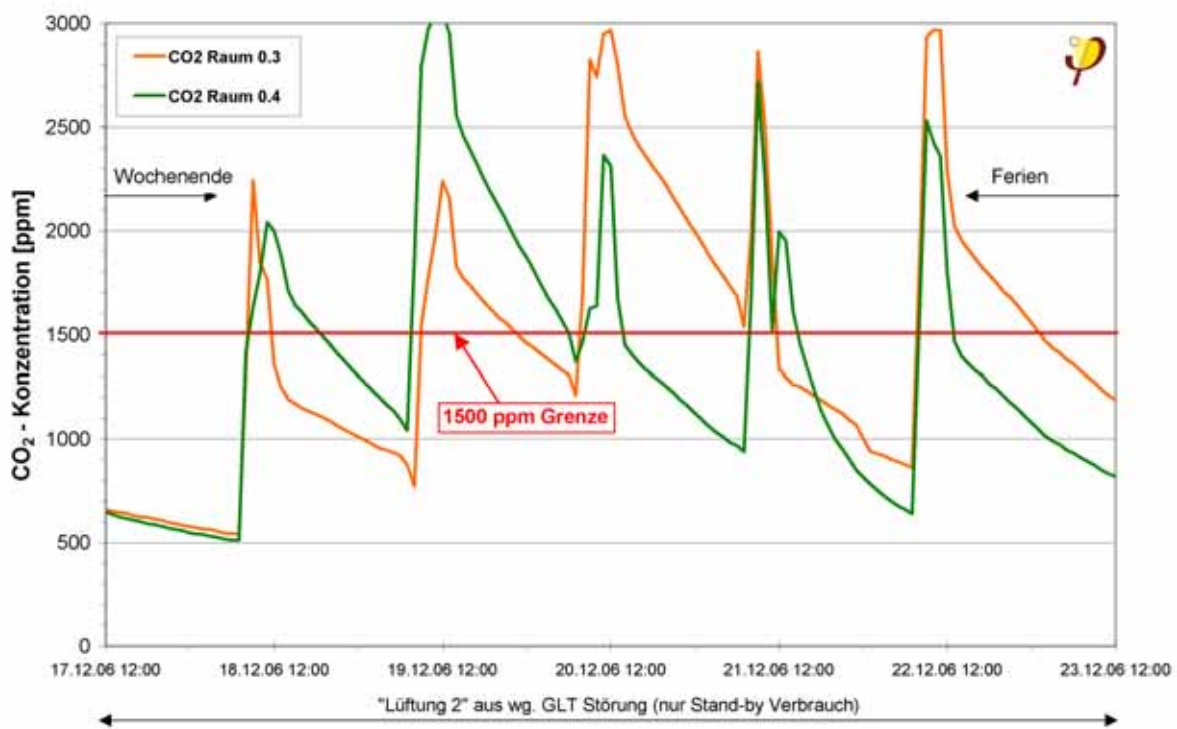


Abbildung 114: Stunden-Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von zwei Räumen mit Schulbetrieb im Zeitraum 17.12.2006 bis 23.12.2006. Es handelt sich dabei um einen Zeitraum in dem die Lüftungsanlage „Schule 2“ ausgefallen war.

#### 6.6.4 VOC Messungen

Die handelsübliche „VOC-Sensoren“ werden vom Hersteller auch als „Mischgas-sensoren“ und „Luftqualitätssensoren“ bezeichnet. Die Sensoren geben nur ein qualitatives Messsignal aus (0 bis 10 Volt), welches in der Auswertung einheitenlos als Messwert zwischen 0 und 1000 dargestellt wird. In diesem Bericht wird trotzdem zur einfacheren Handhabung von gemessenen VOC-„Konzentrationen“ gesprochen (siehe dazu auch die Beschreibung in Abschnitt 5.2.2.3).

Als Beispiel der VOC-Messungen sind in Abbildung 115 Stundenmittelwerte aus den Räumen 0.3 und 0.4 für einen typischen Zeitraum (30.1. bis 8.2.2007) mit Schulanwendung und Wochenende dargestellt. Des Weiteren sind die Lüftungszeiten nach

dem derzeit gültigen GLT-Zeitprogramm für belegte Klassenräume dargestellt (Abbildung 116).

Es zeigt sich, dass die VOC-Konzentration während der Zeiten, in denen die Lüftungsanlage heruntergefahren ist (Nachmittags, Nacht und Wochenende), ansteigen. In dieser Zeit werden durch Einbauten (Bodenbelag, Möbel, Dichtmassen o.ä.) oder durch andere Gegenstände (PC, Unterrichtsmaterial, Turnbeutel, etc.) von den Sensoren messbare Substanzen emittiert und in der Luft angereichert. In beiden Räumen sinken die Konzentrationen während der Nutzungstage (Montag bis Freitag) am Morgen ab 5:00 bis 7:00 Uhr schlagartig ab. Dann steigen sie wieder an, um im Regelfall zwischen 9:00 und 11:00 Uhr ihre Höhepunkte zu erreichen. Normalerweise ist dann um 13:00 Uhr ein weiteres Minimum der Konzentrationen festzustellen. Der schnelle Anstieg danach geht vermutlich auf die Freisetzungen während der Reinigung der Räume zurück. Zwischen 14:00 und 16:00 Uhr ist dann ein Knickpunkt zu erkennen und die Steigung wird deutlich flacher um bis zum Morgen wieder kontinuierlich anzusteigen. Werden die Messdaten mit den eingestellten Lüftungszeiten nach dem Zeitprogramm verglichen (Abbildung 116), erklären sich die gemessenen Verläufe der Konzentrationen weitgehend. Die Lüftungsanlage der belegten Klassenräume war für die Wochentage Montag bis Freitag auf einen Lüftungsbeginn um 5:00 Uhr und ein Lüftungsende um 14:00 Uhr eingestellt. Für die weitere Deutung der Verläufe während der wochentäglichen Nutzungszeiten fehlen genauere Nutzungsangaben (Tätigkeiten, Personenzahlen, ggf. Fensterlüftung etc.).

Das Wochenende zeigt einen kontinuierlichen langsamen Anstieg der VOC-Werte, bis auf einen Zeitraum am Samstag der in Raum 0.4 einen leichten Rückgang und in Raum 0.3 eine Stagnation bewirkt. Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage „Schule 2“ zeigt, dass die Anlage am Wochenende zeitweise wohl für die Nutzung in anderen Räumen betrieben wurde. Die Stabilisierung bzw. das leichte Absinken der Konzentrationen deutet darauf hin, dass es über die Überströmbereiche (Flure, Gruppenräume) eine Rückwirkung auf die unbelüfteten Räume gibt. Denkbar ist auch, dass die Konstantvolumenstromregler nicht 100 % dicht schließen und ein geringer Luftstrom direkt in die Klassenräume eingeblasen wurde.



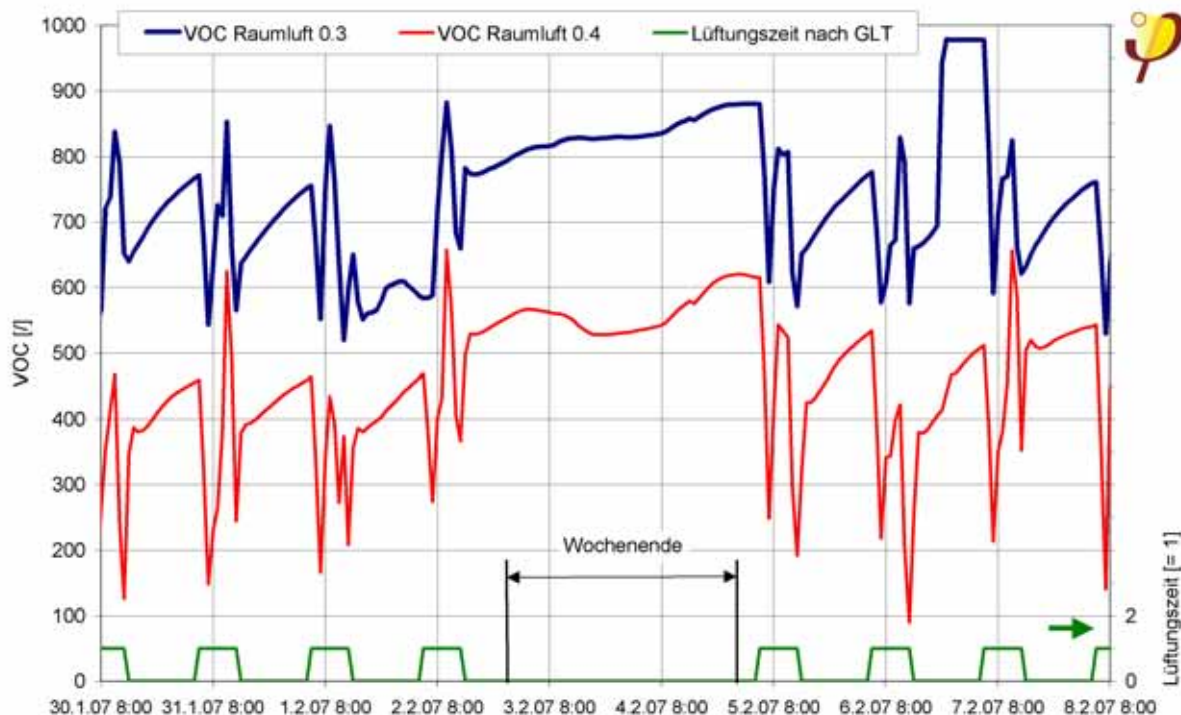


Abbildung 115: VOC-Messdaten in Raum 0.3 und 0.4 und Lüftungszeiten nach dem GLT-Zeitprogramm im Beispiel-Zeitraum 30.1. bis 8.2.2007 (Stundenmittelwerte).

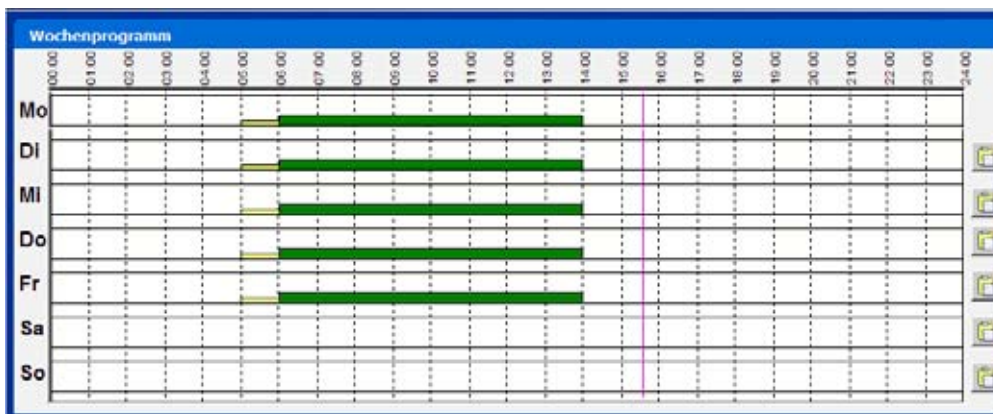


Abbildung 116: Zeitprogramm der GLT für die Räume „Klassenraum belegt“ welches bis Anfang März 2007 eingestellt war. Die gelben Balken geben den Beginn der Lüftungszeit an.

Deutlich wird der generelle Einfluss der Lüftungsanlage auf die „Mischgas“-Messwerte und die Tatsache, dass bei Nichtbetrieb der Anlage trotz Abwesenheit von Personen die Konzentrationen steigen. Dies ist auch ein wichtiger Grund für die „Vorspülzeit“ der Räume, also die Belüftung, bevor die eigentliche Nutzungszeit beginnt. Diese ist auf jeden Fall notwendig, da die Räume in der Nacht nicht belüftet werden, Emissionsquellen aber dauerhaft vorhanden sind. Nur so sind in der eigentlichen Nutzungszeit ausreichend gute Luftqualitäten sicherzustellen. Dieser

„Effekt“ ist mit den gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht feststellbar: Diese sinken - bei ausgeschalteter Belüftung - langsam ab, wenn keine Personen im Raum sind.

#### 6.6.4.1 Optimiertes Zeitprogramm

Anfang März 2007 wurden, auch aufgrund von Hinweisen des Passivhaus Instituts, durch den Schulhausverwalter die Zeitprogramme der GLT angepasst. Die Vorspülzeit nach dem Wochenende am Montag wurde unverändert gelassen, die an den restlichen Werktagen um je 1,5 Stunden verkürzt. An allen fünf Tagen wurde am Nachmittag die Lüftungszeit um eine Stunde von 14:00 auf 13:00 reduziert. Diese Veränderungen sind an den VOC-Messdaten ablesbar.

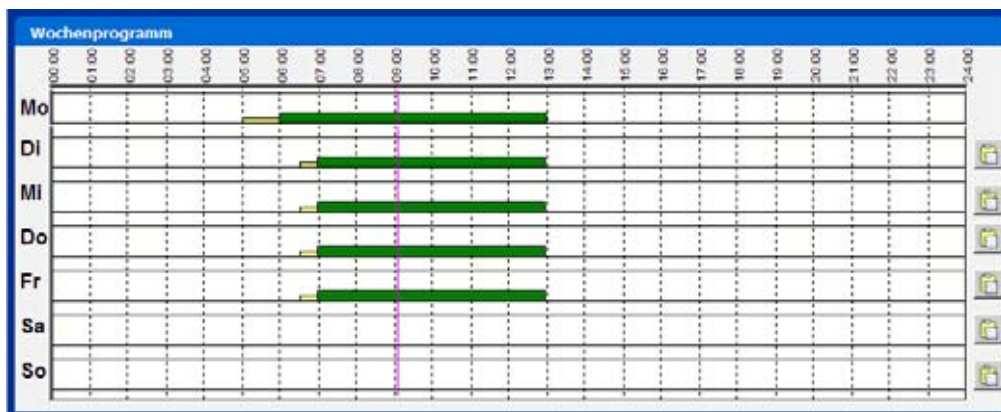
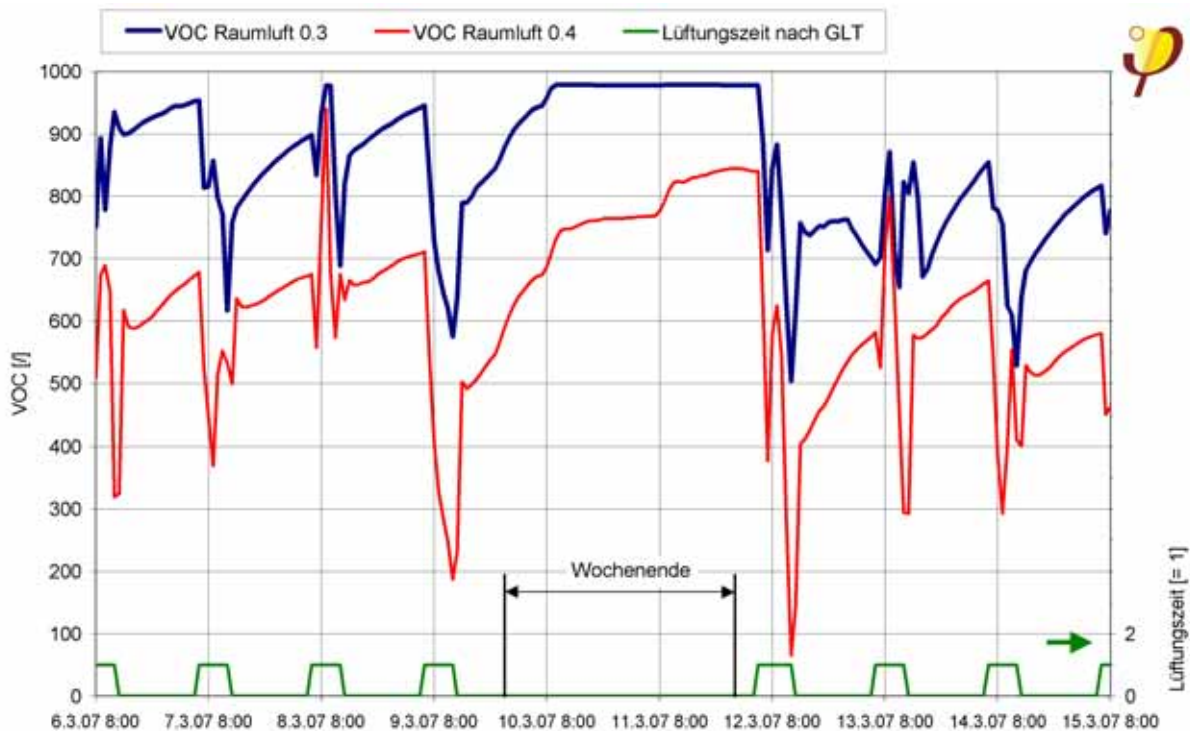


Abbildung 117: Zeitprogramm der GLT für die Räume „Klassenraum belegt“ ab ca. 05. März 2007. Die gelben Balken geben den Beginn der Lüftungszeit an.



**Abbildung 118:** VOC-Messdaten in Raum 0.3 und 0.4 und Lüftungszeiten nach dem GLT-Zeitprogramm im Beispiel-Zeitraum 06.03. bis zum 15.03.2007 nach der Optimierung der Lüftungszeiten (Stundenmittelwerte).

Die VOC-Konzentrationen liegen nach der täglichen Vorspülung bei Unterrichtsbeginn etwas höher als bei längeren Vorspülzeiten. Allerdings zeigen die Zahlenwerte nicht verlässlich die absoluten Veränderungen, da eine sehr starke Drift der Sensoren festgestellt wurde (siehe nächster Abschnitt). Die Messwerte können aber die sich abzeichnende Tendenz durch die veränderten Zeiten deutlich machen. Nutzerklagen nach den veränderten Lüftungszeiten sind nicht bekannt geworden. Energetisch macht sich die Verkürzung der Lüftungszeiten deutlich bemerkbar. Allein der Lüftungsstrom der Gesamtanlage „Schule 2“ (welche auch weitere Räume der Schule mit z.T. anderer Nutzung versorgt) hat sich von 11,9 kWh/Tag auf 7,2 kWh/Tag um rund **40 %** reduziert!

#### 6.6.4.2 Zeitdrift der VOC-Sensoren

Bei der Analyse der VOC-Messdaten zeigt sich eine deutliche Zeitdrift. Zur Verdeutlichung sind die Messdaten der vier Sensoren jeweils vom 20. bis zum 30. November in den Jahren 2004 und 2005 dargestellt:

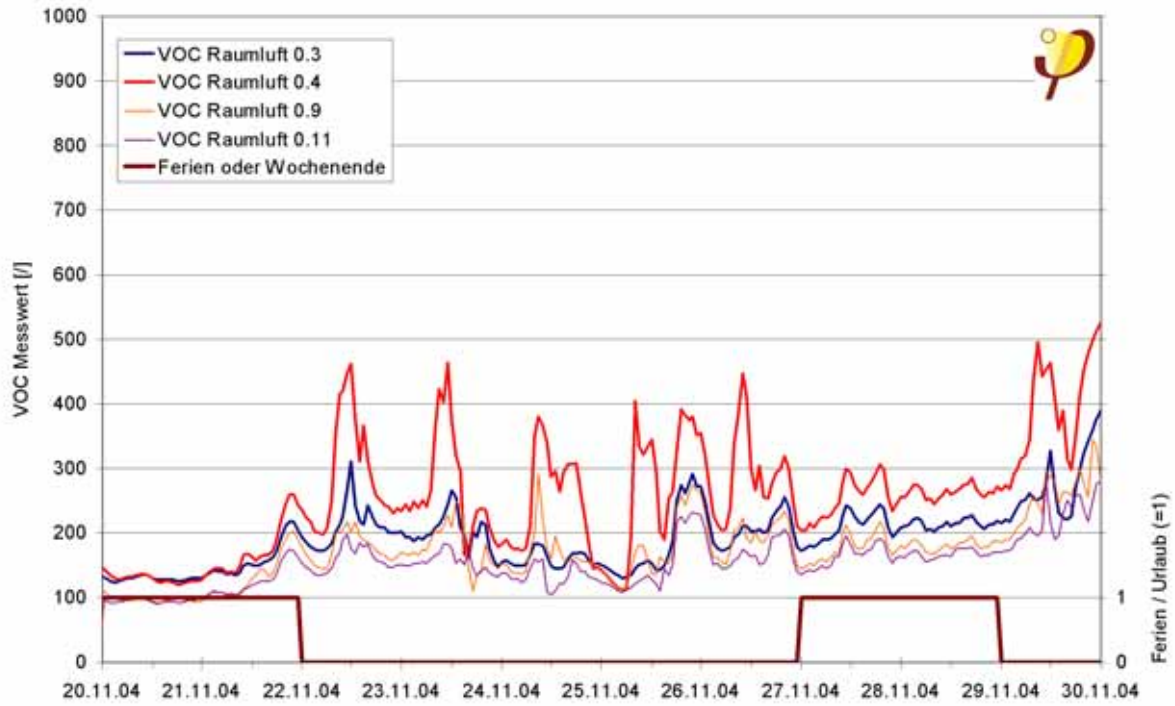


Abbildung 119: VOC-Messdaten der vier Sensoren und die Angabe der Ferien- bzw. Wochenenden im Zeitraum 20.11. bis zum 30.11.2004 (Stundenmittelwerte).

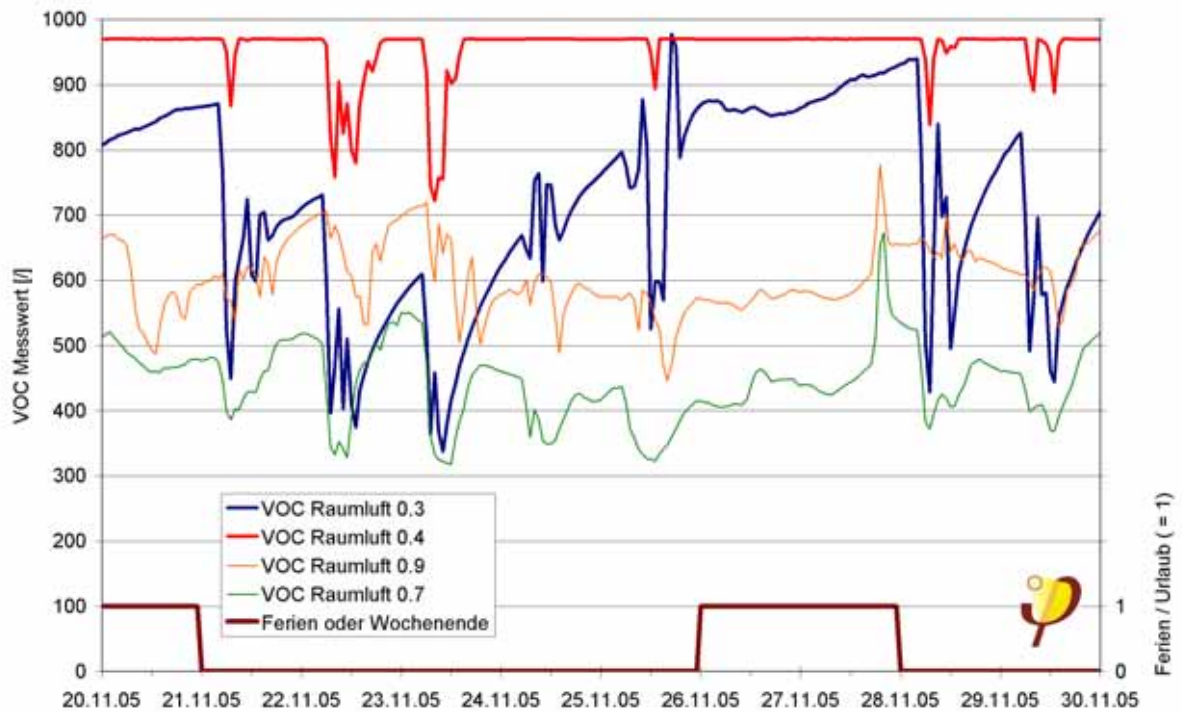


Abbildung 120: VOC-Messdaten der vier Sensoren und die Angabe der Ferien- bzw. Wochenenden im Zeitraum 20.11. bis zum 30.11.2005 (Stundenmittelwerte).



Der zeitliche Verlauf der gemessenen Konzentrationen aus den zwei Grafiken zeigt, dass die VOC-Sensoren alle deutlich zu höheren Werten gedriftet sind. Dieser Verlauf wird mit den realen Veränderungen nicht übereinstimmen. Es ist bekannt, dass mit den höchsten Belastungswerten direkt nach der Fertigstellung der Räume inkl. der Möblierung zu rechnen ist und die Werte dann im Laufe der Zeit absinken [Münzenberger 2003].

In Raum 0.4 war schon im November 2005 sehr häufig der Messbereich von 1000 erreicht bzw. überschritten, sodass keine Aussagen mehr gemacht werden können. Da sich dieser Zustand dauerhaft zeigte, wurde der Sensor in Raum 0.4 am 5.10.2006 neu justiert (Abbildung 121).

Es muss festgestellt werden, dass die Sensoren mit der rein qualitativen Messung und der festgestellten starken Drift zur Steuerung der Raumluftqualität NICHT empfohlen werden können. Sie müssten regelmäßig in kurzen Zeitabständen nachjustiert werden, was erhebliche Kosten verursachen würde.

Die Tatsache, dass nach den Nacht-, Wochenend- und Ferienzeiten eine moderate Vorspülung der Räume notwendig ist, ist auch ohne die Sensoren bekannt. Es muss nur verlässlich dafür gesorgt werden, dass Vorspülzeiten von 1 bis 2 Stunden auch tatsächlich realisiert werden.

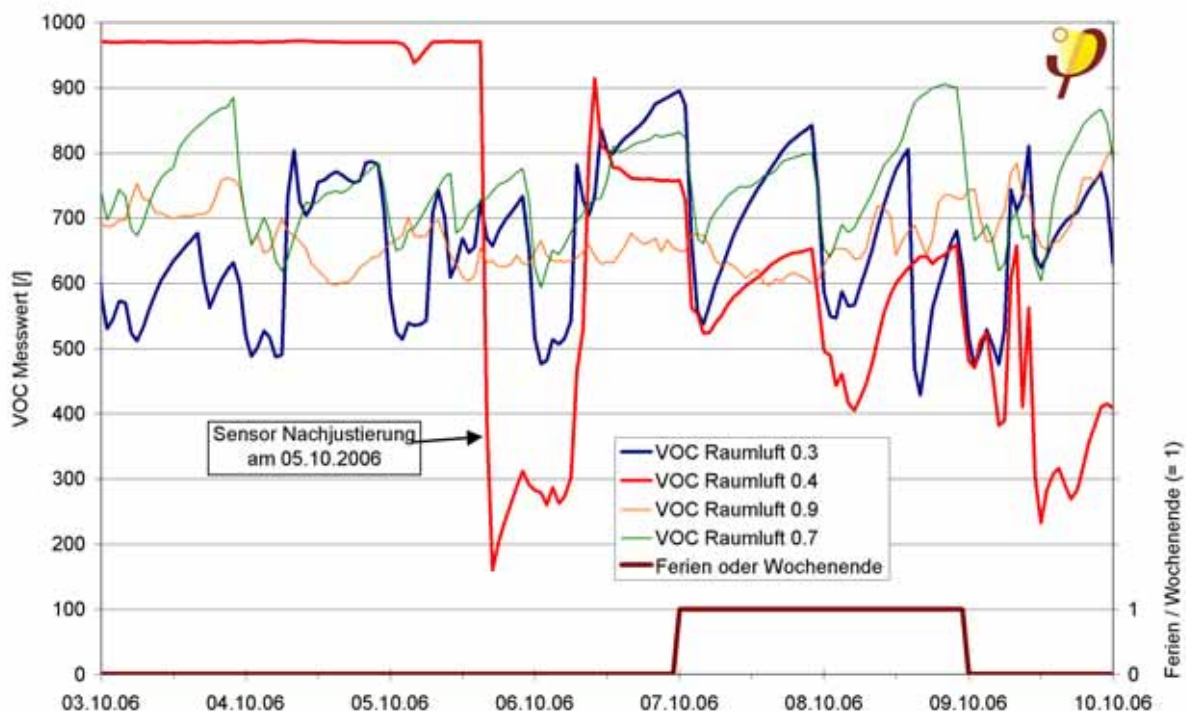


Abbildung 121: VOC-Messdaten der vier Sensoren und die Angabe der Ferien- bzw. Wochenenden im Zeitraum 03.10. bis zum 10.10.2006 (Stundenmittelwerte). Am 05.10.2006 wurde der Sensor in Raum 0.4 nachjustiert.

### 6.6.5 Analyse in der Nutzerbefragungswoche

Um genauere Aussagen zu den Einflüssen durch die Nutzer machen zu können, führten vier Lehrerinnen während einer Winter-Woche (13. bis 17. Februar 2006 bzw. 06. bis 12. März 2006) jeweils ein Protokoll über die Anwesenheiten, Personenzahl, Aktivität der Schüler, Zusatzlüftung (Außentür, Fenster und Sommerlüftungsklappe), Stellung der Klassenraumtür, gewählte Temperatur und Beleuchtung. Die Protokolle wurden für die Räume 0.1, 0.3, 0.4 und 0.7 geführt. Ein Beispielprotokoll ist im Anhang dargestellt.

Mit diesen Grundlagen werden die 10-Minuten Daten aus den Klassenräumen genauer untersucht. Zunächst werden die Messdaten der Befragungswoche für die beiden als Klassenräume genutzten Räume 0.3 und 0.4 vorgestellt. An den Werktagen der Woche (13. bis 17.02.2006) betrug die Außentemperatur im Mittel 3,1 °C (minimal -4,5 °C, maximal 9,4 °C). Die Außentemperaturdaten liegen als Stunden-daten vor, was die stärkere Stufung erklärt.

#### Analyse Raum 0.3

In Raum 0.3 zeigt sich in der Woche eine Klassenstärke inkl. der Lehrerin von 23 Personen und eine Belegung zwischen 12 und 24 Personen. Die Öffnungen der Außenfassade (Tür, Fenster, Sommerlüftungsklappen) waren während der gesamten Nutzungszeit geschlossen. Die Messdaten der Woche sind in Abbildung 122 dargestellt.

Die **CO<sub>2</sub>-Konzentration** zeigt in dieser Woche insgesamt nur drei der 10-Minuten Messwerte, die über der 1500 ppm Grenze lagen. Zwei davon am Dienstag, dem 14.02.2006 und einer am Freitag, dem 17.02.2006. Die minimalen Überschreitungen erfolgten einmal bei ruhiger Tätigkeit der Schüler (Dienstag, 23 Personen), das andere mal bei gemischter Tätigkeit (ruhig/toben) am Freitag mit 24 Personen. Dabei war die Klassenraumtür zum Flur bei den geringen Überschreitungen geschlossen.

Die **Raumlufttemperaturen** zeigen Tagesspitzenwerte zwischen 21,4 bis 21,9 °C. Das Temperaturniveau steigt mit den Tages-Nacht-Schwankungen von Montag bis Freitag an: Am Montag beginnt der Unterricht um 8:00 Uhr bei 19,7 °C Raumlufttemperatur, nachdem ab 5:00 Uhr von 18,5 °C hochgeheizt wurde. Am Freitag liegt die Raumlufttemperatur nach der Nutzung bei etwa 21,1 °C. Die relativ konstanten Nachttemperaturen steigen von Tag zu Tag zwischen 0,1 und 0,3 K. Die Außentemperatur steigt in dieser Woche ebenfalls langsam an. Die Unterrichts-Anfangstemperatur der Raumluft morgens jeweils um 8:00 Uhr steigt von 19,7 am Montag auf 21,1 °C am Freitag an. Nach [AMEV 2001] darf die zulässige Raumtemperatur in Schulen bei Nutzungsbeginn zwischen 17 und 19 °C und während der Nutzung 20 °C betragen. Damit wurden in der Schule die Anforderungen gut erfüllt. Damit lagen in den Klassenräumen gute Temperaturbedingungen vor.

Die **Oberflächentemperaturen** liegen während der Werktag - nach der Aufheizung am Montagmorgen - fast ausschließlich unter der Raumlufttemperatur. Beim



Aufheizvorgang am Montag steigt die Oberflächentemperatur zeitverzögert ab 8:00 Uhr um knapp 0,8 K auf fast 20,0 °C an. Die Belegung und Beheizung an den Vormittagen erzeugt gedämpfte Spitzen von 0,5 K (Dienstag bis Donnerstag) bzw. 0,3 K am Freitag. In der Nacht fallen die Oberflächentemperaturen jeweils um 0,1 bis 0,3 K ab. Die Differenz zwischen der Raumluft- und der Oberflächentemperatur beträgt in der Woche während der Nutzungszeit maximal 1,6 K bzw. -0,7 K. Im Mittel betragen die Werte während der Nutzungszeit 0,5 K. Der empfohlene Wert von maximal 3 K nach [Recknagel 2003] wird damit deutlich unterschritten. Die niedrigen Differenzen zeigen eine hohe Behaglichkeit für die Nutzer. Die sehr hohe thermische Qualität der Verglasung (3-fach Glas mit einem U-Wert des gesamten Fensters inkl. Einbau von 0,74 W/(m<sup>2</sup>K)) unterstützt die geringen Strahlungstemperaturunterschiede.

Die relative **Raumluftfeuchtigkeit** in Raum 0.3 sinkt am Montag nach dem konstanten Wochenendwert von 35 % (ohne Lüftungsbetrieb) bei Lüftungsbeginn um 5:00 Uhr zunächst auf Werte um 27 % ab. Bei Unterrichtsbeginn um 8:00 steigt die relative Feuchtigkeit dann sofort wieder an. Diese Erhöhung während der Nutzungszeiten ist an den einzelnen Werktagen mit Einträgen zwischen 6 bis 10 Prozentpunkten zu erkennen. Die relative Feuchte steigt von Dienstag bis Donnerstag kontinuierlich um 1 bis 5 % auf Werte am Donnerstag (16.02.2006) nach der Nutzung von über 35 %. In der Nacht wird lt. GLT-Zeitsteuerung nicht gelüftet, wodurch die Feuchte im Raum verbleibt. In der Nacht zum Freitag nimmt sie etwas ab und stellt sich nach der Nutzung auf Werte um 32 % am Wochenende ein. Das etwas niedrigere Niveau der relativen Luftfeuchte am Freitag hat seine Ursache in der abgesunkenen Außenlufttemperatur, die kühlere Außenluft enthält weniger Wasserdampf und damit wird weniger Feuchtigkeit über die Zuluft in den Raum eingebracht. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass sich die relative Luftfeuchte während der Anwesenheit von Personen in einem tolerierbaren Rahmen bewegt.

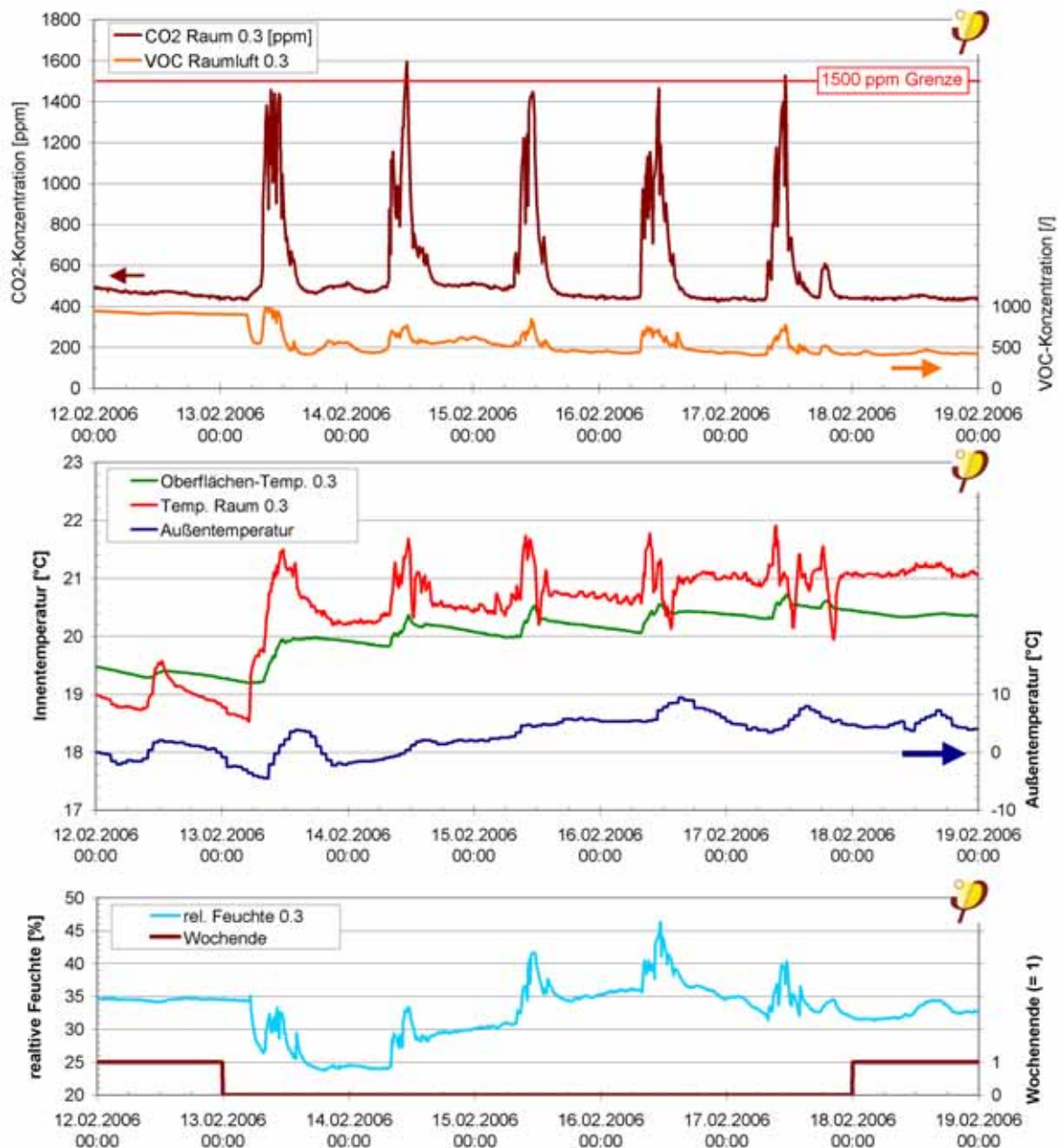


Abbildung 122: Messdaten (10-Minuten Auflösung) von Raum 0.3 während der Woche, in der die Nutzerbefragung in dem Raum durchgeführt wurde (12.02. 0:00 Uhr bis 19.02.2006 0:00 Uhr).

#### Analyse Raum 0.4

In Raum 0.4 zeigt sich in der Woche eine Klassenstärke inkl. der Lehrerin von 20 Personen und eine Belegung zwischen 5 und 20 Personen. Die Öffnungen der Außenfassade (Tür, Fenster, Sommerlüftungsklappen) waren während der Nutzungszeit überwiegend geschlossen. Nur am Donnerstag (16.02.2006) war die Außentür in der 5. Schulstunde 2 min geöffnet und am Freitag (17.02.2006) war die Außentür insgesamt 30 min und die Lüftungsklappe (innerhalb dieses Zeitraumes) 20 min geöffnet. Die Messdaten der Woche sind in Abbildung 123 dargestellt.





Die **CO<sub>2</sub>-Konzentration** zeigt in dieser Woche insgesamt nur einen der 10-Minuten Messwerte, der die 1500 ppm Grenze eben erreicht. Zu dieser Zeit waren 19 Personen im Raum und die Klassenraumtür war geschlossen. In der untersuchten Woche waren bezüglich des Leitgases CO<sub>2</sub> gute Raumluftqualitäten vorhanden.

Die **Raumlufttemperaturen** zeigen Tagesspitzenwerte zwischen 22,6 am Montag bis 21,6 °C am Freitag. Am Wochenende wurde vermutlich geheizt, da die Raumlufttemperaturen mit über 21 °C am Wochenende deutlich höher sind als in Raum 0.3. Hier wäre nach [AMEV 2001] auch ein deutlich niedrigeres Temperaturniveau zulässig und sinnvoll. Erst mit dem Beginn der Belüftung des Raumes um 5:00 senkt sich die Temperatur kurzzeitig bis zum Unterrichtsbeginn um 8:00 Uhr auf 20,6 °C ab, um dann sofort wieder anzusteigen. In den Nächten kühlt der Raum etwas stärker ab als Raum 0.3. Mit dem Beginn der Belüftung in den Morgenstunden sinken die Temperaturen zunächst kurz ab. Zum Unterrichtsbeginn waren immer Temperatur über 20 °C vorhanden, 17 bis 19 °C wären minimal zulässig. Das Temperaturniveau mit den täglichen nutzungsbedingten Spitzenwerten bleibt insgesamt die Woche über relativ konstant. Am Samstag, den 18.02.2006 sind ab 6:40 bis etwa 12:00 Uhr nochmals deutlich ansteigende Temperaturen zu erkennen, die auf eine Nutzung des Raumes hindeuten.

Auffällig ist die Abkühlung der Raumluft am Freitag, den 17.2.06 zwischen 10:00 und 11:20 Uhr. Die Raumlufttemperatur sinkt schlagartig auf minimal 17,7 °C ab. Während dieser Zeit waren Außentüren (30 min) und Sommerlüftungsklappen geöffnet. Damit zeigt sich, dass sich relevante Zusatzlüftungen an den Temperaturgängen gut erkennen lassen.

Die **Oberflächentemperatur** sinkt während der Zusatz-Lüftungsphase am Freitag nur um etwa 0,2 K ab. In der Nutzungszeit der 5 Werkzeuge - ohne die Zusatzlüftung zu berücksichtigen - liegt die Oberflächentemperatur erwartungsgemäß fast immer unter der Raumlufttemperatur. Im Mittel beträgt die Differenz zwischen der Oberflächen- und der Raumlufttemperatur in der Nutzungszeit der Woche (8:00 bis 13:00 Uhr) nur 0,2 K, minimal -0,9 und maximal 1,5 K (Der Ausreißer durch die Lüftung wurde dabei nicht berücksichtigt). Der empfohlene Wert von maximal 3 K nach [Recknagel 2003] wird damit auch in diesem Raum deutlich unterschritten. Es zeigt sich, dass der Grenzwert bei Zusatzlüftung über die Fassade jedoch sehr schnell überschritten wird.

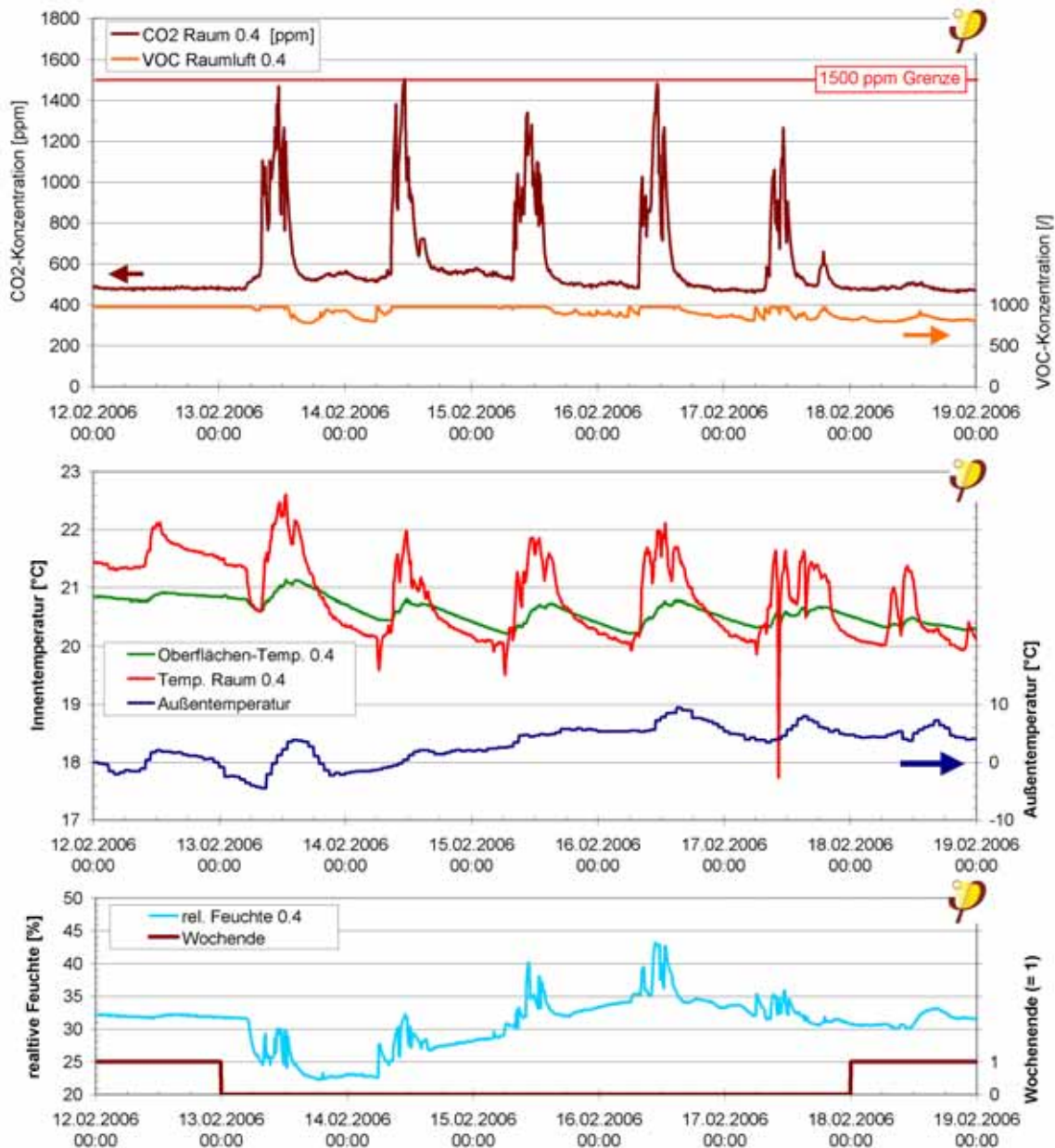


Abbildung 123: Messdaten (10-Minuten Auflösung) von Raum 0.4 während der Woche, in der die Nutzerbefragung in dem Raum durchgeführt wurde (12.02. 0:00 Uhr bis 19.02.2006 0:00 Uhr).

Die relative **Raumluftfeuchtigkeit** in Raum 0.4 verhält sich sehr ähnlich der im Raum 0.3: Nach einem konstanten Wochenendwert sinken am Montag mit dem Lüftungsbeginn um 5:00 Uhr die Werte ab. Mit dem Unterrichtsbeginn um 8:00 steigt die relative Feuchtigkeit dann sofort wieder an. Im Verlauf bis zum Donnerstag steigt das Niveau dann mit den deutlichen Einträgen durch die Nutzer wieder an.

### Sonderbetrachtung: Situation am Montagmorgen in Raum 0.3

Der für die Aufheizung des Raumes nach der Temperaturabsenkung an Wochenenden kritische Zeitraum ist der Montagmorgen. Um diese Situation genauer be-



werten zu können, werden die Daten von Raum 0.3 am Montag während der Nutzerbefragungswoche (13.2.2006) größer skaliert. Dazu sind die Informationen aus der Nutzerbefragung graphisch aufbereitet und zusätzlich dargestellt. Durch die vertikalen Hilfslinien (Änderung der Personenzahl und Änderung der Klassenraumtürstellung) kann der Einfluss auf die Messgrößen beobachtet werden (Abbildung 124).

Es ist ein Einfluss der Türstellung auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erkennen: Die Konzentration fällt bei gleichbleibender Personenzahl zunächst ab, steigt dann allerdings wieder an und erreicht ihr Maximum in dem Moment, als die Tür wieder geschlossen wird! Hier müssen also noch andere Effekte auftreten als sich durch den Einfluss der Tür erklären lassen (Möglicherweise haben kurzzeitig Personen den Raum verlassen und dies wurde nicht im Protokoll festgehalten).

Die Raumlufttemperatur steigt ab 5:00 Uhr mit dem Beginn der Beheizung auf etwa 19,7 °C an und liegt ganz schnell über der Oberflächentemperatur (19,2 °C). Genau mit dem Eintreffen der Schulklasse steigen dann die Temperaturen deutlich an. Der Temperaturhub der Wandoberfläche welche durch die Nutzung verursacht wird, beträgt an diesem Tag knapp 0,8 K.

Auch am Verlauf der relativen Feuchte ist die Nutzung des Raumes zu erkennen.

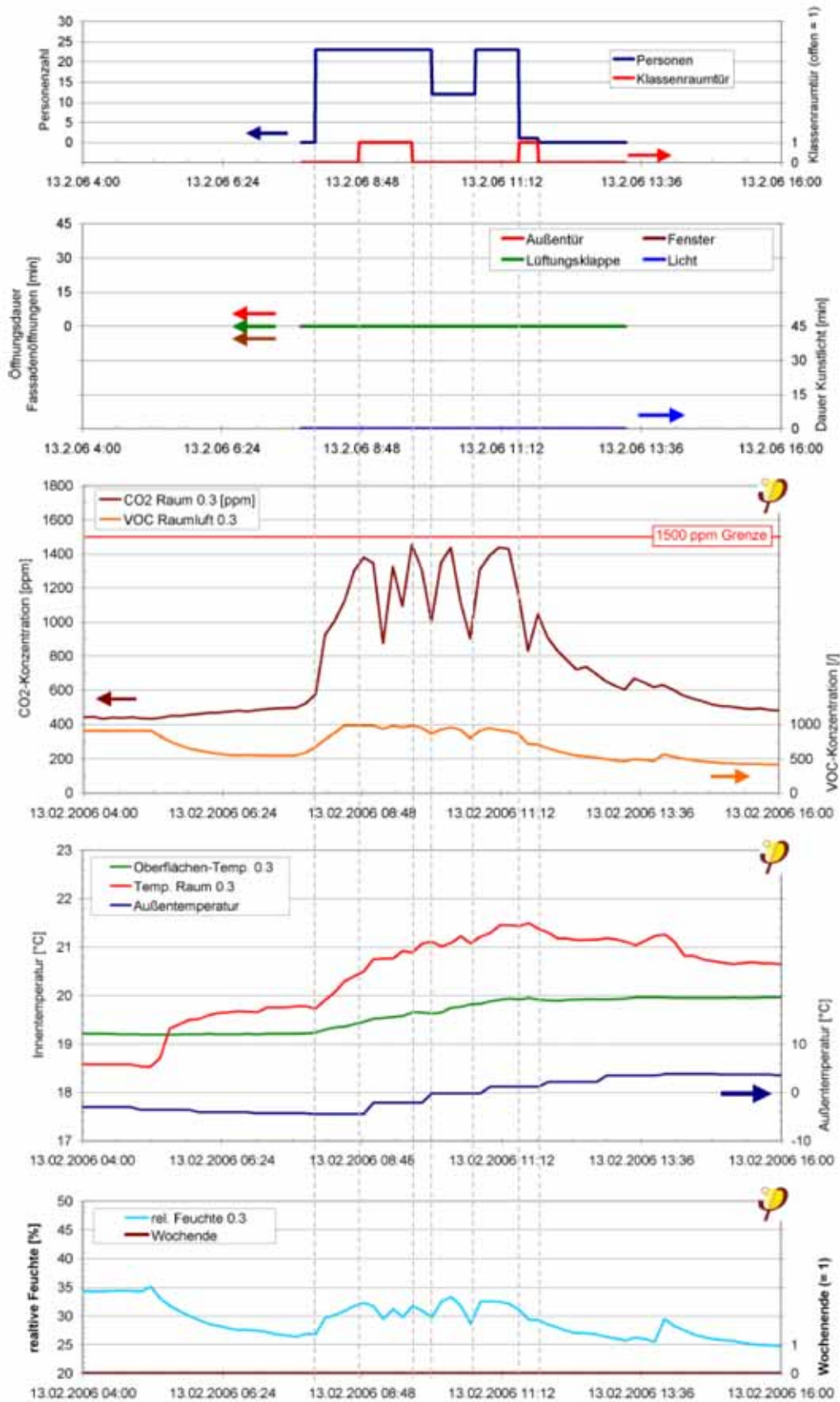
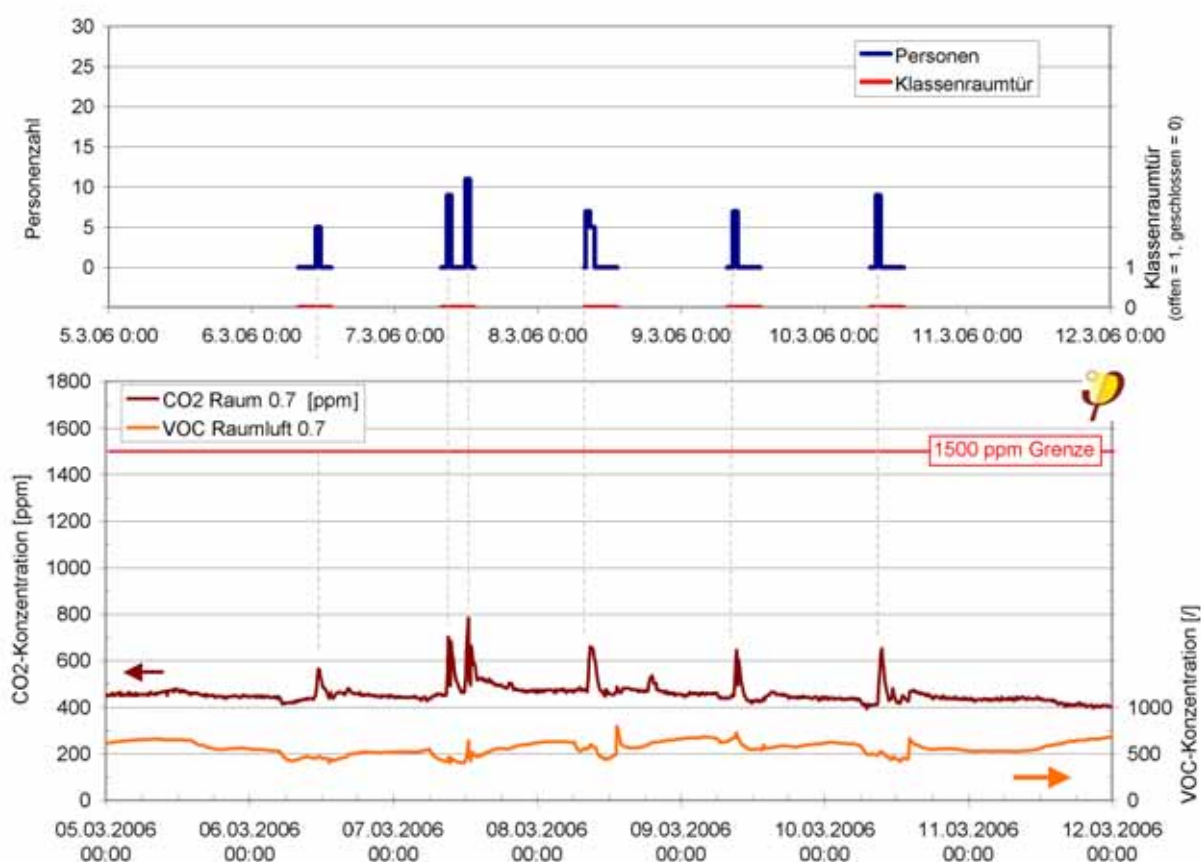


Abbildung 124: Daten der Nutzerbefragung und alle Messdaten aus Raum 0.3 vom 13.02.2006 (Montag) in 10-Minuten Auflösung. Vertikale Hilfslinien dienen zur Orientierung beim Wechsel der Personenzahlen bzw. der Stellung der Klassenraumtür.



Abschließend werden die CO<sub>2</sub>- und VOC-Messdaten aus dem nur schwach genutzten Raum 0.7 im Nordflügel dargestellt. Hier wurde das Nutzerprotokoll abweichend in der Woche vom 6.3. bis einschließlich zum 10.03.2006 geführt.

Die Messdaten im Zusammenhang mit den Personenzahlen und der Stellung der Klassenraumtür sind in Abbildung 125 dargestellt. Es wurden sehr niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen. Die kleineren Peaks der Konzentration (bis maximal 800 ppm) passen sehr gut mit der Angabe über die Personenbelegung zusammen. Für die geringe Personenzahl würde auch ein deutlich niedriger Luftstrom ausreichen. Es wäre zu überlegen, ob es bei Folgeprojekten kostenseitig darstellbar ist, verschiedene Zuluft-Volumenströme über die Regelung zu realisieren. In solchen dauerhaft nur sehr gering genutzten Räumen könnten dann geringere Volumenströme eingestellt werden.



**Abbildung 125: CO<sub>2</sub>- und VOC-Messwerte (10 Minuten Auflösung) sowie anwesende Personenzahlen und Stellung der Klassenraumtür von Raum 0.7 (Förderunterricht) während der Nutzerbefragungswoche.**

## 6.7 Luftwechsel in Klassenräumen - Planungsempfehlung

Zur Untersuchung der Temperaturschichtung im Raum, der CO<sub>2</sub>-Verteilung und insbesondere dem Einfluss der Schüler auf die Raumluftparameter bei Kenntnis über die genaue Personenbelegung wurden am winterlich kalten 3. März 2006 im Klassenraum 0.4 während der Unterrichtszeit Zusatzmessungen durchgeführt (siehe Abschnitt 6.6.3.2). Diese Messungen im Zusammenhang mit der genauen Bestimmung der Luftwechsel in drei Klassenräumen (0.1, 0.3 und 0.4), welche eine Woche zuvor durchgeführt wurde, wurden herangezogen, um eine Empfehlungen zum notwendigen Luftwechsel in Klassenräumen geben zu können.

### 6.7.1 Tatsächliche Luftvolumenströme

Mit der Indikatorgas-Abklingmethode wurde am Wochenende 25. und 26. Februar 2006, der tatsächliche Außenluftwechsel in drei Klassenräumen bestimmt. Hierzu wurde ein Spurengas (SF<sub>6</sub>) in die Klassenraumluft eingebracht und gleichmäßig verteilt. Anschließend wurde der Verdünnungsverlauf bei normalem Zu-/Abluftbetrieb (wie bei Standardnutzung) in den betreffenden Räumen aufgezeichnet (Tracergas-Monitor) und ausgewertet. Die Messdauer betrug etwa 2 Stunden und 45 Minuten. Zusätzlich wurde am Vortag bei den drei gleichen Räumen das Abklingen des Spurengases zur Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels durchgeführt (Lüftungsanlage aus). Die Messdauer betrug etwa 11,5 Stunden.



Abbildung 126: Tracergasmonitor im Gruppenraum neben einem Klassenraum.



**Abbildung 127: Links: Verteilen des Tracergases mit einem Ventilator. Rechts: Ansaugstelle im Raum (Schlauch an der Rückenlehne eines Stuhls).**

Mit der Spurengasmessung wurde der Luftwechsel in den drei Klassenräumen bei normalem Schullüftungsbetrieb festgestellt. Die gemessenen Luftvolumenströme lagen zwischen **262 und 296 m<sup>3</sup>/h**. Beim Raumvolumen von 208 bzw. 209 m<sup>3</sup> ergeben sich Luftwechselzahlen zwischen  $n = 1,26$  bis 1,42. Bei Lüftungsanlagen im Wohnbereich sind Werte von 0,4 bis 0,5 üblich. Durch die hohen Belegungsdichten bei der Schulnutzung sind derartig hohe Luftwechsel notwendig und typisch. Bei der maximalen Belegung am 03.03.2006 von 17 Schülern plus einer Lehrkraft in Raum 0.3 ergibt sich eine personenbezogene Luftmenge von **16,4 m<sup>3</sup>/(h Person)**. Diese deckt sich sehr gut mit den empfohlenen Angaben von Luftmengen zwischen **15 und 20 m<sup>3</sup>/h** aus [Pfluger 2006-2]. Die typische Schulnutzung mit Pausenzeiten, Sonder-raumnutzung und zeitweise Kleingruppenbildungen außerhalb des Raumes führt dazu, dass die Luftmengen trotz der dichten Belegung nicht höher liegen müssen. Beim Ganztagesbetrieb der Schule könnte es ggf. notwendig sein die Luftströme noch etwas zu erhöhen. Der Einfluss der Luftmengen auf den Energieverbrauch eines Schulgebäudes wird häufig deutlich unterschätzt. Es ist daher davon abzuraten, höhere personenbezogene Luftvolumenströme zu projektieren. Der deutliche Einfluss auf den Energieverbrauch wird in [Kah 2006] untersucht und dargestellt.

**Tabelle 26: Ergebnisse der Luftvolumenstrommessungen mittels Tracergas-Untersuchung.**

	<b>Raum 0.4</b>	<b>Raum 0.3</b>	<b>Raum 0.1</b>
Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]	209	208	209
<b>Lüftung aus</b>			
Luftvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	9,4	7,9	12,4
Konfidenzintervall (+/-)	0,2	0,2	0,3
<b>Lüftung an</b>			
Luftvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	296	262	281
Konfidenzintervall (+/-)	17	19	45



Zur Bestimmung des tatsächlichen von der Zuluft eingeblasenen Volumenstroms muss der gemessene Gesamtluftwechsel vom gemessenem Infiltrationsluftwechsel abgezogen werden. Die so bestimmten Zuluftvolumenströme betragen bei den drei Räumen **287, 254 und 267 m<sup>3</sup>/h**. Alle drei Räume haben einen Konstantvolumenstromregler der auf 350 m<sup>3</sup>/h Zuluft eingestellt ist. Dieser Wert wird damit von allen drei Reglern deutlich unterschritten. Die Luftmengen reichen aber - wie oben gezeigt - trotzdem für die reale Nutzung der Räume aus.





## 7 Wärmeverluste zum Erdreich

Das Messprojekt soll die Frage beantworten, ob die gewählte Konstruktion mit einer mäßig gedämmten Bodenplatte, bei der die Dämmwirkung des Erdreichs durch Verwendung einer Dämmschürze verbessert wird, tatsächlich das rechnerisch ermittelte thermische Verhalten zeigt. Damit wird es zum einen möglich, für künftige Projekte die Planungssicherheit zu verbessern, zum anderen kann im hier untersuchten Gebäude festgestellt werden, ob möglicherweise unerwartet hohe Wärmeverluste durch das Erdreich stattfinden.

### 7.1 Konstruktion der Bodenplatte

Die Riedbergschule wurde an einem Hang errichtet (Der Höhenunterschied der Geländeoberkante zwischen Haupteingang und dem Boden der Turnhalle beträgt ca. 8 Meter.). Um den daraus resultierenden, seitlichen Erddruck aufzunehmen, war eine geeignete Gründung erforderlich. Eine für eine wärmebrückenfreie Konstruktion wünschenswerte Flachgründung auf Schaumglas oder extrudiertem Polystyrolschaum schied im Laufe des Planungsprozesses aus; eine thermische Trennung der aufgehenden Wände war aufgrund der hohen statischen Belastung durch die großen Deckenspannweiten ebenfalls nicht möglich. Im Verlauf des Planungsprozesses wurde daher entschieden, eine innovative Lösung mit sogenannten Dämmschürzen zu realisieren. Damit sollten die Wärmeverluste durch das Erdreich zumindest so weit reduziert werden, dass der Passivhausstandard erreichbar wurde. Details zu den während der Planung untersuchten Varianten finden sich in [Schnieders 2006].

Der Aufbau der Gründungskonstruktion geht aus dem Schnitt durch die Ebene der Messsensoren in Abbildung 128 hervor. Die in Beton ausgeführte Bodenplatte ist oberseitig mit Polystyrol gedämmt, darüber befinden sich als thermisch wirksame Schichten noch eine Perlite-Ausgleichsschüttung für den Trockenestrich sowie die Trittschalldämmung. Die aufgehenden, massiven Wände durchdringen die Wärmedämmung und führen zu entsprechenden sehr hohen Wärmebrückeneffekten. Entlang der Außenseiten der Bodenplatte verlaufen senkrechte Dämmschürzen von ca. 2 m Tiefe und 20 cm Stärke, die den Weg der Wärme aus dem Gebäude durch das Erdreich nach außen verlängern und so die Temperatur unter der Bodenplatte anheben und die Wärmeverluste entsprechend reduzieren. Ein Foto einer Dämmschürze während der Bauphase zeigt Abbildung 22.

### 7.2 Methode

Für den Bereich der Bodenplatte, in dem die Messungen durchgeführt wurden, wurde ein zweidimensionales thermisches Modell im Wärmestrom-Berechnungsprogramm HEAT2 aufgebaut. Es erlaubt die zeitabhängige Ermittlung der Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich in Abhängigkeit von den Außen- und Innentemperaturen. Gibt das Modell die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme im

Erdreich korrekt wieder, so kann dies als Validierung des Berechnungsverfahrens angesehen werden..

Unterhalb des untersuchten Gebäudes befinden sich zwei Arten von Erdreich: Der bis zu einer Tiefe von ca. 2 m unter der Geländeoberkante anstehende Boden („Typ A“) besteht aus Löß und Lößlehm. Darüber wurde das Gelände mit einem Material aufgefüllt, das grobe Steine bis ca. 5 cm Größe enthält („Typ B“).

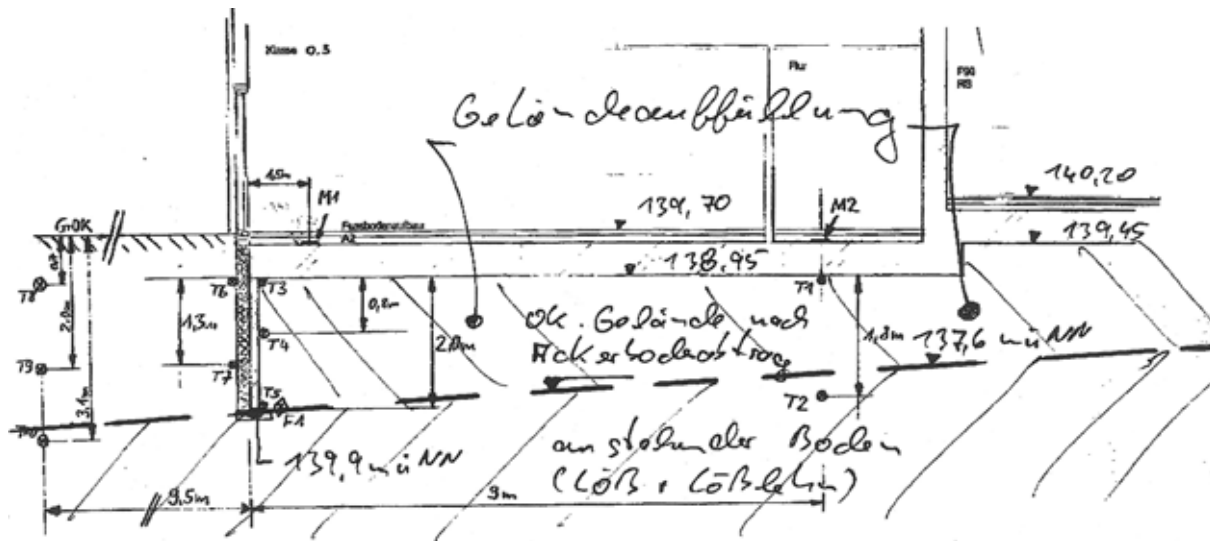


Abbildung 128: Verfüllung unterhalb der Bodenplatte (Skizze: Ingenieurbüro ITUS)

Von beiden Bodentypen wurde beim Einbau der Messsensoren jeweils eine Probe entnommen. Am Lehrstuhl für angewandte Physik an der BTU Cottbus wurden für beide Proben die Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Feuchten sowie die spezifische Wärmekapazität im trockenen Zustand bestimmt. Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 27: Ergebnisse der Untersuchung der Erdreichproben

	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	spez. Wärmekapazität bei 10 °C [J/(gK)]
Typ A, trocken	0,228	0,791
Typ A, u=30%	1,186	1,559**
Typ B, trocken	0,240	0,778
Typ B, u=17%	1,679*	1,268**

\* Die Messung der feuchten Probe konnte aus technischen Gründen nur nach Aussortieren der größeren Steine erfolgen

\*\* Werte errechnet durch PHI

Wie die Tabelle zeigt, hängt insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, aber auch die Wärmekapazität stark von der Erdfeuchte ab.



Um Rückschlüsse auf die in der Auswertung anzusetzenden Bodenfeuchten zu ermöglichen, wurden von der BTU Cottbus ferner einzelne Punkte der Sorptionsisotherme gemessen. Die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

**Tabelle 28: Ergebnisse der Messung der Sorptionsisotherme**

<b>Materialfeuchte u, (Wassermasse / Masse des trockenen Erdreichs) [%]</b>	<b>Rel. Luftfeuchte über der Probe [%]</b>
17,8	100
8,49	100
4,99	100
0,91	79

In Verbindung mit der unter dem Gebäude durchgeführten kontinuierlichen Messung der Wasseraktivität im Erdreich sollten so die thermischen Eigenschaften des Erdreichs während des Messzeitraums ermittelt werden.

Die Auswertung der Feuchtemessungen im Erdreich (Messstelle F1, vgl. [Abbildung 41]) zeigen, dass über den gesamten Messzeitraum die Wasseraktivität im Hohlraum bei 100% liegt. Erst im Herbst 2006 ist eine minimale Abnahme der Wasseraktivität zu erkennen, die auf eine allmähliche Austrocknung des Erdreichs hindeutet. Die gemessenen Punkte auf der Sorptionsisotherme zeigen bei einer Materialfeuchte von 5 % eine Wasseraktivität von 100 %, bei 0,9 % Materialfeuchte beträgt die Wasseraktivität noch 80%. Für die Simulation wurden die thermischen Eigenschaften des Erdreichs daher so eingestellt, dass sie feuchtem Erdreich mit ca. 3 % Materialfeuchte entsprechen.

Bei der Untersuchung von Temperaturverläufen im Erdreich muss berücksichtigt werden, dass die Angleichung der Temperaturen in einem quasistationären Zustand bezüglich der Randbedingungen Zeiträume von mehreren Jahren erfordert. Die Simulation des Temperaturverlaufs erfolgte daher zunächst über einen hinreichend langen Zeitraum für das ungestörte Erdreich – am Standort der Riedbergschule befand sich vor Baubeginn ein Getreideacker. Bei Baubeginn der Schule am 23.7.2003 wurde zunächst der Ackerboden abgetragen; die Dämmschürzen wurden ab Oktober 2003 eingebaut und die Zwischenräume wieder mit Erdreich (Typ B) verfüllt. Im August 2004 wurde die Bodenplattendämmung eingebaut. Diese Vorgänge wurde jeweils in der Simulation abgebildet.

Temperaturmessungen lagen nicht für den gesamten Zeitraum, der in der Simulation abgebildet werden musste, vor. Wo erforderlich, wurden die Randbedingungen daher durch geeignete Approximationen ersetzt. Messdaten zu den Innentemperaturen liegen seit 17. November 2004 vor, von diesem Zeitpunkt an entsprechen sämtliche verwendeten Randbedingungen den gemessenen Daten.



## 7.3 Vergleich von Messung und Simulation

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen weisen unter den oben genannten Randbedingungen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen auf. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 129 bis Abbildung 132) sind jeweils die gemessenen und simulierten Temperatur- bzw. Wärmestromverläufe zusammen dargestellt. Abbildung 133 zeigt eine statistische Auswertung des Vergleichs von Messung und Simulation.

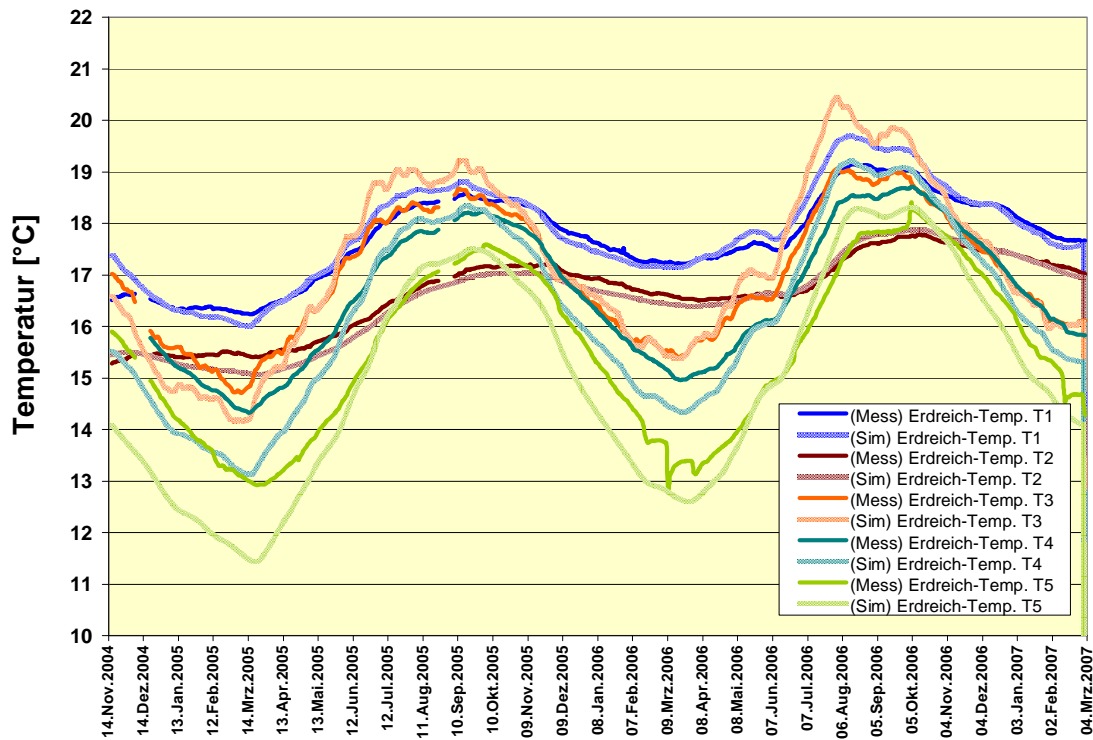


Abbildung 129: Gemessene und simulierte Temperaturen im Erdreich (Messstelle T1 bis T5 unter dem Gebäude)

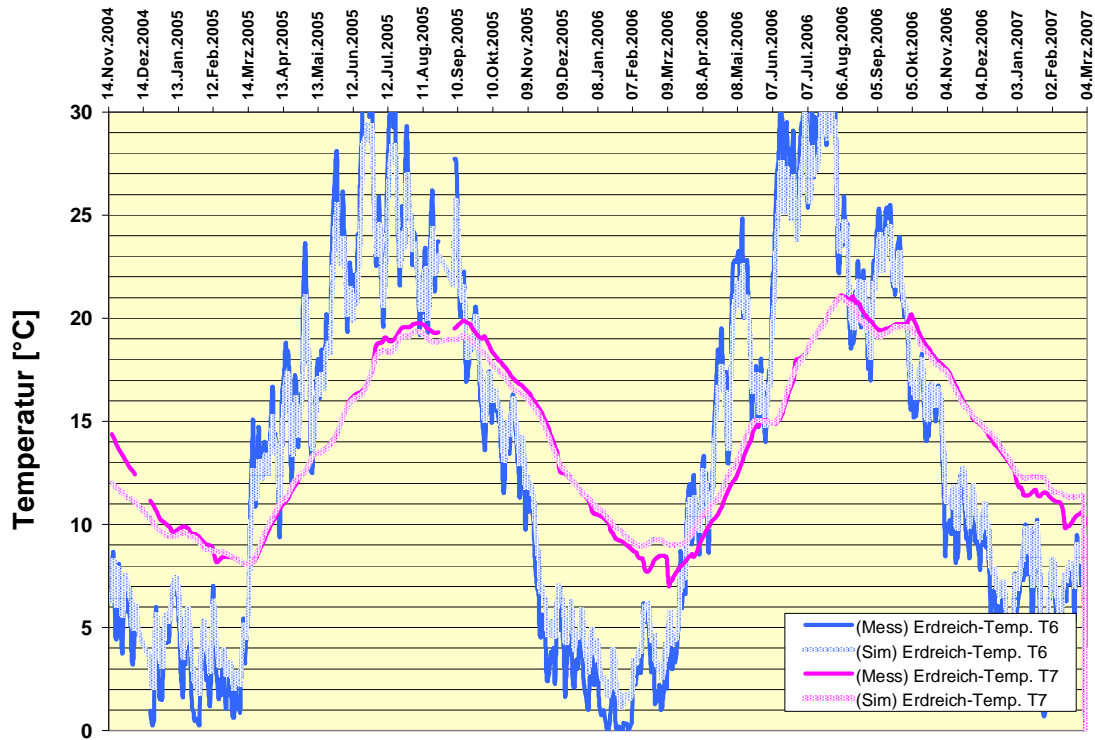


Abbildung 130: Gemessene und simulierte Temperaturen im Erdreich (Messstelle T6 und T7 vor der Frostschürze)

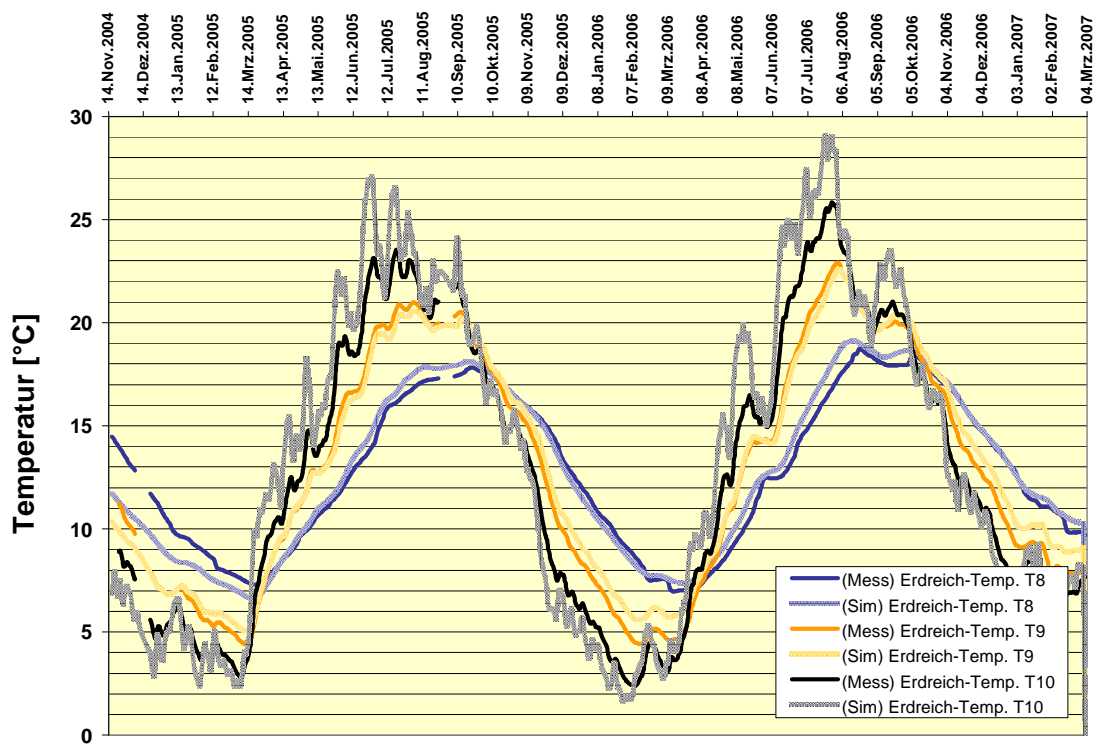


Abbildung 131: Gemessene und simulierte Temperaturen im Erdreich (Messstelle T8 bis T10 im ungestörten Erdreich)

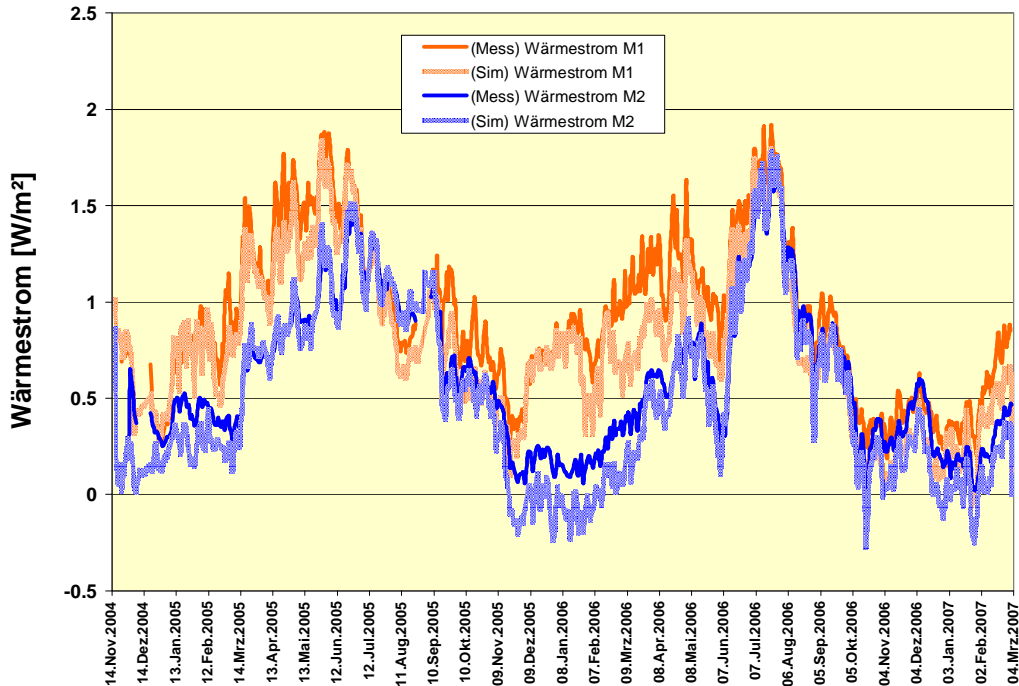


Abbildung 132: Gemessene und simulierte Wärmeströme durch den Fußboden (Messstelle M1 und M2)

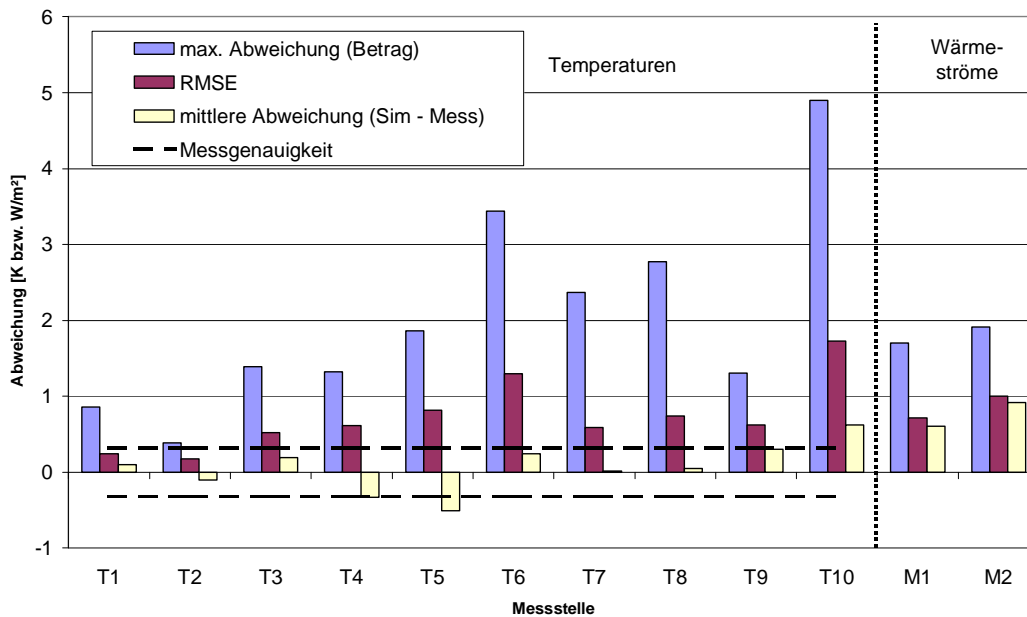


Abbildung 133: Statistische Auswertung der Differenzen zwischen Messung und Simulation für den Zeitraum 17.11.04 bis 1.3.07. Für jeden Messpunkt sind drei Größen dargestellt: 1. Die maximale Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Wert, betragsmäßig. 2. Der Root-Mean-Square-Error gemäß  $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_{sim} - x_{mess})^2}$ . 3. Die durchschnittliche Abweichung zwischen Simulation und Messung. Diese Größe nimmt negative Werte an, wenn die simulierten Temperaturen bzw. Wärmeströme im Durchschnitt unter den gemessenen liegen. Für die Temperaturen wurde zusätzlich die Messgenauigkeit der gesamten Messkette abgeschätzt und im Diagramm eingetragen.



Simulation und Messung stimmen am besten überein für die Temperaturmessstellen, die sich unterhalb von Gebäude und Dämmschürze befinden. Hier liegen die mittleren Abweichungen größtenteils unter der Messgenauigkeit der Temperaturmessung. Auf der Außenseite der Dämmschürze ist die Übereinstimmung etwas schlechter; denkbare Gründe sind z.B. Füllmaterialien oder Bodenbeläge, die von den Werten der Simulation abweichen, Sickerwasser, erdverlegte Wasserleitungen in der Nähe der Messstellen oder nicht berücksichtigte Einflüsse der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche. Da die Übereinstimmung im hier interessierenden Bereich, nämlich in der Nähe des Gebäudes, sehr gut ist, wurden die Ursachen für die etwas größeren Abweichungen im ungestörten Erdreich nicht näher untersucht.

Auch die simulierten Wärmeströme stimmen überwiegend zufriedenstellend mit den gemessenen Werten überein. In Abbildung 132 sieht man jedoch, dass im Winter 2005/2006 für beide Wärmestrommessplatten die gemessenen Werte während mehrerer Monate um ca.  $0,15 \text{ W/m}^2$  über den simulierten liegen. Die Zeiträume, in denen dies zu beobachten ist, treten bei den beiden Platten nicht gleichzeitig auf: Sie sind um ca. 3 Monate gegeneinander verschoben. Die Ursache dieser Abweichungen war anhand der vorliegenden Messdaten nicht ermittelbar. Möglicherweise handelt es sich um einen Messfehler, entweder in den Temperaturen oder im Wärmestrom.

Der gemessene Wärmestrom über den gesamten Auswertungszeitraum von Oktober 2005 bis September 2006 ist an der Messstelle M1 um 21,7%, an der Messstelle M2 um 23,1% größer als in der Simulation. Auch hierfür kommen prinzipiell Messfehler als Ursache in Frage (die Temperatur auf der Bodenoberfläche musste anhand der gemessenen Raumtemperatur und einer exemplarisch ermittelten Temperaturschichtung berechnet werden), denkbar ist aber auch eine geringere Wirkung der Wärmedämmung auf der Bodenplatte als in der Simulation angenommen.

Insgesamt gibt die Simulation die Messergebnisse gut wieder. Abbildung 134 illustriert anhand der Temperaturverteilung unter der Bodenplatte zu verschiedenen Zeitpunkten die Funktion der Dämmschürzen, wie sie durch die Messungen bestätigt wird. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich unterhalb des Gebäudes zwischen den Dämmschürzen eine Wärmeglocke bildet, die die Wärmeverluste durch die Bodenplatte reduziert. Die erhöhten Wärmeverluste aufgrund der Wärmebrücken im Bereich der aufgehenden Wände führen zu entsprechend erhöhten Temperaturen im Erdreich, die in der Grafik ebenfalls gut zu sehen sind.

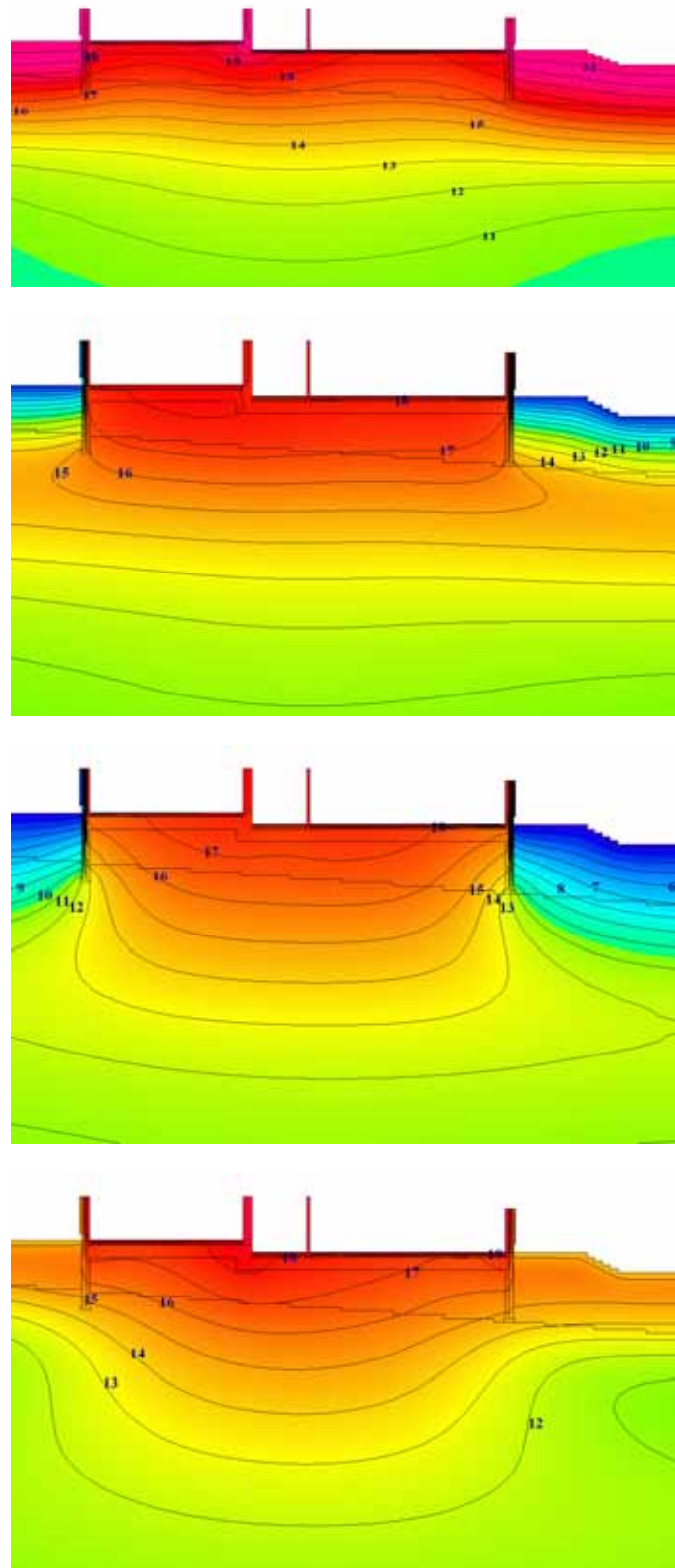


Abbildung 134: Temperaturverteilung im Erdreich am 1. Sep 05, 1. Dez 05, 1. Mar 06 und 1. Jun 06.





## 7.4 Schlussfolgerungen zum Wärmeschutz der Bodenplatte

Die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme stimmen mit den berechneten Werten gut überein. Die Messungen sind demnach verträglich mit der Annahme, dass die Berechnung der Wärmeverluste durch das Erdreich realistische Ergebnisse liefert. Es konnten keine Indizien dafür gefunden werden, dass das Konzept nicht wie erwartet funktionieren würde (etwa aufgrund von fließendem Grundwasser oder grundlegenden Fehlern in den Rechenverfahren).

Dass die gemessenen Wärmeströme durch die Bodenplatte ca. 20% höher liegen als in der Simulation, hat auf die Wärmebilanz des gesamten Gebäudes keinen bedeutenden Einfluss.

Für die künftige Planung ähnlicher Konstruktionen ist zu beachten, dass die Verwendung von Dämmschürzen in Verbindung mit reduziertem Wärmeschutz der Bodenplatte stets gewisse Unsicherheiten beinhaltet: Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs muss gewöhnlich abgeschätzt werden. Die oben dokumentierten Messungen an trockenen und feuchten Erdreichproben zeigen erhebliche Unterschiede zwischen nassen und trockenen Proben, so dass – aufgrund der fehlenden Information über die sich im Gebäudebetrieb einstellende Erdreichfeuchte – selbst nach Messungen von Bodenproben die Wärmeleitfähigkeit nur sehr ungenau bestimmt werden kann. Entsprechende Sicherheiten sind daher vorzusehen. Dies gilt auch für mögliche Grundwasserströmungen, die nur an wenigen Standorten völlig ausgeschlossen werden können.

Insgesamt erlauben es die hier durchgeführten Messungen die Verwendung von Dämmschürzen als eine von mehreren denkbaren Gründungsalternativen zu empfehlen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass solche Schürzen nur dann die hier bestätigte Wirkung entfalten, wenn sie sehr tief (bzw. weit) in das Erdreich eingreifen (hier 2 m) und eine sehr gute Wärmedämmung aufweisen (hier 20 cm).

## 8 Luftwechsel im Eingangsbereich

Eingangsbereiche von öffentlichen Gebäuden werden intensiv genutzt. Mit den häufigen Öffnungsvorgängen ist ein zusätzlicher Luftaustausch verbunden, der in der Heizzeit die Wärmeverluste ggf. relevant erhöhen kann. Mit Untersuchungen am Haupteingang und am Hofzugang der Passivhaus-Grundschule in Frankfurt-Riedberg wurden die auftretenden Außenluftvolumenströme quantitativ ermittelt und der energetische Einfluss bewertet.

Ziel der Untersuchungen war, zu klären, welchen energetischen Einfluss Türöffnungsereignisse bei energieeffizienten Gebäuden mit häufig frequentierten Eingangsbereichen haben. Insbesondere sollte die Verringerung des Luftaustauschs aufgrund von Windfängen in den Eingangsbereichen ermittelt werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung geben auch für zukünftige Projekte Anhaltswerte für einen zusätzlichen Luftaustausch in Eingangsbereichen. Eine erste Vorauswertung dieser Untersuchung erschien in [Kah 2007].

### 8.1 Untersuchte Eingangsbereiche

Die Untersuchungen wurden am Haupteingang und am Zugang zum Pausenhof (vgl. Abbildung 135 und Abbildung 136) der Grundschule durchgeführt. Die Maße des Haupteingangs mit Windfang sind in Abbildung 135 dargestellt. Jeweils ein Türflügel wird elektromotorisch geöffnet und geschlossen. Mit den automatisch öffnenden Türflügeln wird gleichzeitig der rollstuhlgerechte Zugang zur Schule bereitgestellt. Die Öffnungszeiten dieser Flügel sind mit 15 s deutlich länger als die der Türflügel mit mechanischem Türschließer (5 s).

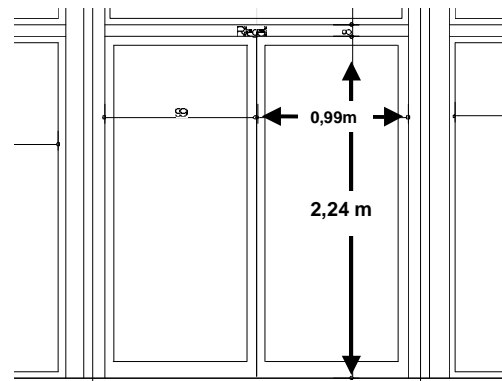
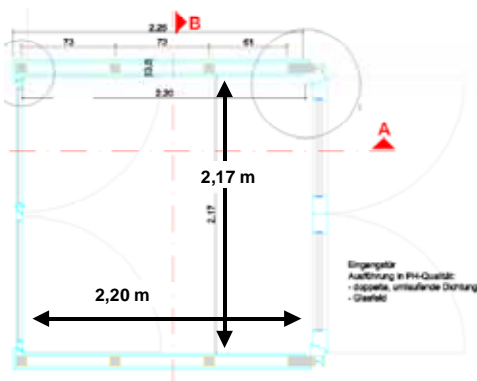


Abbildung 135: Windfang Haupteingang / Grundriss / Ansicht (nach Architekten 4a, Stuttgart)

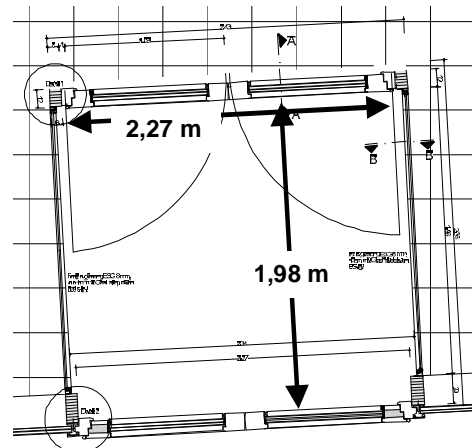


Abbildung 136: Windfang Pausenhof / Grundriss (nach Architekten 4a, Stuttgart)

## 8.2 Durchführung der Messung

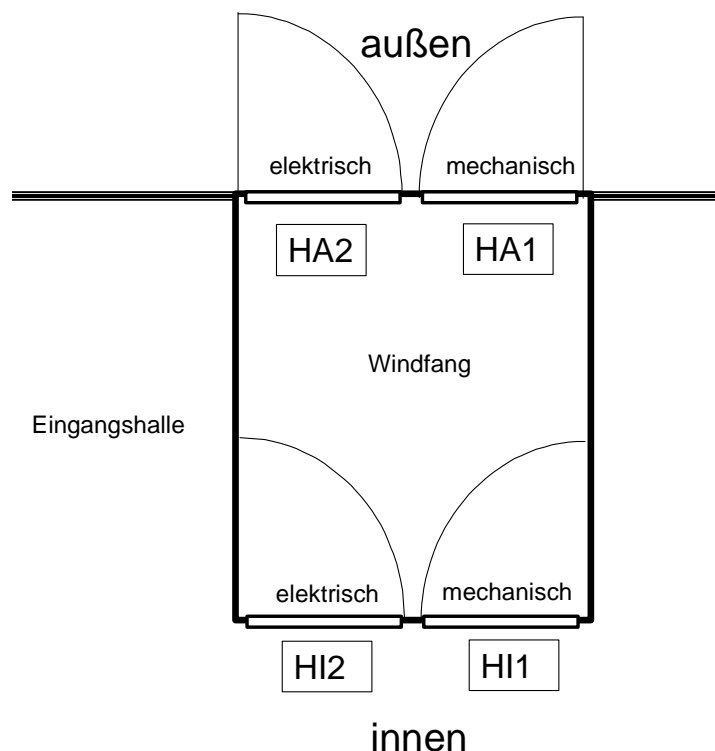
Erste Abschätzungen zum Luftaustausch bei einzelnen Türöffnungen zeigten, dass je Türöffnung mit relativ kleinen Luftmengen zu rechnen ist. Eine ursprüngliche angedachte Messung des tatsächlichen Luftaustauschs im laufenden Schulbetrieb

wurde daraufhin verworfen, da mit dem laufenden Schulbetrieb vereinbare Messaufbauten keine ausreichende Genauigkeit erwarten ließen. Das schließlich entwickelte Messkonzept sah vor, zunächst typische Türöffnungsereignisse und Öffnungsdauern zu identifizieren (vgl. Abschnitt 8.3). Der tatsächliche Luftaustausch für diese typischen Türöffnungsereignisse wurde anschließend mit Hilfe von Indikatorgasmessungen bestimmt (vgl. Abschnitt 8.5). Durch Zusammenführen der Türöffnungsdauern und der gemessenen Luftmengen wurde der zusätzliche Luftaustausch im Eingangsbereich für einen Schultag abgeleitet (vgl. Abschnitt 8.6).

### 8.3 Aufzeichnung der Türöffnungsvorgänge

Um die Öffnungs- und Schließvorgänge der Türen des Windfangs aufzeichnen zu können, wurden jeweils an allen vier Türflügeln Reed-Kontakte und Datenlogger montiert, welche die Türstellung (auf/zu) jeweils in 0,5-Sekundenschritten aufzeichneten.

Der Windfang des Haupteingangs bzw. Pausenhofeingangs verfügt jeweils über zwei mechanische (Bezeichnung 1) und zwei elektrisch öffnbare (Bezeichnung 2) Türflügel, jeweils innen (Bezeichnung I) bzw. außen (Bezeichnung A) am Windfang (siehe Abbildung 137).



**Abbildung 137: Prinzipdarstellung und Bezeichnung der Türflügel im Windfang (hier: Haupteingang)**

Zusätzlich zur automatischen Aufzeichnung der Türöffnungs- und Schließvorgänge wurden beim ersten Ortstermin (16.01.06) vom Schulamt genehmigte Videoaufzeichnungen der Ein- und Austrittsvorgänge am Haupteingang vorgenommen. Wie



sich bei der Auswertung jedoch herausstellte, ließen diese Aufnahmen eine verlässliche Auszählung nicht zu, da Schüler zum Teil längere Zeit zwischen Eingangsbereich und Kamera standen. Daher wurden beim zweiten Ortstermin (30.1.06) zusätzlich zu den Aufzeichnungen der Türöffnungen mittels Datenlogger die Ein- und Austrittsvorgänge von einem Mitarbeiter durch Tastendrucke auf einem Laptop vor Ort (zeitsynchron zu den Aufzeichnungen der Datenlogger für die Türkontakte) mittels eines speziell hierfür erstellten Programms aufgezeichnet. Auf diese Weise konnte auch die Frequenz der Ein- und Austrittsvorgänge (Personen je Zeiteinheit) am Haupteingang bestimmt werden.

In Schuljahr 2005/2006 ist die Schule noch nicht voll belegt, die beobachtete Statistik damit noch nicht repräsentativ für den Auslegungszustand der Schule. Zum Zeitpunkt der Messungen waren nur 5 Klassen (ca. 110 Schüler plus ca. 8 Personen Personal) belegt. Im Zustand der geplanten Vollbelegung sind 400 Grundschüler in 16 Klassen plus ca. 20 Personen Personal vorgesehen. Die Belegung am Tag der Untersuchung lag demnach bei nur 28% der geplanten Vollbelegung. Für die Abschätzung von tagesmittleren Luftwechselraten im Eingangsbereich aufgrund von Öffnungsvorgängen müssen die vorliegenden Daten daher entsprechend hochgerechnet werden.

**Tabelle 29: Vorläufige und geplante Personenbelegung Schule**

	<b>Personen vorläufig (Jan. 2006)</b>	<b>Personen im Zustand der geplanten Vollbelegung</b>
Schüler	110	400
Personal	8	20
<b>Gesamt</b>	<b>118</b> (28 % der Vollbelegung)	<b>420</b>

In Abbildung 138 und Abbildung 139 sind die Häufigkeiten der gemessenen Türöffnungsdauern am Haupteingang und am Zugang zum Pausenhof dargestellt. Die dargestellten Häufigkeiten beziehen sich auf einen Schultag an der Grundschule (7:00 bis 14:00) mit 110 Schülern.

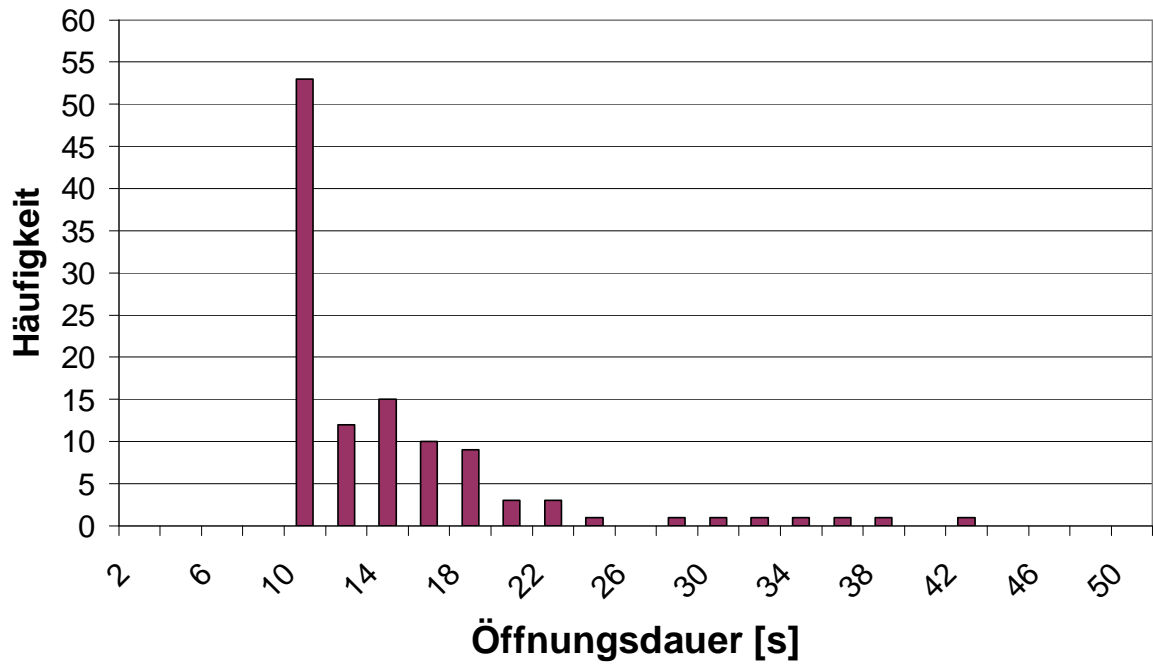


Abbildung 138: Haupteingang. Häufigkeit der gemessenen Türöffnungsdauern an einem Schultag.

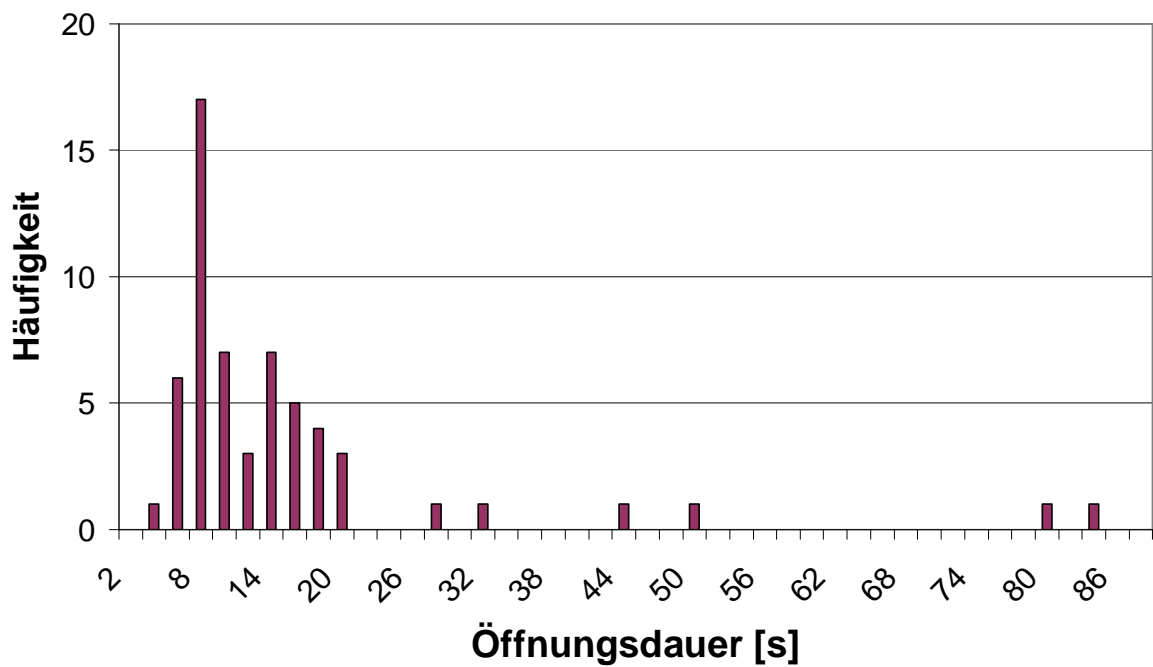
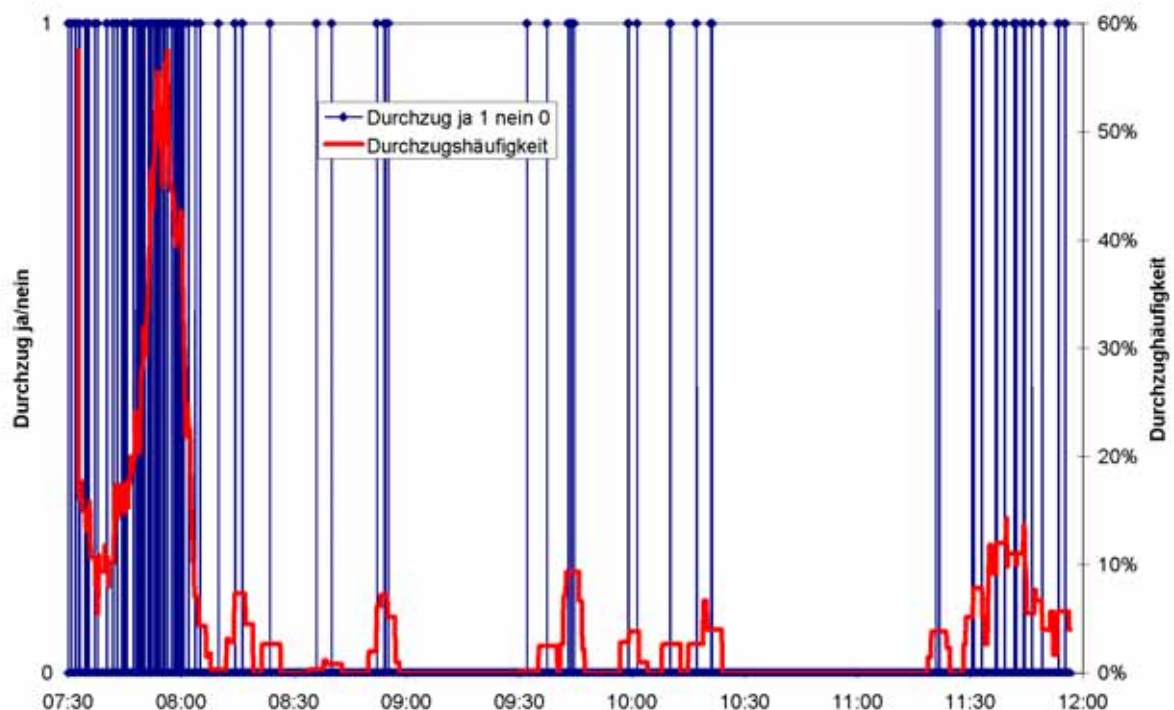


Abbildung 139: Pausenhof-Zugang. Häufigkeit der gemessenen Türöffnungsdauern an einem Schultag.



Zur näheren Betrachtung der Öffnungs- und Schließvorgänge wurden zunächst Einzeldurchgänge (d.h. eine Person durchläuft den Eingang) jeweils durch die mechanischen bzw. elektrisch schließenden Türen aus den Gesamtmessdaten ausgewertet. Es ergab sich für die mechanische Tür eine Schließzeit von 5 s und für die elektrische von 15 s. Die Laufzeit zwischen den Türen, d.h. die Zeit, zwischen dem Öffnen des Türkontaktes der ersten Tür und dem Öffnen des Kontaktes der zweiten Tür beträgt im Mittel 3 s. Demnach ergibt sich eine Überlappungszeit von 2 s bei der mechanischen bzw. von 10 s bei der elektrischen Tür, in dieser Zeit kann Durchzug durch den Windfang auftreten, weil gleichzeitig die innere und äußere Tür offen steht. Abbildung 140 zeigt als Auswertung für den Haupteingang die Zeiten gleichzeitig offener Außen- und Innentüren.



**Abbildung 140: Durchzugzeiten und Häufigkeit (Innere und äußere Türe gleichzeitig offen). Intervalllänge 10 min.**

In Abbildung 141 ist die gemessene Frequenz der Öffnungsvorgänge am Haupteingang dargestellt. Von besonderem Interesse ist hier die Zeit von 7:30 bis 8:00, da in dieser Zeit die Schüler zur ersten Schulstunde eintreffen.

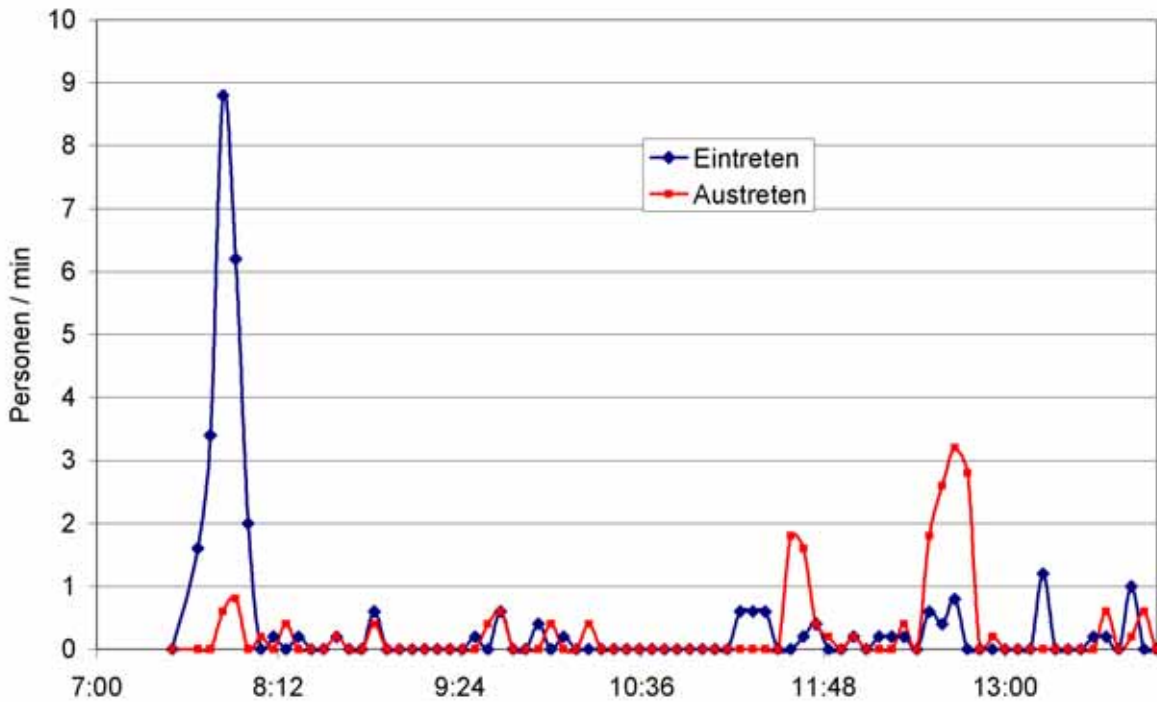


Abbildung 141: Frequenz der Ein- und Austrittsvorgänge am Windfang Haupteingang am 30.01.2006

In der nachfolgenden Grafik ist daher dieser Bereich nochmals vergrößert dargestellt. Die Frequenz der Ein- und Austrittsvorgänge zu Schulbeginn wurde zusätzlich mit einem Simulationsverfahren aus Abschnitt 8.3.1 hochgerechnet.

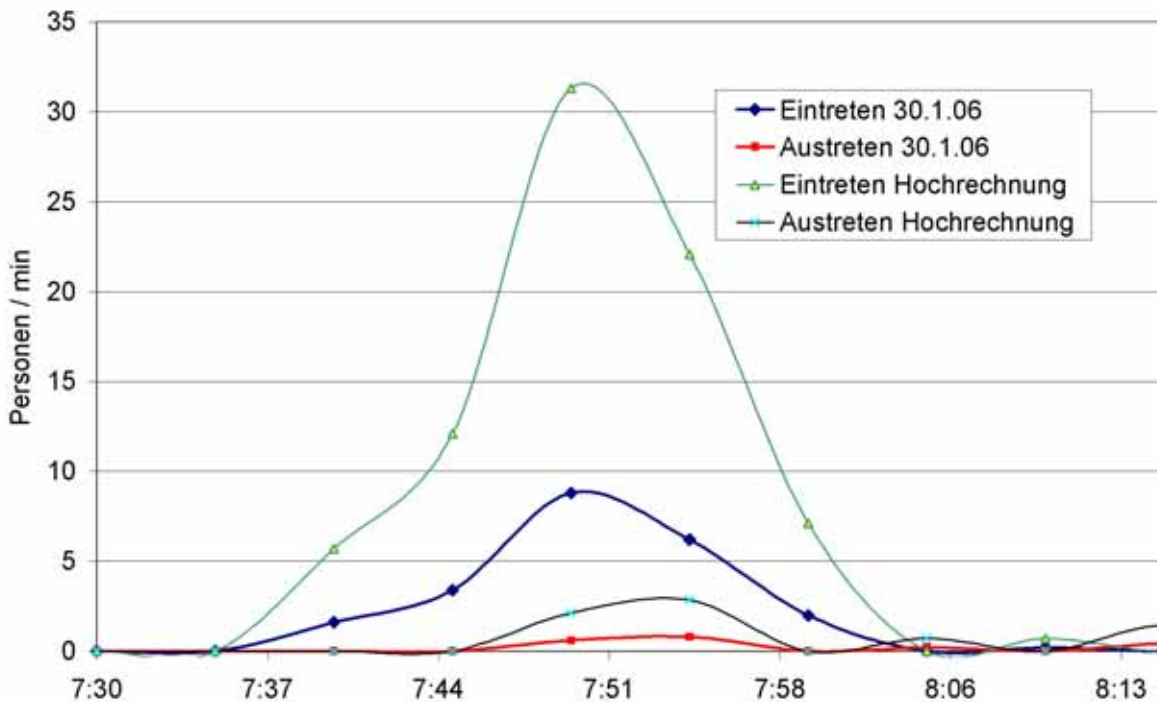


Abbildung 142: Frequenz der Ein- und Austrittsvorgänge vor Schulbeginn (von 7:30 bis 8:00)





Es zeigt sich, dass das Maximum etwa um 7:50, also ca. 10 Minuten vor Schulbeginn, erwartet wird.

Auf den Videoaufzeichnungen des Ortstermins vom 16.01.06 wurde beobachtet, dass sich eine Klasse von 24 Personen vor dem Windfang gesammelt hatte (Sporttermin außerhalb der Schule) und daraufhin sehr zügig (in 30 s) das Gebäude verlassen hat. Daraus ergibt sich rechnerisch eine Frequenz von 48 Schülern pro Minute. Die in Abbildung 142 hochgerechnete maximale Frequenz von 31 Schülern pro Minute bei Vollbelegung ist folglich noch nicht unrealistisch hoch.

### 8.3.1 Hochrechnung der Türöffnungsdauern zu Schulbeginn

Für die nachfolgende Betrachtung wird nicht zwischen elektrischer und mechanischer Türe unterschieden, sondern mit dem Mittelwert der Schließdauer von 10 s gerechnet.

Wird die Frequenz der Durchgänge immer weiter erhöht, dann tritt ab der Frequenz  $f=1/\text{Schließdauer}$  der Fall ein, dass die Tür länger offen steht als die Schließdauer und mehrere Personen hindurchtreten bevor die Tür wieder zugeht. Dabei ist die Streubreite bei geringer Personenzahl relativ breit. Die Messdaten und Videoaufzeichnungen zeigen, dass sich zwei Schüler praktisch unmittelbar nebeneinander durch die Tür drängen oder im Extremfall bis knapp das doppelte der Schließdauer verursachen, wenn sie nacheinander hindurchtreten. Insgesamt können die Datenpunkte linear approximiert werden (siehe Abbildung 143).

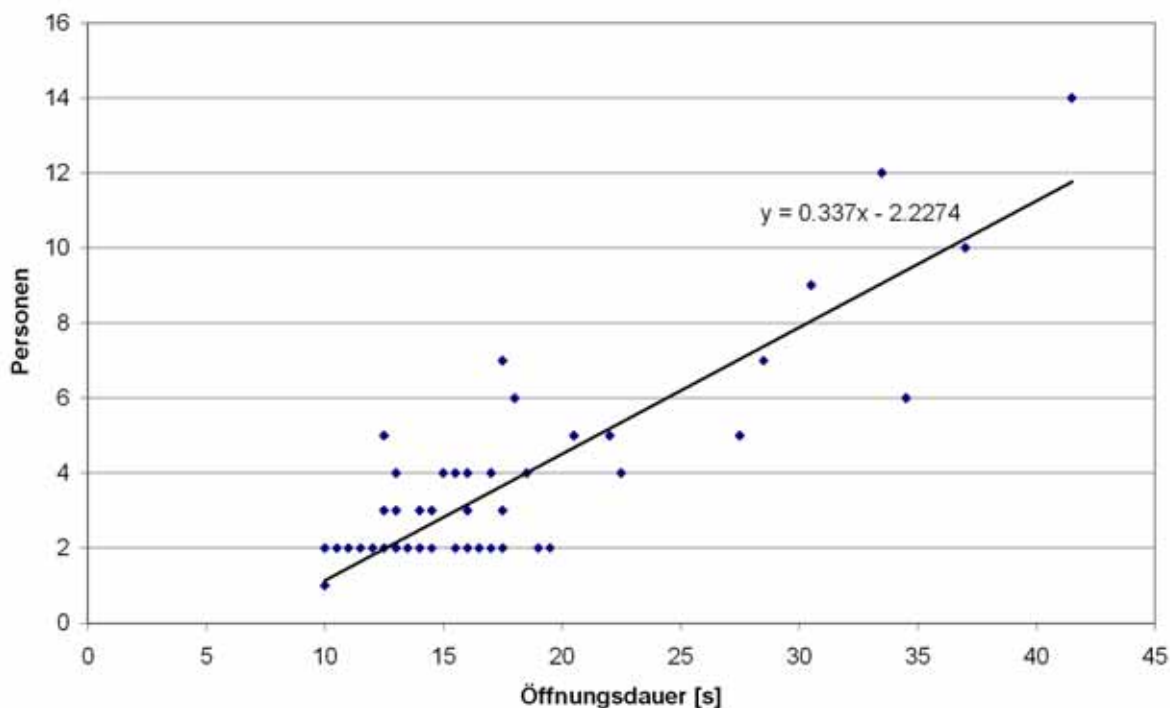
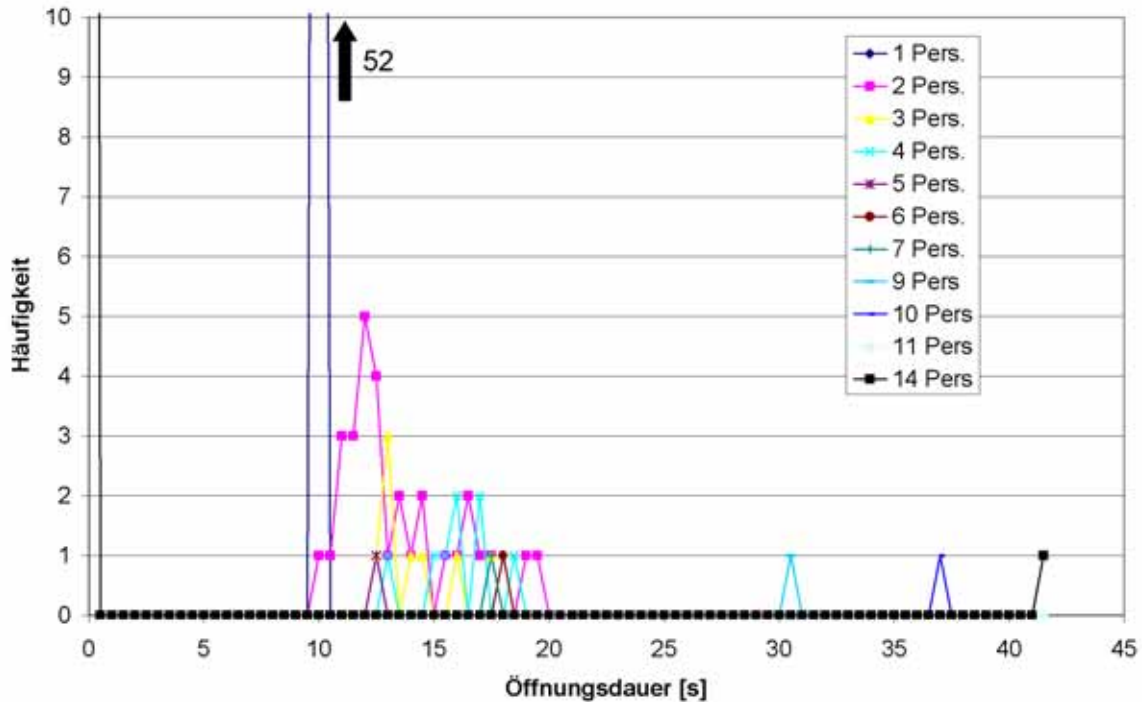


Abbildung 143: Anzahl der Personen in Abhängigkeit der Öffnungsdauer



**Abbildung 144: Häufigkeit der Öffnungsvorgänge in Abhängigkeit von Personenzahl und Öffnungsdauer auf Basis der Beobachtungen**

Betrachtet man die Häufigkeitsverteilung der Öffnungsvorgänge, so tritt das Einzelereignis (eine Person verursacht eine Öffnungsdauer, die der Schließdauer entspricht) mit Abstand am häufigsten auf (52 Ereignisse). Das Maximum bei 2 Personen tritt bei einer Öffnungsdauer von 12 s auf, gefolgt von 3 Personen mit einer Öffnungsdauer von 13 s. Für höhere Personenzahlen ist die Anzahl der Ereignisse nicht mehr ausreichend, um eindeutige Aussagen treffen zu können. Bei Vollbelegung der Schule werden diese Ereignisse allerdings eine höhere Bedeutung annehmen. Aus diesem Grund wurden die in Abbildung 142 dargestellten Frequenzen mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode simuliert und erneut nach Häufigkeiten und Öffnungsdauer ausgewertet. Es zeigt sich, dass sich die Häufigkeiten in Richtung längerer Öffnungsdauern verschieben. Insbesondere in der Zeit kurz vor Schulbeginn häufen sich die Eintrittsvorgänge gemäß Hochrechnung so stark, dass die Türen 490 Sekunden (8 min) dauerhaft offen stehen. Die übrigen Öffnungsdauern liegen zwischen 10 Sekunden und 1,4 Minuten.

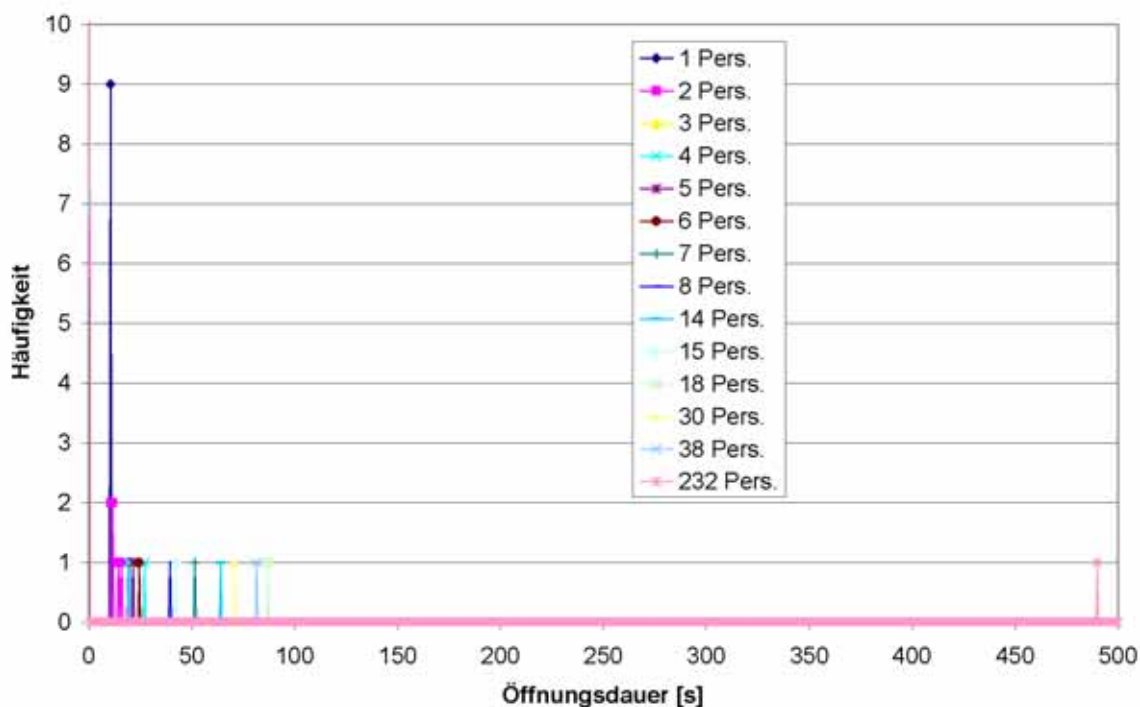


Abbildung 145: Häufigkeit der Öffnungsvorgänge in Abhängigkeit von Personenzahl und Öffnungsdauer auf Basis der Hochrechnung auf Vollbelegung der Schule

## 8.4 Temperaturmessung

Neben der Auswertung der Öffnungsvorgänge wurde am zweiten Ortstermin (30.01.2006) auch die Raumlufttemperatur in der Eingangshalle (Höhe 1,3 m, Abstand von der Innentüre des Windfangs 6 m) sowie die Außentemperatur gemessen und aufgezeichnet. Die Außenlufttemperatur stieg von Versuchsbeginn (7:30) bis Schulschluss (13:00) von  $-4\text{ °C}$  auf  $+1\text{ °C}$  an. Die Raumlufttemperatur im Eingangsbereich stieg im gleichen Zeitraum ebenfalls an, und zwar von  $17,5\text{ °C}$  auf  $18,3\text{ °C}$ . Signifikante Temperatureinbrüche konnten mit der eingesetzten Messtechnik (Trägheit des Temperatursensors) nicht festgestellt werden. Lediglich in der Zeit kurz vor Schulbeginn, in welcher die höchste Eintrittshäufigkeit (und ein damit verbundener Luftwechsel durch die offenen Eingangstüren) stattfand, war ein geringfügiges Absinken der Temperatur (lediglich 1 K) zu erkennen. Vom Versuchspersonal konnte in Bodennähe aber noch im Abstand von 7 m ein kühler Luftzug bei Öffnung der Tür wahrgenommen werden.

## 8.5 Messung des Luftaustauschs für typische Türöffnungsvorgänge

Für typische Türöffnungsereignisse wurde der tatsächliche Luftaustausch mittels Indikatorgasmessungen bestimmt. Um die zu erwartenden geringen Volumenströme noch messen zu können, wurde das Luftvolumen des Foyers durch einen Zeltaufbau verkleinert. Die abgeschätzten Luftmengen lagen zwischen 1 und 10 m<sup>3</sup> je Türöffnungen und wären im Foyervolumen von über 1000 m<sup>3</sup> kaum nachweisbar. Abbildung 146 und Abbildung 147 zeigen den Messaufbau (Indikatorgas-Monitor und Zelt vor dem Haupteingang). Die Indikatorgas-Messungen wurden am Haupteingang (vgl. Abbildung 135) durchgeführt.

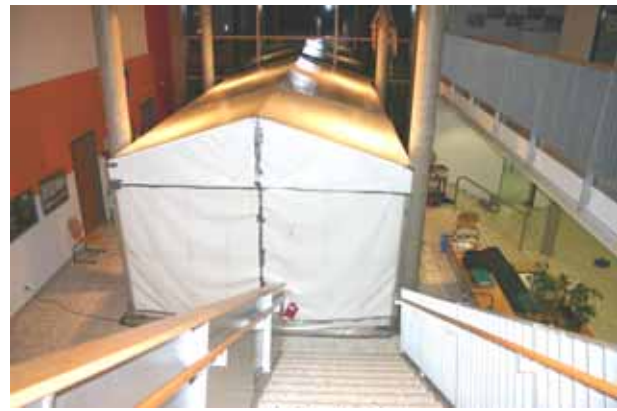


Abbildung 146: Messaufbau zur Konzentrationsabfall-Messung. Der Verdünnungsverlauf wird in einem sorgfältig abgedichteten Zelt im Schulfoyer gemessen. Indikatorgasmonitor (links) / Zelt vor Haupteingang (rechts)



Abbildung 147: Messzelt von innen. Zur Minimierung der Leckagen zum Foyer wurden die Stöße und Anschlüsse des Zeltaufbaus sorgfältig abgeklebt. Über ein Schlauchsystem werden Luftproben aus dem Zeltvolumen entnommen. 2 Schlauchenden sind mit Kreisen markiert (links). Der Ventilator (links) sorgt für eine gute Durchmischung der mit Indikator angereicherten Luft im Zeltvolumen.

Der zusätzliche Luftaustausch wurde mit der Konzentrationsabfallmethode (vgl. [DIN EN ISO 12569], [Ebel 2003]) ermittelt. Der mit den Türöffnungen induzierte Luftaustausch verdünnt das eingebrachte Indikatorgas (Spurengas). Aus dem Konzentrationsverlauf des Indikators kann anschließend der Luftaustausch abgeleitet



werden. Voraussetzung für diese Messmethode ist, dass das Indikatorgas sich vollständig mit der Raumluft vermischt und auch in der zeitlichen Entwicklung homogen im untersuchten Volumen verteilt bleibt. Unter dieser Voraussetzung folgt der Verdünnungsverlauf des Indikators einem Exponentialgesetz:

$$c_{\text{Indikator}}(t) = c_{\text{Indikator}}(t = 0) \cdot \exp(-n \cdot t)$$

$c_{\text{Indikator}}$  : Indikatorgaskonzentration

$t$  : Zeit

$n$  : Luftwechselrate

Zur Auswertung werden die zeitaufgelösten Konzentrationsdaten logarithmiert. Die Luftwechselrate ergibt sich aus der Steigung einer Regressionsgrade über diesen logarithmierten Datensatz.

Die Versuche, z.B. „Eintreten durch Tür mit mechanischem Türschließer“, wurden jeweils mehrfach wiederholt. Dies hatte folgende Vorteile:

- Die Konzentration fiel in den Versuchen stärker ab und somit war das „Mess-Signal“ besser. Die Messgenauigkeit konnte auf diese Weise erhöht werden
- Es konnte der Luftaustausch für ein mittleres, bzw. durchschnittliches Öffnungsereignis bestimmt werden. Zufällige Einflüsse mitteln sich durch diese mehrfache Messung heraus.

Abbildung 148 zeigt exemplarisch den Konzentrationsabfall des Indikators. Durch die Logarithmusbildung wird der exponentielle Konzentrationsabfall zu einer Geraden. Im mittleren Kurvenbereich wurde der Konzentrationsabfall durch 20 Türöffnungsereignisse während 20 min erhöht. Zur Ermittlung der zusätzlich induzierten Luftmengen wurde der Luftwechsel während der Versuche ausgewertet; dieser entspricht der Steigung der logarithmierten Konzentrationskurve. Die weiteren Konzentrationsverläufe sind im Anhang dargestellt.

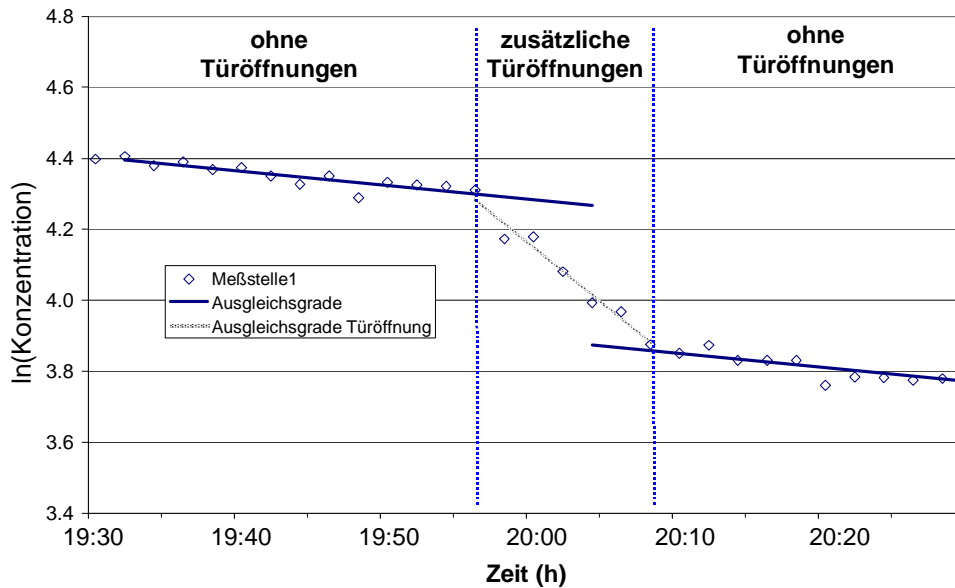


Abbildung 148: Exemplarischer Konzentrationsverlauf während eines Versuchsdurchlaufs. Aus der Steigung des logarithmierten Konzentrationsverlaufs wurde der durchschnittliche Luftwechsel während eines Zeitabschnitts bestimmt.

## 8.6 Ergebnisse

Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse der Indikatorgas-Messung. Beim motorisch öffnenden Türflügel zeigt der Windfang aufgrund der langen Öffnungszeiten und der damit einhergehenden langen gleichzeitigen Öffnung von innerer und äußerer Tür kaum Wirkung (vgl. Tabelle 30, Spalte 2/4).



**Tabelle 30: Ergebnisse der Indikatorgas-Messung. Luftaustausch für unterschiedliche Türöffnungsereignisse.**

	Einzelperson durchläuft <b>WF (mot. TS)</b>	Einzelperson durchläuft <b>WF (mech. TS)</b>	Einzelperson durchläuft Eingang <b>ohne WF (mot. TS)</b>	Einzelperson durchläuft Eingang <b>ohne WF (mech. TS)</b>	Türöffnung mit 10 sec <b>Durchzug (mech. TS)</b>	Türöffnung mit 30 sec <b>Durchzug (mech. TS)</b>
Dauer einer Türöffnung [s]	15	5	15	5	5	5
Dauer der gleichzeitigen Öffnung von innerer und äußerer Tür des Windfangs [s]	12	2	15	5	15	35
Luftaustausch je Ereignis [m <sup>3</sup> ]	3,7 ± 0,3	1,6 ± 0,6	4,3 ± 0,7	3,6 ± 0,4	6,9 ± 1,7	11,7 ± 3,5

Die Messungen wurden bei Außentemperaturen zwischen 2,6 und 0,0°C und einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 1,8 m/s (Böen bis 4m/s) vor dem Eingangsbereich durchgeführt.

**WF:** Windfang / **mech. TS:** mechanischer Türschließer / **mot. TS:** motorischer Türschließer

Zur Abschätzung des induzierten Volumenstroms bei anderen Öffnungsereignissen wurde angenommen, dass dieser proportional zur Dauer der gleichzeitigen Öffnung von innerer und äußerer Tür des Windfangs ansteigt. Durch eine Interpolation wurde ein mittlerer induzierter Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{Tür}}$  von 0,33 m<sup>3</sup>/(s Türöffnung) bestimmt. Zur Ermittlung des zusätzlichen Luftaustauschs über einen Schultag (7:40 bis 14:00) wurden die beobachteten Türöffnungsdauern mit den Luftaustauschmessungen für typische Türöffnungen zusammengeführt (vgl. zweite Zeile in Tabelle 31). Berücksichtigt wurden die Öffnungsvorgänge am Haupteingang als auch am Ausgang zum Pausenhof. Die Türöffnungsereignisse wurden auf eine Vollbelegung der Schule hochgerechnet (Annahme: die Türöffnungsereignisse nehmen proportional zur Belegung zu). In der dritten und vierten Zeile in Tabelle 31 sind der resultierende zusätzliche Luftwechsel und energetische Einfluss auf Jahresbasis abgeschätzt. Bezogen auf das untersuchte Schulgebäude nehmen die Lüftungswärmeverluste aufgrund der Türöffnungen um ca. 0,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) zu.

Wie die Abschätzungen in Tabelle 31 zeigen, hat die Schleusenwirkung des Windfangs bei den beobachteten Türöffnungsereignissen einen geringen Einfluss: die Eingangsbereiche werden regelmäßig in Gruppen durchlaufen, die die motorisch öffnenden Türflügel nutzten. Wird der Windfang hingegen von einzelnen Personen durchlaufen, welche die Türen mit mechanischem Schließer nutzen, dann wird der energetische Einfluss des Windfangs deutlich größer (vgl. Tabelle 32).



**Tabelle 31: Zusätzlicher Luftaustausch und energetischer Einfluss durch die Türöffnungsvorgänge. Kombination der Messungen zu den Türöffnungsdauern und der Indikatorgasmessung.**

	Eingangsbereich mit Windfang	Eingangsbereich ohne Windfang
Summe des zusätzlichen Luftaustauschs über den Eingangsbereich mit Pausenhofzugang je Schüler und Schultag <sup>1)</sup>	8,0 m <sup>3</sup> /(Person d)	8,7 m <sup>3</sup> /(Person d)
Mittlerer zusätzlicher Volumenstrom je Schüler bzw. Lehrer bei Vormittagsschule (Grundschule) <sup>2)</sup>	0,18 m <sup>3</sup> /h	0,20 m <sup>3</sup> /h
Jährlicher zusätzlicher Lüftungswärmeverluste je Schüler und Schuljahr <sup>3)</sup>	4,7 kWh/(Person a)	5,1 kWh/(Person a)

1) Zur Berechnung wurden die Türöffnungen am Haupteingang und am Ausgang zum Pausenhof über einen Schultag herangezogen (7:40 bis 14:00). Die Öffnungsergebnisse wurden auf eine Vollbelegung hochgerechnet.

2) Bei einer Nutzung an 200 Tagen im Jahr.

3) Annahme zu Heizgradstunden: 78 kWh/a (Wärmekapazität  $c_{Luf}$ : 0,33 kWh/(m<sup>3</sup>K))

Eine Übertragung der Ergebnisse zum zusätzlichen Außenluftwechsel auf andere Gebäudearten ist aufgrund der sehr spezifischen Schulnutzung mit Pausenzeiten auf dem Pausenhof etc. nur beschränkt möglich. Allerdings ist die Situation zu Schulbeginn sicher vergleichbar mit Türöffnungshäufigkeiten und –dauern in Gewerbeobjekten mit einheitlichem Arbeitsbeginn. Kurz vor Arbeits- bzw. Schulbeginn bilden sich am Eingang Gruppen, die gemeinsam den Eingang durchlaufen. Die durchschnittliche Türöffnungsdauer je Person nimmt in diesen Fällen ab. In Tabelle 32 wurde anhand der Messdaten für unterschiedliche Eintrittsvarianten der induzierte Luftaustausch und der durchschnittliche auf ein Jahr bezogene Lüftungswärmeverlust abgeschätzt. Gegenüber der tatsächlich gemessenen Varianten (Var.1) wird der Lüftungswärmeverlust bei einzelnen Personen, die zügig durch den Windfang (Türen mit mechanischem Schließer) hindurchlaufen sogar nochmals um 13 % geringer (Var.4). Treten die Personen hingegen einzeln durch den Eingang ohne Windfang ein (Var.5), so verdoppeln sich die Lüftungswärmeverluste gegenüber der Ausgangsvariante. Energetisch am günstigsten ist ein klassenweises Eintreten der Schulklassen, wie es an Grundschulen teilweise auch praktiziert wird (Var.3); gegenüber der Ausgangsvariante 1 verringern sich die Wärmeverluste um 64 %.





**Tabelle 32: Zusätzlicher Luftaustausch und Lüftungswärmeverlust am Haupeingang zu Schulbeginn.**

Var.		induzierter Luft- austausch je Person [m <sup>3</sup> /Person]	Lüftungswärmeverlust je Person und Durchgang in Heizzeit [Wh] <sup>1)</sup>
1	Häufigkeit <b>wie gemessen, mit WF</b> 122 Pers. je Eingang	1,8	5,4
2	Häufigkeit <b>wie gemessen, ohne WF</b> , 122 Pers. je Eingang	1,9	5,7
3	Schüler treten <b>klassenweise</b> ein (5 Gruppen). 122 Pers. je Eingang.	0,7	2,0
4	Personen treten <b>einzel</b> n ein, <b>mit WF</b> , 122 Pers. je Eingang	1,6	4,7
5	Personen treten <b>einzel</b> n ein, <b>ohne WF</b> , 122 Pers. je Eingang .	3,7	10,9
6	<b>Hochrechnung für 420</b> Personen je Eingang (Monte Carlo Simulation), mit WF	1,1	3,1

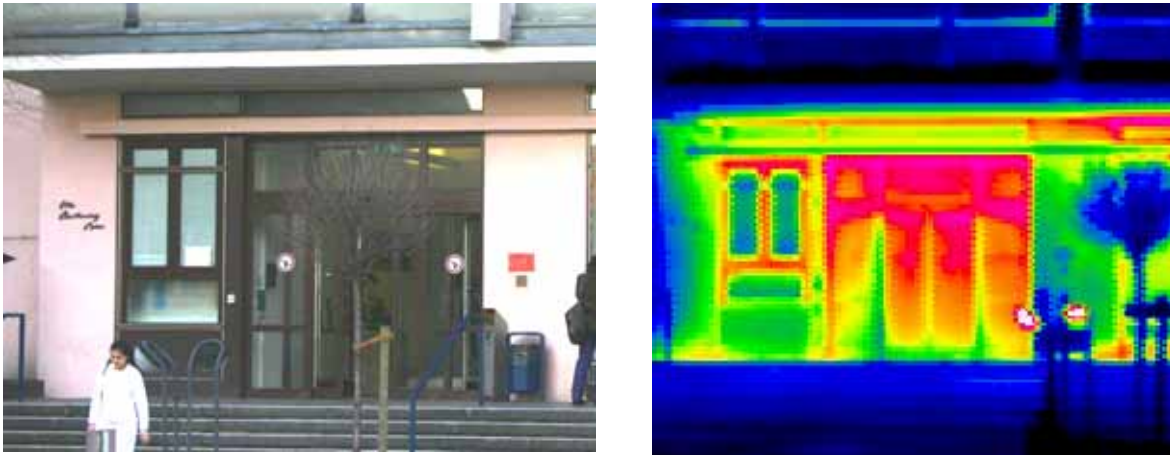
1) Annahme zu Heizgradstunden: 78 kWh/a (Wärmekapazität  $c_{\text{Luft}}$ : 0,33 kWh/(m<sup>3</sup>K))

2) WF –Windfang

Die Außentüren schlossen bei einigen Versuchsdurchgängen nicht vollständig. Nicht korrekt geschlossene Außentüren und defekte Türdichtungen führen zu einer dauerhaften zusätzlichen Infiltration. Anschlagdichtungen kombiniert mit Absenk-dichtungen, wie in diesem Projekt verwendet (vgl. Abbildung 149, links), verringern eine ungewollte In- und Exfiltration. Abbildung 150 zeigt als Beispiel eine konventionelle Schiebetür an einem Bestandsgebäude. Auf der Infrarot-Aufnahme (rechtes Bild) sind deutlich die Kaltluftfahnen aufgrund der unzureichenden Dichtungsprofile erkennbar; diese führen zu dauerhaften Lüftungswärmeverlusten.



**Abbildung 149: Untersuchte Außentür mit Türdichtung und Anschlagdichtung.**



**Abbildung 150:** Konventionelle Schiebetür an einem Bestandsgebäude (keine Passivhaus-Qualität). Auf der Infrarot-Aufnahme sind deutlich die Kaltluftfahnen aufgrund der ungenügenden Dichtungen zu erkennen.

## 8.7 Diskussion

Mit der durchgeführten Messung konnte eine Größenordnung für den zusätzlichen Luftaustausch aufgrund der Türöffnungsvorgänge im Schulgebäude ermittelt werden. Bezogen auf das Schulgebäude ist der zusätzliche Lüftungswärmeverlust gering (etwa  $0.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bei Vollbelegung). Die Messung zeigte weiterhin, dass der energetische Einfluss des Windfangs im Eingangsbereich bei den beobachteten Türöffnungsvorgängen ebenfalls eher gering ist. Die Schleusenwirkung nimmt allerdings deutlich zu, wenn die Personen nacheinander und einzeln Ein- bzw. Austreten. Die Behaglichkeit bei einer Bewertung des Windfangs sollte nicht außer acht gelassen werden; Türöffnungsereignisse verursachen in der Heizzeit Kaltluftseen in den an den Eingang angrenzenden Räumen. Der Windfang beim motorisch öffnenden Türflügel bleibt hingegen aufgrund der langen Öffnungszeiten und der damit einhergehenden langen gleichzeitigen Öffnungsdauern nahezu ohne Wirkung. Die Wirksamkeit kann ggf. durch eine bauliche Trennung in einen häufig frequentierten Haupteingang mit mechanischen Türschließern und einen weniger genutzten Nebeneingang mit motorisch betriebenen Türflügeln verbessert werden. Ebenfalls bedeutend kann der Einfluss von nicht dicht schließenden Eingangstüren sein (Türdichtungen defekt oder Türen nicht korrekt geschlossen). Dieser zusätzliche Infiltrationsluftwechsel führt dauerhaft zu zusätzlichen Lüftungswärmeverlusten. Das korrekte Schließen der Türschließer und die Türdichtungen sollten regelmäßig überprüft werden.



## 9 Quellenangaben

- [AkkP 2007] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: „Wärmebrücken und Tragswerkplanung - die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens“. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2007
- [AMEV 2001] Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV): „Hinweise für das Bedienen und Betreiben von heiztechnischen Anlagen in öffentlichen Gebäuden (Heizbetrieb 2001)“. AMEV, Berlin 2001
- [Bretzke] Bretzke, Axel: „Beispielhafte Beleuchtung in Frankfurter Schulen ist Standard in den Leitlinien mit 2 W/(m<sup>2</sup> 100 lx)“, Download unter [www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement](http://www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement), Frankfurt,
- [Bretzke 2006] Bretzke, Axel: „Planung und Bau der Passivhaus Grundschule, Kalbacher Höhe 15, Frankfurt a.M.“, Energiemanagement der Stadt Frankfurt a. M. ([www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement/passiv/passiv.htm](http://www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement/passiv/passiv.htm)), Frankfurt a.M., November 2006
- [DIN EN 1434-3] DIN EN 1434 Teil 3: Wärmehähler, Teil 3: Datenaustausch und Schnittstellen. Deutsche Fassung EN 1434-3:1997, Beuth Verlag, 1997
- [DIN EN ISO 12569] DIN EN ISO 12569, Bestimmung des Luftwechsels in Gebäuden – Indikatorgasverfahren, Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [DIN 1946-2] DIN 1946 Teil 2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Januar 1994
- [DIN 4108] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Beuth Verlag, April 2003
- [Ebel 2003] Ebel, W., Kah, O., Tracergasmessungen: Auswirkungen von Fensteröffnung bei kontrollierter Lüftung, 7. Passivhaus Tagung 2003, Hamburg.
- [Feist 2006] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Protokollband Passivhaus-Schulen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juli 2006
- [Feist 2006-1] Feist, Wolfgang: „Zusammenfassung: Passivhaus-Schulen“, in Protokollband Passivhaus-Schulen, Arbeits-



- kreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juli 2006
- [Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.12, Öko-Institut, Darmstadt September 2002.
- [HBA 2001] Hochbauamt Frankfurt a.M., Abt. Energiemanagement: Auswertung der Verbrauchswerte von Schulen 2001
- [Leitlinien FFM] „Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen 2007“, Stadt Frankfurt am Main, Hochbauamt, Frankfurt a. M., 2007
- [Myhrvold 1996] Myhrvold, A. N.; Olsen, E.; Landridsen, Ø.: Indoor environment in schools - Pupils health and performance in regard to CO<sub>2</sub> concentrations. RF-Rogaland Research, Stavanger, Norway
- [Kah 2006] Kah, Oliver: „Schulen im Passivhaus-Standard: Randbedingungen und Anforderungen“, in Protokollband Passivhaus-Schulen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juli 2006
- [Kah 2007] Kah, Oliver; Pfluger, Rainer: „Luftaustausch und energetische Auswirkung von Türöffnungsvorgängen im Eingangsbereich einer Schule“. In: Tagungsband. 11. Internationale Passivhaustagung 2007, Bregenz am Bodensee (A), April 2007
- [Kluttig 2001] Kluttig, H.; Dirscherl, A.; Erhorn, H.: Energieverbräuche von Bildungsgebäuden in Deutschland, Gesundheits-Ingenieur 122 (2001), H. 5, S. 221-233.
- [Münzenberger 2003] Münzenberger, Uwe; Thumalla, Jörg: „Raumluftqualität in Passivhäusern“, in Tagungsband 7. Internationale Passivhaustagung, Passivhaus Institut, Darmstadt, Februar 2003
- [Pflichtenheft 1996] Pflichtenheft zur Erstellung von Gutachten zur rationellen Elektrizitätsverwendung, Herausgeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, Wiesbaden, 2. überarbeitete Ausgabe, August 1996
- [Peper 2001] Peper, S., Feist, W., Kah, O., Meßtechnische Untersuchung und Auswertung; Klimaneutrale Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.



- [Peper 2004] Peper, S.; Feist, W.; Pfluger, R.: Ein nordorientiertes Passivhaus. Messtechnische Untersuchung und Auswertung von 19 Wohnungen im Passivhaus-Standard in Frankfurt-Bockenheim, Gremppstraße, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, Dezember 2004.
- [Peper 2005] Peper, S.; Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang: Mehrgeschoss-Passivhaus Hamburg-Pinnasberg. Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, September 2005
- [Peper 2007] Peper, Søren.: PH-Grundschule Frankfurt a.M. - Ergebnisse der Messbegleitung. In Tagungsband der 11. intern. Passivhaus Tagung 2007, Bregenz am Bodensee (A), April 2007.
- [Pfluger 2006-1] Pfluger, Rainer: „Passivhaus Grundschule und Kindertagesstätte auf dem Riedberg, Wilhelm-Busch-Schule, Frankfurt“, in Protokollband Passivhaus-Schulen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juli 2006
- [Pfluger 2006-2] Pfluger, Rainer: „Messung zur Luftqualität in Schulen“, in Protokollband Passivhaus-Schulen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juli 2006
- [Recknagel 2003] Recknagel; Sprenger; Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 03 / 04, Oldenbourg Industrie-Verlag München, 71. Auflage, München 2003
- [Schnieders 2004-1] Schnieders, Jürgen: „BV Riedbergschule. Programmierung MSR und Lüftungsanlagen“. Passivhaus Institut, Darmstadt, 05. August 2004
- [Schnieders 2004-2] Schnieders, Jürgen: „Grundschule und Kindertagesstätte am Riedberg. Kurzanleitung für die Nutzer“. Passivhaus Institut, Darmstadt, November 2004
- [Schnieders 2004-3] Schnieders, Jürgen: „Erdreichwärmeverluste im Passivhaus“ in Protokollband Nr. 27 „Wärmeverluste durch das Erdreich“, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, Mai 2004
- [Schnieders 2006] Schnieders, Jürgen: „Begleitende Beratung bei Planung und Bau der Grundschule und Kindertagesstätte am Riedberg“. Passivhaus Institut, Darmstadt, Dezember 2006
- [Shaughnessy 2005] Shaughnessy, R.; Haverinen- Shaughnessy, U.; Nevalainen, A.; Moschandreas, D.: “Carbon dioxide concentrations



- in classrooms and association with student performance: a preliminary study". In Indoor Air 2005 - Proc. 10<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1: 373-376, Beijing (China), 2005
- [UBA 2000] Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden, erarbeitet von der Innenraum-Lufthygienekommission des Umweltbundesamtes, Berlin, Juni 2000
- [VDI 4300/7] VDI 4300, Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen, Blatt 7, Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [Wargocki 2000] Wargocki, P.; Wyon, DP.; Sundell, J.; Clausen, G.; Fanger, PO.: „The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality" Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity". Indoor Air Vol 10, No. 4:222-236, 2000



## 10 Anhang

**Anhang A:** Ansichten/Grundrisse/Schnitte (nach Plänen vom Architekturbüro A4)

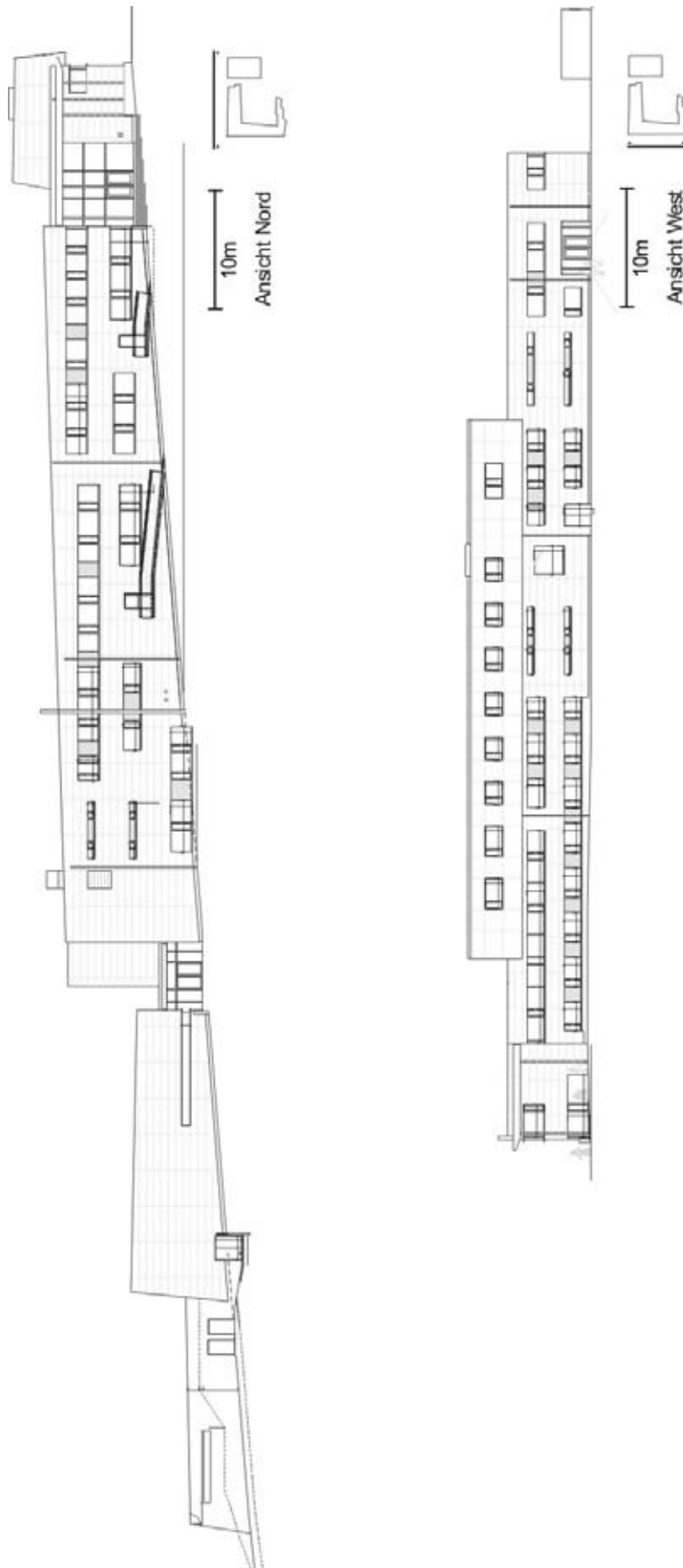
**Anhang B:** Grundrisse EG mit den Positionen der Messsensoren  
(nach Plänen vom Architekturbüro A4)

**Anhang C:** Beispielhaftes Protokollblatt der Nutzerbefragung Februar/März 2006

**Anhang D:** Information zur Indikatorgas-Messung



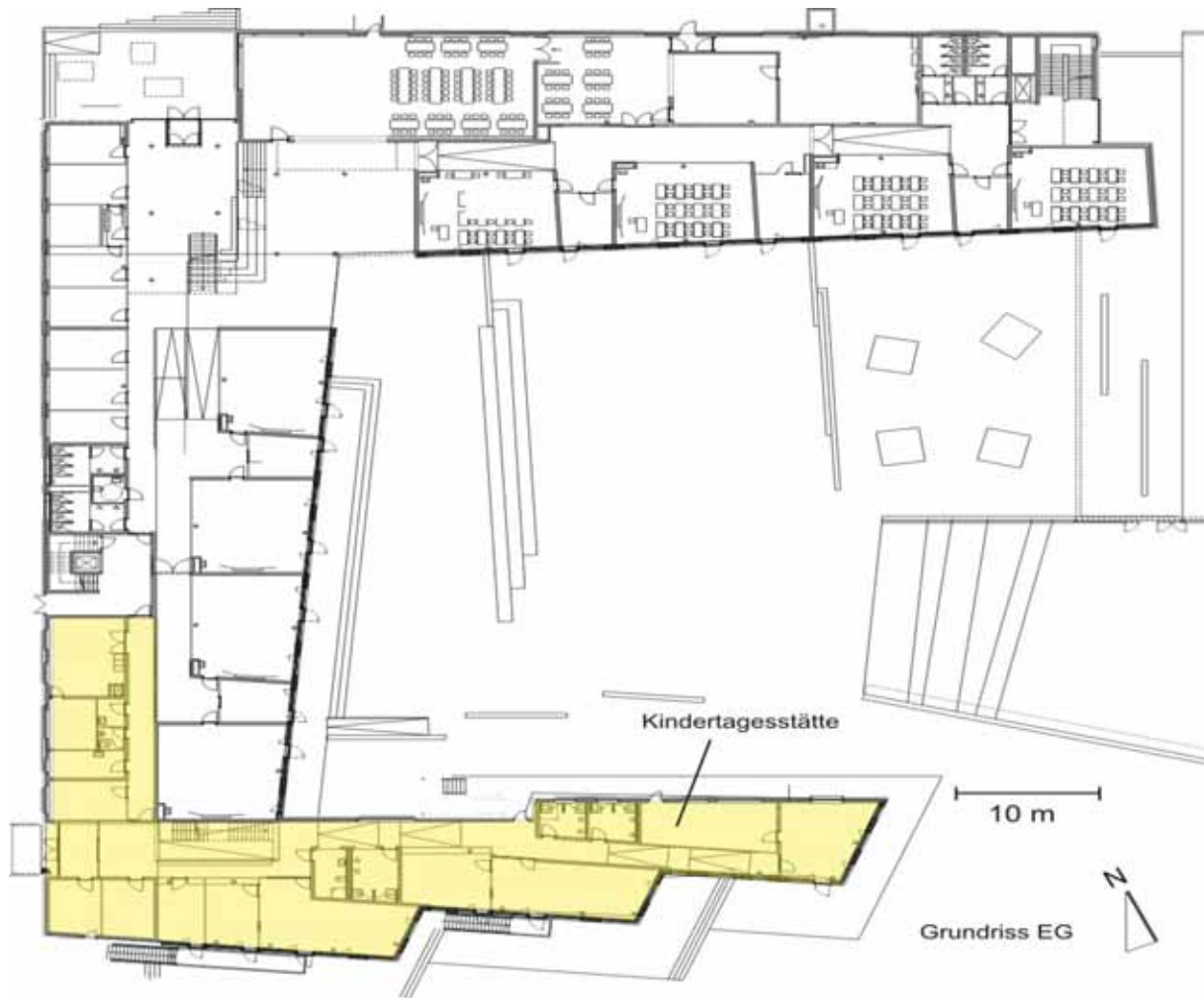
## Ansichten Nord und West







### Grundriss EG



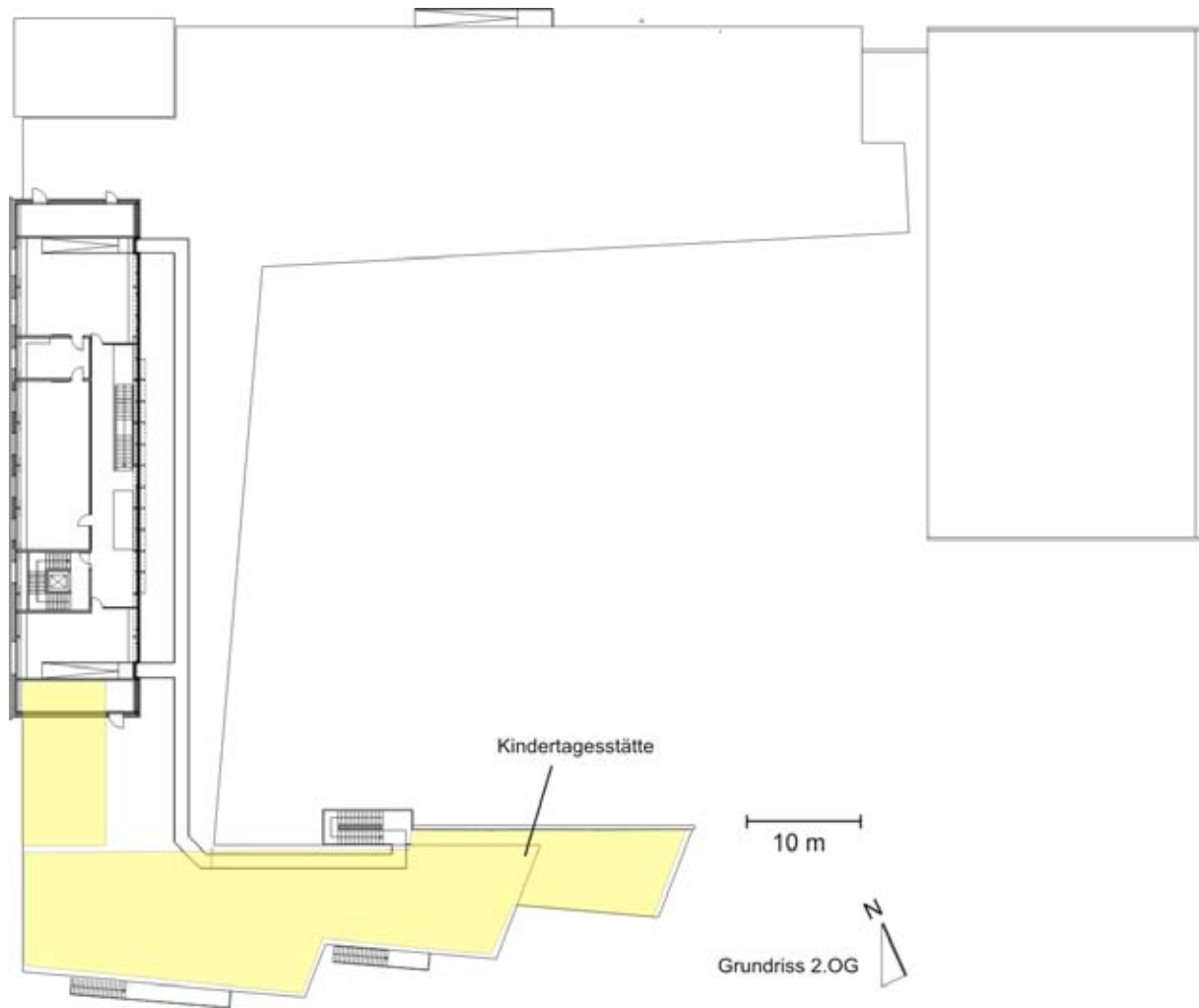


## Grundriss 1. OG



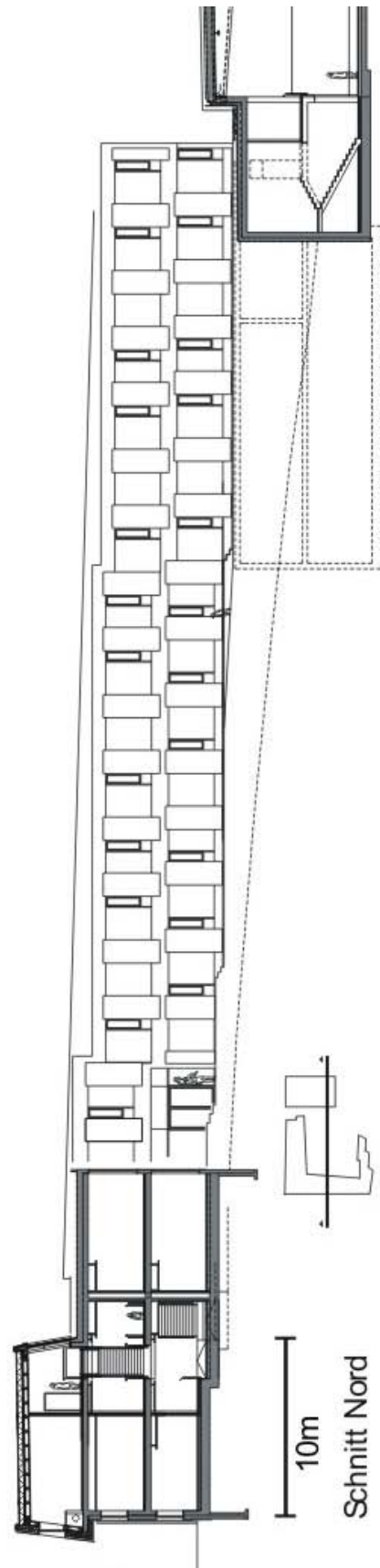
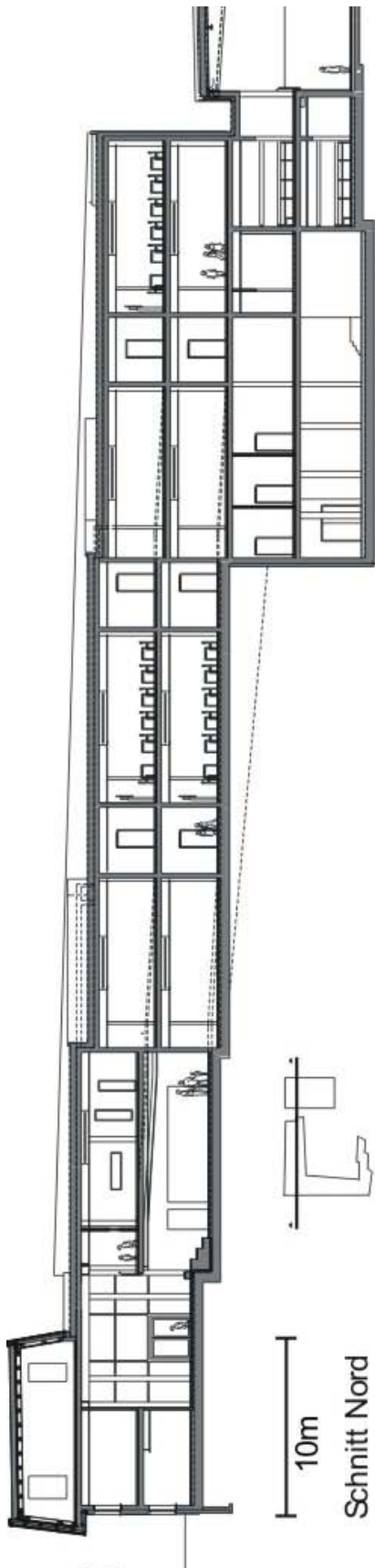


## Grundriss 2. OG



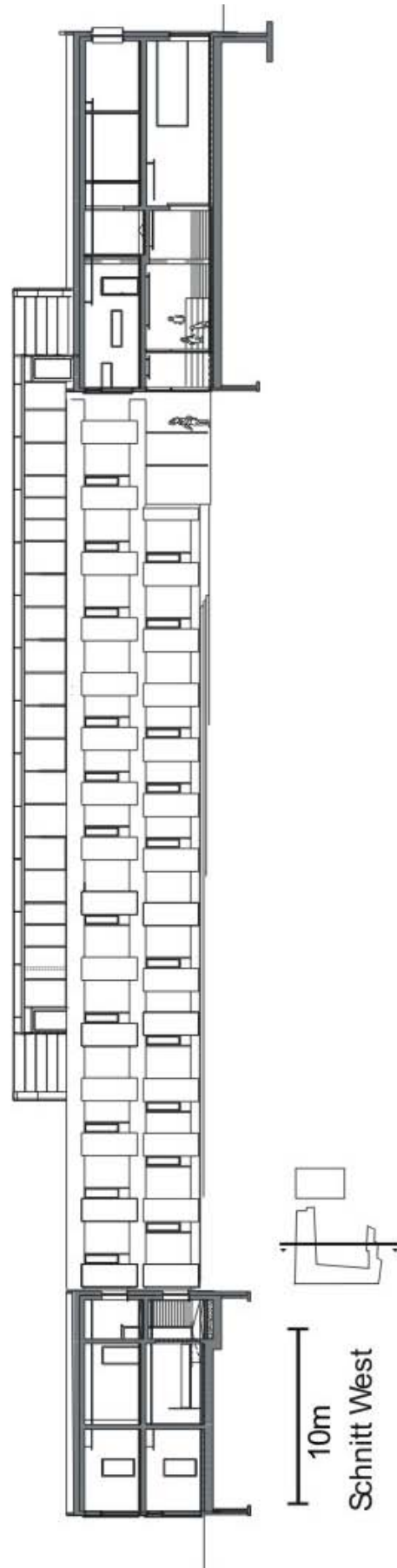
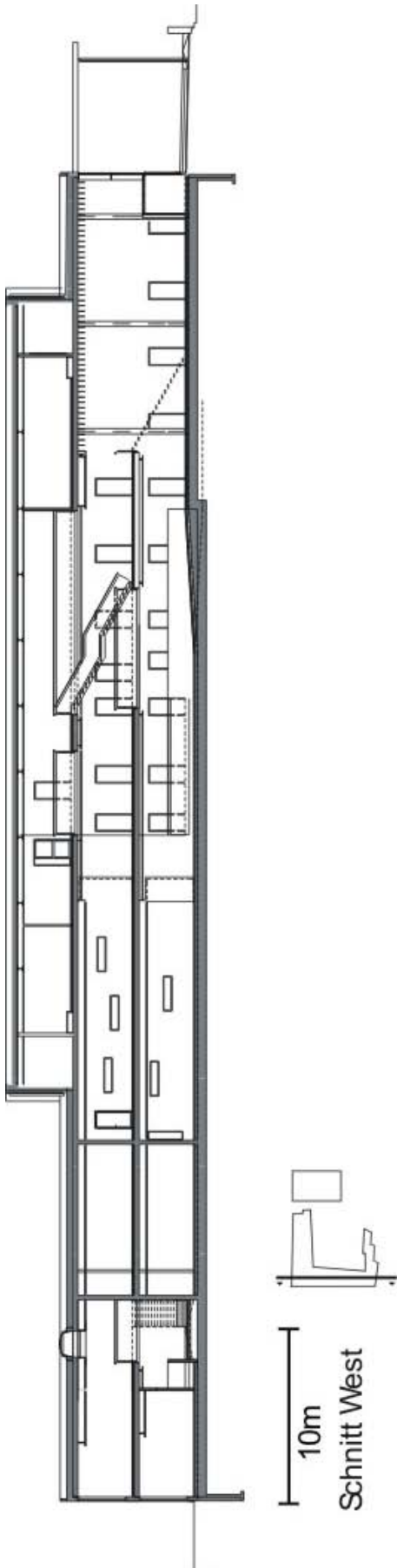


## Schnitte Nord



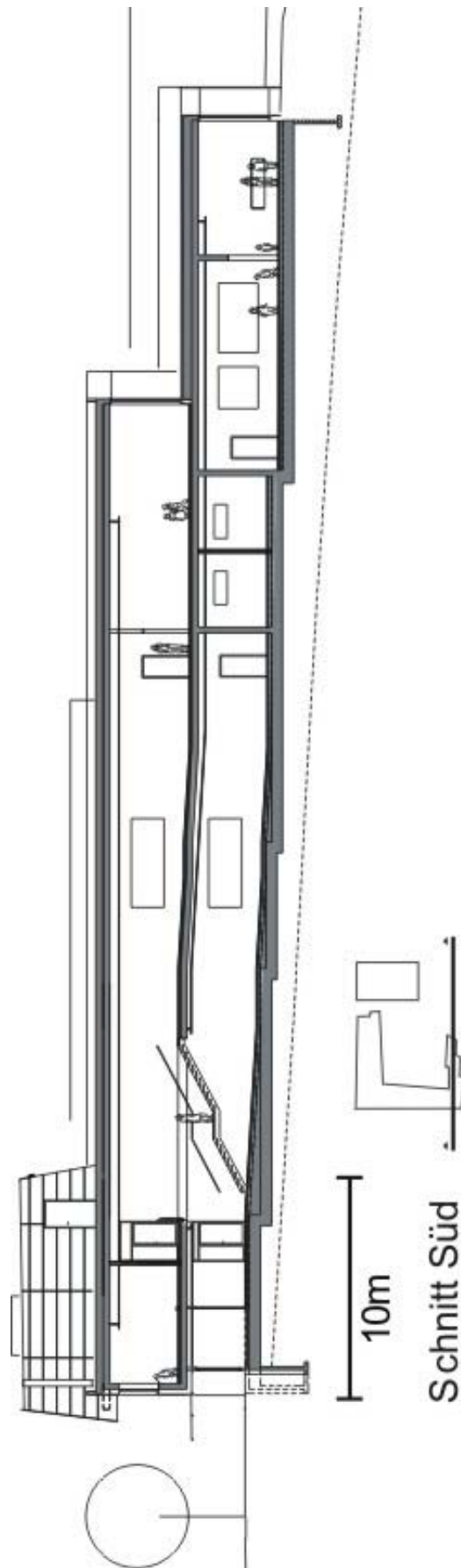


### Schnitte West



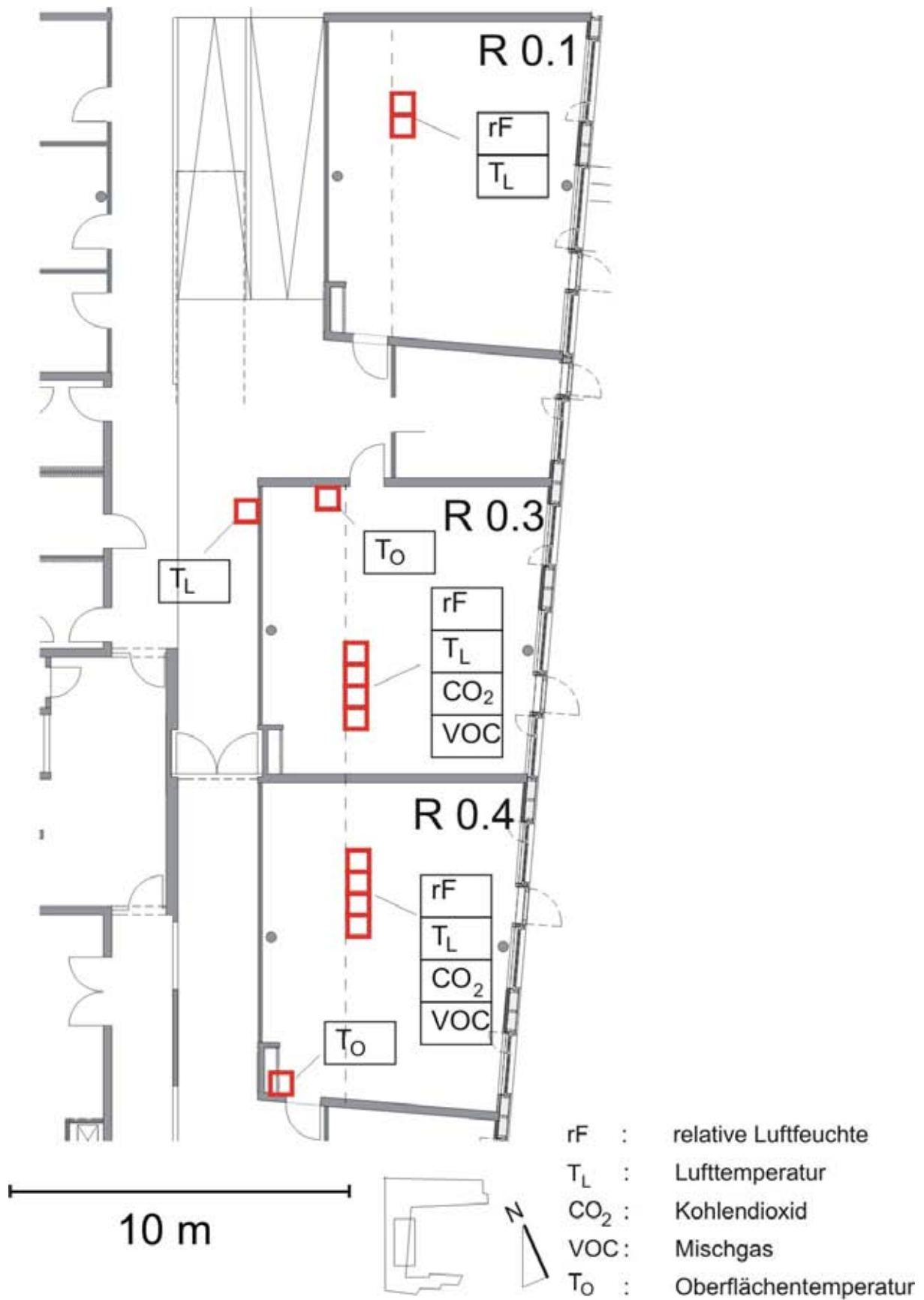


## Schnitt Süd



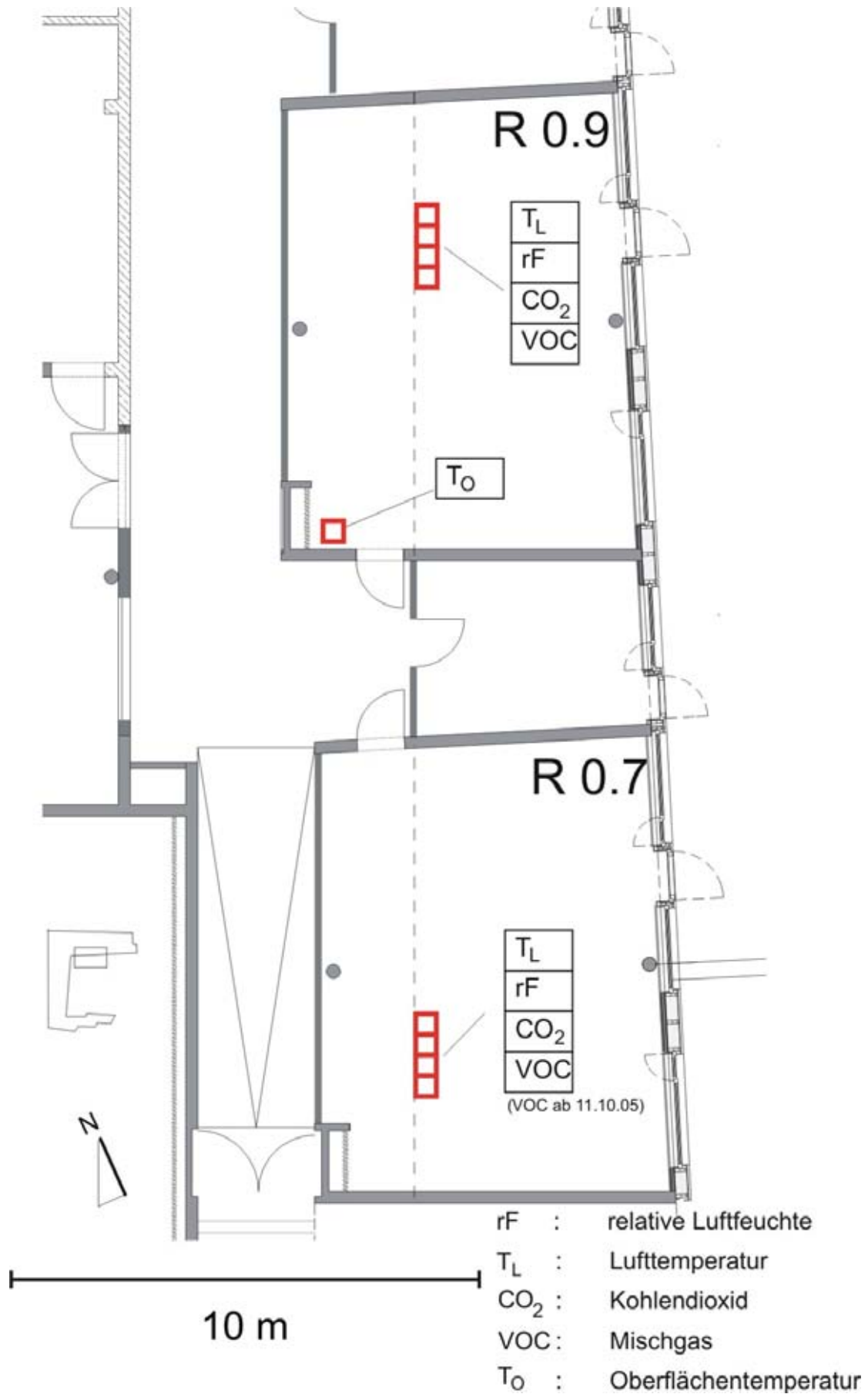


### Grundriss Raum 0.1; 0.3 und 0.4 mit den Positionen der Messensoren





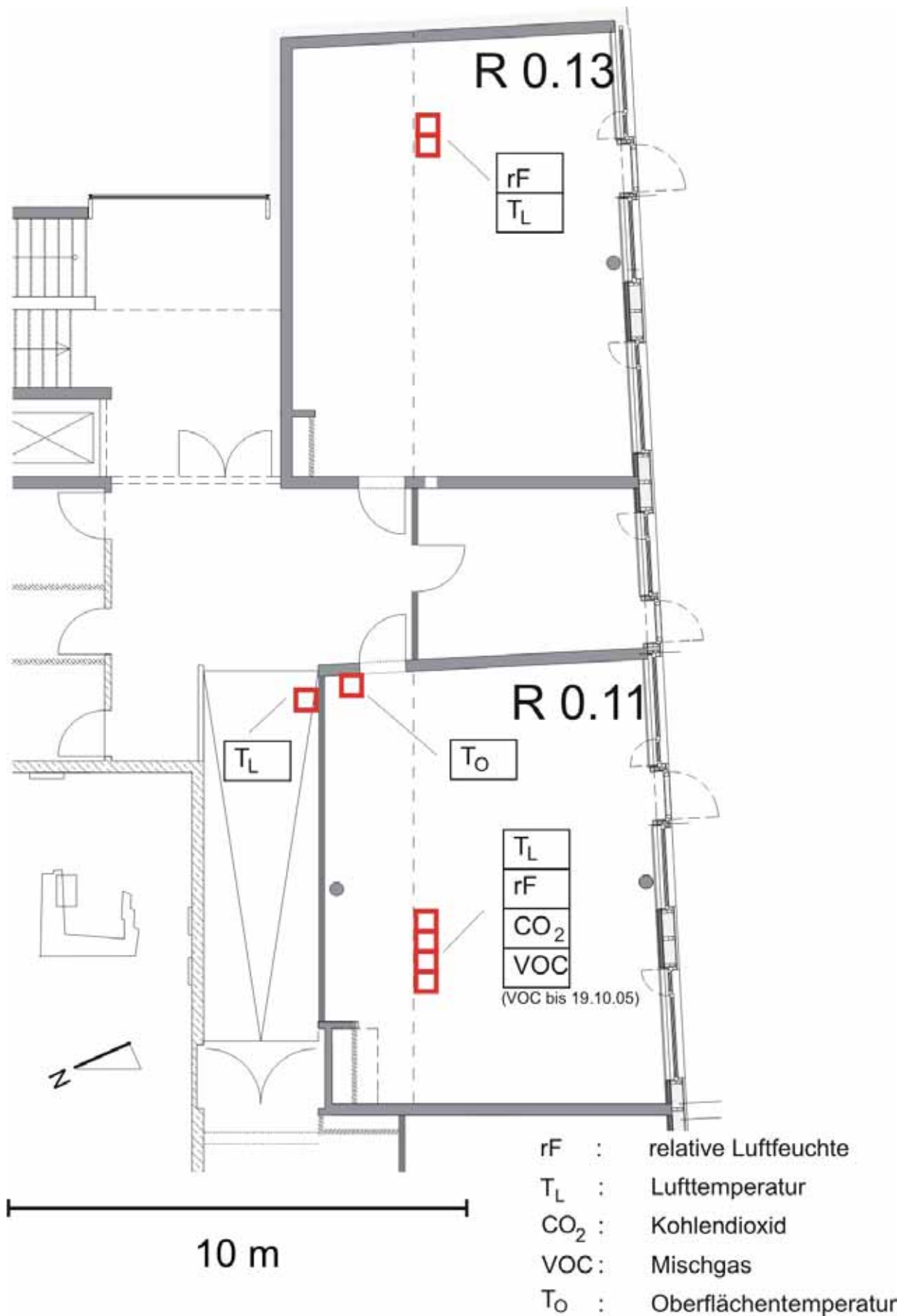
### Grundriss Raum 0.7 und 0.9 mit den Positionen der Messensoren







### Grundriss Raum 0.11 und 0.13 mit den Positionen der Messensoren





## Beispielhaftes Protokollblatt der Nutzerbefragung Februar/März 2006

Passivhaus Institut

Nutzerbefragung Riedbergchule Februar 2006 im Rahmen der Begleitforschung

Raum: \_\_\_\_\_  
 Lehrkraft: 1  
 Klasse: 6-7 Jahre  
 Alter der Schüler: \_\_\_\_\_

Donnerstag 16.02.2006	Zeit		Anzahl		Tätigkeit Schüler		Klassenraumtür		Öffnungsdauer		Lüftungsklappe Öffnungsweite		Dauer Licht an		Raum Temp		Reiner Tür		
	von	bis	Erwachsene	Schüler	toben/aktiv	sitzen/ruhig	offen	zu	Fenster	Außenfür	Lüftungsklappe	gering	mittel	weit	Tafel	Reihe	Beide Reihen	Raum Temp	Soll Temp
1 Stunde	8:00	8:45	19	1		X		X	-	-	-	-	-	45	45	45	19,3°	20,0°	
2 Stunde	8:45	9:30	16	1		X		X	-	-	-	-	-	45	45	45	19,4°	20,0°	
Pause	9:30	10:00	22	2		X		X	-	-	-	-	-	10	10	10	19,4°	20,0°	
3 Stunde	10:00	10:45	12			X		X	-	-	-	-	-	45			19,5	20,0°	
4 Stunde	10:45	11:30	22		X		X		-	-	-	-	-	-	-	-	19,6	20,0°	
Pause	11:30	11:50																	
5 Stunde	11:50	12:35																	
6 Stunde	12:35	13:20																	
Sondernutzung																			

Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte gerne an: Passivhaus Institut, Herr Soren Peper, Tel.: 06151-62699-0



## Information zur Indikatorgas-Messung

### Indikatorgas-Messgerät

Gemessen wurden die Konzentrationsverläufe während der Feldmessungen mit einem mobilen Gaschromatographen. Das Mess-System genügt dabei den Anforderungen der betreffenden Richtlinien (vgl. [VDI 4300/7] und [DIN EN ISO 12569]).

**Messgerät:** Autotrac 101, Fa. Lagus Applied Technology

**Messverfahren:** Gaschromatograph mit Elektroneneinfang-Detektor

**Messbereich:** 0,05 bis 100 ppb ( $\text{SF}_6$ ) (linear)

**Nachweisgrenze:** 5 ppt ( $\text{SF}_6$ )

**Genauigkeit:** 3 % vom Messwert

**Messintervall:** 90 sec

### Indikatorgas

Das gewählte Gas Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) gehört zu den erprobten Indikatorgasen, erfüllt die Anforderungen an ein Indikatorgas (vgl. [VDI 4300/7]) und ist im verwendeten Konzentrationsbereich gesundheitlich unbedenklich.

