



**Fraunhofer** Institut  
Bauphysik

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle  
für Prüfung, Überwachung und  
Zertifizierung  
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile  
und Bauarten  
Forschung, Entwicklung, Demonstra-  
tion und Beratung auf den Gebieten  
der Bauphysik

Institutsleitung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

# Messung des Raumklimas und der Raumluft- qualität in verschiedenen Klassenzimmern

Durchgeführt im Auftrag der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)  
Osnabrück

Der Bericht umfasst  
74 Seiten Text  
12 Tabellen  
40 Abbildungen

Prof. Klaus Sedlbauer  
Dr. Andreas Holm  
Dr. Runa Hellwig  
Dipl.Ing. Florian Antretter

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Problemstellung und Ziel dieser Untersuchungen</b>   | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>Beschreibung der untersuchten Räume</b>  | <b>10</b> |
| 2.1      | Auswahl der Räume   | 10        |
| 2.2      | Beschreibung der Räume  | 10        |
| 2.2.1    | Klosterbau  | 11        |
| 2.2.2    | Aulagebäude   | 11        |
| 2.2.3    | Klassentrakt  | 11        |
| 2.2.4    | Haupthaus   | 11        |
| <b>3</b> | <b>Durchgeführte Messungen</b>  | <b>12</b> |
| 3.1      | Energetische Bestandsaufnahme der Klassenräume  | 12        |
| 3.1.1    | [FIA1] Blower-Door-Messung  | 12        |
| 3.2      | Messung der Witterungsverhältnisse  | 13        |
| 3.3      | Thermisch-hygrisches Raumklima und Kohlendioxid-Konzentration   | 13        |
| 3.3.1    | Klostertrakt  | 14        |
| 3.3.2    | Aula  | 14        |
| 3.3.3    | Klassentrakt  | 15        |
| 3.3.4    | Haupthaus   | 15        |
| 3.3.5    | Verwendete Messtechnik und Messwerterfassungssystem   | 15        |
| <b>4</b> | <b>Ergebnisse der raumklimatischen Untersuchungen im Ist-Zustand</b>  | <b>17</b> |
| 4.1      | Ergebnisse für die einzelnen Gebäudeteile   | 18        |
| 4.1.1    | Aulagebäude   | 19        |
| 4.1.2    | Klassentrakt  | 19        |
| 4.1.3    | Haupthaus   | 20        |
| 4.2      | Vergleichende Betrachtung   | 20        |
| 4.2.1    | Temperaturen  | 20        |
| 4.2.2    | Relative Luftfeuchte  | 22        |
| 4.2.3    | Kohlendioxidgehalt  | 22        |
| 4.2.4    | Fensteröffnungszeiten   | 23        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassende Beschreibung und Ableitung einer allgemeinen Beschreibung des Raumklimas in Schulen</b> | <b>24</b> |
| <b>6</b> | <b>Bilder</b>   | <b>26</b> |
| <b>7</b> | <b>Tabellen</b>   | <b>63</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|         |   |    |
|---------|---|----|
| Bild 1: | Luftaufnahme der Gebäudekomplexe der Angelaschule in Osnabrück. (Quelle: Google Earth).   | 26 |
| Bild 2: | Lage der einzelnen Räume in den Gebäudekomplexen, sowie die Außenansichten der Schulgebäude (Quelle: Angelaschule).   | 27 |
| Bild 3: | Klassenraum KL302 mit Orientierung Nord-West, Raumvolumen 175 m <sup>3</sup> , Baujahr 1903/63, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse.  | 28 |
| Bild 4: | Klassenraum KL312 mit Orientierung Süd-Ost, Raumvolumen 179 m <sup>3</sup> , Baujahr 1903/63, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse.    | 29 |
| Bild 5: | Klassenraum A102 mit Orientierung Süd-Ost, Raumvolumen 159 m <sup>3</sup> , Baujahr 1962, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installiert.                    | 30 |
| Bild 6: | Klassenraum K203 mit Orientierung Nord-Ost, Raumvolumen 175 m <sup>3</sup> , Baujahr 1965, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse.       | 31 |
| Bild 7: | Klassenraum H101 mit Orientierung nach Nord-West, Raumvolumen 207 m <sup>3</sup> , Baujahr 1980, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse. | 32 |
| Bild 8: | Screenshot vom Online-Visualisierungs- und Messwerterfassungssystem Beispiel Klassenraum K203, Temperaturprofil im Raum und Vertikalschnitt durch Wand und Decke.   | 33 |
| Bild 9: | Witterungsverhältnisse während des Auswertzeitraums von April 2006 bis Juli 2008 gemessen von der FH Osnabrück und an der Wetterstation der Angelaschule.   | 34 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Bild 10: | Witterungsverhältnisse während der ausgewählten kalten Woche vom 16. bis 23. Februar 2008 gemessen an der Wetterstation der Angelaschule.   | 35 |
| Bild 11: | Witterungsverhältnisse während der ausgewählten warmen Woche vom 07. bis 14. Juni 2008 gemessen an der Wetterstation der Angelaschule.  | 36 |
| Bild 12: | Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum KL302 für den gesamten Messzeitraum. | 37 |
| Bild 13: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL302 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.   | 38 |
| Bild 14: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL302 für die Sommerwoche vom 7. bis 14. Juni 2008.   | 39 |
| Bild 15: | Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum KL312 für den gesamten Messzeitraum. | 40 |
| Bild 16: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL312 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.   | 41 |
| Bild 17: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL312 für die Sommerwoche vom 7. bis 14. Juni 2008.   | 42 |
| Bild 18: | Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum KL302 für den gesamten Messzeitraum. | 43 |
| Bild 19: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum A102 für die Winterwoche vom 10. bis 17. Februar 2007.  | 44 |
| Bild 20: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum A102 für die Sommerwoche vom 29. April bis 05. Mai 2007.  | 45 |
| Bild 21: | Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum K203 für den gesamten Messzeitraum.  | 46 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Bild 22: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum K203 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.   | 47 |
| Bild 23: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum K203 für die Sommerwoche vom 7. bis 14. Juni 2008.   | 48 |
| Bild 24: | Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum H101 für den gesamten Messzeitraum. | 49 |
| Bild 25: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum H101 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.   | 50 |
| Bild 26: | Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum H101 für die Sommerwoche vom 29. April bis 05. Mai 2007.   | 51 |
| Bild 27: | Boxplot-Darstellung der Temperaturen in den untersuchten Klassenräumen für den Zeitraum von November bis März während der Tageszeit von 8 bis 13 Uhr.  | 52 |
| Bild 28: | Boxplot-Darstellung der Temperaturen in den untersuchten Klassenräumen für den Zeitraum von Mai bis September während der Tageszeit von 8 bis 13 Uhr.  | 52 |
| Bild 29: | Gegenüberstellung des Verlaufs der Raumlufttemperatur in allen untersuchten Klassenräumen am 13. Juli 2006.  | 53 |
| Bild 30: | Verlauf der Temperaturen in den Höhen 0,1 m, 1,1 m, 1,7 m über dem Boden und 0,1 m unter der Decke als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL312 und KL302 am 18. Februar 2008.  | 53 |
| Bild 31: | Aufheizphase im Raum K203 und KL312 nach den Winterferien vom 01. bis 28. Januar 2008.   | 54 |
| Bild 32: | Raumlufttemperatur in den einzelnen Räumen über der Außentemperatur als Scatterplot aller Messwerte während der Schulstunden von 8 bis 13 Uhr und als lineare Regression.  | 55 |
| Bild 33: | Boxplot-Darstellung der Luftfeuchten in den untersuchten Klassenräumen für den gesamten Zeitraum der Tageszeit von 8 bis 13 Uhr.   | 56 |
| Bild 34: | Verlauf des Wasserdampfpartialdrucks im Raum K203 und des Sättigungsdrucks sowie des Dampfdrucks bei   |    |

|          |  |    |
|----------|--|----|
|          | 80 % r.F. an der Wärmebrücke Fensterlaibung während einer ausgewählten Winterwoche.  | 57 |
| Bild 35: | Spannweite des pro Stunde für alle Schulstunden der Monate November 2006 bis März 2007 gemittelten Verlaufs der Kohlendioxidkonzentration in Raum K203.  | 57 |
| Bild 36: | Spannweite des Verlaufs der Kohlendioxidkonzentration, der Innenlufttemperatur und der Fensteröffnungszeit im Raum K203 als Mittelwert über alle Messwerte in den Schulstunden 1 bis 6 je Monat. | 58 |
| Bild 37: | Boxplot-Darstellung der Kohlendioxid-Konzentration in den untersuchten Klassenräumen für den Zeitraum von November bis März während der Tageszeit von 8 bis 13 Uhr.                              | 59 |
| Bild 38: | Kohlendioxidkonzentration in den einzelnen Räumen über der Außentemperatur als Scatterplot aller Messwerte während der Schulstunden von 8 bis 13 Uhr und als lineare Regression.                 | 60 |
| Bild 39: | Fensteröffnungszeiten in allen Räumen in Abhängigkeit von der Außen- und der Innenlufttemperatur.  | 61 |
| Bild 40: | Vergleich des Verlaufs der Außentemperatur, der Innentemperatur und der Wärmestromdichte in den Räumen KL302 und KL312 vom 16. bis 24. Februar 2008.   | 62 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Beschreibung der untersuchten Räume mit Angabe der Lage und Orientierung sowie Abmessungen und Fenster.   | 63 |
| Tabelle 2: Beschreibung der technischen Anlagen in den Untersuchten Räumen (Heizung, Lüftung, Beleuchtung und Sonnenschutz).   | 64 |
| Tabelle 3: Bauteilaufbauten und U-Werte der wichtigsten Bauteile.  | 65 |
| Tabelle 4: U-Wert-Abschätzung aus der Messung der Wärmeströme an den Außenwandbauteilen.   | 66 |
| Tabelle 5: Vergleich der berechneten und aus Messdaten ermittelten U-Werte.  | 66 |
| Tabelle 6: Ergebnis der Blower-Door-Messungen.   | 67 |
| Tabelle 7: Liste aller Messkanäle mit Lage und Einheit.  | 68 |
| Tabelle 8: Liste aller Messkanäle mit Start- und Enddatum der Datenaufzeichnung und mit Angabe der Anzahl gültiger Messwerte im gesamten Messzeitraum.   | 74 |
| Tabelle 9: Prozentuale Häufigkeiten von Innenoberflächentemperaturen an Dach und Außenwand im untersuchten Klassenraum K203 für einen je 3-wöchigen Zeitraum im Juni und November 2006 von Mo –Fr, ganztägig.  | 77 |
| Tabelle 10: Medianwerte für die Fensteröffnungszeiten, Außentemperatur und Innentemperatur in den fünf Klassenräumen der Angelaschule. Nur Werte belegter Schulstunden (= Anzahl der Beobachtungen) zwischen November 2006 und Mai 2007 wurden berücksichtigt.   | 77 |
| Tabelle 11: Rangkorrelationskoeffizienten $r_S$ für die Korrelation zwischen Fensteröffnungszeit und Außen- bzw. Innentemperatur für die fünf untersuchten Klassenräume der Angelaschule. Nur Werte belegter Schulstunden (= Anzahl der Beobachtungen) zwischen November 2006 und Mai 2007 wurden berücksichtigt. Signifikante Korrelationen sind fett markiert (Werte mit * kennzeichnen ein $p < 1 \cdot 10^{-5}$ ). | 78 |

Tabelle 12: Wärmestromdichten in  $W/m^2$  an den Außenbauteilen aller Messräume in den Wintermonaten von November bis März.

78

# 1 Problemstellung und Ziel dieser Untersuchungen

In verschiedenen Studien wurden in jüngster Zeit die CO<sub>2</sub>-Gehalte in Klassenräumen in Querschnittsaufnahmen dokumentiert. [Fromme et al. 2006]<sup>1</sup> untersuchten unter anderen Raumluftparametern auch den Kohlendioxid-Gehalt von bayerischen Klassenräumen in zwei Messperioden. Die Messungen im Winter in 92 Klassenräumen an 46 Schulen ergab Tages-Mediane von 0,06 bis 0,42 Vol %. 92% der Tagesmediane überschritten den Pettenkofer-Wert von 0,1 Vol % und noch 60% der Tagesmediane einen Wert von 0,15 Vol %. Während der Sommermessungen in 76 Klassenräumen an 38 Schulen überschritten nur 28 % der ermittelten Mediane (0,05 bis 0,19 Vol %) den Pettenkofer-Wert aber nur noch 9% einen Wert von 0,15 Vol %.

Ähnliche Überschreitungshäufigkeiten der Kohlendioxid-Gehalte ergaben sich bei einer Untersuchung des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes [Grams et al. 2004]<sup>2</sup>. Auch in Berlin ergaben sich gemittelte Kohlendioxid-Konzentrationen für einen Unterrichtstag im Bereich von 0,05 bis 0,42 Vol %. Der Median über alle Messwerte ergab sich zu 0,16 Vol %. Der Pettenkofer-Wert von 0,1 Vol % wurde in ca. 90% der Klassenräume überschritten [ILAT]<sup>3</sup>.

## Beispiel Angelaschule Osnabrück

Am Beispiel von mehreren Klassenräumen, welche im Rahmen des von der DBU geförderten Projektes untersucht wurden, werden die vorgefundenen raumklimatischen Verhältnisse geschildert. Es wurde über ein fast 2 jährigen Zeitraum gemessen. Ein Ziel dieses Projektes ist es für zukünftige Sanierungsfälle, repräsentative Datensätze für Simulationen (WUFI, etc) über das Raumklima in Klassenzimmern zu haben. Hier besteht ein großer Bedarf an solchen Informationen, denn die Praxis zeigt, dass Schulen in der Regel nicht entsprechend den Vorgaben in den entsprechenden Normen betrieben werden.

- 1 Fromme, H.; Dietrich, S.; Kiranoglu, M.; Twardella, D.; Schierl, R.; Nowak, D.; Heitmann, D.; Körner, W.: Frische Luft an bayerischen Schulen. Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität. Vorläufige Zusammenfassung. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, September 2006.
- 2 Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumlufqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Projektbericht Dezember 2002 und Ergänzungen November 2004.
- 3 Institut für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen Berlin (ILAT) und Landesamt für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technischer Sicherheit Berlin: Dicke Luft im Klassenzimmer? Innenraumlufqualität in Berliner Schulen. Untersuchungen im Berliner Stadtgebiet 2002/2003. Ohne Jahresangabe.  
[http://www.bbges.de/content/fileadmin/res\\_bbges/dicke-luft.pdf](http://www.bbges.de/content/fileadmin/res_bbges/dicke-luft.pdf)

## 2 Beschreibung der untersuchten Räume

Die Angelaschule als staatlich anerkanntes Gymnasium in der Trägerschaft des Bistums Osnabrück konnte im Jahr 2003 ihr 100-jähriges Bestehen feiern. Bombenangriffe im zweiten Weltkrieg und ein Großbrand Anfang der 60er Jahre haben zu Um- und Neuaufbauten geführt, die den Anforderungen einer sich schnell wandelnden Zeit Rechnung tragen sollen.

Bild 1 zeigt eine Luftaufnahme der Schule mit angrenzender Parkanlage von 2004. Deutlich erkennbar sind die verschiedenen Gebäudekomplexe, aus denen die Schule heute besteht. Der 1903 eingeweihte und nach dem Großbrand 1963 wiedererstellte Klostertrakt mit Lage an der Bramstraße ist das älteste Gebäude auf dem Gelände. Noch vor dem Brand wurde mit dem Bau des Aulagebäudes an der südwestlichen Grundstücksgrenze begonnen, das 1962 fertig gestellt wurde. Östlich davon und parallel zum Aulagebäude wurde 1965 der Klassentrakt mit 18 Räumen auf drei Etagen gebaut. Der Erweiterungsbau, der südwestlich an das Kloster- und Schulgebäude anschließt, das heutige Haupthaus, wurde 1980 fertig gestellt.

### 2.1 Auswahl der Räume

Für die Untersuchungen mussten Räume aus Sicht der Gebäudenutzer mit besonderen raumklimatischen Problemen ausgewählt werden. Nach Ortsbesichtigungen und Gesprächen mit Lehrern, der Schulleitung und Vertretern der deutschen Bundesstiftung Umwelt wurden Räume in wichtigen Gebäudeteilen zur Bestandsanalyse ausgewählt. Die Auswahl erfolgte unter den Kriterien die unterschiedliche Bauweise der Gebäudeteile zu erfassen und nach der Orientierung der Räume. KL302 wurde wegen seiner Lage zur Straße hin, seiner nord-westlichen Orientierung und den schon erneuerten Fenstern ausgewählt. Als Vergleich zu KL302 wurde der Raum KL312 ausgewählt. Bei ähnlicher Raumgröße besitzt dieser Raum noch alte Zweifachfenster. Er ist dem Raum KL302 gegensätzlich orientiert und liegt nicht zur Straße hin. Somit können unterschiedliche Einflüsse, wie die Fensteröffnung in Abhängigkeit der Lärmbelastung oder die Temperaturerhöhung durch solare Einstrahlung abgeschätzt werden. Als Beispiel für einen Klassenraum im Aulatrakt dient der Raum A102. Im Erweiterungsbau zum Klostergebäude, dem Haupthaus, wurde der Physik-Saal H101 gewählt. Neben den bauphysikalischen Gründen wurde dieser Raum ausgewählt, um die Messungen direkt in den Unterricht einzubinden. Raum K203 stellt einen repräsentativen Raum im Klassentrakt dar.

### 2.2 Beschreibung der Räume

Bild 2 gibt die Lage der einzelnen Räume in dem Gebäudekomplex der Schule wieder und zeigt die jeweiligen Fassadenansichten der Gebäude. In Tabelle 1 sind die Räume mit ihrer Lage und Orientierung sowie den entsprechenden Maßen und Fenstern tabellarisch zusammengestellt.

Tabelle 2 liefert eine Beschreibung der technischen Anlagen, die in den ausgewählten Räumen installiert sind. Die Bauteilaufbauten der ausgewählten Räume sind in

Tabelle 3 zusammengestellt.

### **2.2.1 Klosterbau**

Die Räume KL302 und KL312 befinden sich im denkmalgeschützten Teil des Klostertraktes, der im Jahr 1903 errichtet und 1963 wieder aufgebaut wurde. KL302 ist nordwest-orientiert, KL312 besitzt eine südost-Orientierung. Die monolithischen Außenwände bestehen aus ca. 60 cm dickem Bruchsandsteinmauerwerk. Im mit 48,6 m<sup>2</sup> Grundfläche kleineren Raum KL302 wurden vor wenigen Jahren neue Fenster mit Wärmeschutzverglasung und Holzrahmen eingebaut. Im normalen Schulbetrieb sind nur die Oberlichter kippbar. Die Drehflügel lassen sich jeweils nur einen schmalen Spalt öffnen. Raum KL312 mit einer Grundfläche von 52,1 m<sup>2</sup> besitzt nur eine Einfachverglasung mit zum Teil stark verzogenen und damit sehr undichten Holzrahmen. Raum KL302 wird als Klassenzimmer genutzt. Häufiger belegt mit wechselnden Klassen ist der Erdkunderaum KL312.

### **2.2.2 Aulagebäude**

Raum A102 liegt oberhalb der Aula (Baujahr 1962) im 1. Obergeschoss. Die Bauweise ist der des Klassentraktes vergleichbar, mit durchgehender Vormauerung aus Klinkersteinen. Die undichten Dreh-Kipp-Fenster sind einfachverglast und besitzen Holzrahmen. Auf Grund der geringen Raumgröße mit 42,7 m<sup>2</sup> Grundfläche und der Lage im Aulagebäude wird der südwest-orientierte Raum nicht sehr stark genutzt.

### **2.2.3 Klassentrakt**

Im zweiten Obergeschoß des 1965 erbauten Klassentrakts befindet sich der häufig belegte Raum K203 mit einer Grundfläche von 56,6 m<sup>2</sup>. Der Klassentrakt wurde als Stahlbetonskelett mit Ausfachung und einer Klinkerverkleidung an den Giebelfassaden, Betonflachdach und isolierverglasten Schwingfenstern mit Kunststoffrahmen erstellt. Die Schule hat insgesamt 18 Räume ähnlicher Bauart.

### **2.2.4 Haupthaus**

Raum H101 befindet sich im Haupthaus. Er stammt aus dem Jahr 1980. Die nordwestlich zur Straße hin orientierte Fassade besteht aus einem zweigeteilten Fensterband von der Brüstung bis zur Decke in voller Raumbreite. Das Fensterband besteht aus Klappfenstern in der unteren und Kippfenstern in der oberen Hälfte, die in Isolierverglasung und Aluminiumrahmen ausgeführt sind. Nach Nordosten wird der Raum von einem innenseitig unverputztem 24 cm dickem Kalksandsteinmauerwerk mit geringer (max. 4 cm) Wärmedämmung hinter einer außenseitigen Blechverkleidung begrenzt. Der Raum mit 68,3 m<sup>2</sup> Grundfläche hat einen hohen Außenwandanteil. Aufgrund der Nutzung als Physikraum ist der Raum mit wechselnden Klassen durchgängig belegt.

Aufgrund der seitlichen Beleuchtung und der Verglasung bis unter die Decke sind die Voraussetzungen für eine gute Tageslichtversorgung gegeben. Allerdings ist die Raumtiefe im Verhältnis zur Raumhöhe vergleichbar hoch. Dies wird etwas durch die zusätzliche Belichtung durch ein Nord-Ost-Fenster ausgeglichen. Im Sommer ist bei heruntergelassenem Sonnenschutz die Tageslichtversorgung eingeschränkt. Zur Schule gehören ca. 10 Räume ähnlicher Bauart.

## 3 Durchgeführte Messungen

### 3.1 Energetische Bestandsaufnahme der Klassenräume

Die aus den Bauteilaufbauten berechneten U-Werte (

Tabelle 3) sowie die mit der Wärmestrom- und Oberflächentemperaturmessung (an 3 Tagen im Januar 2006) ermittelten U-Werte (Tabelle 4) sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

#### 3.1.1 [FIA1] Blower-Door-Messung

Als Bestandteil der energetischen Voruntersuchung wurde die Luftdichtheit der Räume KL301, KL302 und KL312 mit alten bzw. neuen Fenstern nach dem Blower-Door-Messverfahren in Anlehnung an DIN EN 13829 bestimmt. Dabei wird entsprechend der Prüfanforderung ein Luftwechsel bei 50 Pa Differenzdruck der so genannte n50-Wert ermittelt. Räume in anderen Gebäudeteilen konnten nicht gemessen werden, da das verwendete Messgerät die Abmessungen der Raumöffnungen nicht abdecken konnte.

Hierzu wird in die Innentür der entsprechenden Räume eine Minneapolis Blower-Door Typ3 eingebaut. Alle Räume wurden in ihrem momentanen Ist-Zustand getestet. Es wurden lediglich alle Fenster und Türen geschlossen. Zusätzliche Abklebungen wurden nicht vorgenommen. Somit kann die Luftdichtheit des Raumes nachvollzogen werden, die bei geschlossenen Fenstern während des normalen Schulbetriebs erreicht werden kann.

Die Blower-Door-Messung ergab für den untersuchten Raum KL302 mit neuen Fenstern einen n50-Wert von 1,3 h<sup>-1</sup>. Für Raum KL312 und KL301 mit Fenstern alter Bauart wurde ein n50-Wert von 2,7 h<sup>-1</sup> ermittelt. Die gemessenen Werte von 1,3 h<sup>-1</sup> bzw. 2,7 h<sup>-1</sup> entsprechen einer Einstufung im Geschoßwohnungsbau von dicht bzw. mitteldicht. Ein Wert von 3,0 h<sup>-1</sup> bzw. 1,5 h<sup>-1</sup> wird für fenstergelüftete bzw. mit einer Wohnungslüftungsanlage ausgestattete Wohngebäude im Rahmen der Energieeinsparverordnung gefordert. Allerdings werden dabei gesamte Wohnungen mit in der Regel zwei Fassadenausrichtungen auf ihre Dichtheit hin überprüft. Bei den durchgeführten Messungen wurden dagegen nur einzelne Räume gemessen. Daher lassen die gemessenen Werte auf eine eher geringe bis geringe Dichtheit schließen.

### 3.2 Messung der Witterungsverhältnisse

Zur Kennzeichnung der Witterungsverhältnisse wurde für den Zeitraum vor Inbetriebnahme der schuleigenen Wetterstation im Dezember 2006 auf Messwerte von der ca. 500 m entfernten Wetterstation der FH Osnabrück zurückgegriffen. Die Messwerte von Außenlufttemperatur, relativer Luftfeuchte und der Globalstrahlung wurden dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik ab Dezember 2005 Verfügung gestellt. Genaue Spezifikationen der Wetterstation liegen nicht vor, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass die Daten dort gemäß den anerkannten Regeln erfasst werden. Seit Dezember 2006 werden Außenlufttemperatur und Luftfeuchte, später auch Globalstrahlung, Regen und Luftdruck von der Wetterstation der Schule aufgezeichnet.

### 3.3 Thermisch-hygrisches Raumklima und Kohlendioxid-Konzentration

- Zur Messung der thermischen Behaglichkeit und der Luftqualität wurden Messachsen an den Raumumschließungsflächen erstellt. Folgende Größen wurden ab Dezember 2005 messtechnisch erfasst:
- Raumlufttemperatur (Höhe 1,7 m und z. T. zusätzlich auf 0,1 m, 1,1 m und 0,1 m unter der Decke)
- Relative Luftfeuchte (Höhe 1,7 m)
- Kohlendioxidkonzentration im Höhe 1,7 m (ab Mitte April 2006)
- Wärmestromdichten und Oberflächentemperaturen innen und außen an den Außenwänden (Messachse auf 1,7 m Höhe)
- Oberflächentemperaturen an der Wandinnenseite an erwarteten Wärmebrücken
- Fensteröffnungszeiten (ab Mitte November 2006)

Um Raumluftparameter repräsentativ zu erfassen wird allgemein eine Anbringung der Sensoren in der Mitte des Raumes frei hängend in der Luft empfohlen. Eine entsprechende Anbringung wurde diskutiert, dann jedoch verworfen, da der Schulbetrieb bei laufenden Messungen ungestört fortgeführt werden sollte. Somit stehen zur Anbringung der Raumluftfühler nur „geschützte“ Orte an den Raumumschließungsflächen zur Verfügung. Diese Orte sind zwar nur bedingt als repräsentativ anzusehen, lassen aber durch eine geeignete Anbringung und Vergleiche der Messorte sowie Voruntersuchungen (Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchten mit Kleinstloggern im stand-alone Betrieb) an anderen Stellen in den Räumen eine ausreichende Interpretation für die Raumluftverhältnisse zu.

Die Aussagekraft der Messung hängt davon ab, wie repräsentativ die Messwerte für den entsprechenden Raum sind. Der oben erwähnte Kompromiss der Messung des Raumklimas nahe einer Raumumschließungsfläche musste bezüglich seiner Aussagekraft bestätigt werden. Hierzu wurde im Oktober 2006 in jeden der Messräume für jeweils eine Woche ein separater Messaufbau am Sitzplatz eines Schülers eingebracht. Diese Spot-Messung beinhaltete die Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchte auf 0,1 m, 1,1 und 1,7 m sowie die Messung des Kohlendioxidgehalts der Raumluft auf 1,7 m Höhe. Für die Temperatu-

ren und Luftfeuchtigkeit konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Der Kohlendioxidgehalt war speziell bei Extremwerten signifikant unterschiedlich. Als Folge wurden die CO<sub>2</sub>-Sensoren ab Mitte November von den Messachsen an den Außenwänden zum Raum hin verlegt.

Zwei verschiedene Ausbauvarianten wurden für die Messung festgelegt. In der Standardvariante (in Raum A102 und H101) werden für das Raumklima Temperatur, Raumluftfeuchte und Kohlendioxidgehalt der Raumluft in 1,7 m Höhe gemessen. Außerdem wird bei der Variante mit Temperaturschichtung (in Raum K203, KL302 und KL312) die Temperatur im Raum mit zusätzlichen Temperatursensoren auf 0,1 m, 1,1 m und 0,1 m unter der Decke aufgezeichnet.

Zur Überprüfung der Fensteröffnungszeiten und daraus sich ableitenden Zusammenhängen mit dem Raumklima und der Raumluftqualität wurden Fensterkontakte installiert. Eine parallele Darstellung von Ursache (Fensteröffnen) und Wirkung (Absinken des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Raumluft) ist dadurch möglich. Diese Darstellung eignet sich besonders gut für die Integration des Themas in den Unterricht.

Tabelle 7 gibt einen tabellarischen Überblick über alle Messstellen. In Tabelle 8 sind der Messbeginn und das Ende der Messung bei einer Auswertung bis zum 1. Juli 2008 zusammengestellt. Zusätzlich ist die Gesamtzahl aller gültigen Messungen je Kanal aufgeführt.

### **3.3.1 Klostertrakt**

Im Klostertrakt KL302 (Bild 3) wurde die Messachse in der Mitte eines der überall gleich breiten Pfeiler an der Außenwand angebracht. In diesem Raum wurde zusätzlich zum normalen Raumklima die Temperaturschichtung gemessen. Eine Beeinflussung der Temperatursensoren für die Temperaturschichtung durch offene Fenster ist zu erwarten (Abstand zum Fenster ca. 40 cm). Deshalb erfolgte eine Verlegung der Messachse für die Wintermessung an die Innenwand neben der Tafel. Die messtechnische Ausstattung von KL312 (Bild 4) entspricht derjenigen von KL302, wobei der Kohlendioxidgehalt der Raumluft seit November 2006 an einem Pfeiler in Mitte des Raumes gemessen wird.

### **3.3.2 Aula**

Die Außenbauteil-Messachse in A102 (Bild 5) wurde in der Mitte eines der überall gleich breiten Pfeiler an der Außenwand angebracht. Die Messachse für das Raumklima wurde ab November 2006 an die Innenwand gegenüber der Tafel verlegt.

Begleitend zum Umbau des Aula-Trakts wurde im Oktober 2007 die Messinstallation im Aulagebäude erneuert. Die alte Messwerterfassung wurde vor den Umbaumaßnahmen von Lehrer und Schülern der Angeschule abgebaut und zwischengelagert. Die neue Messachse für das Raumklima wurde an der Innenwand zum Nachbarklassenzimmer angebracht. Die Messachse für das Außenbauteil wurde erneut an einem Außenwandpfeiler angebracht, wobei ein Sensor zur Messung der

Grenzschichttemperatur zwischen neuem Wärmedämmverbundsystem und alter Klinkerfassade zusätzlich eingefügt wurde.

### **3.3.3 Klassentrakt**

Eine Ausnahme bildet Raum K203 (Bild 6). Auch hier besteht die Außenwand aus dünnen Pfeilern mit dazwischen liegenden Fenstern. Somit wurden nur die Bauteiloberflächentemperaturen und die Wärmestromdichte an der Außenwand gemessen. Die Messachse für die Raumklimasensoren wurde an der Innenwand zum Nebenraum angebracht. Von einer Anbringung an der Außenwand wurde wegen sehr schmalen Pfeilern abgesehen. Eine Beeinflussung der Werte für die Temperaturschichtung, die Raumluftfeuchte und den Kohlendioxidgehalt durch offene Fenster ist nicht zu erwarten.

### **3.3.4 Haupthaus**

Im Klassenraum H101 (Bild 7) wurde die Messachse in der Mitte der nordöstlichen Außenwand installiert. Die Wand besitzt eine außenseitige Blechverkleidung, weshalb kein Sensor bis auf die äußere Oberfläche geführt wurde. Es wird die Temperatur im Luftspalt zwischen Blechverkleidung und Außendämmung gemessen. Es werden Lufttemperatur, Luftfeuchte und Kohlendioxidgehalt in 1,7 m Höhe erfasst. Der Kohlendioxidssensor wurde im November 2006 von der Außenwand an eine Stelle frei im Raum hängend auf ca. 2,2 m über den Boden verlegt, um eine Beeinflussung durch nahe offene Fenster auszuschließen.

### **3.3.5 Verwendete Messtechnik und Messwerterfassungssystem**

Alle Temperaturen wurden mit PT100-Sensoren der Firma ThermoSensor gemessen. Diese Sensoren, kalibriert im Messbereich von -20 bis 50 °C besitzen eine Genauigkeit von +/- 0,1 K. Zur Messung der relativen Luftfeuchte wurden die Sensoren SC05 der Firma Rotronic verwendet. Mit einer Genauigkeit von +/- 1,5 % relative Luftfeuchte wird ein Messbereich von 0 bis 100 % relative Luftfeuchte abgedeckt. Zusätzlich zum Feuchtefühler ist im genannten Sensor auch ein Temperaturrefühler verbaut. Dieser wurde jedoch wegen mangelnder Genauigkeit nur bis Anfang April 2006 zur Messung verwendet. Ab dann wurde an den Feuchtemessstellen zusätzlich ein oben genannter Temperatursensor angebracht.

Der Kohlendioxidgehalt im Raum wird über ein potentiometrisches Messverfahren mit Zirox CO<sub>2</sub>-Sensoren ermittelt. Diese geben im Messbereich zwischen 0 und 0,5 Vol % (5000 ppm) mit einem relativen Fehler von 5 % und einer Linearität des Messbereichs von 1 % entsprechende Spannungswerte aus. Der Kohlendioxidgehalt in Schulen hat große Schwankungen über den Tag, so dass Einzelmessungen nicht belastbar sind. Die Langzeitmessung in der Angelaschule scheint daher geeignet ein Bild von den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Klassenräumen wiederzugeben.

Neben dem Raumklima wird in jedem der ausgewählten Räume je ein Außenbauteil messtechnisch erfasst. Hierzu wurde an der inneren sowie

der äußeren Bauteiloberfläche in einer Achse auf 1,7 m Höhe über Fußboden ein Sensor für die Oberflächentemperatur installiert. Zusätzlich wird die Wärmestromdichte durch das Bauteil an gleicher Stelle gemessen. Dazu wurde ein möglichst ungestörter Bereich (geringer Wärmebrückeneinfluss) der Außenwand ausgewählt. Mit Phymas Wärmestrommessplatten mit einer aktiven Fläche von 90 x 90 mm werden die Wärmestromdichten durch die Bauteile erfasst. Diese geben die Wärmestromdichte mit +/- 5 % Genauigkeit des Kalibrierwerts bei 25 °C genau an. Die Daten dienen auch dazu, die U-Werte der wichtigsten Bauteile, die mit typischen Materialkennwerten ermittelt wurden, zu vergleichen. Vor allem für A102, KL302 und K203 kann die Achse nicht als ungestört betrachtet werden, da die Außenwände hauptsächlich aus Fensterfronten bestehen und die Fühler somit in der Mitte der Pfeiler zwischen den Fenstern angebracht werden mussten. An erwarteten Wärmebrücken wird die Oberflächentemperatur innen gemessen um mögliche Taupunktunterschreitungen bzw. eine Unterschreitung der Grenztemperatur für 80% Oberflächenfeuchte (Schimmelpilzkriterium) feststellen zu können.

Die Messwerte werden mit Sensoren an den oben beschriebenen Stellen in den jeweiligen Räumen erfasst. Die zugehörigen Sensorleitungen werden zu einem Unterverteiler je Raum geführt. Dort befindet sich auch die Stromversorgung für die aktiven Sensoren.

Vom Unterverteiler werden die Signale über Sammelkabel zum Datenlogger übermittelt. Diese Datenlogger wurden aus den Klassenräumen in nicht direkt für den Unterricht genutzte Räume geführt. Dies ist nötig, da die Abtastung der einzelnen Kanäle durch ein Klicken der Relaischaltung beim Durchloggen nicht lautlos funktioniert. Das gesamte Messsystem gliedert sich in vier einzelne Datenlogger, von denen jeweils einer pro gemessenen Raum die Messwerte erfasst. Nur im Klostertrakt werden beide Räume auf einen Logger geführt.

Die aufgezeichneten Messwerte werden über eine serielle Schnittstelle aus dem Logger gelesen. Ein zwischengeschalteter RS232 – TCP/IP – Wandler ermöglicht es, die Messwerte über separates Netzwerk zum Rechner mit der Datenbankanwendung zu übermitteln. Zum internen Schulnetz besteht eine Netzwerkverbindung. Ein Zugriff auf die Datenbank ist vom IBP aus über eine SSH-Verbindung möglich.

Durch Schwankungen in der Übertragungsleistung des Netzwerkes können kürzere Datenausfälle auftreten. Wegen defekter Messrechner kam es vom 3. bis 8. Januar 2007 als auch vom 4. Juni bis 27. Juli 2007 zu längeren Datenausfällen. Der Messrechner musste jeweils ausgetauscht werden. Der letzte Austausch eines defekten Messrechners fand im Oktober 2008 statt. Der Messrechner war ab Anfang Juli 2008 ausgefallen. Auf dem Rechner werden die Messwerte über das am IBP entwickelte Messwernerfassungssystem IMEDAS gespeichert und zur Auswertung bereitgestellt. Auch die aktuelle Online-Visualisierung der Messwerte erfolgt über diesen Rechner. Bild 8 zeigt am Beispiel des Klassenraumes K203 die vom IBP realisierte Online-Visualisierung.

## 4 Ergebnisse der raumklimatischen Untersuchungen im Ist-Zustand

Die Auswertung der untersuchten Klassenräume erstreckt sich über den Zeitraum von April 2006 bis Juli 2008. Bild 9 zeigt den Verlauf der Messwerte der Wetterstation von Temperatur und relativer Feuchte für den gesamten Zeitraum.

Zur Auswertung des umfangreichen Datensatzes wurde für jeden Raum sowohl der Gesamtzeitraum betrachtet als auch kürzere Zeiträume (jeweils eine heiße Woche im Sommer und eine kalte Woche im Winter), die spezielle Erkenntnisse über die einzelnen Räume und mögliche Zusammenhänge erkennen lassen. Für die Betrachtung des Raumklimas während einer kalten Woche im Winter wurde die Woche vom 16. bis 22. Februar 2008 gewählt. Das Außenklima in dieser Woche ist in Bild 10 dargestellt. Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug in dieser Woche 3,7°C. Für die Sommerwoche dient der Messzeitraum vom 29. April bis 05. Mai 2007 (Durchschnittstemperatur außen 13,4°C) für die Räume H101 und A102 und vom 07. bis 14. Juni 2008 für die Räume KL302, KL312 und K203 (Durchschnittstemperatur außen 17,2°C). Den Verlauf der Außentemperatur und –feuchte in dieser Woche zeigt Bild 11.

Die Daten wurden zur Auswertung so bereinigt, dass alle Messfehler aus den Minuten-Messwerten entfernt wurden. Anschließend wurden Viertelstundenmittelwerte gebildet. Der Datensatz mit den bereinigten Viertelstundenmittelwerten liegt den folgenden Auswertungen zu Grunde.

Zur weiteren Analyse wurden alle potentiellen Schuldaten zwischen 8 Uhr und 13 Uhr an Wochentagen separat ermittelt. Die statistischen Angaben über Mittelwerte, Mediane und Quartile beruhen auf diesen Daten. Es wurde ferner unterschieden zwischen Sommer- und Winterschuldaten. Für die Sommerdaten wurden nur Messwerte in den Monaten Mai, Juni, Juli und August gewählt. Für die Winterdaten wurden die Monate November, Dezember, Januar und Februar gewählt.

Für eine detaillierte Auswertung, in den vergleichenden Betrachtungen für den Kohlendioxidgehalt und für die Fensteröffnungszeiten exemplarisch für den Raum K203 gezeigt, wurden nur belegte Schulstunden herangezogen. Die Analysen basieren auf minütlich erfassten Messwerten, die über eine Schulstunde von 45 Minuten oder für die Dauer der Pause zwischen den Stunden gemittelt wurden. Durch eine lineare Regression des Kohlendioxidgehalts der Raumluft pro Schulstunde wurde auf die Belegung rückgeschlossen. Die Schulstunden wurden nummeriert von S1 bis S13. Da die meisten Stunden am Vormittag gehalten werden und nur sehr wenige Stunden am Nachmittag stattfinden, sind die Stunden S1 bis S6 die wichtigsten Stunden.

## 4.1 Ergebnisse für die einzelnen Gebäudeteile

Im Folgenden werden die jeweiligen Ergebnisse der einzelnen repräsentativen Räume zusammenfassend dargestellt. Dabei ist für jeden Raum immer das Übersichtsdiagramm über den gesamten Beobachtungszeitraum als auch die Einzeldarstellung für die charakteristische Sommer- und Winterwoche in Bild 12 bis Bild 26 dargestellt. Gezeigt werden die Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel über den gesamten Messzeitraum und der ungeglättete Verlauf der Viertelstundenmittelwerte in den ausgewählten Wochenübersichten.

### Klosterbau

Die untersuchten Klassenräume KL302 und KL312 befinden sich im denkmalgeschützten Teil der Schule. Aufgrund des ungedämmten Natursteinmauerwerks und der einfachverglasten Fenster in KL312 ist die energetische Qualität der Räume als schlecht einzustufen.

Trotz der neuen, dichten Fenster und der Orientierung der Fenster zur Straße sind in Raum KL302 wegen der geringen Belegung und auch weil während der Belegung über die Fenster gelüftet wird gemäßigte Kohlendioxidgehalte der Raumluft vorzufinden (Bild 12). Im gesamten Messzeitraum waren 99 % aller Messwerte unter 2000 ppm. Im Winter hält die Heizung, außer zu Ferienzeiten mit Temperaturabsenkung auf 15 °C, die Temperaturen zwischen 18 und 20°C aufrecht (Bild 13). Die sommerlichen Raumtemperaturen während potentieller Schulstunden bewegen sich im Mittel bei 23 °C (Bild 14). Dies ist auf die Lage und Orientierung des Raumes, die geringen internen Lasten und die Lüftung durch Fenster trotz der Lage zur Straße hin zurückzuführen. Vor allem kann in Raum KL302 im Sommer die Raumlufttemperatur während des Unterrichts durch Fensteröffnung merklich abgesenkt werden, was in KL312 nicht möglich ist, obwohl hier zum Teil einige Fenster über Nacht gar nicht geschlossen werden (Bild 17).

Bild 15 zeigt im Vergleich zu Bild 12 die Unterschiede auf, die durch veränderte Belegung, Heizungsregelung und Orientierung der Räume auftreten können. KL312 ist häufiger belegt als KL302. Daraus resultieren höhere mittlere Kohlendioxidgehalte der Raumluft im Winter. Die Spitzen von über 2600 ppm würden noch viel höher ausfallen, wenn auch in Raum KL312 neue Fenster verbaut wären. Die vorhandenen, sehr undichten Fenster sorgen immer für einen erhöhten Grundluftwechsel. Sie schließen zum Teil so schlecht, dass auch im Winter manche Fensterkontakte dauerhaft geöffnete Fenster anzeigen (Bild 16), was erst bei einem Spalt zwischen Fensterflügel und –rahmen von mehr als 3 cm der Fall ist. Der Luftaustausch der Raumluft mit der kalten Außenluft trägt dazu bei, dass die Lufttemperatur in Raum KL312 während aller Monate November bis März im gesamten Messzeitraum 21,7°C nicht überschreitet, zu 50 % liegt sie in diesen Monaten sogar unter 16,2°C. Die Auswirkung der Nachtabsenkung wird in Bild 16 deutlich. In der Nacht kühlt der Raum bis unter 15°C ab. Am Wochenende, ohne Anwesenheit der Schüler, werden die Klassenräume während der Zeit

am Tag, an der geheizt wird, auf nicht einmal 17°C erwärmt. Nur wenn Schüler den Raum zusätzlich erwärmen, werden während des Unterrichts Werte von über 18°C erreicht, die Temperatur in der ausgewählten Woche steigt jedoch nie über 20°C.

#### 4.1.1 Aulagebäude

Für das Aulagebäude liegen Messwerte bis Juni 2007 vor. Deshalb mussten andere Wochenzeiträume gewählt werden. Der gesamte Verlauf der Messwerte (Bild 18) zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration moderat ist. Bei den Temperaturen werden hohe Extremwerte mit bis zu 35,7°C erreicht, jedoch auch Tiefstwerte von unter 10°C. Auch wenn diese Werte nicht während der Unterrichtszeit auftreten, so zeigt sich doch der Einfluss der Orientierung der Fensterflächen, viel mehr jedoch die ungenügenden thermischen Eigenschaften der Bauteile und Fenster. Bei der Betrachtung einer kalten Woche (Bild 19) werden die hohen täglichen Schwankungen der Raumlufttemperatur deutlich. Vor Schulbeginn eines jeden Tages liegen Raumtemperaturen unter 15°C vor. Diese werden durch Heizung und Schüler, aber auch durch solare Einstrahlung unter Tags auf zum Teil über 20°C erhöht. Die moderate CO<sub>2</sub>-Konzentration im Winter ist darauf zurückzuführen, dass der Raum einerseits gering belegt ist, andererseits aber auch nach Erreichen von akzeptablen Temperaturen über die Fenster gelüftet wird. Im Sommer sind vor allem die hohen Temperaturspitzen auffällig (Bild 20). Die Raumlufttemperaturen steigen nach Unterrichtsende wegen der Orientierung der Fenster und fehlender Verschattungsmöglichkeiten auf hohe Werte. Dies kann nach längerer heißer Periode ein Aufschaukeln der Temperatur begünstigen.

#### 4.1.2 Klassentrakt

Der Überblick über den gesamten Messzeitraum für K203 (Bild 21) zeigt die hohen tages- als auch jahreszeitlichen Schwankungen der Raumlufttemperatur. In der Spitze wurde im Klassenraum eine Temperatur von 34,9°C gemessen. Vor allem während der Heizungsabschaltung in den Ferien im Winter sinkt die Temperatur auf unter 10°C. Beides spricht für die schlechte thermische Qualität der Außenwand und des Flachdachs. Auch der häufig sehr hohe Kohlendioxidgehalt der Raumluft, vor allem in den Wintermonaten, wird deutlich. In der Spitze wurden über 5000 ppm gemessen und 50% aller Messwerte während potentieller Schulstunden in den Wintermonaten liegen über 1350 ppm.

Bild 22 zeigt den Verlauf der Raumklimaparameter in einer Woche im Februar 2008. Es ist zu erkennen, dass die Raumtemperaturen nicht einmal bei Anwesenheit der Schüler über 20°C steigen. Nach der Absenkphase am Wochenende ist die Raumlufttemperatur auf unter 14 °C gesunken. Der Einfluss der Nachtabsenkung, vor allem aber auch der Auskühlung und Aufheizphase nach der Absenkung der Heizung über die Winterferien zeigt Bild 31. Die Heizung kann den leeren Raum nur bis maximal 17°C aufheizen. Erst nachdem der Raum wieder genutzt wird, steigen die Temperaturen während der Belegungszeit langsam an. Der ausgekühlte Raum braucht mindestens drei Wochen, um bei der nächtlichen Auskühlung durch die Nachtabschaltung einen einge-

schwungenen Zustand zu erreichen. Für den untersuchten Klassenraum K203 ist die winterliche Behaglichkeit als schlecht einzustufen.

Die sommerlichen Raumtemperaturen sind außerhalb des anzustrebenden Behaglichkeitsbereiches (Bild 21). Im Sommer herrschen unangenehm hohe Temperaturen vor, die auch durch Fensterlüftung nicht verringert werden können. Aufgrund der schlechten Dämmung des Daches und der Außenwand liegen die Innenoberflächentemperaturen im Winter über 50% der Zeit während der Messung im November unter 16,1°C an der Außenwand und 15,8°C am Dach. Im Sommer liegen 75% der Wand-Temperaturen über 25,9 °C und der Dach-Temperaturen über 27,3 °C (Tabelle 9).

Im Winter steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration schnell auf Werte über 0,20 Vol %. Werte über 0,30 Vol % werden jeden Tag der ausgewählten Woche erreicht. Obwohl K203 zum Klostergarten hin orientiert ist, wird wenig über Fenster gelüftet. Das Lüften über Fenster wird wegen der ohnehin schon geringen Raumtemperatur durch die dabei weiter absinkende Raumtemperatur erschwert.

### 4.1.3 Haupthaus

Auch der Raum H101 weist als Physikraum eine hohe Belegungsichte auf. Dies führt zu regelmäßigen Kohlendioxidgehalten der Raumluft über 2000 ppm. Das im jüngsten Bauteil Haupthaus mit dem Baujahr 1980 liegende Zimmer verdeutlicht den Einfluss der thermischen Qualität der Außenbauteile. Die Temperaturen in H101 fallen auch während der Winterferien nicht weit unter 15°C (Bild 24), vor allem aber sind die tageszeitlichen Schwankungen der Raumlufttemperatur im Winter geringer und damit die Temperaturen vor Schulbeginn höher. Bild 25 zeigt jedoch auch, dass durch die Absenkung der Heizung übers Wochenende am Wochenbeginn mit den niedrigsten Temperaturen gestartet wird. Die täglichen Tiefsttemperaturen nach der nächtlichen Auskühlung erhöhen sich im Wochenverlauf kontinuierlich, bis sie am Freitag ihren Höchststand erreichen. Bei höheren Raumtemperaturen wird dann auch mehr über die Fenster gelüftet, was jedoch meist, wegen der Lage zur Straße, stoßweise erfolgt. Die Kohlendioxidgehalte der Raumluft steigen deshalb trotz der hohen Belegungsichte selten auf sehr hohe Werte. Während potentieller Schulstunden in den Wintermonaten liegen 50% aller Messwerte jedoch über 1250 ppm. Im Sommer ist der Raum H101 aufgrund der Orientierung seiner Fensterflächen und der zusätzlich vorhandenen Verschattungsmöglichkeit unkritisch, wie Bild 26 zeigt.

## 4.2 Vergleichende Betrachtung

### 4.2.1 Temperaturen

Bild 27 zeigt im Boxplot- Diagramm die Häufigkeiten der auftretenden Temperaturen an allen Wochentagen der Monate November bis März zwischen 8 Uhr und 13 Uhr. Nur in der Aula und im Haupthaus sind etwas mehr als ein Viertel aller Viertelstundenmittelwerte in einem Bereich über 20°C. Der Median der Lufttemperatur im ausgewählten Zeitraum beträgt für K203 18,0°C, für KL302 19,0°C und für KL312

17,9°C. Das heißt, dass 50 % aller Werte unterhalb der angegebenen Temperaturen liegen.

In Bild 28 sind die Häufigkeiten der auftretenden Temperaturen an allen Wochentagen der Monate Mai bis September zwischen 8 Uhr und 13 Uhr als Boxplot Diagramm dargestellt. Nur K203 weist mit mehr als 50 % aller Werte über 25,0°C eine erhöhte Überschreitung einer möglichen definierten Anforderung auf. In allen anderen Räumen sind mehr als 75 % aller im definierten Zeitraum gemessenen Werte unter 25,8 °C.

Vergleicht man an einem heißen Sommertag, wie in Bild 29 für den 13. Juli 2006 geschehen, die Raumlufttemperaturen, kann man den Einfluss der Orientierung der Fensterfronten deutlich erkennen. Der Nordwest orientierte Raum H101 mit zusätzlich gegebener Verschattungsmöglichkeit zeichnet sich durch geringe Temperaturschwankungen aus. Die beiden Räume im Klostertrakt profitieren von der hohen thermischen Masse der Außenbauteile, die die tageszeitlichen Raumtemperaturschwankungen dämpft. Die Erhöhung der Raumtemperatur findet im Südost orientierten Raum KL312 in den Vormittagsstunden statt. Die Verschattung durch innen liegende Vorhänge ist nicht effektiv. Im Nordost orientierten Raum K203 kann der Einfluss der Verschattung gut nachvollzogen werden. In den frühen Morgenstunden scheint die Sonne in den Raum und die Raumlufttemperatur erhöht sich schnell. Nach Eintreffen der Schüler werden die Vorhänge als innen liegender Sonnenschutz geschlossen und die Lufttemperatur sinkt wieder leicht ab, ist aber während dem Schulbetrieb Schwankungen unterworfen. Nach dem Unterrichtsende erwärmt die eintreffende Strahlung von außen die Raumluft. Im Südwest orientierten Aularaum A102 steigt die Temperatur in den Abendstunden auf unangenehme Werte. Wegen der geringen Wärmedämmung der Außenbauteile und die nächtlich tieferen Außentemperaturen sinkt die Temperatur über Nacht jedoch wieder ab.

Vergleicht man die Temperaturen in verschiedenen Höhen, wie in Bild 30 exemplarisch für den 18. Februar 2008 in den Räumen KL302 und KL312 geschehen lassen sich auch an einem Wintertag keine unangenehm hohen Temperaturdifferenzen feststellen.

Bild 32 trägt die jeweils gemessene Raumlufttemperatur über der Außentemperatur auf. Für alle Räume kann ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Innen- und Außentemperatur gezeigt werden. Die Nachabschaltung der Heizung und die schlechte thermische Qualität der Außenbauteile führt dazu, dass sich nicht wie zu erwarten erst über einer bestimmten Außentemperatur ein linearer Zusammenhang zeigen lässt und unter der Grenz-Außentemperatur eine feste „Heiztemperatur“ vorliegt.

## 4.2.2 Relative Luftfeuchte

Die Boxplot Darstellung der gemessenen relativen Feuchten in Bild 33 zeigt, dass sich die Raumlufftfeuchte in allen Räumen in Bereichen zwischen 40 und 70 % r.F. bewegt. Dieser Bereich ist gesundheitlich unkritisch. Auch an den gemessenen Wärmebrücken werden nur in Spitzen Taupunktunterschreitungen festgestellt.

Bild 34 vergleicht exemplarisch den Wasserdampfpartialdruck im Raum K203 mit dem Sättigungsdampfdruck an der Innenoberfläche der Wärmebrücke des Fensteranschlusses an die Wand im Laibungsbereich während einer kalten Winterwoche. Nur wenn der Wasserdampfpartialdruck über den Sättigungsdampfdruck steigt, ist mit Tauwasserausfall zu rechnen. Diese Bedingung herrscht nur vor, wenn Schüler im Raum sind und dann auch nur sehr kurzzeitig. Da der Prozess des Dampfdruckausgleichs im Raum auch etwas Zeit benötigt und direkt an der Wärmebrücke nur indirekt auf die dort herrschende Feuchte zurückgeschlossen werden kann, ist davon auszugehen, dass Taupunktunterschreitungen und damit einhergehender Tauwasserausfall nur in sehr seltenen Fällen auftreten. In diesen Fällen kann das Tauwasser sehr zeitnah wieder in den Raum verdunsten, da nach der Unterschreitung ein Dampfdruckgefälle zum Raum hin herrscht.

Etwas anders stellt es sich in Bezug auf Schimmelpilzbildung dar. Bild 34 gibt zusätzlich den Wasserdampfpartialdruck an, bei dem an der Wärmebrücke relative Feuchten von 80 % herrschen. Dieser Druck wird während der Belegung häufiger überschritten, das heißt es ist mit „schimmelpilzkritischen“ Feuchten über 80 % zu rechnen. Berücksichtigt man jedoch die anderen Faktoren, die für das Schimmelpilzwachstum relevant sind, so kann man feststellen, dass einerseits in Zeiten von erhöhter Feuchte nur geringe Temperaturen vorherrschen und andererseits die Zeitdauer der Überschreitung auch nur einen geringen Prozentsatz der gesamten Tageszeit beträgt. An den gemessenen Wärmebrücken ist somit weder mit erhöhtem Tauwasserausfall zu rechnen, noch sind Schimmelpilze zu erwarten. Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen vor Ort, die keinen Schimmelpilzbefall erkennen ließen.

## 4.2.3 Kohlendioxidgehalt

Um den Kohlendioxidgehalt und die Temperatur der Raumlufft und die Fensteröffnungszeiten näher zu beleuchten wurde wie beschrieben eine detaillierte Analyse durchgeführt. Dazu werden Schulstundenmittelwerte berechnet um den tageszeitlichen Verlauf der genannten Werte abzubilden. Exemplarisch wird nachfolgend der Raum K203 herausgegriffen, weil er aufgrund seiner Belegung die höchsten Kohlendioxidgehalte aufweist.

Bild 36 zeigt exemplarisch das monatliche Minimum, Maximum und die Quartile der Kohlendioxidkonzentration, der Innentemperatur und der Fensteröffnungszeit ermittelt aus den Mittelwerten der Schulstunden eins bis sechs für den Klassenraum K203. Zwischen November und März ergibt sich ein Median der Kohlendioxidkonzentration von 1200 bis 1560 ppmv. Dies bedeutet, dass in 50% der Schulstunden der Mit-

telwert der Kohlendioxidkonzentration über 1200 bzw. 1560 ppmv lag. Außerhalb dieses Zeitraumes liegen alle Medianwerte unter 1000 ppmv. Die gemessene Innenraumtemperatur in K203 ist sehr niedrig. Von November bis März sind die ermittelten Mediane während der Belegung durch Schüler unter 18,8°C und das obere Quartil überschreitet 19,4 °C nicht. Fast alle Schulstundenmittelwerte liegen also in diesem Zeitraum unterhalb von 20°C. Die Fensteröffnungszeiten liefern zwischen Dezember und März Werte um 0,25. Dieser Wert ist gleichbedeutend damit, dass eines der vier in K203 vorhandenen Fenster für eine Stunde geöffnet wurde oder dass alle vier Fenster während eines Viertels der Schulstunde geöffnet wurden. Ein Wert von 1,0 würde bedeuten, dass alle Fenster eines Raumes für eine gesamte Stunde geöffnet sind. Mit steigender Innentemperatur im April (Median 23,1°C) steigt auch die Fensteröffnungszeit an.

Bild 35 zeigt die über die Monate Januar und Februar für jede Schulstunde und jede Pause gemittelte Kohlendioxidkonzentration. Der Median der Stunden S3 bis S6 liegt bei 1500 ppmv. Die Maximalwerte sind recht hoch und erreichen 3000 bis 4000 ppmv. Die Medianwerte in den Pausen sind geringer als die Mediane in den Schulstunden unmittelbar vor der Pause. Dies bedeutet, dass die Fenster während der Pausen geöffnet werden. 50% aller Werte von Stunde 3 bis 6 liegen zwischen 1200 (unteres Quartil) und 2000 ppmv (oberes Quartil). Die für Januar und Februar für den Zeitraum von 8 bis 18 Uhr gemittelte Außentemperatur wurde zu 5,2°C bestimmt.

Die unterschiedliche Belegung der Räume und die daraus resultierenden Kohlendioxidgehalte der Raumluft zeigt die Zusammenstellung Bild 37 der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Räumen während potentieller Schulstunden in den Wintermonaten. Die Boxplot-Darstellung zeigt, dass sich in A102, KL302 und KL312 rund 25% aller Messwerte nahe der natürlichen Außenkonzentration befinden. Dies lässt darauf schließen, dass sie dann auch nicht belegt sind. H101 und K203 zeigen sehr hohe Schwankungen der Kohlendioxidkonzentration. 25% aller Viertelstundenmittelwerte lagen über 1710 ppm im Raum H101, in Raum K203 lagen ein Viertel aller Werte sogar über 1880 ppm.

Unterstellt man, dass die Fensteröffnung von der Außentemperatur abhängig ist, das heißt, dass bei niedrigeren Außentemperaturen auch weniger gelüftet wird, dann heißt das, dass auch der Luftwechsel von den Temperaturverhältnissen außen abhängt. Trägt man den Kohlendioxidgehalt der Raumluft über der Außenlufttemperatur auf (Bild 38), bestätigt sich diese Annahme. Eine lineare Regression dieses Zusammenhangs zeigt eine unter anderem von der Belegung abhängige Steigung der Regressionsgeraden.

#### 4.2.4 Fensteröffnungszeiten

Für den Zeitraum von November 2006 bis Mai 2007 wurde in jeder Minute der Status der Fenster erfasst und wird im Folgenden ausgewertet. Der Auswertzeitraum für die Minutenwerte wurde eingeschränkt, weil die Arbeitsspeichergröße den auswertbaren Datensatz begrenzt.

Tabelle 10 zeigt die Medianwerte für die Fensteröffnungszeiten, Innen- und Außentemperaturen. Bei einem Median der Außentemperatur von 8°C erreicht der Median der Innentemperatur in keinem Klassenraum 20°C. Der Median der Fensteröffnungszeit während aller belegten Schulstunden ist in allen untersuchten Klassenräumen sehr gering. In Raum H101 sind 65% der erfassten Werte gleich Null. Dies bedeutet, dass in 65% aller Schulstunden die Fenster während der gesamten Schulstunde geschlossen waren. Der höchste Median der Fensteröffnungszeit wurde zu 0,25 für den Raum KL312 im alten Klostergebäude, der zum Hof hin orientiert ist, ermittelt.

Bild 39 zeigt die Fensteröffnungszeit für alle untersuchten Klassenräume in Abhängigkeit von der Außentemperatur (links) bzw. in Abhängigkeit von der Innentemperatur. Die Diagramme zeigen die Quadranten, die aus den Medianlinien für die Fensteröffnungszeit und denen der Außen- bzw. Innentemperatur entstehen. Für jeden Raum ergibt sich eine typische Verteilung der Fensteröffnungszeit, die aus der Anzahl der Fenster je Raum resultiert. Aus den Diagrammen können keine klaren Abhängigkeiten der Fensteröffnungszeit von der Außen- bzw. Innentemperatur abgeleitet werden.

Daher wurden die Rangkorrelationen zwischen Fensteröffnungszeit und Außen- bzw. Innentemperatur berechnet. Tabelle 11 zeigt, dass nur für einen Klassenraum eine signifikante Korrelation zwischen der Fensteröffnungszeit und der Außentemperatur gibt. Dieser für H101 gefundene Korrelationswert ist jedoch sehr niedrig und zeigt eine schwache Korrelation an. Im Gegensatz sind die Korrelationen zwischen Fensteröffnungszeit und Innentemperatur höher. Alle diese Korrelationen sind auch signifikant. Es kann daraus geschlossen werden, dass mit steigender Innentemperatur auch die Fensteröffnungszeit steigt. H101 und KL302 zeigen Korrelationen von 0,23 bzw. 0,15. Beide Räume sind zur Straße hin orientiert. KL312 zeigt den höchsten Korrelationswert von 0,43 und ist wie A102 und K203 zum Hof hin orientiert.

## 5 Zusammenfassende Beschreibung und Ableitung einer allgemeinen Beschreibung des Raumklimas in Schulen

Viele Schulen in Deutschland weisen eine alte Bausubstanz und alte Fenster auf. Die Messungen an der Angelaschule können als repräsentativ für verschiedene Bauweisen der Schulen angesehen werden. Die unterschiedlich gut gedämmten Außenbauteile und die von Gebäudeteil zu Gebäudeteil variierenden Fenster ermöglichen eine gute Abschätzung des Einflusses dieser Parameter auf das in Schulräumen herrschende Raumklima.

Wie an der Angelaschule besteht bei vielen älteren Schulen erhöhter Sanierungsbedarf. Bei einer energetischen Betrachtung fallen vor allem die schlecht gedämmten Bauteile und die zum Teil noch vorhandene Einfachverglasung auf. Durch diese an das Außenklima grenzenden Bauteile verlieren die Gebäude viel Energie. Um die Kosten für die Heizung in Grenzen zu halten, werden an der Angelaschule verschiedene

Strategien angewandt. Hauptsächlich wird versucht, durch Nachtabsenkung eine Einsparung zu erzielen. Vergleicht man die Raumlufttemperaturen und die Wärmestromdichten durch die Außenbauteile in der ausgewählten Winterwoche (Bild 40) erkennt man, dass die Raumlufttemperatur in KL302 zwischen 18 °C und 20 °C gehalten wird. Dies führt zu einem kontinuierlichen Wärmestrom von 20 – 30 W/m<sup>2</sup> durch die Außenbauteile. In Raum KL312, in dem die Raumlufttemperatur nur während der Anwesenheit von Schülern auf 17 °C bis 20 °C steigt, ist auch nur in diesen Zeiträumen ein ähnlich hoher Wärmestrom vorhanden. Ansonsten sinkt er aufgrund der geringeren Temperaturdifferenzen auf Werte bis unter 10 W/m<sup>2</sup> ab. Wenn man in allen Schulräumen zumindest während der Schulzeit die Raumlufttemperatur in behaglichen Bereichen hält, ist mit einem mehr als doppelt so hohen Energieverbrauch zu rechnen.

Dies führt dazu, dass allein die Heizung nicht in der Lage ist, die Klassenzimmer in der kurzen Vorlaufzeit zwischen Heizbeginn und Schulbeginn auf akzeptable Temperaturen zu heizen. Die morgendliche Aufheizphase dauert einige Stunden, ehe sich eine mittlere Temperatur für die Belegung je Klassenzimmer einstellt. Sehr niedrige winterliche Lufttemperaturen in den Klassenzimmern führen dazu, dass nach Aussage der Lehrer die Schüler mit Anoraks im Unterricht sitzen. Noch gravierender wirkt sich die Aufheizphase nach Ferien im Winter aus, in denen die Absenkung der Heizung bewirkt, dass die kompletten Baukörper auf Temperaturen von bis unter 10°C auskühlen. Mehrere Wochen Einschwingphase sind notwendig, um eingeschwungene tageszeitliche Schwankungen wiederherzustellen.

Die kalten winterlichen Raumlufttemperaturen werden auch das Lüftungsverhalten durch Fensterlüftung beeinflussen. Da weniger gelüftet wird, werden noch höhere Kohlendioxidgehalte der Raumluft erreicht. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Klassenräumen ist jedoch auch sehr stark von der Belegung abhängig. Deshalb weist beispielsweise Raum KL302, der neue, dichte Fenster hat und zur Straße hin orientiert ist, was die Fensterlüftung aufgrund akustischer Beeinträchtigung erschwert, geringere Konzentrationen an Kohlendioxid in der Raumluft auf als KL312, der wegen seiner undichten Fenster einen hohen Infiltrationsluftwechsel aufweist und zusätzlich zum Innenhof orientiert ist, was eine erhöhte Fensterlüftung zumindest theoretisch ermöglichen würde.

Wie sich für die Angelaschule zeigt, ist die Fensterlüftung kaum geeignet, die Kohlendioxidkonzentration im Raum auf akzeptable Werte zu begrenzen. Die Öffnung der Fenster hängt hauptsächlich von der Raumlufttemperatur ab. Obwohl in den Messräumen Kohlendioxidensoren eingebaut waren, die den aktuellen Messwert anzeigen, wurde auf eine Einhaltung annehmbarer Werte nicht geachtet. Gerade in den Wintermonaten mit kalter Außentemperatur verursacht die Fensterlüftung einen zusätzlichen Energieverlust und eine Absenkung der Raumlufttemperatur. Will man einen Luftwechsel aufrechterhalten, der eine Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf akzeptable Werte ermöglicht, ist eine kontinuierliche Lüftung erforderlich.

Die unsanierten und undichten Schulräume weisen Raumlufffeuchten auf, die unkritisch erscheinen. In Raum KL302 wurden die Fenster ausgetauscht und neue, dichte Fenster eingebaut. Auch hier sind die Raumlufffeuchten nicht kritisch. Dies mag jedoch an der geringen Belegung des Raumes liegen. Bei stärkerer Raumbelastung ist deshalb darauf zu achten, nicht nur einzelne Sanierungsmaßnahmen wie den alleinigen Fensteraustausch durchzuführen, sondern auch den Auswirkungen der durchgeführten Maßnahme entsprechend Rechnung zu tragen. Es ist immer ein Gesamtkonzept zu erarbeiten.

## 6 Bilder



Bild 1:  
Luftaufnahme der Gebäudekomplexe der Angelaschule in Osnabrück.  
(Quelle: Google Earth).

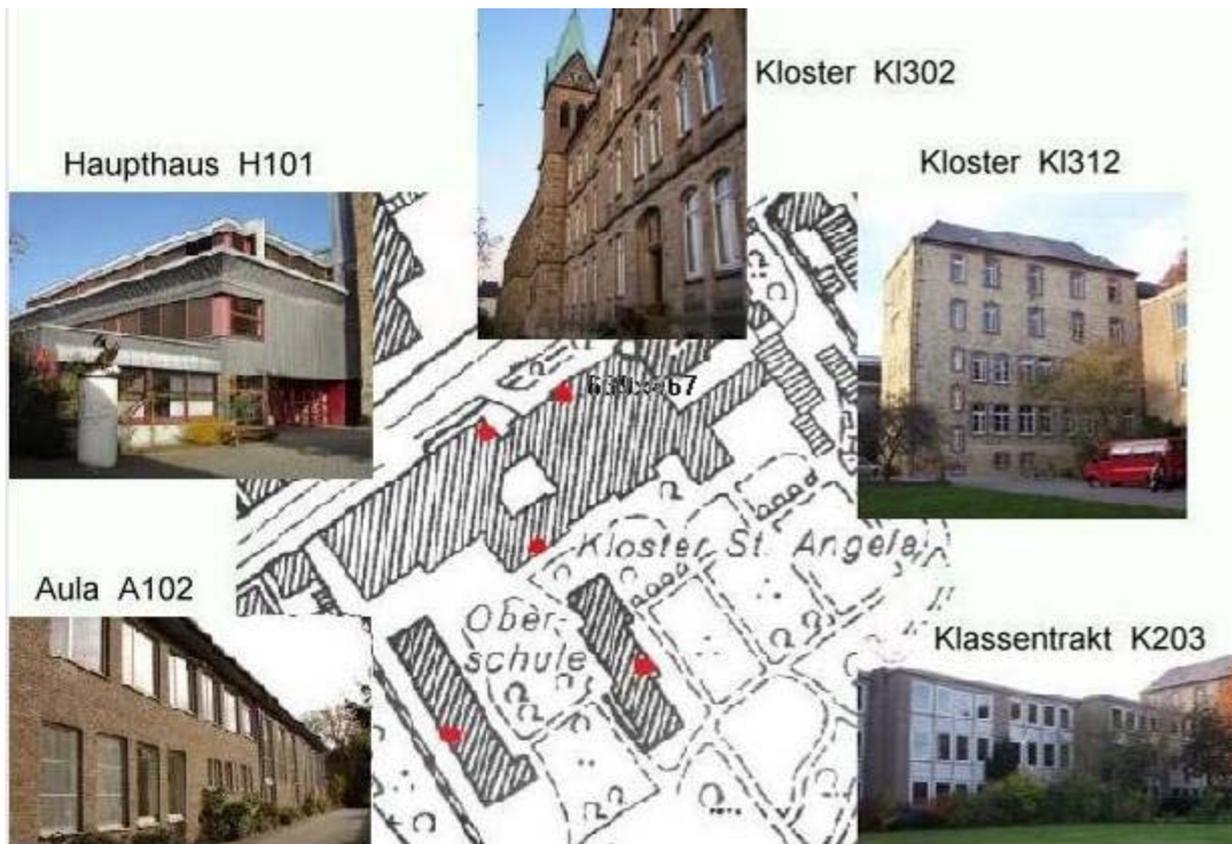


Bild 2:  
 Lage der einzelnen Räume in den Gebäudekomplexen, sowie die Außenansichten der Schulgebäude (Quelle: Angelaschule).

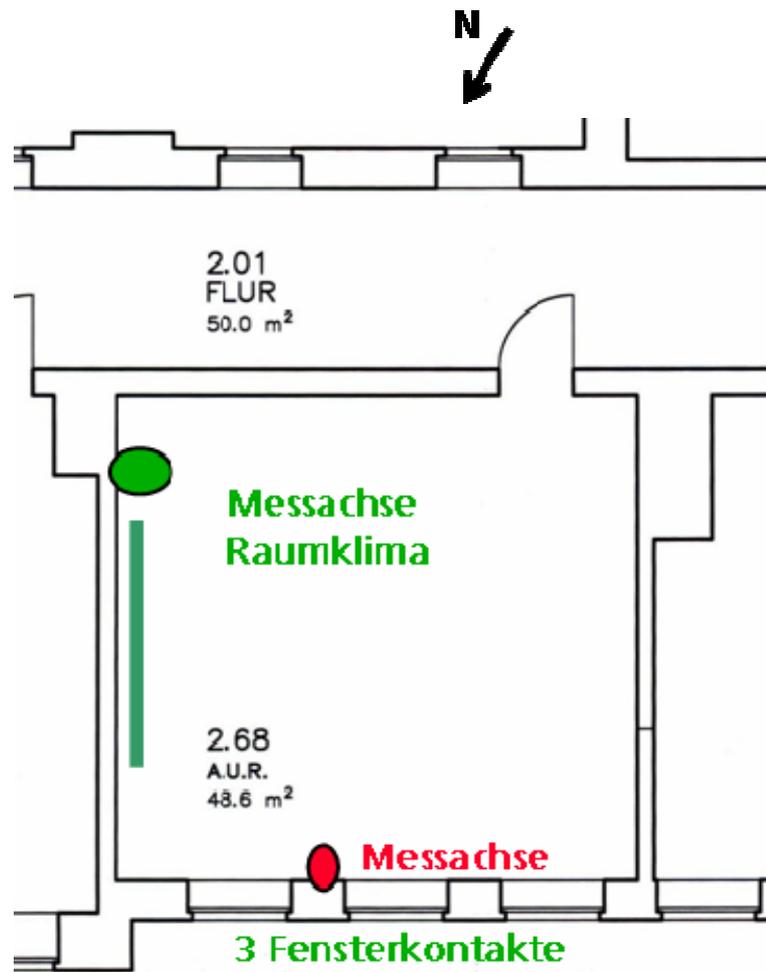


Bild 3:  
Klassenraum KL302 mit Orientierung Nord-West, Raumvolumen 175 m<sup>3</sup>, Baujahr 1903/63, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse.

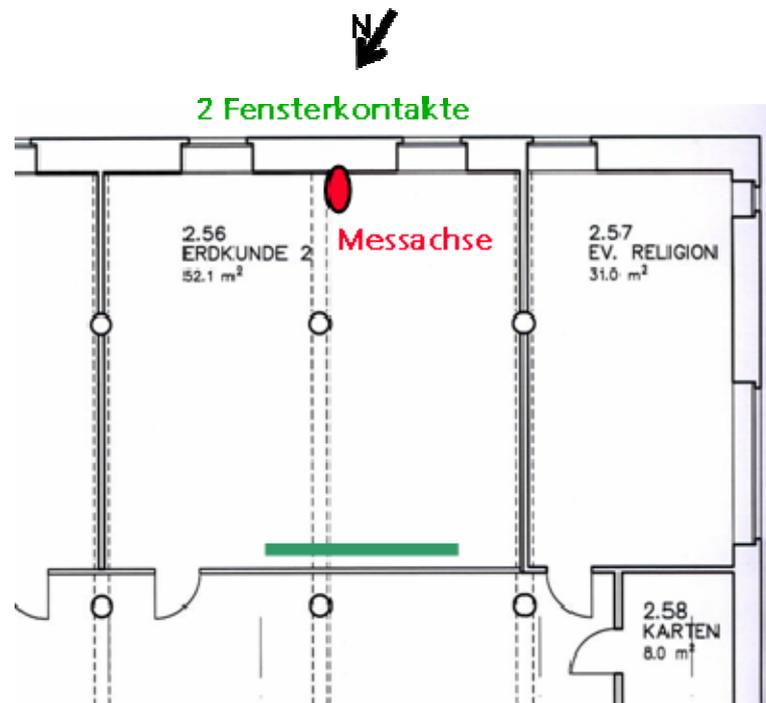


Bild 4:  
 Klassenraum KL312 mit Orientierung Süd-Ost, Raumvolumen 179 m<sup>3</sup>,  
 Baujahr 1903/63, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des  
 Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse.

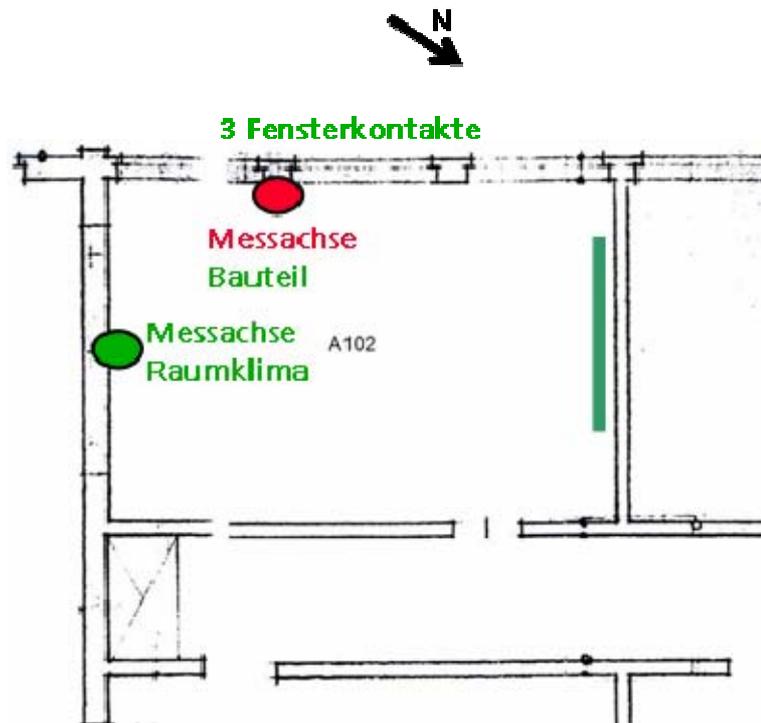


Bild 5:  
 Klassenraum A102 mit Orientierung Süd-Ost, Raumvolumen 159 m<sup>3</sup>,  
 Baujahr 1962, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des  
 Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installiert.

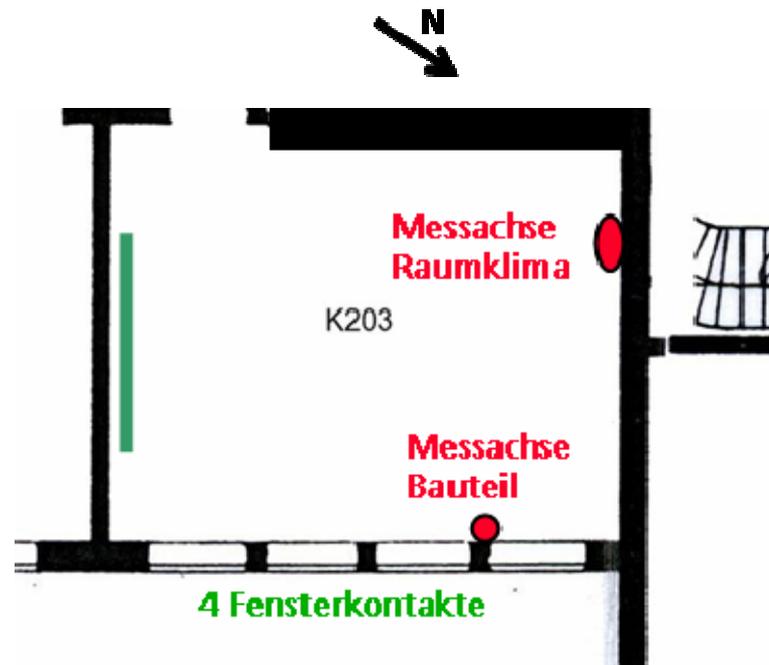


Bild 6:  
 Klassenraum K203 mit Orientierung Nord-Ost, Raumvolumen 175 m<sup>3</sup>,  
 Baujahr 1965, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des  
 Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse.

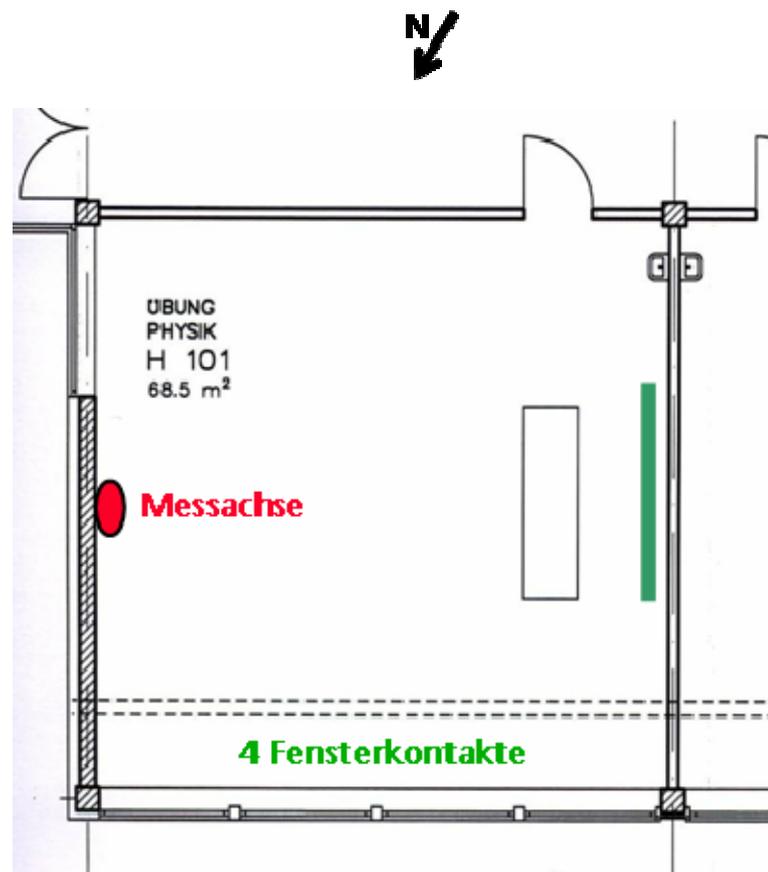


Bild 7:  
Klassenraum H101 mit Orientierung nach Nord-West, Raumvolumen 207 m<sup>3</sup>, Baujahr 1980, Grundriss mit der Position der Messachse, Ansicht des Gebäudes, Ansicht des Innenraumes und der installierten Messachse.

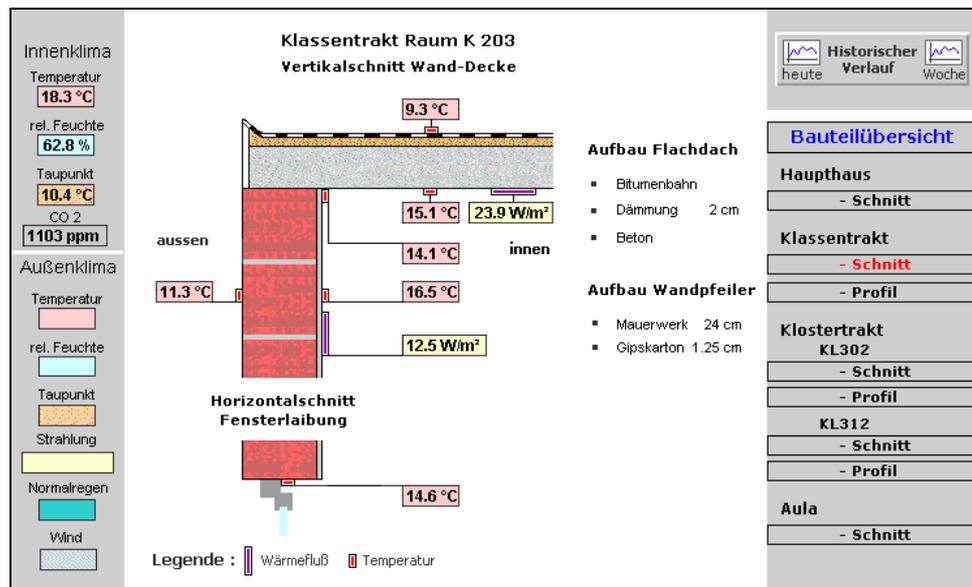
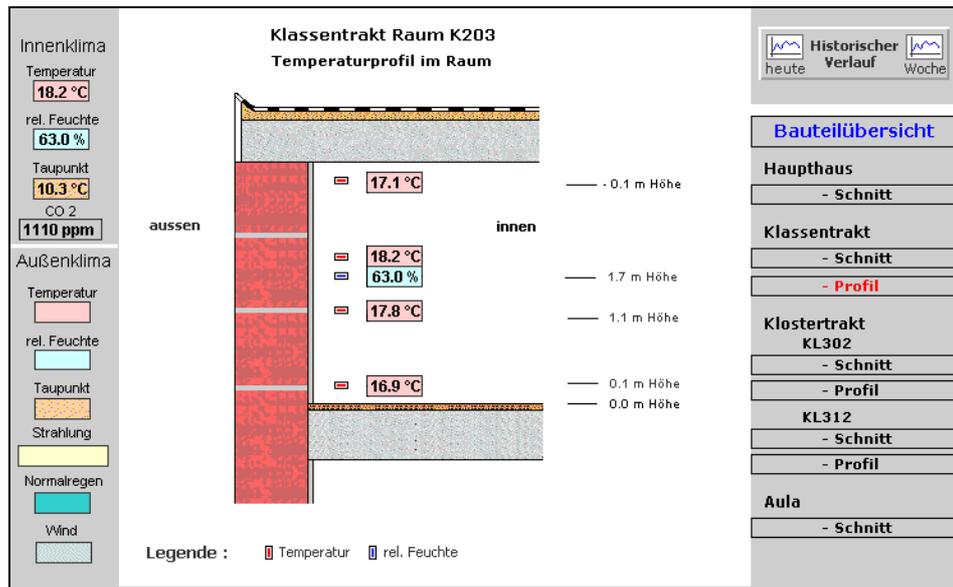


Bild 8:  
Screenshot vom Online-Visualisierungs- und Messwerterfassungssystem  
Beispiel Klassenraum K203, Temperaturprofil im Raum und Vertikal-  
schnitt durch Wand und Decke.

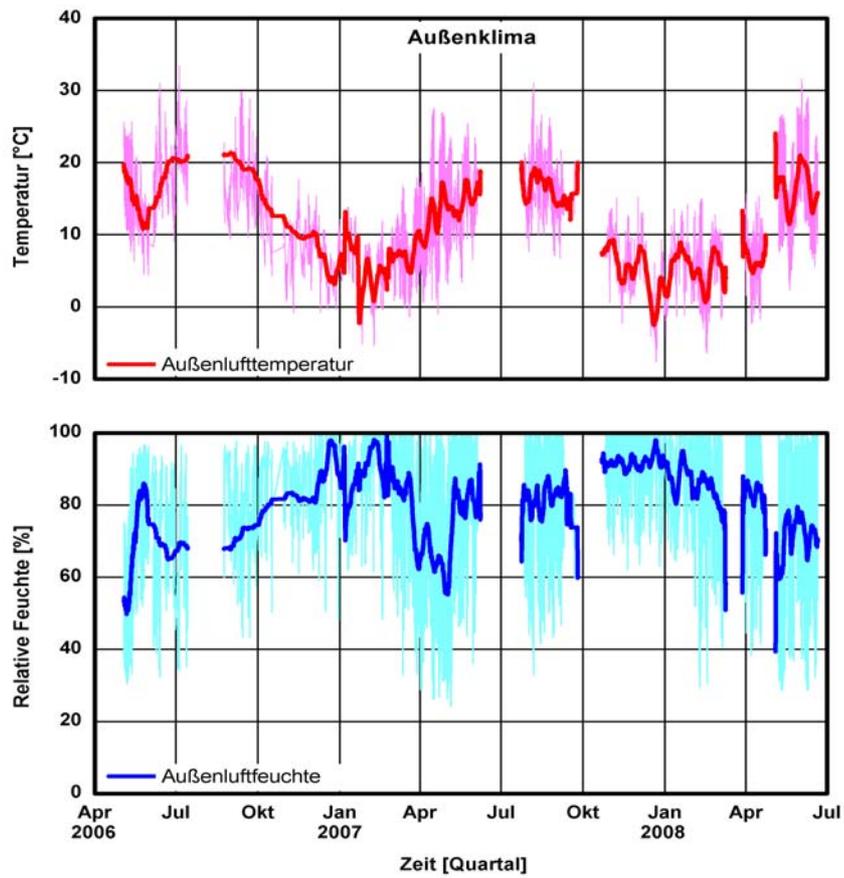


Bild 9:  
 Witterungsverhältnisse während des Auswertzeitraums von April 2006 bis Juli 2008 gemessen von der FH Osnabrück und an der Wetterstation der Angelaschule.

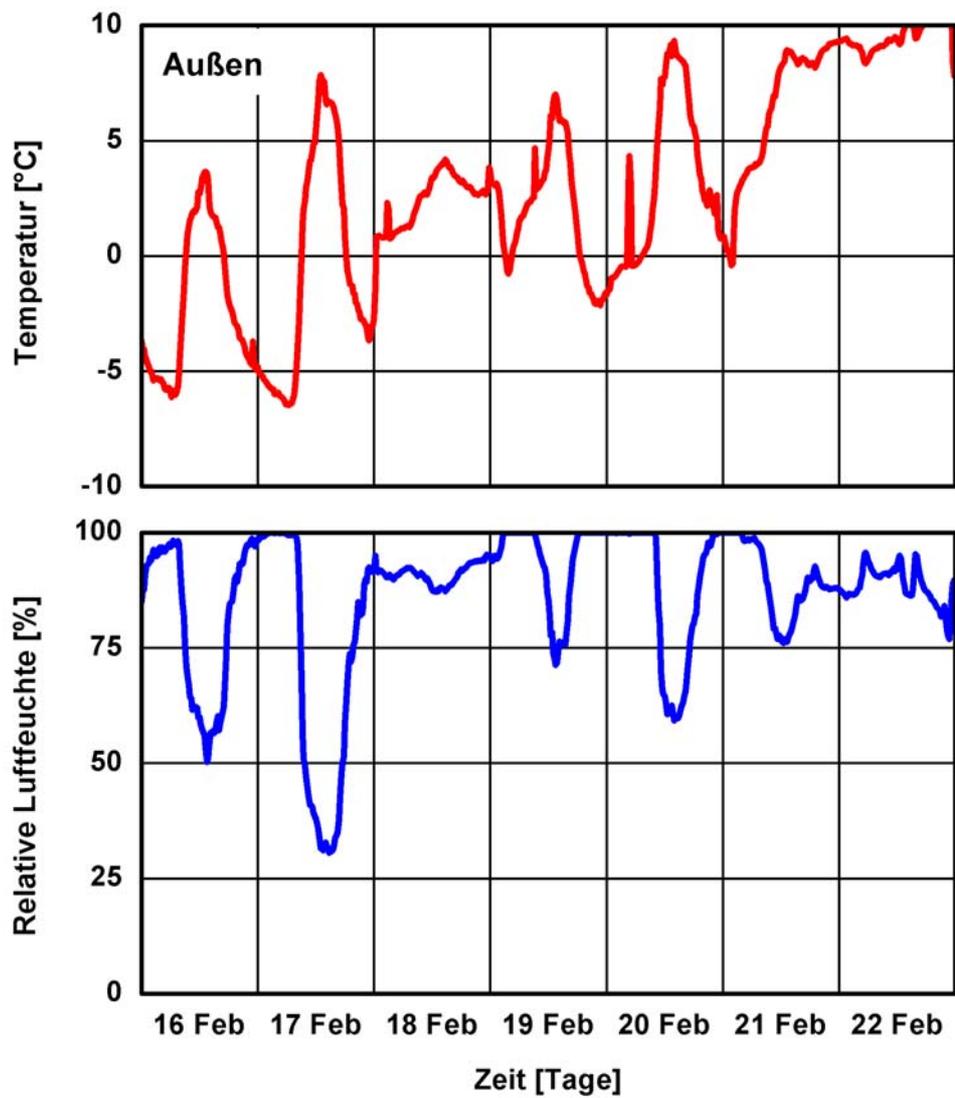


Bild 10:  
 Witterungsverhältnisse während der ausgewählten kalten Woche vom 16. bis 23. Februar 2008 gemessen an der Wetterstation der Angelschule.

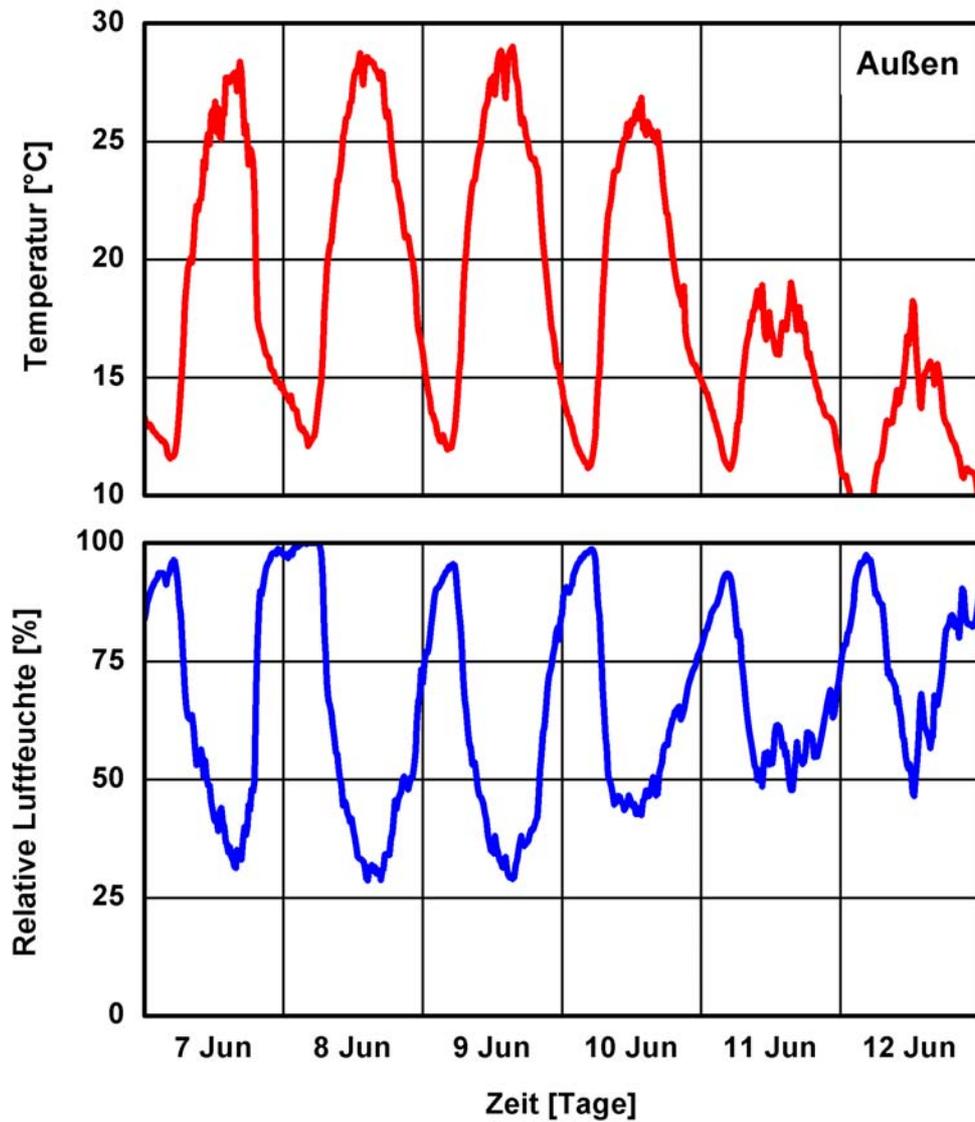


Bild 11:  
 Witterungsverhältnisse während der ausgewählten warmen Woche vom 07. bis 14. Juni 2008 gemessen an der Wetterstation der Angulaschule.

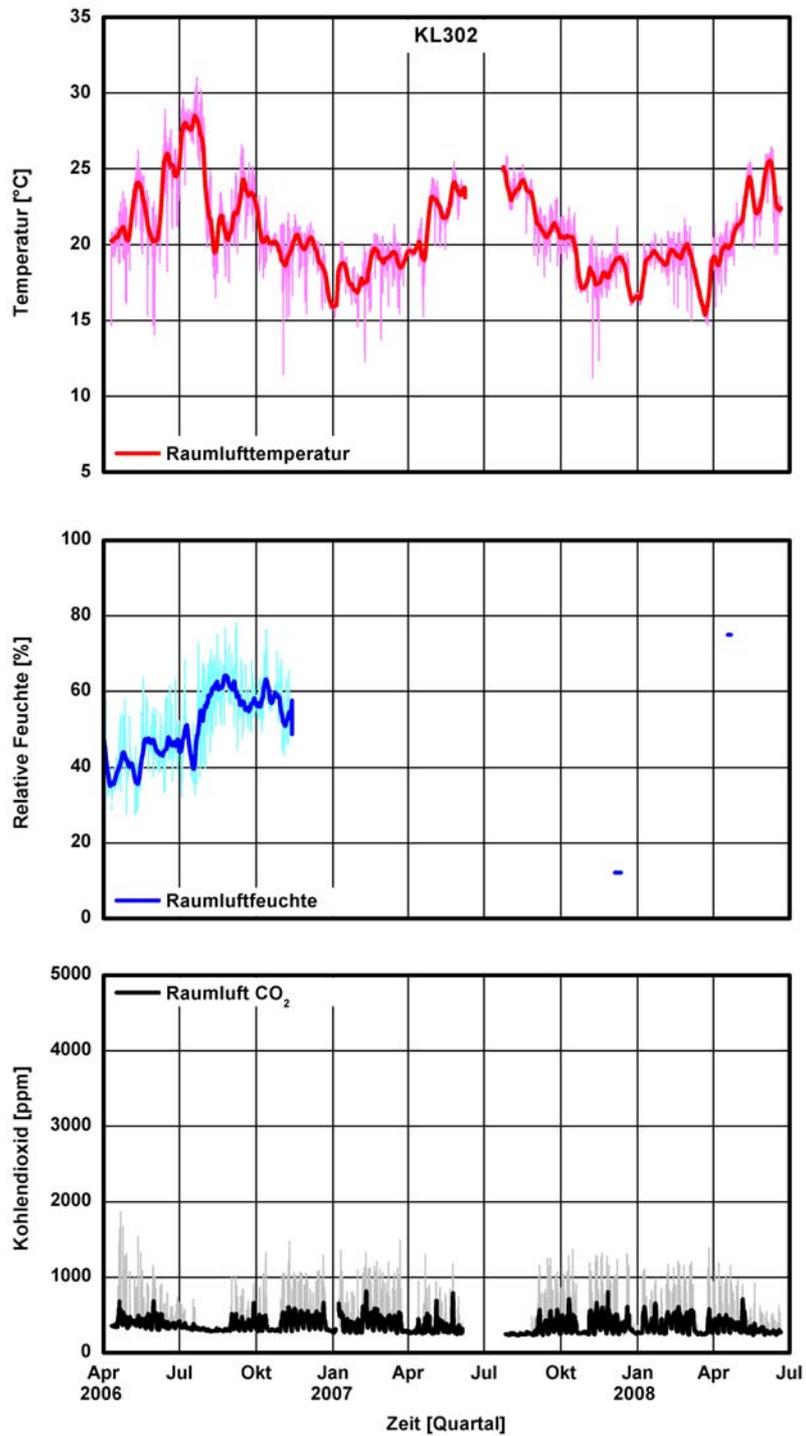


Bild 12:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum KL302 für den gesamten Messzeitraum.

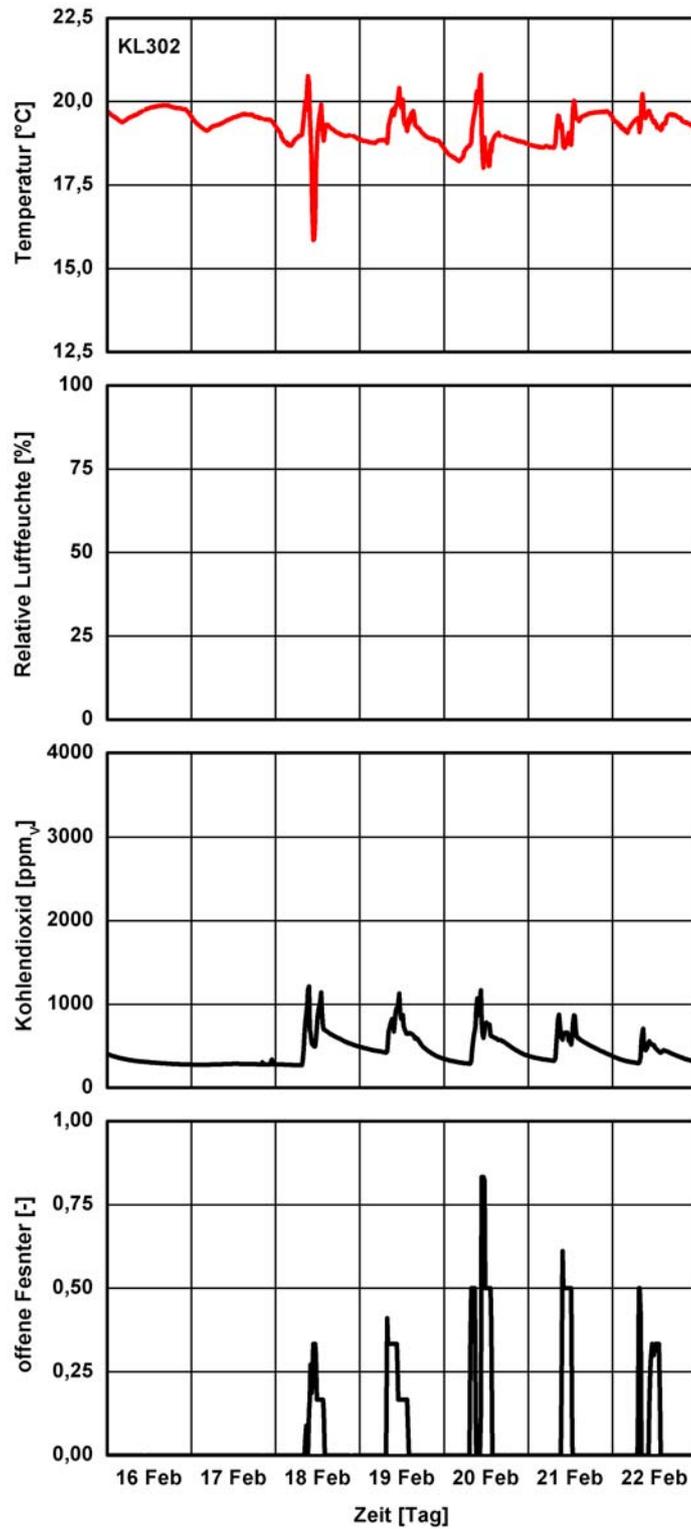


Bild 13:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL302 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.

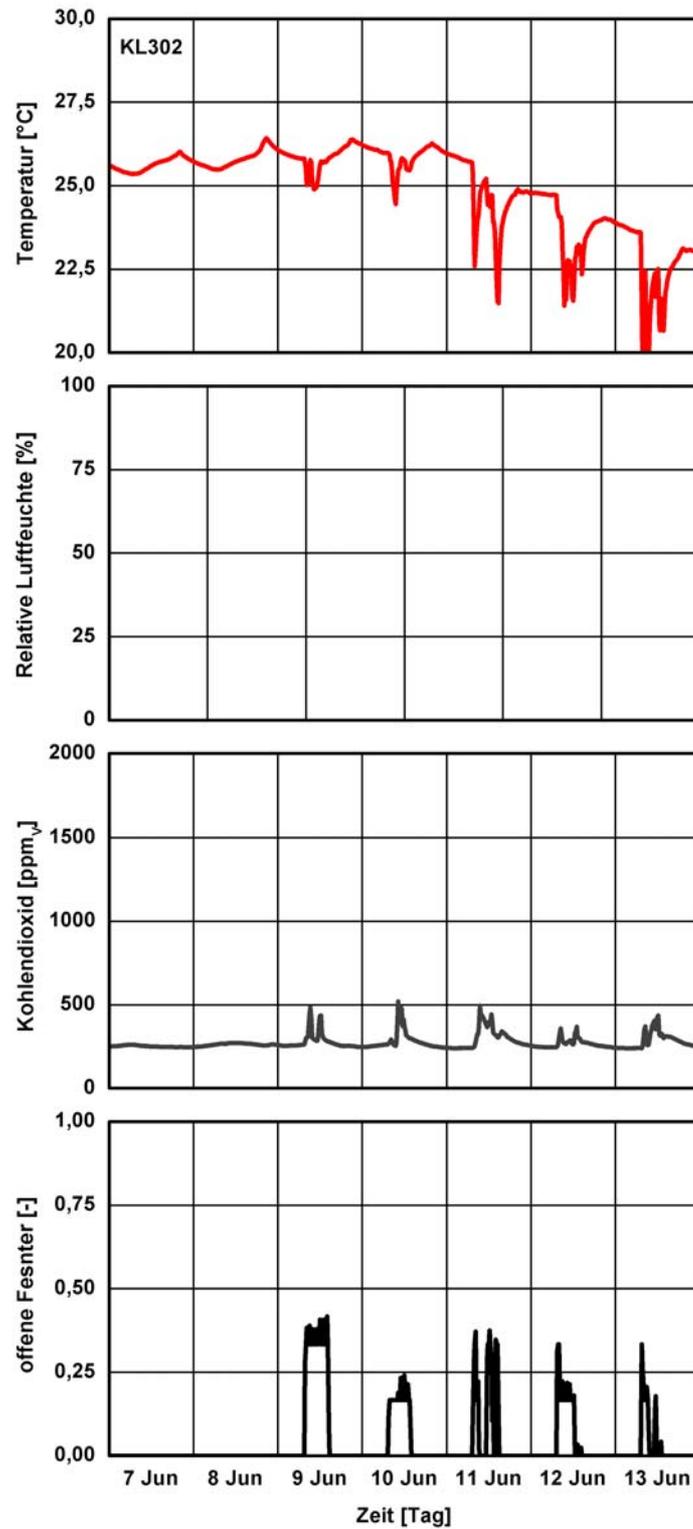


Bild 14:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL302 für die Sommerwoche vom 7. bis 14. Juni 2008.

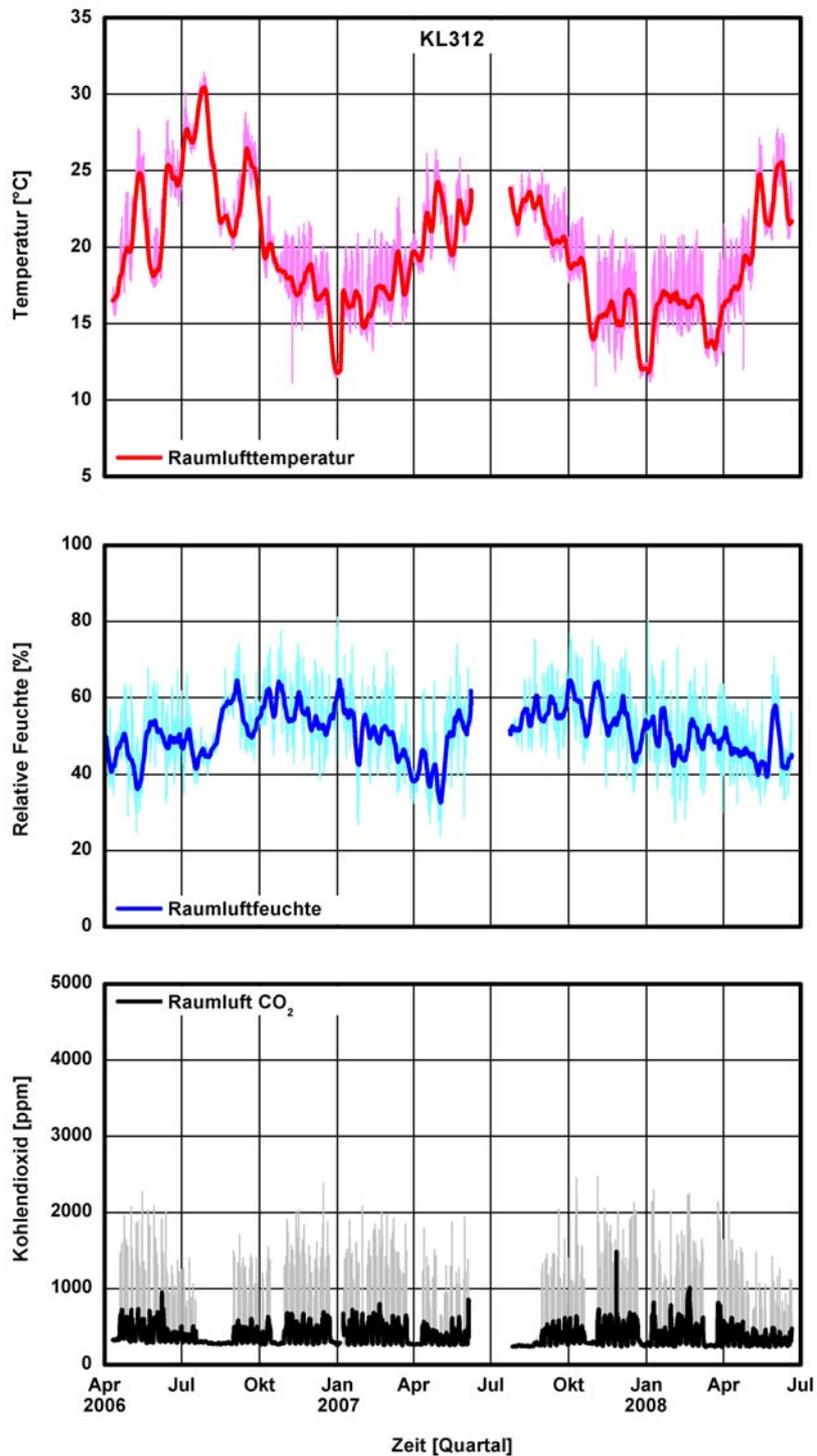


Bild 15:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum KL312 für den gesamten Messzeitraum.

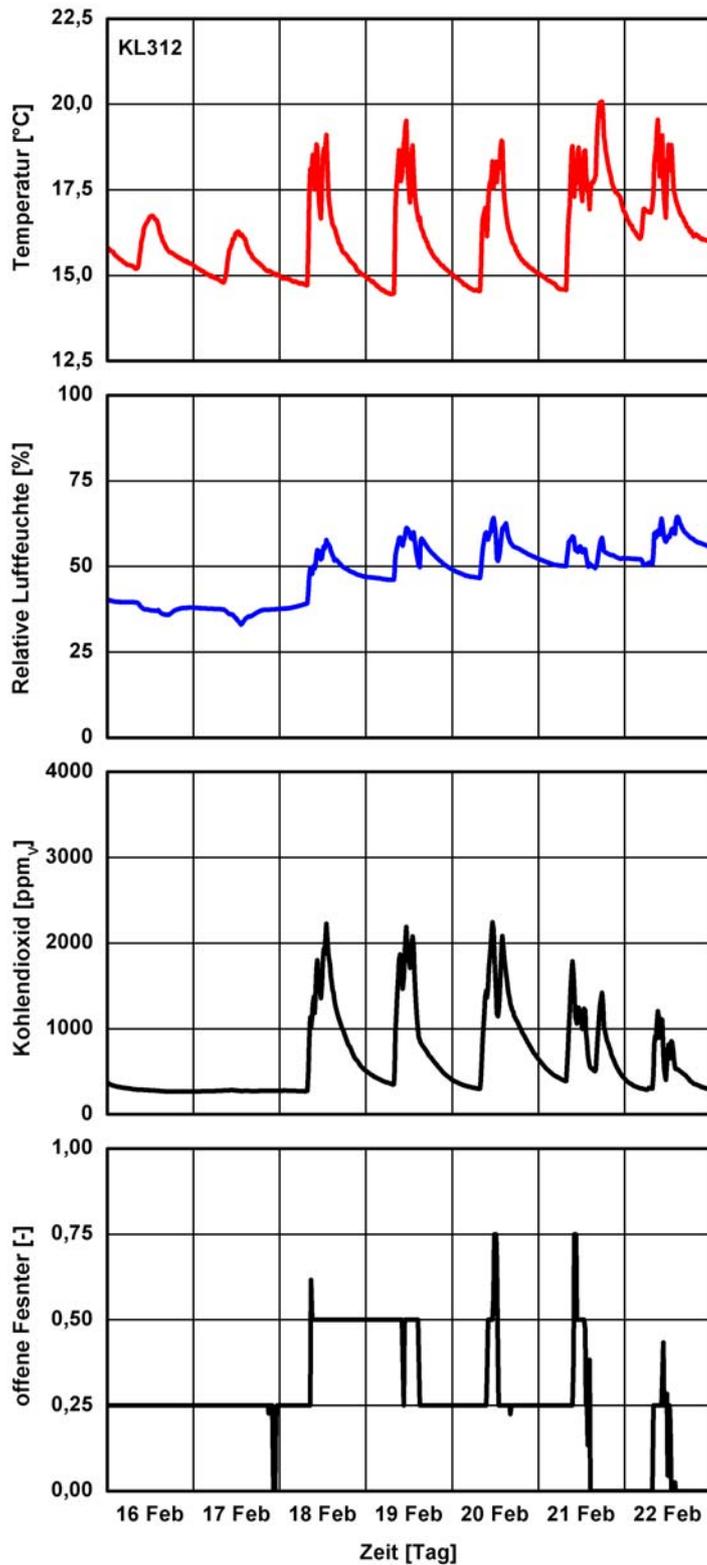


Bild 16:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL312 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.

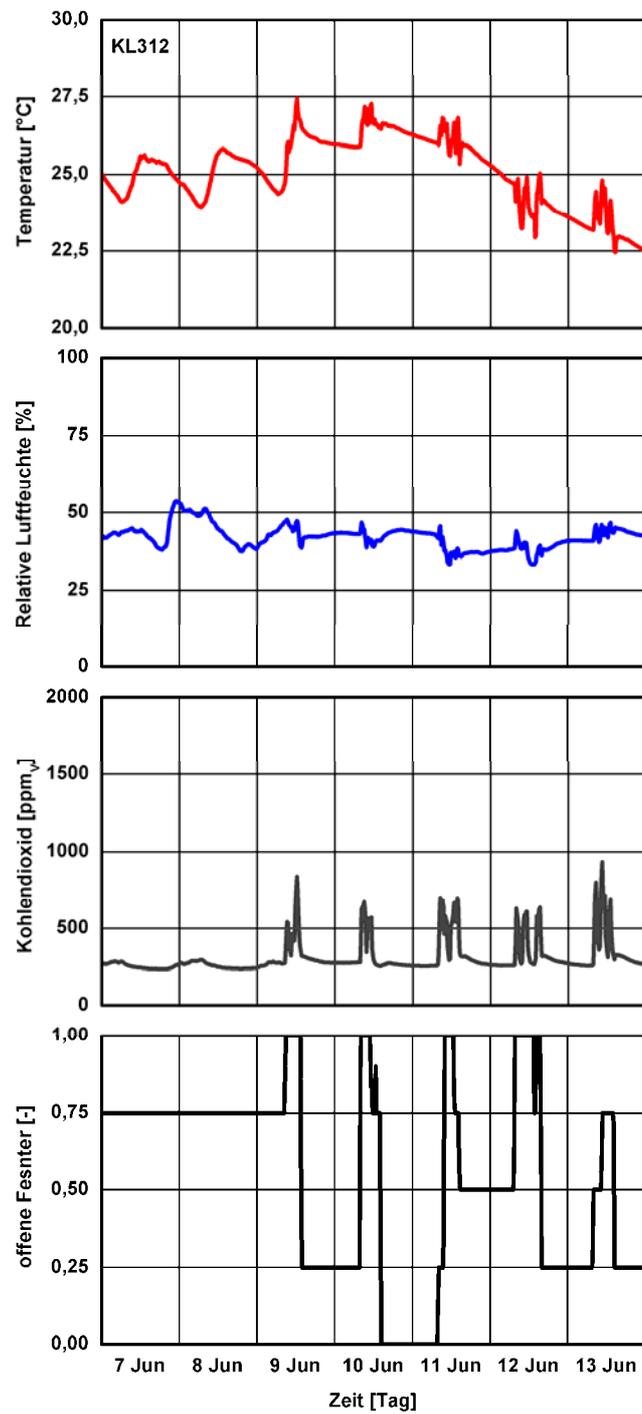


Bild 17:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL312 für die Sommerwoche vom 7. bis 14. Juni 2008.

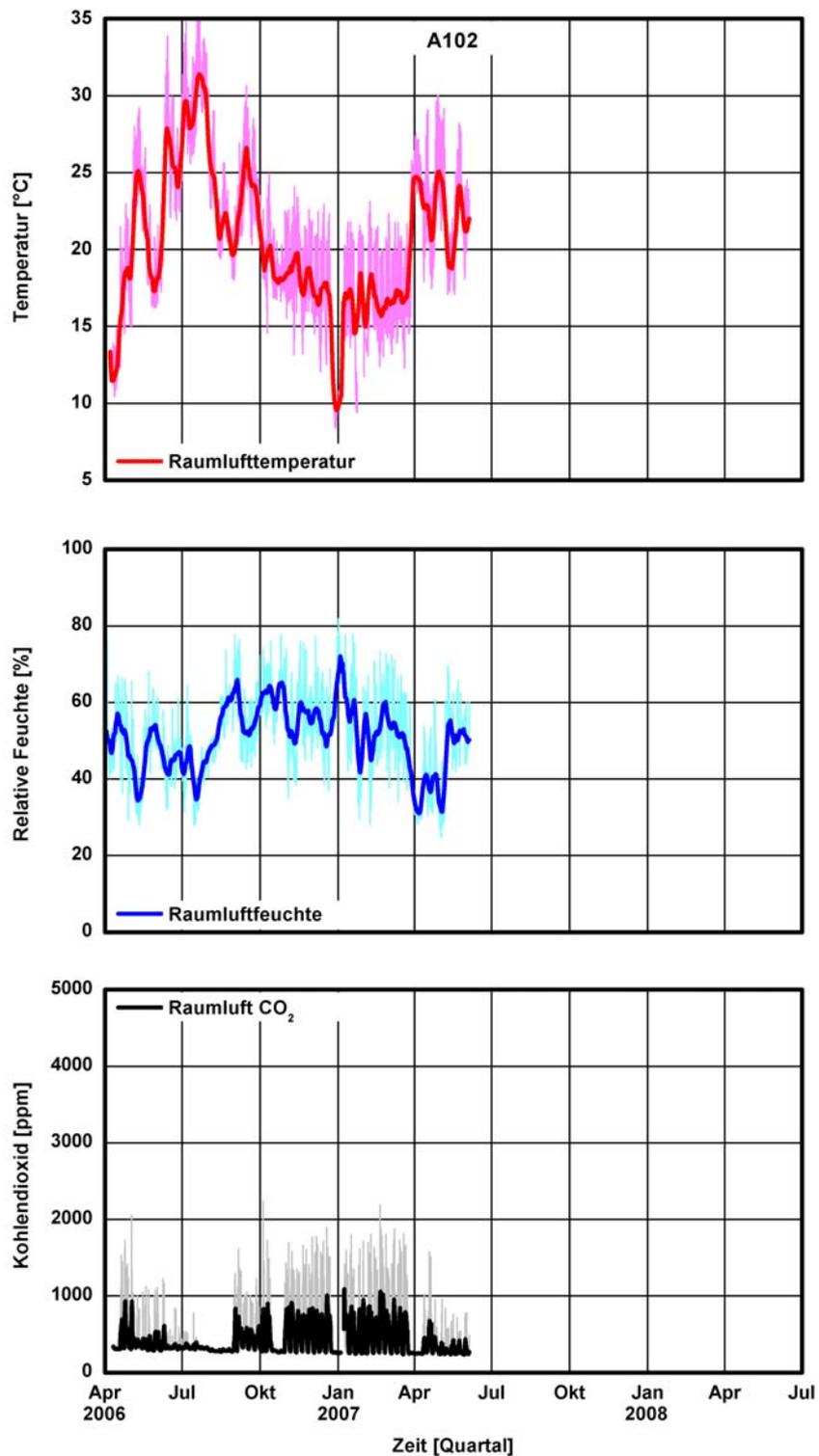


Bild 18:  
 Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten  
 (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte  
 über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum KL302 für den  
 gesamten Messzeitraum.

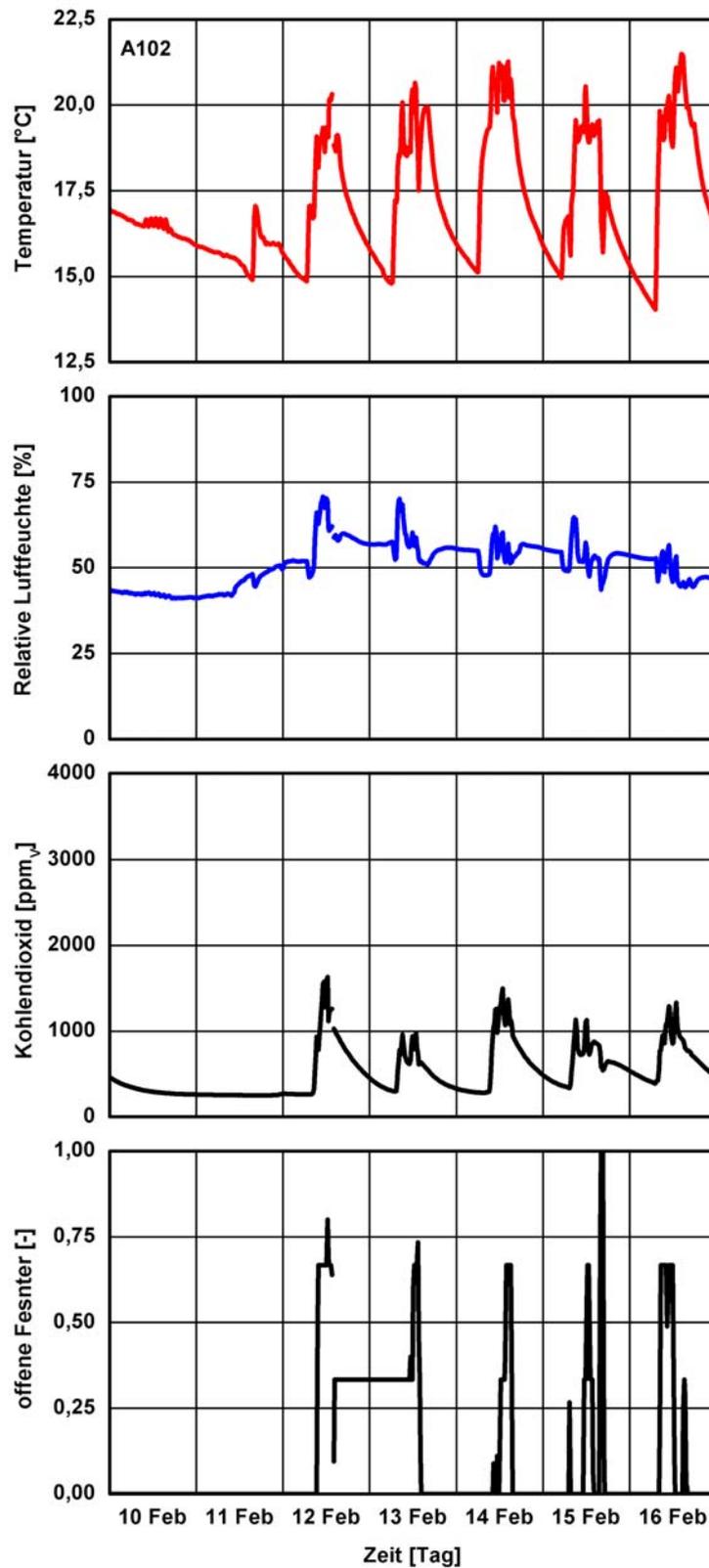


Bild 19:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum A102 für die Winterwoche vom 10. bis 17. Februar 2007.

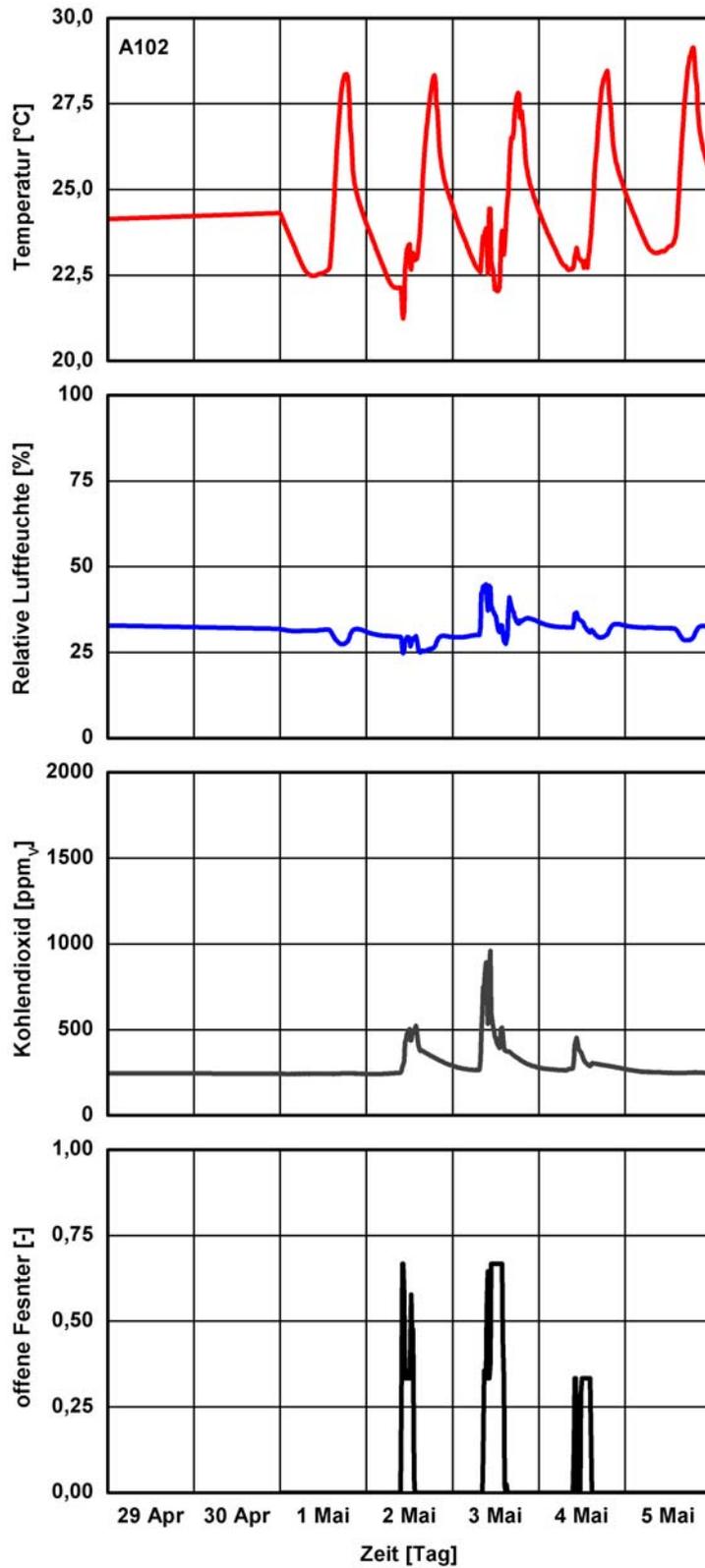


Bild 20:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum A102 für die Sommerwoche vom 29. April bis 05. Mai 2007.

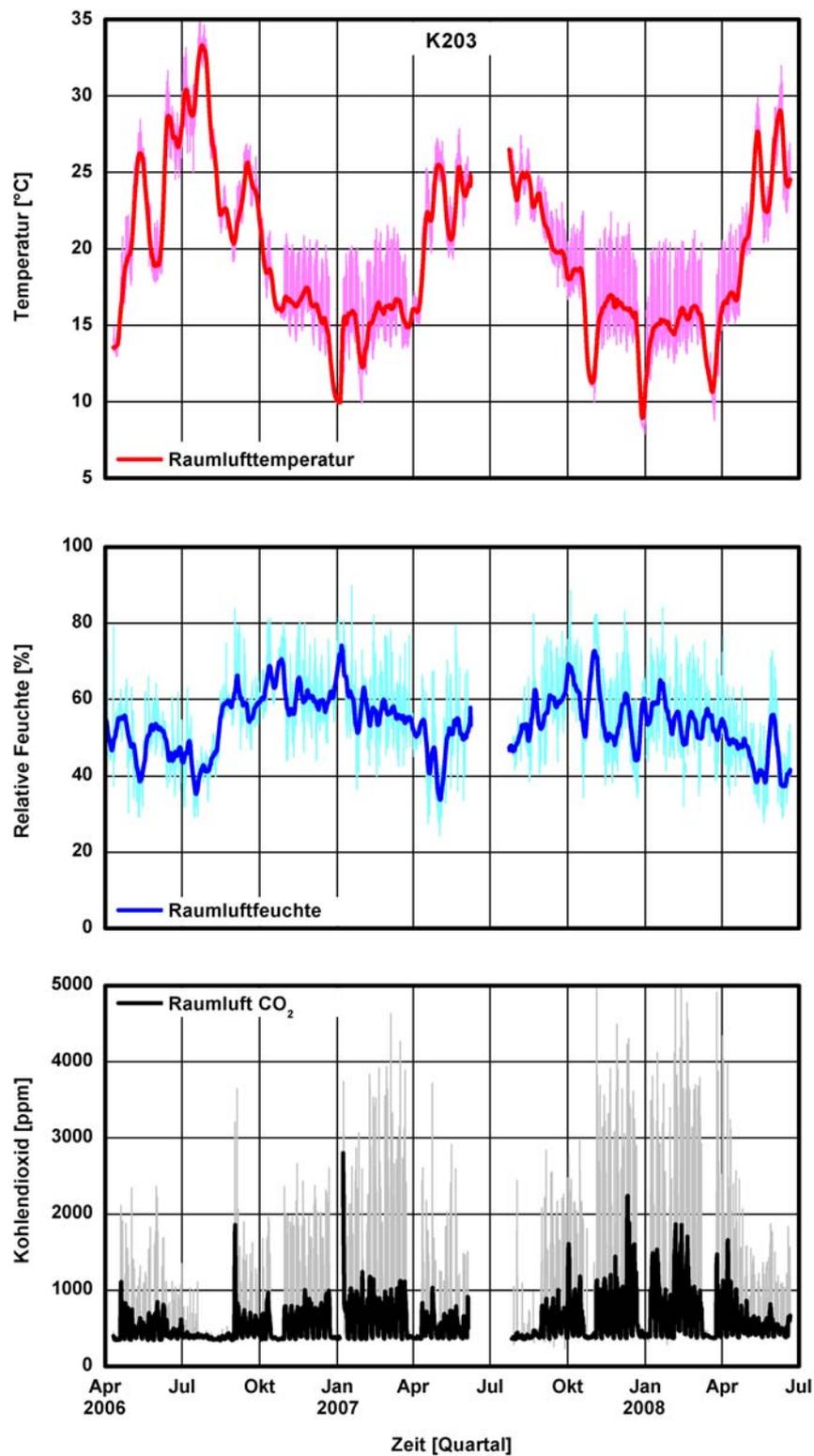


Bild 21:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum K203 für den gesamten Messzeitraum.

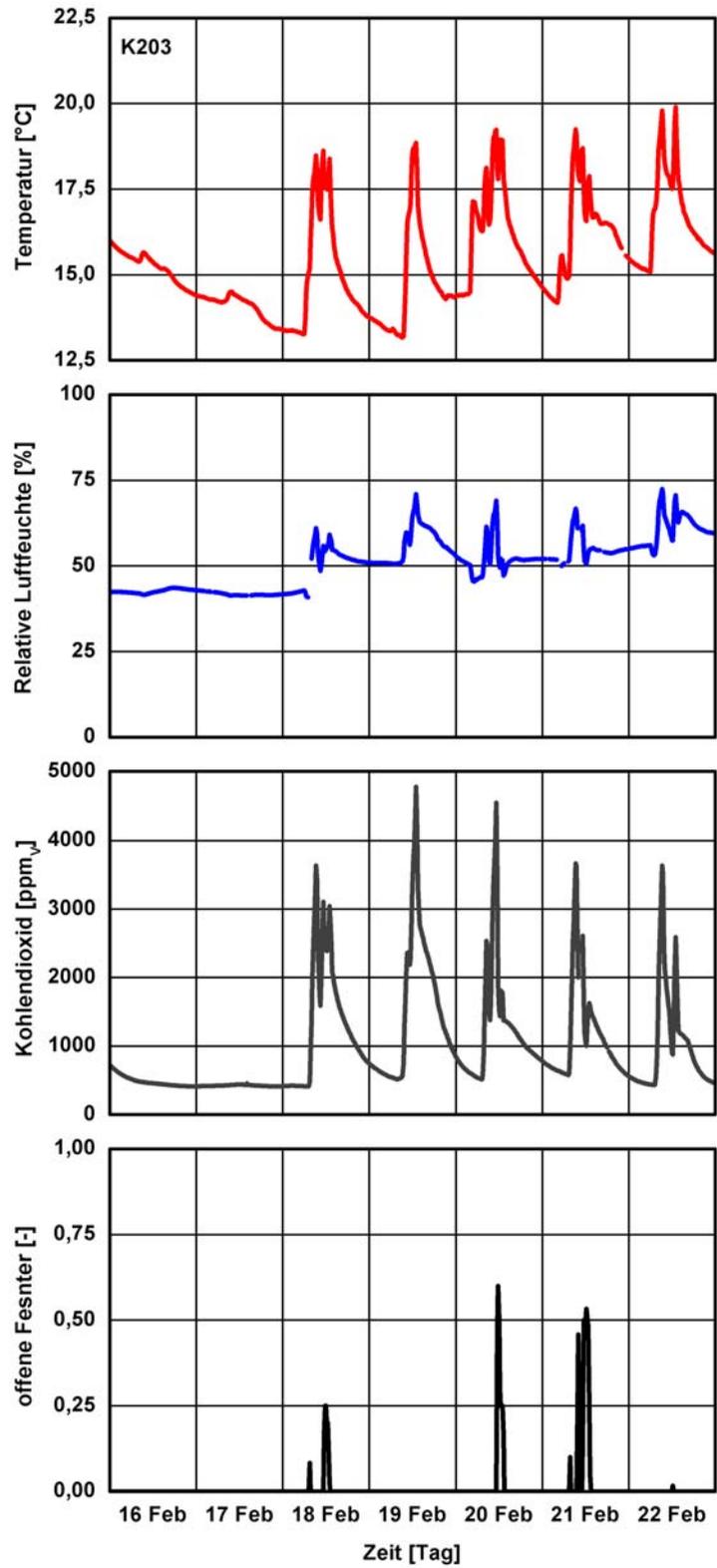


Bild 22:  
 Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum K203 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.

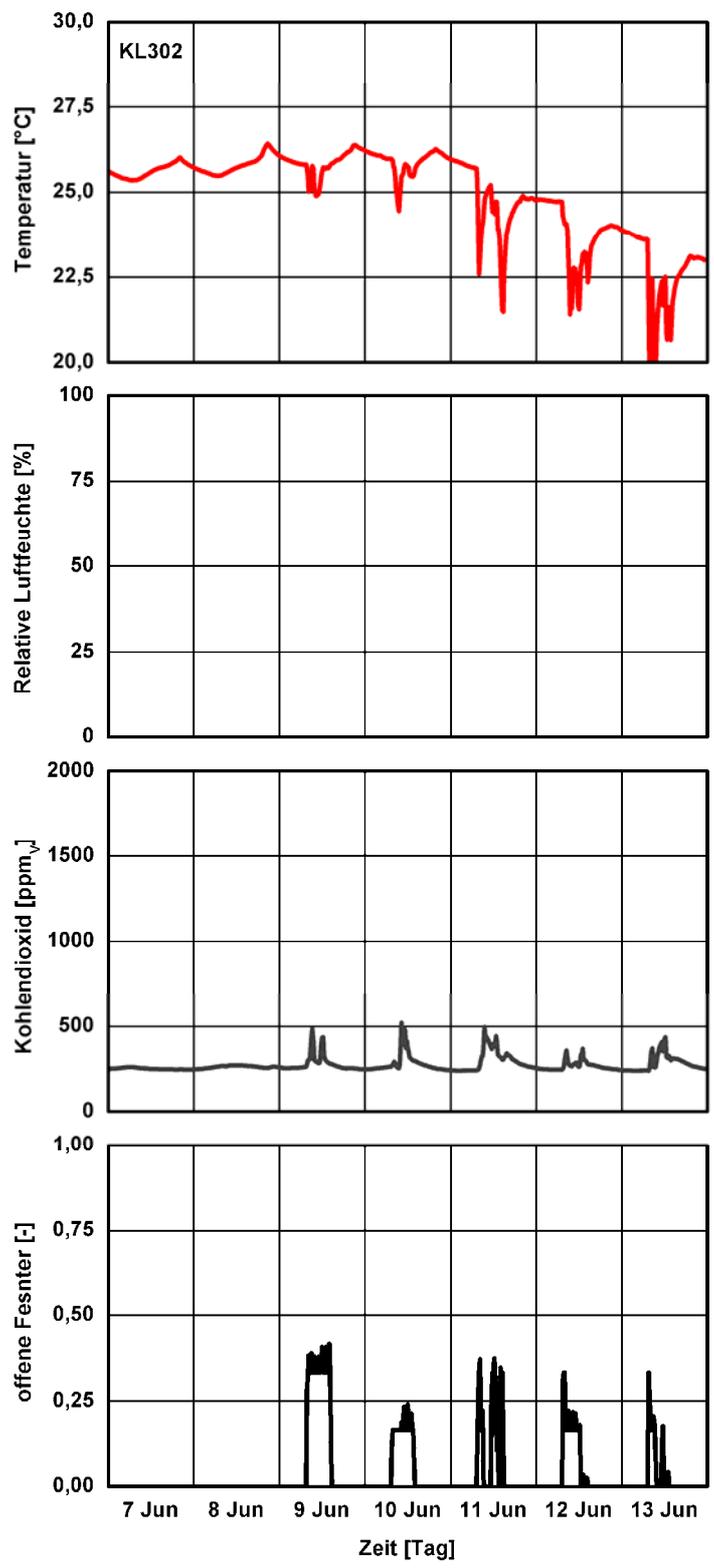


Bild 23:  
 Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO2 als Mittelwerte über  
 15 Minuten im Raum K203 für die Sommerwoche vom 7. bis 14. Juni  
 2008.

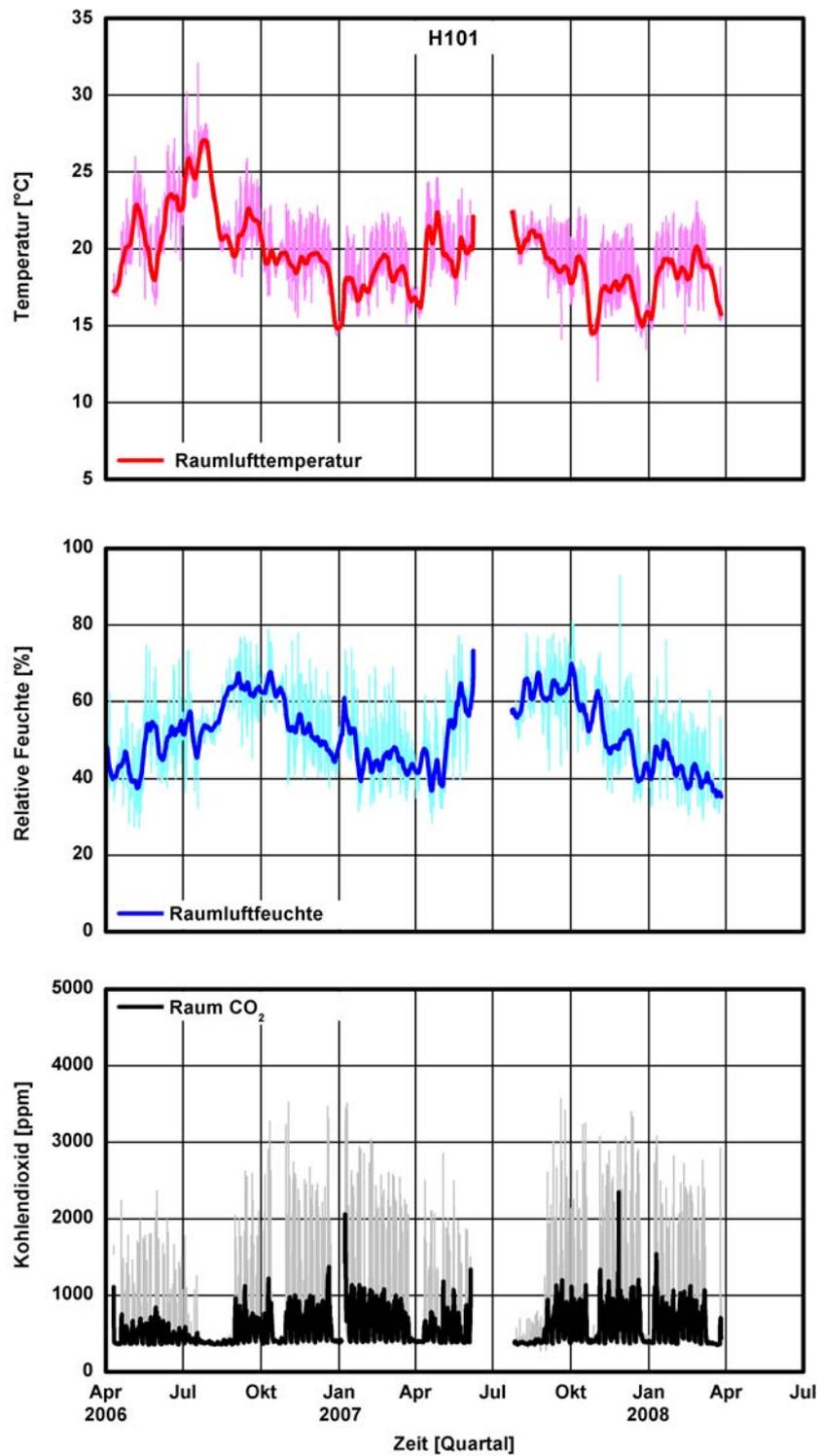


Bild 24:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen als Mittelwerte über 15 Minuten (dünne Linie) und als gleitendes Wochenmittel und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten und gleitendes Tagesmittel im Raum H101 für den gesamten Messzeitraum.

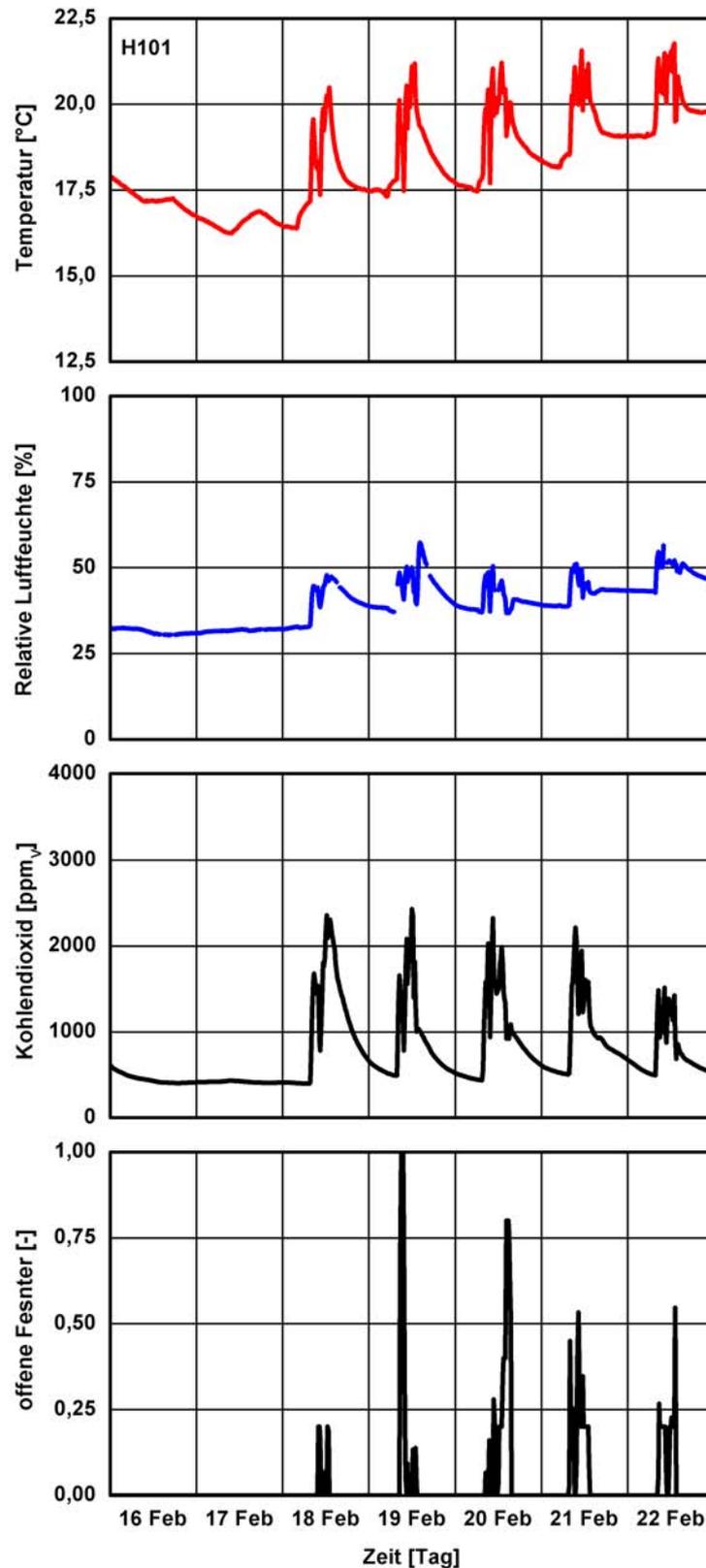


Bild 25:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum H101 für die Winterwoche vom 16. bis 23. Februar 2008.

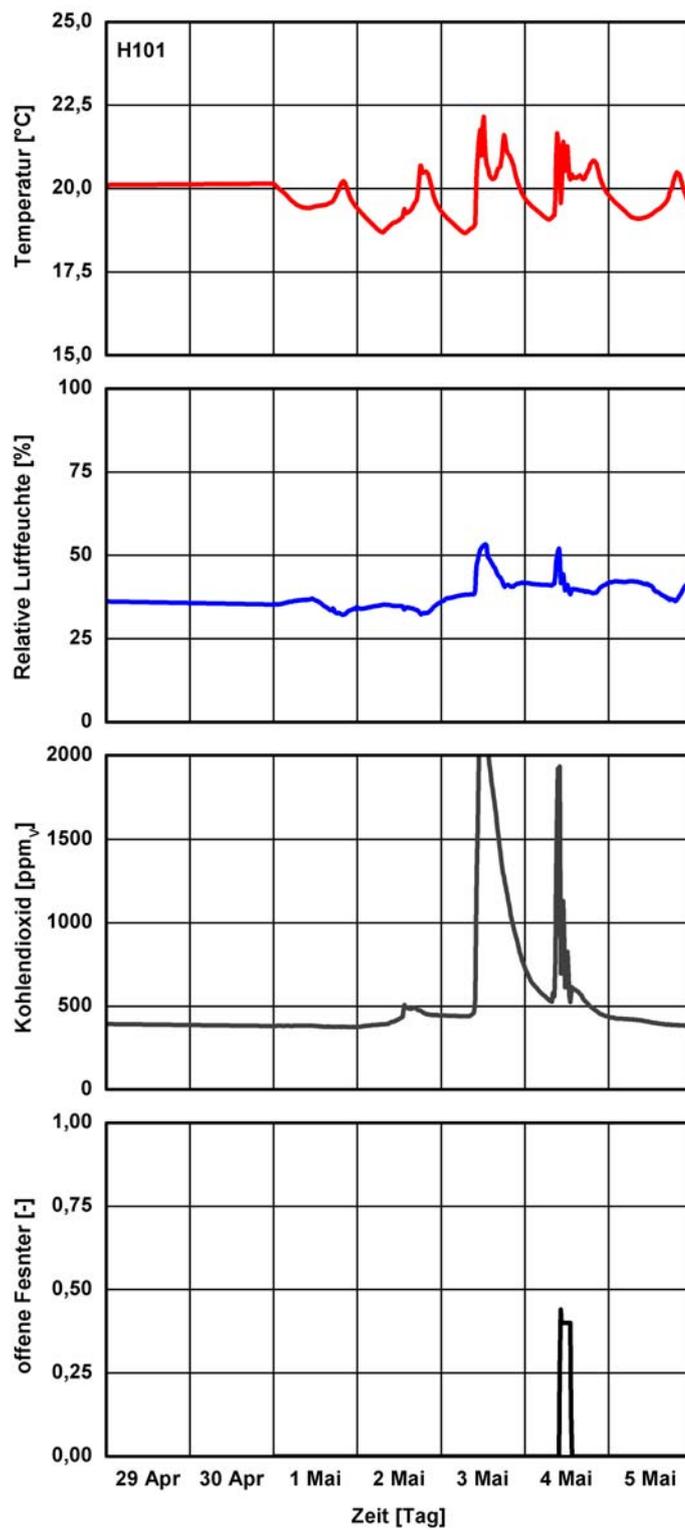


Bild 26:  
Verlauf der Raumklima Bedingungen und CO<sub>2</sub> als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum H101 für die Sommerwoche vom 29. April bis 05. Mai 2007.

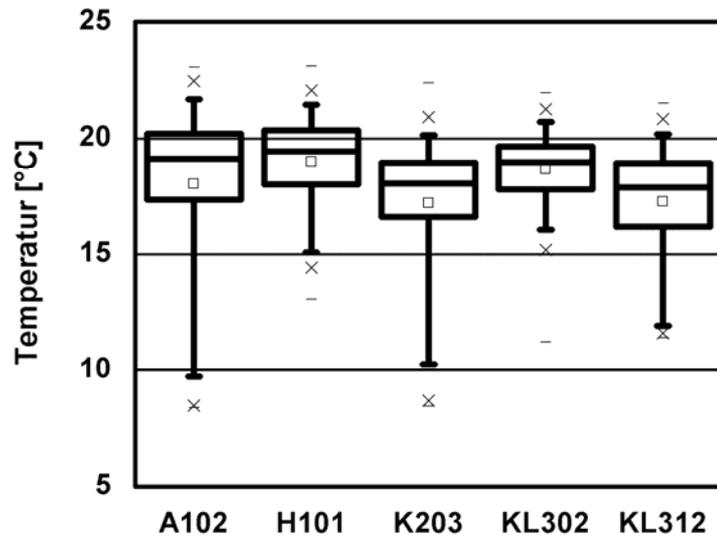


Bild 27:  
Boxplot-Darstellung der Temperaturen in den untersuchten Klassen-  
räumen für den Zeitraum von November bis März während der Tages-  
zeit von 8 bis 13 Uhr.

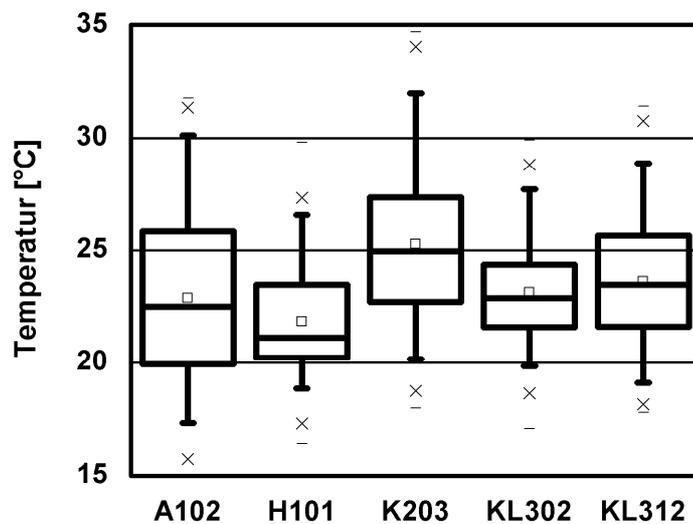


Bild 28:  
Boxplot-Darstellung der Temperaturen in den untersuchten Klassen-  
räumen für den Zeitraum von Mai bis September während der Tageszeit  
von 8 bis 13 Uhr.

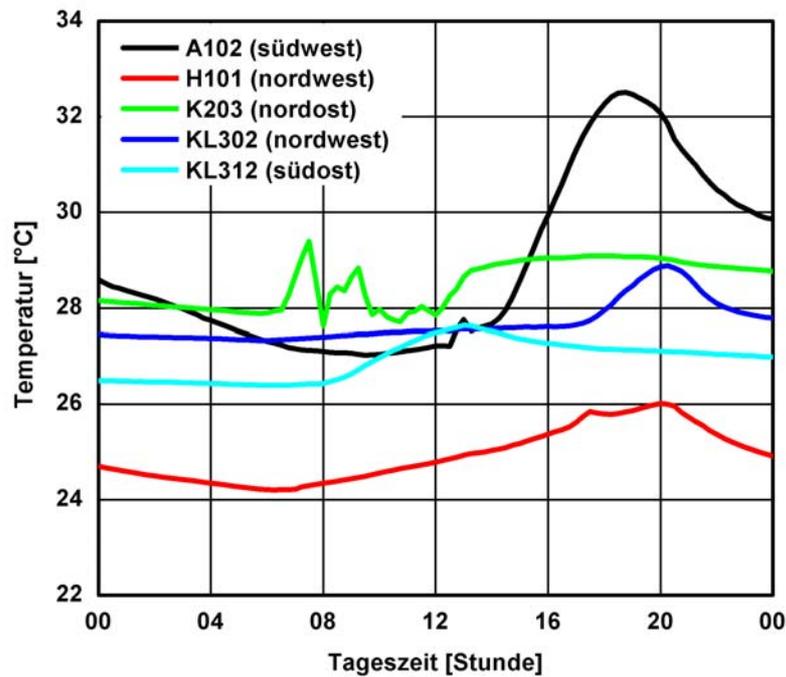


Bild 29:  
Gegenüberstellung des Verlaufs der Raumlufttemperatur in allen untersuchten Klassenräumen am 13. Juli 2006.

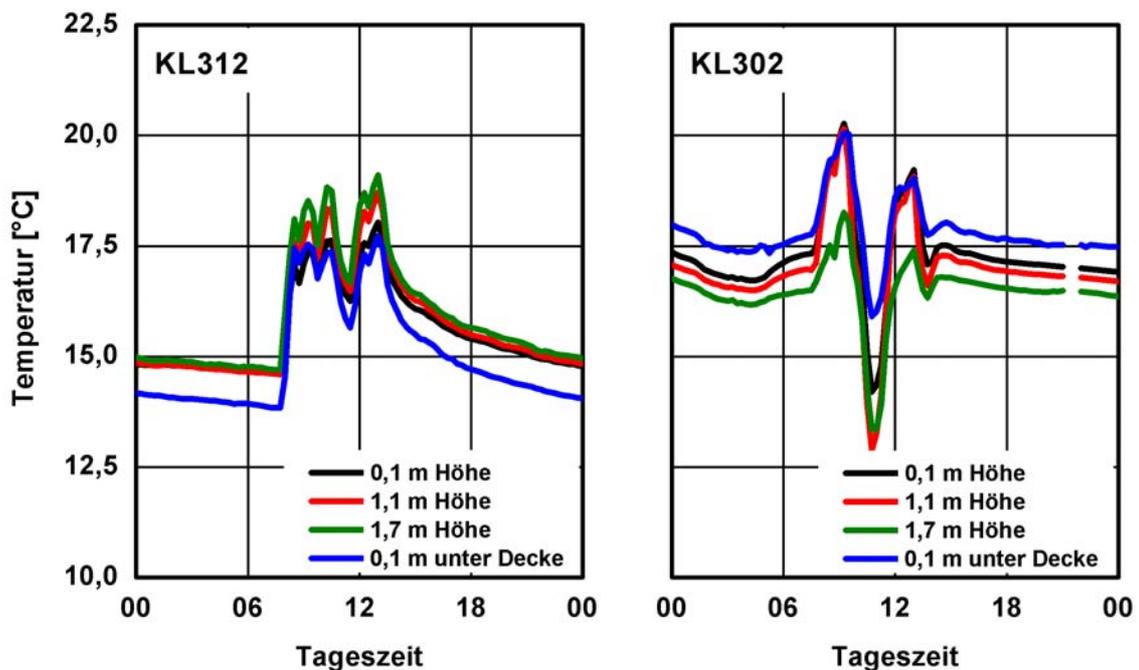


Bild 30:  
Verlauf der Temperaturen in den Höhen 0,1 m, 1,1 m, 1,7 m über dem Boden und 0,1 m unter der Decke als Mittelwerte über 15 Minuten im Raum KL312 und KL302 am 18. Februar 2008.

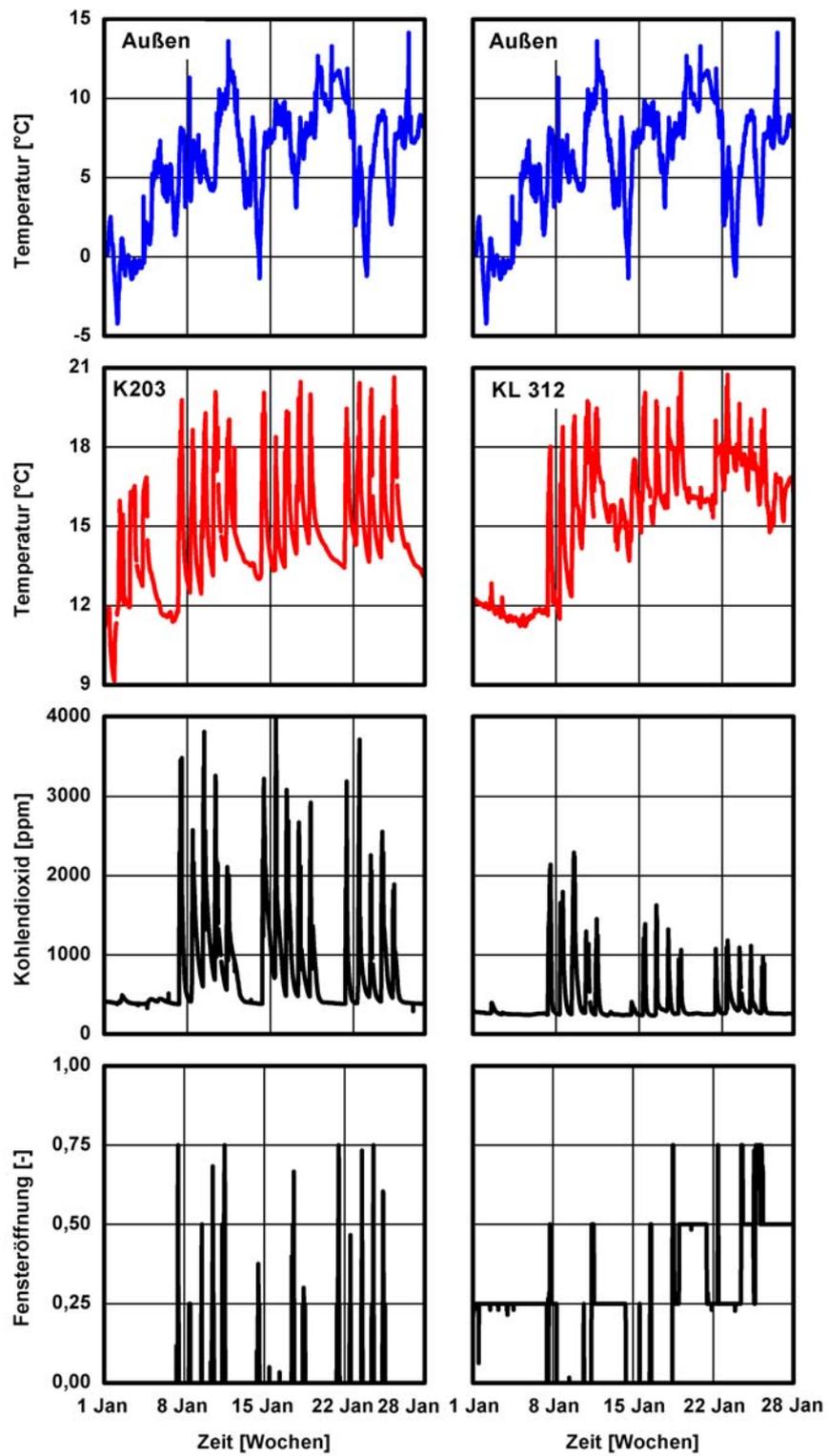


Bild 31:  
 Aufheizphase im Raum K203 und KL312 nach den Winterferien vom  
 01. bis 28. Januar 2008.

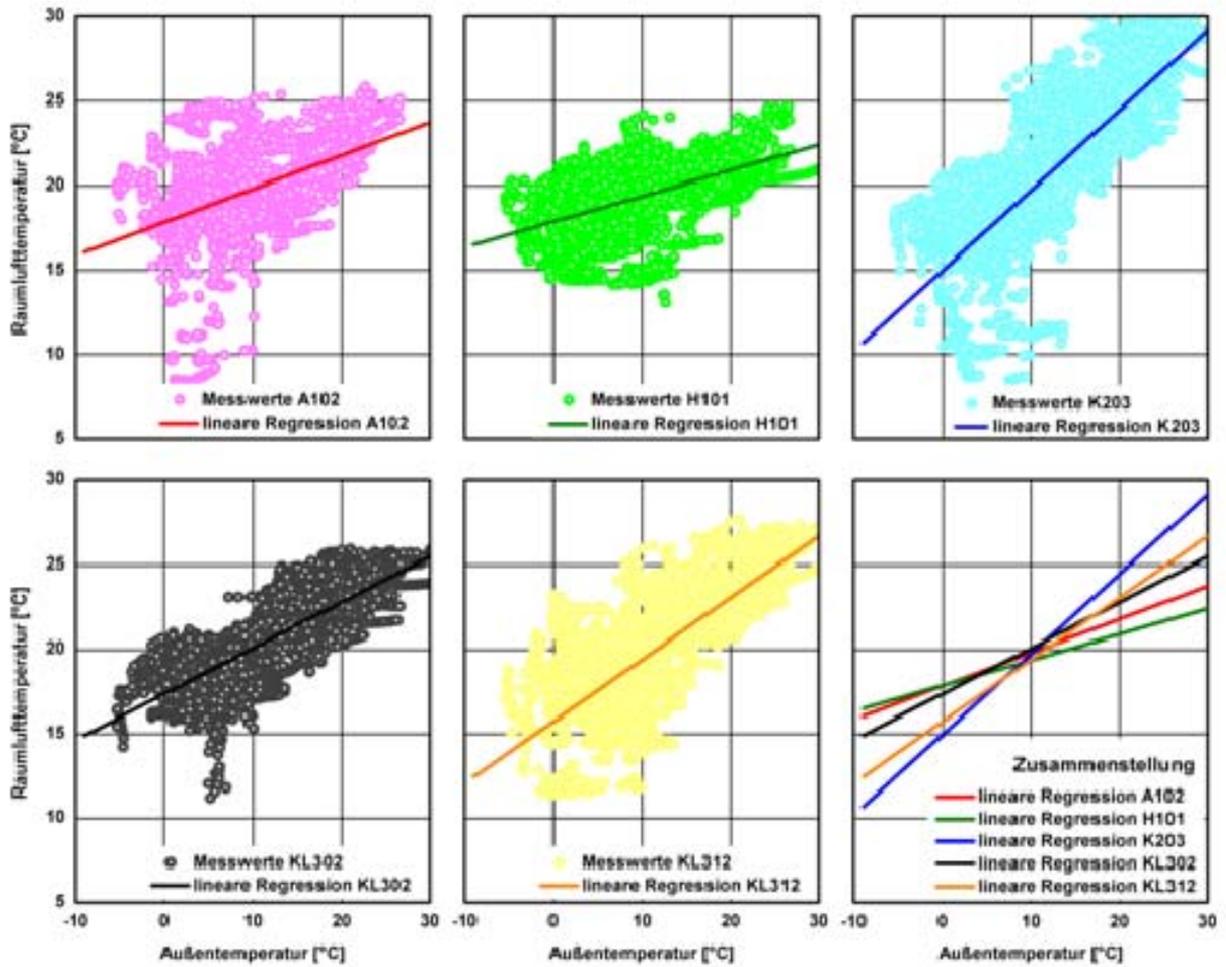


Bild 32:  
Raumluffttemperatur in den einzelnen Räumen über der Außentemperatur als Scatterplot aller Messwerte während der Schulstunden von 8 bis 13 Uhr und als lineare Regression.

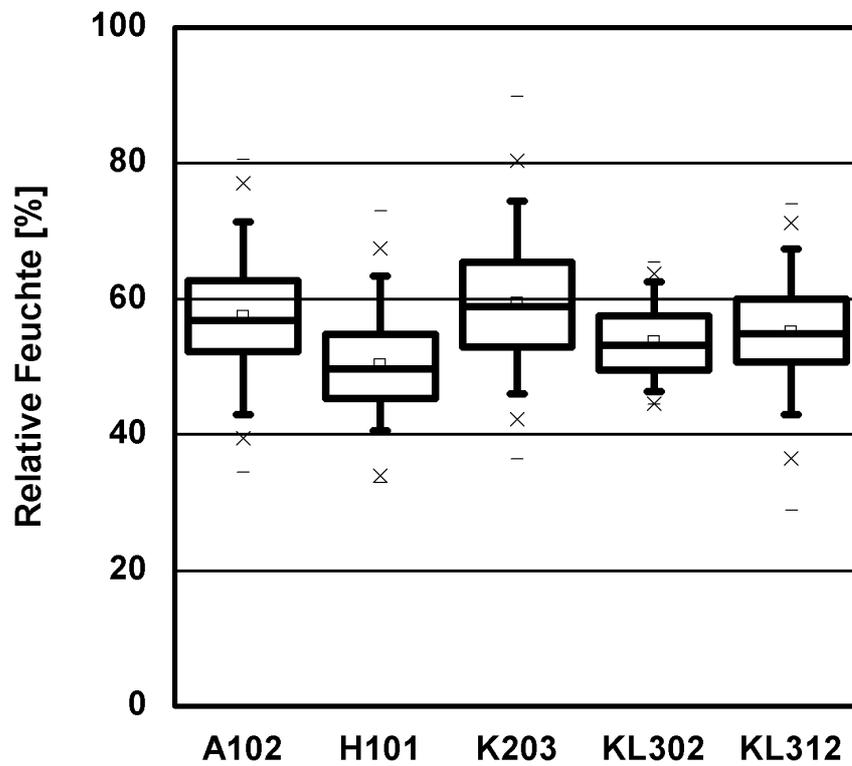


Bild 33:  
 Boxplot-Darstellung der Luftfeuchten in den untersuchten Klassenräumen für den gesamten Zeitraum der Tageszeit von 8 bis 13 Uhr.

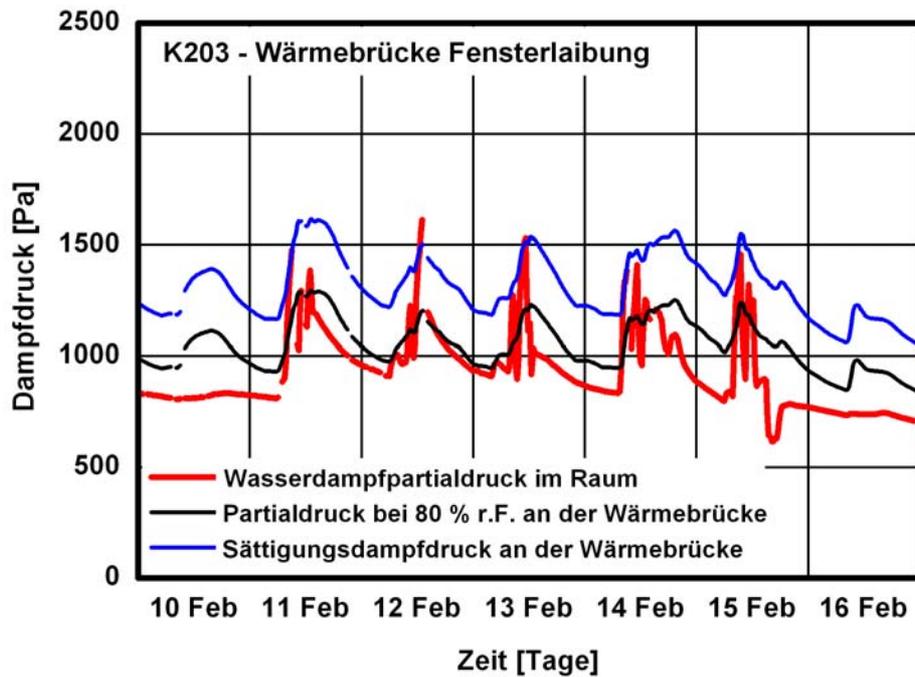


Bild 34:  
Verlauf des Wasserdampfpartialdrucks im Raum K203 und des Sättigungsdrucks sowie des Dampfdrucks bei 80 % r.F. an der Wärmebrücke Fensterlaibung während einer ausgewählten Winterwoche.

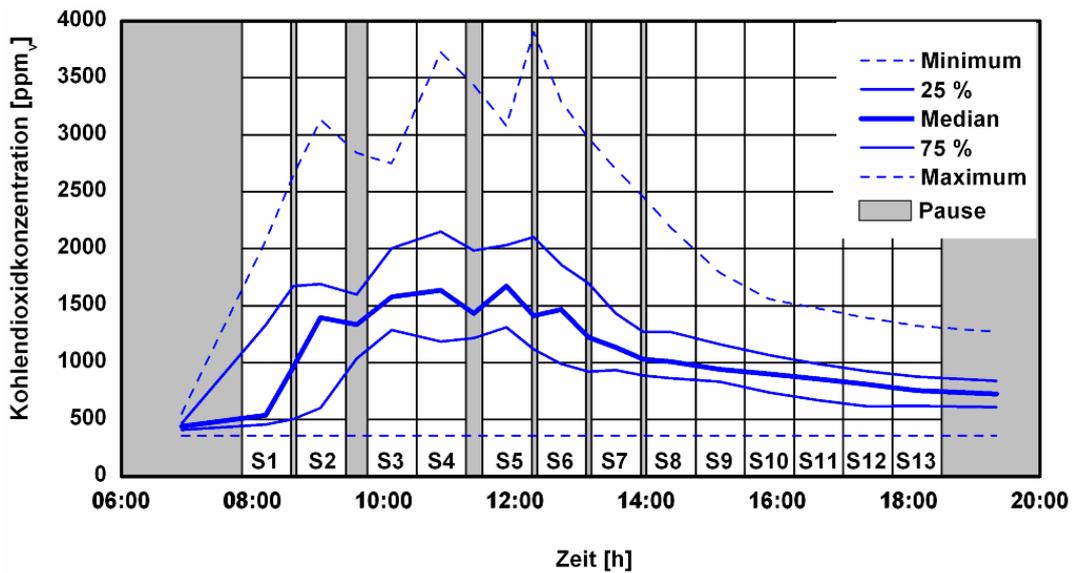


Bild 35:  
Spannweite des pro Stunde für alle Schulstunden der Monate November 2006 bis März 2007 gemittelten Verlaufs der Kohlendioxidkonzentration in Raum K203.

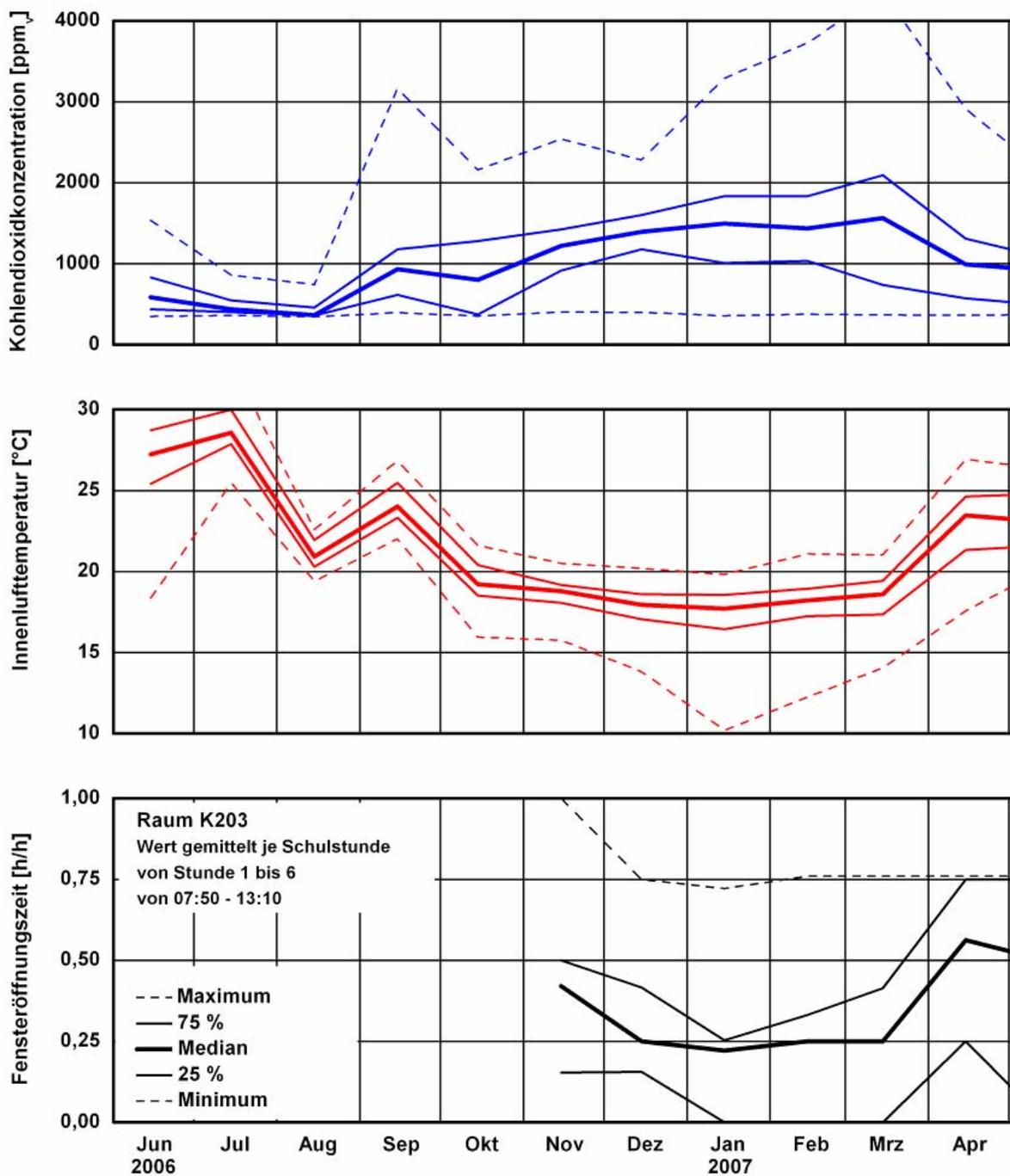


Bild 36:  
Spannweite des Verlaufs der Kohlendioxidkonzentration, der Innenlufttemperatur und der Fensteröffnungszeit im Raum K203 als Mittelwert über alle Messwerte in den Schulstunden 1 bis 6 je Monat.

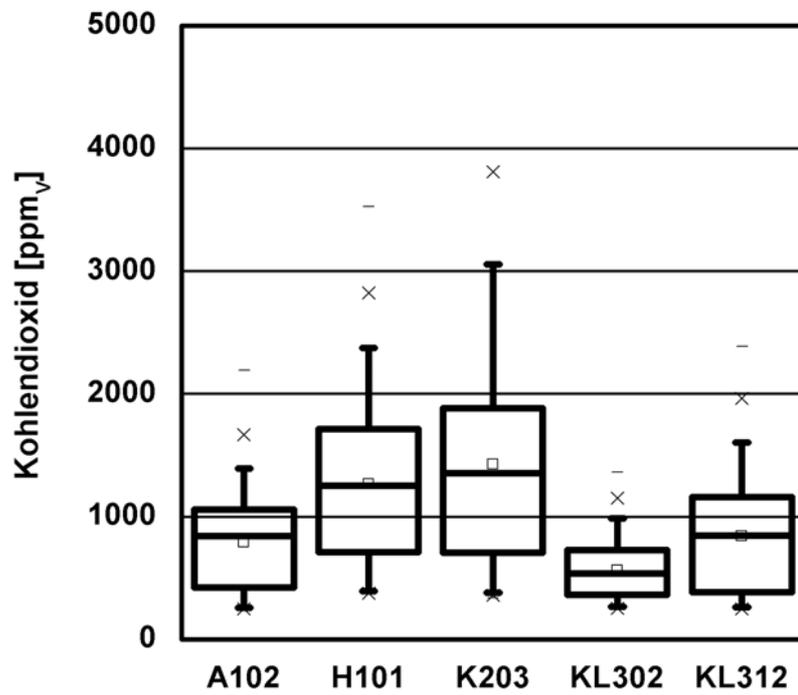


Bild 37:  
 Boxplot-Darstellung der Kohlendioxid-Konzentration in den untersuchten Klassenräumen für den Zeitraum von November bis März während der Tageszeit von 8 bis 13 Uhr.

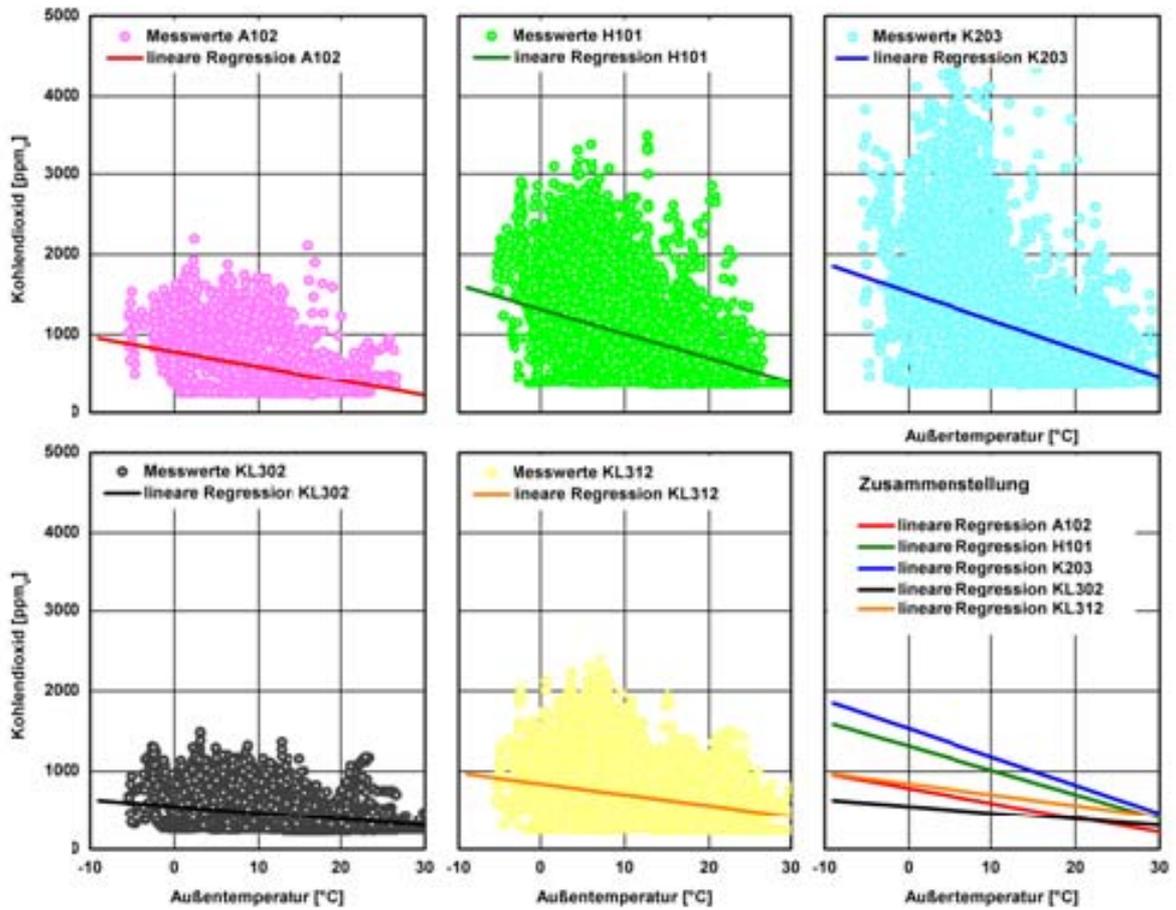


Bild 38:  
Kohlendioxidkonzentration in den einzelnen Räumen über der Außentemperatur als Scatterplot aller Messwerte während der Schulstunden von 8 bis 13 Uhr und als lineare Regression.

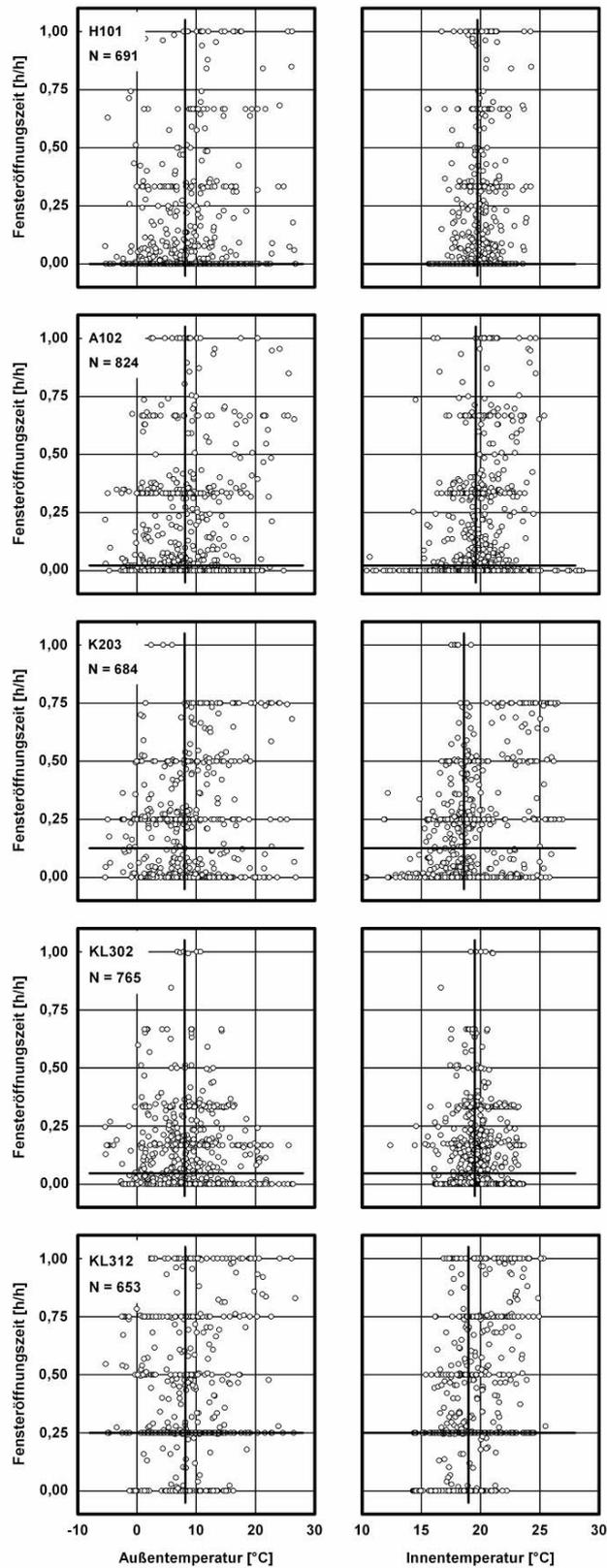


Bild 39:  
Fensteröffnungszeiten in allen Räumen in Abhängigkeit von der Außen- und der Innenlufttemperatur.

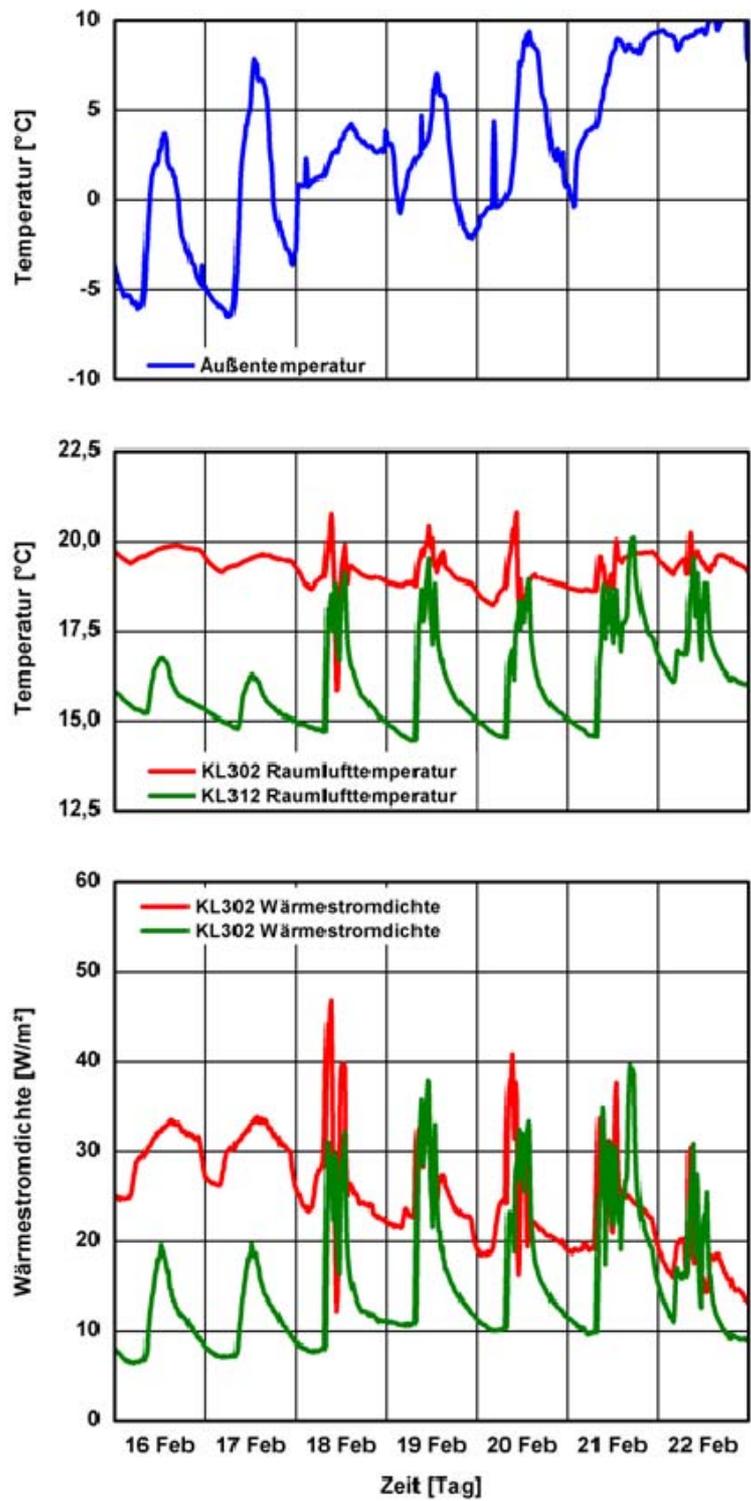


Bild 40:  
 Vergleich des Verlaufs der Außentemperatur, der Innentemperatur und der Wärmestromdichte in den Räumen KL302 und KL312 vom 16. bis 24. Februar 2008.

## 7 Tabellen

Tabelle 1:  
Beschreibung der untersuchten Räume mit Angabe der Lage und Orientierung sowie Abmessungen und Fenster.

| Raum  | Baujahr   | Lage                  | Fensterorientierung | Abmessungen  | Anzahl Fenster | Fensterart   |
|-------|-----------|-----------------------|---------------------|--|----------------|--|
| KL302 | 1903/1963 | Klostertrakt<br>3.OG  | Nord-West           | 44,3 m <sup>2</sup><br>L: 6,75 m<br>B: 6,57 m<br>H: 3,58 m | 3              | Holzrahmenfenster mit Wärmeschutzverglasung und kippbaren Oberlichtern |
| KL312 | 1903/1963 | Klostertrakt<br>3.OG  | Süd-Ost             | 52,1 m <sup>2</sup><br>L: 7,10 m<br>B: 7,34 m<br>H: 3,57 m | 2              | Holzrahmenfenster mit Einfachverglasung und kippbaren Oberlichtern     |
| A102  | 1962      | Anlagegebäude<br>1.OG | Süd-West            | 42,7 m <sup>2</sup><br>L: 7,98 m<br>B: 5,35 m<br>H: 3,55 m | 3              | Drehkipfenster mit Einfachverglasung und Holzrahmen                    |
| K203  | 1965      | Klassentrakt<br>2. OG | Nord-Ost            | 56,6 m <sup>2</sup><br>L: 8,40 m<br>B: 6,74 m<br>H: 3,15 m | 4              | Isolierverglaste Schwingfenster mit Kunststoffrahmen                   |
| H101  | 1980      | Haupthaus<br>1. OG    | Nord-West           | 68,3 m <sup>2</sup><br>L: 8,27 m<br>B: 8,26 m<br>H: 3,02 m | 6              | Klapp-/Kipfenster mit Isolierverglasung und Aluminiumrahmen            |

Tabelle 2:  
 Beschreibung der technischen Anlagen in den Untersuchten Räumen  
 (Heizung, Lüftung, Beleuchtung und Sonnenschutz).

| Raum  | Heizung    | Lüftung | Beleuchtung            | Sonnenschutz / Blendschutz    |
|-------|------------|---------|------------------------|-------------------------------|
| KL302 | Heizkörper | Fenster | Leuchtstoff-<br>röhren | ohne / innenliegender Vorhang |
| KL312 | Heizkörper | Fenster | Leuchtstoff-<br>röhren | ohne / innenliegender Vorhang |
| A102  | Heizkörper | Fenster | Leuchtstoff-<br>röhren | ohne / innenliegender Vorhang |
| K203  | Heizkörper | Fenster | Leuchtstoff-<br>röhren | ohne / innenliegender Vorhang |
| H101  | Heizkörper | Fenster | Leuchtstoff-<br>röhren | außenliegende Raffstores      |

Tabelle 3:  
Bauteilaufbauten und U-Werte der wichtigsten Bauteile.

| Raum/<br>Bauteil   | Bauteilaufbau von au-<br>ßen nach innen   | Dicke | Wärmeleit-<br>fähigkeit | U-Wert             |
|--------------------|---|-------|-------------------------|--------------------|
|                    |   | m     | W/mK                    | W/m <sup>2</sup> K |
| H101<br>Außenwand  | Blechverkleidung                          | -     | -                       | 0,52               |
|                    | Hinterlüftung                             | -     | -                       |                    |
|                    | Dämmung                                   | 0,060 | 0,04                    |                    |
|                    | Kalksandstein                             | 0,240 | 1,10                    |                    |
| H101<br>Fenster    | Isolierverglasung mit<br>Aluminiumrahmen  | -     | -                       | 3,7-4,3            |
| KL302<br>Außenwand | Sandstein                                 | 0,600 | 2,30                    | 2,22               |
|                    | Innenputz                                 | 0,020 | 0,80                    |                    |
| KL 302<br>Fenster  | Wärmeschutzverglasung<br>mit Holzrahmen   | -     | -                       | 1,4-1,7            |
| KL312<br>Außenwand | Sandsteinbruch                            | 0,600 | 1,60                    | 1,77               |
|                    | Innenputz                                 | 0,020 | 0,80                    |                    |
| KL312              | Einfachverglasung mit<br>Holzrahmen       | -     | -                       | 5,0-5,2            |
| K203<br>Außenwand  | Klinker                                   | 0,130 | 0,95                    | 1,00               |
|                    | Stahlbeton                                | 0,300 | 2,10                    |                    |
|                    | Dämmung                                   | 0,020 | 0,04                    |                    |
|                    | Gipskartonplatte                          | 0,013 | 0,25                    |                    |
| K203<br>Dach       | Bitumenbahn                               | -     | -                       | 0,94               |
|                    | Dämmung                                   | 0,040 | 0,05                    |                    |
|                    | Stahlbeton                                | 0,200 | 2,10                    |                    |
| K203<br>Fenster    | Isolierverglasung mit<br>Kunststoffrahmen | -     | -                       | 2,5-2,7            |
| A102<br>Außenwand  | Klinker                                   | 0,130 | 0,95                    | 0,91               |
|                    | Ziegel                                    | 0,240 | 0,96                    |                    |
|                    | Dämmung                                   | 0,020 | 0,04                    |                    |
|                    | Gipskartonplatten                         | 0,013 | 0,25                    |                    |
| A102<br>Fenster    | Einfachverglasung mit<br>Holzrahmen       | -     | -                       | 5,0-5,2            |

Tabelle 4:  
U-Wert-Abschätzung aus der Messung der Wärmeströme an den Außenwandbauteilen.

| Raum/<br>Bauteil   | Außentempe-<br>ratur [°C] | Innentempe-<br>ratur [°C] | Wärmestrom-<br>dichte [W/m <sup>2</sup> ] | U-Wert<br>[W/m <sup>2</sup> K] |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|---|--------------------------------|
| H101<br>Außenwand  | 0,6                       | 12,6                      | 5,67                                      | 0,47                           |
| KL302<br>Außenwand | 0,6                       | 16,0                      | 28,92                                     | 1,87                           |
| KL312<br>Außenwand | 0,6                       | 14,7                      | 19,39                                     | 1,37                           |
| K203<br>Außenwand  | 0,6                       | 11,6                      | 9,19                                      | 0,83                           |
| K203<br>Dach       | 0,6                       | 11,6                      | 9,36                                      | 0,85                           |
| A102<br>Außenwand  | 0,6                       | 19,0                      | 17,27                                     | 0,93                           |

Tabelle 5:  
Vergleich der berechneten und aus Messdaten ermittelten U-Werte.

| Raum  | Bauteil   | U-Wert [W/m <sup>2</sup> K] |          |
|-------|-----------|-----------------------------|----------|
|       |           | berechnet                   | gemessen |
| H101  | Außenwand | 0,52                        | 0,47     |
| KL302 | Außenwand | 2,22                        | 1,87     |
| KL312 | Außenwand | 1,77                        | 1,37     |
| K203  | Außenwand | 1,00                        | 0,83     |
|       | Dach      | 0,94                        | 0,85     |
| A102  | Außenwand | 0,91                        | 0,93     |

Tabelle 6:  
Ergebnis der Blower-Door-Messungen.

| Raum  | Raumvolumen | n50-Wert [1/h]<br>(1.Messung) | n50-Wert [1/h]<br>(2.Messung) |
|-------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| KL301 | 197         | 2,72                          | 2,75                          |
| KL302 | 163         | 1,32                          | 1,31                          |
| KL312 | 225         | 2,69                          | 2,65                          |

Tabelle 7:  
Liste aller Messkanäle mit Lage und Einheit.

| Kurzname des Kanals | Gebäudeteil           | Kanal  | Einheit           |
|---------------------|-----------------------|--|-------------------|
| WS_Temperatur       | Wetterstation         | Außenlufttemperatur  | °C                |
| WS_Luftfeuchte      | Wetterstation         | Außenluftfeuchte   | % r.F.            |
| WS_Strahlung        | Wetterstation         | Globalstrahlung  | W/m <sup>2</sup>  |
| WS_Luftdruck        | Wetterstation         | Luftdruck  | hPa               |
| WS_Regen            | Wetterstation         | Regen  | mm/m <sup>2</sup> |
| A102_Lufttemperatur | Aulagebäude, Raum 102 | Raumlufttemperatur   | °C                |
| A102_Luftfeuchte    | Aulagebäude, Raum 102 | Raumluftfeuchte  | % r.F.            |
| A102_CO2            | Aulagebäude, Raum 102 | Kohlendioxidgehalt der Raumluft  | ppmV              |
| A102_WS             | Aulagebäude, Raum 102 | Wärmestromdichte durch den Regelquerschnitt der Außenbauteile                          | W/m <sup>2</sup>  |
| A102_AOFT           | Aulagebäude, Raum 102 | Temperatur der Außenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile  | °C                |
| A102_IOFT           | Aulagebäude, Raum 102 | Temperatur der Innenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile  | °C                |
| A102_FK1            | Aulagebäude, Raum 102 | Fensterkontakt des der Tafel am nächsten Fensters                                      | -                 |
| A102_FK2            | Aulagebäude, Raum 102 | Fensterkontakt des mittleren Fensters  | -                 |
| A102_FK3            | Aulagebäude, Raum 102 | Fensterkontakt des von der Tafel am entferntesten Fensters                             | -                 |
| A102_WB_FL_OFT      | Aulagebäude, Raum 102 | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke an der Fensterlaibung                     | °C                |
| A102_WB_DA_OFT      | Aulagebäude, Raum 102 | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke am Anschluss zwischen Außenwand und Decke | °C                |
| H101_Lufttemperatur | Haupthaus, Raum 101   | Raumlufttemperatur   | °C                |
| H101_Luftfeuchte    | Haupthaus, Raum 101   | Raumluftfeuchte  | % r.F.            |

| Kurzname des Kanals | Gebäudeteil            | Kanal  | Einheit          |
|---------------------|------------------------|--|------------------|
| H101_CO2            | Haupthaus, Raum 101    | Kohlendioxidgehalt der Raumluft  | ppmV             |
| H101_WS             | Haupthaus, Raum 101    | Wärmestromdichte durch den Regelquerschnitt der Außenbauteile                                    | W/m <sup>2</sup> |
| H101_AOFT           | Haupthaus, Raum 101    | Temperatur zwischen äußerer Blechverkleidung und Mauerwerk am Regelquerschnitt der Außenbauteile | °C               |
| H101_IOFT           | Haupthaus, Raum 101    | Temperatur der Innenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile            | °C               |
| H101_FK1            | Haupthaus, Raum 101    | Fensterkontakt des der Tafel am nächsten Fensters  | -                |
| H101_FK2            | Haupthaus, Raum 101    | Fensterkontakt des von der Tafel gesehen 2. Fensters   | -                |
| H101_FK3            | Haupthaus, Raum 101    | Fensterkontakt des von der Tafel gesehen 3. Fensters   | -                |
| H101_FK4            | Haupthaus, Raum 101    | Fensterkontakt des von der Tafel gesehen 4. Fensters   | -                |
| H101_FK5            | Haupthaus, Raum 101    | Fensterkontakt des der Tafel rechts gegenüberliegenden Fensters                                  | -                |
| H101_WB_FL_OFT      | Haupthaus, Raum 101    | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke an der Fensterlaibung                               | °C               |
| H101_WB_Fuge_OFT    | Haupthaus, Raum 101    | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke Mörtelfuge Klinkermauerwerk innen                   | °C               |
| K203_Lufttemperatur | Klassentrakt, Raum 203 | Raumlufttemperatur   | °C               |
| K203_Luftfeuchte    | Klassentrakt, Raum 203 | Raumluftfeuchte  | % r.F.           |
| K203_CO2            | Klassentrakt, Raum 203 | Kohlendioxidgehalt der Raumluft  | ppmV             |

| Kurzname des Kanals | Gebäudeteil            | Kanal  | Einheit          |
|---------------------|------------------------|--|------------------|
| K203_WS             | Klassentrakt, Raum 203 | Wärmestromdichte durch den Regelquerschnitt der Außenbauteile                          | W/m <sup>2</sup> |
| K203_AOFT           | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur der Außenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile  | °C               |
| K203_IOFT           | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur der Innenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile  | °C               |
| K203_FK1            | Klassentrakt, Raum 203 | Fensterkontakt des der Tafel am nächsten Fensters                                      | -                |
| K203_FK2            | Klassentrakt, Raum 203 | Fensterkontakt des von der Tafel gesehen 2. Fensters                                   | -                |
| K203_FK3            | Klassentrakt, Raum 203 | Fensterkontakt des von der Tafel gesehen 3. Fensters                                   | -                |
| K203_FK4            | Klassentrakt, Raum 203 | Fensterkontakt des von der Tafel am entferntesten Fensters                             | -                |
| K203_WB_FL_OFT      | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke an der Fensterlaibung                     | °C               |
| K203_WB_Bc_OFT      | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke am Anschluss zwischen Außenwand und Decke | °C               |
| K203_DA_WS          | Klassentrakt, Raum 203 | Wärmestromdichte durch den Regelquerschnitt der Decke                                  | W/m <sup>2</sup> |
| K203_DA_AOFT        | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur der Außenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Decke          | °C               |
| K203_DA_IOFT        | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur der Innenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Decke          | °C               |

| Kurzname des Kanals  | Gebäudeteil            | Kanal   | Einheit          |
|----------------------|------------------------|---|------------------|
| K203_01m_LT          | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur der Raumluft in 0,1 m Höhe über Fußboden                                   | °C               |
| K203_11m_LT          | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur der Raumluft in 1,1 m Höhe über Fußboden                                   | °C               |
| K203_39m_LT          | Klassentrakt, Raum 203 | Temperatur der Raumluft in 0,1 m unter der Decke                                      | °C               |
| KL302_Lufttemperatur | Klostertrakt, Raum 302 | Raumlufttemperatur  | °C               |
| KL302_Luftfeuchte    | Klostertrakt, Raum 302 | Raumluftfeuchte   | % r.F.           |
| KL302_CO2            | Klostertrakt, Raum 302 | Kohlendioxidgehalt der Raumluft   | ppmV             |
| KL302_WS             | Klostertrakt, Raum 302 | Wärmestromdichte durch den Regelquerschnitt der Außenbauteile                         | W/m <sup>2</sup> |
| KL302_AOFT           | Klostertrakt, Raum 302 | Temperatur der Außenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile | °C               |
| KL302_IOFT           | Klostertrakt, Raum 302 | Temperatur der Innenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile | °C               |
| KL302_FK1o           | Klostertrakt, Raum 302 | Fensterkontakt des der Tafel am nächsten Fensters am Oberlicht                        | -                |
| KL302_FK1u           | Klostertrakt, Raum 302 | Fensterkontakt des der Tafel am nächsten Fensters unten                               | -                |
| KL302_FK2o           | Klostertrakt, Raum 302 | Fensterkontakt des mittleren Fensters am Oberlicht                                    | -                |
| KL302_FK2u           | Klostertrakt, Raum 302 | Fensterkontakt des mittleren Fensters unten   | -                |
| KL302_FK3o           | Klostertrakt, Raum 302 | Fensterkontakt des von der Tafel am entferntesten Fensters am Oberlicht               | -                |
| KL302_FK3u           | Klostertrakt, Raum 302 | Fensterkontakt des von der Tafel am entferntesten Fensters unten                      | -                |

| Kurzname des Kanals  | Gebäudeteil            | Kanal   | Einheit          |
|----------------------|------------------------|---|------------------|
| KL302_WB_FL_OFT      | Klostertrakt, Raum 302 | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke an der Fensterlaibung                    | °C               |
| KL302_01m_LT         | Klostertrakt, Raum 302 | Temperatur der Raumluft in 0,1 m Höhe über Fußboden                                   | °C               |
| KL302_11m_LT         | Klostertrakt, Raum 302 | Temperatur der Raumluft in 1,1 m Höhe über Fußboden                                   | °C               |
| KL302_39m_LT         | Klostertrakt, Raum 302 | Temperatur der Raumluft in 0,1 m unter der Decke                                      | °C               |
| KL312_Lufttemperatur | Klostertrakt, Raum 312 | Raumlufttemperatur  | °C               |
| KL312_Luftfeuchte    | Klostertrakt, Raum 312 | Raumluftfeuchte   | % r.F.           |
| KL312_CO2            | Klostertrakt, Raum 312 | Kohlendioxidgehalt der Raumluft   | ppmV             |
| KL312_WS             | Klostertrakt, Raum 312 | Wärmestromdichte durch den Regelquerschnitt der Außenbauteile                         | W/m <sup>2</sup> |
| KL312_AOFT           | Klostertrakt, Raum 312 | Temperatur der Außenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile | °C               |
| KL312_IOFT           | Klostertrakt, Raum 312 | Temperatur der Innenoberfläche in der Messachse am Regelquerschnitt der Außenbauteile | °C               |
| KL312_FK1o           | Klostertrakt, Raum 312 | Fensterkontakt des der Tafel links gegenüberliegenden Fensters am Oberlicht           | -                |
| KL312_FK1u           | Klostertrakt, Raum 312 | Fensterkontakt des der Tafel links gegenüberliegenden Fensters unten                  | -                |
| KL312_FK2o           | Klostertrakt, Raum 312 | Fensterkontakt des der Tafel rechts gegenüberliegenden Fensters am Oberlicht          | -                |
| KL312_FK2u           | Klostertrakt, Raum 312 | Fensterkontakt des der Tafel rechts gegenüberliegenden Fensters unten                 | -                |

| Kurzname des Kanals | Gebäudeteil            | Kanal  | Einheit |
|---------------------|------------------------|--|---------|
| KL312_WB_FL_OFT     | Klostertrakt, Raum 312 | Temperatur an der Oberfläche der Wärmebrücke an der Fensterlaibung | °C      |
| KL312_01m_LT        | Klostertrakt, Raum 312 | Temperatur der Raumluft in 0,1 m Höhe über Fußboden                | °C      |
| KL312_11m_LT        | Klostertrakt, Raum 312 | Temperatur der Raumluft in 1,1 m Höhe über Fußboden                | °C      |
| KL312_39m_LT        | Klostertrakt, Raum 312 | Temperatur der Raumluft in 0,1 m unter der Decke                   | °C      |

Tabelle 8:

Liste aller Messkanäle mit Start- und Enddatum der Datenaufzeichnung und mit Angabe der Anzahl gültiger Messwerte im gesamten Messzeitraum.

| Kurzname des Kanals | Startdatum | Enddatum   | gültige Messwerte |
|---------------------|------------|------------|-------------------|
| WS_Temperatur       | 01.12.2006 | 20.06.2008 | 779637            |
| WS_Luftfeuchte      | 01.12.2006 | 20.06.2008 | 778307            |
| WS_Strahlung        | 01.12.2006 | 20.06.2008 | 778227            |
| WS_Luftdruck        | 13.11.2006 | 20.06.2008 | 748366            |
| WS_Regen            | 18.04.2007 | 15.06.2008 | 1211762           |
| A102_Lufttemperatur | 12.12.2005 | 04.06.2007 | 744770            |
| A102_Luftfeuchte    | 12.12.2005 | 04.06.2007 | 620529            |
| A102_CO2            | 10.04.2006 | 04.06.2007 | 759777            |
| A102_WS             | 12.12.2005 | 04.06.2007 | 620101            |
| A102_AOFT           | 12.12.2005 | 04.06.2007 | 631015            |
| A102_IOFT           | 12.12.2005 | 04.06.2007 | 631009            |
| A102_FK1            | 09.11.2006 | 04.06.2007 | 1048968           |
| A102_FK2            | 09.11.2006 | 04.06.2007 | 1048970           |
| A102_FK3            | 09.11.2006 | 04.06.2007 | 1048976           |
| A102_WB_FL_OFT      | 12.12.2005 | 04.06.2007 | 631019            |
| A102_WB_DA_OFT      | 12.12.2005 | 04.06.2007 | 631957            |
| H101_Lufttemperatur | 12.12.2005 | 26.03.2008 | 442093            |
| H101_Luftfeuchte    | 12.12.2005 | 26.03.2008 | 321520            |
| H101_CO2            | 10.04.2006 | 26.03.2008 | 442881            |
| H101_WS             | 12.12.2005 | 26.03.2008 | 321317            |
| H101_AOFT           | 12.12.2005 | 26.03.2008 | 315059            |
| H101_IOFT           | 12.12.2005 | 26.03.2008 | 328212            |
| H101_FK1            | 09.11.2006 | 26.03.2008 | 741580            |
| H101_FK2            | 09.11.2006 | 26.03.2008 | 741581            |

| Kurzname des Kanals  | Startdatum | Enddatum   | gültige Messwerte |
|----------------------|------------|------------|-------------------|
| H101_FK3             | 09.11.2006 | 26.03.2008 | 741579            |
| H101_FK4             | 09.11.2006 | 26.03.2008 | 741583            |
| H101_FK5             | 09.11.2006 | 26.03.2008 | 752825            |
| H101_WB_FL_OFT       | 12.12.2005 | 26.03.2008 | 327958            |
| H101_WB_Fuge_OFT     | 12.12.2005 | 26.03.2008 | 327961            |
| K203_Lufttemperatur  | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 332619            |
| K203_Luftfeuchte     | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 220980            |
| K203_CO2             | 10.04.2006 | 20.06.2008 | 332999            |
| K203_WS              | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 224096            |
| K203_AOFT            | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 218865            |
| K203_IOFT            | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 218867            |
| K203_FK1             | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 631811            |
| K203_FK2             | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 631810            |
| K203_FK3             | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 631811            |
| K203_FK4             | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 631814            |
| K203_WB_FL_OFT       | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 218879            |
| K203_WB_Bc_OFT       | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 218883            |
| K203_DA_WS           | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 221035            |
| K203_DA_AOFT         | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 218864            |
| K203_DA_IOFT         | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 218864            |
| K203_01m_LT          | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 616775            |
| K203_11m_LT          | 12.12.2005 | 20.08.2007 | 293516            |
| K203_39m_LT          | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 218862            |
| KL302_Lufttemperatur | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 324927            |
| KL302_Luftfeuchte    | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 928748            |
| KL302_CO2            | 10.04.2006 | 20.06.2008 | 200271            |
| KL302_WS             | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 199419            |

| Kurzname des Kanals  | Startdatum | Enddatum   | gültige Messwerte |
|----------------------|------------|------------|-------------------|
| KL302_AOFT           | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 211241            |
| KL302_IOFT           | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 211239            |
| KL302_FK1o           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 638525            |
| KL302_FK1u           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 638525            |
| KL302_FK2o           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 638524            |
| KL302_FK2u           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 638525            |
| KL302_FK3o           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 638525            |
| KL302_FK3u           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 638530            |
| KL302_WB_FL_OFT      | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 211238            |
| KL302_01m_LT         | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 211552            |
| KL302_11m_LT         | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 211541            |
| KL302_39m_LT         | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 211475            |
| KL312_Lufttemperatur | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 315386            |
| KL312_Luftfeuchte    | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 199590            |
| KL312_CO2            | 10.04.2006 | 20.06.2008 | 199822            |
| KL312_WS             | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 199441            |
| KL312_AOFT           | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 201939            |
| KL312_IOFT           | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 201951            |
| KL312_FK1o           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 628374            |
| KL312_FK1u           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 628377            |
| KL312_FK2o           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 628375            |
| KL312_FK2u           | 09.11.2006 | 20.06.2008 | 628382            |
| KL312_WB_FL_OFT      | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 201982            |
| KL312_01m_LT         | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 315196            |
| KL312_11m_LT         | 12.12.2005 | 20.06.2008 | 315198            |
| KL312_39m_LT         | 12.12.2005 | 09.11.2006 | 314998            |

Tabelle 9:

Prozentuale Häufigkeiten von Innenoberflächentemperaturen an Dach und Außenwand im untersuchten Klassenraum K203 für einen je 3-wöchigen Zeitraum im Juni und November 2006 von Mo –Fr, ganztägig.

| Monat    | Darstellungsart | Innenoberflächentemperatur Außenwand [°C] | Innenoberflächentemperatur Dach [°C] |
|----------|-----------------|---|--------------------------------------|
| Juni     | Minimum         | 24,1                                      | 26,5                                 |
|          | 25% Perzentil   | 25,9                                      | 27,3                                 |
|          | Median          | 27,2                                      | 28,4                                 |
|          | 75% Perzentil   | 28,6                                      | 29,1                                 |
|          | Maximum         | 31,0                                      | 31,1                                 |
| November | Minimum         | 12,4                                      | 13,5                                 |
|          | 25% Perzentil   | 15,1                                      | 15,2                                 |
|          | Median          | 16,1                                      | 15,8                                 |
|          | 75% Perzentil   | 16,8                                      | 16,2                                 |
|          | Maximum         | 18,8                                      | 17,2                                 |

Tabelle 10:

Medianwerte für die Fensteröffnungszeiten, Außentemperatur und Innentemperatur in den fünf Klassenräumen der Angelaschule. Nur Werte belegter Schulstunden (= Anzahl der Beobachtungen) zwischen November 2006 und Mai 2007 wurden berücksichtigt.

| Klassenraum | Anzahl der Beobachtungen | Außentemperatur [°C] | Innentemperatur [°C] | Fensteröffnungszeit [h] |
|-------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| H101        | 691                      | 8,1                  | 19,8                 | 0,00                    |
| A102        | 824                      | 8,1                  | 19,6                 | 0,02                    |
| K203        | 684                      | 8,0                  | 18,6                 | 0,13                    |
| KL302       | 765                      | 8,0                  | 19,5                 | 0,05                    |
| KL312       | 653                      | 8,2                  | 19,0                 | 0,25                    |

Tabelle 11:

Rangkorrelationskoeffizienten rS für die Korrelation zwischen Fensteröffnungszeit und Außen- bzw. Innentemperatur für die fünf untersuchten Klassenräume der Angelaschule. Nur Werte belegter Schulstunden (= Anzahl der Beobachtungen) zwischen November 2006 und Mai 2007 wurden berücksichtigt. Signifikante Korrelationen sind fett markiert (Werte mit \* kennzeichnen ein  $p < 1 \cdot 10^{-5}$ ).

| Klassenraum | Anzahl der Beobachtungen | Korrelation zur Außentemperatur |       | Korrelation zur Innentemperatur |   |
|-------------|--------------------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|---|
|             |                          | Korrelationskoeffizient         | p     | Korrelationskoeffizient         | p |
| H101        | 691                      | 0,10                            | 0,003 | 0,23                            | * |
| A102        | 824                      | -0,05                           | 0,089 | 0,23                            | * |
| K203        | 684                      | 0,03                            | 0,227 | 0,31                            | * |
| KL302       | 765                      | 0,01                            | 0,421 | 0,15                            | * |
| KL312       | 653                      | 0,04                            | 0,149 | 0,43                            | * |

Tabelle 12:

Wärmestromdichten in  $W/m^2$  an den Außenbauteilen aller Messräume in den Wintermonaten von November bis März.

| Klassenraum | Anzahl der Beobachtungen | 1%    | 25%   | 50%   | 75%   | 99%   |
|-------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H101        | 691                      | -1,78 | 3,73  | 6,93  | 15,81 | 41,53 |
| A102        | 824                      | 0,36  | 2,95  | 4,06  | 5,82  | 23,08 |
| K203        | 684                      | 0,29  | 4,74  | 7,42  | 12,10 | 33,40 |
| KL302       | 765                      | 8,44  | 15,78 | 18,73 | 22,36 | 36,62 |
| KL312       | 653                      | 2,34  | 9,22  | 12,35 | 16,77 | 35,56 |