Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule
Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)
als Nullenergiehaus in Holzbauweise

# Abschlussbericht
## Teil 5: Raumklima und Behaglichkeit

Prof. Dr.-Ing. K. Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) K. Gebhardt, M. Eng.

Die Verantwortung für den Inhalt
des Berichtes liegt bei den Verfassern.

Magdeburg, September 2018

unter dem Förderkennzeichen
FKZ 0327430O
gefördert durch das:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

# Impressum

**Projektförderung:**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
unter dem Förderkennzeichen FKZ 0327430O
Im Förderprogramm Energieoptimiertes Bauen (EnOB) – EnEff: Schule

**Projektträger:**

Projektträger Jülich (PTJ)
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich

**Projektlaufzeit:**

01.04.2013 – 31.03.2018

**Fördermittelnehmer und Forschungskooperationspartner:**

Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg
Max-Josef-Metzger-Str. 1
39104 Magdeburg

**Verantwortliche Berichtverfasser:**

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit
Hochschule Magdeburg/Stendal
Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

**Projektbearbeiter:**

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Sascha Gauer, M. Eng.
Lisa Haferung, M. Eng.
Dimitri Kleer, B. Eng.
Julia Stresing, B. Eng.

**Datenstand:**
Magdeburg, 30.09.2018

inhalt


Impressum ..... 3

1 Zusammenfassung ..... 7

2 Sommerlicher Wärmeschutz ..... 19
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108-2, Ausgabe 2003 ..... 21
2.2 Ergebnisse nach DIN 4108-2, Ausgabe 2013 ..... 22
2.3 Messorte und Messtechnik ..... 23
2.4 Oberflächentemperaturen Aula ..... 25
2.5 Verbesserungsansätze ..... 34
2.6 Verallgemeinerung und Fazit ..... 35

3 Raumtemperatur ..... 37
3.1 Messorte und Messtechnik ..... 38
3.2 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Klassenraum 1.08 ..... 39
3.3 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Klassenraum 2.01 ..... 44
3.4 Temperaturhäufigkeit und -verlauf der Klassenräume im Vergleich ..... 48
3.5 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Hortraum 0.01 ..... 52
3.6 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Aula 0.26 ..... 57
3.7 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf der Küche ..... 64
3.8 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Lehrerzimmer 1.04 ..... 68
3.9 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Technikräume ..... 73
3.10 Vertikales Temperaturprofil Klassenraum 1.08 ..... 74
3.11 Vertikales Temperaturprofil Klassenraum 2.01 ..... 77
3.12 Vertikales Temperaturprofil Aula ..... 79
3.13 Befragungen ..... 81
3.14 Winterliche Problemfälle ..... 82
3.15 Sommerliche Problemfälle ..... 84
3.16 Verbesserungsansätze ..... 86
3.17 Verallgemeinerung und Fazit ..... 89

4 Raumluftfeuchte ..... 91
4.1 Messorte und Messtechnik ..... 91
4.2 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Klassenraum 1.08 ..... 92
4.3 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Klassenraum 2.01 ..... 93
4.4 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Klassenräume im Vergleich ..... 94
4.5 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Hortraum 0.01 ..... 97
4.6 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf der Aula 0.26 ..... 98
4.7 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Küche ..... 100
4.8 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Lehrerzimmer 1.04 ..... 102
4.9 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Technikräume ..... 102
4.10 Abluftfeuchte ..... 103
4.11 Befragungen ..... 104
4.12 Winterliche Problemfälle ..... 105
4.13 Sommerliche Problemfälle ..... 107
4.14 Verbesserungsansätze ..... 107
4.15 Verallgemeinerung und Fazit ..... 108

5 Behaglichkeit ..... 109

6 $CO_2$-Gehalt der Raumluft ..... 111
6.1 Messorte und Messtechnik ..... 111
6.2 Plausibilitätsprüfung und Fehlerbetrachtung ..... 112
6.3 Häufigkeitsverteilung Klassenräume ..... 117
6.4 Häufigkeitsverteilung Aula ..... 128
6.5 Befragungen ..... 130
6.6 Problemfälle und Verbesserungsansätze ..... 130
6.7 Verallgemeinerung und Fazit ..... 131

7 Fensteröffnung ..... 133
7.1 Messorte und Messtechnik ..... 133
7.2 Fensteröffnungsverhalten Klassenräume ..... 137
7.3 Fensteröffnungsverhalten Lehrerzimmer ..... 144
7.4 Befragungen ..... 145
7.5 Verallgemeinerung und Fazit ..... 145
8 Nachhallzeit und Raumakustik ..... 147
8.1 Messorte und Messtechnik ..... 148
8.2 Messergebnisse Raum der Stille 1.14 ..... 149
8.3 Messergebnisse Aula 0.26 ..... 152
8.4 Messergebnisse Klassenräume 1.01, 1.08 und 2.01 ..... 155
8.5 Auswertung ..... 162
8.6 Verallgemeinerung und Fazit ..... 164
9 Anhang ..... 165
9.1 Literatur ..... 165
9.2 Nomenklatur ..... 166
9.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis ..... 167
9.4 Verantwortliche Planer und Ausführende ..... 172
9.5 Überblick über separate Anhänge ..... 172

# 1 Zusammenfassung

Besonders in Schulen ist die Behaglichkeit der Räume ein wichtiger Faktor, der das geistige Aufnahmevermögen der Schüler und das Arbeitsumfeld der Lehrer beeinflusst. Eine Vollüberwachung des Gebäudes im Rahmen des Monitorings war weder gewünscht noch finanzierbar. Daher beschränken sich die intensiven Untersuchungen, deren Ergebnisse in diesem Bericht behandelt werden, auf wenige exemplarische Räume:

- Klassenraum 2.01 auf der Nordseite, obere Etage, Ecklage mit 3 Außenseiten
- Klassenraum 1.08 auf der Südseite, mittlere Etage, Innenlage mit 1 Außenseite
- Hortraum 0.01 auf der Nordseite, Erdgeschoss, Ecklage mit 3 Außenseiten
- Lehrerzimmer 1.04 auf der Nordseite, mittlere Etage, Ecklage mit 2 Außenseiten
- Aula 0.26 im Erdgeschoss auf der Südseite

Vorgestellt werden zunächst die Ergebnisse des sommerlichen Wärmeschutznachweises, gefolgt von den Auswertungen der Oberflächen- und Raumlufttemperaturen der Referenzräume. Die hierfür genutzten Fühler geben auch Aufschluss über die Raumluftfeuchten, welche ebenfalls hinsichtlich der Behaglichkeit eingeordnet werden. Die Beurteilungen zur Raumluftqualität werden komplettiert durch die Auswertungen der $CO_2$-Gehalte in den beiden Klassenräumen und der Aula. Während die Untersuchungen zu den Temperaturen im Fensterkastenbereich Bestandteil des Abschlussberichtes Teil 6 sind, wird im vorliegenden Teil das allgemeine Fensteröffnungsverhalten der Nutzer analysiert.

**Sommerlicher Wärmeschutz**

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz wurden von einigen Räumen sowohl nach DIN 4108-2:2003 [1] (28 Räume) als auch nach DIN 4108-2:2013 [2] (12 Räume) nicht erfüllt. Die rechnerische Verbesserung nach neuer Norm gegenüber der Version von 2003 liegt insbesondere an der Anrechenbarkeit der Nachtlüftung.

Hauptursache für die Nichterfüllung der Anforderungen ist die Wahl des zwischenliegenden Sonnenschutzes, für den im Bestand ein $F_C$-Wert von 0,7 bzw. 0,75 anrechenbar ist.

Nach der Normversion von 2003 hätte ein außenliegender Sonnenschutz mit $F_C \leq 0{,}5$ (Markise) bereits für die meisten Räume – so auch für die drei betroffenen Klassenräume 1.07, 1.08 und 2.08 – zur Erfüllung der Anforderungen geführt. Das Büro 0.08, das Foyer 0.21 sowie das Schlafzimmer 2.25 und das Wohnzimmer 2.28 der Wohnung hätten mit $F_C \leq 0{,}3$ eine wirksamere Sonnenschutzvorrichtung benötigt (z. B. Außenrolladen, Fensterladen).

Nach neuer Norm (2013) wäre für den Personalraum 0.34, das Büro 0.07 und das Sekretariat 1.23 mit einem $F_C$-Wert von 0,5 die Norm erfüllt. Während das Archiv 1.24 und das Büro 0.08 mit $F_C \leq 0{,}3$ ausgestattet werden könnten, wäre beim Foyer 0.21 ein Sonnenschutz mit $F_C \leq 0{,}25$ notwendig. Kritisch bleibt das Wohnzimmer 2.28 der Hausmeisterwohnung: hier würde selbst ein außenliegender Sonnenschutz mit $F_C \leq 0{,}25$ das Problem nicht lösen, jedoch deutlich verbessern. Dies hätte von vornherein durch einen geringeren Fensterflächenanteil ($f_{WG,ist}$ = 50 %) vermieden werden können. Der Hausmeister selbst ist jedoch nach eigener Aussage zufrieden.

Allein unter dem Aspekt des sommerlichen Wärmeschutznachweises hat der zwischenliegende Sonnenschutz rechnerische Nachteile und führt teilweise zur Nichterfüllung des Nachweises. Der Gedanke, die Jalousien witterungs- und vandalismusgeschützt im Fensterkastenbereich unterzubringen, ist grundsätzlich gut und nachvollziehbar. Jedoch führt die hier gewählte Ausführung dazu, dass sich der Fensterkastenbereich aufheizt. Dies wäre nur mit einem außenliegenden Sonnenschutz vermeidbar gewesen. Die sommerlichen Problemfälle werden in Kapitel 3.2 und 3.15 anhand des Klassenraumes 1.08 ausführlicher beschrieben.

Ein Kritikpunkt der Nutzer ist, dass bei der geringen Lamellenbreite von 25 mm die Sicht nach draußen stark eingeschränkt ist. Insbesondere in den südorientierten Klassenräumen müssen die Jalousien aufgrund des Wärmeschutzes und der Blendung fast immer heruntergefahren werden. Es kam häufiger die Aussage, man fühle sich „eingesperrt". Jalousien mit 50-60 mm breiten Lamellen hätten automatisch in horizontaler Stellung einen deutlich größeren Lamellenzwischenraum, durch den die Nutzer hindurchschauen könnten. Diese Ausführung war jedoch aufgrund der Platzeinschränkungen im Fensterkastenbereich nicht möglich.

Nachdem es im ersten Betriebsjahr mehrfach zu Spannungsrissen in Fensterscheiben und Problemen mit der Motorsteuerung der Jalousieantriebe gekommen war, kam erschwerend seitens des Schulträgers die Anweisung hinzu, die Jalousien nicht mehr in Zwischenstellung (halbhoch) zu betreiben. Die Nutzer fügen sich dieser Anweisung, obwohl sie sich dadurch eingeschränkt fühlen. Häufig besteht das Bedürfnis, die Jalousien nur anteilig herunterzufahren, um zwar Blendschutz zu gewährleisten, jedoch Tageslichtnutzung und Außenbezug im unteren Bereich beizubehalten. Aus Sicht des Monitorings sollte die halbhohe Stellung erlaubt werden, um die Nutzerzufriedenheit zu erhöhen. Da i. d. R. im Sommer das Öffnen des äußeren Fensterflügels vorgesehen ist, um Stauwärme abzuführen, sollte es nicht zu temperaturbedingten Problemen kommen.

**Oberflächentemperaturen der Aula**

Hinsichtlich der Oberflächentemperaturen der Aula ist von einem Messfehler an der Wandoberfläche raumseitig der Solarwand auszugehen, der im Bereich von etwa 3 K liegt. Zwar ist dennoch messtechnisch erkennbar, dass die Solarwand zeitweise wärmer ist als die Referenzwand. Da sich dies jedoch kaum in der Entwicklung der Raumlufttemperatur widerspiegelt und es von Nutzern keine negativen Rückmeldungen gibt, besteht aus dieser Hinsicht kein Handlungsbedarf. Der U-Wert der Solarwand ist mit 0,161 W/(m²K) bereits sehr gut, wodurch einem Wärmestrom von außen nach innen bereits bestmöglich entgegengewirkt wurde. Die Behaglichkeit der Aula wird in Kapitel 3.6 näher untersucht.

Entgegen der anfänglichen Befürchtungen, die Aula würde aufgrund der Solarkollektorwand in Kombination mit dem großen Fensterflächenanteil allgemein zu Überhitzung neigen, konnte festgestellt werden, dass es in der Nutzungszeit nur zu geringen Temperaturüberschreitungen kommt und behagliche Raumlufttemperaturen herrschen. Dies ist insbesondere auf die effektive Nachtlüftung zurückzuführen, aber auch auf die – unfreiwillig – dauerhaft heruntergefahrenen Jalousien. Positiv ist zwar, dass der Sonnenschutz in der Pfosten-Riegel-Fassade im Scheibenzwischenraum vor Witterung geschützt ist. Jedoch ist er im Reparaturfall – welcher bereits aufgetreten ist – schwer zugänglich. Aus dieser Erfahrung resultiert die Anweisung, die Sonnenschutzvorrichtung dauerhaft heruntergefahren zu betreiben. Die Anlage wird nur noch eingeschränkt bedient, aus Angst, einen Defekt auszulösen. Dies kann nicht das Ziel des Wärmeschutz- oder Beleuchtungskonzeptes gewesen sein.

**Raumtemperatur**

Klammert man den betriebsbedingt warmen Küchenbereich aus, so zeigt der südorientierte Klassenraum 1.08 hinsichtlich des sommerlichen Temperaturverhaltens die größten Probleme. Übertemperaturen von > 26 °C traten im Jahr 2016 in 9,9 % der Nutzungszeit und im Jahr 2017 in 6,3 % der Nutzungszeit auf. Die sommerliche Behaglichkeit in einer Passivhausschule sollte laut Feist in [3] auf $h_{\vartheta \geq 25}$ unter 10 % begrenzt werden. Für den Klassenraum 1.08 beträgt jedoch der Anteil der Stunden, in denen der Wert überschritten wurde, 23,5 % (2016) bzw. 19,8 % (2017). Selbst für den nordorientierten Klassenraum 2.01 lag der Wert im Jahr 2016 mit 12,2 % etwas über der Empfehlung.

Abbildung 1-1 zeigt die Stundenwerte der Raumtemperaturen an Schultagen von 7 bis 15 Uhr für die beiden messtechnisch begleiteten Klassenräume und den Hortraum im Jahr 2016. Im Allgemeinen ist die Temperatur im nordorientierten Klassenraum 2.01 deutlich niedriger als im südorientierten Klassenraum 1.08. Der Hort ist noch kühler als die Klassenräume. Die Mittelwerte der Raumlufttemperaturen liegen bei 23,95 °C (Klassenraum 1.08), 22,6 °C (Klassenraum 2.01) bzw. 21,4 °C (Hortraum 0.01). Der Temperaturunterschied zwischen Nord und Süd von ca. 2 K führt insbesondere in der Heizperiode zu unbehaglichen Zuständen in den Nordräumen und zu berechtigten Nutzerbeschwerden.

Besonders groß sind die Defizite in der Behaglichkeit des nördlichen Hortbereiches, welcher messtechnisch durch den Hortraum 0.01 repräsentiert wird. Im Jahr 2016 war in 13,6 % der Zeit die Solltemperatur unterschritten, im Jahr 2017 noch in 11,3 % der Zeit. Auch im nordorientierten Klassenraum 2.01 liegt die Anzahl der Stunden mit Raumtemperaturen < 20 °C in 9,8 % der Nutzungszeit auf einem Niveau, welches Optimierungsmaßnahmen erfordert.

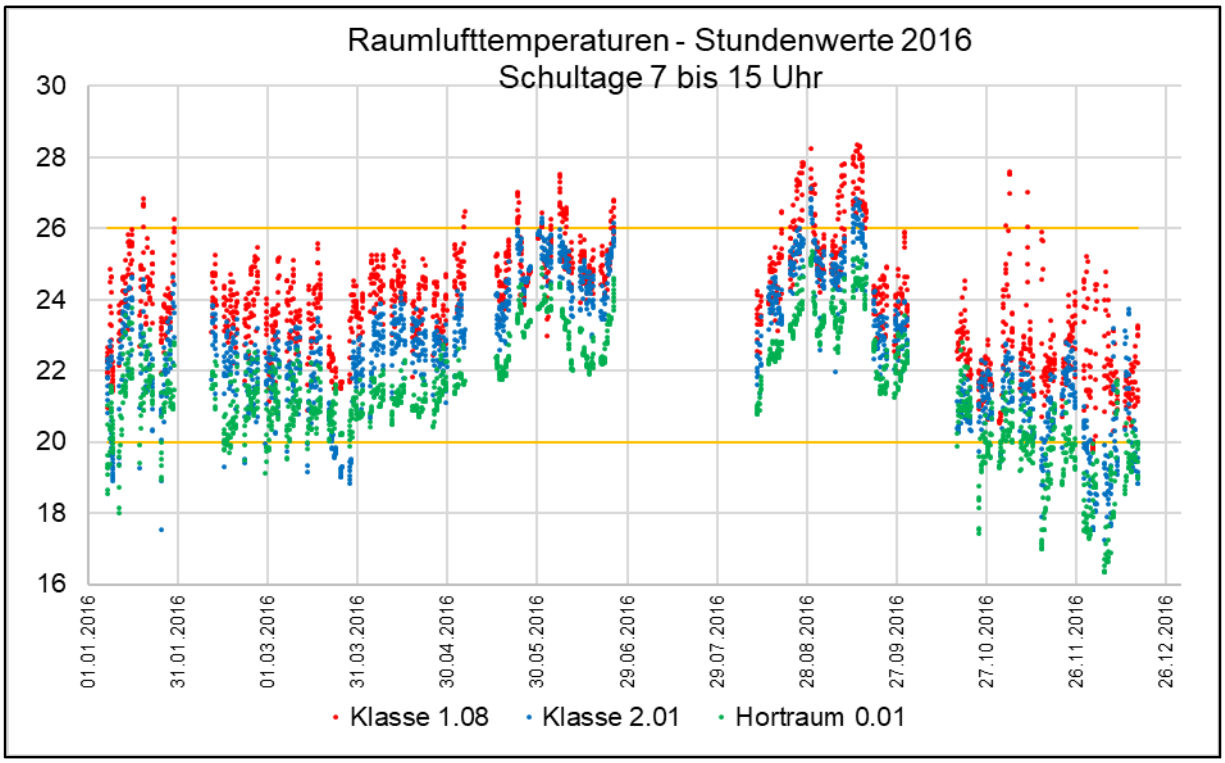


**Abbildung 1-1: Vergleich der Raumlufttemperaturen der Klassenräume und des Hortes**

Die nachfolgende Tabelle 1-1 fasst die auf Basis der Messdaten errechneten Über- bzw. Untertemperatur(grad)stunden für die Jahre 2016 und 2017 zusammen.

Die Übertemperaturgradstunden über 27 °C für die Sommerklimaregion C, in der die Stadt Halle liegt, wurden stets in Bezug auf die Normnutzungszeit (Montag bis Freitag von 7 bis 18 Uhr) nach DIN 4108-2 auf Basis der gemessenen Temperaturen errechnet. Der Anforderungswert beträgt dabei für Nichtwohngebäude maximal 500 Kh/a.

Alle weiteren Über- bzw. Untertemperaturen (> 26 °C, > 25 °C, < 20 °C) wurden in Bezug auf die in der ersten Spalte angegebene, reale Nutzungszeit errechnet. Die Messtechnik in Raum 2.01 war im Jahr 2017 leider von Datenausfall betroffen.

Der Grenzwert von 27 °C wurde im Fall der Klassenräume 1.08 und 2.01, des Hortraumes 0.01, des Lehrerzimmers 1.04 und der Aula 0.26 deutlich unterschritten und somit eingehalten. Lediglich die Spülküche und die Kochküche erfüllen die Anforderungen mit einer drei- bis vierfachen Überschreitung des Grenzwertes betriebsbedingt nicht. Dies ist jedoch nicht auf einen mangelnden sommerlichen Wärmeschutz zurückzuführen, sondern wird durch die enorme Abwärme der Küchentechnik verursacht.

**Tabelle 1-1: Übertemperaturgradstunden [Kh] sowie Über- und Untertemperaturstunden [h]**

| | Jahr 2016 | | | | Jahr 2017 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | > 27 °C [Kh] | > 26 °C [h] | > 25 °C [h] | < 20 °C [h] | > 27 °C [Kh] | > 26 °C [h] | > 25 °C [h] | < 20 °C [h] |
| **Raum 1.08 (Süd)** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 56 | 169 | 399 | 5 | 22 | 110 | 346 | 38 |
| | | 9,9% | 23,5% | 0,3% | | 6,3% | 19,8% | 2,2% |
| **Raum 2.01 (Nord)** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 0,1 | 35 | 208 | 166 | Datenlücken | | | |
| | | 2,1% | 12,2% | 9,8% | | | | |
| **Hort 0.01 (Nord)** *Nutzungszeit 6-17 Uhr* | 0 | 0 | 51 | 393 | 0 | 0 | 22 | 322 |
| | | | 1,8% | 13,6% | | 0,0% | 0,8% | 11,3% |
| **Spülküche 0.33a** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 2011 | 790 | 1064 | 75 | 2091 | 925 | 1240 | 212 |
| | | 32,8% | 44,1% | 3,1% | | 38,9% | 52,1% | 8,9% |
| **Kochküche 0.33** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 1564 | 30 | 154 | 200 | 1386 | 702 | 998 | 233 |
| | | 1,8% | 9,1% | 11,8% | | 29,5% | 41,9% | 9,8% |
| **Lehrer 1.04 (Nord)** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 2 | 30 | 154 | 200 | 0,1 | 56 | 124 | 113 |
| | | 1,8% | 9,1% | 11,8% | | 3,2% | 7,1% | 6,5% |
| **Aula 0.26 (Nord)** *Nutzungszeit 7-17 Uhr* | 4 | 36 | 93 | 65 | 0 | 1 | 26 | 117 |
| | | 1,7% | 4,5% | 3,1% | | 0,1% | 1,5% | 6,7% |

Nach monatelangen Versuchen, mit dem Hersteller der Lüftungstechnik einen Vor-Ort-Termin zur Problembehandlung im Gebäudeteil B (Klassen) zu vereinbaren, gelang im Juni 2018 endlich eine zweitägige Zusammenkunft mit intensiver Diagnostik. Dabei wurden etliche Fehleinstellungen aufgedeckt und behoben:

- Zum einen wurde festgestellt, dass die Nachtlüftung von 1:00 bis 5:00 Uhr zwar korrekt angelegt war, jedoch in der Bedienoberfläche im Gebäudeteil B (Klassen) der Haken zur Aktivierung nicht gesetzt war. Die Nachtlüftung hat daraufhin am 5.6.2018 erstmals ab 1:00 Uhr funktioniert.
- Es wurde von einer Konstantregelung auf eine Kaskadenregelung umgestellt.
- In der Regelungsoberfläche waren im Fall des Hortes sämtliche Räume der falschen Himmelsrichtung zugeordnet. Es war schlichtweg Nord und Süd vertauscht. Dies wurde behoben.
- Der Temperaturfühler des Raumes 0.01 befand sich nicht frei im Raum, sondern wurde in der Elektrounterverteilung gefunden. Da dieser Fühler als Regelfühler für alle nordorientierten Räume dient, war diese Lage unpassend. Der Fühler wurde freigelegt, sodass er nun die Temperatur im Raum 0.01 widergibt.

Wie sich die Veränderungen in der Anlagenregelung auf die Situation auswirken, bleibt abzuwarten. Da Süd- und Nordräume lüftungstechnisch aneinander gekoppelt sind, lässt sich das Problem der unterschiedlichen Raumlufttemperaturen mit obigen Maßnahmen nicht auflösen. Sollten weiterhin große Differenzen zwischen nord- und südorientierten Räumen auftreten, wird eine Nachregulierung über die Volumenströme angestrebt. Die Nordräume sollen in dem Fall einen leicht überhöhten Luftvolumenstrom bekommen (im Winter zur besseren Heizungsversorgung), während in den Südräumen ein wenig gedrosselt wird.

Das führt allerdings auch dazu, dass die Luftqualität in den Nordräumen noch etwas besser wird, in den Südräumen etwas schlechter. Daher sind dieser Optimierungsmaßnahme Grenzen gesetzt. Weiteres siehe Abschlussbericht Teil 7.

Grundsätzlich ist die Behaglichkeit in der Passivhausschule als sehr gut einzustufen. Die Luftschichtung in den Klassenräumen ist unabhängig von der Ausrichtung (Nordseite/Südseite) sehr homogen, wesentliche Unterschiede sind nicht erkennbar. Der Grenzwert von max. 2 K Temperaturdifferenz zwischen Fußboden und Kopf- oder Arbeitsebene wird nicht überschritten. Im südorientierten Klassenraum ist gelegentlich die Temperatur in Fußbodennähe höher als in 0,8 oder 1,7 m Höhe, was das Behaglichkeitsempfinden im Allgemeinen noch steigert.

Ein großes Problem stellt die grundlegende Konzipierung der raumlufttechnischen Anlage dar. Bereits in der Planungsphase wurde seitens der Hochschule Magdeburg-Stendal angemerkt, dass die Versorgung aller Räume des Gebäudeteils B mit der gleichen Lufttemperatur unabhängig von der Himmelsrichtung zu Problemen führen wird und eine Trennung in Nord/Süd notwendig sei. Der verantwortliche Planer ging von einem sehr gut funktionierenden Sonnenschutz in den Südräumen aus, der zu keinen nennenswerten Temperaturunterschieden führen würde. Zudem sei die thermische Kopplung zwischen den Räumen so gut wirksam, dass sich dies ggf. ausgleichen werde.

Die Praxis zeigt nun die vorbeschriebenen Schwierigkeiten mit ganzjährigen Übertemperaturen im südorientierten Klassenraum und unbehaglich kalten Zuständen im nordorientierten Bereich während der Heizperiode. Es hat sich eingebürgert, die Klassenraumtüren so oft wie möglich – auch während des Unterrichts – offen zu lassen, um einen Luftaustausch zu erreichen. Die Reinigungskräfte schließen am Nachmittag die Türen, der Hausmeister sorgt anschließend dafür, dass über Nacht wieder alle Türen offen stehen. Diese Umstände können nicht Ziel des Heizungs- und Lüftungskonzeptes gewesen sein. Jedoch: es ist absehbar, dass die Behebung der aufgedeckten Fehleinstellungen in der Regelung zu einer deutlichen Verbesserung der Behaglichkeit führen.

Dass die Nachtlüftung grundsätzlich zur Auskühlung der Räume in den Sommermonaten funktioniert, obwohl der Erdwärmeübertrager nicht umgangen werden kann, zeigen die zufriedenstellenden Messwerte aus der Aula. Für den Gebäudeteil B und die betroffenen Klassenräume hatte der geringe Auskühleffekt durch die Nachtlüftung regelungstechnische Ursachen in der Lüftungsanlage und teilweise funktionale Ursachen an den Volumenstromreglern. Diese Schwierigkeiten wurden im Rahmen der Lüftungsoptimierung am 5.6.2018 behoben, siehe Abschlussbericht Teil 7.

Das Anlagenkonzept ohne Einzelraumregelung bzw. im mindestens Zonenregelung für Raumgruppen kann für künftige Projekte nicht empfohlen werden.

**Raumluftfeuchte**

Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Raumluftfeuchten im gesamten Gebäude häufig deutlich zu niedrig sind, was dazu führt, dass die Nutzer die Luft als zu trocken empfinden und Zimmerpflanzen aufstellen, um dieser Problematik ein wenig entgegenzuwirken.

Dies ist hauptsächlich auf die hohen Luftwechselraten in den Räumen zurückzuführen, die insbesondere in der kühlen Jahreszeit durch das stetige Einbringen von trockener Außenluft zu einer weiteren Entfeuchtung der Raumluft führen. Die Messwerte zeigen, dass die Raumluftfeuchten bei ausgeschalteter Lüftungsanlage (nachts und am Wochenende) ansteigen und morgens mit Beginn des Lüftungsbetriebes deutlich abfallen. Diesen Effekt kann auch die Anwesenheit der Nutzer nicht aufhalten.

Da sich die Luftwechselraten am Frischluftbedarf der Personen und der Vermeidung zu hoher $CO_2$-Konzentrationen orientieren, ist eine Reduktion der Volumenströme in den meisten Räumen keine Option – mit Ausnahme der Aula, die in der meisten Zeit aufgrund eines zu hohen Minimalvolumenstroms bei geringer Belegung deutlich überversorgt ist. Die vorhandene Feuchterückgewinnung in den RLT-Anlagen mindert das Problem, kann es aber nicht verhindern.

Relative Feuchten über der Behaglichkeitsgrenze von 70 % kommen ausschließlich im Küchenbereich vor. In allen anderen Räumen werden keine kritischen Grenzwerte erreicht, sodass auch die Bausubstanz in keinem Bereich gefährdet ist.

Tabelle 1-2Tabelle 4-2 stellt die Anzahl der Stunden, in denen die Raumluftfeuchte während der angegebenen Nutzungszeit des Raumes unter 35 % bzw. über 70 % betrug, für die ausgewerteten Jahre 2016 und 2017 dar. Leider waren (und sind) sämtliche Fühler in Raum 2.01 seit Sommer 2017 von Datenausfall betroffen.

**Tabelle 1-2: Anzahl der Stunden mit relativen Feuchten < 35 % bzw. > 70 % und prozentualer Anteil an der Nutzungszeit**

| | Jahr 2016 | | Jahr 2017 | |
|---|---|---|---|---|
| | < 35 % [h] | > 70 % [h] | < 35 % [h] | > 70 % [h] |
| **Raum 1.08** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 747 | 0 | 477 | 0 |
| | 44% | 0% | 27% | 0% |
| **Raum 2.01** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 588 | 0 | Datenlücken | |
| | 35% | 0% | | |
| **Hort 0.01** *Nutzungszeit 6-17 Uhr* | 1092 | 0 | 480 | 0 |
| | 38% | 0% | 17% | 0% |
| **Spülküche 0.33a** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 286 | 29 | 167 | 4 |
| | 12% | 1% | 7% | 0% |
| **Kochküche 0.33** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 306 | 50 | 192 | 201 |
| | 13% | 2% | 8% | 8% |
| **Lehrer 1.04** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 754 | 0 | 491 | 0 |
| | 44% | 0% | 28% | 0% |
| **Aula 0.26** *Nutzungszeit 7-17 Uhr* | 979 | 0 | 667 | 0 |
| | 47% | 0% | 31% | 0% |

Besonders trocken ist die Raumluft in der Aula, jedoch wird diese im Wesentlichen nur während der Mittagszeit als Speisesaal genutzt – dann mit einer Belegungsdichte von ca. 100 Personen. Der Raum ist gekennzeichnet durch sehr hohe Luftwechselraten bis 5,8 $h^{-1}$ (Volumenstrom bis 6500 m³/h). Auch während der Abwesenheit der Nutzer ist der eingestellte, minimale Luftvolumenstrom zu hoch, was insbesondere in der Heizperiode zu einer Raumlufttentfeuchtung führt. Leider konnte bis zum Ende der Projektlaufzeit keine Optimierung der Volumenströme erzielt werden. Weiteres zu dieser Problematik siehe Abschlussbericht Teil 7 - Lüftung.

Bezüglich der Klassenräume hat die am 5.6.2018 vorgenommene Optimierung der Lüftungsregelung auch Auswirkungen auf die relativen Feuchten. Erwartet wird im südorientierten Raum 1.08 eine deutliche Minderung der Raumtemperaturspitzen, was zu einem Anstieg der relativen Feuchte führen wird.

In den im Winter zu kühlen, nordorientierten Räumen 2.01, 0.01 und 1.04 wird eine Anhebung der Raumtemperatur bei ansonsten gleichen Nutzungsbedingungen zu eher trockenerer Luft als bisher führen.

**Behaglichkeit**

Die Darstellungen in Abbildung 1-2 und Abbildung 1-3 nach [4] verdeutlichen die behaglichen oder noch behaglichen Bereiche bei sitzender Beschäftigung und einer Luftgeschwindigkeit unter 20 cm/s [5]. Die Wertepaare wurden im Stundenmittel aufgetragen.

In beiden Klassenräumen befindet sich die Mehrzahl der Wertepaare im behaglichen oder noch behaglichen Bereich. Jedoch fallen zahlreiche feuchtwarme Zustände auf, die im Wesentlichen auf die beschriebenen sommerlichen Problemfälle zurückzuführen sind. Eine geringe Anzahl von Nutzungsstunden ist durch unbehaglich trocken-kühle Raumluft gekennzeichnet. Insgesamt ist die Behaglichkeit zufriedenstellend.

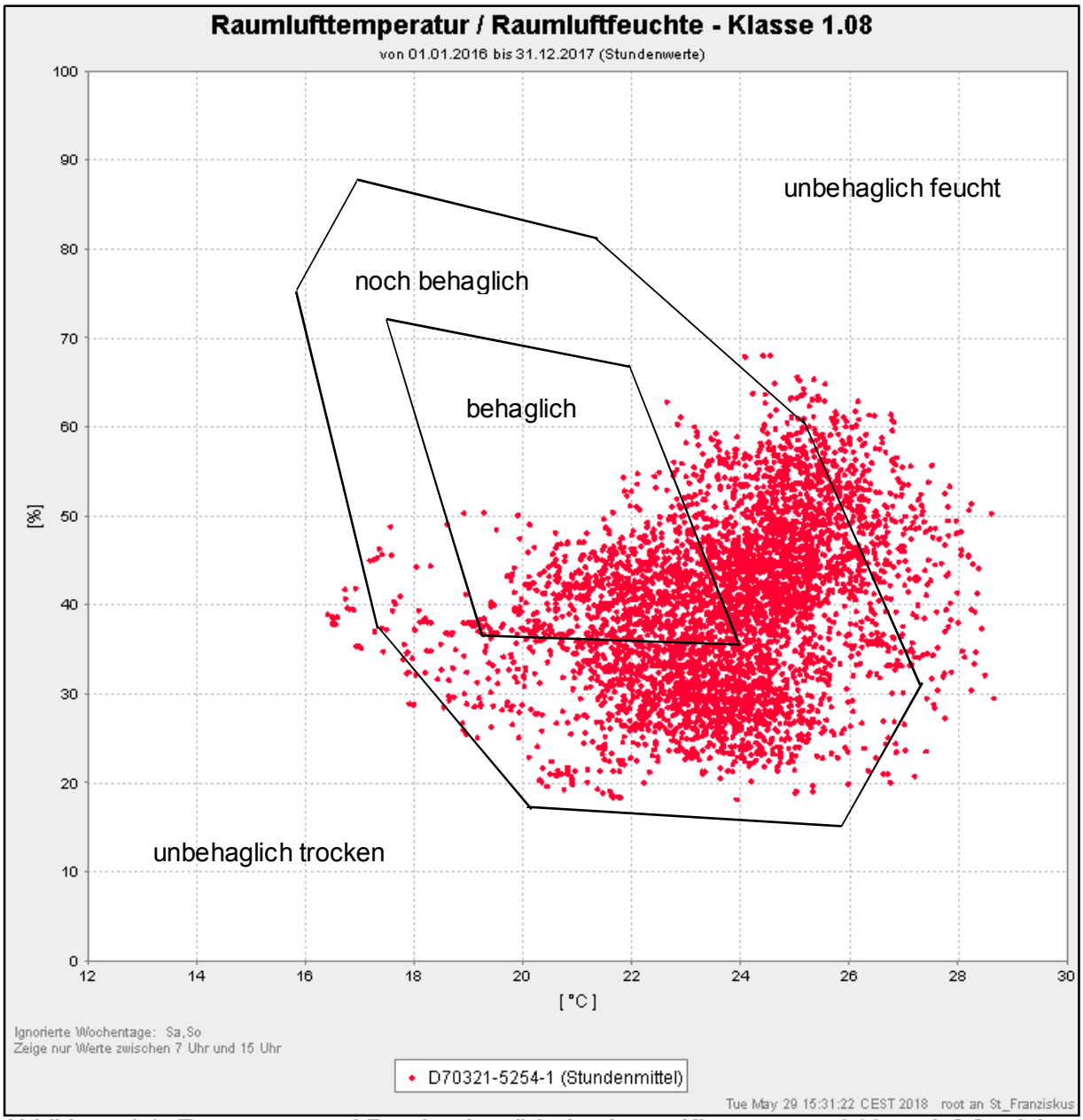


**Abbildung 1-2: Temperatur und Feuchte im südorientierten Klassenraum 1.08 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr**

Durch die am 5.6.2018 vorgenommenen Veränderungen an der Lüftungsregelung im Gebäudeteil B wird insgesamt eine deutliche Verbesserung der Situation erwartet. Insbesondere in den südorientierten Klassenräumen ist eine bessere Effizienz der Nachtlüftung festzustellen, da diese seit 5.6.2018 früher beginnt – um 1:00 Uhr statt 3:00 bzw. 4:00 Uhr – und nun auch niedrigere Zulufttemperaturen bei Betriebsbeginn ermöglicht werden.

Hinsichtlich der unbehaglich kühlen Zustände wird eine Verbesserung der Situation angestrebt, da nun anstelle der manuell gewählten Zulufttemperatur durch die aktivierte Kaskadenregelung angepasste Übertemperaturen zur Beheizung der Räume möglich sind.

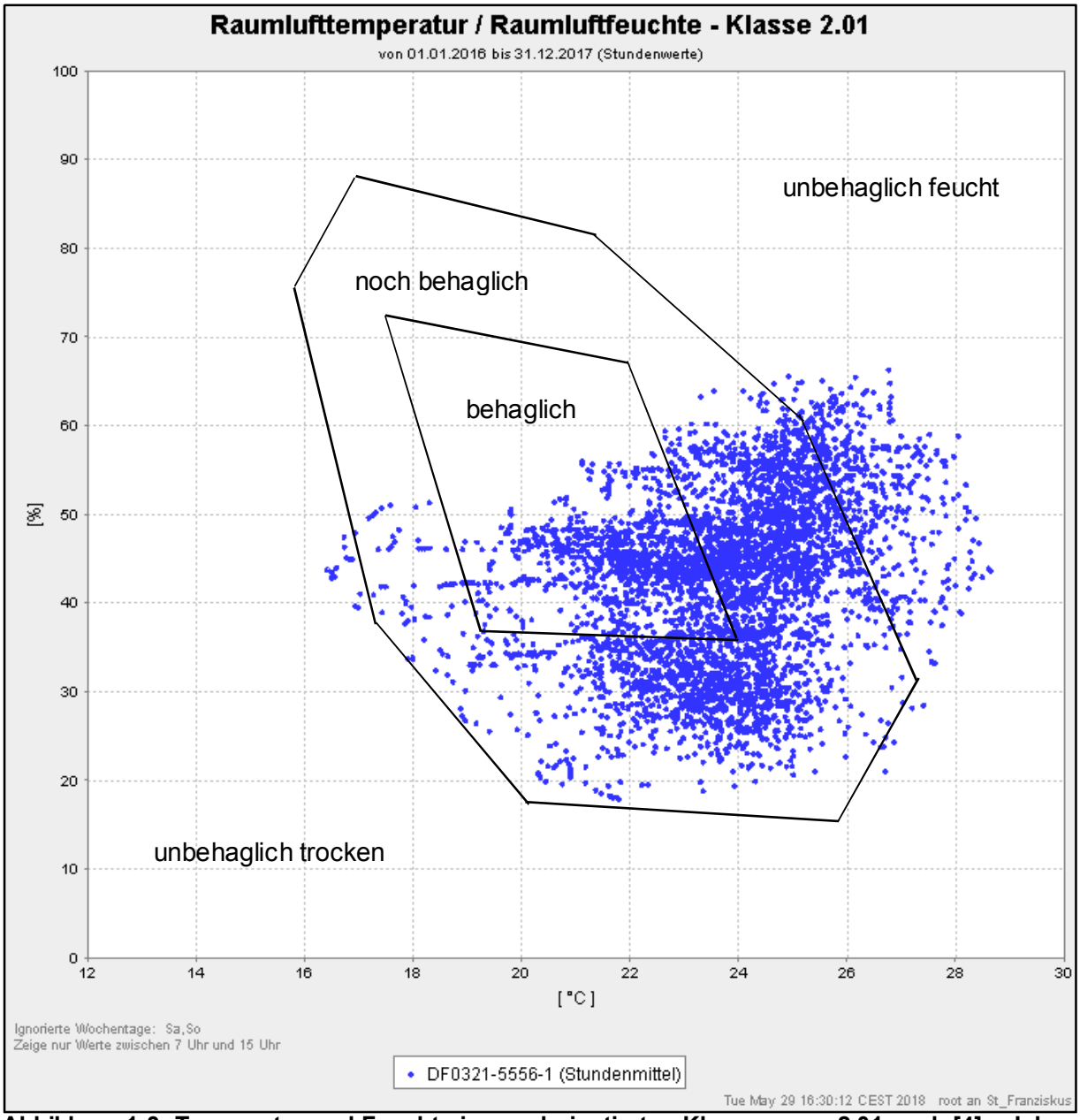


**Abbildung 1-3: Temperatur und Feuchte im nordorientierten Klassenraum 2.01 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr**

**$CO_2$-Gehalt der Raumluft**

Die Luftqualität der Klassenräume ist mit $CO_2$-Stundenmittelwerten während der Nutzungszeit von 676 bis 826 ppm als sehr gut einzustufen. Überschreitungen der Pettenkofer-Grenze traten zwar in bis zu 41 % der Nutzungszeit auf, jedoch blieben die Werte dann meist unter 1500 ppm, was – insbesondere verglichen mit manuell belüfteten Schulen – einer guten Luftqualität entspricht.

Trotz der schwierigen Messwertauswertung (Kapitel 6.1) aufgrund der ungünstigen Fühlerpositionierung ergeben sich sehr wahrscheinlich Messwerte, die die Luftqualität konventioneller Schulen deutlich übersteigen. Da das regelungstechnische Konzept sowie die Anlagenauslegung identisch für alle Klassenräume sind, sind die Ergebnisse der beiden untersuchten Klassenräume 1.08 und 2.01 auf den Rest des Klassentraktes übertragbar.

Es ist davon auszugehen, dass alle südorientierten Räume die am Beispiel des Raumes 1.08 dargestellten Probleme mit erhöhten Raumtemperaturen haben (Kapitel 3.2) und die Nutzer dadurch die Luft als stickiger empfinden, wie in der Nutzerbefragung angemerkt wurde.

Nach der beschriebenen Lüftungsoptimierung vom 5.6.2018 wird zunächst abgewartet, wie die Werte sich entwickeln. Sollte für die Angleichung der Temperaturen zwischen Nord und Süd eine leichte Absenkung der Volumenströme im Süden erfolgen (Kapitel 3.16), wird dies eine Verschlechterung der $CO_2$-Gehalte in den Südräumen zur Folge haben.

In der Aula sind die $CO_2$-Gehalte meist so gering, dass von einer lüftungstechnischen Überversorgung gesprochen werden kann. Es ist bekannt, dass die Aula auf einer zu hohen Grundleistungsstufe läuft, d. h. der werksseitig eingestellte minimale Volumenstrom zu hoch gewählt wurde. Diese hohen Volumenströme von max. 6500 m³/h sind nur bei hoher Belegungsdichte notwendig und haben hohe Ventilatorstromkosten zur Folge. Leider ist es während der Projektlaufzeit nicht gelungen, eine Fachfirma zur Nachkorrektur des Minimalwertes zu engagieren. Eine Lüftungsoptimierung ist für den Winter 2018/19 vorgesehen. Sie wird dann durch die Hochschule Magdeburg-Stendal und den Hausmeister vorgenommen, siehe Abschlussbericht Teil 7 – Lüftung.

Die Messwerte für $CO_2$ in den beiden intensiv untersuchten Klassenräumen und der Aula zeigen sehr gute Ergebnisse. Innerhalb der Anwesenheit von Personen ergeben sich nur vernachlässigbar geringe Überschreitungen des Grenzwertes von 1500 ppm – im Jahr 2016 unter 1 % der Zeit, im Jahr 2017 unter 4 %, siehe Tabelle 1-3.

**Tabelle 1-3: Anzahl der Nutzungsstunden mit erhöhten $CO_2$-Konzentrationen**

| | Jahr 2016 | | Jahr 2017 | | 01.01.-31.08.2018 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | > 1000 ppm [h] | > 1500 ppm [h] | > 1000 ppm [h] | > 1500 ppm [h] | > 1000 ppm [h] | > 1500 ppm [h] |
| **Raum 1.08** | 307 | 3 | 515 | 67 | 332 | 60 |
| | 18,0% | 0,2% | 29,5% | 3,8% | 30,2% | 5,5% |
| **Raum 2.01** | 125 | 0 | Datenlücken | | 445 | 89 |
| | 7,3% | 0,0% | | | 41% | 8% |
| **Aula 0.26** | 14 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| | 0,7% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,1% | 0,0% |

Die Bemessung der Lüftungsanlage mit nur 18 m³/h je Schüler war demzufolge ausreichend. Und auch das Regelungskonzept – allein nach Präsenzmelder entweder offene oder geschlossene Volumenstromregler – war zielführend. Nach einer Einregulierungsphase im Jahr 2015 gab es keine Nutzerbeschwerden mehr hinsichtlich der Luftqualität.

Das Regelungskonzept der Aula ist grundsätzlich empfehlenswert, allerdings nur mit einem ausreichend gering eingestellten Minimalvolumenstrom. Da dies in der St. Franziskus-Grundschule nicht der Fall ist, werden innerhalb der Nutzungszeit nie die maximal zulässigen $CO_2$-Grenzwerte erreicht, sodass ein automatisches Nachregulieren der Anlage nicht stattfindet und somit nicht untersucht werden kann. Nach der Anpassung des minimalen Volumenstromes werden die $CO_2$-Gehalte steigen, jedoch aufgrund der fortbestehenden Grundlüftung im akzeptablen Bereich bleiben.

**Fensteröffnung**

Positiv ist, dass aufgrund der vorhandenen maschinellen Lüftung eine häufige manuelle Bedienung der Fenster nicht zwingend notwendig ist. Grundsätzlich ist es zu begrüßen und in Folgeprojekten unbedingt zu empfehlen, dass das Öffnen der Fenster trotz der Passivhausbauweise ermöglicht wird. Dies trägt maßgeblich zur Nutzerzufriedenheit bei.

Eine anderslautende Darstellung in der Lokalpresse, in der der Journalist zum Zeitpunkt des Einzuges über die Schule berichtete, man dürfe die Fenster nicht öffnen, führte zu vielen Nachfragen durch besorgte Eltern und zu noch immer anhaltender Verunsicherung in der Lehrerschaft.

Das Kastenfensterkonzept sieht vor, dass im Sommer der äußere Flügel zum Abführen von Stauwärme aus dem Kastenbereich angekippt wird, während der innere Flügel geschlossen bleibt. Im Winter soll umgekehrt die Wärme des Kastenbereiches genutzt werden, indem der äußere Flügel geschlossen bleibt und der innere geöffnet wird. Die Fensterstellung wurde im Monitoring durch Kennzahlen in bit erfasst: 0 bit = mindestens ein offener Flügel jeweils innen und außen, 2 bit = Winterfall, 8 bit = Sommerfall, 10 bit = alles geschlossen.

Abbildung 1-4 stellt exemplarisch die registrierte Fensteröffnung für alle drei Fenster im südorientierten Klassenraum 1.08 für die Jahre 2016 und 2017 dar, hier in Abhängigkeit von der gemessenen Raumlufttemperatur in Klasse 1.08. In der Darstellung wurde eine Beschränkung auf die Nutzungszeit von Montag bis Freitag 7 bis 15 Uhr vorgenommen, da die Nutzer nur in dieser Zeit aktiv Einfluss auf die Fenster nehmen können.

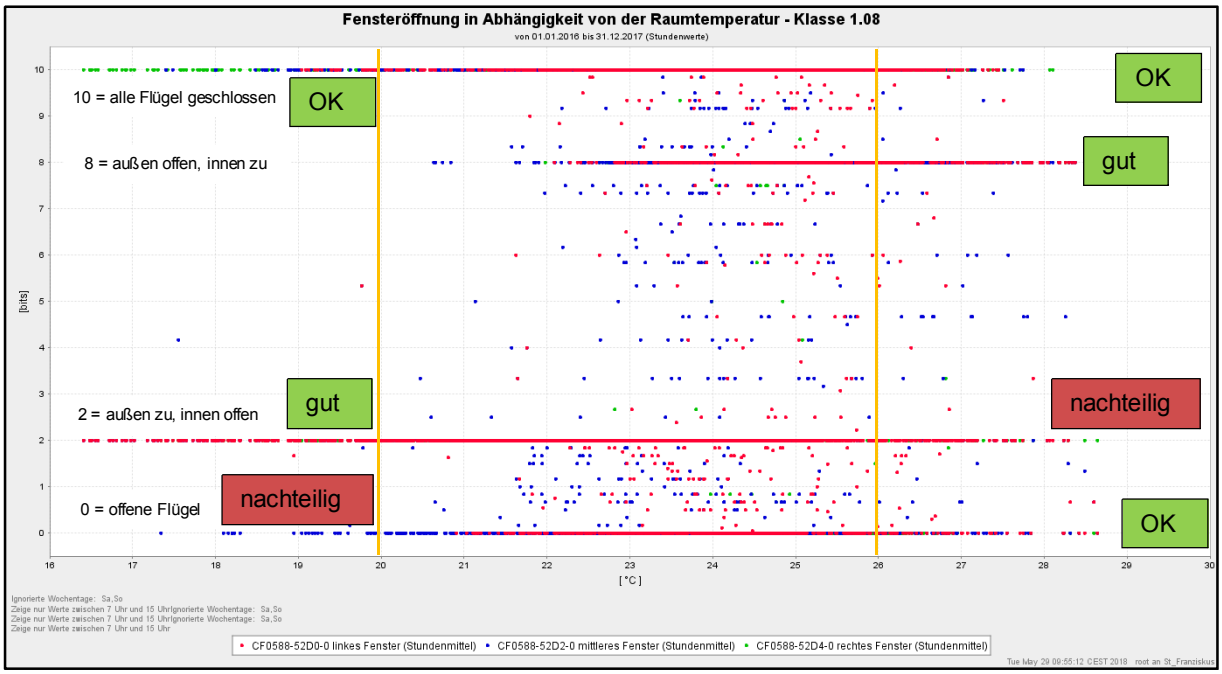


**Abbildung 1-4: Fensteröffnung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur – Jahre 2016 bis 2017**

Betrachtet man den linken Bereich, in dem die Solltemperatur von 20 °C unterschritten wurde, so ist positiv anzumerken, dass der Winterfall (2 bit), der die Ausnutzung der Stauwärme aus dem Kastenbereich ermöglichen soll, korrekt umgesetzt wurde. Auch wurde an kühleren Tagen offenbar häufig zu der Maßnahme gegriffen, alle Flügel komplett zu schließen (10 bit). Ob in dieser Zeit theoretisch Wärmegewinne aus dem Kastenbereich möglich gewesen wären, lässt sich hier nicht ablesen. Diese Thematik wurde in Abschlussbericht Teil 6 an Beispielen untersucht.

In Bezug auf den Übertemperaturbereich (rechts im Bild) ist zunächst positiv anzumerken, dass die sommerliche Einstellung der Fenster (8 bit, Außenflügel offen, Innenflügel zu) zur Abführung von Stauwärme häufig korrekt umgesetzt wurde. Auch die Komplettöffnung der Fenster ist hier nachvollziehbar, wenngleich dies bei ähnlich hohen Außentemperaturen kaum zu einer Verbesserung der Behaglichkeit führt – was in dieser Darstellung nicht überprüft werden kann. Jedoch: die Winterposition (2 bit) sollte bei einer ohnehin zu hohen Raumtemperatur künftig vermieden werden, da diese zusätzlich die Wärme aus dem Kastenbereich in den Raum lässt.

Sofern die Überhitzung auf eine hohe solare Einstrahlung zurückzuführen ist, sollte auch eine komplette Schließung der Fenster nicht erfolgen, da diese zu einer Aufheizung des Kastenbereiches führt.

Während eines Vor-Ort-Termins im Raum 1.08 wurden am 29.09.2017 erhebliche Unstimmigkeiten beim Monitoring aller Fensterkontakte der drei Kastenfenster in Raum 1.08 festgestellt. Alle Innenflügel der Kastenfenster waren an dem Tag offen und alle Außenflügel zu. Bei einem anschließenden Blick auf die entsprechende Tagesdatei zeigte sich jedoch, dass das Monitoring für diesen Tag genau gegenteilige Zustände meldete. Daraufhin wurden am 05.01.2018 alle Kontakte systematisch überprüft.

Trotz einiger dabei festgestellter Unstimmigkeiten bei der Erfassung der Öffnungszustände ergibt sich insgesamt ein schlüssiges Bild. Jedoch: ein Monitoring des Fensteröffnungsverhaltens in der hier umgesetzten Form ist nicht weiterzuempfehlen. Das System erwies sich als sehr fehleranfällig und war zudem aufgrund der Parallelschaltung von Kontakten nicht in der Lage, alle möglichen Zustände der vier Flügel abzubilden, sondern nur vier Zustände.

Der Nutzereinfluss – und damit eine mögliche Verbesserung des Raumklimas – durch Ausschöpfen aller gegebenen Optionen (Öffnen/Schließen der Fenster, Einstellen der Jalousien) ist größer als die meisten befragten Nutzer dies vermuten. Um dem Nutzer eine Hilfestellung zu geben, ob die Fensterlüftung sinnvoll ist, wurde im Mai 2018 eine Gebrauchsanleitung entworfen, die die weitere Bedienung abhängig von den vorherrschenden Temperaturen außen, im Fensterkasten und im Raum darstellt.

Im Fall, dass es den Nutzern zu kalt ist (Abbildung 1-5, links), wird die Fensterkastentemperatur (oben im Display) mit der Raumlufttemperatur (unten im Display) verglichen, um eine Entscheidung zu ermöglichen, ob der „Wintergarteneffekt“ durch Öffnen des Innenflügels genutzt werden kann. Im Fall des zu warm empfundenen Raumes (Abbildung 1-5, rechts) wird die Außentemperatur (oben im Display) mit der Raumtemperatur (unten im Display) verglichen, um bei der Entscheidung zu helfen, ob das Öffnen der Fenster etwas bringt. Zum Einsatz kommen hierfür Funkthermometer im unteren Preissegment.

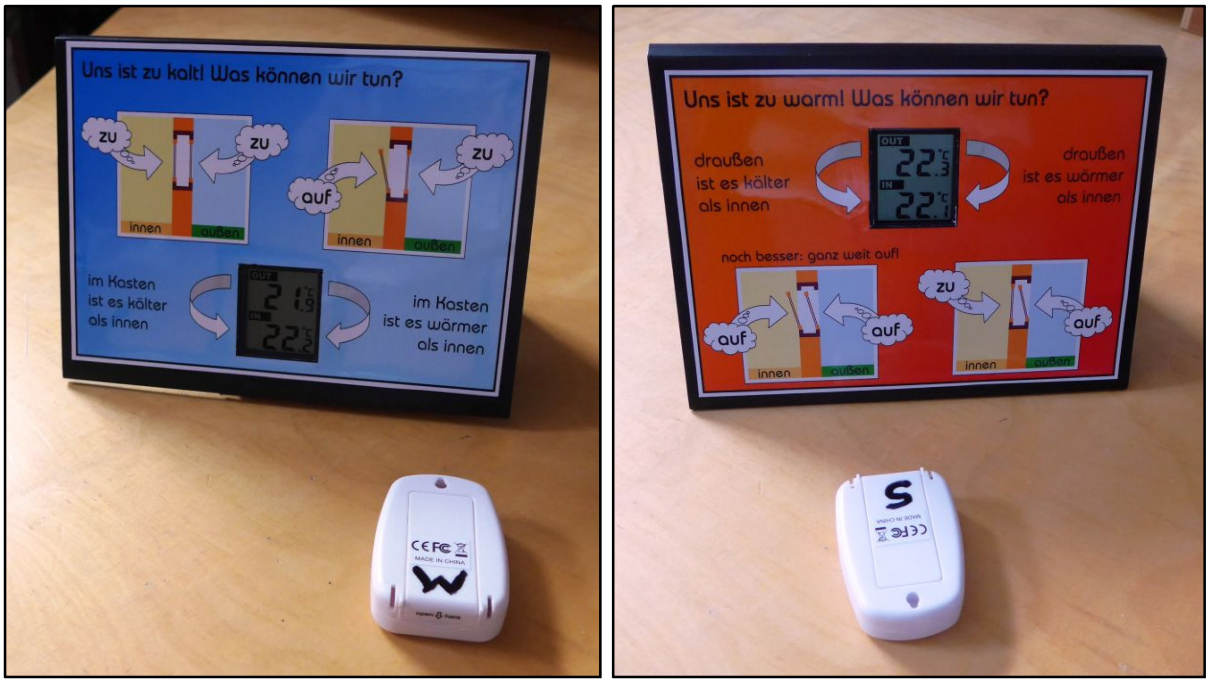


**Abbildung 1-5: Entwurf Bedienungsanleitung: Links „zu kalt“, Rechts: „zu warm“**

### Nachhallzeit und Raumakustik

In den Unterrichtsräumen wurde insgesamt ein hohes Qualitätsniveau hinsichtlich der Nachhallzeit umgesetzt. Hierfür wurden in den Klassenräumen schallabsorbierende Holzwolleplatten vom Fabrikat Heradesign über dem Sitzbereich der Schüler installiert, was jedoch gemäß DIN 18041 hinsichtlich der Anordnung als ungünstig bewertet wird [6]. Die Absorption tieffrequenter Schallsignale sollte nach [7] idealerweise „in der Nähe der Schallquelle sowie in Raumecken und an Raumkanten“ erfolgen. Tatsächlich zeigen die Messungen in den Räumen 1.08 und 2.01 Überschreitungen der Nachhallzeit im niederfrequenten Bereich. Die Nutzerbefragung mit der Begleitforschung am 14. April 2015 hat ergeben, dass die Lehrer die Räume trotz ihrer Länge als still und die Akustik als sehr gut empfinden. Das Klima trage zu einem konzentrierten Arbeiten bei. Auch in einer erneuten Nutzerbefragung am 29.09.2017 wurde die gute Sprachverständlichkeit gelobt.

### Befragungen

Sporadisch zu bestimmten Themen durchgeführte Befragungen zeigten ein gemischtes Bild zur Kenntnis der Nutzer über die Zusammenhänge zwischen Anlagen- bzw. Gebäudebedienung und Auswirkungen auf das Raumklima. Insbesondere die kombinierte Bedienung der Jalousien, Kastenfenster und Beleuchtungsregelung (siehe Abschlussbericht Teil 12) ist offensichtlich nicht selbsterklärend.

Die Gebäudenutzer können aktiv Einfluss nehmen auf die:

- Raumlufttemperatur durch Öffnen der Kastenfenster (ein oder beide Flügel) sowie Einstellungen der Jalousien (schwarz/silber, hoch/runter, geschlossen/geöffnet),
- Blendung und Tageslichtversorgung durch Einstellungen der Jalousien (schwarz/silber, hoch/runter, geschlossen/geöffnet),
- Beleuchtungsstärke durch Kunstlichteinstellungen (Programme, Übersteuerung) sowie Einstellungen der Jalousien (hoch/runter, geschlossen/geöffnet).

# 2 Sommerlicher Wärmeschutz

In diesem Kapitel wird zunächst die Vorgehensweise beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes erläutert. Daraufhin werden die Ergebnisse getrennt nach der alten (2003) und neuen (2013) Fassung der DIN 4108-2 aufgeführt [2] [1]. Am Beispiel der Aula wird untersucht, ob es einen messbaren Effekt auf die Behaglichkeit und die Oberflächentemperaturen raumseitig der Solarkollektorwand gibt.

Ziel des sommerlichen Wärmeschutzes ist es, Menschen einen behaglichen Wohn- und Arbeitsraum mit zumutbaren sommerlichen Innentemperaturen zu schaffen, ohne dabei auf kosten- und energieintensive maschinelle Kühlmaßnahmen zurückgreifen zu müssen.

Im Rahmen des Monitorings wurde der sommerliche Wärmeschutz mit dem Sonneneintragskennwerteverfahren für alle Räume der Grundschule in einer EXCEL-Tabelle durchgerechnet. Die Berechnungsdaten finden sich in Anhang A. Auf eine Gebäudesimulation wurde verzichtet.

Zum Zeitpunkt der Planung im Jahre 2011 galt die EnEV 2009. Diese verweist in der Anlage 1 Punkt 3 auf die DIN 4108-2 mit dem damaligen Stand 2003 [1]. Während der Projektlaufzeit erschien die DIN 4108-2:2013 [2], weshalb die Berechnungen zum Vergleich der Ergebnisse auch nach neuer Norm durchgeführt wurden.

**Überprüfung des Fensterflächenanteils und Finden kritischer Räume**

Zunächst wurde in einer EXCEL-Tabelle für alle Räume des Gebäudes der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil ermittelt. Räume, die den Grenzwert nach DIN 4108-2:2003 Tabelle 7 bzw. DIN 4108-2:2013 Tabelle 6 (siehe Abbildung 2-1) von 10 % (bei nordorientierten Räumen 15%) für den Fensterflächenanteil einhalten, fielen somit aus der weiteren Nachweisführung sofort heraus.

**Tabelle 6 — Zulässige Werte des Grundflächen bezogenen Fensterflächenanteils, unterhalb dessen auf einen sommerlichen Wärmeschutznachweis verzichtet werden kann**

| Spalte | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| Zeile | **Neigung der Fenster gegenüber der Horizontalen** | **Orientierung der Fenster**[a] | **Grundflächen bezogener Fensterflächenanteil**[b] $f_{WG}$ % |
| 1 | über 60° bis 90° | Nordwest- über Süd bis Nordost | 10 |
| 2 | | Alle anderen Nordorientierungen | 15 |
| 3 | von 0° bis 60° | Alle Orientierungen | 7 |

[a] Sind beim betrachteten Raum mehrere Orientierungen mit Fenstern vorhanden, ist der kleinere Grenzwert für $f_{WG}$ bestimmend.

[b] Der Fensterflächenanteil $f_{WG}$ ergibt sich aus dem Verhältnis der Fensterfläche (siehe Bild 2) zu der Grundfläche des betrachteten Raumes oder der Raumgruppe. Sind beim betrachteten Raum bzw. der Raumgruppe mehrere Fassaden oder z. B. Erker vorhanden, ist $f_{WG}$ aus der Summe aller Fensterflächen zur Grundfläche zu berechnen.

**Abbildung 2-1: Zulässige Werte des Fensterflächenanteils bezogen auf die Grundfläche [2]**

Diese erste Überprüfung ergab, dass 42 von 91 Räumen allein aus dieser Hinsicht unkritisch sind. Alle weiteren verbleibenden Räume wurden unabhängig ihrer Nutzungsanforderungen in die weiteren Schritte der Nachweisführung mitgenommen. Die angenommenen Grunddaten und die Vorgehensweise der Nachweisführung werden im Folgenden erläutert.

### Sommerklimaregion C und resultierende Grenzwerte

Der Standort Halle ist der Sommerklimaregion C (sommerheiß) zuzuordnen. Der Grenzwert der Innentemperatur, der an nicht mehr als 10 % der Aufenthaltszeit überschritten werden sollte, beträgt nach DIN 4108-2:2003 Tabelle 6 bzw. DIN 4108-2:2013 Tabelle 9 demnach 27 °C. Die neuere Norm hat zudem den Anforderungswert an die Übertemperaturgradstunden in Kelvinstunden pro Jahr eingeführt, welcher für Nichtwohngebäude bei 500 Kh/a liegt.

### Bauschwere: leichte Bauart

Die Bauschwere wird über die wirksame Wärmespeicherfähigkeit $c_{wirk}$ der Oberflächen und Materialien bestimmt und beeinflusst maßgeblich den Ausnutzungsgrad der solaren und internen Wärmegewinne sowie die Wirksamkeit der Nachtabsenkung. Im Sommer sind besonders Bauarten mit hoher Speichermasse von Vorteil. Das Gebäude entspricht von seiner Bauart in Holzrahmenbauweise mit abgehängten Decken einer typischen leichten Bauart ($c_{wirk} \leq 50$ Wh/m²K). Obwohl im Rahmen einer Masterarbeit [8] die Speicherfähigkeit der Aula mit 66 Wh/m²K entsprechend einer mittleren Bauschwere ermittelt wurde, wurde für das Gesamtgebäude – auf der sicheren Seite liegend – weiter von einer leichten Bauweise ausgegangen.

### Sonnenschutzvorrichtungen

Im Kastenbereich der Kastenfenster befindet sich an der Außenseite des Innenflügels eine elektrisch angetriebene Jalousette vom Fabrikat Faltenbacher Jalousie F-02 (Abbildung 2-3 links). Wird der innere Fensterflügel geöffnet, bewegt sich demnach auch die Verschattung mit, siehe Abbildung 2-2. Mit dieser Anordnung wird die Verschattungsanlage vor Witterungseinflüssen geschützt.

Die Jalousetten weisen eine Absorberseite (schwarz) und eine Reflektorseite (reflektierend) auf. Die Lamellenbreite beträgt 25 mm. Die Bedienung erfolgt manuell durch die Nutzer, wobei es fünf mögliche Neigungswinkel gibt: waagerecht sowie 45 ° bzw. 90 ° Neigung jeweils in beide Richtungen.

**Abbildung 2-2: Blick in den Fensterkasten, hochgefahrene Jalousie rechts am Innenflügel**

Im Scheibenzwischenraum der Pfosten-Riegel-Fassade der Aula befindet sich eine innenliegende Jalousie vom Typ Isolette, welche mit einem Jalousieantrieb Encoder BA 11-300/500 bewegt wird. Durch den hermetischen Einbau ist die Jalousie vor äußeren Einflüssen geschützt und gemäß Herstellerangaben wartungsfrei. Jedoch kam es bei einer Scheibe bereits zu einem Defekt, der den Ausbau der Scheibe, die Öffnung des Randverbundes und eine Reparatur des Antriebs notwendig machte. Seither herrscht die globale Anweisung, den Sonnenschutz nicht mehr hoch- und runterzufahren, sondern nur noch den Drehwinkel zu bedienen (Abbildung 2-3 rechts).

**Abbildung 2-3: Jalousien in den Kastenfenstern und der Pfosten-Riegel-Fassade**

## *2.1 Ergebnisse nach DIN 4108-2, Ausgabe 2003*

### Vorhandener Sonneneintrag $S_{vorh}$

Für alle Räume wurde über die Fensterflächen $A_w$ und die Gesamtenergiedurchlassgrade $g_{tot}$ (aus $g \cdot F_C$) der transparenten Flächen inkl. Sonnenschutz geteilt durch die Grundflächen $A_G$ der Räume der jeweils vorhandene Sonneneintragskennwert $S_{vorh}$ ermittelt:

$$S_{vorh} = \frac{\sum_j A_{w,j} * g_{tot,j}}{A_G} \leq S_{zul}$$

Für die Jalousetten im Fensterkastenbereich wurde dabei nach DIN 4108-2:2003 Tabelle 8 Zeile 2.1 [1] ein $F_C$-Wert von 0,75 angesetzt (Sonnenschutz zwischen den Scheiben, reflektierende Oberfläche mit geringer Transparenz).

### Zulässiger Sonneneintrag $S_{zul}$

Die zulässigen Sonneneintragskennwerte $S_{zul}$ ergeben sich aus der Summe der einzelnen Sonneneinträge $S_x$. Im Fall der St. Franziskus-Grundschule sind dies folgende Parameter:

- $S_1$ = 0,015 für Klimaregion C (Zeile 1.3)
- $S_2$ = 0,06 * (Fensterfläche + 0,3 * Außenwandfläche + 0,1 * Dachfläche) / Nettogrundfläche; Annahme: leichte Bauart
- $S_3$ = 0,02; leichte Bauart
- $S_4$ = nicht zutreffend, da keine Sonnenschutzverglasung
- $S_5$ = nicht zutreffend, da keine Fensterneigung < 60°
- $S_6$ = 0,10 * (nordorientierte Fensterfläche/gesamte Fensterfläche)

Im Zuge der Überprüfung, ob die Anforderung $S_{vorh} \leq S_{zul}$ erfüllt wird, konnte für 21 der nachweispflichtigen 49 Räume der Nachweis erfüllt werden.

Die folgende Tabelle 2-1 listet die Räume auf, für die der sommerliche Wärmeschutz mit dem vereinfachten Verfahren nicht erfüllt werden konnte. Die Sortierung erfolgt von der größten zur kleinsten Differenz zwischen $S_{vorh}$ und $S_{zul}$.

Hieraus ist ersichtlich, dass die kritischsten Räume der Windfang, die Treppenhäuser und das Foyer sind. Hierbei handelt es sich um Verkehrsflächen und keine klassischen Aufenthaltsräume.

Betrachtet man die Aufenthaltsräume, so gehören das Wohnzimmer 2.28 und das Schlafzimmer 2.25 der Hausmeisterwohnung, der Mitarbeiterraum 0.08, der Erste-Hilfe-Raum 1.24 und die Aula 0.26 zu den zahlenmäßig kritischsten Räumen. Problematischer für eine große Anzahl Nutzer ist jedoch anzusehen, dass auch die Klassenräume 1.07, 1.08 und 2.08 den Nachweis nicht erfüllen.

Bezüglich des Foyers und der Aula konnte in der Norm kein Hinweis gefunden werden, wie mit zweigeschossigen Räumen verfahren wird. Da einige Berechnungsanteile sich auf die Grundfläche und nicht auf das (dann doppelte) Raumvolumen beziehen, könnten zweigeschossige Räume mit hohem Fassadenanteil nicht hinreichend abgebildet sein.

**Tabelle 2-1: Sommerlicher Wärmeschutz nicht erfüllt – DIN 4108-2:2003**

| Raum | Funktion | Fenster nach | $S_{vorh}$ | S1 | S2 | S3 | S6 | $S_{zul}$ | $S_{vorh}$-$S_{zul}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 020 | Windfang | Süd | 0,44 | 0,015 | 0,066 | 0,02 | | 0,10 | 0,340 |
| 206 | Treppenhaus | West | 0,21 | 0,015 | 0,039 | 0,02 | | 0,07 | 0,140 |
| 231 | Treppenhaus | Ost | 0,21 | 0,015 | 0,039 | 0,02 | | 0,07 | 0,140 |
| 228 | Wohnzimmer | Süd + Ost | 0,19 | 0,015 | 0,062 | 0,02 | | 0,10 | 0,098 |
| 021 | Foyer/Luftraum | Süd | 0,16 | 0,015 | 0,032 | 0,02 | | 0,07 | 0,090 |
| 119 | Treppenhaus | Ost | 0,11 | 0,015 | 0,019 | 0,02 | | 0,05 | 0,054 |
| 106 | Treppenhaus | West | 0,10 | 0,015 | 0,018 | 0,02 | | 0,05 | 0,049 |
| 008 | Mitarbeiter | Ost | 0,11 | 0,015 | 0,034 | 0,02 | | 0,07 | 0,04 |
| 124 | Archiv/1.Hilfe | Süd | 0,12 | 0,015 | 0,050 | 0,02 | | 0,09 | 0,035 |
| 225 | Schlafzimmer | Süd | 0,09 | 0,015 | 0,028 | 0,02 | | 0,06 | 0,031 |
| 026 | Aula/Luftraum | Süd | 0,07 | 0,015 | 0,009 | 0,02 | | 0,04 | 0,028 |
| 123 | Sekretariat | Süd | 0,08 | 0,015 | 0,021 | 0,02 | | 0,06 | 0,025 |
| 121 | Besprechung | Ost | 0,07 | 0,015 | 0,022 | 0,02 | | 0,06 | 0,017 |
| 034 | Personal | Ost | 0,10 | 0,015 | 0,051 | 0,02 | | 0,09 | 0,014 |
| 033 + 033a | Küche/Spülküche | Süd | 0,08 | 0,015 | 0,027 | 0,02 | | 0,06 | 0,013 |
| 012 | Medien | Süd | 0,07 | 0,015 | 0,026 | 0,02 | | 0,06 | 0,013 |
| 013 | Entspannung | Süd | 0,07 | 0,015 | 0,026 | 0,02 | | 0,06 | 0,013 |
| 108 | Klasse | Süd | 0,06 | 0,015 | 0,017 | 0,02 | | 0,05 | 0,013 |
| 107 | Klasse | Süd | 0,06 | 0,015 | 0,023 | 0,02 | | 0,06 | 0,007 |
| 007 | Büro | Nord + Ost | 0,17 | 0,015 | 0,058 | 0,02 | 0,07 | 0,16 | 0,01 |
| 208 | Klasse | Süd | 0,06 | 0,015 | 0,024 | 0,02 | | 0,06 | 0,006 |
| 025 | Garderobe | West | 0,07 | 0,015 | 0,030 | 0,02 | | 0,06 | 0,005 |
| 014 | Werkstatt | Süd | 0,06 | 0,015 | 0,023 | 0,02 | | 0,06 | 0,004 |
| 114 | Raum der Stille | West | 0,07 | 0,015 | 0,027 | 0,02 | | 0,06 | 0,004 |
| 214 | Kunst | Süd + West | 0,07 | 0,015 | 0,032 | 0,02 | | 0,07 | 0,003 |
| 024 | Garderobe | West | 0,06 | 0,015 | 0,027 | 0,02 | | 0,06 | 0,002 |
| 023 | Garderobe | West | 0,06 | 0,015 | 0,027 | 0,02 | | 0,06 | 0,002 |
| 122 | Schulleiter | Süd | 0,05 | 0,015 | 0,018 | 0,02 | | 0,05 | 0,001 |

## *2.2 Ergebnisse nach DIN 4108-2, Ausgabe 2013*

Darüber hinaus wurden die Berechnungen entsprechend der DIN 4108-2 Ausgabe 2013 durchgeführt.

### Vorhandener Sonneneintrag $S_{vorh}$

Gegenüber der Ausgabe 2003 hat sich für die Jalousetten im Fensterkastenbereich nun nach Tabelle 7 Zeile 2.1 [2] ein $F_C$-Wert von 0,70 ergeben, was rechnerisch zu geringeren Sonneneinträgen als nach alter Norm führt (dort: $F_C$ = 0,75). Da die Tabelle keine Vierfachverglasung vorsieht, wurde auf den Wert der Dreifachverglasung zurückgegriffen.

### Zulässiger Sonneneintrag $S_{zul}$

Die zulässigen Sonneneintragskennwerte $S_{zul}$ ergeben sich aus der Summe folgender Parameter:

- $S_1$ = 0,048 für Nichtwohngebäude leichter Bauart mit erhöhter Nachtlüftung, Klimaregion C
- $S_2$ = 0,03 – (0,115 * (Fensterfläche/Nettogrundfläche))
- $S_3$ = nicht zutreffend, da keine Sonnenschutzverglasung
- $S_4$ = nicht zutreffend, da keine Fensterneigung < 60°
- $S_5$ = 0,10 * (nordorientierte Fensterfläche/gesamte Fensterfläche)
- $S_6$ = 0,02 für leichte Bauart

Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die 12 Räume, die den Nachweis nicht erfüllen konnten. Auch hier erfolgt die Sortierung absteigend nach der Differenz. Es zeigt sich wieder, dass die rechnerisch kritischsten Räume Verkehrsflächen sind. Lässt man diese in der Betrachtung außen vor, sind weiterhin das Wohnzimmer 2.28 der Hausmeisterwohnung, der Erste-Hilfe-Raum 1.24, der Mitarbeiterraum 0.08 und der Personalraum 0.34 die zahlenmäßig kritischsten Räume.

Dass mit dem neuen Nachweisverfahren deutlich mehr Räume den Nachweis erfüllen können, ist einerseits darauf zurückzuführen, dass der $F_C$-Wert der Sonnenschutzvorrichtung von 0,75 auf 0,70 gesunken ist und somit der Sonneneintrag rechnerisch kleiner wurde. Andererseits wurde mit $S_{1,zul}$ = 0,048 die erhöhte Nachtlüftung mit einem Luftwechsel von $n \geq 2\ h^{-1}$ honoriert, was nach alter Norm nicht vorgesehen war. Dies führt zu einer Erfüllung des Nachweises in den Klassenräumen.

**Tabelle 2-2: Sommerlicher Wärmeschutz nicht erfüllt – DIN 4108-2:2013**

| Raum | Funktion | Fenster nach | $S_{vorh}$ | S1 | S2 | S5 | S6 | $S_{zul}$ | $S_{vorh}$-$S_{zul}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 020 | Windfang | Süd | 0,44 | 0,048 | -0,080 | | | -0,03 | 0,47 |
| 206 | Treppenhaus | West | 0,21 | 0,048 | -0,017 | | | 0,03 | 0,18 |
| 231 | Treppenhaus | Ost | 0,21 | 0,048 | -0,017 | | | 0,03 | 0,18 |
| 228 | Wohnzimmer | Süd + Ost | 0,18 | 0,078 | -0,055 | | 0,02 | 0,04 | 0,14 |
| 021 | Foyer/Luftraum | Süd | 0,16 | 0,048 | -0,015 | | 0,02 | 0,05 | 0,10 |
| 119 | Treppenhaus | Ost | 0,11 | 0,048 | 0,006 | | | 0,05 | 0,05 |
| 124 | Archiv/1.Hilfe | Süd | 0,11 | 0,048 | -0,006 | | 0,02 | 0,06 | 0,05 |
| 106 | Treppenhaus | West | 0,10 | 0,048 | 0,007 | | | 0,06 | 0,05 |
| 008 | Mitarbeiter | Ost | 0,11 | 0,048 | -0,003 | | 0,02 | 0,06 | 0,04 |
| 034 | Personal | Ost | 0,09 | 0,048 | 0,001 | | 0,02 | 0,07 | 0,02 |
| 007 | Büro | Nord + Ost | 0,16 | 0,048 | -0,019 | 0,10 | 0,02 | 0,15 | 0,01 |
| 123 | Sekretariat | Süd | 0,08 | 0,048 | 0,006 | | 0,02 | 0,07 | 0,00 |

## *2.3 Messorte und Messtechnik*

Während der Planungsphase und der Erstellung des Monitoringkonzeptes wurde die Aula mit ihrer großen Südausrichtung und dem hohen Fensterflächenanteil als besonders kritischer Raum hinsichtlich der sommerlichen Überwärmung angesehen. Zudem sind in die Außenwand die Solarkollektoren integriert, von denen ein Wärmeeintrag über die Innenseite der Aula erwartet wurde.

Ziel des Messkonzeptes war es daher, den Einfluss der Außenwand mit integrierten Solarkollektoren auf die raumseitige Oberflächentemperatur und die Raumlufttemperatur in der Aula zu untersuchen. Der Aufbau der Solarwandkonstruktion ist im Abschlussbericht Teil 6, Kapitel 2.1 detailliert beschrieben.

Die Solarwand wurde auf der Südseite der Grundschule im Bereich des Haupteingangs und der Aula installiert. Sie weist einen U-Wert von 0,161 W/(m²K) auf. Es befinden sich mehrere Messfühler sowohl in verschiedenen Ebenen der Solarwand (außen = Kollektorrückseite/Wandaußenseite, Mitte = Mitte der Dämmschicht, innen = raumseitig der Dämmung) als auch in drei verschiedenen Höhen (oben, Mitte, unten), sodass sich neun Fühler innerhalb dieser Wand ergeben. Zusätzlich gibt es zwei Messpunkte auf der raumseitigen Wandoberfläche: an der Solarwand und an einer Referenzwand (normale Außenwand ohne Kollektor, rot in Abbildung 2-4).

Aufgrund der hohen Temperaturen der Solarflüssigkeit in der Kollektorfläche ist zu vermuten, dass diese im Sommer einen negativen Effekt auf den sommerlichen Wärmeschutz und im Winter einen positiven Effekt auf u. U. nutzbare Wärmeeinträge zur Folge haben könnten.

Abbildung 2-4 zeigt die Lage der Fühler im Solarkollektor (blau) und des Fühlers in der Referenzwand (rot).

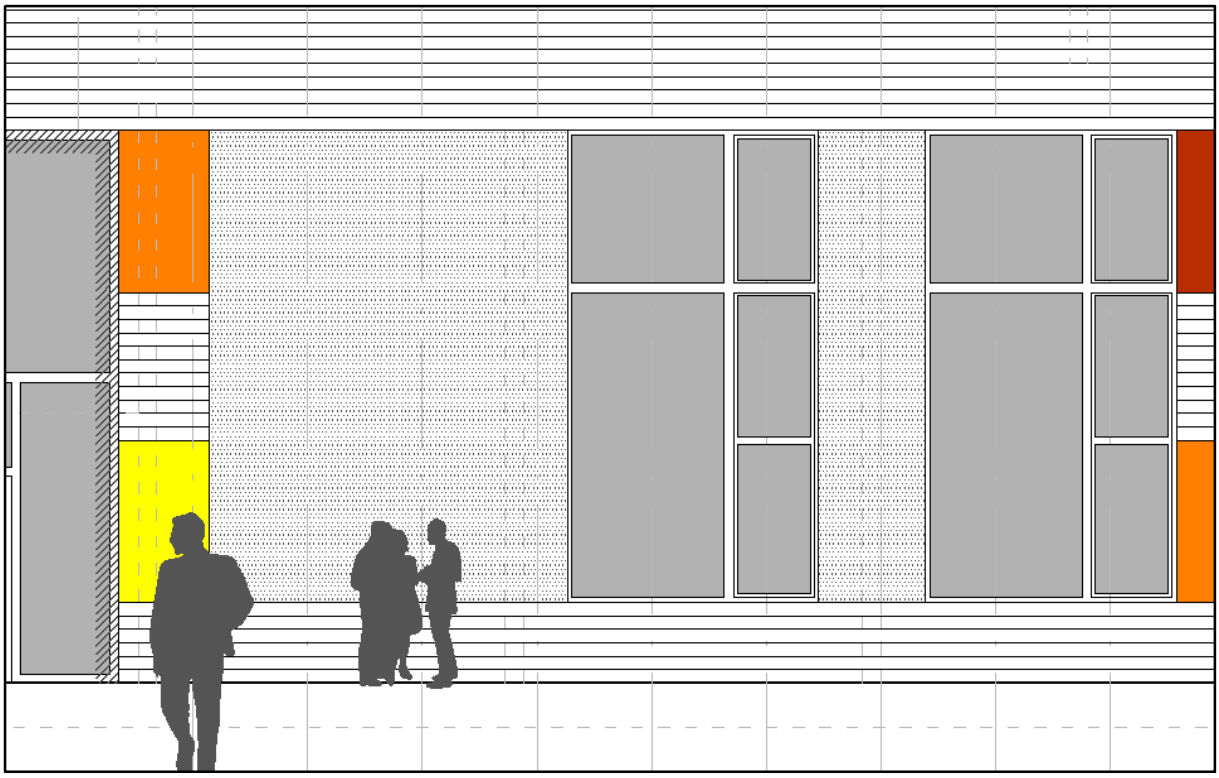

**Abbildung 2-4: Lage der Fühler gemäß Messkonzept**

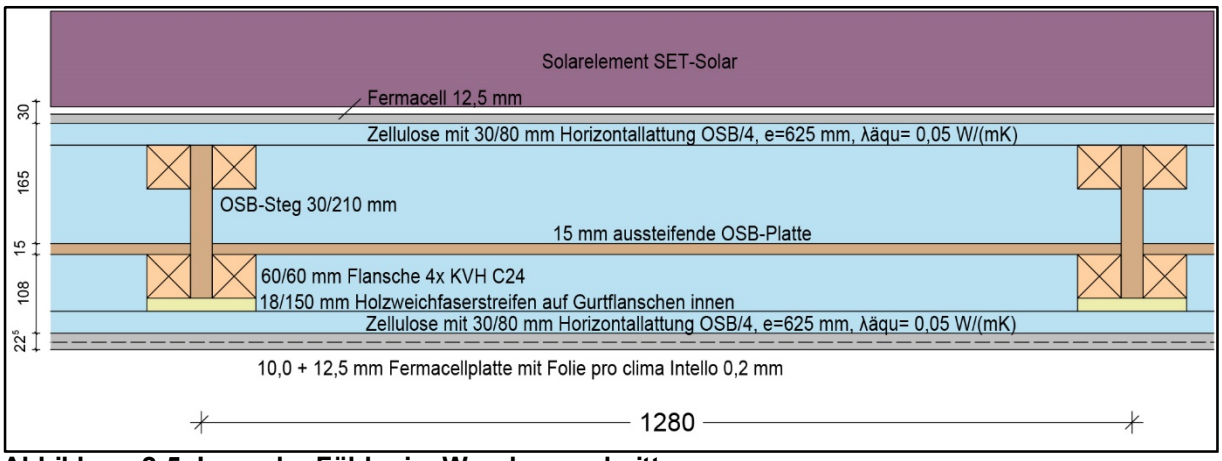


**Abbildung 2-5: Lage der Fühler im Wandquerschnitt**

In der nachfolgenden Tabelle 2-3 sind alle relevanten Messpunkte der Solarwand aufgelistet.

**Tabelle 2-3: Messpunkte bezüglich Solarkollektorwand**

| Kürzel | Ein-heit | Gruppe | Unter-gruppe | Beschreibung |
|---|---|---|---|---|
| DF0220-161C-0 | °C | SOL | KOL | Kollektortemperatur_1_mitte |
| DF0220-162C-0 | °C | SOL | KOL | Kollektortemperatur_1_unten |
| DF0220-163C-0 | °C | SOL | KOL | Kollektortemperatur_2_oben |
| DF0220-164C-0 | °C | SOL | KOL | Kollektortemperatur_2_mitte |
| DF0220-165C-0 | °C | SOL | KOL | Kollektortemperatur_2_unten |
| DF0220-166C-0 | °C | SOL | KOL | Kollektortemperatur_1_oben |
| DF0220-1690-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_oben_innen |
| DF0220-1692-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_unten_innen |
| DF0220-1694-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_oben_mitte |
| DF0220-1696-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_mitte_aussen |
| DF0220-169A-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_mitte_innen |
| DF0220-169C-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_mitte_mitte |
| DF0220-169E-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_unten_aussen |

| Kürzel | Ein-heit | Gruppe | Unter-gruppe | Beschreibung |
|---|---|---|---|---|
| DF0220-2690-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_raumseitig_an_der_Solarwand |
| DF0220-2692-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_raumseitig_an_der_Referenzwand |
| DF0220-2694-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_unten_mitte |
| DF0220-269C-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_mitte_mitte |
| DF0220-269E-0 | °C | BAU | AWS | Temperatur_in_Kollektorwand_oben_aussen |
| DF0321-3660-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_10_cm |
| DF0321-3662-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_100_cm |
| DF0321-3664-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_2_m |
| DF0321-3666-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_3_m |
| DF0321-3668-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_4_m |
| DF0321-3660-6 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Aula |
| DF0321-6558-0 | °C | RLT | BTA | Ablufttemperatur_aus_Aula_im_Kanal |
| DF0321-7002-0 | °C | WET | WET | Aussentemperatur |
| DF0384-7001-0 | W/m² | WET | WET | Globalstrahlung_der_Wetterstation |

Die Messdaten der Aula wurden im Rahmen der Bachelorarbeit mit dem Titel „Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz und zur Temperaturbehaglichkeit in der Aula einer Passivhausschule in Halle“ von Julia Stresing ausgewertet [8].

## *2.4 Oberflächentemperaturen Aula*

### Plausibilität und Vergleich der drei Höhenpunkte

Für die Auswertung der Temperaturdurchgänge im Bauteil stehen Messpunkte in drei Höhen (oben/Mitte/unten) zur Auswahl, siehe Abbildung 2-4. Im ersten Schritt soll überprüft werden, ob und welche Temperaturunterschiede sich in den unterschiedlichen Höhen ergeben und ob die Werte plausibel erscheinen. Hierzu werden für die vier Messebenen jeweils die drei Höhen in Abbildung 2-6 grafisch dargestellt, sodass sich allein daraus 12 Kurven ergeben:

- Ebenen: Kollektor 1 = lila, Wand außen = dunkelblau, Wandmitte = grau, Wand innen = rot
- Höhen: oben = durchgezogene Linie, Mitte = gestrichelt, unten = gepunktet

Zusätzlich sind ein Messpunkt raumseitig der Solarwand (pink) und ein Messpunkt raumseitig der Referenzwand (ohne Kollektor, orange) dargestellt, deren Höhe nicht bekannt ist.

Es zeigt sich, dass die Kollektortemperaturen (lila) oben und in mittlerer Höhe fast deckungsgleich verlaufen, während die Kollektortemperatur im unteren Bereich etwas niedriger liegt. Die Kollektoren erreichen ihre maximale Temperatur meist gegen 15 Uhr.

Während die Wandaußenseite (Kollektorrückseite / Außenseite der Wand; hier dunkelblau dargestellt) ebenfalls oben und mittig gleich verläuft, liegt der Temperaturwert an der Außenseite unten weit darunter. Er verläuft in Anlehnung an die Außenlufttemperatur, die jedoch hier nicht angezeigt wird, da mit 14 Messpunkten das Maximum der darstellbaren Kurven in der genutzten Auswertesoftware MONISOFT erreicht war.
Für die äußeren Messpunkte oben/Mitte ist gut ablesbar, dass sie ihren Maximalwert gegen 18 Uhr erreichen, also mit einer zeitlichen Verschiebung von ca. drei Stunden gegenüber dem Kollektor. Der untere äußere Messwert hingegen erreicht sein Maximum zeitgleich mit dem Kollektor.

Bei den drei Messpunkten im Wandinneren (grau) fällt auf, dass der mittlere und der untere Wert sehr nah beieinanderliegen, während der obere Punkt meist ca. 2 K darüber verläuft. Auch hier ist eine Phasenverschiebung ablesbar, die gegenüber der Wandaußenseite ca. zwei Stunden beträgt. Die Kurve „Wandmitte oben“ liegt oftmals zwischen 21 und 12 Uhr oberhalb der Temperatur der Wandaußenseite.

Betrachtet man die Wandinnenseite (wahrscheinlich in der Installationsebene), so liegen der Fühler „Wand innen oben“ und „Wand innen Mitte“ nah beieinander, während der untere Messpunkt – genau wie an der Wandaußenseite auch – stark abweicht, in diesem Fall jedoch nach oben, wofür es keine plausible Erklärung gibt. Es dürfte sich um einen Messfehler handeln.

Die Kurve der Wandinnenoberfläche an der Solarwand (pink) liegt dauerhaft ca. 4 K oberhalb der Kurve an der Referenzwand ohne Solarwand (orange). Dies deutet zunächst darauf hin, dass es zu einem messbaren Temperaturdurchgang von außen nach innen aufgrund der hohen Kollektortemperaturen kommt.

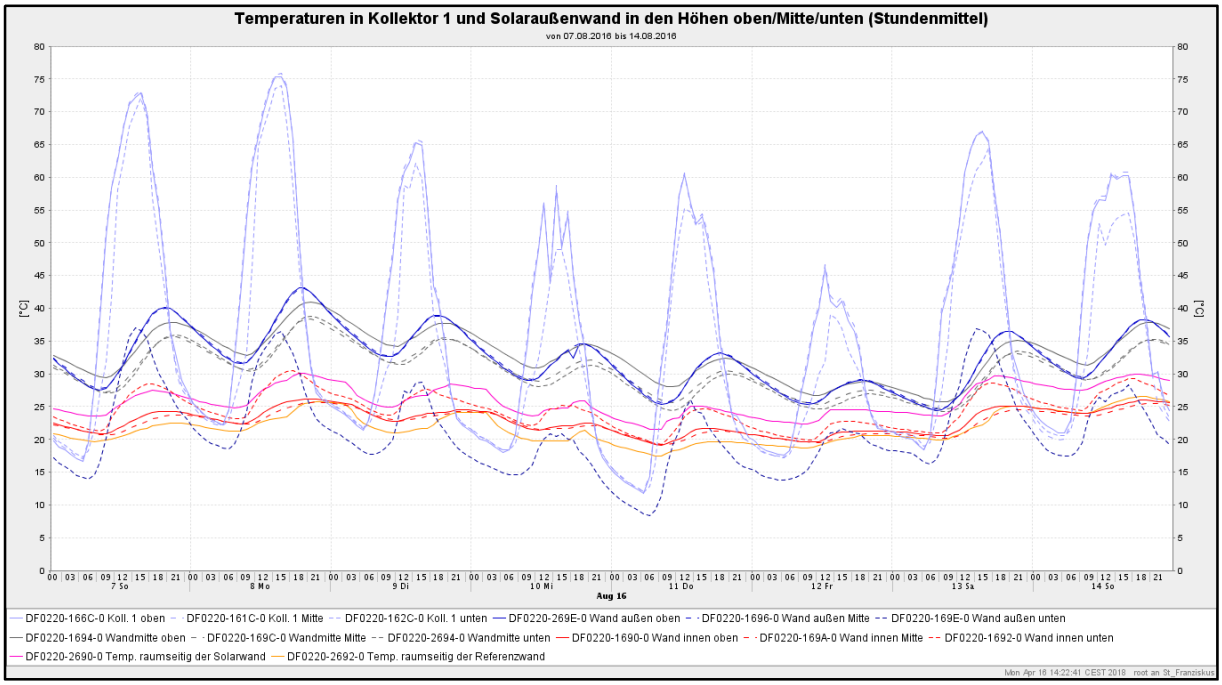


**Abbildung 2-6: Temperaturen der Solarwand in drei Höhen und vier Ebenen**

Die Messwerte der oberen und mittleren Höhe erscheinen verlässlich und plausibel. Für die folgenden Auswertungen wurde daher durchgehend exemplarisch der Bauteildurchgang im Höhenpunkt „Mitte“ ausgewählt. Stichproben ergaben, dass sich die Verläufe auf der mit „oben“ bezeichneten Höhe sehr ähnlich darstellen, weshalb auf eine detaillierte Auswertung verzichtet wird, um Dopplungen zu vermeiden. Eine Auswertung auf der unteren Höhe wird nicht vorgenommen, da die vorbeschriebene Plausibilitätsprüfung unklare Abweichungen ergab.

Die folgende Abbildung 2-7 zeigt Innenthermographien der Solarwand mit außenseitiger Solarkollektorfassade. Sehr gut erkennbar ist die Leitungsführung in der Wand. Da Teile der Wand bei der Montage der Fühler schon zwischenbeplankt waren, war die genaue Leitungsführung nicht mehr erkennbar. Es kann demnach nicht ausgeschlossen werden, dass sich Innenfühler in Leitungsnähe befinden.

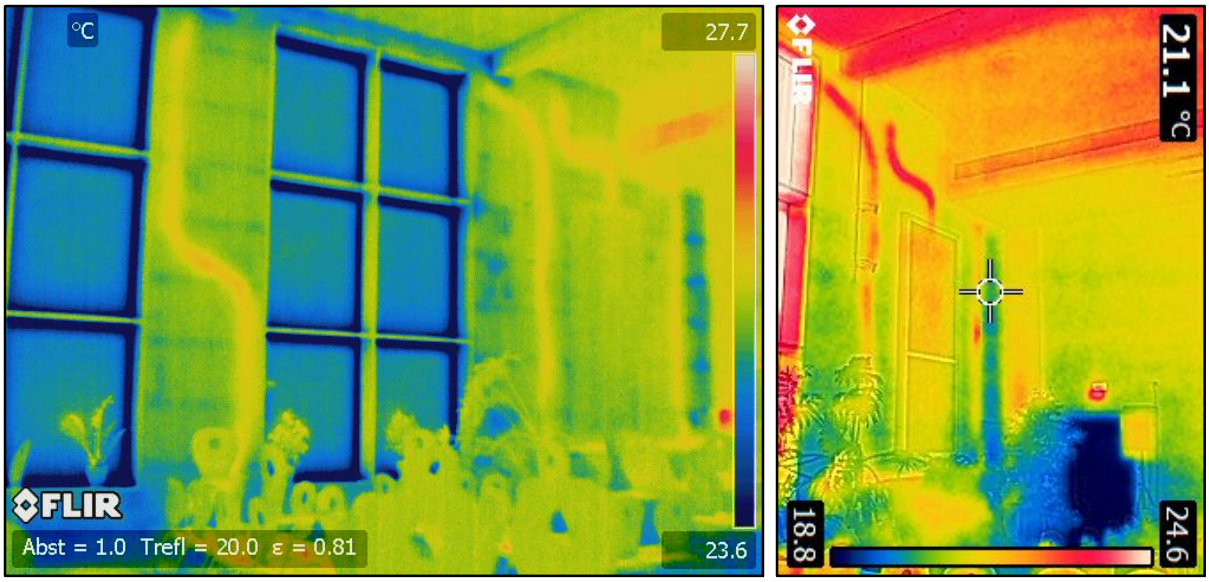


**Abbildung 2-7: Innenthermographie der Solaraußenwand**

### Jahresverlauf 2016 – mittlere Höhe

Ob es durch die Solarwand zu unerwünschten Wärmeeinträgen in die Aula kommt, kann maßgeblich an der Oberflächentemperatur raumseitig der Solarwand abgelesen werden. Abbildung 2-8 zeigt im Stundenmittel die Temperatur des Solarkollektors 1 in mittiger Höhe (hell gestrichelt), die dahinterliegende Temperatur an der Außenseite der Solaraußenwand (dunkelblau) sowie die Temperaturen raumseitig der Solarwand (pink), raumseitig der Referenzwand als Vergleich (orange) und der Ablufttemperatur der Aula im Kanal (grün). Aus Gründen der Lesbarkeit wurde hier auf die Darstellung der Wandmitte, des Fühlers in der Installationsebene sowie auf die Außentemperatur verzichtet. Eine Reduktion auf Tagesmittelwerte bietet Abbildung 2-9.

Sowie die Temperatur raumseitig der Kollektorwand (pink) höher ist als die der Raumluft, ist davon auszugehen, dass die Raumlufttemperatur der Aula durch die Solaraußenwand erhöht wird.

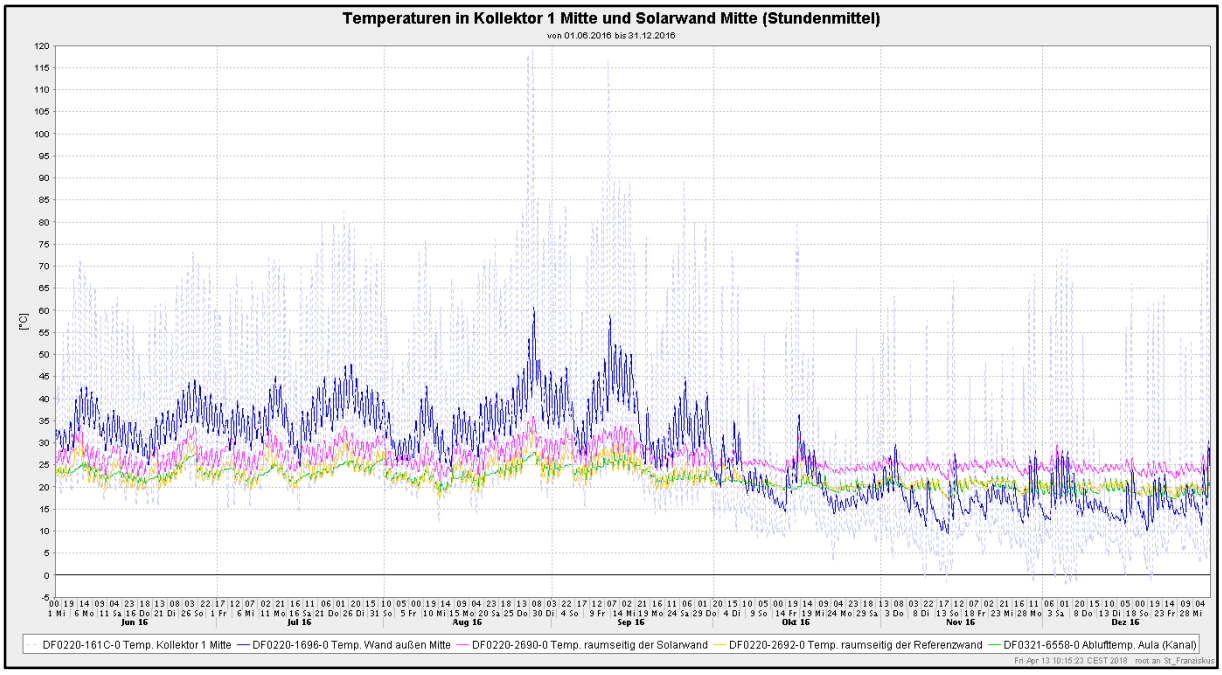


**Abbildung 2-8: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Juni bis Dezember 2016 (Stundenmittel)**

Es zeigt sich, dass von Mai bis Anfang Oktober 2016 der äußere Temperaturwert der Solarwand (dunkelblau) deutlich über den raumseitigen Temperaturen liegt. Sein Temperaturverlauf wird maßgeblich durch die Kollektortemperatur (helllila, gestrichelt), aber auch durch die Außenlufttemperatur beeinflusst. Dieses Verhältnis kehrt sich erst im Oktober um.

Während die Raumlufttemperatur der Aula (grün) und die Oberflächentemperatur der Referenzwand (orange) annähernd deckungsgleich verlaufen, liegt die raumseitige Oberflächentemperatur der Solarwand (pink) stets ca. 4 K oberhalb der Referenzwand (orange). Dies geschieht auch in Zeiten, in denen innerhalb der Solaraußenwand keine höheren Temperaturen herrschen als im Raum.

Eine EXCEL-Analyse der Stundenmittelwerte von Februar bis Dezember 2016 ergab: auch in den Stunden, in denen die Temperatur in der Kollektorwand außen (Hinterlüftung) niedriger als die Temperatur der Referenzwand in der Aula lag, war die Temperatur raumseitig der Solarwand im Mittel 4,02 K höher als die der Referenzwand. Da zu diesem Zeitpunkt ein Wärmestrom von außen nach innen ausgeschlossen ist, muss es sich hier um einen Messfehler handeln. Die verbauten Temperaturfühler LM 75 werden mit einer Messgenauigkeit von ± 2 K angegeben. Grundsätzlich kann zudem nicht ausgeschlossen werden, dass sich der Innenfühler in der Nähe der Solarleitung befindet, da die Wand zum Zeitpunkt der Fühlermontage bereits beplankt war. Jedoch erklärt auch dies nicht die hohen Differenzen in den Stunden, in denen der Kollektor – und somit auch die Solarleitung – kalt ist.

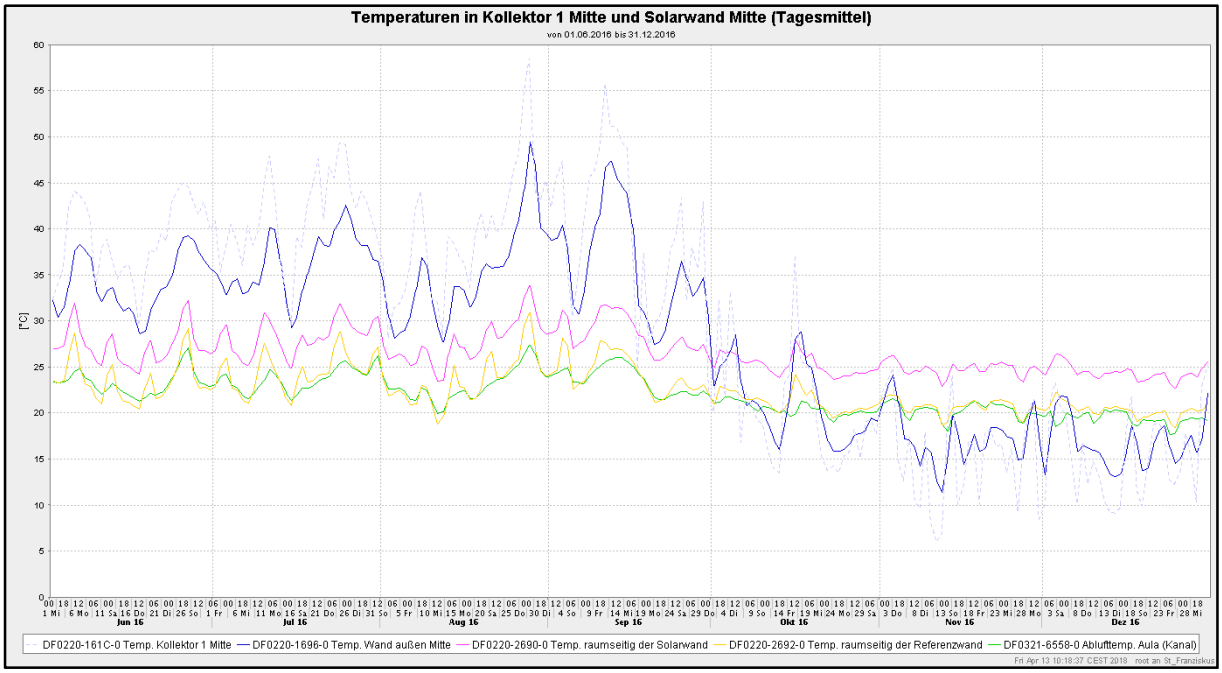


**Abbildung 2-9: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Juni bis Dezember 2016 (Tagesmittel)**

### Jahresverlauf 2017 – mittlere Höhe

Ein ähnlicher Verlauf zeichnet sich für das Jahr 2017 ab, die gleiche Fehleranalyse (Temperatur der Kollektorwand < Temperatur der Referenzwand) ergibt ein mittleres Delta von 3,96 K für die beiden raumseitigen Oberflächentemperaturen.

Auch hier liegt die Temperatur raumseitig der Solarwand (Stundenmittel 26,1 °C) dauerhaft oberhalb der Temperatur der Referenzwand (Stundenmittel 22,0 °C). Dies auch in Zeiten, während die Temperatur hinter dem Kollektor an der Außenseite der Außenwand deutlich unterhalb der raumseitigen Temperaturen liegt (blaue Kurve unterhalb der pinken Kurve).

Eine weitere EXCEL-Analyse ergab: auch in den Stunden, in denen die Kollektortemperatur unterhalb des Mittelwertes der Solarwand von 26,1 °C bleibt, beträgt das Delta zwischen den raumseitigen Fühlern der Solarwand und der Referenzwand noch 3,82 K.

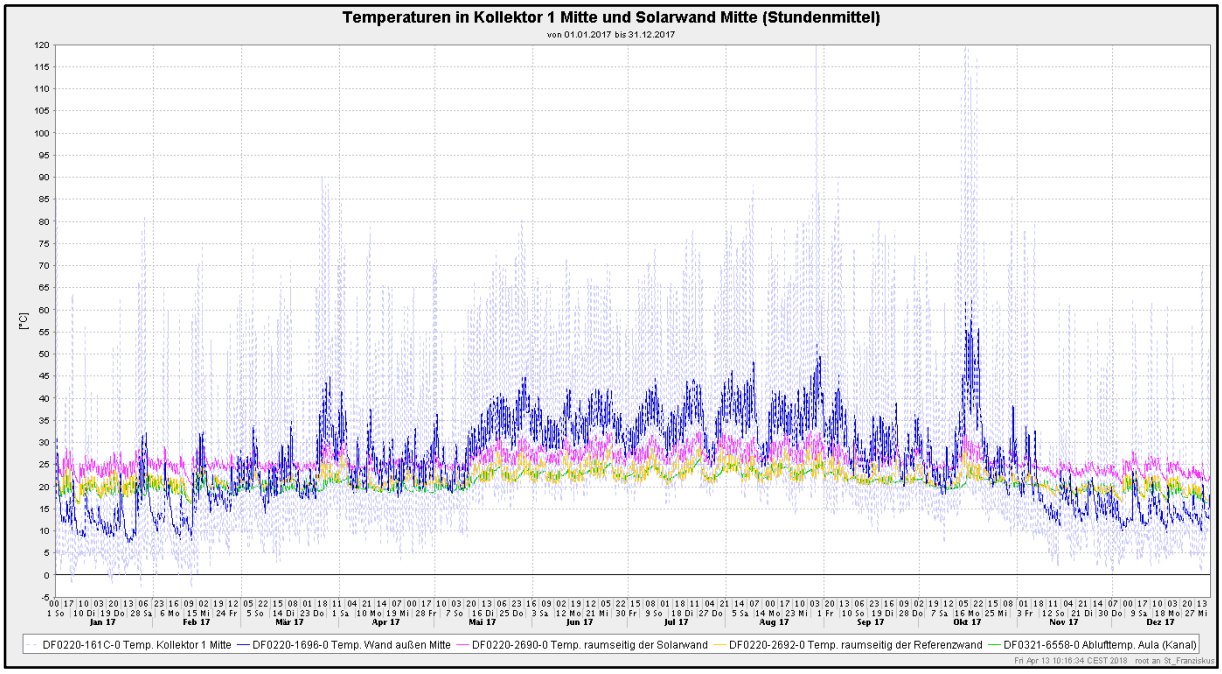


**Abbildung 2-10: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Jahr 2017 (Stundenmittel)**

Eine Darstellung begrenzt auf die Tagesmitteltemperaturen soll auch hier die grobe Tendenz leichter ablesbar machen:

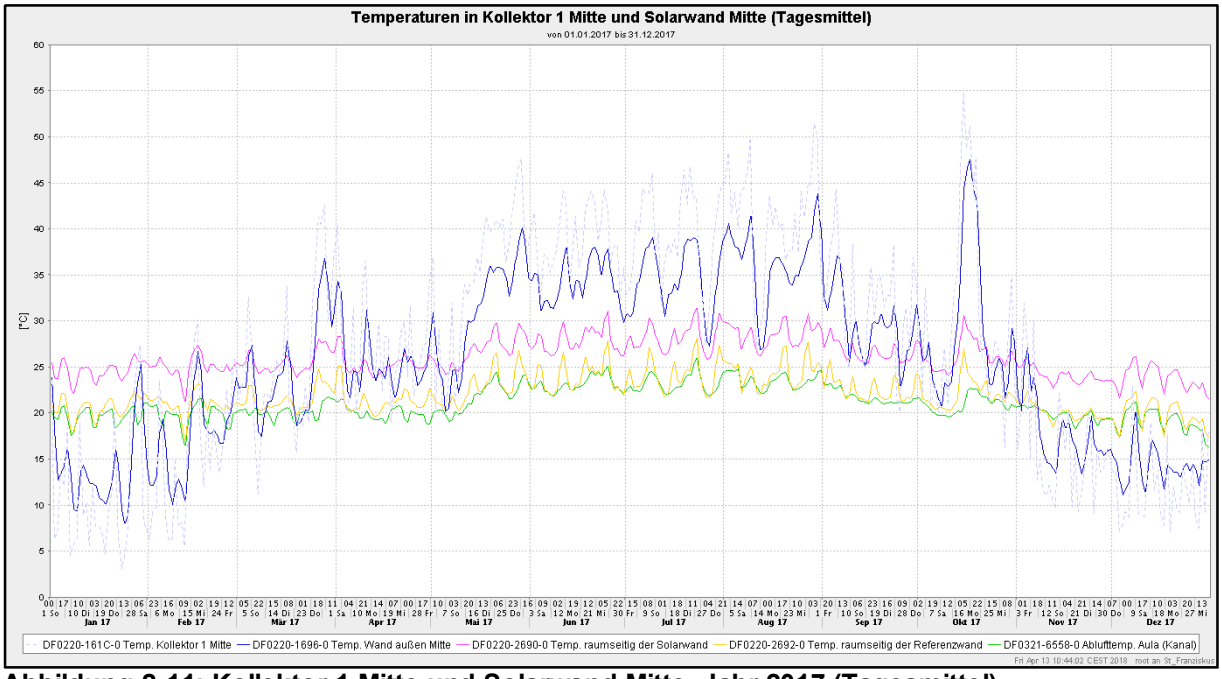


**Abbildung 2-11: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Jahr 2017 (Tagesmittel)**

Im Folgenden werden einzelne Wochen exemplarisch näher betrachtet. Im Gegensatz zu den Jahresverläufen werden nun auch die Außenlufttemperatur sowie die Temperaturen mittig in der Außenwand (Dämmebene = grau) und innen (Installationsebene = rot) eingeblendet.

**Woche vom 05.12. bis 11.12.2016**

In der beispielhaften Winterwoche lässt sich der Einfluss der Kollektortemperatur auf die Temperaturen innerhalb der Solarwand ablesen (Abbildung 2-13). Bei vermehrter Sonneneinstrahlung steigt die Temperatur der Kollektoren unabhängig von der Außentemperatur stetig und sehr schnell an. Trotz der winterlichen Verhältnisse mit Außentemperaturen um den Gefrierpunkt erreichte der Kollektor am 05.12.2016 eine Temperatur von 75 °C.
Das Maximum zeigt sich hier und auch an den Folgetagen stets zwischen 11 und 15 Uhr. Das Stundenmittel der Woche beträgt jedoch nur 14,1 °C.

Daraus resultierend steigen auch die Temperaturen im Bauteilquerschnitt der Solarwand an. Die Temperatur auf der Wandaußenseite (dunkelblau) zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Kollektortemperatur, sie nimmt mit steigender Kollektortemperatur zu und erreicht ihr Maximum meist gegen 16 Uhr – wobei dieses in der Beispielwoche am Montag bei 28 °C liegt. Ihr Stundenmittel liegt bei 16,5 °C. In der Dämmebene (graue Kurve) ist der Einfluss des Temperaturdurchgangs von der Außenseite noch gut ablesbar. Erreicht die Wandaußenseite ihr Maximum, tut dies die Dämmebene ca. eine Stunde später – wobei die beiden Temperaturen an der Spitze sehr nah beieinanderliegen, während die Temperatur der Wandaußenseite in der Zwischenzeit durch den Einfluss der Außentemperatur stärker abfällt.

Alle raumseitigen Temperaturen hingegen scheinen vor allem durch die Raumlufttemperatur beeinflusst zu werden. Hier ist ein Wärmestrom von außen nach innen nicht ablesbar. Vielmehr ist ersichtlich, dass die Wandoberfläche raumseitig der Solarwand (pink) ihr Maximum immer schon dann erreicht, wenn dies auch bei der Raumluft der Fall ist (gegen 13 Uhr). Käme der Einfluss von außen, dürfte das Maximum zeitlich erst nach 16 Uhr vorkommen. Das Stundenmittel raumseitig der Solarwand beträgt 24,4 °C, das der Referenzwand 20,3 °C.

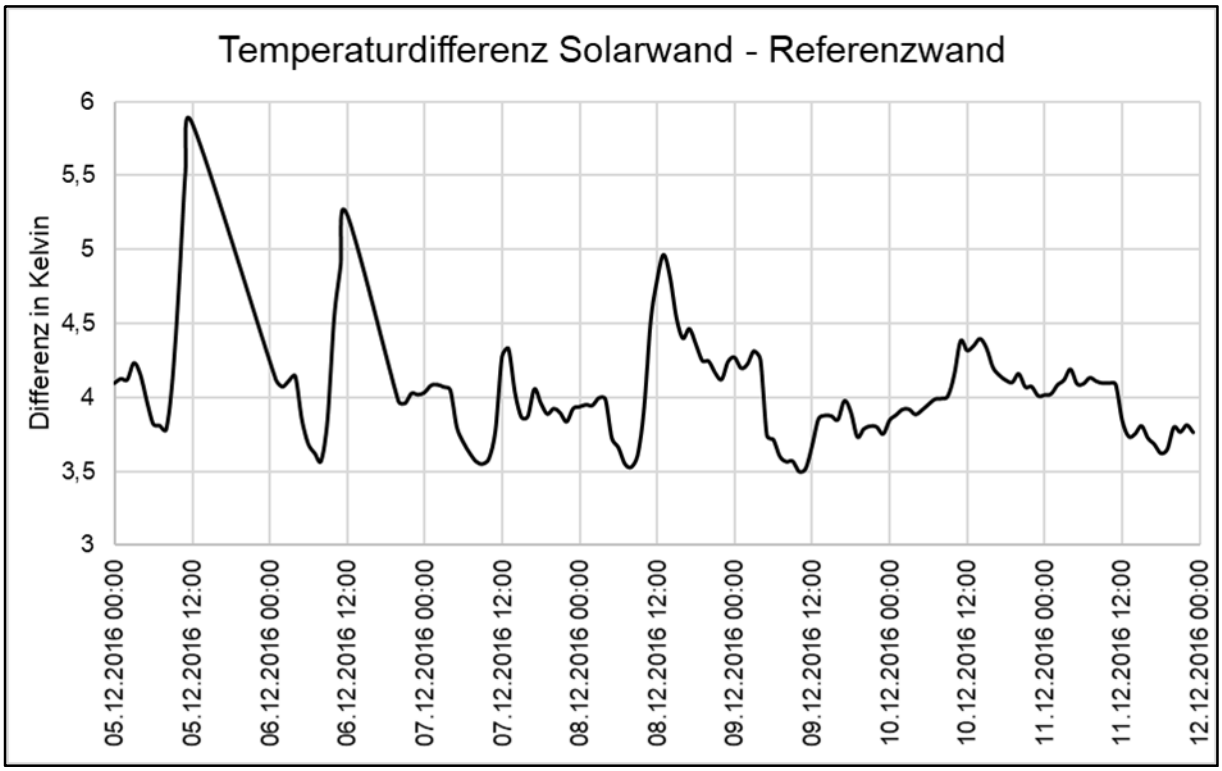

**Abbildung 2-12: Temperaturdifferenz zwischen Solar- und Referenzwand, Winterwoche 2016**

Die minimale Differenz zwischen Solarwand und Referenzwand beträgt 3,5 K, die maximale 5,8 K, siehe Abbildung 2-12. Es fällt auf, dass die Temperaturdifferenz gegen 12 Uhr am größten ist, also zum Zeitpunkt der größten Kollektortemperatur, vgl. Abbildung 2-13.

Diese Spitzen treten zudem besonders stark an den Tagen auf (Montag, Dienstag, Donnerstag), an denen die Kollektortemperatur besonders hoch ist. Die Temperaturerhöhung resultiert dabei wahrscheinlich nicht aus dem Wärmedurchgang durch das Bauteil selbst, denn dieser würde zeitlich später einsetzen, wie die Verläufe der Wandaußenseite und der Zelluloseebene in Abbildung 2-13 zeigen. Vielmehr liegt die Vermutung nahe, dass sich eine Solarleitung in der Wand in Fühlernähe befindet.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Messfehler ca. 3,5 K beträgt und die darüber hinausgehende Temperaturdifferenz auf den Wärmeeinfluss der Kollektorwand/-leitung zurückzuführen ist.

Das klassische, winterliche Temperaturgefälle im Bauteilquerschnitt von innen nach außen scheint nur aufzutreten, sofern die Kollektortemperatur unter 55 °C bleibt (7.12. und 9.-11.12.) Am 8.12.2016 erreicht der Kollektor gegen 10 Uhr ein Maximum von nahezu 55 °C. Daraufhin ergibt sich gegen 16 Uhr für die drei Temperaturen in der Solarwand (außen, Mitte, Installationswand) eine fast einheitliche Querschnittstemperatur von ca. 20 °C. Wird der Kollektor wärmer (5.12. und 6.12.), gibt es ein Gefälle von außen nach innen, wie es auch in den beispielhaften Sommerwochen der Fall ist.

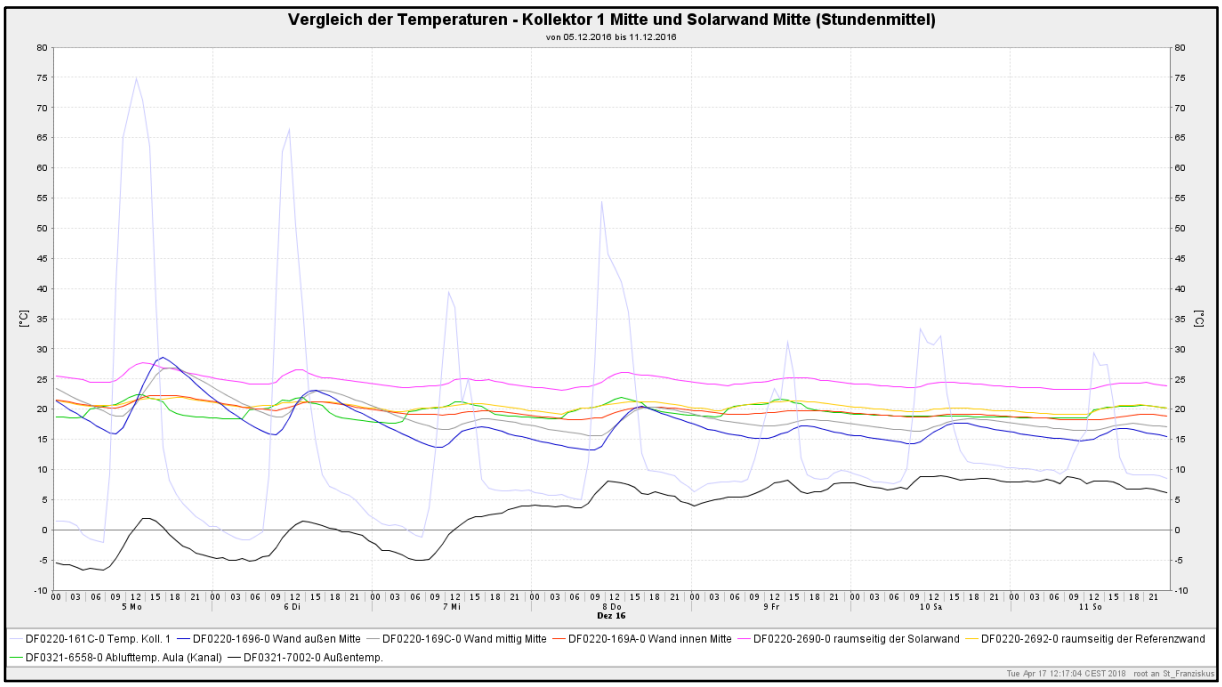


**Abbildung 2-13: Temperaturverlauf in der Solarkollektorwand im Dezember 2016**

### Woche vom 07.08. bis 14.08.2016

Gezeigt wird eine typische Sommerwoche. In Abbildung 2-15 ist für die Woche vom 07.08. bis 14.08.2016 deutlich zu erkennen, dass vor allem während der Nachmittagsstunden im Sommer bei erhöhter Sonneneinstrahlung die Temperaturen der Kollektoren bis zu 75 °C erreichen (helllila). Auch die Messpunkte mittig innerhalb der Konstruktion der Solarwand (grau) verzeichnen beispielsweise am 08.08.2016 um 16:00 Uhr einen enormen Temperaturanstieg auf bis zu 38 °C bei steigender Temperatur der Kollektoren. Der Fühler im äußeren Bereich der Kollektorwand (dunkelblau) liefert noch höhere Werte bis 43 °C. Dabei kann der Einfluss der Außentemperatur vernachlässigt werden, da diese 13 K unter den Temperaturen des äußeren Fühlers in der Solarwand liegt.

Die Temperaturen innerhalb der Solarwand nehmen durch den starken Einfluss der Kollektoren erwartungsgemäß von außen nach innen ab – jedoch fällt die Temperatur der Innenoberfläche (pink) – wie zuvor beschrieben – aus dem Rahmen, da hier zum Raum hin nochmals ein Temperaturanstieg zu verzeichnen ist, der nicht logisch erklärbar ist. Die Temperatur der Innenoberfläche hätte man zwischen der Installationsebene (rote Kurve) und der Raumlufttemperatur (grüne Kurve) erwartet.

Die in Abbildung 2-14 ablesbare Temperaturdifferenz zwischen der Referenzwand und der Wandoberfläche an der Kollektorwand beträgt 3,2 bis 6,5 K.
Der Stundenmittelwert der raumseitigen Temperaturen beträgt an der Solarwand 25,9 °C und an der Referenzwand 21,7 °C, das Delta beträgt im Mittel 4,2 K. Die Temperaturdifferenz ist im Tagesverlauf zwischen 12 und 16 Uhr besonders hoch, was auch hier – genau wie in der Winterwoche – auf den Einfluss der Kollektortemperatur und der Solarleitungstemperatur zurückzuführen ist.

Aufgrund der winterlichen Untersuchungen (siehe oben) ist auch hier von einem Messfehler > 3 K auszugehen.

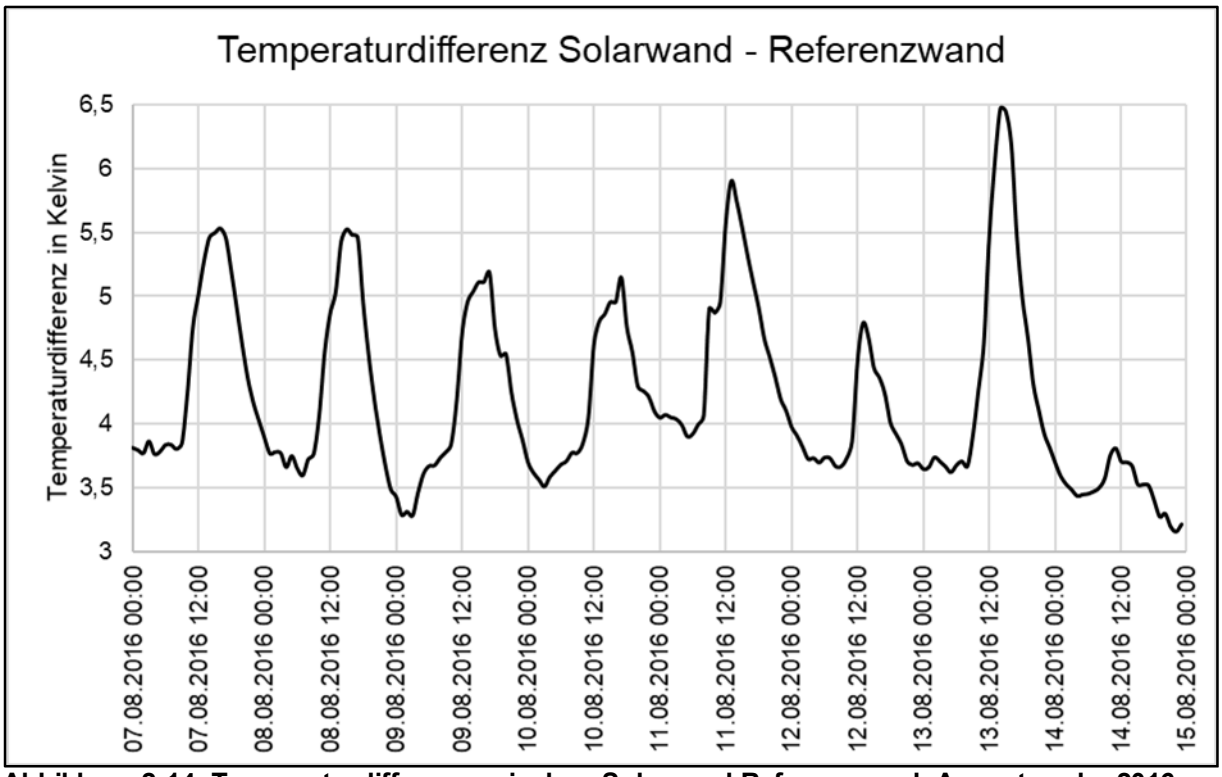


**Abbildung 2-14: Temperaturdifferenz zwischen Solar- und Referenzwand, Augustwoche 2016**

Es ist nicht erkennbar, dass die Maxima der Oberflächentemperatur an der Solarwand zu einer Erhöhung der Raumlufttemperatur führen würden.

Während die Außentemperatur (schwarz) sich zwischen 8 und 29 °C bewegt, schwankt die Innentemperatur der Aula (grün) nur moderat zwischen ca. 18 und 24 °C und beträgt im Stundenmittel 21,4 °C. Die Temperaturspitze lag am Samstag, 13.08.2016 um 14 Uhr bei 24 °C. Dieser Tag war deutlich wärmer als die drei vorigen, der Kollektor erreichte 65 °C. Die Lüftungsanlage war an diesem Samstag aktiv, da hier die Einschulung der Erstklässler stattfand.

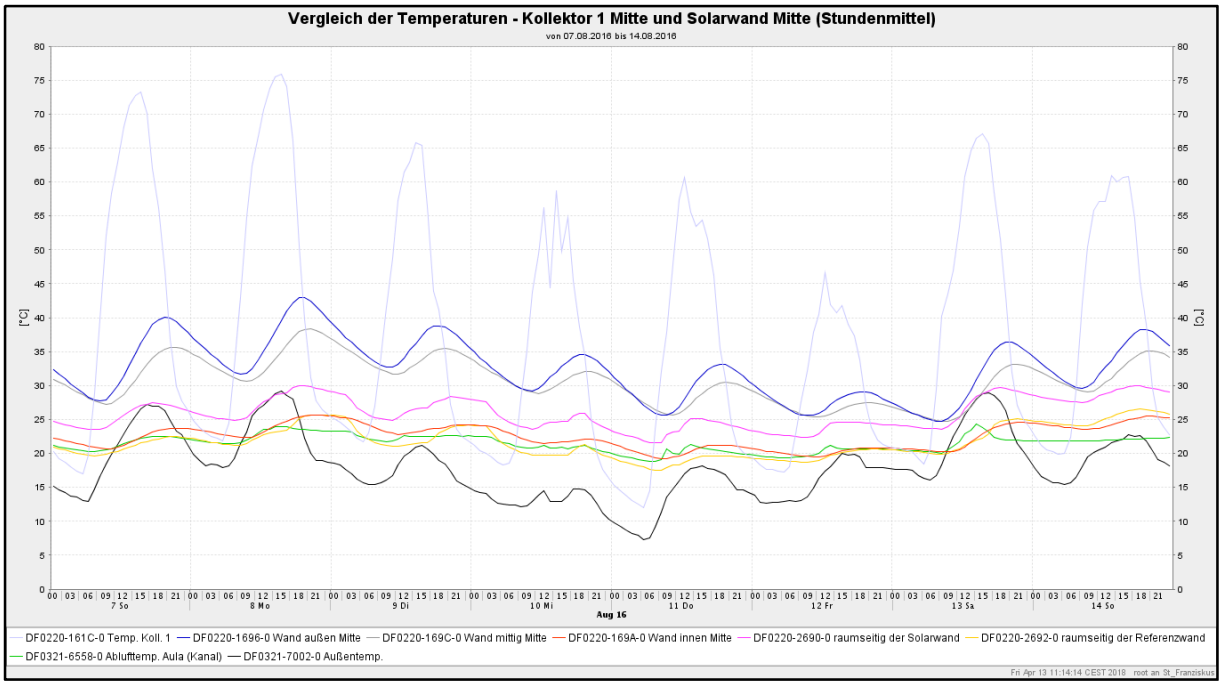


**Abbildung 2-15: Temperaturverlauf in der Solarkollektorwand im August 2016**

### Woche vom 06.06. bis 12.06.2016

Es folgt ein Blick auf eine sonnige Woche vom 06.06. bis 12.06.2016 in Abbildung 2-16. Die Temperaturen verlaufen hier sehr ähnlich wie in der betrachteten Augustwoche 2016.

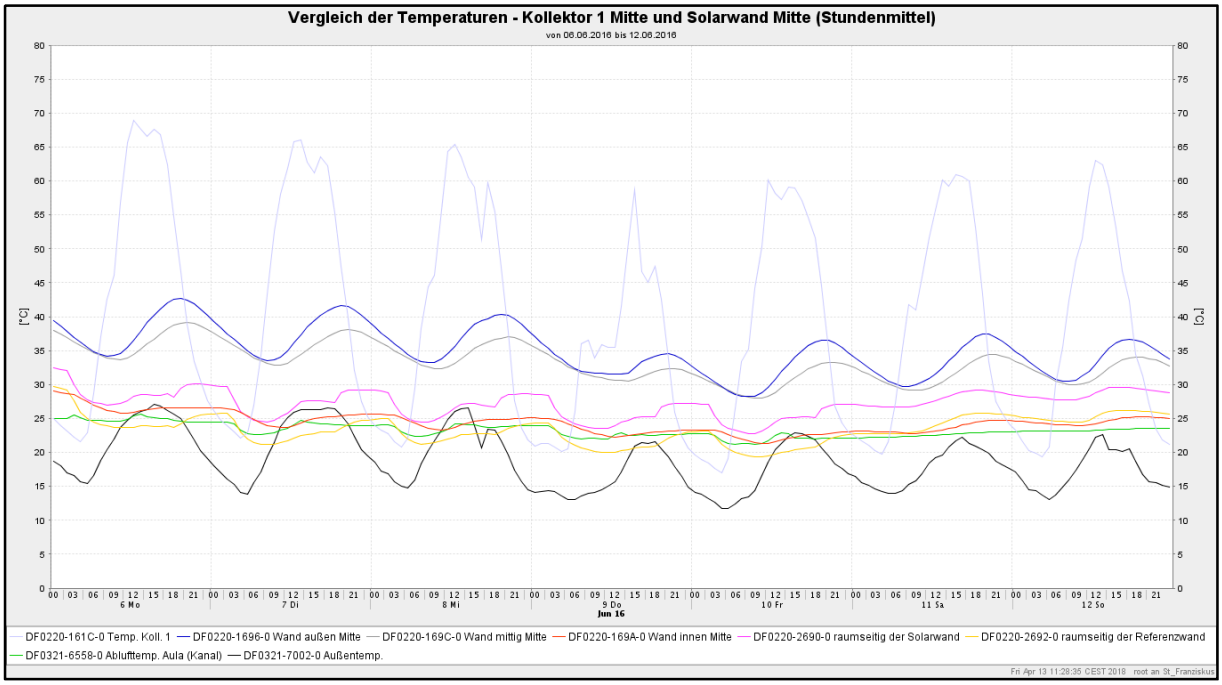


**Abbildung 2-16: Temperaturverlauf in der Solarkollektorwand im Juni 2016**

Auch hier liegt die Temperatur der Wandinnenoberfläche an der Solarwand (pink) oberhalb der Installationsebene (rot), der Referenzwand (orange) und der Raumluft (grün). Im Gegensatz zur Augustwoche ist hier jedoch der Effekt der Nachtlüftung ab 3 Uhr sehr deutlich abzulesen. Insbesondere die beiden Oberflächentemperaturen zeigen mit Einschalten der Nachtlüftung einen Temperatursturz um 5 K bis ca. 7 Uhr, um dann kontinuierlich bis zum Mittag um ca. 2,5 K anzusteigen.

Da die Lüftungsanlage am Wochenende deaktiviert ist, erfolgt hier ein Aufschwingen der Oberflächentemperatur raumseitig der Solarwand auf bis zu 30 °C am Sonntag. Der Effekt der Nachtauskühlung auf die Raumlufttemperatur ist nicht so stark ablesbar wie an den Oberflächen. Sie liegt mit 22 bis 25 °C im behaglichen Bereich.

Die Differenz zwischen der Solarwandoberfläche und der Referenzwand beträgt minimal 2,3 K und maximal 5,3 K, siehe Abbildung 2-17. Der Mittelwert liegt bei 3,9 K. Auffällig ist hier, dass es häufig ein maximales Delta gegen 12 Uhr gibt und erneut gegen 18 Uhr. Dieses Bild zeigt sich auch in der Kollektortemperatur in Abbildung 2-16. Auch diese Analyse lässt darauf schließen, dass der Messfehler ca. 3 K beträgt und die darüber hinausgehende Temperaturdifferenz auf den Kollektoreinfluss (inkl. Solarleitung) zurückzuführen ist.

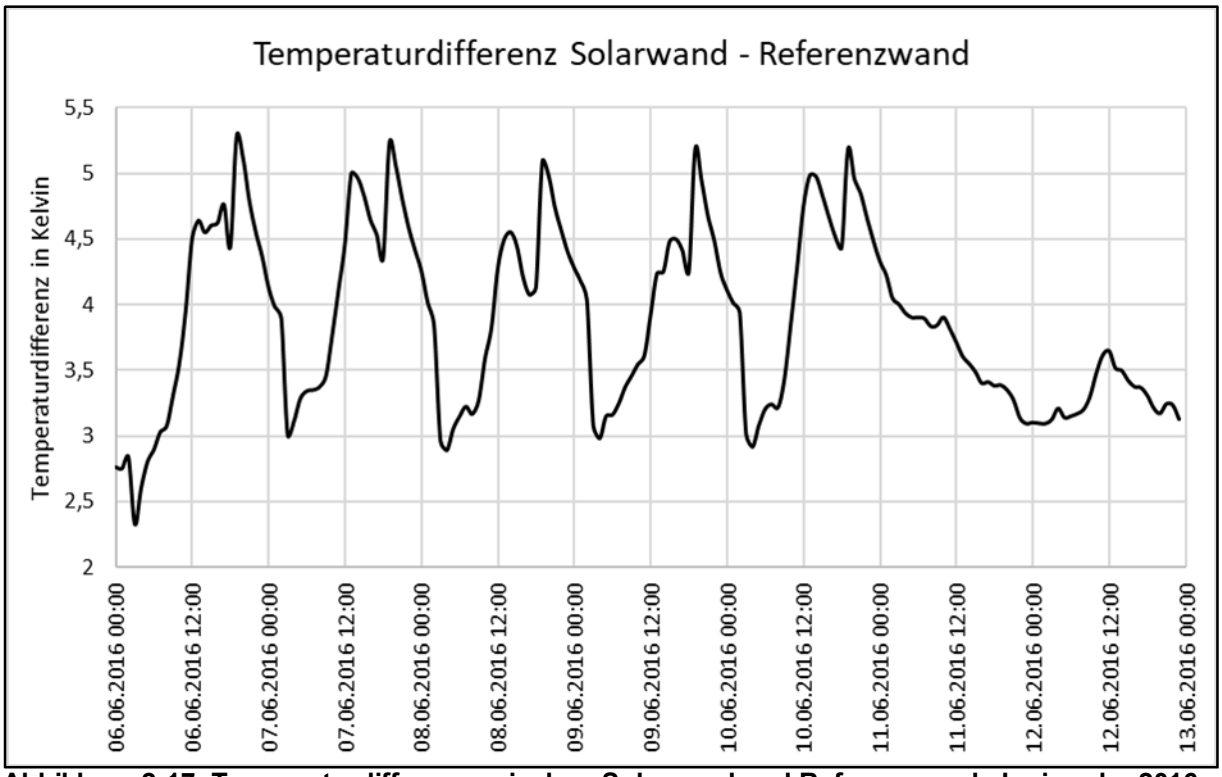


**Abbildung 2-17: Temperaturdifferenz zwischen Solarwand und Referenzwand, Juniwoche 2016**

## *2.5 Verbesserungsansätze*

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz wurden von einigen Räumen sowohl nach DIN 4108-2:2003 [1] (28 Räume) als auch nach DIN 4108-2:2013 [2] (12 Räume) nicht erfüllt. Die rechnerische Verbesserung nach neuer Norm gegenüber der Version von 2003 liegt insbesondere an der Anrechenbarkeit der Nachtlüftung.

Hauptursache für die Nichterfüllung der Anforderungen ist die Wahl des zwischenliegenden Sonnenschutzes, für den im Bestand ein $F_C$-Wert von 0,7 bzw. 0,75 anrechenbar ist.

Nach der Normversion von 2003 hätte ein außenliegender Sonnenschutz mit $F_C \leq 0{,}5$ (Markise) bereits für die meisten Räume – so auch für die drei betroffenen Klassenräume 1.07, 1.08 und 2.08 – zur Erfüllung der Anforderungen geführt. Das Büro 0.08, das Foyer 0.21 sowie das Schlafzimmer 2.25 und das Wohnzimmer 2.28 der Wohnung hätten mit $F_C \leq 0{,}3$ eine wirksamere Sonnenschutzvorrichtung benötigt (z. B. Außenrolladen, Fensterladen).

Nach neuer Norm (2013) wäre für den Personalraum 0.34, das Büro 0.07 und das Sekretariat 1.23 mit einem $F_C$-Wert von 0,5 die Norm erfüllt. Während das Archiv 1.24 und das Büro 0.08 mit $F_C \leq 0{,}3$ ausgestattet werden könnten, wäre beim Foyer 0.21 ein Sonnenschutz mit $F_C \leq 0{,}25$ notwendig. Kritisch bleibt das Wohnzimmer 2.28 der Hausmeisterwohnung: hier würde selbst ein außenliegender Sonnenschutz mit $F_C \leq 0{,}25$ das Problem nicht lösen, jedoch deutlich verbessern. Dies hätte von vornherein durch einen geringeren Fensterflächenanteil ($f_{WG,ist}$ = 50 %) vermieden werden können. Der Hausmeister selbst ist jedoch nach eigener Aussage zufrieden.

## *2.6 Verallgemeinerung und Fazit*

**Sommerlicher Wärmeschutz**

Allein unter dem Aspekt des sommerlichen Wärmeschutznachweises hat der zwischenliegende Sonnenschutz rechnerische Nachteile und führt teilweise zur Nichterfüllung des Nachweises. Der Gedanke, die Jalousien witterungsgeschützt im Fensterkastenbereich unterzubringen, ist grundsätzlich gut und nachvollziehbar. Jedoch führt die hier gewählte Ausführung dazu, dass sich der Fensterkastenbereich aufheizt. Dies wäre nur mit einem außenliegenden Sonnenschutz vermeidbar gewesen. Die sommerlichen Problemfälle werden in Kapitel 3.2 und 3.15 anhand des Klassenraumes 1.08 ausführlicher beschrieben.

Nachdem es mehrfach zu Spannungsrissen in Fensterscheiben und Problemen mit der Motorsteuerung der Jalousieantriebe gekommen war, kam erschwerend seitens des Schulträgers die Anweisung hinzu, die Jalousien nur noch ganz hoch oder ganz runter zu fahren. Die Nutzer fügen sich dieser Anweisung, obwohl sie sich dadurch eingeschränkt fühlen. Häufig besteht das Bedürfnis, die Jalousien nur anteilig herunterzufahren, um zwar Blendschutz zu gewährleisten, jedoch Tageslichtnutzung und Außenbezug im unteren Bereich beizubehalten. Aus Sicht des Monitorings sollte die halbhohe Stellung erlaubt werden, um die Nutzerzufriedenheit zu erhöhen. Da i. d. R. im Sommer das Öffnen des äußeren Fensterflügels vorgesehen ist, um Stauwärme abzuführen, sollte es nicht zu temperaturbedingten Problemen kommen.

**Aula**

Hinsichtlich der Oberflächentemperaturen der Aula ist von einem Messfehler an der Wandoberfläche raumseitig der Solarwand auszugehen, der im Bereich von etwa 3 K liegt. Zwar ist dennoch messtechnisch erkennbar, dass die Solarwand zeitweise wärmer ist als die Referenzwand. Da sich dies jedoch kaum in der Entwicklung der Raumlufttemperatur widerspiegelt und es von Nutzern keine negativen Rückmeldungen gibt, besteht aus dieser Hinsicht kein Handlungsbedarf. Der U-Wert der Solarwand ist mit 0,161 W/(m²K) bereits sehr gut, wodurch einem Wärmestrom von außen nach innen bereits bestmöglich entgegengewirkt wurde. Die Behaglichkeit der Aula wird in Kapitel 3.6 näher untersucht.

Entgegen der anfänglichen Befürchtungen, die Aula würde aufgrund der Solarkollektorwand in Kombination mit dem großen Fensterflächenanteil allgemein zu Überhitzung neigen, konnte festgestellt werden, dass es in der Nutzungszeit nur zu geringen Temperaturüberschreitungen kommt und behagliche Raumlufttemperaturen herrschen. Dies ist insbesondere auf die effektive Nachtlüftung zurückzuführen, aber auch auf die – unfreiwillig – dauerhaft heruntergefahrenen Jalousien. Positiv ist zwar, dass der Sonnenschutz in der Pfosten-Riegel-Fassade im Scheibenzwischenraum vor Witterung geschützt ist. Jedoch ist er im Reparaturfall – welcher bereits aufgetreten ist – schwer zugänglich. Aus dieser Erfahrung resultiert die Anweisung, die Sonnenschutzvorrichtung dauerhaft heruntergelassen zu halten und nur noch die Lamellendrehung zu bedienen. Die Anlage wird nur noch eingeschränkt bedient, aus Angst, einen Defekt auszulösen. Dies kann nicht das Ziel des Wärmeschutz- oder Beleuchtungskonzeptes gewesen sein.

# 3 Raumtemperatur

Dieser Abschnitt widmet sich intensiv einem der wichtigsten Behaglichkeitsaspekte – der Raumtemperatur. Zunächst wird das Messkonzept der ausgewählten Referenzräume vorgestellt. Im weiteren Verlauf folgt die Auswertung der Messergebnisse anhand der Temperaturhäufigkeiten und Temperaturverläufe der Referenzräume. Für die Aula und die Klassenräume 1.08 und 2.01 werden zusätzlich die vertikalen Temperaturprofile analysiert. Die Hinweise aus den durchgeführten Nutzerbefragungen werden diskutiert und winterliche wie sommerliche Problemfälle beleuchtet.

**Anforderungen**

Bezüglich der Anforderungen an die Raumtemperatur werden in verschiedenen Regelwerken unterschiedliche Grenzwerte angesetzt.

Der „Leitfaden für Innenraumhygiene in Schulen“ des Umweltbundesamtes [9] kommt zu dem Schluss, dass die physiologisch behaglichen Operativtemperaturen in Klassenräumen zwischen 20 … 26 °C möglichst das ganze Jahr einzuhalten sind.

Eben diese Kennwerte finden sich auch in den „Technischen Regeln für Arbeitsstätten“ (ASR), in denen ein Mindestwert der Lufttemperatur 20 °C bei überwiegend sitzender Körperhaltung und einer leichten Arbeitsschwere, wie dies in Schulen der Fall ist, empfohlen wird [10]. Darüber hinaus wird eine maximale Rauminnentemperatur von 26 °C benannt.

Die DIN 4108-2:2013 [2] ordnet die St. Franziskus-Grundschule am Standort Halle der Klimaregion C (sommerheiß) zu und benennt in Tab. 9 die zulässige operative Innenraumtemperatur $\theta_{b,op}$ mit 27 °C. Die operative Temperatur kann als die „gefühlte Temperatur“ beschrieben werden. Sie setzt sich aus der Raumlufttemperatur und der Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen zusammen [8]. Zudem definiert die Norm für Nichtwohngebäude einen Grenzwert für die Übertemperaturgradstunden von 500 Kh/a. Dieser Wert ergibt sich aus der Temperaturüberschreitung in K multipliziert mit der Zeit, in der diese auftritt.

Die sommerliche Behaglichkeit in einer Passivhausschule sollte laut Feist in [3] auf $h_{\vartheta \geq 25}$ unter 10 % begrenzt werden. Das heißt, dass die Raumlufttemperatur in nicht mehr als 10 % der Betriebsstunden höher als 25 °C sein sollte. Hierfür ist neben einer wirksamen Verschattung eine ausreichende Nachtlüftung notwendig.

Wie stark allein die Anwesenheit von Personen zur Erwärmung der Raumluft beiträgt, soll folgende Beispielrechnung für einen Unterrichtsraum zeigen. Gemäß DIN EN 13779 Tabelle A.13 [11] beträgt die Wärmeabgabe einer Person bei sitzender Tätigkeit (Schule) ca. 75 W. Die Wärmeabgabe eines Grundschülers kann aufgrund des geringeren Körpergewichtes mit ca. 50 W angesetzt werden. Die Wärmeabgabe des Lehrers wird hier mit 105 W entsprechend einer mittelschweren Tätigkeit angenommen. In einem Klassenraum mit 24 Schülern und einem Lehrer entspricht dies somit einer internen Wärmelast $\dot{Q}_K$von

$$\dot{Q}_K = 24\ Personen * 50\ \frac{W}{Person} + 1\ Person * 105\ \frac{W}{Person}$$

$$\underline{\dot{Q}_K = 1305\ W}$$

Dies entspricht bei einer Grundfläche des Klassenraumes von 82,6 m² einer Wärmelast von 15,8 W/m². Die Transmissionsheizlasten $\dot{Q}_T$ der Klassenräume wurden mit 427 … 822 W ermittelt, siehe Abschlussbericht 9. Dies bedeutet, dass allein die Anwesenheit der Personen die Transmissionsheizlast am kältesten Tag deckt [12].

## *3.1 Messorte und Messtechnik*

In ausgewählten Räumen werden Lufttemperaturen (meist im Abluftvolumenstrom in der Nähe des Lufteintritts) und Luftfeuchten gemessen. Wie geplant erfolgte die Umsetzung mit je einem Temperatur- und Feuchtesensor in den beiden Klassenräumen 1.08 und 2.01, dem Lehrerzimmer 1.04 (hier im Überströmbereich zum Nachbarraum), der Aula sowie der Koch- und Spülküche (0.33, 2 Fühler). Auch im Elektro-Anschlussraum 0.04 ist eine Messung vorhanden.

Entfallen sind die Messungen im Wohnzimmer der Hausmeisterwohnung (2.28 und 2.29), da im dafür vorgesehenen Schaltkasten seitens des Elektroinstallateurs kein Platz gelassen wurde. Im Sekretariat 1.23 ist die Messung entfallen zugunsten der ursprünglich nicht geplanten Messstelle im Hortraum 0.01. Der Fühler wird als Referenzfühler der RLT-Anlage für die morgendliche Aufheizung verwendet. Da die Ausstattung mit Datenübertragungsmodulen es ohne Problem kostengünstig hergab, wurden zusätzlich in den beiden Lüftungszentralen (2.18 und 2.03) jeweils Raumtemperatur und -feuchte erfasst.

In einigen Räumen werden zusätzlich in unterschiedlichen Raumhöhen an Innen- und Außenwand die Temperaturen erfasst. Dies betrifft die Klassen 1.08 und 2.01 sowie die Aula.

Zudem wird der Temperaturverlauf hinter und in der Solarwand gemessen; dabei wird auch die Raumtemperatur der Aula erfasst. Dies wird mit einer Referenzwand ohne Solarkollektor verglichen. Die Ergebnisse wurden bereits in Kapitel 2.4 beschrieben.

**Tabelle 3-1: Messpunkte bezüglich Raumtemperatur und Höhenprofil**

| Kürzel | Einheit | Gruppe | Untergruppe | Beschreibung |
|---|---|---|---|---|
| DF0321-3660-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_10_cm |
| DF0321-3662-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_100_cm |
| DF0321-3664-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_2_m |
| DF0321-3666-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_3_m |
| DF0321-3668-0 | °C | RAU | HOE | Raumluft_Temperatur_Aula_4_m |
| DF0321-5230-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_108_an_Innenwand_10_cm |
| DF0321-5232-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_108_an_Innenwand_80_cm |
| DF0321-5234-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_108_an_Innenwand_170_cm |
| DF0321-5236-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_108_an_Aussenwand_10_cm |
| DF0321-5238-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_108_an_Aussenwand_80_cm |
| DF0321-523A-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_108_an_Aussenwand_170_cm |
| DF0321-5520-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_201_an_Aussenwand_10_cm |
| DF0321-5522-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_201_an_Aussenwand_80_cm |
| DF0321-5524-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_201_an_Aussenwand_170_cm |
| DF0321-5526-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_201_an_Innenwand_10_cm |
| DF0321-5528-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_201_an_Innenwand_80_cm |
| DF0321-552A-0 | °C | RAU | HOE | Innentemperatur_Klasse_201_an_Innenwand_170_cm |
| DF0321-5254-0 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Klasse_108 |
| DF0321-5354-0 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Hort_001 |
| DF0321-3660-6 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Aula |
| DF0321-6558-0 | °C | RLT | BTA | Ablufttemperatur_aus_Aula_im_Kanal |
| DF0321-5556-0 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Klasse_201 |
| DF0321-564E-0 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Lehrerzimmer_104 |
| DF0321-6152-0 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Spuelkueche_033 |
| DF0321-615E-0 | °C | RAU | INN | Raumluft_Temperatur_Kochkueche_033 |
| DF0220-659E-0 | °C | RAU | TGA | Temperatur_in_R_218 |
| DF0321-5152-0 | °C | RAU | TGA | Raumluft_Temperatur_Raum_004 |
| DF0321-5158-0 | °C | RAU | TGA | Raumluft_Temperatur_Raum_004 |
| DF0321-658E-0 | °C | RAU | TGA | Temperatur_in_R_218 |
| DF0321-7001-0 | °C | RAU | TGA | Wetterstation_Raumlufttemperatur_in_Lueftungszentrale_BtB |
| DF0321-7002-0 | °C | WET | WET | Aussentemperatur |
| DF0384-7001-0 | W/m² | WET | WET | Globalstrahlung_der_Wetterstation |

Messkonzept:

- die Messungen werden zur Einschätzung der Behaglichkeit verwendet und teilweise zur Vervollständigung anderer Messreihen (Temperaturen in Bauteilen, Lüftungsverhalten) genutzt
- Solarwand: Überprüfung der resultierenden Innenlasten für die Aula, siehe Kapitel 2.4

## *3.2 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Klassenraum 1.08*

Zunächst ist Abbildung 3-1 ein Zeitraumvergleich der Raumlufttemperaturen in Klassenraum 1.08 (Südraum) im Tagesmittel für die Jahre 2016 und 2017 zu entnehmen. Die Darstellung bezieht sich auf die gesamten Jahre unabhängig von den Nutzungszeiten des Klassenraumes. Es zeigt sich, dass die Übertemperaturhäufigkeit (> 26 °C) im Jahr 2016 stärker ausgeprägt ist als 2017. Der Mittelwert der Raumlufttemperaturen beträgt 23,5 °C im Jahr 2016, im Jahr 2017 hingegen 23,0 °C.

Im Jahr 2017 treten erstmals nennenswerte Soll-Temperaturunterschreitungen (< 20 °C) auf, die außerhalb der Weihnachtsferien liegen und somit für den Nutzerkomfort relevant sind.

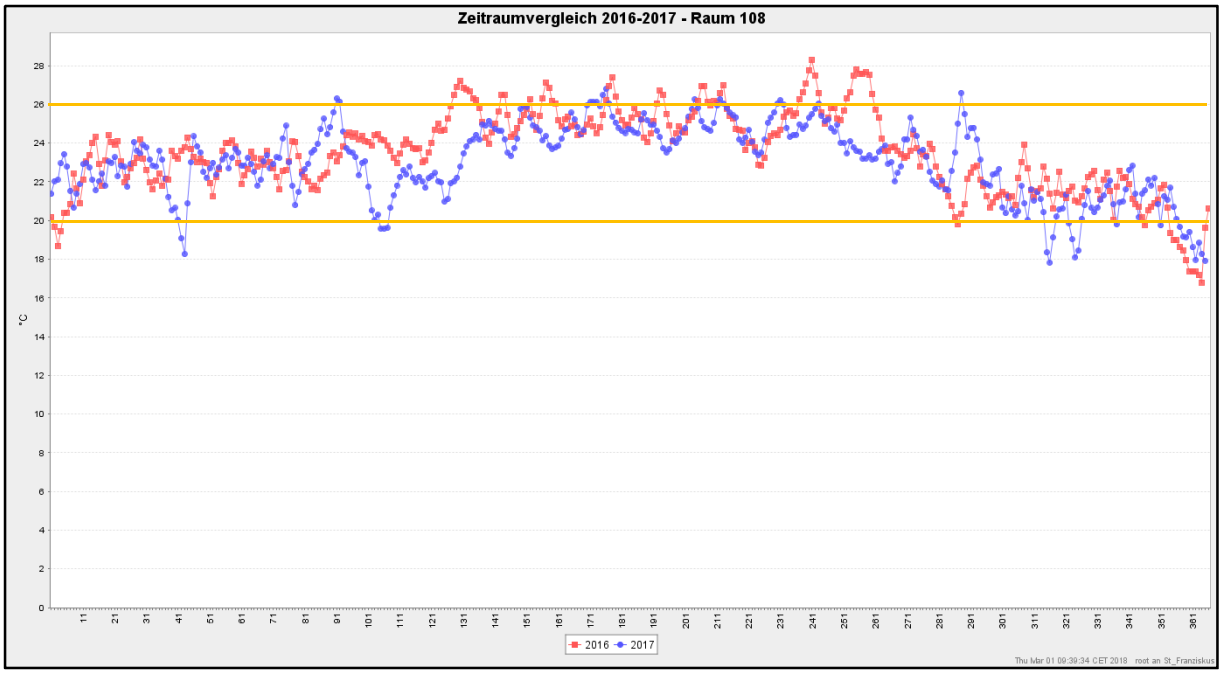


**Abbildung 3-1: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel**

Den Raumbelegungsplänen ist zu entnehmen, dass der Unterricht montags bis freitags von 7:30 bis 12:15 Uhr stattfindet. Zwischen 13:30 – 14:00 Uhr werden meist die Hausaufgaben erledigt, teilweise findet Projektarbeit statt. Die Messwerte werden daher in den folgenden Jahresauswertungen zunächst für alle Stunden des Jahres abgebildet (z. B. Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3) und anschließend auf wochentags in der Zeit von 7 bis 15 Uhr reduziert (z. B. Abbildung 3-4).

In den Carpetplots (Abbildung 3-2 und Abbildung 3-6) ist der Temperaturbereich von 20 bis 26 °C dargestellt. Weiße Fehlstellen bedeuten in der Heizperiode eine Unterschreitung der Solltemperatur von 20 °C und während der warmen Monate Überschreitungen der Behaglichkeitsgrenze von 26 °C. Die Darstellung erfolgt unabhängig von der Nutzungszeit für alle Stunden des Jahres, der Nutzungszeitraum von 7 bis 15 Uhr ist markiert.

**Jahr 2016**

Dem Carpetplot in Abbildung 3-2 und dem Jahresverlauf in Abbildung 3-3 kann entnommen werden, dass die Behaglichkeitsgrenze von 26 °C im Klassenraum 1.08 zwischen Mai und September sehr häufig überschritten wird, ebenso vereinzelt im Oktober 2016. Unterschreitungen der Soll-Temperatur zeigen sich hauptsächlich während der Weihnachtsferien und sind somit nicht relevant für die Nutzung.

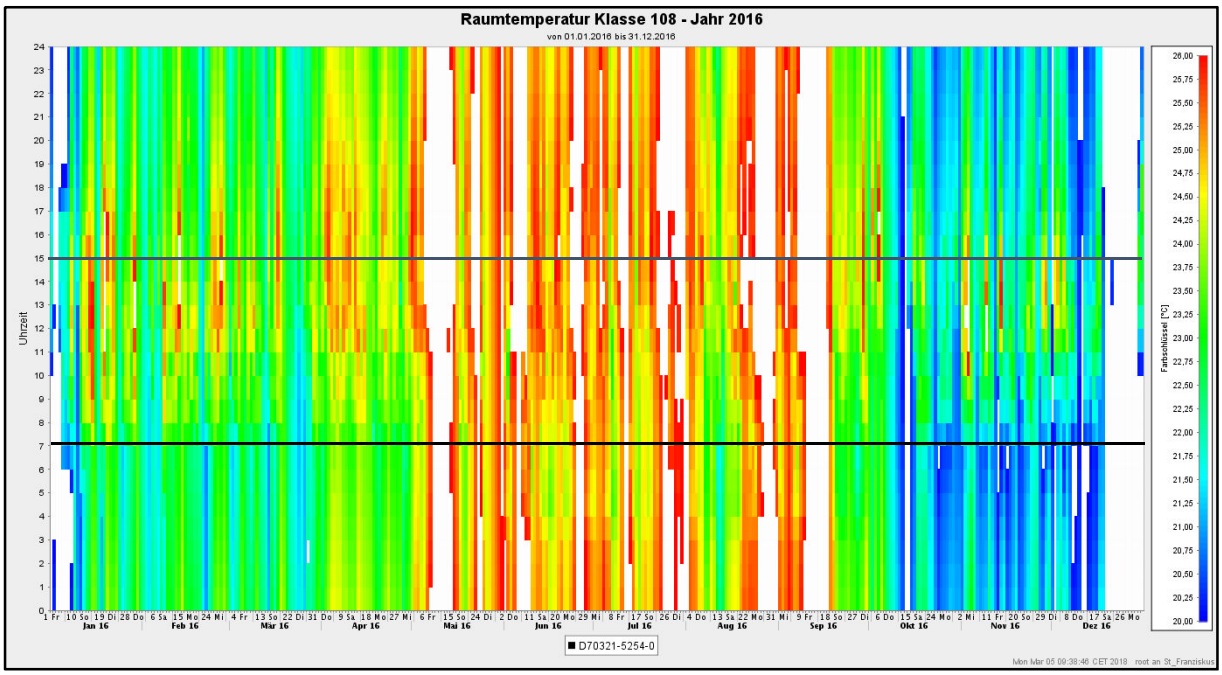


**Abbildung 3-2: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – Carpetplot**

Die gleiche Aussage kann Abbildung 3-3 entnommen werden – zusätzlich mit der Aussage, wie stark die Temperaturschwankungen im Stundenmittel auch oberhalb von 26 °C und unterhalb von 20 °C sind.

Da die Raumtemperaturen außerhalb der Nutzungszeit nicht für den Nutzerkomfort entscheidend sind, wird die Darstellung in Abbildung 3-4 auf die Schultage in der Zeit von 7 bis 15 Uhr beschränkt. Der Temperaturmittelwert während der Nutzungszeit im Jahr 2016 beträgt 23,8 °C. Die Raumlufttemperatur liegt dabei im Bereich von 19,7 °C bis 28,3 °C.

Eine genaue Analyse ergab, dass in 5 Nutzungsstunden des Jahres 2016 der Sollwert von 20 °C unterschritten wurde. Dies entspricht 0,3 % der Nutzungszeit.

Vergleicht man die Übertemperaturgradstunden mit der Anforderung nach DIN 4108-2:2013 Tabelle 9, in welcher in der Sommerklimaregion C auf eine Überschreitung von 27 °C während einer normierten Nutzungszeit von 7 bis 18 Uhr Bezug genommen wird [2], so ergeben sich aus den Messwerten für das gesamte Jahr – jedoch nur an Schultagen von 7 bis 18 Uhr – insgesamt 56 Kh, womit der Grenzwert von 500 Kh deutlich eingehalten wird. Die reale Nutzungszeit ist deutlich kürzer als in der Norm veranschlagt.

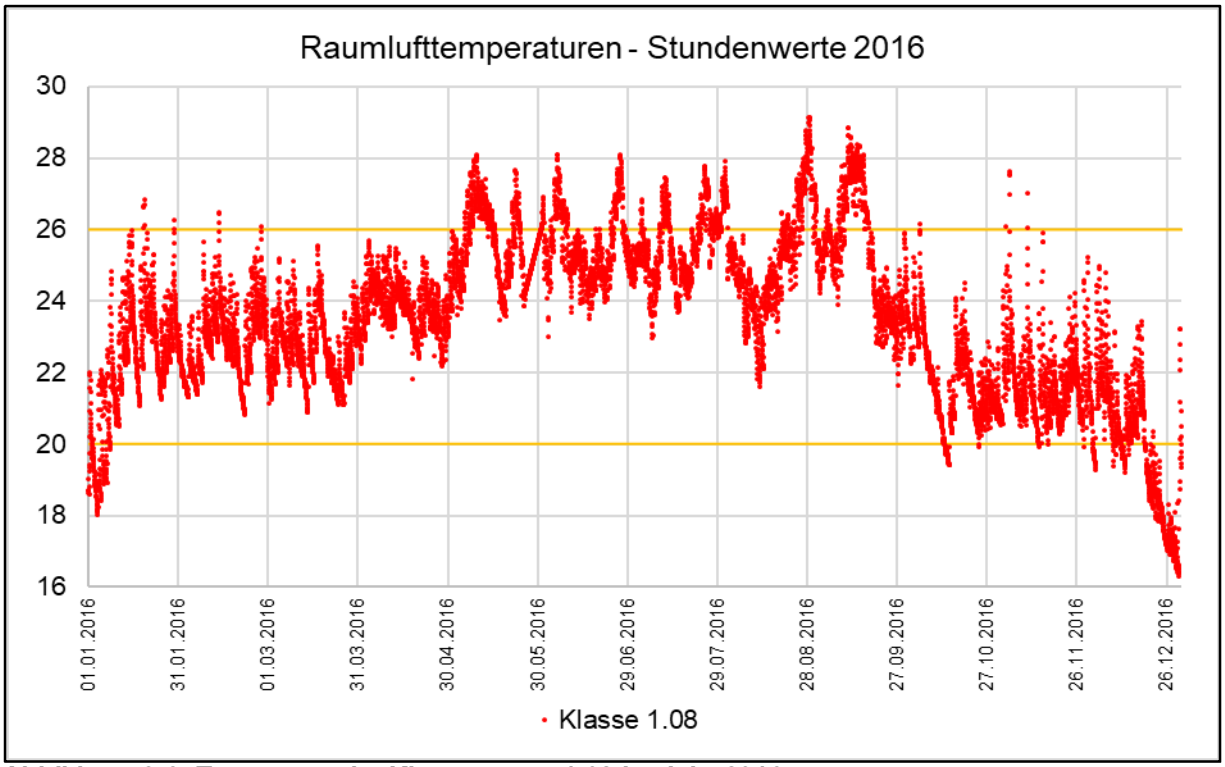


**Abbildung 3-3: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016**

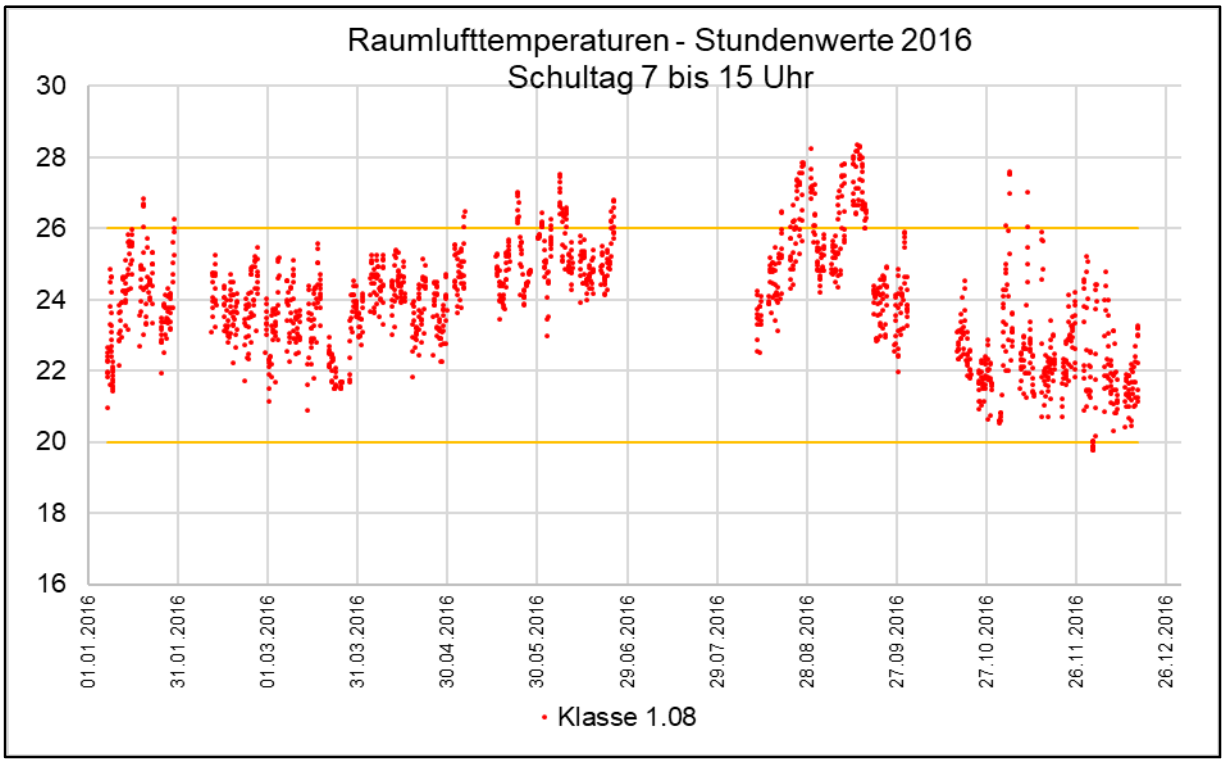


**Abbildung 3-4: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016, Schultage 7-15 Uhr**

Überschreitungen der 26 °C-Marke hingegen sind bereits erstmals im Januar 2016 zu verzeichnen und treten von Mai bis September 2016 gehäuft auf. Die Analyse der Überschreitungen in der EXCEL-Auswertung der Stundenmittel ergibt 169 Stunden im Jahr 2016 (9,9 % von 1701 Nutzungsstunden), in denen die Temperaturen während der Nutzungszeit zwischen 7 und 15 Uhr zu hoch lagen. Die mittlere Überschreitung betrug dabei 0,9 K, sodass sich Übertemperaturgradstunden von 147 Kh ergeben. Bei der Ermittlung der Übertemperaturgradstunden wurden die Ferienzeiten bereits ausgeklammert.

Eine Überschreitung der 25 °C-Grenze, die nach Empfehlung des Passivhaus-Institutes auf max. 10 % der Nutzungszeit zu begrenzen ist, wurde ebenfalls überprüft. Es zeigt sich in 399 Nutzungsstunden eine Überschreitung des Kriteriums. Bezogen auf 1701 Nutzungsstunden ergibt dies einen Anteil von $h_{\vartheta \geq 25}$ = 23,5 %. Der Grenzwert ist somit deutlich überschritten worden.

Die Lufttemperaturen im Raum 1.08 auf der Südseite im Zusammenhang mit der Außenlufttemperatur zeigt Abbildung 3-5. Auch diese Darstellung lässt erkennen, dass eine Unterschreitung der Sollwerte praktisch nicht festzustellen ist. Jedoch sind in allen Jahreszeiten – auch im Winter – zu hohe Temperaturen erkennbar. Die Komfortraumtemperatur (gestrichelt) und die operativen Raumtemperaturen (± 2 K gegenüber der Komfortraumtemperatur) sind in Anlehnung an DIN EN 15251:2012 markiert worden [13].

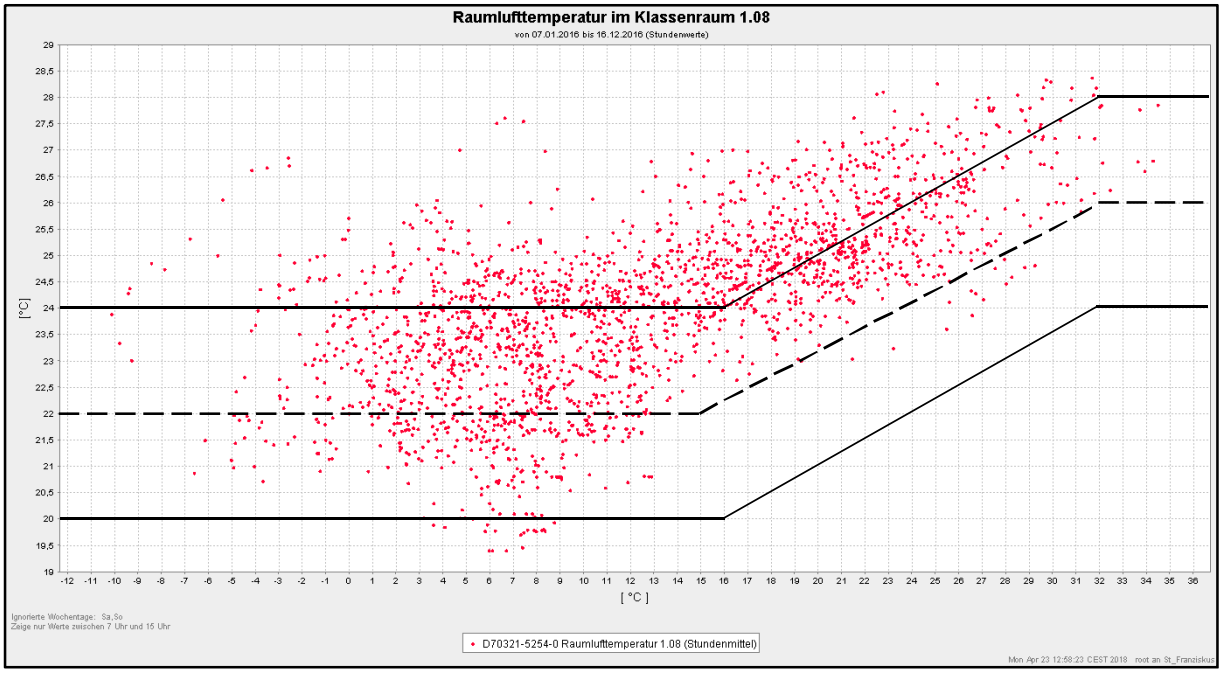


**Abbildung 3-5: Raum- über Außentemperatur Klasse 1.08, Jahr 2016 wochentags 7 bis 15 Uhr**

**Jahr 2017**

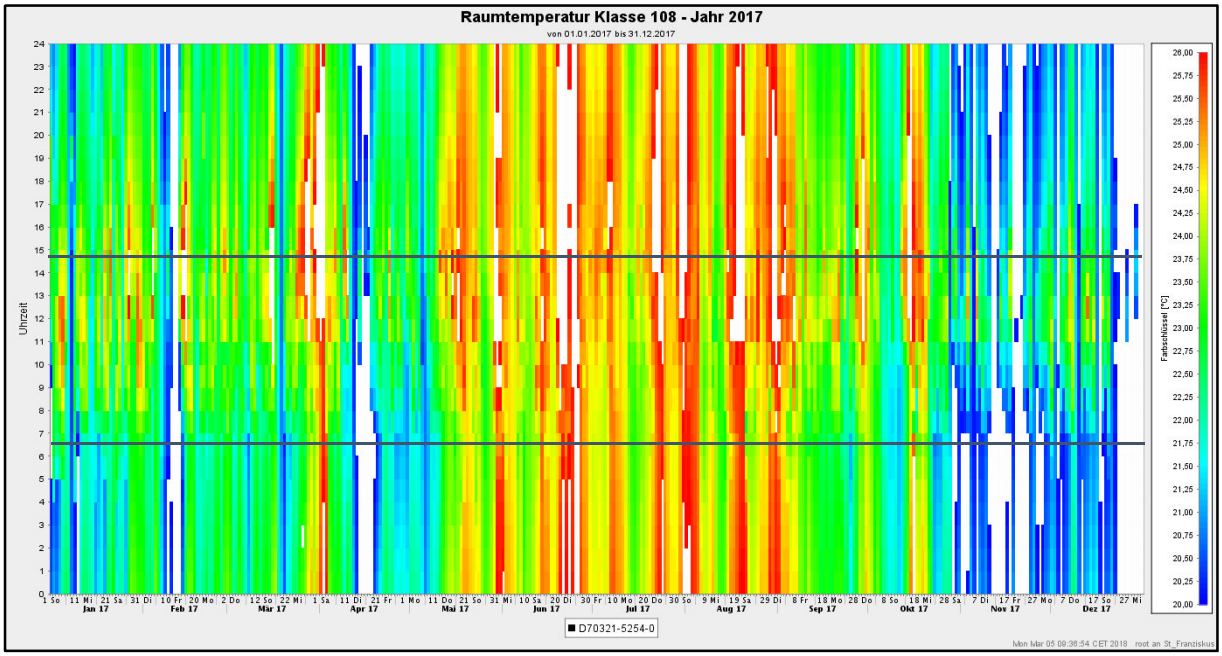


**Abbildung 3-6: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2017 – Carpetplot**

Im Jahr 2017 sind die Überschreitungen der Behaglichkeitsgrenze von 26 °C weniger stark ausgeprägt. Dafür gibt es mehr Temperaturunterschreitungen (< 20 °C) im November 2017.

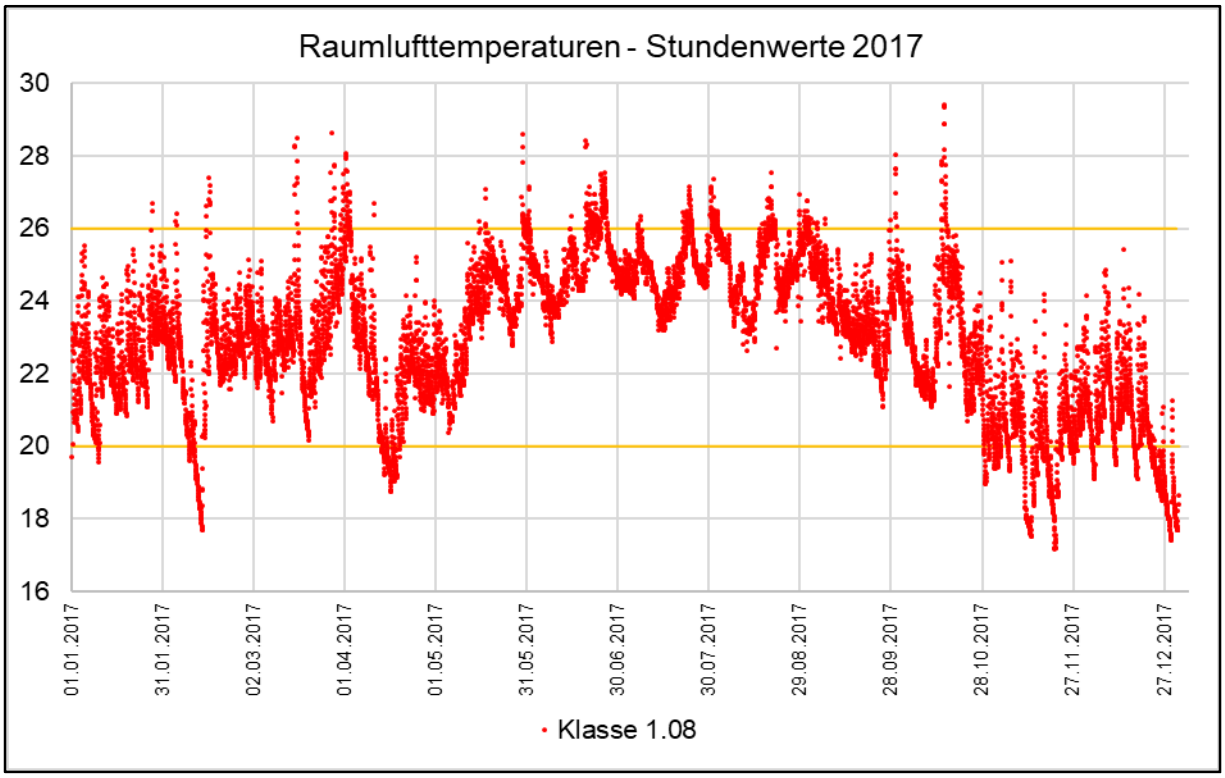


**Abbildung 3-7: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2017**

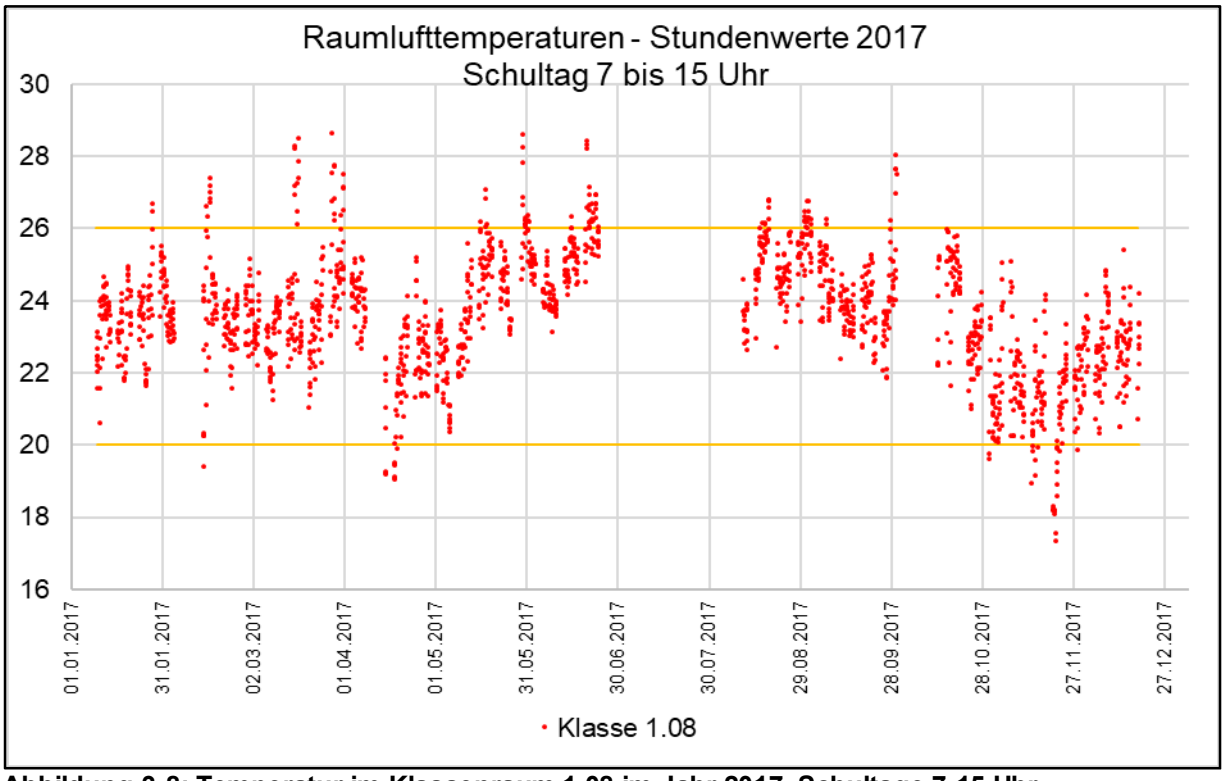


**Abbildung 3-8: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2017, Schultage 7-15 Uhr**

Die genaue Analyse der Nutzungszeit von 7 bis 15 Uhr ergab eine mittlere Raumlufttemperatur von 23,2 °C.

Die Anforderung gemäß sommerlichem Wärmschutz nach DIN 4108-2:2013 ergibt Übertemperaturgradstunden gegenüber 27 °C von 22 Kh. Der Grenzwert von 500 Kh ist auch hier eindeutig eingehalten. Die Übertemperaturgradstunden gegenüber der 26 °C-Marke sanken auf 83 Kh, diese traten in 110 Nutzungsstunden auf (6,3 % der Nutzungszeit).

Die Übertemperaturhäufigkeit gegenüber dem 25 °C-Kriterium ergab 346 h während einer Nutzungszeit von 1746 h. Dies entspricht $h_{\vartheta \geq 25}$ = 19,8 %, womit die Empfehlung des Passivhaus Institutes von 10 % erneut deutlich überschritten wurde.

Dem gegenüber steht eine Erhöhung der Stundenzahl, in denen die Soll-Temperatur von 20 °C nicht erreicht wurde. Dies betrifft 38 h im Jahr 2017, was 2,2 % der Nutzungszeit entspricht.

Abbildung 3-9 zeigt wenige Unterschreitungen des Komfortbereiches. Die Mehrheit der Messpunkte liegt im erhöhten und überhöhten Bereich.

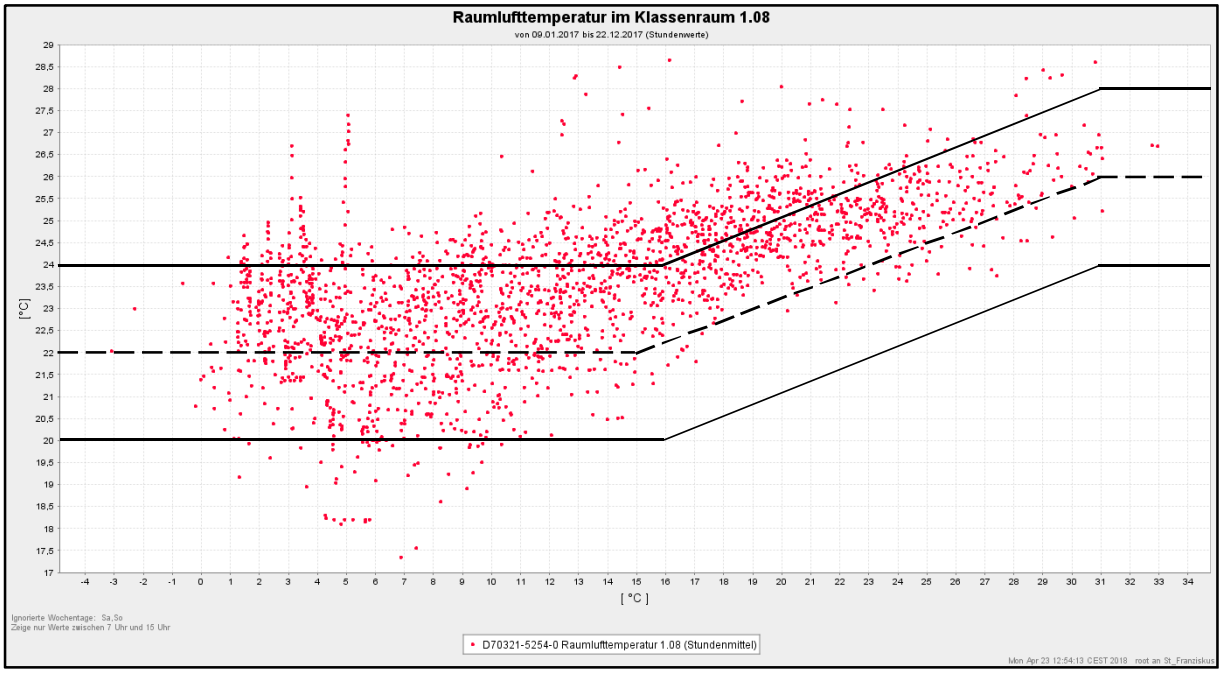


**Abbildung 3-9: Raum- über Außentemperatur Klasse 1.08, Jahr 2017 wochentags 7 bis 15 Uhr**

Die Abweichungen der beiden Jahre kann durch die manuell durch den Hausmeister gewählte Zulufttemperatur erklärt werden. Er reagiert dabei auf Beschwerden mit schrittweiser Anpassung der Zulufttemperatur und verschiebt damit für das gesamte Gebäude die Temperaturen. Eine vermiedene Überwärmung auf der Südseite erhöht dabei die Untertemperaturen auf der Nordseite und umgekehrt.

## *3.3 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Klassenraum 2.01*

Auch hier soll zunächst ein Zeitraumvergleich der Raumlufttemperaturen in Klassenraum 2.01 (Nordraum) vorgenommen werden, dargestellt sind in Abbildung 3-10 die Tagesmittel für die Jahre 2016 und 2017 unabhängig von den Nutzungszeiten des Klassenraumes. Leider sind die Werte für 2017 aufgrund eines Ausfalls der Messtechnik nur begrenzt verwertbar.

Im Sommer 2017 fällt die Übertemperaturhäufigkeit (> 26°C) deutlich geringer aus. Der Mittelwert der Raumlufttemperaturen beträgt 22,0 °C im Jahr 2016. Für das Jahr 2017 sind die Daten zu lückenhaft, um eine Aussage zu treffen.

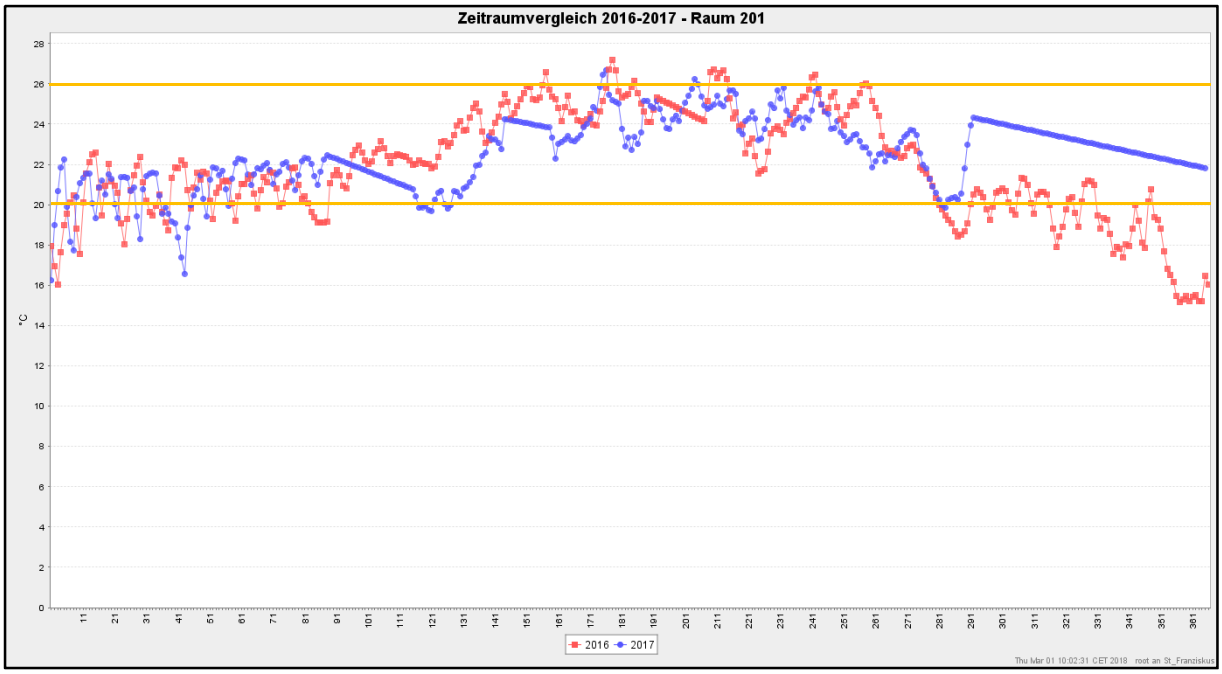


**Abbildung 3-10: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel**

Den Raumbelegungsplänen ist zu entnehmen, dass der Unterricht montags bis freitags von 7:30 bis 12.15 Uhr stattfindet, in Ausnahmefällen ist die Klasse auch in der 6. Stunde anwesend. Darüber hinaus werden von 14:30 bis 15:15 Uhr die Hausaufgaben gemacht. Auch hier werden die Gesamtjahresmesswerte und die Messwerte während der Nutzungszeit wochentags von 7 bis 15 Uhr jeweils gegenübergestellt.

### Jahr 2016

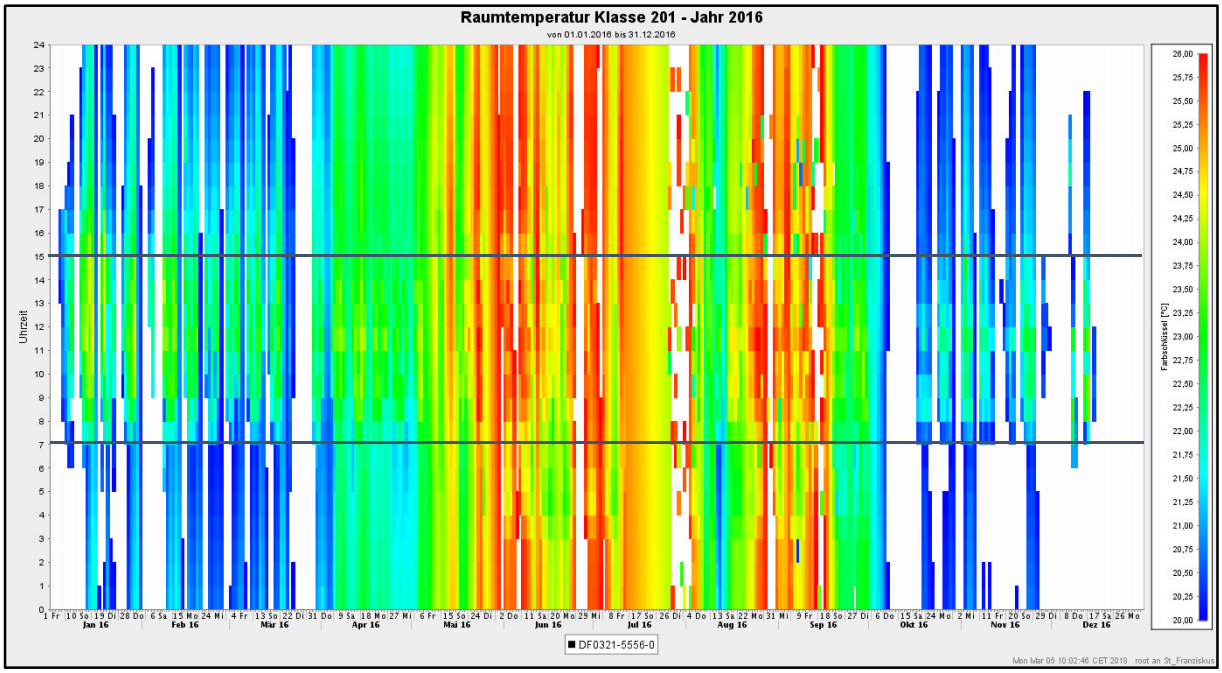


**Abbildung 3-11: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016 – Carpetplot**

Auffallend sind die sehr häufigen Mindesttemperaturunterschreitungen im nordorientierten Klassenraum 2.01 in der Zeit von Januar bis März und Oktober bis Dezember 2016 in Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12.

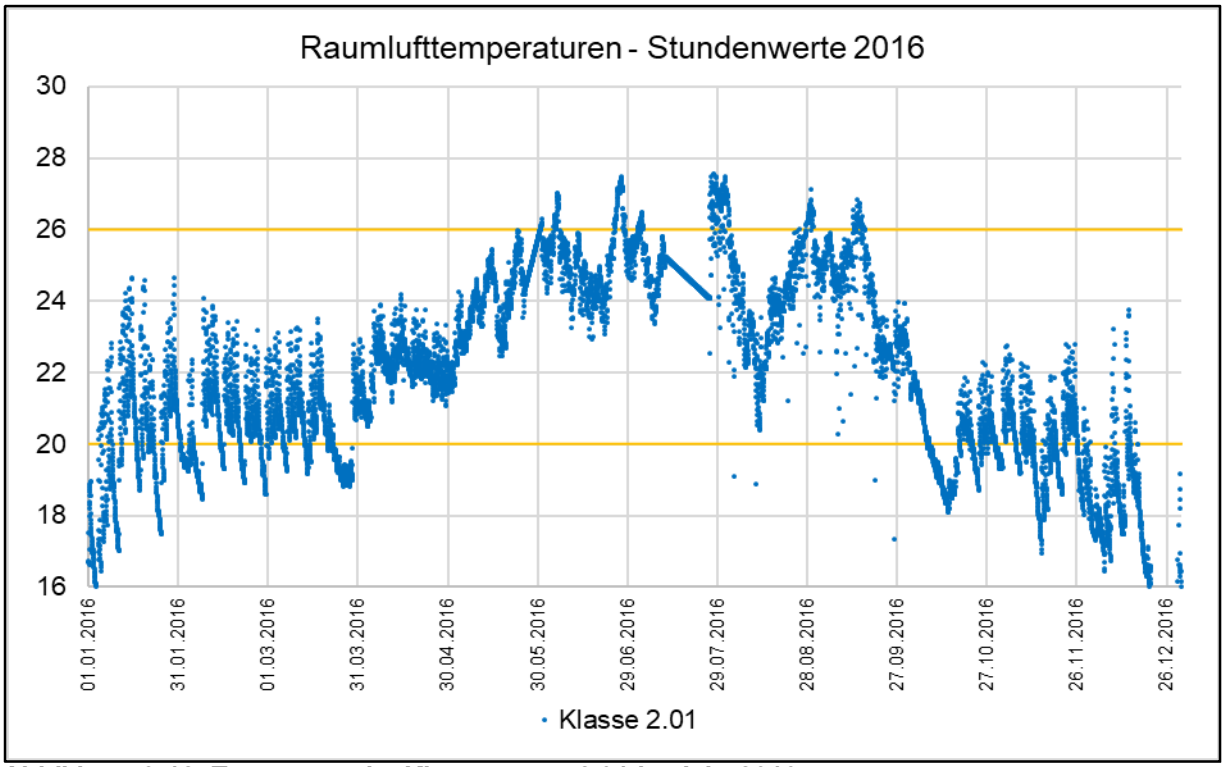


**Abbildung 3-12: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016**

Beschränkt man die Auswertung auf die Nutzungszeit zwischen 7 und 15 Uhr (Abbildung 3-13), so ergibt sich ein Mittelwert der Raumlufttemperatur von 22,3 °C. Die Bandbreite liegt dabei im Bereich von 17,2 °C bis 27,1 °C.

Unterschreitungen der Soll-Temperatur zeigen sich auch während der Nutzungszeit regelmäßig bis Ende März und dann wieder ab Oktober. Eine EXCEL-Analyse ergab, dass in 166 h des Jahres innerhalb der Nutzungszeit von 7 bis 15 Uhr die Soll-Temperatur von 20 °C im Mittel unterschritten wurde. Bei 1701 Nutzungsstunden entspricht dies 9,8 % der Nutzungszeit.

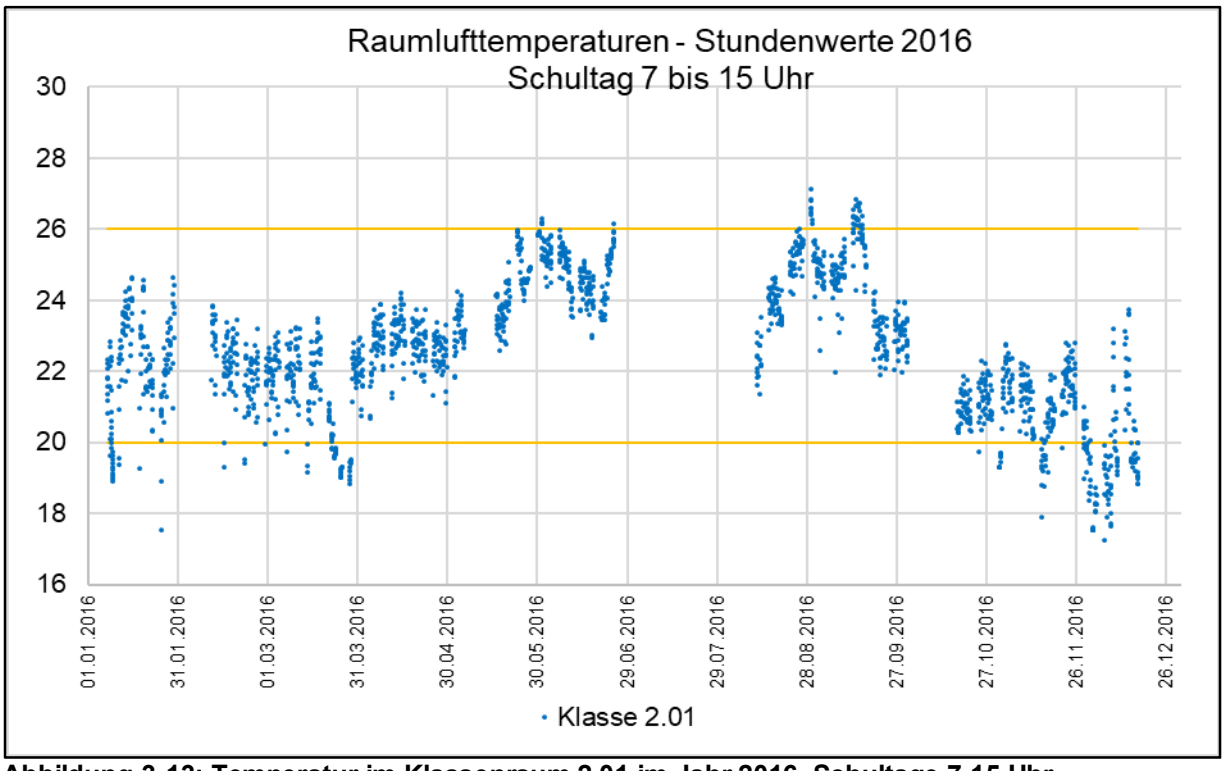


**Abbildung 3-13: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016, Schultage 7-15 Uhr**

Überschreitungen der 26 °C-Marke sind auf der Nordseite deutlich seltener als im südorientierten Raum der Fall, sie treten in 35 h zwischen Mai und September auf. Die Übertemperaturgradstunden über 27 °C gehen mit 0,1 Kh gegen Null.

In 208 Stunden des Jahres wurde die 25 °C-Marke überschritten, was bei 1701 Nutzungsstunden einem Wert von $h_{\vartheta \geq 25}$ = 12,2 % entspricht. Die Empfehlung des Passivhaus Institutes wurde damit leicht überschritten.

Abbildung 3-14 zeigt die Zusammenhänge gegenüber der Außenlufttemperatur für den Nordklassenraum. Es zeigt sich deutlich, dass etliche unbehaglich kalte Luftzustände zu verzeichnen sind. Aber auch Überschreitungen des Komfortbereiches treten häufig auf, wenn auch nicht so stark ausgeprägt wie im Südklassenraum.

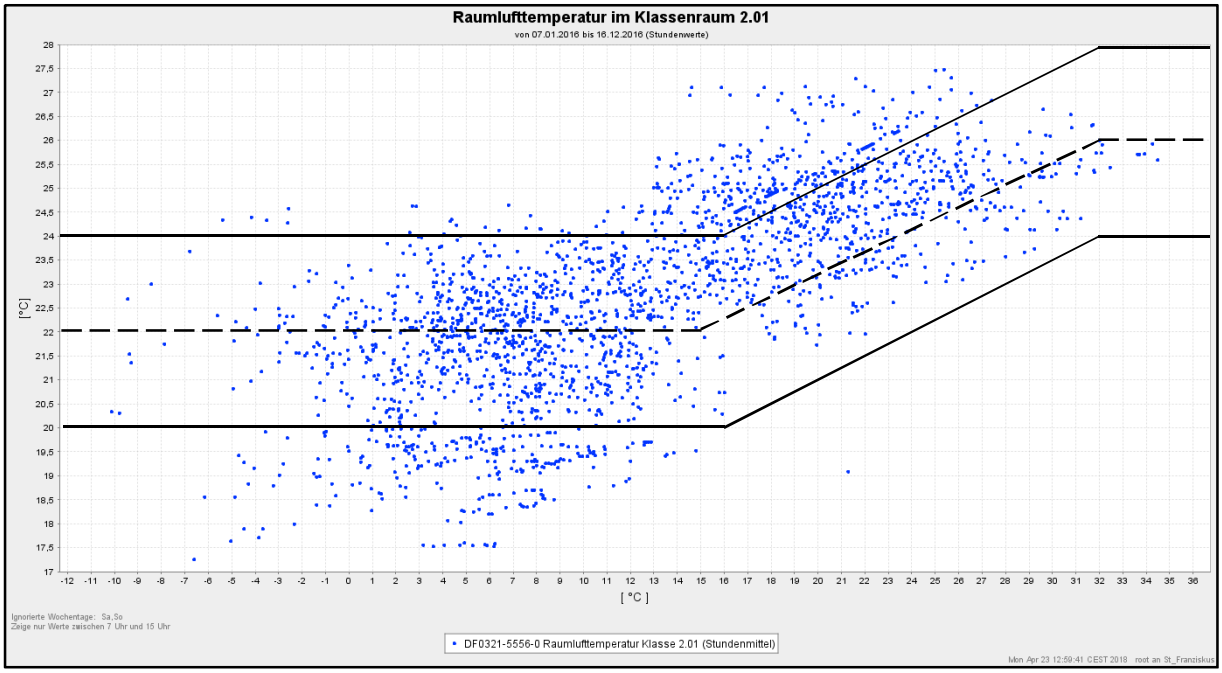


**Abbildung 3-14: Raum- über Außentemperatur Klasse 2.01, Jahr 2016 wochentags 7 bis 15 Uhr**

### Jahr 2017

Leider lässt Abbildung 3-15 sofort Probleme mit der Messtechnik im Zeitraum April 2017 und ab Ende Oktober erkennen, weshalb hier auf detaillierte Auswertungen verzichtet wird. Die minimal gemessene Raumtemperatur während der Nutzungszeit beträgt 17,4 °C, die maximale 26,5 °C. Es zeigen sich weiterhin Probleme mit einer Sollwert-Unterschreitung bis Februar und in der ersten Maihälfte.

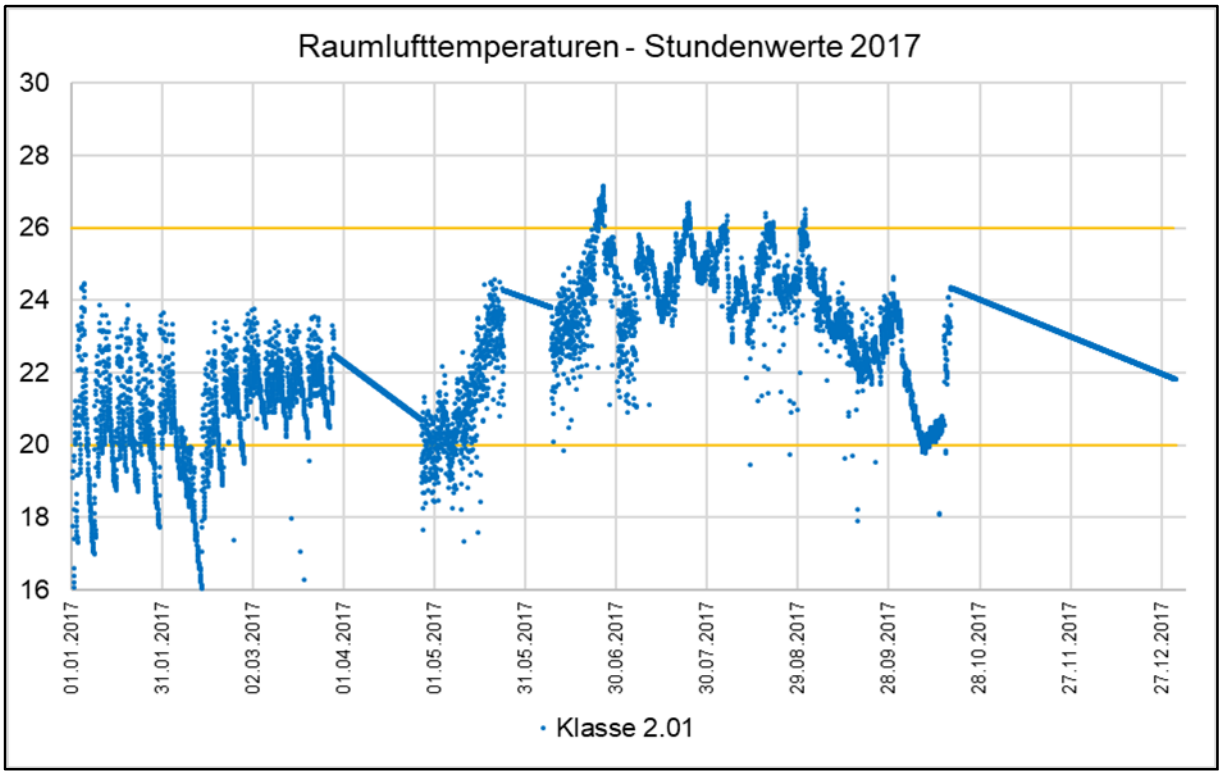


**Abbildung 3-15: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2017**

## *3.4 Temperaturhäufigkeit und -verlauf der Klassenräume im Vergleich*

### *3.4.1 Frühlingswoche in den Klassenräumen*

Der Verlauf der Raumlufttemperatur während einer Schulwoche im Frühling wird für die Woche vom 11.04. bis 15.04.2016 beispielhaft ausgewertet. In Abbildung 3-16 ist zu erkennen, dass in der entsprechenden Woche die Außentemperatur zwischen ca. 4 °C und 18,7 °C schwankt und am Dienstag die Sonneneinstrahlung am stärksten ist.

Die Verläufe zeigen, dass die Rauminnentemperaturen im südorientierten Klassenraum 1.08 in der gesamten Woche über denen aus dem nordorientierten Klassenraum 2.01 liegen. Gut ersichtlich ist, dass die Temperatur während der Anwesenheit der Nutzer zwischen 7:30 und 12:15 Uhr steigt, gegen Mittag ihren Höhepunkt erreicht und über den Abend und die Nacht wieder absinkt.

Am Tag mit den meisten Sonnenstunden und der höchsten Außentemperatur dieser Woche, am Dienstag dem 12.04.2016, wird im Klassenraum 1.08 bereits zum Beginn des Unterrichts eine Temperatur von 23,6 °C und nach dem Unterricht um 12:20 Uhr eine Temperatur von 25,6 °C gemessen. Die Höchsttemperatur wird an diesem Tag um 13:50 Uhr mit 25,7 °C erreicht. Der Grenzwert von 26 °C wird zwar nicht überschritten, jedoch pendelt sich die Innentemperatur selbst in der Nacht im Bereich von ca. 24,5 °C ein. Insgesamt können die Temperaturen für diese Jahreszeit bereits als recht hoch eingestuft werden, sie fallen nicht unter 23 °C.

Im nordorientierten Klassenraum 2.01 schwanken die Temperaturen zwischen etwa 21 und 24 °C. Zum Unterrichtsbeginn am Dienstag werden um 7:30 Uhr 23,1 °C gemessen. Nach fünf Unterrichtstunden hat sich die Rauminnentemperatur auf 23,8 °C erhöht. Auch an den anderen Wochentagen ist ein Temperaturanstieg von etwa 1 K zu verzeichnen.

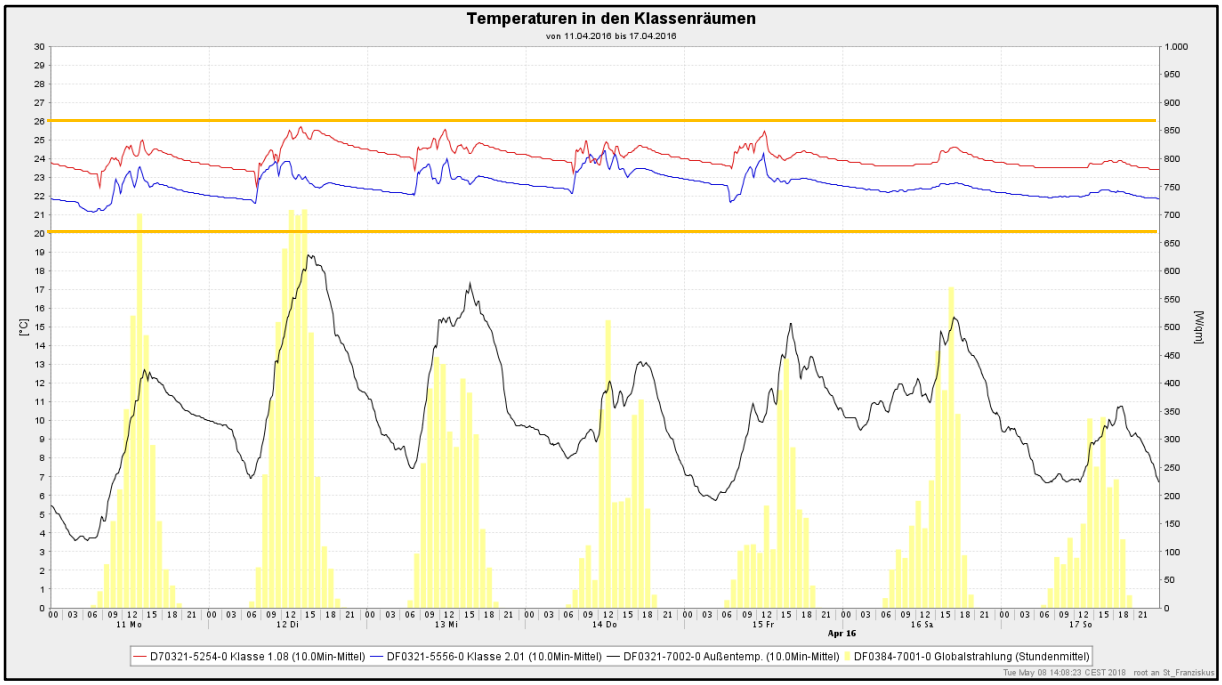


**Abbildung 3-16: Raumtemperatur der Klassenräume 11.04. – 15.04.2016**

### *3.4.2 Sommerwoche in den Klassenräumen*

Für einen typischen sommerlichen Verlauf wird die Woche vom 20.06. – 24.06.2016 beispielhaft ausgewertet. Aus den Daten der Wetterstation in Abbildung 3-17 wird ersichtlich, dass die Tageshöchsttemperaturen von ca. 23 °C am Montag auf über 34 °C am Freitag anstiegen. Donnerstag und Freitag waren besonders sonnige Tage.

Im Vergleich zur Frühlingswoche ist der Temperaturunterschied zwischen Nord- und Südorientierung etwas geringer. Die Raumtemperaturen im nordorientierten Klassenraum 2.01 liegen meist ca. 1 K unter denen im südorientierten Klassenraum 1.08.

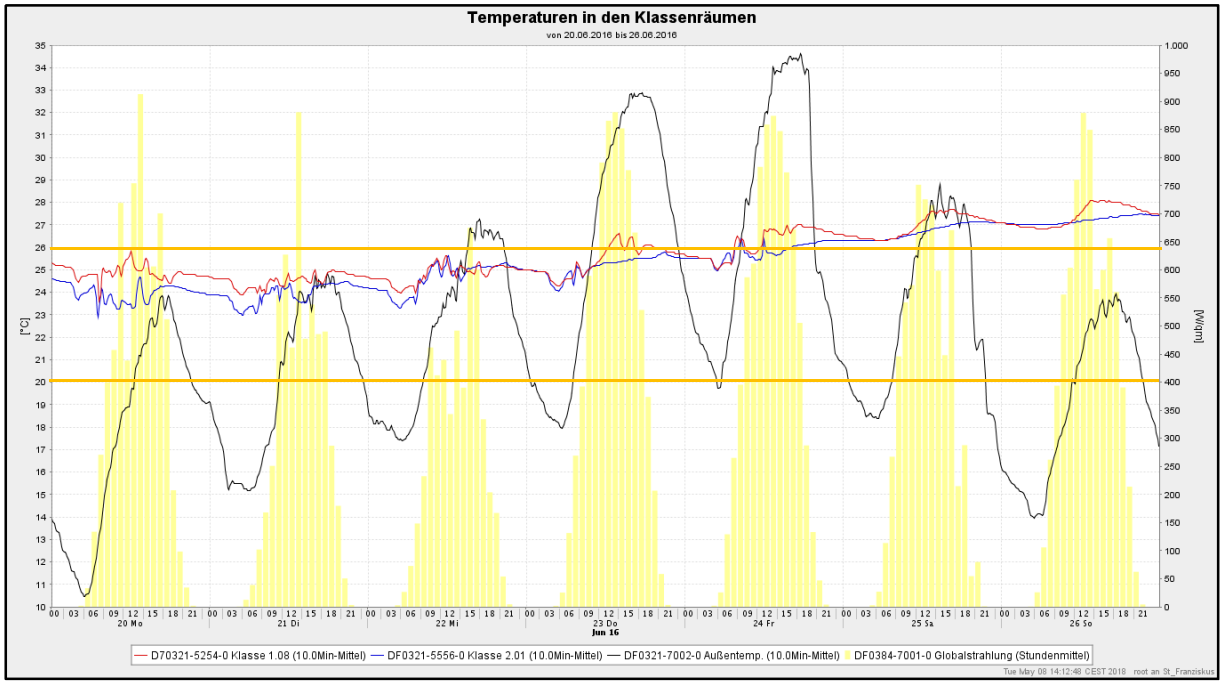


**Abbildung 3-17: Raumtemperatur der Klassenräume 20.06. – 26.06.2016**

Im Raum 1.08 wird am Donnerstag ab 12:30 Uhr der Grenzwert der Rauminnentemperatur von 26 °C überschritten, diese erreicht gegen 14:10 Uhr einen Höchstwert von 26,6 °C. Über den Abend und die Nacht von Donnerstag zu Freitag kühlt sich die Luft im Raum nur minimal auf ca. 25 °C ab. Am Freitagmorgen ab 7:30 Uhr wird der Grenzwert von 26 °C wieder überschritten, schwankt im Laufe des Vormittags zwischen 25,7 °C und 26,7 °C und erreicht zur Mittagszeit (12:10 Uhr) einen Wert von 26,9 °C. Der Tageshöchstwert der Rauminnentemperatur wird um 15:40 Uhr mit 27 °C erreicht. Zum Wochenende erfolgt ein Anstieg der Raumtemperaturen, da hier die Lüftungsanlage nicht in Betrieb ist.

Im Klassenraum 2.01 wird der Grenzwert erst am Freitag überschritten, die Temperatur steigt jedoch am Mittwoch und Donnerstag schon auf ca. 25 °C an. Am Freitagmorgen ab 8:20 Uhr wird der Grenzwert von 26 °C überschritten, die Raumlufttemperatur erreicht ca. 8:40 Uhr den Tageshöchstwert von 26,5 °C. Am nachfolgenden Wochenende steigt die Raumtemperatur weiter an und liegt im Mittel bei 26,9 °C.

Auffällig ist die fehlende Nachtlüftung trotz geringer Außentemperaturen. Die Abkühlung bis zum Unterrichtsbeginn beträgt häufig weniger als 1 K. Hierdurch sind die Räume schon morgens recht warm. Die Ursachen werden in Kapitel 3.16 und im Abschlussbericht Teil 7 – Lüftung diskutiert.

### *3.4.3 Herbstwoche in den Klassenräumen*

Für den Vergleich einer Herbstwoche dient die Woche vom 24.10. – 28.10.2016 als Beispiel. In dieser Zeit werden Höchsttemperaturen von etwa 9 bis 13 °C und Tiefsttemperaturen von etwa 3 bis 9 °C gemessen.

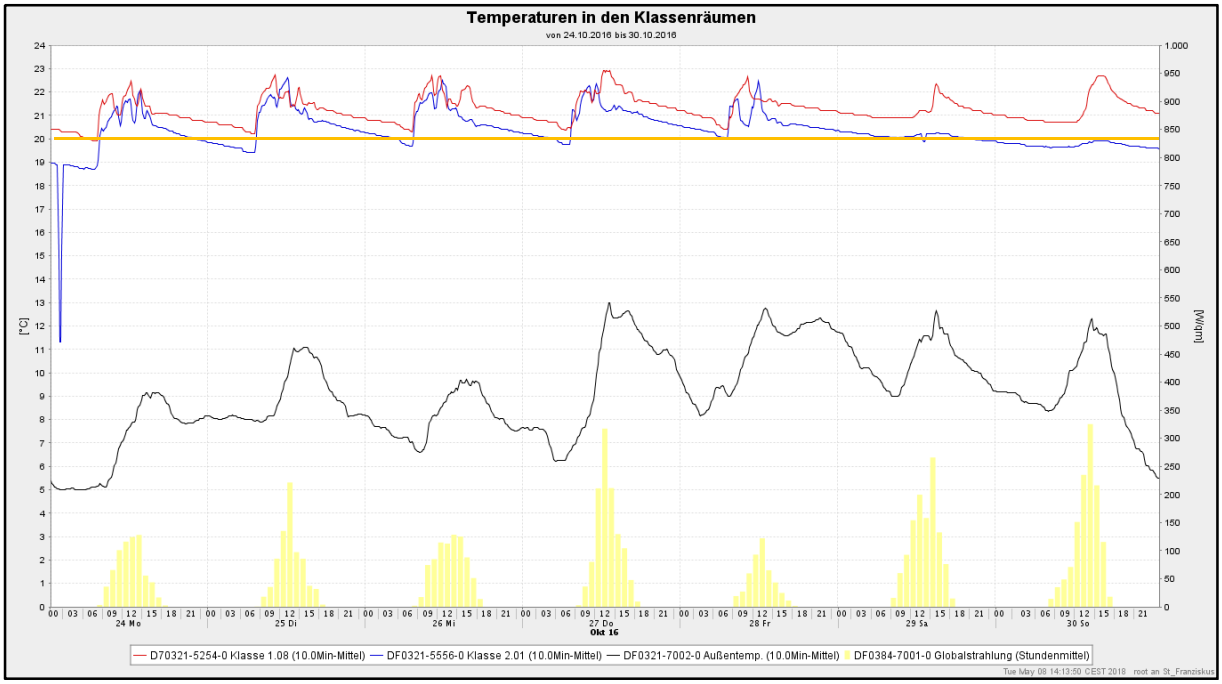


**Abbildung 3-18: Raumtemperatur der Klassenräume 24.10. – 30.10.2016**

In Bezug auf die Raumlufttemperaturen, welche in Abbildung 3-18 dargestellt sind, erkennt man eine tägliche, zyklische Wiederholung der Verläufe. Während der Nutzungszeit steigt die Temperatur, sinkt nach dem Unterricht wieder und erreicht am nächsten Morgen wieder ungefähr die Anfangstemperatur des vorherigen Morgens.

Im Klassenraum 1.08 werden z. B. am Mittwoch zum Beginn des Unterrichts um 7:30 Uhr 21,4 °C gemessen. Während der Unterrichtsstunden steigt die Temperatur auf höchstens 22,8 °C (10:10 Uhr) und erreicht zum Unterrichtsende wieder 21,3 °C. In der Nacht verringert sich die Temperatur und liegt am Donnerstagmorgen bei 20,7 °C.

Im Klassenraum 2.01 wird die empfohlene Mindesttemperatur von 20 °C am Montagmorgen mit 19,7 °C unterschritten, sie steigt jedoch durch die Belegung innerhalb von 10 Minuten auf 20,4 °C. Nach dem Unterricht am Montag herrscht im Raum eine Temperatur von 21,3 °C. An den restlichen Tagen liegt die Raumtemperatur zum Unterrichtsbeginn über 20 °C.

Auch hier liegen die Raumtemperaturen im Südklassenraum meist ca. 1 K über denen des Nordklassenraumes, wobei die Temperaturspitzen an weniger sonnigen Tagen ähnliche Werte erreichen. Lediglich am etwas sonnigeren Donnerstag der Beispielwoche liegt die Temperaturspitze im Südraum 1 K höher als im Nordraum.

### *3.4.4 Winterwoche in den Klassenräumen*

Für den typischen Verlauf in der Heizperiode wurde die Woche vom 05.12. – 09.12.2016 für eine Auswertung ausgewählt. In dieser Zeit liegen die Höchsttemperaturen zwischen ca. 1 und 9 °C. Die nächtlichen Tiefsttemperaturen befinden sich nur am Anfang der Woche im negativen Bereich zwischen -7 und -5 °C und steigen ab Donnertag auf etwa 4 °C an.

Für die ausgewählte Woche sind in Abbildung 3-19 die Verläufe der Raumtemperaturen der beiden Klassenräume dargestellt. Allgemein ist deutlich abzulesen, wann die Nutzer anwesend sind, da sich in dem Zeitraum die Temperaturen erhöhen. Ist der Raum nicht belegt, sind die Volumenstromregler geschlossen und es entfallen die inneren Wärmegewinne aus Personenabwärme und Beleuchtung.

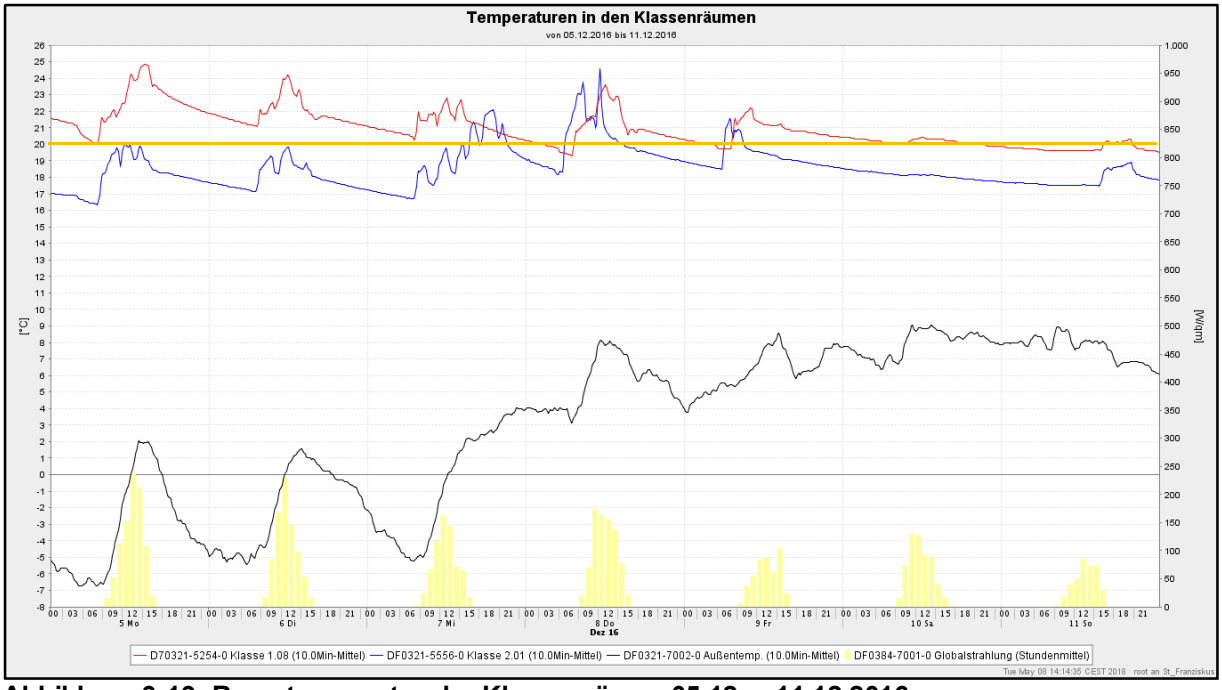


**Abbildung 3-19: Raumtemperatur der Klassenräume 05.12. – 11.12.2016**

Im Klassenraum 1.08 sind die Raumtemperaturen in der gesamten Unterrichtszeit im Behaglichkeitsfeld. Am Montag werden zum Beginn des Unterrichts 21 °C gemessen und am Ende des Unterrichts 24,3 °C. Die Raumtemperaturen in der Nutzungszeit von Montag bis Freitag während der Anwesenheit der Schüler von ca. 07:30 bis 12:15 Uhr liegen bei durchschnittlich 22,03 °C, der Spitzenwert beträgt 24,8 °C gegen 14 Uhr.

Im Klassenraum 2.01 hingegen liegen die Rauminnentemperaturen auch während der Anwesenheit der Nutzer häufig unter der Behaglichkeitsgrenze. Die Raumtemperatur liegt während der Nutzungszeit im Mittel bei 19,7 °C. Von Montag bis Mittwoch herrschen Temperaturen zum Unterrichtsbeginn zwischen 17,5 und 18,3 °C. Am Donnerstag und am Freitag sind mit 22,5 °C und 20,7 °C bessere Anfangsbedingungen vorzufinden.

Selbst zum Unterrichtsende um 12:15 Uhr liegt die Raumlufttemperatur erst bei 18,8 °C (Mittwoch) bis 20,6 °C (Donnerstag). Der Donnerstag ist der einzige Tag in dieser gewählten Winterwoche, an dem die Raumtemperatur im Klassenzimmer 2.01 mit einer durchschnittlichen Raumtemperatur von 22,2 °C über die gesamte Nutzungszeit im Behaglichkeitsfeld liegt. An den anderen Tagen liegen die Messwerte außerhalb des als behaglich empfundenen Temperaturbereiches von 20 °C bis 24 °C.

## *3.5 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Hortraum 0.01*

Der betrachtete Hortraum 0.01 befindet sich in der nordwestlichen Gebäudeaußenecke. Aus energetischer Sicht gilt er als einer der ungünstigsten Räume aufgrund seiner Ausrichtung und des hohen Hüllflächenanteils.

Der Zeitraumvergleich der Raumlufttemperaturen im Hortraum 0.01 stellt die Tagesmittel für die Jahre 2016 und 2017 unabhängig von den Nutzungszeiten dar (Abbildung 3-20). Auf den ersten Blick lässt sich erkennen, dass die 26 °C-Grenze zu keinem Zeitpunkt überschritten wird. Auffälliger sind sehr häufige Unterschreitungen der Soll-Temperatur von 20 °C, auf die in den folgenden Auswertungen näher eingegangen werden soll. Der Hort ist von 6:00 bis 17:00 Uhr geöffnet. Schließzeiten gibt es nur in der 3. und 4. Woche der Sommerferien sowie zwischen Weihnachten und Neujahr.

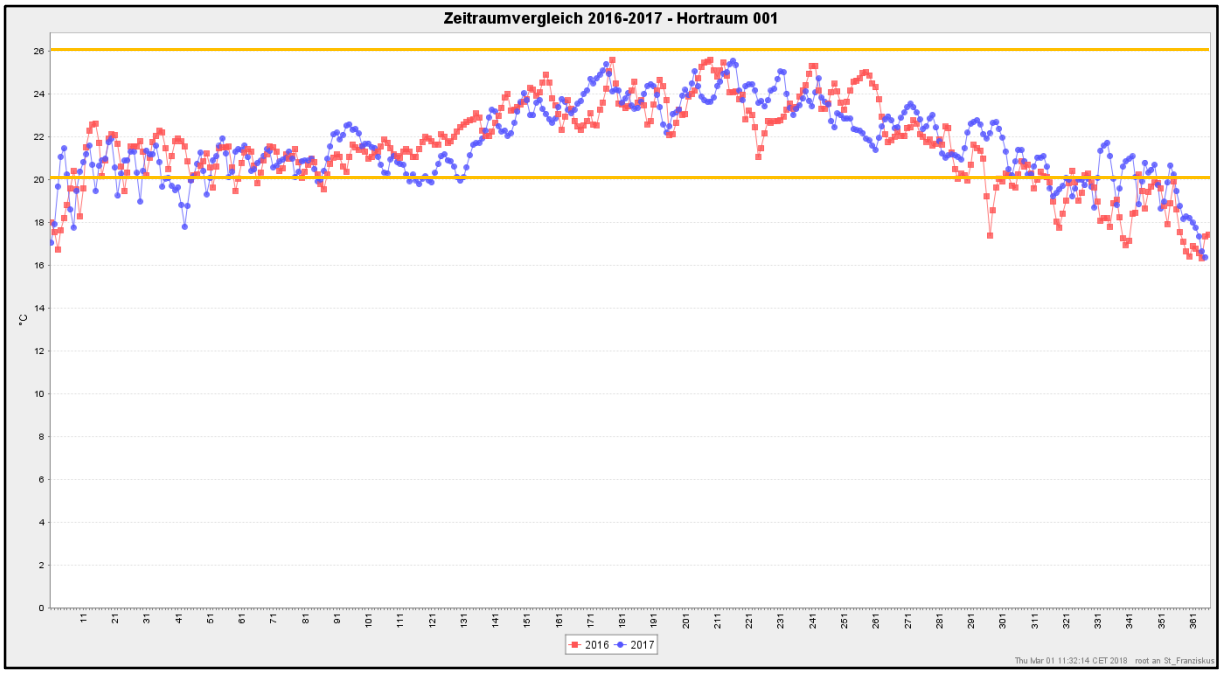


**Abbildung 3-20: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel**

**Jahr 2016**

Aus dem Carpetplot in Abbildung 3-22 für alle Stunden des Jahres 2016 lässt sich deutlich ablesen, dass die Mindesttemperatur von 20 °C insbesondere ab Oktober 2016 sehr häufig unterschritten wird. Jedoch: erst am 5.6.2018 fiel auf, dass der Fühler im Elektroverteiler des Raumes eingebaut war und somit nicht unmittelbar die Raumtemperatur wiedergab. Er wurde daraufhin freigelegt, siehe Abbildung 3-21.

**Abbildung 3-21: Temperaturfühler Hortraum 0.01**

Abbildung 3-23 bildet zunächst den Ganzjahresverlauf ab, während Abbildung 3-24 sich auf die Nutzungszeit von 6 bis 17 Uhr bezieht. Der Mittelwert der Raumlufttemperatur während der Nutzungszeit beträgt 21,7 °C. Die Raumlufttemperatur liegt dabei im Bereich von 16,3 °C bis 25,8 °C, es gab demnach keine Überschreitungen der 26°C-Marke. Die Grenze von 25 °C wurde in 51 h des Jahres 2016 überschritten. Bezogen auf 2892 Stunden (Öffnungszeit im Jahr 2016) sind dies $h_{\vartheta \geq 25}$ = 1,8 %, womit das 10 %-Kriterium des Passivhaus Institutes deutlich erfüllt wird.

Problematisch sind die häufigen Zeitpunkte, in denen die Mindesttemperatur von 20 °C nicht erreicht wird. Dies betrifft 393 Stunden im Jahr während der Nutzungszeit von 6 bis 17 Uhr, entsprechend 13,6 %. Dieser Wert ist deutlich zu hoch und spiegelt sich auch in der – nicht allzu hohen – Nutzerzufriedenheit wider.

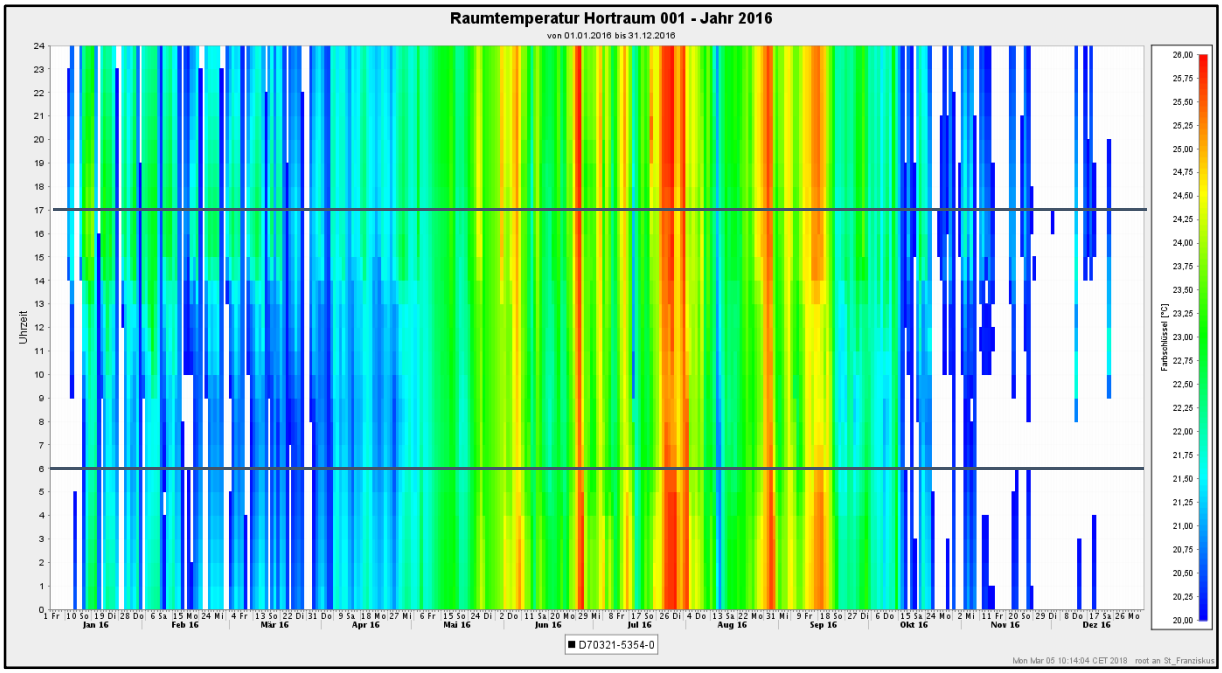


**Abbildung 3-22: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016 – Carpetplot**

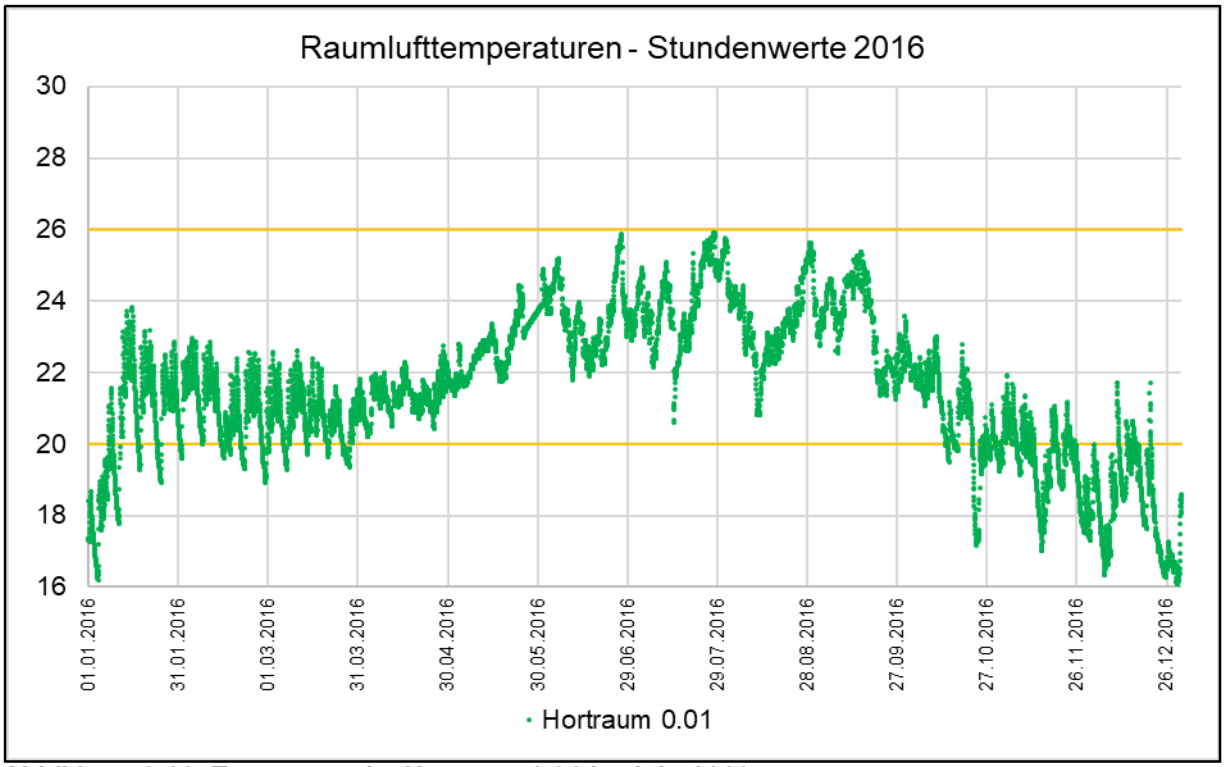


**Abbildung 3-23: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016**

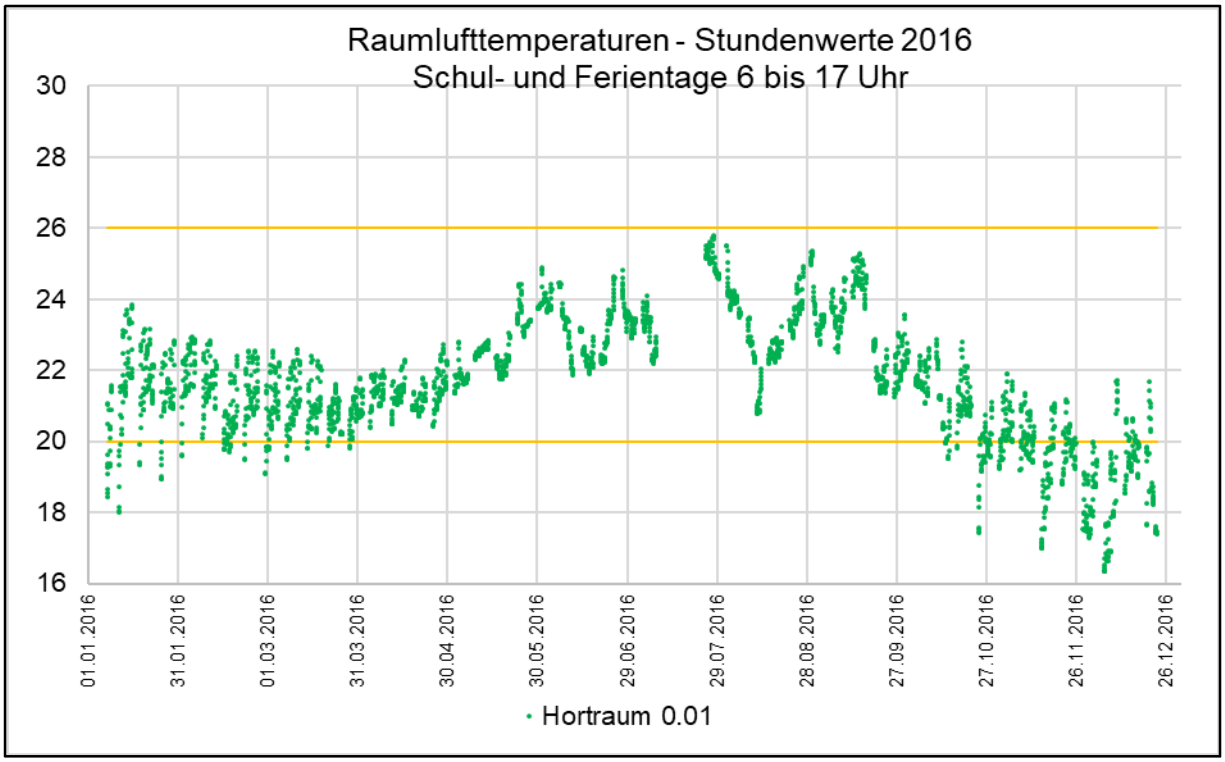


**Abbildung 3-24: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016, wochentags 6-17 Uhr**

Abbildung 3-25 zeigt zahlreiche Unterschreitungen des Komfortbereiches in der kühleren Jahreszeit. Zu warm war es sehr selten.

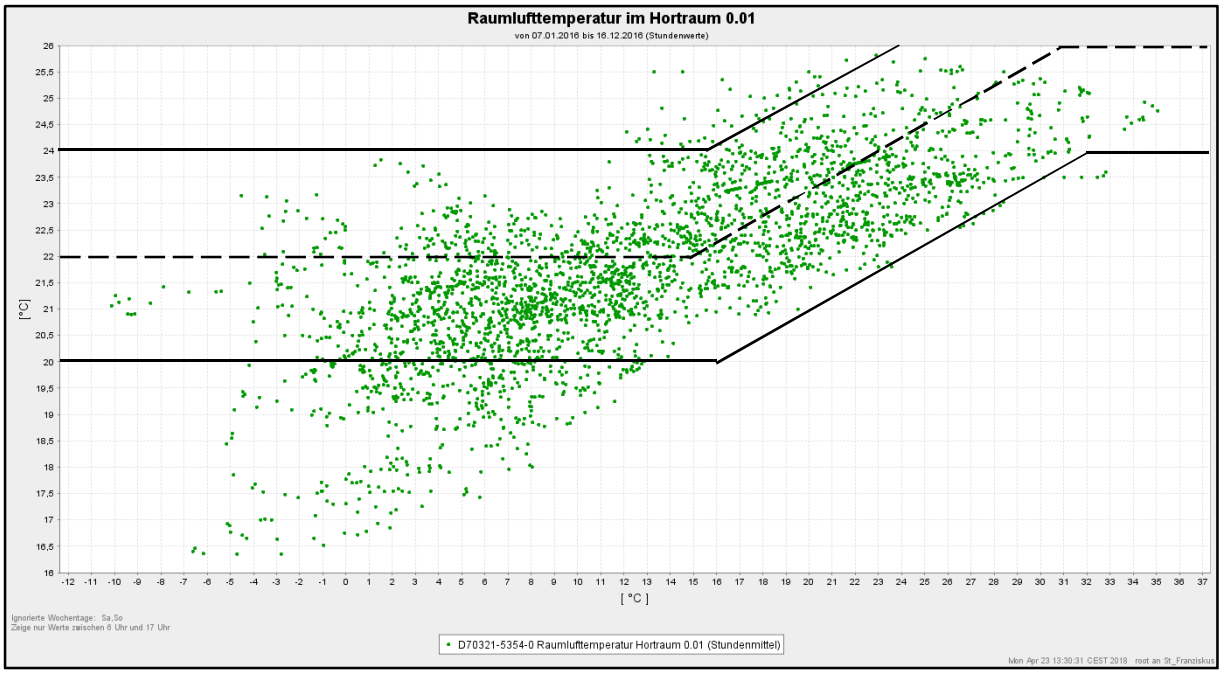


**Abbildung 3-25: Raum- über Außentemperatur Hortraum 0.01, 2016 wochentags 6 bis 17 Uhr**

## Jahr 2017

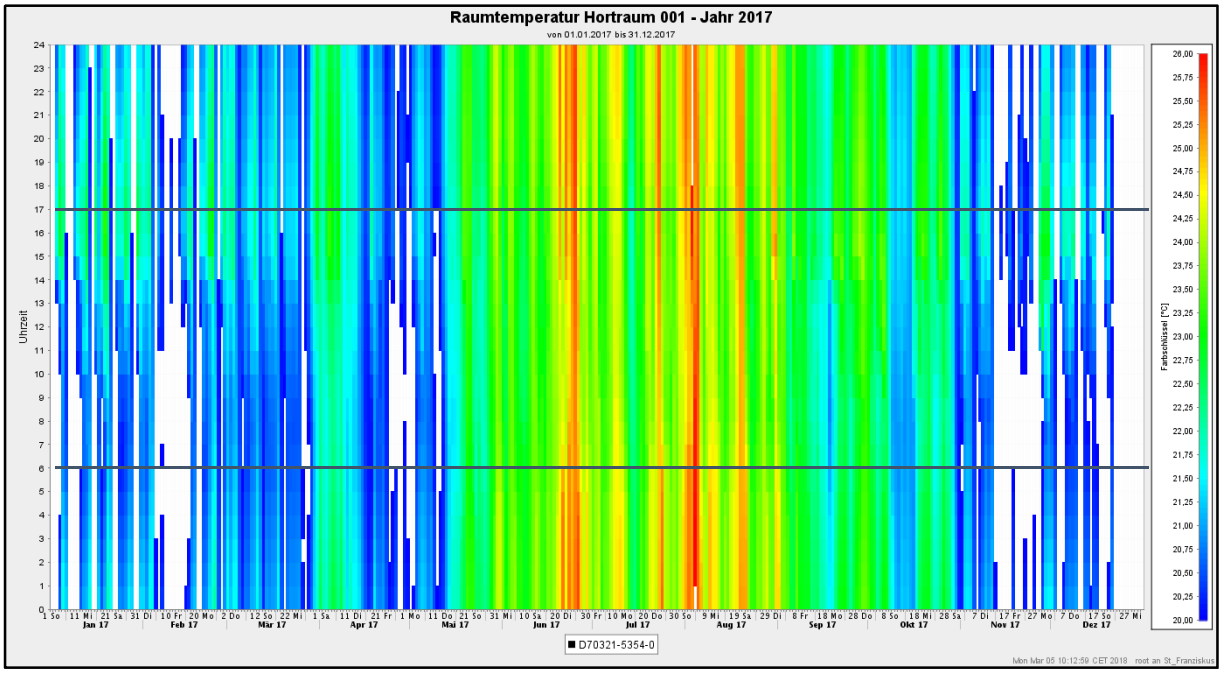


**Abbildung 3-26: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2017 – Carpetplot**

Auch im Jahr 2017 gibt es zahlreiche Fehlstellen im Carpetplot (Abbildung 3-26), die auf Unterschreitungen der Mindesttemperatur zwischen Januar und April sowie November bis Dezember hinweisen. Aus Abbildung 3-27 lässt sich genauer ablesen, wie weit die Temperaturunterschreitungen gehen.

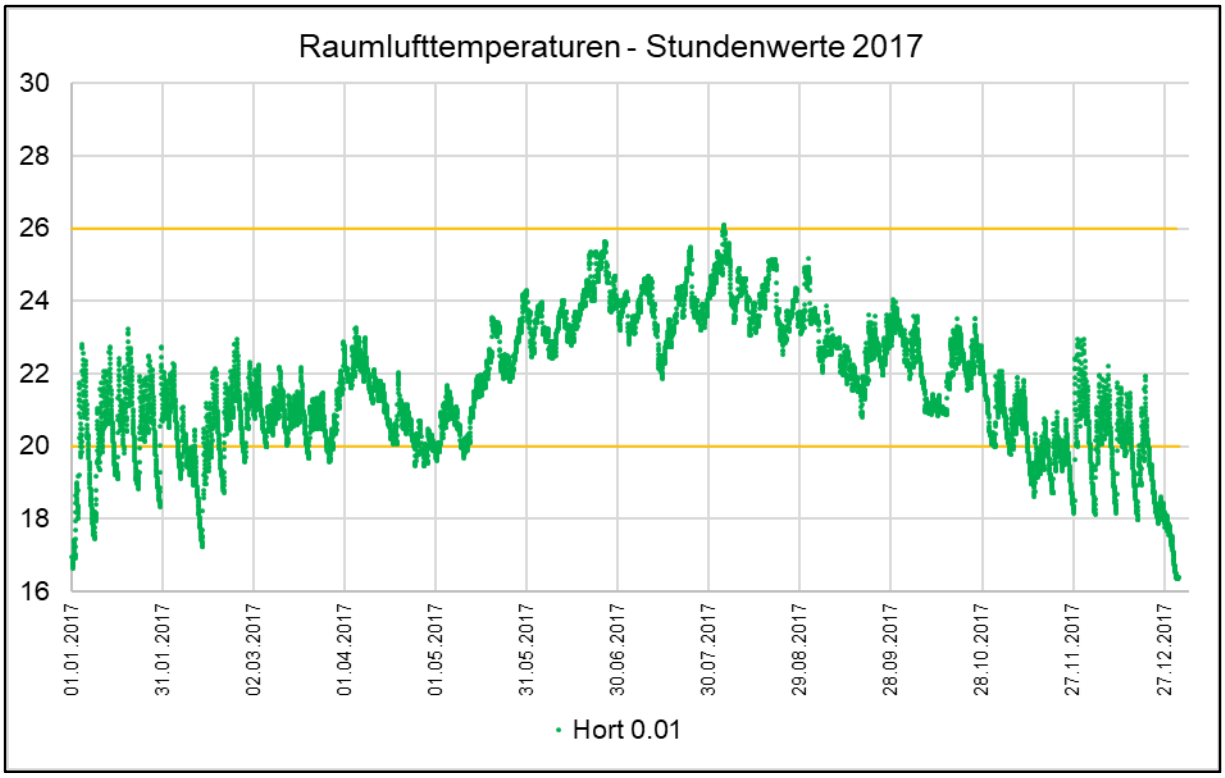


**Abbildung 3-27: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2017**

Der Mittelwert der Raumlufttemperatur in der Nutzungszeit von 6 bis 17 Uhr beträgt 21,8 °C (Abbildung 3-28). Die Raumlufttemperatur liegt dabei im Bereich von 17,2 °C bis 25,9 °C. Es gab lediglich 22 von 2856 Nutzungsstunden über 25 °C (0,8 %). Mit 322 h, entsprechend 11,3 %, ist auch im Jahr 2017 die Anzahl der Stunden, in denen keine 20 °C Innentemperatur erreicht wurden, deutlich zu hoch.

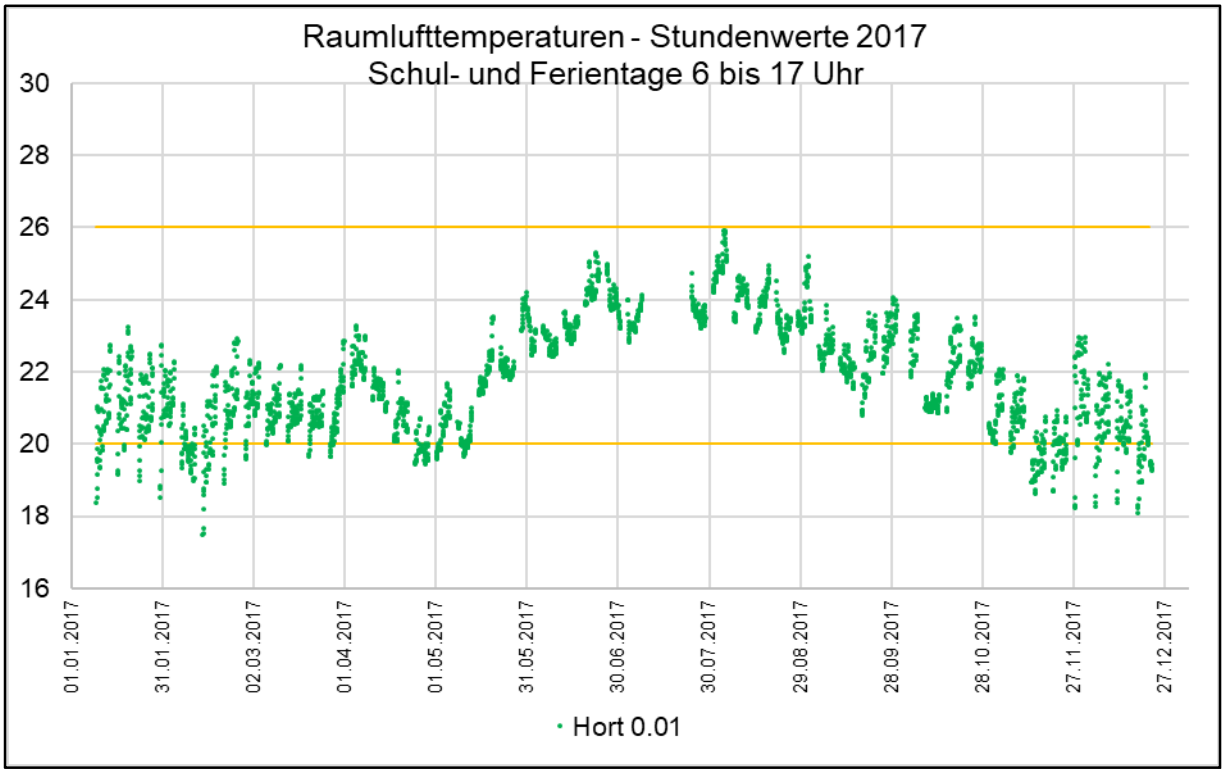


**Abbildung 3-28: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2017, wochentags 6-17 Uhr**

Die Betrachtung der Raumlufttemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur zeigt auch hier, dass es zahlreiche Solltemperaturunterschreitungen in der kälteren Jahreszeit gab. Überschreitungen des Komfortbereiches traten hingegen kaum auf.

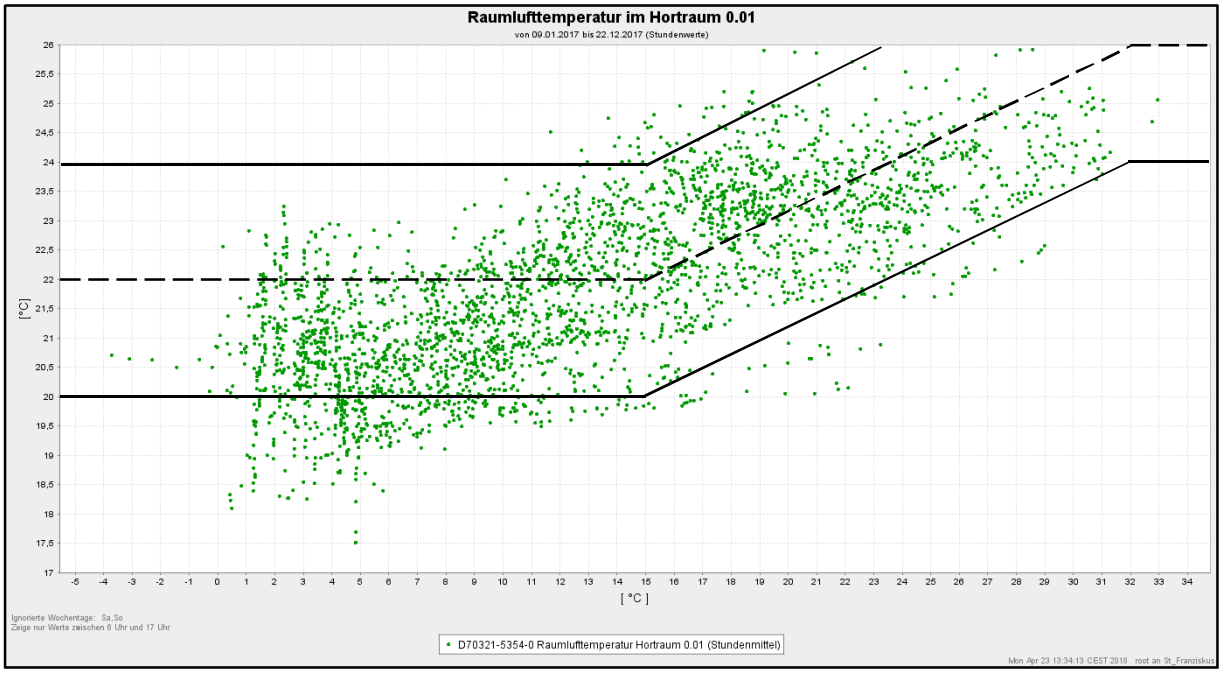


**Abbildung 3-29: Raum- über Außentemperatur Hortraum 0.01, Jahr 2017 wochentags 6 bis 17 Uhr**

## *3.6 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Aula 0.26*

Für die Bewertung der Temperaturhäufigkeit der Aula stehen mehrere Fühler zur Verfügung. Zunächst wurden die Temperaturen der Raumluft, der Raumluft in 100 cm Höhe und der Abluft aus der Aula im Stundenintervall und im Tagesmittel verglichen.

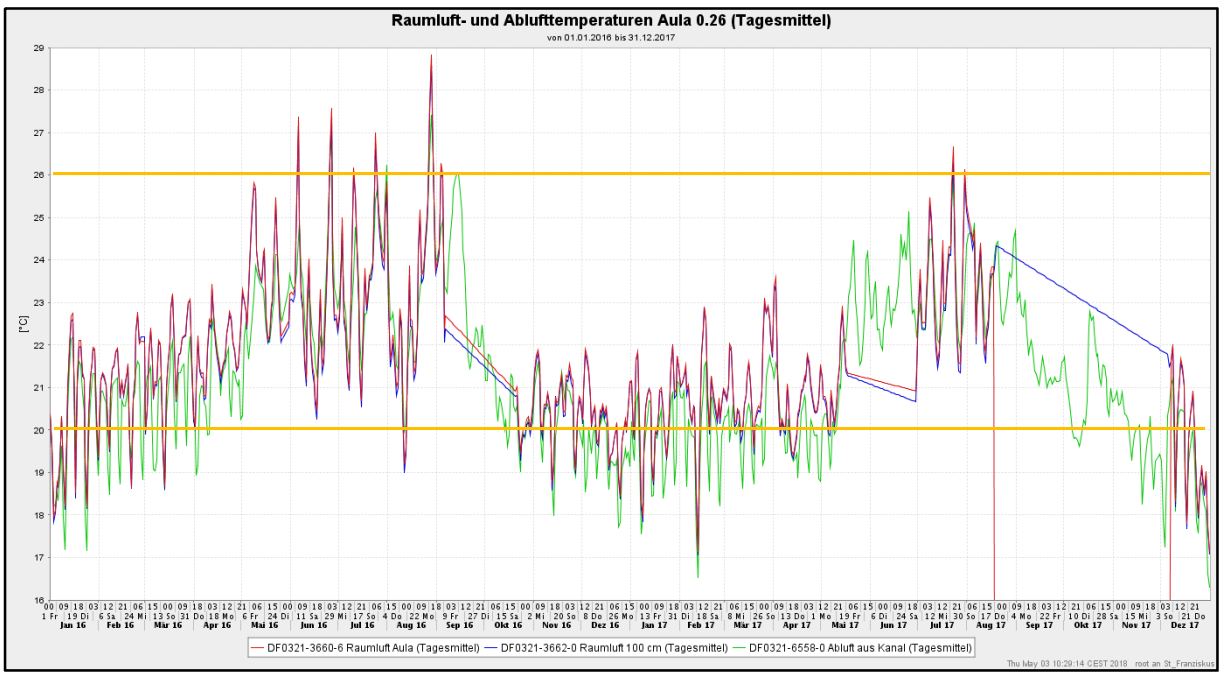


**Abbildung 3-30: Raumluft- und Ablufttemperaturen der Aula 0.26, Jahre 2016 – 2017**

Die Sensoren „Raumluft“ und „Raumluft in 100 cm Höhe“ melden nahezu identische Werte. Der Abluftsensor im Kanal (DF0321-6558-0) zeigt Abweichungen um 1 … 2 K nach unten, ist jedoch als einziger Fühler nicht von Datenausfall betroffen, weshalb er für die folgenden Auswertungen herangezogen wurde. Abbildung 3-30 zeigt die Tagesmittelwerte im Zweijahresverlauf. Die Datenausfälle sind klar erkennbar. Anzumerken ist jedoch, dass der Abluftfühler bei ausgeschaltetem Ventilator, also außerhalb der Nutzungszeit, die Luft im stehenden Kanalsystem misst.

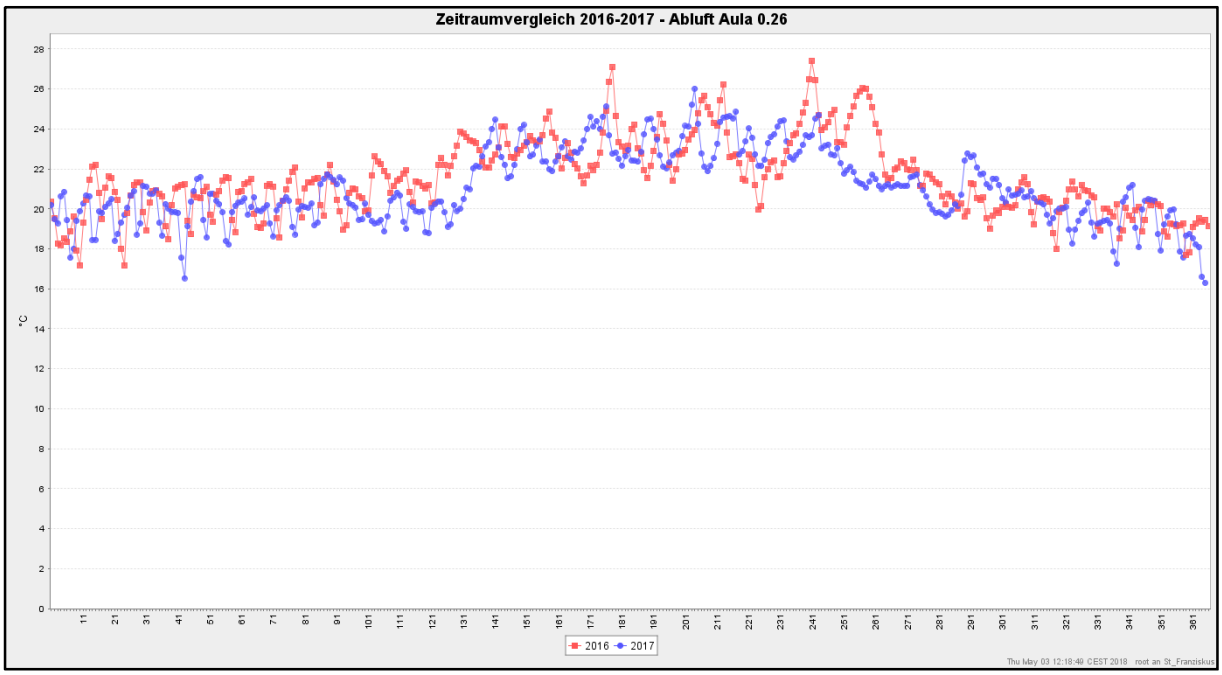


**Abbildung 3-31: Ablufttemperatur in der Aula im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel**

### Jahr 2016

Die Nutzungszeit der Aula wurde großzügig von 7 bis 17 Uhr angesetzt, da auch außerhalb der Zeit des Mittagessens, welches 11:40 bis 13:10 Uhr eingenommen wird, mit der Anwesenheit von Nutzern z. B. für Musikunterricht oder Projektarbeit gerechnet werden muss.

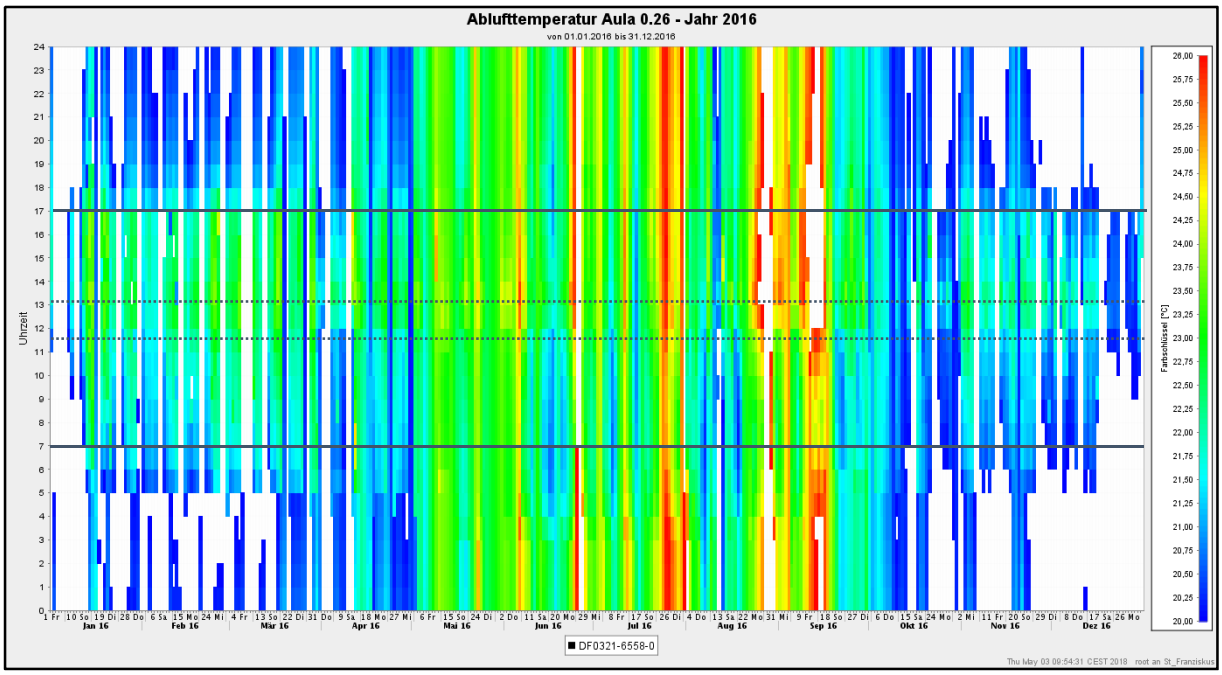


**Abbildung 3-32: Ablufttemperatur in der Aula 0.26 im Jahr 2016 – Carpetplot**

Aus dem Carpetplot (Abbildung 3-32) ist ablesbar, dass insbesondere Ende Juni und Ende August/Anfang September überhöhte Ablufttemperaturen auftraten. Aus Abbildung 3-33 wird ersichtlich, dass diese bis zu 28 °C betrugen. Dies betrifft die Mittagszeit, aber auch insbesondere die Nachmittagsstunden. Außerhalb der Nutzungszeit gibt es in der kühleren Jahreshälfte zahlreiche Temperaturunterschreitungen der Komfortgrenze von 20 °C. Im relevanten Nutzungszeitraum sind diese eher vernachlässigbar, wie die weiteren Auswertungen zeigen werden.

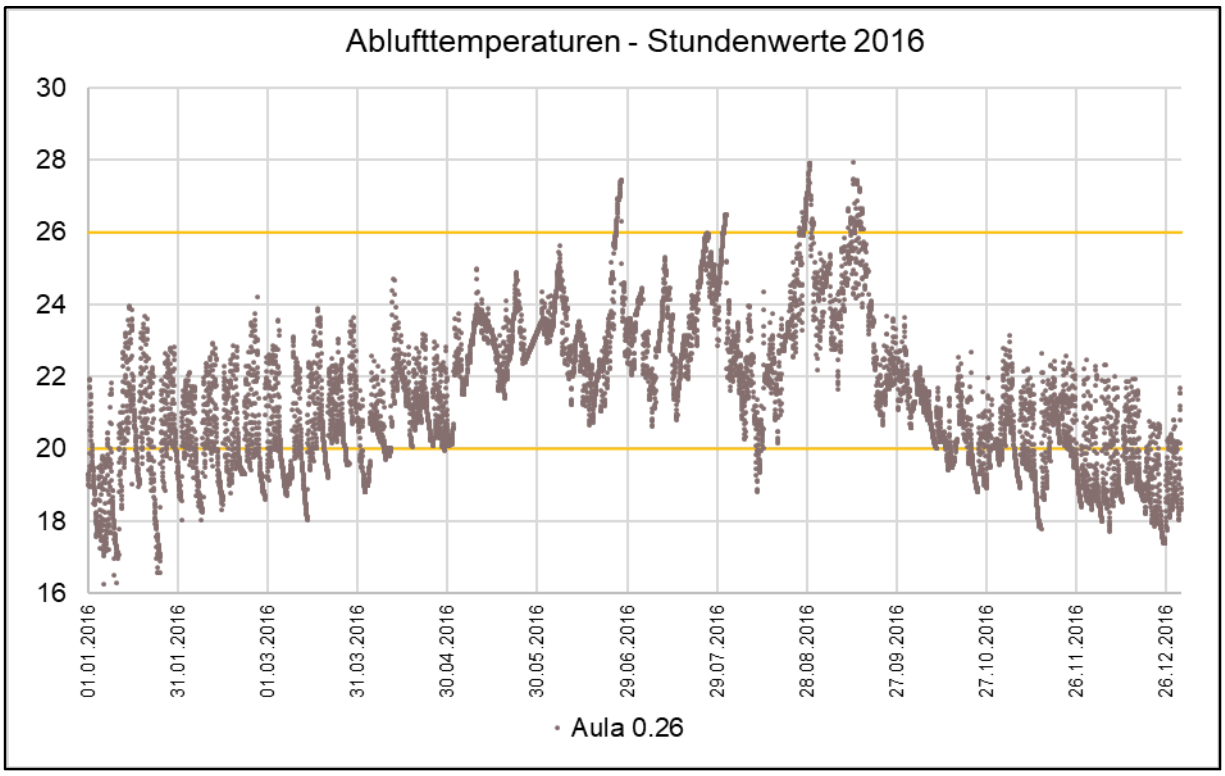


**Abbildung 3-33: Ablufttemperatur der Aula 0.26, Jahr 2016**

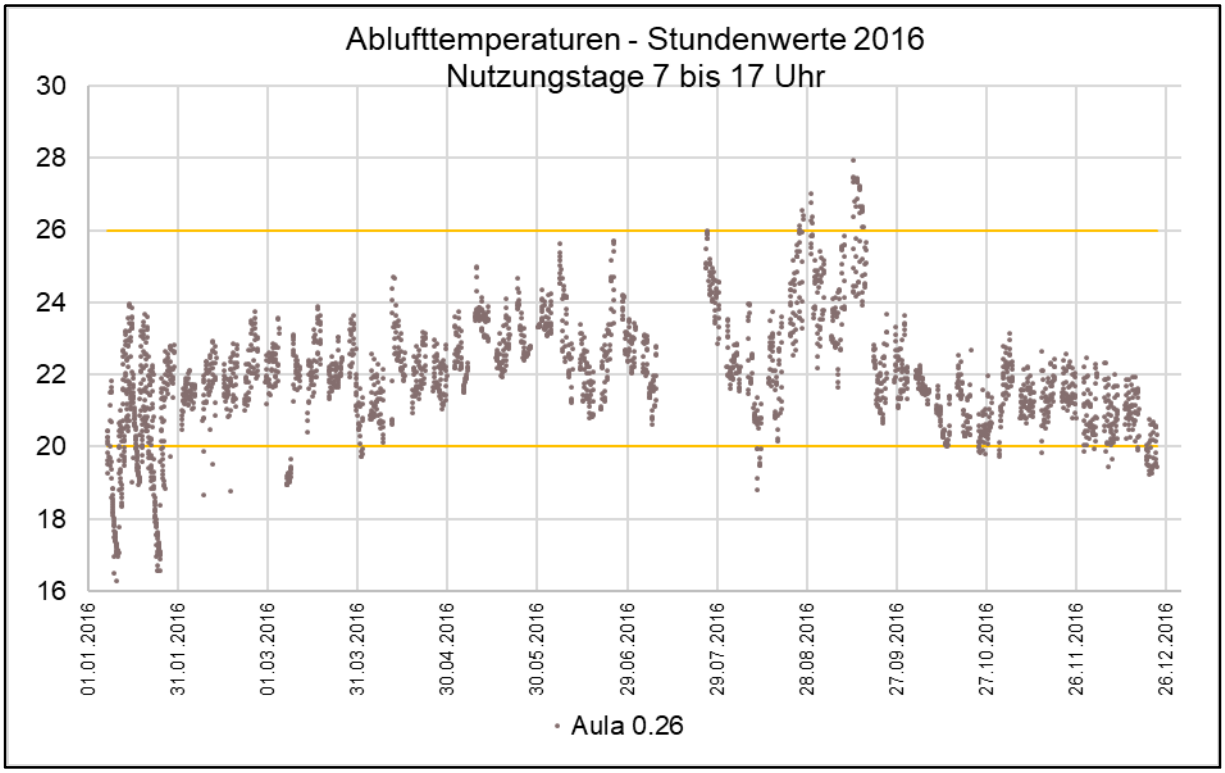


**Abbildung 3-34: Ablufttemperatur der Aula 0.26, Nutzungstage 7 bis 17 Uhr, Jahr 2016**

Die mittlere Raumlufttemperatur auf Basis des Ablufttemperaturfühlers beträgt 21,7 °C während der Nutzungszeit von werktags 7:00 bis 17:00 Uhr. Innerhalb dieses Zeitraums beträgt die minimale Temperatur 16,2 °C und die maximale 27,9 °C (siehe Abbildung 3-34).

Eine Auswertung der Übertemperaturgradstunden über 27 °C ergibt für alle 8764 Stunden des Jahres 2016 nur 22 Kh. Beschränkt man die Betrachtung auf die Normnutzungszeit von werktags 7:00 bis 18:00 Uhr, so ergeben sich lediglich 4,5 Kh/a. Der Grenzwert von 500 Kh/a wurde unabhängig von der Betrachtungszeit eingehalten.

Die 26 °C-Marke wird in 36 Stunden des Jahres innerhalb der Nutzungszeit überschritten, was 1,7 % der Zeit betrifft.

Bezüglich des 10%-Kriteriums lässt sich nachweisen, dass im Jahr 2016 in 93 Nutzungsstunden die vom Passivhaus Institut [3] empfohlene Grenztemperatur von 25 °C überschritten wurde. Bei 2079 Nutzungsstunden für das Jahr 2016 (werktags von 7:00-17:00 Uhr) entspricht dies 4,5 % der Nutzungszeit.

Die Solltemperatur von ≥ 20 °C wurde in 65 Stunden unterschritten, was 3,1 % der Nutzungszeit zwischen 7 und 17 Uhr betrifft.

Die Darstellung der Ablufttemperatur über der Außentemperatur (Abbildung 3-35) lässt erkennen, dass sich die Mehrzahl der Punkte im Komfortbereich in Anlehnung an DIN EN 15251 befindet. In der kühleren Jahreszeit treten einige Unterschreitungen auf, Überschreitungen sind eher selten.

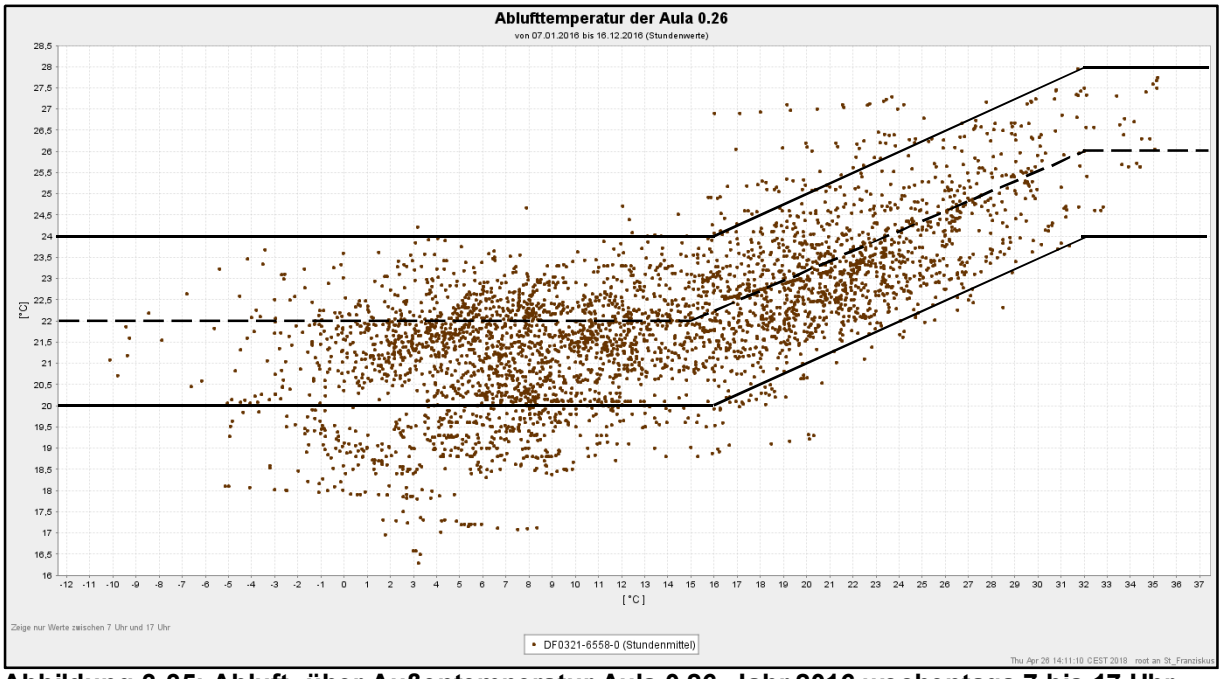


**Abbildung 3-35: Abluft- über Außentemperatur Aula 0.26, Jahr 2016 wochentags 7 bis 17 Uhr**

**Jahr 2017**

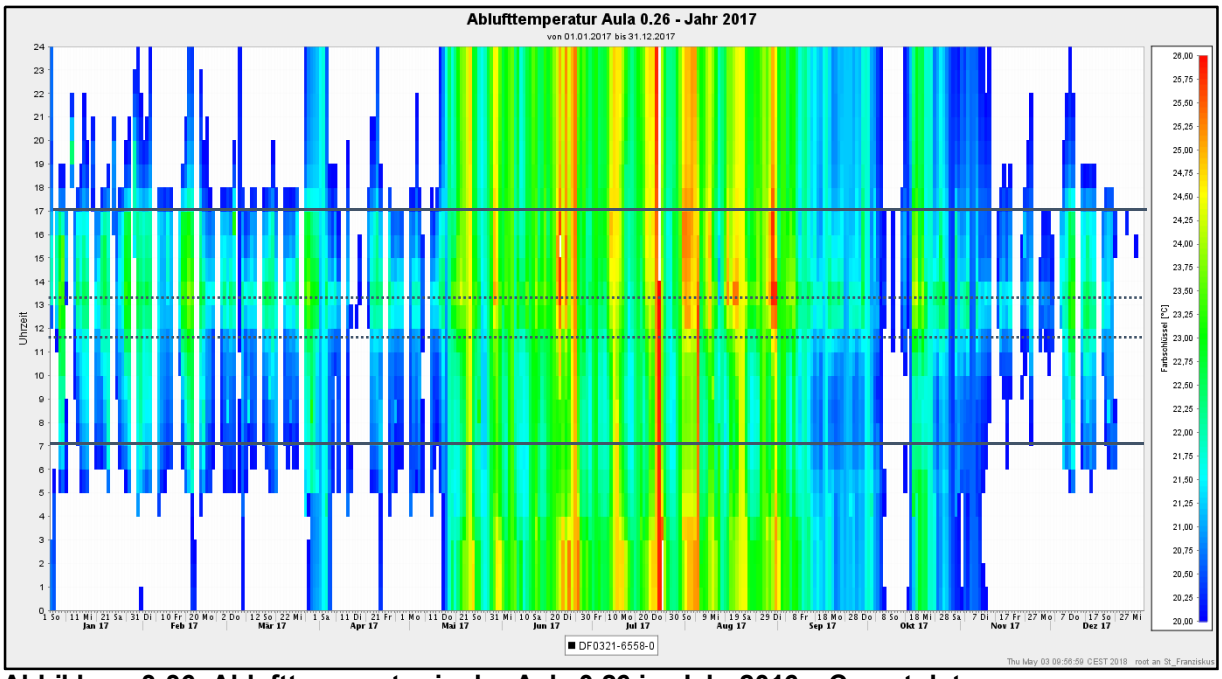


**Abbildung 3-36: Ablufttemperatur in der Aula 0.26 im Jahr 2016 – Carpetplot**

Die Gesamtauswertung des Jahres lässt insgesamt geringere Temperaturen als im Vorjahr erkennen, wie auch schon aus dem Zeitraumvergleich beider Jahre in Abbildung 3-31 ablesbar war. Die Behaglichkeitsgrenze von 26 °C wurde kaum überschritten (Vorjahr: bis 27,9 °C), stattdessen häufen sich nun die Unterschreitungen der Soll-Temperatur von 20 °C.

Gut sichtbar ist der Zeitraum der aktivierten Nachtlüftung vom 15.05. bis 15.09.2017, welcher sich im Carpetplot in Abbildung 3-36 grün hervorhebt.

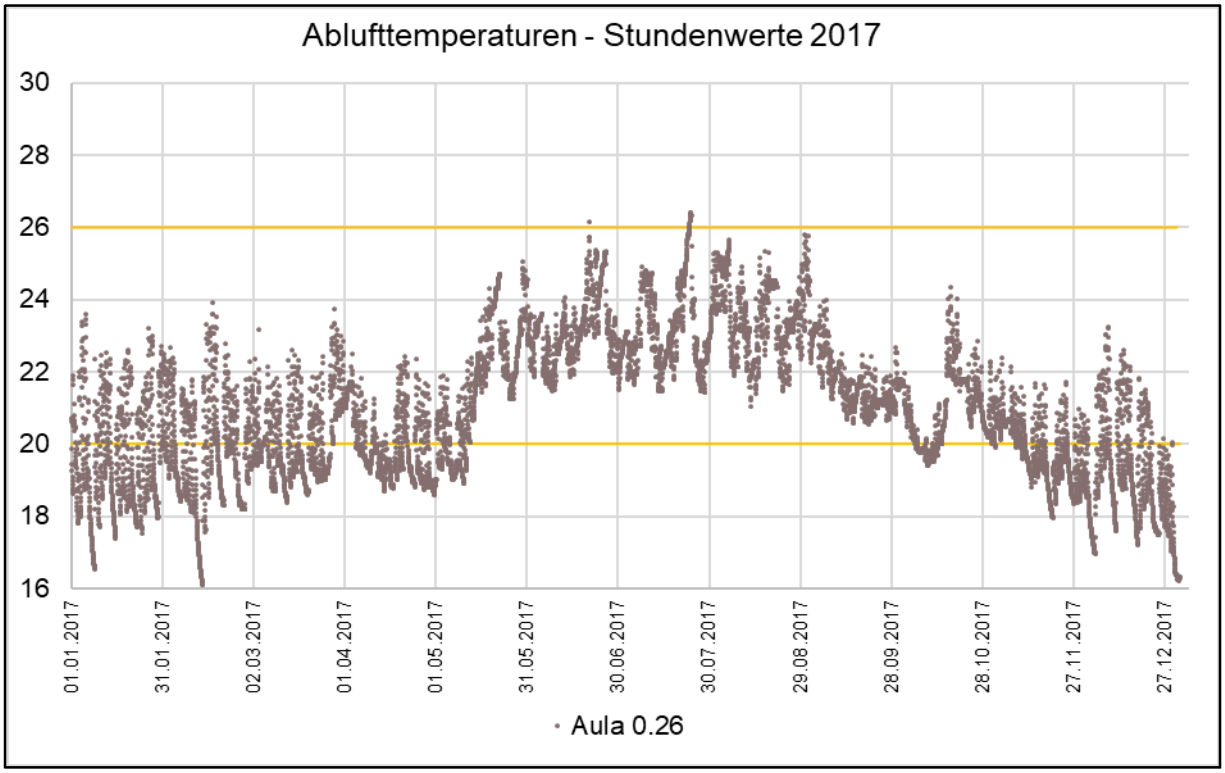


**Abbildung 3-37: Raumtemperatur Aula, Jahr 2017**

Die Raumlufttemperatur (auch hier gemessen am Abluftfühler im Kanal) lag während der Nutzungszeit zwischen 17,8 bis 26,1 °C und betrug im Mittel 21,6 °C. Eine Überschreitung der 27 °C-Marke hat es im Jahr 2017 nicht gegeben. Selbst die Grenze von 26 °C wurde nur in einer Stunde des Nutzungszeitraumes überschritten. Die Anzahl der Nutzungsstunden, in denen die Raumtemperatur über 25 °C lag, beträgt 26 h von 2134 h, dies entspricht $h_{\vartheta \geq 25}$ = 1,5 %, also deutlich weniger als 10 % der Nutzungszeit. Das Kriterium des Passivhaus Institutes wird demnach sehr gut eingehalten.

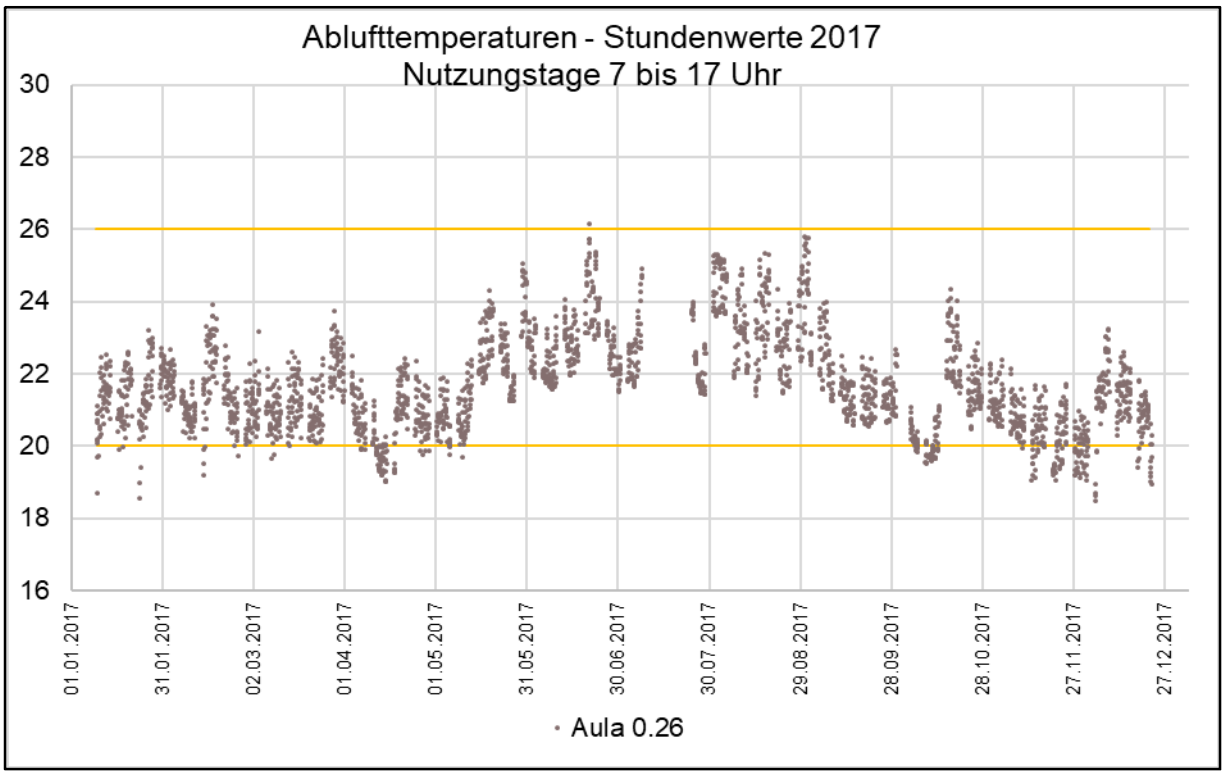


**Abbildung 3-38: Ablufttemperatur der Aula 0.26, Nutzungstage 7 bis 17 Uhr, Jahr 2017**

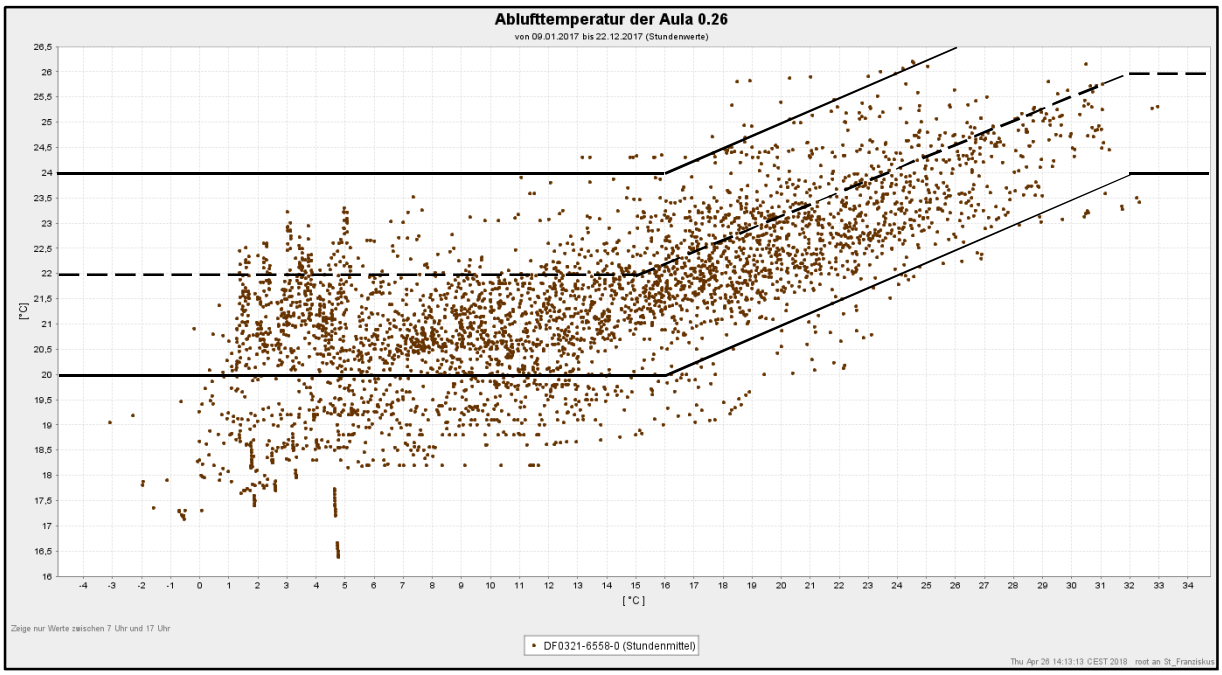


**Abbildung 3-39: Abluft- über Außentemperatur Aula 0.26, Jahr 2017 wochentags 7 bis 17 Uhr**

Allerdings wurde die Mindesttemperatur von 20 °C in 117 h des Jahres nicht erreicht, was 6,7 % der Stunden zwischen 7 und 17 Uhr betrifft. Während der Kernessenzeit von 12 bis 14 Uhr betraf dies nur 10 h des Jahres. Zu kühl ist es meist in den Morgenstunden oder am späten Nachmittag.

Abbildung 3-39 zeigt nur sehr weniger Überschreitungen des Komfortbereiches. Die Mehrzahl der Punkte liegt in der unteren Hälfte des Komfortbereiches. Es gibt jedoch auch einige Temperaturunterschreitungen des Komfortbandes.

**Sommerwoche in der Aula 0.26**

Im Folgenden soll der Temperaturverlauf einer typischen Sommerwoche beispielhaft betrachtet werden.

Anhand des Verlaufes der Raumlufttemperatur der gewählten Schulwoche im Sommer (Abbildung 3-40) wird deutlich, dass die Messwerte weitestgehend innerhalb des Behaglichkeitsfeldes liegen. Dargestellt sind die Messwerte aus der Abluft im Kanal, die Raumtemperatur und die Temperatur in 1 m Höhe. Eine Überschreitung des Grenzwertes von 26 °C erfolgt erst am Wochenende aufgrund der deaktivierten Lüftungsanlage.

Es fällt auf, dass sich die Messwerte aus der Abluft im Kanal wie zuvor beschrieben von den Raumtemperaturen unterscheiden. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass die Sensoren bei ausgeschalteter Lüftungsanlage die stehende Luft im Kanalsystem messen und nicht die Temperatur des Raumes.

In der Zeit vom 15.04 bis 30.09 ist die freie Nachtauskühlung von 03:00 Uhr bis 08:00 Uhr aktiv, was sich in den Messwerten widerspiegelt. Am Montag um 03:00 Uhr werden in der Aula etwa 23,5 °C gemessen und um 08:00 Uhr hat sich die Temperatur auf 19,70 °C abgekühlt. Der untere Grenzwert der Behaglichkeit von 20 °C wird nur am Montag von 06:20 Uhr bis 09:50 Uhr nach der intensiven Nachtlüftung unterschritten.

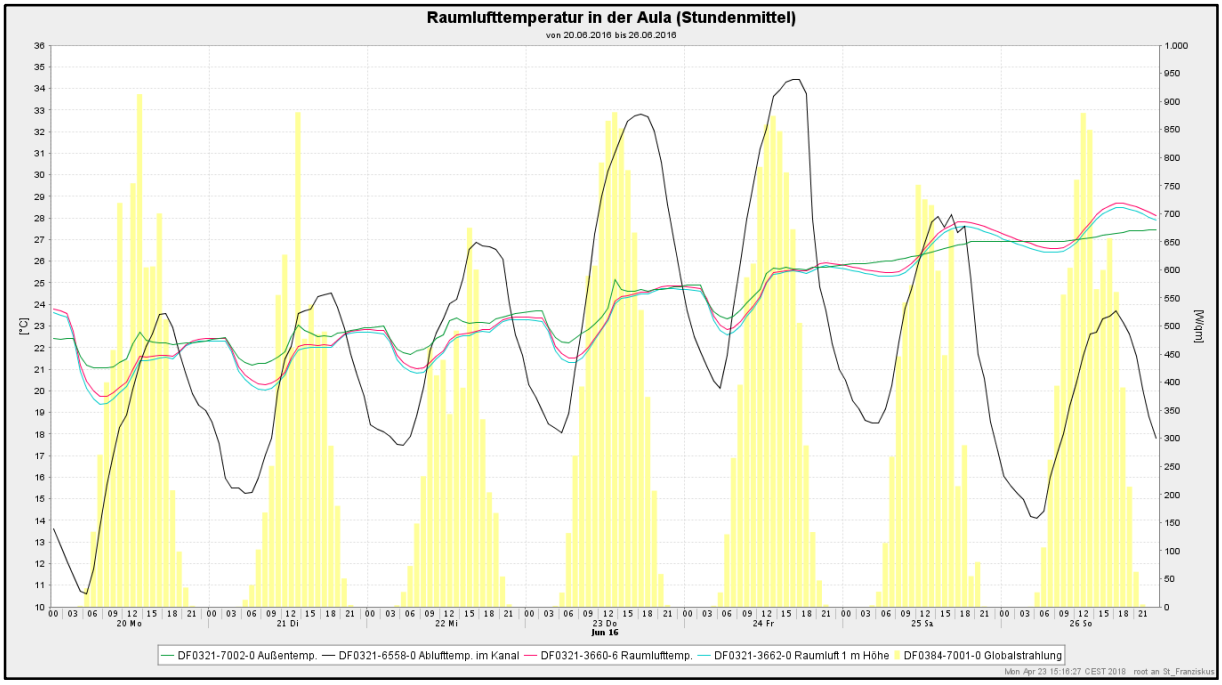


**Abbildung 3-40: Raumlufttemperatur der Aula, 20. bis 26.06.2016**

**Winterwoche in der Aula 0.26**

Für die ausgewertete Schulwoche im Winter wird der Verlauf der Raumlufttemperatur in Abbildung 3-41 dargestellt. In den Nutzungsstunden der Mensa ist täglich ein behaglicher Zustand gegeben. Es erfolgt stets ein Anstieg der Raumlufttemperatur im Vormittagsverlauf mit Spitzenwerten zur Mittagszeit von 21 bis 22,5 °C. Am Abend und in der Nacht fällt die Raumlufttemperatur auf bis zu 19 °C ab. Während sich die Messwerte bei eingeschalteter Lüftungsanlage ähneln, fällt der Wert im Abluftkanal außerhalb der Anlagenlaufzeit deutlich unter die Raumtemperaturen.

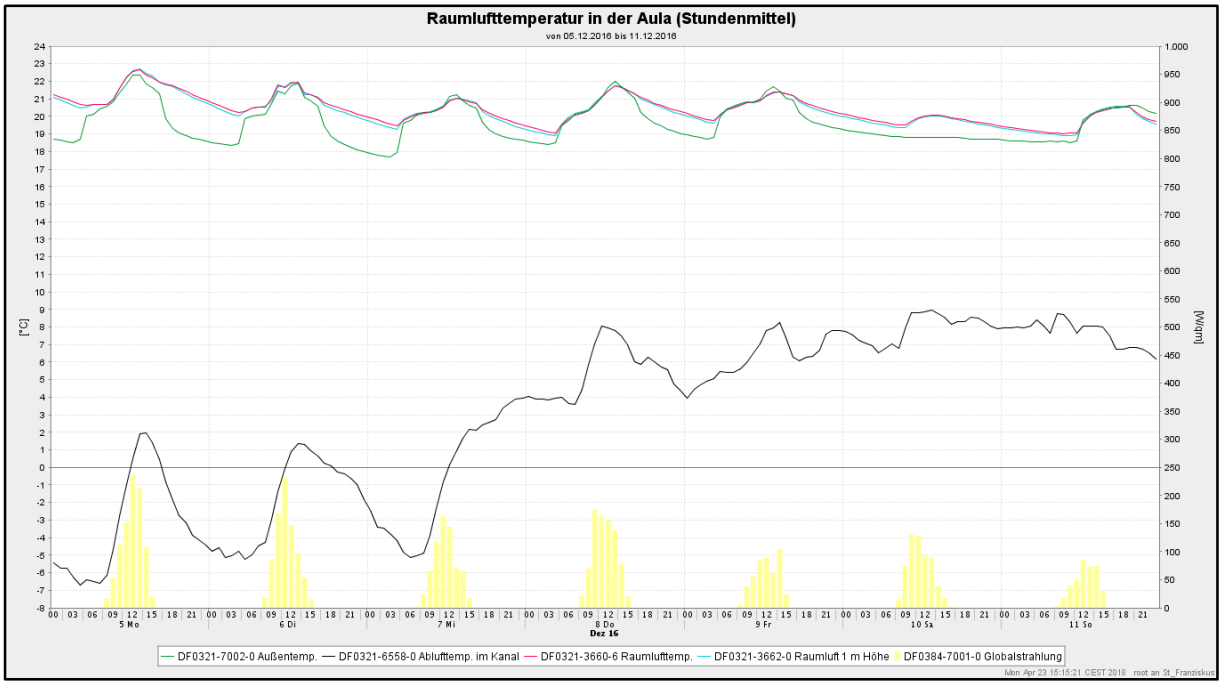


**Abbildung 3-41: Raumlufttemperatur der Aula 05. – 11.12.2016**

## *3.7 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf der Küche*

Die Koch- und Spülküche befindet sich im Erdgeschoss der Schule und schließt an die Aula, welche als Mensa genutzt wird, an. Koch- und Spülküche sind räumlich verbunden, weshalb die Auswertung hier gleichzeitig für beide Arbeitsbereiche erfolgt. Das Essen wird in der Küche frisch zubereitet. Laut der Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) sollten die Lufttemperaturen in Küchen mindestens 17 °C betragen und eine Temperatur von 26 °C im Rahmen des betrieblich Möglichen nicht überschreiten. In Ausnahmefällen darf die Lufttemperatur höher sein, sofern auch die Außentemperatur über 26 °C liegt [10].

Abbildung 3-42 zeigt die jahreszeitlichen Schwankungen im Verlauf von Januar 2016 bis Dezember 2017 anhand der Tagesmittelwerte über 24 h. Es wird deutlich, dass die Tagesmitteltemperaturen von April bis Oktober meist über 26 °C liegen.

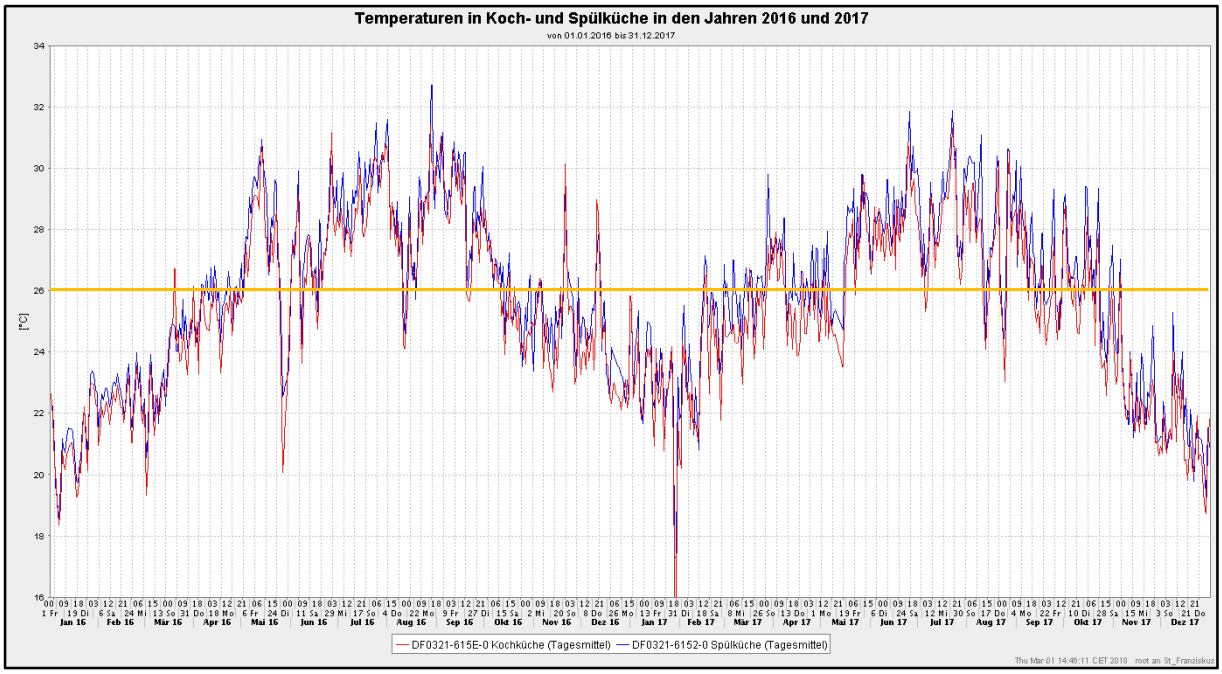


**Abbildung 3-42: Raumtemperaturen der Koch- und Spülküche (Tagesmittel)**

### Jahr 2016

Der Ganzjahresverlauf in Abbildung 3-43 zeigt sehr häufige Überschreitungen der Behaglichkeitsgrenze von 26 °C. In Ausnahmefällen werden Spitzenwerte bis etwa 48 °C erreicht. Die minimalen bzw. maximalen Temperaturen betrugen im Jahr 2016 im Stundenmittel über die betrachtete Nutzungszeit in Abbildung 3-44 (6 bis 15 Uhr) 15,6 ... 37,1 °C in der Spülküche sowie 17,0 ... 37,2 °C in der Kochküche. Die Durchschnittstemperaturen ergaben 24,6 (Kochküche) bzw. 24,8 °C (Spülküche).

Bezogen auf die 27 °C-Grenze nach DIN 4108-2 ergeben sich durch die EXCEL-Analyse der Daten während der Normnutzungszeit (7 bis 18 Uhr) für die Spülküche 2010 Kh und für die Kochküche 1564 Kh, womit beide Arbeitsbereiche den Normwert von 500 Kh deutlich übersteigen. Jedoch liegt die Ursache dafür nicht im mangelhaften sommerlichen Wärmeschutz, auf den sich die Norm bezieht, sondern ist hauptsächlich der Abwärme aus dem Küchenbetrieb geschuldet, der auch zu kurzzeitigen Spitzenwerten an den Messfühlern (z. B. beim Austritt von Wasserdampf aus Geräten, Kochgefäßen oder der Spülmaschine) führt.

Die Auswertung ergab weiterhin, dass von den 2410 Nutzungsstunden des Jahres 2016 in der Spülküche in 790 Stunden (32,8 %) und in der Küche in 710 Stunden (29,5 %) die Temperaturen über 26 °C lagen. Somit ist klar, dass auch das 25 °C-Kriterium des Passivhaus Institutes mit 1064 h (44,1 % der Zeit, Spülküche) bzw. 1010 h (41,9 %, Kochküche) bei weitem überschritten wird. Unterschreitungen der 20 °C-Marke traten in der Spülküche in 75 Stunden (3,1 %) und in der Kochküche in 83 Stunden (3,4 %) während der Nutzung auf.

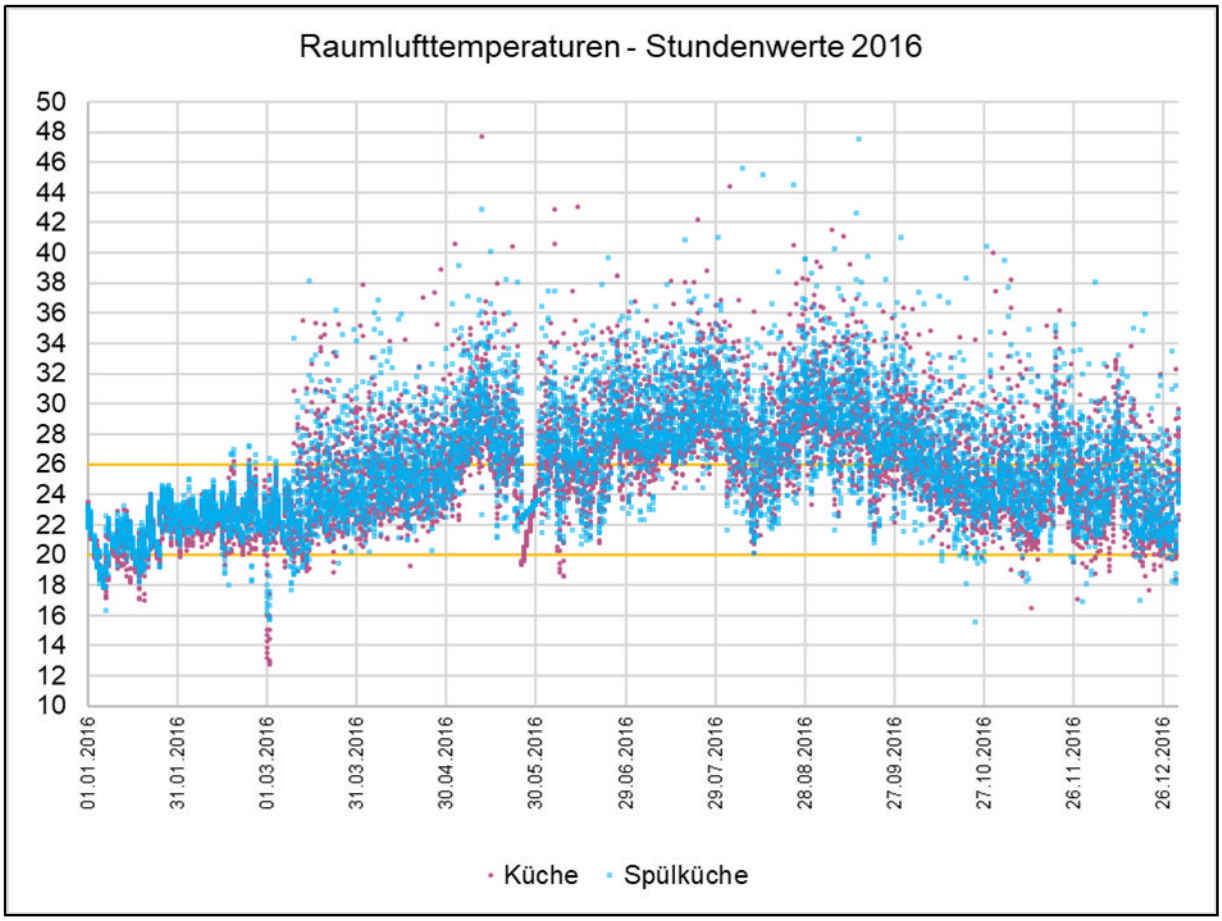


**Abbildung 3-43: Raumtemperaturen Küche und Spülküche, Jahr 2016 – gesamt**

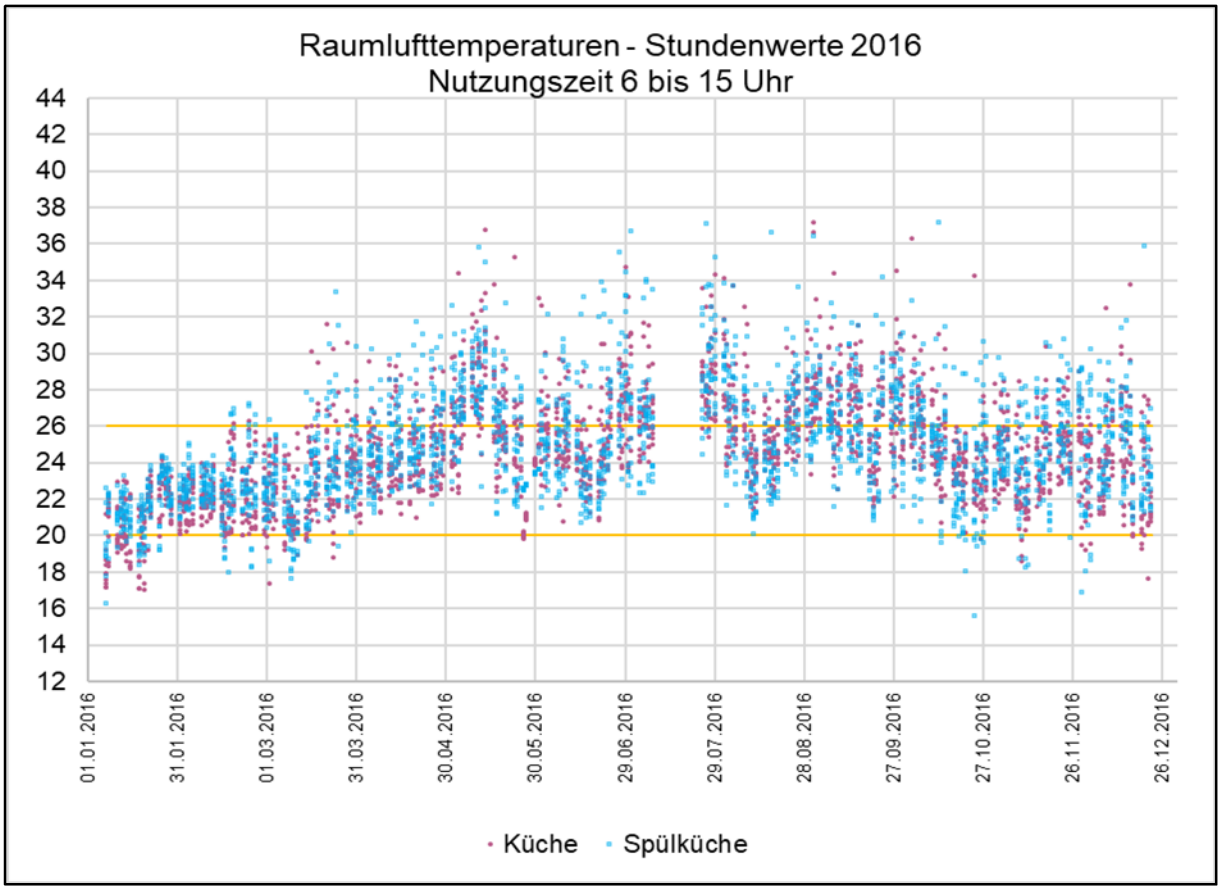


**Abbildung 3-44: Raumtemperaturen der Koch- und Spülküche Jahr 2016 – 6 bis 15 Uhr**

**Jahr 2017**

Abbildung 3-45 zeigt zunächst wieder den Ganzjahresverlauf, während Abbildung 3-46 auf die Nutzungszeit von 6 bis 15 Uhr beschränkt ist.

Für die Spülküche ergab sich während der Nutzungszeit von 6 bis 15 Uhr im Jahr 2017 ein Mittelwert der Raumtemperatur von 25,0 °C, die Bandbreite lag zwischen 14,7 und 42,8 °C. In der Kochküche schwankten die Temperaturen zwischen 13,3 und 38,0 °C im Stundenmittel, der Mittelwert betrug 24,4 °C.

Die Analyse in einer EXCEL-Tabelle ergab, dass die Übertemperaturgradstunden über 27 °C in der Spülküche 2091 Kh und in der Kochküche 1386 Kh betrugen. In 925 von 2380 Nutzungsstunden (38,9 %) lag die Temperatur in der Spülküche über 26 °C. In der Kochküche war dies in 702 Stunden der Fall (29,5 %). Betrachtet man die Überschreitungen des 25 °C-Kriteriums nach Passivhaus Institut, so traten diese in der Spülküche in 1240 h (52,1 %) und in der Kochküche in 998 h (41,9 %) auf.

Zu kühl (< 20 °C) war es in 212 Stunden in der Spülküche (8,9 %) bzw. in 233 Stunden in der Kochküche (9,8 %).

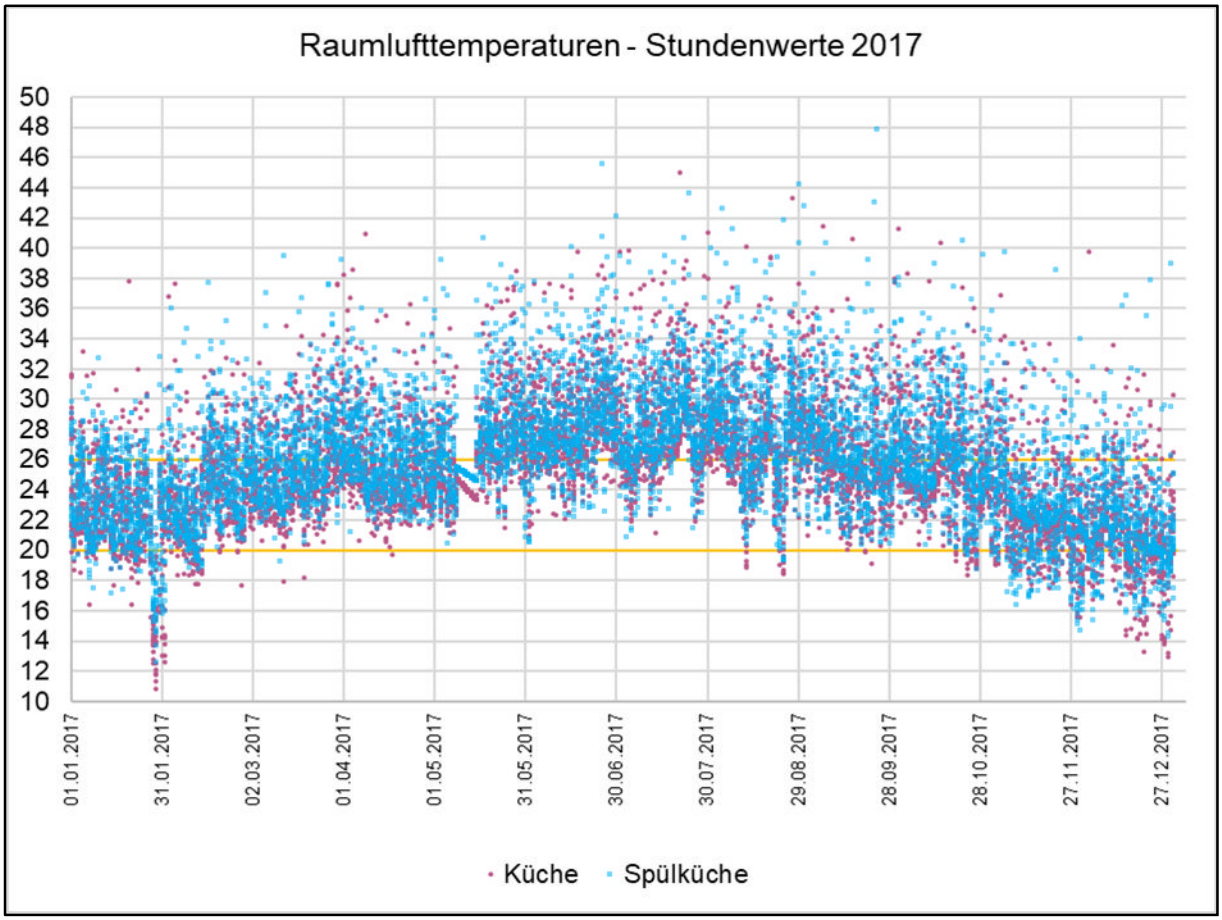


**Abbildung 3-45: Raumtemperaturen Küche und Spülküche, Jahr 2017 – gesamt**

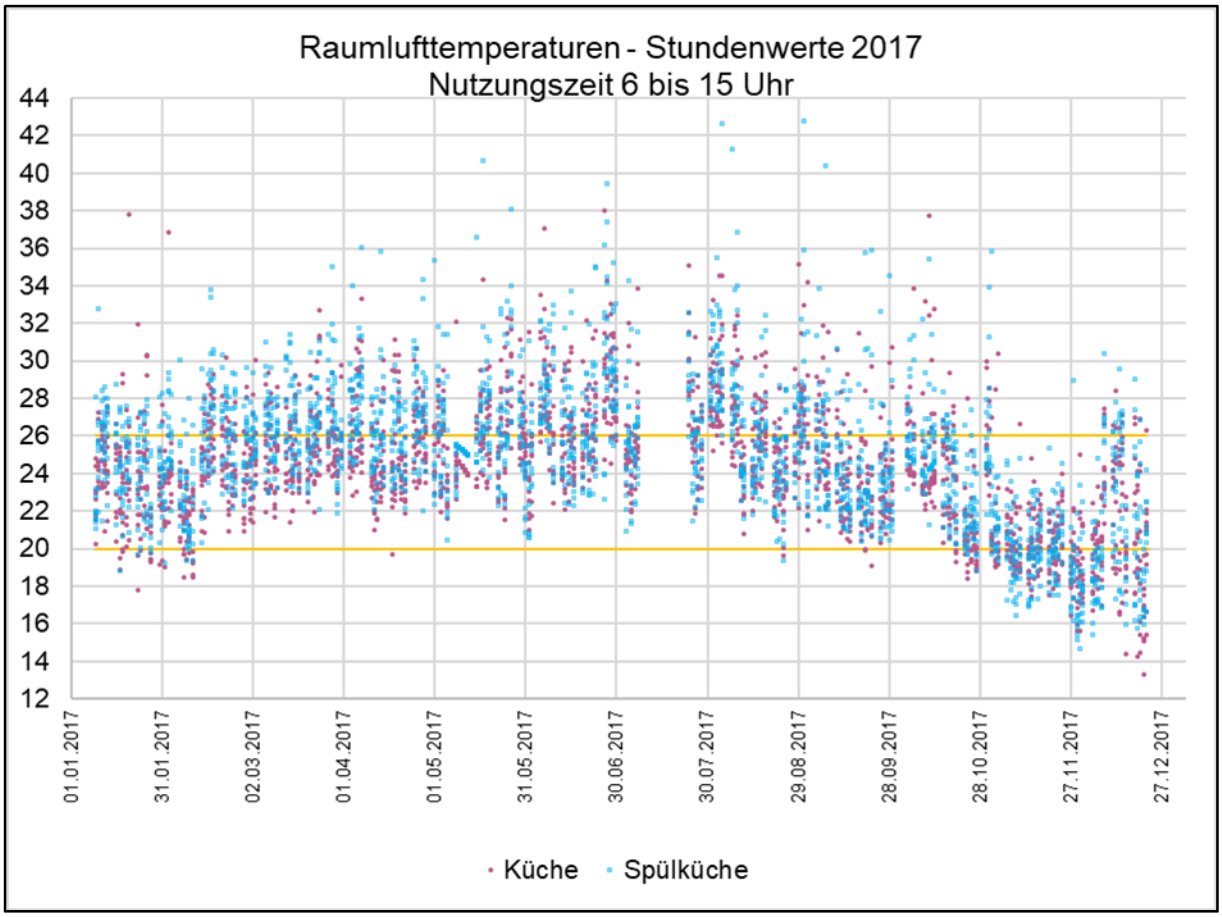


**Abbildung 3-46: Raumtemperaturen der Koch- und Spülküche 2017 – Nutzungszeit 6 bis 15 Uhr**

## *3.8 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Lehrerzimmer 1.04*

Das betrachtete Lehrerzimmer 1.04 befindet sich in der Nordostecke des Gebäudeteils B. Es gehört aufgrund seiner Lage zu den Räumen mit überdurchschnittlicher Heizlast. Bereits in der Planungsphase wurde vermutet, dass die Nachinstallation eines elektrischen Heizkörpers notwendig würde. Dieser wurde Anfang 2015 angeschafft.

Der Zeitraumvergleich der Raumlufttemperaturen im Raum 1.04 stellt die Tagesmittel für die Jahre 2016 und 2017 unabhängig von den Nutzungszeiten dar (Abbildung 3-47). Es wird deutlich, dass es in der Heizperiode zu häufigen Temperaturunterschreitungen < 20 °C kommt und in der Sommerzeit zu einigen Überschreitungen der 26 °C-Marke.

Es wird davon ausgegangen, dass das Lehrerzimmer genau wie die Klassenräume zwischen 7 und 15 Uhr genutzt wird. Deshalb wird bei den folgenden Auswertungen auf diesen Zeitraum Bezug genommen.

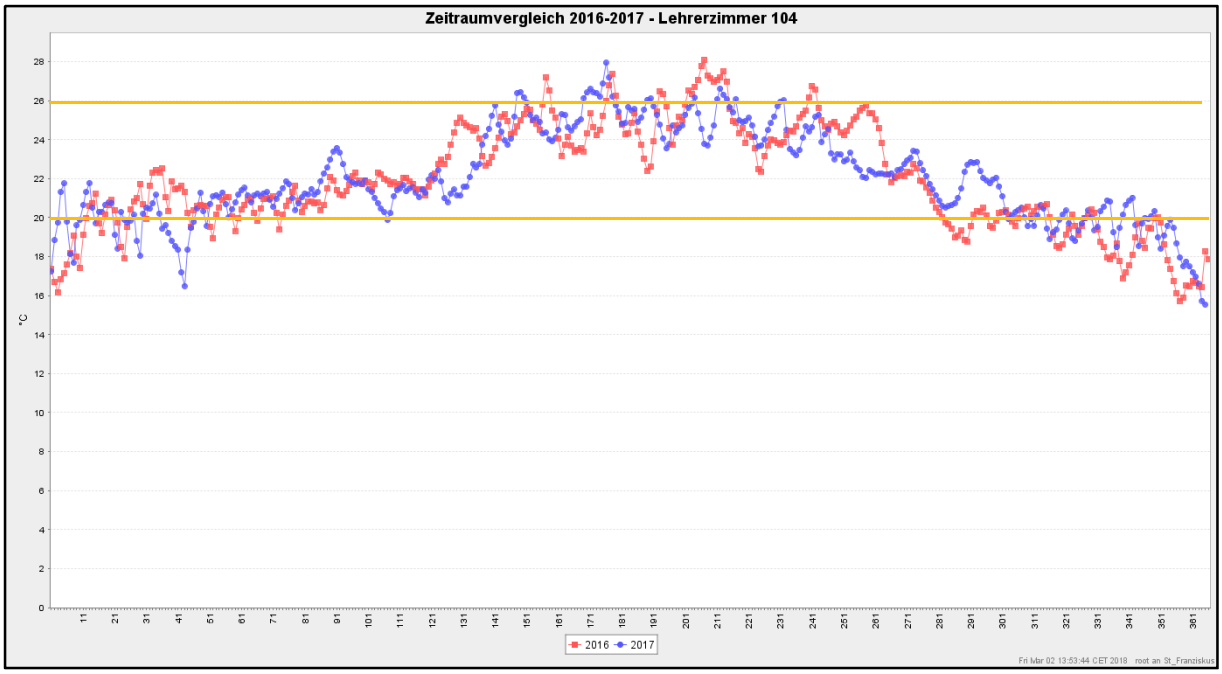


**Abbildung 3-47: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel**

### Jahr 2016

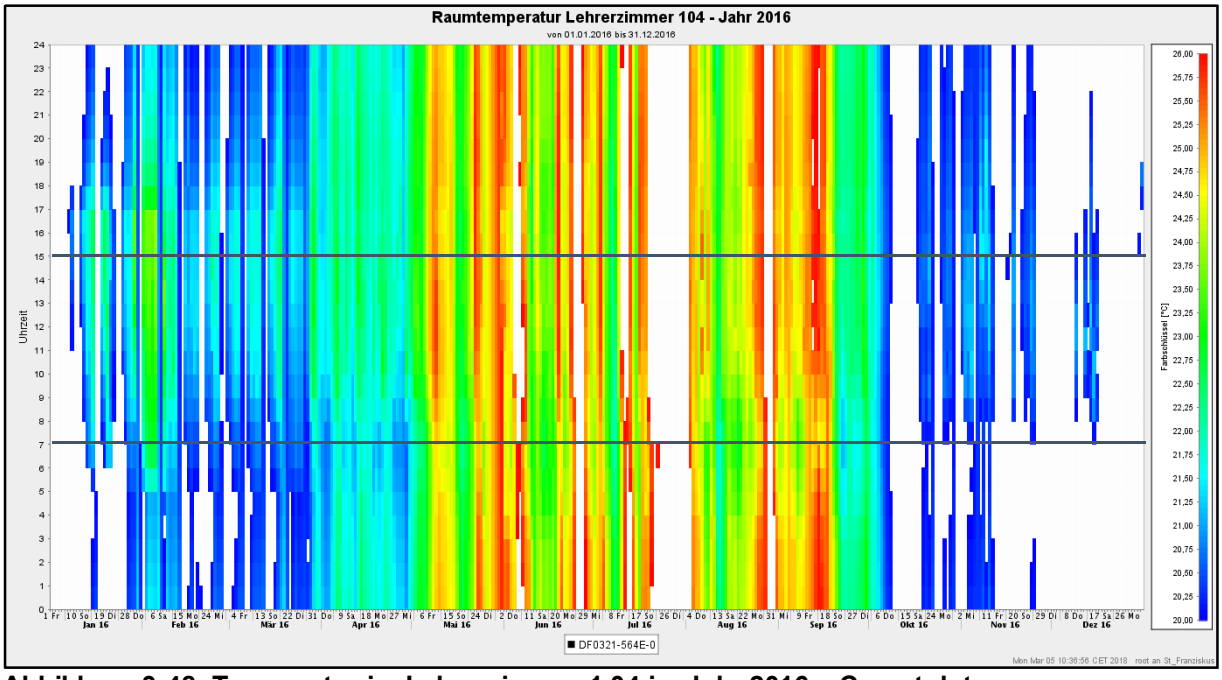


**Abbildung 3-48: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016 – Carpetplot**

Im Carpetplot (Abbildung 3-48) bestätigen sich die häufigen Unterschreitungen der Mindesttemperatur von 20 °C, erkennbar an den weißen Fehlstellen in der Heizperiode. Überschreitungen der Behaglichkeitsgrenze von 26 °C gab es hauptsächlich während der Sommerferien.

Abbildung 3-49 bildet zunächst wieder das gesamte Jahr ab, während Abbildung 3-50 auf die Nutzungszeit von 7 bis 15 Uhr reduziert ist.

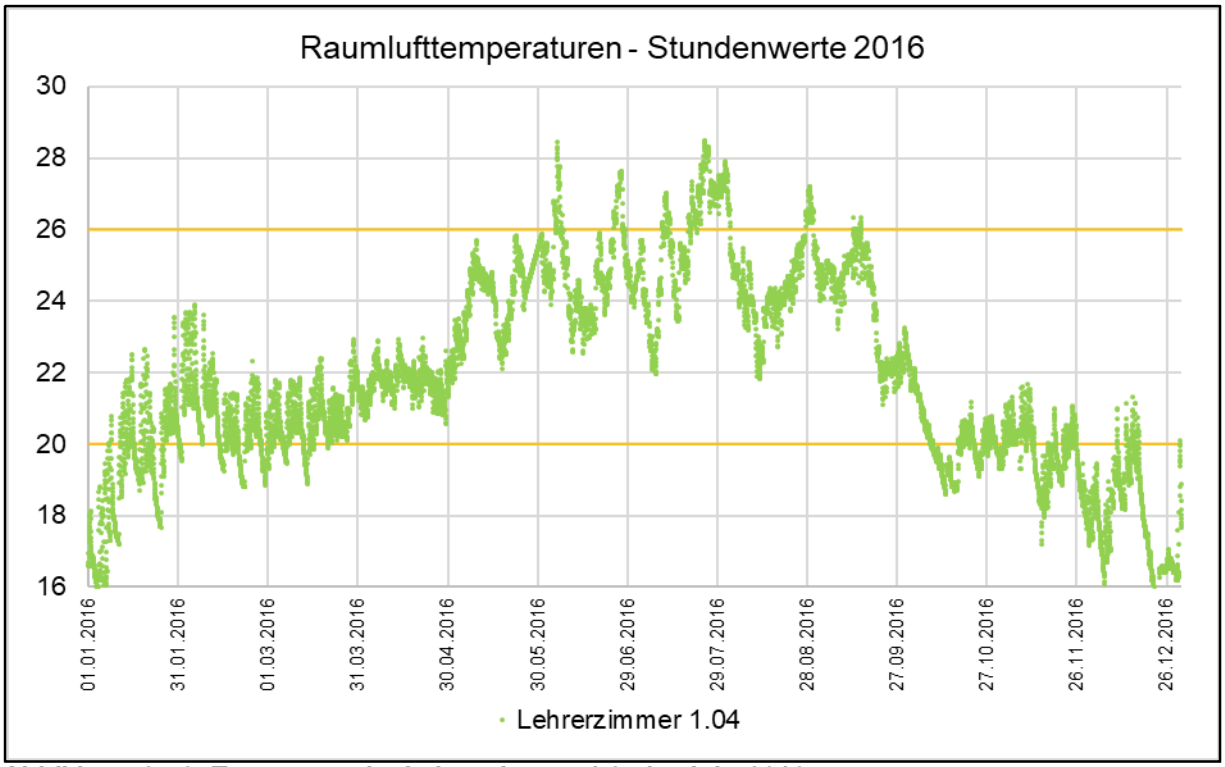


**Abbildung 3-49: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016**

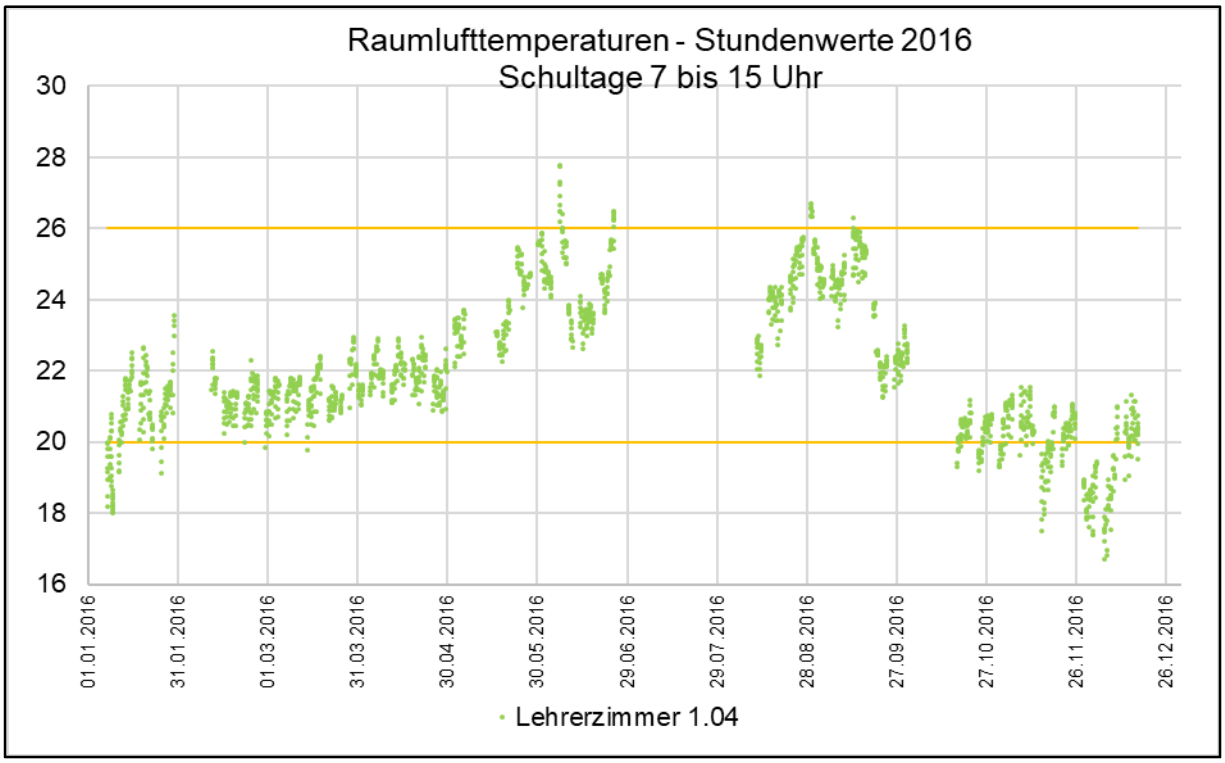


**Abbildung 3-50: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016, Schultage 7 – 15 Uhr**

Der Mittelwert der Raumlufttemperatur in der Nutzungszeit von 7 bis 15 Uhr beträgt 22 °C. Die Raumlufttemperatur liegt dabei im Bereich von 16,7 °C bis 27,7 °C.

Die Grenze von 25 °C wurde in 154 h von 1718 Nutzungsstunden überschritten, was einer Häufigkeit von $h_{\vartheta \geq 25}$ = 9,1 % entspricht und die Empfehlung des Passivhauses einhält. Die 26 °C-Marke wird in 30 von 1701 Nutzungsstunden des Jahres überschritten (1,8 %). Eine Raumtemperatur von mehr als 27 °C kommt mit 2,1 Kh kaum vor.

In 200 der 1701 Nutzungsstunden (11,8 % der Zeit) kommt es dazu, dass die Mindesttemperatur von 20 °C nicht gegeben ist. Nach Nutzerhinweisen wurde daraufhin – wie bereits in der Planungsphase vorgesehen – ein Strahlungsheizkörper installiert, der manuell eingeschaltet werden kann und nach 60-Minuten automatisch abschaltet. Aufgrund der Messwerte liegt jedoch die Vermutung nahe, dass dieser nicht häufig genug eingeschaltet wird oder der Bedarf aufgrund der eher seltenen Nutzung des Raumes doch nicht gesehen wird.

**Jahr 2017**

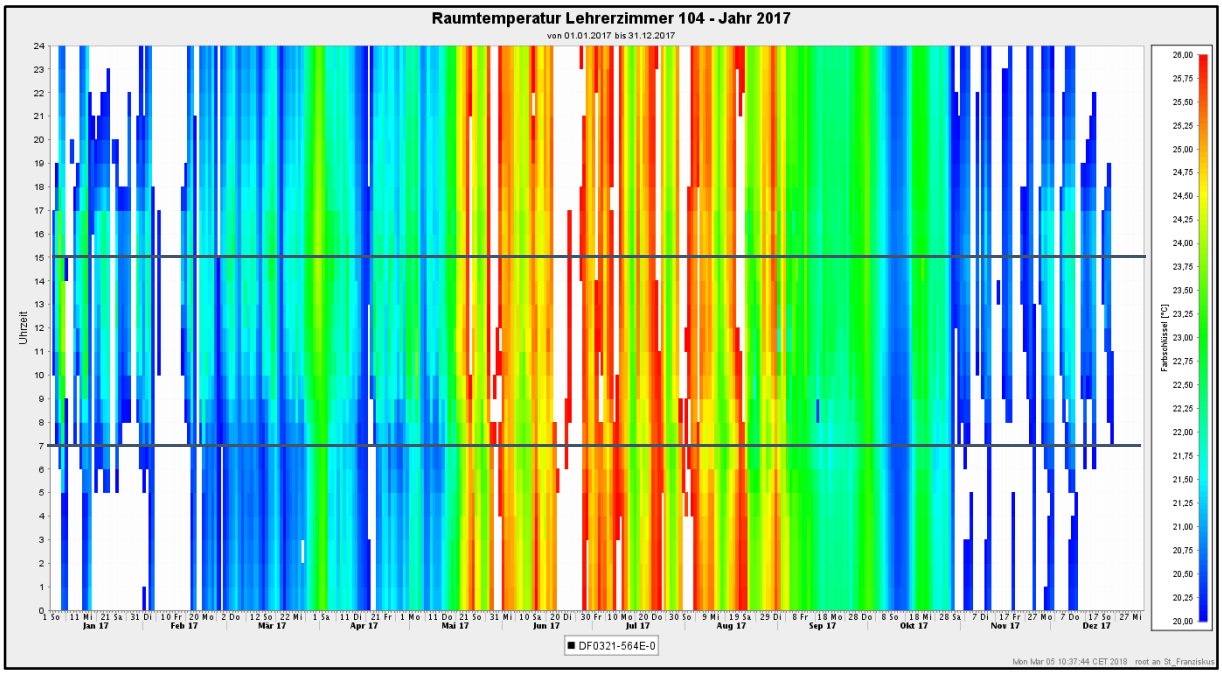


**Abbildung 3-51: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2017 – Carpetplot**

Aus dem Carpetplot für das Jahr 2017 (Abbildung 3-51) lässt sich ablesen, dass das Problem der Sollwertunterschreitung fortbesteht. Es ist jedoch auch erkennbar, dass sich die Fehlstellen insbesondere außerhalb der Nutzungszeit (nachts) häufen. Die längere Kältephase im Februar liegt in den Winterferien, im Dezember betrifft dies die Weihnachtsferien, siehe Abbildung 3-52 für das Gesamtjahr.

Die mittlere Raumtemperatur während der Nutzungszeit lag bei 22,3 °C und bewegte sich zwischen minimal 17,5 und maximal 27,9 °C (Abbildung 3-53).

In 113 von 1746 Nutzungsstunden zwischen 7 und 15 Uhr wird die Mindesttemperatur von 20 °C unterschritten, was 6,5 % der Nutzungszeit entspricht.

Übertemperaturen kamen gelegentlich vor: in 124 h war es wärmer als 25 °C, was 7 % der Nutzungszeit entspricht. Die 26 °C-Marke wurde in 56 Stunden überschritten (3,2 %).

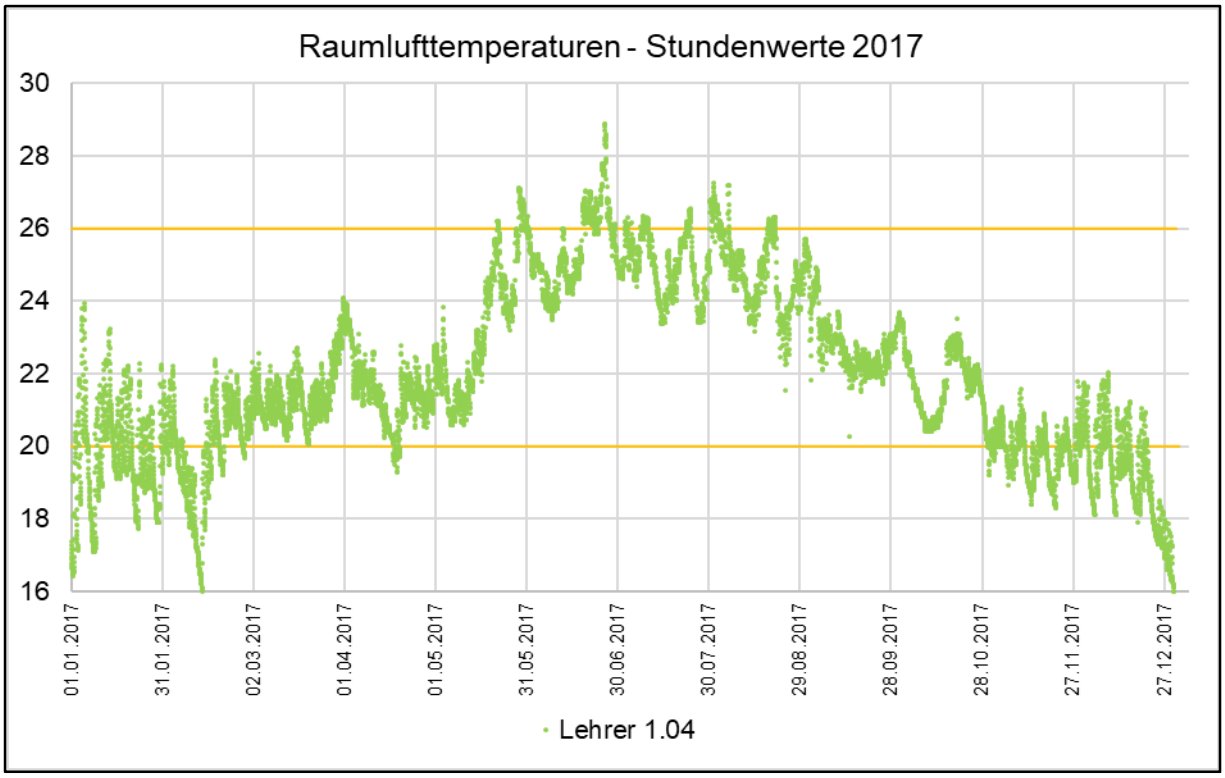


**Abbildung 3-52: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2017**

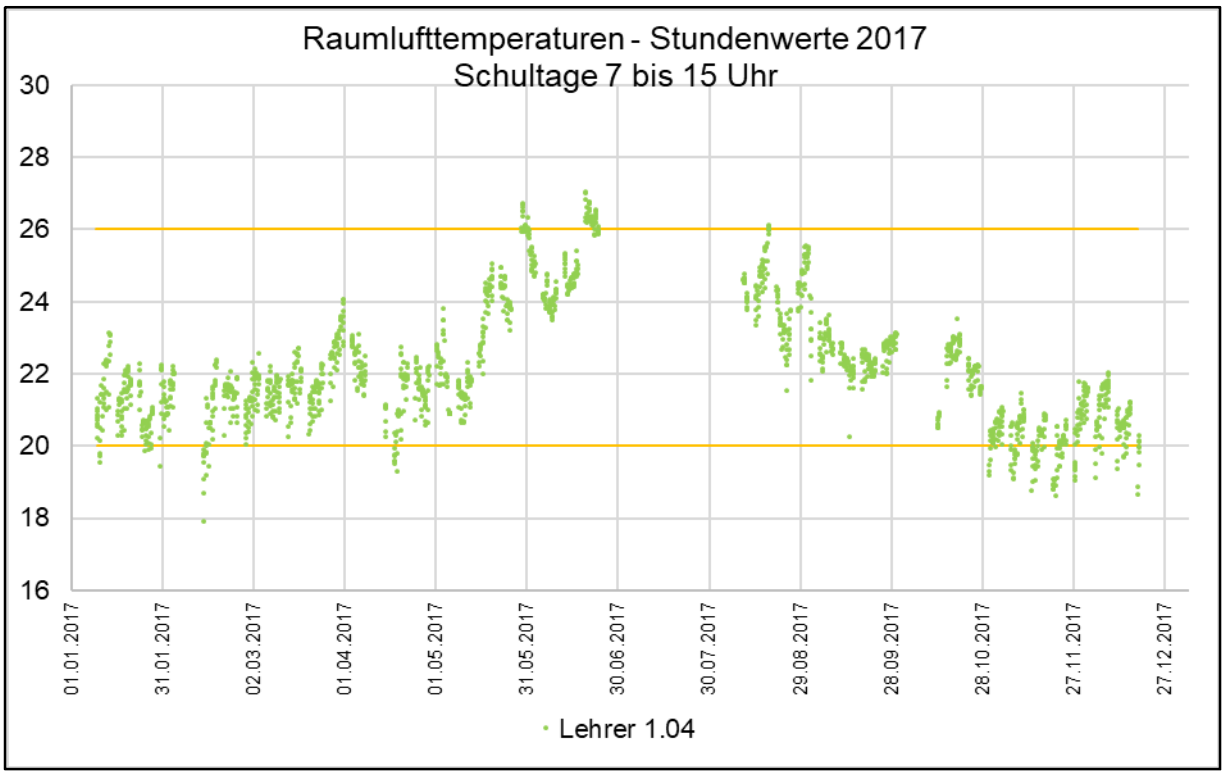


**Abbildung 3-53: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2017, Schultage 7-15 Uhr**

## *3.9 Temperaturhäufigkeit und Temperaturverlauf Technikräume*

Zusätzlich zu den vorher beschriebenen Aufenthaltsräumen liegen für drei Technikräume (Hausanschlussraum Elektro 0.04, Lüftungszentrale 2.18 Gebäudeteil A und Lüftungszentrale 2.03 Gebäudeteil B) die Raumtemperaturen vor, da sie andere Messreihen wie Bauteilmessungen oder Betriebsmessungen vervollständigen.

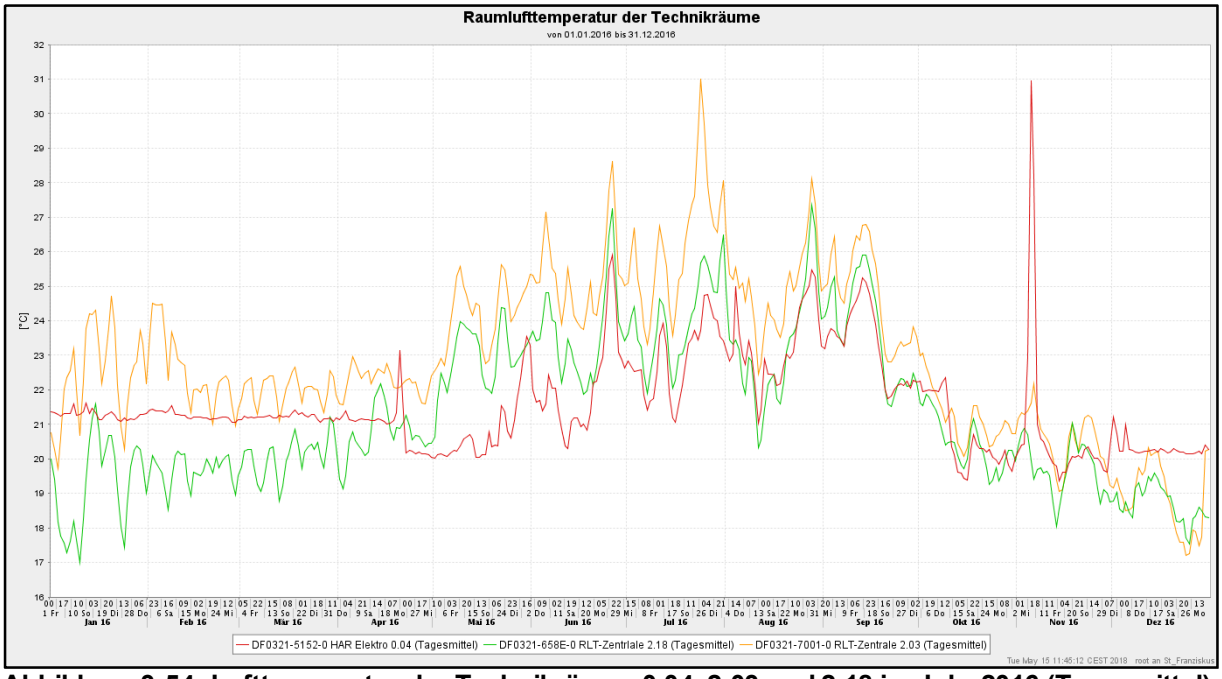


**Abbildung 3-54: Lufttemperatur der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2016 (Tagesmittel)**

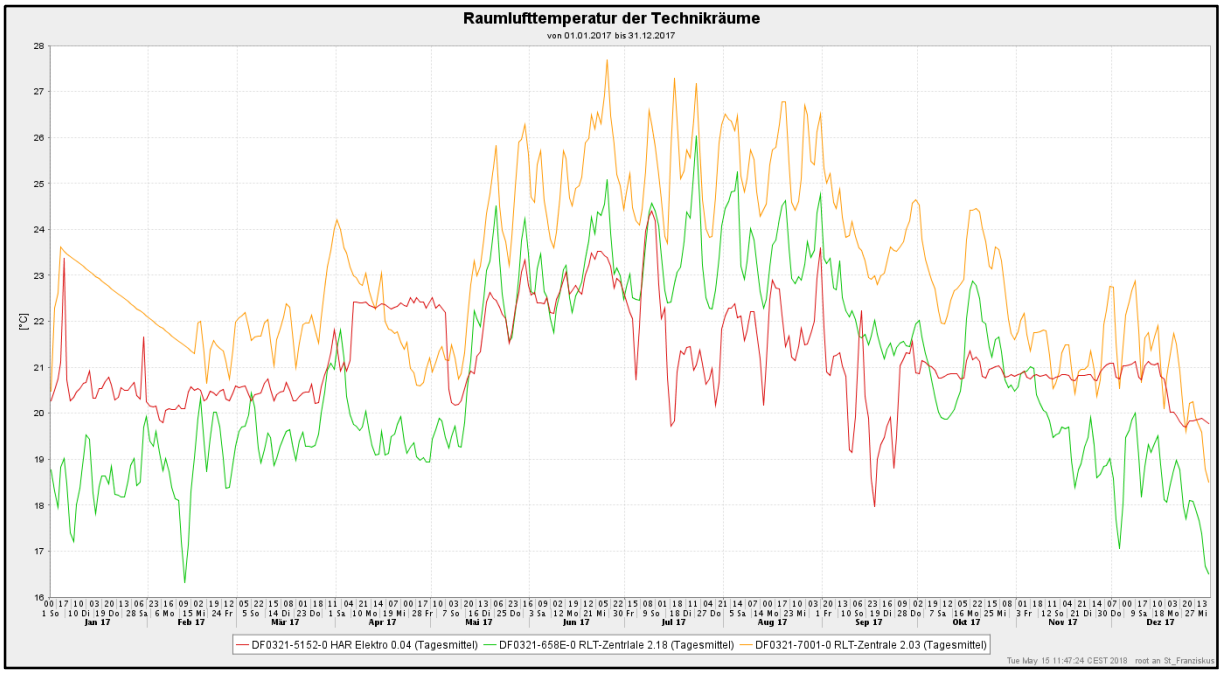


**Abbildung 3-55: Lufttemperatur der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2017 (Tagesmittel)**

Die Messdaten sollen in aller Kürze für die Jahre 2016 (Abbildung 3-54) und 2017 (Abbildung 3-55) anhand von Tagesmittelwerten dargestellt werden. Gut sichtbar ist die aktive Kühlung im Elektroraum 0.04 als Standort des Servers (rot) mit relativen konstanten Raumtemperaturen zwischen 20 und 21 °C. In den Sommerhalbjahren gibt es stärkere Schwankungen, deren Ursache nicht bekannt ist.

Anfang November 2016 scheint die Kühlung kurzzeitig inaktiv gewesen zu sein, die Temperatur stieg auf ein Tagesmittel von 31 °C. Das Minimum war im September 2017 mit einem Tageswert von 18 °C zu verzeichnen. Die Temperaturen in der Lüftungszentrale 2.03 (orange) liegen ganzjährig im Mittel 1,6 K über denen der Lüftungszentrale 2.18 (grün). Die Ursache hierfür ist nicht bekannt.

## *3.10 Vertikales Temperaturprofil Klassenraum 1.08*

Ziel der Betrachtung des vertikalen Temperaturprofils ist die Beurteilung der Fußboden- und Oberflächentemperaturen. Lufttemperaturen in der Höhe von 0,1 m sollten nach [14] eine Temperatur von 21 °C nicht unterschreiten, eine Temperatur von 24 °C wird hingegen als optimal und sehr behaglich empfunden. Für eine Schule sollten die Differenzen der Raumlufttemperaturen zwischen Kopf- und Knöchelhöhe nicht mehr als 2 K betragen – bei sehr tiefen Außentemperaturen 2,5 K.

Da der Unterricht hauptsächlich von 7:30 bis 12:15 Uhr in den Klassenräumen stattfindet, wird die Schichtung in den folgenden Auswertungen stets zu Unterrichtsbeginn (durchgezogene Linien) und -ende (gestrichelte Linien) dargestellt.

### *3.10.1 Frühlingswoche*

In der ausgewählten Woche vom 11.04 bis 15.04.2016 (Abbildung 3-56) liegt die Raumtemperatur in einer Höhe von 0,1 m im gesamten Wochenverlauf nie unterhalb von 21 °C, es werden im Durchschnitt Messwerte von 23,4 °C erreicht. Die vom Nutzer als besonders behaglich empfundene Temperatur im Fußbereich von 24 °C wird nur am Mittwoch in der Zeit von 11:10 Uhr bis 12:10 Uhr gemessen.

Je vertikaler sich die Linien im Diagramm darstellen, desto homogener ist die Temperaturschichtung. Das größte Delta zwischen 0,1 und 1,7 m Höhe wurde am Dienstag um 7:30 Uhr mit 0,95 K < 2 K gemessen und liegt somit im behaglichen Bereich. Die Differenz während der Anwesenheit der Nutzer liegt im Mittel bei 0,5 K.

Es wird weiterhin deutlich, dass die Lufttemperatur in der Unterrichtszeit täglich ansteigt. Dies ist im Beispiel insbesondere am Montag und Dienstag stark ausgeprägt. Am Dienstag beträgt die Temperatur zum Unterrichtsbeginn in 0,8 m Höhe 22,4 °C, nach Unterrichtsende ist sie um 1,8 K auf 24,2 °C angestiegen.

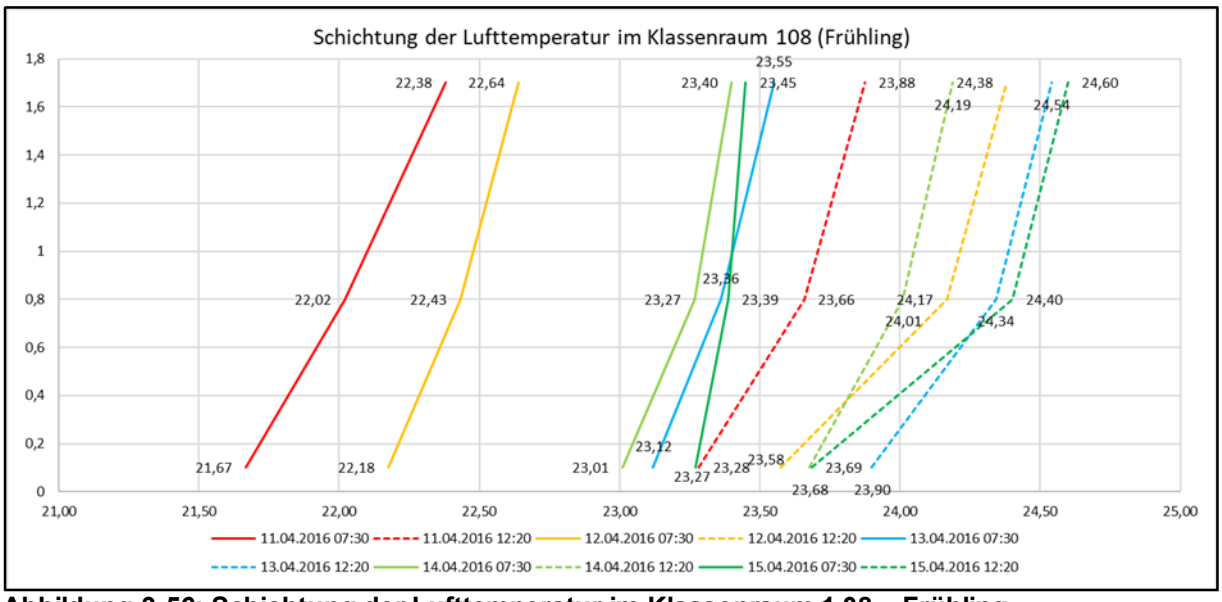

**Abbildung 3-56: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Frühling**

### *3.10.2 Sommerwoche*

In der auszuwertenden Sommerwoche vom 20.06 bis 24.06.2016 (Abbildung 3-57) liegen die Temperaturen in 10 cm Höhe zu Unterrichtsbeginn zwischen 23,8 und 25,1 °C, zum Unterrichtsende zwischen 23,9 und 25,6 °C. Es werden im Mittel Temperaturen von 24,2 °C (0,1 m) gemessen.

Analog zur ausgewerteten Frühlingswoche steigen die Temperaturen in der Zeit des Unterrichts ebenfalls täglich an. Am Montag (rote Linie) liegt die Temperatur in 0,8 m Höhe um 7:30 Uhr bei 24,2 °C und am Ende des Unterrichts um 12:20 Uhr bei 25 °C.

Die maximale Differenz zwischen der Raumlufttemperatur in 0,1 m und 1,7 m lag am Montag um 12:10 Uhr bei 0,6 K < 2 K. Die Spreizung liegt im Durchschnitt während der Anwesenheit der Nutzer bei 0,3 K.

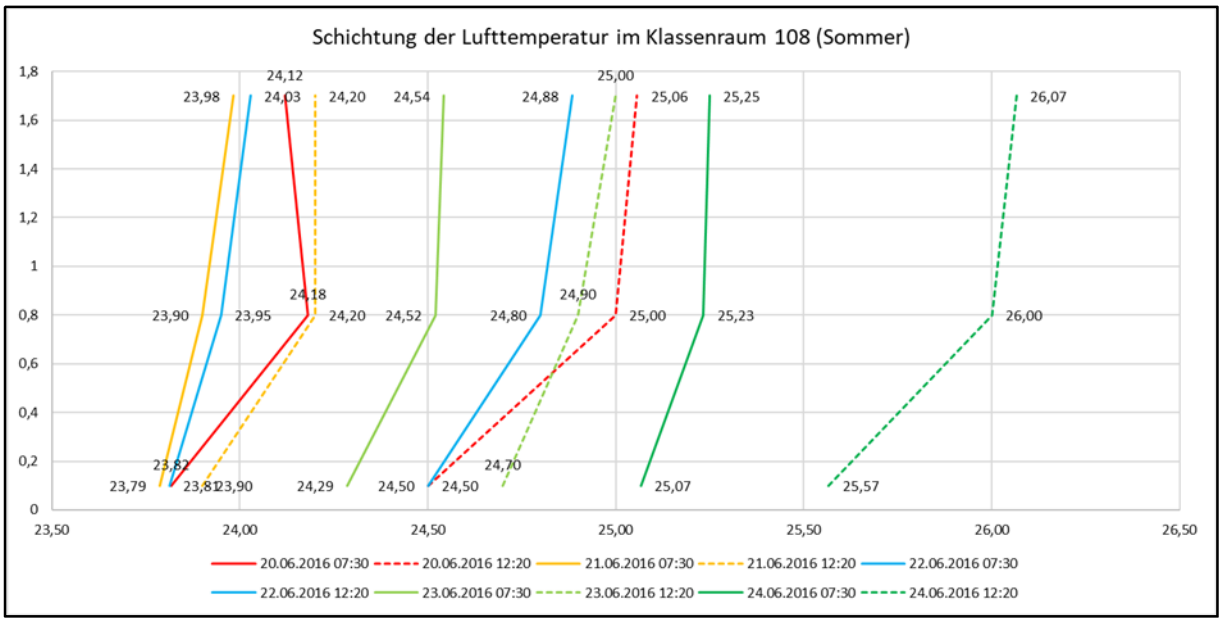


**Abbildung 3-57: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Sommer**

### *3.10.3 Herbstwoche*

In Abbildung 3-58 ist die Temperaturschichtung im Klassenraum 1.08 in der Herbstwoche vom 24.10 bis 28.10.2016 dargestellt.

Die Messwerte in Fußbodennähe liegen zu Unterrichtsbeginn bei 20 bis 20,5 °C < 21 °C. In der Unterrichtszeit von 7:30 Uhr bis 12:20 Uhr liegt die Temperatur durchschnittlich bei 20,7 °C und in 77 % der Zeit unter 21 °C. Der als optimal empfundene Wert von 24 °C wird in der gesamten Woche nicht erreicht.

Auch in dieser Woche steigt die Lufttemperatur in den drei gemessenen Höhen ebenfalls täglich während des Unterrichts an. Beispielsweise am Montag liegt die Temperatur zu Unterrichtsbeginn in 0,8 m Höhe bei 20,2 °C und am Unterrichtsende bei 21,3 °C. Die Differenz zwischen der Raumlufttemperatur in 0,1 m und 1,7 m liegt im Mittel bei 0,45 K.

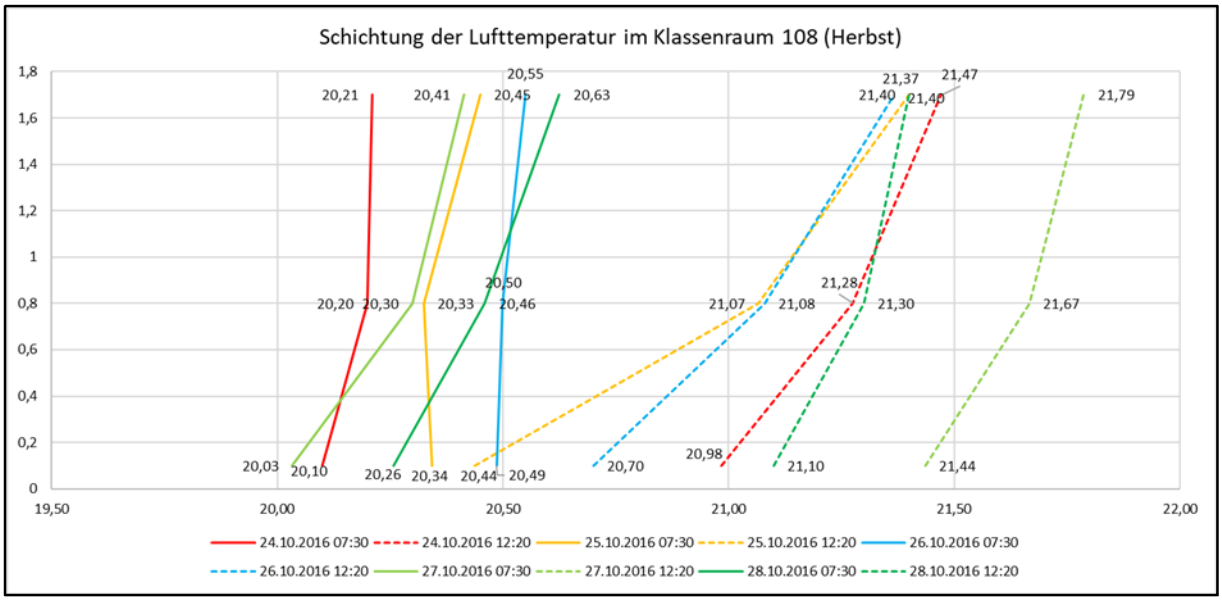


**Abbildung 3-58: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Herbst**

### *3.10.4 Winterwoche*

In der betrachteten Winterschulwoche vom 05.12 bis 09.12.2016 (Abbildung 3-59) liegen die Messwerte der Lufttemperatur in 0,1 m Höhe zwischen 19,6 und 22,5 °C. In der Unterrichtszeit werden im Mittel 20,8 °C gemessen, in 77 % der Zeit sind die Werte unter 21°C.

Die als optimal empfundene Temperatur in Fußbodennähe von 24 °C wird am Dienstag in der Zeit von 10:40 Uhr bis 10:50 Uhr gemessen (hier nicht dargestellt). In diesem Zeitraum gibt es mit 2,5 K eine hohe Spreizung zwischen der Raumlufttemperatur in 0,1 m und 1,7 m Höhe. Da in diesem Fall jedoch die Fußbodentemperatur den höheren Wert aufwies, gilt dieses Verhältnis als besonders behaglich.

Auffällig ist der Verlauf am Montag (rot gestrichelt) um 12:20 Uhr, aber auch hier liegt die Temperaturdifferenz beim sitzenden Schüler nur bei 1,4 K < 2 K zwischen Kopf und Füßen. Das durchschnittliche Delta beträgt 0,4 K während der Nutzungszeit.

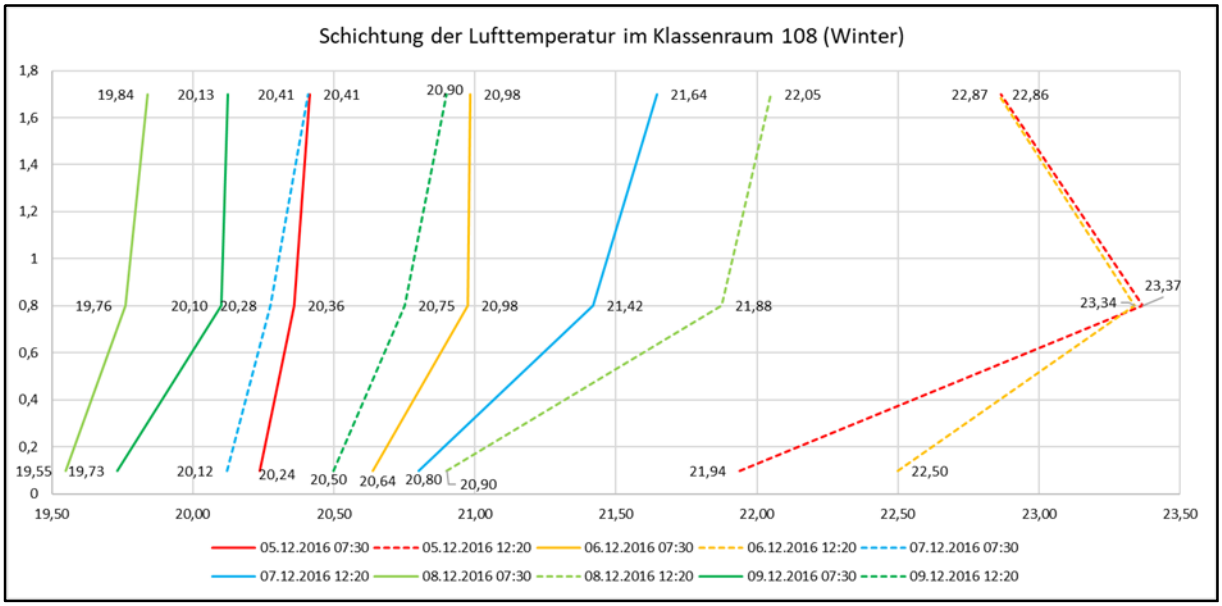


**Abbildung 3-59: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Winter**

## 3.11 Vertikales Temperaturprofil Klassenraum 2.01

### 3.11.1 Frühlingswoche

Im nordorientierten Klassenraum 2.01 sind in der auszuwertenden Frühlingswoche die Messwerte der Lufttemperatur in 0,1 m Höhe zu keinem Zeitpunkt unter dem Grenzwert von 21°C. Im Durchschnitt wird während der Nutzung eine Temperatur von 22,4 °C gemessen. Die meist nahezu senkrecht verlaufenden Kurven lassen erkennen, dass die Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Füßen gering ist, sie liegt im Mittel bei 0,15 K.

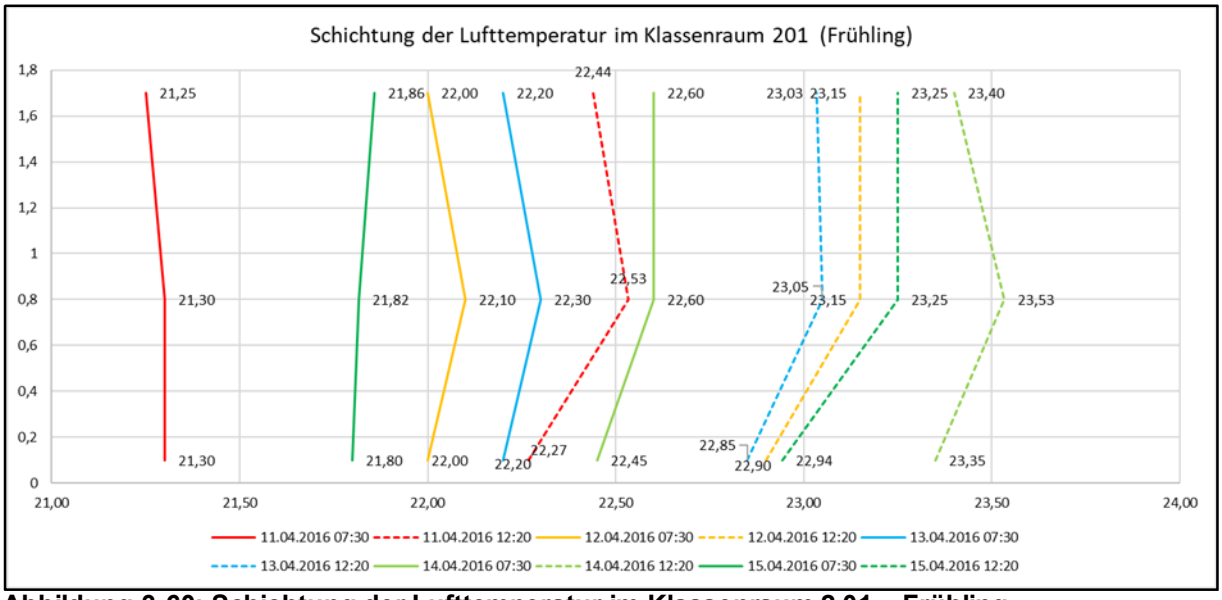


**Abbildung 3-60: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Frühling**

### 3.11.2 Sommerwoche

In der untersuchten Sommerwoche bewegen sich die Temperaturen in Fußbodennähe zwischen 23,1 und 25,2 °C, der Mittelwert während der Nutzungszeit liegt bei 24 °C. Die Temperaturdifferenz in der Höhenschichtung beträgt im Mittel 0,1 K, die Verteilung ist demnach sehr homogen. Positiv ist, dass in 25 % der Nutzungszeit die Lufttemperatur in 1,7 m Höhe geringer ist als in Fußbodennähe. Erstmals tritt der Fall auf, dass die Temperatur zum Unterrichtsende kühler ist als zum Beginn (Montag).

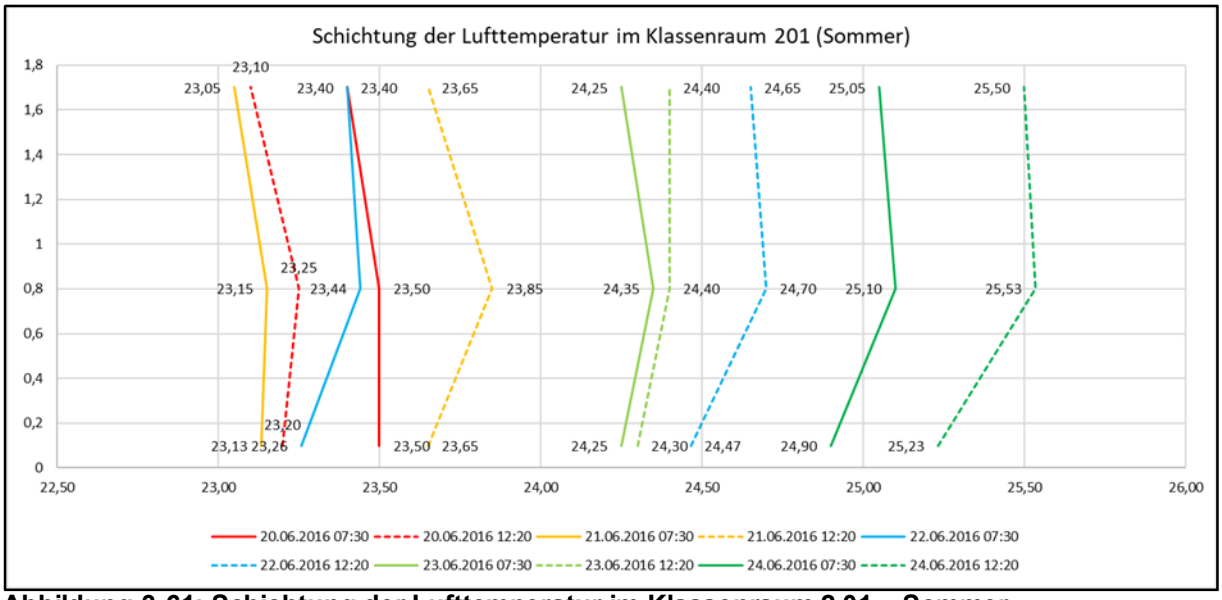


**Abbildung 3-61: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Sommer**

### *3.11.3 Herbstwoche*

Im Klassenraum 2.01 wird in der Herbstwoche der empfohlene Grenzwert in Fußbodennähe von 21 °C zu Unterrichtsbeginn grundsätzlich unterschritten, es ist fußkalt. Erst zum Unterrichtsende wird dahingehend ein behaglicher Zustand erreicht. Die Messwerte liegen im Mittel bei 20,4 °C und während der Nutzung zu ca. 95 % unter 21 °C. Das Optimum von 24 °C in Fußnähe wird während der gesamten Woche nicht erreicht.

Während der Anwesenheit der Nutzer liegt die Differenz zwischen der Raumlufttemperatur in 0,1 m und 1,7 m durchschnittlich bei 0,2 K. Der Grenzwert von 2 K wird zu keinem Zeitpunkt der Woche überschritten.

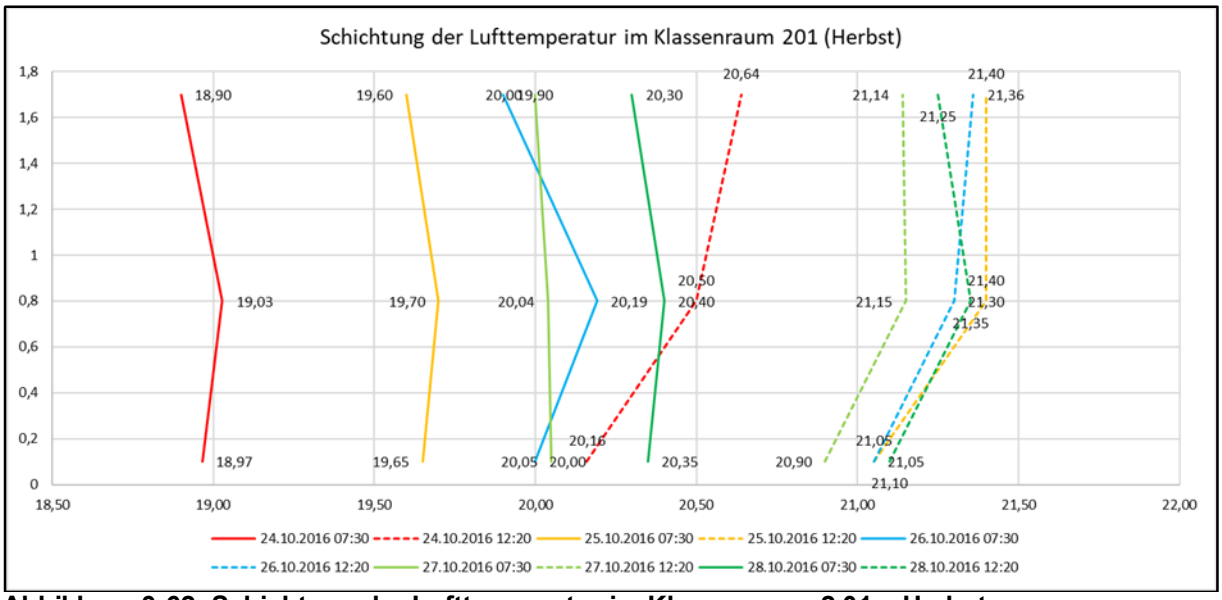


**Abbildung 3-62: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Herbst**

### *3.11.4 Winterwoche*

In der ausgewerteten Winterwoche liegt die Mehrzahl der gemessenen Innentemperaturen, wie auch bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, weit unterhalb der Behaglichkeitsgrenze. Temperaturen in Fußbodennähe von 16,7 bis 20,3 °C – im Mittel 18,6 °C während der Unterrichtszeit – sind eindeutig zu gering.

Die Lufttemperatur liegt in ca. 35 % der Unterrichtszeit zwischen 16 °C und 18 °C. Besonders auffällig ist dabei der Montag, an dem zu Unterrichtsbeginn in 0,1 m Höhe nur 16,6 °C gemessen werden. Im Laufe des Unterrichts steigt die Lufttemperatur auf höchstens 18,5 °C an, was zu kühl ist.

Die Temperaturschichtung stellt sich relativ homogen dar, sie weist im Mittel eine Spreizung von 0,35 K auf. Dieses Kriterium heilt jedoch in diesem Fall nicht die mangelnde allgemeine Behaglichkeit im Klassenraum.

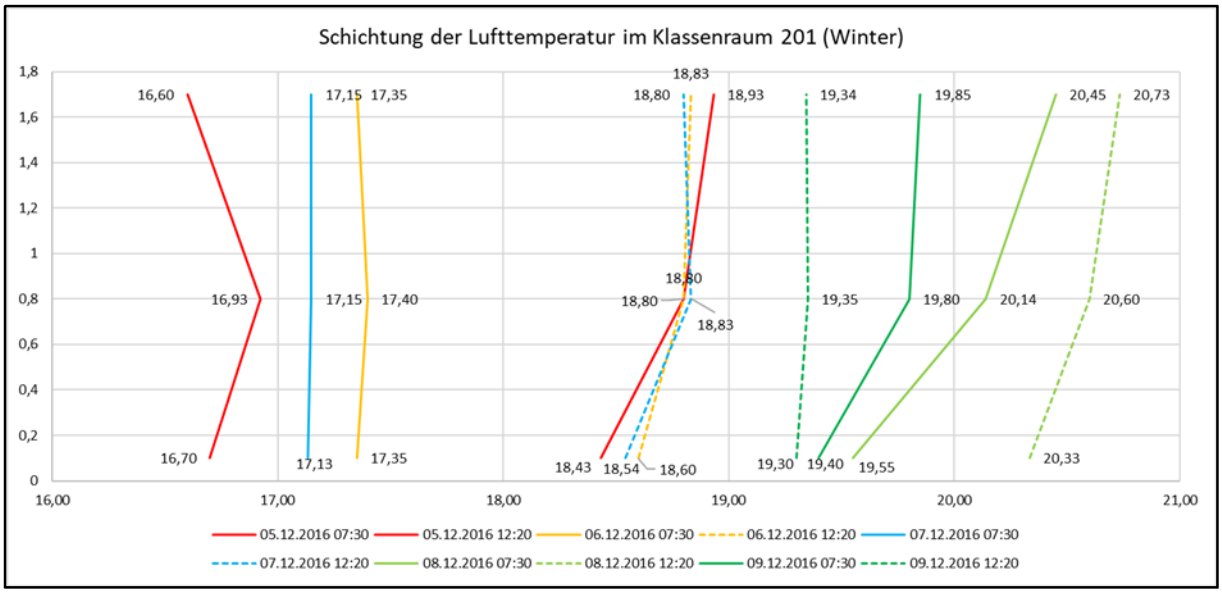


**Abbildung 3-63: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Winter**

## *3.12 Vertikales Temperaturprofil Aula*

### *3.12.1 Sonnige Sommerwoche*

Das vertikale Temperaturprofil wird im Folgenden an einer sonnigen Beispielwoche vom 06.06. bis 10.06.2016 untersucht (siehe Abbildung 3-64).

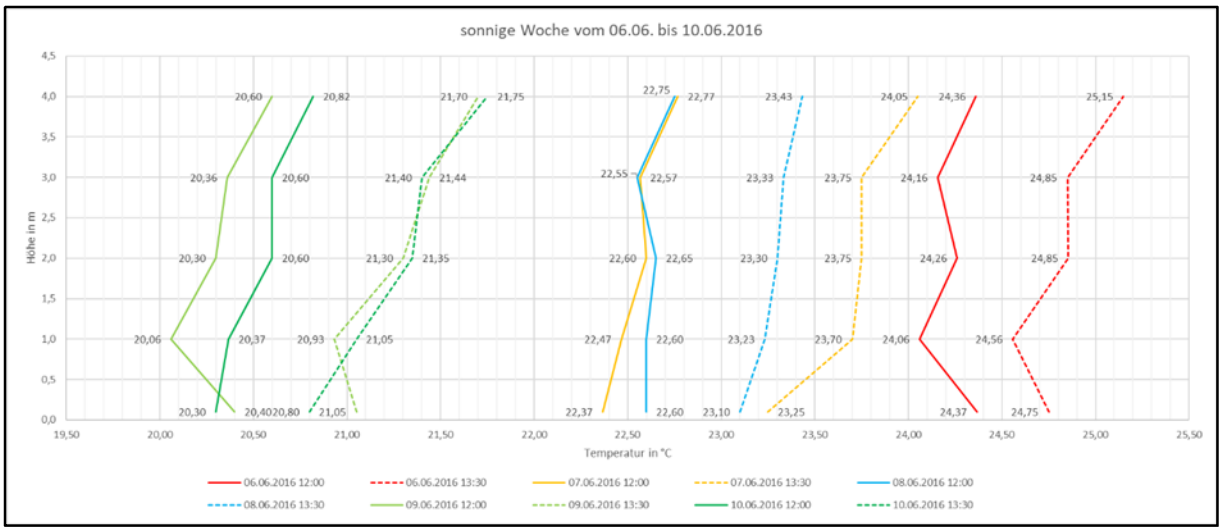


**Abbildung 3-64: Höhenprofil der Aula – sonnige Woche vom 06.06. bis 10.06.2016**

Die dargestellten Höhenlinien zeigen die Werktage der Woche jeweils zu Mittagsbeginn um 12:00 Uhr (durchgezogene Linien) und nach dem Mittagessen um 13:30 Uhr (gestrichelte Linien).

Für alle Tage kann festgestellt werden, dass die gestrichelten Linien rechts der durchgezogenen Linien liegen, was bedeutet, dass innerhalb der 90-minütigen Mittagszeit eine Erwärmung stattgefunden hat. Ausschlaggebend hierfür sind die hohe Personendichte und die Wärmeübertragung aus der benachbarten Küche, welche während der Essenausgabe durch die Durchreiche räumlich mit der Aula verbunden ist.

Der rot dargestellte Montag zeigt die Temperaturverhältnisse nach einem Wochenende mit ausgeschalteter Lüftungsanlage. Das Wochenende war sonnig mit Außentemperaturen bis zu 28 °C. Über die freie Nachtauskühlung, die um 3.00 Uhr nachts begann, wurde die Temperatur in der Aula auf ein behaglicheres Raumklima abgesenkt.

An den darauffolgenden Tagen kam es nicht mehr zu Innenraumtemperaturen über 24,0 °C, dennoch stellt sich jeweils eine Temperaturerhöhung über die Mittagszeit ein.

Für alle Messzeitpunkte der Beispielwoche kann gezeigt werden, dass die Differenzen zwischen Minimal- und Maximaltemperatur der einzelnen Kurven bei 0,2 bis 0,9 K liegen. Die minimale Temperatur innerhalb des Aufenthaltsbereiches bis 1,5 m lag bei 20,1 °C, die höchste bei 24,8°C.

### *3.12.2 Bewölkte Sommerwoche*

Zum Vergleich ist nun eine bewölkte Woche vom 11.07. bis 15.07.2016 dargestellt, in der es am Montag 9 Sonnenstunden gab, danach täglich 1 … 4,5 Sonnenstunden (Abbildung 3-65).

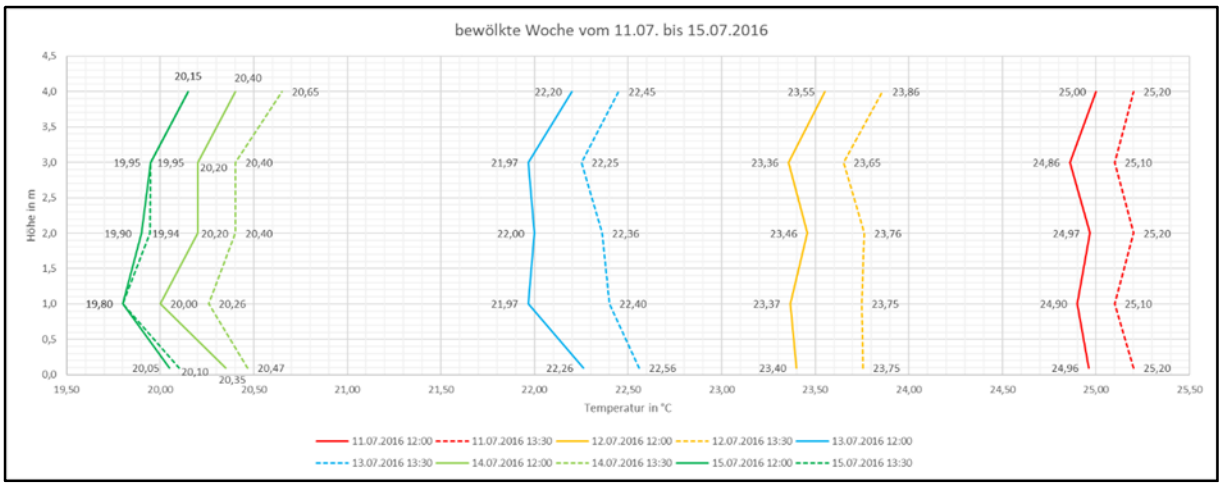


**Abbildung 3-65: Höhenprofil der Aula – bewölkte Woche vom 11.07. bis 15.07.2016**

Auch hier begann der Montag (rot) nach einem Wochenende ohne Nachtabsenkung mit hohen Innentemperaturen. Es ist deutlich zu sehen, wie die Temperaturprofile von Montag bis Freitag im Diagramm immer weiter nach links rücken, sich der Raum also allmählich abkühlt.
Weiterhin zeichnet sich ab, dass nach der Benutzung der Aula die Innentemperaturen um 0,2 bis 0,3 K gestiegen sind. Die einzige Ausnahme bildet der Freitag, hier sind die Profile vor und nach dem Mittag fast deckungsgleich.

Die minimale Temperatur innerhalb des Aufenthaltsbereiches bis 1,5 m lag bei 19,8 °C, die höchste bei 25,2 °C.

### *3.12.3 Sonnige Winterwoche*

Zum Vergleich wird nun eine sonnige Winterwoche vom 22.02. bis 26.02.2016 betrachtet. Die Nachtauskühlung ist zu der Zeit deaktiviert, dafür findet morgens eine Aufheizphase statt. Im Gegensatz zum Sommer ist hier zu sehen, dass der Montag nach der Wochenendabsenkung kühler startet als die folgenden Wochentage. Auch hier zeigt sich die Aufheizung während der 90-minütigen Mittagszeit.

Für alle Messzeitpunkte der Beispielwoche kann gezeigt werden, dass die Differenzen zwischen Minimal- und Maximaltemperatur der einzelnen Kurven bei 0,5 bis 1 K liegen. Die minimale Temperatur innerhalb des Aufenthaltsbereiches bis 1,5 m lag bei 21,3°C, die höchste bei 24 °C. Die größte Differenz zeigt sich stets zwischen 0,1 m und 1 m Höhe, sie ist jedoch so gering, dass sie nicht zu Unbehaglichkeit führt.

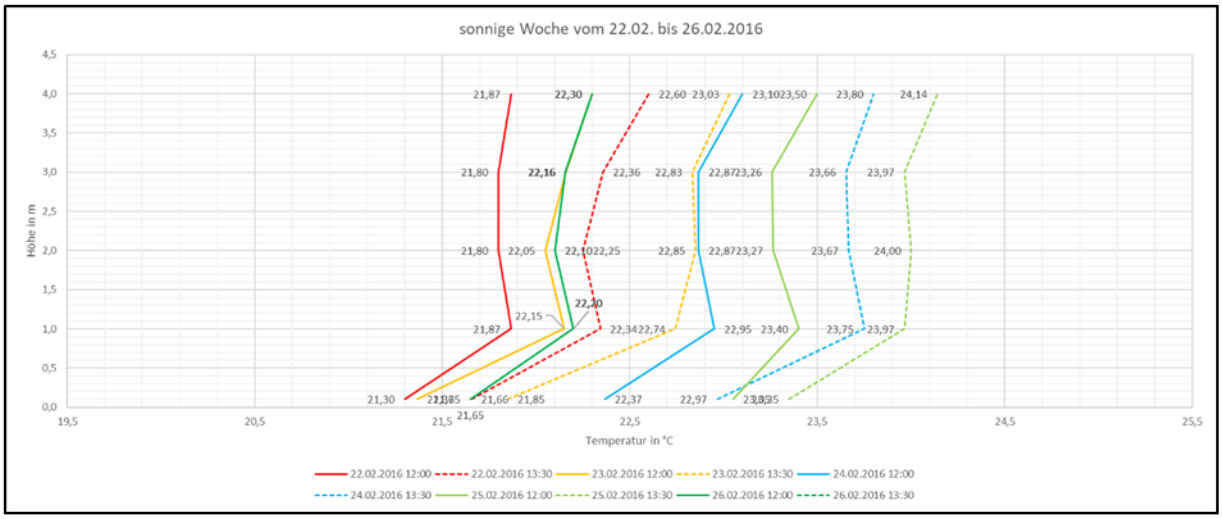


**Abbildung 3-66: Höhenprofil der Aula – sonnige Winterwoche vom 22.02. bis 26.02.2016**

### *3.12.4 Bewölkte Winterwoche*

Auch die bewölkte Winterwoche vom 11.01. bis 15.01.2016 startet nach der Wochenendabsenkung mit einem eher kühlen Montag, wobei sich die Raumtemperatur im Wochenverlauf erhöht. Auch hier zeigt sich die Aufheizung während der 90-minütigen Mittagszeit um bis zu 1,2 K im Aufenthaltsbereich von 1 m Höhe.

Die minimale Temperatur innerhalb des Aufenthaltsbereiches lag bei 20,2 °C (am Montag in 0,10 m Höhe), die höchste bei 25,26 °C (am Freitag in 2 m Höhe).

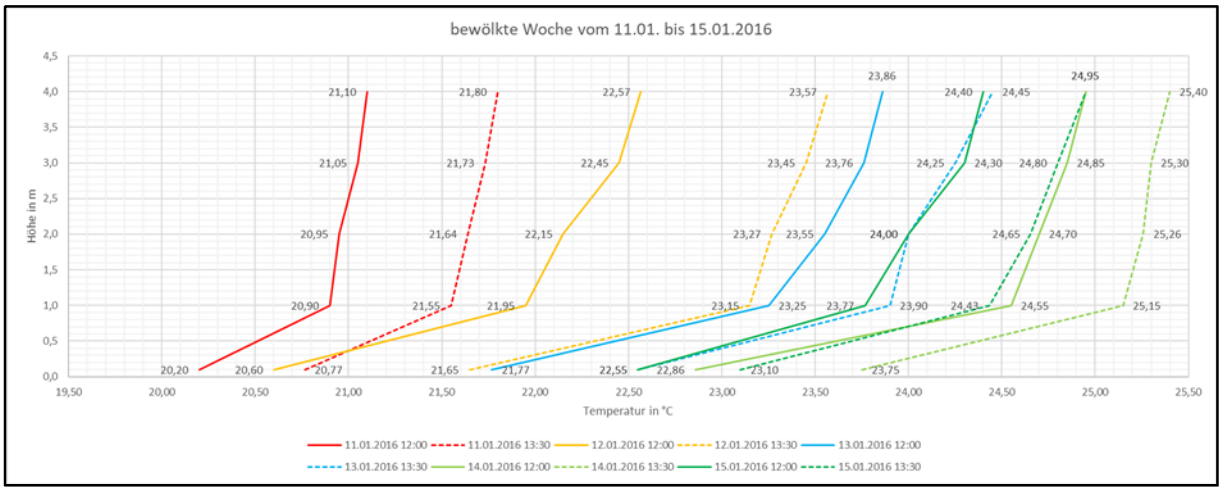


**Abbildung 3-67: Höhenprofil der Aula – bewölkte Winterwoche vom 22.02. bis 26.02.2016**

### *3.12.5 Fazit*

Die Temperaturschichtung in der Aula innerhalb der potentiellen Anwesenheitszeit von Personen sowie innerhalb des Aufenthaltsbereichs (unter 1,7 m Höhe) ist sehr homogen. Die Temperaturdifferenz zwischen unten und oben liegt fast ganzjährig unter 2 K. Es wurde ebenfalls deutlich, dass die höchste Raumlufttemperatur nicht unbedingt in 4,0 m Höhe gemessen wird.

## *3.13 Befragungen*

Die Protokolle der Befragungen befinden sich in Anhang B. In den Gruppendiskussionen mit Schülern und Lehrern am 14.04.2015 mit der Begleitforschung äußerten die Kinder positiv, das Gebäude sei im Winter immer warm genug, die Temperaturen seien sehr gut. Diese Kinder hatten das alte, marode Gebäude noch kennengelernt. Bei der Gelegenheit äußerten die Lehrer die Kritik, die Südseite sei im Sommer 2014 sehr warm gewesen.

Sporadische Nutzerrückmeldungen zur Temperatur in den Räumen ergaben immer wieder, dass das regelungstechnische Konzept auch im dritten Betriebsjahr noch zu Beschwerden über zu kalte Nordräume, insbesondere morgens und im Erdgeschoss, führe.

Im Fall des Hortraumes 0.01 führte dies dazu, dass die Nutzer eine mobile Elektroheizung (Abbildung 3-68) mit einer Leistung von 3,3 kW aufstellten, um sich selbst zu helfen. Wie häufig diese in Betrieb genommen wird, ist nicht bekannt.

**Abbildung 3-68: Mobile Elektroheizung**

Am 29.09.2017 wurde erneut eine Nutzerbefragung in einer 2. Klasse und anschließend mit einem Teil des Lehrerkollegiums durchgeführt. Die Befragung der Schüler im südorientierten Raum 1.08 ergab dabei, dass nahezu alle Schüler den Raum als zu warm empfinden und die Temperatur lediglich im Winter als genau richtig einstufen (äußerst selten als zu kalt). Auch die Lehrer bestätigen, dass man in den südorientierten Räumen schnell ins Schwitzen kommt. Auffällig war, dass trotz der einhelligen Meinung, der Raum sei auch just im Moment zu warm (etwa 25 °C), alle Kastenfenster bereits auf „Winterstellung“ – innen angekippt, außen geschlossen – waren und blieben. Hierzu sei angemerkt, dass die Kinder im Schuljahr zuvor im südorientierten Raum 1.07 lernten und auch in den Folgejahren – dann im 2. Obergeschoss – auf der Südseite bleiben. Bei den Kindern der nordorientierten Klassen ist es ebenso, sie durchlaufen in den vier Jahren Grundschulzeit alle vier Räume der Nordorientierung.

Im weiteren Lehrergespräch wurde bemängelt, dass der südorientierte Raum 2.16, welcher ursprünglich als Vorbereitungsraum für Kunst und Werken vorgesehen war, aber jetzt als Einzelbüro genutzt wird, zu kalt ist. Ein Strahlungsheizkörper wurde bereits unter dem Schreibtisch nachinstalliert, welcher häufig in Betrieb sei. Man wisse jedoch, dass man sich für einen Termin in dem Raum eine Jacke mitnehme.

## *3.14 Winterliche Problemfälle*

In den vorangegangenen Kapiteln 3.3, 3.5 und 3.8 zeigte sich, dass winterliche Problemfälle im Wesentlichen in den nordorientierten Räumen auftreten. Aufgrund dieser Problematik wird im Folgenden der Temperaturverlauf in einer typischen Winterwoche – vom 05. bis 09.12.2016 – exemplarisch für die drei untersuchten, nordorientierten Räume Hortraum 0.01 (grün), Lehrerzimmer 1.04 (hellgrün) und Klassenraum 2.01 (blau) vergleichend betrachtet, siehe Abbildung 3-69.

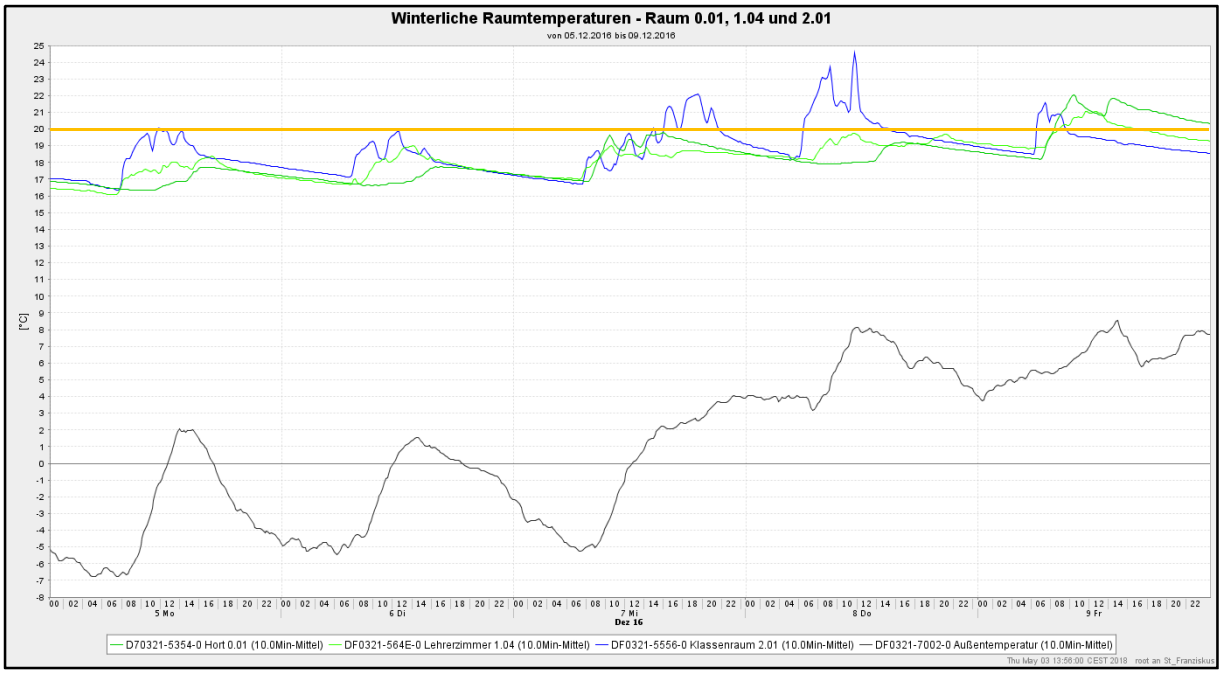


**Abbildung 3-69: Temperaturen Hort 0.01, Lehrerzimmer 1.04 und Klasse 2.01, 05. – 09.12.2016**

### Hortraum 0.01

Die tiefsten Temperaturen im Wochenverlauf sind im Hortraum gegeben, welcher eine mittlere Temperatur von 18,2 °C und einen Tiefstwert von 16,3 °C am Montag um 8:50 Uhr aufweist. Die ersten drei Wochentage beginnen mit Werten unter 17 °C, am Donnerstag und Freitag liegen die morgendlichen Temperaturen bei 17,9 bzw. 18,2 °C. Die Tagesspitzen werden meist gegen 14 bis 16 Uhr erreicht, sie liegen jedoch am Montag und Dienstag bei lediglich 17,7 °C, am Mittwoch bei 19,7 °C und am Donnerstag bei 19,2 °C. Der höchste gemessene Wert der Woche beträgt 22 °C am Freitag um 9:50 Uhr. Jedoch sei hier nochmals angemerkt, dass der Fühler bis zum 5.6.2018 im Elektroverteiler verbaut war und die Messdaten bis dahin nicht die unmittelbare Raumlufttemperatur wiedergeben.

### Lehrerzimmer 1.04

Die durchschnittliche Raumlufttemperatur im Lehrerzimmer in der Dezemberwoche liegt bei 18,3 °C.

Zum Wochenbeginn herrschen in dem betroffenen Raum am Montagmorgen etwa 16 °C, im Tagesverlauf werden 18,3 °C erreicht. Die morgendliche Temperatur bessert sich von Tag zu Tag (~17 °C am Dienstag und Mittwoch, 18 °C am Donnerstag, 19 °C am Freitag), dennoch liegt sie unter der Mindesttemperatur von 20 °C, welche bei einer sitzenden Tätigkeit angemessen wäre. Erst am Freitag wird in der Zeit von 08:30 Uhr bis 16:40 Uhr eine behaglichere Raumtemperatur erreicht.

Insgesamt sind im Wochenverlauf steigende Temperaturen zu verzeichnen. Ob dies allein durch die Belegung des Raumes und die Luftheizung erreicht wird, oder ob auch der nachinstallierte Heizkörper eingeschaltet wurde, lässt sich nicht ermitteln.

### Klassenzimmer 1.08

Besser stellt sich die Situation im nordorientierten Klassenraum 1.08 mit einer mittleren Temperatur von 18,8 °C dar. Zwar sind die morgendlichen Temperaturen zu Unterrichtsbeginn mit ca. 17,7 °C an den ersten drei Wochentagen zu kühl, jedoch zeigt sich in diesem Raum sehr deutlich der sprunghafte Anstieg der Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Belegung.

Am Montag und Dienstag bleiben auch die Spitzenwerte gegen Mittag knapp unter 20 °C. Am Mittwoch ist ein Aufschwingen der Temperatur bis in die Abendstunden auf 22 °C zu verzeichnen, eventuell durch eine außerplanmäßige Belegung des Raumes mit mehreren Personen. Am Donnerstag werden nach der morgendlichen Aufheizung 22 °C erreicht. Dass dies an den vorangegangenen Tagen nicht erfolgte, deutet auf ein Problem mit der Lüftungsregelung hin.

Insgesamt ist auffällig, dass die Raumtemperaturen bis ca. 7 Uhr (Montag bis Mittwoch) um ca. 1,5 K abfallen und der Aufheizbetrieb zu spät startet, erkennbar an den steigenden Temperaturen. Während der Planungsphase wurde davon ausgegangen, dass es eine morgendliche Vorspül- und Aufheizphase von zwei Stunden vor Unterrichtsbeginn gibt. Diese findet offenbar nicht wie geplant statt, siehe Abschlussbericht Teil 7. Am Donnerstag und Freitag ist ab 5:30 Uhr ein Temperaturanstieg durch eine Aufheizphase zu beobachten, was sich insgesamt positiv auf die Raumtemperatur auswirkt.

## *3.15 Sommerliche Problemfälle*

### Klassenraum 1.08

Die Problematik der hohen sommerlichen Temperaturen auf der Südseite soll anhand von zwei Beispielwochen näher betrachtet werden. Zum einen wurde eine Frühlingswoche im Mai ausgewählt, in der bereits sehr hohe Raumtemperaturen zu verzeichnen waren (09. bis 13.05.2016, Abbildung 3-70). Zum anderen wurde eine Woche Ende August/Anfang September gewählt, die ebenfalls Zustände weit über dem Komfortbereich aufwies (29.08. bis 02.09.2016, Abbildung 3-71).

Dargestellt ist jeweils die Raumtemperatur des Klassenraumes 1.08 (rot). Als Vergleichswert wird die Raumtemperatur der ebenfalls südorientierten Aula (grün) mit aufgeführt. Die Außentemperatur (schwarz) und die Globalstrahlung (gelb) in dem Zeitraum wurden von der Wetterstation aufgezeichnet.

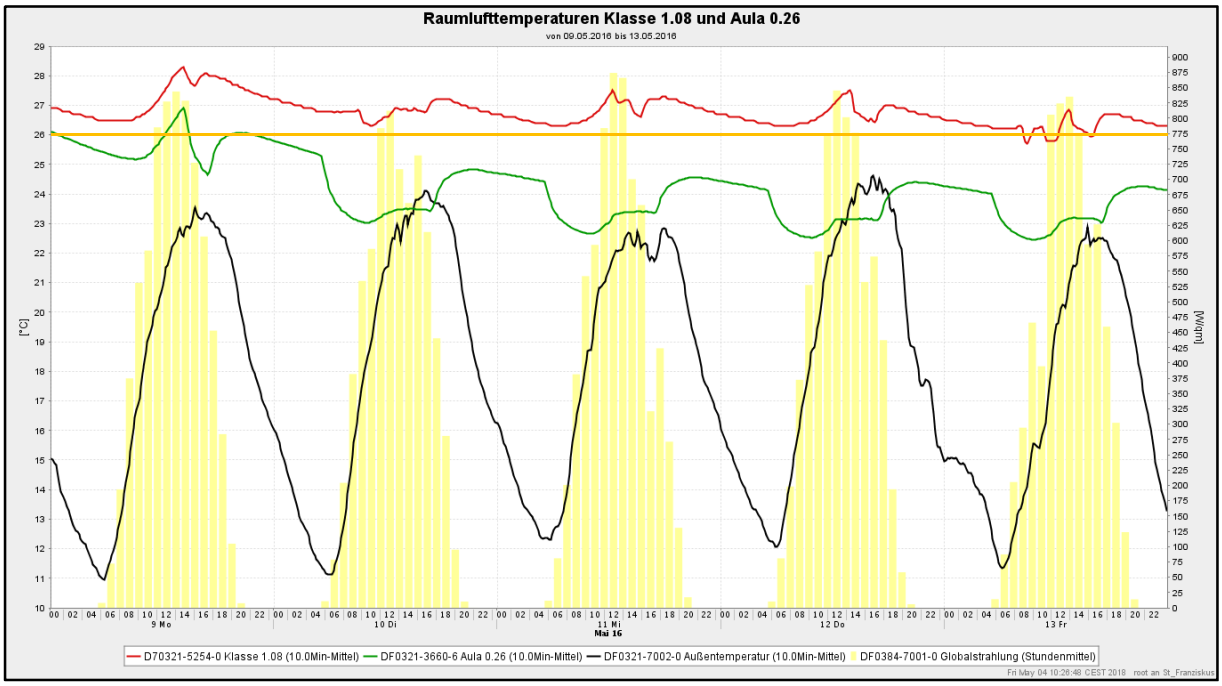


**Abbildung 3-70: Raumlufttemperaturen Klasse 1.08 und Aula 0.26 vom 09. bis 13.05.2016**

Bereits am Montagmorgen des 09.05.2016 um 0:00 herrscht im Klassenraum 1.08 eine Lufttemperatur von 26,9 °C (Abbildung 3-70), da über das Wochenende bei ausgeschalteter Lüftungsanlage und solarer Einstrahlung ein „Aufschaukeln“ der Raumlufttemperatur stattgefunden hat.

Bis zum Unterrichtsbeginn am Montag um 7:30 Uhr ist die Temperatur in den Nachtstunden lediglich auf 26,5 °C gefallen. Da die Außentemperatur währenddessen im günstigsten Fall nur 11 °C beträgt, zeigt dies, dass die Nachtlüftung entweder noch nicht aktiviert war oder nicht funktioniert hat (zur Ursache siehe Kapitel 3.16 und Abschlussbericht 7 - Lüftung).

Die Temperatur steigt dann bis zur Mittags- und Hausaufgabenzeit auf fast 28,3 °C an. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich auch in den folgenden Tagen, wobei die Raumlufttemperatur erst am Freitag erstmals unter 26 °C fällt (Minimum: 25,7 °C um 8:50 Uhr). Es werden täglich Höchstwerte über 27 °C erreicht.

In der letzten Augustwoche (Abbildung 3-71) startet der Montag um 0:00 Uhr mit sehr hohen 28,4 °C im Klassenraum 1.08. Jedoch beginnt ab 5:20 Uhr ein Temperaturabfall, welcher um 8:40 Uhr mit 26,1 °C sein Minimum erreicht. Zum Mittag hingegen liegt die Raumtemperatur bereits wieder bei 28,4 °C. Nach einer erneuten Abkühlung pegelt sich der Wert in der Nacht bei etwa 27 °C ein. Am Dienstagmorgen schaltete sich um 4:00 Uhr die Lüftungsanlage ein, es erfolgt eine leichte Abkühlung auf 25,6 °C. Wobei der Effekt der Nachtlüftung mit nur 1,4 K Temperaturdifferenz als nicht zufriedenstellend einzustufen ist (Ursache: siehe Kapitel 3.16).

Die Außenluft war mit minimal 12 °C deutlich kühler, sodass der Effekt trotz der Ansaugung über den Erdwärmeübertrager größer hätte ausfallen müssen. Dass dies prinzipiell funktioniert, zeigt der Verlauf der Aula: Hier wurde eine Abkühlung der Raumluft von 26,5 °C (3:00 Uhr) auf 22,2 °C (8:50 Uhr) erreicht, was 4,3 K Temperaturdifferenz entspricht. Auch alle Folgetage zeigen eine sehr effektive Nachtauskühlung der Aula, jedoch nicht des Klassenraumes.

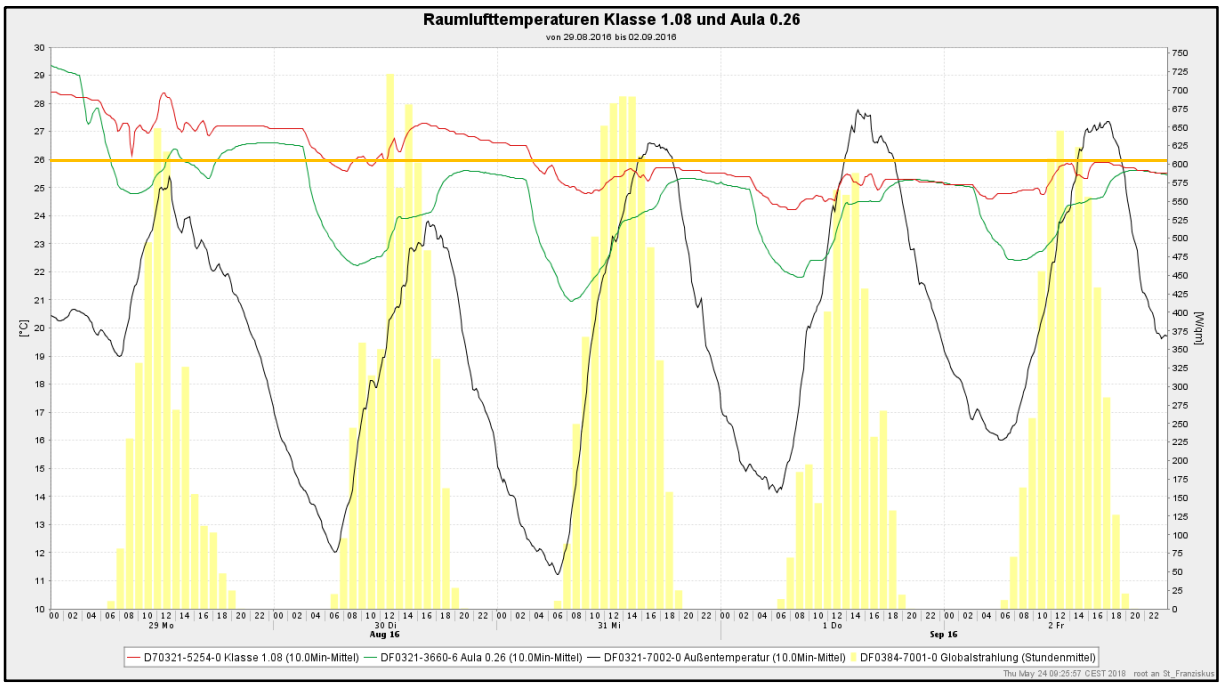


**Abbildung 3-71: Raumlufttemperaturen Klasse 1.08 und Aula 0.26 vom 29.08. bis 02.09.2016**

Die Raumtemperatur des Klassenraumes 1.08 fällt am Mittwochmorgen in der 2. Unterrichtsstunde erstmals unter 25 °C, am Donnerstagmorgen wird mit 24,2 °C das Wochenminimum erreicht, obwohl die Außenlufttemperatur von Dienstag zu Donnerstag gestiegen ist.

Über die Fensterstellung der drei Kastenfenster kann leider keine eindeutige Aussage getroffen werden, da die Fensterkontakte keine fehlerfreien Daten liefern. Die Messdaten zeigen, dass die Fensterflügel im Mai wahrscheinlich nicht bedient wurden. Am Montag, dem 28.09. wurden beim mittleren Fenster zwischen 6:00 und 14:00 Uhr mehrfach Öffnungen der Flügel registriert. Weitere Bewegungen wurden nicht erfasst.

Interessant ist, dass der Klassenraum 1.08 beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes etwas besser abschnitt als die Aula (Ergebnisse siehe Tabelle 2-1, Seite 22). In der Praxis stellen sich die Verhältnisse jedoch anders dar. Dies ist vermutlich auf zwei Ursachen zurückzuführen:

Zum einen sind in der Aula die innenliegenden Jalousetten der Pfosten-Riegel-Fassade dauerhaft ganzjährig heruntergefahren, da sie nach einem Defekt nicht mehr bewegt werden sollen. Im Klassenraum hingegen werden die Jalousien von den Nutzern bedient, wodurch nicht garantiert werden kann, dass sie bei Sonneneinstrahlung konsequent geschlossen sind.

Zum anderen zeigen die Messungen, dass die Nachtlüftung im Gebäudeteil A, in dem die Aula liegt, deutlich effektiver als im Gebäudeteil B (Klassen, Hort) funktioniert. Eine Klärung der Problematik konnte zwar nach Projektabschluss, jedoch rechtzeitig zur Berichterstellung endlich gefunden werden, siehe folgender Abschnitt 3.16. Der Abschlussbericht Teil 7 dokumentiert die Erkenntnisse im Detail.

Der Effekt der sommerlichen Nachtlüftung ist grundsätzlich gut – dort, wo diese funktioniert. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Auskühlung in den Klassenräumen von zu kurzer Dauer ist bzw. ein zu hoher Sollwert eingestellt ist, da mit der einsetzenden morgendlichen Betriebsphase eine sehr schnelle Wiederaufheizung des Gebäudes erfolgt.

## *3.16 Verbesserungsansätze*

**Gebäudeteil A**

Bezüglich der Behaglichkeit in der Aula sind entgegen der anfänglichen Erwartungen – aufgrund des hohen Fensterflächenanteils und der Solarkollektorwand – weder im Sommer noch im Winter Probleme aufgetreten. Nach Beschwerden im ersten Betriebsjahr über zu hohe Raumlufttemperaturen wurde die freie Nachtauskühlung aktiviert – der Haken in der Bedienoberfläche war noch nicht gesetzt. An den Wochenenden ist die Lüftungsanlage aufgrund der Abwesenheit der Nutzer nicht in Betrieb, was im Sommer zu einem Anstieg der Temperaturen führt. Die gemessenen Werte für die Jahre 2016 und 2017 geben jedoch keinen Anlass für weiteren Optimierungsbedarf im Bereich der Aula hinsichtlich der Raumlufttemperaturen.

**Gebäudeteil B**

Abbildung 3-72 zeigt die Stundenwerte der Raumtemperaturen an Schultagen von 7 bis 15 Uhr für die beiden messtechnisch begleiteten Klassenräume und den Hortraum. Im Allgemeinen ist die Temperatur im nordorientierten Klassenraum 2.01 deutlich niedriger als im südorientierten Klassenraum 1.08. Der Hort ist noch kühler als die Klassenräume. Die Mittelwerte der Raumlufttemperaturen liegen bei 23,95 °C (Klassenraum 1.08), 22,6 °C (Klassenraum 2.01) bzw. 21,4 °C (Hortraum 0.01). Der Temperaturunterschied zwischen Nord und Süd von ca. 2 K führt insbesondere in der Heizperiode zu unbehaglichen Zuständen in den Nordräumen und zu berechtigten Nutzerbeschwerden.

Besonders groß sind die Defizite in der Behaglichkeit des nördlichen Hortbereiches, welcher messtechnisch durch den Hortraum 0.01 repräsentiert wird. Im Jahr 2016 war in 13,6 % der Zeit die Solltemperatur unterschritten, im Jahr 2017 noch in 11,3 % der Zeit. Auch im nordorientierten Klassenraum 2.01 liegt die Anzahl der Stunden mit Raumtemperaturen < 20 °C in 9,8 % der Nutzungszeit auf einem Niveau, welches Optimierungsmaßnahmen erfordert.

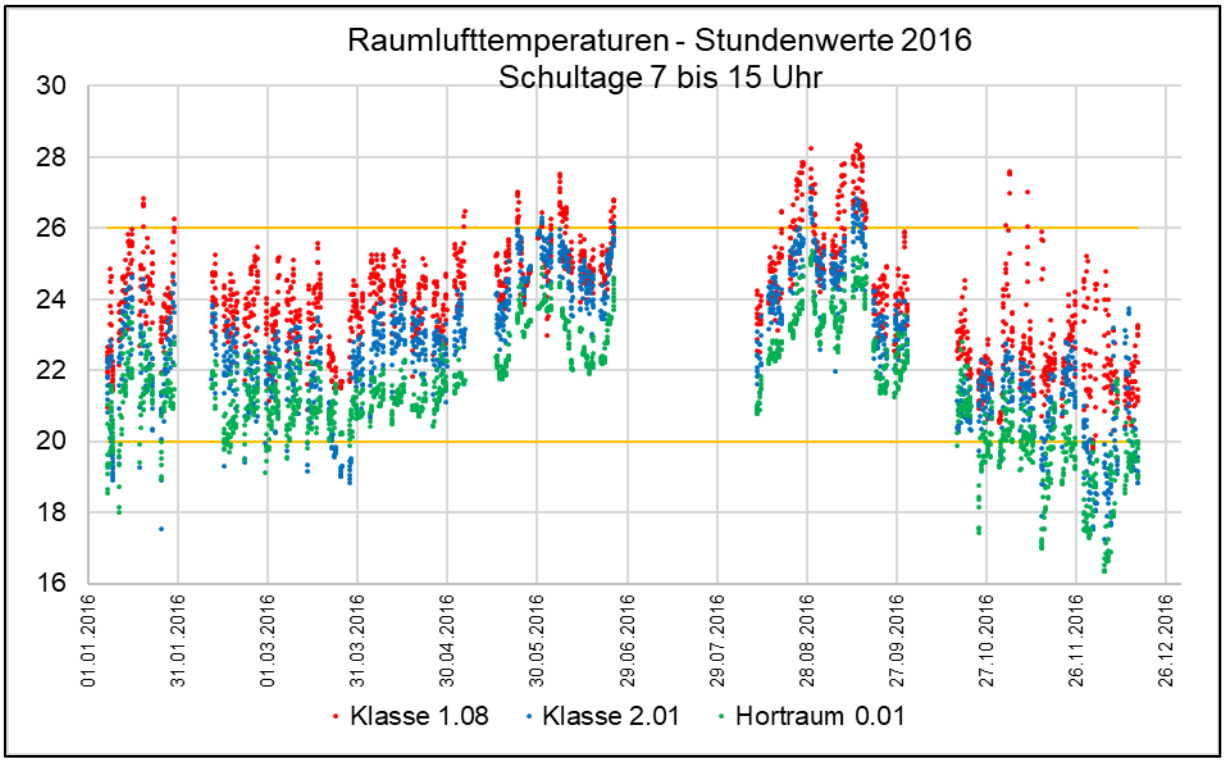


**Abbildung 3-72: Vergleich der Raumlufttemperaturen der Klassenräume und des Hortes**

Die nachfolgende Tabelle 3-2 fasst die auf Basis der Messdaten errechneten Über- bzw. Untertemperatur(grad)stunden für die Jahre 2016 und 2017 zusammen.

Die Übertemperaturgradstunden über 27 °C für die Sommerklimaregion C, in der die Stadt Halle liegt, wurden stets in Bezug auf die Normnutzungszeit (Montag bis Freitag von 7 bis 18 Uhr) nach DIN 4108-2 auf Basis der gemessenen Temperaturen errechnet. Der Anforderungswert beträgt dabei für Nichtwohngebäude maximal 500 Kh/a.

Alle weiteren Über- bzw. Untertemperaturen (> 26 °C, > 25 °C, < 20 °C) wurden in Bezug auf die in der ersten Spalte angegebene, reale Nutzungszeit errechnet. Die Messtechnik in Raum 2.01 war im Jahr 2017 leider von Datenausfall betroffen.

Der Grenzwert von 27 °C wurde im Fall der Klassenräume 1.08 und 2.01, des Hortraumes 0.01, des Lehrerzimmers 1.04 und der Aula 0.26 deutlich unterschritten und somit eingehalten. Lediglich die Spülküche und die Kochküche erfüllen die Anforderungen mit einer drei- bis vierfachen Überschreitung des Grenzwertes betriebsbedingt nicht. Dies ist jedoch nicht auf einen mangelnden sommerlichen Wärmeschutz zurückzuführen, sondern wird durch die enorme Abwärme der Küchentechnik verursacht.

Klammert man den Küchenbereich aus, so zeigt der südorientierte Klassenraum 1.08 hinsichtlich des sommerlichen Temperaturverhaltens große Probleme. Übertemperaturen von > 26 °C traten im Jahr 2016 in 9,9 % der Zeit und im Jahr 2017 in 6,3 % der Zeit auf. Die sommerliche Behaglichkeit in einer Passivhausschule sollte laut Feist in [3] auf $h_{\vartheta \geq 25}$ unter 10 % begrenzt werden. Für den Klassenraum 1.08 beträgt jedoch der Anteil der Stunden, in denen der Wert überschritten wurde, 23,5 % (2016) bzw. 19,8 % (2017). Selbst für den nordorientierten Klassenraum 2.01 lag der Wert im Jahr 2016 mit 12,2 % etwas über der Empfehlung.

**Tabelle 3-2: Übertemperaturgradstunden [Kh] sowie Über- und Untertemperaturstunden [h]**

| | Jahr 2016 | | | | Jahr 2017 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | > 27 °C [Kh] | > 26 °C [h] | > 25 °C [h] | < 20 °C [h] | > 27 °C [Kh] | > 26 °C [h] | > 25 °C [h] | < 20 °C [h] |
| **Raum 1.08** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 56 | 169 | 399 | 5 | 22 | 110 | 346 | 38 |
| | | 9,9% | 23,5% | 0,3% | | 6,3% | 19,8% | 2,2% |
| **Raum 2.01** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 0,1 | 35 | 208 | 166 | Datenlücken | | | |
| | | 2,1% | 12,2% | 9,8% | | | | |
| **Hort 0.01** *Nutzungszeit 6-17 Uhr* | 0 | 0 | 51 | 393 | 0 | 0 | 22 | 322 |
| | | | 1,8% | 13,6% | | 0,0% | 0,8% | 11,3% |
| **Spülküche 0.33a** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 2011 | 790 | 1064 | 75 | 2091 | 925 | 1240 | 212 |
| | | 32,8% | 44,1% | 3,1% | | 38,9% | 52,1% | 8,9% |
| **Kochküche 0.33** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 1564 | 30 | 154 | 200 | 1386 | 702 | 998 | 233 |
| | | 1,8% | 9,1% | 11,8% | | 29,5% | 41,9% | 9,8% |
| **Lehrer 1.04** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 2 | 30 | 154 | 200 | 0,1 | 56 | 124 | 113 |
| | | 1,8% | 9,1% | 11,8% | | 3,2% | 7,1% | 6,5% |
| **Aula 0.26** *Nutzungszeit 7-17 Uhr* | 4 | 36 | 93 | 65 | 0 | 1 | 26 | 117 |
| | | 1,7% | 4,5% | 3,1% | | 0,1% | 1,5% | 6,7% |

Nach monatelangen Versuchen, mit dem Hersteller der Lüftungstechnik einen Vor-Ort-Termin zur Problembehandlung zu vereinbaren, gelang im Juni 2018 endlich eine zweitägige Zusammenkunft mit intensiver Diagnostik. Dabei wurde eine unglückliche Verkettung von Fehleinstellungen aufgedeckt und behoben:

- Zum einen wurde festgestellt, dass die Nachtlüftung von 1:00 bis 5:00 Uhr zwar korrekt angelegt war, jedoch in der Bedienoberfläche im Gebäudeteil B (Klassen) der Haken zur Aktivierung nicht gesetzt war. Die Nachtlüftung hat daraufhin am 5.6.2018 erstmals ab 1:00 Uhr funktioniert.
- Es wurde von einer Konstantregelung auf eine Kaskadenregelung umgestellt.
- In der Regelungsoberfläche waren im Fall des Hortes sämtliche Räume der falschen Himmelsrichtung zugeordnet. Es war schlichtweg Nord und Süd vertauscht. Dies wurde behoben.
- Der Temperaturfühler des Raumes 0.01 befand sich nicht frei im Raum, sondern wurde in der Elektrounterverteilung gefunden. Da dieser Fühler als Regelfühler für alle nordorientierten Räume dient, war diese Lage unpassend. Der Fühler wurde freigelegt, sodass er nun die Temperatur im Raum 0.01 widergibt.

Wie sich die Veränderungen in der Anlagenregelung auf die Situation auswirken, bleibt abzuwarten. Da Süd- und Nordräume lüftungstechnisch aneinander gekoppelt sind, lässt sich das Problem der unterschiedlichen Raumlufttemperaturen nicht gänzlich auflösen. Sollten weiterhin große Differenzen zwischen nord- und südorientierten Räumen auftreten, wird eine Nachregulierung über die Volumenströme angestrebt. Die Nordräume sollen in dem Fall einen leicht überhöhten Luftvolumenstrom bekommen (im Winter zur besseren Heizungsversorgung), während in den Südräumen ein wenig gedrosselt wird. Das führt allerdings auch dazu, dass die Luftqualität in den Nordräumen noch etwas besser wird, in den Südräumen etwas schlechter. Daher sind dieser Optimierungsmaßnahme Grenzen gesetzt. Weiteres siehe Abschlussbericht Teil 7 zur Lüftung.

### *3.17 Verallgemeinerung und Fazit*

Grundsätzlich ist die Behaglichkeit in der Passivhausschule als allenfalls gut einzustufen.

Die Luftschichtung in den Klassenräumen ist unabhängig von der Ausrichtung sehr homogen, wesentliche Unterschiede sind nicht erkennbar. Der Grenzwert von maximal 2 K Temperaturdifferenz zwischen Fußboden und Kopf- oder Arbeitsebene wird nicht überschritten. Im südorientierten Klassenraum ist gelegentlich die Temperatur in Fußbodennähe höher als in 0,8 oder 1,7 m Höhe, was das Behaglichkeitsempfinden im Allgemeinen noch steigert.

Ein großes Problem stellt die grundlegende Konzipierung der raumlufttechnischen Anlage dar. Bereits in der Planungsphase wurde seitens der Hochschule Magdeburg-Stendal angemerkt, dass die Versorgung aller Räume des Gebäudeteils B mit der gleichen Lufttemperatur unabhängig von der Himmelsrichtung zu Problemen führen wird und eine Trennung in Nord/Süd notwendig sei. Der verantwortliche Planer ging von einem sehr gut funktionierenden Sonnenschutz in den Südräumen aus, der zu keinen nennenswerten Temperaturunterschieden führen würde. Zudem sei die thermische Kopplung zwischen den Räumen so gut wirksam, dass sich dies ggf. ausgleichen werde. Die Praxis zeigt nun die vorbeschriebenen Schwierigkeiten mit Übertemperaturen im südorientierten Klassenraum und unbehaglich kalten Zuständen im nordorientierten Bereich während der Heizperiode. Es hat sich eingebürgert, die Klassenraumtüren so oft wie möglich – auch während des Unterrichts – offen zu lassen, um einen Luftaustausch zu erreichen. Die Reinigungskräfte schließen am Nachmittag die Türen, der Hausmeister sorgt anschließend dafür, dass über Nacht wieder alle Türen offen stehen. Diese Umstände können nicht Ziel des Heizungs- und Lüftungskonzeptes gewesen sein.

Dass die Nachtlüftung grundsätzlich zur Auskühlung der Räume in den Sommermonaten funktioniert, obwohl der Erdwärmeübertrager nicht umgangen werden kann, zeigen die zufriedenstellenden Messwerte aus der Aula. Für den Gebäudeteil B und die betroffenen Klassenräume hatte der geringe Auskühleffekt durch die Nachtlüftung regelungstechnische Ursachen in der Lüftungsanlage und teilweise funktionale Ursachen an den Volumenstromreglern. Diese Schwierigkeiten wurden im Rahmen einer Lüftungsoptimierung am 5.6.2018 behoben, siehe Abschlussbericht Teil 7.

Das Anlagenkonzept ohne Einzelraumregelung bzw. im mindestens Zonenregelung für Raumgruppen kann für künftige Projekte nicht empfohlen werden.

# 4 Raumluftfeuchte

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Auswertung der gemessenen Raumluftfeuchten in den Referenzräumen, die auch hinsichtlich der Raumtemperatur im Kapitel 3 beschrieben wurden. Da es sich um kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler handelt, sind Messorte und Messtechnik identisch.

Die relative Feuchte kann in einem Bereich zwischen 35 und 70 % schwanken und wird vom Menschen trotzdem als behaglich empfunden. Eine Luftfeuchte unter 35 % ist zum Schutz der Schleimhäute eher zu vermeiden. Dass dieser Fall in der St. Franziskus-Grundschule häufiger auftritt, zeigen die folgenden Betrachtungen. Überschreitungen der 70 %-Marke hingegen hat es in den Referenzräumen zu keinem Zeitpunkt der Jahre 2016 und 2017 gegeben.

## *4.1 Messorte und Messtechnik*

Die Feuchten werden ebenso wie die Lufttemperaturen in ausgewählten Räumen durch kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler erfasst. Messtechnik und Messorte wurden bereits in Kapitel 3.1, Seite 38 näher beschrieben. Die in der Untergruppe "HOE" aufgelisteten Messpunkte waren im ursprünglichen Messkonzept nicht vorgesehen. Sie stehen lediglich zur Verfügung, da es sich bei der Messtechnik für die Temperaturschichtung im Raum (Kapitel 3.10 bis 3.12) ohnehin um kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler handelt.

Messkonzept:

- die Messungen werden zur Einschätzung der Behaglichkeit verwendet und teilweise zur Vervollständigung anderer Messreihen (Feuchteverlauf in Bauteilen, Lüftungsverhalten) genutzt

**Tabelle 4-1: Messpunkte bezüglich Raumluftfeuchte**

| Kürzel | Einheit | Gruppe | Untergruppe | Beschreibung |
|---|---|---|---|---|
| DF0321-3660-1 | % | RAU | HOE | Raumluft_Feuchte_Aula_10_cm |
| DF0321-3662-1 | % | RAU | HOE | Raumluft_Feuchte_Aula_100_cm |
| DF0321-3664-1 | % | RAU | HOE | Raumluft_Feuchte_Aula_2_m |
| DF0321-3666-1 | % | RAU | HOE | Raumluft_Feuchte_Aula_3_m |
| DF0321-3668-1 | % | RAU | HOE | Raumluft_Feuchte_Aula_4_m |
| DF0321-5230-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_108_an_Innenwand_10_cm |
| DF0321-5232-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_108_an_Innenwand_80_cm |
| DF0321-5234-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_108_an_Innenwand_170_cm |
| DF0321-5236-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_108_an_Aussenwand_10_cm |
| DF0321-5238-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_108_an_Aussenwand_80_cm |
| DF0321-523A-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_108_an_Aussenwand_170_cm |
| DF0321-5520-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_201_an_Aussenwand_10_cm |
| DF0321-5522-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_201_an_Aussenwand_80_cm |
| DF0321-5524-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_201_an_Aussenwand_170_cm |
| DF0321-5526-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_201_an_Innenwand_10_cm |
| DF0321-5528-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_201_an_Innenwand_80_cm |
| DF0321-552A-1 | % | RAU | HOE | Luftfeuchte_Klasse_201_an_Innenwand_170_cm |
| DF0321-5254-1 | % | RAU | INN | Raumluft_Feuchte_Klasse_108 |
| DF0321-5354-1 | % | RAU | INN | Raumluft_Feuchte_Hort_001 |
| DF0321-3660-7 | % | RAU | INN | Raumluft_Feuchte_Aula |
| DF0321-6558-1 | % | RLT | BTA | Ablufttemperatur_aus_Aula_im_Kanal |
| DF0321-5556-1 | % | RAU | INN | Raumluft_Feuchte_Klasse_201 |
| DF0321-564E-1 | % | RAU | INN | Raumluft_Feuchte_Lehrerzimmer_104 |
| DF0321-6152-1 | % | RAU | INN | Raumluft_Feuchte_Spuelkueche_033 |
| DF0321-615E-1 | % | RAU | INN | Raumluft_Feuchte_Kochkueche_033 |
| DF0321-5152-1 | % | RAU | TGA | Raumluft_Feuchte_Raum_004 |
| DF0321-5158-1 | % | RAU | TGA | Raumluft_Feuchte_Raum_004 |
| DF0321-658E-1 | % | RAU | TGA | Feuchte_in_R_218 |
| DF0321-7001-1 | % | RAU | TGA | Wetterstation_Raumluftfeuchte_in_Lueftungszentrale_BtB |
| DF0321-7002-1 | % | WET | WET | Aussenluftfeuchte |

## *4.2 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Klassenraum 1.08*

**2016**

Abbildung 4-1 stellt die Verläufe der relativen Luftfeuchte, gemessen am Fühler DF0321-5254-1, links für alle Stunden des Jahres und rechts reduziert auf die Nutzungszeit an Schultagen von 7 bis 15 Uhr im südorientierten Klassenraum 1.08 dar.

Der Mittelwert der relativen Luftfeuchte betrug im Gesamtjahr 39,3 % (Mittelwert über 8784 Stunden), bezogen auf die Nutzungszeit von 7 bis 15 Uhr (1701 Stunden) 38,0 %. Der niedrigste Wert innerhalb der Belegungszeit wurde am 22.01. um 13:00 Uhr mit 18,9 % gemessen, der höchste am 24.06. mit 61,4 %. Es wird deutlich, dass in 747 h, was 44 % der Nutzungszeit entspricht, die relative Feuchte unter 35 % liegt.

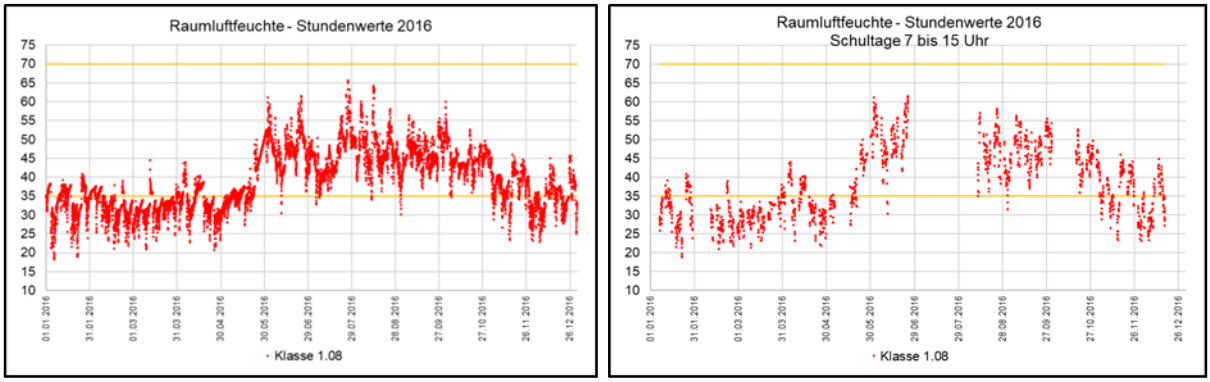


**Abbildung 4-1: Luftfeuchte Klasse 1.08 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr**

Aufgrund der Untersuchung der vertikalen Temperaturschichtung im Klassenraum 1.08 stehen außerplanmäßig auch Feuchtewerte in verschiedenen Höhen (10 cm, 80 cm, 170 cm) sowohl an der Innenwand als auch an der Außenwand zur Verfügung, siehe Abbildung 4-2.

Die Werte liefern ähnliche Ergebnisse wie der ausgewertete Fühler DF0321-5254-1, wobei während der Nutzungszeit festzustellen ist, dass die relativen Feuchten in Wandnähe höher liegen. Außerhalb der Betriebszeit der Lüftung stellen sich die Werte in Wandnähe im Vergleich niedriger dar. Eine Auswertung der Schichtung soll hier nicht vorgenommen werden.

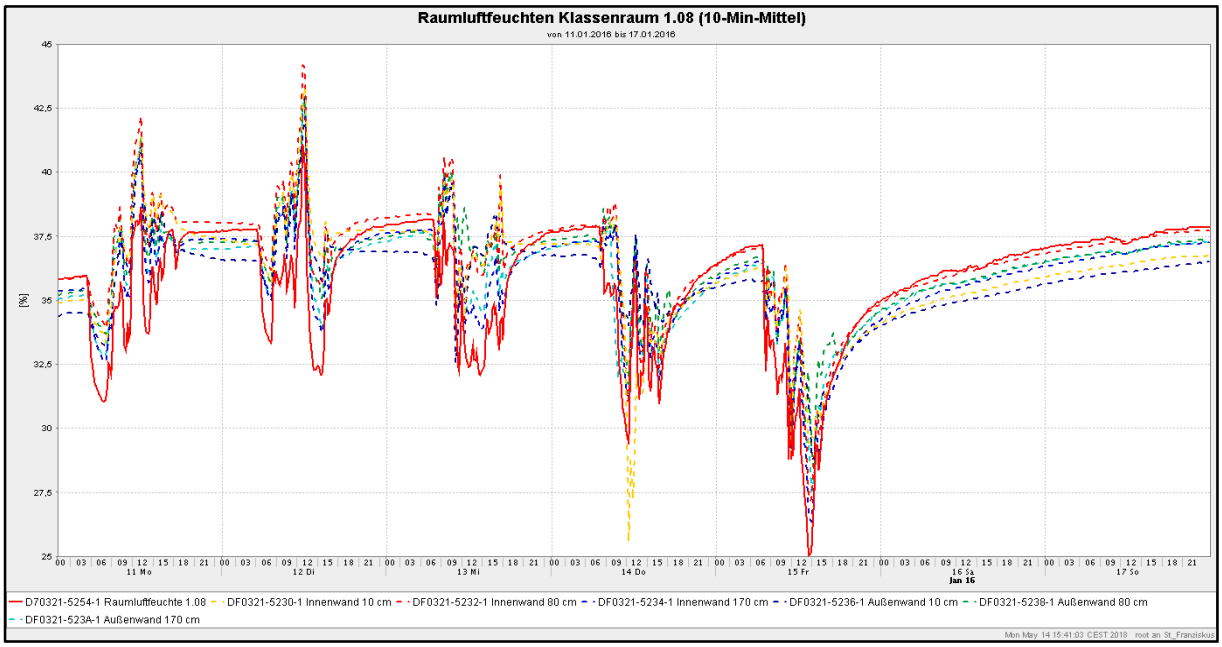


**Abbildung 4-2: Raumluftfeuchte in verschiedenen Höhen der Klasse 1.08 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016Uhr**

**2017**

Im Jahr 2017 (Abbildung 4-3) lag der Mittelwert der relativen Luftfeuchte bei 40,6 % (Gesamtjahr 8760 h) bzw. bei 40,2 % (Nutzungszeit 1746 h). Auch hier trat der Minimalwert mit 19,1 % im Januar auf, während das Maximum mit 63,8 % am 16.08. zu verzeichnen war. In 477 Nutzungsstunden (entsprechend 27 % der Belegung) war die Luft mit < 35 % relativer Feuchte eher zu trocken.

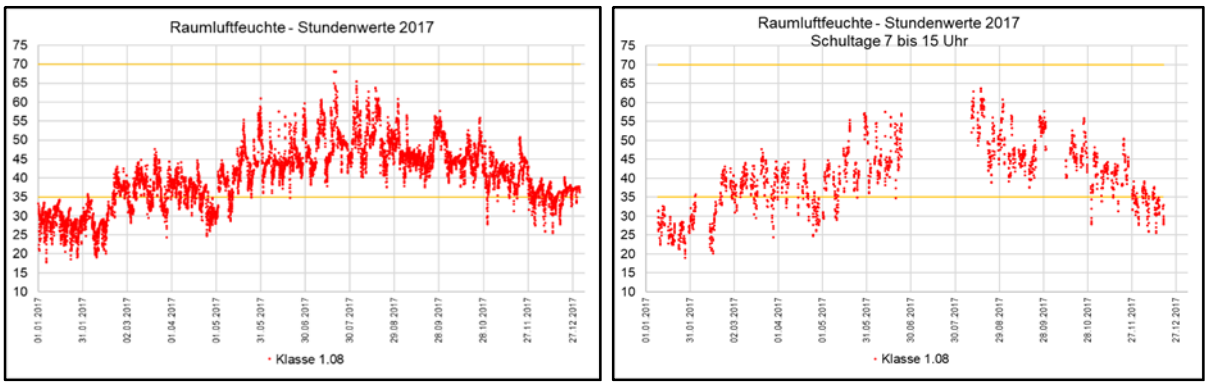


**Abbildung 4-3: Luftfeuchte Klasse 1.08 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr**

## *4.3 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Klassenraum 2.01*

**2016**

Die relative Luftfeuchte des nordorientierten Klassenraumes 2.01 lag mit 43,1 % (Gesamtjahr) bzw. 40,5 % (Mittelwert Schultage von 7 bis 15 Uhr) etwa 4 % über dem Mittelwert des Südklassenraumes. Dies ist insbesondere darin zu begründen, dass der Nordklassenraum in der überwiegenden Zeit auch eine geringere Raumtemperatur aufweist als der Südklassenraum. Die kleinste relative Feuchte wurde am 22.01. mit 18,8 % gemessen, der höchste Wert trat am 24.06. mit 66,3 % auf.

Während 588 Nutzungsstunden (35 % der Zeit) lag die Luftfeuchte unter den empfohlenen 35 %.

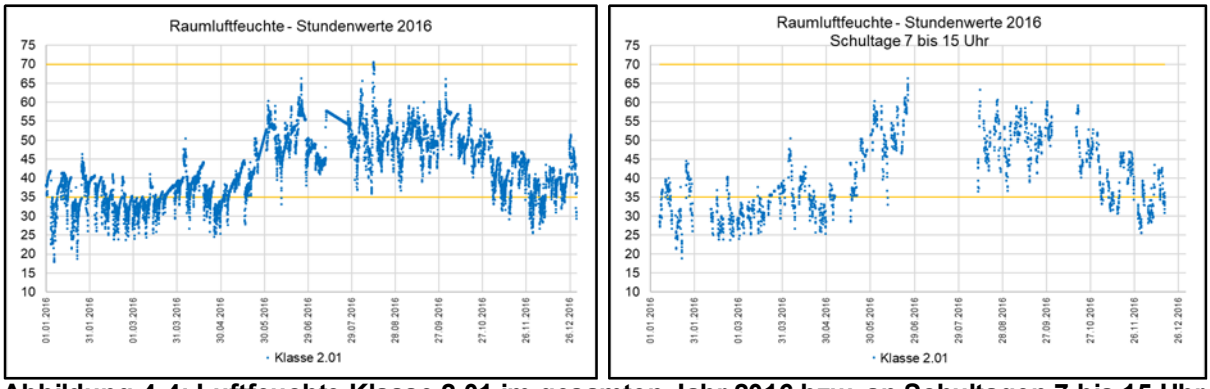


**Abbildung 4-4: Luftfeuchte Klasse 2.01 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr**

Auch im Raum 2.01 ergeben sich aus den kombinierten Temperatur- und Feuchtefühlern der Höhenprofilmessung zusätzliche Feuchtewerte in verschiedenen Höhen (10 cm, 80 cm, 170 cm) sowohl an der Innenwand als auch an der Außenwand. Die Werte liefern ähnliche Ergebnisse wie der ausgewertete Fühler DF0321-5556-1, wobei während der Nutzungszeit festzustellen ist, dass die relativen Feuchten in Wandnähe höher liegen. Außerhalb der Betriebszeit der Lüftung stellen sich die Werte in Wandnähe im Vergleich niedriger dar. Eine Auswertung der Schichtung soll hier nicht vorgenommen werden.

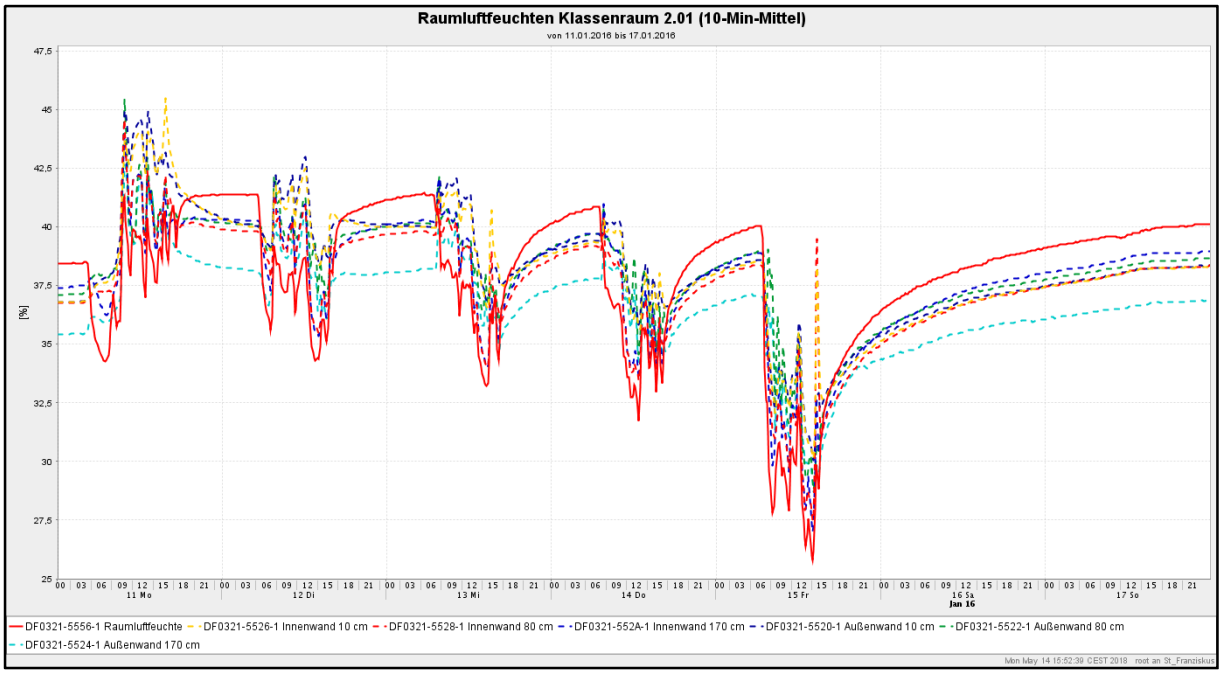


**Abbildung 4-5: Raumluftfeuchte in verschiedenen Höhen der Klasse 2.01 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016Uhr**

**2017**

Die Datenlücken waren im Jahr 2017 zu groß, um eine Auswertung der prozentualen Unterschreitungshäufigkeit vornehmen zu können. Die Ergebnisse ähneln grundsätzlich denen des Vorjahres.

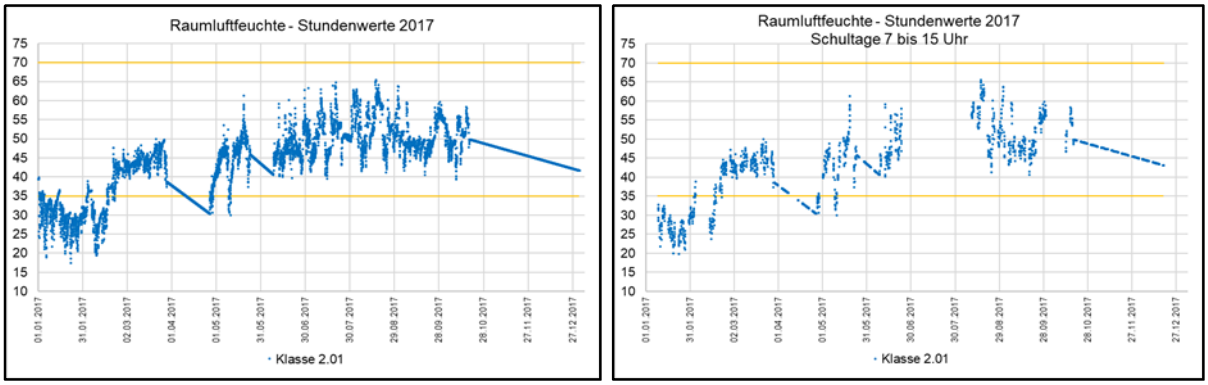


**Abbildung 4-6: Luftfeuchte Klasse 2.01 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr**

## *4.4 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Klassenräume im Vergleich*

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf die gleichen Wochen wie bei der Temperaturauswertung in Kapitel 3.4. Es wird davon ausgegangen, dass der Bereich von 35 bis 70 % als behaglich empfunden wird.

### *4.4.1 Frühlingswoche*

Die Raumluftfeuchten der beiden Klassenräume 1.08 und 2.01 werden in der Abbildung 4-7 dargestellt. Der Grafik ist zu entnehmen, dass die Feuchte in dem Klassenraum 1.08 am Wochenanfang vermehrt unter der Grenze von 35 % liegt. Der minimale Feuchtegehalt der Luft wird am Montag um 13:20 Uhr mit 30,4 % erreicht. Im Klassenraum 2.01 hingegen unterschreitet die Raumluftfeuchte die Behaglichkeitsgrenze nur kurzzeitig am Montag. Im Rest der Woche liegt der Feuchtegehalt über der 35 %-Marke.

Analog zur Raumlufttemperatur (vgl. Abbildung 3-16, Seite 49) wird hier ebenfalls deutlich, dass der Feuchtegehalt während der Anwesenheit der Nutzer ansteigt. Betrachtet man die im Intervall von 10 Minuten aufgenommenen Messwerte detailliert, ist festzustellen, dass die Raumluftfeuchte während der einzelnen Unterrichtsstunden steigt und in den Pausen wieder sinkt. Grund dafür ist wahrscheinlich die Abwesenheit der Nutzer während der Pausen oder aber auch die Änderung des Lüftungsverhaltens in dieser kurzen Zeit. Beispielsweise liegt der Feuchtegehalt am Anfang der vierten Stunde am Montag im Klassenraum 1.08 bei 32,1 % und am Ende bei 34,5 %.

Auffällig ist der konstante Verlauf mit leichtem Feuchteanstieg in den Zeiten mit ausgeschalteter Lüftungsanlage und Nutzerabwesenheit.

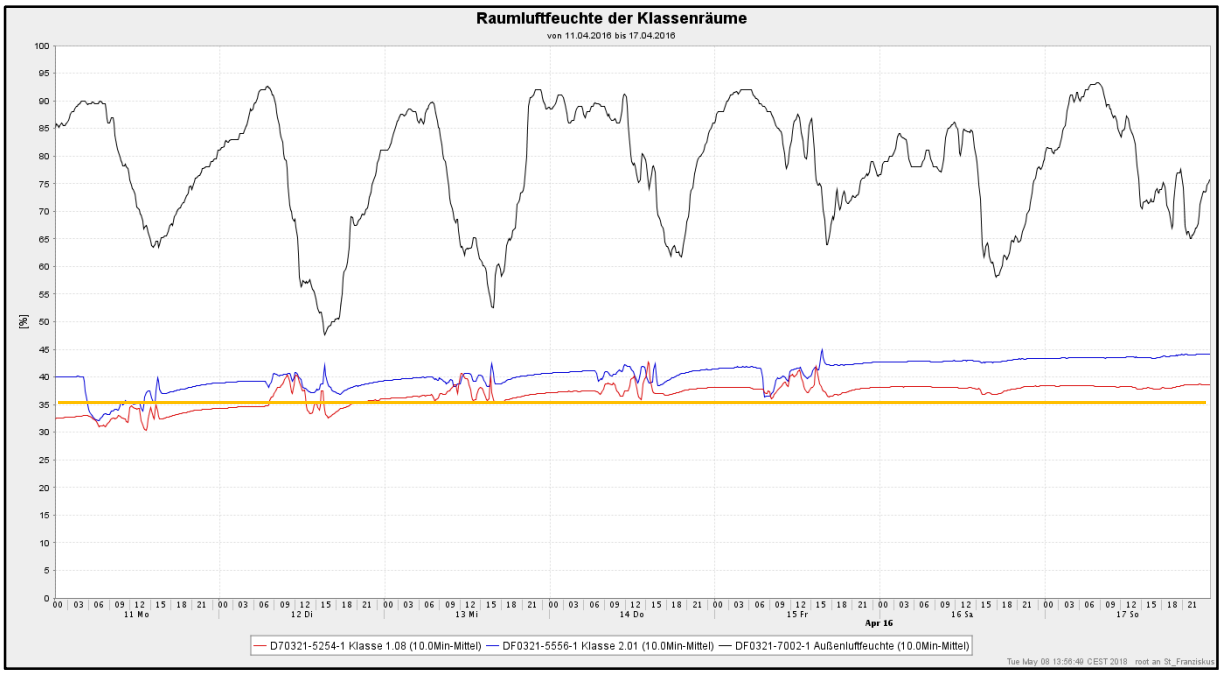


**Abbildung 4-7: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 11.04. – 17.04.2016**

### *4.4.2 Sommerwoche*

In Abbildung 4-8 ist der Verlauf der Raumluftfeuchte in den Klassenräumen in einer Schulwoche im Sommer dargestellt (20.06. – 26.06.2016). Erkenntlich wird, dass die Feuchten im Klassenraum 2.01 während der gesamten Woche über denen des Klassenraums 1.08 liegen. In beiden Räumen steigt im Verlauf der Woche mit steigender Temperatur (vgl. Abbildung 3-17, Seite 49) auch die Feuchte.

Im Klassenraum 1.08 liegt das Wochenminimum am Montag um 18:20 Uhr bei 40,2 %. Es wird am Freitag um 12:10 Uhr ein Maximum von 62,8 % erreicht. Durchschnittlich beträgt die Raumluftfeuchte in dieser Woche 50,9 %.

In der Nutzungszeit wird im Klassenraum 2.01 im Mittel eine Raumluftfeuchte von 55,3 % gemessen. Am Montag gegen 9:00 Uhr wird ein Wochenminimum von 45,6 % erreicht, am Freitag um 12:10 Uhr ein Maximum von 67,3 %.

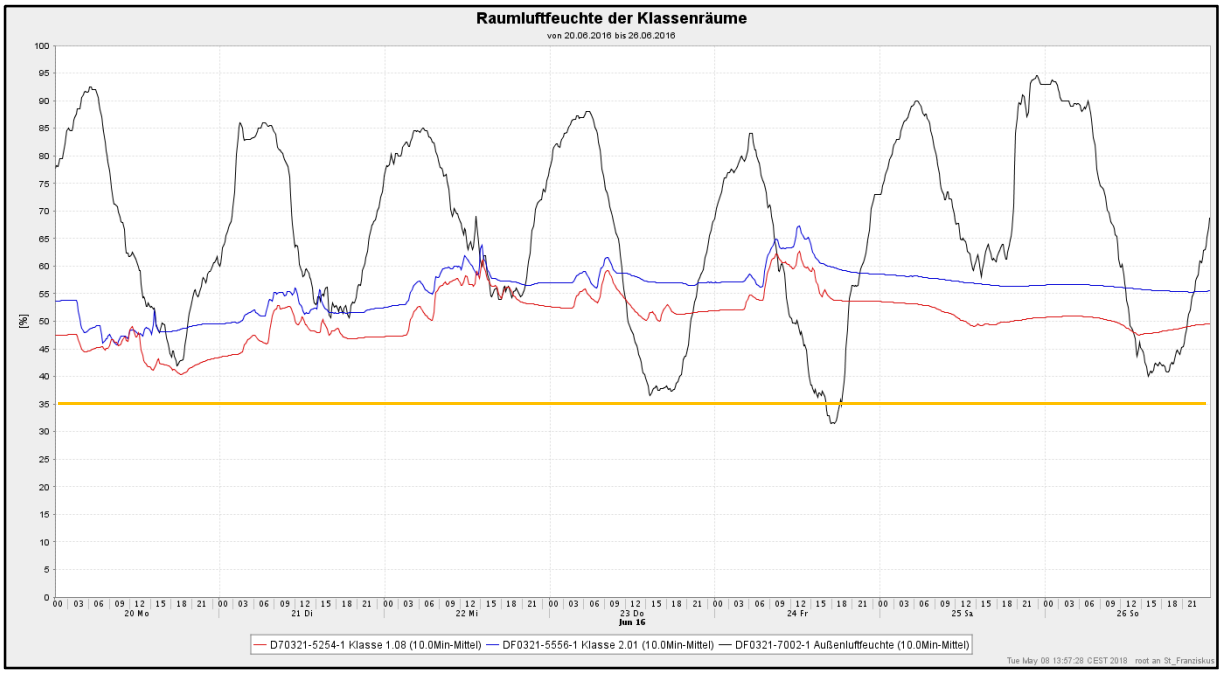


**Abbildung 4-8: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 20.06. bis 26.06.2016**

Anhand des Diagramms ist deutlich zu erkennen, dass täglich im Zeitraum von ca. 7:00 bis 12:30 Uhr, in dem die Nutzer anwesend sind, die Feuchte im Raum ansteigt und danach wieder sinkt. Außerhalb der Nutzungszeit bleibt die Raumluftfeuchte weitestgehend konstant.

### *4.4.3 Herbstwoche*

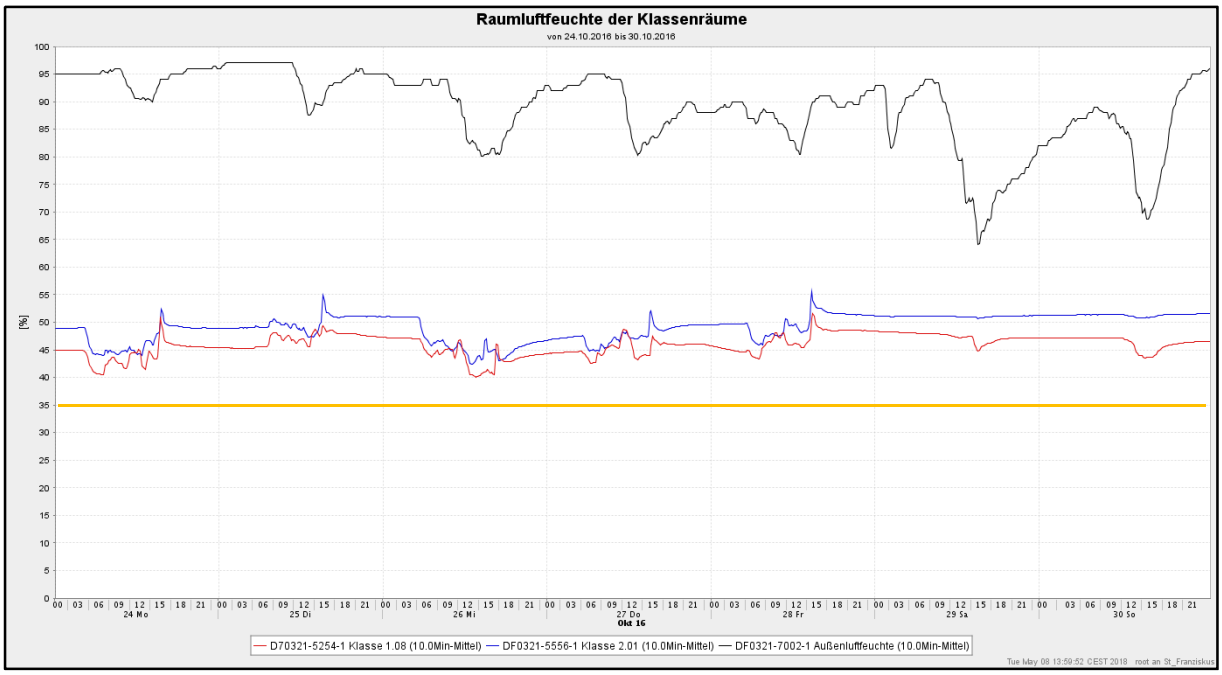


**Abbildung 4-9: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 24.10. bis 30.10.2016**

Wie in Abbildung 4-9 zu sehen ist, liegen die Messwerte der Raumluftfeuchte in der ausgewählten Oktoberwoche (24.-30.10.) in beiden Klassenräumen im Behaglichkeitsfeld. Am Verlauf wird deutlich, wann die Nutzer anwesend sind, da der Feuchtegehalt in einem kurzen Zeitraum ansteigt und danach wieder sinkt. Nach dem Unterricht bzw. über Nacht bleibt die Raumluftfeuchte relativ konstant.

Während der Mittelwert der relativen Feuchte im Raum 1.08 bei 45,3 % liegt, beträgt er in Raum 2.01 zwei Prozent mehr. Im südorientierten Klassenraum schwankte die Feuchte zwischen 40,2 und 49,7 %. Im nordorientierten Raum lag die Spannbreite zwischen 43,0 und 52,9 %.

### *4.4.4 Winterwoche*

Aus Abbildung 4-10 ist der Verlauf der Raumluftfeuchte der Klassenräume in der gewählten Winterwoche vom 05.12. – 11.12.2016 abzulesen. Im Allgemeinen ist zu erkennen, dass die Raumluftfeuchte im Klassenraum 2.01 – wie auch in den anderen Jahreszeiten – höher liegt. Die Luftfeuchte unterschreitet dauerhaft die 35 %-Marke und ist somit als (zu) trocken einzustufen.

Die durchschnittliche Raumluftfeuchte im Klassenraum 1.08 beträgt in der Nutzungszeit 29 %. Abgesehen vom Freitag befindet sich die Feuchte während des Unterrichts durchgängig unter 35 %. Der niedrigste Wert wird mit 23,7 % um 10:50 Uhr am Montag gemessen, wobei um 10:10 Uhr der Wochenhöchstwert von 39,5 % erreicht wird.

Im Klassenraum 2.01 werden während der Nutzeranwesenheit täglich Raumfeuchten unterhalb von 35 % gemessen. Im Mittel liegen sie bei 32,4 %. Der Minimalwert wird am Montag um 07:10 Uhr mit 26,3 % und der Maximalwert am Freitag um 14:50 Uhr mit 49,3 % gemessen.

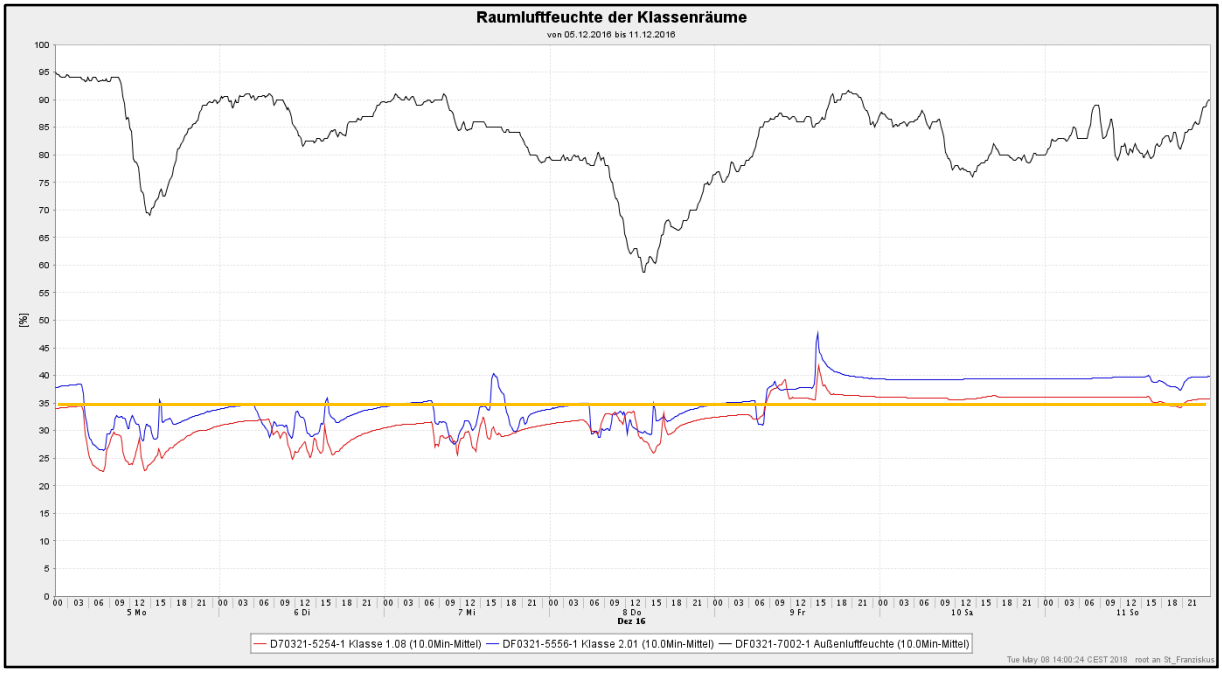


**Abbildung 4-10: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 05.12. bis 11.12.2016**

## *4.5 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Hortraum 0.01*

**2016**

Abbildung 4-11 stellt die Verläufe der relativen Luftfeuchte, gemessen am Fühler DF0321-5354-1, links für alle Stunden des Jahres und rechts reduziert auf die Nutzungszeit des Hortes von 6 bis 17 Uhr im nordorientierten Hortraum 0.01 dar. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass der Fühler bis zum 5.6.2018 im Elektroverteilerkasten platziert war und somit nicht die unmittelbare Raumluftfeuchte wiedergab.

Der Mittelwert der relativen Luftfeuchte betrug im Gesamtjahr 38,8 % (Mittelwert über 8784 Stunden), bezogen auf die Nutzungszeit von 6 bis 17 Uhr (2892 Stunden) 38,2 %. Der niedrigste Wert innerhalb der Belegungszeit wurde am 22.01. mit 16,8 % gemessen, der höchste am 24.06. mit 65,1 %. Es wird deutlich, dass in 1092 h, was 38 % der Nutzungszeit entspricht, die relative Feuchte unter 35 % liegt.

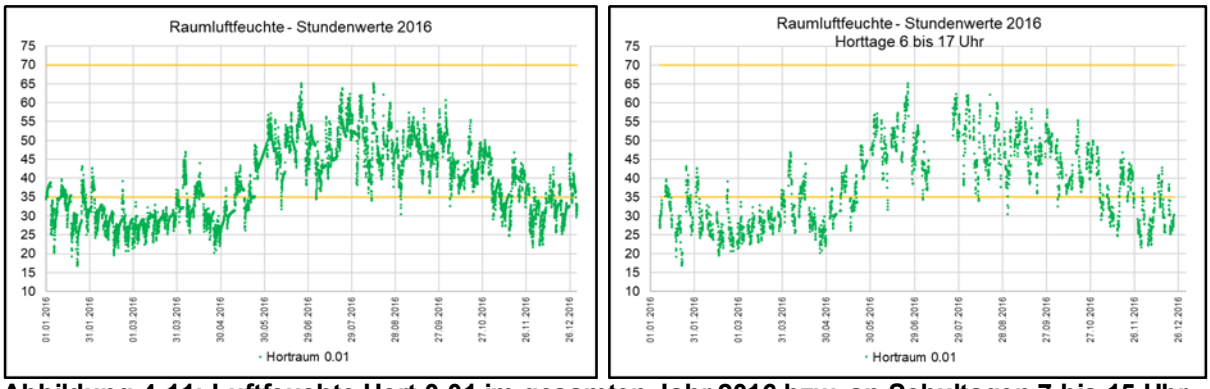


**Abbildung 4-11: Luftfeuchte Hort 0.01 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr**

**2017**

Im Jahr 2017 (Abbildung 4-12) lag der Mittelwert der relativen Luftfeuchte bei 40,5 % (Gesamtjahr 8760 h) bzw. bei 40,0 % (Nutzungszeit 2856 h). Auch hier trat der Minimalwert mit 16,1 % im Januar auf (20.01.), während das Maximum mit 64,0 % am 03.08. zu verzeichnen war. In 480 Nutzungsstunden (entsprechend 17 % der Belegung) war die Luft mit < 35 % relativer Feuchte eher zu trocken.

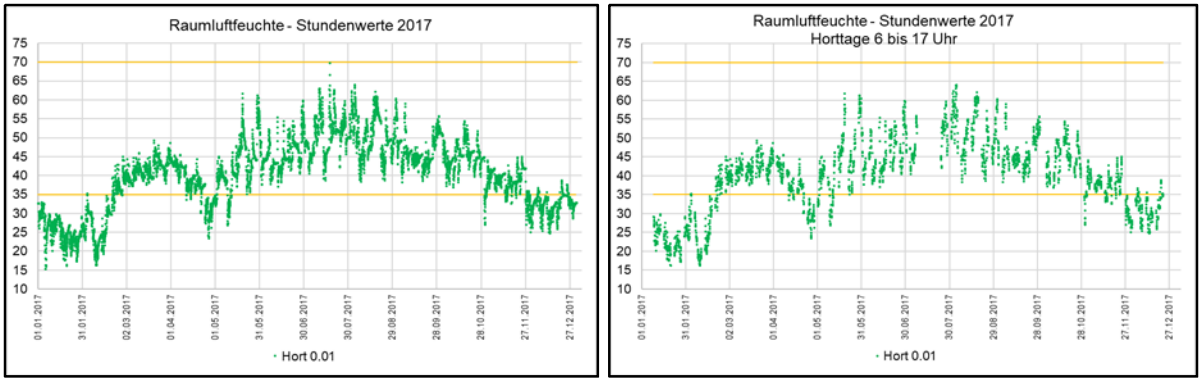


**Abbildung 4-12: Luftfeuchte Hort 0.01 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr**

## *4.6 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf der Aula 0.26*

**2016**

Die relative Luftfeuchte der Aula 0.26 – gemessen am Abluftfühler DF0321-6558-1 – lag im Mittel bei 40,6 % (Gesamtjahr) bzw. 38,3 % (Mittelwert der Nutzungszeit von 7 bis 17 Uhr). Die kleinste relative Feuchte wurde am 22.01. mit 16,0 % gemessen, der höchste Wert trat am 03.08. mit 70,3 % auf.

Während 979 Nutzungsstunden (47 % der Zeit) lag die Luftfeuchte unter den empfohlenen 35 %. Betrachtet man nur die Hauptnutzungszeit von 11 bis 13 Uhr, so betrifft dies 172 Stunden bzw. etwa 86 Tage von Januar bis zum 16.05. und wieder ab November.

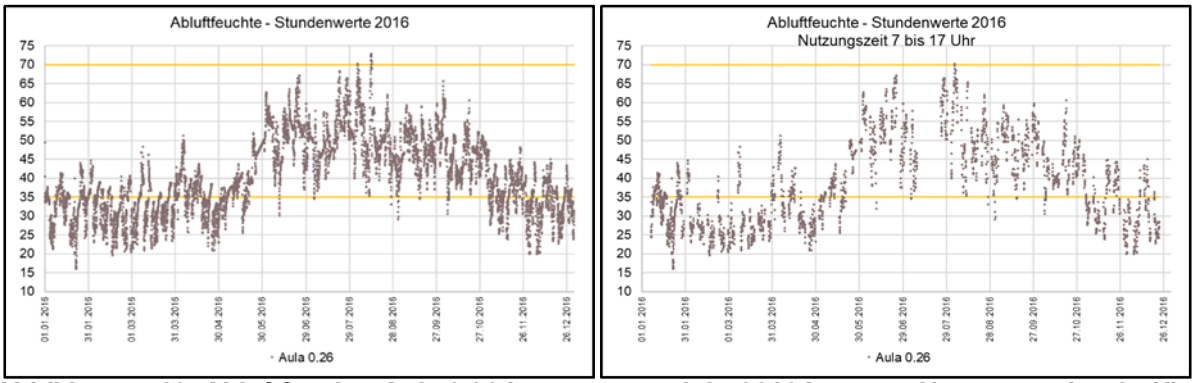


**Abbildung 4-13: Abluftfeuchte Aula 0.26 im gesamten Jahr 2016 bzw. zur Nutzungszeit 7-17 Uhr**

Für die Aula standen aufgrund der Untersuchung der Temperaturschichtung außerplanmäßig auch Feuchtewerte im Höhenprofil zur Verfügung, welche am Beispiel der Woche vom 11.01. bis 17.01.2016 in Abbildung 4-14 dargestellt sind. Die gemessenen Werte weichen unwesentlich von den Abluftwerten im Kanal ab, lediglich die mittäglichen Spitzen sind nicht so stark ausgeprägt. Genau wie bei den Abluftwerten, die während der Stillstandzeiten der Lüftungsanlage die im System stehende Luft abbilden, ist auch bei den Luftfeuchten in verschiedenen Höhen ein Anstieg der Raumluftfeuchte in den Abend- und Nachtstunden zu verzeichnen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei reduzierter oder ausgeschalteter Lüftung die dauerhafte Entfeuchtung entfällt und sich zwischen Raumluft und Umgebungsbauteilen eine Ausgleichsfeuchte einstellt.

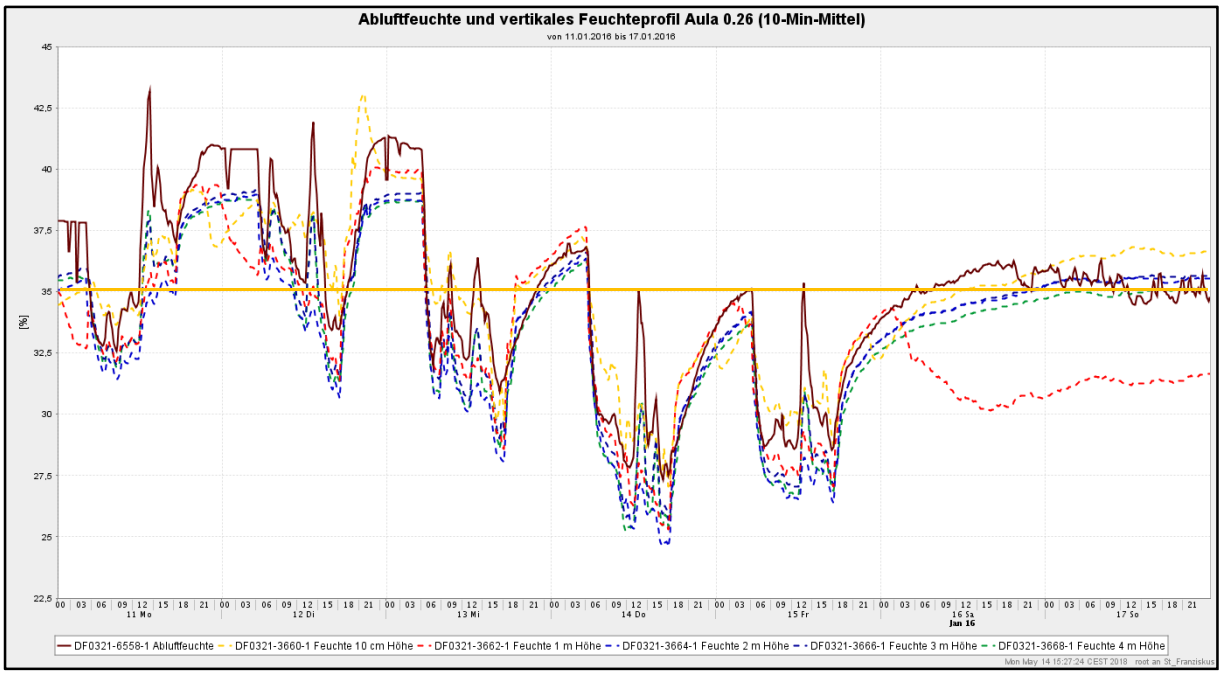


**Abbildung 4-14: Abluftfeuchte und Raumluftfeuchte in verschiedenen Höhen der Aula – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016Uhr**

**2017**

Der Mittelwert über alle Stunden des Jahres beträgt 42,1 %, bezogen auf die Nutzungszeit von 7 bis 17 Uhr (2134 h) 40,4 %. Die Messwerte schwanken zwischen 16,0 % (am 09.02.) und 68,6 % (am 29.06.). In 667 Nutzungsstunden (entsprechend 31 %) lag die relative Feuchte unter 35 %.

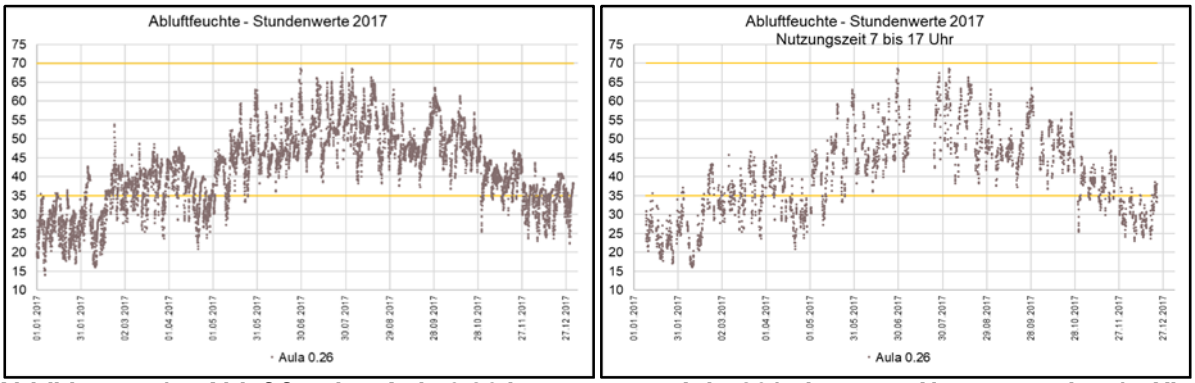


**Abbildung 4-15: Abluftfeuchte Aula 0.26 im gesamten Jahr 2017 bzw. zur Nutzungszeit 7-17 Uhr**

## *4.7 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Küche*

### 2016

Der Mittelwert der Spülküche betrug während der Nutzungszeit von 6 bis 15 Uhr 45,7 % (Gesamtjahr 40,5 %). In der Kochküche liegen die Mittelwerte mit 45,0 % (Gesamtjahr 38,6 %) nur knapp darunter. Abbildung 4-16 zeigt die Messwerte während des gesamten Jahres bzw. während der Nutzungszeit für beide Küchenbereiche. Spitzenwerte bis zu 75 % bzw. 97 % Feuchte treten betriebsbedingt auf, z. B. beim Austritt von Wasserdampf.

Naturgemäß unterliegt die Raumluft in der Küche hohen Temperatur- und Feuchteschwankungen durch den hohen Energie- und Wassereinsatz im Betrieb. Einen beispielhaften Verlauf zeigt Abbildung 4-17 während der Woche vom 11.01. bis 15.01.2016 im 10-Minuten-Intervall. Insbesondere in den Morgenstunden gegen 8 Uhr kommt es zu Feuchtespitzen bis 95 % relativer Feuchte in der Kochküche. Diese Spitze ist auch in der Spülküche sichtbar, sie bleibt jedoch hier unter 80 %. Im weiteren Nutzungsverlauf sind unregelmäßige Schwankungen sichtbar, gefolgt von einer kleineren Spitze bei 50 bis 60 % zum Feierabend, die wahrscheinlich auf das Ausspritzen des Küchenfußbodens zurückzuführen ist. Ab ca. 16 Uhr bis 6 Uhr ist ein stetiger Abfall der Raumluftfeuchte auf bis zu 30 bis 40 % zu beobachten, da die Grundlüftung hier auch nachts läuft.
Während der Nutzungszeit von 6 bis 15 Uhr war es in 12 bis 13 % der Stunden mit < 35 % relativer Feuchte eher zu trocken. Feuchter als 70 % war es hingegen nur in 1 bis 2 % der Zeit.

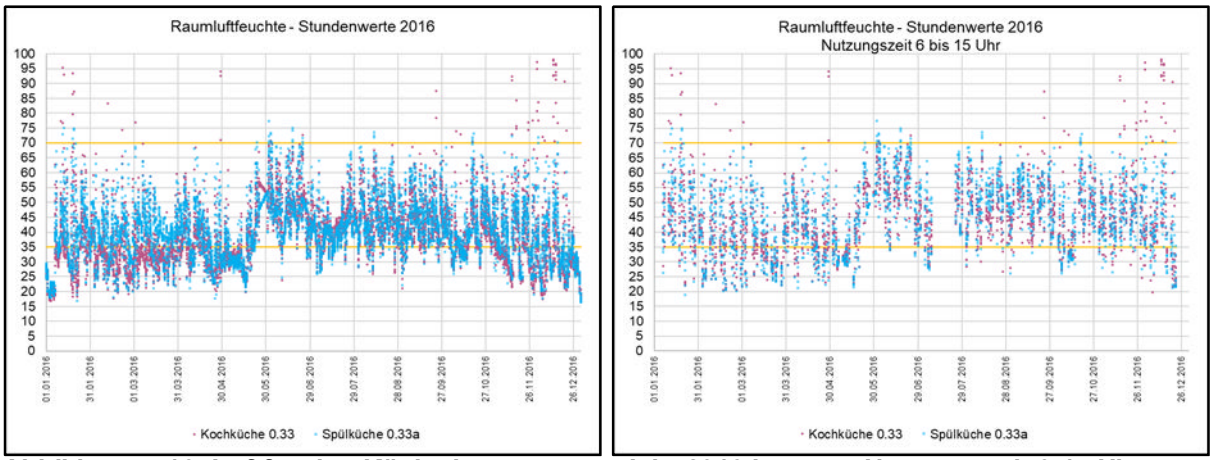


**Abbildung 4-16: Luftfeuchte Küche im gesamten Jahr 2016 bzw. zur Nutzungszeit 6-15 Uhr**

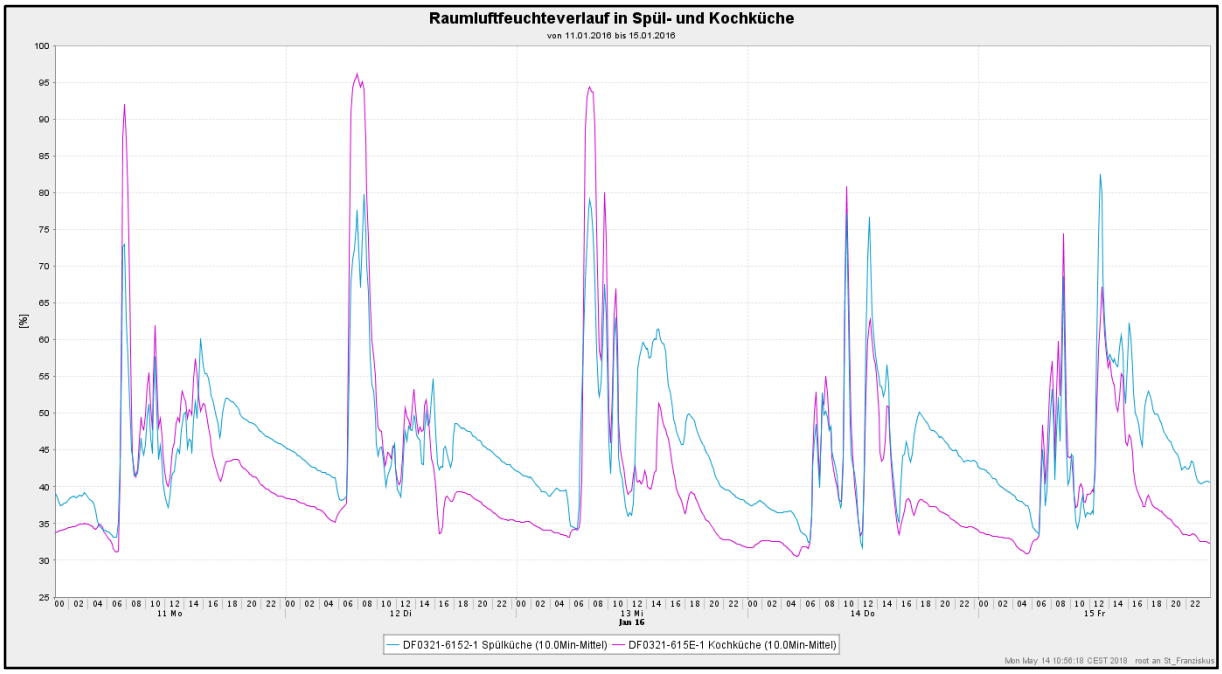


**Abbildung 4-17: Luftfeuchte Küche – Woche vom 11.01. bis 15.01.2016**

**2017**

Der Mittelwert der Feuchte in der Spülküche betrug während der Nutzungszeit von 6 bis 15 Uhr 45,0 % (Gesamtjahr 40,3 %). In der Kochküche liegen die Mittelwerte bei 47,9 % bzw. 40,8 % für das Gesamtjahr. Auch hier zeigt sich im Gegensatz zu den anderen untersuchten Räumen, dass der Feuchtewert während der Nutzungszeit betriebsbedingt höher ist als der Jahresmittelwert.

In der Spülküche schwankten die Stundenwerte zwischen 15,3 und 76,4 %, in der Kochküche zwischen 16,4 und 99,9 %. Im Gegensatz zum Vorjahr reduzierte sich der Anteil der eher zu trockenen Nutzungsstunden auf 7 bis 8 % der Zeit. Feuchter als 70 % war es in der Spülküche praktisch nie, in der Kochküche hingegen wurden in 8 % der Zeit (201 Stunden) Mittelwerte über 70 % gemessen. Auffällig ist, dass diese nur in der ersten Jahreshälfte auftreten und nach dem Betreiberwechsel ab 1.8.2017 nahezu ausbleiben.

Zu den im Vergleich zu den anderen Räumen höheren relativen Feuchten trägt bei, dass die Küche Oberflächen mit geringerer Sorptionsfähigkeit (Fliesen) aufweist.

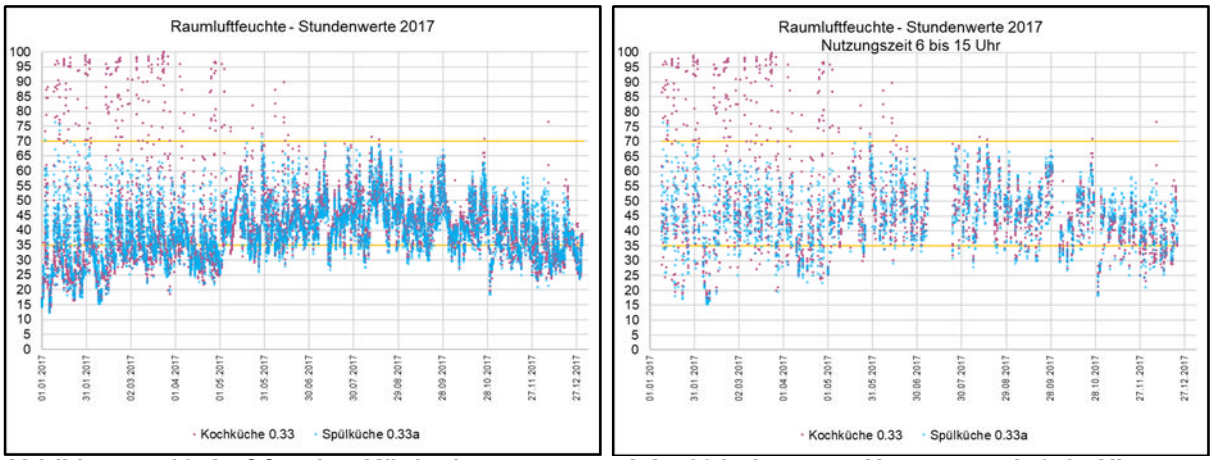


**Abbildung 4-18: Luftfeuchte Küche im gesamten Jahr 2017 bzw. zur Nutzungszeit 6-15 Uhr**

## *4.8 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Lehrerzimmer 1.04*

Das Lehrerzimmer gehört – genau wie das Klassenzimmer 1.08 – zu den Räumen mit sehr trockener Raumluft.

**2016**

Die Spannbreite der Messwerte liegt während der Nutzungszeit bei 18,6 bis 59,0 % relativer Feuchte, im Mittel liegen die Werte bei 37,7 % (Gesamtjahr 39 %). In 754 Stunden (44 % der Nutzungszeit) ist die Luft trockener als 35 % relative Feuchte.

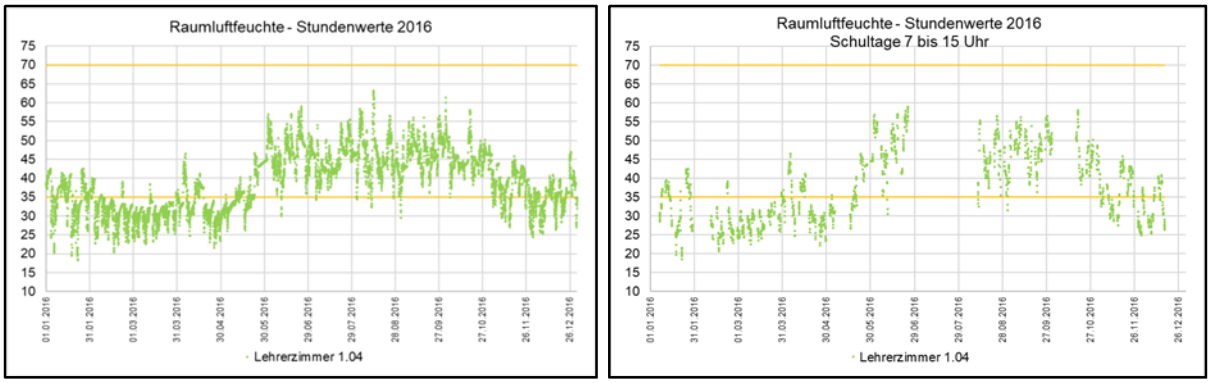


**Abbildung 4-19: Luftfeuchte Raum 1.04 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7-15 Uhr**

**2017**

Im Jahr 2017 beträgt der Mittelwert von 7 bis 15 Uhr 39,4 % (Gesamtjahr 40,7 %), wobei die Werte zwischen minimal 18,3 und maximal 62,2 % schwankten. Auch hier betrug der Anteil der zu trockenen Raumluft immerhin ca. 28 % der Nutzungszeit (491 Stunden).

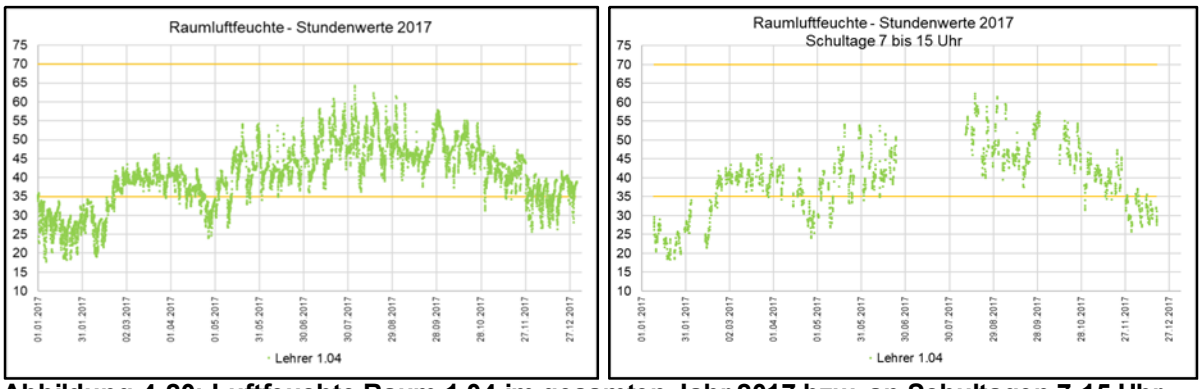


**Abbildung 4-20: Luftfeuchte Raum 1.04 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7-15 Uhr**

## *4.9 Feuchtehäufigkeit und Feuchteverlauf Technikräume*

Zusätzlich zum Behaglichkeitsmonitoring der Aufenthaltsräume liegen für drei Technikräume (Hausanschlussraum Elektro 0.04, Lüftungszentralen 2.18 (Gebäudeteil A) und 2.03 (Gebäudeteil B)) die Raumluftfeuchten vor, da sie andere Messreihen wie Bauteilmessungen oder Betriebsmessungen vervollständigen. Die Messdaten sollen in aller Kürze für die Jahre 2016 (Abbildung 4-21) und 2017 (Abbildung 4-22) anhand von Tagesmittelwerten dargestellt werden. Es fällt auf, dass die Räume HAR Elektro und RLT-Zentral 2.03 im Gebäudeteil B deutlich trockener sind als die Lüftungszentrale im Bauteil A.

Im Jahr 2016 beträgt die mittlere Raumluftfeuchte im Elektroraum 36,6 % und in der Lüftungszentrale 2.03 mit 38,9 % etwas mehr. In der Lüftungszentrale 2.18 hingegen liegt der Mittelwert bei 54,1 %. Obwohl der Raum im Mittel 1,6 K kühler ist als Raum 2.03, lässt sich die höhere relative Feuchte rechnerisch nicht ausschließlich darauf zurückführen. Der Verlauf im Jahr 2017 ist ähnlich.

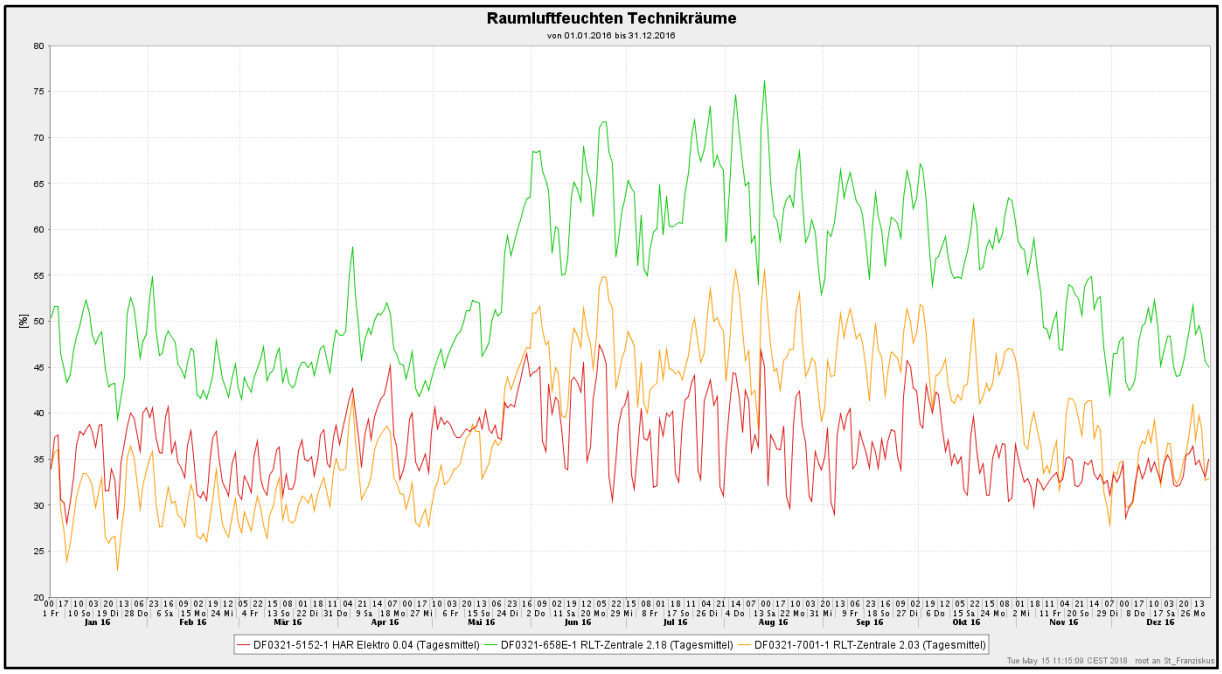


**Abbildung 4-21: Luftfeuchte der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2016 (Tagesmittel)**

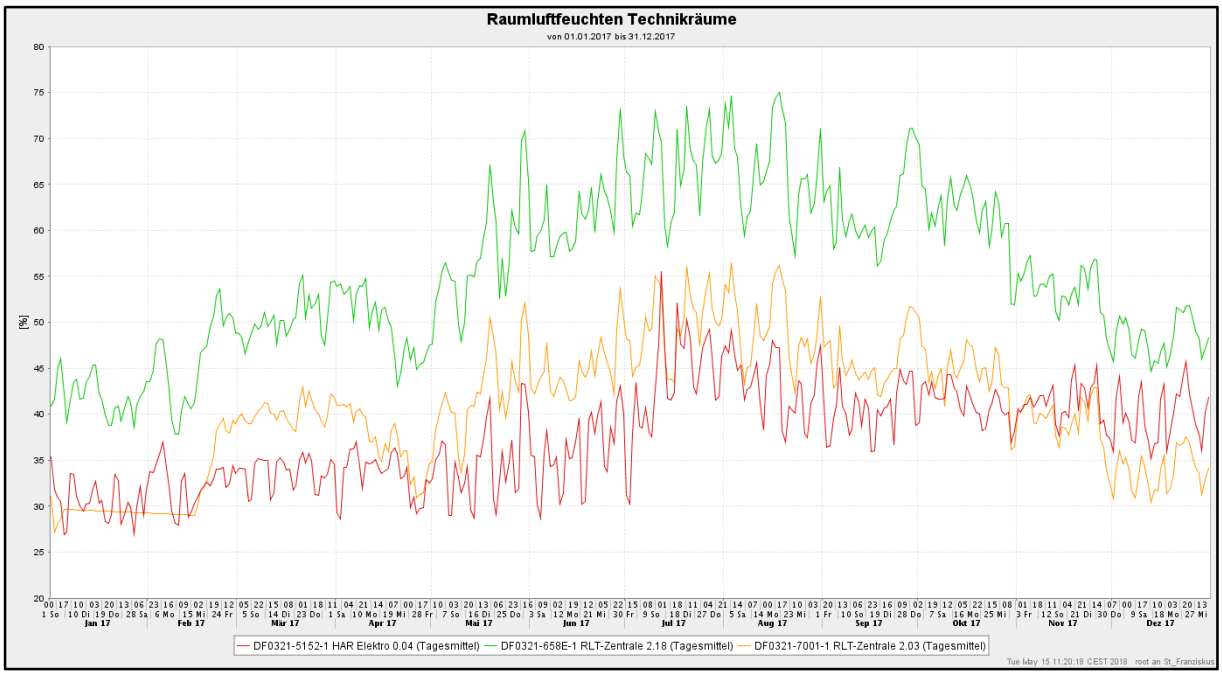


**Abbildung 4-22: Luftfeuchte der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2017 (Tagesmittel)**

## *4.10 Abluftfeuchte*

Die Abluftfeuchte der Aula im Gebäudeteil A wurde bereits in Kapitel 4.6 ab Seite 98 ausgewertet.

Abbildung 4-23 stellt die Abluftfeuchten des Gebäudeteils B (Klassen, Hort) und die Zuluftfeuchten (gestrichelt) im Vergleich dar. Während die Zuluft bis Ende April und ca. ab November bedingt durch die geringe absolute Feuchte der (kühlen) Außenluft trockener ist als die Abluft, kehrt sich dieses Verhältnis zwischen Mai und Oktober um. Hier ist die Zuluft – bedingt durch die wärmere und somit feuchtere Außenluft – feuchter als die Abluft des Gebäudeteils.

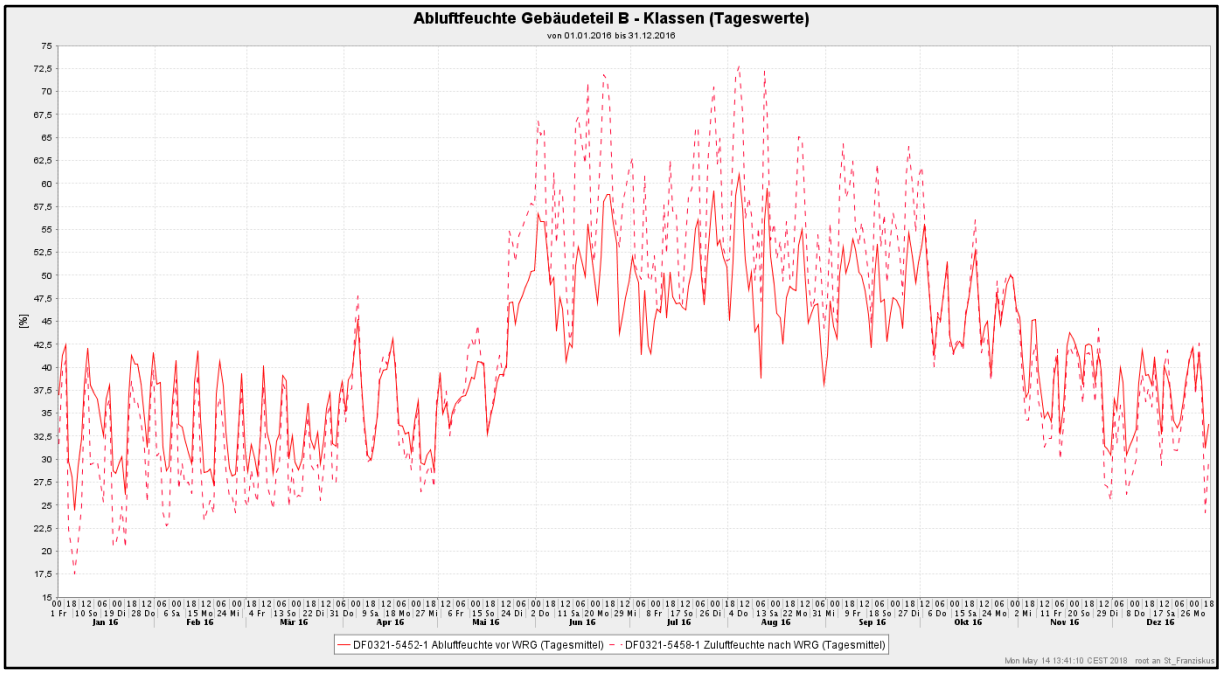


**Abbildung 4-23: Abluftfeuchte Gebäudeteil B – Tagesmittelwerte des Jahres 2016**

Abbildung 4-24 zeigt eine Beispielwoche im Winter. Deutlich zu sehen sind die sehr niedrigen Zuluftfeuchten mit Werten von ca. 17 bis 23,5 % im Lüftungsbetrieb, bedingt durch die hohe erforderliche Zulufttemperatur. Die Abluftfeuchte liegt stets etwa 12,5 % über der Zuluftfeuchte.

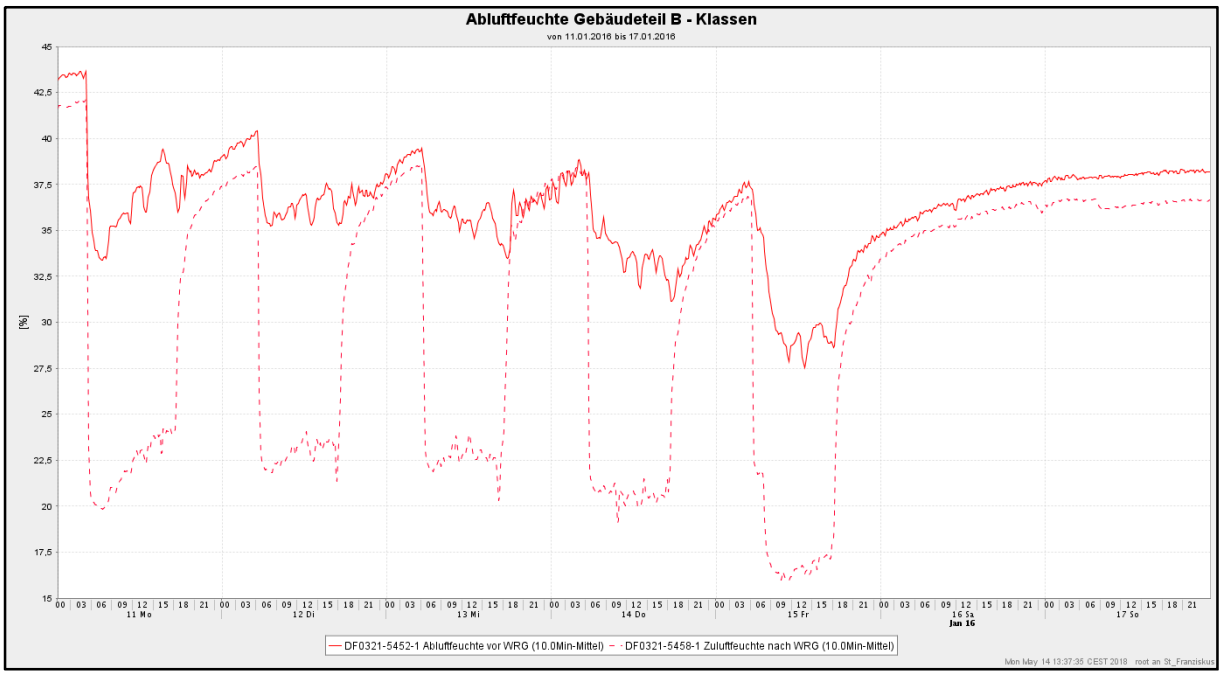


**Abbildung 4-24: Abluftfeuchte Gebäudeteil B – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016**

Eine weitere Auswertung, auch zur Funktion der Feuchterückgewinnung, erfolgt im Abschlussbericht Teil 7.

## *4.11 Befragungen*

Die Befragungen am 14.04.2015 mit der Begleitforschung ergaben, dass manche Lehrer die Luft im Gebäude als zu trocken empfinden. Von den Schülern wurde dies nicht geäußert. In der zweiten Nutzerbefragung vom 29.09.2017 wurde die Raumluftfeuchte nur in einem Nebensatz kommentiert: Man habe gern Pflanzen auf den Fensterbrettern, da die Räume sehr trocken seien.

## *4.12 Winterliche Problemfälle*

### Klassenräume

Die Auswertung einer Winterwoche wurde für beide Klassenräume im Vergleich in Kapitel 4.4 vorgenommen. Hier zeigte sich, dass der wärmere, südorientierte Klassenraum 1.08 deutlich trockenere Raumluft aufweist als der nordorientierte Klassenraum.

### Hortraum 0.01

Der Hort hat mit 1092 bzw. 480 Nutzungsstunden einen hohen Zeitanteil mit relativen Feuchten unter 35 %, allerdings spiegeln die Werte die Situation im Elektroverteiler wider.

Am Beispiel der Woche vom 11.01. bis 17.01.2016 zeigt Abbildung 4-25 einen typischen winterlichen Wochenverlauf im Hort. Auffällig ist, dass in den nächtlichen Stillstandzeiten der Lüftungsanlage ein sägezahnartiger Anstieg der Raumluftfeuchte erfolgt. Während der Nutzungszeit kommt es zu Schwankungen der Raumluftfeuchte in beide Richtungen. Der geringste Feuchtewert wird am Freitagmittag mit ca. 27 % erfasst, der höchste am Montagnachmittag mit etwa 40 %.

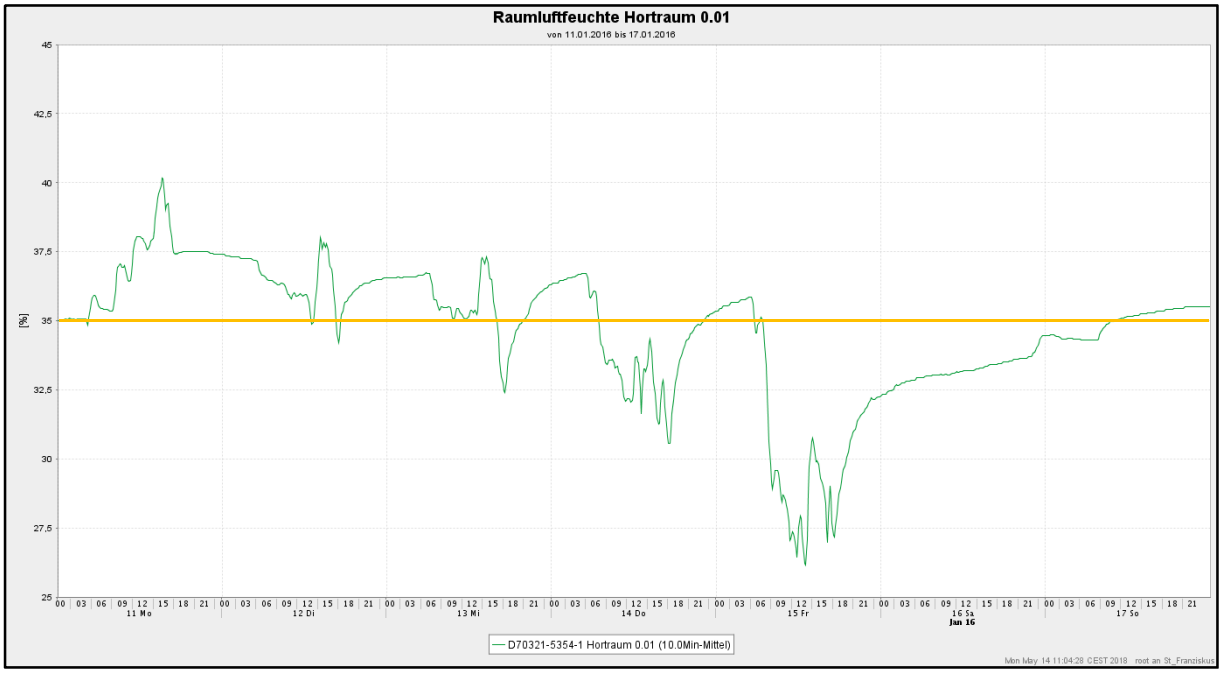


**Abbildung 4-25: Luftfeuchte Hort 0.01 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016**

### Aula

Während 979 Nutzungsstunden (47 % der Zeit) lag die Luftfeuchte unter den empfohlenen 35 %. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass lediglich mittags für 1,5 Stunden eine hohe Belegung mit Personen stattfindet, die zu einer Auffeuchtung führen. In der restlichen Zeit ist die Aula mit einem sehr hohen Volumenstrom (über-)versorgt, der in Zeiten mit niedriger Außentemperatur – und somit geringer absoluter Außenluftfeuchte – zu übermäßig trockener Luft führt.

Abbildung 4-26 zeigt den Verlauf der Abluftfeuchte in der Winterwoche vom 11.01. bis 17.01.2016. Die Abluftwerte schwanken zwischen ca. 27,5 und 43 % relativer Feuchte. Auch hier zeigt sich ein sägezahnartiger Verlauf mit einem Feuchteanstieg in den Abend- und Nachtstunden (und am Wochenende) und einem plötzlichen Feuchterückgang mit Einschalten der Lüftungsanlage am Morgen – all dies jedoch gemessen im Kanal.

Während des Mittagessens gegen 12 Uhr sind vier Klassen gleichzeitig anwesend, was einhergehend mit einer relativen Auffeuchtung um ca. 5 bis 7,5 % zu einer im Diagramm sichtbaren Spitze führt. An der ebenfalls dargestellten Zuluftfeuchte der Aula (gestrichelt) wird sichtbar, wie trocken die Zuluft eingeblasen wird. Hier sind Minimalwerte von nur 18 % relativer Feuchte zu verzeichnen, was jedoch hauptsächlich auf die hohe Zulufttemperatur zurückzuführen ist.

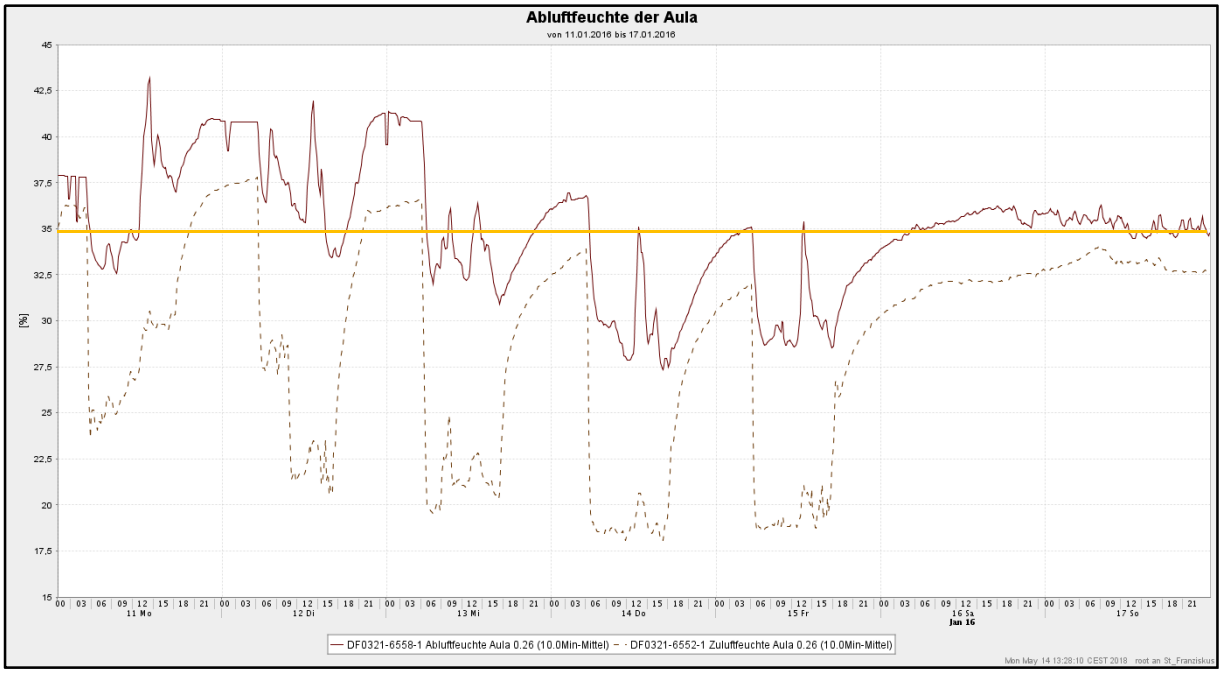


**Abbildung 4-26: Abluftfeuchte Aula 0.26 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016**

### Lehrerzimmer 1.04

Abbildung 4-27 zeigt einen winterlichen Feuchteverlauf am Beispiel der Woche vom 11.01. bis 17.01.2016. Die Messwerte schwanken in der Woche zwischen 27,5 % am Freitagnachmittag und etwa 42 % am Montagabend.

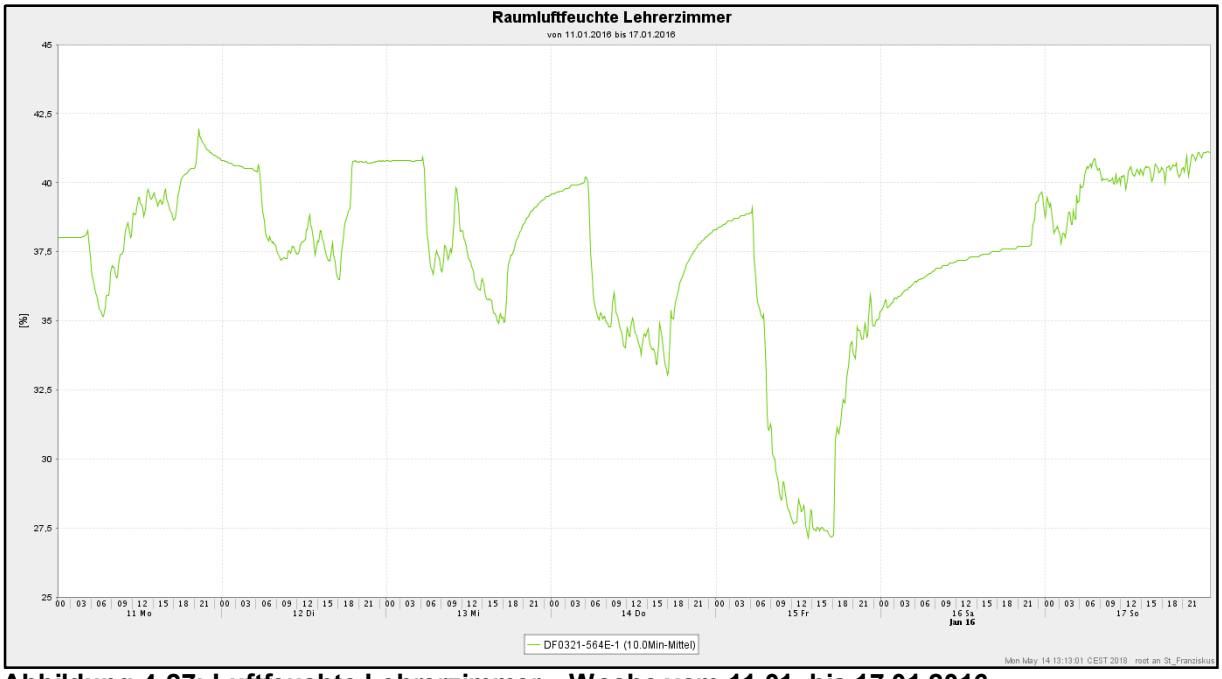


**Abbildung 4-27: Luftfeuchte Lehrerzimmer – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016**

Außerhalb der Nutzungszeit kommt es regelmäßig zu einem Anstieg der relativen Feuchte in dem Raum. Mit Einschalten der Lüftungsanlage in den Morgenstunden tritt eine sprunghafte Entfeuchtung auf, gefolgt von einem unregelmäßigen Verlauf abhängig von der Belegung des Raumes.

## *4.13 Sommerliche Problemfälle*

Es sind keine sommerlichen Problemfälle hinsichtlich der Raumluftfeuchte bekannt. Die relativen Feuchten der Referenzräume befinden sich stets unter 70 %. Für die Bausubstanz wären Raumluftfeuchten ab 80 % kritisch geworden, da diese das Schimmelpilzrisiko erhöhen. Diese Werte werden zu keinem Zeitpunkt erreicht.

## *4.14 Verbesserungsansätze*

Die Verbesserungsansätze betreffen ausschließlich die winterliche Situation mit zu trockener Raumluft in sämtlichen Referenzräumen, wobei die Problematik in der Küche betriebsbedingt nicht so stark ausgeprägt ist wie in den anderen Räumen.

Tabelle 4-2 stellt die Anzahl der Stunden, in denen die Raumluftfeuchte während der angegebenen Nutzungszeit des Raumes unter 35 % bzw. über 70 % betrug, für die ausgewerteten Jahre 2016 und 2017 dar. Leider waren (und sind) sämtliche Fühler in Raum 2.01 seit Sommer 2017 von Datenausfall betroffen.

**Tabelle 4-2: Anzahl der Stunden mit relativen Feuchten < 35 % bzw. > 70 % und prozentualer Anteil an der Nutzungszeit**

| | Jahr 2016 | | Jahr 2017 | |
|---|---|---|---|---|
| | < 35 % [h] | > 70 % [h] | < 35 % [h] | > 70 % [h] |
| **Raum 1.08** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 747 | 0 | 477 | 0 |
| | 44% | 0% | 27% | 0% |
| **Raum 2.01** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 588 | 0 | Datenlücken | |
| | 35% | 0% | | |
| **Hort 0.01** *Nutzungszeit 6-17 Uhr* | 1092 | 0 | 480 | 0 |
| | 38% | 0% | 17% | 0% |
| **Spülküche 0.33a** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 286 | 29 | 167 | 4 |
| | 12% | 1% | 7% | 0% |
| **Kochküche 0.33** *Nutzungszeit 6-15 Uhr* | 306 | 50 | 192 | 201 |
| | 13% | 2% | 8% | 8% |
| **Lehrer 1.04** *Nutzungszeit 7-15 Uhr* | 754 | 0 | 491 | 0 |
| | 44% | 0% | 28% | 0% |
| **Aula 0.26** *Nutzungszeit 7-17 Uhr* | 979 | 0 | 667 | 0 |
| | 47% | 0% | 31% | 0% |

Besonders trocken ist die Raumluft in der Aula, jedoch wird diese im Wesentlichen nur während der Mittagszeit als Speisesaal genutzt – dann mit einer Belegungsdichte von ca. 100 Personen. Der Raum ist gekennzeichnet durch sehr hohe Luftwechselraten bis 5,8 $h^{-1}$ (Volumenstrom bis 6500 m³/h). Auch während der Abwesenheit der Nutzer sind die eingestellten, minimalen Luftwechsel zu hoch, was insbesondere in der Heizperiode zu einer Raumluftentfeuchtung führt. Leider konnte bis zum Ende der Projektlaufzeit keine Optimierung der Volumenströme erzielt werden. Weiteres zu dieser Problematik siehe Abschlussbericht Teil 7.

Bezüglich der Klassenräume hat die am 5.6.2018 vorgenommene Optimierung der Lüftungsregelung wahrscheinlich auch Auswirkungen auf die relativen Feuchten. Erwartet wird im südorientierten Raum 1.08 eine deutliche Minderung der Raumtemperaturspitzen, was zu einem Anstieg der relativen Feuchte führen wird.

In den im Winter zu kühlen, nordorientierten Räumen 2.01, 0.01 und 1.04 wird eine Anhebung der Raumtemperatur bei ansonsten gleichen Nutzungsbedingungen zu eher trockenerer Luft als bisher führen.

### *4.15 Verallgemeinerung und Fazit*

Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Raumluftfeuchten im gesamten Gebäude häufig hinsichtlich der Behaglichkeit deutlich zu niedrig sind, was dazu führt, dass die Nutzer die Luft als zu trocken empfinden und Zimmerpflanzen aufstellen, um dieser Problematik ein wenig entgegenzuwirken.

Dies ist hauptsächlich auf die hohen Luftwechselraten in den Räumen zurückzuführen, die insbesondere in der kühlen Jahreszeit durch das stetige Einbringen von trockener Außenluft zu einer weiteren Entfeuchtung der Raumluft führen. Die Messwerte zeigen, dass die Raumluftfeuchten bei ausgeschalteter Lüftungsanlage (nachts und am Wochenende) ansteigen und morgens mit Beginn des Lüftungsbetriebes deutlich abfallen. Diesen Effekt kann auch die Anwesenheit der Nutzer nicht aufhalten. Da sich die Luftwechselraten am Frischluftbedarf der Personen und der Vermeidung zu hoher $CO_2$-Konzentrationen orientieren, ist eine Reduktion der Volumenströme in den meisten Räumen keine Option – mit Ausnahme der Aula, die in der meisten Zeit aufgrund eines zu hohen Minimalvolumenstroms bei geringer Belegung deutlich überversorgt ist.

Relative Feuchten über der Behaglichkeitsgrenze von 70 % kommen ausschließlich im Küchenbereich vor. In allen anderen Räumen werden keine kritischen Grenzwerte erreicht, sodass auch die Bausubstanz in keinem Bereich gefährdet ist.

# 5 Behaglichkeit

Zusammenfassend soll für beide Klassenräume die Luftfeuchtigkeit in Kombination mit der Lufttemperatur betrachtet werden. Die Darstellungen in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 nach [4] verdeutlichen die behaglichen oder noch behaglichen Bereiche bei sitzender Beschäftigung und einer Luftgeschwindigkeit unter 20 cm/s [5]. Die Wertepaare wurden im Stundenmittel aufgetragen.

In beiden Klassenräumen befindet sich die Mehrzahl der Wertepaare im behaglichen oder noch behaglichen Bereich. Jedoch fallen zahlreiche feuchtwarme Zustände auf, die im Wesentlichen auf die beschriebenen sommerlichen Problemfälle zurückzuführen sind. Eine geringe Anzahl von Nutzungsstunden ist durch unbehaglich trocken-kühle Raumluft gekennzeichnet. Insgesamt ist die Behaglichkeit zufriedenstellend, d. h. es sind deutliche Abstriche vom Optimum erkennbar.

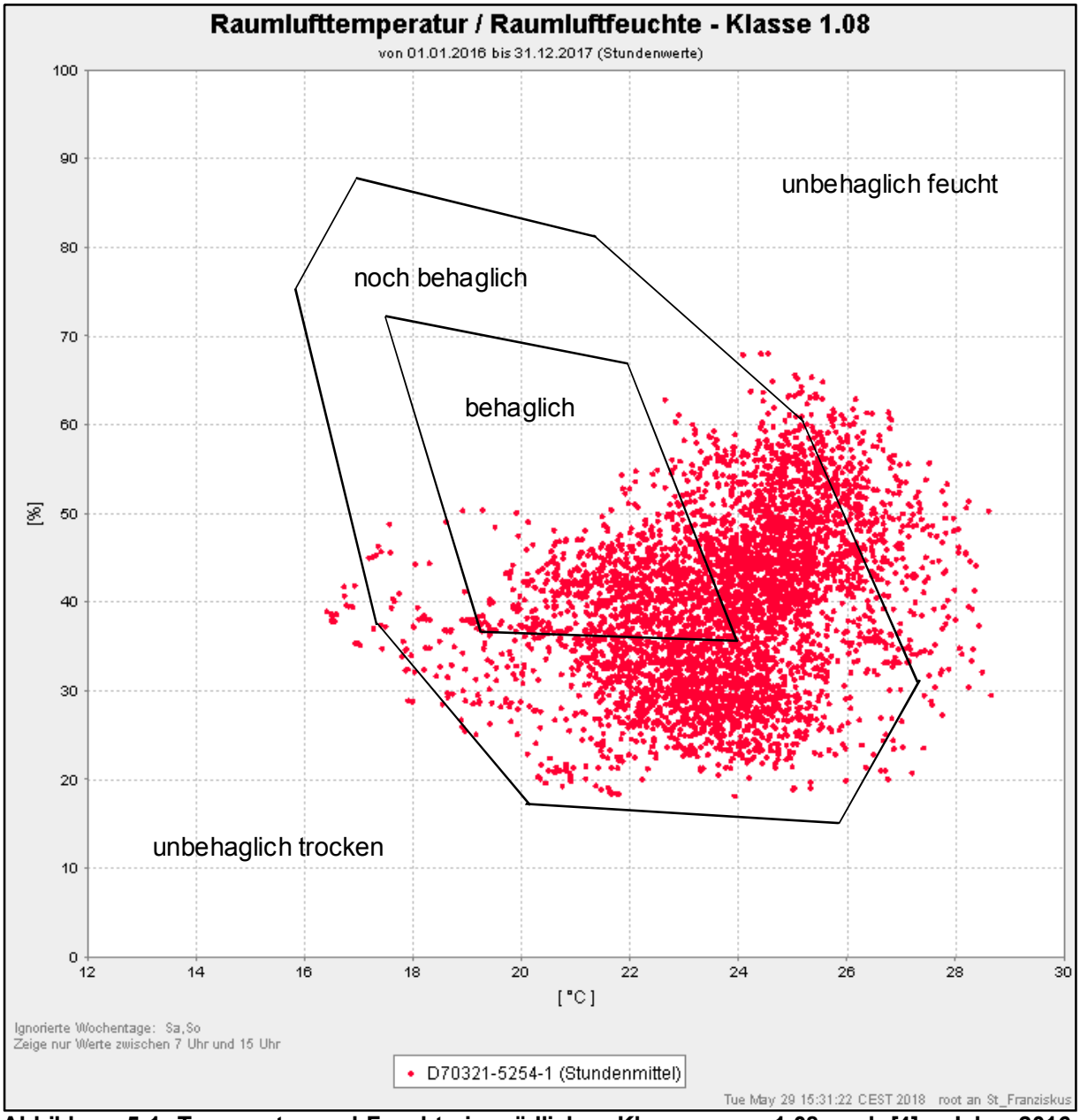


**Abbildung 5-1: Temperatur und Feuchte im südlichen Klassenraum 1.08 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr**

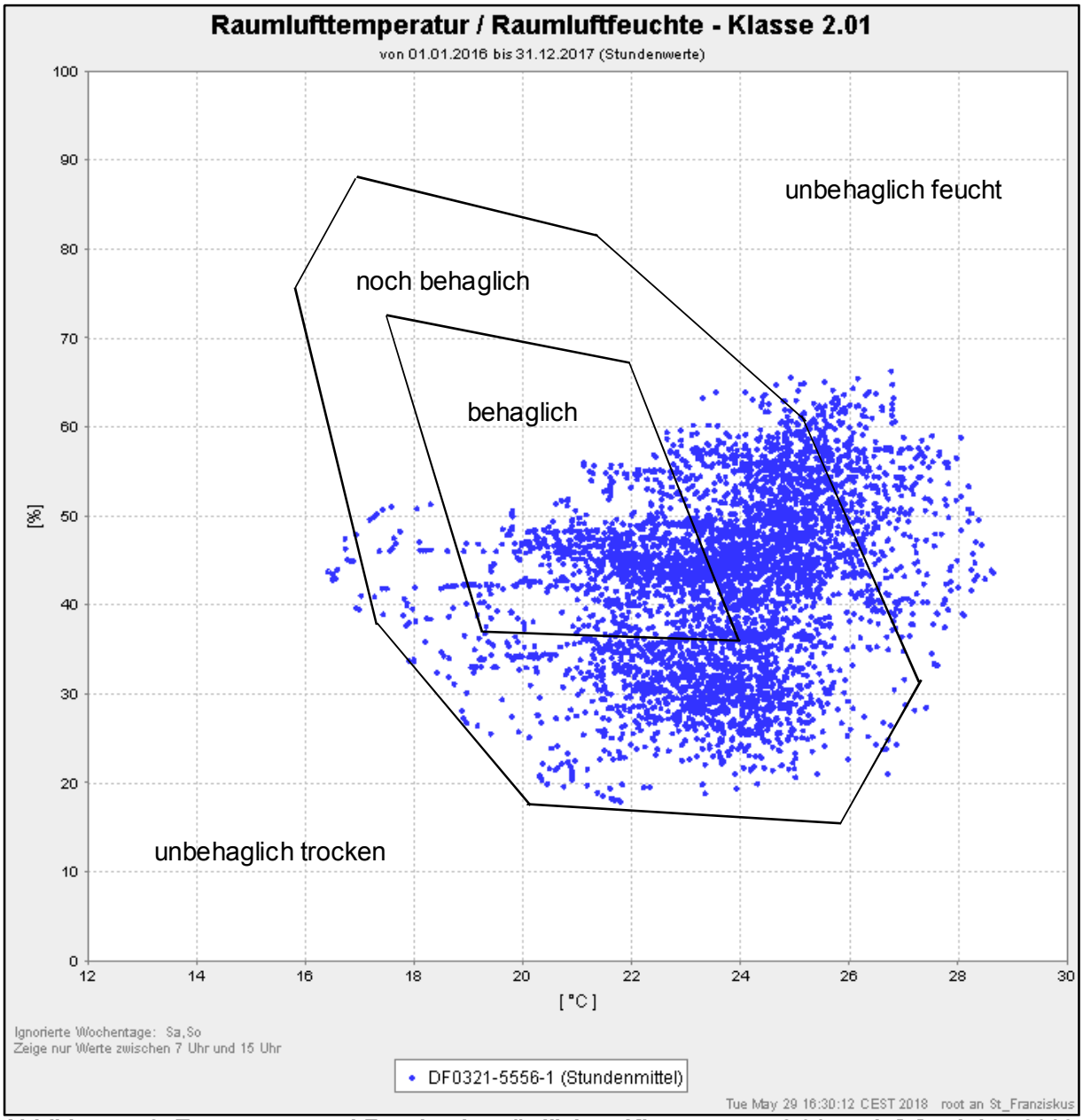


**Abbildung 5-2: Temperatur und Feuchte im nördlichen Klassenraum 2.01 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr**

Durch die am 5.6.2018 vorgenommenen Veränderungen an der Lüftungsregelung im Gebäudeteil B wird insgesamt eine deutliche Verbesserung der Situation erwartet. Insbesondere in den südorientierten Klassenräumen ist eine bessere Effizienz der Nachtlüftung festzustellen, da diese seit 5.6.2018 früher beginnt – um 1:00 Uhr statt 3:00 bzw. 4:00 Uhr – und nun auch niedrigere Zulufttemperaturen bei Betriebsbeginn ermöglicht werden.

Hinsichtlich der unbehaglich kühlen Zustände wird eine Verbesserung der Situation angestrebt, da nun anstelle der manuell gewählten Zulufttemperatur durch die aktivierte Kaskadenregelung angepasste Übertemperaturen zur Beheizung der Räume möglich sind.

# 6 $CO_2$-Gehalt der Raumluft

In diesem Kapitel wird eine Auswertung der Kohlendioxidgehalte der Raumluft in den beiden intensiv untersuchten Klassenräumen 1.08 und 2.01 vorgenommen. Darüber hinaus werden die Daten der $CO_2$-geführten Aulalüftung herangezogen.

Der vom Nutzer verursachte $CO_2$-Gehalt der Raumluft ist neben der Temperatur und der Feuchte ein wichtiger Einflussfaktor der Behaglichkeit. Von ihm ist die Konzentrationsfähigkeit der Personen im Raum stark abhängig. Dabei dient Kohlendioxid als Leitsubstanz für die Bewertung der allgemeinen Lufthygiene des Raumes, die z. B. auch von Geruchs- oder Schadstoffen, Stoffwechselprodukten der Nutzer und Mikroorganismen beeinträchtigt wird.

Eine $CO_2$-Konzentration bis 1.000 ppm – als „Pettenkofer-Grenze“ bekannt – gilt als hygienisch unbedenklich. Der in der DIN 1946 Teil 2 bekannte Grenzwert von 1500 ppm ist weiterhin in der Praxis anzutreffen (z. B. bei Lüftungsampeln). Die Norm wurde im Jahr 2005 durch die EN 13779 ersetzt, in welcher in der schlechtesten Qualitätsstufe (In Door Air IDA 4) eine Erhöhung der $CO_2$-Konzentration gegenüber der Außenluft von > 1000 ppm beschrieben wird [11]. Der Leitfaden des Umweltbundesamtes übersetzt dies in einen Absolutwert von > 1400 ppm, ausgehend von einer Außenluftkonzentration von 400 ppm. Er bezeichnet weiterhin den Bereich zwischen 1.000 und 2.000 ppm als hygienisch auffällig, Lüftungsmaßnahmen sollten intensiviert und das Lüftungsverhalten verbessert werden. Wenn die $CO_2$-Konzentration die Schwelle von 2.000 ppm überschreitet, liegt demnach ein „hygienisch inakzeptabler“ Zustand vor und es muss gelüftet werden [9].

Im Wesentlichen ist die $CO_2$-Konzentration in genutzten Innenräumen abhängig von der Anzahl der im Raum befindlichen Personen, dem Raumvolumen, der Aktivität der Nutzer, der Zeitdauer der Nutzung, eventueller Verbrennungsvorgänge im Innenraum und dem Luftwechsel bzw. dem Außenluftvolumenstrom [15].

## *6.1 Messorte und Messtechnik*

In den Klassenräumen 1.08 und 2.01 wird der $CO_2$-Gehalt dauerhaft gemessen. Dies sind die Räume, in denen auch die Messungen zum Fensteröffnungsverhalten erfolgen (siehe Kapitel 7). Die Messwerte der $CO_2$-geregelten Aulalüftung werden ebenfalls erfasst.

Messziel: die Messung ergibt ein Bild über die Wirksamkeit der Lüftung und ermöglicht ggf. eine Nachkalibrierung der Lüftungsanlage (Volumenströme).

**Tabelle 6-1: Messpunkte bezüglich Kohlendioxidkonzentration**

| Kürzel | Einheit | Gruppe | Untergruppe | Beschreibung |
|---|---|---|---|---|
| DF0189-5240-0 | ppm | RAU | CO2 | CO2_Klasse_108 |
| DF0189-5530-0 | ppm | RAU | CO2 | Klasse_201_CO2 |
| DF0189-6530-0 | ppm | RAU | CO2 | Aula_026_CO2_Abluft |
| A_CO2-Sensor | ppm | RLT | MAC | CO2 Wert in der Aula, Mittelwert |
| A_CO2-Sensor max | ppm | RLT | MAC | CO2 Wert in der Aula, Maximalwert |
| A_CO2-Sensor min | ppm | RLT | MAC | CO2 Wert in der Aula, Minimalwert |

Verwertbare Messdaten liegen für den Klassenraum 1.08 ab 01.03.2016 vor, für den Klassenraum 2.01 und die Aula ab 16.02.2016.

## 6.2 *Plausibilitätsprüfung und Fehlerbetrachtung*

Es sind zwei Fehler bei der $CO_2$-Messung gegen Ende der Monitoringphase bekannt geworden, die nachfolgend erläutert werden: zum einen ein Absolutmessfehler (zu hoher Messwert bei einem der Sensoren), zum anderen ein luftgeschwindigkeitsabhängiger Messfehler (bei allen Sensoren). Beide Fehler beeinflussen sich teilweise gegenseitig. Es werden Ansätze zur nachträglichen Fehlerkorrektur vorgestellt und Hinweise zum Interpretieren der Messwerte gegeben.

### Plausibilitätsprüfung

Für eine Plausibilitätsprüfung der gemessenen $CO_2$-Gehalte wurde zunächst eine Woche in der Schließzeit über Weihnachten herangezogen, siehe Abbildung 6-1. Die Darstellung enthält zusätzlich die Zuluftvolumenströme der Lüftungsgeräte in Gebäudeteil A (Aula) und B (Klassen).

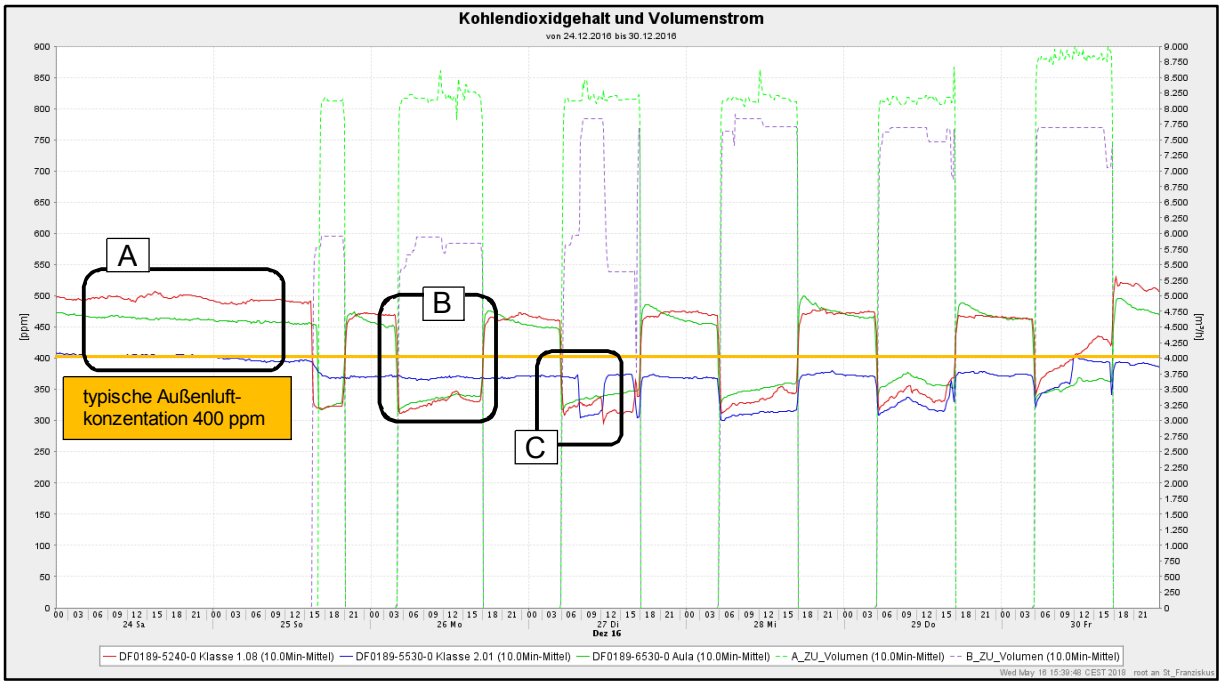


**Abbildung 6-1: Zuluftvolumenströme und $CO_2$-Gehalte – 24.12. bis 30.12.2016**

Während der Abwesenheit der Nutzer sollte sich eine gleichmäßige $CO_2$-Konzentration einstellen, die in allen untersuchten Räumen annähernd gleich ist (nah an der Außenluftkonzentration) und aufgrund der Nutzerabwesenheit in den Ferien konstant bleibt.

Die Überprüfung anhand des 24.12.2016 (Bereich A in Abbildung 6-1) ergibt jedoch, dass die Werte der drei Messsonden um bis zu 100 ppm voneinander abweichen. Die Lüftungsanlagen sind an diesem Tag ausgeschaltet. Während der Fühler in Raum 2.01 (blau) mit ca. 400 ppm den niedrigsten Wert anzeigt, liegt der Messwert in Raum 1.08 (rot) bei ca. 500 ppm. Der Wert in der Aula (grün) sinkt im Tagesverlauf moderat von 470 auf 460 ppm.

Mit Einschalten beider Lüftungsanlagen am Montag, dem 26.12.2016 gegen 16 Uhr (Bereich B in Abbildung 6-1) fallen die Werte für die Klasse 1.08 sowie die Aula 0.26 gleichsam auf 320 ppm ab, was beides unrealistisch erscheint, da die Außenluftqualität in Städten im Allgemeinen mit etwa 400 ppm $CO_2$-Gehalt angegeben wird. Der Volumenstromregler in Raum 1.08 war während des Lüftungsbetriebes voll geöffnet (hier nicht dargestellt). In der Aula war ebenfalls ein Volumenstrom zu verzeichnen (geschlossene Volumenstromregler bei laufenden Ventilatoren sind regelungstechnisch nicht vorgesehen). Gleichzeitig bleibt der Messwert in Raum 2.01 fast konstant bei 370 ppm. Der Volumenstromregler war in diesem Raum geschlossen.

Der Messwert für den Raum 2.01 ist nahezu konstant bis zum 27.12.2016 gegen 8:00 Uhr, um dann mit Anfahren des Lüftungsgerätes und Öffnen des Volumenstromreglers auf 310 ppm abzufallen (Bereich C in Abbildung 6-1).

Dieses Muster – ca. 470 ppm im stehenden Kanalsystem bei ausgeschalteter Anlage, ca. 320 bis 350 ppm bei eingeschalteter Anlage – wiederholt sich im Klassenraum 1.08 und der Aula 0.26 bis zum Freitag. Im Klassenraum 2.01 ist das Muster ebenfalls erkennbar, jedoch mit kleineren Amplituden und insgesamt auf niedrigerem Absolutniveau. Der Wert steigt bei ausgeschalteter Anlage regelmäßig auf nur 370 ppm, während er im Lüftungsbetrieb auf annähernd 300 ppm sinkt.

Die Grafik bestätigt die Vermutung, dass das Absinken der $CO_2$-Gehalte in den Morgenstunden mit dem Anfahren der Lüftungstechnik einhergeht, während der Anstieg am späten Nachmittag zeitgleich mit dem Ausschalten der RLT stattfindet.

**Messfehler aufgrund der Luftgeschwindigkeit**

Die Messsonden befanden sich in den Klassenräumen seit der Installation Anfang 2016 direkt am Lüftungsgitter des Abluftkanals, siehe Abbildung 6-2 links. Aufgrund der unrealistisch geringen $CO_2$-Konzentrationen (< 400 ppm) und des erkennbaren Zusammenhangs mit der Durchströmung bzw. Anströmung der Fühler wurde die Ursache für die Messfehler bei der Luftgeschwindigkeit vermutet.

Der Blick in die technischen Daten des Fühlers SEN CO2 O 100 [16] bestätigt, dass die Fühler für eine maximale Luftgeschwindigkeit von 0,2 … 1,0 m/s vorgesehen sind. Welcher Wert der tatsächliche Maximalwert ist, ergibt sich aus den Unterlagen nicht. Unter Sollbedingungen liegt die Lufteintrittsgeschwindigkeit in die Abluftgitter bei knapp 0,9 m/s. zumindest der "untere Maximalwert" von 0,2 m/s wird somit deutlich überschritten.

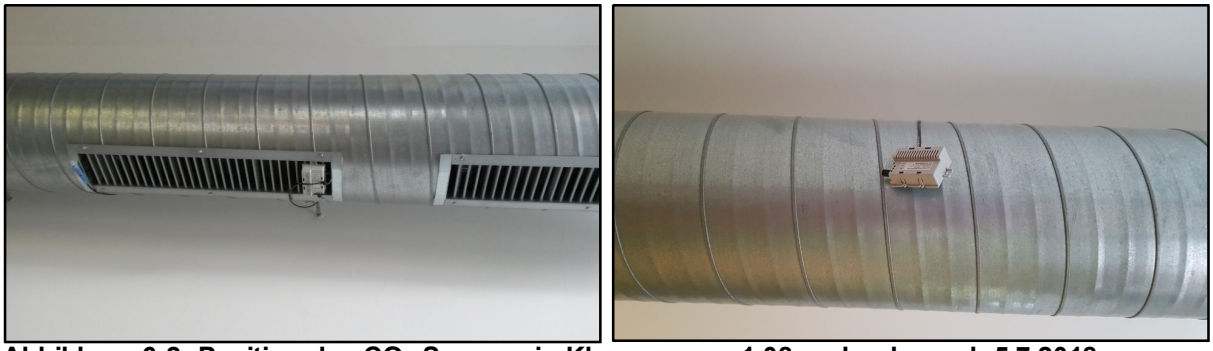

**Abbildung 6-2: Position des $CO_2$-Sensors in Klassenraum 1.08 vorher bzw. ab 5.7.2018**

Der Hausmeister hat am 5.7.2018 die Fühler vom Lüftungsgitter gelöst und provisorisch umpositioniert, siehe Abbildung 6-2 rechts.

Somit wird seither die starke Durchströmung der Fühler unterbunden, was sich positiv in den Messwerten bemerkbar macht, siehe Bereich B in Abbildung 6-7. Die starken Ausreißer nach unten entfallen fortan. Beide Fühler reagieren nun ähnlich – wenn auch auf anderem Absolutniveau. Der Wert im Klassenraum 1.08 war vorher einer größeren Schwankungsbreite unterworfen als der Wert im Klassenraum 2.01 (Bereich A in Abbildung 6-7)

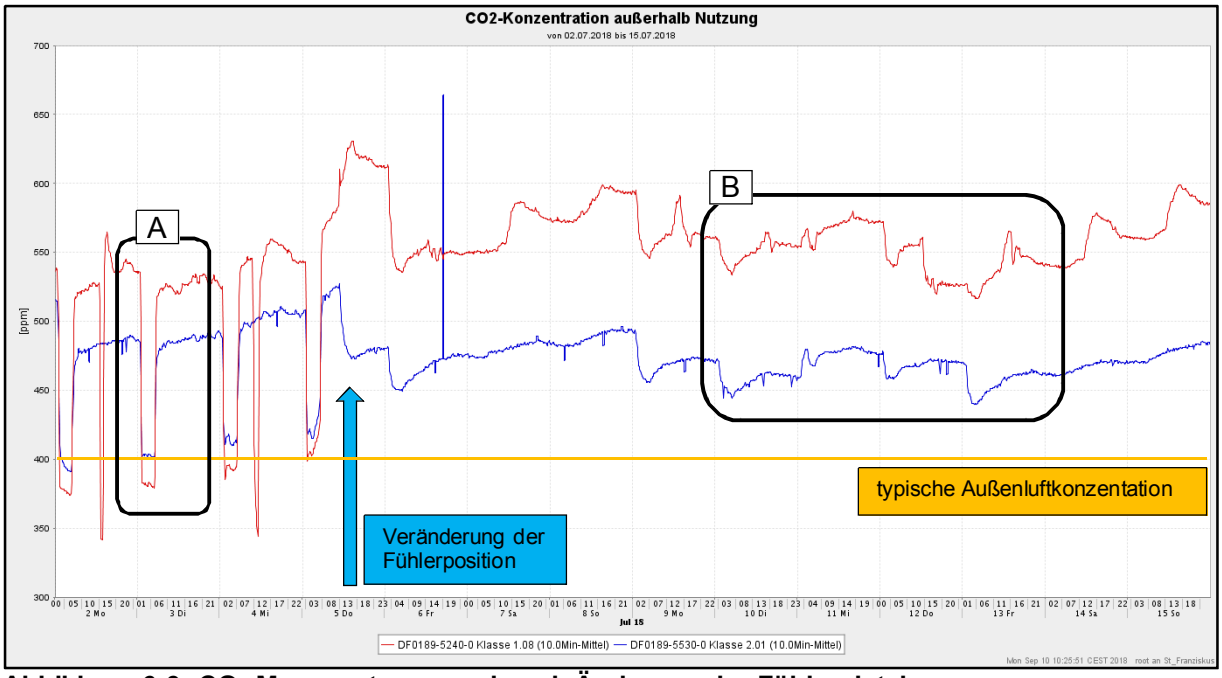


**Abbildung 6-3: $CO_2$-Messwerte vor und nach Änderung der Fühlerplatzierung**

Wie stark sich der Messfehler auswirkt, soll anhand des Monats August geklärt werden, da für diesen – zumindest in Raum 1.08 – in allen drei Jahren Messdaten vorliegen und sich die Zeit der Sommerferien nur um jeweils einen Kalendertag verschob, so dass die Monate gut vergleichbar sind.

Durch eine EXCEL-Analyse wurden für die Schultage der Monate August 2016 (15 Schultage ab 11.08.2016), August 2017 (16 Schultage ab 10.08.2017) und August 2018 (17 Schultage ab 09.08.2018) jeweils die Mittelwerte aller 15/16/17 Messwerte des jeweiligen 10-Minuten-Intervalls 0 Uhr, 0:10 Uhr usw. bis 23:50 Uhr gebildet.

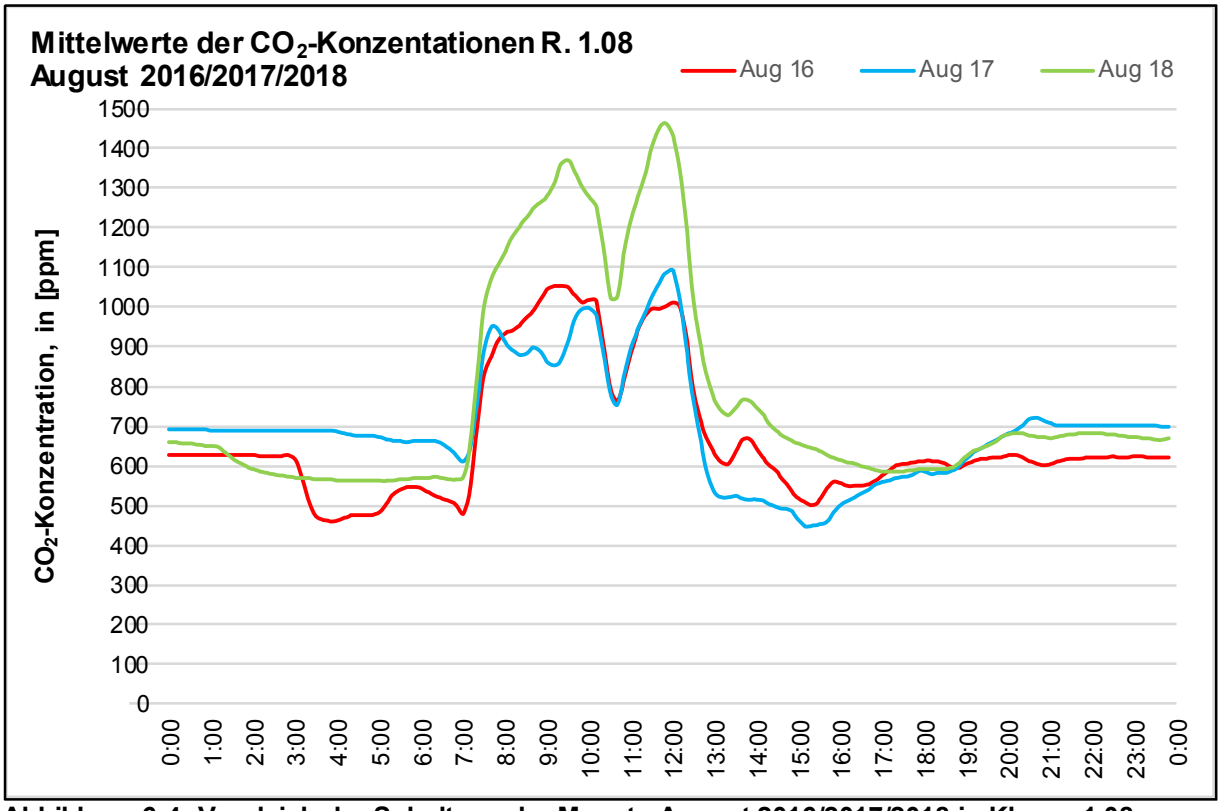


**Abbildung 6-4: Vergleich der Schultage der Monate August 2016/2017/2018 in Klasse 1.08**

Hieraus ergibt sich für Klasse 1.08 folgendes Bild (Abbildung 6-8): die korrekte Platzierung des Messfühlers außerhalb der direkten Anströmung hat sich stark bemerkbar gemacht. Die Messwerte innerhalb der Nutzungszeit waren in den Jahren 2016 und 2017 vermutlich zu gering. Zumindest zeigt der nicht mehr angeströmte Sensor im Jahr 2018 ca. 200 … 300 ppm höhere Messwerte in der Nutzungszeit als in den Vorjahren. Weitere nutzungsbedingte Einflüsse auf das Ergebnis (Personenzahl, Fensteröffnungsverhalten) sind nicht auszuschließen, können jedoch nicht weiter untersucht werden.

Zum Detailverlauf: in der Phase mit ausgeschalteter Lüftung liegen die Werte aller Jahre nah beieinander. Die Nachtlüftung (2016: ab 3 Uhr, 2017: abgeschaltet, 2018: ab 1 Uhr) wird registriert. In allen Fällen ist das Eintreffen der Nutzer ab ca. 7 Uhr durch den sprunghaften Anstieg der Werte deutlich zu erkennen. Auch die Hofpause gegen 10:40 Uhr ist in allen drei August-Monaten gut zu sehen, ebenso wie der Unterrichtsschluss ab 13 Uhr.

Die Auswertung für den Raum 2.01 zeigt Abbildung 6-5. Leider war das Jahr 2017 von Datenausfall betroffen (blau). Der Tagesablauf – Nachtlüftung, Nutzungsphase und Hofpause – ist ebenso erkennbar wie in Raum 1.08, wenn auch mit anderen Absolutwerten.

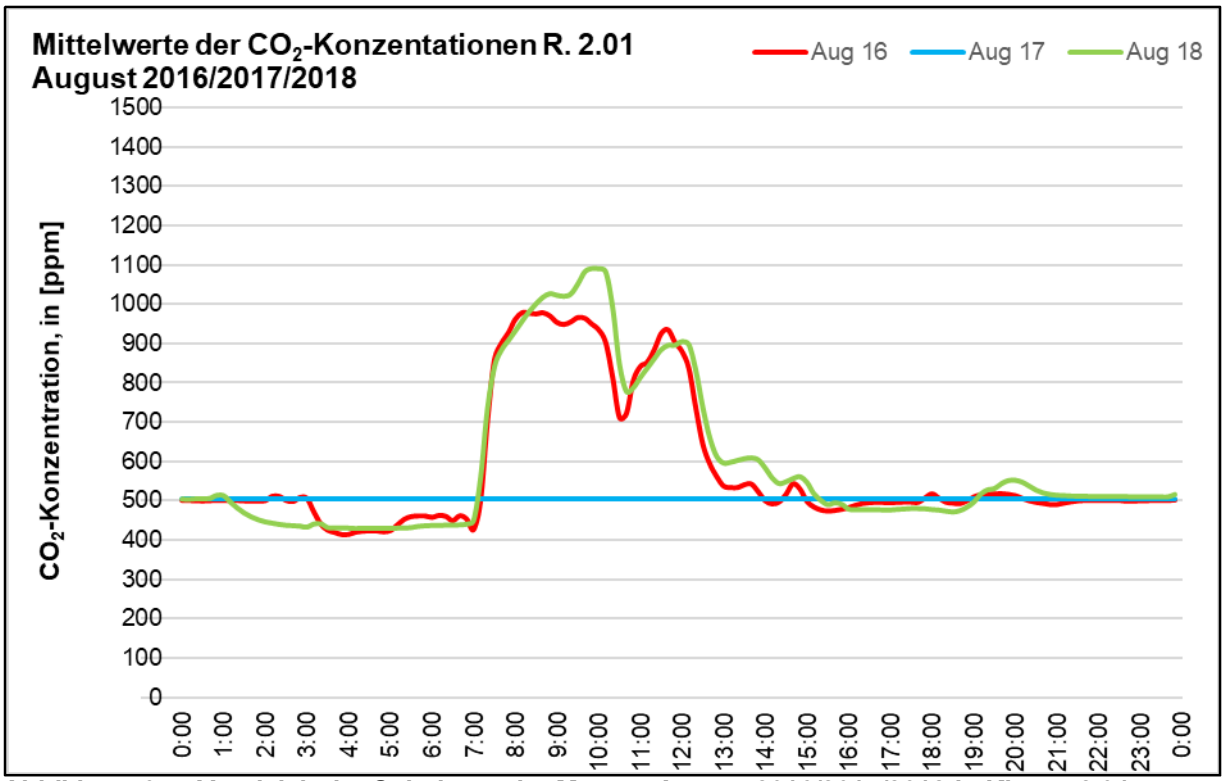


**Abbildung 6-5: Vergleich der Schultage der Monate August 2016/2017/2018 in Klasse 2.01**

Es ergibt sich die Erkenntnis für Klasse 2.01: der Messfühler war weit weniger von der Fehlmessung betroffen. Insgesamt gibt es nur geringere Unterschiede zwischen August 2016 und August 2018. Während die Mittelwerte im August 2016 unter 1000 ppm bleiben, liegen sie im August 2018 bei max. etwa 1100 ppm, was einer sehr guten Luftqualität entspricht. Über die reale Raumnutzung und Belegungsdichte in den Vergleichszeiträumen zur besseren Vergleichbarkeit ist nichts bekannt.

**Absolute Differenz beider Klassenräume**

Die vorherigen Auswertungen in Abbildung 6-3 bis Abbildung 6-5 zeigten auch einen absoluten Unterschied der Messwerte in beiden Klassenräumen, der nicht nutzungsbedingt zu erklären ist.

Bei korrekter Fühlerposition (ohne direkte Anströmung der Messsonde) ist zu erkennen, dass die Messwerte des Fühlers in Raum 1.08 dauerhaft über denen des Raumes 2.01 liegen, siehe Bereich B in Abbildung 6-7. Die Werte aus dem Raum 2.01 werden als realistischer bewertet, da sie näher an der typischen Außenluftkonzentration liegen, was außerhalb der Nutzungszeit näherungsweise in den Klassenräumen zu erwarten ist.

Eine EXCEL-Analyse der Messwerte ohne Nutzeranwesenheit (Ferien) vom 06.07. bis 09.08.2018 ergibt, dass die Abweichung zwischen den Fühlern beider Klassenräume im Mittel bei 98 ppm liegt. Die Werte der Klasse 1.08 müssen entsprechend im Mittel nach unten korrigiert werden.

Diese Erkenntnis kann allerdings nicht auf die Phase vor der korrekten Messfühleranordnung übertragen werden. Es sind keine konstanten Differenzen erkennbar. In den Phasen mit stehender Lüftungsanlage (nachts) wird im Raum 1.08 eine höhere $CO_2$-Konzentration als im Raum 2.01 gemessen, bei Lüftungsbetrieb kehrt sich dies um, siehe Bereich A in Abbildung 6-7.

**Fazit**

Die Position der Messfühler unmittelbar am Lüftungsgitter war nachteilig für die Verwertbarkeit der Messdaten. Der Fehler fiel nur auf, da Minimalwerte unter der typischen Außenluftkonzentration von 400 ppm auftraten. Nachdem die Fühler am 5.7.2018 aus dem Luftstrom genommen wurden, normalisierten sich die Messwerte im Bereich um 400 ppm. Aufgrund der Nutzerabwesenheit in den Sommerferien konnte der Absolutfehler von etwa 98 ppm für den Fühler in Raum 1.08 erkannt werden.

Es ergibt sich folgendes Fazit für die Klassenräume und die nachfolgenden Messwertauswertungen in Kapitel 6.3:

- Klasse 2.01:
    - das absolute $CO_2$-Niveau des Messfühlers wird als korrekt angesehen,
    - der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Messwerte der Jahre 2016 und 2017 ist vergleichsweise gering,
    - die Messwerte vor und nach der korrekten Platzierung der Messsensoren werden als repräsentativ für einen typischen Klassenraum angesehen.
- Klasse 1.08:
    - das absolute $CO_2$-Niveau des Messfühlers ist zu hoch,
    - der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Messwerte ist deutlich erkennbar und führt innerhalb der Betriebszeiten der Lüftungsanlage zu falschen (ca. 200 … 300 ppm zu geringen) Messwerten für die Jahre 2016 und 2017,
    - beide Einflüsse heben sich teilweise gegenseitig auf, jedoch nicht vollständig und abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit,
    - innerhalb der Nutzungszeit (Anwesenheit von Personen und laufende Lüftungsanlage) sind in der Realität ca. 100 … 200 ppm höhere reale Messwerte zu vermuten; auf die Ableitung eines formelmäßigen Zusammenhanges wird verzichtet.

Wichtig ist jedoch die Aussage, dass in beiden Klassenräumen im August 2018 mit korrekter Fühlerplatzierung die Luftqualität mit Mittelwerten unter 1500 ppm im guten Bereich lag.

## *6.3 Häufigkeitsverteilung Klassenräume*

Die Lüftungsanlage in den Klassenräumen ist präsenzgesteuert. Wird keine Bewegung im Raum registriert, schließen die Volumenstromregler. Die Nachlaufzeit hierfür wurde am 5.6.2018 von 2 Minuten auf 10 Minuten verlängert, um ein Nachspülen zu ermöglichen.

**2016**

Die Auswertungen aller Stundenwerte des Jahres 2016 ergeben, dass die gemessene $CO_2$-Konzentration im Raum 1.08 mit einem Mittelwert von 599 ppm etwas höher liegt als im Raum 2.01 mit i. M. 512 ppm. Begrenzt auf die Nutzungszeit von 7 bis 15 Uhr ergeben sich Mittelwerte von 745 ppm (1.08) bzw. 676 ppm (2.01). Mögliche Messfehler wurden hier nicht herausgerechnet, siehe Kapitel 6.2. Die Zahlenwerte für den Raum 2.01 werden als sicherer eingeschätzt.

Während es in Raum 2.01 bezogen auf die Stundenmittelwerte während der Nutzungszeit keine Überschreitungen der 1500 ppm-Grenze gab, war dies in Raum 1.08 in drei Stunden des Jahres der Fall. Den einzigen Ausreißer bis auf 2040 ppm gab es am 17.08.2016 gegen 11 Uhr.

Der niedrigere Grenzwert von 1000 ppm wird im Raum 2.01 in 125 Nutzungsstunden (7 % der Zeit) überschritten. In Klasse 1.08 hingegen tritt dieser Fall mit 307 Stunden (18 % der Zeit) über 1000 ppm mehr als doppelt so häufig auf.

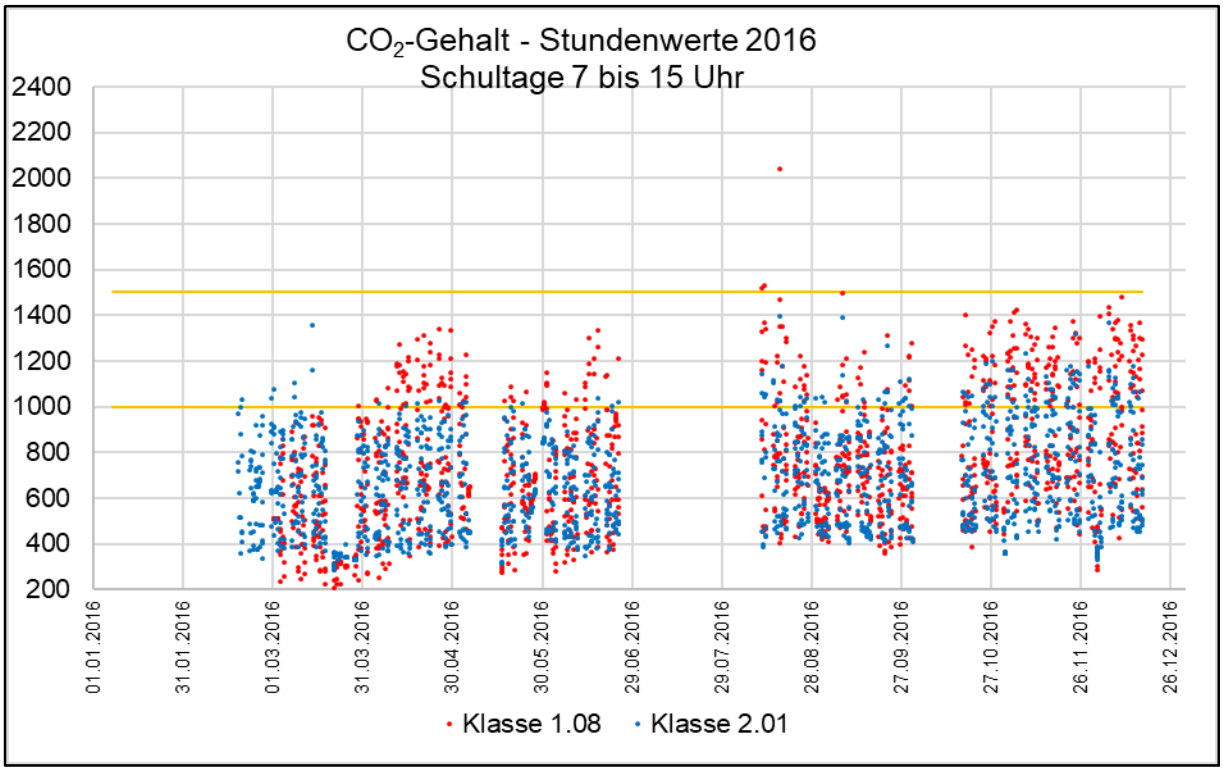


**Abbildung 6-6: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr (Stundenmittel)**

In höherer Auflösung mit 10-Minuten-Mittelwerten stellen sich die Diagramme für die Räume 1.08 und 2.01 wie in Abbildung 6-7 bzw. Abbildung 6-9 dar. Gut erkennbar sind die Belegungszeiten in den Carpetplots in Abbildung 6-8 und Abbildung 6-10.

Deutlich wird auch hier, dass die Mehrzahl der Werte (ohne Korrektur) in einem guten bis sehr guten Spektrum liegt. Die wenigen Ausreißer werden durch die fehlende Glättung noch deutlicher: der Maximalwert in Raum 1.08 betrug am 17.08.2016 tatsächlich 2313 ppm im 10-Minuten-Mittel (Stundenwert 2040 ppm). Im Raum 2.01 lag das Maximum bei 1592 ppm im 10-Minuten-Mittel, interessanterweise ebenfalls am 17.08.2016.

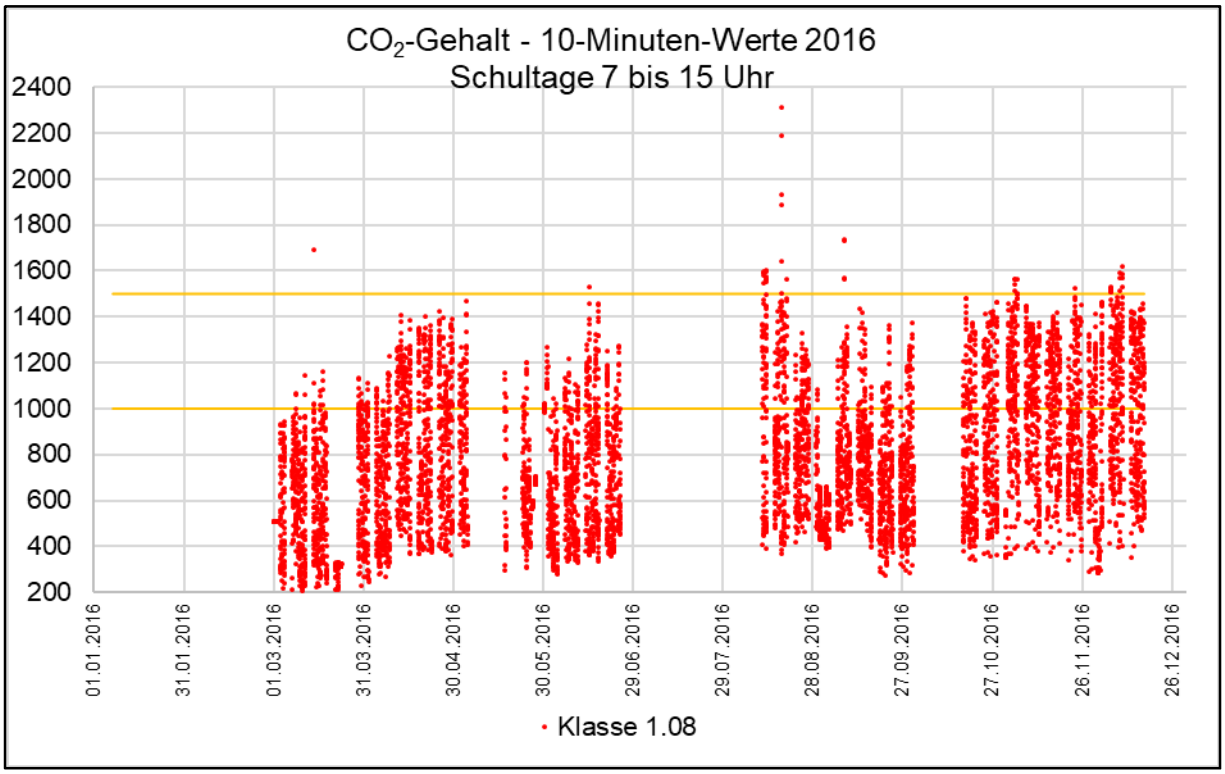


**Abbildung 6-7: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr (10-Minuten-Mittel)**

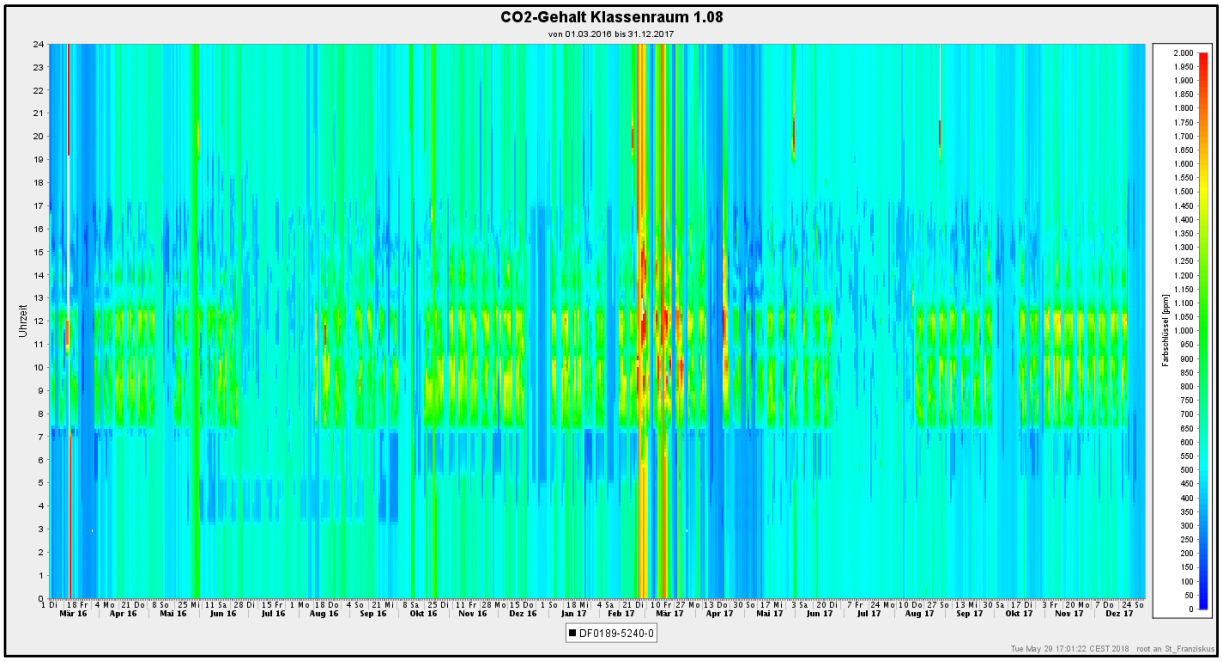


**Abbildung 6-8: Carpetplot $CO_2$-Gehalt Klassenraum 1.08 von März 2016 bis Dezember 2017**

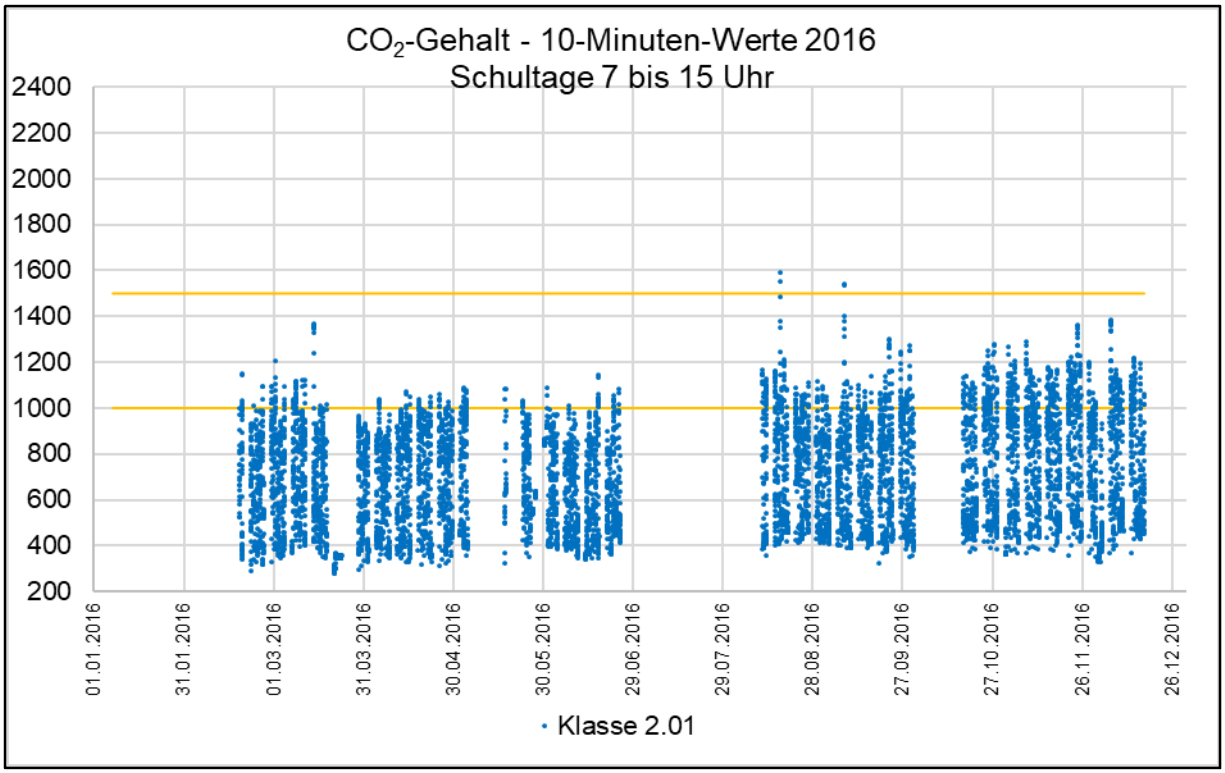


**Abbildung 6-9: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 2.01 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr (10-Minuten-Mittel)**

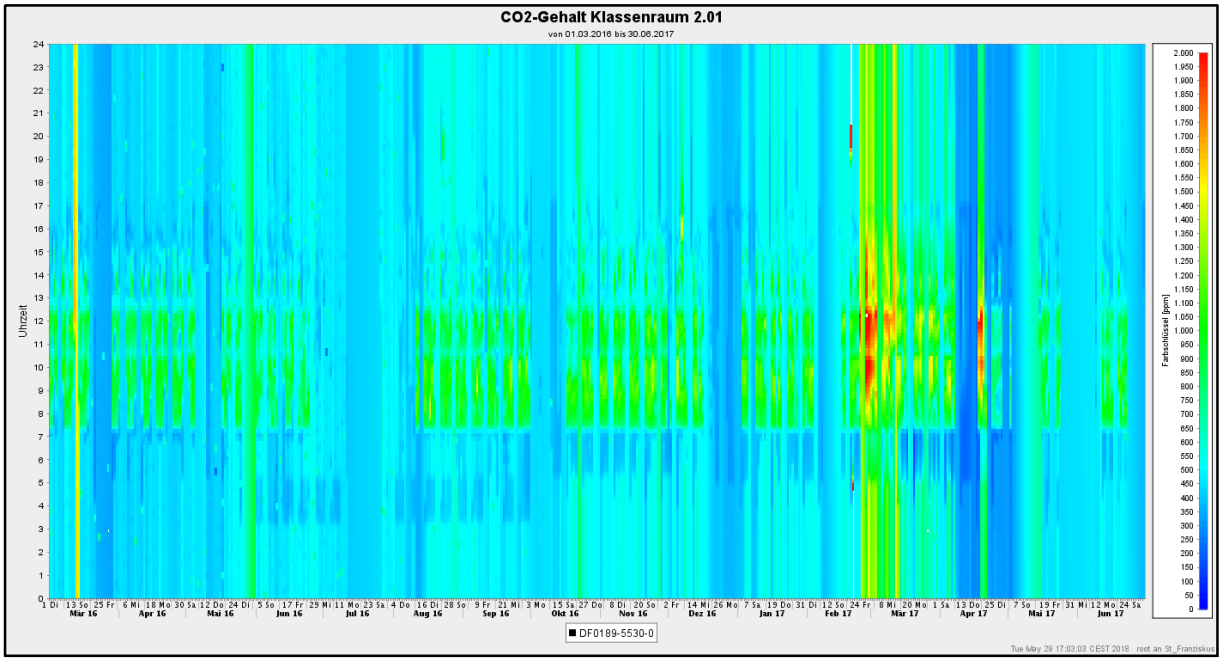


**Abbildung 6-10: Carpetplot $CO_2$-Gehalt Klassenraum 2.01 von März 2016 bis Juni 2017**

**2017**

Im Raum 1.08 lag der Jahresmittelwert in der Nutzungszeit bei 826 ppm, bezogen auf das gesamte Jahr bei 609 ppm (Abbildung 6-11, unkorrigiert). Im Raum 2.01 kommt es leider – wie bei allen anderen Fühlern des Raumes auch – ab der Jahresmitte zu Datenausfall. Bezogen auf die vorliegenden Werte bis Ende Juni lag der Mittelwert während der Belegungszeit bei 756 ppm.

Im Raum 1.08 traten mit 515 Nutzungsstunden (29 % der Zeit) häufige Überschreitungen der Pettenkofer-Grenze auf, Überschreitungen >1500 ppm wurden in 67 Stunden registriert (4 % der Zeit). Das Maximum von 2596 ppm wurde am 27.02. um 12:10 Uhr erfasst.

In Raum 2.01 wurden bis Ende Juni 214 Stundenmittelwerte über 1000 ppm erfasst, was bis dahin 12 % der Jahresnutzungsstunden von 1746 h entspricht. 41 Stundenmittelwerte überschritten den Grenzwert von 1500 ppm.

Mögliche Messfehler wurden hier nicht herausgerechnet, siehe Kapitel 6.2. Die Zahlenwerte für den Raum 2.01 werden als sicherer eingeschätzt.

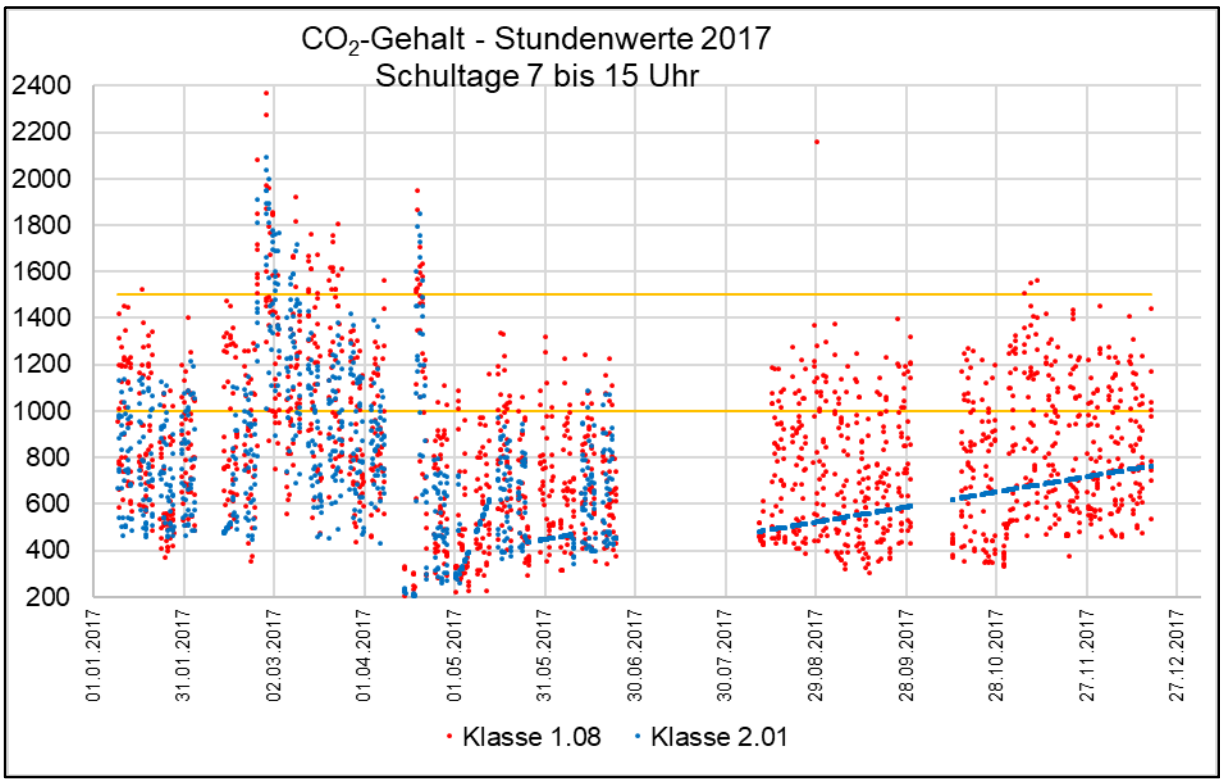


**Abbildung 6-11: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im Jahr 2017 – 7 bis 15 Uhr**

**2018**

Abbildung 6-12 zeigt den Verlauf bis Ende August 2018. Auch hier zeigt sich, dass mit der Neupositionierung der Fühler nach den Sommerferien die Ausreißer < 400 ppm entfallen.

Im Raum 1.08 lag der Mittelwert in der Nutzungszeit bei 844 ppm (unkorrigiert), in Raum 2.01 bei 946 ppm.

Im Raum 1.08 traten mit 332 Nutzungsstunden (30 % der Zeit) häufige Überschreitungen der Pettenkofer-Grenze auf (ohne Messwertkorrektur), Überschreitungen >1500 ppm wurden in 60 Stunden registriert (5 % der Zeit). Das Maximum von etwa 3000 ppm wurde am 10.01. um 12:10 Uhr erfasst. Mögliche Messfehler wurden hier nicht herausgerechnet, siehe Kapitel 6.2.

In Raum 2.01 wurden bis Ende August 445 Stundenmittelwerte über 1000 ppm erfasst, was 41 % der betrachteten Nutzungsstunden von 1098 h entspricht. 89 Stundenmittelwerte (8 %) überschritten den Grenzwert von 1500 ppm. Die Zahlenwerte für den Raum 2.01 werden als sicherer eingeschätzt, siehe Kapitel 6.2.

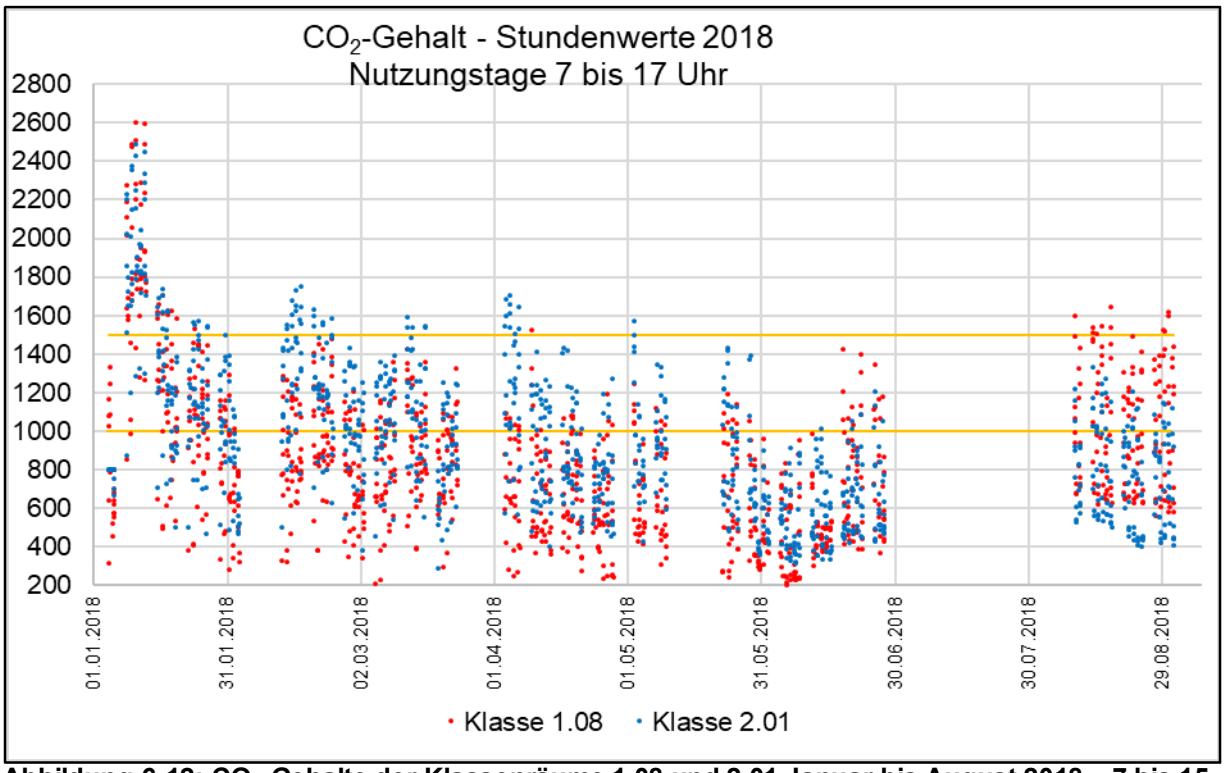


**Abbildung 6-12: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 Januar bis August 2018 – 7 bis 15 Uhr**

Eine genauere Betrachtung des Monats August 2018 in Abbildung 6-13 zeigt die Werte für den einzig verfügbaren Monat ohne negativen Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Messung, siehe Kapitel 6.2.

Entscheidend ist, dass die Messwerte in Raum 1.08 mit einem um 98 ppm nach unten korrigierten Mittelwert von 952 ppm während der Nutzungszeit von 7 bis 15 Uhr eine gute Luftqualität bescheinigen. Der Mittelwert für Raum 2.01 liegt mit 806 ppm noch darunter.

Der Maximalwert lag in Raum 1.08 bei 1362 ppm (korrigiert) und in Raum 2.01 bei 1091 ppm.

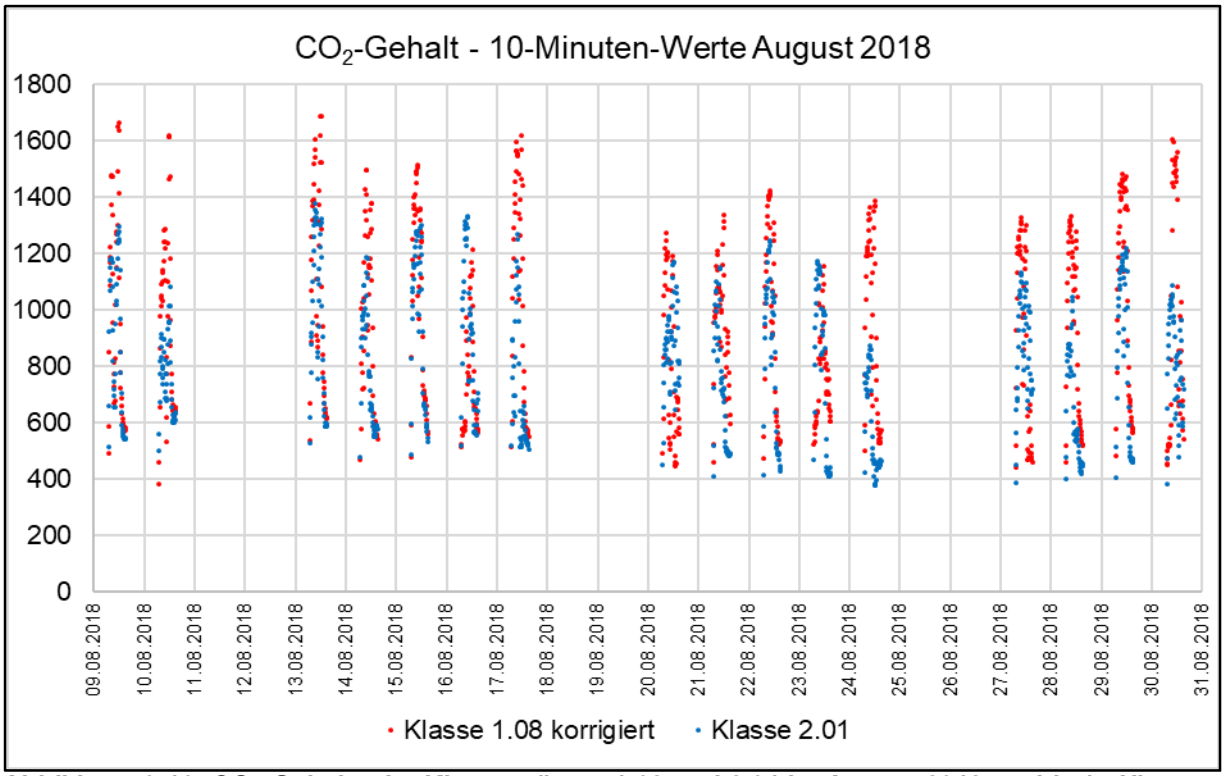


**Abbildung 6-13: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im August 2018 – 7 bis 15 Uhr**

## Dauerlinien

Die folgenden Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15 stellen die Dauerlinien der $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 für die Zeit vom 01.01.2016 bis 31.08.2018 dar. Hier wurde keine Beschränkung auf die Nutzungszeit vorgenommen.

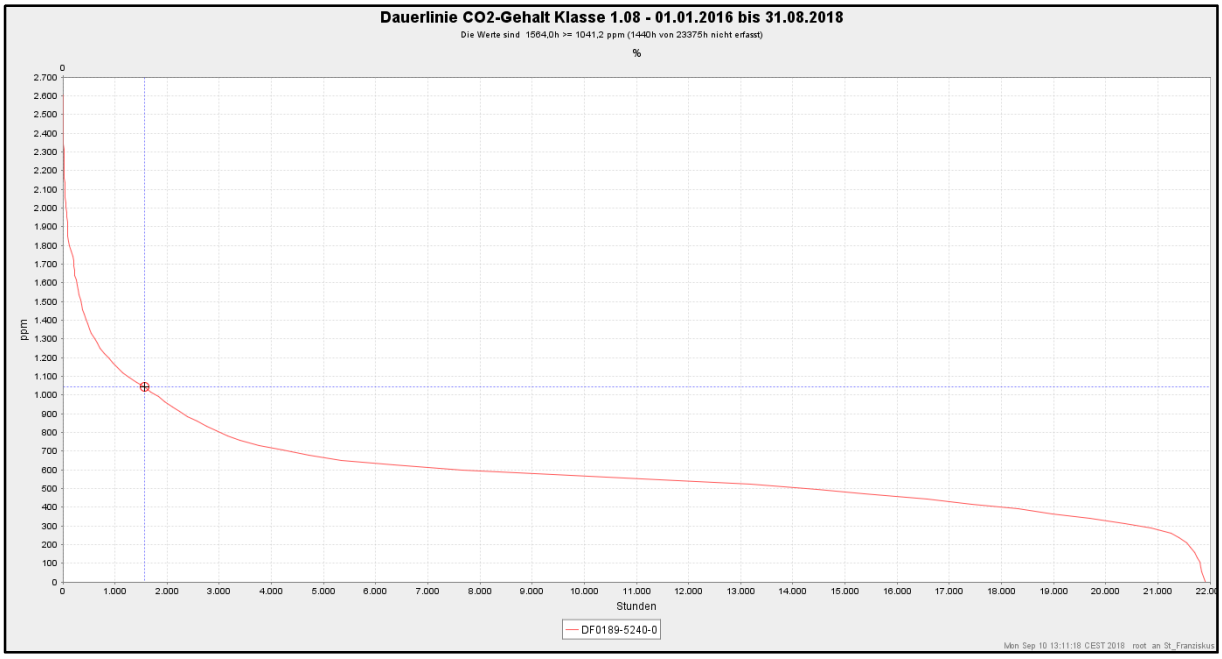


**Abbildung 6-14: Dauerlinie $CO_2$-Gehalt Klasse 1.08 – 01.01.2016 bis 31.08.2018**

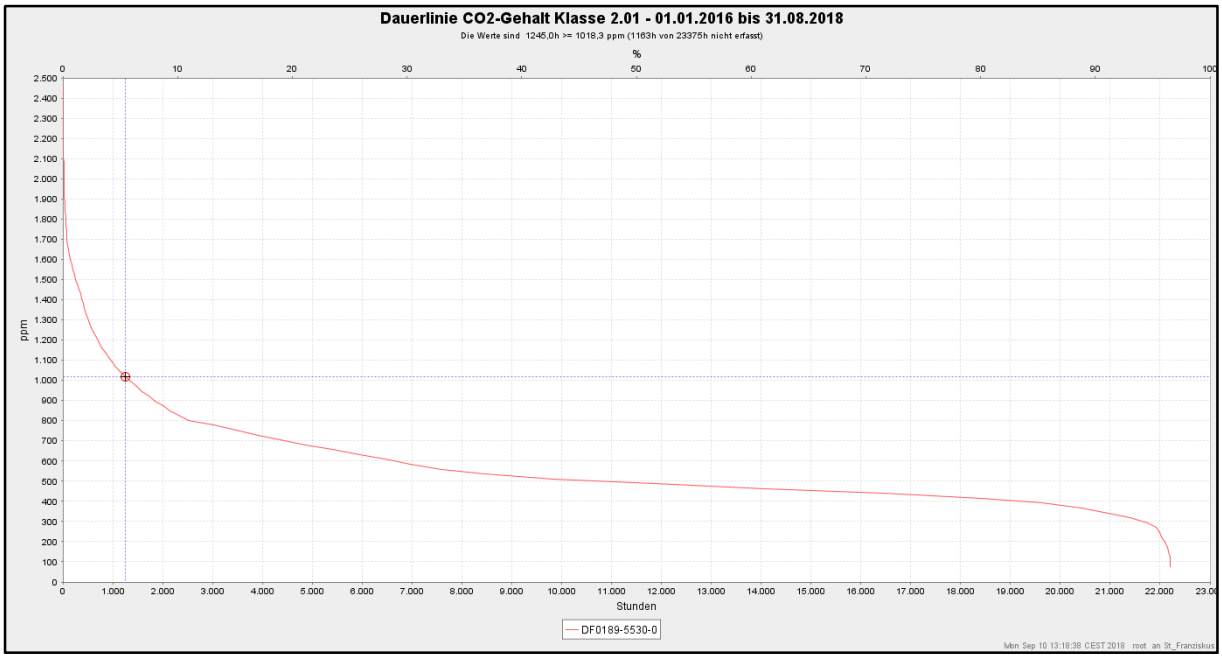


**Abbildung 6-15: Dauerlinie $CO_2$-Gehalt Klasse 2.01 – 01.01.2016 bis 31.08.2018**

Im Folgenden soll die zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration in den Klassenräumen an ausgewählten Schultagen exemplarisch untersucht werden.

### Beispieltage Klassenraum 1.08

Als Beispieltag für einen Zeitverlauf dient Dienstag, der 14.06.2016, da einerseits an diesem Tag die 1500 ppm-Linie kurzzeitig überschritten wird und andererseits die Abwesenheit der Klasse zum Sportunterricht sichtbar ist, siehe Darstellung der 10-Minuten-Mittelwerte in Abbildung 6-16 (unkorrigierte Messwerte). Die grau hinterlegten Felder stellen die Pausenzeiten der Klasse dar.

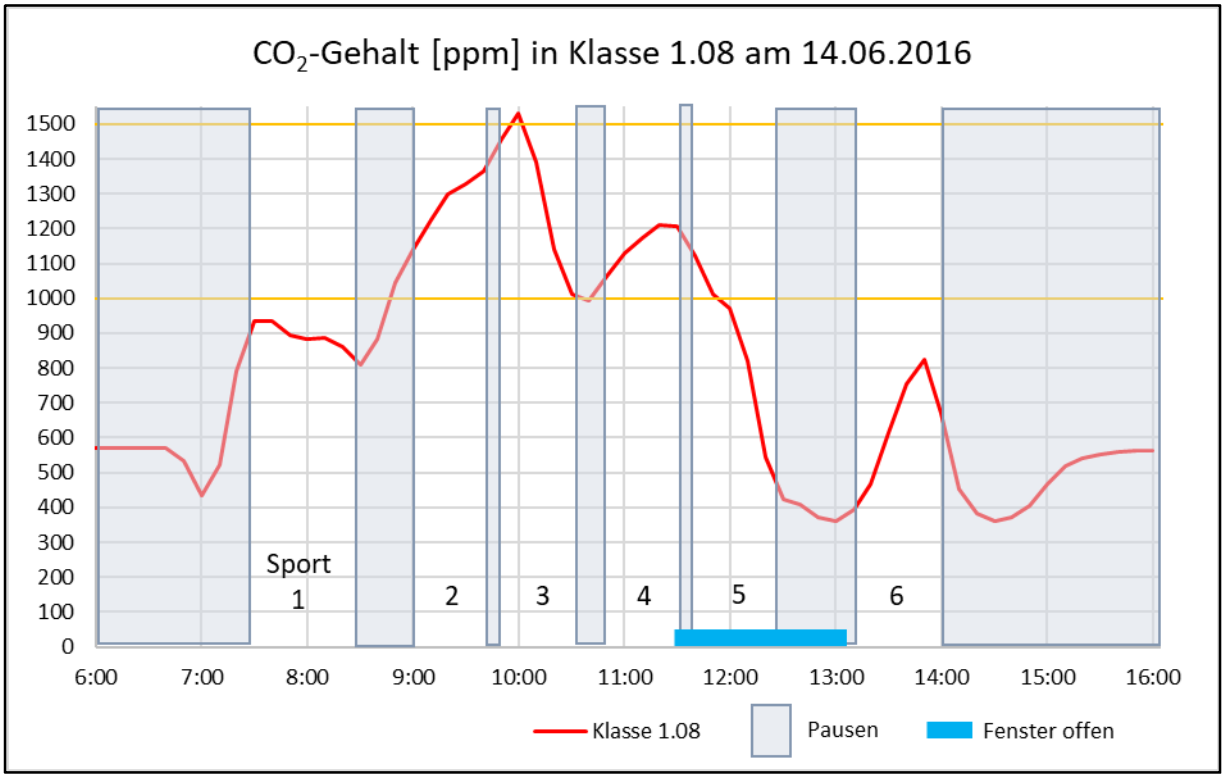


**Abbildung 6-16: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 1.08 – 14.06.2016**

Gut sichtbar ist die steigende $CO_2$-Konzentration beim Eintreffen der Klasse bis 7:30 Uhr, wobei die Werte hier von ca. 420 auf 930 ppm steigen. Während die Kinder in der Sporthalle sind, sinkt der Wert wieder auf 800 ppm. Aus dem Monitoring ist bekannt, dass der Volumenstromregler (VSR) zwischen 3:50 und 17:00 Uhr geöffnet war. Ab der Rückkehr der Kinder um 8:30 Uhr steigen die Werte bis 10:00 Uhr auf 1530 ppm an. Während die $CO_2$-Konzentration in der 4. Stunde ab 10:50 Uhr um 200 ppm leicht ansteigt, sinkt sie in der 3. und 5. Stunde signifikant. In der 5. Stunde ist dies auf das Öffnen des mittleren Fensters zurückzuführen (blaue Markierung). Ob die Kinder in der 3. Stunde abwesend waren oder ob Lüftungsmaßnahmen getroffen wurden, kann nicht abschließend gesagt werden, da sich das Monitoring der Fensterkontakte bei einigen Fenstern als sehr fehleranfällig erweist (siehe Kapitel 7).

Zum Vergleich wird der Zeitverlauf an dem Tag mit dem Jahresmaximum im 10-Minuten-Mittel gezeigt: Mittwoch, der 17.08.2016. Laut Plan war die Klasse in der 1. bis 5. Stunde im Raum anwesend. Der präsenzgesteuerte Volumenstromregler war ganztägig offen. Kurz vor 7 Uhr wurde das mittlere Fenster für einige Minuten geöffnet. Gut zu sehen ist das Eintreffen der Schüler mit einem zügigen Anstieg auf 1500 ppm bis 7:40 Uhr. Das Öffnen des rechten Fensters kurz vor 8:00 Uhr bewirkt daraufhin ein Absinken des $CO_2$-Gehaltes auf 840 ppm. Ab dann steigen die Werte bis 11:20 Uhr auf 2420 ppm, was bei den Nutzern dazu führte, dass das mittlere Fenster bis 13:30 Uhr geöffnet wurde.

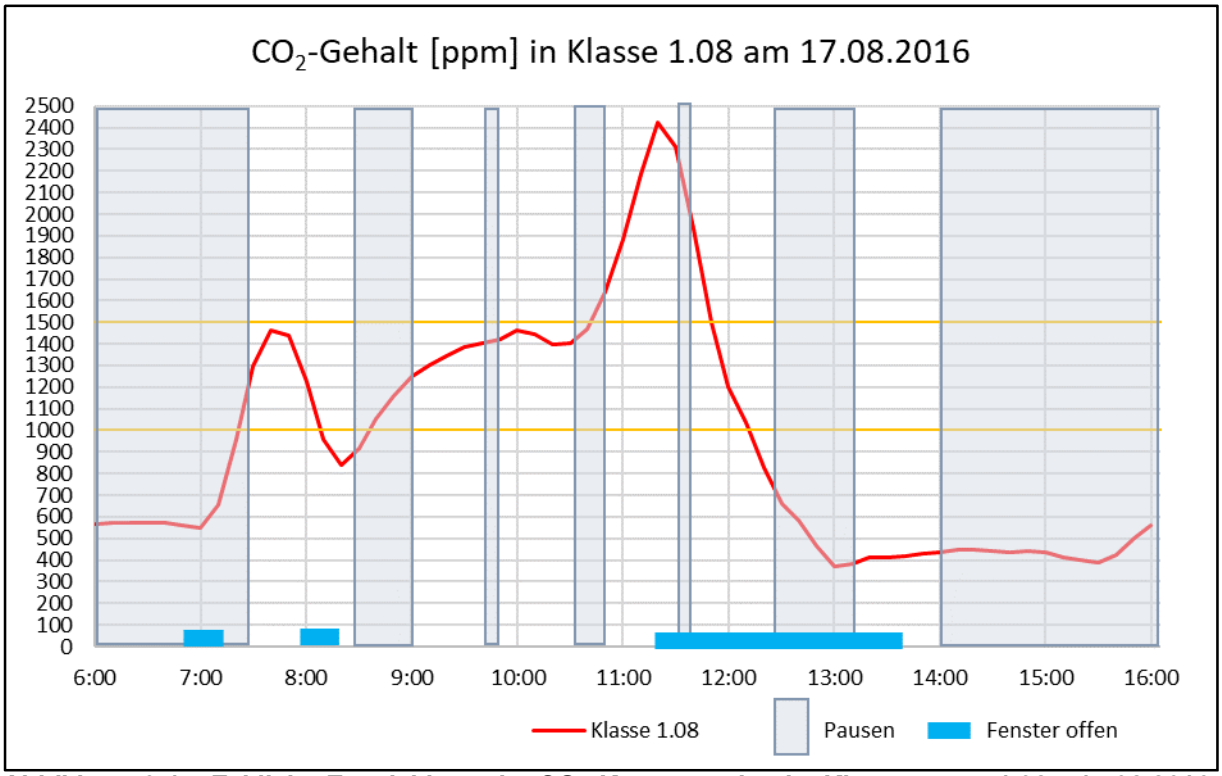


**Abbildung 6-17: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 1.08 – 17.08.2016**

Es ist bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen, dass der Messfühler einen Messfehler aufweist. In der Realität sind die Messwerte außerhalb der Nutzungszeit etwas besser, innerhalb etwas schlechter, siehe Kapitel 6.2.

**Beispieltage Klassenraum 2.01**

Auch im Klassenraum 2.01 war Mittwoch, der 17.08.2016 der Tag mit dem höchsten $CO_2$-Messwert im 10-Minuten-Mittel – welcher sich mit Eintreffen der Nutzer ab 7 Uhr zügig bis 8:10 Uhr auf 1592 ppm steigerte, siehe Abbildung 6-18. Die Klasse war wahrscheinlich gemäß Plan von 7:30 bis 12:15 Uhr anwesend. Gut sichtbar sind die fallenden Werte in den beiden großen Pausen nach der 1. und nach der 5. Stunde. Der VSR blieb in der Zeit offen. Eine Fensteröffnung wurde nur von ca. 11 bis 12 Uhr beim mittleren Fenster registriert (Startwert: 1100 ppm).

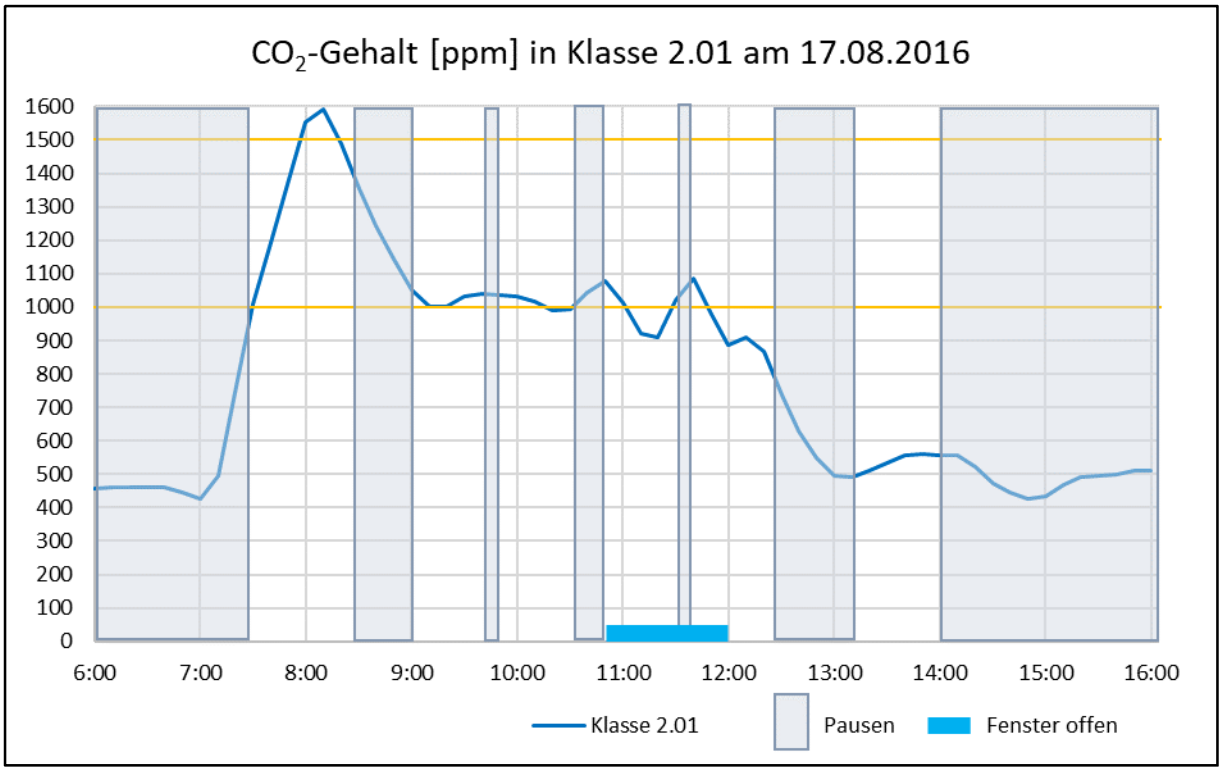


**Abbildung 6-18: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 2.01 – 17.08.2016**

Da die Messwerte in Raum 2.01 Anfang März 2017 höher als sonst ausfielen, wurde für eine nähere Betrachtung Freitag, der 03.03.2017 ausgewählt, an dem die Klasse in der 2. und 3. Stunde gemäß Plan abwesend ist. Abbildung 6-19 zeigt den Tagesverlauf anhand der 10-Minuten-Mittelwerte.

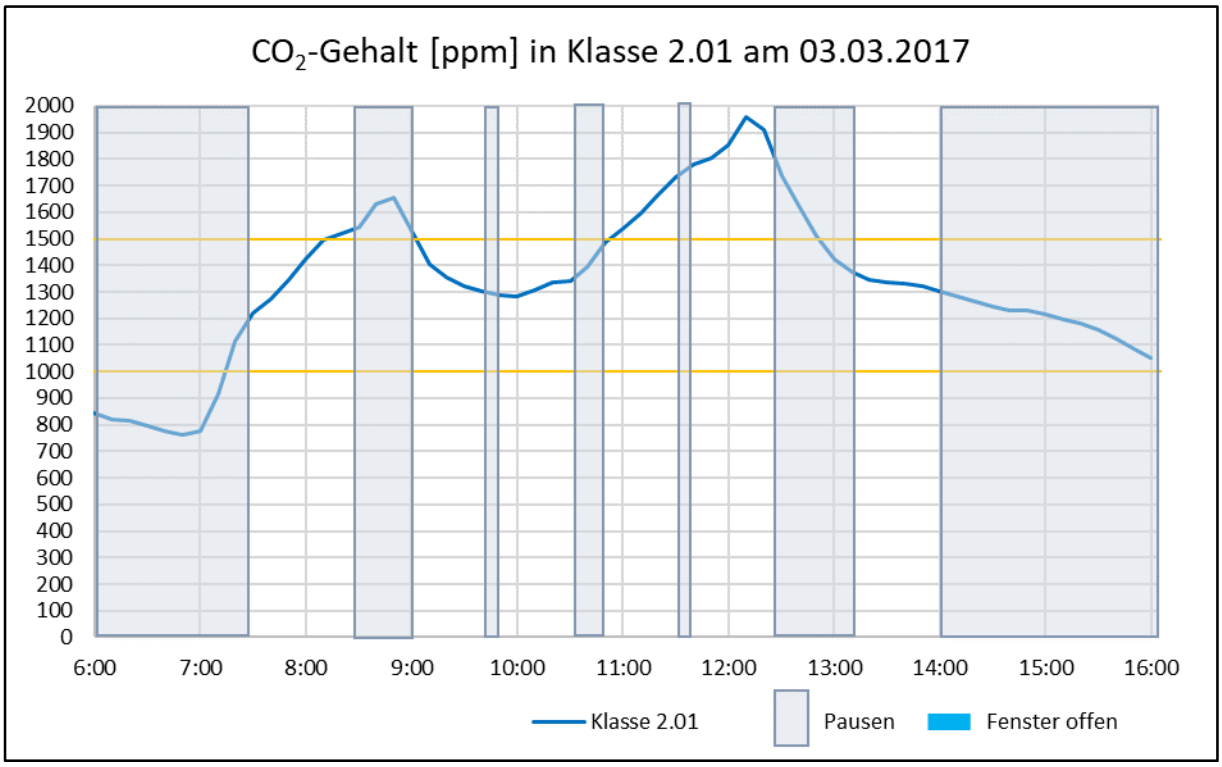


**Abbildung 6-19: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 2.01 – 03.03.2017**

Mit dem Eintreffen der Schüler steigt der $CO_2$-Gehalt auf 1655 ppm um 8:50 Uhr. In der 2. Stunde scheinen die Kinder tatsächlich abwesend zu sein, denn der Wert sinkt moderat auf etwa 1300 ppm, um dann in der 3. Stunde leicht und mit Beginn der 4. Stunde wieder deutlich anzusteigen. Um 12:10 Uhr ist das Tagesmaximum von 1960 ppm erreicht. Nach der Mittagspause hat sich ein Wert von ca. 1350 ppm eingestellt, der im Nachmittagsverlauf und über das Wochenende sehr langsam auf 727 ppm (Montag 3:50 Uhr) abfällt. Erst mit Einschalten der Lüftungsanlage gibt es einen signifikanten Abfall auf einen $CO_2$-Gehalt entsprechend Außenluftqualität. Dies bestätigt die sehr hohe Luftdichtheit des Gebäudes.

**Einfluss der Präsenzsteuerung**

Es stellt sich die Frage, ob die Präsenzsteuerung der Lüftungsanlage dazu führt, dass die $CO_2$-Konzentration im Klassenraum durch die Abwesenheit der Klasse auf einem zu hohen Niveau verharrt ohne bis zur Rückkehr der Nutzer abgelüftet zu werden. Im Rahmen des Monitorings wird die Stellung der Volumenstromregler erfasst. Jedoch handelt es sich nicht um deren realen Öffnungsgrad, sondern um den Anforderungswert aus der Lüftungsregelung. Werte zwischen 0 und 100 % resultieren demnach aus Öffnungs- und Schließvorgängen.

Die folgende Abbildung 6-20 stellt die $CO_2$-Gehalte der Klassenräume im 10-Minuten-Mittel in Abhängigkeit von der erfassten Stellung der Volumenstromregler dar. Es wird deutlich, dass es in Raum 1.08 (wenige) Zeiten gibt, in denen trotz geöffneter Regler der $CO_2$-Gehalt über die empfohlenen Grenzwerte steigt. Für den Einfluss der Präsenzsteuerung ist insbesondere die geschlossene Stellung (0 %) interessant, da hier abgelesen werden kann, wie häufig die Regler trotz schlechterer Luftqualität geschlossen waren, z. B. weil die Nachlaufzeit zu kurz war.

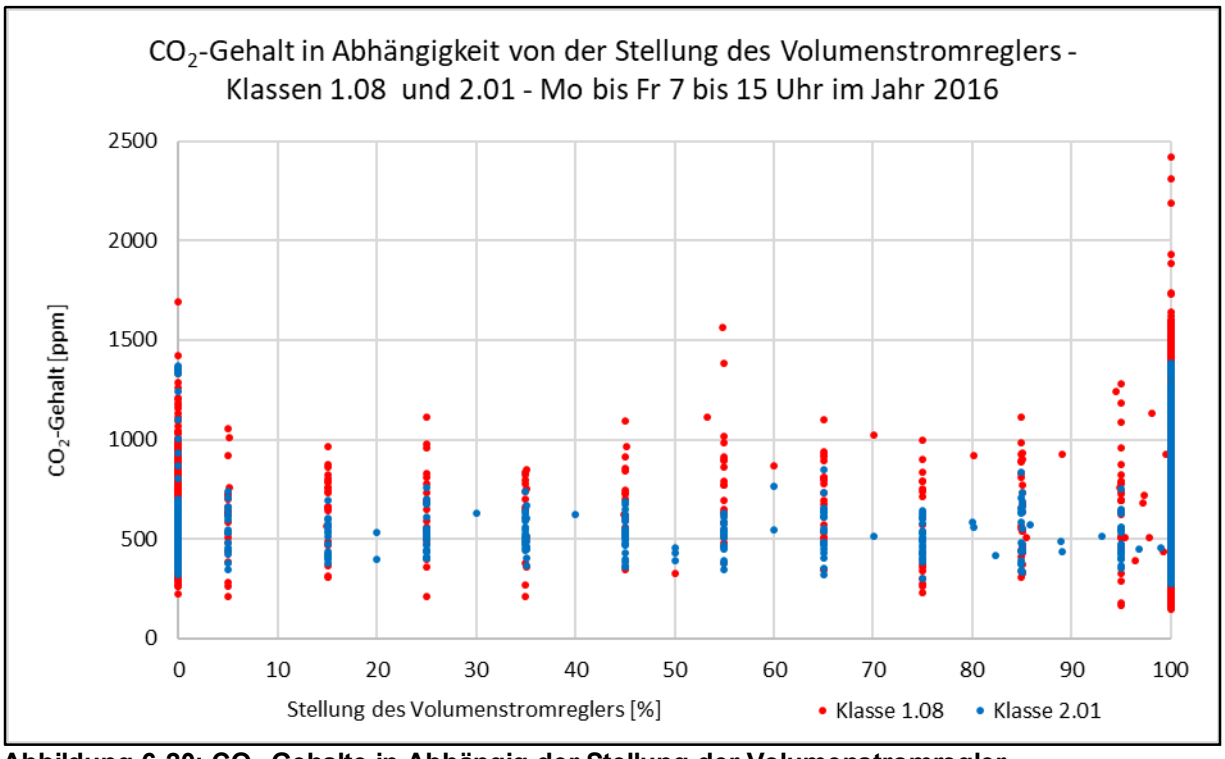


**Abbildung 6-20: $CO_2$-Gehalte in Abhängig der Stellung der Volumenstromregler**

In den folgenden Diagrammen Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 sind nur die $CO_2$-Gehalte im 10-Minuten-Mittel abgebildet, die gleichzeitig mit einer Stellung des jeweiligen Volumenstromreglers von 0 bis 25 % einhergehen. Die Grenze von 25 % wurde hier gewählt, um mögliche Öffnungs- und Schließvorgänge innerhalb der 10 Minuten mit einzubeziehen.

Hieraus wird ersichtlich, dass sich das Schließen der Volumenstromregler nur in sehr wenigen Fällen negativ auf die Luftqualität auswirkt. Die erhöhten Werte am Montag, dem 14.03.2016 schließen sich an das Wochenende mit dem Tag der offenen Tür an, bei dem die Lüftungsanlage ausgeschaltet blieb und hohe $CO_2$-Gehalte erzielt wurden (siehe Kapitel 6.6).

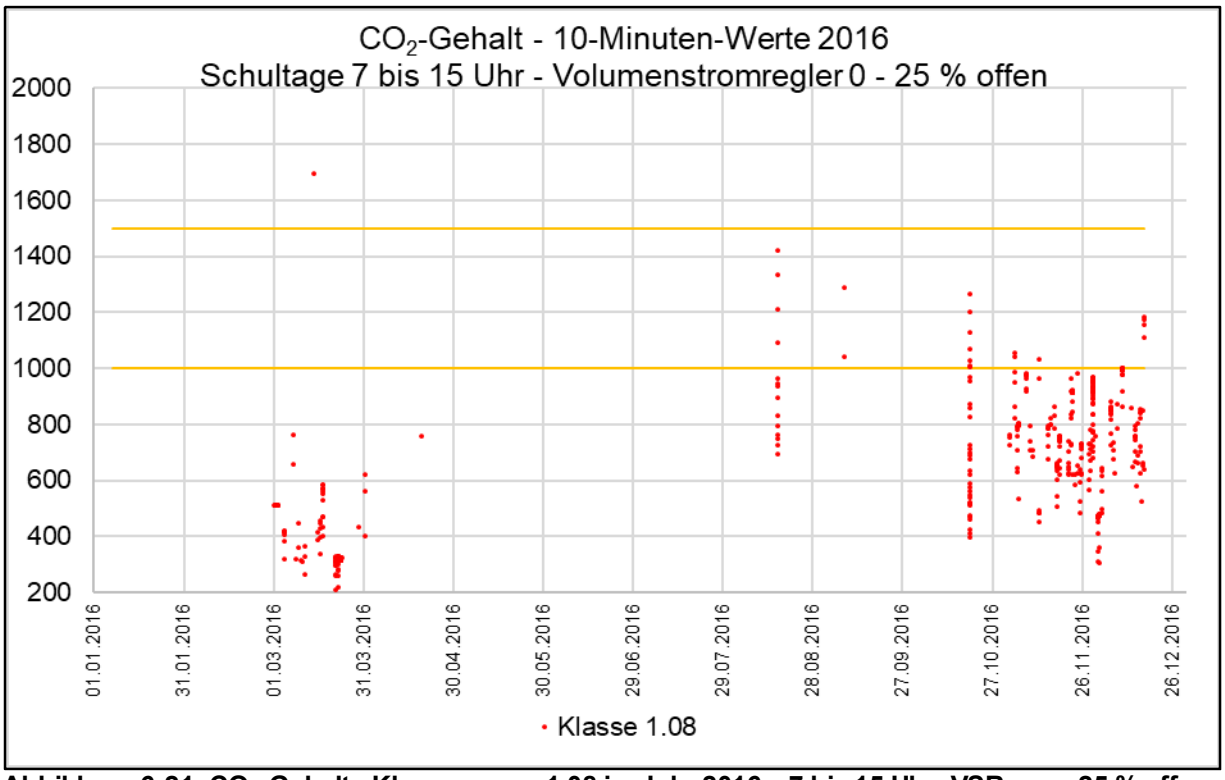


**Abbildung 6-21: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr; VSR max. 25 % offen**

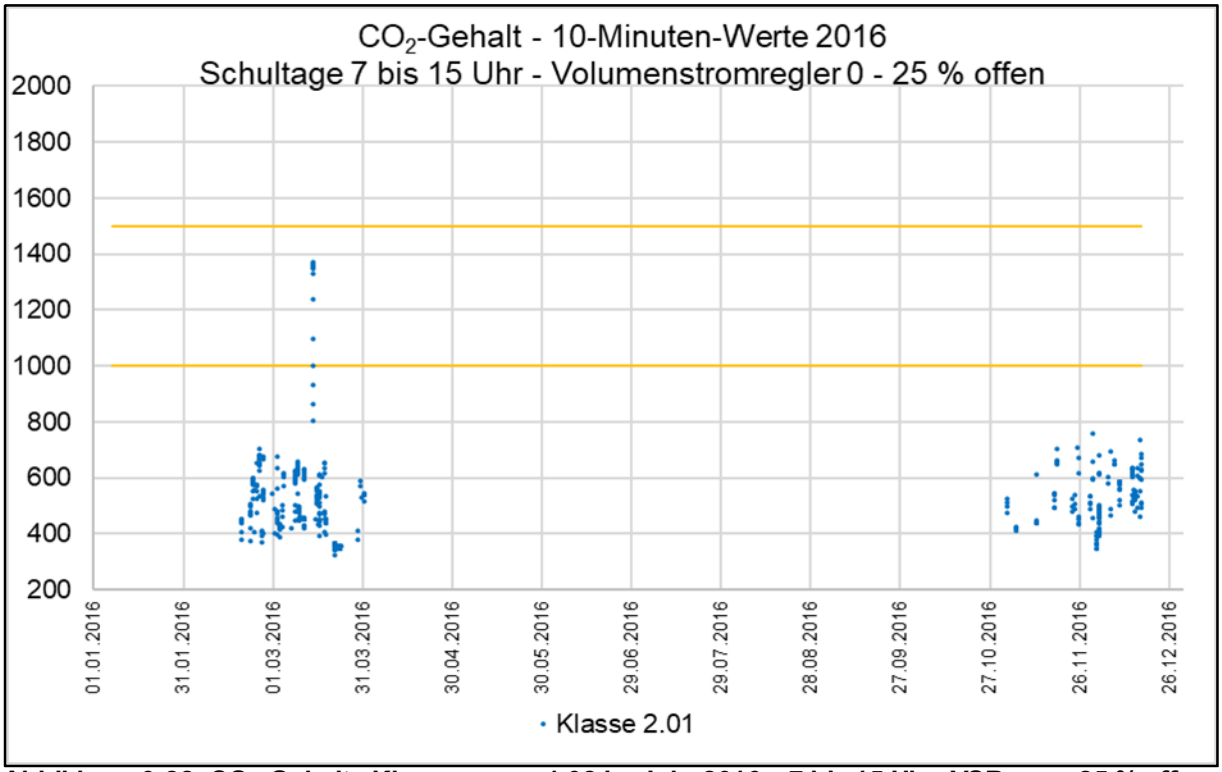


**Abbildung 6-22: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr; VSR max. 25 % offen**

## 6.4 Häufigkeitsverteilung Aula

Zur Funktion: ein $CO_2$-Sensor in der Aula registriert Veränderungen der $CO_2$-Konzentration. Die zentrale Regelung berechnet daraufhin für die örtlichen Volumenstromregler ein Signal zwischen 0 V (minimaler Volumenstrom) und 10 V (maximaler Volumenstrom) abhängig von der Luftbelastung. Eine Raumtemperaturregelung (hier tatsächlich eine Einzelraumregelung) ist im Sinne einer Maximalauswahl überlagert. Die beiden folgenden Diagramme Abbildung 6-23 und Abbildung 6-24 lassen sofort erkennen, dass die $CO_2$-Gehalte im gesamten Jahr äußerst niedrig sind.

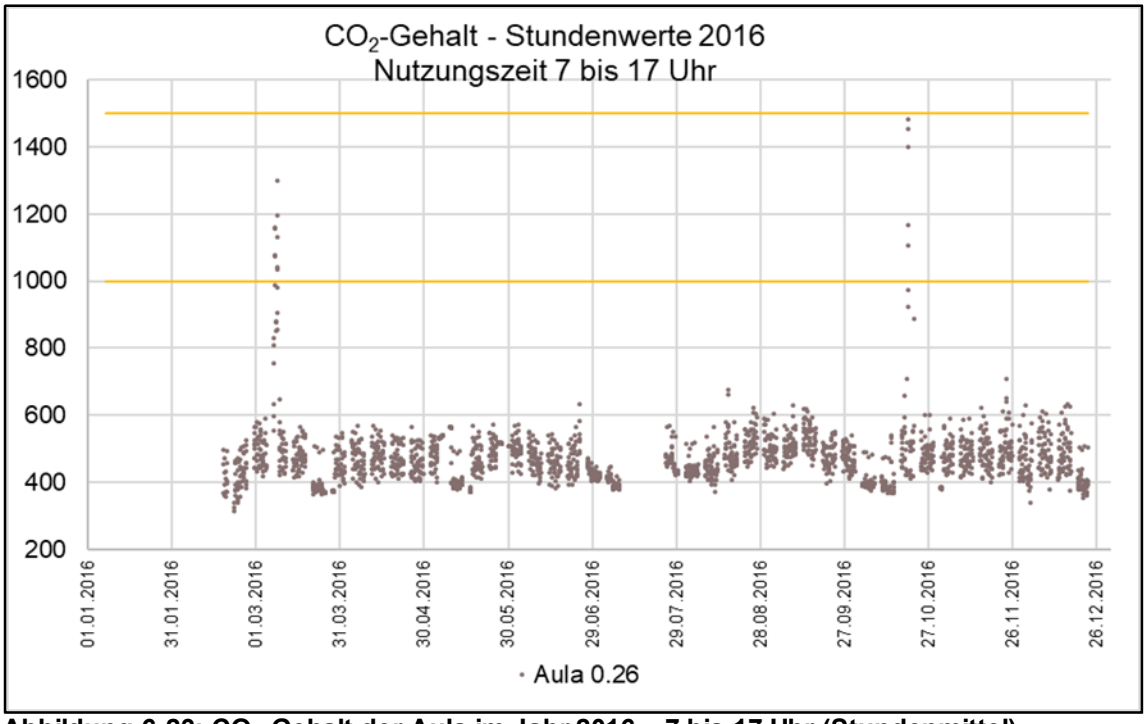


**Abbildung 6-23: $CO_2$-Gehalt der Aula im Jahr 2016 – 7 bis 17 Uhr (Stundenmittel)**

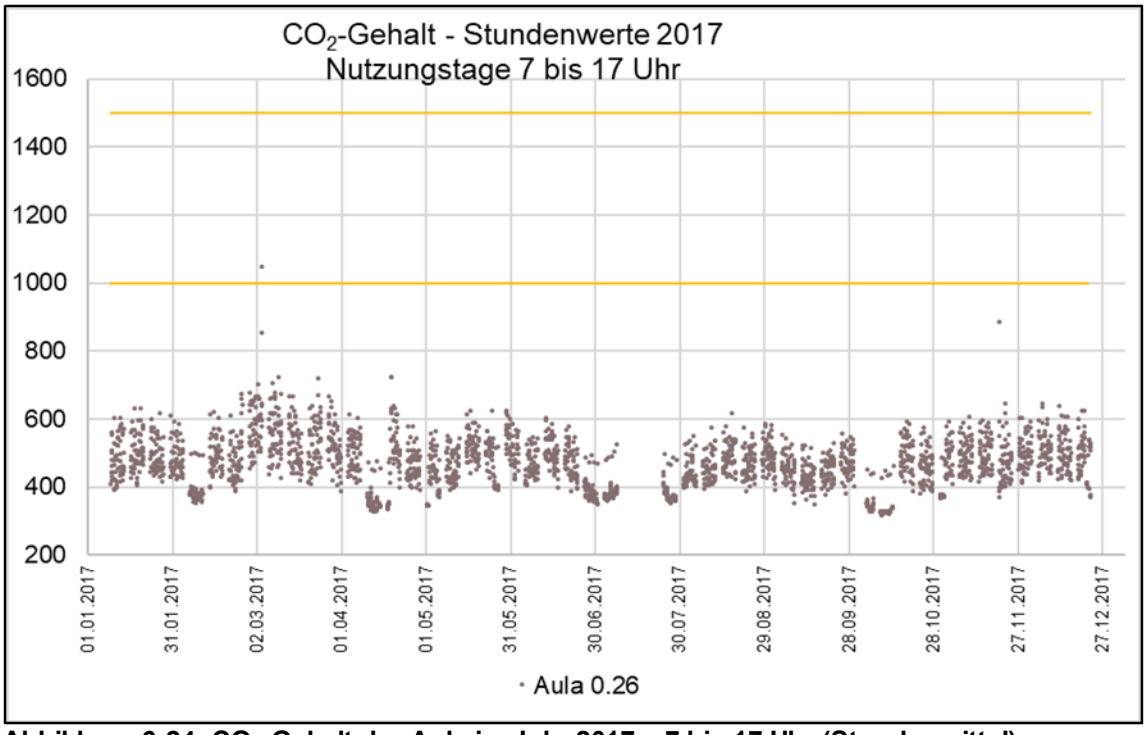


**Abbildung 6-24: $CO_2$-Gehalt der Aula im Jahr 2017 – 7 bis 17 Uhr (Stundenmittel)**

Der Mittelwert während der Nutzungszeit lag bei gerade einmal 474 ppm (Jahr 2016) bzw. 472 ppm (Jahr 2017). Lediglich am 08.03.2016 (RLT-Anlage lief nur von 15 bis 17 Uhr), 19.10.2016 (RLT-Anlage lief nur von 4 bis 10 Uhr) und am 03.03.2017 lassen sich überhaupt Übertretungen der Pettenkofer-Grenze innerhalb der Nutzungszeit, welche hier großzügig mit 7 bis 17 Uhr angesetzt wurde, ablesen.

Abbildung 6-25 zeigt als Beispielwoche die Woche, in der im Klassenbereich erhöhte Werte zu verzeichnen waren – vom 15.08. bis 19.08.2016. Die rötlich markierten Bereiche sind die Zeiten, in denen die Lüftungsanlage der Gebäudeteils A komplett ausgeschaltet war. So auch am 17.08.2016, der sich im Gebäudeteil B in erhöhten $CO_2$-Werten äußerte. Es zeigt sich täglich gegen 14 Uhr eine leichte Spitze, wobei die maximal gemessenen 700 ppm weit unter der Pettenkofer-Grenze bleiben.

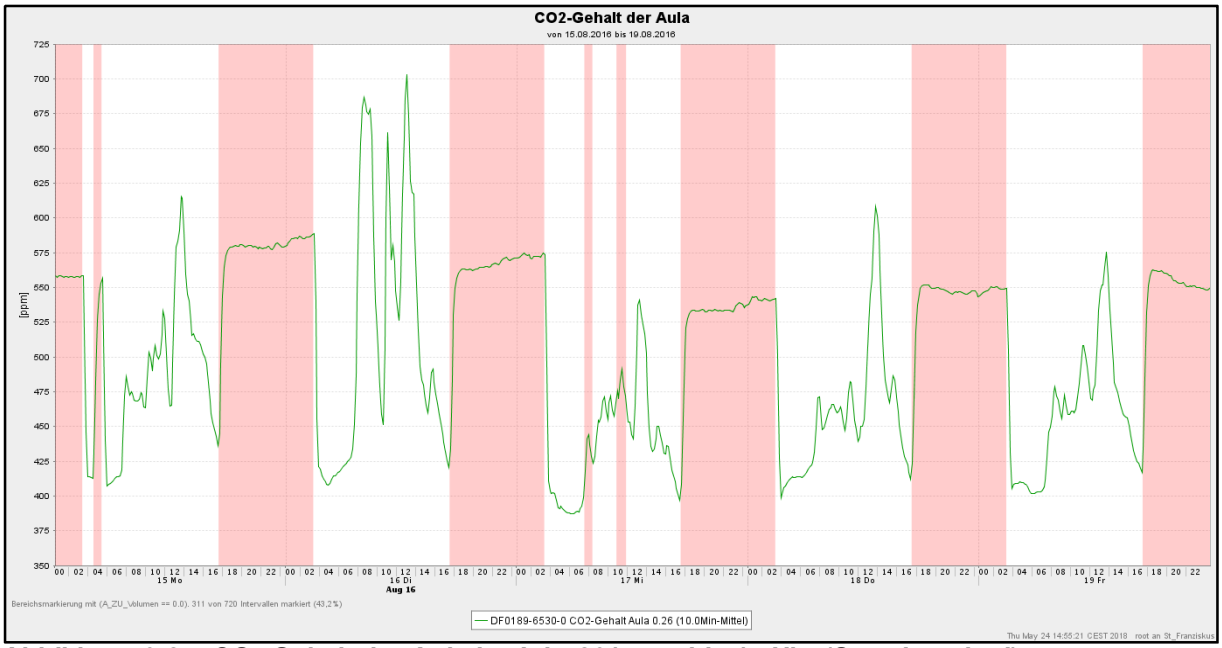


**Abbildung 6-25: $CO_2$-Gehalt der Aula im Jahr 2017 – 7 bis 17 Uhr (Stundenmittel)**

Abbildung 6-26 zeigt die Dauerlinie zusammengefasst für die Jahre 2016 und 2017, jedoch ohne Beschränkung auf die Nutzungszeit von 7 bis 17 Uhr.

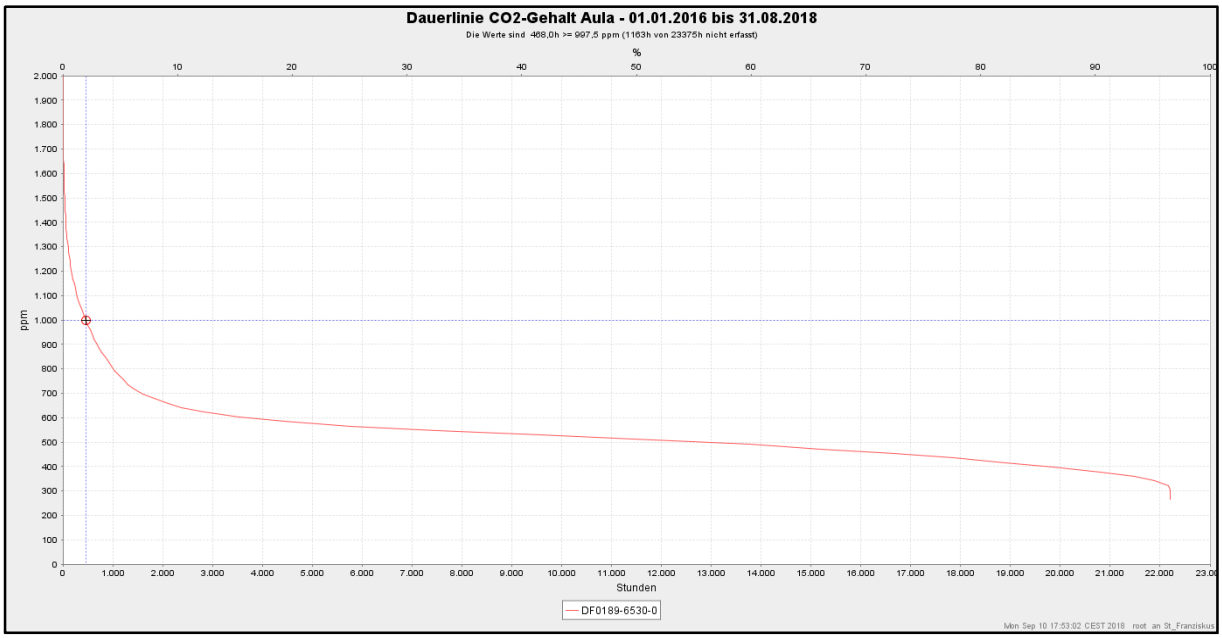


**Abbildung 6-26: Dauerlinie $CO_2$-Gehalt Aula für die Jahre 2016 und 2017**

## 6.5 Befragungen

Wie in Kapitel 3.13 berichtet, empfinden die im Klassenraum 1.08 befragten Schüler den Raum häufig als zu warm. Hierdurch entsteht auch das subjektive Gefühl, der Raum sei zu stickig – was nicht objektiv hohe $CO_2$-Werte meint. Es hat sich daher eingebürgert, dass die Tür zum Flur nach Möglichkeit – auch während der Unterrichtszeit – offen gelassen wird, um für einen Luftaustausch zu sorgen. Die (kühlere) Luft aus dem Flur wird als frischer empfunden.

## 6.6 Problemfälle und Verbesserungsansätze

### Klassenräume

Die Luftqualität der Klassenräume ist mit $CO_2$-Mittelwerten während der Nutzungszeit von 676 bis 826 ppm als sehr gut einzustufen. Überschreitungen der Pettenkofer-Grenze traten zwar in bis zu 41 % der Nutzungszeit auf, jedoch blieben die Werte dann meist unter 1500 ppm, was – insbesondere verglichen mit manuell belüfteten Schulen – einer guten Luftqualität entspricht. Trotz der schwierigen Messwertauswertung (Kapitel 6.1) aufgrund der ungünstigen Fühlerpositionierung ergeben sich sehr wahrscheinlich Messwerte, die die Luftqualität konventioneller Schulen deutlich übersteigen. Da das regelungstechnische Konzept sowie die Anlagenauslegung identisch für alle Klassenräume sind, sind die Ergebnisse auf den Rest des Klassentraktes übertragbar.

Es ist davon auszugehen, dass alle südorientierten Räume die am Beispiel des Raumes 1.08 dargestellten Probleme mit erhöhten Raumtemperaturen haben (Kapitel 3.2) und die Nutzer die Luft als stickiger empfinden, wie in der Nutzerbefragung angemerkt wurde. Nach der beschriebenen Lüftungsoptimierung vom 5.6.2018 wird zunächst abgewartet, wie die Werte sich entwickeln. Sollte für die Angleichung der Temperaturen zwischen Nord und Süd eine leichte Absenkung der Volumenströme im Süden erfolgen (Kapitel 3.16), könnte dies eine Verschlechterung der $CO_2$-Gehalte in den Südräumen zur Auswirkung haben.

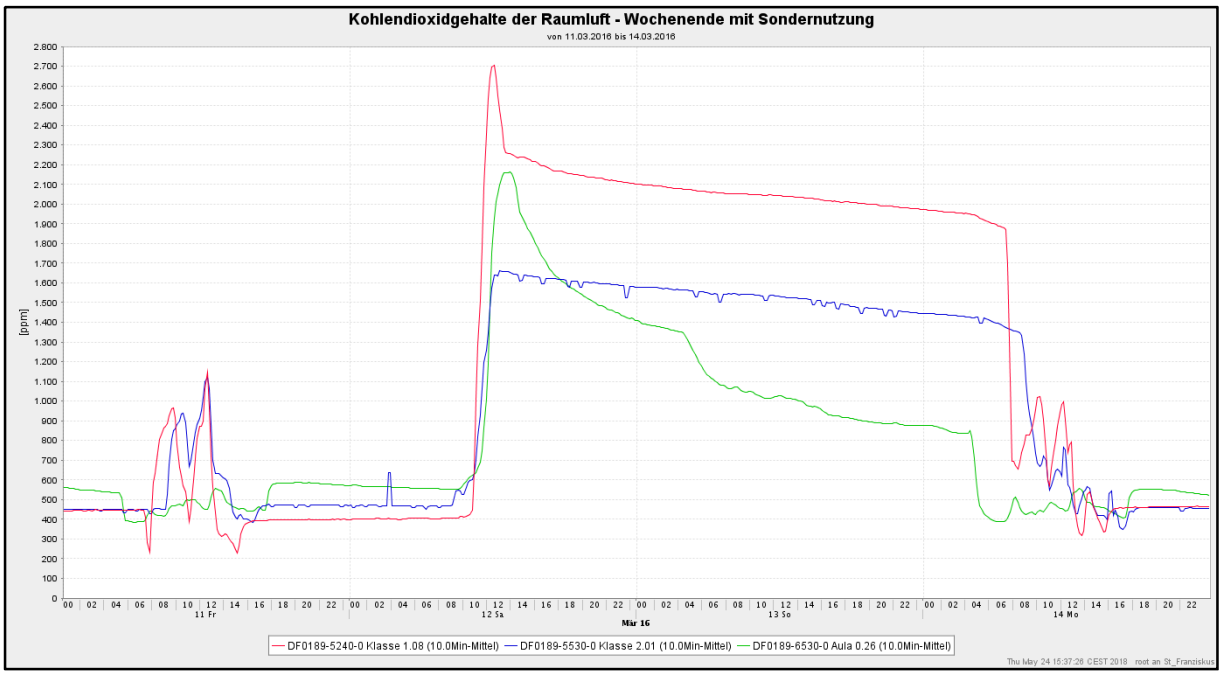


**Abbildung 6-27: $CO_2$-Gehalte am Wochenende des 12./13.03.2016**

Über die reguläre Nutzungszeit hinaus gab es in den drei untersuchten Räumen am Wochenende vom 12./13.03.2016 sehr hohe $CO_2$-Konzentrationen. Am 12.03.2016 fand der Tag der offenen Tür statt, an dem die Lüftungsanlage nicht manuell eingeschaltet wurde. Die Werte gingen ab Samstag 10 Uhr sprunghaft auf Maxima von 1658 ppm (2.01), 2150 ppm (0.26) bzw. 2507 ppm (1.08) hoch und fielen ab 12 Uhr wieder langsam ab.

Erst mit Einsetzen der morgendlichen Lüftung am Montag normalisierten sich die Werte merklich. Da die Anlage primär zeitgesteuert ist, kam es durch die Anwesenheit der Nutzer am Samstag nicht zu einer automatischen Aktivierung. Für künftige Veranstaltungen sollte demnach an ein händisches Einschalten der beiden Lüftungsgeräte gedacht werden.

**Aula**

In der Aula sind die $CO_2$-Gehalte meist so gering, dass von einer lüftungstechnischen Überversorgung gesprochen werden kann. Seit langem ist bekannt, dass die Aula auf einer zu hohen Grundleistungsstufe läuft, d. h. der werksseitig eingestellte minimale Volumenstrom am Regler zu hoch gewählt wurde (wahrscheinlich 50 % Öffnungsgrad). Diese hohen Volumenströme von max. 6500 m³/h sind nur bei hoher Belegungsdichte notwendig und haben hohe Ventilatorstromkosten zur Folge. Leider ist es während der Projektlaufzeit nicht gelungen, eine Fachfirma zur Nachkorrektur des Minimalwertes zu engagieren. Die ausführende Firma sah sich nicht in der Lage, das Problem abzustellen. Der Schulträger möchte nun die notwendige Volumenstromregler-Fernbedienung anschaffen, die Regulierung wird dann durch die Hochschule Magdeburg-Stendal vorgenommen. Siehe Abschlussbericht Teil 7 – Lüftung.

## *6.7 Verallgemeinerung und Fazit*

Die Messwerte für $CO_2$ in den beiden intensiv untersuchten Klassenräumen und der Aula zeigen sehr gute Ergebnisse. Innerhalb der Anwesenheit von Personen ergeben sich nur vernachlässigbar geringe Überschreitungen des Grenzwertes von 1500 ppm – im Jahr 2016 unter 1 % der Zeit, im Jahr 2017 unter 4 %, siehe Tabelle 6-2.

Es ist zu beachten: Messfehler aufgrund einer zu hohen Luftgeschwindigkeit am Messort sowie Absolutfehler (falsche Fühlerkalibrierung o. ä.) wurden nicht herausgerechnet, siehe Kapitel 6.2. Die Zahlenwerte für den Raum 2.01 werden als sicherer und damit repräsentativer eingeschätzt.

Es ist zu beachten: Messfehler aufgrund einer zu hohen Luftgeschwindigkeit am Messort sowie Absolutfehler (falsche Fühlerkalibrierung o. ä.) wurden bei der Auswertung der Daten festgestellt, aber nicht herausgerechnet. Sie betrafen vor allem den Raum 1.08. Die Zahlenwerte für den Raum 2.01 werden als sicherer und damit repräsentativer eingeschätzt.

**Tabelle 6-2: Anzahl der Nutzungsstunden mit erhöhten $CO_2$-Konzentrationen**

| | Jahr 2016 | | Jahr 2017 | | 01.01.-31.08.2018 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | > 1000 ppm [h] | > 1500 ppm [h] | > 1000 ppm [h] | > 1500 ppm [h] | > 1000 ppm [h] | > 1500 ppm [h] |
| **Raum 1.08** | 307 | 3 | 515 | 67 | 332 | 60 |
| | 18,0% | 0,2% | 29,5% | 3,8% | 30,2% | 5,5% |
| **Raum 2.01** | 125 | 0 | Datenlücken | | 445 | 89 |
| | 7,3% | 0,0% | | | 41% | 8% |
| **Aula 0.26** | 14 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| | 0,7% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,1% | 0,0% |

Die Bemessung der Lüftungsanlage mit nur 18 m³/h je Schüler war demzufolge ausreichend. Und auch das Regelungskonzept – allein nach Präsenzmelder entweder offene oder geschlossene Volumenstromregler – war zielführend. Nach einer Einregulierungsphase im Jahr 2015 gab es keine Nutzerbeschwerden mehr hinsichtlich der Luftqualität.

Das Regelungskonzept der Aula ist grundsätzlich empfehlenswert, allerdings nur mit einem ausreichend gering eingestellten Minimalvolumenstrom. Da dies in der St. Franziskus-Grundschule nicht der Fall ist, werden innerhalb der Nutzungszeit nie die maximal zulässigen $CO_2$-Grenzwerte erreicht, sodass ein automatisches Nachregulieren der Anlage nicht stattfindet und somit nicht untersucht werden kann. Nach der Anpassung des minimalen Volumenstromes werden die $CO_2$-Gehalte steigen, jedoch aufgrund der fortbestehenden Grundlüftung im akzeptablen Bereich bleiben.

# 7 Fensteröffnung

Dieser Abschnitt beschreibt zunächst das Messkonzept zu den Fensteröffnungen, geht jedoch auch auf die aufgedeckten Probleme hinsichtlich der Plausibilität der Daten ein. Das Fensteröffnungsverhalten der Nutzer in den drei Referenzräumen 1.08, 2.01 und 1.04 wird untersucht.

## *7.1 Messorte und Messtechnik*

In den Klassenräumen 1.08 und 2.01 sowie im Lehrerzimmer 1.04 wird detailliert das Fensteröffnungsverhalten erfasst. Dies sind die Räume, in denen auch die Temperaturmessungen in den Kastenfenstern erfolgen (Siehe Abschlussbericht Teil 6 – Baukonstruktion). Hierzu wurden jeweils oben am inneren und äußeren Flügel Magnetkontakte angebracht.

Messkonzept:

- mit der Messung können für die 3 Räume die Messdaten im Scheibenzwischenraum korreliert werden – es ergibt sich eine Abhängigkeit der Temperatur je nach Betätigung der Fenster (siehe Abschlussbericht Teil 6)
- außerdem ergibt sich zusammen mit der Raumtemperatur und ggf. $CO_2$ und Raumfeuchte ein Bild über das Lüftungsverhalten der Nutzer

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Fenstermessungen. Dabei stehen die Bezeichnungen links, Mitte und rechts jeweils für die Lage des Fensters im Raum bezogen auf die Ansicht von innen.

Die Kontakte sind innen und außen jeweils in Reihe geschaltet. Für die Fensterkontakte werden einerseits die Rohdaten in bits gemeldet. Die bit-Wertigkeiten der Fensterkontakte sind die Zweier-Potenzen: Bit 0 = 1, Bit 1 = 2, Bit 2 = 4, Bit 3 = 8, Bit 4 = 16, usw. Plausible Werte einer bit-Reihe könnten z. B. 0, 2, 8 und 10 (aus 2+8) lauten (siehe Tabelle 7-2). 10 hieße in dem Fall, dass Bit 1 + Bit 3 geschlossen sind. Lautet der Wert 0, so ist mindestens ein Flügel innen und ein Flügel außen offen, evtl. aber auch jeweils beide.

Da keine exakte Dokumentation mitgeliefert wurde, und um die Auswertung zu erleichtern, werden die Werte durch Fa. GEDES bereits jeweils für das Innen- und Außenfenster in „zu“ und „offen“ übersetzt.

**Abbildung 7-1: Fensterkontakte**

**Tabelle 7-1: Messpunkte bezüglich Fensteröffnungsverhalten und Temperaturen**

| Kürzel | Ein-heit | Gruppe | Unter-gruppe | Beschreibung |
|---|---|---|---|---|
| **Öffnungszustand** | | | | |
| CF0588-52D0-0 | bits | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_links |
| CF0588-52D0-8 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_links innen |
| CF0588-52D0-9 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_links außen |
| CF0588-52D2-0 | bits | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_mitte |
| CF0588-52D2-8 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_mitte innen |
| CF0588-52D2-9 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_mitte außen |
| CF0588-52D4-0 | bits | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_rechts |
| CF0588-52D4-8 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_rechts innen |
| CF0588-52D4-9 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_108_rechts außen |
| CF0588-55D0-0 | bits | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_links |
| CF0588-55D0-8 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_links innen |
| CF0588-55D0-9 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_links außen |
| CF0588-55D2-0 | bits | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_mitte |
| CF0588-55D2-8 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_mitte innen |
| CF0588-55D2-9 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_mitte außen |
| CF0588-55D4-0 | bits | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_rechts |
| CF0588-55D4-8 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_rechts innen |
| CF0588-55D4-9 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung_Klasse_201_rechts außen |
| CF0588-56D0-0 | bits | RAU | FEK | Fensteroeffnung__Lehrerzimmer_104_Ost |
| CF0588-56D0-8 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung__Lehrerzimmer_104_Ost innen |
| CF0588-56D0-9 | | RAU | FEK | Fensteroeffnung__Lehrerzimmer_104_Ost außen |
| **Temperaturen** | | | | |
| DF0220-2592-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_linkes_Fenster_links_oben |
| DF0220-2594-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_linkes_Fenster_links_unten |
| DF0220-2596-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_linkes_Fenster_rechts_oben |
| DF0220-259A-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_linkes_Fenster_rechts_unten |
| DF0220-259C-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_mittleres_Fenster_links_oben |
| DF0220-259E-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_mittleres_Fenster_links_unten |
| DF0220-5292-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_mittleres_Fenster_rechts_oben |
| DF0220-5294-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_mittleres_Fenster_rechts_unten |
| DF0220-5296-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_rechtes_Fenster_links_oben |
| DF0220-529A-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_rechtes_Fenster_links_unten |
| DF0220-529C-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_rechtes_Fenster_rechts_oben |
| DF0220-529E-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_108_rechtes_Fenster_rechts_unten |
| DF0220-5592-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_mittleres_Fenster_rechts_unten |
| DF0220-5594-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_rechtes_Fenster_links_unten |
| DF0220-5596-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_rechtes_Fenster_rechts_unten |
| DF0220-559A-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_mittleres_Fenster_rechts_oben |
| DF0220-559C-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_rechtes_Fenster_links_oben |
| DF0220-559E-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_rechtes_Fenster_rechts_oben |
| DF0220-5692-0 | °C | BAU | KFE | Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost |
| DF0220-5694-0 | °C | BAU | KFE | Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost |
| DF0220-569C-0 | °C | BAU | KFE | Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost |
| DF0220-569E-0 | °C | BAU | KFE | Fenstertemperatur_Lehrerzimmer_104_Ost |
| DF0321-5550-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_linkes_Fenster_links_unten_Temperatur |
| DF0321-5570-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_linkes_Fenster_rechts_oben |
| DF0321-5572-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_linkes_Fenster_links_oben |
| DF0321-5574-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_linkes_Fenster_rechts_unten |
| DF0321-5588-0 | °C | BAU | KFE | Klasse_201_mittleres_Fenster_links_oben |
| **Feuchten** | | | | |
| DF0321-5588-1 | % | BAU | KFE | Klasse_201_mittleres_Fenster_links_oben |
| DF0321-558C-1 | % | BAU | KFE | Klasse_201_mittleres_Fenster_links_unten |
| **Außenklima** | | | | |
| DF0321-7002-0 | °C | WET | WET | Aussentemperatur |
| DF0384-7001-0 | W/m² | WET | WET | Globalstrahlung_der_Wetterstation |

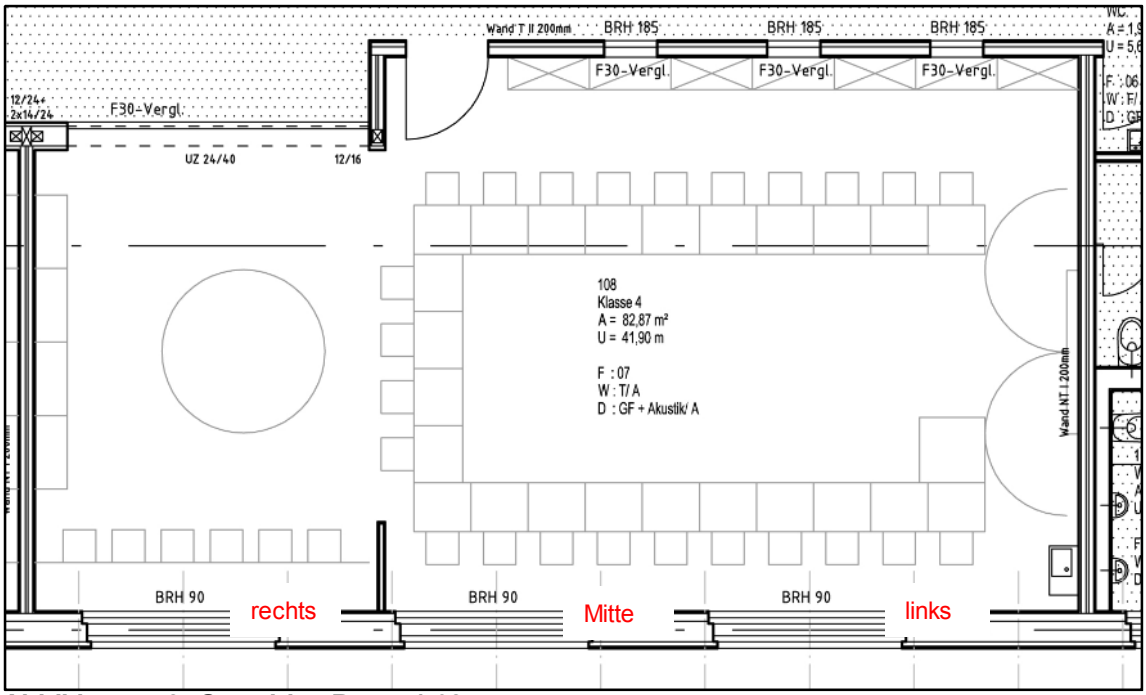


**Abbildung 7-2: Grundriss Raum 1.08**

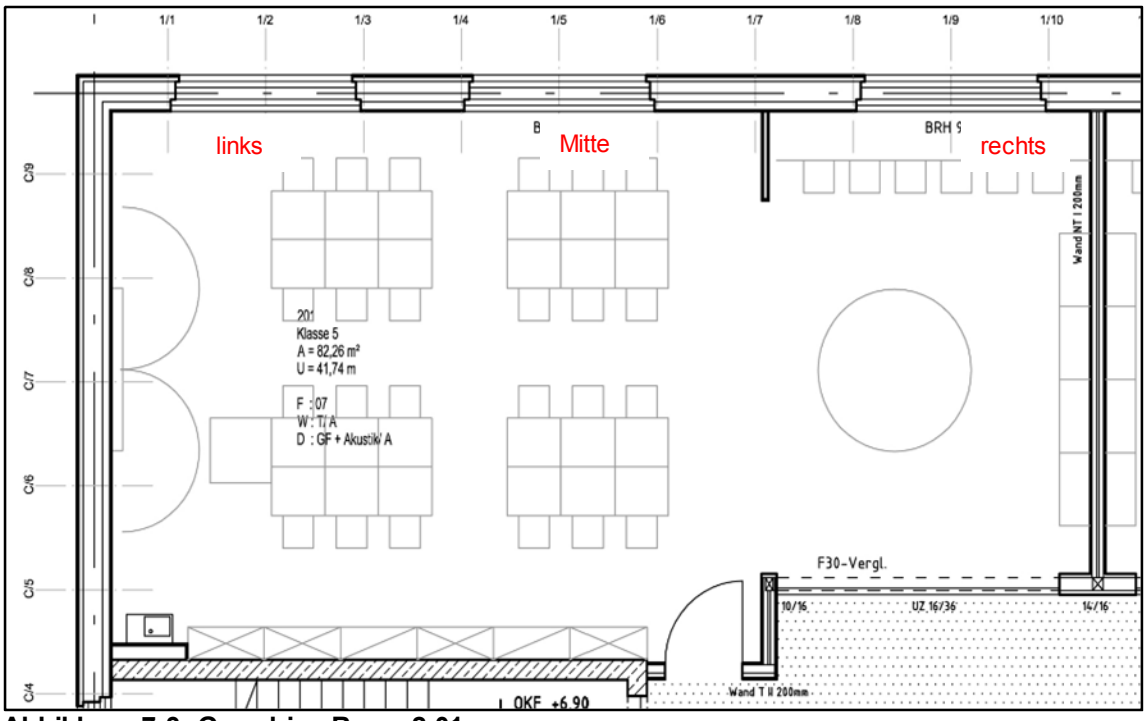


**Abbildung 7-3: Grundriss Raum 2.01**

Während eines Vor-Ort-Termins im Raum 1.08 wurden am 29.09.2017 erhebliche Unstimmigkeiten beim Monitoring aller Fensterkontakte der drei Kastenfenster in Raum 1.08 festgestellt. Alle Innenflügel der Kastenfenster waren an dem Tag offen und alle Außenflügel zu. Bei einem anschließenden Blick auf die entsprechende Tagesdatei zeigte sich jedoch, dass das Monitoring für diesen Tag genau gegenteilige Zustände meldete.

Daraufhin wurden am 05.01.2018 alle in Tabelle 7-1 aufgeführten Kontakte systematisch überprüft. In 20-minütigem Wechsel wurden sämtliche Öffnungskombinationen hergestellt und mit der csv-Datei aus dem Monitoring-Server abgeglichen.

Die grün markierten Zellen in Tabelle 7-2 bis Tabelle 7-4 zeigen korrekte Werte, die rot markierten Zellen zeigen falsche Werte.

Für alle drei Fenster des Raumes 1.08 konnten dem Monitoring wenig plausible Ergebnisse entnommen werden, die die zuvor vorgenommenen Einstellungen abbilden. Sowohl die Bit-Wertigkeiten änderten sich nicht hinreichend als auch die automatischen Übersetzungen in „zu“ oder „offen“, siehe Tabelle 7-2.

Im Raum 2.01 hingegen waren die Ergebnisse beim linken Fenster plausibel und stimmten mit den vorgenommenen Einstellungen weitestgehend überein. Eine Besonderheit des mittleren Fensters in 2.01 ist, dass die Zustandsbeschreibungen innen und außen stimmen, obwohl die Bit-Angaben fehlen (Tabelle 7-3). Für das rechte Fenster gab es keine Daten.

**Tabelle 7-2: Abgleich der Fensterkontakte mit dem Monitoring – Raum 1.08**

| Zeit | Einstellung | Soll | 108 li | 108 li innen | 108 li außen | 108 Mi | 108 Mi innen | 108 Mi außen | 108 re | 108 re innen | 108 re außen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 05.01.2018 12:50 | alle zu | 10 | 10 | zu | zu | 10 | zu | zu | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 13:00 | | 10 | 10 | zu | zu | 10 | zu | zu | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 13:10 | innen offen, außen zu | 8 | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 13:20 | | 8 | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 13:30 | | 8 | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 13:40 | | 8 | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 13:50 | | 8 | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 14:00 | | 8 | 8 | offen | zu | 8 | offen | zu | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 14:10 | innen zu, außen offen | 2 | 8 | offen | zu | 8 | offen | zu | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 14:20 | | 2 | 8 | offen | zu | 8 | offen | zu | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 14:30 | alle offen | 0 | 8 | offen | zu | 0 | offen | offen | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 14:40 | | 0 | 8 | offen | zu | 0 | offen | offen | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 14:50 | | 0 | 8 | offen | zu | 0 | offen | offen | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 15:00 | li: links offen<br>Mi: rechts offen<br>re: links außen/ rechts innen offen | 0 | 0 | offen | offen | 0 | offen | offen | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 15:10 | | 0 | 0 | offen | offen | 0 | offen | offen | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 15:20 | alle zu | 10 | 10 | zu | zu | 10 | zu | zu | 2 | zu | offen |
| 05.01.2018 15:30 | | 10 | 10 | zu | zu | 10 | zu | zu | 2 | zu | offen |

**Tabelle 7-3: Abgleich der Fensterkontakte mit dem Monitoring – Raum 2.01**

| Zeit | Einstellung | Soll | 201 li | 201 li innen | 201 li außen | 201 Mi | 201 Mi innen | 201 Mi außen | 201 re | 201 re innen | 201 re außen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 05.01.2018 12:50 | alle zu | 10 | 10 | zu | zu | | zu | zu | | | |
| 05.01.2018 13:00 | | 10 | 10 | zu | zu | | zu | zu | | | |
| 05.01.2018 13:10 | innen offen, außen zu | 8 | 8 | offen | zu | | offen | zu | | | |
| 05.01.2018 13:20 | | 8 | 8 | offen | zu | | offen | zu | | | |
| 05.01.2018 13:30 | | 8 | 8 | offen | zu | | offen | zu | | | |
| 05.01.2018 13:40 | | 8 | 8 | offen | zu | | offen | zu | | | |
| 05.01.2018 13:50 | | 8 | 8 | offen | zu | | offen | zu | | | |
| 05.01.2018 14:00 | | 8 | 8 | offen | zu | | offen | zu | | | |
| 05.01.2018 14:10 | innen zu, außen offen | 2 | 2 | zu | offen | | zu | offen | | | |
| 05.01.2018 14:20 | | 2 | 2 | zu | offen | | zu | offen | | | |
| 05.01.2018 14:30 | alle offen | 0 | 0 | offen | offen | | offen | offen | | | |
| 05.01.2018 14:40 | | 0 | 0 | offen | offen | | offen | offen | | | |
| 05.01.2018 14:50 | | 0 | 0 | offen | offen | | offen | offen | | | |
| 05.01.2018 15:00 | li: links offen<br>Mi: rechts offen<br>re: links außen/ rechts innen offen | 0 | 0 | offen | offen | | offen | offen | | | |
| 05.01.2018 15:10 | | 0 | 8 | offen | zu | | offen | zu | | | |
| 05.01.2018 15:20 | alle zu | 10 | 10 | zu | zu | | zu | zu | | | |
| 05.01.2018 15:30 | | 10 | 10 | zu | zu | | zu | zu | | | |

Im Lehrerzimmer Raum 1.04 zeigten sich ebenso unlogische, nicht verwertbare Meldungen. Eine Nachfrage bei GEDES zu möglichen Ursachen verblieb bis zum Projektende ohne Ergebnis.

**Tabelle 7-4: Abgleich der Fensterkontakte mit dem Monitoring – Raum 1.04**

| Zeit | Einstellung | Soll | 104 Ost | 104 Ost innen | 104 Ost außen |
|---|---|---|---|---|---|
| 05.01.2018 12:50 | alle zu | 10 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 13:00 | | 10 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 13:10 | innen offen, außen zu | 8 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 13:20 | | 8 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 13:30 | | 8 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 13:40 | | 8 | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 13:50 | | 8 | 0 | offen | offen |
| 05.01.2018 14:00 | | 8 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 14:10 | innen zu, außen offen | 2 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 14:20 | | 2 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 14:30 | alle offen | 0 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 14:40 | | 0 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 14:50 | | 0 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 15:00 | li: links offen, Mi: rechts offen re: links außen/rechts innen offen | 0 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 15:10 | | 0 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 15:20 | alle zu | 10 | 8 | offen | zu |
| 05.01.2018 15:30 | | 10 | 8 | offen | zu |

Aus Tabelle 7-2 bis Tabelle 7-4 ist leider ersichtlich, dass sich dieses System der Fensterkontakte nicht im Detail bewährt hat. Jedoch handelt es sich bei der Überprüfung um eine Momentaufnahme. Ob die Kontakte grundsätzlich nicht korrekt funktionieren, ist nicht bekannt.

## *7.2 Fensteröffnungsverhalten Klassenräume*

### *7.2.1 Klassenraum 1.08*

**Linkes Fenster**
Die Überprüfung der Fensterkontakte am 05.01.2018 ergab, dass nur der Zustand 10 bit (alles zu) wahrscheinlich korrekt abgebildet wird. Deshalb sind die gemeldeten Zustände 0 (alles offen), 2 (außen zu – innen offen) und 8 bit (außen offen – innen zu) mit Vorsicht zu betrachten. Beispielsweise wurden bei der Überprüfung 8 bit gemeldet, obwohl alle Flügel geöffnet waren.

Der Überblick über die Jahre 2016 und 2017 in Abbildung 7-4 über die Aktivitäten bei der Öffnung des linken Kastenfensters in Raum 1.08 und die Häufigkeitsverteilung in Abbildung 7-5 zeigen, dass im Zweijahresverlauf zu ca. 35 % der Zeit alle Flügel geschlossen bleiben (10 bit). Insbesondere im Juni bis August 2016 würde dies bedeuten, dass der vom Planer vorgesehene Sommerfall (8 bit – Außenflügel zum Abführen von Stauwärme) nicht umgesetzt wurde – sofern die Daten stimmen. Im Folgejahr wurde von Mitte Mai bis Mitte Juni sowie nach den Sommerferien ab Mitte August demnach die Sommereinstellung häufiger umgesetzt, was plausibel ist.

Werden 0 bit gemeldet, so sind mindestens ein Innen- und ein Außenflügel geöffnet. Dieser Fall tritt insgesamt in ca. 10 % der Zeit auf. Insbesondere von Februar bis April 2016 gibt es einen stetigen Wechsel zwischen der Winterposition (außen zu, innen offen) und dem Öffnen beider Flügel. In Kapitel 3.2 wurde bereits festgestellt, dass es in dieser Zeit bereits zu Raumtemperaturen >26 °C gekommen ist. Möglicherweise handelt es sich hier um Versuche der Nutzer, eine Temperaturreduktion herbeizuführen.

Die Meldungen für den Winterfall (2 bit) erscheinen plausibel: Der äußere Flügel ist während der kühleren Monate geschlossen, während der innere zur gewünschten Nutzung des Kasteneffektes geöffnet ist (ca. 40 % des Jahres). In den Herbstferien 2017 (die ersten beiden Oktoberwochen) war der Winterfall bereits eingestellt. Dies deckt sich mit der Aussage, dass der Hausmeister dies Anfang Oktober generell umsetzt. Nach den Ferien hat man sich jedoch aufgrund der Witterung noch einmal für ein paar Tage für den Sommerfall entschieden, um anschließend im Winterbetrieb zu bleiben.

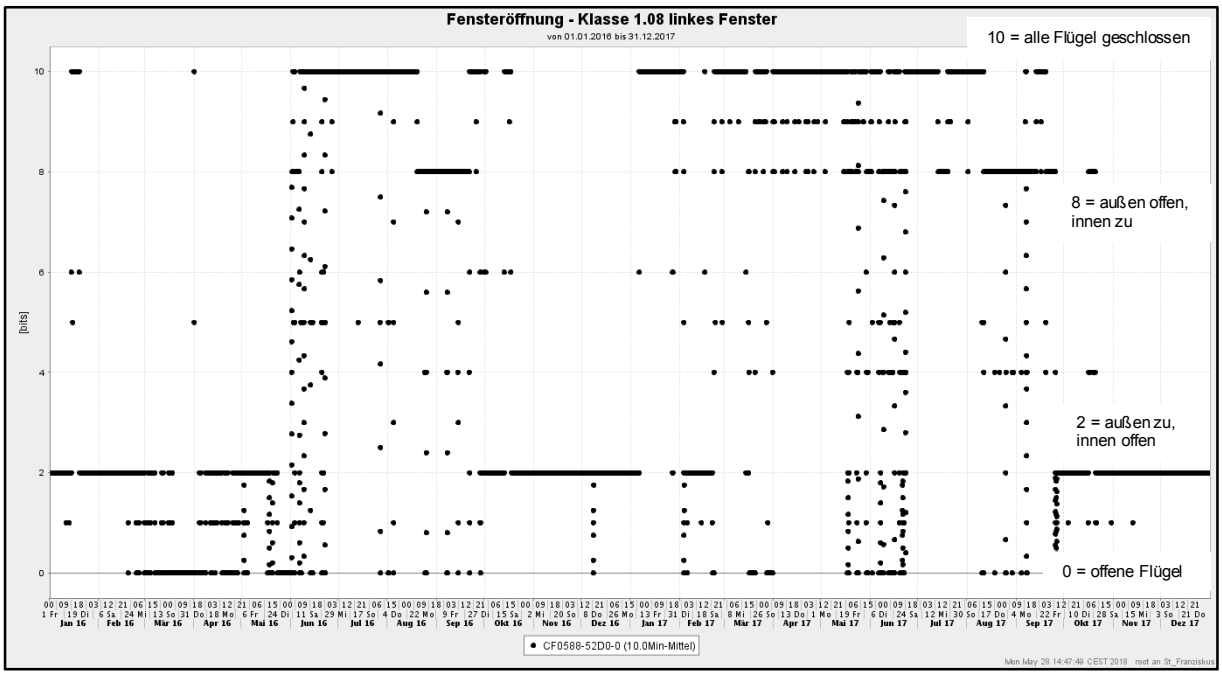


**Abbildung 7-4: Fensteröffnung – Klasse 1.08 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

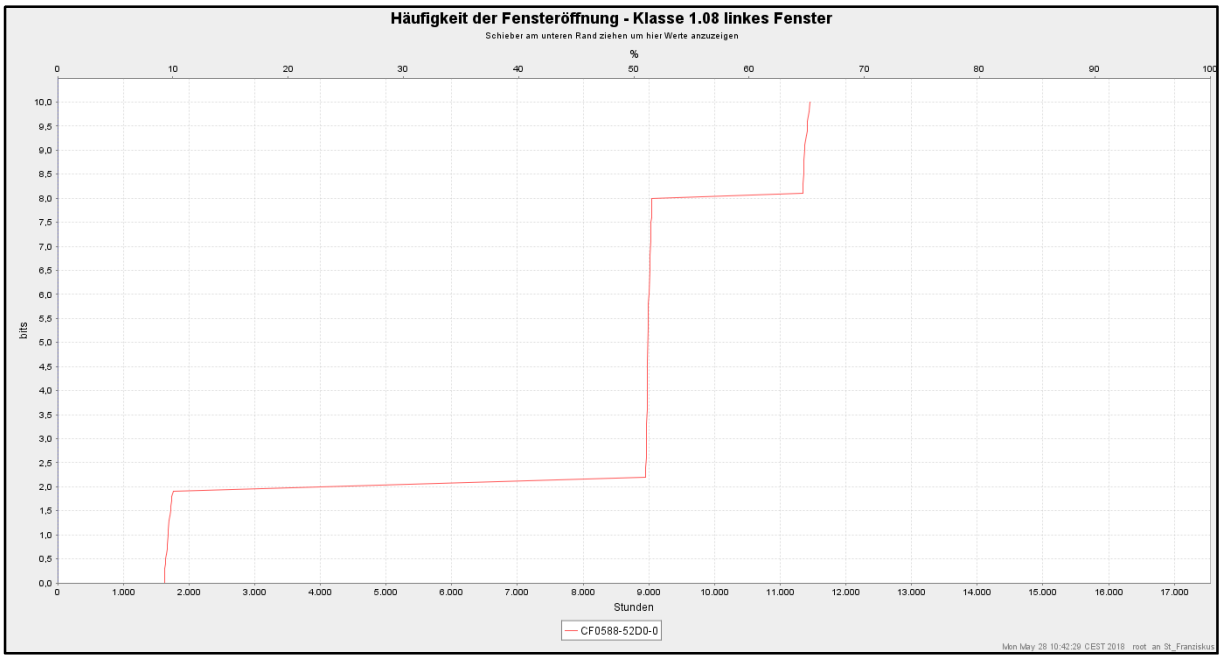


**Abbildung 7-5: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 1.08 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

### Mittleres Fenster

Beim mittleren Fenster sind ebenfalls nur die Stellungen in 0 bit und 10 bit relativ gut auszuwerten. Der Test am 05.01.2018 ergab für die Zustände 2 bit und 8 bit falsche Daten, insgesamt ergibt sich jedoch ein recht plausibles Bild.

Die häufigen Wechsel in der Fenstereinstellung zeigen im Vergleich zu den anderen beiden Fenstern, dass das mittlere Fenster am häufigsten bedient wird.

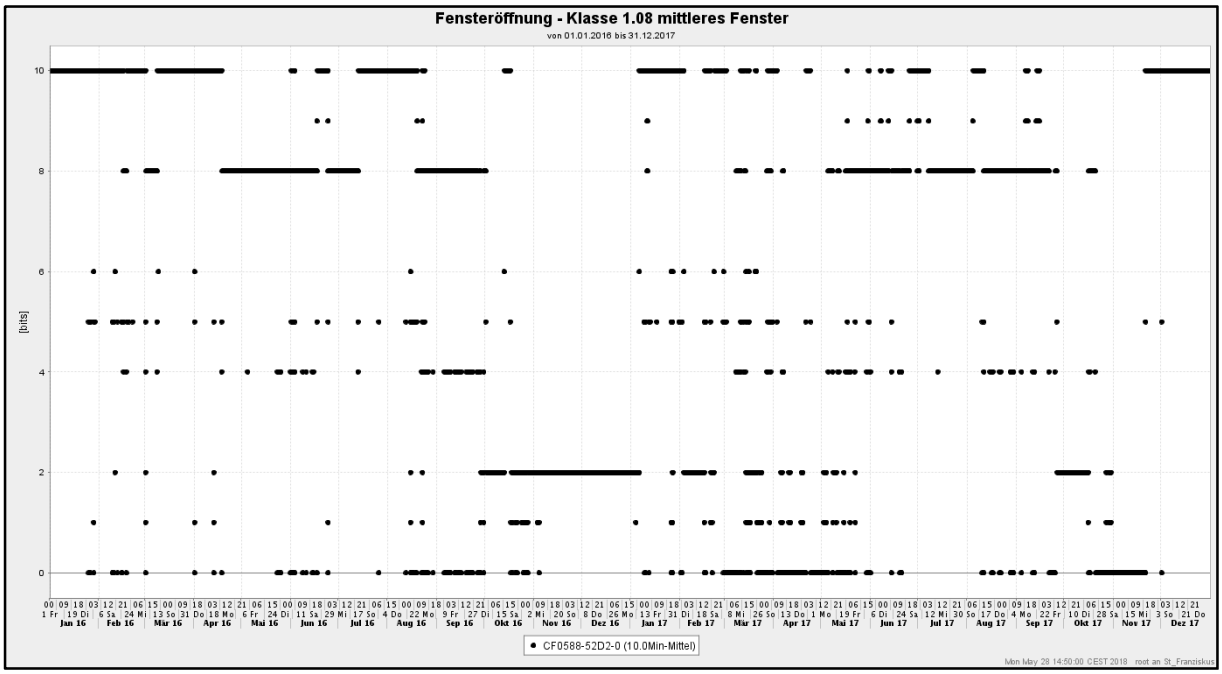


**Abbildung 7-6: Fensteröffnung – Klasse 1.08 mittleres Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

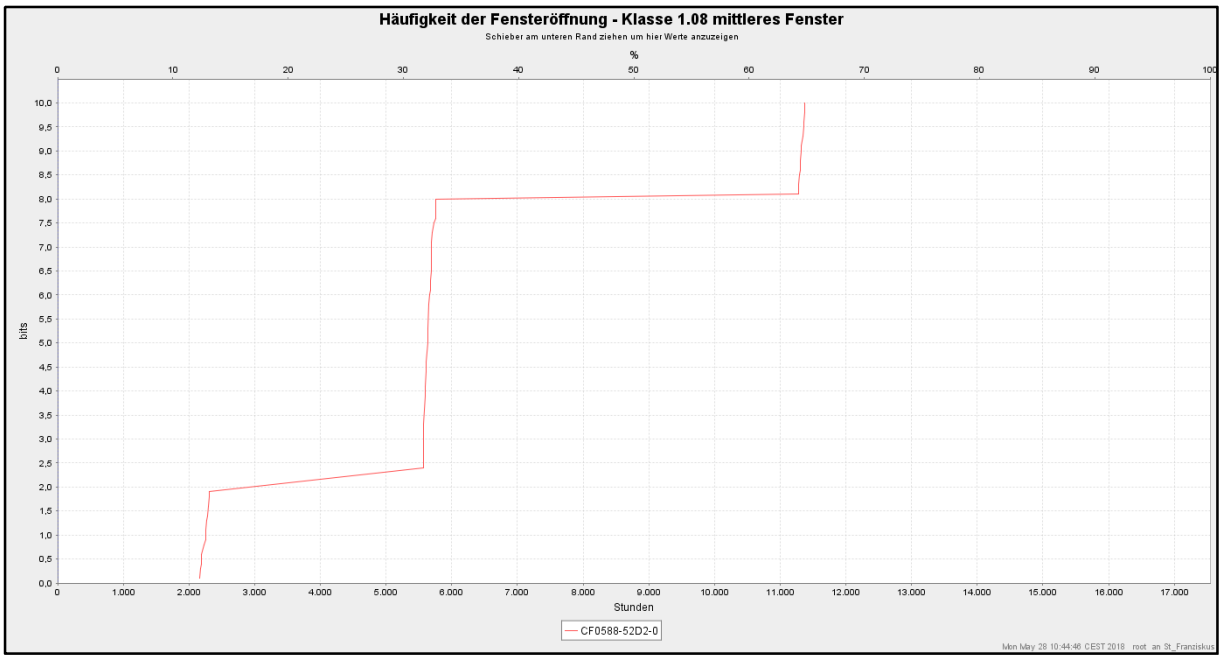


**Abbildung 7-7: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 1.08 mittleres Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

Die Sommerposition wurde in beiden Jahren von April/Mai bis September registriert, während die Wintereinstellung von Oktober bis Dezember erfasst wurde. Dies erscheint plausibel und entspricht den Angaben des Hausmeisters.

Von Mai bis September 2016 gab es auffallend viele Wechsel zwischen der Sommereinstellung und einer Komplettöffnung. Ausnahme bilden die Sommerferien.

Glaubt man den Daten, so waren in ca. 12 % der Zeit die Fenster geöffnet und in 35 % geschlossen. Dazwischen scheint der Sommerfall (8 bit) zu überwiegen, was angesichts der Übertemperaturproblematik in den südorientierten Klassen auch plausibel erscheint.

Obwohl die Daten in der Winter- oder Sommerstellung im Rahmen der Überprüfung am 05.01.2018 falsch erschienen, ergibt in der Zweijahresauswertung ein plausibles Bild. Es wurden daher keine Messwertkorrekturen vorgenommen.

**Rechtes Fenster**

Die Plausibilitätsprüfung ergab am 05.01.2018 nur für den Zustand „alles offen“ korrekterweise 0 bit. Alle anderen Zustände wurden falsch abgebildet.

Vor dem rechten Fenster befinden sich die PC-Schreibtische, weshalb dieses schlecht bedient werden kann und für die Nutzer keine große Rolle zur Beeinflussung des Raumklimas spielt. Dies spiegelt sich in den Messungen wider, siehe Abbildung 7-8. In der kühlen Jahreshälfte bleibt der Winterfall eingestellt (2 bit) bzw. die inneren Flügel werden zusätzlich geschlossen (10 bit). Komplettöffnungen kamen sehr selten vor, die lange Öffnung von Mai bis September 2017 erscheint unglaubwürdig. Der Sommerfall wurde nur von September bis Oktober 2016 registriert, hat aber wahrscheinlich auch immer Sommer 2017 stattgefunden. Die Messwerte wurden nicht korrigiert, da das Fenster aufgrund der eingeschränkten Bedienbarkeit (PC-Tische) eine untergeordnete Rolle spielt.

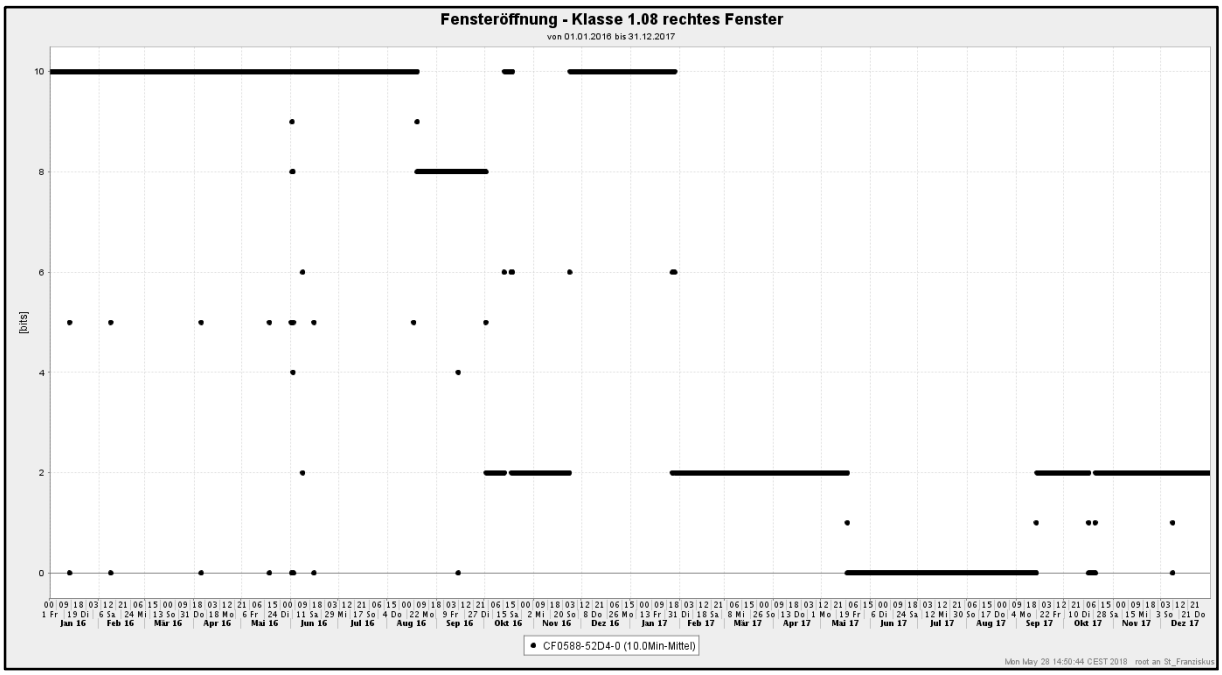


**Abbildung 7-8: Fensteröffnung – Klasse 1.08 rechtes Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

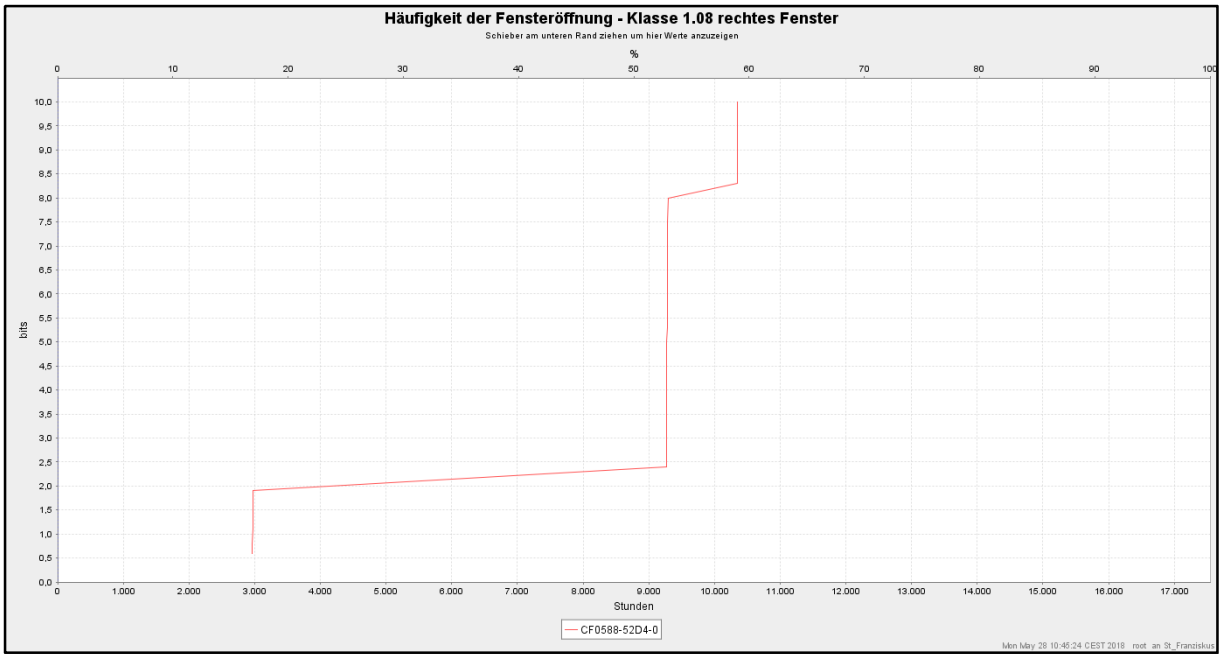


**Abbildung 7-9: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 1.08 rechtes Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

Abbildung 7-10 stellt die registrierte Fensteröffnung für alle drei Fenster im südorientierten Klassenraum 1.08 für die Jahre 2016 und 2017 dar. In der Darstellung wurde eine Beschränkung auf die Nutzungszeit von Montag bis Freitag 7 bis 15 Uhr vorgenommen, da die Nutzer nur in dieser Zeit aktiv Einfluss auf die Fenster nehmen können.

Betrachtet man den linken Bereich, in dem die Solltemperatur von 20 °C unterschritten wurde, so ist positiv anzumerken, dass der Winterfall (2 bit), der die Ausnutzung der Stauwärme aus dem Kastenbereich ermöglichen soll, korrekt umgesetzt wurde. Auch wurde an kühleren Tagen offenbar häufig zu der Maßnahme gegriffen, alle Flügel komplett zu schließen (10 bit). Ob in dieser Zeit theoretisch Wärmegewinne aus dem Kastenbereich möglich gewesen wären, lässt sich hier nicht ablesen. Diese Thematik wurde in Abschlussbericht Teil 6 an Beispielen untersucht.

In Bezug auf den Übertemperaturbereich (rechts im Bild) ist zunächst positiv anzumerken, dass die sommerliche Einstellung der Fenster (8 bit, Außenflügel offen, Innenflügel zu) zur Abführung von Stauwärme häufig korrekt umgesetzt wurde. Auch die Komplettöffnung der Fenster ist hier nachvollziehbar, wenngleich dies bei ähnlich hohen Außentemperaturen kaum zu einer Verbesserung der Behaglichkeit führt – was hier nicht überprüft werden kann. Jedoch: die Winterposition (2 bit) sollte bei einer ohnehin zu hohen Raumtemperatur künftig vermieden werden, da diese zusätzlich die Wärme aus dem Kastenbereich in den Raum lässt. Sofern die Überhitzung auf eine hohe solare Einstrahlung zurückzuführen ist, sollte auch eine komplette Schließung der Fenster nicht erfolgen, da diese zu einer Aufheizung des Kastenbereiches führt.

Trotz der bei der Plausibilitätsprüfung festgestellten Unstimmigkeiten bei der Erfassung der Öffnungszustände ergibt sich insgesamt ein schlüssiges Bild.

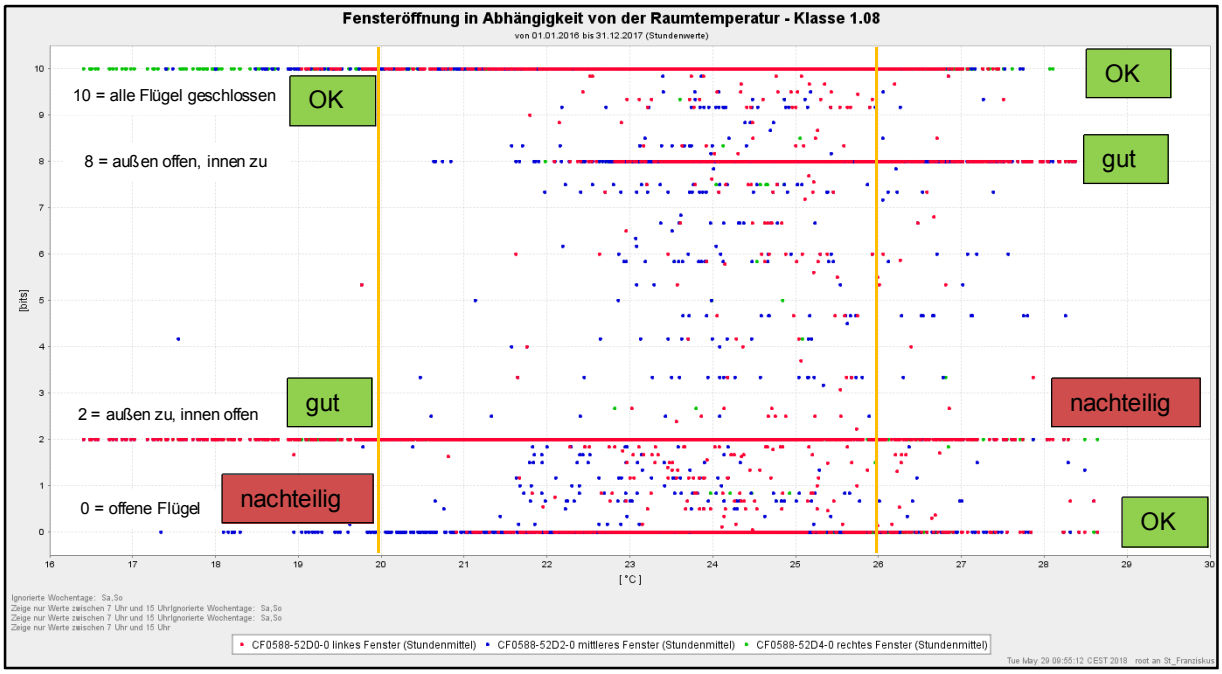


**Abbildung 7-10: Fensteröffnung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur – Jahre 2016 bis 2017**

### *7.2.2 Klassenraum 2.01*

**Linkes Fenster**

Das linke Fenster in Raum 2.01 war das einzige Fenster, welches im Moment der Überprüfung der verschiedenen Stellungen durchweg korrekte bit-Wertigkeiten meldete. Jedoch wurden im Gegensatz zur in Abbildung 7-11 zu sehenden Langzeitbetrachtung (max. 21 bit) nur Zustandsmeldungen von 0 bis 10 bit registriert.

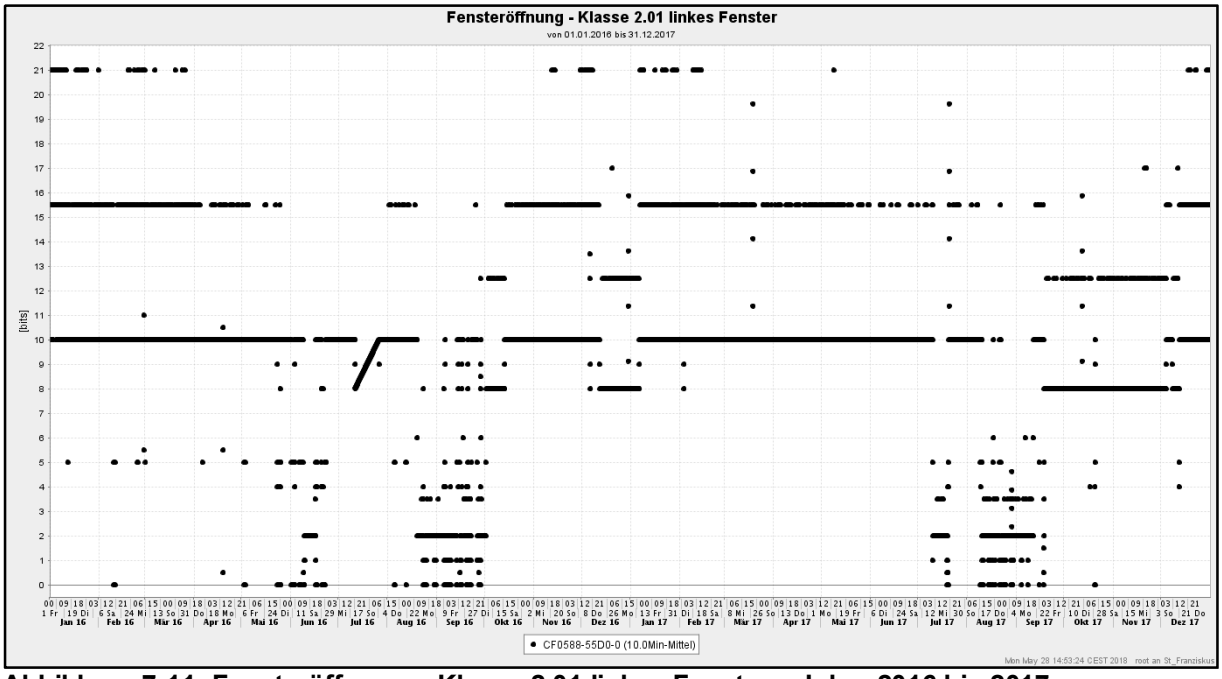


**Abbildung 7-11: Fensteröffnung – Klasse 2.01 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

Der Vergleich der drei Fenster deutet darauf hin, dass in Raum 2.01 das linke Fenster am häufigsten bedient wird. Die Meldungen mit 2 bit bilden den Sommerfall ab, 8 bit entsprachen bei der Überprüfung dem Winterfall, welcher in Abbildung 7-11 eher bei 10 bit zu vermuten ist. Bei Wertigkeiten von 21 bit dürfte es sich um Fehlmeldungen oder Komplettschließungen handeln. Komplettöffnungen (0 bit) gab es demnach nur vor und nach den Sommerferien.

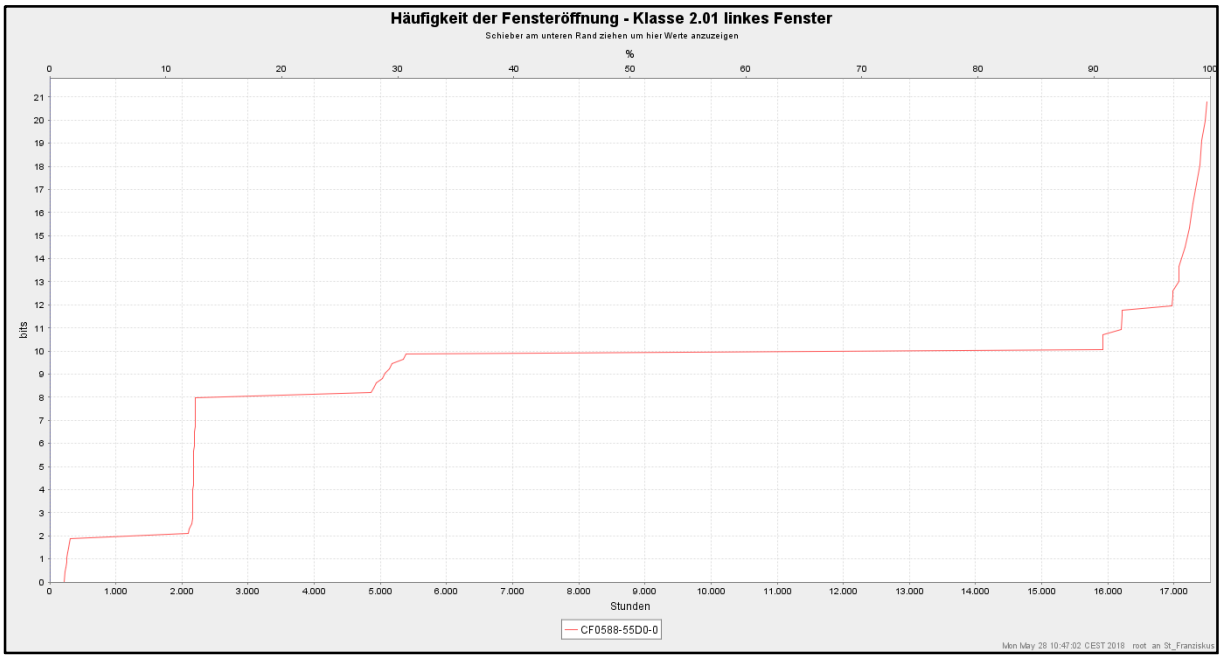


**Abbildung 7-12: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 2.01 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

### Mittleres und rechtes Fenster

Bei der Überprüfung der Kontakte am 05.01.2018 wurden keine bit-Wertigkeiten übermittelt, jedoch waren die vorgefertigten Übersetzungen (offen/zu) zu den Innen- und Außenflügeln korrekt.

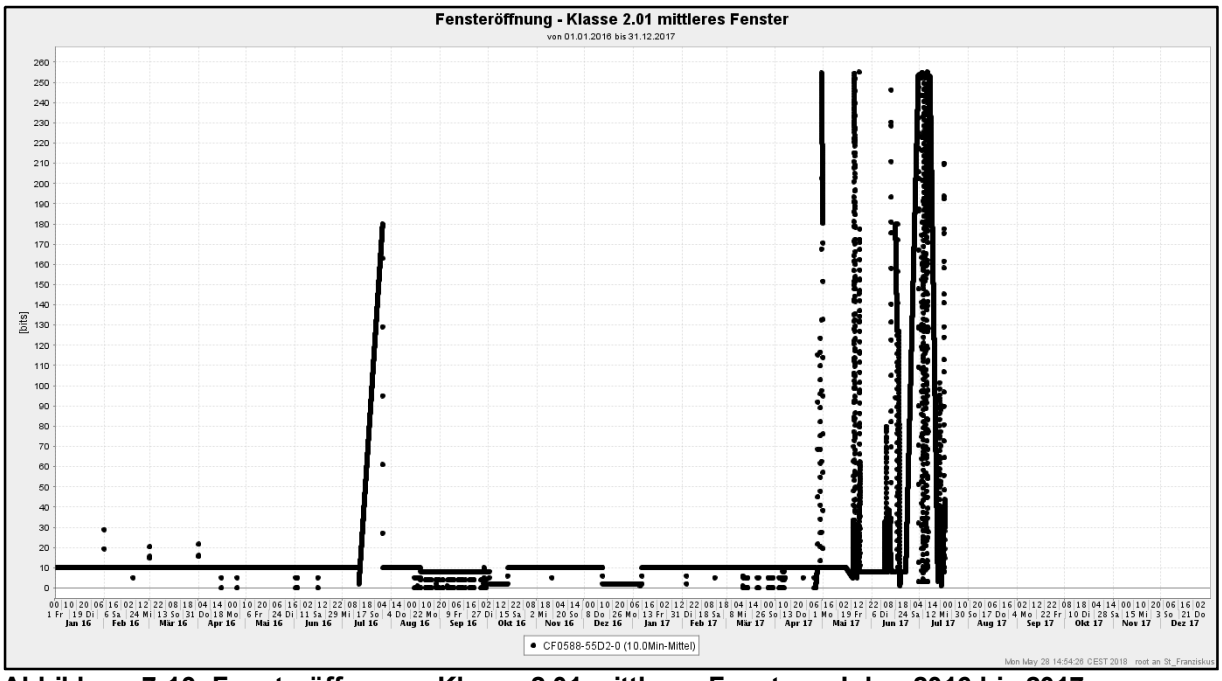


**Abbildung 7-13: Fensteröffnung – Klasse 2.01 mittleres Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

Beide Fenster stagnieren in der überwiegenden Zeit bei 10 bit, erst ab Mai 2017 steigen die Wertigkeiten häufig auf bis zu 256 bit. Die Werte erscheinen unplausibel und brechen im Juli 2017 ab, weshalb auf eine Auswertung verzichtet wird.

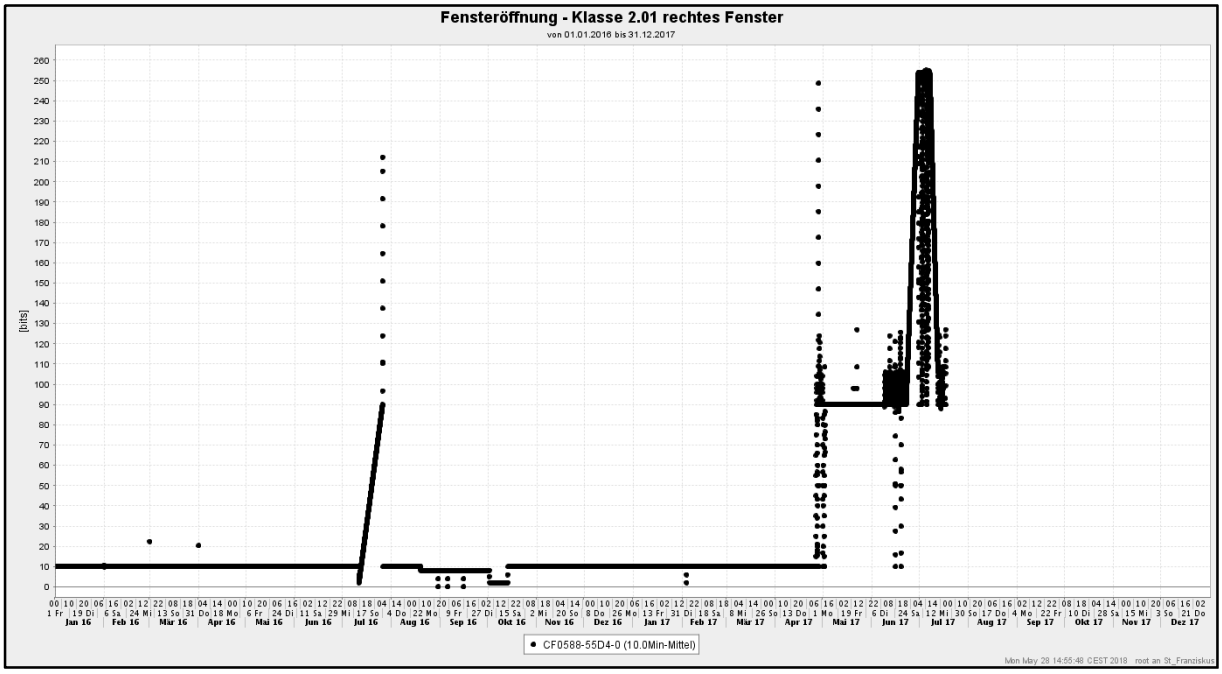


**Abbildung 7-14: Fensteröffnung – Klasse 2.01 rechtes Fenster – Jahre 2016 bis 2017**

## *7.3 Fensteröffnungsverhalten Lehrerzimmer*

Die Überprüfung der Fensterkontakte am 05.01.2018 ergab, dass für fast alle Zustände fälschlicherweise 8 bit gemeldet wurden. Darauf deutet auch die Langzeitbetrachtung in Abbildung 7-15 hin. Auf eine Auswertung wird aufgrund der schlechten Datenlage verzichtet.

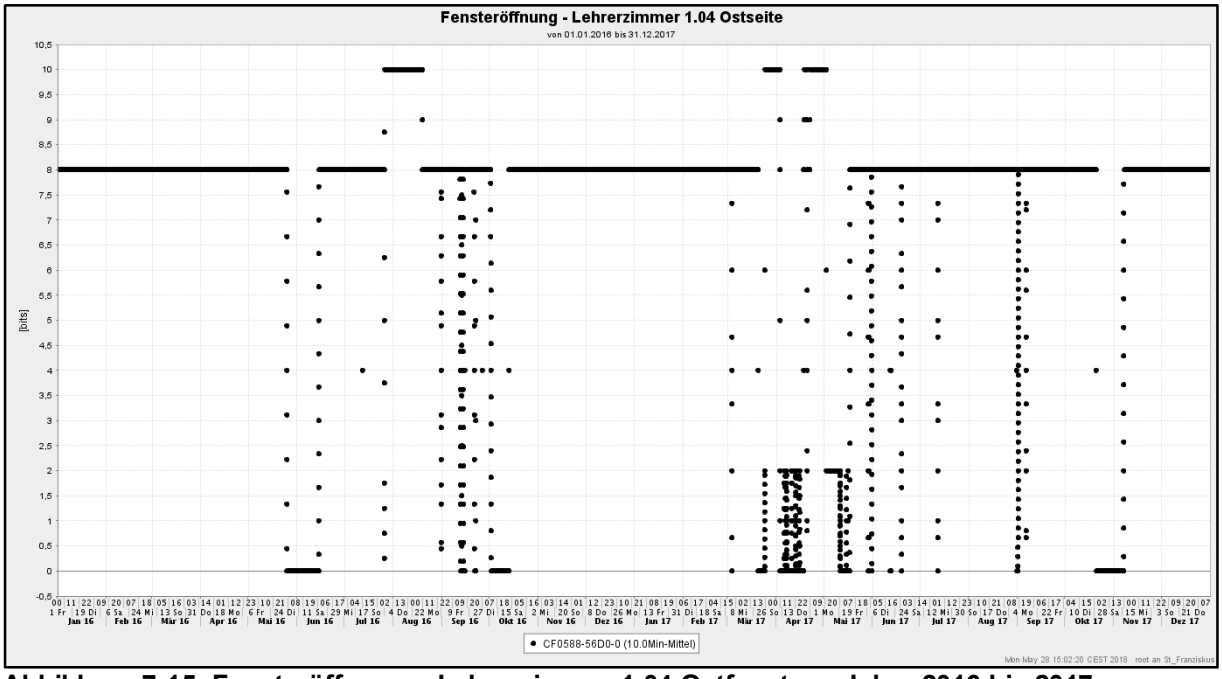


**Abbildung 7-15: Fensteröffnung – Lehrerzimmer 1.04 Ostfenster – Jahre 2016 bis 2017**

## 7.4 Befragungen

Die Befragungsergebnisse zum Fensteröffnungsverhalten und der Bedienung der Fenster werden in Abschlussbericht Teil 6 ausführlich beschrieben.

## 7.5 Verallgemeinerung und Fazit

Ein Monitoring des Fensteröffnungsverhaltens in der hier umgesetzten Form ist nicht weiterzuempfehlen. Das System erwies sich als sehr fehleranfällig und war zudem aufgrund der Parallelschaltung nicht in der Lage, alle möglichen Zustände der vier Flügel abzubilden, sondern nur vier Zustände. Erschwerend kommt hinzu, dass der Fensterkastenbereich hinsichtlich der Tiefe knapp bemessen ist, sodass die Innenflügel teilweise die angekippten Außenflügel wieder zudrücken (siehe Abschlussbericht Teil 6).

Dies machte eine detaillierte Auswertung des Öffnungsverhaltens schwierig, jedoch ließ sich in den Jahresverläufen erkennen, dass die Nutzer die Empfehlungen zur Sommerstellung (Außenflügel auf, Innenflügel zu) und umgekehrt zur Winterstellung überwiegend umsetzen.

Positiv ist, dass aufgrund der vorhandenen maschinellen Lüftung eine häufige manuelle Bedienung der Fenster nicht zwingend notwendig ist. Grundsätzlich ist es zu begrüßen und in Folgeprojekten unbedingt zu empfehlen, dass das Öffnen der Fenster trotz der Passivhausbauweise ermöglicht wird. Dies trägt maßgeblich zur Nutzerzufriedenheit bei. Eine anderslautende Darstellung in der Lokalpresse, in der der Journalist zum Zeitpunkt des Einzuges über die Schule berichtete, man dürfe die Fenster nicht öffnen, führte zu vielen Nachfragen durch besorgte Eltern und zu langanhaltender Verunsicherung in der Lehrerschaft.

Der Nutzereinfluss – und damit eine mögliche Verbesserung des Raumklimas – durch Ausschöpfen aller gegebenen Optionen (Öffnen/Schließen der Fenster, Einstellen der Jalousien) ist größer als die meisten befragten Nutzer dies vermuten. Um dem Nutzer eine Hilfestellung zu geben, ob die Fensterlüftung sinnvoll ist, wurde im Mai 2018 eine Gebrauchsanleitung entworfen, die die weitere Bedienung abhängig von den vorherrschenden Temperaturen außen, im Fensterkasten und im Raum darstellt.

**Abbildung 7-16: Entwurf Bedienungsanleitung: Links „zu kalt“, Rechts: „zu warm“**

Im Fall, dass es den Nutzern zu kalt ist (Abbildung 1-5, links), wird die Fensterkastentemperatur (oben im Display) mit der Raumlufttemperatur (unten im Display) verglichen, um eine Entscheidung zu ermöglichen, ob der „Wintergarteneffekt“ durch Öffnen des Innenflügels genutzt werden kann. Im Fall des zu warm empfundenen Raumes (Abbildung 1-5, rechts) wird die Außentemperatur (oben im Display) mit der Raumtemperatur (unten im Display) verglichen, um bei der Entscheidung zu helfen, ob das Öffnen der Fenster etwas bringt. Zum Einsatz kommen hierfür Funkthermometer im unteren Preissegment.

# 8 Nachhallzeit und Raumakustik

Dieser Abschnitt beschreibt die Vorgehensweise und die Ergebnisse der raumakustischen Messungen in drei Klassenräumen, dem Raum der Stille und der Aula.

Für ein angenehmes Lern- und Lehrklima ist insbesondere eine gute Raumakustik im Klassenzimmer von Bedeutung. Lärm und schlechte Sprachverständlichkeit können nicht nur die Lernerfolge der Schüler einschränken, sondern auch für Lehrer zu einer starken physischen und psychischen Belastung führen.

Die Nachhallzeit des Raumes ist die Größe, welche über die Raumakustik und somit die Sprachverständlichkeit entscheidet. Diese wird beeinflusst durch das Raumvolumen und die Absorptionseigenschaften der Oberflächen. Als Absorptionsflächen kamen in der Aula sowie in den Fluren des Gebäudeteils B gelochte Akustikdecken zum Einsatz. In den Klassenräumen befinden sich 31 m² große Deckensegel des Fabrikates Hera Design, welche die Hörsamkeit in den Klassenräumen durch Verringerung der Nachhallzeit verbessern sollen.

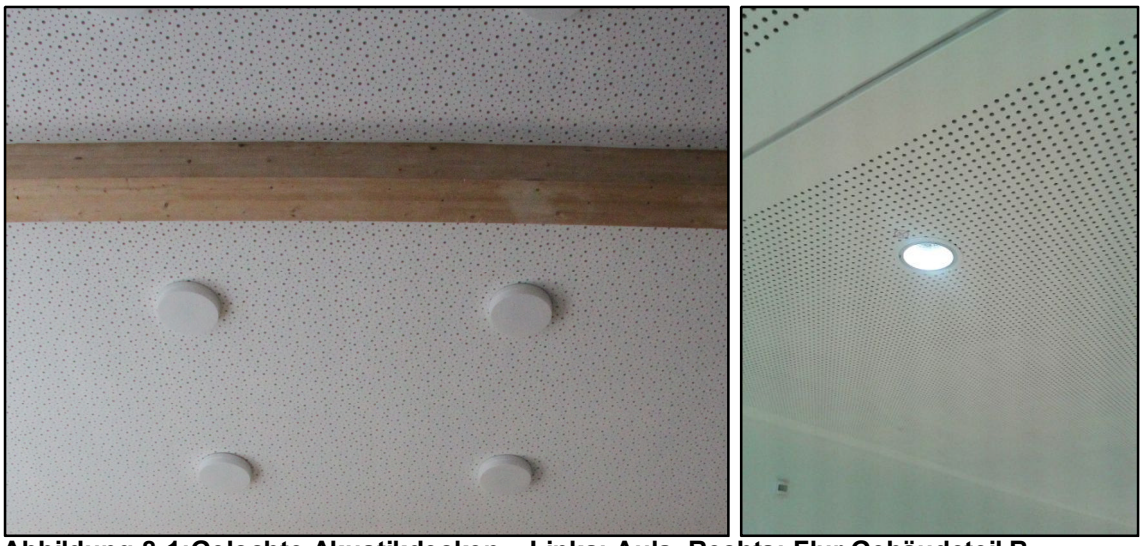

**Abbildung 8-1:Gelochte Akustikdecken – Links: Aula, Rechts: Flur Gebäudeteil B**

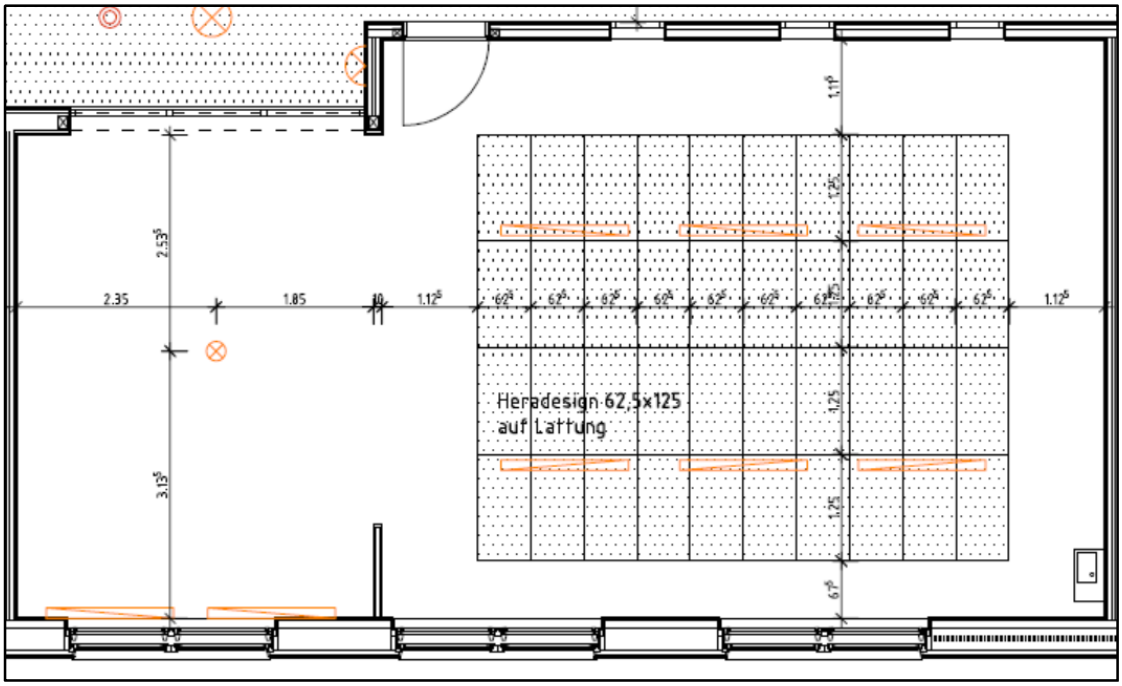


**Abbildung 8-2: Deckenspiegel mit Heradesign Raum 1.08** Es ist eine ungültige Quelle angegeben.

## *8.1 Messorte und Messtechnik*

Die Akustikmessungen erfolgten am 13.10.2016. Im Zuge dessen wurden auch Schallschutzmessungen an einer schallentkoppelten Innenwand und zwei schallentkoppelten Geschossdecken durchgeführt. Die Ergebnisse der Schallschutzmessungen können dem Abschlussbericht 6 entnommen werden.

Zur Erzeugung des Schallfeldes kamen ein Norm-Hammerwerk sowie ein Lautsprecher zum Einsatz. Der Schallpegel wurde von zwei an Stativen befestigten Mikrofonen gemessen. Die Erfassung der Messdaten erfolgte über einen zweikanaligen Echtzeitanalysator Norsonic RTA 840. Insgesamt wurden für jeden nötigen schalltechnischen Kennwert fünf Messungen durchgeführt und dabei die Position von beiden Mikrofonen variiert.

**Abbildung 8-3: Lautsprecher und Mikrofon im Bereich des Morgenkreises eines Klassenraumes**

**Abbildung 8-4: Aufzeichnung der Messwerte**

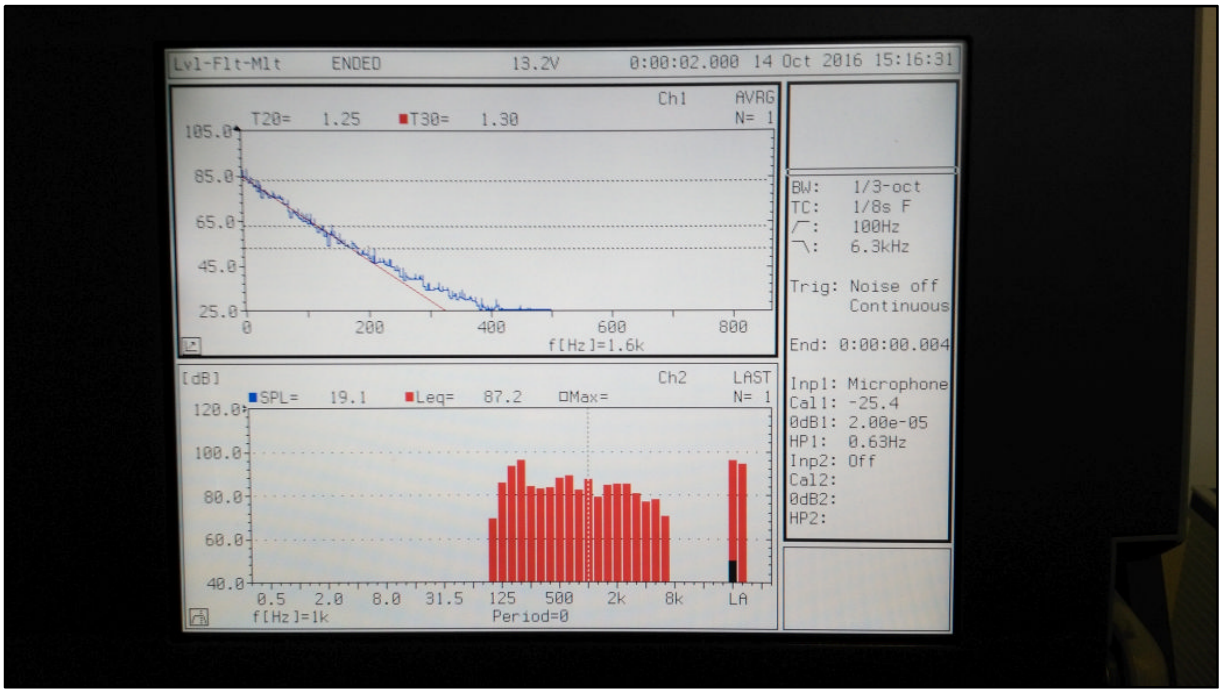


**Abbildung 8-5: Bildschirmdarstellung im Verlauf einer Messung**

Es wurden Nachhallzeitmessungen durchgeführt in:

- dem Raum der Stille 1.14
- der Aula 0.26 und
- den Klassenräumen 1.01, 1.08 und 2.01

## *8.2 Messergebnisse Raum der Stille 1.14*

Der Raum der Stille befindet sich im 1. OG des Gebäudeteils A. Er grenzt an zwei Außenwände, an einen Flur und an den Luftraum des Eingangsbereiches. Unterhalb befinden sich Garderobenräume, oberhalb der Fachunterrichtsraum Kunst. Die Gesamtmaße des Raumes belaufen sich auf 11,25 m in der Länge und 4,77 m in der Breite. Der Raum gliedert sich in einen durch zwei Stichwände abgetrennten Vorraum mit niedrigerer abgehängter Deckenhöhe und einen Hauptraum mit einem Gipskarton-Deckensegel mit Akustik-Lochplatten und einem Gipskarton-Bogenelement (Abbildung 8-6). Das Raumvolumen beträgt rund 133 m³. (siehe Abbildung 8-7)

Im Raum der Stille sollen Meditation, Gebet oder Entspannung und Besinnung ermöglicht werden. Demnach sind geringe Nachhallzeiten vorteilhaft, um Geräusche und Stimmen schnell verstummen zu lassen.

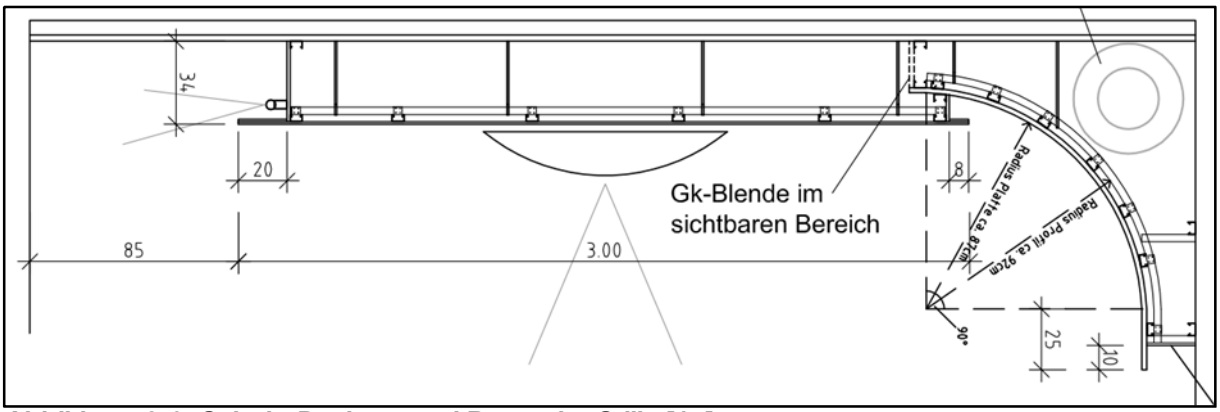


**Abbildung 8-6: Schnitt Deckensegel Raum der Stille [17]**

**Abbildung 8-7: Links: Messung der Nachhallzeit; Rechts: Grundriss Raum der Stille [17]**

Die Nachhallzeitmessungen wurden abweichend vom in DIN EN ISO 16283-1 [18] empfohlenen Frequenzbereich in Terzbändern zwischen Mittenfrequenzen von 100 Hz bis 6300 Hz gemessen. Zur Anwendung kam das Verfahren des abgeschalteten Rauschens. Dabei erzeugt ein Lautsprecher ein breitbandiges statisches Rauschen bis ein stationäres Schallfeld erzeugt wird, das mindestens 45 dB über dem Störpegel liegen muss. [19]

Im Mittel ergibt sich eine Nachhallzeit von 0,56 s. Die maximale Abweichung beträgt 0,09 s in den Frequenzen 100 Hz und 125 Hz. Bei Betrachtung des frequenzabhängigen Verlaufs ergibt sich ein weitestgehend linearer Verlauf mit einem leichten Anstieg der Kurve in den tieferen Frequenzen (Abbildung 8-8).

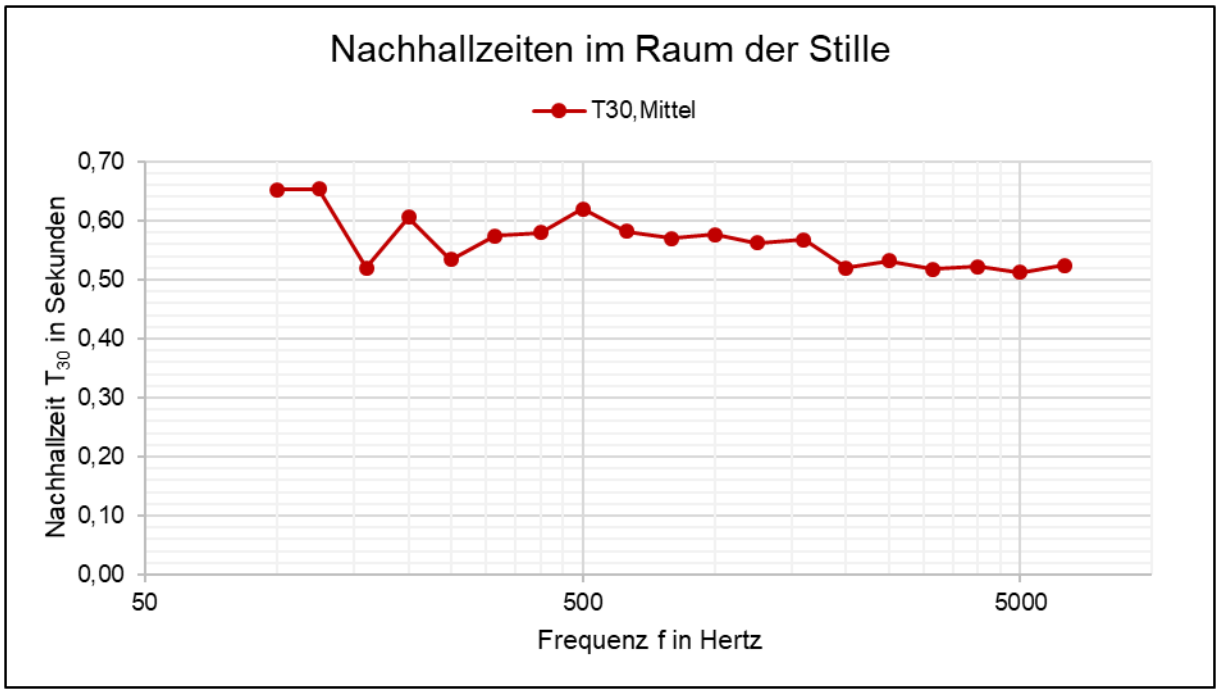


**Abbildung 8-8: Gemittelte Nachhallzeiten im Raum der Stille [20]**

Nach DIN 18041 ist der Raum der Stille als Ruheraum der Gruppe B, Nutzungsart B3 „Räume zum längerfristigen Verweilen“ zuzuordnen. Bei der Bewertung der Raumgruppe B ist das Verhältnis der äquivalenten Schallabsorptionsfläche $A_{abs}$ zum Raumvolumen V zu betrachten. Mithilfe der ermittelten Nachhallzeiten $T_{30}$ lässt sich die äquivalente Schallabsorptionsfläche nach Formel (1) ermitteln.

$$A_{abs} = 0{,}163 * \frac{V}{T} \quad \textbf{(1)}$$

Dabei gibt die DIN 18041 nach Formel (2) Mindestwerte für das Verhältnis zwischen äquivalenter Schallabsorptionsfläche A und Raumvolumen V in Abhängigkeit der Raumhöhe h vor. Die Formel für den Mindestwert lautet

$$\frac{A}{V} \geq [3{,}13 + 4{,}69 * \lg\left(\frac{h}{1}m\right)]^{-1} \quad \textbf{(2)}$$

und ergibt für den Raum der Stille eine Anforderung $A_{abs}/V \geq 0{,}20$ m²/m³.

Tabelle 8-1 stellt die frequenzabhängigen gemittelten Nachhallzeiten $T_{30,Mittel}$ und die berechneten Absorptionsflächen $A_{abs}$ zusammen. Es erfolgt ein Abgleich des Verhältnisses von $A_{abs}/V$ gegenüber der Anforderung von ≥ 0,20 m²/m³.

**Tabelle 8-1: Nachhallzeiten und Absorptionsflächen für den Raum der Stille [20]**

| Frequenz [Hz] | $T_{30,Mittel}$ [s] | $A_{abs}$ [m²] | $A_{abs}/V$ [m²/m³] | Anforderung |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,65 | 33,25 | 0,25 | |
| 125 | 0,65 | 33,15 | 0,25 | |
| 160 | 0,52 | 41,69 | 0,31 | |
| 200 | 0,61 | 35,77 | 0,27 | ≥ 0,20 |
| 250 | 0,53 | 40,60 | 0,31 | ≥ 0,20 |
| 315 | 0,57 | 37,77 | 0,28 | ≥ 0,20 |
| 400 | 0,58 | 37,38 | 0,28 | ≥ 0,20 |
| 500 | 0,62 | 34,97 | 0,26 | ≥ 0,20 |
| 630 | 0,58 | 37,25 | 0,28 | ≥ 0,20 |
| 800 | 0,57 | 38,03 | 0,29 | ≥ 0,20 |
| 1000 | 0,58 | 37,64 | 0,28 | ≥ 0,20 |
| 1250 | 0,56 | 38,57 | 0,29 | ≥ 0,20 |
| 1600 | 0,57 | 38,17 | 0,29 | ≥ 0,20 |
| 2000 | 0,52 | 41,69 | 0,31 | ≥ 0,20 |
| 2500 | 0,53 | 40,75 | 0,31 | ≥ 0,20 |
| 3150 | 0,52 | 41,85 | 0,31 | |
| 4000 | 0,52 | 41,53 | 0,31 | |
| 5000 | 0,51 | 42,34 | 0,32 | |
| 6300 | 0,52 | 41,37 | 0,31 | |

Der Mindestwert für die volumenbezogene Absorberfläche wird in allen betrachteten Frequenzbereichen eingehalten und häufig sogar um 50 % übererfüllt.

## *8.3 Messergebnisse Aula 0.26*

Die Aula befindet sich im Erdgeschoss des Ostteils des Gebäudes, grenzt an eine Außenwand, zwei Flurwände und im Osten an die Küche, diverse Funktionsräume und auf Höhe der Galerie im ersten Obergeschoss an den Verwaltungstrakt. (Abbildung 8-9)

Die Gesamtmaße belaufen sich auf 15,92 m in der Länge und 11,45 m in der Breite. Eine 4,12 m breite Galerie erstreckt sich entlang der Ostwand des Raumes. Abgesehen von der zwei Meter breiten Deckenverkofferung ist die komplette Decke mit einer freitragenden akustisch wirksamen Gipskarton-Lochdecke mit Streulochung abgehangen. Abzüglich der Galerie und der Deckenaufbauten weist die Aula ein Raumvolumen von rund 1052 m³ auf.

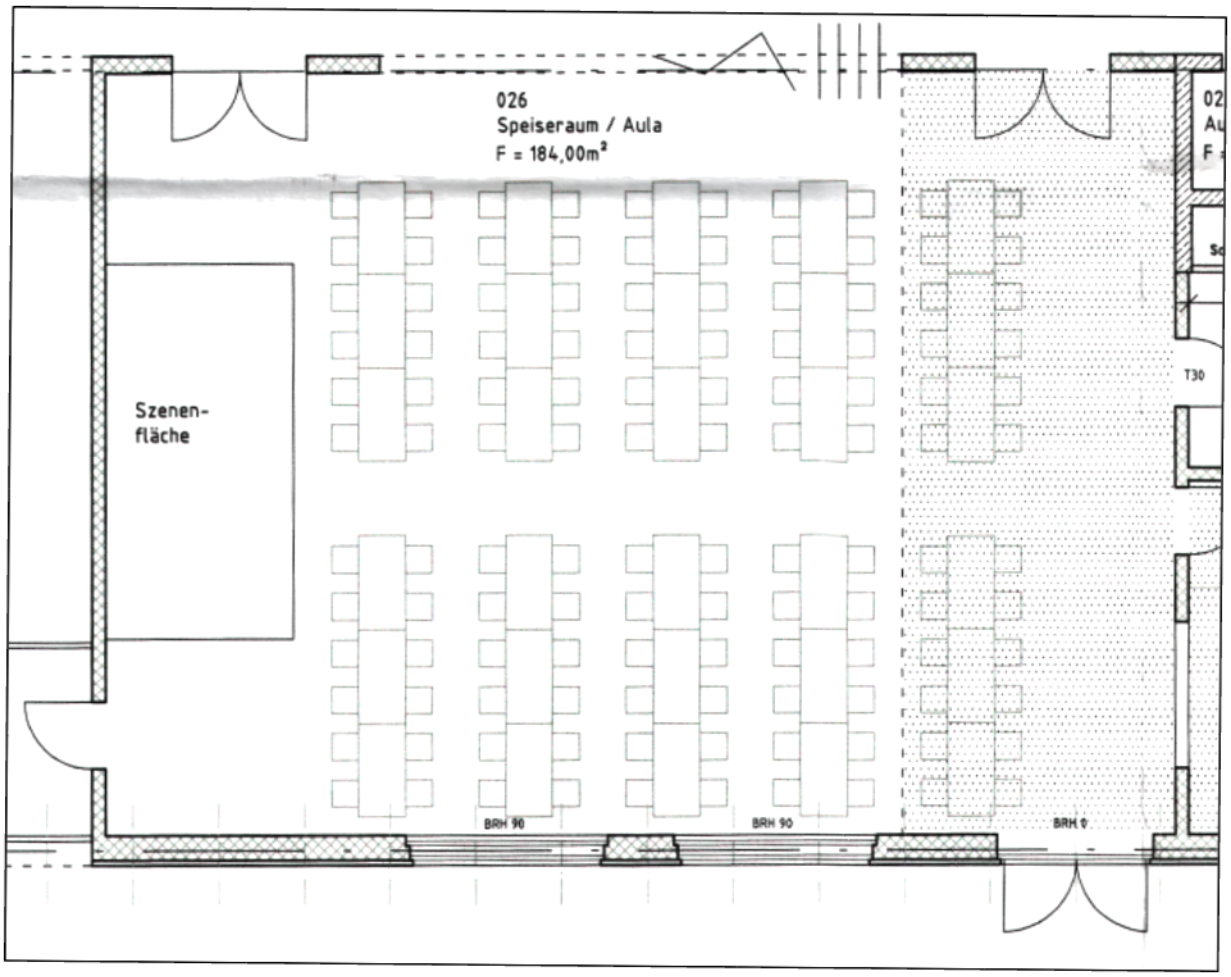


**Abbildung 8-9: Grundriss Aula [17]**

Die Aula dient als Versammlungs- und Veranstaltungsraum in Schulen. Dies bedeutet, dass nicht nur eine gute Verständlichkeit des gesprochenen Wortes über längere Distanzen angestrebt ist, sondern auch musikalische Darbietungen ihren Klang entfalten sollen. Aus akustischer Sicht widersprüchlich dazu wird die Aula auch als Speiseraum genutzt, bei der wiederum eine gute Hörsamkeit über kurze Distanzen relevant ist, um eine unerwünschte Lautheitsspirale zu vermeiden.

Im Mittel beträgt die Nachhallzeit in der Aula 1,14 s, der minimale Wert liegt bei 0,92 s bei 6300 Hz, der maximale wurde mit 1,34 s bei 1250 bis 1600 Hz gemessen. Der Nachhallzeitenverlauf ergibt einen unsteten Verlauf mit einer Erhöhung im hohen Frequenzbereich von 800 Hz bis 4000 Hz. (Abbildung 8-10)

Aufgrund der verschiedenen Nutzungsarten wurden die Nachhallzeiten gesondert für beide Nutzungsarten – Gruppe A2 und Gruppe B3 nach DIN 18041 – bewertet.

**Bewertung nach DIN 18041 Gruppe A2 – Versammlungsraum**

Als Versammlungsraum zählt die Aula zu der Gruppe A2 („Sprache/Vortrag“) der DIN 18041. Die Anforderung an die Nachhallzeit $T_{soll,A2}$ ist an das Raumvolumen V gekoppelt und wird mit folgender Formel ermittelt:

$$T_{soll,A2} = \left(0{,}37 * lg\frac{V}{m^3} - 0{,}14\right)s \quad (3)$$

Die ermittelte Soll-Nachhallzeit $T_{soll,A2}$ beträgt somit 0,98 s. Hierbei ist zu beachten, dass die Soll-Nachhallzeit $T_{soll}$ sich auf einen Besetzungszustand von 80% bezieht. Dies bedeutet, dass die im unbesetzten Zustand gemessenen Nachhallzeiten $T_{30,Mittel}$ umgerechnet werden müssen. Im Falle der Aula entspricht dies einer Personenbesetzung von beispielsweise 160 Schülern. Anhang A der DIN 18041 gibt die rechnerische Umrechnung wie folgt vor:

$$T_{besetzt} = \frac{T_{unbesetzt}}{1 + \frac{T_{unbesetzt} * \Delta A_{Personen}}{0{,}16 * V}} \quad (4)$$

$\Delta A_{Personen}$ ist dabei die zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche der Personen zwischen unbesetztem Zustand und besetztem Raum in m². Die zusätzliche Schallabsorptionsfläche durch Personen im Raum fließt pauschalisiert, aber frequenzabhängig in die Formel mit ein. Beispielsweise sind im Anhang A der DIN 18041 Schallabsorptionsflächen für stehende Personen, sitzende Personen je nach Bestuhlung und auch Schüler verschiedener Altersklassen vorgegeben. Durch einfache Multiplikation der zusätzlichen Schallabsorptionsfläche je Person $\Delta A_{1Person}$ mit der vorhandenen Personenanzahl N lässt sich die zusätzliche Schallabsorptionsfläche $\Delta A_{Personen}$ ermitteln.

$$\Delta_{APersonen} = N * \Delta A_{1Person} \quad (5)$$

Bei einer Besetzung der Aula von 80 % nach DIN 18041 Tabelle A.1 Zeile 6 (Schüler Primarstufe, sitzend an Tischen) ergibt sich folgendes Bild für die Nachhallzeit: (Abbildung 8-10)

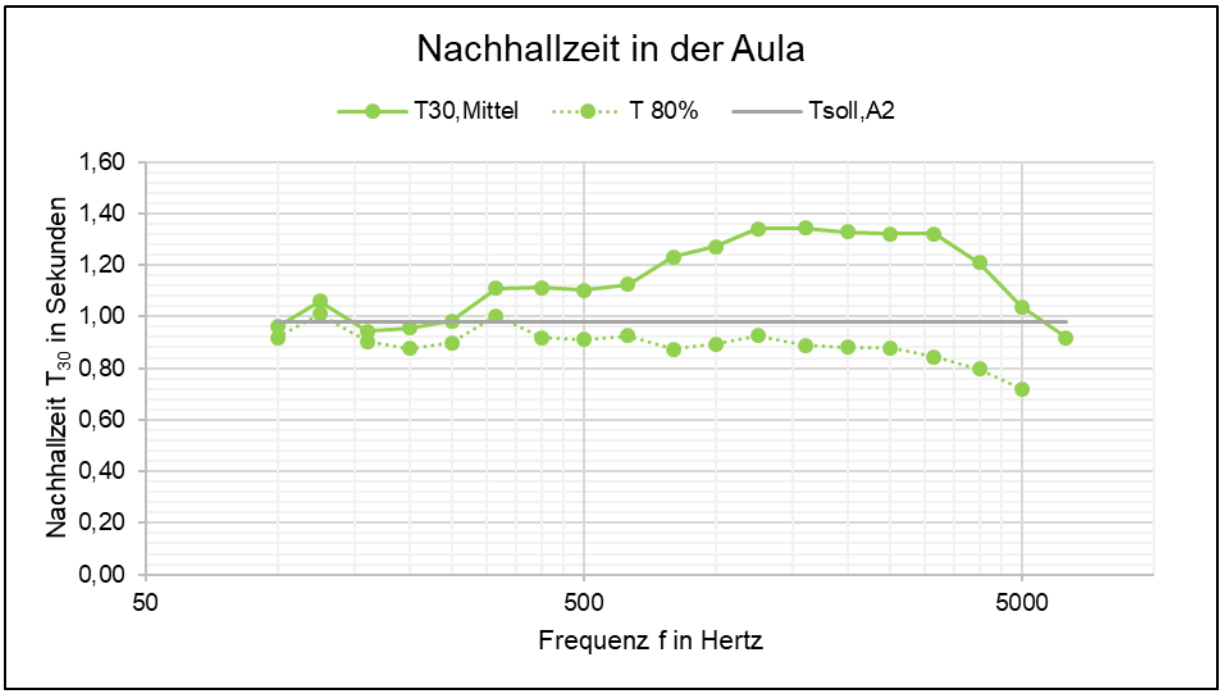


**Abbildung 8-10: Gemittelte Nachhallzeiten in der Aula**

Tabelle 8-2 dokumentiert die gemessenen, gemittelten Nachhallzeiten sowie die Umrechnung auf den zu 80 % besetzten Zustand für alle Frequenzen.

**Tabelle 8-2: Umgerechnete Nachhallzeiten in der Aula [20]**

| Frequenz [Hz] | $T_{30,Mittel}$ [s] | $T_{besetzt}$ [s] | $T_{soll,A2}$ [s] | $T_{besetzt}$ / $T_{soll}$ [s] |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,96 | 0,92 | 0,98 | 0,94 |
| 125 | 1,06 | 1,01 | 0,98 | 1,03 |
| 160 | 0,94 | 0,90 | 0,98 | 0,92 |
| 200 | 0,96 | 0,88 | 0,98 | 0,90 |
| 250 | 0,98 | 0,90 | 0,98 | 0,92 |
| 315 | 1,11 | 1,00 | 0,98 | 1,03 |
| 400 | 1,11 | 0,92 | 0,98 | 0,94 |
| 500 | 1,10 | 0,91 | 0,98 | 0,93 |
| 630 | 1,12 | 0,93 | 0,98 | 0,95 |
| 800 | 1,23 | 0,87 | 0,98 | 0,89 |
| 1000 | 1,27 | 0,89 | 0,98 | 0,91 |
| 1250 | 1,34 | 0,93 | 0,98 | 0,95 |
| 1600 | 1,34 | 0,89 | 0,98 | 0,91 |
| 2000 | 1,33 | 0,88 | 0,98 | 0,90 |
| 2500 | 1,32 | 0,88 | 0,98 | 0,90 |
| 3150 | 1,32 | 0,84 | 0,98 | 0,86 |
| 4000 | 1,21 | 0,80 | 0,98 | 0,81 |
| 5000 | 1,04 | 0,72 | 0,98 | 0,73 |
| 6300 | 0,92 | | 0,98 | |

Schließlich muss der Quotient aus der 80-prozentigen Besetzung $T_{besetzt}$ und der Soll-Nachhallzeit $T_{soll}$ in einem durch die DIN 18041 festgelegten frequenzabhängigen Toleranzbereich liegen, siehe Abbildung 8-11. In der grafischen Darstellung ist die Erfüllung der Nachhallzeitenanforderung klar erkenntlich, sodass eine bestmögliche akustische Situation für die Aula als Versammlungsraum vorhanden ist. Diese Nutzung war in der Planungsphase priorisiert.

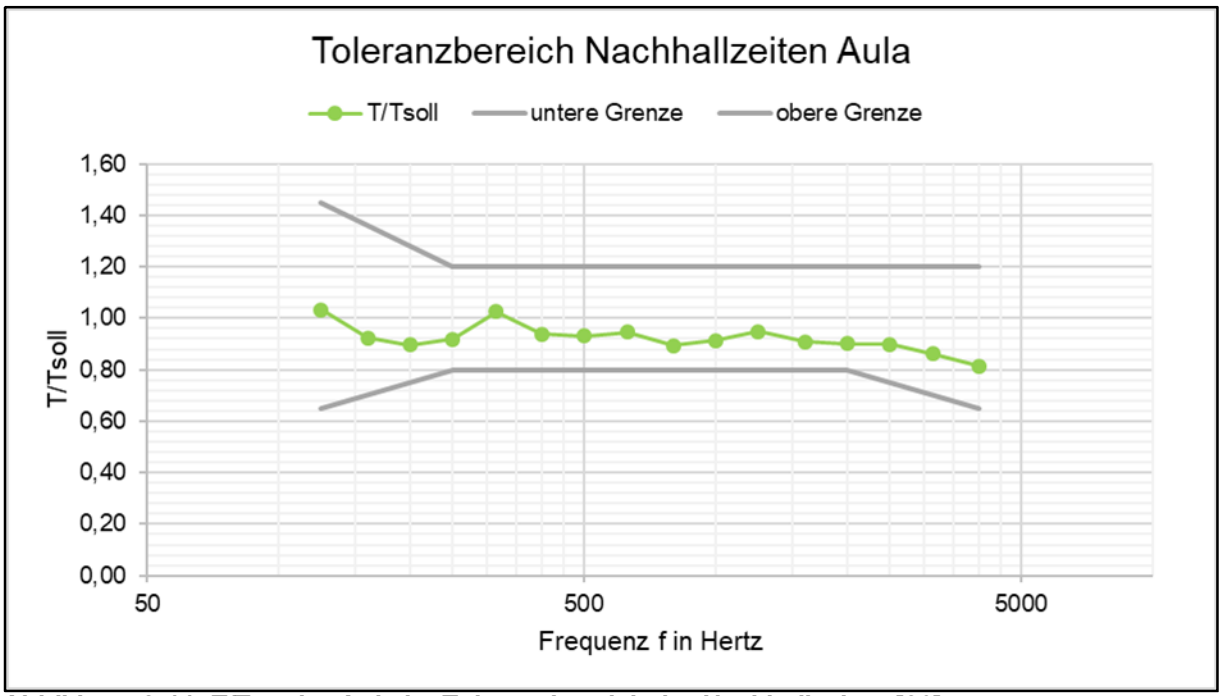


**Abbildung 8-11: $T/T_{soll}$ der Aula im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [20]**

**Bewertung nach DIN 18041 Gruppe B3 – Speiseraum**

Nach DIN 18041 ist die Aula als Speiseraum der Gruppe B3 („Räume zum längerfristigen Verweilen“) zuzuordnen. Es erfolgt nur eine indirekte Bewertung der Nachhallzeiten über die Ermittlung der äquivalenten Schallabsorptionsflächen nach Formel (2), siehe Seite 151.

Tabelle 8-3 stellt die frequenzabhängigen gemittelten Nachhallzeiten $T_{30,Mittel}$ und die berechneten Absorptionsflächen $A_{abs}$ zusammen. Es erfolgt ein Abgleich des Verhältnisses von $A_{abs}/V$ gegenüber der Anforderung von ≥ 0,15 m²/m³. Ab einem Frequenzbereich von 630 Hz reicht die äquivalente Schallabsorptionsfläche nicht aus um den geforderten Mindestwert nach DIN 18041 zu erfüllen. Somit ist für die Nutzungsart „Speiseraum“ nicht genug äquivalente Schallabsorptionsfläche vorhanden. Dieser Kompromiss muss allerdings eingegangen werden, da die Nutzung der Aula als Veranstaltungsraum priorisiert wird.

**Tabelle 8-3: Nachhallzeiten und Absorptionsflächen für die Aula als Speiseraum [13]**

| Frequenz [Hz] | $T_{30,Mittel}$ [s] | $A_{abs}$ [m²] | $A_{abs}/V$ [m²/m³] | Anforderung |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,96 | 178,62 | 0,17 | |
| 125 | 1,06 | 161,77 | 0,15 | |
| 160 | 0,94 | 181,65 | 0,17 | |
| 200 | 0,96 | 179,37 | 0,17 | ≥ 0,15 |
| 250 | 0,98 | 174,62 | 0,17 | ≥ 0,15 |
| 315 | 1,11 | 154,48 | 0,15 | ≥ 0,15 |
| 400 | 1,11 | 154,21 | 0,15 | ≥ 0,15 |
| 500 | 1,10 | 155,60 | 0,15 | ≥ 0,15 |
| 630 | 1,12 | 152,56 | 0,15 | ≥ 0,15 |
| 800 | 1,23 | 139,19 | 0,13 | ≥ 0,15 |
| 1000 | 1,27 | 134,81 | 0,13 | ≥ 0,15 |
| 1250 | 1,34 | 127,97 | 0,12 | ≥ 0,15 |
| 1600 | 1,34 | 127,78 | 0,12 | ≥ 0,15 |
| 2000 | 1,33 | 129,12 | 0,12 | ≥ 0,15 |
| 2500 | 1,32 | 129,91 | 0,12 | ≥ 0,15 |
| 3150 | 1,32 | 129,91 | 0,12 | |
| 4000 | 1,21 | 141,95 | 0,13 | |
| 5000 | 1,04 | 165,20 | 0,16 | |
| 6300 | 0,92 | 186,79 | 0,18 | |

## *8.4 Messergebnisse Klassenräume 1.01, 1.08 und 2.01*

Die Klassenräume befinden sich im Gebäudeteil B des Gebäudes. Raum 1.01 und Raum 1.08 liegen im 1. Obergeschoss, Raum 2.01 im 2. Obergeschoss, genau über Raum 1.01. Die Räume grenzen jeweils an Außenräume, an das Treppenhaus, an andere Klassenräume und diverse Funktionsräume (Grundriss siehe Abbildung 8-2).

Alle Klassenzimmer sind ungefähr gleich groß mit Grundflächen von rund 83 m². Im 1. OG belaufen sich die Raumhöhen auf rund 3 m, im 2. OG auf rund 3,15 m. Dadurch ergeben sich Raumvolumen von ca. 250 m³ bzw. 260 m³. In den Klassenräumen kamen im Bereich der Tischgruppen Deckensegel des Fabrikates Hera Design mit den Abmessungen 5,00 x 6,25 m = 31,25 m² zum Einsatz.

**Abbildung 8-12: Klassenzimmer mit Akustik-Deckensegel**

**Abbildung 8-13: Messung im Klassenraum**

Aufgrund der einheitlichen Raumausstattungen ergeben sich ähnliche Nachhallzeitenverläufe. Die mittleren Nachhallzeiten belaufen sich auf jeweils 0,69 s, 0,8 s und 0,88 s. In allen Verläufen sind deutliche Erhöhungen bei Frequenzen von 250 Hz bzw. 315 Hz erkennbar. (siehe Tabelle 8-4) Abbildung 8-14 stellt die Verläufe grafisch im Vergleich dar.

**Tabelle 8-4: Gemittelte Nachhallzeiten der Klassenräume [20]**

| Frequenz [Hz] | Raum 1.01 $T_{30,Mittel}$ [s] | Raum 1.08 $T_{30,Mittel}$ [s] | Raum 2.01 $T_{30,Mittel}$ [s] |
|---|---|---|---|
| 100 | 0,81 | 0,79 | 0,97 |
| 125 | 0,67 | 0,81 | 0,86 |
| 160 | 0,74 | 0,86 | 0,81 |
| 200 | 0,73 | 0,99 | 0,92 |
| 250 | 0,88 | 0,98 | 0,99 |
| 315 | 0,85 | 1,11 | 1,04 |
| 400 | 0,75 | 0,90 | 0,98 |
| 500 | 0,70 | 0,88 | 0,92 |
| 630 | 0,67 | 0,79 | 0,81 |
| 800 | 0,62 | 0,72 | 0,78 |
| 1000 | 0,64 | 0,74 | 0,80 |
| 1250 | 0,67 | 0,73 | 0,80 |
| 1600 | 0,67 | 0,77 | 0,89 |
| 2000 | 0,73 | 0,78 | 0,93 |
| 2500 | 0,69 | 0,77 | 0,93 |
| 3150 | 0,64 | 0,74 | 0,92 |
| 4000 | 0,60 | 0,67 | 0,85 |
| 5000 | 0,58 | 0,66 | 0,77 |
| 6300 | 0,53 | 0,60 | 0,68 |

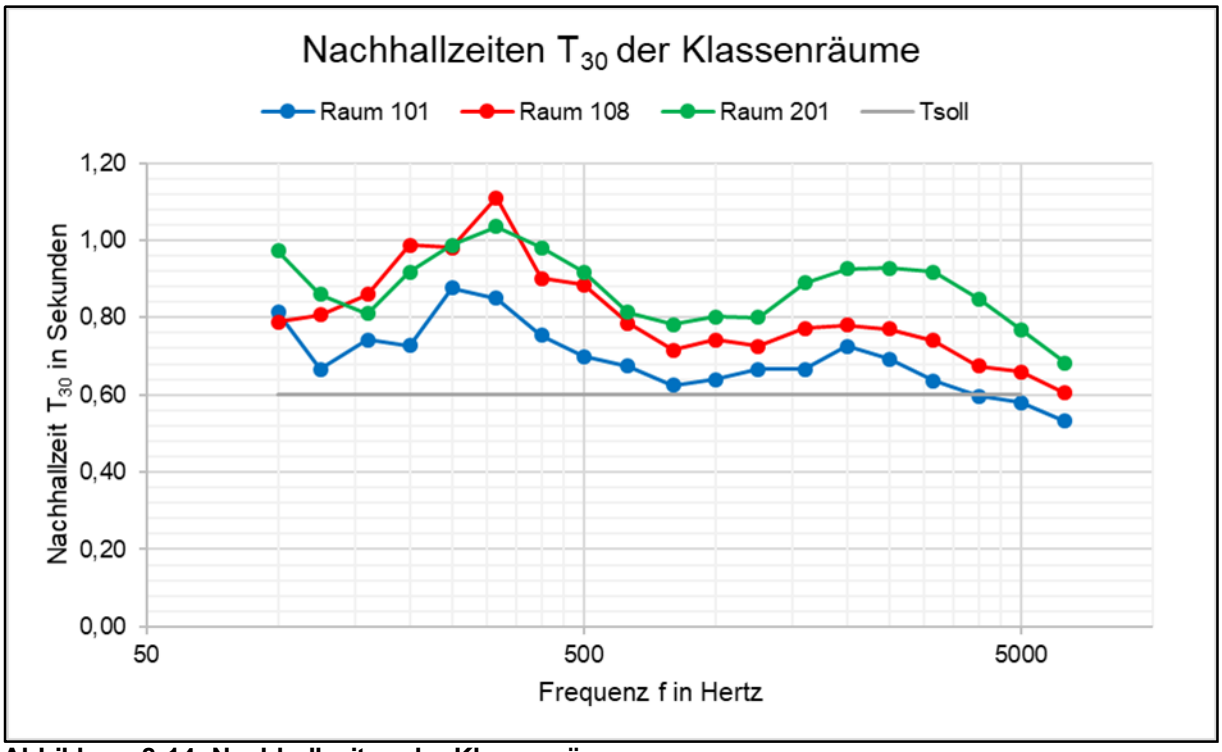


**Abbildung 8-14: Nachhallzeiten der Klassenräume**

### Bewertung Raum 1.01 nach DIN 18041 Gruppe A3

Nach DIN 18041 sind Klassenräume der Gruppe A3 („Unterricht/Kommunikation“) zuzuordnen. Die Berechnung der Soll-Nachhallzeit $T_{soll,A3}$ erfolgt nach folgender Formel:

$$T_{soll,A3} = (0{,}32 * \lg\left(\frac{V}{m^3} - 0{,}17\right)s \quad \textbf{(6)}$$

Auch hier erfolgt eine Umrechnung der Nachhallzeiten auf den besetzten Zustand. Eine 80-prozentige Raumbesetzung entspricht einer Personenanzahl von 21. Tabelle 8-5 dokumentiert die gemessenen, gemittelten Nachhallzeiten sowie die Umrechnung auf den zu 80 % besetzten Zustand für alle Frequenzen, Abbildung 8-15 stellt diese grafisch dar.

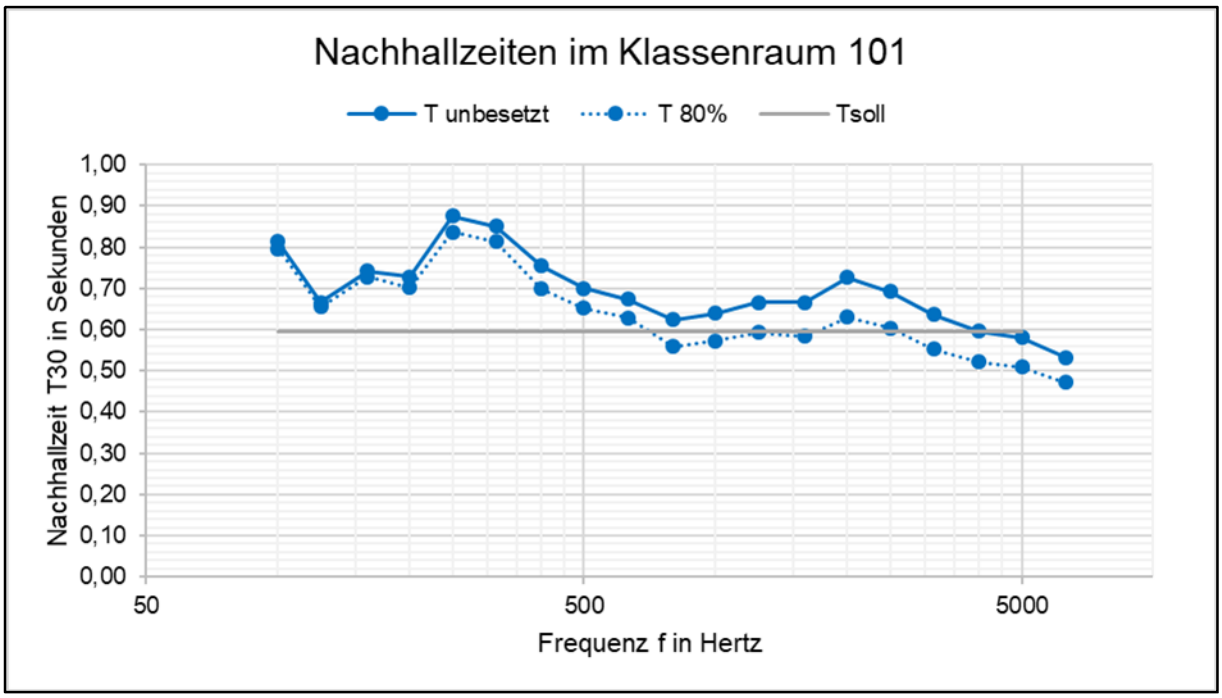


**Abbildung 8-15: Nachhallzeiten in Raum 1.01**

**Tabelle 8-5: Umgerechnete Nachhallzeiten im Klassenraum 1.01**

| Frequenz | $T_{30,Mittel}$ [s] | $T_{besetzt}$ [s] | $T_{soll}$ [s] | $T_{besetzt}$ / $T_{soll}$ [s] |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,81 | 0,80 | 0,60 | 1,34 |
| 125 | 0,67 | 0,65 | 0,60 | 1,10 |
| 160 | 0,74 | 0,73 | 0,60 | 1,22 |
| 200 | 0,73 | 0,70 | 0,60 | 1,17 |
| 250 | 0,88 | 0,84 | 0,60 | 1,40 |
| 315 | 0,85 | 0,81 | 0,60 | 1,36 |
| 400 | 0,75 | 0,70 | 0,60 | 1,17 |
| 500 | 0,70 | 0,65 | 0,60 | 1,09 |
| 630 | 0,67 | 0,63 | 0,60 | 1,05 |
| 800 | 0,62 | 0,56 | 0,60 | 0,94 |
| 1000 | 0,64 | 0,57 | 0,60 | 0,96 |
| 1250 | 0,67 | 0,59 | 0,60 | 0,99 |
| 1600 | 0,67 | 0,58 | 0,60 | 0,98 |
| 2000 | 0,73 | 0,63 | 0,60 | 1,06 |
| 2500 | 0,69 | 0,60 | 0,60 | 1,01 |
| 3150 | 0,64 | 0,55 | 0,60 | 0,93 |
| 4000 | 0,60 | 0,52 | 0,60 | 0,87 |
| 5000 | 0,58 | 0,51 | 0,60 | 0,85 |
| 6300 | 0,53 | 0,47 | | |

Auch hier wird der Quotient aus $T_{besetzt}$ und $T_{soll}$ in den Toleranzbereich hineingelegt. In der grafischen Darstellung (Abbildung 8-16) ist deutlich erkennbar, dass die Nachhallzeiten im Bereich von 250 Hz bis 315 Hz außerhalb des im DIN 18041 empfohlenen Toleranzbereiches liegen und die Nachhallzeiten an dieser Stelle zu hoch sind. Diese Frequenzen liegen knapp unterhalb des Sprachbereiches.

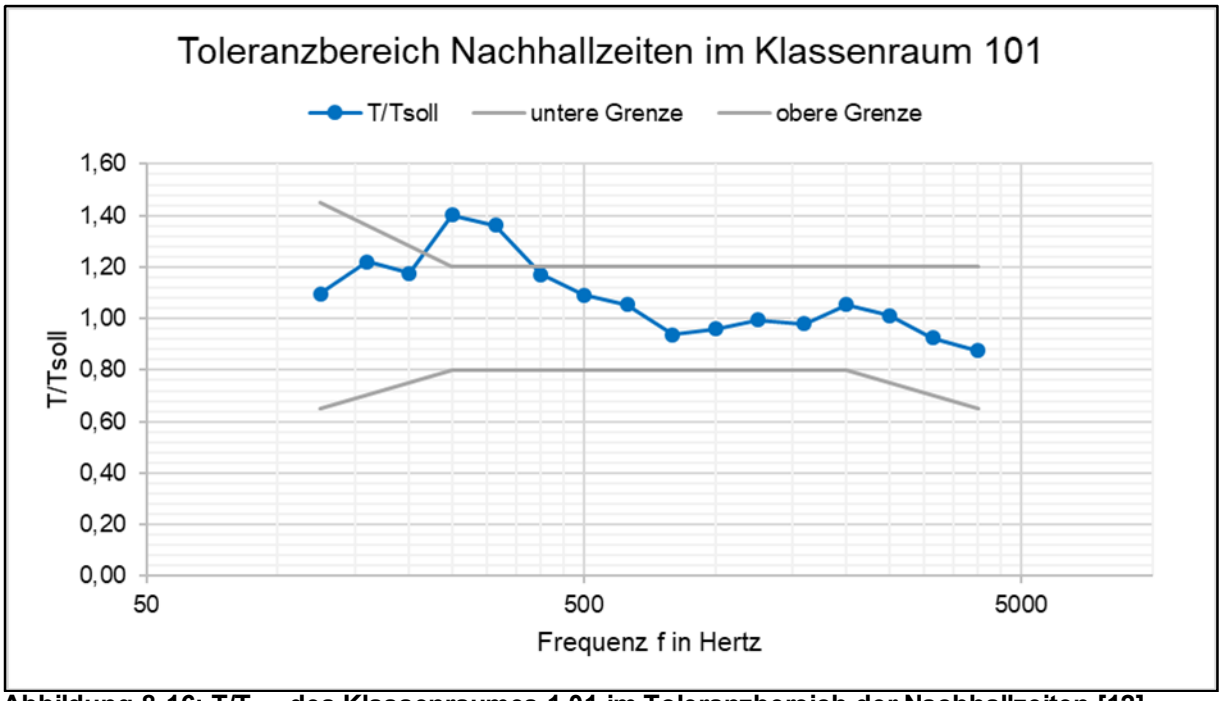


**Abbildung 8-16: $T/T_{soll}$ des Klassenraumes 1.01 im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [12]**

### Bewertung Raum 1.08 nach DIN 18041 Gruppe A3

Analog zu Raum 1.01 erfolgen nun die Auswertungen für Raum 1.08. Tabelle 8-6 fasst zunächst die Nachhallzeiten und deren Umrechnungen zusammen:

**Tabelle 8-6: Umgerechnete Nachhallzeiten im Klassenraum 1.08**

| Frequenz | $T_{30,Mittel}$ [s] | $T_{besetzt}$ [s] | $T_{soll}$ [s] | $T_{besetzt} / T_{soll}$ [s] |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,79 | 0,77 | 0,60 | 1,29 |
| 125 | 0,81 | 0,79 | 0,60 | 1,32 |
| 160 | 0,86 | 0,84 | 0,60 | 1,41 |
| 200 | 0,99 | 0,94 | 0,60 | 1,57 |
| 250 | 0,98 | 0,93 | 0,60 | 1,56 |
| 315 | 1,11 | 1,05 | 0,60 | 1,76 |
| 400 | 0,90 | 0,82 | 0,60 | 1,38 |
| 500 | 0,88 | 0,81 | 0,60 | 1,36 |
| 630 | 0,79 | 0,73 | 0,60 | 1,22 |
| 800 | 0,72 | 0,63 | 0,60 | 1,06 |
| 1000 | 0,74 | 0,65 | 0,60 | 1,09 |
| 1250 | 0,73 | 0,64 | 0,60 | 1,07 |
| 1600 | 0,77 | 0,66 | 0,60 | 1,11 |
| 2000 | 0,78 | 0,67 | 0,60 | 1,12 |
| 2500 | 0,77 | 0,66 | 0,60 | 1,11 |
| 3150 | 0,74 | 0,63 | 0,60 | 1,06 |
| 4000 | 0,67 | 0,58 | 0,60 | 0,97 |
| 5000 | 0,66 | 0,57 | 0,60 | 0,96 |
| 6300 | 0,60 | 0,53 | | |

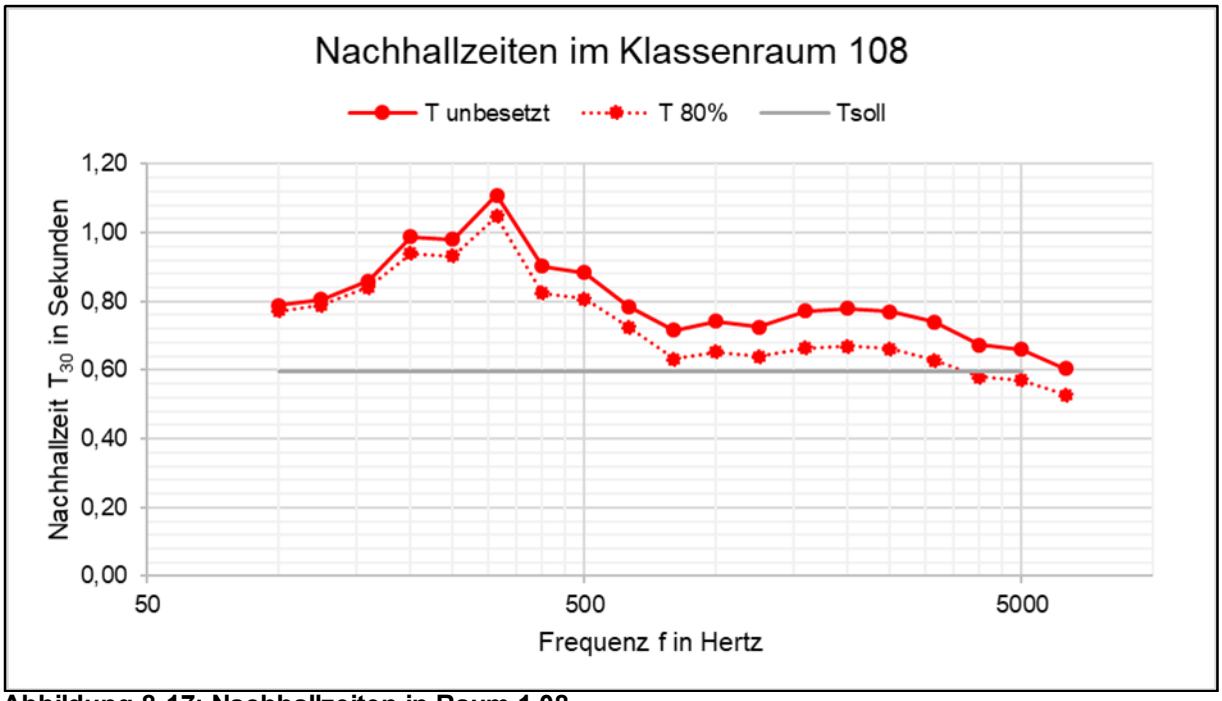


**Abbildung 8-17: Nachhallzeiten in Raum 1.08**

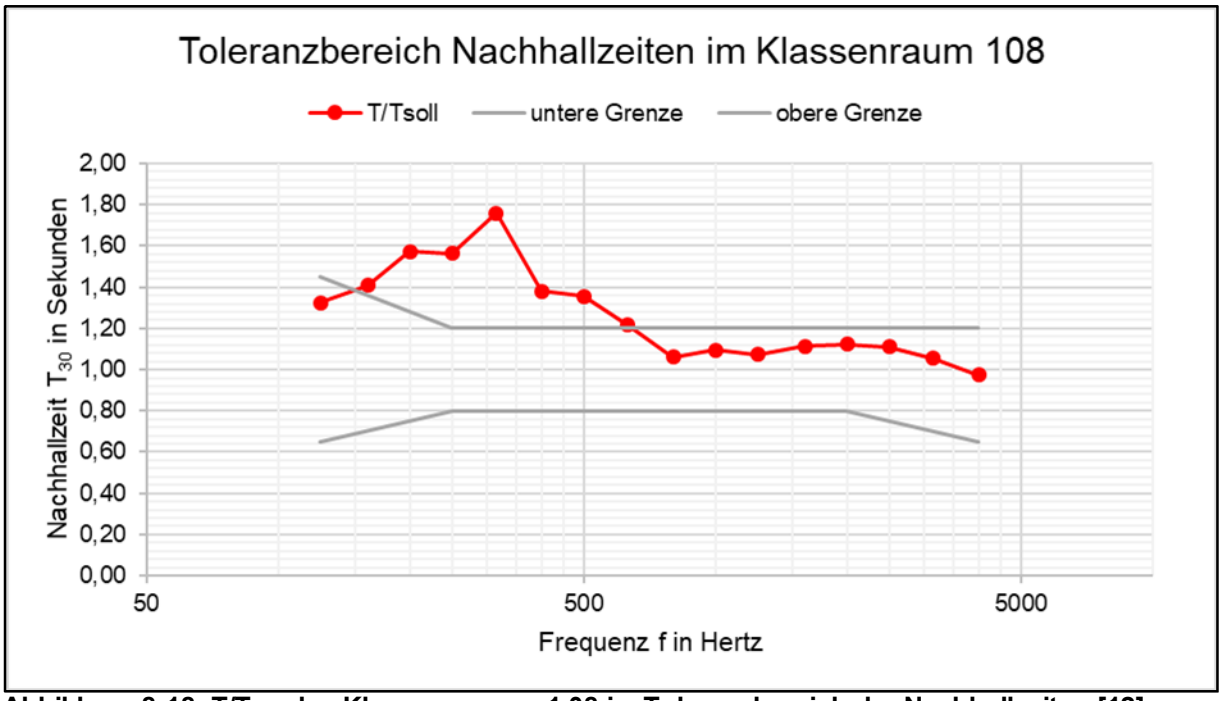


**Abbildung 8-18: $T/T_{soll}$ des Klassenraumes 1.08 im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [12]**

Im Diagramm (Abbildung 8-17) ist erkennbar, dass die Nachhallzeiten auch hier deutlich über dem Sollwert von 0,6 s liegen. Insbesondere im niederfrequenten Bereich sind sie mit bis zu 1,11 s zu lang. Abbildung 8-18 zeigt die Lage gegenüber dem Toleranzbereich, welcher bei Frequenzen zwischen 200 Hz und 500 Hz deutlich überschritten wird.

### Bewertung Raum 2.01 nach DIN 18041 Gruppe A3

Ergänzend zu den Räumen 1.01 und 1.08 wurde auch Raum 2.01 vermessen. Auch hier zunächst die Tabelle der Nachhallzeiten im Überblick.

**Tabelle 8-7: Umgerechnete Nachhallzeiten im Klassenraum 2.01**

| Frequenz | $T_{30,Mittel}$ [s] | $T_{besetzt}$ [s] | $T_{soll}$ [s] | $T_{besetzt}$ / $T_{soll}$ [s] |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,97 | 0,95 | 0,60 | 1,57 |
| 125 | 0,86 | 0,84 | 0,60 | 1,40 |
| 160 | 0,81 | 0,79 | 0,60 | 1,32 |
| 200 | 0,92 | 0,88 | 0,60 | 1,45 |
| 250 | 0,99 | 0,94 | 0,60 | 1,56 |
| 315 | 1,04 | 0,98 | 0,60 | 1,63 |
| 400 | 0,98 | 0,89 | 0,60 | 1,48 |
| 500 | 0,92 | 0,84 | 0,60 | 1,39 |
| 630 | 0,81 | 0,75 | 0,60 | 1,25 |
| 800 | 0,78 | 0,69 | 0,60 | 1,14 |
| 1000 | 0,80 | 0,70 | 0,60 | 1,16 |
| 1250 | 0,80 | 0,70 | 0,60 | 1,16 |
| 1600 | 0,89 | 0,75 | 0,60 | 1,25 |
| 2000 | 0,93 | 0,78 | 0,60 | 1,29 |
| 2500 | 0,93 | 0,78 | 0,60 | 1,30 |
| 3150 | 0,92 | 0,76 | 0,60 | 1,26 |
| 4000 | 0,85 | 0,71 | 0,60 | 1,18 |
| 5000 | 0,77 | 0,65 | 0,60 | 1,08 |
| 6300 | 0,68 | 0,59 | | |

Analog zu den Räumen 1.01 und 1.08 ist auch hier eine Überschreitung der empfohlenen Nachhallzeit von 0,6 s zu verzeichnen (Abbildung 8-19). Insbesondere im Niederfrequenzbereich, aber auch im Bereich von 2500 Hz ist die Nachhallzeit erhöht.

Der Quotient $T/T_{soll}$ liegt zwischen 800 und 1250 Hz nah an der Obergrenze des Toleranzbereiches (Abbildung 8-20), in allen anderen Frequenzbereichen wird die Obergrenze meist überschritten. Die größte Abweichung beträgt 163% über der Ideallinie bei einer Frequenz von 315 Hz.

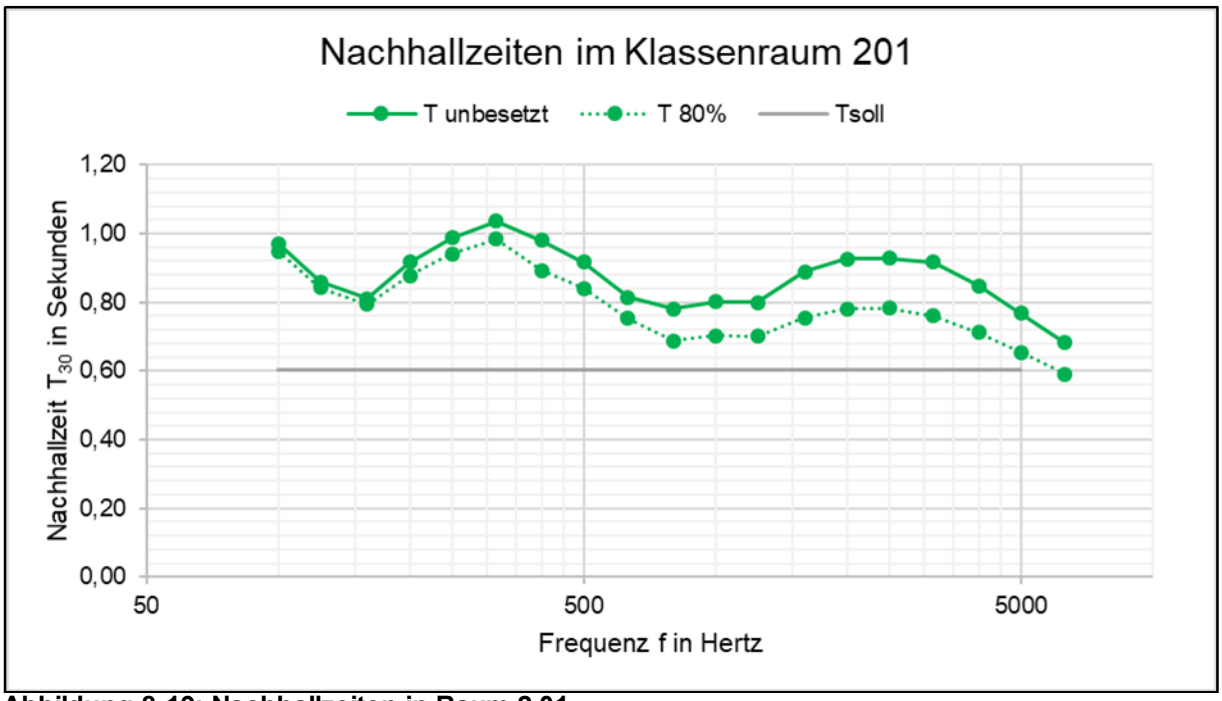


**Abbildung 8-19: Nachhallzeiten in Raum 2.01**

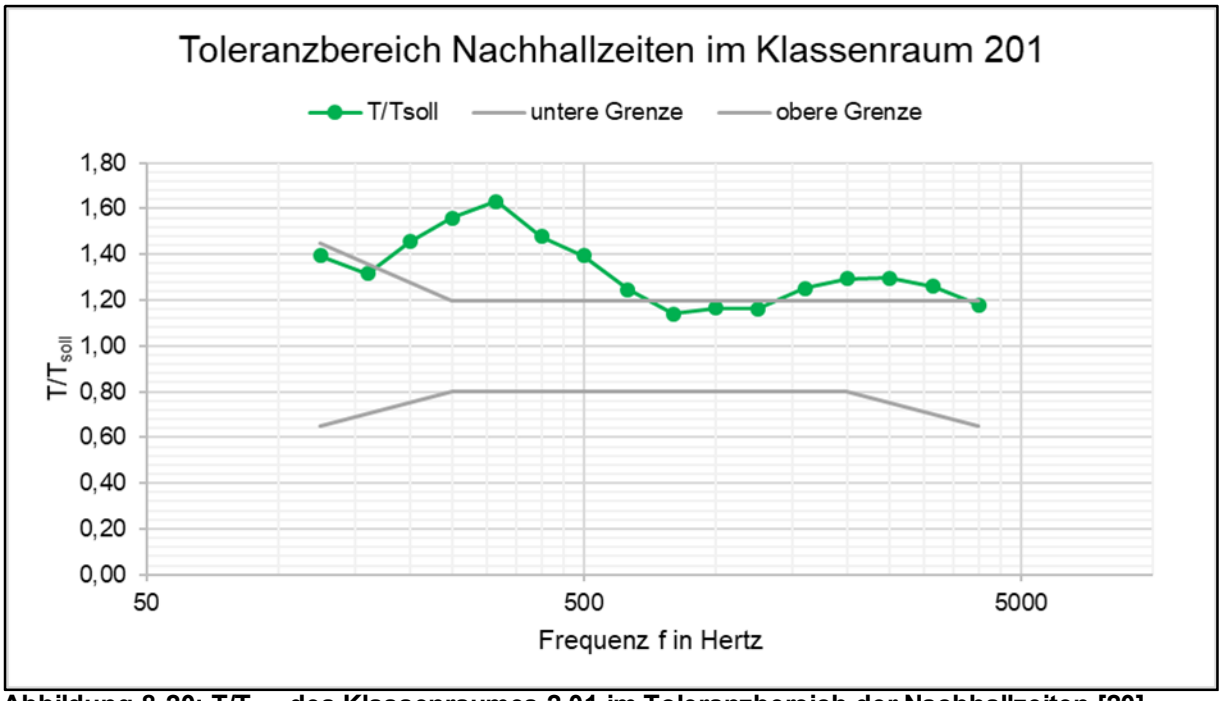


**Abbildung 8-20: $T/T_{soll}$ des Klassenraumes 2.01 im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [20]**

## *8.5 Auswertung*

### Raum der Stille 1.14

Der Mindestwert für die Absorberfläche wird in allen betrachteten Frequenzbereichen eingehalten und häufig sogar um 50% übererfüllt. Dank der Akustikdecke und des Teppichbelages ergeben sich im Raum der Stille optimale Werte für die gemessenen Nachhallzeiten, sodass nicht nur alle Anforderungen erfüllt sind, sondern sich auch ein gleichmäßiger Nachhallzeitenverlauf mit nur geringen Schwankungen einstellt.

### Aula 0.26

Die Aula als Sonderfall mit zwei konträren Nutzungsarten erreicht insgesamt gute Ergebnisse. Für die priorisierte Nutzungsart Versammlungs- und Veranstaltungsraum sind ideale Verhältnisse gegeben.

Für die Nutzung als Speisesaal sind in den Frequenzen über 315 Hz nicht genug Schallabsorptionsflächen vorhanden. Jedoch werden die Sollvorgaben, gerade im mittleren Frequenzbereich, nur geringfügig unterschritten. Eine dauerhafte Erhöhung der Schallabsorptionsfläche würde die Nutzung als Speisesaal akustisch begünstigen, jedoch hätte dies negative Auswirkungen auf die gewünschte Klangqualität bei Veranstaltungen. Sollte sich z. B. durch Nutzerrückmeldungen zeigen, dass Unzufriedenheit über die akustische Behaglichkeit während der Mittagszeiten vorherrscht, so könnte über mobile Absorberflächen wie Stellwände nachgedacht werden, die bei Musikveranstaltungen leicht entfernt werden können. Das war bislang nicht der Fall.

### Klassen

Bei den Nachhallzeiten der Klassenräume ist eine ungünstige Situation in tieferen Frequenzbereichen erkennbar. Von den drei gemessenen Räumen stellt sich Raum 1.01 am besten dar. Da die Räume baulich identisch sind, ist dies wahrscheinlich auf Einrichtungsgegenstände zurückzuführen. Abbildung 8-21 fasst die gemessenen und die für eine 80-prozentige Besetzung berechneten Nachhallzeiten noch einmal im Vergleich zusammen. $T_{soll}$ liegt bei 0,6 s.

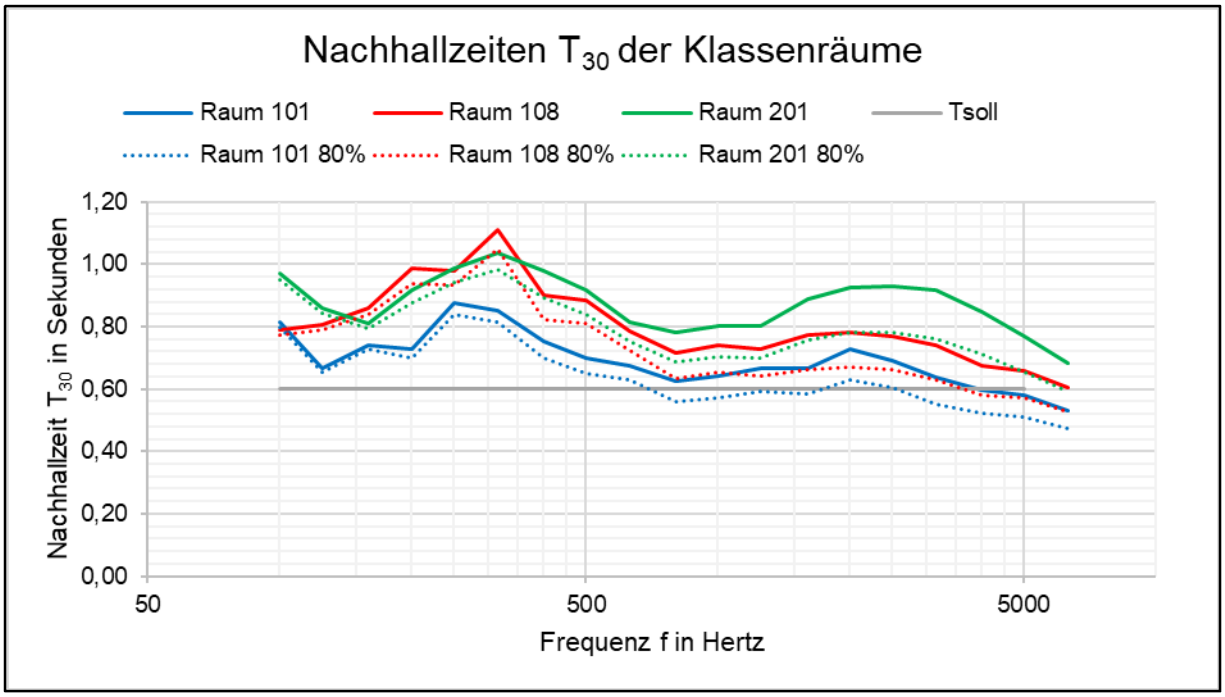


**Abbildung 8-21: Nachhallzeiten der Klassenräume im Vergleich**

Raum 1.08 und 2.01 haben im niederfrequenten Bereich ähnliche Spitzen mit bis zu 1,11 s Nachhallzeit bei 315 Hz. Eine weitere Spitze zeigt sich bei 2000 Hz mit bis zu 0,93 s im Raum 201. Diese führt bei Raum 2.01 dazu, dass der Toleranzbereich auch bei höheren Frequenzen überschritten wird.

Während es bei Raum 1.01 nur Überschreitungen zwischen 250 und 315 Hz gibt, sind diese im niederfrequenten Bereich bei den Räumen 1.08 und 2.01 stärker ausgeprägt.

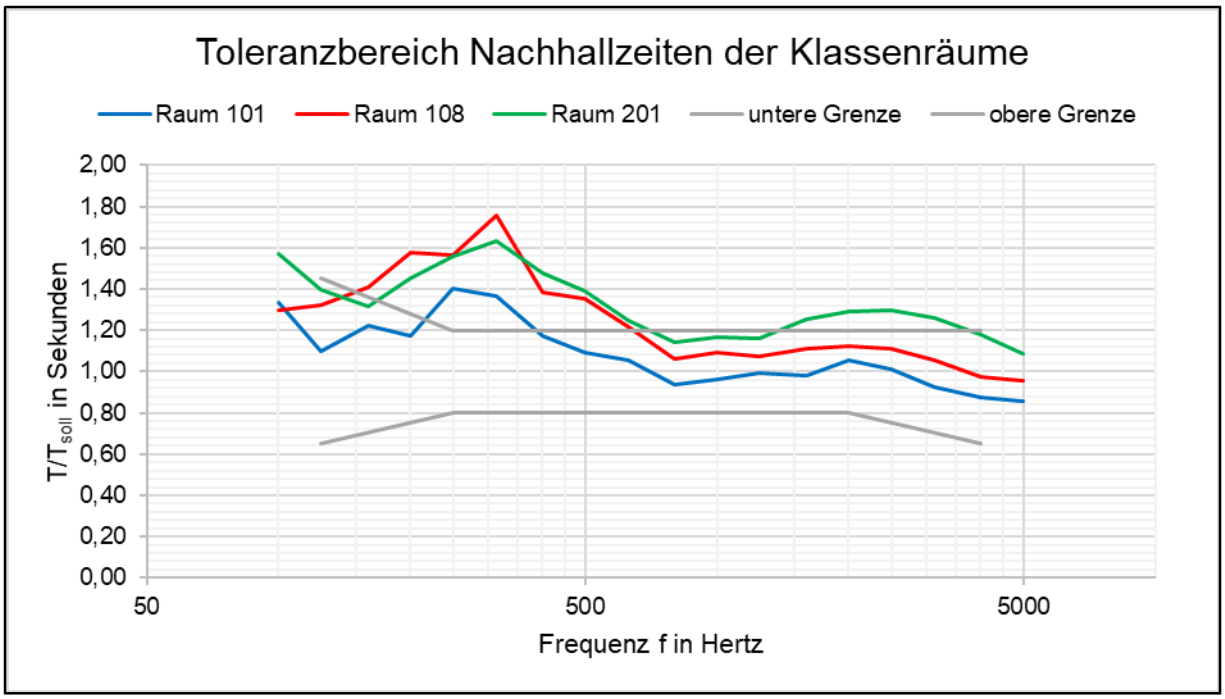


**Abbildung 8-22: $T/T_{soll}$ der Klassenräume im Toleranzbereich der Nachhallzeiten im Vergleich**

Sollte sich im Rahmen von Nutzergesprächen tatsächlich eine Unzufriedenheit mit der Akustik in den Räumen 1.08 und 2.01 herausstellen, kann über Maßnahmen zur Erhöhung der Absorberfläche (Tiefenabsorber) nachgedacht werden. Während der ersten 4 Betriebsjahre wurden keine negativen Erfahrungen kommuniziert.

## *8.6 Verallgemeinerung und Fazit*

In den Unterrichtsräumen wurde insgesamt ein hohes Qualitätsniveau hinsichtlich der Nachhallzeit umgesetzt. Hierfür wurden in den Klassenräumen schallabsorbierende Holzwolleplatten vom Fabrikat Heradesign über dem Sitzbereich der Schüler installiert, was jedoch gemäß DIN 18041 hinsichtlich der Anordnung als ungünstig bewertet wird [6]. Die Absorption tieffrequenter Schallsignale sollte nach [7] idealerweise „in der Nähe der Schallquelle sowie in Raumecken und an Raumkanten“ erfolgen. Tatsächlich zeigen die Messungen in den Räumen 1.08 und 2.01 Überschreitungen der Nachhallzeit im niederfrequenten Bereich.

Im Akustikgutachten [21] aus dem Jahr 2011 war zunächst der Istzustand der Räume ohne akustische Maßnahmen berechnet und anschließend verschiedene Ausführungsvarianten mit Decken- und teilweise Wandabsorbern vorgeschlagen worden. Da keine dieser Varianten zur Ausführung kam, erfolgt hier kein Abgleich der Messwerte mit den Planwerten. Das Gutachten befindet sich in Anlage C.

Die Nutzerbefragung mit der Begleitforschung am 14. April 2015 hat ergeben, dass die Lehrer die Räume trotz ihrer Länge als still und die Akustik als sehr gut empfinden. Das Klima trage zu einem konzentrierten Arbeiten bei. Auch in einer erneuten Nutzerbefragung am 29.09.2017 wurde die gute Sprachverständlichkeit gelobt.

# 9 Anhang

## *9.1 Literatur*


[1] DIN 4108-2:2003, „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden," Beuth, Berlin, 2003.

[2] DIN 4108-2, *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden,* Berlin: Beuth, 2013.

[3] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband 3: Passivhaus-Schulen, Darmstadt: Passivhaus Institut, 2006.

[4] F. Leusden und H. Freymark, „Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch," *Gesundheitsingenieur 72 Heft 16,* pp. 271-273, 1951.

[5] K. Schild und W. M. Willems, Wärmeschutz: Grundlagen – Berechnung – Bewertung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

[6] DIN 18041, *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen,* Berlin: Beuth, 2004.

[7] W. M. Willems, K. Schild, S. Dinter und D. Stricker, Formeln und Tabellen Bauphysik, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

[8] J. Stresing, „Bachelorarbeit "Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz und zur Temperaturbehaglichkeit in der Aula einer Passivhausschule in Halle"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[9] Umweltbundesamt, „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden," 2008. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fuer-innenraumhygiene-in-schulgebaeuden. [Zugriff am 28 Februar 2018].

[10] Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA), „Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.5 – Raumtemperatur," Juni 2010. [Online]. Available: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-5.pdf?__blob=publicationFile&v=3. [Zugriff am 20 April 2018].

[11] DIN EN 13779, *Lüftung von Nichtwohngebäuden,* Berlin: Beuth, 2007.

[12] K. Gebhardt, „Masterarbeit "Qualitätssicherung für die Planung und Erstellung eines Monitoringkonzeptes für die St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2011.

[13] DIN EN 15251, *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik,* Berlin: Beuth, 2012.

[14] DIN EN ISO 7730, „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit," Beuth, Berlin, 2006.

[15] Umweltbundesamt, „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft," 2008. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf. [Zugriff am 2017].

[16] www.mb-systemtechnik.de, „Datenblatt: CO2-Sensor Module für OEM Anwendung SEN CO2 O 100," [Online]. Available: https://files.elv.com/Assets/Produkte/12/1232/123231/Downloads/122231_SEN%20CO2%20O%20100_data.pdf. [Zugriff am 4 Juli 2018].

[17] Steinblock Architekten, *Planungsunterlagen,* Magdeburg: Steinblock Architekten, 2013.

[18] DIN EN ISO 16283-1, „Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 1: Luftschalldämmung," CEN-CENELEC Management-Zentrum, Brüssel, 2014.

[19] DIN EN ISO 3382-2, „Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen," Beuth, Berlin, 2008.

[20] D. Kleer, „Bachelorarbeit "Schallschutz und Raumakustik in einer Grundschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.

[21] Ingenieurbüro für Schallschutz GmbH Magdeburg, „Schallschutztechnische Planung Raumakustik für ausgewählte Räume im Rahmen des BV " Neubau einer Grundschule in Halle"," Magdeburg, 2011.

[22] S. Jäger und F. Switala, „Bachelorarbeit "Vergleich der Ergebnisse der Heizlastberechnung für eine Passivhausschule nach verschiedenen Verfahren für die St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.

[23] P. Weingart, „Masterarbeit "Qualitätssicherung einer Passivhausschule in Holzbauweise mithilfe ingenieurtechnischer Messverfahren"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[24] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV e.V., *Arbeiten in Küchenbetrieben,* Berlin, 2007.

[25] DIN EN ISO 16283-2, „Akustik – Messung der Schalldämmung und von Bauteilen am Bau – Teil 2: Trittschalldämmung," CEN-CENELEC Management-Zentrum, Brüssel, 2017.

[26] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Sommerverhalten von Nichtwohngebäuden im Passivhausstandard," in *Protokollband 41*, Darmstadt, 2012.

## *9.2 Nomenklatur*

**Tabelle 9-1: Lateinische Formelzeichen**

| Formelzeichen | Erläuterung | Einheit |
|---|---|---|
| $\Delta A_{Personen}$ | zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche der Personen zwischen unbesetztem Zustand und besetztem Raum | m² |
| $\Delta A_{1Person}$ | zusätzliche Schallabsorptionsfläche je Person | m² |
| A | Fläche | m² |
| $A_W$ | Fensterfläche (engl. window) | m² |
| $c_{wirk}$ | spezifische Wärmespeicherkapazität | kJ/(kgK)<br>Wh/(m²K) |
| d | Schichtdicke | m |
| $d_i$ | wirksame Schichtdicke | m |
| $F_c$ | Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen | - |
| $F_S$ | Teilbestrahlungsfaktor | - |
| $f_{WG}$ | Fensterflächenanteil bezogen auf die Grundfläche | - |
| g | Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung | - |
| $g_{tot}$ | Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung einschließlich Sonnenschutz | - |
| $h_{\vartheta \geq 25}$ | Zeit, in der die Raumtemperatur über 25 °C beträgt | h |
| N | Anzahl der Personen | |
| n, $n_{50}$ | Luftwechselrate | $h^{-1}$ |
| $R_W$ | bewertetes Schalldämmmaß | dB |
| $S_{vorh}$ | vorhandener Sonneneintragskennwert | - |
| $S_x$ | anteiliger Sonneneintragskennwert | - |
| $S_{zul}$ | zulässiger Sonneneintragskennwert | - |
| T | Nachhallzeit | s |
| $T_{besetzt}$ | Nachhallzeit für den besetzten Raum | s |
| $T_{unbesetzt}$ | Nachhallzeit für den unbesetzten Raum | s |

| Formelzeichen | Erläuterung | Einheit |
|---|---|---|
| U | Wärmedurchgangskoeffizient | W/(m²K) |
| V | (Raum)Volumen | m³ |

**Tabelle 9-2: Griechische Formelzeichen**

| Formelzeichen | Erläuterung | Einheit |
|---|---|---|
| $\Delta$ | Differenz | verschieden |
| $\vartheta$ | Temperatur | °C, K |
| $\vartheta_{b,op}$ | operative Innenraumtemperatur | °C |
| $\lambda$ | Wärmeleitfähigkeit | W/(mK) |
| $\rho$ | Rohdichte | kg/m³ |

**Tabelle 9-3: Abkürzungen**

| Kürzel | Erläuterung |
|---|---|
| ASR | Technische Regeln für Arbeitsstätten |
| $CO_2$ | Kohlenstoffdioxid |
| d | Tag |
| d. J. | des Jahres |
| DIN | Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm |
| DIN V | Deutsches Institut für Normung; deutsche Vornorm |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| EG | Erdgeschoss |
| EN | Europäische Norm |
| EnBau | (Forschung für) Energieoptimiertes Bauen im Neubau |
| EnEV | Energieeinsparverordnung (Jahr 2009) |
| EnOB | (Forschung für) Energieoptimiertes Bauen |
| EnSan | (Forschung für) Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung |
| IDA | Indoor air (Klassifizierung der Raumluftqualität) |
| i. H. v. | in Höhe von |
| ISO | International Standardisation Organisation; internationale Norm |
| K | Kelvin |
| k. A. | keine Angabe |
| Kh | Übertemperaturgradstunden in Kelvinstunden pro Jahr |
| OG | Obergeschoss |
| PCM | Phase change material |
| PHI | Passivhaus Institut Darmstadt |
| ppm | Parts per million ($10^{-6}$) |
| RLT | Raumlufttechnik |
| TGA | Technische Gebäudeausrüstung |

## *9.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis*

Abbildung 1-1: Vergleich der Raumlufttemperaturen der Klassenräume und des Hortes ..... 9
Abbildung 1-2: Temperatur und Feuchte im südorientierten Klassenraum 1.08 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr ..... 13
Abbildung 1-3: Temperatur und Feuchte im nordorientierten Klassenraum 2.01 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr ..... 14
Abbildung 1-4: Fensteröffnung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur – Jahre 2016 bis 2017 ..... 16
Abbildung 1-5: Entwurf Bedienungsanleitung: Links „zu kalt“, Rechts: „zu warm“ ..... 18
Abbildung 2-1: Zulässige Werte des Fensterflächenanteils bezogen auf die Grundfläche [2] ..... 19
Abbildung 2-2: Blick in den Fensterkasten, hochgefahrene Jalousie rechts am Innenflügel ..... 20
Abbildung 2-3: Jalousien in den Kastenfenstern und der Pfosten-Riegel-Fassade ..... 20
Abbildung 2-4: Lage der Fühler gemäß Messkonzept ..... 24
Abbildung 2-5: Lage der Fühler im Wandquerschnitt ..... 24
Abbildung 2-6: Temperaturen der Solarwand in drei Höhen und vier Ebenen ..... 26
Abbildung 2-7: Innenthermographie der Solaraußenwand ..... 27
Abbildung 2-8: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Juni bis Dezember 2016 (Stundenmittel) ..... 27
Abbildung 2-9: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Juni bis Dezember 2016 (Tagesmittel) ..... 28
Abbildung 2-10: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Jahr 2017 (Stundenmittel) ..... 29

Abbildung 2-11: Kollektor 1 Mitte und Solarwand Mitte, Jahr 2017 (Tagesmittel) ....29
Abbildung 2-12: Temperaturdifferenz zwischen Solar- und Referenzwand, Winterwoche 2016....30
Abbildung 2-13: Temperaturverlauf in der Solarkollektorwand im Dezember 2016....31
Abbildung 2-14: Temperaturdifferenz zwischen Solar- und Referenzwand, Augustwoche 2016....32
Abbildung 2-15: Temperaturverlauf in der Solarkollektorwand im August 2016....33
Abbildung 2-16: Temperaturverlauf in der Solarkollektorwand im Juni 2016....33
Abbildung 2-17: Temperaturdifferenz zwischen Solarwand und Referenzwand, Juniwoche 2016....34
Abbildung 3-1: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel....39
Abbildung 3-2: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – Carpetplot....40
Abbildung 3-3: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016....41
Abbildung 3-4: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2016, Schultage 7-15 Uhr....41
Abbildung 3-5: Raum- über Außentemperatur Klasse 1.08, Jahr 2016 wochentags 7 bis 15 Uhr....42
Abbildung 3-6: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2017 – Carpetplot....42
Abbildung 3-7: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2017....43
Abbildung 3-8: Temperatur im Klassenraum 1.08 im Jahr 2017, Schultage 7-15 Uhr....43
Abbildung 3-9: Raum- über Außentemperatur Klasse 1.08, Jahr 2017 wochentags 7 bis 15 Uhr....44
Abbildung 3-10: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel....45
Abbildung 3-11: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016 – Carpetplot....45
Abbildung 3-12: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016....46
Abbildung 3-13: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2016, Schultage 7-15 Uhr....46
Abbildung 3-14: Raum- über Außentemperatur Klasse 2.01, Jahr 2016 wochentags 7 bis 15 Uhr....47
Abbildung 3-15: Temperatur im Klassenraum 2.01 im Jahr 2017....48
Abbildung 3-16: Raumtemperatur der Klassenräume 11.04. – 15.04.2016....49
Abbildung 3-17: Raumtemperatur der Klassenräume 20.06. – 26.06.2016....49
Abbildung 3-18: Raumtemperatur der Klassenräume 24.10. – 30.10.2016....50
Abbildung 3-19: Raumtemperatur der Klassenräume 05.12. – 11.12.2016....51
Abbildung 3-20: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel....52
Abbildung 3-21: Temperaturfühler Hortraum 0.01....53
Abbildung 3-22: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016 – Carpetplot....53
Abbildung 3-23: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016....54
Abbildung 3-24: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2016, wochentags 6-17 Uhr....54
Abbildung 3-25: Raum- über Außentemperatur Hortraum 0.01, 2016 wochentags 6 bis 17 Uhr....55
Abbildung 3-26: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2017 – Carpetplot....55
Abbildung 3-27: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2017....56
Abbildung 3-28: Temperatur im Hortraum 0.01 im Jahr 2017, wochentags 6-17 Uhr....56
Abbildung 3-29: Raum- über Außentemperatur Hortraum 0.01, Jahr 2017 wochentags 6 bis 17 Uhr..57
Abbildung 3-30: Raumluft- und Ablufttemperaturen der Aula 0.26, Jahre 2016 – 2017....57
Abbildung 3-31: Ablufttemperatur in der Aula im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel....58
Abbildung 3-32: Ablufttemperatur in der Aula 0.26 im Jahr 2016 – Carpetplot....58
Abbildung 3-33: Ablufttemperatur der Aula 0.26, Jahr 2016....59
Abbildung 3-34: Ablufttemperatur der Aula 0.26, Nutzungstage 7 bis 17 Uhr, Jahr 2016....59
Abbildung 3-35: Abluft- über Außentemperatur Aula 0.26, Jahr 2016 wochentags 7 bis 17 Uhr....60
Abbildung 3-36: Ablufttemperatur in der Aula 0.26 im Jahr 2016 – Carpetplot....61
Abbildung 3-37: Raumtemperatur Aula, Jahr 2017....61
Abbildung 3-38: Ablufttemperatur der Aula 0.26, Nutzungstage 7 bis 17 Uhr, Jahr 2017....62
Abbildung 3-39: Abluft- über Außentemperatur Aula 0.26, Jahr 2017 wochentags 7 bis 17 Uhr....62
Abbildung 3-40: Raumlufttemperatur der Aula, 20. bis 26.06.2016....63
Abbildung 3-41: Raumlufttemperatur der Aula 05. – 11.12.2016....64
Abbildung 3-42: Raumtemperaturen der Koch- und Spülküche (Tagesmittel)....65
Abbildung 3-43: Raumtemperaturen Küche und Spülküche, Jahr 2016 – gesamt....66
Abbildung 3-44: Raumtemperaturen der Koch- und Spülküche Jahr 2016 – 6 bis 15 Uhr....66
Abbildung 3-45: Raumtemperaturen Küche und Spülküche, Jahr 2017 – gesamt....67
Abbildung 3-46: Raumtemperaturen der Koch- und Spülküche 2017 – Nutzungszeit 6 bis 15 Uhr....68
Abbildung 3-47: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016 und 2017, Tagesmittel....69
Abbildung 3-48: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016 – Carpetplot....69
Abbildung 3-49: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016....70
Abbildung 3-50: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2016, Schultage 7 – 15 Uhr....70
Abbildung 3-51: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2017 – Carpetplot....71
Abbildung 3-52: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2017....72
Abbildung 3-53: Temperatur im Lehrerzimmer 1.04 im Jahr 2017, Schultage 7-15 Uhr....72
Abbildung 3-54: Lufttemperatur der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2016 (Tagesmittel)...73
Abbildung 3-55: Lufttemperatur der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2017 (Tagesmittel)...73

Abbildung 3-56: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Frühling ..... 74
Abbildung 3-57: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Sommer ..... 75
Abbildung 3-58: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Herbst ..... 76
Abbildung 3-59: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 1.08 – Winter ..... 76
Abbildung 3-60: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Frühling ..... 77
Abbildung 3-61: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Sommer ..... 77
Abbildung 3-62: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Herbst ..... 78
Abbildung 3-63: Schichtung der Lufttemperatur im Klassenraum 2.01 – Winter ..... 79
Abbildung 3-64: Höhenprofil der Aula – sonnige Woche vom 06.06. bis 10.06.2016 ..... 79
Abbildung 3-65: Höhenprofil der Aula – bewölkte Woche vom 11.07. bis 15.07.2016..... 80
Abbildung 3-66: Höhenprofil der Aula – sonnige Winterwoche vom 22.02. bis 26.02.2016..... 81
Abbildung 3-67: Höhenprofil der Aula – bewölkte Winterwoche vom 22.02. bis 26.02.2016 ..... 81
Abbildung 3-68: Mobile Elektroheizung ..... 82
Abbildung 3-69: Temperaturen Hort 0.01, Lehrerzimmer 1.04 und Klasse 2.01, 05. – 09.12.2016..... 83
Abbildung 3-70: Raumlufttemperaturen Klasse 1.08 und Aula 0.26 vom 09. bis 13.05.2016 ..... 84
Abbildung 3-71: Raumlufttemperaturen Klasse 1.08 und Aula 0.26 vom 29.08. bis 02.09.2016..... 85
Abbildung 3-72: Vergleich der Raumlufttemperaturen der Klassenräume und des Hortes..... 87
Abbildung 4-1: Luftfeuchte Klasse 1.08 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr ..... 92
Abbildung 4-2: Raumluftfeuchte in verschiedenen Höhen der Klasse 1.08 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016Uhr ..... 92
Abbildung 4-3: Luftfeuchte Klasse 1.08 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr ..... 93
Abbildung 4-4: Luftfeuchte Klasse 2.01 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr ..... 93
Abbildung 4-5: Raumluftfeuchte in verschiedenen Höhen der Klasse 2.01 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016Uhr ..... 94
Abbildung 4-6: Luftfeuchte Klasse 2.01 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr ..... 94
Abbildung 4-7: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 11.04. – 17.04.2016 ..... 95
Abbildung 4-8: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 20.06. bis 26.06.2016..... 96
Abbildung 4-9: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 24.10. bis 30.10.2016..... 96
Abbildung 4-10: Raumluftfeuchte der Klassenräume – 05.12. bis 11.12.2016..... 97
Abbildung 4-11: Luftfeuchte Hort 0.01 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr ..... 98
Abbildung 4-12: Luftfeuchte Hort 0.01 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7 bis 15 Uhr ..... 98
Abbildung 4-13: Abluftfeuchte Aula 0.26 im gesamten Jahr 2016 bzw. zur Nutzungszeit 7-17 Uhr ..... 99
Abbildung 4-14: Abluftfeuchte und Raumluftfeuchte in verschiedenen Höhen der Aula – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016Uhr ..... 99
Abbildung 4-15: Abluftfeuchte Aula 0.26 im gesamten Jahr 2017 bzw. zur Nutzungszeit 7-17 Uhr ..... 100
Abbildung 4-16: Luftfeuchte Küche im gesamten Jahr 2016 bzw. zur Nutzungszeit 6-15 Uhr ..... 100
Abbildung 4-17: Luftfeuchte Küche – Woche vom 11.01. bis 15.01.2016..... 101
Abbildung 4-18: Luftfeuchte Küche im gesamten Jahr 2017 bzw. zur Nutzungszeit 6-15 Uhr ..... 101
Abbildung 4-19: Luftfeuchte Raum 1.04 im gesamten Jahr 2016 bzw. an Schultagen 7-15 Uhr ..... 102
Abbildung 4-20: Luftfeuchte Raum 1.04 im gesamten Jahr 2017 bzw. an Schultagen 7-15 Uhr ..... 102
Abbildung 4-21: Luftfeuchte der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2016 (Tagesmittel) ..... 103
Abbildung 4-22: Luftfeuchte der Technikräume 0.04, 2.03 und 2.18 im Jahr 2017 (Tagesmittel) ..... 103
Abbildung 4-23: Abluftfeuchte Gebäudeteil B – Tagesmittelwerte des Jahres 2016 ..... 104
Abbildung 4-24: Abluftfeuchte Gebäudeteil B – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016..... 104
Abbildung 4-25: Luftfeuchte Hort 0.01 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016..... 105
Abbildung 4-26: Abluftfeuchte Aula 0.26 – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016..... 106
Abbildung 4-27: Luftfeuchte Lehrerzimmer – Woche vom 11.01. bis 17.01.2016 ..... 106
Abbildung 5-1: Temperatur und Feuchte im südlichen Klassenraum 1.08 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr..... 109
Abbildung 5-2: Temperatur und Feuchte im nördlichen Klassenraum 2.01 nach [4] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr..... 110
Abbildung 6-1: Zuluftvolumenströme und $CO_2$-Gehalte – 24.12. bis 30.12.2016 ..... 112
Abbildung 6-2: Position des $CO_2$-Sensors in Klassenraum 1.08 vorher bzw. ab 5.7.2018 ..... 113
Abbildung 6-3: $CO_2$-Messwerte vor und nach Änderung der Fühlerplatzierung ..... 114
Abbildung 6-4: Vergleich der Schultage der Monate August 2016/2017/2018 in Klasse 1.08..... 114
Abbildung 6-5: Vergleich der Schultage der Monate August 2016/2017/2018 in Klasse 2.01..... 115
Abbildung 6-6: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr (Stundenmittel) ..... 117
Abbildung 6-7: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr (10-Minuten-Mittel) ..... 118
Abbildung 6-8: Carpetplot $CO_2$-Gehalt Klassenraum 1.08 von März 2016 bis Dezember 2017..... 118
Abbildung 6-9: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 2.01 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr (10-Minuten-Mittel) ..... 119
Abbildung 6-10: Carpetplot $CO_2$-Gehalt Klassenraum 2.01 von März 2016 bis Juni 2017 ..... 119

Abbildung 6-11: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im Jahr 2017 – 7 bis 15 Uhr ..... 120
Abbildung 6-12: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 Januar bis August 2018 – 7 bis 15 Uhr ..... 121
Abbildung 6-13: $CO_2$-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im August 2018 – 7 bis 15 Uhr ..... 122
Abbildung 6-14: Dauerlinie $CO_2$-Gehalt Klasse 1.08 – 01.01.2016 bis 31.08.2018 ..... 122
Abbildung 6-15: Dauerlinie $CO_2$-Gehalt Klasse 2.01 – 01.01.2016 bis 31.08.2018 ..... 123
Abbildung 6-16: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 1.08 – 14.06.2016 ..123
Abbildung 6-17: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 1.08 – 17.08.2016 ..124
Abbildung 6-18: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 2.01 – 17.08.2016 ..125
Abbildung 6-19: Zeitliche Entwicklung der $CO_2$-Konzentration im Klassenraum 2.01 – 03.03.2017 ..125
Abbildung 6-20: $CO_2$-Gehalte in Abhängig der Stellung der Volumenstromregler ..... 126
Abbildung 6-21: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr; VSR max. 25 % offen ..... 127
Abbildung 6-22: $CO_2$-Gehalte Klassenraum 1.08 im Jahr 2016 – 7 bis 15 Uhr; VSR max. 25 % offen ..... 127
Abbildung 6-23: $CO_2$-Gehalt der Aula im Jahr 2016 – 7 bis 17 Uhr (Stundenmittel) ..... 128
Abbildung 6-24: $CO_2$-Gehalt der Aula im Jahr 2017 – 7 bis 17 Uhr (Stundenmittel) ..... 128
Abbildung 6-25: $CO_2$-Gehalt der Aula im Jahr 2017 – 7 bis 17 Uhr (Stundenmittel) ..... 129
Abbildung 6-26: Dauerlinie $CO_2$-Gehalt Aula für die Jahre 2016 und 2017 ..... 129
Abbildung 6-27: $CO_2$-Gehalte am Wochenende des 12./13.03.2016 ..... 130
Abbildung 7-1: Fensterkontakte ..... 133
Abbildung 7-2: Grundriss Raum 1.08 ..... 135
Abbildung 7-3: Grundriss Raum 2.01 ..... 135
Abbildung 7-4: Fensteröffnung – Klasse 1.08 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 138
Abbildung 7-5: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 1.08 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..138
Abbildung 7-6: Fensteröffnung – Klasse 1.08 mittleres Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 139
Abbildung 7-7: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 1.08 mittleres Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 139
Abbildung 7-8: Fensteröffnung – Klasse 1.08 rechtes Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 140
Abbildung 7-9: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 1.08 rechtes Fenster – Jahre 2016 bis 2017 141
Abbildung 7-10: Fensteröffnung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur – Jahre 2016 bis 2017 ... 142
Abbildung 7-11: Fensteröffnung – Klasse 2.01 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 142
Abbildung 7-12: Häufigkeit der Fensteröffnung – Klasse 2.01 linkes Fenster – Jahre 2016 bis 2017 143
Abbildung 7-13: Fensteröffnung – Klasse 2.01 mittleres Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 143
Abbildung 7-14: Fensteröffnung – Klasse 2.01 rechtes Fenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 144
Abbildung 7-15: Fensteröffnung – Lehrerzimmer 1.04 Ostfenster – Jahre 2016 bis 2017 ..... 144
Abbildung 7-16: Entwurf Bedienungsanleitung: Links „zu kalt“, Rechts: „zu warm“ ..... 145
Abbildung 8-1:Gelochte Akustikdecken – Links: Aula, Rechts: Flur Gebäudeteil B ..... 147
Abbildung 8-2: Deckenspiegel mit Heradesign Raum 1.08 Es ist eine ungültige Quelle angegeben. 147
Abbildung 8-3: Lautsprecher und Mikrofon im Bereich des Morgenkreises eines Klassenraumes .... 148
Abbildung 8-4: Aufzeichnung der Messwerte ..... 148
Abbildung 8-5: Bildschirmdarstellung im Verlauf einer Messung ..... 149
Abbildung 8-6: Schnitt Deckensegel Raum der Stille [17] ..... 149
Abbildung 8-7: Links: Messung der Nachhallzeit; Rechts: Grundriss Raum der Stille [17] ..... 150
Abbildung 8-8: Gemittelte Nachhallzeiten im Raum der Stille [20] ..... 150
Abbildung 8-9: Grundriss Aula [17] ..... 152
Abbildung 8-10: Gemittelte Nachhallzeiten in der Aula ..... 153
Abbildung 8-11: $T/T_{soll}$ der Aula im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [20] ..... 154
Abbildung 8-12: Klassenzimmer mit Akustik-Deckensegel ..... 156
Abbildung 8-13: Messung im Klassenraum ..... 156
Abbildung 8-14: Nachhallzeiten der Klassenräume ..... 157
Abbildung 8-15: Nachhallzeiten in Raum 1.01 ..... 158
Abbildung 8-16: $T/T_{soll}$ des Klassenraumes 1.01 im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [12] ..... 159
Abbildung 8-17: Nachhallzeiten in Raum 1.08 ..... 160
Abbildung 8-18: $T/T_{soll}$ des Klassenraumes 1.08 im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [12] ..... 160
Abbildung 8-19: Nachhallzeiten in Raum 2.01 ..... 161
Abbildung 8-20: $T/T_{soll}$ des Klassenraumes 2.01 im Toleranzbereich der Nachhallzeiten [20] ..... 162
Abbildung 8-21: Nachhallzeiten der Klassenräume im Vergleich ..... 163
Abbildung 8-22: $T/T_{soll}$ der Klassenräume im Toleranzbereich der Nachhallzeiten im Vergleich ..... 163

Tabelle 1-1: Übertemperaturgradstunden [Kh] sowie Über- und Untertemperaturstunden [h] .....10
Tabelle 1-2: Anzahl der Stunden mit relativen Feuchten < 35 % bzw. > 70 % und prozentualer Anteil an der Nutzungszeit .....12
Tabelle 1-3: Anzahl der Nutzungsstunden mit erhöhten $CO_2$-Konzentrationen .....15
Tabelle 2-1: Sommerlicher Wärmeschutz nicht erfüllt – DIN 4108-2:2003 .....22
Tabelle 2-2: Sommerlicher Wärmeschutz nicht erfüllt – DIN 4108-2:2013 .....23
Tabelle 2-3: Messpunkte bezüglich Solarkollektorwand .....24
Tabelle 3-1: Messpunkte bezüglich Raumtemperatur und Höhenprofil .....38
Tabelle 3-2: Übertemperaturgradstunden [Kh] sowie Über- und Untertemperaturstunden [h] .....88
Tabelle 4-1: Messpunkte bezüglich Raumluftfeuchte .....91
Tabelle 4-2: Anzahl der Stunden mit relativen Feuchten < 35 % bzw. > 70 % und prozentualer Anteil an der Nutzungszeit .....107
Tabelle 6-1: Messpunkte bezüglich Kohlendioxidkonzentration .....111
Tabelle 6-2: Anzahl der Nutzungsstunden mit erhöhten $CO_2$-Konzentrationen .....131
Tabelle 7-1: Messpunkte bezüglich Fensteröffnungsverhalten und Temperaturen .....134
Tabelle 7-2: Abgleich der Fensterkontakte mit dem Monitoring – Raum 1.08 .....136
Tabelle 7-3: Abgleich der Fensterkontakte mit dem Monitoring – Raum 2.01 .....136
Tabelle 7-4: Abgleich der Fensterkontakte mit dem Monitoring – Raum 1.04 .....137
Tabelle 8-1: Nachhallzeiten und Absorptionsflächen für den Raum der Stille [20] .....151
Tabelle 8-2: Umgerechnete Nachhallzeiten in der Aula [20] .....154
Tabelle 8-3: Nachhallzeiten und Absorptionsflächen für die Aula als Speiseraum [13] .....155
Tabelle 8-4: Gemittelte Nachhallzeiten der Klassenräume [20] .....157
Tabelle 8-5: Umgerechnete Nachhallzeiten im Klassenraum 1.01 .....158
Tabelle 8-6: Umgerechnete Nachhallzeiten im Klassenraum 1.08 .....159
Tabelle 8-7: Umgerechnete Nachhallzeiten im Klassenraum 2.01 .....161
Tabelle 9-1: Lateinische Formelzeichen .....166
Tabelle 9-2: Griechische Formelzeichen .....167
Tabelle 9-3: Abkürzungen .....167
Tabelle 9-4: Planer, Ausführende, Projektbeteiligte .....172

## *9.4 Verantwortliche Planer und Ausführende*

**Tabelle 9-4: Planer, Ausführende, Projektbeteiligte**

| Kurz | ausführliche Angabe | Gewerk/Verantwortlichkeit |
|---|---|---|
| HOLLENBACH | Sachverständigenbüro<br>Herr Hollenbach<br>Karlstraße 14<br>39261 Zerbst | Projektsteuerer |
| STEINBLOCK | Steinblock Architekten GmbH<br>Herr Tietze<br>Porsestraße 19<br>39104 Magdeburg | Architektur |
| GEDES | Gedes e.V.<br>Herr Döring<br>Promenadenring 8<br>02708 Löbau | Messtechnik,<br>Ausführung |
| N+S | Ingenieurbüro Naumann + Stahr<br>Arnoldstraße 26<br>04299 Leipzig | HLS alt,<br>Planer |
| T+K | Theurich+Klose Ingenieurgesellschaft mbH<br>Vahrenwalder Str. 117<br>30165 Hannover<br>Herr Adolf, Herr Gierlich, Hr. v. Goldammer | HLS neu,<br>Planer |
| AIB | AIB GmbH<br>Architekten Ingenieure Bautzen<br>Herr Medack, Herr Hoffmann<br>Liselotte-Herrmann-Str. 4<br>02625 Bautzen | Elektrotechnik,<br>Planer |
| BACHMANN | Dr. Bachmann<br>Hohenwarther Str. 15<br>39126 Magdeburg | Akustik |
| MENERGA | Menerga Leipzig<br>Podelwitzerstr. 5<br>04680 Colditz OT Commichau | Lüftungstechnik,<br>Hersteller |
| APW | APW Heizung und Sanitärbau GmbH<br>Herr Petersohn<br>Hauptstraße 9<br>04288 Leipzig | HLS,<br>Ausführung |

## *9.5 Überblick über separate Anhänge*

A Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes
B Protokolle der Befragungen
C Akustikgutachten von 2011