

MASTER THESIS

**Comparison of physical variables relevant for indoor
environment of two schools with various types of
ventilation, each equipped with two different green
wall modules**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

**Vergleich raumklimarelevanter physikalischer
Größen zweier Schulgebäude mit unterschiedlicher
Belüftung, jeweils ausgestattet mit zwei verschiedenen
Innenwandbegrünungssystemen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Simon Strübing

Matr.Nr.: 1127668

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Azra Korjenic**

Univ.Ass. Mag.rer.nat. **David Tudiwer**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich E207-03 - Ökologische Bautechnologien
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Wien, im Januar 2019

Abstract

The performance of pupils is unquestionably closely related to comfort. This is strongly dependent on the room environment, which in turn can be controlled to create the optimal conditions. In a natural way, interior wall greening systems can contribute to positively influence the microclimate in the classroom and thereby increase individual performance during the lesson. In this master thesis the influences of two such greening systems in two different schools are analyzed, whereby the role of the ventilation type and their impact also stands in the foreground. The two schools participate in the project "GRÜNEzukunftSCHULE" and are ventilated naturally, meaning manually, and mechanically. Essential aspects to be considered in the measurements are: air temperature, humidity, carbon dioxide concentration and additionally the reverberation time. The first step is to compare the systems in the respective schools and then to compare the classrooms of the two schools with the same interior wall greening system.

Researched reference values are used for the evaluation of the processed measurement data. Two findings will emerge. The interior wall greening systems achieve an improved room environment, the greened classes clearly stand out from the reference rooms, and mechanical ventilation makes a positive as well as a negative contribution. Depending on the point of view, this has a supportive or even counterproductive effect.

Kurzfassung

Die Leistungsfähigkeit von SchülerInnen steht eng in Verbindung mit der Behaglichkeit. Die ist stark vom umgebenden Raumklima abhängig, welche wiederum steuerbar ist um die optimalen Bedingungen zu schaffen. Auf eine natürliche Art können Innenwandbegrünungssysteme dazu beitragen das Mikroklima im Aufenthaltsraum positiv zu beeinflussen und damit eine individuelle Leistungssteigerung während des Unterrichts hervorrufen. In dieser Diplomarbeit werden die Einflüsse zwei solcher Begrünungssysteme in zwei unterschiedlichen Schulen analysiert, wobei vor allem die Rolle der Belüftungsart und deren Mitwirkung im Vordergrund steht. Die beiden untersuchten Schulen beteiligen sich am Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULE“. Eine davon wird natürlich (Fensterlüftung) und die andere mechanisch belüftet. Wesentliche Aspekte die bei den durchgeführten Messungen berücksichtigt werden sind: die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Kohlenstoffdioxidkonzentration sowie die Nachhallzeit. Im ersten Schritt werden die Systeme in der jeweiligen Schule miteinander verglichen und im Anschluss dazu die Klassenzimmer der beiden Schulen mit dem gleichen Innenwandbegrünungssystem gegenübergestellt. Für die Beurteilung der ausgewerteten Messdaten werden bauphysikalische Richtwerte herangezogen.

Es haben sich zwei wichtige Erkenntnisse herauskristallisiert. Die Innenwandbegrünungssysteme verbessern das Raumklima, dabei heben sich die begrünten Klassen deutlich von den Referenzräumen (nicht begrünt) ab, und die mechanische Belüftung leistet sowohl einen positiven als auch negativen Beitrag. Diese wirkt je nach Gesichtspunkt unterstützend oder kontraproduktiv.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Die Schulen und deren Beobachtungsklassenräumen..... | 3 |
| 2.1 | BRG 15 Diefenbachgymnasium | 3 |
| 2.1.1 | Biologiesaal Raum 255 | 4 |
| 2.1.2 | Referenzraum Raum 253 | 5 |
| 2.1.3 | Physikraum Raum 251 | 6 |
| 2.2 | BRG 16 Schuhmeierplatz..... | 8 |
| 2.2.1 | Biologiesaal Raum N.004..... | 8 |
| 2.2.2 | Referenzraum N.005 | 9 |
| 2.2.3 | Raum N.016..... | 10 |
| 2.3 | Trogsystem..... | 11 |
| 2.4 | Vliestaschensystem | 12 |
| 2.5 | Eigenschaften der Pflanzen..... | 12 |
| 2.6 | Luft-Luft-Wärmetauscher | 12 |
| 3 | Grundlagen zu den erweiterten raumklimarelevanten physikalischen Größen..... | 13 |
| 3.1 | Die Lufttemperatur, die absolute und relative Luftfeuchte und der Taupunkt | 13 |
| 3.2 | CO ₂ -Konzentration..... | 15 |
| 3.3 | Raumakustik..... | 16 |
| 4 | Vorgehensweise/wissenschaftliche Methodik..... | 18 |
| 5 | Datenauswertung: Lufttemperatur und relative bzw. absolute Luftfeuchtigkeit | 22 |
| 5.1 | BRG 15 Diefenbachgasse: Vergleich der Räume 251, 253 und 255 miteinander | 22 |
| 5.2 | BRG 16 Schuhmeierplatz: Vergleich der Räume N.004, N.005 und N.016 miteinander.. | 29 |
| 5.3 | Vergleich BRG 15 mit BRG 16 | 36 |
| 5.3.1 | Vergleich Raum 253 mit Raum N.005 | 37 |
| 5.3.2 | Vergleich 251 mit N.016 | 39 |
| 5.3.3 | Vergleich 255 mit N.004 | 42 |
| 6 | Datenauswertung: Kohlenstoffdioxidkonzentration..... | 45 |
| 6.1 | BRG 15 Diefenbachgasse: Vergleich der Räume 251, 253 und 255 miteinander | 45 |
| 6.2 | BRG 16 Schuhmeierplatz: Vergleich der Räume N.004, N.005 und N.016 miteinander.. | 47 |
| 6.3 | Vergleich BRG 15 mit BRG 16 | 49 |
| 6.3.1 | Vergleich Raum 253 mit Raum N.005 | 49 |
| 6.3.2 | Vergleich Raum 251 mit Raum N.016 | 50 |
| 6.3.3 | Vergleich Raum 255 mit Raum N.004 | 51 |
| 7 | Datenauswertung: Taupunkt und Schimmelpilzsporen..... | 52 |
| 7.1 | BRG 15 Diefenbachgasse: Vergleich der Räume 251, 253 und 255 miteinander | 52 |
| 7.2 | BRG 16 Schuhmeierplatz: Vergleich der Räume N.004, N.005 und N.016 miteinander.. | 53 |
| 7.3 | Vergleich BRG 15 mit BRG 16 | 55 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.3.1 | Vergleich Raum 253 mit Raum N.005 | 55 |
| 7.3.2 | Vergleich 251 mit N.016 | 56 |
| 7.3.3 | Vergleich 255 mit N.004 | 57 |
| 8 | Nachhallzeit..... | 59 |
| 9 | Konklusion | 63 |
| | Literaturangabe..... | 64 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 65 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 67 |
| | Anhang | 68 |
| A | – Raumklimadiagramme der KW 8..... | 69 |
| B | – Raumklima der KW 23 | 85 |
| C | – Raumklima vom 05.10.2018 (Survey)..... | 104 |

1 Einleitung

Mit dem Lied „Concrete Jungle“ machten „The Wailers“, das Roots-Reggae-Musikensemble mit dem legendären Sänger Bob Marley, Gebrauch von einer Metapher, die damals wie auch heute ihre Gültigkeit hat. Den künstlichen Kronenschluss bilden nun luftige Hochhäuser die uns die Straßen verschatten und das direkte Sonnenlicht verwehren. Durch die moderne Raumplanung, Architektur und Baustofftechnologie, wurde eine anthropogene Barriere zwischen Mensch und Natur errichtet. Städte platzen aufgrund von diversen Pull-Faktoren aus allen Nähten. Laut einer Studie der UN leben 66% der Bevölkerung 2050 in Städten [14]. Es müssen neuer Wohnraum und neue Arbeitsstätten schnell und kostengünstig geschaffen werden, Expansion und eine Nachverdichtung sind die Konsequenz. Leidtragende ist in diesem Falle die Natur, da Grünflächen für Gebäude, Verkehrsflächen und sonstige versiegelte Flächen weichen müssen, und damit einhergehend die Lebensqualität der Bevölkerung in den Ballungsgebieten, weil nämlich kein adäquater Ersatz geschaffen wird. Der Blick aus dem Fenster, sei es nun ein Schul- oder Bürogebäude, trifft größtenteils auf die kalte, leb- und fast gestaltlose Fassade des gegenüberliegenden Gebäudes, und nicht auf eine wuchtige Baumkrone oder sattgrüne Rasenfläche. Diese Tendenz findet sich leider in den vier Wänden wieder. Viele Räume sind steril gehalten, im Sinne der Abwesenheit von Pflanzen, mit Klimaanlage bzw. Belüftungsanlagen ausgestattet, nahezu hermetisch abgekapselt und mit einem PVC-Boden ausgelegt. Es kommt das Phänomen des „Sick buildings“ ins Spiel, welches u.a. auch Einfluss auf die Arbeitsleistung haben kann. Diese Tatsache ist nicht unwesentlich da wir uns, wie es aus einer Studie der WHO ergeht, nur 10% der Zeit im Freien aufhalten. Den Rest der Zeit verbringen wir entweder in Gebäuden oder in Verkehrsmitteln. Das heißt unsere kognitive Leistung ist stark abhängig von unserem Wohlbefinden¹, sprich die Behaglichkeit in unserer Umgebung spielt dabei eine wesentliche Rolle. Dieses wurde u.a. in den Studien vom Fraunhofer Institut für Bauphysik im Rahmen des Forschungsprogramms „Menschen in Räumen“ nachgegangen und bestätigt [15]. In erster Linie werden die olfaktorische, thermische, hygri-sche, akustische Behaglichkeit und die Luftqualität ins Visier genommen. Es gibt also für die erwähnten Gesichtspunkte optimale Bereiche mit möglicher Toleranz, die es Schüler, Studenten oder sonstigen Personengruppen, die geistige und physische Leistung erbringen müssen, erlaubt, die Konzentration auf die zu bewältigende Aufgabe zu fokussieren, ohne allzu große Ablenkung durch die Umwelt zu befürchten.

Es ist nun das Unterfangen, mit der Hilfe des gezielten Einsatzes von Pflanzen das erweiterte Raumklima soweit auf natürliche Weise positiv zu beeinflussen, dass es die Lern- und Arbeitsfähigkeit fördert. Pflanzen sind eine Art „Schweizer Taschenmesser“, ein Multitalent. Einige der nennenswerten Eigenschaften, die es ihr erlauben das Mikroklima mitzugestalten, wären: Erhöhung der Luftfeuchtigkeit, Filtern sowohl Staub als auch gewisse Schadstoffe, Kühlung der Umgebungsluft und der Sauerstoffausstoß mit der vorangegangenen Kohlenstoffdioxidaufnahme. Auch hierzu gibt es unzählige Forschungsergebnisse, die das Nutzen von Pflanzen zu dem gewünschten Zweck im Unterricht oder im Büroraum attestieren.

In dieser Arbeit wurden zwei Schulen für das Forschungsprojekt „GRÜNEZukunftSCHULEN“ miteinander verglichen. In jeweils drei Klassenzimmern wurden die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Kohlenstoffdioxidkonzentration dauerhaft aufgezeichnet. Zudem wurden in bestimmten Abständen Messungen zur Bestimmung der Nachhallzeit und der Schimmelsporenkonzentration durchgeführt. Zwei der drei Klassenräume sind mit unterschiedlichen Innenwandbegrünungssystemen, ein Trog- und ein Vliestaschensystem, (nachträglich) ausgestattet. Der übrige Raum dient als Referenzraum und wurde nicht begrünt. Einer der untersuchten Schulen ist mit einer mechanischen Belüftungsanlage ausgestattet. In der Gegenüberstellung

¹ In der Umweltmedizin wird von einem Gleichgewicht der sieben Umweltgeschwister (die ästhetische, aktinische, akustische, atmosphärische, mechanische, psychosoziale und zuletzt die thermische Umwelt) ausgegangen.

wird also untersucht wie sich das Raumklima durch diese Einflussfaktoren ändert, um eine Aussage zu treffen welche Randbedingung zu beachten sind beim Implementieren solcher Gründwandsysteme.

2 Die Schulen und deren Beobachtungsklassenräumen

Diese Diplomarbeit wird im Rahmen des Projekts „GRÜNEzukunftSCHULEN“ geschrieben. Das Projekt ist das Nachfolgeprojekt von „GrünPlusSchule“ und besteht bisher aus zwei Pilotschulen das Diefenbachgymnasium im 15. Wiener Bezirk und das Bundesrealgymnasium 16 im 16. Wiener Bezirk. Das Projekt wird von der technischen Universität Wien geleitet. Das Konsortium das sich hierfür zusammengeschlossen hat, besteht außerdem aus der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), das Büro für nachhaltige Kompetenz (B-NK GmbH) und Dipl.-Ing. Ralf Dopheide und wird von Klima- und Energiefonds Österreich sowie die Bundesimmobiliengesellschaft (BIG) gefördert. Dieser Zusammenschluss hat es sich zur Aufgabe erklärt die Wandbegrünung in die Planung und Realisierung von Schulen zu integrieren und die Betreuung der Grünwände sollen von den Schulen übernommen werden. Die Idee im Allgemeinen ist eine Verbesserung der IST-Situation in den Schulen in den Aufenthaltsbereichen, in Bezug auf die Behaglichkeit, durch gezieltes Implementieren von adäquaten Pflanzen. Dieses Vorgehen findet Innen als auch im Freien mithilfe von Innen- und Fassadenbegrünungssystemen statt, wobei in dieser Master Thesis nur auf die Innenbegrünungssysteme eingegangen wird. Ziel dieser Erforschung ist ein optimiertes Wohlbefinden der SchülerInnen während des Aufenthalts auf dem Schulgelände hervorzurufen, um die Lernqualität zu fördern und fundierte Maßstäbe für Anwendungsmöglichkeiten in bundesweiten Schulen zu setzen, die dieses Konzept übernehmen möchten.

Im Nachfolgenden werden die an das Projekt beteiligten beziehungsweise die untersuchten Pilotschulen genauer beschrieben.

2.1 BRG 15 Diefenbachgymnasium



Abb. 2.1: Außenansicht des Haupteingangs vom Schulgebäude des BRG 15. Zur Orientierung nach links verläuft die Diefenbachgasse und nach rechts die Storchengasse. Im 2. Stock zur Storchgasse gewandt ist der Biologiesaal Raum 255. Zur Diefenbachgasse ausgerichtet sind im gleichen Stock die Räume, von vorne nach hinten, einmal der Referenzraum Raum 253 und zum anderen der Physiksaal Raum 251.

Beim Schulstandort Diefenbachgymnasium handelt es sich um einen Neubau der sich in unmittelbarer Nähe der U-Bahnstation Längenfeldgasse im 15. Wiener Bezirk an der Kreuzung Diefenbachgasse-Storchengasse befindet. Die Klassenräume die mit den jeweiligen Innengrünwandssystemen ausgestattet sind zusammen mit dem Referenzraum befinden sich im 2. Stock des Schulgebäudes (s. **Abb. 2.1**). Das Gebäude entspricht den heute geforderten energetischen

Standards und wird mit einer mechanischen Belüftungsanlage mit Frischluft versorgt. Die Anlage verfügt über einen Wärmetauscher, allerdings nicht mit Luftfeuchterückgewinnung. Im Gegensatz zum Schulstandort Schuhmeierplatz befinden sich zwischen den untersuchten Klassen noch weitere Räume (Raum 252 und Raum 254), grenzen demnach nicht aneinander.

2.1.1 Biologiesaal Raum 255

Der Biologieraum ist im 2. Stock zur Storchengasse und damit nach Südwest (s. **Abb. 2.3**) orientiert. Damit bekommt dieser Raum von den dreien am meisten Sonne ab. Eine Verschattung durch die Nachbarbebauung ist im Sommer ausgeschlossen, im Winter jedoch mit dem tiefen Sonnenstand möglich. Zudem verfügt diese Klasse über zwei Außenwände und über einem Teil der Raumdecke befindet sich die Außenterrasse im 3. Stock vor der Schulbibliothek. Dieses lässt sich anhand des Versatzes in der **Abb. 2.1** leicht ausmachen. Der Raum weist eine große Fensterfront, mit einem Fenster-Grundflächen-Verhältnis von 19% und zwei Türen auf. Es handelt sich dabei einmal um eine Eingangstür zur Pausenhalle und zum anderen eine Durchgangstür zum Raum 254. Die Innenwandbegrünung mit Trogsystem befindet sich an der Innenwand, die den Biologiesaal und Raum 254 trennt, parallel zum Fenster. Das Trogsystem ist auf 3,50x2,30m dimensioniert, sprich 8,05m² und hat neun Tröge die übereinander in einem gleichmäßigen Abstand angebracht sind. Das System ist mit einem Anschluss an die vorhandene Wasserleitung und an den Abfluss ausgestattet und hat einen Wasser- also auch einen Stromzähler fest installiert. An der Decke ist die Lichttechnik für die Bestrahlung der Wand sowie die ganze Sensorenmesstechnik untergebracht (vgl. **Abb. 2.2**).



Abb. 2.2: Trogsystem im Biologiesaal Raum 255. Es sind insgesamt neun Tröge, übereinander mit einem regelmäßigen Abstand zueinander, an der Innenwand parallel zur Fensterfront angebracht. Die von der Firma bevorzugte LED-Beleuchtung ist oben im Bild gut zu erkennen. Die Sensoren (von links nach rechts) RTR671 (blau), 11452 (weiß), und 11494 (weiß) sind zwischen der Beleuchtung und Grünwand angeordnet.

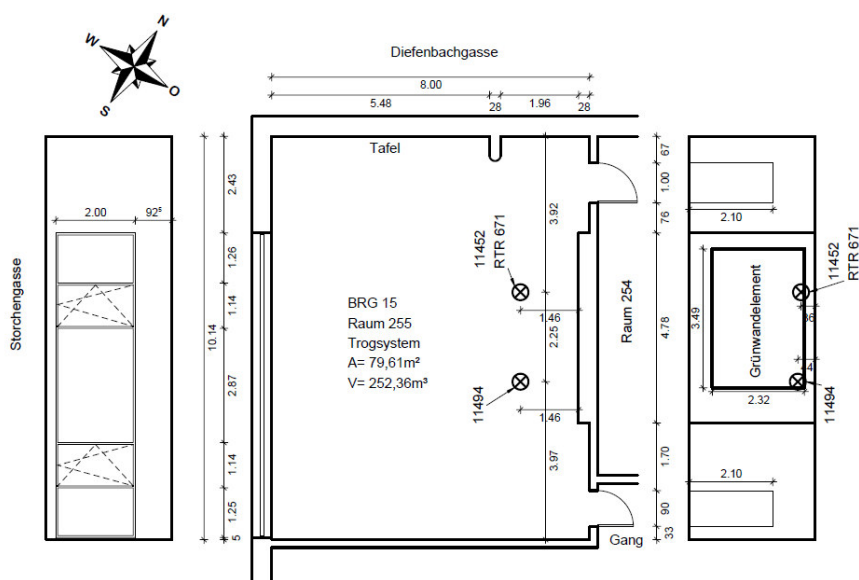


Abb. 2.3: Grundriss vom Biologiesaal Raum 255 mit Ansichten der relevanten Wände. Das Trogsystem ist an der Innenwand gegenüber von den Fenstern angebracht. Der Raum hat im Gegensatz zu den beiden anderen Klassenräumen zwei Außenwände. Zudem ist die Fensterfront nach Südwest ausgerichtet. Das Verhältnis Fensterfläche zu Fußbodenfläche beträgt hier 19%. Die genauen Abstände der Sensoren sind ebenfalls dokumentiert.

2.1.2 Referenzraum Raum 253

Das Klassenzimmer befindet sich zwischen Raum 254 und Raum 252. Damit hat es zwei Durchgangstüren und eine die zur Pausenhalle führt. Der Raum ist genau wie Raum 251 mit dem Fenster nach Nordwesten orientiert und hat ein Fußboden-Fensterflächen-Verhältnis von 23%. In diesem Raum ist keine Begrünung vorzufinden. Die Messsensoren sind mit etwas Abstand von der zum Fenster parallel angeordnete Innenwand installiert und zwar im gleichen Umfang wie in den beiden Klassen mit Innenwandbegrünungssystemen. Von den drei Beobachtungsräumen im Diefenbachgymnasium ist dieser der, mit dem größten Raumvolumen und hat damit die größte Grundfläche.



Abb. 2.4: Referenzraum Raum 253. Die Sensoren (von links nach rechts) RTR531 (blau), 11403 (weiß) und 11604 (weiß) machen sich unterhalb der Decke erkennbar. Deren Anordnung ist ca. 2,0m von der unbegrünten Innenwand, gegenüberliegend von der Fensterfront, und mit etwas Abstand von der abgehängten Decke.

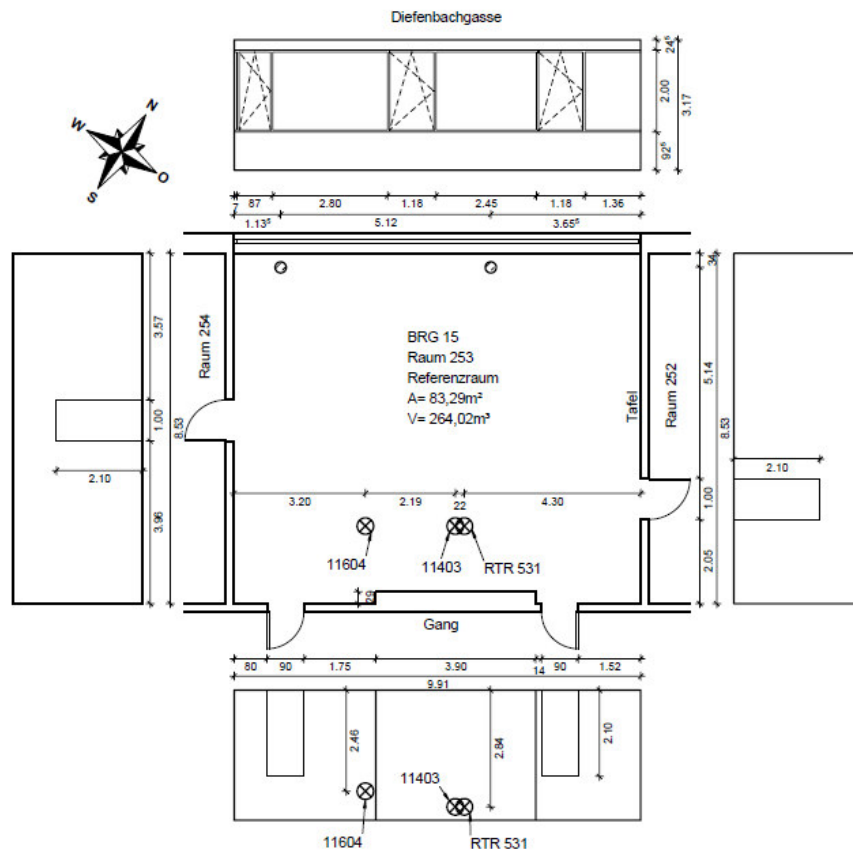


Abb. 2.5: Grundriss vom Referenzraum Raum 253 mit den relevanten Ansichten der Innenwände. Dieses Klassenzimmer hat eine Fensterfront die nach Nordwesten orientiert ist. 23% ist das Verhältnis von Fensterfläche zur Grundfläche. Wie in den beiden anderen Beobachtungsräumen befinden sich die Sensoren vor der Innenwand parallel zur Außenwand mit Fenstern.

2.1.3 Physikraum Raum 251

Wie auch bei Raum 253 ist der Physiksaal nach Nordosten orientiert (vgl. **Abb. 2.7**) und bekommt nur im Sommer gegen Abend etwas Sonne ab, mit einer intensiven Sonneneinstrahlung wie im Biologiesaal ist also nicht zu rechnen. Der Raum grenzt an Raum 252 und teilt sich die Durchgangstür mit diesem. Die beiden anderen Türen, wie in **Abb. 2.6** zu sehen, führen zur Pausenhalle. Der Raum hat eine Fensterfront mit einer Fläche von $14,4\text{m}^2$ und weist somit ein Verhältnis zur Grundfläche von 18% auf, damit auch das kleinste von den am Projekt beteiligten Räumen in dieser Schule. Die Befestigung des Innengrünwandsystems erfolgt dem Beispiel in Raum 255, nämlich gegenüber vom Fenster an einer Innenwand. In diesem Fall ist es die, die zwischen Pausenhalle und den Raum liegt. Das Vliestaschensystem ist auch in dieser Ausstattung mit den Ver- und Entsorgungsleitungen für Trinkwasser verbunden. Entsprechend sind Messzähler für Wasser und Strom zwischengeschaltet und unterhalb des Grünwandelementes im Schaltkasten untergebracht. Ähnlich wie im Biologiesaal ist auch hier die Beleuchtung für die Bestrahlung der Pflanzen an der Decke montiert, nur dass es sich um eine LED-Leiste und nicht einem überdimensionalen LED-Spotter handelt. Die Messsensoren sind mit einem definierten Abstand vom Vliestaschensystem von der Decke hängend angeordnet (s. **Abb 2.6**). Die Innenwandbegrünung hat ein Ausmaß von $6,88\text{m}^2$, ist demnach etwas kleiner dimensioniert als das Trogsystem im Biologieraum.



Abb. 2.6: Vliestaschensystem im Physiksaal Raum 251. Auch hier befindet sich der Aufbau an der Innenwand gegenüber von der Fensterfront. Die LED-Beleuchtungsleiste ist zwischen den Messsensoren angebracht. Die laut Grundriss betriebenen Sensoren sind (von links nach rechts) 11667 (weiß), RTR 679 (blau) und 11714 (weiß).

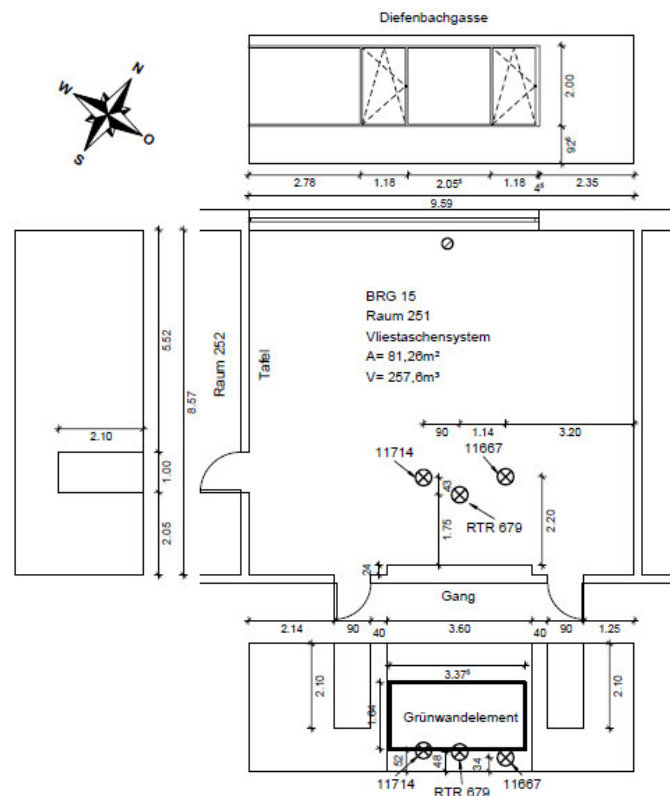


Abb. 2.7: Grundriss vom Physiksaal Raum 251 mit Ansichten der relevanten Innenwände. Im Gegenteil zum Biologiesaal zeigen die Fenster nach Nordwesten und verfügt über drei Türen. Das Fensterflächen-Bodenflächenverhältnis kommt auf 18%. Auch hier sind die Sensoren in unmittelbarer Nähe der Grünwand angebracht.

2.2 BRG 16 Schuhmeierplatz



Abb. 2.8: Außenansicht des Haupteingangs des BRG 16. Die am Projekt beteiligten Räume befinden sich hinter dem sanierten Hauptgebäude im neu errichteten Anbau.

Im ca. 4km nördlich von der Diefenbachgasse gelegenen 16. Bezirk befindet sich der zweite Schulstandort östlich von der U-Bahnstation Ottakring, der in dieser Master Thesis mit einbezogen wird. Das Bundesrealgymnasium hat im Innenhof einen neuerrichteten Zubau in dem sich im Erdgeschoss die drei Klassenräume befinden, die für dieses Projekt ausgewählt wurden. Auch hier entspricht der Anbau den heutigen Ansprüchen des energetischen Standards. Die Schule hat im Gegenteil zum BRG 15 keine maschinelle Belüftung, sondern eine natürliche. Die Klassenzimmer sind alle benachbart und haben demzufolge immer eine gemeinsame Innentrennwand.

2.2.1 Biologiesaal Raum N.004

Der Biologieraum ist im Erdgeschoss zum Hartplatz und damit nach Südsüdwest (s. **Abb. 2.10**) orientiert. Damit bekommt dieser Raum wie auch die anderen ausreichend Sonne ab, sowohl im Sommer als auch im Winter. Eine Verschattung durch die Nachbarbebauung ist zu jeder Jahreszeit möglich, besonders bei einem tiefen Sonnenstand morgens und abends. Der Raum weist eine große Fensterfront, mit einem Fenster-Grundflächen-Verhältnis von 21% und zwei Türen auf. Es handelt sich dabei einmal um eine Eingangstür zum Gang und zum anderen eine Durchgangstür zur Biologiesammlung. Die Innenwandbegrünung (Trogssystem) befindet sich an der Innenwand, die den Biologiesaal und Raum N.005 trennt, senkrecht zum Fenster. Das Trogssystem ist auf 5,0x2,10m dimensioniert, sprich 10,5m² und hat acht Tröge die übereinander in einem gleichmäßigen Abstand angebracht sind. Das System ist nicht an die Versorgungsleitungen gekuppelt. Dem entsprechend verfügt dieses Innenwandbegrünungssystem über ein Wasserreservoir das manuell gefüllt werden muss. An der Decke ist die Lichttechnik für die Bestrahlung der Wand sowie die Sensorenmesstechnik untergebracht (vgl. **Abb. 2.9**).



Abb. 2.9: Trogssystem im Biologesaal Raum N.004. Es sind insgesamt acht Tröge, übereinander mit einem regelmäßigen Abstand zueinander, an der Innenwand parallel zur Fensterfront angebracht. Die LED-Beleuchtung ist oben rechts im Bild gut zu erkennen. Die Sensoren (von links nach rechts) 11411 (weiß), 11487 (weiß), und RTR 665 (blau) sind zwischen der Beleuchtung und Grünwand angeordnet.

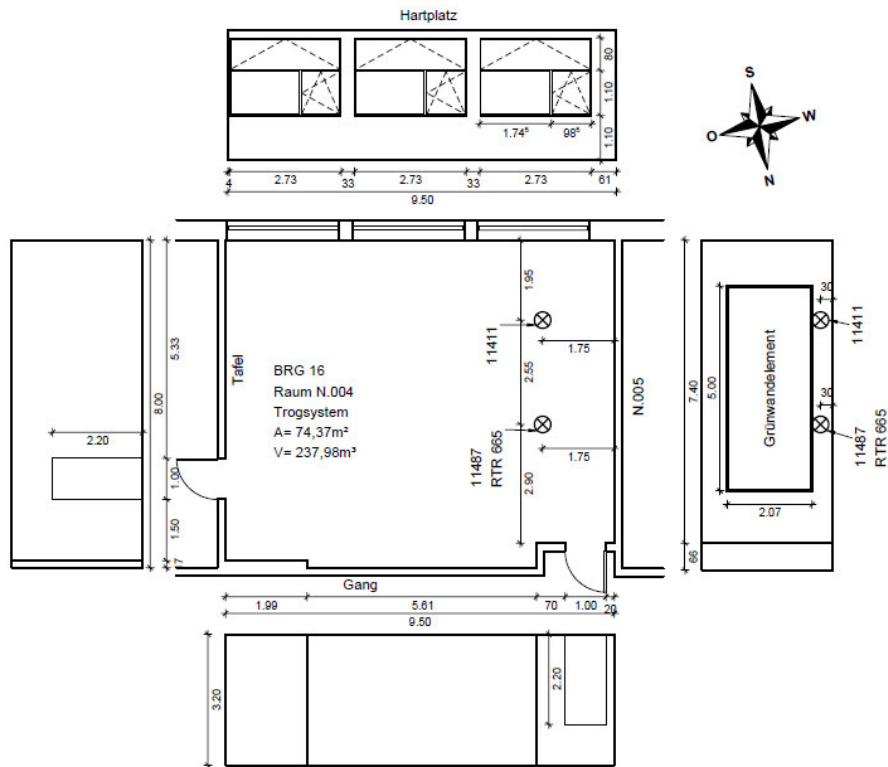


Abb. 2.10: Grundriss vom Biologesaal Raum N.004 mit Ansichten der relevanten Wände. Das Trogssystem ist an der Innenwand rechtwinkelig zu den Fenstern angebracht. Identisch zu den anderen Klassenräumen ist die Fensterfront nach Südsüdwest ausgerichtet. Das Verhältnis Fensterfläche zu Fußbodenfläche beträgt hier 20,9%. Die genauen Abstände der Sensoren sind ebenfalls dokumentiert und sind gleichgroß gehalten.

2.2.2 Referenzraum N.005

Das Klassenzimmer befindet sich zwischen Raum N.004 und Raum N.016 und ist mit einer Tür ausgestattet die zum Gang führt. Der Raum ist genau wie die beiden anderen Räume mit dem

Fenster nach Südsüdwest orientiert und hat ein Fußboden-Fensterflächen-Verhältnis von 15%. In diesem Raum ist keine Begrünung vorzufinden. Die Messsensoren sind mit etwas Abstand von der zum Fenster parallel angeordnete Innenwand installiert und zwar im gleichen Umfang wie in den beiden Klassen mit Innenwandbegrünungssystemen.

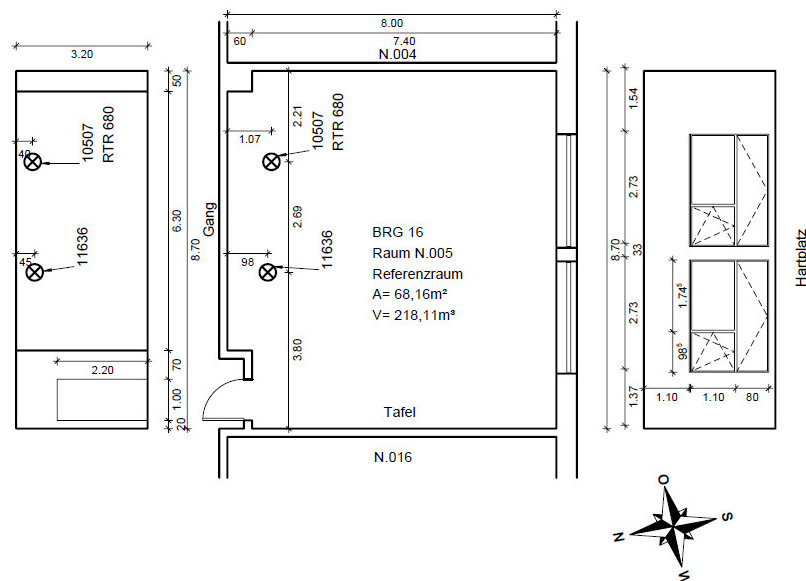


Abb. 2.11: Grundriss vom Referenzraum Raum N.005 mit den relevanten Ansichten der Innenwände. 15% ist das Verhältnis von Fensterfläche zur Grundfläche. Im Gegensatz zum vorherigen Beobachtungsraum befinden sich die Sensoren vor der Innenwand parallel zur Außenwand mit Fenstern. Auch hier wurde wieder auf eine Aufstellungskonstellation ähnlichen Abstands der Sensoren geachtet.

2.2.3 Raum N.016

Das Klassenzimmer ist wie die bereits genannten nach Südsüdwesten orientiert (vgl. **Abb. 2.13**) und wird erst wegen der Umgebungsbebauung gegen Mittag von der Sonne intensiv bestrahlt. Der Raum grenzt an Raum N.005 und verfügt nur über einen Eingang. Der Raum hat eine Fensterfront mit einer Fläche von $10,37\text{m}^2$ und weist somit ein Verhältnis zur Grundfläche von 15% auf und hat zudem auch die kleinste Grundfläche von dem am Projekt beteiligten Räumen beider Schulen. Die Befestigung des Innengrünwandsystems erfolgt nach dem Beispiel in Raum 251 (BRG 15), nämlich gegenüber vom Fenster an einer Innenwand. In diesem Fall ist es die, die zwischen Gang und Raum liegt. Das Vliestaschensystem ist auch in dieser Ausstattung wie in Raum N.004 nicht mit den Ver- und Entsorgungsleitungen für Trinkwasser verbunden, sondern verfügt über ein Wasserreservoir. Ähnlich wie im Biologiesaal ist auch hier die Beleuchtung für die Bestrahlung der Pflanzen an der Decke montiert, nur dass es sich um eine LED-Leiste und nicht einem überdimensionalen LED-Spotter handelt. Die Messsensoren sind mit einem definierten Abstand vom Vliestaschensystem von der Decke hängend angeordnet (s. **Abb 2.12**). Die Innenwandbegrünung hat ein Ausmaß von $5,58\text{m}^2$, ist demnach kleiner dimensioniert als das Trogsystem im Biologieraum und dem Physikraum im BRG 15.



Abb. 2.12: Vliestaschensystem im Raum N.016. Hier befindet sich, im Gegensatz zum Biologiesaal Raum N.004 der Aufbau an der Innenwand gegenüber von der Fensterfront. Die LED-Beleuchtungsleiste ist direkt vor den Messsensoren angebracht. Die laut Grundriss betriebenen Sensoren sind (von links nach rechts) 11407 (weiß), RTR 646 (blau) und 11466 (weiß).

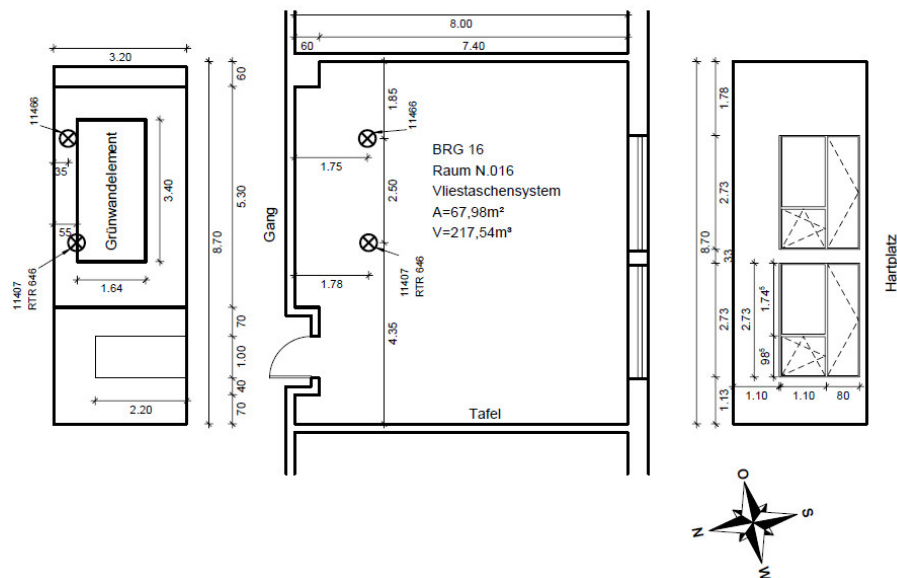


Abb. 2.13: Grundriss vom Raum N.016 mit Ansichten der relevanten Innenwände. Das Fensterflächen-Bodenflächenverhältnis kommt auf 15%. Auch hier sind die Sensoren in unmittelbarer Nähe der Grünwand angebracht. Die Fenster sind zum Innenhof mit Hartplatz gerichtet. Die Orientierung ist wie alle Beobachtungsräume des BRG 16 Südsüdwest.

2.3 Trogsystem

Dieses Wandbegrünungssystem besteht im Konzept aus einer Aluminiumwanne, die im Querschnitt trapezförmig ist. Diese kann in ihrer Länge den Anforderungen angepasst werden und beliebig oft übereinander montiert werden. Die Wanne wird von innen mit einem Kunststoffwerkzeuge ausgekleidet und mit einem gewünschten Pflanzensubstrat gefüllt. In diesem Fall ist das Substrat ein Blähtongranulat, welches auch bei Hydrokulturen verwendet wird. Die Wasserversorgung wird über einem in der Wanne verlegten Tropfschlauch gewährleistet. Durch den S-förmigen Verlauf sind die Wannen miteinander verbunden. Dieser Schlauch bezieht das Wasser entweder direkt von einer Wasserleitung, wie es im BRG 15 in Raum 255 der Fall ist, oder aus einem Wasserreservoir der manuell befüllt werden muss. Über eine Pumpvorrichtung wird das

Wasser in die oberste Wanne befördert und das überschüssige Wasser im Reservoir wieder aufgefangen oder in den Abfluss geleitet.

2.4 Vliestaschensystem

Das Vliestaschensystem ist ein Verbund aus unterschiedlichen Geotextilien. Es liegt kein Substrat vor in dem die Pflanzen sich verwurzeln können. Stattdessen sind im vertikal hängenden Vlies Taschen eingelassen, in denen die Pflanzen mit nackten Wurzeln hineingesteckt werden. Ähnlich wie beim Trogsystem wird ein Pumpsystem mit Wasser aus einem Anschluss oder aus einem Wasserreservoir gespeist. Das Wasser tropft dann von der Oberkante entlang des Vlieses an den Wurzeln vorbei und anschließend in das Wasserreservoir oder den Abfluss.

2.5 Eigenschaften der Pflanzen

Pflanzen haben die Eigenschaft in vielerlei Hinsicht das Mikroklima in ihrer Umgebung, je nach Pflanzenart und Umfang, zu beeinflussen. Diese Beeinflussung deckt jene Elemente des erweiterten Raumklimas, die für die Behaglichkeit verantwortlich sind, ziemlich gut ab.

Durch die oxygene Photosynthese, die von Pflanzen betrieben wird, werden vereinfacht Kohlenstoffdioxid und Wasser mit der Energie des Lichts (überwiegend blau und rot) zu Dextrose und Sauerstoff umgewandelt. Hinzu kommt die Tatsache, dass manche Pflanzen zusammen mit den Mikroorganismen im Pflanzensubstrat in der Lage sind gewisse Luftverunreinigungen zu binden und zu einem bestimmten Grad unschädlich zu machen. Das sind vor allem das krebserregende Benzol, das karzinogene Formaldehyd und das stark narkotisierende Trichlorethen. Dazu hat die NASA eine Studie mit einer Aufzählung von luftreinigenden Pflanzen veröffentlicht, wobei die „*Dracaena fragans*“ die mit aufgeführt wird, im Trogsystem mit eingebunden ist [10]. An der Unterseite der Blätter befindet sich eine Vielzahl von Spaltöffnungen, die zum einen die Kohlenstoffdioxidaufnahme regulieren und zum anderen über diese Öffnungen Wasser bei Hitze ausscheiden, das dann der Transpiration zur Verfügung steht um sich vor dem Austrocknen zu schützen. Dieser Prozess kühlt die Pflanze und senkt dabei auch die Umgebungstemperatur, da dieser die Energie in Form von Wärme entzogen wird sobald die Verdunstung eintritt [11]. Auch auf die Raumakustik haben Pflanzen eine Auswirkung wie es aus einer Studie von M. Monreal und Dr. K.-H. Kerstjens hervorgeht. Hier hat sich ein linearer Zusammenhang der äquivalenten Schallabsorptionsfläche bei steigender Anzahl an Pflanzen gezeigt, wobei die Anordnung als auch die Position im Raum von Bedeutung sind [12].

Den entscheidenden Beitrag zur Luftfeuchte hat nicht die Pflanze selbst, sondern das Substrat. Hier ist natürlich entscheidend welche Art von Substrat eingesetzt wird und wie hoch der vorliegende Wassergehalt ist.

2.6 Luft-Luft-Wärmetauscher

Bei der sogenannten rekuperativen Wärmeübertragung wird Außenluft und Innenluft angesaugt und deren Luftströme so gelenkt, dass diese im Herz der Anlage aneinander in Kanälen parallel vorbeiströmen. Über die Kanalwand, die beide Luftströme trennt, wird direkt die thermische Energie der Innenluft an die einströmende Außenluft übertragen. Es kann vor dem Einleiten der Zuluft in den Aufenthaltsraum noch ein Nachheizregister dazwischen geschaltet werden. Dieser gleicht die Energieverluste beim Wärmetausch aus und damit tritt die Frischluft mit nahezu der vorliegenden Zimmerlufttemperatur aus [13]. Ein Austausch der Luftfeuchte findet bei diesem Prozess nicht statt, dazu müsste eine regenerative Wärmeübertragung zum Einsatz kommen. Dies ist im Diefenbachgymnasium nicht der Fall.

3 Grundlagen zu den erweiterten raumklimarelevanten physikalischen Größen

3.1 Die Lufttemperatur, die absolute und relative Luftfeuchte und der Taupunkt

Die Kennwerte für die thermische und hygrische Behaglichkeit gehen Hand in Hand und werden besonders deshalb an dieser Stelle gemeinsam behandelt. Einflüsse auf diese Parameter sind unterschiedlicher Natur. Zum einen spielen die Bauweise des Gebäudes und sein Standort eine maßgebende Rolle. Dazu zählen die Orientierung der Klassen zur Sonne hin und die Fensterfläche (Art der Verglasung und Umfang). Andererseits haben auch die Nutzung, die Heizung, die Belüftung oder Klimatisierung sowie interne Feuchte- und Wärmequellen einen großen Einfluss. Zu den Feuchte- und Wärmequellen gehören Elektrogeräte im Betrieb, Pflanzen und der Mensch [5].

Aus der Anatomie des Menschen ist bekannt, dass wir Thermorezeptoren im Stammhirn und in der Haut besitzen, welche das Bedürfnis in uns auslösen tätig zu werden um uns abzukühlen oder zu erwärmen. Kühlt die Haut auf 34°C ab oder in der umgekehrten Situation erreicht das Stammhirn eine Temperatur von über 37°C wird ein entsprechender Reiz ausgelöst. Diese Werte sind jedoch von Individuum zu Individuum unterschiedlich und schwanken über den Tag. Das Wohlbefinden ist also stark subjektiv geprägt. Es muss also eine Empfindungstemperatur berücksichtigt werden. Ist die Umgebungslufttemperatur im Innenraum bei einem durchschnittlichen Wert und die umschließenden Wände strahlen Wärme ab, so ist es behaglich und die empfundene Temperatur ist höher als die gemessene. Kalte Wandoberflächen bewirken genau das Gegenteil. Die gemessene Raumtemperatur wird kälter empfunden². Die empfundene Temperatur lässt sich als Mittelwert aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur berechnen. Entscheidend ist demzufolge die Regulierung der Wärmeflüsse. Hier kommt dem Wärmeschutz eine besondere Bedeutung zu, womit in erster Linie die Wärmedämmung, Sonnenschutz und Lüftungswärmeverluste gemeint sind [5]. Laut DIN 1946-2:1994-01 soll die empfundene Temperatur bei einer Außentemperatur von $18\text{-}26^{\circ}\text{C}$ in einem Bereich zwischen $22\text{-}25^{\circ}\text{C}$ liegen. Bei höheren Außentemperaturen im Sommer (bei 32°C) liegt der Bereich zwischen 25°C und 27°C [6].

Die Luft kann als Speicher für Wasserdampf (Wasser im gasförmigen Aggregatzustand) gesehen werden. Die Speicherfähigkeit ist von der Lufttemperatur abhängig. Steigt die Temperatur von 20°C auf 25°C , so kann die Umgebungsluft statt $17,2\text{g}/\text{m}^3$ nun $23,0\text{g}/\text{m}^3$ (absolute Luftfeuchtigkeit) aufnehmen, dies entspricht in beiden Fällen einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100%. Das ist also das theoretische Wasserdampffassungsvermögen im gesättigten Stadium. Beträgt die Lufttemperatur 20°C und die gemessene relative Luftfeuchtigkeit 50%, so ist die absolute Luftfeuchtigkeit $8,6\text{g}/\text{m}^3$ und somit genau die Hälfte von $17,2\text{g}/\text{m}^3$. Wird die Temperatur von 20°C auf 25°C erhöht und die absolute Luftfeuchtigkeit bei $8,6\text{g}/\text{m}^3$ konstant gehalten, dann ändert sich die relative Luftfeuchtigkeit entsprechend von 50% zu 37,44%. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit ist ein Wert zwischen 40 und 65% erstrebenswert, wobei eine absolute Luftfeuchtigkeit von mehr als $15\text{g}/\text{m}^3$ als schwül und damit einhergehend unbehaglich empfunden wird. Ist die Luft zu trocken können Symptome wie brennende Augen oder ausgetrocknete Schleimhäute in den Atemwegen zu beklagen sein. Im Falle der Schleimhäute kann eine niedrige Luftfeuchte zur Veränderung der Viskosität führen und infolge dessen den Schutzmechanismus des Körpers gegen Erreger schwächen.

Um die Behaglichkeit nun grafisch darzustellen wird in dieser Arbeit auf das hygrothermische Diagramm, ein Streudiagramm, nach W. Frank zurückgegriffen und adaptiert. Frank verwendet

² Hier kann auf die Arbeiten von Ole Fanger, F. Roedler und W. Frank verwiesen werden.

ein kartesisches Koordinatensystem mit der Lufttemperatur auf der Abszissenachse und die relative Luftfeuchtigkeit auf der Ordinatenachse. Die Relative wird dabei mit der Absoluten ausgetauscht (vgl. **Abb. 5.10**), was unüblich ist. Weil der Einfluss der Belüftungsanlage bei der absoluten Luftfeuchtigkeit ersichtlich wird, wird diese Konzentration im Diagramm ebenfalls herangezogen. Befindet sich ein Wertpaar im I. Quadranten unten links ist die Luft trocken und kalt, oben rechts hingegen schwül und heiß, in beiden Situationen ist man im unbehaglichen Gebiet. Die „noch behagliche“ und behagliche Zone sind von der Fläche am kleinsten im Vergleich und beschränken sich auf einen Bereich von 4-14g/m³ und von 17-27°C.

$$\rho_D = \frac{e}{R_D * T} * 1000$$

$$\rho_D = \text{absolute Luftfeuchtigkeit} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

$$e = \text{Partialdruck Wasserdampf [Pa]}$$

$$R_D = \text{Gaskonstante Wasserdampf} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$$

$$T = \text{Lufttemperatur [K]}$$
(1)³

$$e = \varphi * e_{sat}$$

$$e = \text{Partialdruck Wasserdampf [Pa]}$$

$$\varphi = \text{relative Luftfeuchtigkeit [-]}$$

$$e_{sat} = \text{Sättigungsdampfdruck [Pa]}$$
(2)

$$e_{sat,w} = 611,2 * \exp\left(\frac{22,46 + t}{272,62 + t}\right)$$

$$e_{sat,w} = \text{Sättigungsdampfdruck [Pa]}$$

$$t = \text{Lufttemperatur [°C]}$$
(3)

Neben einem entsprechenden Nährboden spielt die Feuchtigkeit eine übergeordnete Rolle bei der Schimmelpilzbildung. Schimmelpilzsporen können Mykotoxikosen und Mykoallergosen hervorrufen [3]. Damit sind Krankheitserscheinungen, im ersten Fall Unwohlsein durch Vergiftungen und im Zweiten allergische Reaktionen durch irritierte Schleimhäute gemeint. Es kann zudem zu einer Geruchsbelästigung im Innenraum kommen. Am häufigsten werden aerogene Pilzarten der Gattung *Penicillium*, *Aspergillus* und *Cladosporium* nachgewiesen. Am Bauwerk selber kann bei einem Befall schwarzer, grüner oder weißer Schimmel vorkommen, wobei aufgrund der Farbe des Schimmels nicht unmittelbar auf eine Gefährdung geschlossen werden kann.

Quelle der Feuchtigkeit, schlimmer noch Nässe, wären die Luftfeuchtigkeit, Regenwassereindringung oder jegliche Arten von Wasserschäden (Rohrbruch, Hochwasser). Hier wird jedoch nur auf die Luftfeuchtigkeit Bezug genommen. Ein weiterer wichtiger Begriff ist der Taupunkt, welcher im direkten Zusammenhang mit der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit steht (vgl. **Formel (4)**). Die Taupunkttemperatur stellt den Umkehrpunkt dar, bei dem der „Speicher“ seine Kapazität erreicht hat und den überschüssigen Wasserdampf abgibt [4]. Dieser wiederum wechselt seinen Aggregatzustand von gasförmig zu flüssig und fällt als Kondensat aus. An Gegenständen als Tau in der Luft als Nebel. Mit Hilfe eines gekühlten Erfrischungsgetränks lässt sich dieser Vorgang veranschaulichen. Im Sommer kann beobachtet werden wie sich Wasserperlen an der Außenseite des Behälters bilden. Das heißt die schmale Grenzschicht der Luft um den Behälter kühlt sich derart ab und befindet sich unterhalb des Taupunktes, hat jedoch noch die gleiche absolute Luftfeuchtigkeit beibehalten. Die gesättigte Luft, also eine relative Luftfeuchtigkeit von über 100%, hat das Wasserdampfvermögen überschritten und stößt den Überschuss ab. In Chittagong (Bangladesch) bei einer Lufttemperatur von 31°C und einer

³ Diese Formeln wurden für die Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit in dieser Arbeit herangezogen, wobei die Eingabewerte die Messwerte sind und der Luftdruck mit 101325Pa angenommen wird. Quelle: <https://www.schweizer-fn.de/luftung/feuchte/feuchte.php#berechnung> (Zugriff am 12.12.2018)

relativen Luftfeuchtigkeit von 94% beträgt der Taupunkt 30°C. Also könnten sich Wassertröpfchen an der Tasse eines lauwarmen Tees mit 28°C bilden. Das andere Extrema wäre im australischen Outback mit einer Lufttemperatur von 32°C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 3% und demnach ein Taupunkt um -18°C. Dem zufolge würde an einem gefrorenen Schokoladeneis die Glasur nicht beschlagen. Dieses Prinzip lässt sich nun auch in den Innenraum übertragen. Besonders betroffen sind Bereiche, an denen sich geometrische/materielle/konstruktive Wärmebrücken vorfinden, also Innenecken von Außenwänden, Fensteranschlüsse, Ecken zwischen Außenwand und Decke und Sanitäranlagen im Raum. Es muss jederzeit dafür gesorgt sein, dass die Lufttemperatur an keiner Stelle im Raum unterhalb des Taupunktes liegt. Mit Kondensat kann schon bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80% zu rechnen sein. Der Taupunkt ist also mit der Begrünung in den Klassen ein wichtiger Kennwert, jedoch nur punktuell ermittelbar.

$$t_{TP} = \varphi^{8,02} * (109,8 + t) - 109,8 \quad \begin{array}{l} t_{TP} = \text{Taupunkttemperatur [}^\circ\text{C]} \\ \varphi = \text{relative Luftfeuchtigkeit [-]} \\ t = \text{Lufttemperatur [}^\circ\text{C]} \end{array} \quad (4)^4$$

3.2 CO₂-Konzentration

Die Luftqualität darf als einer der Einflussfaktoren für die Behaglichkeit nicht vernachlässigt werden. Ein Parameter auf den ein Augenmerk geworfen wird und damit eine Schlüsselrolle einnimmt ist die Kohlenstoffdioxidkonzentration. Kohlendioxid, mit seiner chemischen Summenformel CO₂, ist ein weder optisch noch olfaktorisch wahrnehmbares Gas. Dieses saure Gas kommt natürlich in der Umgebungsluft mit einer typischen Konzentration von ca. 400 ppm (parts per million) im städtischen und 350 ppm im außerstädtischen Gebiet vor. Damit hat Kohlenstoffdioxid im Vergleich zu den anderen Gasen in der Luft (78% Stickstoff und 21% Sauerstoff) eher einen geringen Anteil. Als Quellen sind Verbrennungsprozesse mit Sauerstoff und die Zellatmung im Organismus von Mensch und Tier anzuführen. Im umhüllten Raum ist die Summe der sich dort aufhaltenden Menschen, Luftaustausch mit der Außenluft, Volumen des Aufenthaltsraums, die Intensität der Aktivität und Aufenthaltsdauer für die Konzentration verantwortlich. Schulen weisen eine erhöhte Kohlenstoffdioxidkonzentration auf und liegen mit Werten teils über 2000ppm weit vor zum Beispiel Büroräumen mit 800ppm oder Wohnungen mit 870ppm [7]. Überhöhte Konzentrationen führen zu einer deutlichen Abnahme des Wohlbefindens, welche sich durch die Erscheinung von einer Beeinträchtigung des zentralen Nervensystems in Form von Müdigkeit, Kopfweh und ein Nachlass an Fokussierung erkenntlich machen. Studien die letzteres betreffen ergeben, dass lediglich die Denkleistung vom Tempo her träge wird und es zu keiner Beeinträchtigung, weder des Kurz- noch Langzeitgedächtnisses führt [8]. Es ist zudem nicht auszuschließen das Kinder und Jugendliche empfindlicher reagieren, wenn sich die Zustände ihrer Umgebung ändern. Es wird häufig die Pettenkofer-Zahl von 1000 ppm als Richtwert angewendet. Dies ist leider nicht zeitgemäß und demnach werden adaptierte Zahlen herangezogen, die den modernen Gebäuden und dem menschlichen Verhalten entsprechen und dennoch den Pettenkofer-Richtwert als Basis implementieren. Der Anhang der ÖNORM EN 13779:2008 enthält eine Einteilung in Klassen 1-4 welche Ziel- und Richtwerte darstellen. Jedoch wird nicht zwischen natürlicher und mechanischer Lüftung unterschieden. Klasse 1 stellt das Ziel für Räume unter ständiger Nutzung, für Werte unter 800 ppm dar. Klasse 2 ist ein Richtwert, wobei hier die Konzentration zwischen 800 ppm und 1000 ppm liegen muss. Die darauffolgende Klasse 3 repräsentiert den allgemeinen Richtwert. Werte müssen 1400 ppm unterschreiten. Nicht hinnehmbar sind Konzentrationen die 5000 ppm übersteigen. Eine weitere

⁴ Diese Formel wurde für die Berechnung der Taupunkte in dieser Arbeit herangezogen. Quelle: <https://www.schweizer-fn.de/lueftung/feuchte/feuchte.php#berechnung> (Zugriff am 12.12.2018)

Klassifizierung der Luftqualität findet sich in der gleichen Norm. Die Kategorisierung lautet wie folgt: IDA1 für eine hohe Qualität mit einer CO₂-Konzentration ≤ 400 ppm; IDA2 für eine mittlere Qualität mit 400-600 ppm; IDA3 für eine mäßige Qualität mit 600-1000 ppm; IDA4 für eine niedrige Qualität mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration ≥ 1000 ppm. Diese Werte gehen mit einer Luftwechselrate einher. Je kleiner die Konzentration, umso größer das Volumen des Luftwechsels in der Stunde. IDA1 hat eine Außenluftfrate von ≥ 52 m³ pro Person und Stunde.

$$\beta_i = \frac{0,1 * M * p * X_i}{R * T * 1000}$$

$$\beta_i = \text{Konzentration} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

$$M = \text{Molare Masse} \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$$

$$p = \text{Referenzdruck} [\text{mbar}]$$

$$X_i = \text{Konzentration} [\text{ppm}]$$

$$R = \text{Molare Gaskonstante} \left[\frac{\text{J}}{\text{kmol} * \text{K}} \right]$$

$$T = \text{Lufttemperatur} [\text{K}]$$
(5)⁵

3.3 Raumakustik

Für die akustische Behaglichkeit ist die Nachhallzeit für die Qualität der Hörsamkeit eines Aufenthaltsraumes ausschlaggebend. Je nach Nutzungsart sind unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. In einer Konzerthalle sollte auch die hinterste Reihe alles hören und die Geräuschquelle orten können, während in Schulklassen die Verständigung auf kurzer Distanz klar und deutlich sein soll und Störgeräusche auf ein Minimum reduziert werden müssen. Demnach muss die Akustik ein Schallgeräusch entweder weit tragen oder im anderen Fall die Ausbreitung unterbinden. Die Hallfähigkeit eines Raumes wird durch die Nachhallzeit beschrieben und steht unzertrennlich in Verbindung mit dem Raumvolumen. Die Eigenschaft jeder Oberfläche im Raum den Schall zu reflektieren beziehungsweise diesen zu absorbieren, wird als Schallabsorptionsgrad bezeichnet. Die Fläche des schallabsorbierenden Raumes wird als äquivalente Schallabsorptionsfläche angegeben (vgl. **Formeln 7** und **8**). Mit diesem Wissen lässt sich die Raumakustik mit Hilfe von gezielt gewählten Einrichtungsgegenständen feinjustieren. Liegt eine längere Nachhallzeit vor, so wird der Aufenthaltsort als hallig und laut empfunden. Umgekehrt wirkt der Ton dumpf. Das liegt daran, dass ein Schallsignal den Zuhörer einmal direkt trifft und zum anderen ein oder mehrmals an den Oberflächen im Raum reflektiert wird. Im Gegensatz zum Direktschall treffen die zurückgeworfenen Schallwellen demnach später und schwächer ein. Das ist mit den verlängerten Wegen die der Schall zurücklegt und mit der unvollkommenen Reflexion zu erklären [9]. Die Nachhallzeit ist jene Zeit die von Beginn eines Schallereignisses vergeht, bis eine Abnahme des Schalldruckpegels mit einer Schalldruckdifferenz von 60dB(A) gemessen wird. Es handelt sich dem zufolge um die Abklingdauer der Reflexionen.

Die Nenn-Nachhallzeit ist von der Raumnutzung abhängig, auf das gesamte Frequenzspektrum anzuwenden und wird mit der **Formel 6** berechnet. Von diesem Wert darf es, laut ÖNORM B 8115-3:2005, in den Frequenzbändern 250-2000Hz zu Über- und Unterschreitungen von nicht mehr als 20% kommen. Damit ist ein Toleranzbereich festgelegt. Die Bezugshfrequenz ist für den Fall Kommunikation bei 500Hz angegeben.

Die optimale Nachhallzeit ist besonders für den Lernerfolg bei Fremdsprachen vonnöten. Störgeräusche beeinträchtigen die Fokussierung der Aufmerksamkeit im Unterricht und müssen

⁵ Diese Formel wurde für die Umrechnung der Kohlenstoffdioxidkonzentration in dieser Arbeit herangezogen, wobei der Referenzdruck auch hier mit 1013,25mbar angenommen wird. Quelle: <https://www.unternehmensberatung-babel.de/industriegase-lexikon/industriegase-lexikon-n-bis-z/umrechnung-ppm/index.html#> (Zugriff am 12.12.2018)

auf einem niedrigen Niveau gehalten werden. Eine ebenfalls niedrige Sprachverständlichkeit und laute Kulisse kann zu einem Stressfaktor für Schüler werden, welches wiederum in Unruhe mündet.

$$T_{soll} = \left(0,32 * \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,17\right) s \quad T_{soll} = \text{Nachhallzeit [s]} \quad (6)^6$$

$$V = \text{Raumvolumen [m}^3\text{]}$$

$$T = 0,163 * \frac{V}{A} \quad V = \text{Raumvolumen [m}^3\text{]} \quad (7)^7$$

$$A = \text{Äquivalente}$$

$$\text{Schallabsorptionsfläche [m}^3\text{]}$$

$$A = \sum \alpha_s * S \quad \alpha_s = \text{Schallabsorptionsgrad [-]} \quad (8)$$

$$S = \text{Raumbegrenzungsfläche [m}^2\text{]}$$

⁶ Diese Formel stammt aus der ÖNORM B 8115-3:2005 (Seite 5) und gilt für die Kommunikation in einem Raum von der Größe $30\text{m}^3 \leq V \leq 1000\text{m}^3$

⁷ Quelle: <http://www.proholz.at/zuschnitt/37/haste-toene-raumakustik-im-kindergarten/> (Zugriff am 12.12.2018)

4 Vorgehensweise/wissenschaftliche Methodik

Damit die Veranschaulichung von Abhängigkeiten der Messdaten repräsentativ ist waren einige Zwischenschritte vor der Analyse beziehungsweise den Vergleichen erforderlich.

Die Messdatensätze sind nach Schule getrennt. Jeder Datensatz beinhaltet die Messdaten der installierten Sensoren der Klassen, die Räume mit dem Trog- und Vliestaschensystem als auch der Referenzraum. Für die CO₂-Konzentration kam nur ein Sensor in den jeweiligen Klassen in Frage. Für die Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit wurden die Sensoren grob nach zwei Brauchbarkeitskriterien ausgewählt. Zum einen der, welcher die niedrigste Ausfallrate hatte und zum anderen welcher über dem Zeitraum der Beobachtung am schlüssigsten war, also eine sinnvolle Abfolge an Messwerten aufzeichnete. Im Anschluss dieser Aussortierung wurden die Messwerte bei der relativen Luftfeuchtigkeit kleiner 0, bei der Lufttemperatur kleiner 10°C und größer als 38°C und bei der CO₂-Konzentration kleiner 0ppm und größer 2000ppm herausgefiltert. Im Anschluss wurden die Werte manuell sortiert und der Zeitstempel überprüft, um die Bearbeitung im Tabellenkalkulationsprogramm zu erleichtern. Abschließend wurden die Messdaten von einem Minutentakt auf einem 5-Minutentakt gekürzt um den Rechenaufwand und im gleichen Zug die Dateigrößen erheblich zu verringern. Ausnahme für die Taktänderung ist der 05.10.2018, hier wurde der Minutentakt für eine feinere Betrachtung beibehalten. Verwendet wurden dann ausschließlich nur die Messdaten die während des Unterrichts aufgezeichnet wurden. Dazu war ein ständiger Abgleich mit den Belegungsplänen der Klassenräume, Schulferien und Feiertage notwendig.

Tab. 4.1: Übersicht der Maxima und Minima in den Klassenräumen als auch vom Wetter. Wobei es sich um Durchschnittswerte des jeweiligen Tages oder der Woche handelt. Farblich sind jene Tage und Wochen hervorgehoben, die häufiger als einmal vorkommen.

| | | | BRG15 | | | BRG16 | | | Wetter |
|-----|---------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | 251 | 253 | 255 | 004 | 005 | 016 | |
| Tag | Max Tag | aLF | 08.06.2018 | 08.06.2018 | 08.06.2018 | 11.06.2018 | 11.06.2018 | 04.09.2018 | 08.06.2018 |
| | Min Tag | aLF | 21.02.2018 | 21.02.2018 | 20.02.2018 | 22.02.2018 | 19.02.2018 | 21.02.2018 | 21.02.2018 |
| | Max Tag | Temp | 03.09.2018 | 12.06.2018 | 11.06.2018 | 11.06.2018 | 11.06.2018 | 11.06.2018 | 21.06.2018 |
| | Min Tag | Temp | 12.02.2018 | 19.12.2017 | 08.12.2017 | 05.04.2018 | 13.11.2017 | 10.11.2017 | 27.02.2018 |
| KW | Max KW | aLF | 22 | 22 | 22 | 22 | 23 | 36 | 23 |
| | Min KW | aLF | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | Max KW | Temp | 23 | 23 | 37 | 38 | 38 | 24 | 22 |
| | Min KW | Temp | 9 | 7 | 49 | 44 | 43 | 43 | 9 |
| | | | | | | | | | |

Im ersten Schritt werden die Verläufe der Messdaten über das gesamte Schuljahr 2017/2018 dargestellt und untersucht. In den nachfolgenden Schritten wird die Zeitperiode der Observation auf gezielt ausgesuchte Wochen und Tage verkleinert. Kriterium für die Wahl der Wochen sind die kleinsten und größten Werte der Außenklimadaten, wobei lediglich die Außenlufttemperatur und die absolute Außenluftfeuchte herangezogen werden. Es werden also jene Kalenderwochen und Tage einbezogen, die am wärmsten/kältesten und trockensten/feuchtesten waren.

Die Extrema für die Außenlufttemperatur fallen auf die Kalenderwochen 9 2018 (Minimum), Kalenderwoche 22 2018 (Maximum) und für die absolute Außenluftfeuchtigkeit einmal die Kalenderwoche 8 2018 (Minimum) und des Weiteren die Kalenderwoche 23 2018 (Maximum). Um der Unmenge an Diagrammen Herr zu werden, kommen nur Kalenderwoche 8 und 23 in Betracht. Die **Tab. 4.1** veranschaulicht welche Vielzahl an Diagrammen erstellt werden müsste um alle ermittelten Zeiträume abzudecken. Bei den Tagen kommt nur der 05.10.2018 vor. An diesem wurde in drei Unterrichtsstunden ein Survey an alle Schulen in den Beobachtungsklassen durchgeführt. Wobei das Lüftungsverhalten mit Anzahl und Art und Weise der geöffneten Fenster als auch Türen und Anzahl der anwesenden Personen dokumentiert wurde.

Um die Aussagekraft der Messwerte effektiv abzubilden reicht nicht eine Art von Diagramm, jedoch soll die Anzahl auch nicht überhand gewinnen. Also sollte mit einer geschickten Wahl das größtmögliche an Information in ein paar unterschiedlichen Grafiken ersichtlich werden, die zu plausiblen Schlussfolgerungen führen und den Vergleich der Räume miteinander erlauben. Wegen der Zeitkomponente sind Liniendiagramme das handlichste Werkzeug. Für den ersten Überblick sorgt die Darstellung der Verläufe in den entsprechenden Zeit-X-Diagrammen. Mit X sind die physikalischen Größen, sprich Lufttemperatur, relative als auch die absolute Luftfeuchtigkeit, Kohlenstoffdioxidkonzentration und Taupunkt gemeint. Weiteres eignen sich Boxplots, um die Streuung und Extrema der Messdaten zu illustrieren [1]. Die Messwerte werden dabei gedanklich ihrer Größe nach sortiert und aufgereiht. Es ergeben sich so ein Maximum und ein Minimum, sogenannte Ausreißer. Anschließend werden das erste, zweite und dritte Quartil ermittelt. Diese sind auch als 25%-, 50%- und 75%-Quantil bekannt, wobei zweitletzteres gängig als Median bezeichnet wird. Dieser ist nicht mit dem arithmetischen Mittel zu verwechseln. Der Median ist der Tatsächliche Wert, welcher die Messwertreihe halbiert.

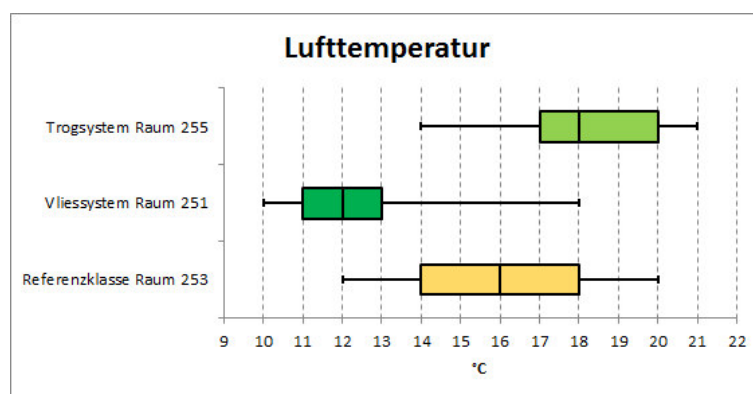


Abb. 4.1: Beispiele für Boxplots: normalverteilt (Raum 253), linksschiefe (Raum 251) und rechtsschiefe (Raum 255)

Die Zone zwischen dem dritten und ersten Quartil, der Interquartilbereich, umfasst ca. 50% der Messwerte. Um diesen Bereich wird die Box gezeichnet. Die Abschnitte die nun links und rechts von der Box liegen, also vom 25%-Quantil zum Minimum und umgekehrt vom 75%-Quantil zum Maximum, bilden die Whiskers. Eines dieser Zonen umfasst ein Viertel der Messwerte, demnach einmal das untere und zum anderen das obere Viertel. Sind die vier Abschnitte alle gleichgroß (vgl. **Abb. 4.1**), wird dies als normalverteilter Boxplot bezeichnet. Eine andere Möglichkeit die sehr wahrscheinlich häufiger auftritt ist die Schiefe. Hierbei ist zum Beispiel der eine Whisker kürzer im Gegensatz zum anderen. Die Symmetrie geht demzufolge verloren. Für die Gegenüberstellung werden die Lage der Mediane und Streubreite als Beurteilungsmarker herangezogen.

Ein weiteres Hilfsmittel um die Streuung optisch zu präsentieren ist die Normalverteilung aus der Stochastik. Eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche oft in der Literatur unter Gauß-Verteilung zu finden ist und oft dann in den Naturwissenschaften zum Einsatz kommt, sobald mit Abweichungen der Messdaten, während eines Versuchs von einem Erwartungswert zu rechnen sind. Fast alles in der Natur ist normalverteilt. Gängiges Beispiel dafür ist die Körpergröße des Menschen für Männer und Frauen. Diese Verteilung stellt die Häufigkeit dar und die normierte Funktion $f(x, \mu, \sigma)$ beschreibt eine streng symmetrische Kurve die einer Glocke ähnelt. Durch die Normierung ist die Fläche unter dem Graphen jeder Glockenkurve immer aufintegriert „1“. Der Erwartungswert μ diktiert die Position der Kurve und dem zufolge dessen Maximum entlang der Abszissenachse und lässt sich vereinfacht als Mittelwert beschreiben. Während hingegen die Standardabweichung σ die Breite vorgibt. Verläuft der Graph flach, ist die Standardabweichung groß und somit auch die Streuung der Messwerte. Umgekehrt nimmt die Glocke eine schmale beziehungsweise eine spitze Form an (vgl. **Abb. 4.2**), wenn das Sigma klein

ist. Damit befinden sich die Messwerte hauptsächlich im nahen Umfeld von μ . Im Streuinterval von „ $\mu-\sigma$ “ und „ $\mu+\sigma$ “ befinden sich annäherungsweise 68% der Messwerte. Anders ausgedrückt kann behauptet werden, dass ein x -beliebiger Wert mit „ $\mu-\sigma \leq x \leq \mu+\sigma$ “ mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% vorkommt. Es lassen sich für diverse Intervalle die Wahrscheinlichkeiten $p(\Phi)$ mit Hilfe von Tabellen schnell errechnen. Wie bei dem Boxplot gibt es auch hier Ausreißer. Diese sind in den Bereichen „ $x \leq \mu-3\sigma$ “ und „ $x \geq \mu+3\sigma$ “ zu finden. [2]

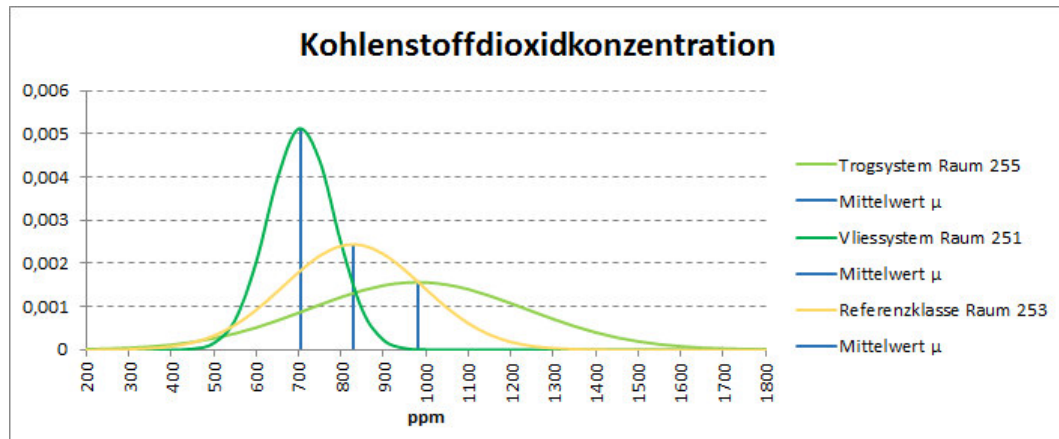


Abb. 4.2: Normalverteilung für die CO₂-Konzentrartion. Gut dargestellt sind die diversen Erwartungswerte und unterschiedlichen Glockenkurven, die auf mal größer (Raum 255) mal kleine (Raum 251) Standardabweichungen hinweisen. Damit ist offensichtlich, dass Raum 255 die weiteste Streuung hat. Jede Fläche unter den Funktionen ist aufintegriert „1“.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Messwerte die Werte Sigma und μ liefern und diese ein Abbild erzeugen, welches mit der tatsächlichen Summenhäufigkeit nicht identisch ist. Für die spätere Untersuchung kommt dieses Modell für die absolute und relative Luftfeuchtigkeit, also auch für die Kohlenstoffdioxidkonzentration nicht in Frage, da diese Größen keine negativen Werte annehmen dürfen. Für die hygrothermische Behaglichkeit kommen Kreisdiagramme und Streudiagramme zur Anwendung. Letzteres mit der absoluten Luftfeuchtigkeit an der Ordinate und die Temperatur an der Abszisse abgetragen, lässt eine gute graphische Veranschaulichung der Korrelationen zwischen den Wertpaaren in Form von Punktwolken zu. Der Effekt bei dieser Clusterbildung wird zusätzlich durch die Transparenz der gewählten Farbe sowie des Durchmessers des Punktes hervorgehoben. Je dichter die Punktkonzentration, umso dunkler die Verfärbung der Wolke. Da das Streudiagramm im I. Quadranten außerdem noch in drei Bereiche unterteilt ist, wird das Kreisdiagramm zur Unterstützung hinzugezogen um die Anteile, in Prozent, der Wertpaare in den jeweiligen Bereichen darzustellen. Hier wurde auf das Ampelfarbschema zurückgegriffen, wobei grün die positive Situation, rot wiederum die negative und gelb die Zwischenposition repräsentieren. Als letztes wurde noch das Balkendiagramm wegen seiner leicht überschaubaren Form für den Vergleich der Nachhallzeiten im Bereich des Oktavbands von 125-2000Hz angewendet.

In den genannten graphischen Veranschaulichungen wurde ein Farbschema für die Klassen festgelegt. Diese ist bereits in der **Tab. 4.1** ersichtlich. Für die Referenzräume 253 (BRG 15) und N.005 (BRG 16) fungiert die Farbe Gelb, für die Räume 255 und N.004 mit dem Trogsystem die Farbe Hellgrün und letztlich für die Räume 251 und N.016 mit dem Vliestaschensystem die Farbe Dunkelgrün. Dieses ist nur gültig für den Vergleich der Klassenräume in einer Schule. Beim direkten Vergleich der Schulen, also Räume 253 und N.005, Raum 251 und N.016 als auch Raum 255 und N.004, für die Räume des BRG 15 ein Farbton eine Nuance heller und dunkler gewählt, damit der Unterschied erkenntlich ist.

Wie bereits zum Thema Farbcode erklärt, wird im ersten Schritt die Situation in den Klassenräumen zu Beginn in der Schule (BRG 15: 253-251-255; BRG 16: N.005-N.016-N.004) verglichen und im zweiten Schritt das jeweilige Grünwandsystem im Raum der einen Schule mit dem glei-

chen in der anderen Schule (BRG 15-BRG 16: 253-N.005; 251-N.016; 255-N.004). Dieser Ablauf wird immer wieder für die ausgewählten Zeiträume (Gesamtbeobachtungsperiode, KW 8, KW 23, 05.10.2018) angewendet. Gegliedert wird nun zu dem in der Reihenfolge, beginnend die Betrachtung mit der Lufttemperatur (gemessen) und der absoluten(berechnet)/relativen Luftfeuchtigkeit (gemessen), dann die Kohlenstoffdioxidkonzentration (gemessen), der Taupunkt (berechnet) und abschließend mit der Nachhallzeit (gemessen).

Es wird mit Hilfe der Grafiken, eine qualitative Analyse der Lage in den Räumen erstellt und mögliche Zusammenhänge schlüssig erarbeitet, nach deren Ursachen.

5 Datenauswertung: Lufttemperatur und relative bzw. absolute Luftfeuchtigkeit

5.1 BRG 15 Diefenbachgasse: Vergleich der Räume 251, 253 und 255 miteinander

Aus der logischen Überlegung, dass die Pflanzen einen Kühlungseffekt hervorrufen, sollten die Grünklassen bei der Lufttemperatur kühler sein als der Referenzraum. Anders herum sollte es bei der absoluten Luftfeuchtigkeit der Fall sein, hier sollte sie in den Räumen 255 und 251 höher liegen als im Raum 253, aufgrund der Bewässerung. In **Abb. 5.1** ist die Vermutung, dass die begrünten Klassen kühler sind, bestätigt. Besonders ab den Osterferien lässt sich die Überlegenheit der Innenwandbegrünungssysteme zeigen. Dies ist gerade im Klassenzimmer 255 imposant wegen der Exposition der Fenster beziehungsweise der Fassade nach Südwest. Eigentlich müsste dieser Raum deswegen eine wärmere Tendenz zeigen. Zu Beginn der Aufzeichnungen der Messdaten ist die Temperatur vom Raum 251 oberhalb vom Referenzraum. Es könnte daran liegen, dass die Pflanzen erst einmal eine Akklimatisierungsphase benötigen bevor diese ihr eigentliches Verhalten entfalten. Andererseits ist eine Begründung in der Geruchsbildung beim Vliessystem zu findendennach könnte öfter gelüftet werden. Werden nun die Durchschnittswerte betrachtet, so liegen diese relative hoch. Üblicherweise sollten die Temperaturen um die 23-25°C liegen. **Abb. 5.3** stellt mit den schmalen Interquartilbereichen eine geringe Streuung der zentralen Messwerte dar. Die Ausreißer zum Minimum sind auf das Lüften während der Winterzeit zurückzuführen. Werden nun die absolute Luftfeuchtigkeit hinzugezogen (s. **Abb. 5.8** und **5.9**) so ist die zu erwartend hohe Verdunstung in den begrünten Klassen speziell zur Sommerzeit erkennbar. Wie prognostiziert liegen, wenn auch nur knapp, die Klassen 255 und 251 im Mittel über dem Referenzraum. Das Klassenzimmer mit dem Vliessystem hat auch hier deutlich Schwierigkeiten, wie bereits bei der Lufttemperatur erkannt, in der Anfangsphase in den Wochen 48 bis 11 im Folgejahr. Generell ist die Luftfeuchtigkeit ähnlich, insbesondere ist dies bei den Minima von circa $2,0\text{g/m}^3$ (vgl. **Abb. 5.9**) ersichtlich.

Die hygrothermische Behaglichkeit, also die Verknüpfung der Lufttemperatur mit der absoluten Luftfeuchtigkeit, sind in den **Abb. 5.11** ff. dargestellt und nochmal tabellarisch in **Tab. 5.1**, mit deren prozentualen Abweichungen erfasst, wobei immer der Referenzraum als Basis dient auf den Bezug genommen wird. Raum 253 stellt die Ausgangslage dar. Die Clusterwolke bewegt sich zur kalten Jahreszeit unterhalb der behaglichen Zone und steigt verständlicherweise mit Zunahme der Lufttemperatur und der Luftfeuchte im Sommer. Hierbei liegt der Schwerpunkt deutlich im unbehaglichen Bereich. Eine Verbesserung zeigt sich bei der begrünten Klasse mit dem Vliessystem (s. **Abb. 5.11**). Da bereits festgestellt wurde, dass die Luftfeuchte in den Klassen ähnlich ist und nur geringe Abweichungen vorliegen, wird die Temperatur der dominante Faktor bei der Hygrothermik sein, der für eine bessere Behaglichkeit sorgt. So lässt sich auch die Verlagerung der Streuwolke in **Abb. 5.12** erklären. Da das Klassenzimmer im Sommer deutlich kühler ist, wandern die Wertepaare nach links Richtung der „noch behaglichen“ Zone. Dem zufolge ändert sich auch das Kuchendiagramm. Aus **Tab. 5.1** geht hervor, dass in diesem Bereich der Punkt um 28% zugenommen haben. Im behaglichen Bereich hat sich hingegen nichts getan. Am besten schneidet das Trogsystem ab. Gegenüber dem Referenzraum haben sich die Wertepaare um 53% im „noch behaglichen“ Bereich vermehrt. Zudem ist eine siebenfache Zunahme im behaglichen Bereich registriert. Im Beobachtungszeitraum der Kalenderwoche 8 spielt sich das gleiche Verhalten ab (vgl. **Abb. A8** ff.). Die Grünklassen wandeln den Zustand positiv um. Die Wertepaare im „noch behaglichen“ Bereich legen mit circa 15% zu. Hier ist jedoch nicht wie in der vorherigen Betrachtung die Lufttemperatur verantwortlich, sondern die absolute Luftfeuchtigkeit maßgebend (s. **Abb. A2** und **A4**). Bis auf den einen oder anderen Ausreißer bei der mini-

malen Temperatur sind die Streubreiten fast identisch. Für die Kalenderwoche 23 liegen eine kaum zu unterscheidende absolute Luftfeuchtigkeit und ein wechselndes Temperaturverhalten zwischen den Klassenräumen vor (vgl. **Abb. B1** und **B3**). Da die Woche sich in einer Hitzeperiode befindet, sind die vorliegenden Kuchendiagramme nicht verwunderlich (s. **Abb. B9 ff.**). Es ist das gleiche Schema wie bereits in **Abb. 5.11 ff.** zu erkennen. Die Clusterbildung wandert von rechts nach links (Raum 253, Raum 251, Raum 255). Ausschließlich der Raum 255 erreicht mit seinem Schwerpunkt die „noch behagliche“ Zone. Von den beiden Systemen steht hier wieder der Raum 255 besser dar.

Abschließend wir noch der Surveytag unter die Lupe genommen. Im Zeit-Temperaturdiagramm **Abb. C1** lassen sich bei genauem Hinsehen die Belüftungsphasen kurz vor Beginn der Unterrichtsstunde ablesen. Allgemein verhalten sich die Klassen mit den Innenwandbegrünnungssystemen kühler als der Raum 253. Werden nun auch die absolute Luftfeuchtigkeit zur Kenntnis genommen, so gibt sich ein anderes Bild als zu erwarten. Die Grünräume liegen nicht oberhalb des Referenzraums. Auch hier lassen sich die Momente an den ein Luftzug entsteht gut beobachten. Bei der hygrothermischen Behaglichkeit lässt sich das bereits erkannte Phänomen in den **Abb. C7 ff.** aufzeigen. Die Linienwolken haben die Tendenz sich weiter nach links zu orientieren. Das Vliestaschensystem verbessert sich im Bereich des „noch behaglichen“ um 14%. Raum 255 hat eine ähnliche Verbesserung nur ist diese im behaglichen Bereich vorzufinden. Ganz offensichtlich ist die Ist-Situation in Klassenzimmer mit dem Trogsystem klar im Vorteil.

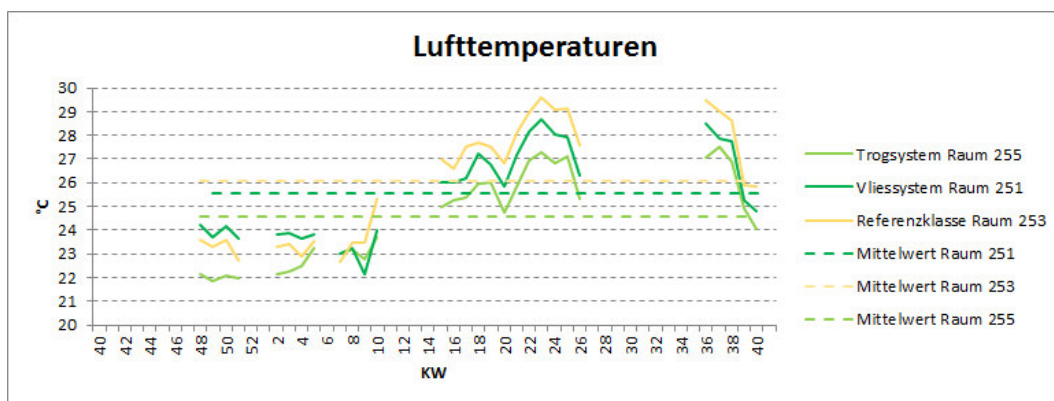


Abb. 5.1: Gemittelte Werte der Kalenderwochen 2017 und 2018 für die Lufttemperatur in den Beobachtungsklassen des BRG 15. Bei den Werten handelt es sich um jene die während des Unterrichts erfasst wurden. Lücken entsprechen schulfreie Wochen. Gut zu erkennen ist hier im Mittel der warme Referenzraum im Vergleich zu den „kühleren“ begrünten Räumen.

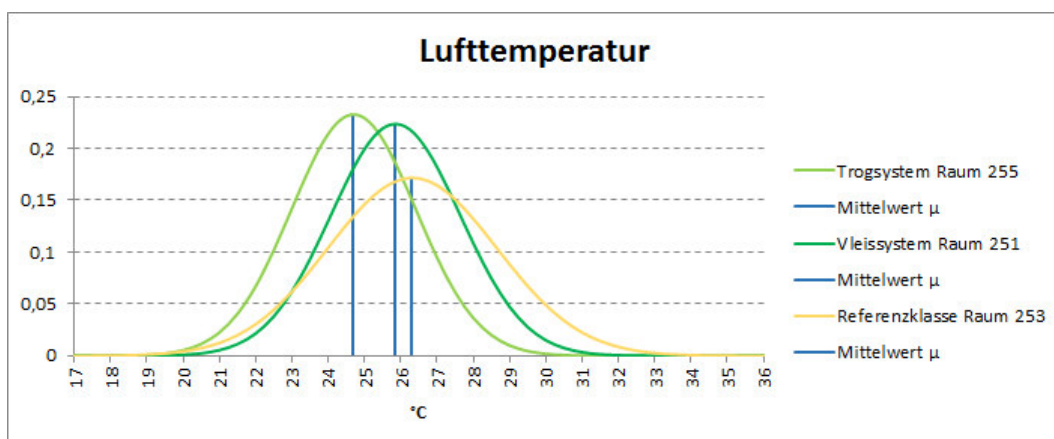


Abb. 5.2: Normalverteilung der gesamten Messwerte aus den Klassen des BRG 15 während des Unterrichts von der KW 48 2017 bis KW 40 2018 für die Lufttemperatur. Der Erwartungswert bzw. der Mittelwert der begrünten Räume sind kleiner als im Referenzraum. Die Glockenkurven der Räume 255 und 251 sind von der Höhe und Breite fast identisch. Die Streuung im Raum 253 ist größer und damit ist die Kurve flacher gegenüber den anderen Räumen.

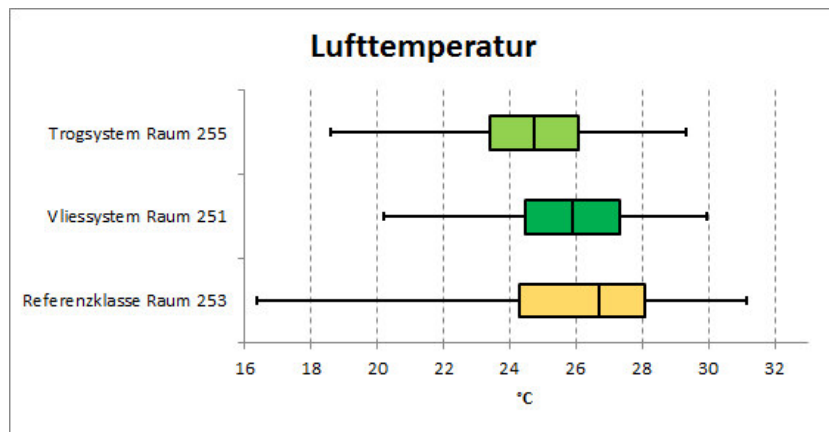


Abb. 5.3: Boxplot der Lufttemperatur der drei Klassenräume des BRG 15, wobei alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 48 2017 bis KW 40 2018 einbezogen sind. Es sind die jeweiligen Minima und Maxima, das 25%-Fraktile, der Median und das 75%-Fraktile abgebildet. Je größer der Abstand zwischen diesen Werten zum nächst größeren oder kleineren, umso größer die Streuung der Messwerte. Eine geringe Streuung der beiden begrünten Klassen im Bereich zwischen dem 25%-Fraktile und 75%-Fraktile ist zu erkennen. Dieser beinhaltet demnach ca. 50% der Messwerte.

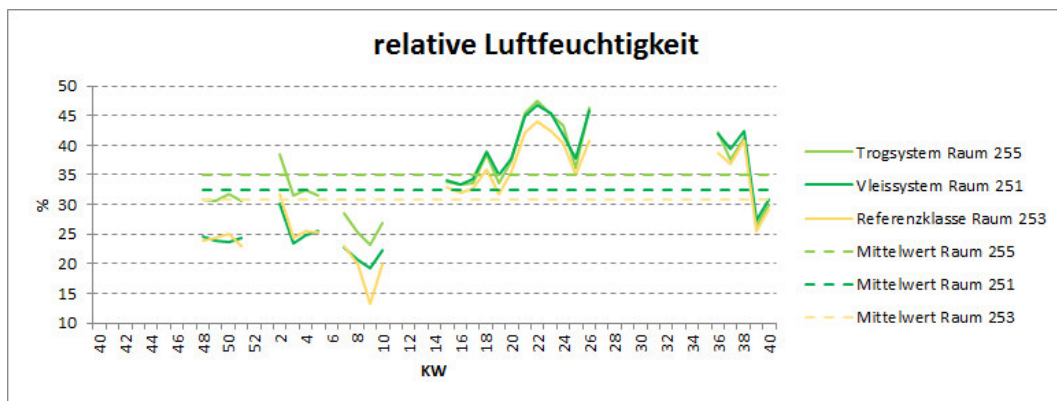


Abb. 5.4: Gemittelte Werte der Kalenderwochen 2017 und 2018 für die relative Luftfeuchtigkeit in den Beobachtungsklassen des BRG 15. Bei den Werten handelt es sich um jene die während des Unterrichts erfasst wurden. Lücken entsprechen schulfreie Wochen. Hier lässt sich gut erkennen wie die begrünten Räume erwartungsgemäß im Mittel über dem der Referenzklasse liegen.

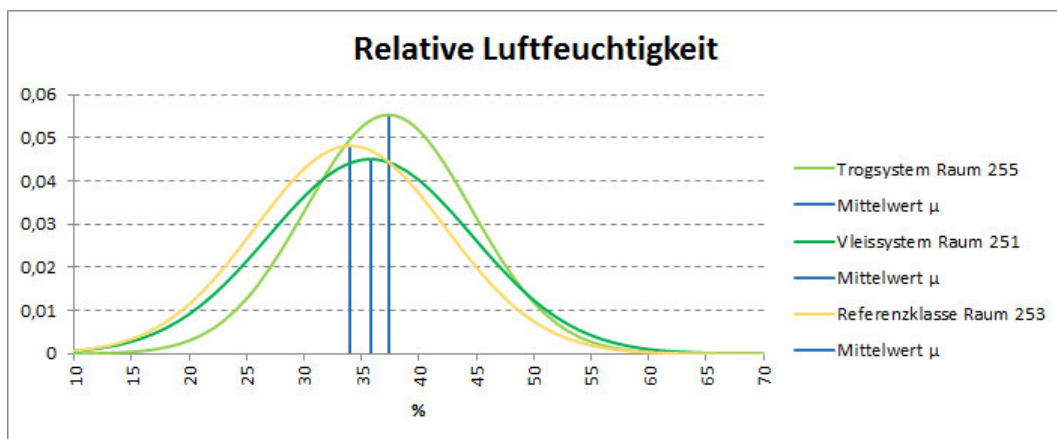


Abb. 5.6: Normalverteilung der gesamten Messwerte aus den Klassen des BRG 15 während des Unterrichts von der KW 48 2017 bis KW 40 2018 für die relative Luftfeuchtigkeit. Der Erwartungswert bzw. der Mittelwert der begrünten Räume sind größer als im Referenzraum. Die Abweichung der Erwartungswerte ist relativ gering. Die Glockenkurve vom Raum 251 ist flacher als die vom Raum 255 und deutet somit auf eine größere Streuung hin.

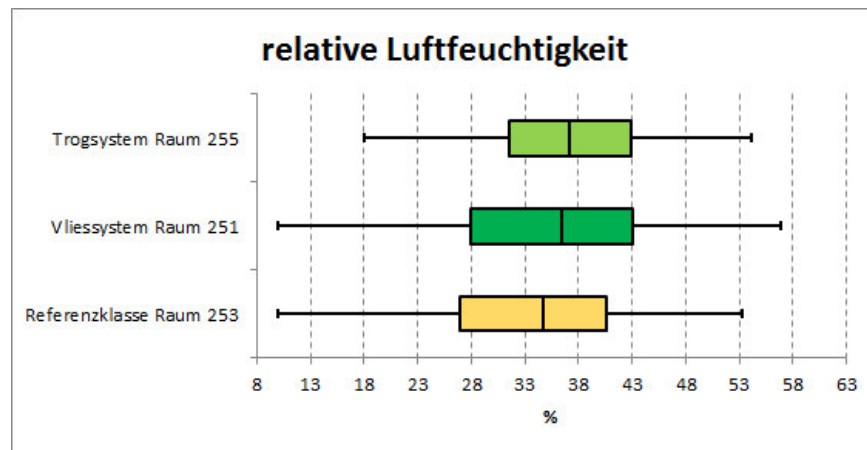


Abb. 5.7: Boxplot der relativen Luftfeuchtigkeit der drei Klassenräume des BRG 15, wobei alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 48 2017 bis KW 40 2018 einbezogen sind. Es sind die jeweiligen Minima und Maxima, das 25%-Quantil, der Median und das 75%-Quantil abgebildet. Je größer der Abstand zwischen diesen Werten zum nächst größeren oder kleineren, umso größer die Streuung der Messwerte. Raum 251 zeigt einen großen Abstand zwischen seinem Maximum und Minimum und zudem auch eine größere Streuung im Bereich zwischen dem 25%- und 75%-Quantil im Gegensatz zum Klassenraum 255.

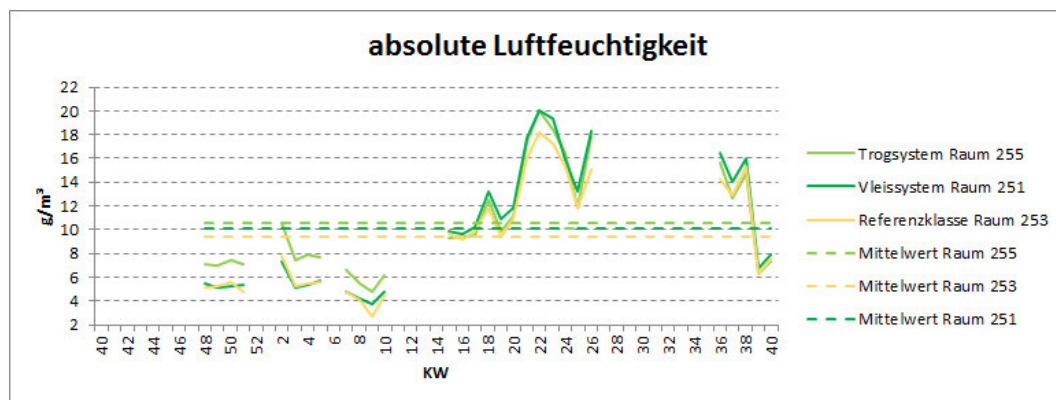


Abb. 5.8: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, der Kalenderwochen 2017 und 2018 für die absolute Luftfeuchtigkeit in den Beobachtungsklassen des BRG 15. Bei den Werten handelt es sich um jene die während des Unterrichts erfasst wurden. Lücken entsprechen schulfreie Wochen. Hier lässt sich die Überlegenheit der begrünter Beobachtungsräume gut ablesen. Deutliches Maximum lässt sich im Juni und das Minimum im Februar ablesen.

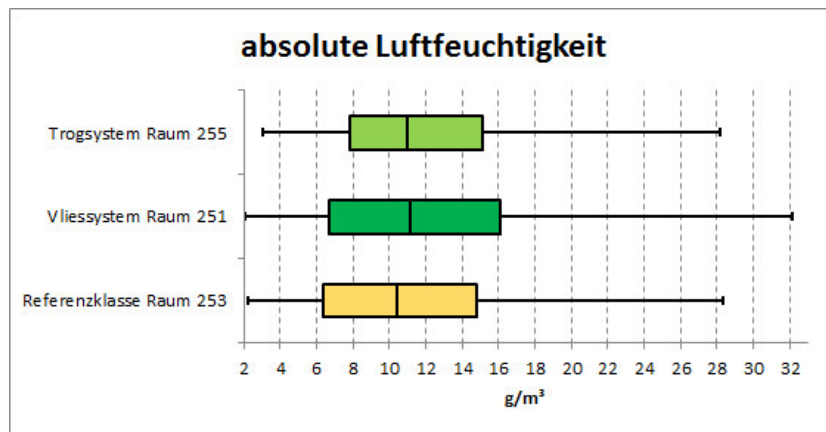


Abb. 5.9: Boxplot der absoluten Luftfeuchtigkeit der drei Klassenräume des BRG 15, wobei alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 48 2017 bis KW 40 2018 einbezogen sind. Es sind die jeweiligen Minima und Maxima, das 25%-Quantil, der Median und das 75%-Quantil abgebildet. Je größer der Abstand zwischen diesen Werten zum nächst größeren oder kleineren, umso größer die Streuung der Messwerte. Hier zeigen alle Räume im Bereich zwischen dem 3. Quartil und dem Maximum einen großen Abstand und damit eine große Streuung.

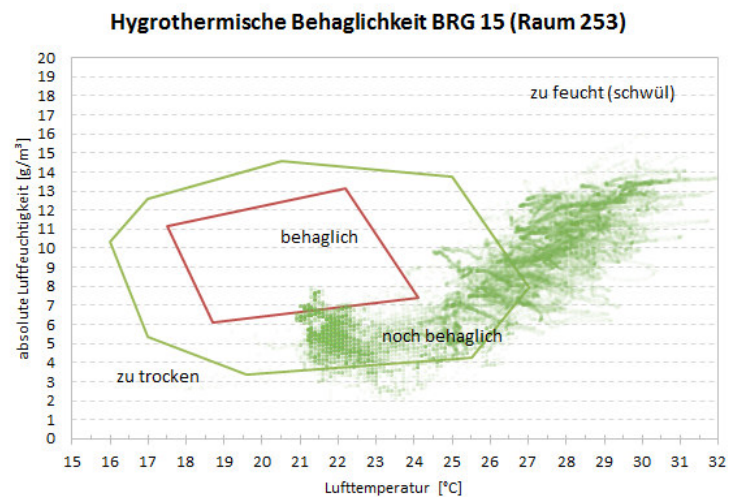


Abb. 5.10: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 48 2017 bis KW 40 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare im „noch behaglichen“ und schwülen Bereich. Während niedrige Temperaturen und eine niedrige absolute Luftfeuchtigkeit im Winter zu erwarten sind (noch behaglich), ist es im Sommer der umgekehrte Fall, welches ein subjektives Unbehagen hervorruft. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 21-31 $^{\circ}\text{C}$ und 3-14 g/m^3 .

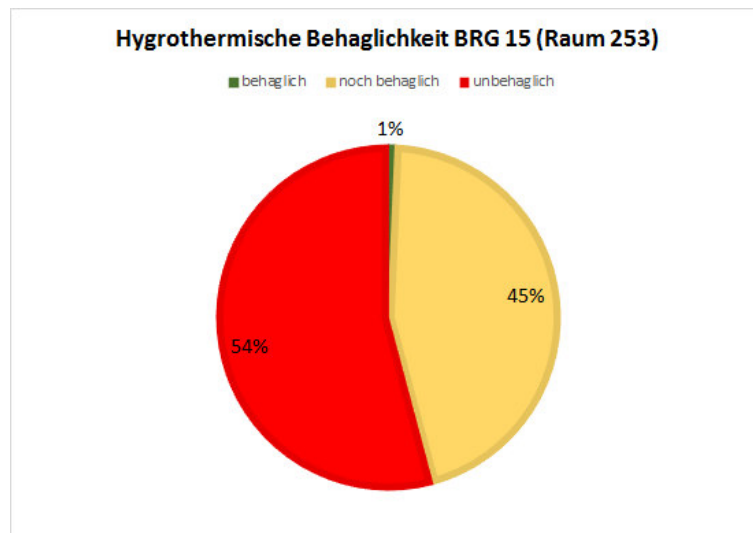


Abb. 5.11: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.5.10** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen kaum Werte im behaglichen (grün) Bereich. Mit einer leichten Mehrheit sind die Wertpaare im unbehaglichen Bereich vorzufinden.

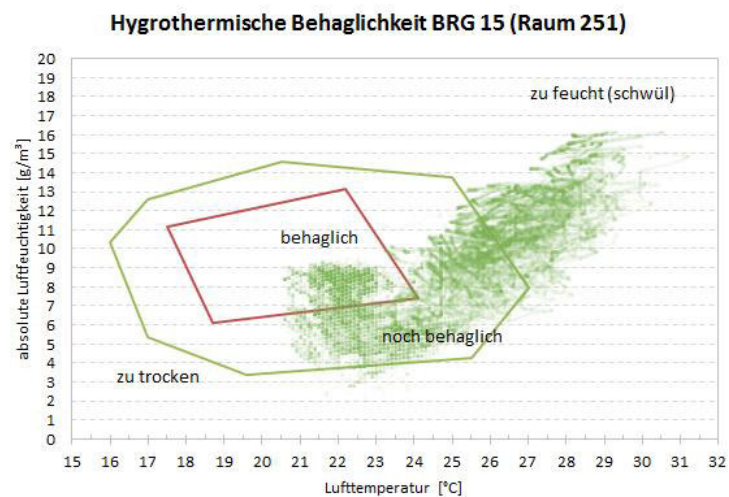


Abb. 5.12: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 48 2017 bis KW 40 2018 berücksichtigt. Die Messwerte sind überwiegend rechtslastig im grün begrenzten Bereich angesiedelt. Hauptsächlich im Bereich 21-30°C und 4-16g/m³. Im Vergleich zu **Abb. 5.10** hat sich die Messdatenwolke von rechts her verschmälert jedoch vertikal leicht ausgestreckt.

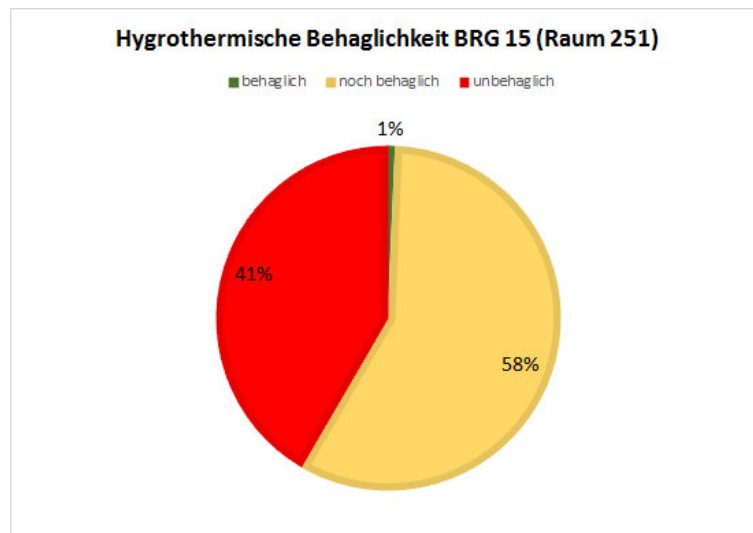


Abb. 5.13: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.5.12** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen kaum Werte im behaglichen (grün) Bereich. Im Gegensatz zum Referenzraum befinden sich etwas weniger als zwei Drittel der Wertepaare im „noch behaglichen Bereich“. Eine merkbare Verbesserung gegenüber dem Referenzraum.

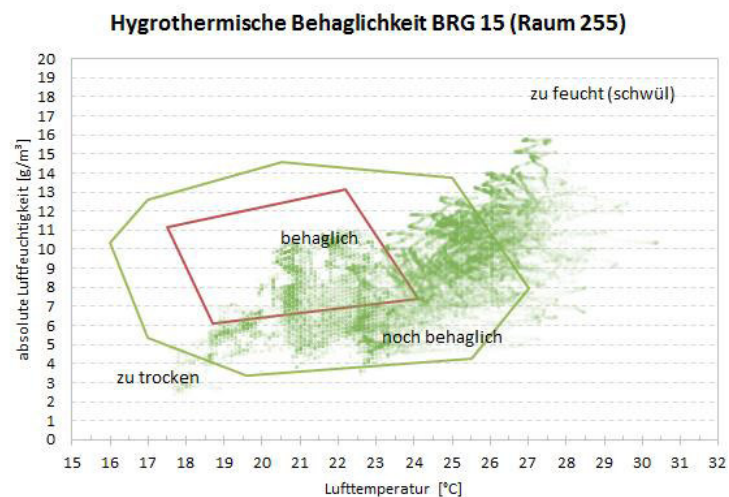


Abb. 5.14: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 48 2017 bis KW 40 2018 berücksichtigt. Die Messwerte sind überwiegend leicht rechtslastig im grün begrenzten Bereich angesiedelt. Hauptsächlich im Bereich 19-29°C und 4-15g/m³. Im Vergleich zu **Abb. 5.10** hat sich die Messdatenwolke nach rechts verschoben und ein wenig verschmälert.

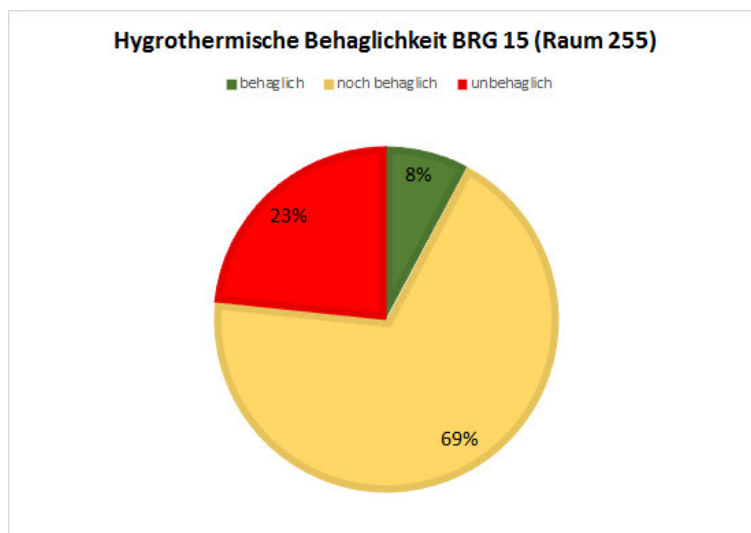


Abb. 5.15: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.5.14** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegt fast jeder zehnte Wert im behaglichen (grün) Bereich. Im Gegensatz zum Referenzraum befinden sich etwas mehr als zwei Drittel der Wertepaare im „noch behaglichen Bereich“. Eine deutliche Verbesserung im Vergleich zum Raum 253 und 251.

Tab. 5.1: Vergleich der Kuchendiagramme „hygrothermische Behaglichkeit“ der beiden Schulen, bezogen auf die jeweilige Referenzklasse. Es sind entweder Verbesserungen oder Verschlechterungen in den definierten Bereichen registriert.

| | | Hygrothermische Behaglichkeit | | | | | |
|----------|----------------|--------------------------------------|----------|----------|--------|----------|----------|
| Zeitraum | Bereich | BRG 15 | | | BRG 16 | | |
| | | 253 | 255 | 251 | N.005 | N.004 | N.016 |
| 17/18 | behaglich | 1,00 | 700,00% | 0,00% | 14,00 | 71,43% | 21,43% |
| | noch behaglich | 45,00 | 53,33% | 28,89% | 61,00 | -9,84% | -11,48% |
| | unbehaglich | 54,00 | -57,41% | -24,07% | 25,00 | -16,00% | 16,00% |
| KW 8 | behaglich | 0,00 | 100,00% | 0,00% | 0,00 | 300,00% | 300,00% |
| | noch behaglich | 86,00 | 13,95% | 15,12% | 96,00 | 1,04% | 1,04% |
| | unbehaglich | 14,00 | -85,71% | -92,86% | 4,00 | -100,00% | -100,00% |
| KW 23 | behaglich | 0,00 | 0,00% | 0,00% | 0,00 | 0,00% | 0,00% |
| | noch behaglich | 0,00 | 1900,00% | 0,00% | 3,00 | 333,33% | 100,00% |
| | unbehaglich | 100,00 | -19,00% | 0,00% | 97,00 | -10,31% | -3,09% |
| Survey | behaglich | 0,00 | 1400,00% | 0,00% | 0,00 | 800,00% | 0,00% |
| | noch behaglich | 88,00 | -2,27% | 13,64% | 100,00 | -8,00% | 0,00% |
| | unbehaglich | 12,00 | -100,00% | -100,00% | 0,00 | 0,00% | 0,00% |

5.2 BRG 16 Schuhmeierplatz: Vergleich der Räume N.004, N.005 und N.016 miteinander

Aufgrund des Standorts der Klassenräume, kann davon ausgegangen werden, dass die Lufttemperaturen im Mittel niedriger liegen werden. Damit einhergehend werden niedrigere Konzentrationen bei der absoluten Luftfeuchtigkeit erwartet, da die Verdunstungsrate eine andere ist als im Diefenbachgymnasium. Ein Blick auf die **Abb. 5.16** und **5.22** belegt die Neigung zu niedrigeren Mittelwerten. Die Lufttemperaturen liegen im Durchschnitt zwischen 24°C und 25°C. Bis auf das Klassenzimmer mit dem Vliessystem sind die Räume kühler als der Referenzraum. Das Verhalten aus dem Raum N.016 beruht wahrscheinlich auf die schon im BRG 15 vermutete Geruchsentwicklung und damit verbundene intensive Belüftung des Raums. Damit sind die Temperaturen in den kalten Wochen niedriger und im Sommer passiert genau das Gegenteil (vgl. **Abb. 5.16**). Maxima treten in den Wochen 22 bis 26 und Minima in der Woche 44 auf. In **Abb. 5.22** ist klar zu erkennen, dass die absolute Luftfeuchtigkeit in den begrünten Klassen gleich groß ist und

zudem im Mittel über der von Raum N.005 liegen. Die Minima sind in der Woche 9 vorzufinden und die Maxima treten in Woche 23 und 36 auf.

Bei der Betrachtung der hygrothermischen Behaglichkeit in den **Abb. 5.24** ff. finden sich die kühleren Temperaturen und niedrigeren Konzentrationen der Luftfeuchte wieder. Der Raum N.005 ist die Ausgangslage und hat vernünftige Messwert vorzulegen (s. **Abb. 5.25**). Hauptsächlich sind die Wertpaare im rechten Bereich der „noch behaglichen“ Zone angesiedelt. Der genaue Anteil lässt sich in **Abb. 5.25** entnehmen. Im Klassenzimmer mit dem Vliesystem ist der Schwerpunkt der Clusterbildung im unteren rechten Eck des behaglichen Bereiches und diagonal hoch in den Schwülen. Mit Hilfe der **Tab. 5.1** und **Abb. 5.27** zeigt sich zwar eine Zunahme von 21% in der behaglichen Zone, dafür aber auch eine im unbehaglichen von 16%. Ein anderes Bild zeigt sich im Raum N.004 mit dem Trogsystem. Der behagliche Bereich nimmt mit 71% zu und gleichzeitig ist eine Abnahme im unbehaglichen Bereich von 16% zu erkennen. Damit herrscht im Klassenzimmer N.004 eine bessere Ist-Situation im Schuljahr 2017/2018. In Kalenderwoche 8 (s. **Abb. A14** und **A16**) sind die Verläufe der Temperaturen und absoluten Luftfeuchtigkeit so wie es von den Ergebnissen mit einer anwesenden Begrünung gewünscht wird. Die Klassen mit der Wandbegrünung sind deutlich kühler, wobei die Temperaturen im Bereich zwischen 23°C und 25°C verlaufen. Bei der Luftfeuchte hat der Referenzraum durchgehend die kleinste Konzentration mit einem konstanten Verlauf. Wegen der niedrigen Temperaturen und der größeren Konzentration bei der Luftfeuchtigkeit kommen die Streudiagramme der Grünräume wie in **Abb. A22** ff. zustande. Die Wolken konzentrieren sich im unteren rechten Eck der behaglichen Zone. Im Referenzraum ist es das untere rechte Eck des „noch behaglichen“ Bereichs. In diesem Beobachtungszeitraum stehen die begrünten Klassen gleich gut da und haben sich beide in Bezug auf den Referenzklasserraum ein wenig in den Bereichen behaglich und „noch behaglich“ verbessert. In der im Sommer gelegenen Kalenderwoche 23 ist in den Streudiagrammen die Temperatur der ausschlaggebende Faktor. Die Innenbegrünung verbessert das Raumklima im Vergleich zum Raum N.005 (vgl. **Abb. B23** ff.). Raum N.004 hat im Bereich „noch behaglich“ mit circa 333% den Anteil mehr als verdreifacht und Raum N.016 aufgrund der erhöhten Lufttemperaturen (s. **Abb. B15**) bloß verdoppelt. Am Surveytag haben die Lufttemperatur und die absolute Luftfeuchtigkeit (s. **Abb. C15** und **C17**) den gleichen Anteil an Einfluss bei der Lage und Form der Clustbildung (vgl. **Abb. C12** ff.). Die Streuwolken nehmen großenteils eine diagonale Linienform an und sind im mittleren rechten Bereich der „noch behaglichen“ Zone zu finden. An diesem Tag in dieser Beobachtungsperiode kann nur das Trogsystem in Raum N.004 sich durch den einen zusätzlichen Anteil im behaglichen Bereich verbessern. Raum N.016 ist gleich auf mit dem Referenzraum. Hier befinden sich alle Wertpaare im „noch behaglichen“ Bereich. An dieser Stelle landet das Trogsystem wieder vor dem Vliestaschensystem.

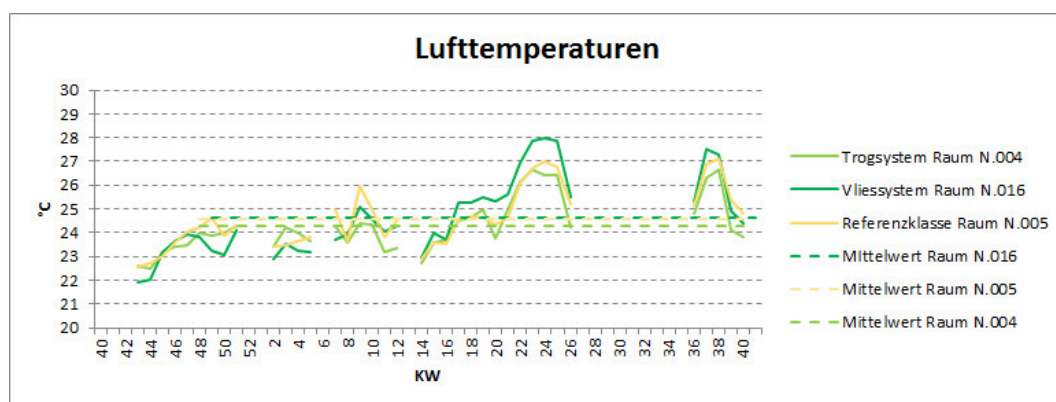


Abb. 5.16: Gemittelte Werte der Kalenderwochen 2017 und 2018 für die Lufttemperatur in den Beobachtungsklassen des BRG 16. Bei den Werten handelt es sich um jene die während des Unterrichts erfasst wurden. Lücken entsprechen schulfreie Wochen. Hier liegen die Mittelwerte der Räume N.016 und N.005 fast gleichauf. Die hohe Temperatur im begrünten Raum ist auf das intensive Lüften wegen der vom Vlies ausgehende Geruchsbildung zurückzuführen.

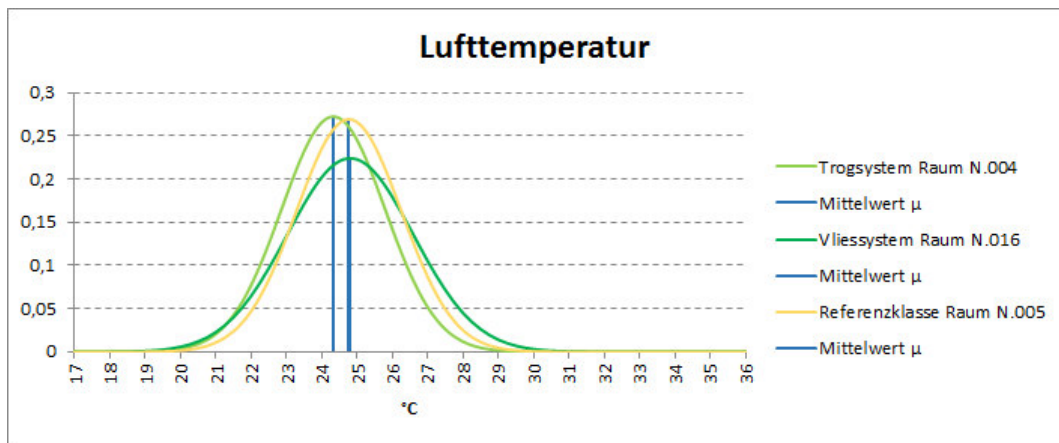


Abb. 5.17: Normalverteilung der gesamten Messwerte aus den Klassen des BRG 16 während des Unterrichts von der KW 42 2017 bis KW 40 2018 für die Lufttemperatur. Die Erwartungswerte sind nahezu identisch. Die Glockenkurve vom Trogsystem ist gleich hoch wie der Referenzraum. Nur im Raum N.016 ist der Kurvenverlauf flacher und damit verbunden eine etwas größere Streuung der Messwerte.

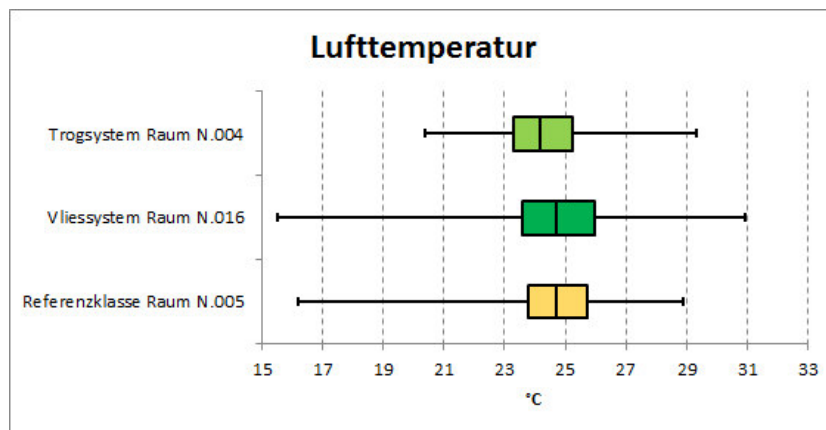


Abb. 5.18: Boxplot der Lufttemperatur der drei Klassenräume des BRG 16, wobei alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 42 2017 bis KW 40 2018 einbezogen sind. Es sind die jeweiligen Minima und Maxima, das 1. Quartil, der Median und das 3. Quartil abgebildet. Je größer der Abstand zwischen diesen Werten zum nächst größeren oder kleineren, umso größer die Streuung der Messwerte. Die Bereiche zwischen dem 1. und 3. Quartil sind in allen Beobachtungsklassen nah beieinander, somit ist die Streuung für diese ca. 50% der Messwerte wirklich gering. Dafür ist die Streuung zu den Extrema hin umso größer für das Vliessystem und Referenzraum.

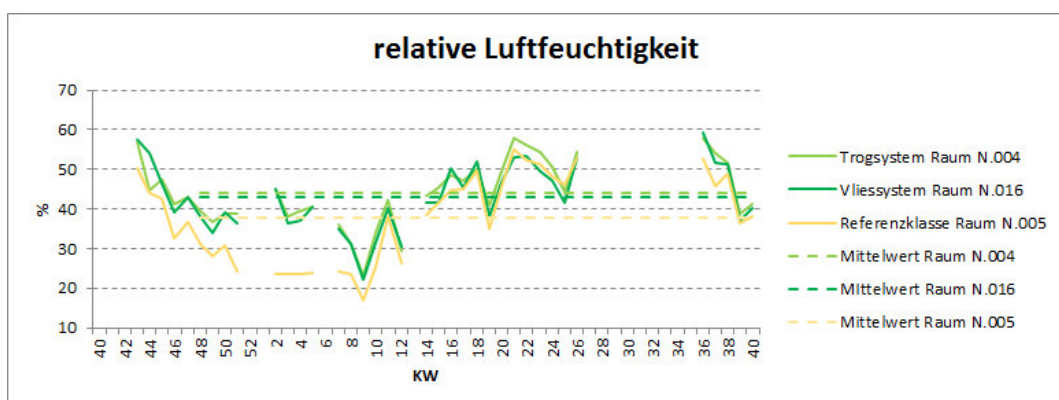


Abb. 5.19: Gemittelte Werte der Kalenderwochen 2017 und 2018 für die relative Luftfeuchtigkeit in den Beobachtungsklassen des BRG 16. Bei den Werten handelt es sich um jene die während des Unterrichts erfasst wurden. Lücken entsprechen schulfreie Wochen. Erwartungsgemäß liegen die Werte in den begrüneten Klassen signifikant über denen vom Referenzraum.

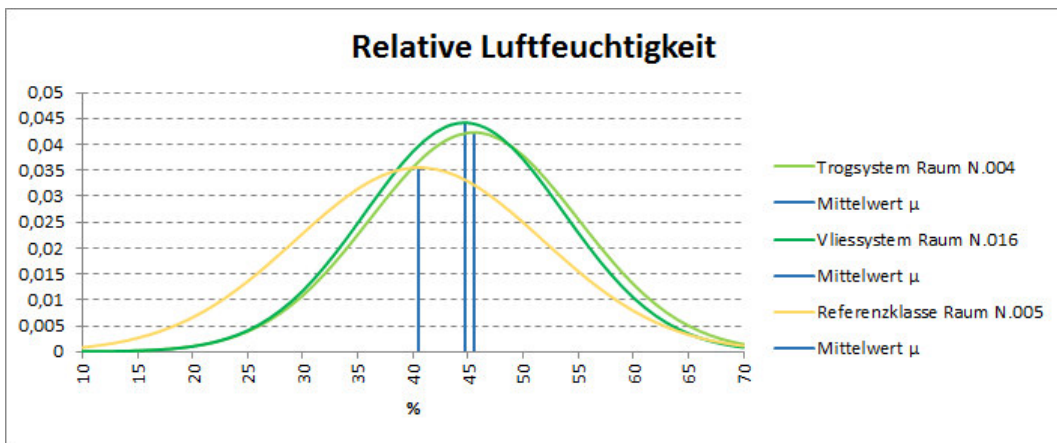


Abb. 5.20: Normalverteilung der gesamten Messwerte aus den Klassen des BRG 16 während des Unterrichts von der KW 42 2017 bis KW 40 2018 für die relative Luftfeuchtigkeit. Die Mittelwerte vom Vlies- und Trogsystem liegen eng beieinander und weisen eine fast identische Glockenkurve auf. Die Streuung im Referenzraum ist größer, entsprechen flach ist der Kurvenverlauf.

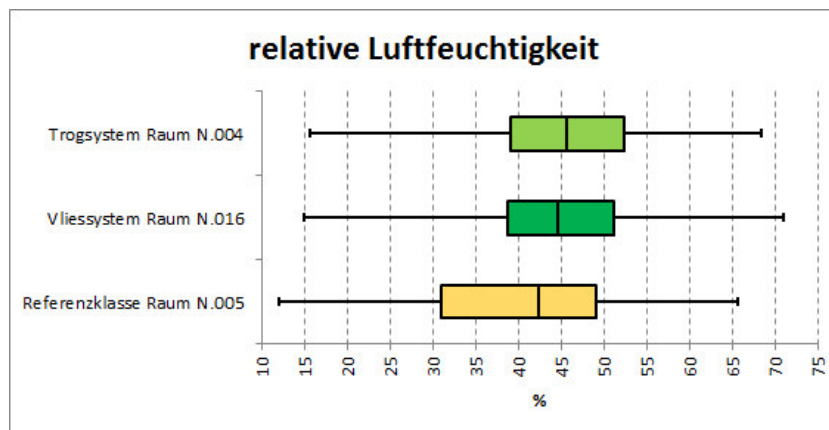


Abb. 5.21: Boxplot der relativen Luftfeuchtigkeit der drei Klassenräume des BRG 16 Schuhmeierplatz, wobei alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 48 2017 bis KW 40 2018 einbezogen sind. Es sind die jeweiligen Minima und Maxima, das 25%-Quantil, der Median und das 75%-Quantil abgebildet. Je größer der Abstand zwischen diesen Werten zum nächst größeren oder kleineren, umso größer die Streuung der Messwerte. Die Streuung sind nahezu identisch in den Klassen mit den Grünwandelementen, sowohl im Kernbereich als auch bei den Abständen zu den Extrema.

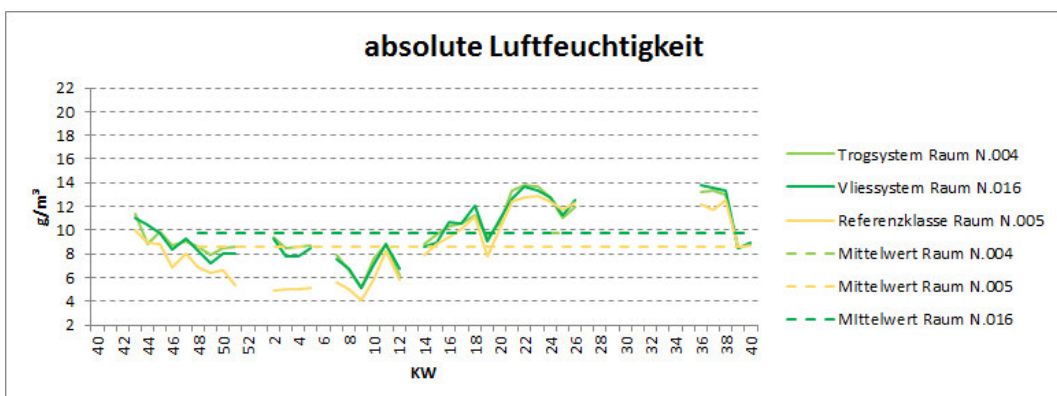


Abb. 5.22: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, der Kalenderwochen 2017 und 2018 für die absolute Luftfeuchtigkeit in den Beobachtungsklassen des BRG 16. Bei den Werten handelt es sich um jene die während des Unterrichts erfasst wurden. Lücken entsprechen schulfreie Wochen. Wie vorherzusehen liegen die Klassen mit den Grünwandelementen deutlich über dem Referenzraum. Maxima sind im Juni zu erwarten und so auch ablesbar.

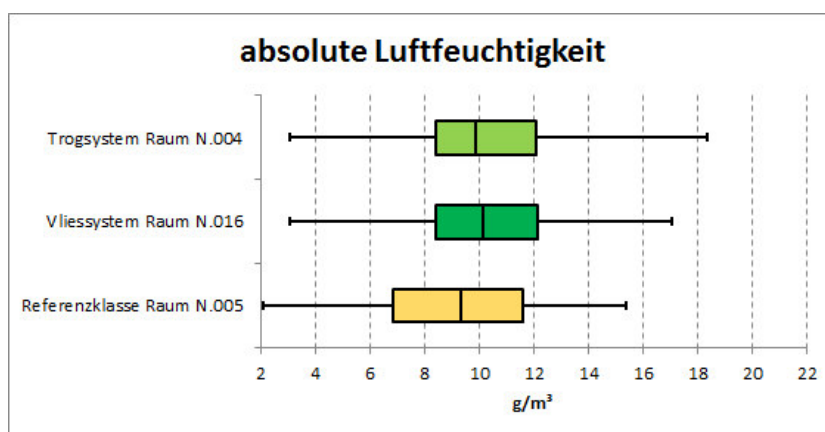


Abb. 5.23: Boxplot der absoluten Luftfeuchtigkeit der drei Klassenräume des BRG 16, wobei alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 42 2017 bis KW 40 2018 einbezogen sind. Es sind die jeweiligen Minima und Maxima, das 25%-Quantil, der Median und das 75%-Quantil abgebildet. Je größer der Abstand zwischen diesen Werten zum nächst größeren oder kleineren, umso größer die Streuung der Messwerte. Im Vergleich unterscheiden sich die Räume mit der Wandbegrünung wenig.

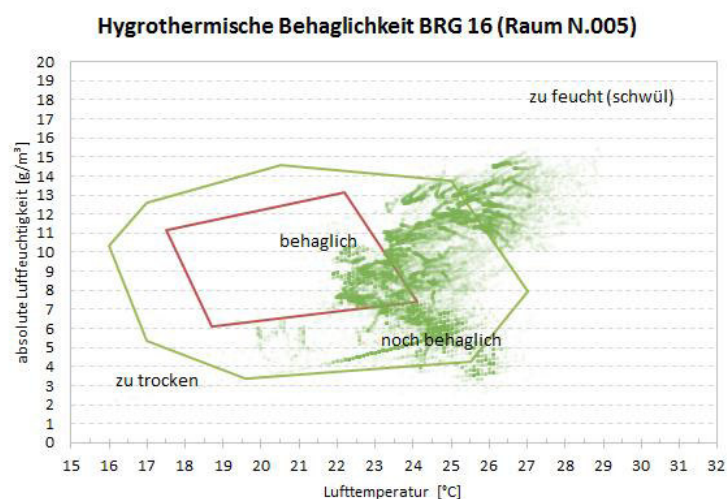


Abb. 5.24: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 42 2017 bis KW 40 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare rechtslastig im „noch behaglichen“ und ein wenig im schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 22-28°C und 3-15g/m³.

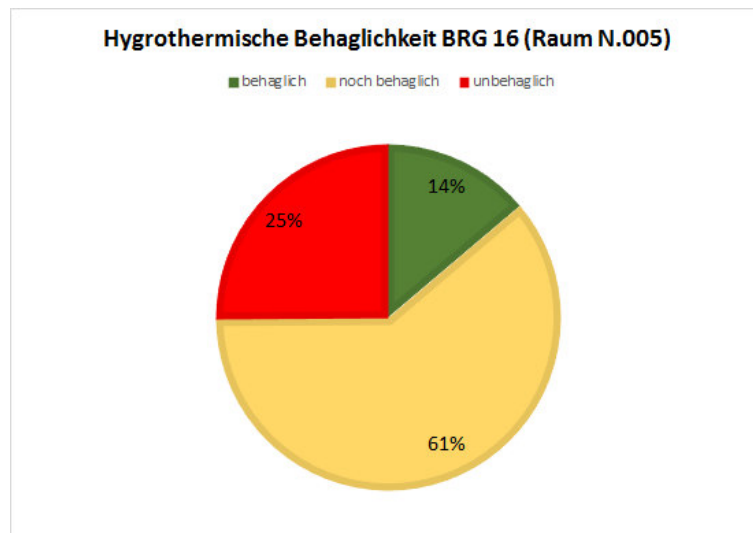


Abb. 5.25: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.5.24** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein Achtel der Werte im behaglichen (grün) Bereich. Etwas weniger als zweidrittel der Wertpaare sind im „noch behaglichen“ Bereich vorzufinden. Gegenüber dem Referenzraum von BRG 15 eine bessere Ausgangslage.

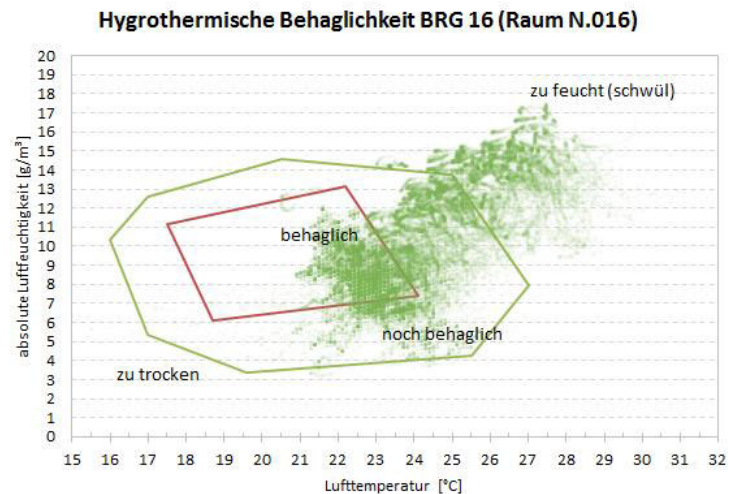


Abb. 5.26: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 42 2017 bis KW 40 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare rechtslastig im „noch behaglichen“ und ein wenig im schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 21-29°C und 4-17g/m³.

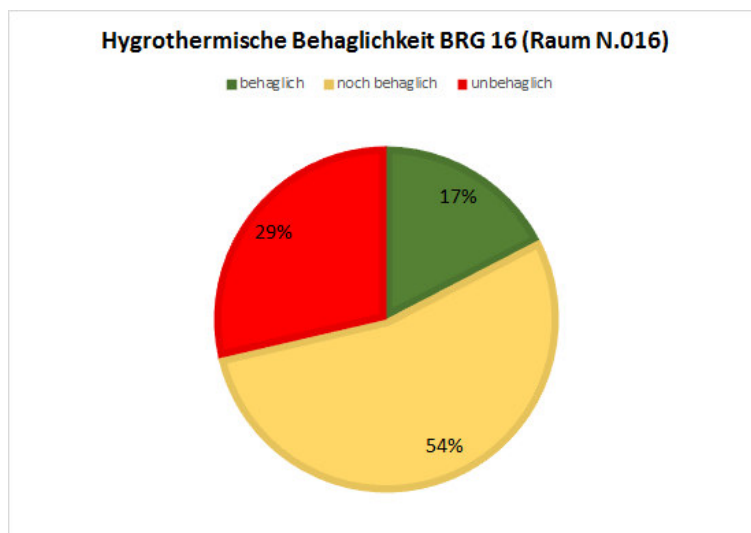


Abb. 5.27: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.5.26** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein Fünftel der Werte im behaglichen (grün) Bereich. Etwas mehr als die Hälfte der Wertpaare sind im „noch behaglichen“ Bereich vorzufinden. Es hat sich eine leichte Verbesserung mit einer gleichzeitigen Verschlechterung durch die Begrünung im Vergleich zum Referenzraum ergeben.

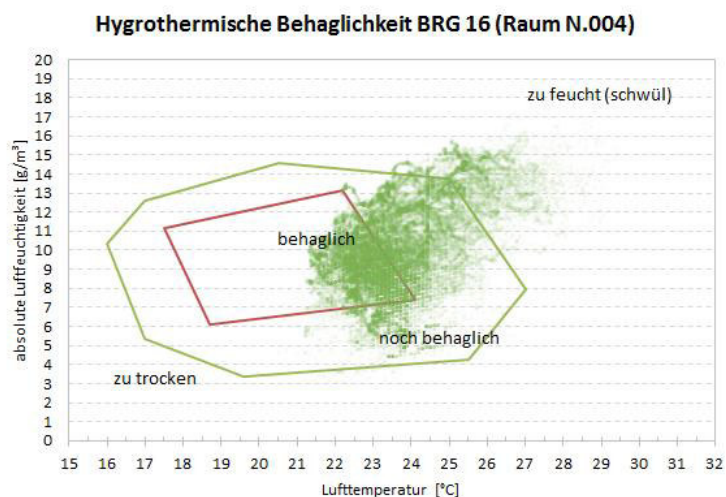


Abb. 5.28: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum von KW 42 2017 bis KW 40 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare konzentriert im „noch behaglichen“ und ein wenig im schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 21-27°C und 5-15g/m³.

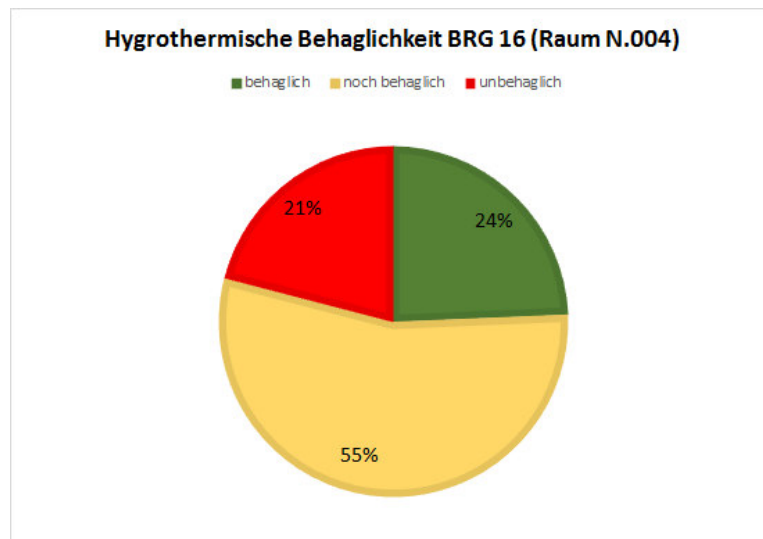


Abb. 5.29: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.5.28** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein Viertel der Werte im behaglichen (grün) Bereich. Etwas mehr als die Hälfte der Wertpaare sind im „noch behaglichen“ Bereich vorzufinden. Es hat sich eine Verbesserung im Vergleich zum Referenzraum ergeben.

5.3 Vergleich BRG 15 mit BRG 16

In diesem Abschnitt werden die jeweiligen Klassenzimmer mit dem gleichen Innenwandbegrü- nungssystem beider Schulen gegenübergestellt. Ersichtlich werden soll die Beeinflussung der mechanischen Belüftung im Diefenbachgymnasium.

In den **Abb. 5.30, 5.38** und **5.46** zeigt sich der mögliche Unterschied, der durch die Belü- tungsart in den Schulen zustande kommt. In allen Diagrammen ist das gleiche Verhalten der Schulklassen des BRG 15 festgehalten. Dabei spielt die Jahreszeit einen wesentlichen Faktor. Im Winter sind die Räume des Diefenbachgymnasiums kälter und im Sommer ist genau das Gegen- teil der Fall. Eine Erklärung dafür wäre, dass die Belüftungsanlage die Zuluft nicht entsprechend auf die Raumlufttemperatur erwärmt. Die Lufttemperaturdifferenzen sind dennoch im Vergleich marginal. In den warmen Sommerwochen tritt die umgekehrte Situation ein. Hier wird die Zuluft nicht gekühlt und entsprechend kann es dazu führen, dass die gemessenen Temperaturen wär- mer sind als am Schuhmeierplatz. Wird nun der Fokus nun auf die absolute Luftfeuchtigkeit (s. **Abb. 5.36, 5.44** und **5.52**)gerichtet, so wird ein ähnliches Muster registriert. Die Luft ist außen in den Winterwochen trocken und kalt. Somit hat die Luft eine niedrige relative Luftfeuchte, wenn diese von der Belüftungsanlage angesogen wird. Beim Zuführen in die Räume hat sich die Temperatur schlagartig nach oben verändert und die relative Luftfeuchte hat in diesem Vorgang abgenommen. Die absolute Luftfeuchtigkeit ist dabei gleich geblieben. Nun erfolgt ein Konzentrationsausgleich im Raum, welches wiederum zu einer Abnahme der relativen als auch absolu- ten Luftfeuchtigkeit im gesamten Raumvolumen führt. Dieses Phänomen lässt sich aus den Dia- grammen auch im Sommer entnehmen. Warme, feuchte Luft wird im Wärmetauscher durch die gegenströmende Abluft abgekühlt. In diesem Fall ist die absolute Luftfeuchtigkeit konstant ge- blieben und die relative Luftfeuchtigkeit nimmt zu. Der Konzentrationsausgleich lässt die im Raum gemessene relative sowie absolute Luftfeuchtigkeit steigen. Allgemein sind die gemesse- nen Werte für die relative Luftfeuchtigkeit im BRG 15 unterhalb deren des BRG 16 (vgl. **Abb. 5.33, 5.41** und **5.49**). Bei der Betrachtung der relativen Luftfeuchtigkeit liegen die Räume 255 und 251 im Schnitt bei 36% und die Klassen N.004 und N.016 bei 45% (s. **Abb. 5.42** und **5.50**). Die Mittelwerte der Klassenzimmer mit dem Trogsystem liegen in etwa +1% über den Durch- schnittswerten der Räume 251 und N.016.

5.3.1 Vergleich Raum 253 mit Raum N.005

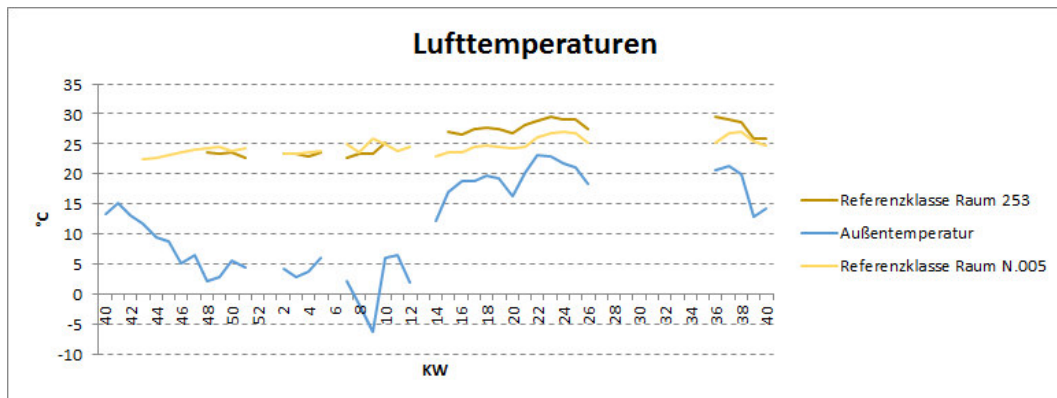


Abb. 5.30: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.1** und **5.16**). Der Referenzraum 253 des BRG 15 zeigt eine größere Streuung durch die Schwankungen zwischen den Winter- und Sommerwochen auf. Der Raum N.005 des BRG 16 bleibt verhältnismäßig konstant. Beide Räume sind im Vergleich zur Außentemperatur verhältnismäßig konstant über die Jahreszeiten.

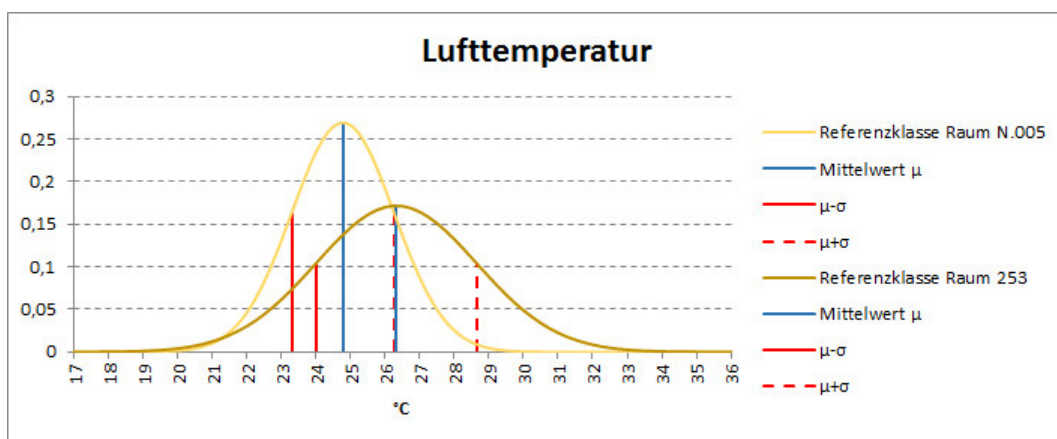


Abb. 5.31: Normalverteilung der gesamten Messwerte (vgl. **Abb. 5.2** und **5.17**) für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Die Kurven spiegeln die bereits erkannte Situation aus **Abb. 5.30** wieder. Der Raum N.005 hat einen niedrigeren Mittelwert und eine kleinere Streuung der Messwerte, durch die schlanke und spitzverlaufende Kurve.

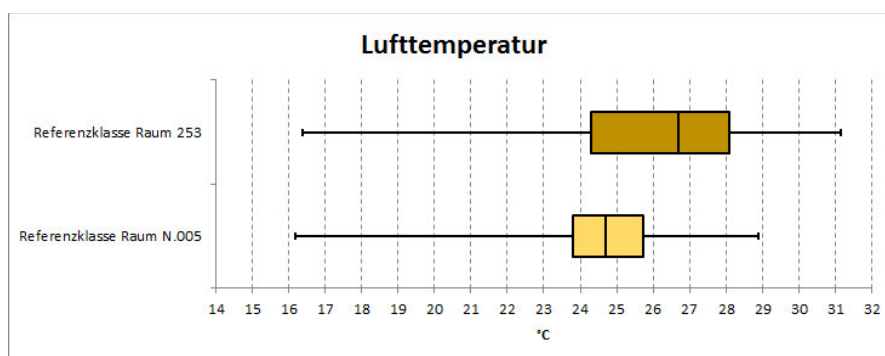


Abb. 5.32: Boxplot der gesamten Messwerte für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.30** und **5.31** gut erkennen. Während ca. 50% der Werte vom Raum N.005 im Bereich 24-25°C befinden, sind es 24-28°C im Raum 253. Beide weisen das nahezu gleiche Minimum auf.

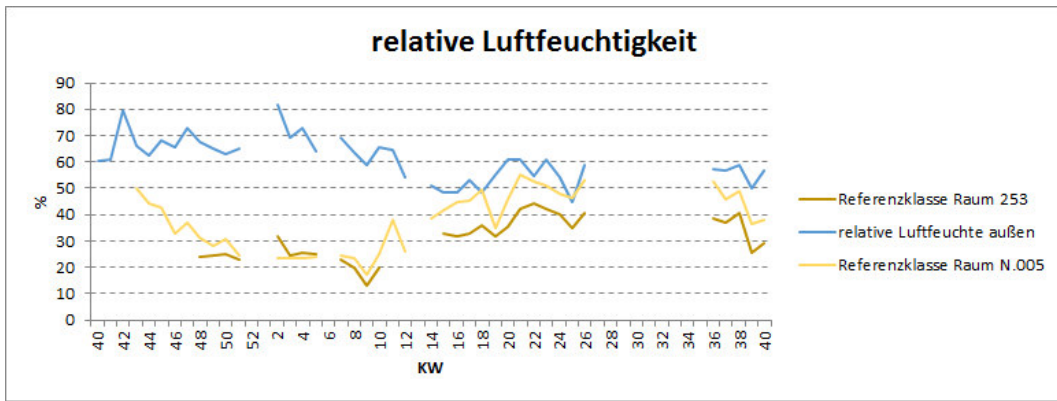


Abb. 5.33: Gemittelte Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.4** und **5.19**). Beide Räume liegen unter den Werten von außen. Raum 253 liegt im Schnitt unterhalb von Raum N.005, haben jedoch beiden in den Winterwochen einen kleinen Einbruch.

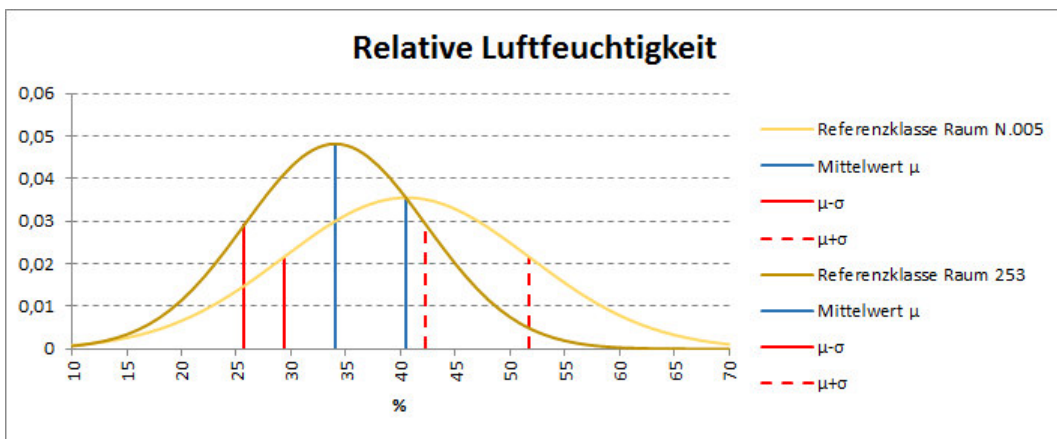


Abb. 5.34: Normalverteilung der gesamten Messwerte (vgl. **Abb. 5.5** und **5.20**) für die relative Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Die Kurven spiegeln die bereits erkannte Situation aus **Abb. 5.33** wieder. Raum N.005 hat einen höheren Erwartungswert und eine größere Streuung, entsprechend flach verläuft die Glockenkurve.

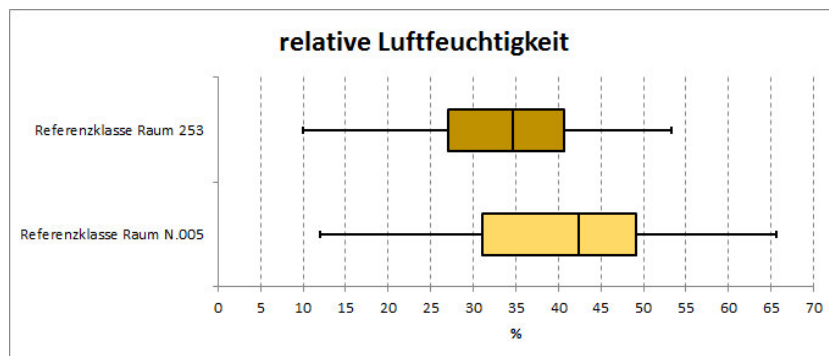


Abb. 5.35: Boxplot der gesamten Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.33** und **5.34** gut erkennen.

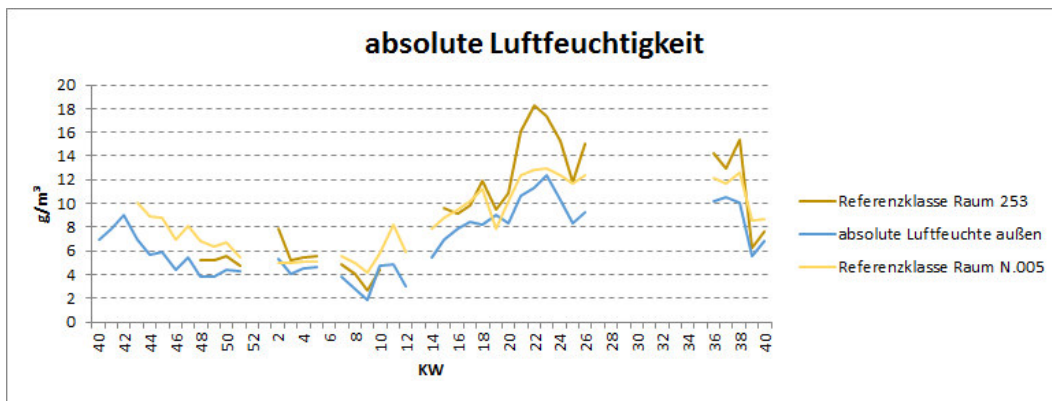


Abb. 5.36: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.8** und **5.22**). Der Verlauf von Raum 253 ähnelt dem der Lufttemperatur (vgl. **Abb. 5.30**), im Winter unterhalb und im Sommer oberhalb von Raum N.005. Allgemein wird der Raum des BRG 15 eine größere Streuung aufweisen. Die Werte liegen über denen der der Luftfeuchte von außen.

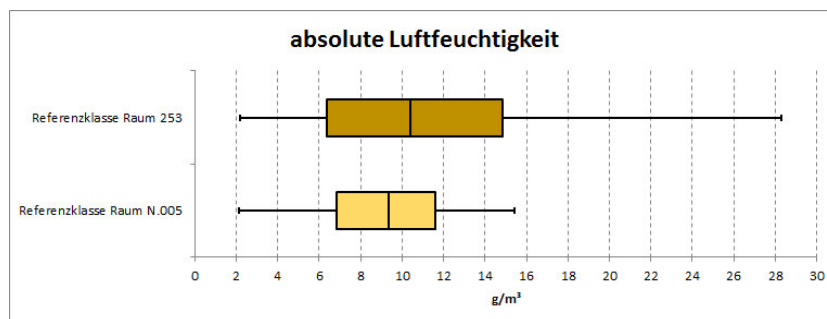


Abb. 5.37: Boxplot der gesamten Messwerte für die absolute Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.36** gut erkennen, nämlich die größere Streuung im Raum 253.

5.3.2 Vergleich 251 mit N.016

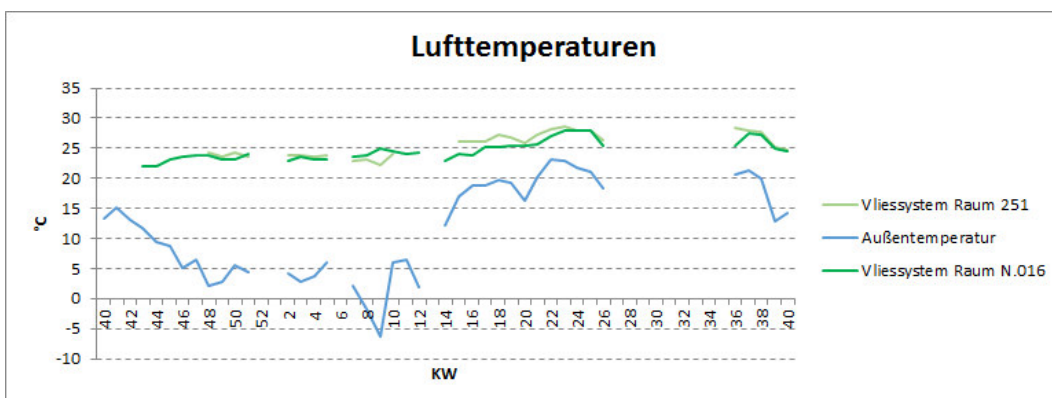


Abb. 5.38: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.1** und **5.16**). Der Referenzraum 251 des BRG 15 und der Raum N.016 des BRG 16 zeigen eine ähnliche Streuung und Verlauf über den Messzeitraum auf. Beide Räume sind im Vergleich zur Außentemperatur verhältnismäßig konstant über die Jahreszeiten.

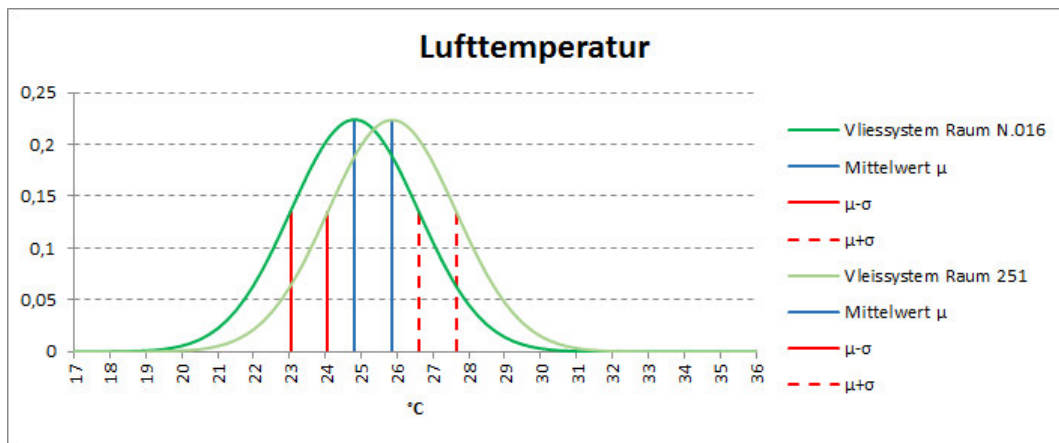


Abb. 5.39: Normalverteilung der gesamten Messwerte (vgl. **Abb. 5.2** und **5.17**) für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Die Kurven spiegeln die bereits erkannte Situation aus **Abb. 5.38** wieder. Der Raum N.016 hat einen niedrigeren Mittelwert und eine nahezu identische Streuung der Messwerte, durch die gleiche Kurvenhöhe gut zu erkennen.

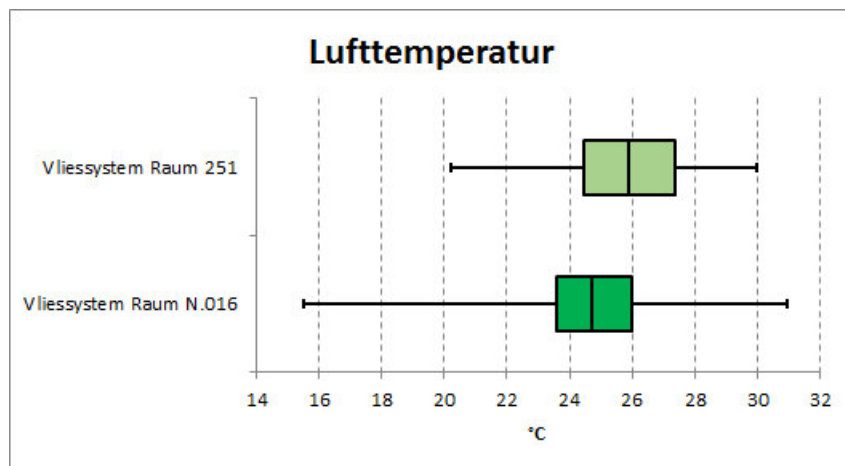


Abb. 5.40: Boxplot der gesamten Messwerte für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.39** und **5.38** gut erkennen. Während ca. 50% der Werte vom Raum N.016 im Bereich 23,5-26°C befinden, sind es 24,5-27,5°C im Raum 251.

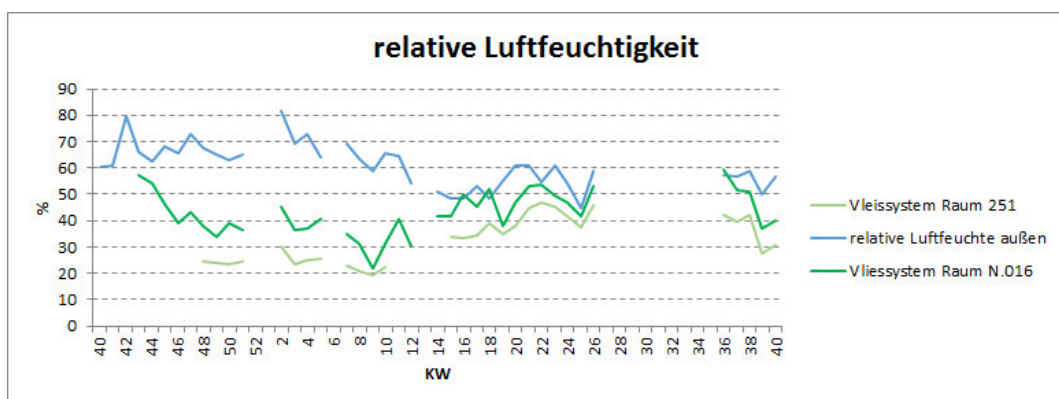


Abb. 5.41: Gemittelte Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.4** und **5.19**). Beide Räume liegen unter den Werten von außen. Raum 251 liegt im Schnitt unterhalb von Raum N.016.

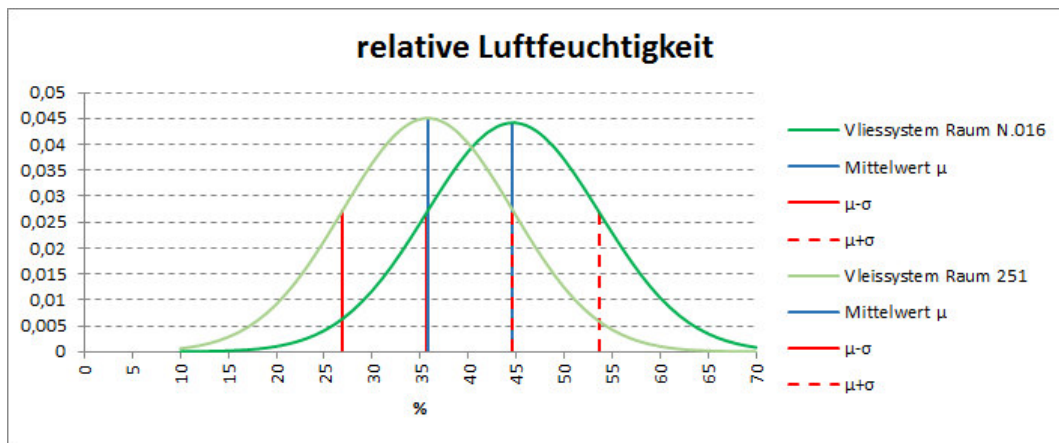


Abb. 5.42: Normalverteilung der gesamten Messwerte (vgl. **Abb. 5.5** und **5.20**) für die relative Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Die Kurven spiegeln die bereits erkannte Situation aus **Abb. 5.41** wieder. Raum N.016 hat einen höheren Erwartungswert und eine ähnliche Streuung, entsprechend gleich verlaufen die Glockenkurven der beiden Räume.

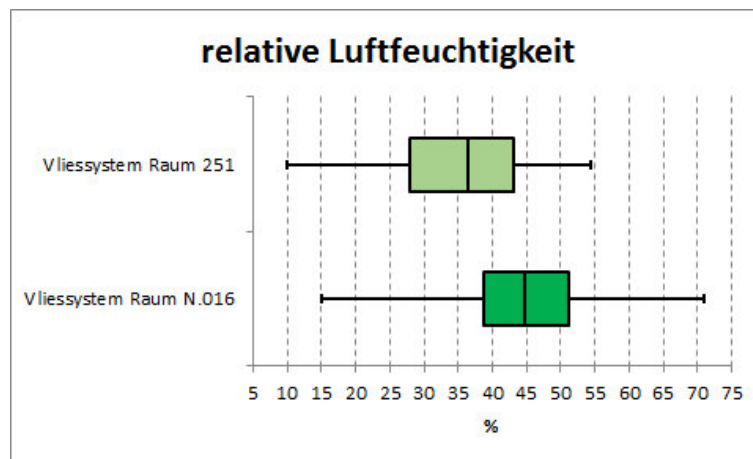


Abb. 5.43: Boxplot der gesamten Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.42** und **5.41** gut erkennen. Fast gleichgroße Streuung, aber etwas versetzt.

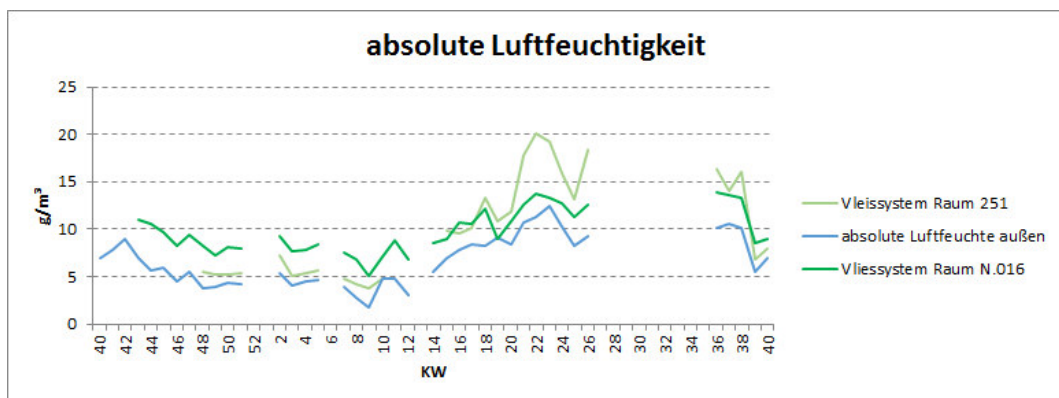


Abb. 5.44: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.8** und **5.22**). Der Verlauf von Raum 251 ähnelt dem der Lufttemperatur (vgl. **Abb. 5.38**), im Winter unterhalb und im Sommer oberhalb von Raum N.016. Allgemein wird der Raum des BRG 15 eine größere Streuung aufweisen. Die Werte liegen über denen der der Luftfeuchte von außen.

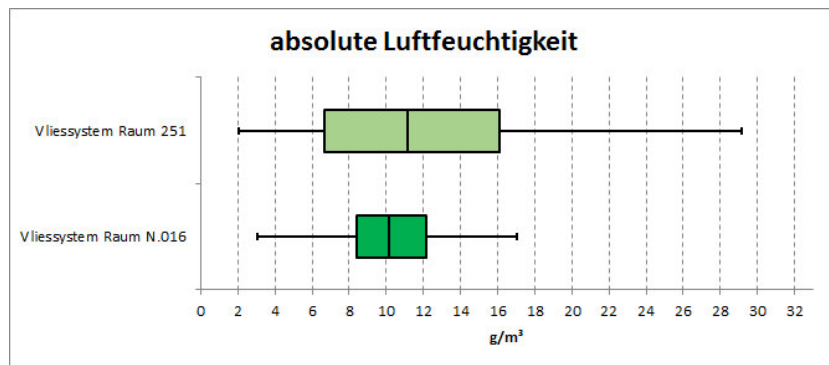


Abb. 5.45: Boxplot der gesamten Messwerte für die absolute Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.44** gut erkennen, nämlich die größere Streuung im Raum 251.

5.3.3 Vergleich 255 mit N.004

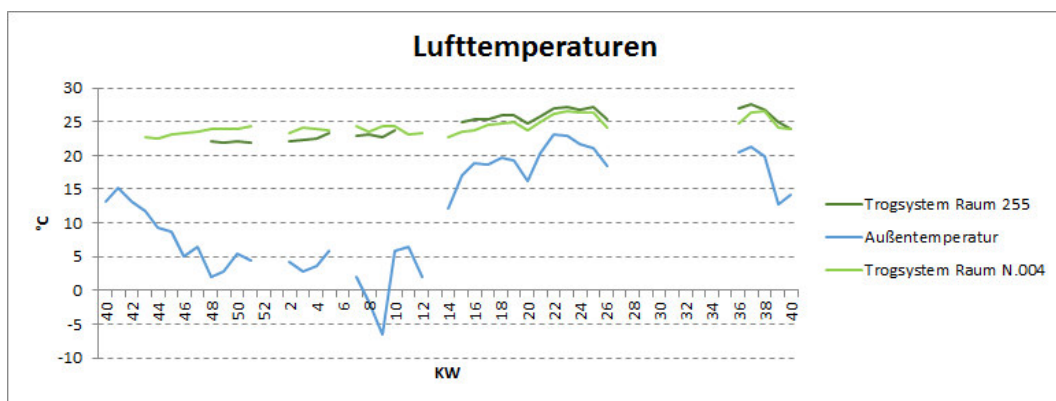


Abb. 5.46: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.1** und **5.16**). Der Referenzraum 255 des BRG 15 zeigt eine größere Streuung durch die Schwankungen zwischen den Winter- und Sommerwochen auf. Der Raum N.004 des BRG 16 bleibt verhältnismäßig konstant. Beide Räume sind im Vergleich zur Außentemperatur verhältnismäßig konstant über die Jahreszeiten.

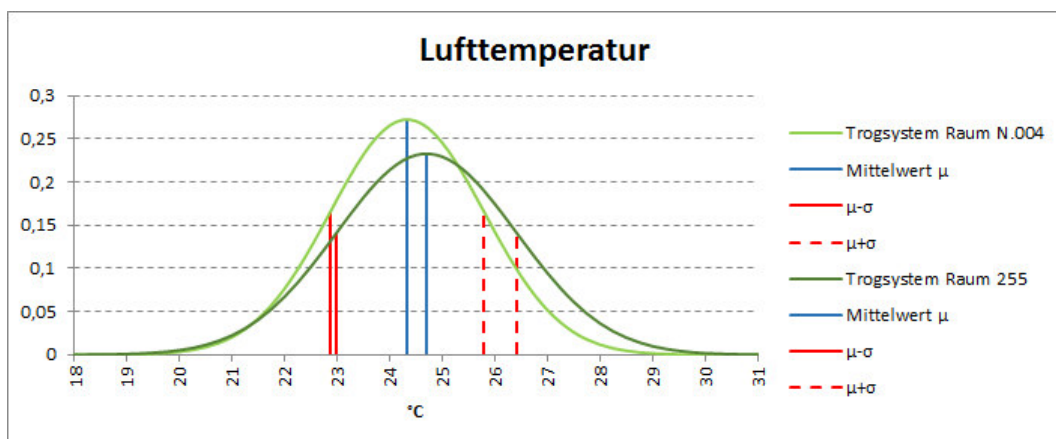


Abb. 5.47: Normalverteilung der gesamten Messwerte (vgl. **Abb. 5.2** und **5.17**) für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Die Kurven spiegeln die bereits erkannte Situation aus **Abb. 5.46** wieder. Der Raum N.004 hat einen niedrigeren Mittelwert und eine kleinere Streuung der Messwerte, welche durch die ungleiche Kurvenhöhe gut zu erkennen sind.

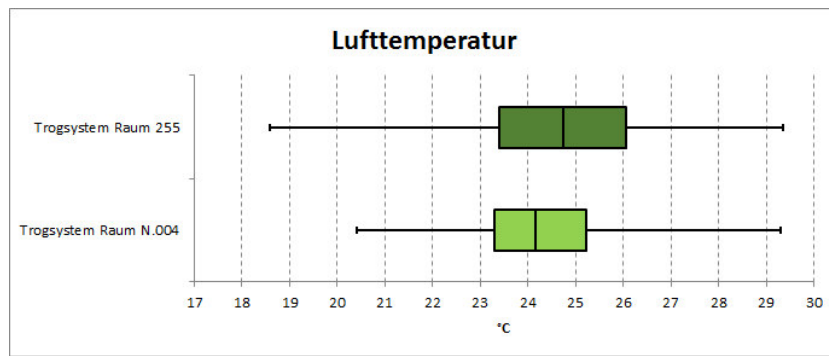


Abb. 5.48: Boxplot der gesamten Messwerte für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.47** und **5.46** gut erkennen. Während ca. 50% der Werte vom Raum N.004 im Bereich 23,5-25,5°C befinden, sind es 23,5-26°C im Raum 255. Beide weisen das nahezu gleiche Maximum auf.

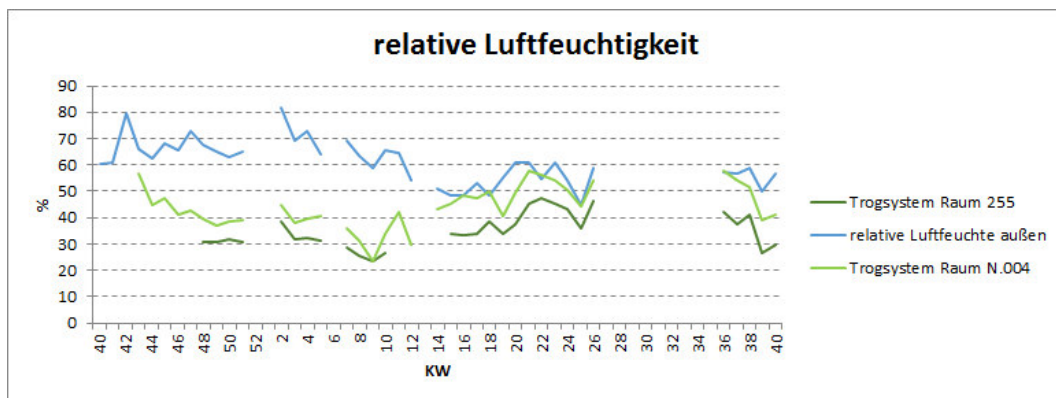


Abb. 5.49: Gemittelte Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.4** und **5.19**). Beide Räume liegen unter den Werten von außen. Raum 255 liegt im Schnitt unterhalb von Raum N.004.

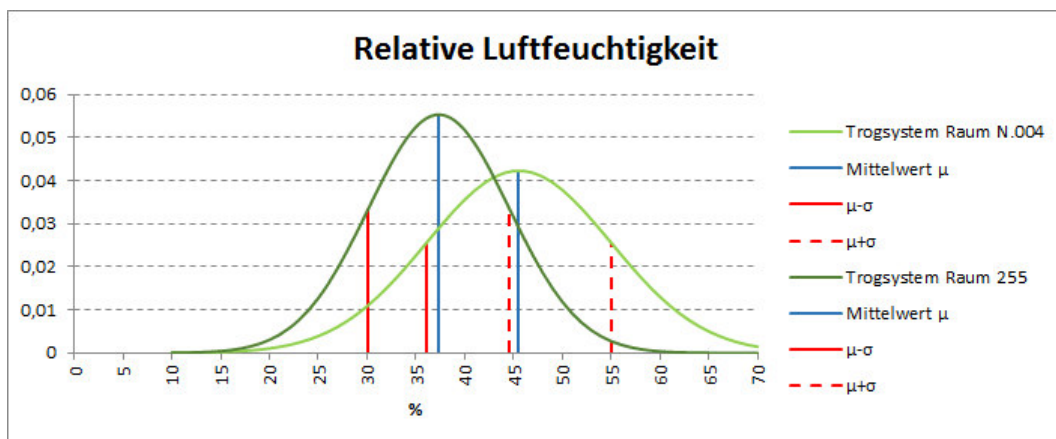


Abb. 5.50: Normalverteilung der gesamten Messwerte (vgl. **Abb. 5.5** und **5.20**) für die relative Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Die Kurven spiegeln die bereits erkannte Situation aus **Abb. 5.49** wieder. Raum N.004 hat einen höheren Erwartungswert und eine größere Streuung (flache Glockenkurve), entsprechend unterschiedlich verlaufen die Glockenkurven der beiden Räume.

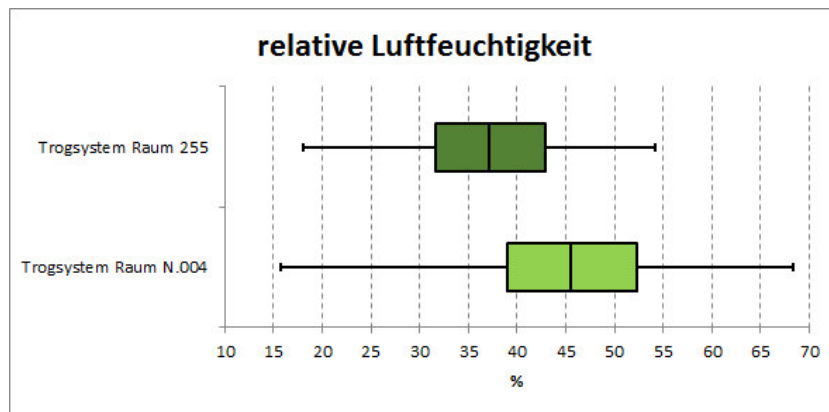


Abb. 5.51: Boxplot der gesamten Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.50** und **5.49** gut erkennen. Stark versetzt und eine unterschiedliche Streuung.

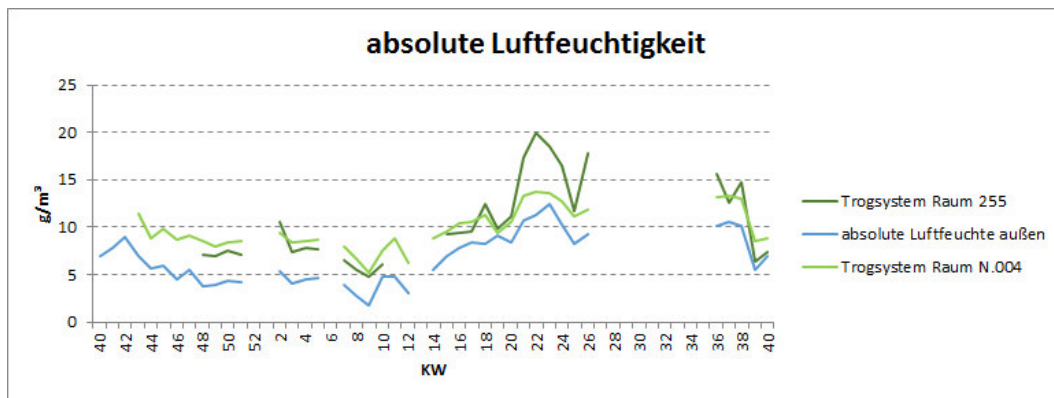


Abb. 5.52: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume (vgl. **Abb. 5.8** und **5.22**). Der Verlauf von Raum 255 ähnelt dem der Lufttemperatur (vgl. **Abb. 5.46**), im Winter unterhalb und im Sommer oberhalb von Raum N.004. Allgemein wird der Raum des BRG 15 eine größere Streuung aufweisen. Die Werte liegen über denen der der Luftfeuchte von außen.

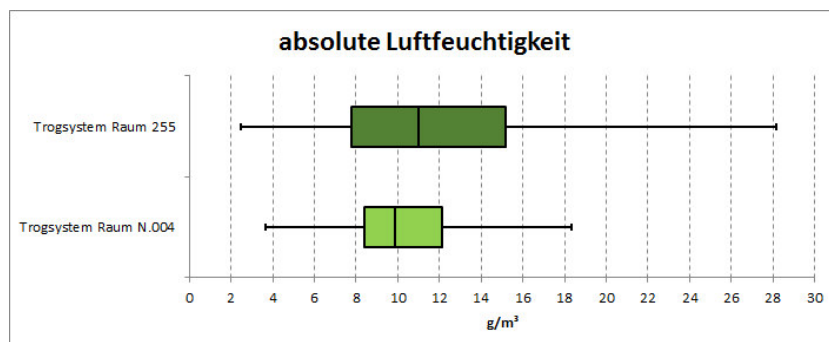


Abb. 5.53: Boxplot der gesamten Messwerte für die absolute Luftfeuchtigkeit, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 5.52** gut erkennen, nämlich die größere Streuung im Raum 255.

6 Datenauswertung: Kohlenstoffdioxidkonzentration

6.1 BRG 15 Diefenbachgasse: Vergleich der Räume 251, 253 und 255 miteinander

Erwartet wird, dass die Konzentrationen mindestens unter 1000ppm und zudem niedriger als die der Schule am Schuhmeierplatz liegen. In den Winterwochen zur kalten Jahreszeit werden höhere Kohlenstoffdioxidkonzentrationen prognostiziert, das auf das zusätzlich manuelle Lüftungsverhalten zurückzuführen ist. Mit den kälteren Außentemperaturen fällt das Lüften seltener und kürzer aus. Daher findet kein intensiver Luftaustausch wie an den wärmeren Tagen statt. Eine genaue Analyse ist schwierig, weil kein strenges Regiment für die manuelle Belüftung geführt wird. Deswegen kann es vorkommen, dass Räume die erwartungsgemäß besser abschneiden sollten, schlechter dastehen, weil weniger gelüftet wurde als in den beiden anderen Klassenräumen.

In **Abb. 6.1** liegt genau der eben genannte Fall vor. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration der Klasse mit dem Trogsystem (Raum 255) liegt im Durchschnitt weit über der des Vliessystems. Und das obwohl eigentlich laut Vorhersage die begrünten Klassen unterhalb des Referenzraums liegen müssten. Es kann natürlich auch an einer nicht einwandfrei funktionierenden Belüftungsanlage liegen. Im Allgemeinen wird die 1000ppm-Grenze im Durchschnitt nicht überschritten, jedoch kommt es in den ersten Wochen nach Inbetriebnahme der Innenwandbegrünungssysteme zu überhöhten Messwerten. In **Abb. 6.2** sind die Ausreißer sehr klar zu sehen. In den beiden begrünten Räumen meldeten die Sensoren Werte über 1800ppm. Geringere Werte sind in den Sommerwochen in **Abb. 6.1b** ersichtlich. Hier ist der Mittelwert niedriger, da die Winterwochen aufgrund der Datenlücke unberücksichtigt bleiben. Die Minima fallen sogar auf das Niveau der Außenluftkonzentration von ca. 400ppm⁸. Diese treten im Sommer auf, während die Lüftung oft und intensiv oder sogar dauerhaft erfolgt. Werden die Räume in Klassen laut ÖNORM EN 13779 eingeteilt, würden die Räume 253 und 251 die Klasse 1 (≤ 800 ppm) und Raum 255 Klasse 2 (800-1000ppm) zugeordnet (vgl. **Abb. 6.2**). In der KW 23 wird die Situation ähnlich widerspiegelt, wie es in **Abb. B5** bei den Verläufen im Zeit-Konzentrationsdiagramm und in **Abb. B6** bei der Streuung dargestellt ist. Bei der detaillierten Betrachtung am 05.10.2018 wird das Lüften durch das markante Sägezahnmuster nachvollziehbar (s. **Abb. C5** ff.). Ab 11:15 Uhr befinden sich die Grünklassen klar unterhalb dem Niveau von Raum 253. Der steile Abfall in Raum 255 ist mit dem längeren Lüften mit mehreren Fenstern zu erklären. Die beiden anderen Klassen werden im Schnitt mit Beginn der Pause zwischen den Unterrichtsstunden bis kurz nach Unterrichtsbeginn der anschließenden Unterrichtsstunde gelüftet. Generell ist mit einer Zunahme der CO₂-Konzentration vom Schultagbeginn bis zum Schluss auszugehen. In **Abb. C6** ist die kleine Streuung der Messwerte in Raum 251 hervorzuheben. Bis auf ein paar Ausnahmen bewegen sich die Konzentrationen überwiegend im Bereich unter 1000ppm.

⁸ Die Messsensoren können nur Konzentrationen ≥ 400 ppm bestimmen.

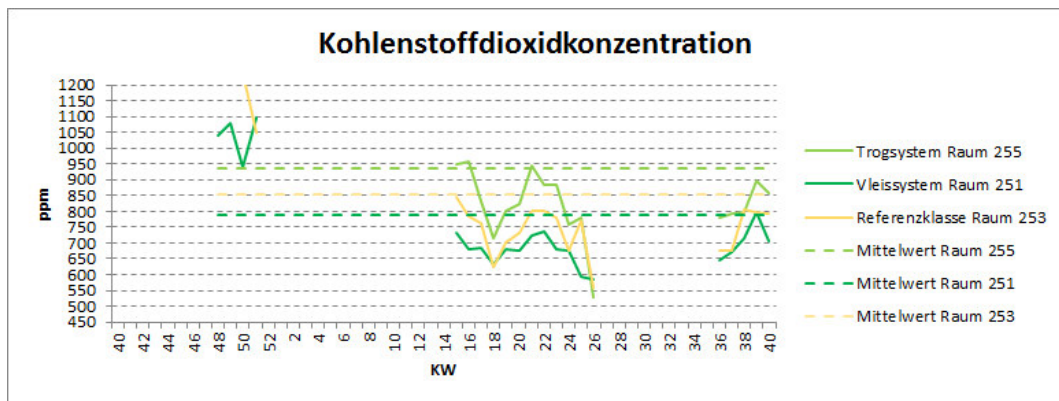


Abb. 6.1: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume. Im Mittel liegt der Referenzraum zwischen den beiden begrünten Klassen. Es liegt eine größere Datenlücke über die Winterwochen vor. Grob lässt sich die Konzentration im Bereich unter 950ppm anordnen. Raum 251 liegt im Schnitt am niedrigsten von den drei Klassenräumen.

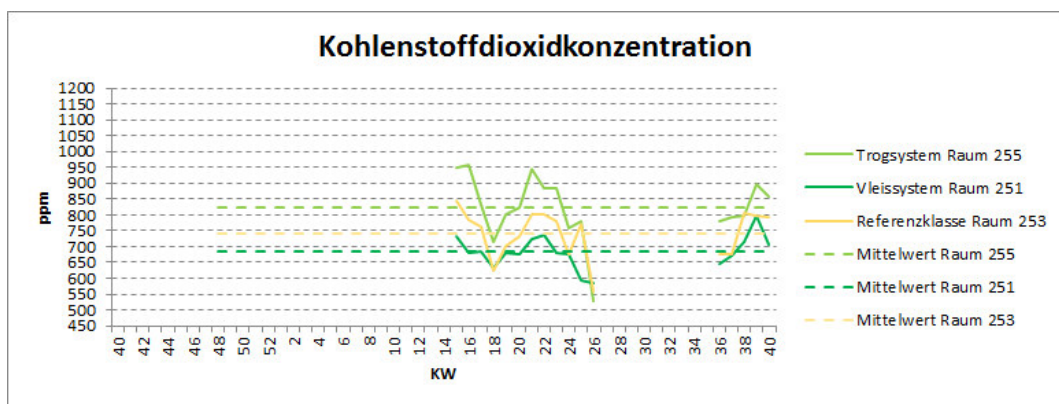


Abb. 6.1b: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume. Hier zeichnet sich ein ähnliches Bild ab wie in **Abb. 6.1**. Für den Vergleich der Mittelwerte mit BRG 16 ist dieser Zeitraum geeigneter.

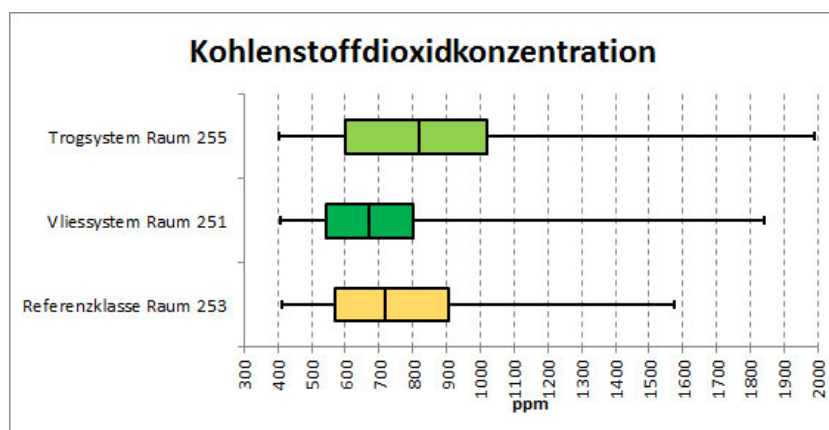


Abb. 6.2: Boxplot der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 6.1** gut erkennen, nämlich der Bereich in dem die Werte hauptsächlich zu finden sind. Die riesige Streuung im Bereich zwischen den Maxima und den 3. Quartilen ist zu einen auf die Datenlücke und zum anderen auf die hohe Konzentration zu Beginn der Aufzeichnung zurückzuführen.

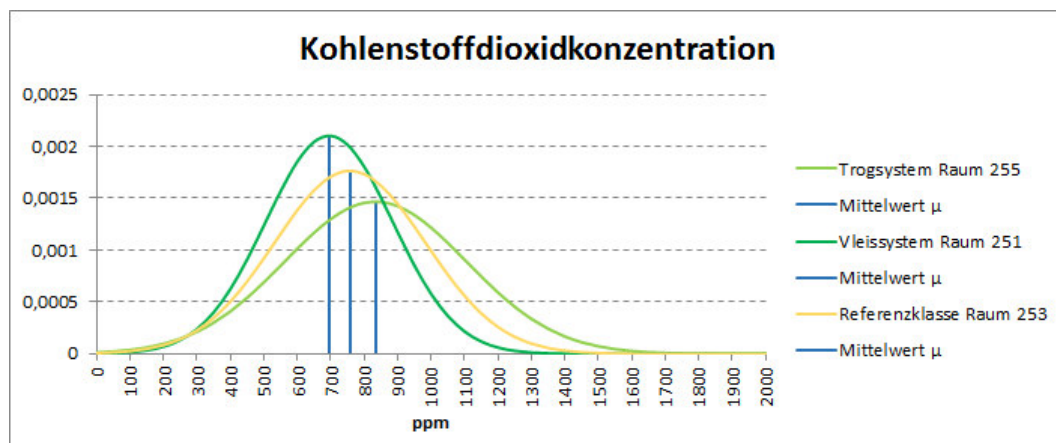


Abb. 6.3: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. 6.2** und **6.1** wiedergegeben. Raum 251 hat die geringste Streuung und den niedrigsten Mittelwert von den drei Klassenräumen. Der Referenzraum liegt zwischen den beiden begrünten Klassen.

6.2 BRG 16 Schuhmeierplatz: Vergleich der Räume N.004, N.005 und N.016 miteinander

Im Gegensatz zum Diefenbachgymnasium mit der mechanischen Belüftungsanlage, sind im BRG 16 bis zum gewissen Grad verhältnismäßig höhere Kohlenstoffdioxidkonzentrationen vertretbar. Wie bereits für das BRG 15 erläutert, sind überdurchschnittliche hohe Werte bei der Aufzeichnung zwischen November und März wegen den kalten Außentemperaturen vorhersehbar. In **Abb. 6.4** ist die Situation schlecht zu durchschauen, da sich keine geordneten Verläufe ergeben, die eine eindeutige Aussage zulassen. Erst mithilfe des Mittelwerts und den **Abb. 6.4b**, **6.5** und **6.6** ist eine Interpretation möglich. Die von den Messsensoren erfassten Daten geben Werte wider die offensichtlich im Niveau über dem des BRG 15 liegen. Lediglich der Raum N.004 kann der Klasse 1 zugeordnet werden. Die übrigen zwei fallen mit einer durchschnittlichen Konzentration ≤ 1000 ppm in Klasse 2. Damit wäre für einen Klassenraum das Ziel erreicht. Raum N.005 und N.016 erfüllen den Richtwert. In **Abb. 6.5** ist das Durcheinander im Schuljahr 2017/2018 dargestellt. In den Boxplots sind die Interquartilbereiche besonders breit, womit die große Streubreite bewiesen ist. Die Whiskers erreichen bei den Minima, wie bereits im BRG 15 beobachtet, Werte die der typischen Außenluftkonzentration entsprechen. Diese werden durch die intensive Belüftung der Zimmer während der Sommermonate herbeigeführt. Die Ausreißer aller Zimmer erreichen knapp die 2000ppm-Marke. Dies ist für eine natürliche Belüftung nicht unüblich, dennoch kritisch zu betrachten. Abgesehen vom Trogsystem im Raum N.004, schneiden die begrünten Klassen nicht viel besser ab. Wird nur der Zeitraum der milden und warmen Wochen gewählt wie in **Abb. 6.4b** so steht zumindest Raum N.016 in einem besseren Licht und liegt unter dem Referenzraum. In den **Abb. B19** ff. ist die Lage nochmal am Beispiel der Kalenderwoche 23 belegt. Aus der Normalverteilung geht sogar hervor, dass die Mittelwerte der Grünklassen in dieser Woche die 800ppm-Grenze unterschreiten. Die Streubreiten der drei Räume sind in der Größenordnung in etwa gleich. Die etwas genauere Ansicht am 05.10.2018 gibt ein Auf und Ab der Konzentrationen während der drei untersuchten Stunden (vgl. **Abb. C19** ff.). Tatsache ist, die Konzentrationen steigen langsamer wenn Fenster auf Kipp gestellt sind, Abfälle sind überall dort erkennbar wo gelüftet wird und die Konzentration sinkt im Referenzraum genauso rapide wie im Raum N.004 während der Raum unbesetzt ist. Zudem erreichen die Klassen schnell maximale Konzentrationen, teilweise innerhalb einer Unterrichtsstunde. Eine Wirkung der Pflanzen lässt sich hier nicht feststellen. Laut **Abb. C20b** sind die Zimmer mit Innenwandbegrünung im Mittel schlechter als der Referenzraum, dies ist aber der unterrichtsfreien Stunde zu verschulden.

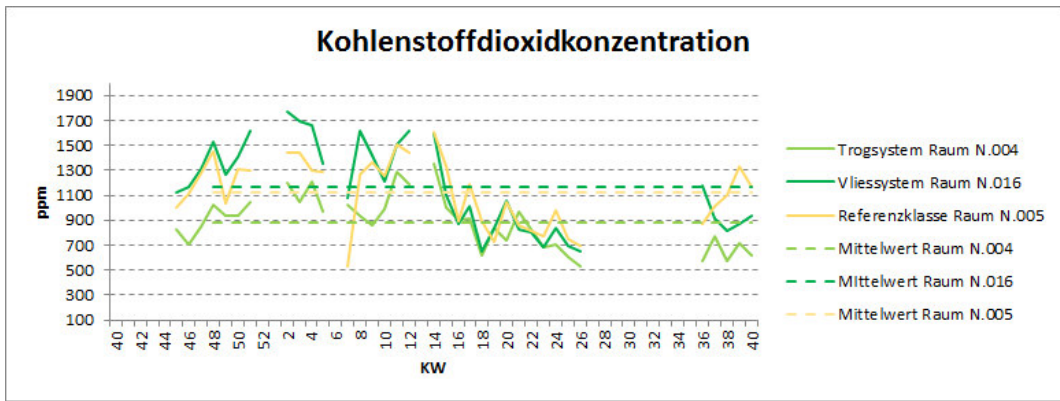


Abb. 6.4: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume. Im Mittel liegt der Referenzraum zwischen den beiden begrünten Klassen aber knapp unterhalb von Raum N.016. Im Vergleich zum BRG 15 ist liegen hier größere Schwankungen und höhere Konzentrationen im Mittel vor.

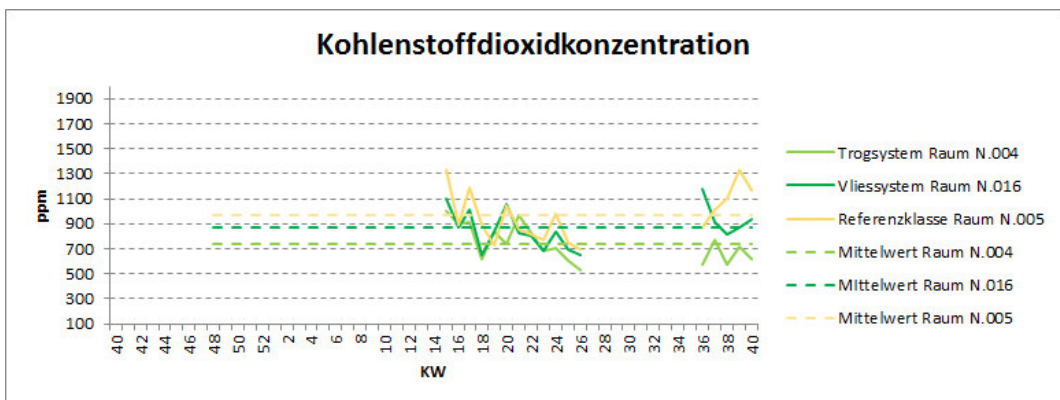


Abb. 6.4b: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume. Zum Vergleich mit dem BRG 15 ist es geschickter nur die Monate zu berücksichtigen, die in denen gemeinsam Messwerte vorliegen. Dabei zeichnet sich ein anderes Bild ab. Der Referenzraum liegt deutlich über die anderen in diesem Zeitraum im Mittel.

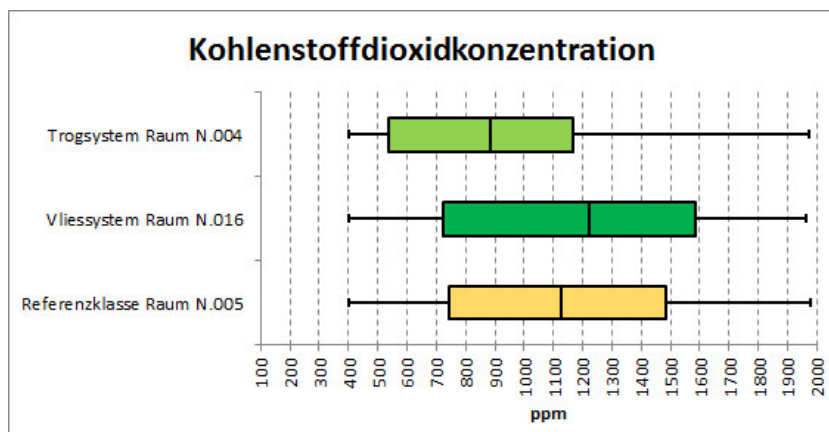


Abb. 6.5: Boxplot der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 6.4** gut erkennen, nämlich die riesige Streuung im Bereich zwischen den 1. Und den 3. Quartilen in denen sich ca. 50% der Werte befinden.

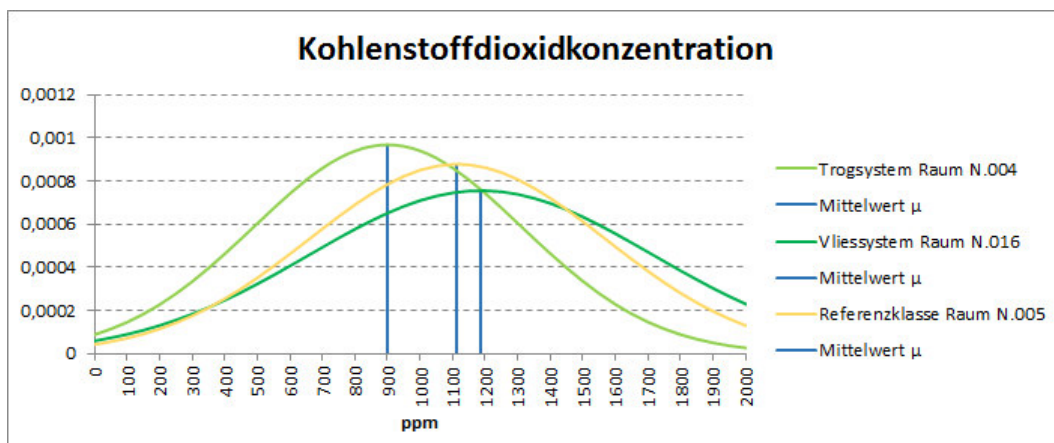


Abb. 6.6: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. 6.5** und **6.4** wiedergegeben. Raum N.004 hat die geringste Streuung und den niedrigsten Mittelwert von den drei Klassenräumen. Der Referenzraum liegt zwischen den beiden begrünten Klassen. Generell sind alle Glockenkurven flach verlaufen und weisen somit eine hohe Streuung auf.

6.3 Vergleich BRG 15 mit BRG 16

Als erstes fällt beim Betrachten der **Abb. 6.7**, **6.9** und **6.11** auf, dass zwei Drittel der Klassenräume des BRG 15 eine durchaus niedrigere Konzentration aufweisen. Nur der Raum 255 liegt ständig über Raum N.004. Als nächstes werden die Verläufe der einzelnen Klassen betrachtet. Die Zimmer des BRG 15 sind „ruhiger“. Es tauchen kaum Spitzen auf wie am Schuhmeierplatz. Dort treten regelmäßig im Schuljahr 2017/2018 eine enge Abwechslung zwischen Höhen und Tiefen. Es scheint als könnte die maschinelle Belüftung dafür verantwortlich sein, dass Schwankungen deutlich geschwächer auftreten. In den **Abb. B33**, **B40** und **B47** wird die Sachlage in KW 23 nochmal bewusst vor Augen geführt. Die Werte von Raum 255 unterscheiden sich von den anderen. Dennoch ist in den Boxplot-Darstellungen (s. **Abb. B34**, **B41** und **B48**) zu entnehmen, dass die Streuung im Interquartilbereich in den Klassenzimmern 253 und 251 sehr schmal ist und damit durchaus eine stabile Konzentration zu erwarten ist. In **Abb. B41** lässt sich an der Gegenüberstellung die Beeinflussung der unterschiedlichen Belüftungsarten ablesen. Auch der Vergleich der Boxplots **Abb. B34** mit **B41** bestätigt zum einen die Wirkung der Innenwandbegrünung und zum anderen den Einsatz der Belüftungsanlage.

6.3.1 Vergleich Raum 253 mit Raum N.005

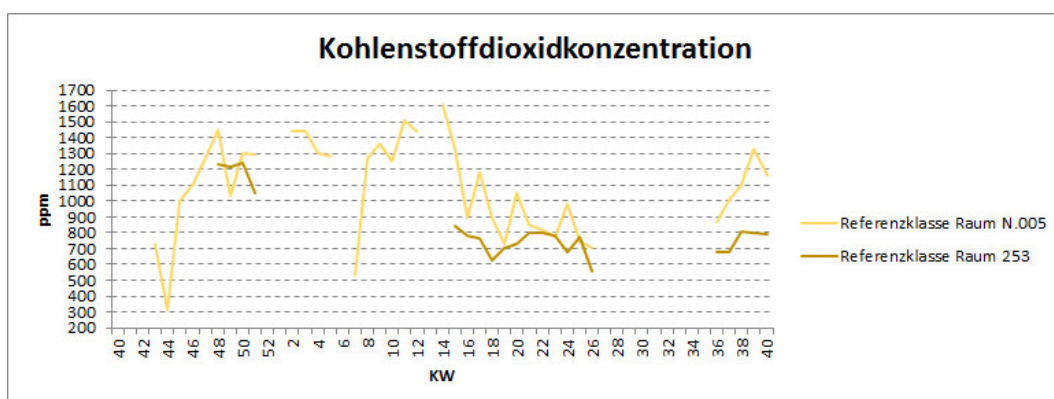


Abb. 6.7: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume. Werden nun die Verläufe nach der Datenlücke vom BRG 15 betrachtet, so ist eine etwas weniger schwankender Aufzeichnung im Raum 253 und allgemein geringere Konzentration im Gegensatz zum Raum N.005 zu erkennen.

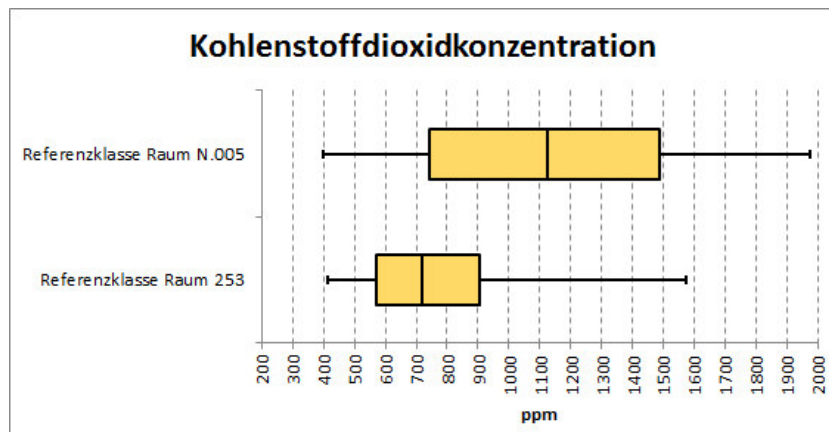


Abb. 6.8: Boxplot der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 6.7** gut erkennen, nämlich die riesige Streuung im Bereich zwischen dem 1. und 3. Quartil vom Raum N.005.

6.3.2 Vergleich Raum 251 mit Raum N.016

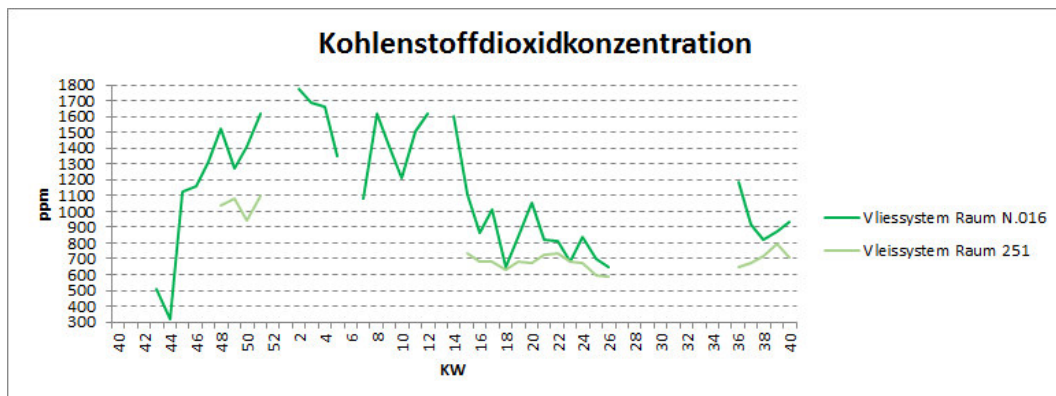


Abb. 6.9: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume. Werden nun die Verläufe nach der Datenlücke vom BRG 15 betrachtet, so ist eine etwas weniger schwankender Aufzeichnung im Raum 251 und allgemein geringere Konzentration im Gegensatz zum Raum N.016 erkennbar.

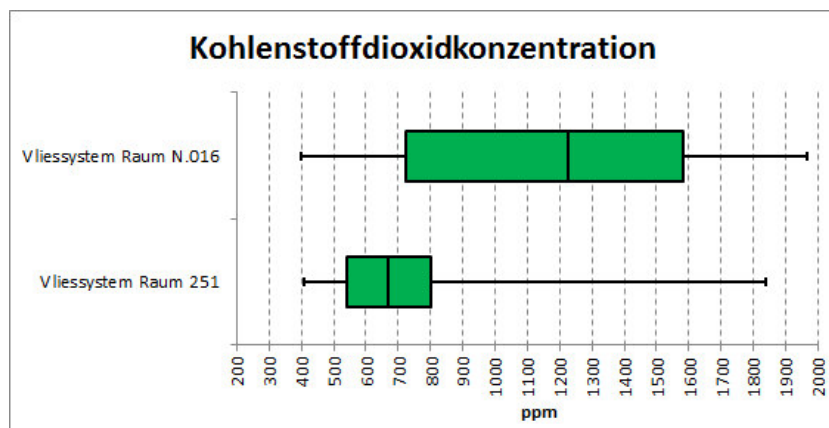


Abb. 6.10: Boxplot der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 6.9** gut erkennen, nämlich die riesige Streuung im Bereich zwischen dem 1. und 3. Quartil vom Raum N.016.

6.3.3 Vergleich Raum 255 mit Raum N.004

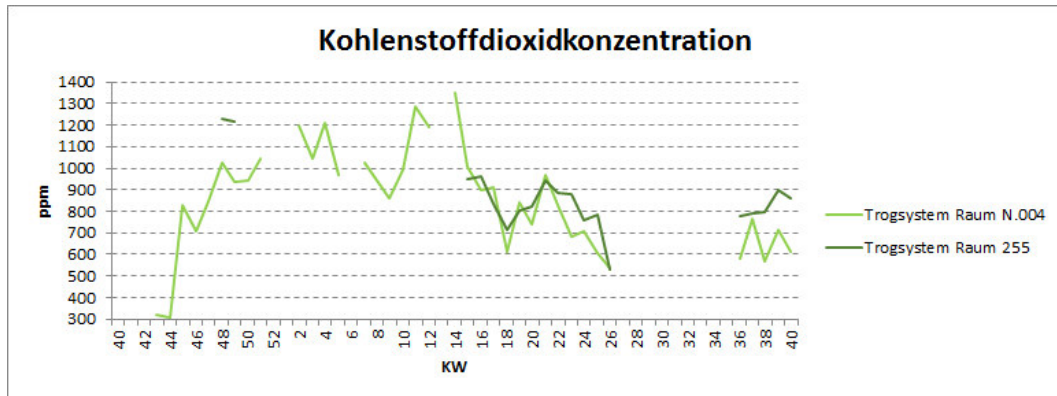


Abb. 6.11: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume. Werden nun die Verläufe nach der Datenlücke vom BRG 15 betrachtet, so ist im Mittel eine höhere Konzentration im Raum 255, dafür aber ein kleinerer Schwankungsbereich erkennbar.

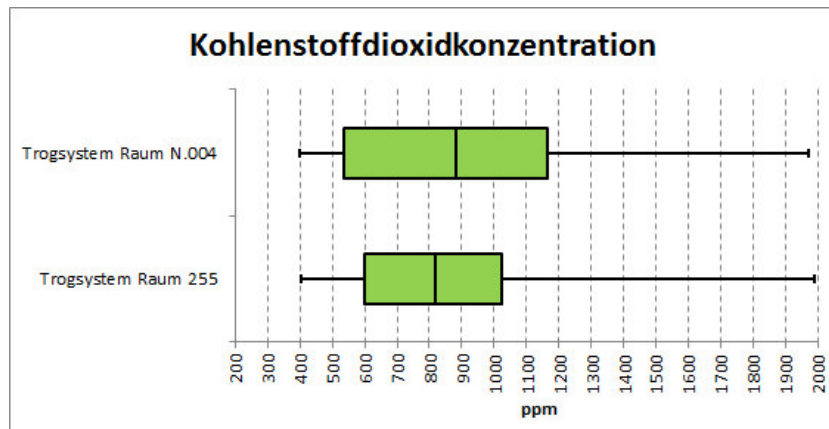


Abb. 6.12: Boxplot der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Auch hier lässt sich das Ergebnis aus **Abb. 6.9** gut erkennen, nämlich die größere Streuung im Bereich zwischen dem 1. und 3. Quartil vom Raum N.004. Hauptsächlich sind die Werte unterhalb von 1200ppm vorfindbar.

7 Datenauswertung: Taupunkt und Schimmelpilzsporen

7.1 BRG 15 Diefenbachgasse: Vergleich der Räume 251, 253 und 255 miteinander

Durch die Abhängigkeit des Taupunkts von zwei raumklimatische Größen, nämlich der Lufttemperatur und Luftfeuchte, lässt sich deren Einfluss in den Diagrammen ablesen. Während die Verläufe (vgl. **Abb. 7.1, 5.1** und **5.4** bzw. **5.8**) im Großen und Ganzen ähnlich sind, ist der Taupunkt eher durch die relative Luftfeuchtigkeit geprägt. Daraus folgt, dass die Extrema dort zu erwarten sind, wo die Maxima und Minima der Eingangsgrößen auftauchen. Im Schuljahr 2017/2018 ist das Minimum der relativen/absoluten Luftfeuchtigkeit in der KW 08 und das Maximum in der KW 23 vorgekommen. Das deckt sich also eins zu eins mit denen in **Abb. 7.1**. Obwohl die Lufttemperaturen der begrünten Räume im Mittel unterhalb vom Referenzraum liegen, scheint der absoluten Luftfeuchtigkeit eine größere Gewichtung zuzukommen, da der Taupunkt der Grünklassen wie auch bei der Luftfeuchte ziemlich deutlich überwiegend höhere Werte präsentieren als der Referenzraum. Da es sich um gemittelte Messwerte handelt ist ein Taupunkt nahe 25°C als Maximum (in allen Räumen ähnlich) kritisch zu sehen. Oberflächen müssen in diesem Zeitraum ebenfalls eine hohe Temperatur aufweisen, damit Wasser als Kondensat nicht ausfällt. Das Minimum liegt circa bei -1°C. Damit kommt eine Differenz von 26°C zustande. In der etwas verfeinerten Betrachtung (s. **Abb. A6, B7** und **C13**) sind die Extrema in den jeweiligen Kalenderwochen genauer abgebildet. Anschaulich wird die Tatsache, dass bei trockener Luft sich die Werte um den Nullpunkt ansiedeln und demnach mit Sicherheit für eine nicht besorgniserregende Temperaturdifferenz zu den raumumschließenden Oberflächen führt, ausgenommen sind potentielle Wärmebrücken. Auf der anderen Seite steht die KW 23 mit den durchschnittlich höchsten Messwerten. Hier kann es sehr wohl vorkommen, dass die Wände sich in einem kühleren Zustand befinden als zulässig ist. Bei mehrmaligen Rundgängen in den Klassenräumen waren keine Auffälligkeiten bei der visuellen Überprüfung der Wände zu bemängeln. Auch das chemische Labor der IBO Innenraumanalytik kommt bei ihren Untersuchungen der Raumluft zum gleichen Resultat. Hier wurden Luftproben (im April genommen) nach Referenz- und Richtwerte beurteilt und die Ergebnisse in einem Bericht geschildert. Die Konzentrationen unterschreiten die Grenzen die eine Bestimmung zulassen, also liegt eine unbedenkliche Luftqualität in den Räumen 255 und 251 vor. Eine weitere Probe im Sommer wäre an dieser Stelle notwendig um die gute Luftqualität über das ganze Jahr hinweg zu bestätigen.

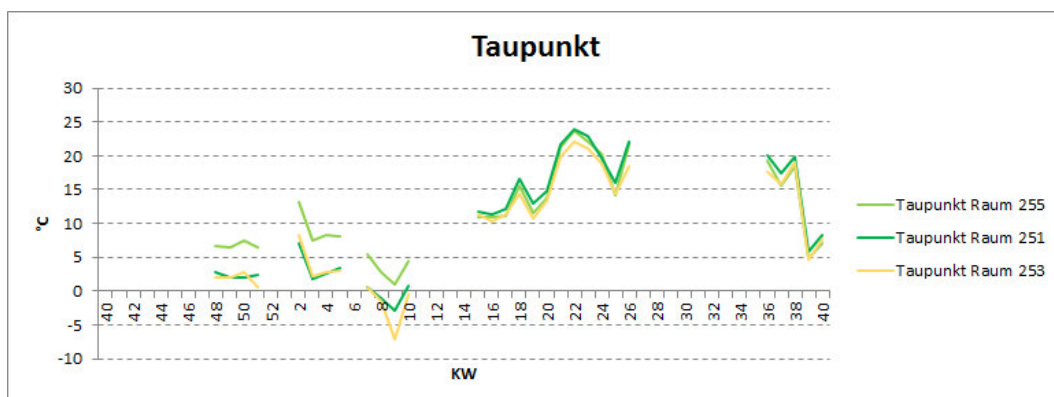


Abb. 7.1: Gemittelte Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Während die Verläufe zu Beginn relativ ungeordnet sind, gibt es eine fast Parallelität in den Sommerwochen. Grob ist der Raum 255 im Mittel der mit der höchsten Temperatur. Allgemein liegen die Taupunkte im Sommer ziemlich hoch, hier ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass es zur Kondensation von Wasser an der Außenwandoberfläche kommen kann. Der Verlauf ähnelt dem der absoluten Luftfeuchtigkeit (vgl. **Abb. 5.8**).

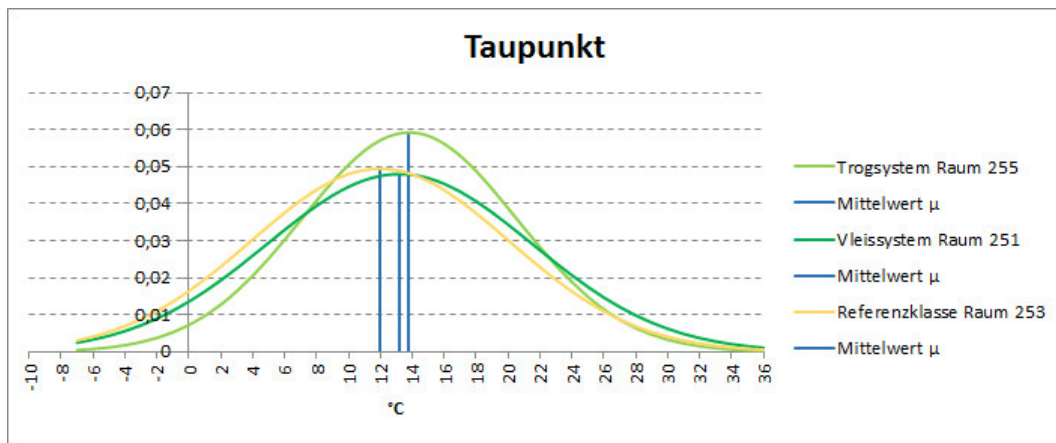


Abb. 7.2: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. 7.1** wiedergegeben. Die Mittelwerte liegen maximal 2°C auseinander. Raum 255 hat die geringste Streuung von den drei Klassen. Wie eigentlich zu erwarten ist, weist der Referenzraum die niedrigste Temperatur auf.

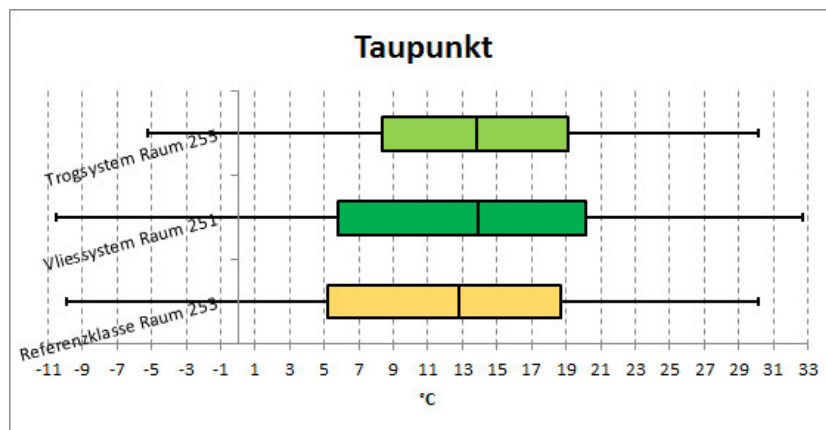


Abb. 7.3: Boxplot der gesamten Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Die Situation aus **Abb. 7.2** und **7.1** wird hier gut wiedergegeben. Alle Räume haben in etwa eine ähnliche Streuung im Boxbereich. Die geringste Differenz zwischen Minimum und Maximum hat der Raum 255.

7.2 BRG 16 Schuhmeierplatz: Vergleich der Räume N.004, N.005 und N.016 miteinander

In den **Abb. 7.4**, **5.16** und **5.19** bzw. **5.22** lässt sich das Zusammenspiel von Lufttemperatur und Luftfeuchte wiederfinden. Gleiches gilt für die Zeiträume der Extrema, die sich ebenfalls im Frühjahr um KW 08 und im Sommer in der KW 23 zu erkennen geben. Einzig die Anomalität in den ersten Schulwochen von 2018 ist hier noch erwähnenswert. Die Taupunkte liegen im Durchschnitt bei maximal 17°C und minimal bei in etwa 1°C, womit der Unterschied von 16°C geringer ausfällt als im BRG 15 (s. **Abb. 7.2** vs. **7.5** und **7.3** vs. **7.6**). Bei den Begehungen der Räume in der Schule am Schuhmeierplatz hat es keine Hinweise auf Schimmelbildung an den Wänden gegeben. Auch die von der IBO durchgeführte Laboruntersuchung hat das gleiche Ergebnis in den Klassen mit der Innenwandbegrünung geliefert. Es sind keine erfassbaren Spuren von Penicillium und Cladosporium in der Luft vorhanden. Dieses Resultat ist etwas erstaunlich da sowohl im Referenzraum als auch im Hof, die Luftproben (alle Ende März entnommen) positiv auf diese mesophile⁹ Pilz-arten ausgefallen sind.

⁹ Bezeichnet einen bevorzugten mittleren Temperaturbereich von etwa 20°C bis 40°C

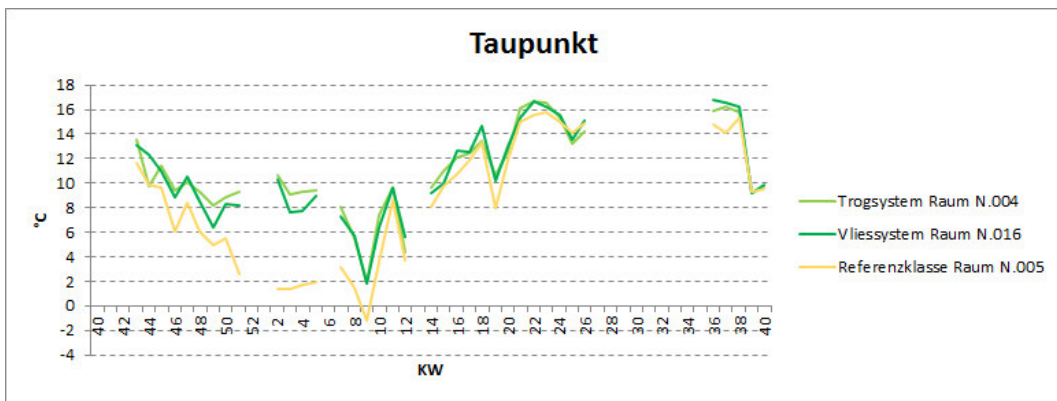


Abb. 7.4: Gemittelte Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Es fällt der Unterschied zwischen den begrünten Räumen und dem Referenzraum auf. Ganz grob sind die Verläufe ähnlich zueinander. Der Verlauf ähnelt dem der absoluten Luftfeuchtigkeit (vgl. **Abb. 5.22**).

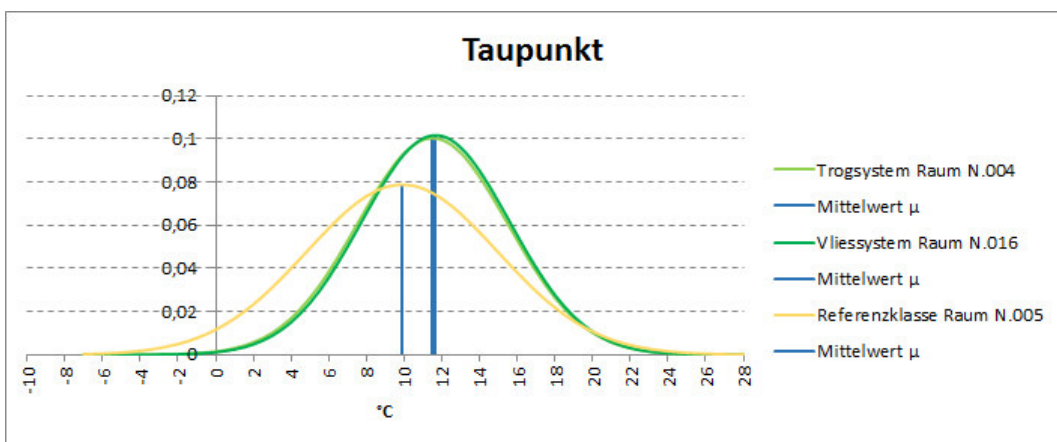


Abb. 7.5: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. 7.4** wiedergegeben. Der Referenzraum hat den niedrigsten Taupunkt und gleichzeitig die größte Streuung. Die begrünten Klassen sind so gut wie identisch.

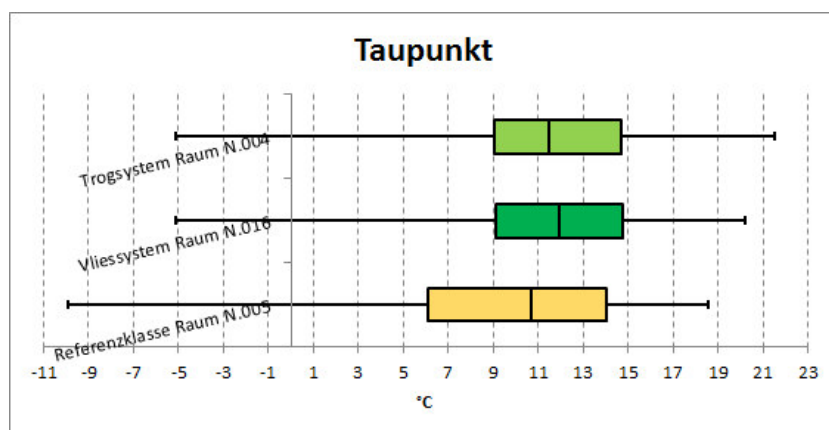


Abb. 7.6: Boxplot der gesamten Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Die Situation aus **Abb. 7.4** und **7.5** wird hier gut wiedergegeben. Die begrünten Klassen haben die gleiche Boxgröße und Raum N.005 weist die größte Streuung in diesem Bereich auf. Auffällig sind die Bereiche der Whiskers zum Minimum hin.

7.3 Vergleich BRG 15 mit BRG 16

7.3.1 Vergleich Raum 253 mit Raum N.005

Der Referenzraum im BRG 15 zeigt beim Taupunkt das gleiche Verhalten wie es schon in **Abb. 5.36** zu sehen ist. In den kalten Wochen liegt der Taupunkt unterhalb vom Raum N.005 und in den warmen Wochen darüber. Dies ist auf die absolute Luftfeuchtigkeit in Wechselwirkung mit der Belüftung zurückzuführen. Ist die Außenluft im Winter trocken so wirkt sich dies auch auf die Innenluft aus, die dabei trockener wird als zum Beispiel der Raum im BRG 16. Im Sommer ist es genau umgekehrt. Die Außenluft ist feuchter und daraus folgt eine Befeuchtung der Innenluft im Raum 253. Aus den **Abb. 7.8** und **7.9** lassen sich die unterschiedlichen Streuungen der Werte erkennen. Raum 253 hat ein breit gefächertes Spektrum und einen höher liegenden Mittelwert. Während in beiden Räumen das Minimum in etwa identisch ist, gibt es einen offensichtlichen Unterschied bei den Maxima.

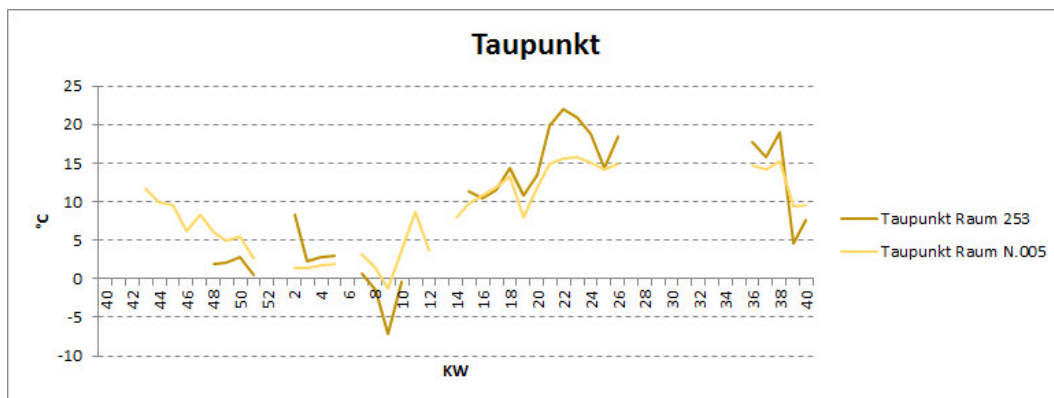


Abb. 7.7: Gemittelte Werte für den Taupunkt (vgl. **Abb 7.4** und **7.1**), welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Der Verlauf ähnelt dem der absoluten Luftfeuchtigkeit (vgl. **Abb. 5.36**). Der Raum 253 ist mal ober- und unterhalb vom Raum N.005. Es lässt sich abschätzen, dass der Mittelwert von Raum 253 am höchsten und die Streuung am größten ist.

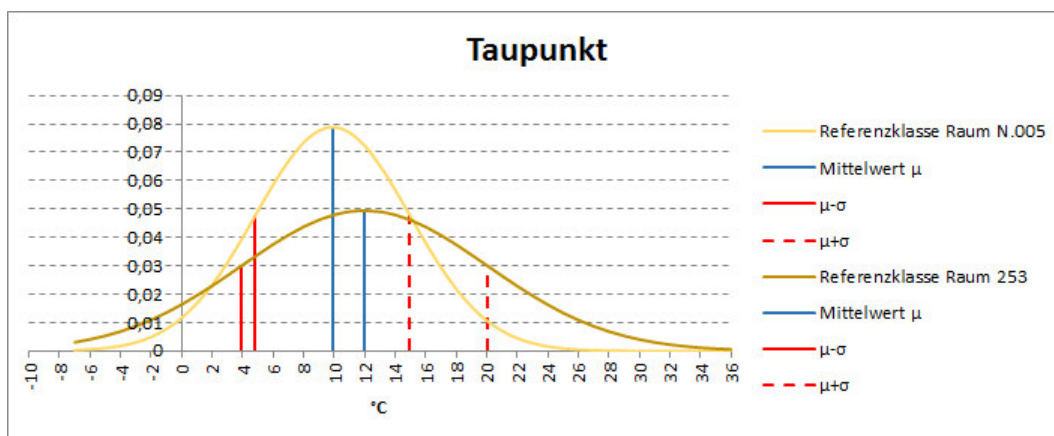


Abb. 7.8: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. 7.4** wiedergegeben. Raum 253 hat einen Mittelwert der 2°C über dem anderen Referenzraum liegt und die Glockenkurve ist flacher, damit also eine größere Streuung der Werte.

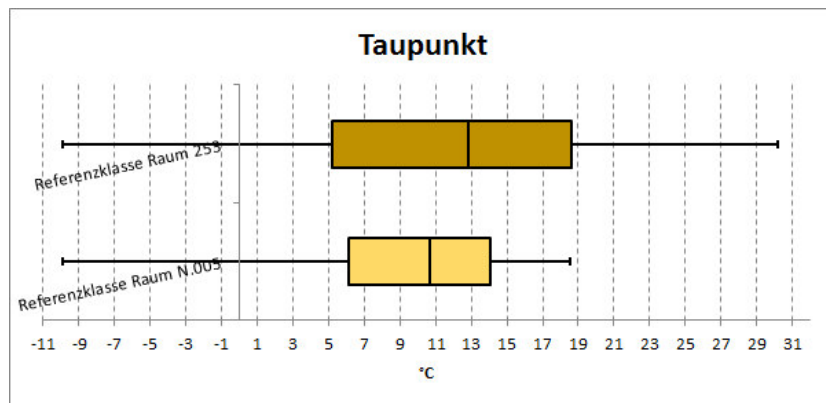


Abb. 7.9: Boxplot der gesamten Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Die Situation aus **Abb. 7.8** und **7.7** wird hier gut wiedergegeben.

7.3.2 Vergleich 251 mit N.016

Im Vergleich der Referenzräume war der Einfluss der Belüftung thematisiert. In **Abb. 7.10** lässt sich ebenfalls der Sprung zwischen Winter und Sommer ausmachen. In den Wochen 48 bis 10 liegt der Raum des BRG 16 über dem Verlauf des Raum 251 und wechselt die Position in die Wochen danach, mit aller Deutlichkeit in den Wochen 20 bis 27. Bei den Schwankungen geben die Räume mit dem Vliestaschensystem ein analoges Bild. Es sind lediglich die Temperaturen im Durchschnitt um 2°C höher. Die Streuungen (vgl. **Abb. 7.11** mit **Abb. 7.8**) sind vom Aussehen gleichartig. Der Raum in der Diefenbachgasse stellt sich weitgestreut dar, hat das kleinste Minimum von beiden und das größte Maximum. Der Interquartilbereich von Raum 251 in **Abb. 7.12** ist fast 2,5 Mal größer. Der Raum N.016 wirkt also über das Schuljahr stabiler.

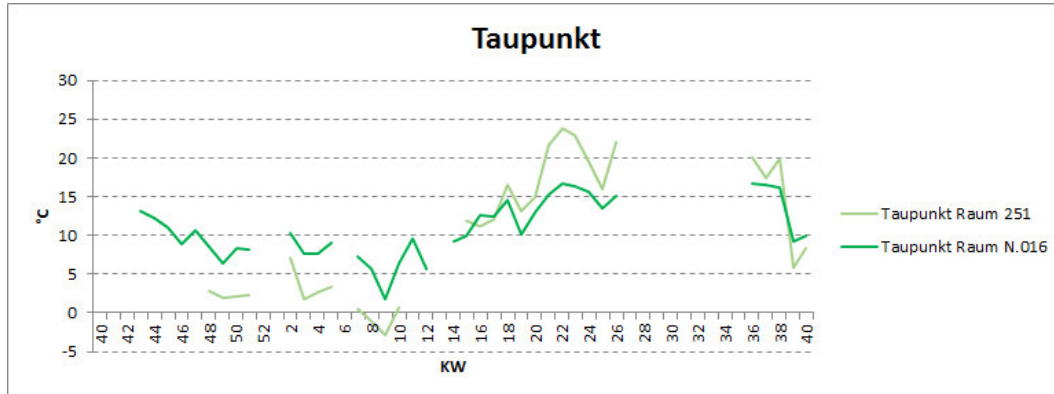


Abb. 7.10: Gemittelte Werte für den Taupunkt (vgl. **Abb. 7.4** und **7.1**), welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Der Verlauf ähnelt dem der absoluten Luftfeuchtigkeit (vgl. **Abb. 5.44**). Der Raum 251 ist mal ober- und unterhalb vom Raum N.016. Es lässt sich abschätzen, dass der Mittelwert von Raum 251 am höchsten und die Streuung am größten ist.

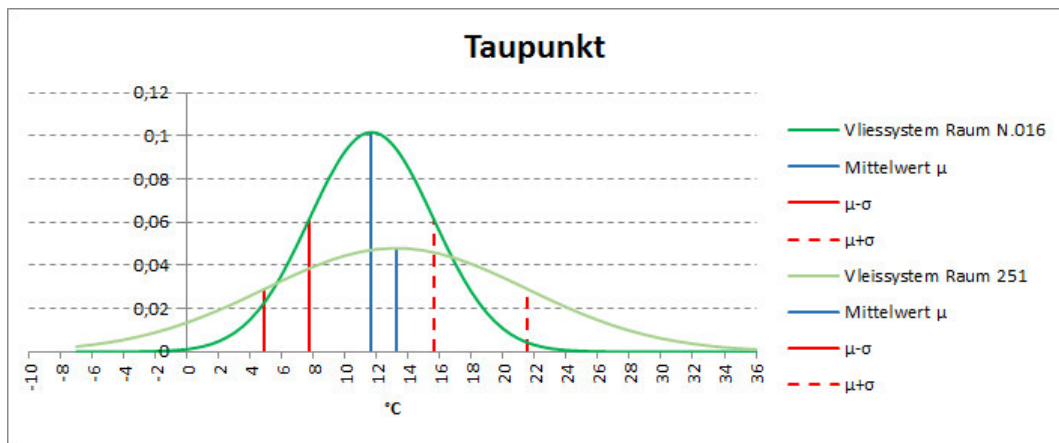


Abb. 7.11: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. 7.10** wiedergegeben. Raum 251 hat einen Mittelwert der ca. 2°C über dem anderen Klassenraum des BRG 16 liegt und die Glockenkurve ist deutlich flacher, damit also eine größere Streuung der Werte.

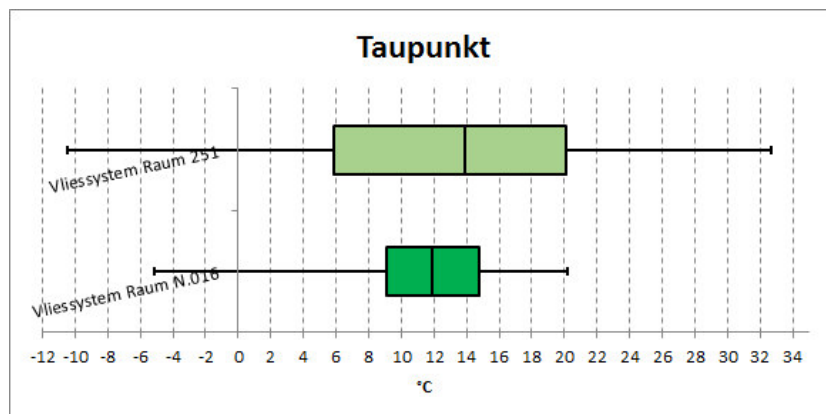


Abb. 7.12: Boxplot der gesamten Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Die Situation aus **Abb. 7.11** und **7.12** wird hier gut wiedergegeben. Der Größenunterschied ist ziemlich gut zu erkennen, auch die längeren Whiskers zu den Extrema von Raum 251.

7.3.3 Vergleich 255 mit N.004

Räume 255 und N.004 liegen vom Mittelwert her zwischen den anderen Klassen der beiden Schulen. Die Auswirkung der Belüftung ist auch hier ersichtlich, auch wenn nicht so klar wie im Klassenraum 251. In **Abb. 7.14** zeigt sich ein kongruentes Bild wie in **Abb. 7.8**, nur mit Mittelwerten die um 1°C höher liegen. Wie auch bei den Referenzräumen liegen die Minima nahezu gleichauf (s. **Abb. 7.15**). Der Interquartilbereich von Raum 255 ist circa doppelt so groß und hat damit also einen weiteren Streuungsbereich als Raum N.004. Auch hier ist auf einen konstanten Verlauf der Taupunkte in Raum N.004 zu schließen.

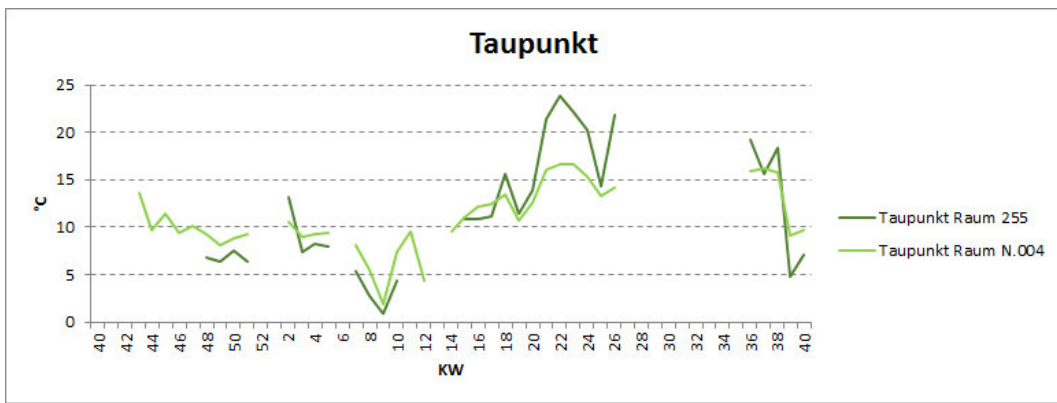


Abb. 7.13: Gemittelte Werte für den Taupunkt (vgl. **Abb 7.4** und **7.1**), welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Der Verlauf ähnelt dem der absoluten Luftfeuchtigkeit (vgl. **Abb. 5.52**). Gut abgebildet ist der Unterschied der beiden Maxima in KW 22.

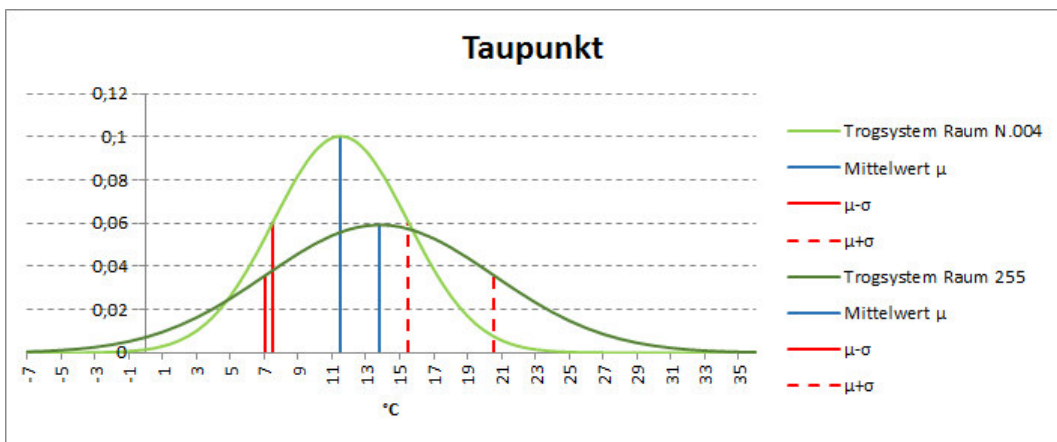


Abb. 7.14: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. 7.13** wiedergegeben. Raum 255 hat einen Mittelwert der ca. 2°C über dem anderen Klassenraum des BRG 16 liegt und die Glockenkurve ist deutlich flacher, damit also eine größere Streuung der Werte.

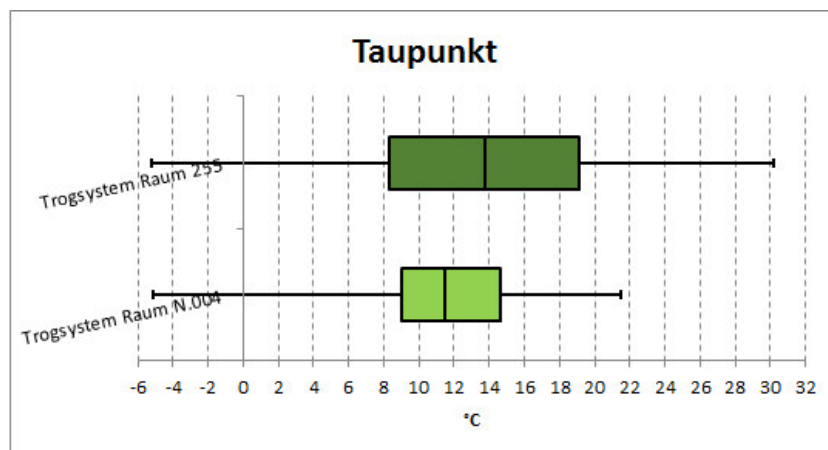


Abb. 7.15: Boxplot der gesamten Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweiligen Beobachtungszeiträume, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Die Situation aus **Abb. 7.13** und **7.14** wird hier gut wiedergegeben. Der Größenunterschied ist ziemlich gut zu erkennen, auch die längeren Whiskers zum Maximum von Raum 255.

8 Nachhallzeit

Für die Raumakustik sind in den **Abb. 8.1** bis **8.4** die gemessenen Nachhallzeiten als Balkendiagramm dargestellt. Einmal die Dauer im Klasseneinrichtungszustand vor der Montage der Innenwandbegrünungssysteme und als Gegenüberstellung die Zeit des Nachhallens nach der Installation. Mit abgebildet sind die 20%-Ober- und 20%-Untergrenze wie diese in der ÖNORM B 8115-3 festgelegt sind. Mit Hilfe der **Formel 6** wurde die Nennnachhallzeit individuell für jedes Klassenzimmer in Abhängigkeit der Raumvolumen ermittelt. Der zulässige Schwankungsbereich ist an diese Soll-Nachhallzeit gekoppelt. Für alle Klassen ergibt sich ein Wert zwischen 0,58 und 0,60 Sekunden. Bei allen Messungen haben sich für die Bezugsfrequenz 500Hz, bei den anderen Oktavbänden offensichtlich auch, erkennbare Differenzen vom Vorher zum Nachher ergeben. Der größte Unterschied lässt sich im BRG 16 Raum N.004 ablesen, der kleinste in der gleichen Schule am Schuhmeierplatz im Raum N.016. In **Tab. 8.1** ist eine detaillierte Zusammenfassung gegeben. Hier ist die Differenz in Prozent ausgedrückt und lässt darauf zurückschließen, dass die Räume mit dem Trogsystem die größte Veränderung präsentieren. Das betrifft also Raum 255 im BRG 15 und Raum N.004 im BRG 16. Im Umkehrschluss sind die beiden anderen Klassen mit dem Vliestaschensystem kaum von einer Veränderung betroffen. Dass die Veränderungen bei den jeweiligen Systemen nicht gleich ausfallen, beruht zum einen auf der Tatsache, dass in erster Linie die Dimensionierungen ungleich sind und die Standorte eine wesentliche Rolle spielen. Am Beispiel der Klassenräume mit dem Innenbegrünungssystem Trog wird dies deutlich. Raum N.004 hat praktisch die komplette Rückwand für das Begrünungselement vorgesehen, während das System im BRG 15 Raum 255 kleiner in der Ausführung ist und an einer Innenwand senkrecht zur Tafel angebracht ist. Interessant ist nun auch der Vergleich der Alphas. In dieser Situation hat das Vliestaschensystem einen höheren Schallabsorptionsgrad. Für beide Klassen mit dieser Ausstattung lassen sich mit den **Formeln 7** und **8** Werte im Bereich von $\alpha=0,175$ kalkulieren, das ist zur Veranschaulichung in etwa die Wirkung die auch ein Furnierholzpanel ($\alpha=0,18$) hat. Das Trogsystem kommt im Mittel auf $\alpha=0,125$, dies wiederum hat den Charakter eines leichten Vorhangs ($\alpha=0,11$). Eine mögliche Ursache ist die Zusammenstellung der Materialien einer solchen Begrünungseinheit. Bei dem Vliestaschensystem hat das Vlies einen erheblichen Anteil an der Gesamtwirkung. Einen Beitrag leisten auch die gewählten Pflanzen mit ihren charakteristischen Blättern. Dabei ist unter anderem die Größe, Anzahl, Oberflächenbeschaffenheit, Porigkeit und Biegesteifigkeit gemeint. Beim Trog kann der Geometrie und dem Raum zwischen den einzelnen Reihen eine Bedeutung zugeschrieben werden, in dem sich der Schall „verfängt“. Und gleichermaßen spielen die Pflanzenblätter hier eine entscheidende Rolle.

Zusammenfassend lässt sich eine Auswirkung der Innenbegrünungssysteme auf die Raumakustik und damit die akustische Behaglichkeit ausmachen. Es muss jedoch, wie in allen Abbildungen der Nachhallzeit ersichtlich, darauf hingewiesen werden, dass sich in der aktuellen Situation eine „Verschlechterung“ feststellen lässt. Das ist so zu verstehen, dass in der Planungsphase bei der Bemessung einer Klasse die Einrichtung eine wichtige Komponente ist und diese in der Ausgangssituation schon nahezu optimal umgesetzt war um die notwendige Hörsamkeit zu gewährleisten. Die Planer hätten nicht ahnen können, wie die Räume später durch eine Zusatzausstattung ihr Verhalten ändern. So ist es bei einem Neubau einer Schule wichtig die Variation mit einer nachträglichen Begrünung im Blick zu behalten, sollte diese nicht schon fest eingeplant sein.

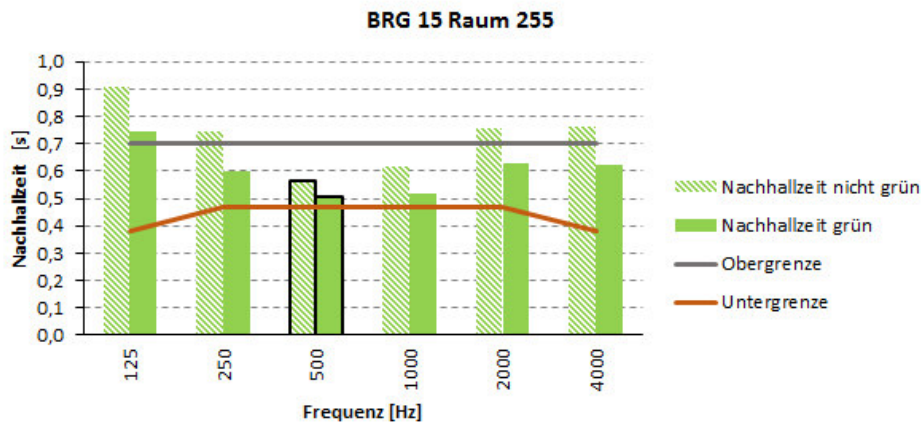


Abb. 8.1: Ergebnis der Messungen im leeren Klassenzimmer vor und nach Errichtung der Begrünungssysteme. Ausschlaggebend ist die Frequenz mit 500Hz. Für T_{soll} wurde ein Wert, in Abhängigkeit vom Raumvolumen (vgl. **Abb. 2.3**), um die 0,6s ermittelt. Beide Messungen liegen unterhalb der Richtnachhallzeit, halten aber die Forderung lt. DIN 18041 (ÖNORM B8115-3) nach einem Mindestlevel von -20% in den Oktavbänden 250-2000Hz ein.

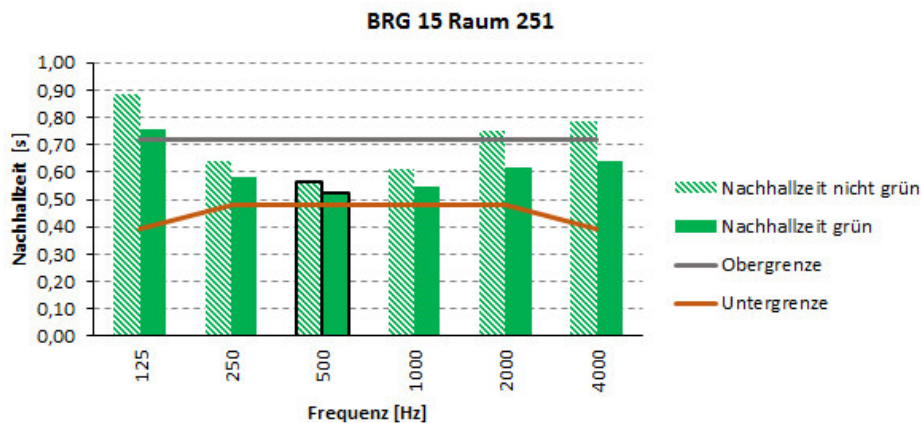


Abb. 8.2: Ergebnis der Messungen im leeren Klassenzimmer vor und nach Errichtung der Begrünungssysteme. Ausschlaggebend ist die Frequenz mit 500Hz. Für T_{soll} wurde ein Wert, in Abhängigkeit vom Raumvolumen (vgl. **Abb. 2.7**), um die 0,6s ermittelt. Beide Messungen liegen unterhalb der Richtnachhallzeit, halten aber die Forderung lt. DIN 18041 (ÖNORM B8115-3) nach einem Mindestlevel von -20% in den Oktavbänden 250-2000Hz ein.

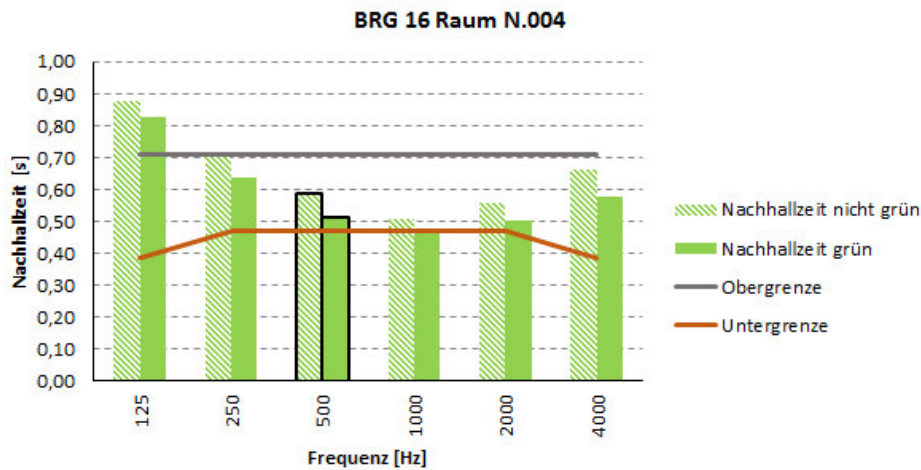


Abb. 8.3: Ergebnis der Messungen im leeren Klassenzimmer vor und nach Errichtung der Begrünungssysteme. Ausschlaggebend ist die Frequenz mit 500Hz. Für T_{soll} wurde ein Wert, in Abhängigkeit vom Raumvolumen (vgl. **Abb. 2.10**), um die 0,59s ermittelt. Beide Messungen liegen unterhalb der Richtnachhallzeit, halten aber die Forderung lt. DIN 18041 (ÖNORM B8115-3) nach einem Mindestlevel von -20% in den Oktavbänden 250-2000Hz ein.

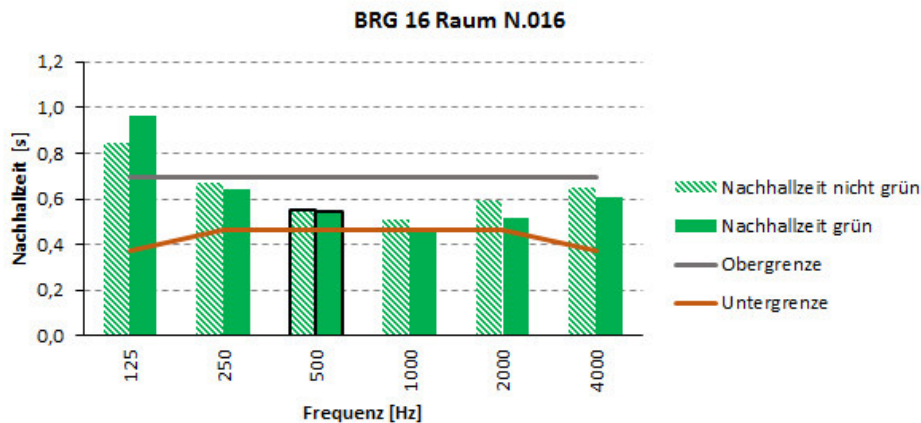


Abb. 8.4: Ergebnis der Messungen im leeren Klassenzimmer vor und nach Errichtung der Begrünungssysteme. Ausschlaggebend ist die Frequenz mit 500Hz. Für T_{soll} wurde ein Wert, in Abhängigkeit vom Raumvolumen (vgl. **Abb. 2.13**), um die 0,58s ermittelt. Beide Messungen liegen unterhalb der Richtnachhallzeit, halten aber die Forderung lt. DIN 18041 (ÖNORM B8115-3) nach einem Mindestlevel von -20% in den Oktavbänden 250-2000Hz ein.

Tab. 8.1: Zusammenfassung der relevanten Größen für die Nachhallzeit der Grünklassen beider Schulen

| Klassenraum | 255, BRG 15 | 251, BRG 15 | N.004, BRG 16 | N.016, BRG 16 |
|---|-------------|-------------|---------------|---------------|
| Frequenz /s | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Nachhallzeit nicht grün s | 0,56 | 0,56 | 0,59 | 0,55 |
| Nachhallzeit grün s | 0,51 | 0,53 | 0,52 | 0,55 |
| Raumlänge m | 9,21 | 8,48 | 7,52 | 7,82 |
| Raubbreite m | 7,85 | 9,59 | 7,80 | 8,7 |
| Raumhöhe m | 3,2 | 3,15 | 3,20 | 3,21 |
| Volumen Raum m ³ | 231,49 | 256,17 | 187,78 | 218,15 |
| Alle Oberflächen Raum m ² | 253,9 | 276,49 | 215,43 | 241,92 |
| Fläche Begrünung | 8,75 | 6,12 | 10,00 | 6,12 |
| Äquivalente Schallabsorptionsfläche nicht grün m ² | 67,08 | 74,23 | 51,96 | 64,65 |
| Äquivalente Schallabsorptionsfläche grün m ² | 74,41 | 79,28 | 59,37 | 64,85 |
| Alpha gesamter Raum nicht grün | 0,26 | 0,27 | 0,24 | 0,27 |
| Alpha gesamter Raum grün | 0,29 | 0,29 | 0,28 | 0,27 |
| Alpha Absorber | 0,13 | 0,18 | 0,12 | 0,17 |
| Schallpegelminderung dL dB | 0,45 | 0,29 | 0,58 | 0,01 |
| Reduktion der Nachhallzeit | 10% | 6% | 12% | 0% |

9 Konklusion

Bei der Raumakustik hat sich gezeigt, dass die Innenwandbegrünungssysteme beide die Nachhallzeit verringern, wobei der Schallabsorptionsgrad α für das Vliestaschensystem am größten ist während aufgrund der Dimensionierung der Trogsystemelementenfläche, diese zu einer deutlicheren Reduktion führen. Es ist demnach wichtig diese in der Planung beim Hochrüsten oder Neubau zu berücksichtigen. Ob sich die Begrünung für die Senkung der Kohlenstoffdioxidkonzentration wirklich eignet, lässt sich mit dieser Auswertung nicht eindeutig sagen. Einzig mit einer mechanischen Belüftung mit einem konstanten Luftwechsel kann der Kohlenstoffdioxidgehalt eindeutig gesenkt werden. Es müsste für ein klares Ergebnis für gewisse Jahreszeiten einen kurzen Zeitraum geben in dem ein strikter Lüftungsplan eingehalten werden muss, um Gewissheit zu bekommen. Dazu wären auch Sensoren an den Fenstern und Türen hilfreich, die Aufschluss darüber geben ob und wie lange eine Öffnung einen Luftaustausch ermöglicht.

Beim Taupunkt hat sich gezeigt, dass die Temperaturen gering höher liegen als im Referenzraum. Im BRG 15 kann es unter Umständen durch die extrem hohen Taupunkttemperaturen im Sommer kritisch werden. Nichts desto trotz birgt die Situation bisher keiner gesundheitlichen Gefahr durch Schimmelpilzsporen. Dies mag an der Luftwechslungsrate durch das Lüften in beiden Schulen liegen. Interessant wäre der Vollständigkeit halber die Temperaturentwicklung an der Außenwandoberfläche im Innenraum mit dem Taupunkt zu vergleichen, um ein Bild davon zu bekommen ob Wasserkondensat zu einem Problemfall werden könnte.

In Bezug auf die Lufttemperatur tragen die Pflanzen ganz offensichtlich zu einer Kühlung der Umgebungsluft bei. Diese reicht dennoch nicht im Sommer aus, um für die angepeilte Behaglichkeit zu sorgen. Eventuell würde eine Klimaanlage einen vorteilhaften Synergieeffekt in beiden Klassen zustande bringen. In den hygrothermischen Streudiagrammen wäre eine Verlagerung der Clusterwolke durch die kühlere Luft und möglicherweise etwas geringere Luftfeuchte, zentral in die behagliche Zone nicht unrealistisch. Es hat sich weiter gezeigt, dass die Belüftungsanlage zu einer größeren Differenz der Innenlufttemperatur zwischen der Sommer- und Winterzeit führt. Weniger anfällig ist in dieser Situation die natürliche Belüftung. Bei der Luftfeuchte ist auch erwartungsgemäß der Vorteil einer Begrünung zu beobachten. Die Verbesserung ist allzu deutlich. Im Hinblick auf den Aspekt welche Belüftung nun sich dabei etablieren kann, so muss es ohne zu zögern die Natürliche sein. Das Trogsystem trumpft bei diesen Gesichtspunkten.

Im Großen und Ganzen kann aus dem Projekt eine positive Bilanz aus der Inklusion von Pflanzen in der Schulklasse gezogen werden. Die Grünwand wird den Erwartungen gerecht. Profitieren wird aus meiner Sicht, der Einsatz von solchen Innenwandbegrünungssystemen vor allem ein Gebäude mit natürlicher Belüftung, außer die mechanische Belüftungsanlage verfügt über eine zusätzliche Luftfeuchterückgewinnung. Ein solcher Vergleich würde den Erkenntnishorizont ein wenig erweitern und andere Schlussfolgerungen zulassen.

Literaturangabe

- [1] Interpretieren der wichtigsten Ergebnisse für Boxplot; <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/graphs/how-to/boxplot/interpret-the-results/key-results/>
Zugriff: 08.12.2018
- [2] Normalverteilung; <https://matheguru.com/stochastik/normalverteilung.html>
Zugriff 09.12.2018
- [3] Schimmel die Ursachen; <https://www.hausjournal.net/schimmel-ursachen>
Zugriff 12.12.2018
- [4] Was ist der Taupunkt?;
<https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundlagen/bauphysik/was-ist-der-taupunkt/>
Zugriff am 12.12.2018
- [5] Sedlbauer, K. und andere, 2006. Raumklima und Innovation. Eine Aufgabe der Bauphysik. In: Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz 51. 2006 Heftnummer 57, S.9-16 [Zugriff am 12.12.2018]. Fraunhofer Institut. ISSN: 0341-0293. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-53588.html>
- [6] Dentel, Arno und Udo Dietrich, keine Angab zum Erscheinungsjahr. Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden. Hamburg: Hafen City Universität. [Zugriff am 13.12.2018] Verfügbar unter: https://rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation_Thermische_Behaglichkeit.pdf
- [7] Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluft-hygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden, 2008. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz 51 (11, 2008): 1358-1369. Springer Medizin Verlag 2008
- [8] Sayers JA, Holland RL, Smith REA, Keatinge, WR, 1987. Effects of carbon dioxide on mental performance. Journal of applied physiology. 1987, 63(1): 25-30.
- [9] Raumakustik im Kindergarten;
<http://www.proholz.at/zuschnitt/37/haste-toene-raumakustik-im-kindergarten/>
[Zugriff am 13.12.2018]
- [10] Wolverton, B.C. und andere, 1989. Interior Landscape plants for indoor air pollution abatement. National Aeronautics and Space Administration, 1989.
- [11] Wie Pflanzen schwitzen;
<https://www.pflanzenforschung.de/index.php?CID=5876>
[Zugriff am 16.12.2018]
- [12] Monreal, M. und Kerstjens, K.-H., 1995. Pflanzen im Raum schlucken viel Schall: Positive schallakustische Wirkung. In: DeGa Innenraumbegrünung. 1995 (16), S.931-933. [Zugriff am 16.12.2018]. Verfügbar unter: <https://www.dghk.net/datenbank/Monreal+und+Kerstjens+1995.PDF>
- [13] Luftwärmetauscher: Aufbau, Funktion, Einsatz
<https://heizung.de/heizung/wissen/luft-waermetauscher-aufbau-funktion-einsatz/>
[Zugriff am 20.01.2019]
- [14] United Nations – Department of Economic and Social Affairs/Population Division. World Urbanization Prospects: The 2011 Revision. Technical report, New York, 2012
- [15] Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2015. Energieeffizienz und Gesundheit: Hand in Hand zum optimalen Raumklima. In: Pressinformation. 2015, 10. März, S. 1-4. [Zugriff am 20.01.2019]. Verfügbar unter: https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Presseinformationen/10032015_Literaturstudie_RK_finale.pdf

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|-------|
| 2.1 | Ansicht Schulgebäude Diefenbachgymnasium BRG 15 | S. 3 |
| 2.2 | Schulklasse BRG 15 Raum 255, Trogsystem | S. 4 |
| 2.3 | Grundriss BRG 15 Raum 255, Trogsystem | S. 5 |
| 2.4 | Schulklasse BRG 15 Raum 253, Referenzraum | S. 5 |
| 2.5 | Grundriss BRG 15 Raum 253, Referenzraum | S. 6 |
| 2.6 | Schulklasse BRG 15 Raum 251, Vliestaschensystem | S. 7 |
| 2.7 | Grundriss BRG 15 Raum 251, Vliestaschensystem | S. 7 |
| 2.8 | Ansicht Schulgebäude Schuhmeierplatz BRG 16 | S. 8 |
| 2.9 | Schulklasse BRG 16 Raum N.004, Trogsystem | S. 9 |
| 2.10 | Grundriss BRG 16 Raum N.004, Trogsystem | S. 9 |
| 2.11 | Grundriss BRG 16 Raum N.005, Referenzraum | S.10 |
| 2.12 | Schulklasse BRG 16 Raum N.016, Vliestaschensystem | S. 11 |
| 2.13 | Grundriss BRG 16 Raum N.016, Vliestaschensystem | S. 11 |
| 4.1 | Beispiel Boxplots | S. 19 |
| 4.2 | Beispiel Normalverteilung | S. 20 |
| 5.1 | Lufttemperaturen BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 23 |
| 5.2 | Lufttemperaturen BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 23 |
| 5.3 | Lufttemperaturen BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 24 |
| 5.4 | Relative Luftfeuchtigkeit BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 24 |
| 5.6 | Relative Luftfeuchtigkeit BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 24 |
| 5.7 | Relative Luftfeuchtigkeit BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 25 |
| 5.8 | Absolute Luftfeuchtigkeit BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 25 |
| 5.9 | Absolute Luftfeuchtigkeit BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 26 |
| 5.10 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 253 Schuljahr 2017/2018, Streudiagramm | S.26 |
| 5.11 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 253 Schuljahr 2017/2018, Kreisdiagramm | S. 27 |
| 5.12 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 251 Schuljahr 2017/2018, Streudiagramm | S. 27 |
| 5.13 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 251 Schuljahr 2017/2018, Kreisdiagramm | S. 28 |
| 5.14 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 255 Schuljahr 2017/2018, Streudiagramm | S. 28 |
| 5.15 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 255 Schuljahr 2017/2018, Kreisdiagramm | S. 29 |
| 5.16 | Lufttemperaturen BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 30 |
| 5.17 | Lufttemperaturen BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 31 |
| 5.18 | Lufttemperaturen BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 31 |
| 5.19 | Relative Luftfeuchtigkeit BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 31 |
| 5.20 | Relative Luftfeuchtigkeit BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 32 |
| 5.21 | Relative Luftfeuchtigkeit BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 32 |
| 5.22 | Absolute Luftfeuchtigkeit BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 32 |
| 5.23 | Absolute Luftfeuchtigkeit BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 33 |
| 5.24 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 16 Raum N.005 Schuljahr 2017/2018, Streudiagramm | S. 33 |
| 5.25 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 16 Raum N.005 Schuljahr 2017/2018, Kreisdiagramm | S. 34 |
| 5.26 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 16 Raum N.016 Schuljahr 2017/2018, Streudiagramm | S. 34 |
| 5.27 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 16 Raum N.016 Schuljahr 2017/2018, Kreisdiagramm | S. 35 |
| 5.28 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 16 Raum N.004 Schuljahr 2017/2018, Streudiagramm | S. 35 |
| 5.29 | Hygrothermische Behaglichkeit BRG 16 Raum N.004 Schuljahr 2017/2018, Kreisdiagramm | S. 36 |
| 5.30 | Lufttemperaturen Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 37 |
| 5.31 | Lufttemperaturen Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 37 |

| | | |
|------|--|-------|
| 5.32 | Lufttemperaturen Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 37 |
| 5.33 | Relative Luftfeuchtigkeit Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 38 |
| 5.34 | Relative Luftfeuchtigkeit Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 38 |
| 5.35 | Relative Luftfeuchtigkeit Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 38 |
| 5.36 | Absolute Luftfeuchtigkeit Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 39 |
| 5.37 | Absolute Luftfeuchtigkeit Referenzräume Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 39 |
| 5.38 | Lufttemperaturen Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 39 |
| 5.39 | Lufttemperaturen Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 40 |
| 5.40 | Lufttemperaturen Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 40 |
| 5.41 | Relative Luftfeuchtigkeit Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 40 |
| 5.42 | Relative Luftfeuchtigkeit Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 41 |
| 5.43 | Relative Luftfeuchtigkeit Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 41 |
| 5.44 | Absolute Luftfeuchtigkeit Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 41 |
| 5.45 | Absolute Luftfeuchtigkeit Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 42 |
| 5.46 | Lufttemperaturen Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 42 |
| 5.47 | Lufttemperaturen Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 42 |
| 5.48 | Lufttemperaturen Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 43 |
| 5.49 | Relative Luftfeuchtigkeit Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 43 |
| 5.50 | Relative Luftfeuchtigkeit Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 43 |
| 5.51 | Relative Luftfeuchtigkeit Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 44 |
| 5.52 | Absolute Luftfeuchtigkeit Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Temperaturdiagramm | S. 44 |
| 5.53 | Absolute Luftfeuchtigkeit Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 44 |
| 6.1 | CO ₂ -Konzentration BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 46 |
| 6.1b | CO ₂ -Konzentration BRG 15 Schuljahr 2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 46 |
| 6.2 | CO ₂ -Konzentration BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 46 |
| 6.3 | CO ₂ -Konzentration BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 47 |
| 6.4 | CO ₂ -Konzentration BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 48 |
| 6.4b | CO ₂ -Konzentration BRG 16 Schuljahr 2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 48 |
| 6.5 | CO ₂ -Konzentration BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 48 |
| 6.6 | CO ₂ -Konzentration BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 49 |
| 6.7 | CO ₂ -Konzentration Referenzraum Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 49 |
| 6.8 | CO ₂ -Konzentration Referenzraum Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 50 |
| 6.9 | CO ₂ -Konzentration Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 50 |
| 6.10 | CO ₂ -Konzentration Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 50 |
| 6.11 | CO ₂ -Konzentration Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 51 |
| 6.12 | CO ₂ -Konzentration Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 51 |
| 7.1 | Taupunkt BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 52 |
| 7.2 | Taupunkt BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 53 |
| 7.3 | Taupunkt BRG 15 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 53 |
| 7.4 | Taupunkt BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 54 |
| 7.5 | Taupunkt BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 54 |
| 7.6 | Taupunkt BRG 16 Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 54 |
| 7.7 | Taupunkt Referenzraum Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 55 |
| 7.8 | Taupunkt Referenzraum Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 55 |
| 7.9 | Taupunkt Referenzraum Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 56 |
| 7.10 | Taupunkt Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 56 |
| 7.11 | Taupunkt Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 57 |
| 7.12 | Taupunkt Vliessystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 57 |
| 7.13 | Taupunkt Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Zeit-Konzentrationsdiagramm | S. 58 |
| 7.14 | Taupunkt Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Normalverteilung | S. 58 |
| 7.15 | Taupunkt Trogsystem Schuljahr 2017/2018, Boxplot | S. 58 |
| 8.1 | Nachhallzeit BRG 15 Raum 255 Trogsystem, Balkendiagramm | S. 60 |
| 8.2 | Nachhallzeit BRG 15 Raum 251 Vliessystem, Balkendiagramm | S. 60 |
| 8.3 | Nachhallzeit BRG 16 Raum N.004 Trogsystem, Balkendiagramm | S. 61 |
| 8.4 | Nachhallzeit BRG 16 Raum N.016 Vliessystem, Balkendiagramm | S. 61 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-------|
| 4.1 | Übersicht der Maxima und Minima, Lufttemperatur und absolute Luftfeuchtigkeit, Innen und Außen | S. 18 |
| 5.1 | Vergleich der Hygrothermik in den Schulen mit Bezug auf den Referenzräumen | S. 29 |
| 8.1 | Nachhallzeiten und weitere dazugehörige Größen der begrünten Klassenzimmer | S. 62 |

Anhang

- [A] Raumklimadiagramme der KW 8
- [B] Raumklimadiagramme der KW 23
- [C] Raumklimadiagramme vom 05.10.2018 (Survey)
- [D] Surveyprotokolle BRG 15 und BRG 16

A – Raumklimadiagramme der KW 8

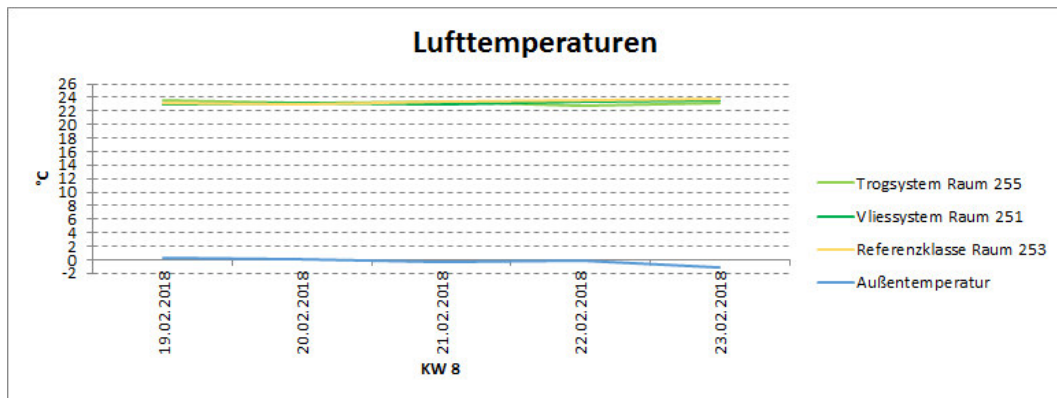


Abb. A1: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die Temperaturen bewegen sich in einem Bereich von 23-24°C während die Außentemperatur um die 0°C liegt.

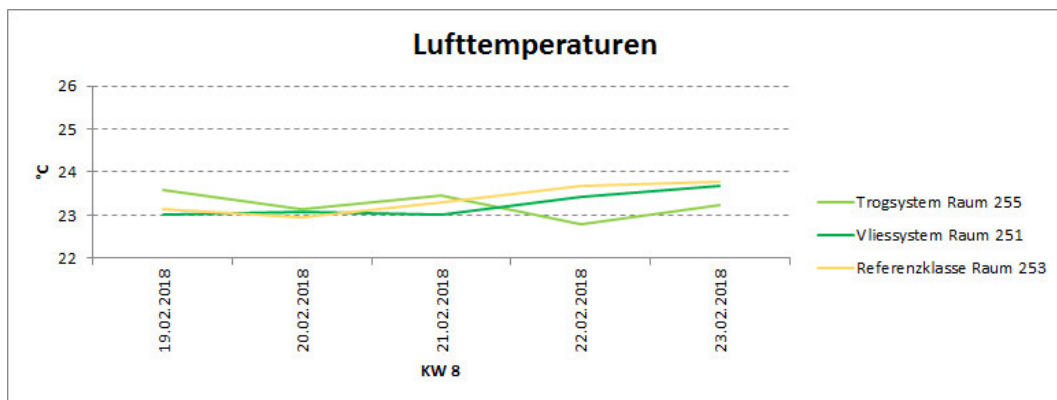


Abb. A2: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Eine genauere Ansicht im Vergleich zu **Abb. A1**. Die Räume weisen grob im Mittel einen Wert um die 23,5°C auf.

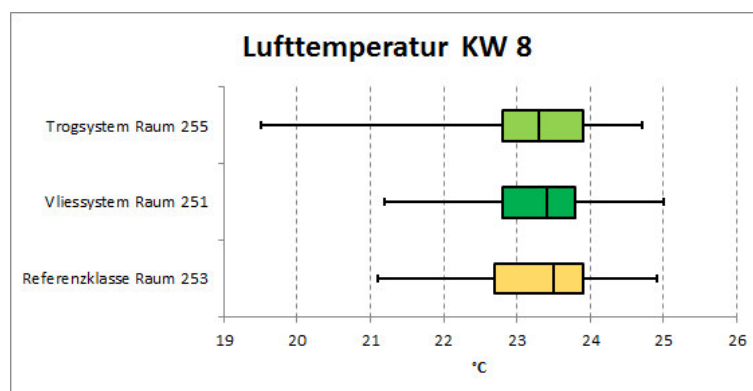


Abb. A3: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. A2** nochmal dar. Im Bereich des 25%- und 75%-Fraktils sind sich die Räume sehr ähnlich. Eine merklich große Abweichung gibt es lediglich im Raum 255 zum Minimum hin.

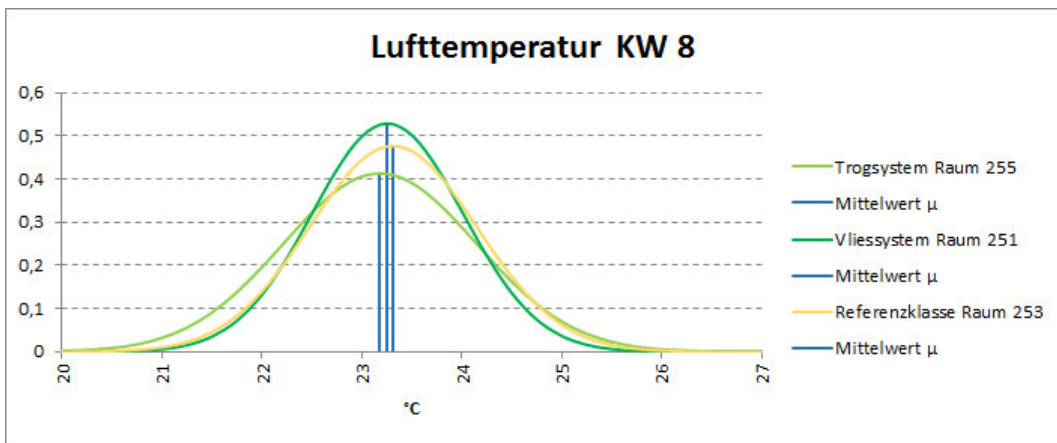


Abb. A3b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. A3** und **A2** wiedergegeben. Die Erwartungswerte liegen eng beieinander. Deutlicher unterscheiden sich die Klassen anhand der Kurvenhöhe.

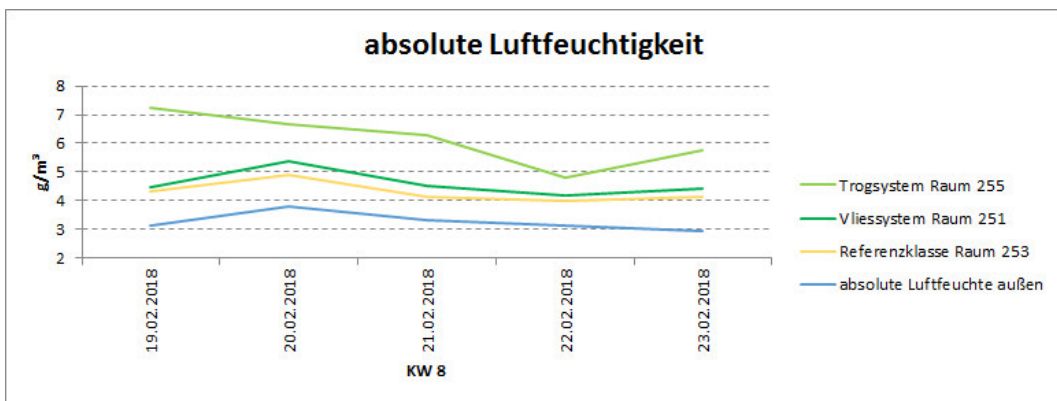


Abb. A4: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die begrünten Räume liegen eindeutig über dem Referenzraum. Bis auf Raum 255 mit den größten Schwankungen, folgen die restlichen Klassen fast den Verlauf der Außenluftfeuchtigkeit. Mittelwerte: Raum 253 $4,37\text{g/m}^3$, Raum 251 $4,54\text{g/m}^3$, Raum 255 $6,04\text{g/m}^3$.

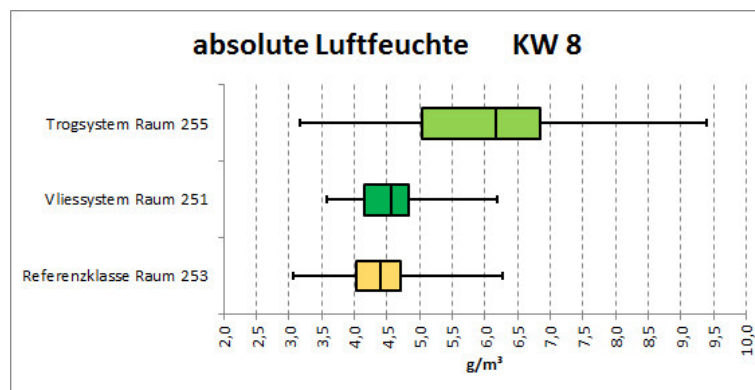


Abb. A5: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. A4**. Verhältnismäßig klein sind die Streuungen der Klassen 251 und 253. Raum 255 weist das höchste Maximum auf.

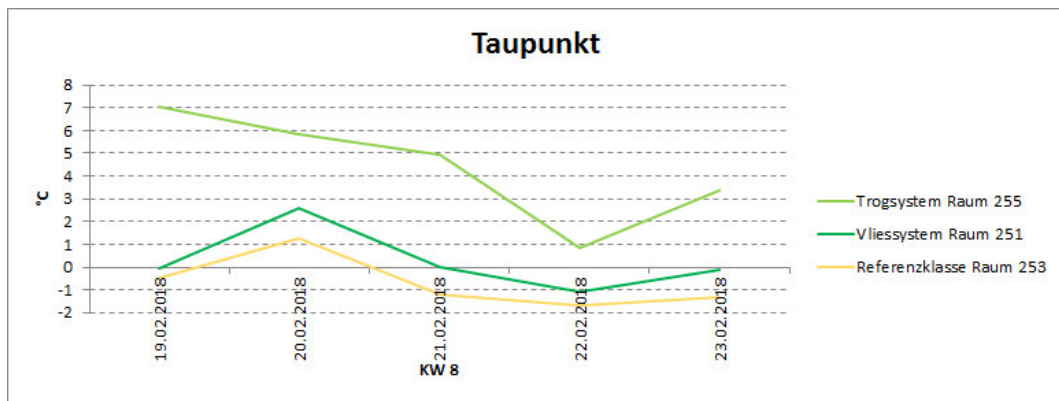


Abb. A6: Gemittelte Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts in der KW 8, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Hier zeichnet sich ein ähnliches Muster wie in **Abb. A4** ab. Raum 255 tanzt aus der Reihe, dagegen verlaufen Raum 253 und 251 fast parallel zueinander.

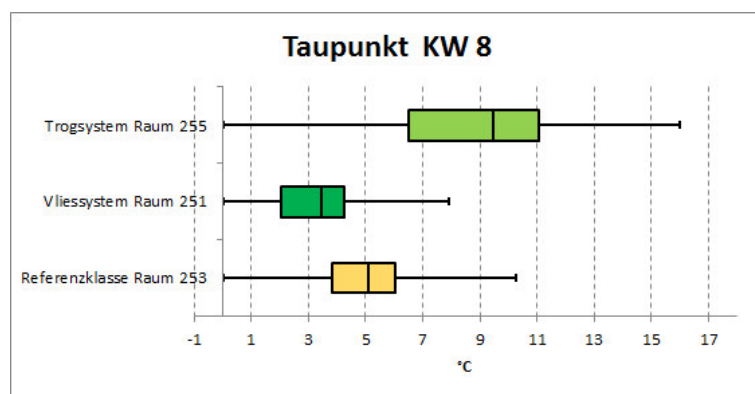


Abb. A7: Boxplot mit den gesamten Werten für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts in der KW 8, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Es beschreibt ganz gut die Ergebnisse aus **Abb. A6**. Die Boxen der Räume 253 und 251 sind größengleich. Eine weitgefächerte Streuung ist in Raum 255 vorzufinden.

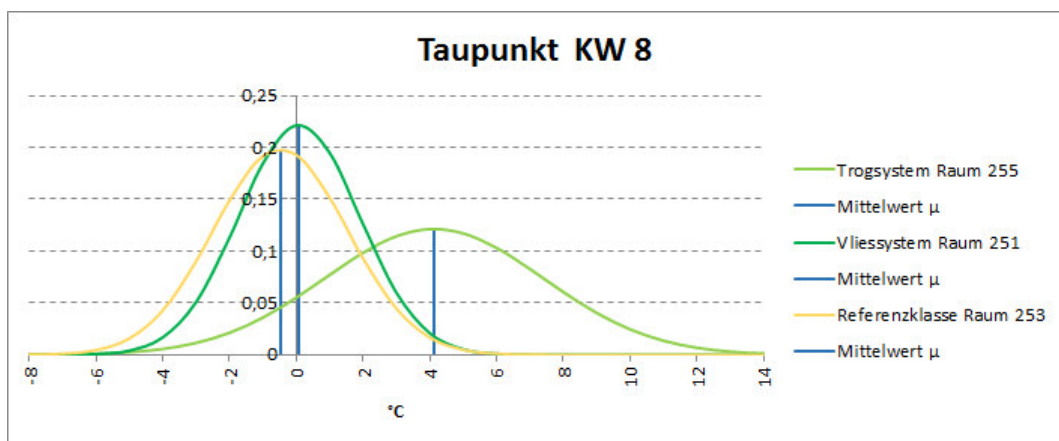


Abb. A7b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. A6** und **A7** wiedergegeben. Ganz offensichtlich liegen die Klassen mit Grünwand über dem Referenzraum.

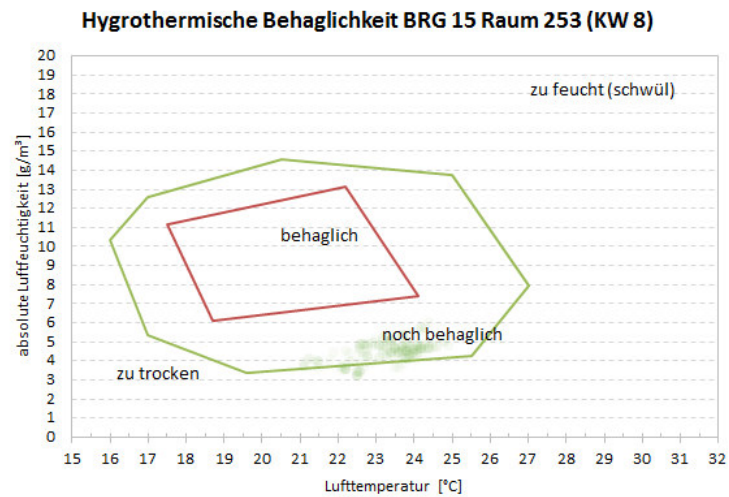


Abb. A8: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 8 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich in der unteren Hälfte. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 21-25°C und 3-6g/m³.

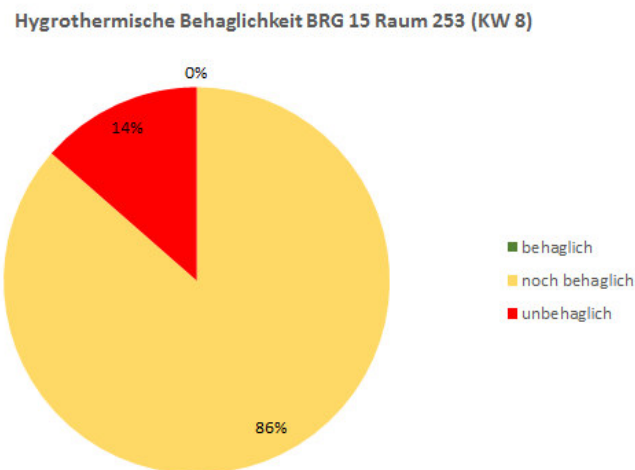


Abb. A9: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.A8** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein sieben Achtel der Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich.

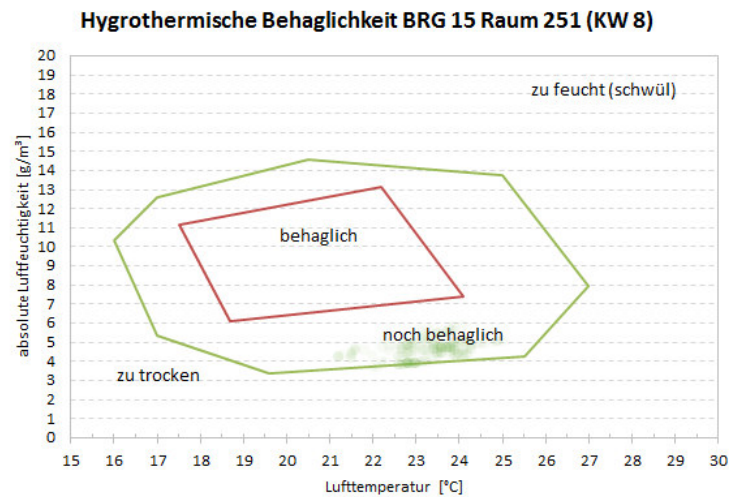


Abb. A10: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 8 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich in der unteren Hälfte. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 21-25°C und 3-6g/m³.

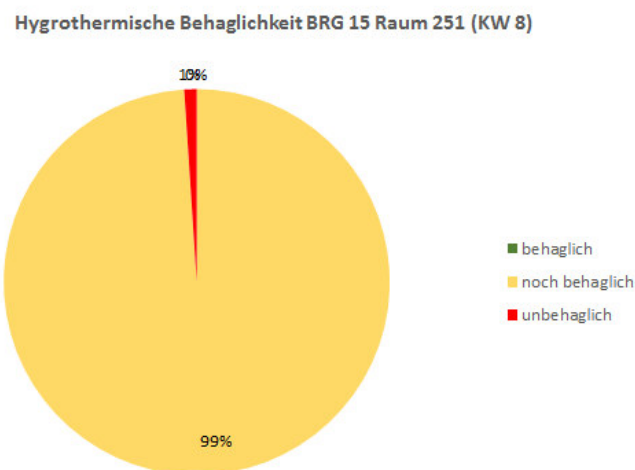


Abb. A11: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.A10** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp alle Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Demzufolge eine Verbesserung gegenüber Raum 253.

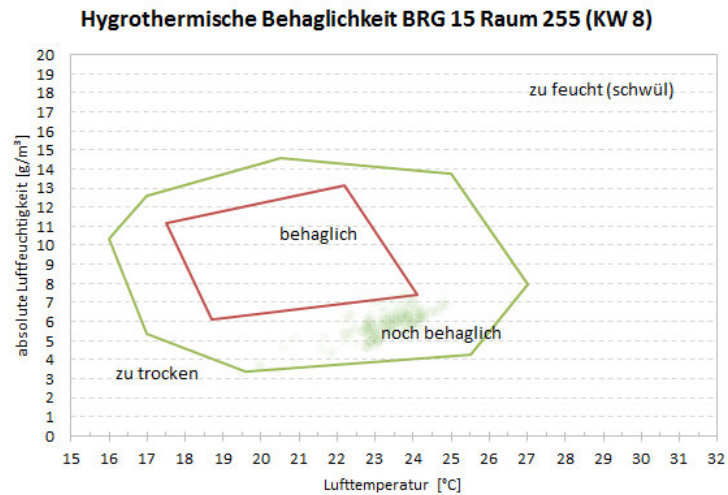


Abb. A12: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 8 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich in der unteren Hälfte. Grob befinden sich die Werte konzentriert im Bereich von 22-25°C und 4-7g/m³.

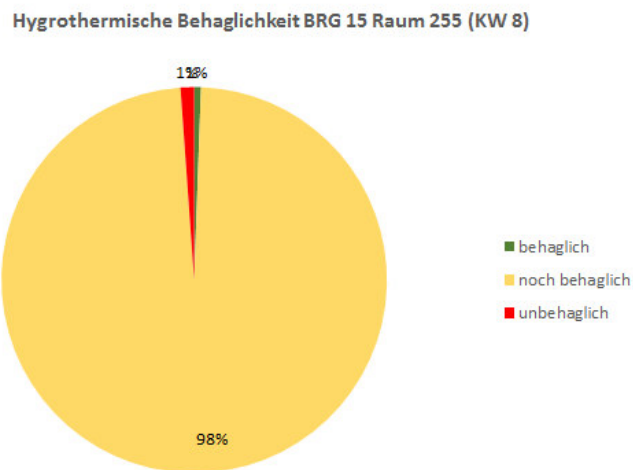


Abb. A13: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.A12** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp alle Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Lediglich befinden sich ein Prozent im behaglichen Bereich. Dementsprechend eine Verbesserung gegenüber Raum 253 und 251.

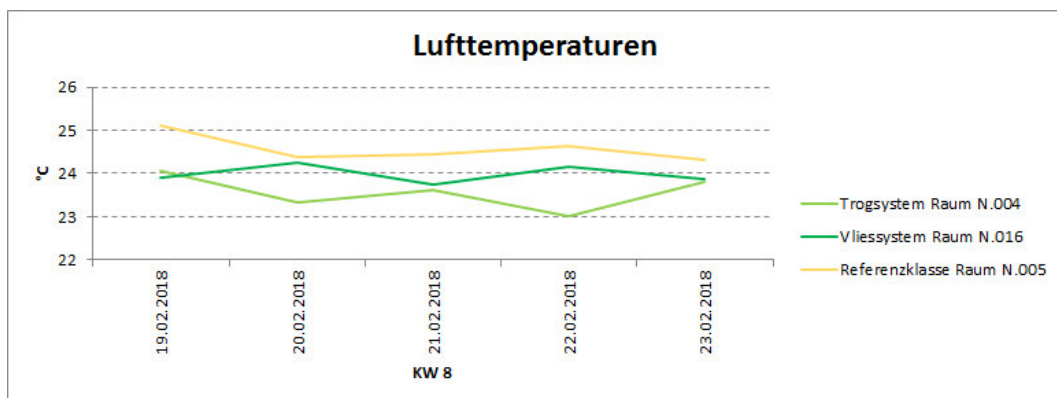


Abb. A14: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Hier bewegen sich die begrünten Räume unterhalb des Referenzraumes. Raum N.004 und N.016 weisen einen gespiegelten Verlauf auf.

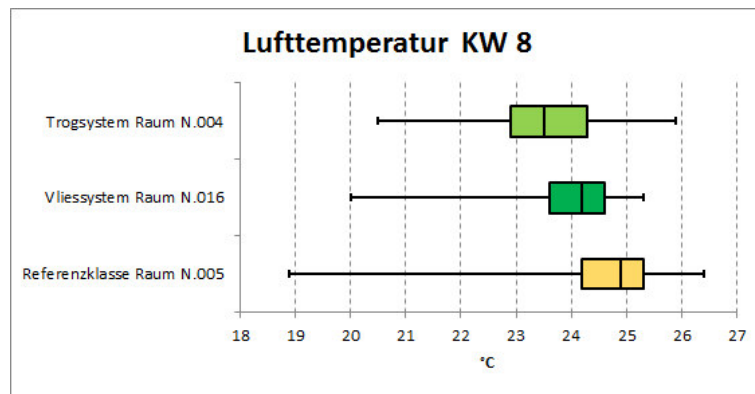


Abb. A15: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. A14** nochmal dar. Die Bereiche zwischen dem 1. und 3. Quartil bewegen sich in etwa im Größenbereich von 1°C. Die weiteste Streuung ist im Raum N.005 zu finden.

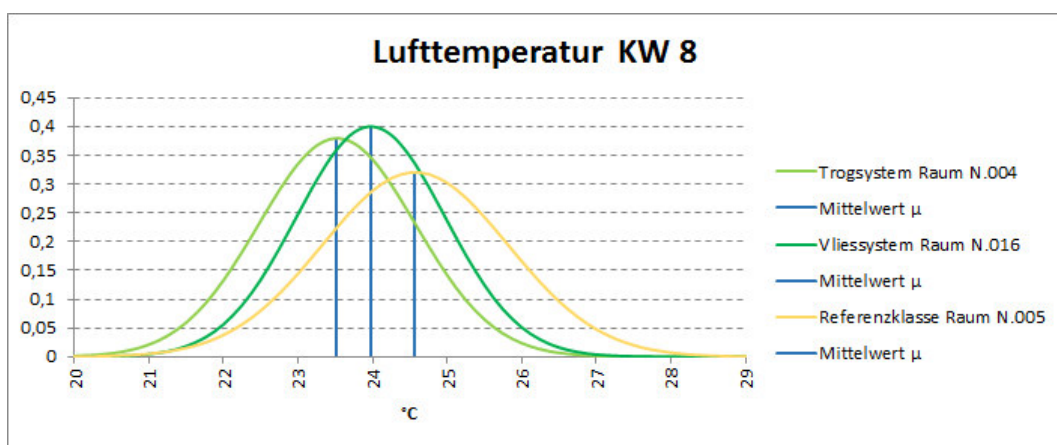


Abb. A15b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. A14** und **A15** wiedergegeben. Beide begrüneten Klassen liegen niedriger mit dem Erwartungswert und haben höher liegenden Wendepunkt.

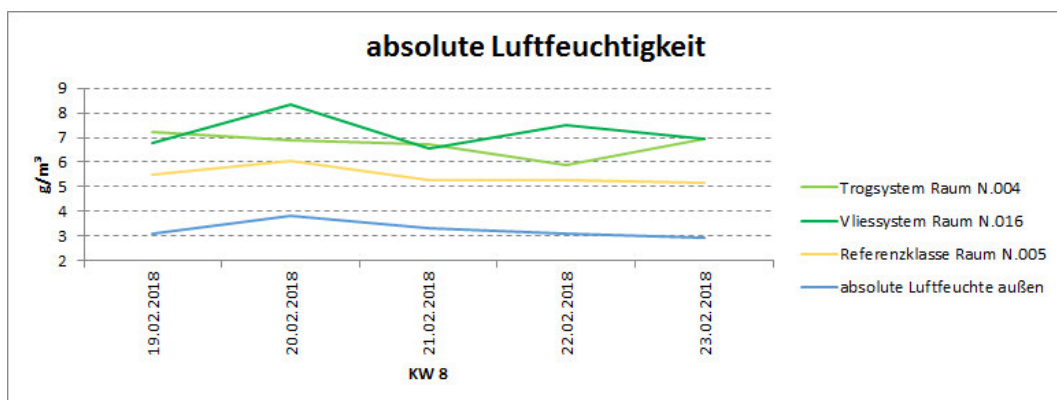


Abb. A16: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Wie bereits bei der Lufttemperatur verlaufen die Diagramme der begrüneten Klassen in einem Rautenmuster zueinander, liegen erwartungsgemäß hier über dem Referenzraum. Mittelwerte: Raum N.005 $5,43\text{g/m}^3$, Raum N.016 $7,18\text{g/m}^3$, Raum N.004 $6,71\text{g/m}^3$.

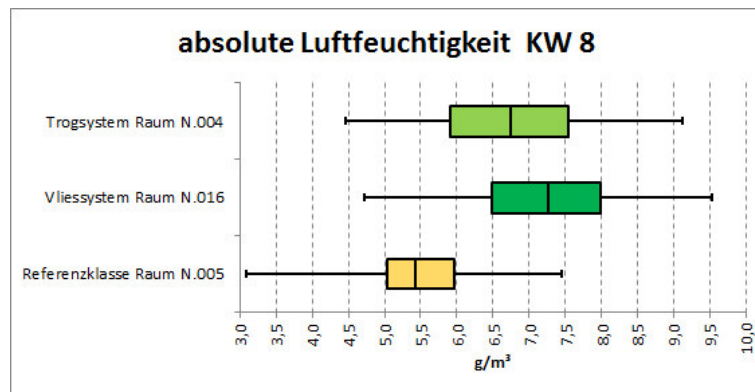


Abb. A17: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. A16**. Raum N.004 und N.016 zeigen im mittleren Bereich in etwa die gleiche Streuung auf. Der Referenzraum liegt deutlich niedriger im Vergleich.

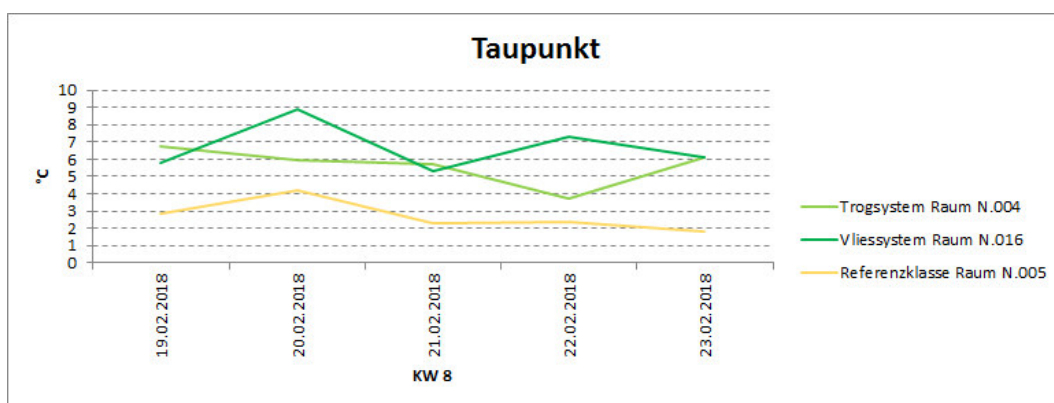


Abb. A18: Gemittelte Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts in der KW 8, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Hier zeichnet sich ein ähnliches Muster wie in **Abb. A16** ab. Die Diagramme der begrünten Klassen verlaufen in einem Rautenmuster zueinander, liegen erwartungsgemäß hier über dem Referenzraum.

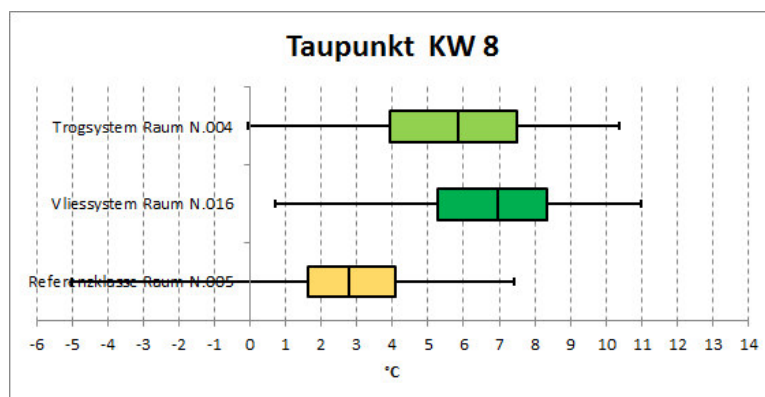


Abb. A19: Boxplot der gesamten Werte für den Taupunkt, welche aus den Messwerten, aufgezeichnet während des Unterrichts in der KW 8, für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ermittelt wurden. Das Resultat aus **Abb. A18** ist hier gut wiedergegeben. Die begrünten Klassen liegen mit einer leichten Differenz von 1°C auseinander.

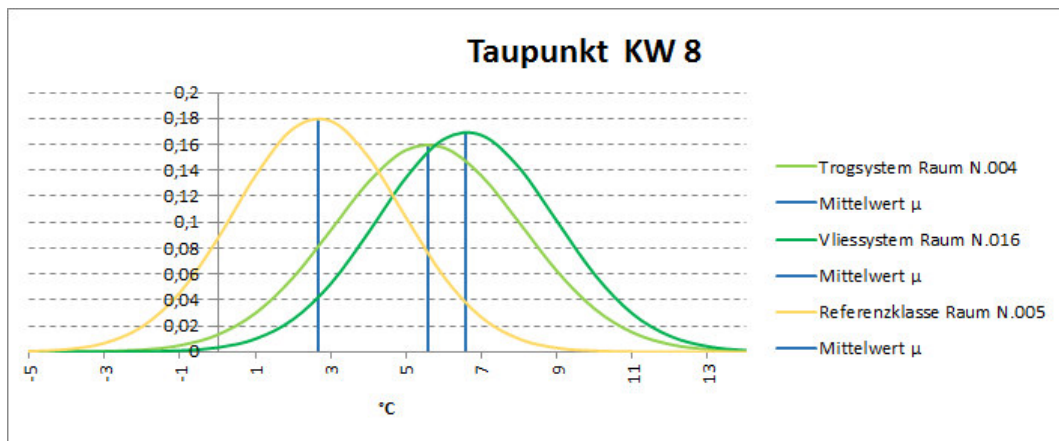


Abb. A19b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. A19** und **A18** wiedergegeben. Beide Klassen mit Grünwand liegen deutlich höher mit dem Mittelwert als die Referenzklasse.

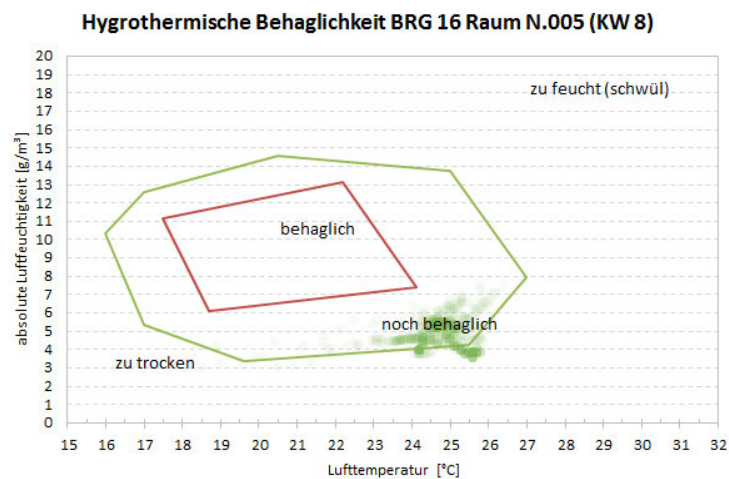


Abb. A20: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 8 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich in der unteren rechten Hälfte. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 23-26°C und 3-6g/m³.

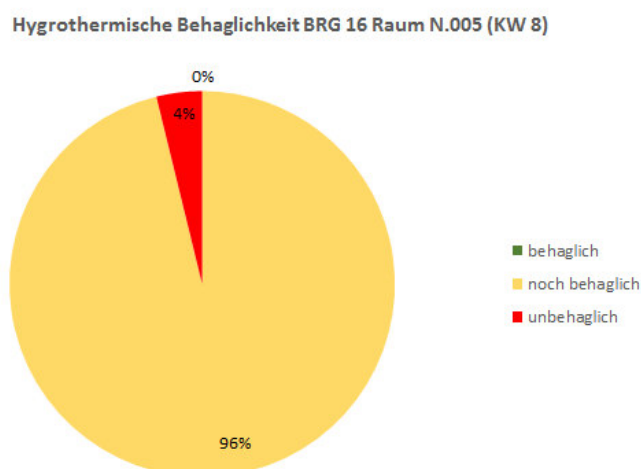


Abb. A21: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.A20** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp alle Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Lediglich befinden sich fünf Prozent im unbehaglichen Bereich.

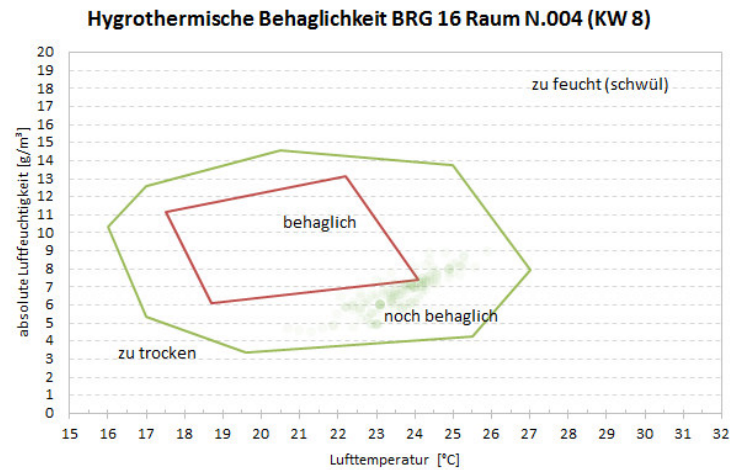


Abb. A22: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 8 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich unterhalb der rechten Ecke des behaglichen Bereichs. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 22-25°C und 5-8g/m³.

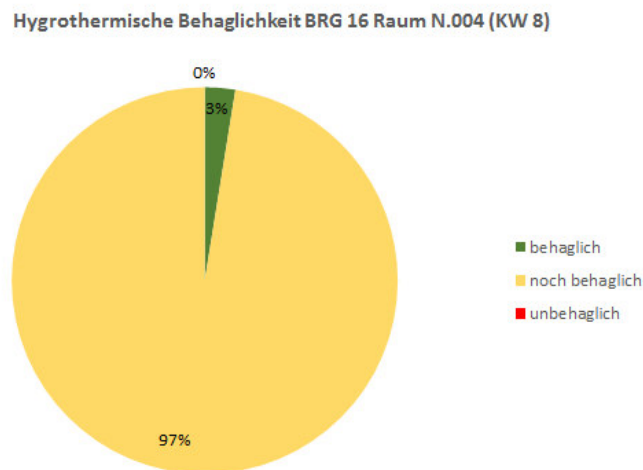


Abb. A23: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.A22** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp alle Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Lediglich befinden sich drei Prozent im behaglichen Bereich. Demzufolge eine Verbesserung gegenüber Raum N.005.

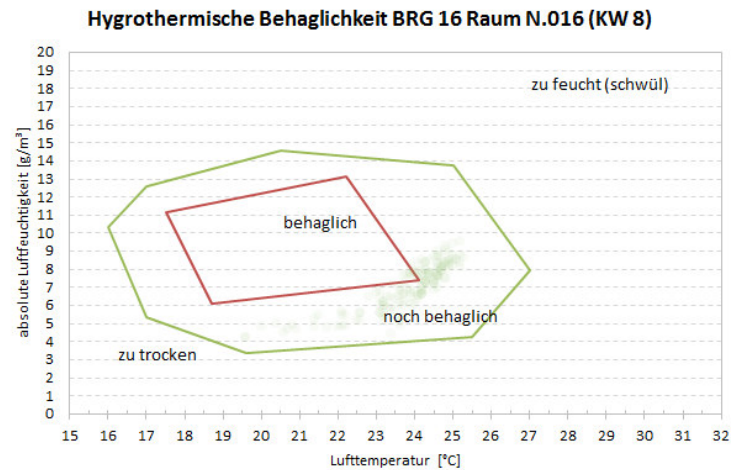


Abb. A24: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 8 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich unterhalb der rechten Ecke des behaglichen Bereichs. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 23-25,5 $^{\circ}\text{C}$ und 5-8 g/m^3 .

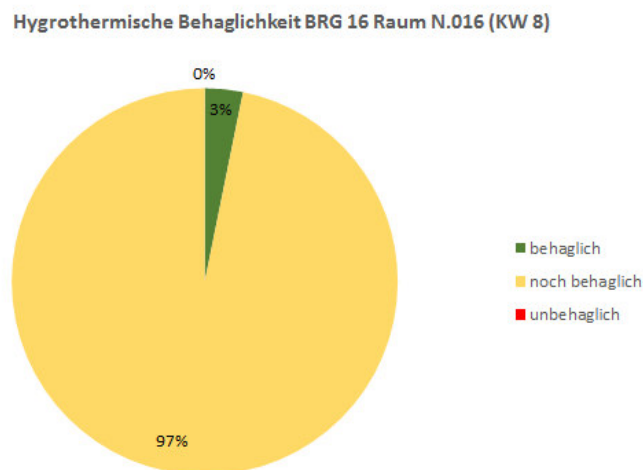


Abb. A25: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.A24** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp alle Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Lediglich befinden sich drei Prozent im behaglichen Bereich. Demzufolge eine Verbesserung gegenüber Raum N.005 und eine gleiche Situation wie in Raum N.004.

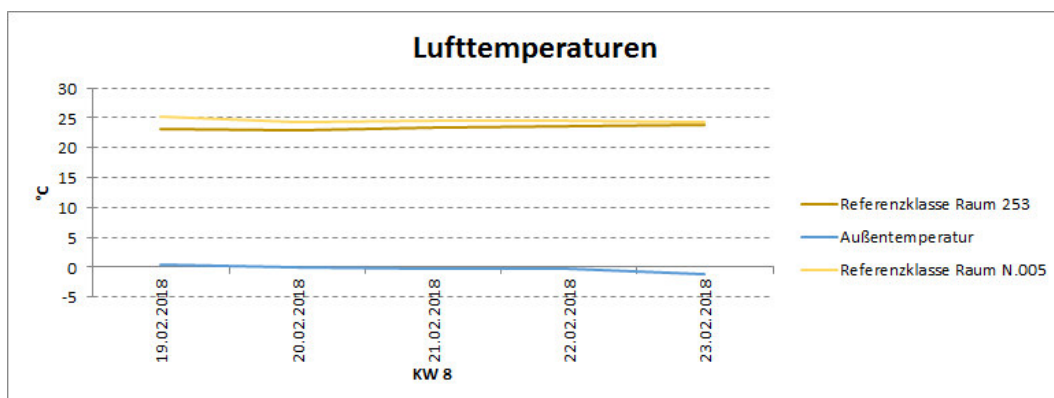


Abb. A26: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Referenzraum des BRG 15 liegt im Mittel ca. 1,5 $^{\circ}\text{C}$ unterhalb dem des Raums N.005.

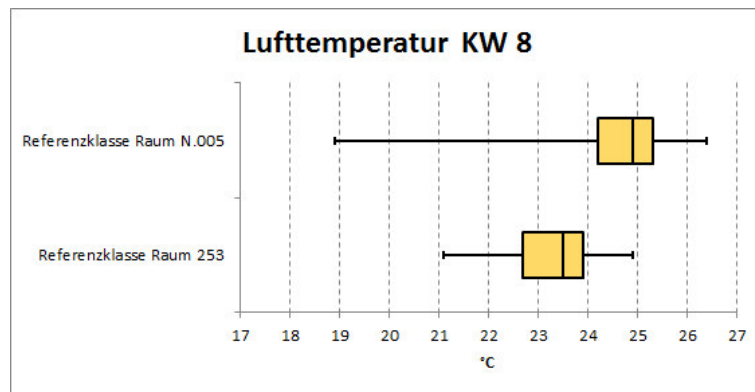


Abb. A27: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. A26** nochmal dar. Der Referenzraum des BRG 16 weist zwischen Minimum und dem 1. Quartil eine weite Streuung auf. Ansonsten ist die Streuung beider Klassen im zentralen Bereich im Größenbereich von etwas mehr als 1°C.

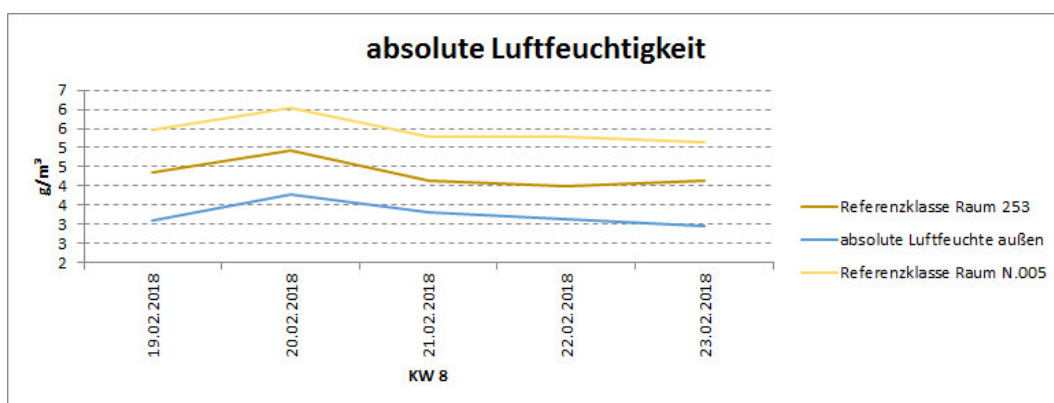


Abb. A28: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die Verläufe sind nahezu parallel. Raum 253 liegt deutlich unter dem Referenzraum von BRG 16.

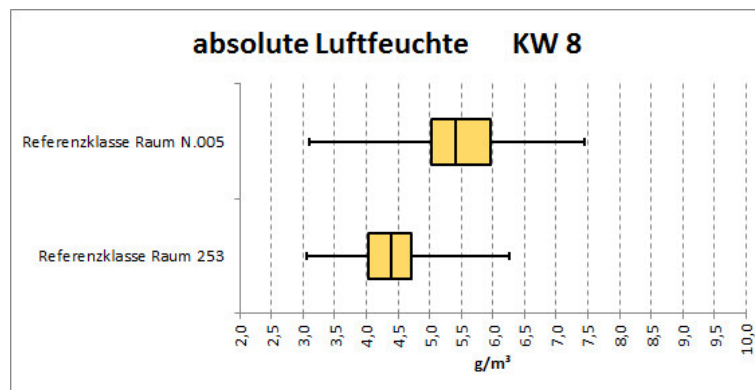


Abb. A29: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. A28**. Die Streuung im Raum 253 ist am geringsten.

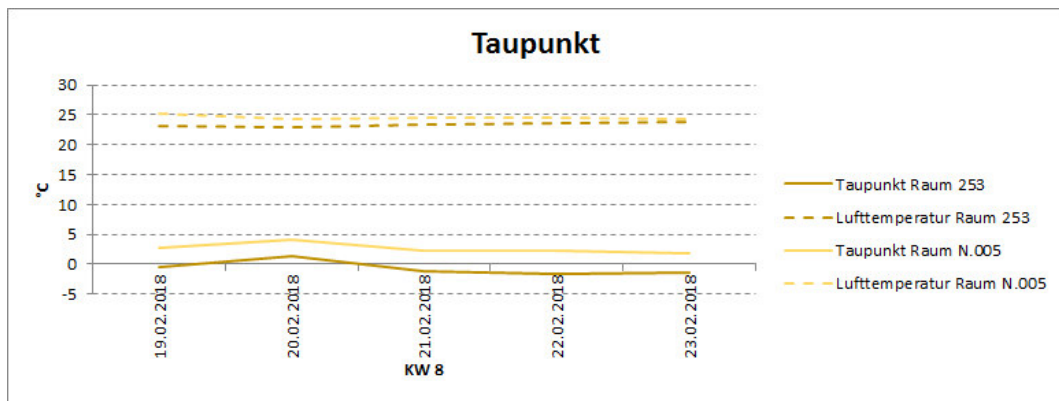


Abb. A30: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Raum 253 hat im Mittel ganz klar den niedrigeren Taupunkt.

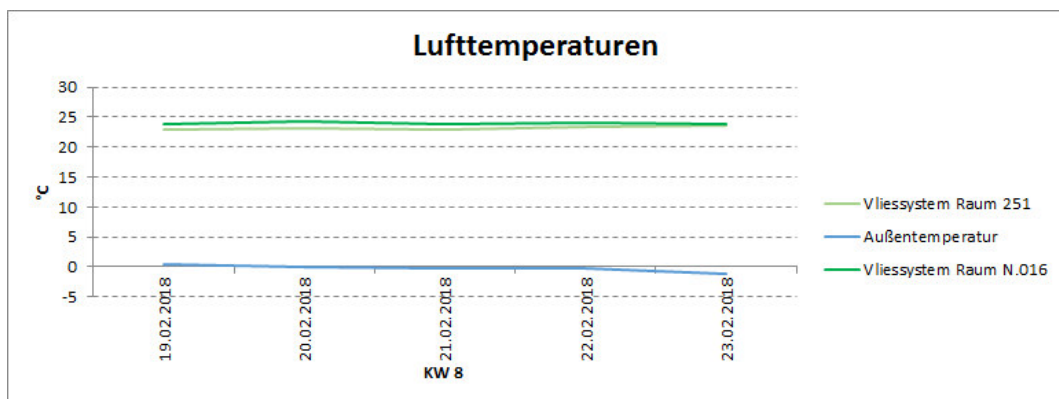


Abb. A31: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Offensichtlich liegt der Raum des BRG 16 im Schnitt über dem Raum 251.

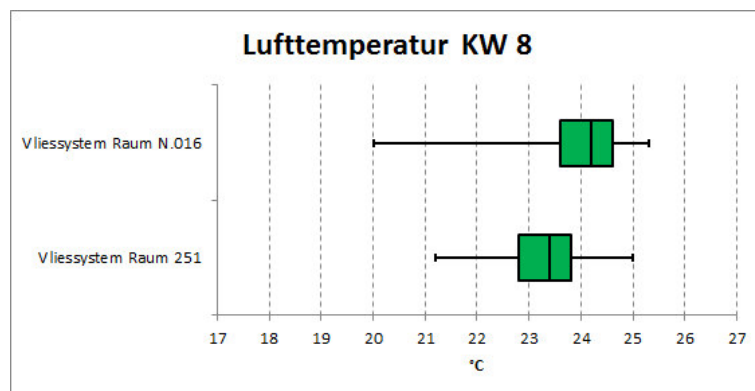


Abb. A32: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. A31** nochmal dar. Der Raum 251 hat ganz klar die kleinste Streuung und liegt im mittleren Bereich um 1°C niedriger.

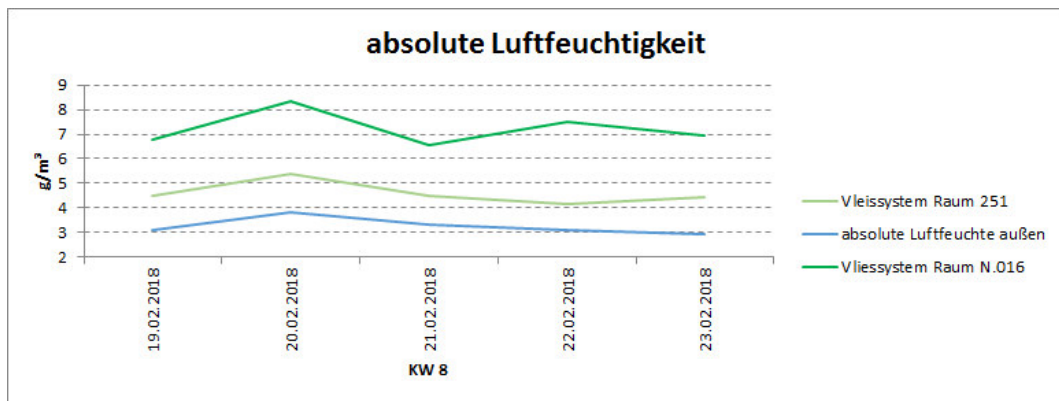


Abb. A33: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Deutlich liegt hier wieder der Raum des BRG 16 über dem des BRG 15. Raum 251 hat einen nahezu parallelen Verlauf zur Außenluftfeuchtigkeit.

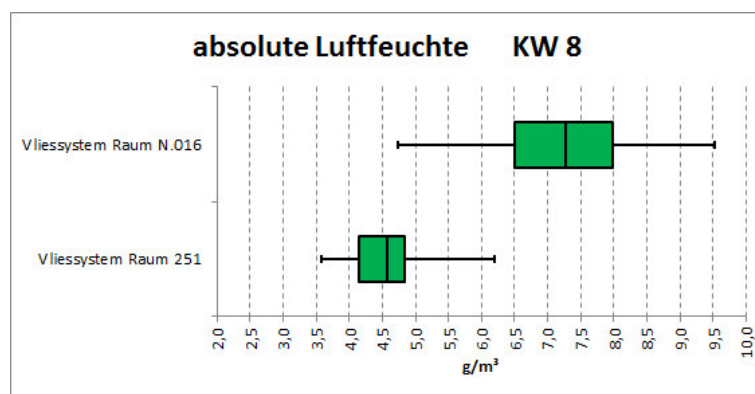


Abb. A34: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. A33**. Auch hier lässt sich die kleine Streuung im Raum des BRG 15 erkennen (vgl. **Abb. A29**).

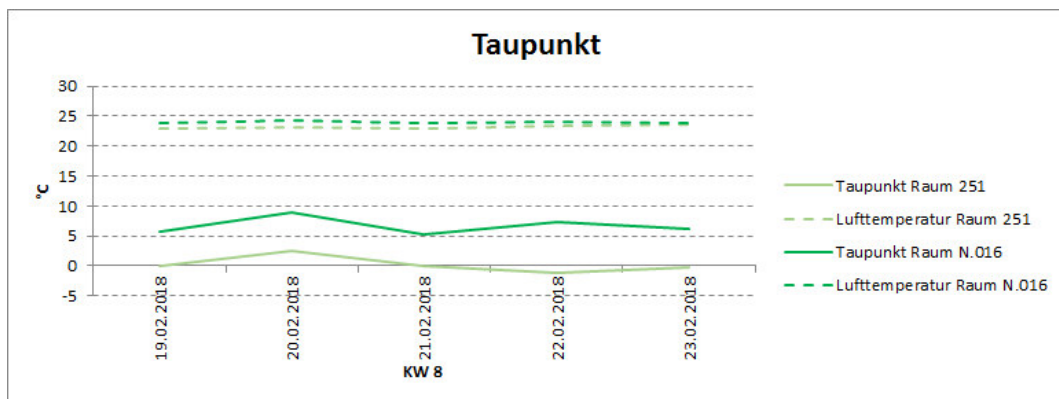


Abb. A35: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Raum 251 hat im Mittel ganz klar den niedrigeren Taupunkt.

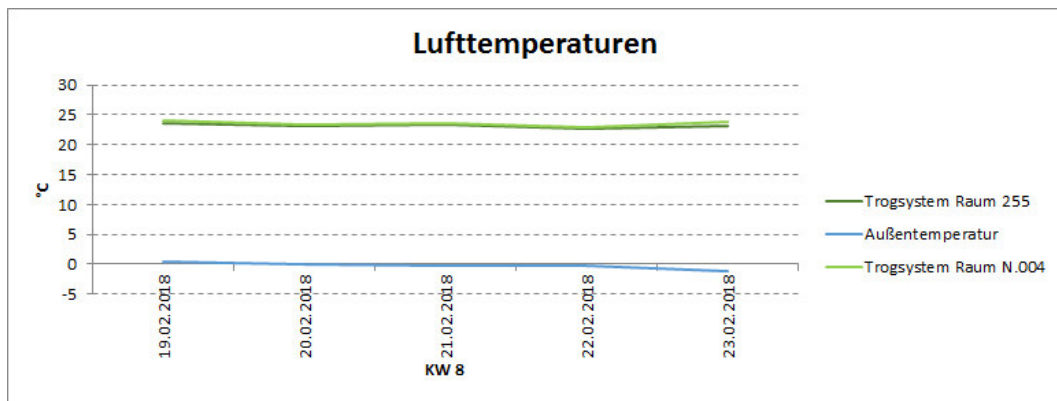


Abb. A36: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Offensichtlich liegt der Raum des BRG 16 im Schnitt über dem Raum 255.

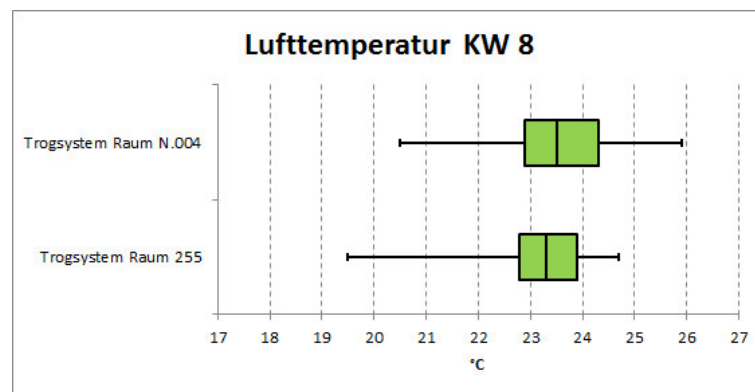


Abb. A37: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. A36** nochmal dar. Die Boxen liegen fast gleich auf und haben im zentralen Bereich in etwa eine ähnliche Größe.

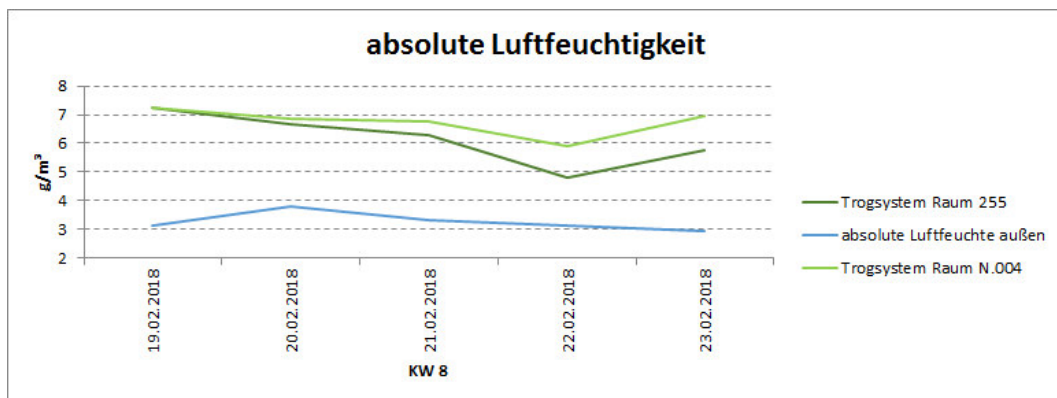


Abb. A38: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Beide Räume zeigen einen ähnlichen Verlauf mit identischem Ursprung.

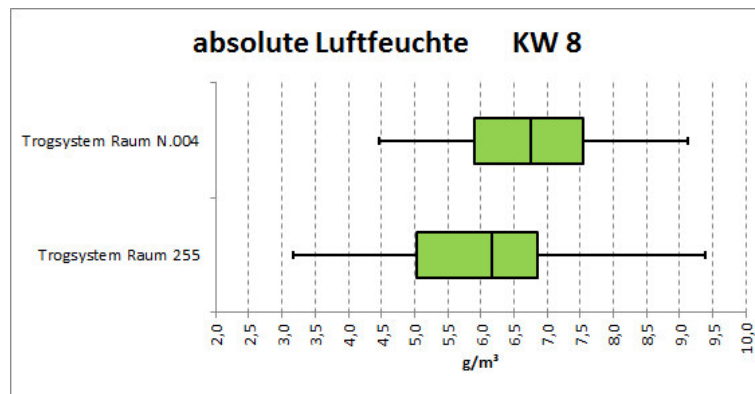


Abb. A39: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 8 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. A38**. Raum 255 liegt im mittleren Bereich niedriger als Raum N.004 und hat eine etwas weitere Streuung.

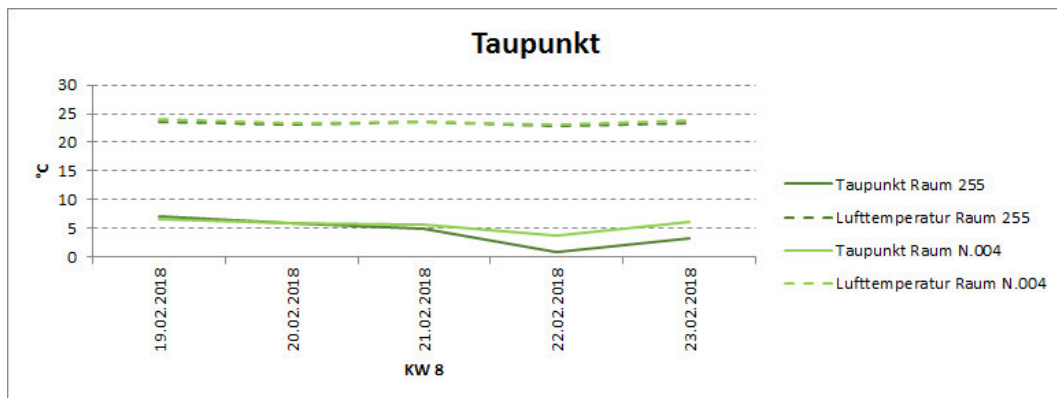


Abb. A40: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Raum 255 hat im Mittel ganz klar den niedrigeren Taupunkt.

B – Raumklima der KW 23

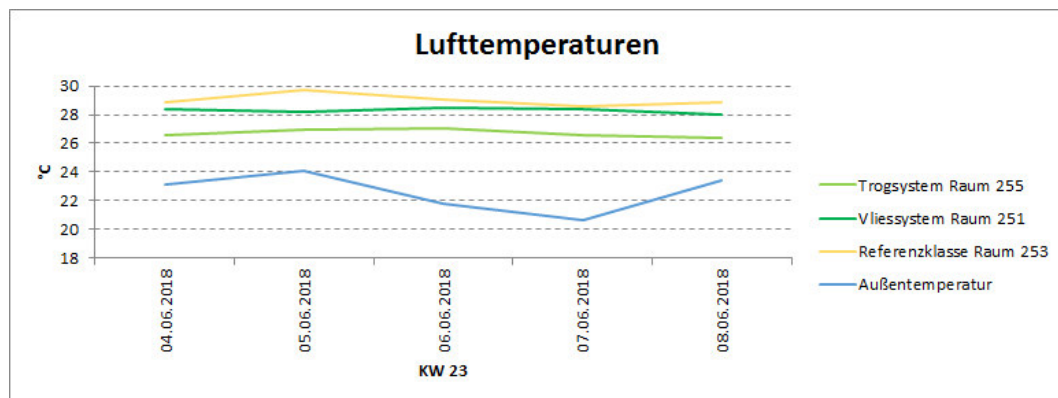


Abb. B1: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die Temperatur in den Klassen bleibt praktisch konstant im Vergleich zur Außentemperatur. Deutlich lässt sich eine im Mittel höhere Temperatur im Referenzraum gegenüber den begrünten Klassen auslesen.

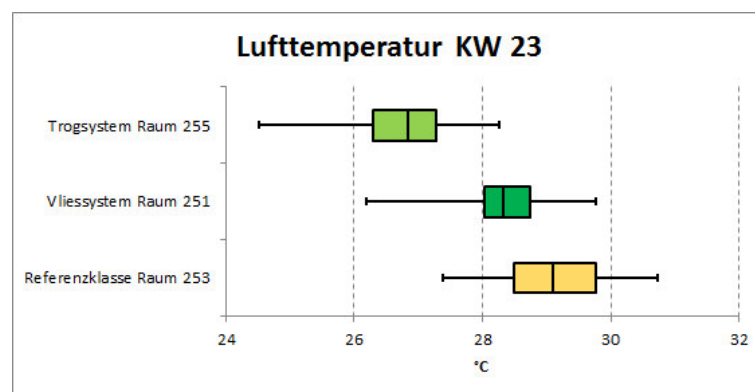


Abb. B2: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. B1** nochmal dar. Die Räume 255 und 251 liegen klar niedriger als die Referenzklasse. Raum 251 hat die kleinste Streuung im zentralen Bereich.

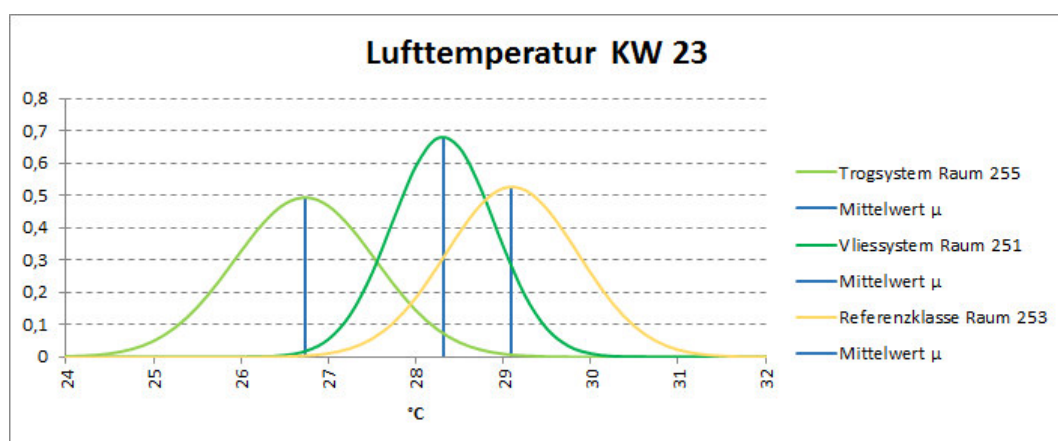


Abb. B2b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. B2** und **B1** wiedergegeben. Die Erwartungswerte der Grünklassen liegen niedriger als dem Referenzraum. Raum 251 hat die geringste Streuung.

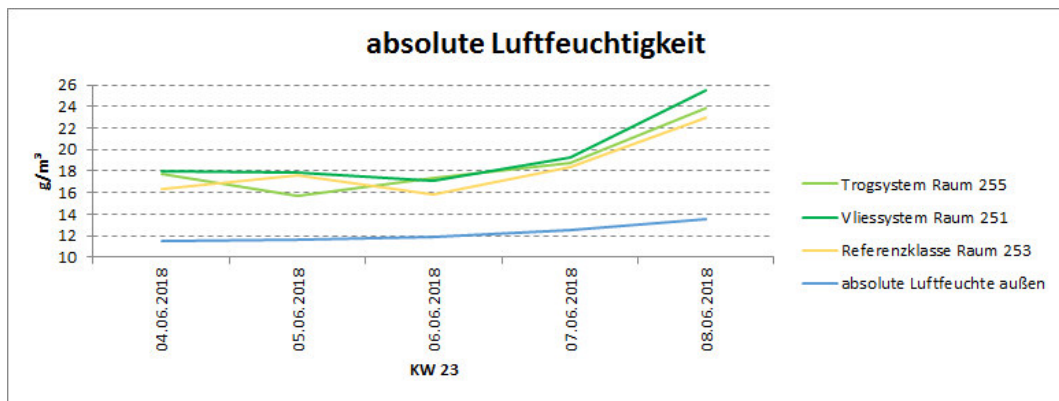


Abb. B3: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Hier liegen die begrünten Räume leicht über dem Referenzraum. Während zum Wochenende die Außenluftfeuchte gering ansteigt, ist die Steigung in den Klassen viel steiler. Mittelwerte: Raum 253 18,04g/m³, Raum 251 19,53 g/m³, Raum 255 18,54 g/m³.

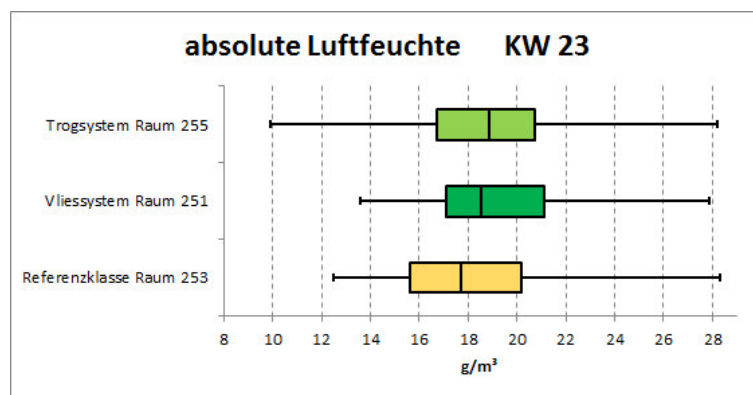


Abb. B4: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B3**. Die Klassen mit Grünwand liegen im Zentrum in etwa gleich auf und alle Räume weisen einen ähnlich hohes Maximum auf.

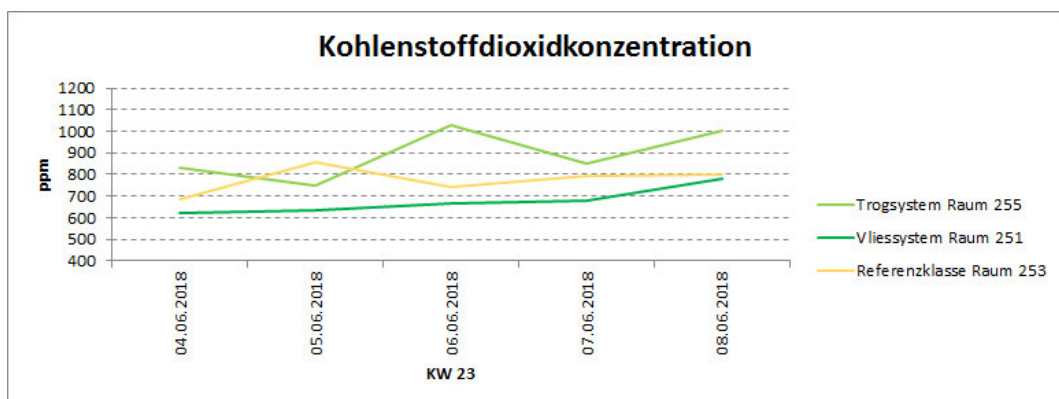


Abb. B5: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Raum 251 liegt über die gesamte Woche unter dem Referenzraum. Raum 255 hat im Schnitt die größte Schwankung.

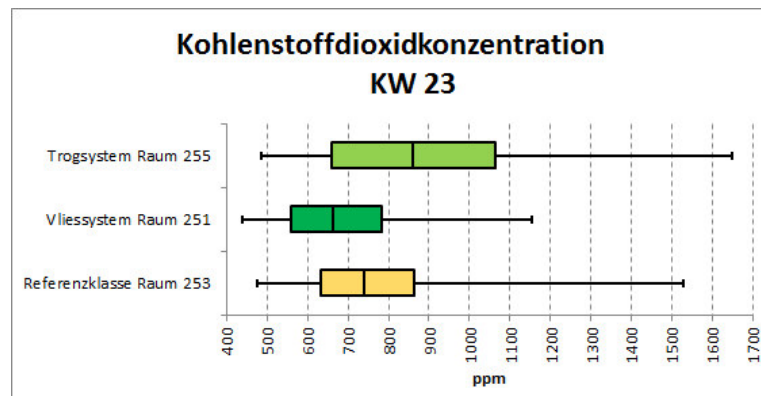


Abb. B6: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B5**. Die deutlich größte im zentralen Bereich und zudem zwischen den Extrema ist im Raum 255 zu erkennen. Niedriger liegen die übrigen Räume.

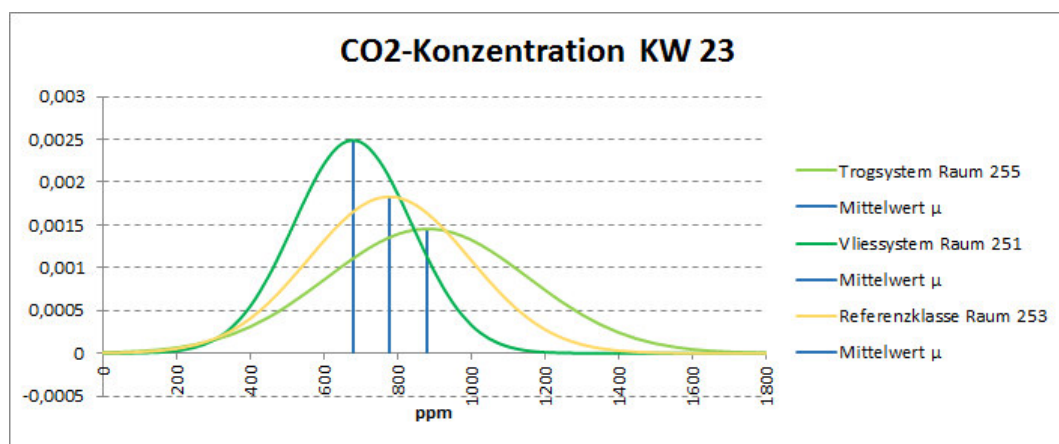


Abb. B6b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. B6** und **B5** wiedergegeben. Der Referenzraum liegt mit dem Mittelwert und der Streuung zwischen den beiden anderen Klassen.

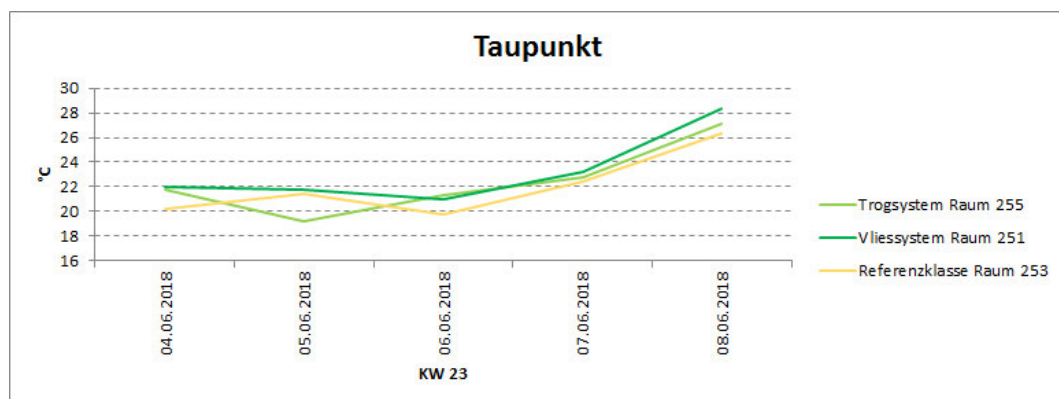


Abb. B7: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Es ist ein konstanter Verlauf mit einem Anstieg zum Wochenende zu erkennen. Mit einem grob im Mittel Abstand von ca. 1°C liegen die Klassen relativ eng zusammen.

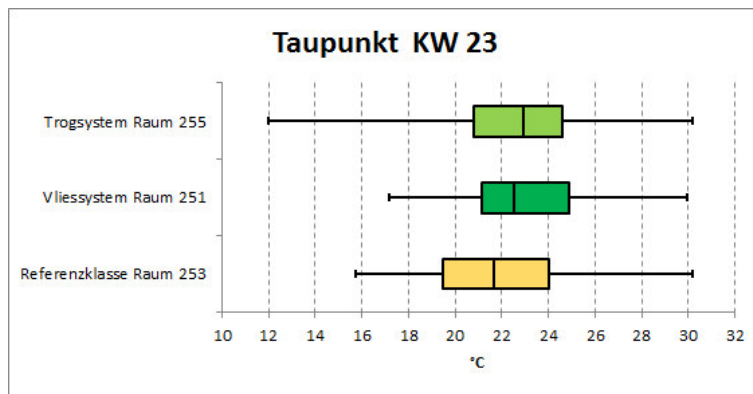


Abb. B8: Boxplot der gesamten Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die Situation in **Abb. B7** ist gut abzulesen. Die Mediane liegen nicht wirklich weit auseinander. Raum 255 weist die größte Streuung auf.

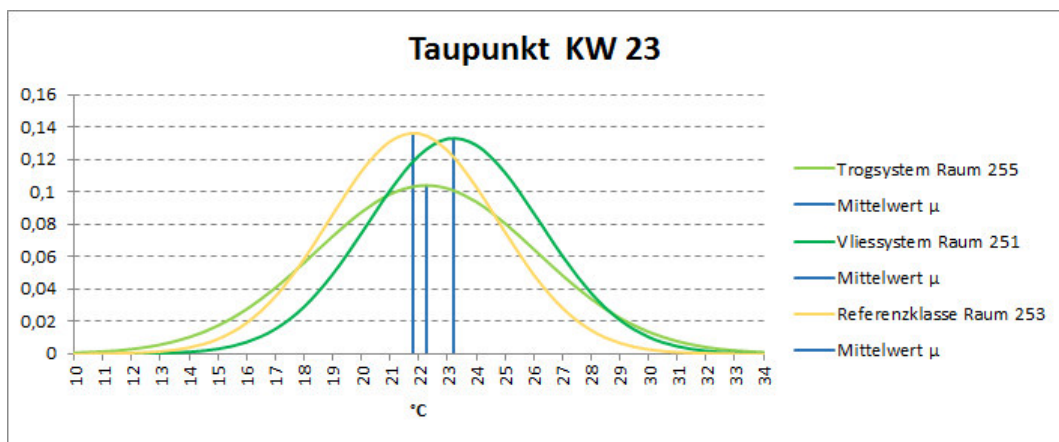


Abb. B8b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. B8** und **B7** wiedergegeben. Beide begrüneten Klassen liegen leicht mit dem Erwartungswert über dem Referenzraum.

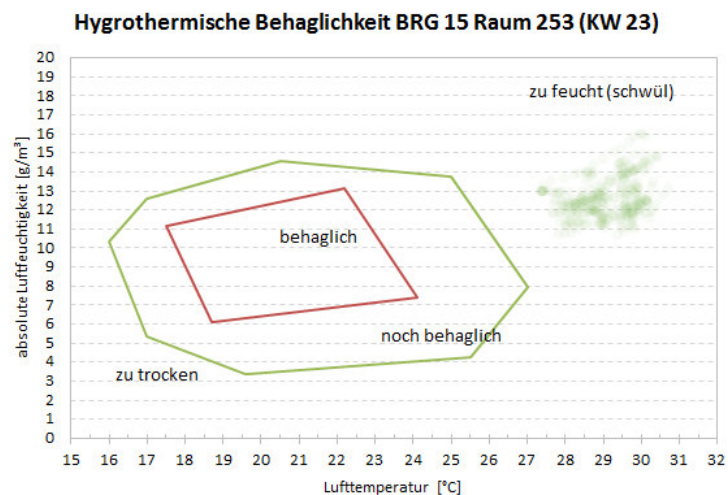


Abb. B9: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 23 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare im unbehaglichen schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 27,5-31°C und 11-16g/m³.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 253 (KW 23)

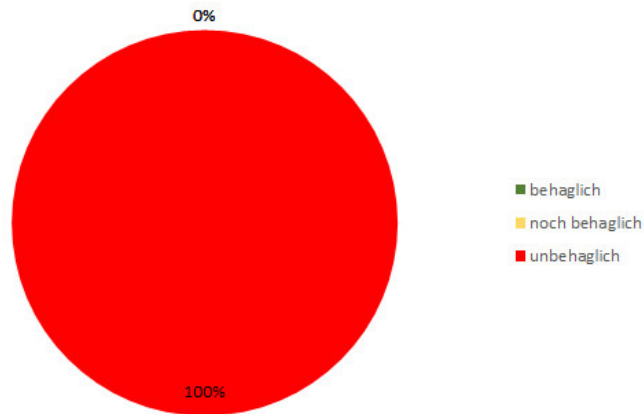


Abb. B10: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.B9** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen alle Werte im unbehaglichen“ (rot) Bereich.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 251 (KW 23)

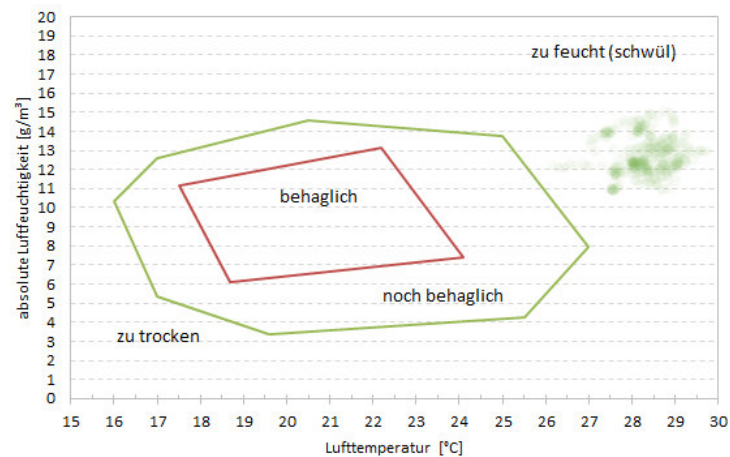


Abb. B11: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 23 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare im unbehaglichen schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 27,5-30°C und 11-15g/m³.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 251 (KW 23)

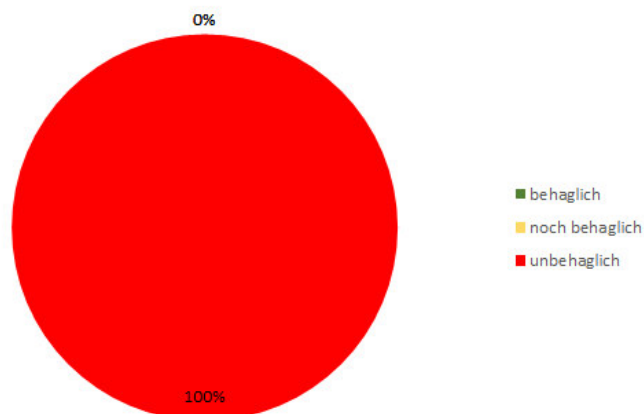


Abb. B12: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.B11** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen alle Werte im unbehaglichen“ (rot) Bereich.

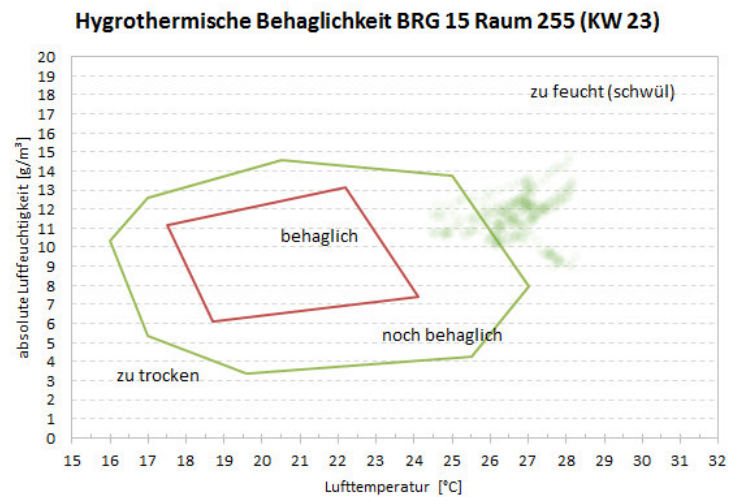


Abb. B13: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 23 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im unbehaglichen schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 25-28°C und 10-14g/m³.

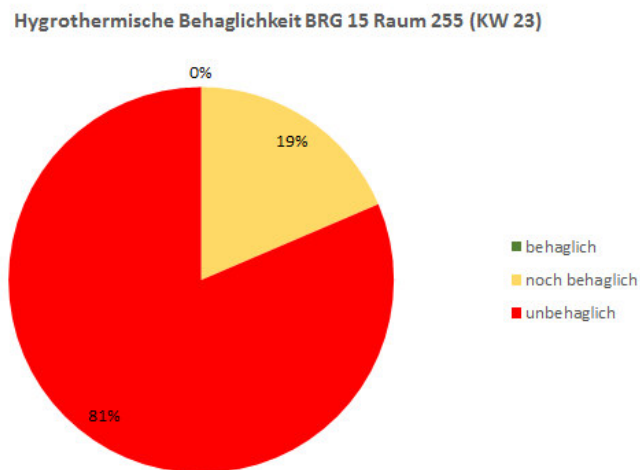


Abb. B14: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.B13** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein Fünftel der Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Dies entspricht eine Verbesserung gegenüber Raum 251 und Raum 253.

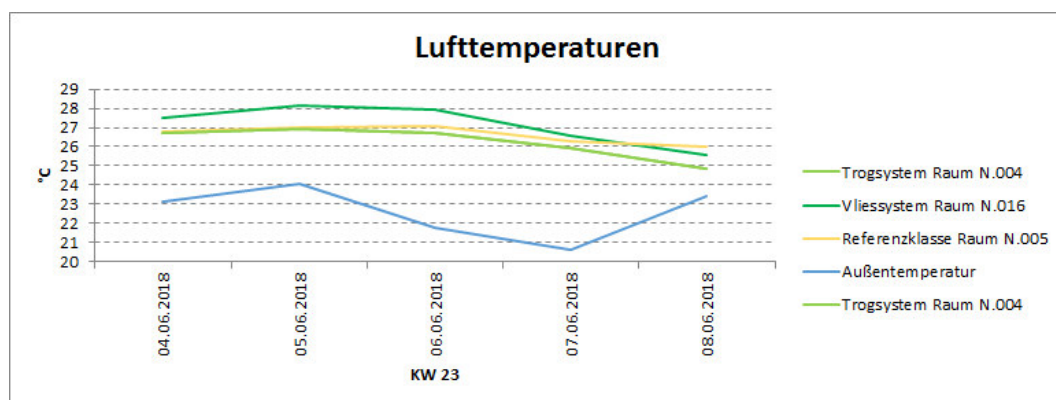


Abb. B15: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die begrünteren Klassen verlaufen nahezu parallel. Raum N.005 liegt zwischen den begrünteren Räumen.

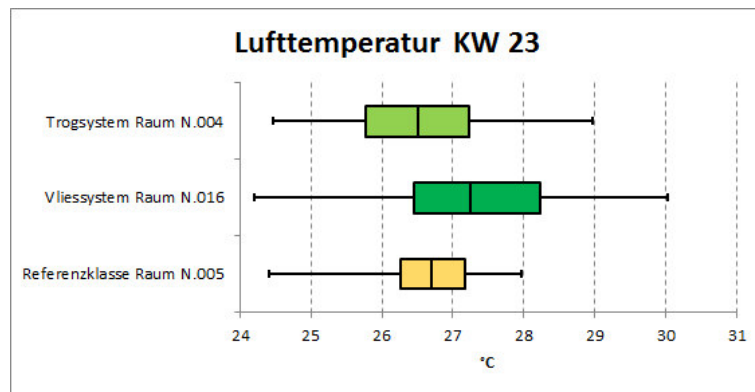


Abb. B16: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. B15** nochmal dar. Offensichtlich liegt der Referenzraum zwischen den anderen Klassen und hat die kleinste Streuung.

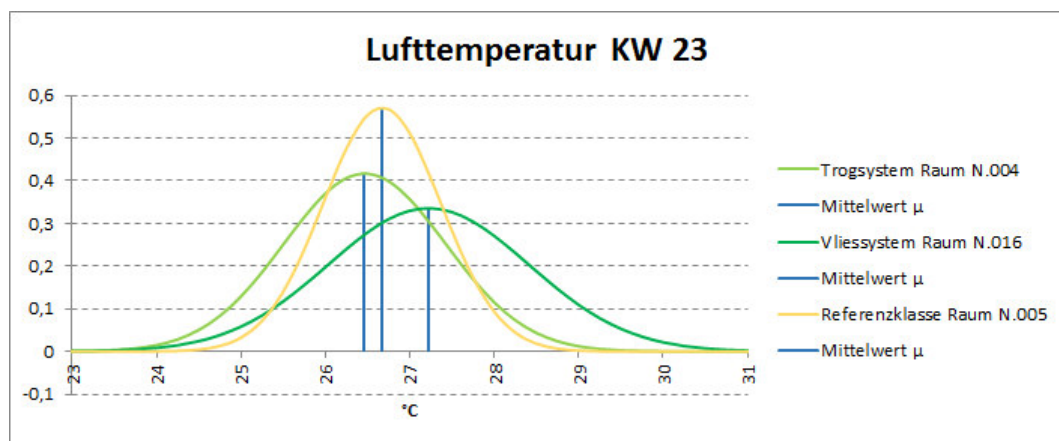


Abb. B16b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. B16** und **B15** wiedergegeben. Raum hat die weiteste Streuung und liegt außergewöhnlicher mit dem Erwartungswert über dem Raum N.005.

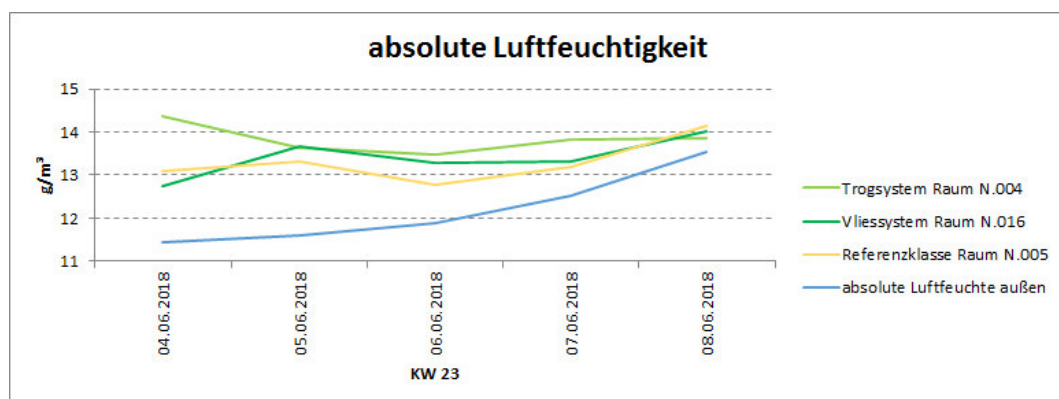


Abb. B17: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Im Mittel liegen die Klassen mit Grünwand über dem Referenzraum. Der Abstand wird zum Freitag zwischen den Klassen und der Außenluftfeuchte immer kleiner. Mittelwerte: Raum N.005 $13,21\text{g}/\text{m}^3$, Raum N.016 $13,27\text{g}/\text{m}^3$, Raum N.004 $13,83\text{g}/\text{m}^3$.

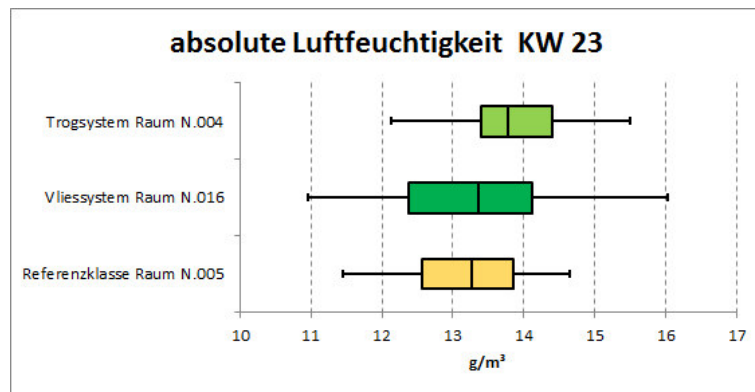


Abb. B18: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B17**. Im Gegensatz zu den anderen Klassen hat der Raum N.016 die größte Streuung mit niedrigsten und höchsten Extrema. Generell liegen die begrünten Klassen höher.

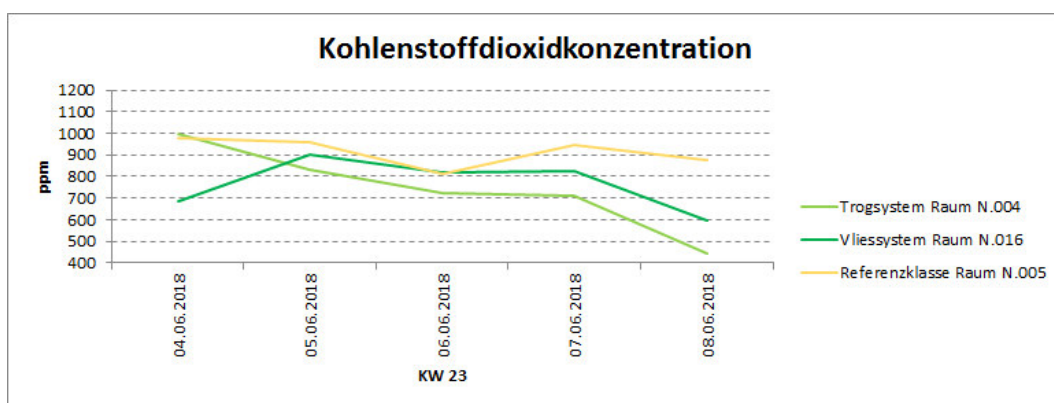


Abb. B19: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Offensichtlich liegen die Räume N.016 und N.004 unter dem Referenzraum und haben zum Ende der Woche einen ähnlichen Verlauf.

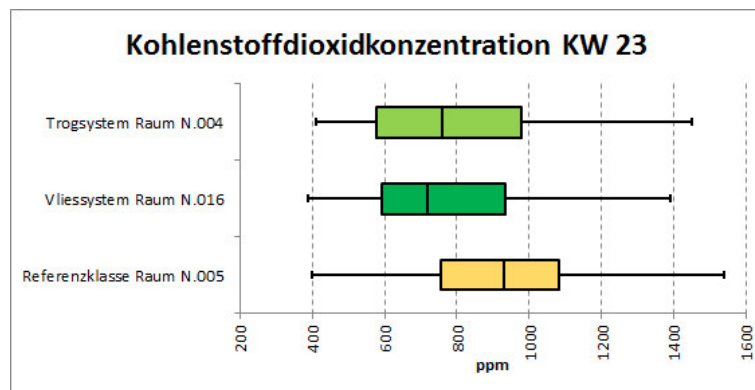


Abb. B20: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B19**. Der Referenzraum liegt ganz klar mit dem Median höher als die anderen Räume.

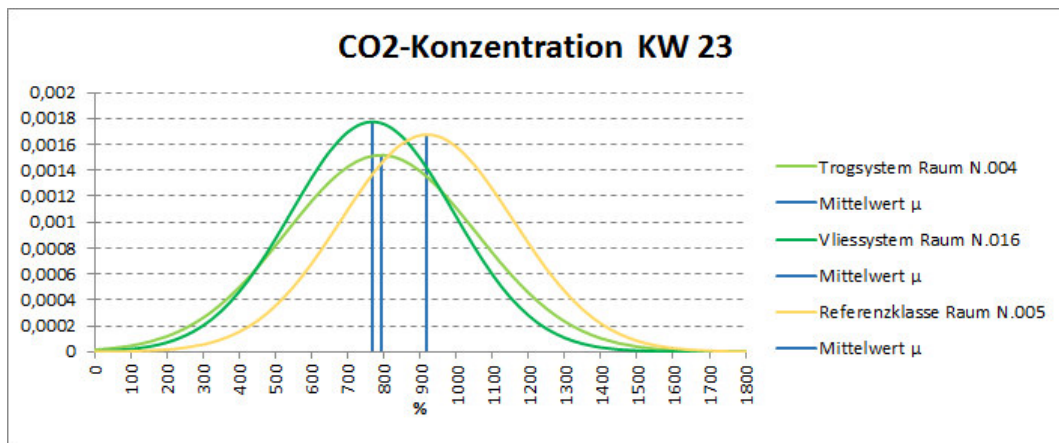


Abb. B20b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. B20** und **B19** wiedergegeben. Die Klassen mit Grünwand liegen eng beieinander und mit dem Mittelwert niedriger als dem Referenzraum.

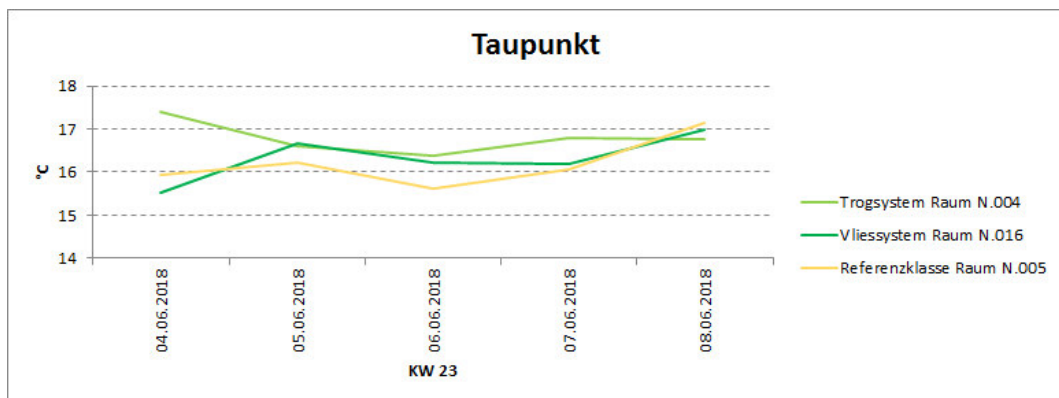


Abb. B21: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die Räume N.004 und N.016 liegen deutlich über dem Referenzraum.

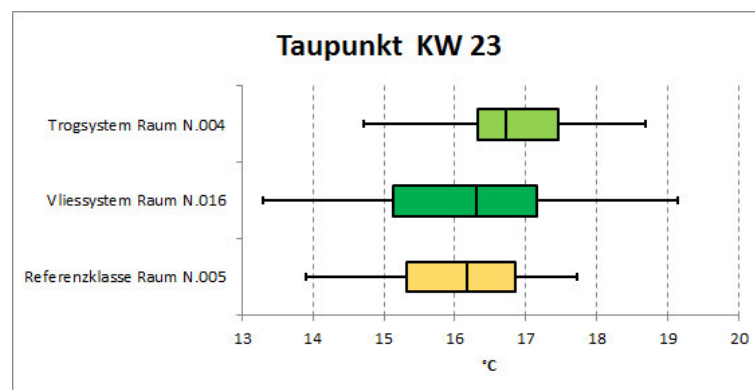


Abb. B22: Boxplot der gesamten Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die Situation in **Abb. B21** ist gut abzulesen. Auffällig ist die unterschiedliche Streuung der begrüneten Räume. Größte Differenz zwischen Minimum und Maximum ist in Raum N.016 herauslesbar.

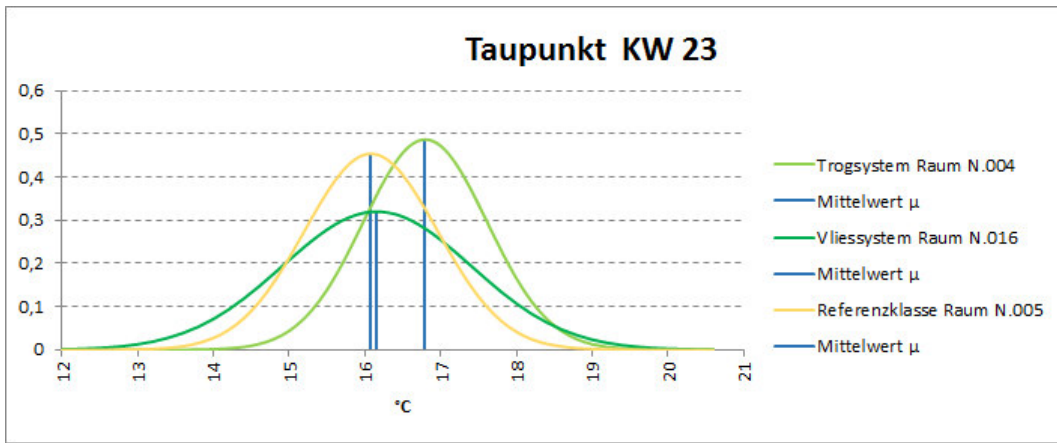


Abb. B22b: Normalverteilung auf Basis der gesamten Messdaten, aufgezeichnet über den Beobachtungszeitraum während des Unterrichts. Auch hier wird das Ergebnis auf **Abb. B22** und **B21** wiedergegeben. Der Raum N.016 liegt fast gleichauf mit dem Referenzraum und hat die größte Streuung wegen der flachen Glockenkurve.

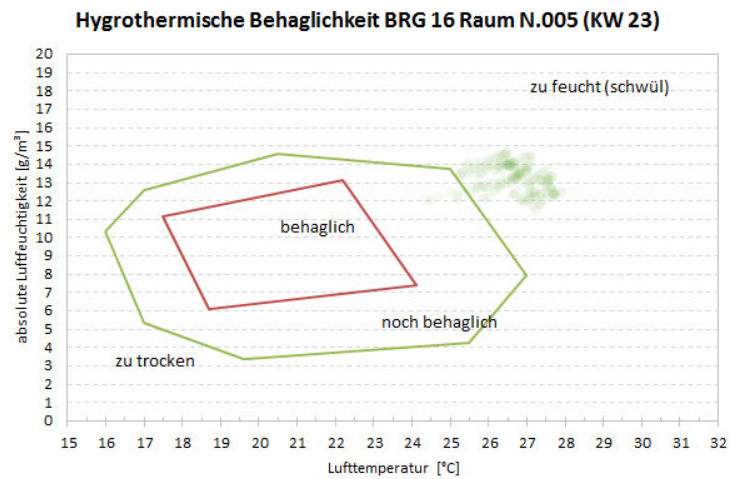


Abb. B23: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 23 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im unbehaglichen schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 25-28°C und 12-15g/m³.

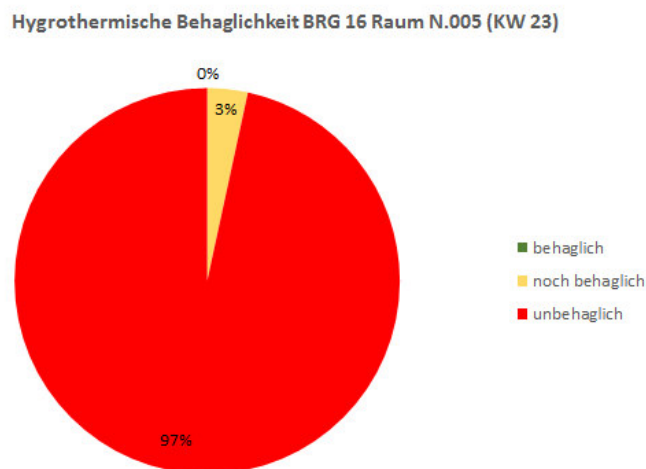


Abb. B24: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.B23** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp alle Werte im unbehaglichen (rot) Bereich. Eine bessere Ausgangslage im Vergleich zum Referenzraum des BRG 15

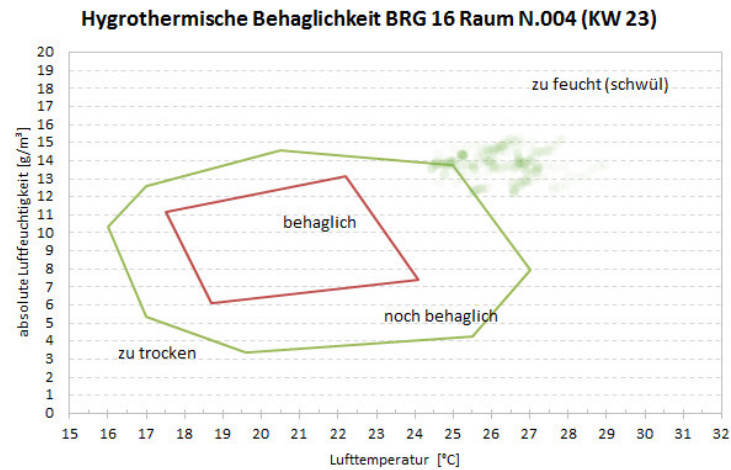


Abb. B25: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 23 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im unbehaglichen schwülen Bereich. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 24,5-28°C und 12-15g/m³.

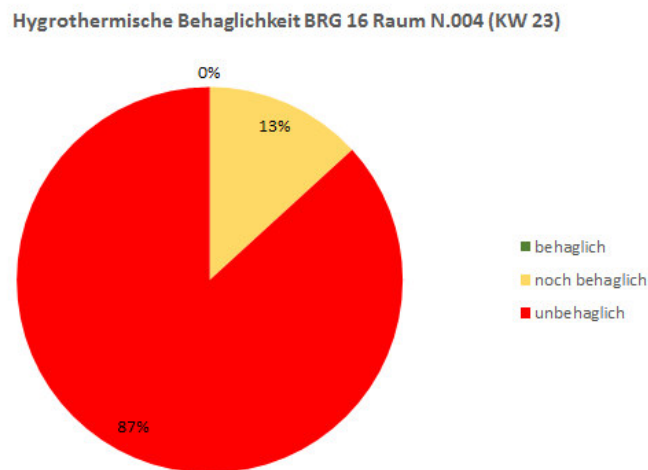


Abb. B26: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.B25** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp vier Fünftel der Werte im unbehaglichen (rot) Bereich. Trotzdem eine Verbesserung gegenüber Raum N.005.

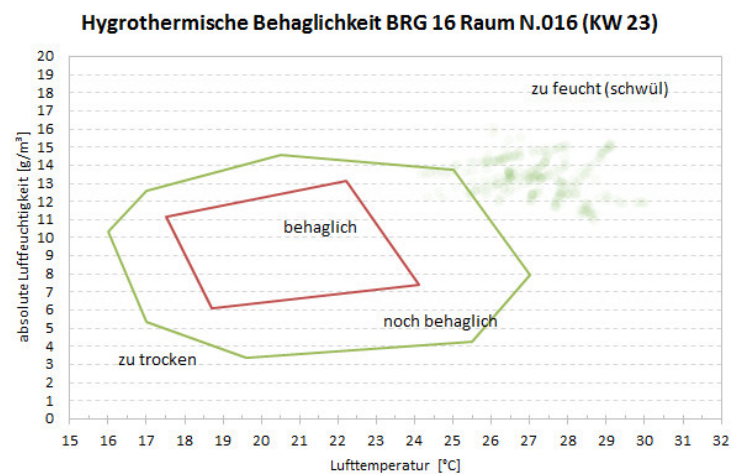


Abb. B27: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum der KW 23 2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im unbehaglichen schwülen Bereich verstreut. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 25-29°C und 11-15g/m³.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 16 Raum N.016 (KW 23)

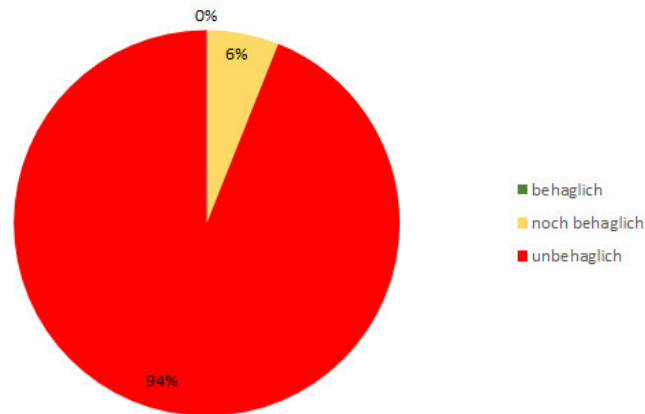


Abb. B28: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.B27** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp alle Werte im unbehaglichen (rot) Bereich. Trotzdem eine Verbesserung gegenüber Raum N.005, aber eine schlechtere Situation als im Raum N.004.

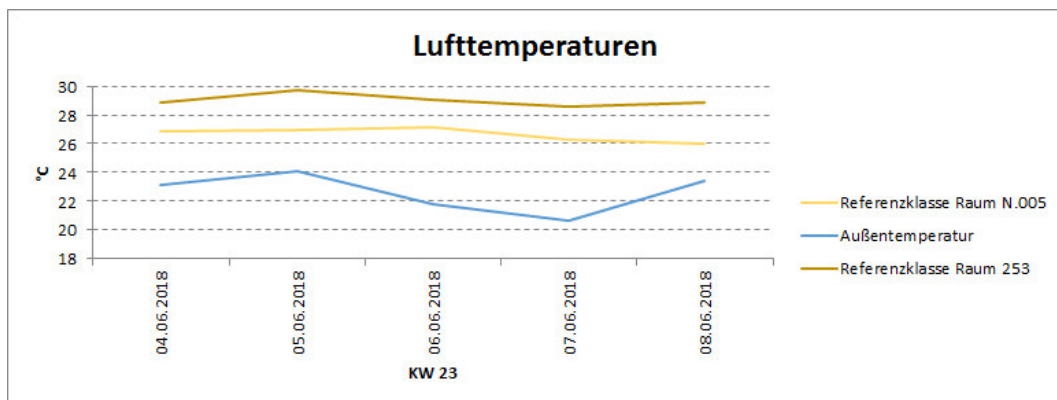


Abb. B29: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Es lässt sich gut ablesen wie die Außentemperatur und Raum 253 einen ähnliches Verlaufsmuster haben. Raum 253 liegt offensichtlich weit über Raum N.005.

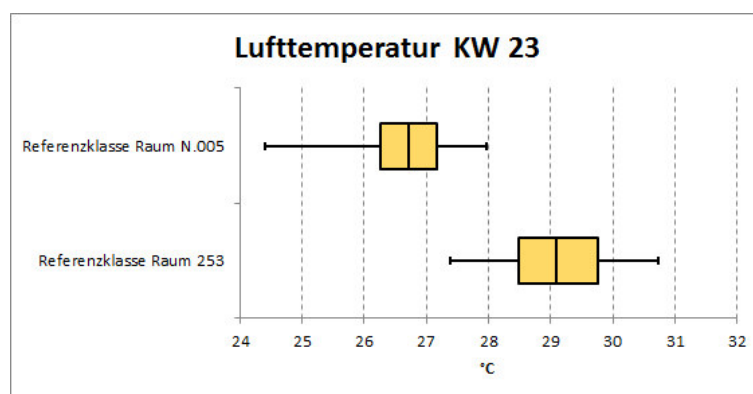


Abb. B30: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. B29** nochmal dar. Raum 253 im Bereich zwischen dem 25%- und 75%-Quantil die größere der beiden Streuungen.

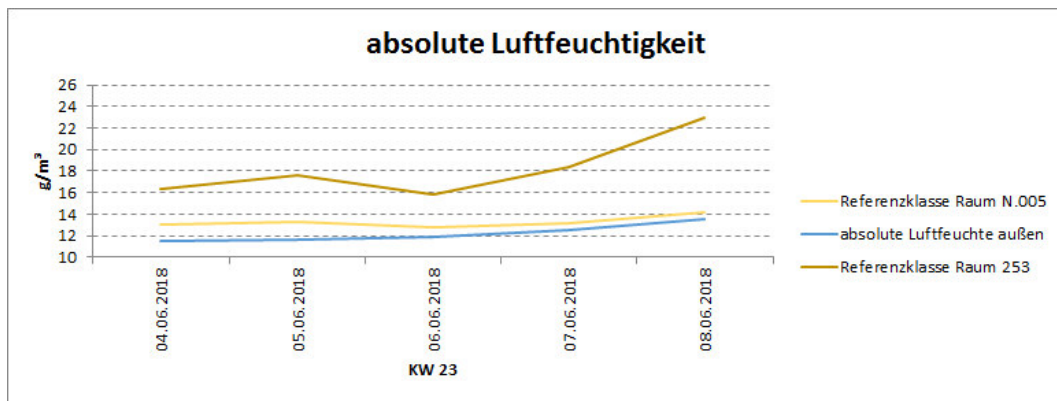


Abb. B31: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Der Verlauf von Raum N.005 schmiegt sich an dem von der Außenluftfeuchte. Am höchsten liegt Raum 253.

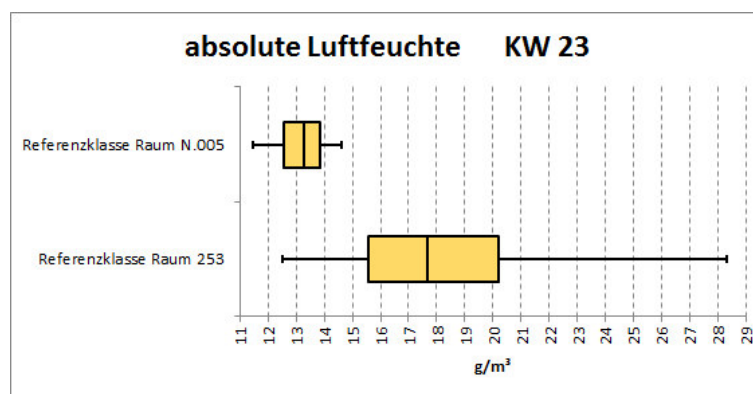


Abb. B32: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B31**. Ganz klar fällt einem die weite Streuung von Raum 253 auf, während die Streuung im BRG 16 auf einen konstanten Verlauf hindeutet.

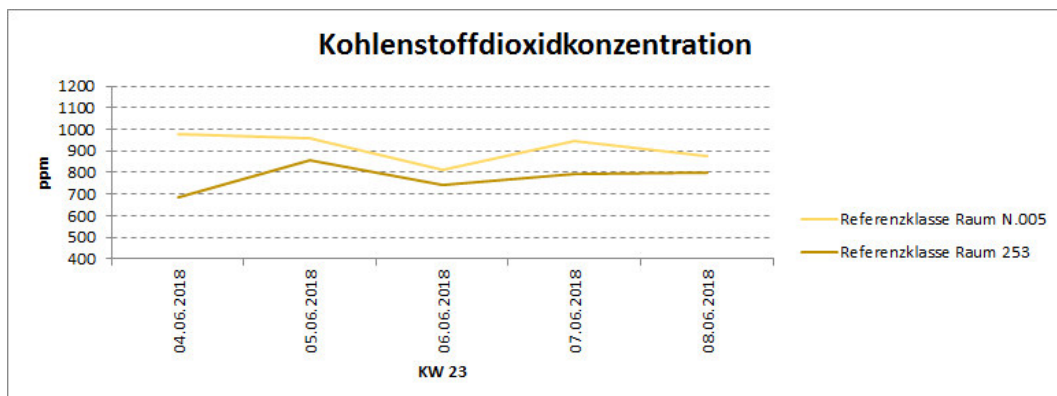


Abb. B33: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Hier liegt der Raum 253 deutlich niedriger über die Woche.

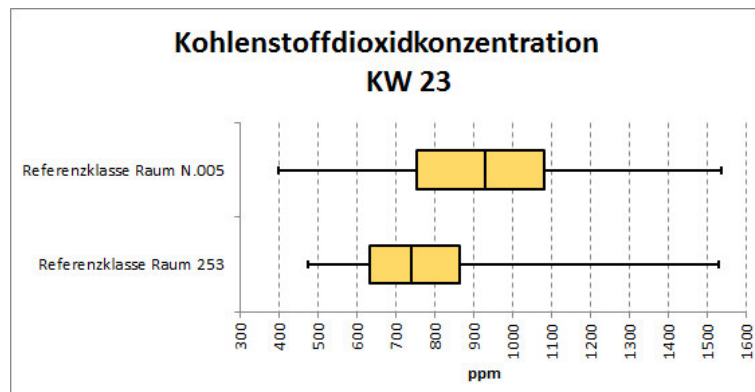


Abb. B34: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B33**. Beide Räume zeigen eine große Streuung, während der Median des Raumes 253 viel niedriger liegt.

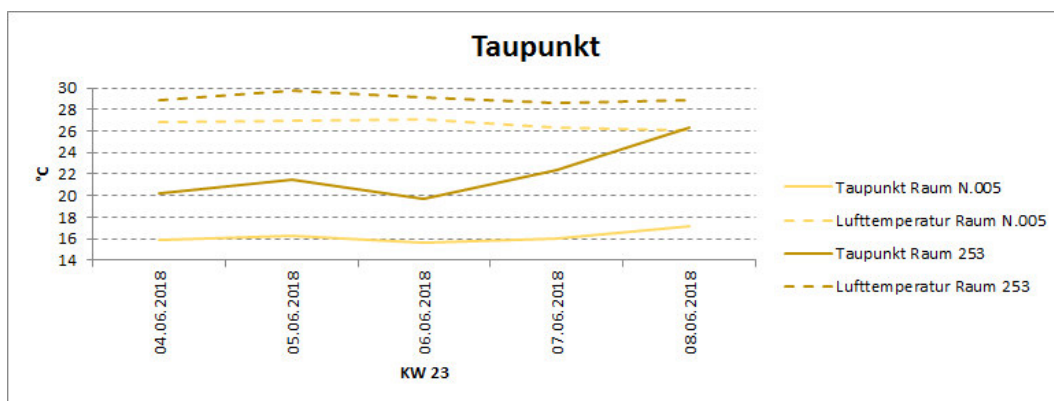


Abb. B35: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Raum N.005 liegt weit unterhalb vom Raum 253.

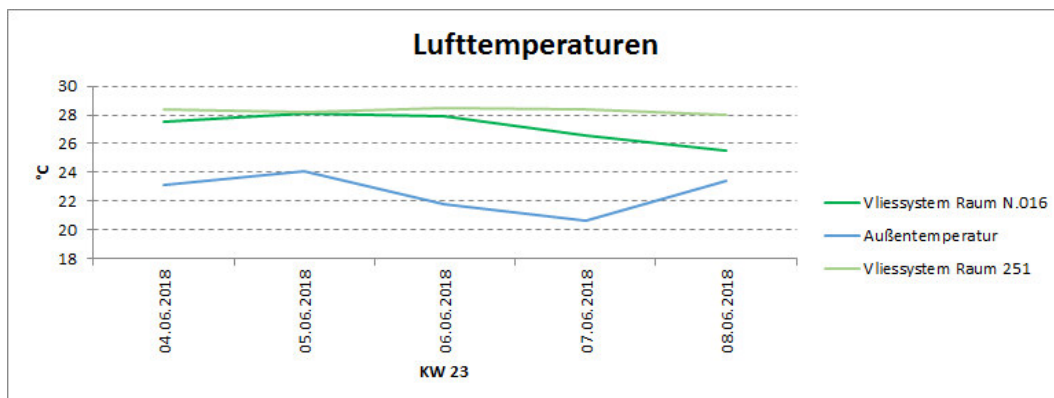


Abb. B36: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Raum 251 hat über die Woche den konstanten Verlauf und liegt ganz klar über Raum N.016.

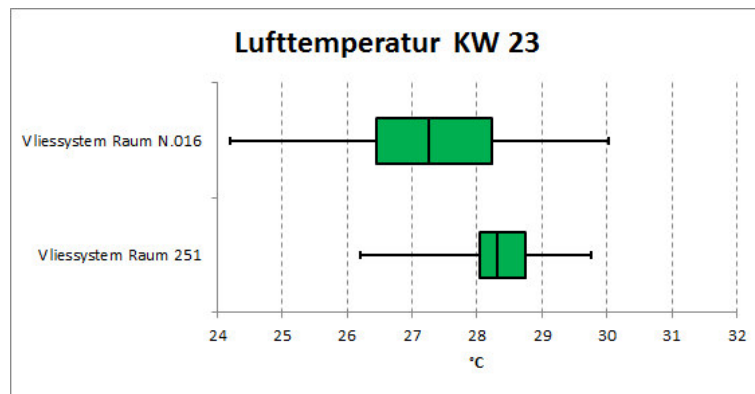


Abb. B37: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. B36** nochmal dar. Der konstante Verlauf in Raum 251 zeigt sich in der Streuung wieder.

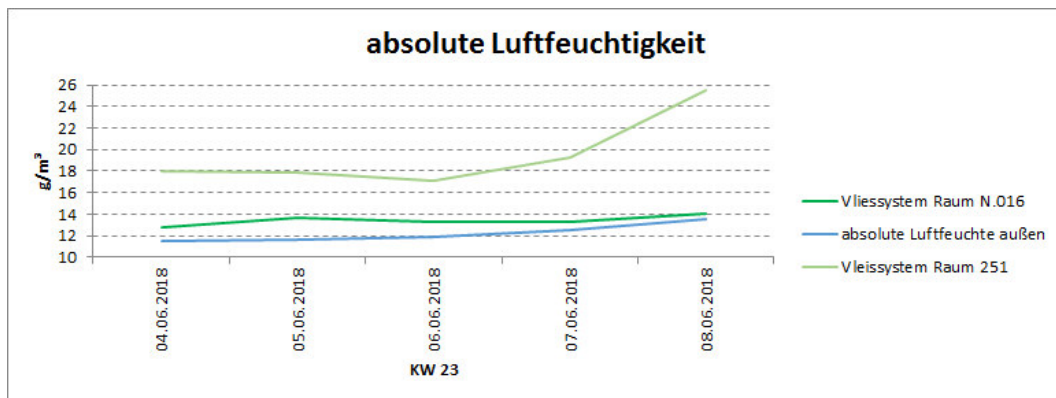


Abb. B38: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Raum 251 liegt tendenziell weit über Raum N.016, welcher sich im Nahbereich der Außenluftfeuchte bewegt.

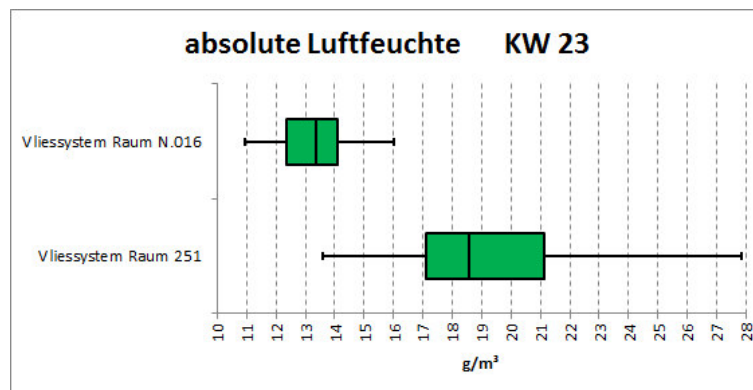


Abb. B39: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B38**. Der konstante Verlauf von Raum N.016 lässt sich in der geringen Streuung gut ablesen.

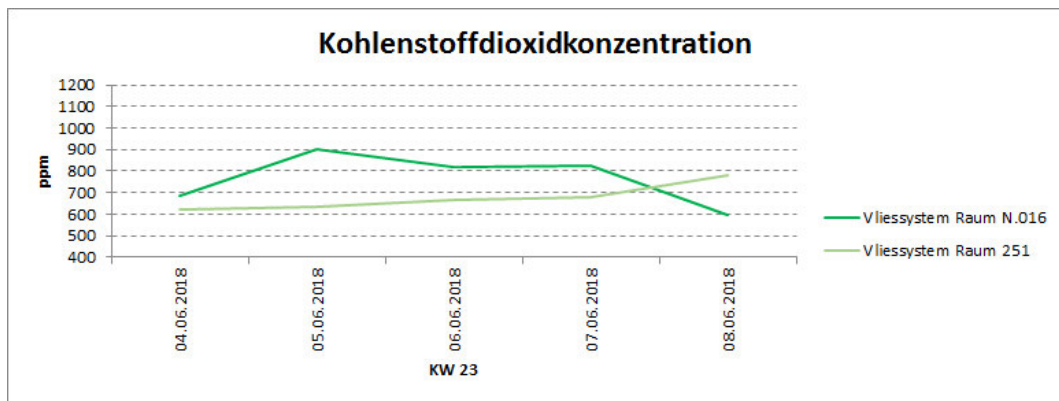


Abb. B40: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Im Mittel liegt der Raum 251 ganz klar unterhalb von Raum N.016, welcher etwas konstanter verläuft.

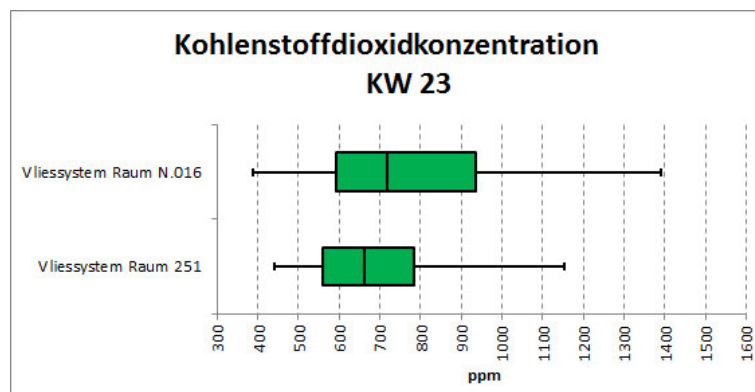


Abb. B41: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B40**. Die starke Schwankung von Raum N.016 lässt sich gut in der Streuung erkennen.

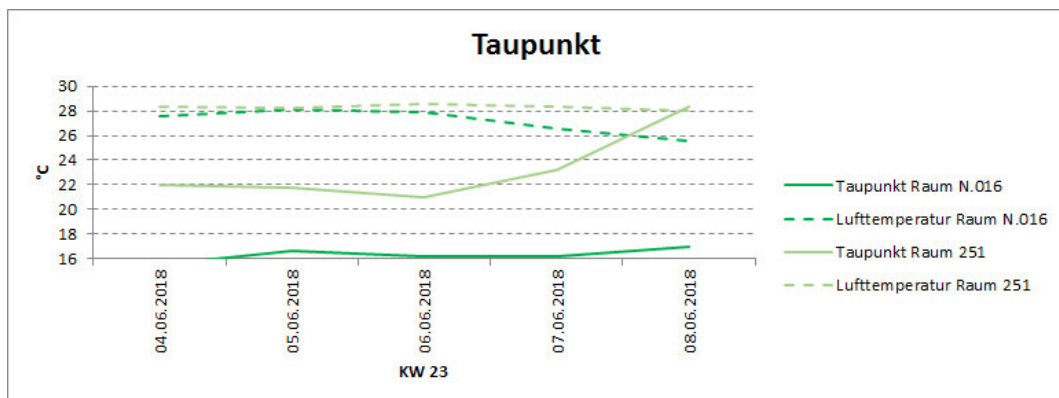


Abb. B42: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Hier liegt Raum N.016 weit unter Raum 251, hat jedoch einen konstanten Verlauf.

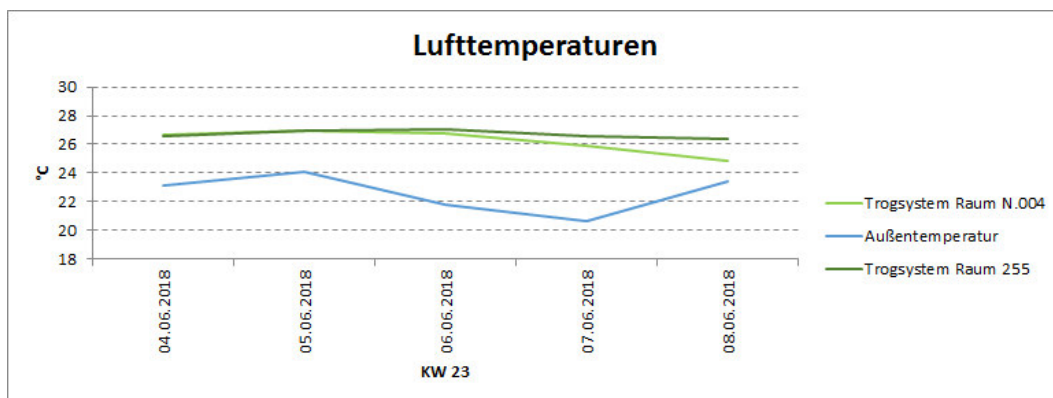


Abb. B43: Gemittelte Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Die beiden Räume verlaufen bis zur Mitte der Woche fast identisch, bis diese sich trennen. Die Schwankungen der Außenlufttemperatur scheinen keinen wahrnehmbaren Einfluss auf die Räume zu haben.

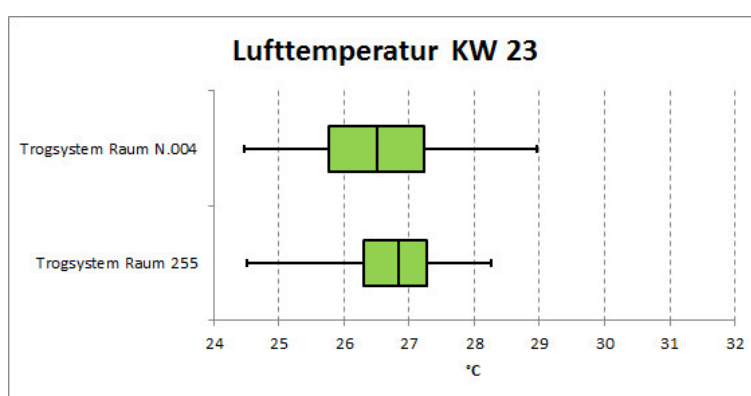


Abb. B44: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. B43** nochmal dar. Raum 255 hat die kleinere Streuung im Bereich zwischen dem 1. und 3. Quartil.

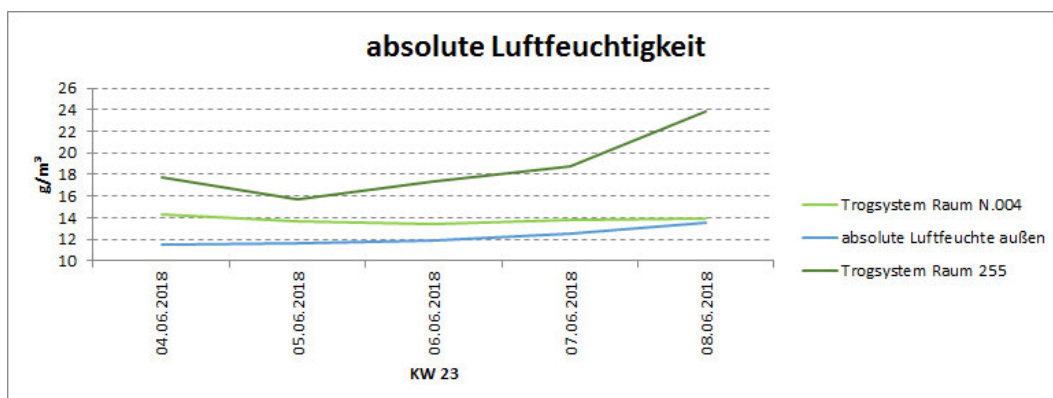


Abb. B45: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Der Raum liegt deutlich oberhalb von Raum N.004 und schwankt mehr.

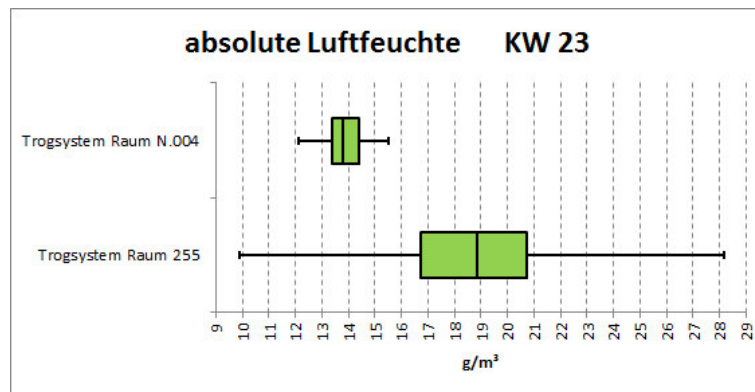


Abb. B46: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B45**. Die Schwankung macht sich hier in der starken Streuung von Raum 255 sehr bemerkbar. Die geringe Streuung von Raum N.004 ist ein gutes Beispiel für einen konstanten Verlauf.

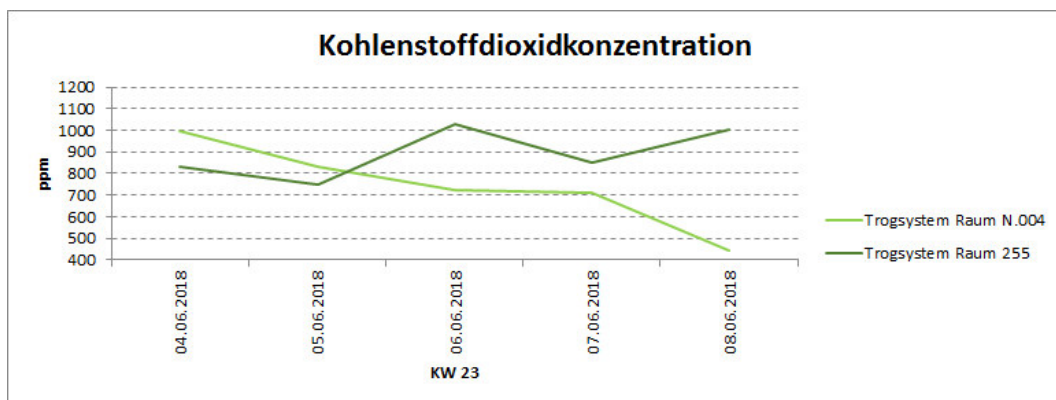


Abb. B47: Gemittelte Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Im Schnitt liegt der Raum 255 höher als Raum N.004. Beide schwanken stark, während der eine steigt, fällt der andere ab.

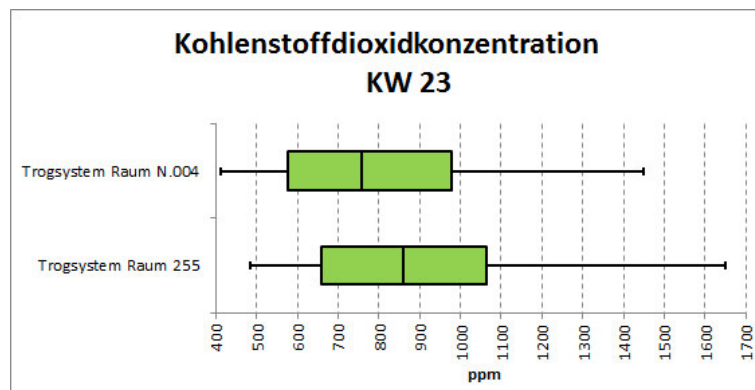


Abb. B48: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. B47**. Im Wesentlichen liegen die nicht so weit voneinander ab wie im Diagramm vermutet. Die Boxplots sind ähnlich nur leicht verschoben.

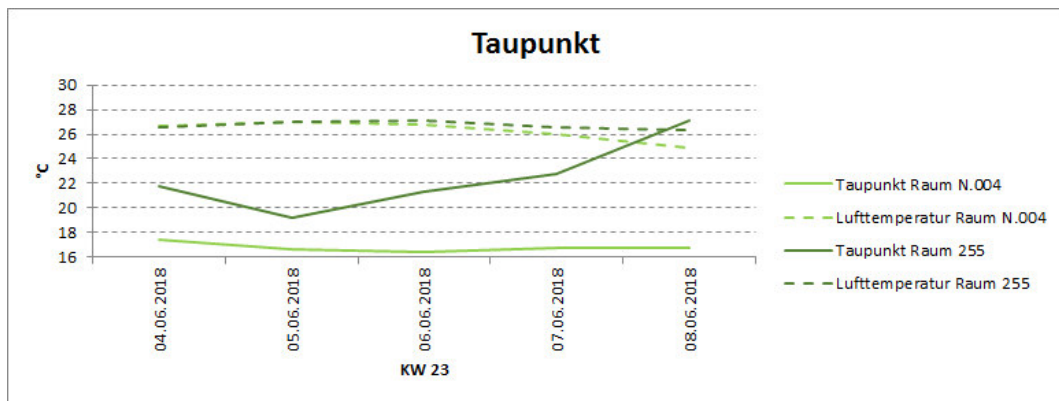


Abb. B49: Gemittelte Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungswoche. Offensichtlich liegt der Raum N.004 weit unterhalb von Raum 255, welcher stark schwankt.

C – Raumklima vom 05.10.2018 (Survey)

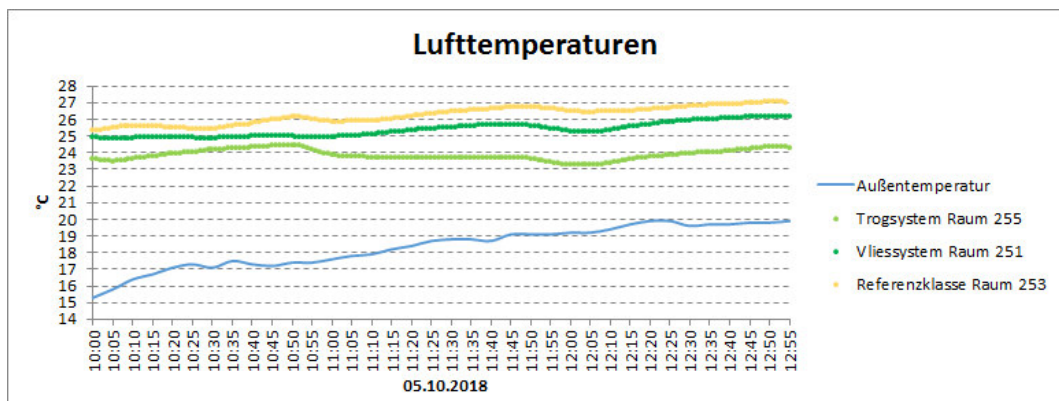


Abb. C1: Tatsächliche Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungszeitraum an dem Freitag. Temperaturschwankungen sind im Bereich von 1°C beschränkt, während hingegen die Außentemperatur deutlich mehr zunimmt. Die begrüneten liegen erwartungsgemäß unterhalb vom Referenzraum. Es sind kleine Abfälle kurz vor der vollen Stunde erkennbar.

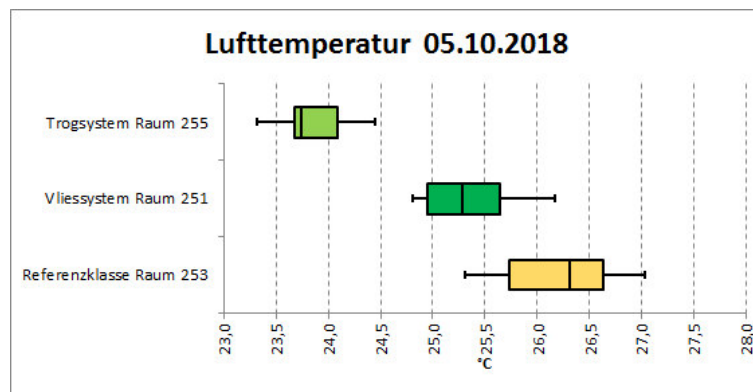


Abb. C2: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. C1** nochmal dar. Die größte Streuung ist im Raum 253 vorzufinden. Zwischen den begrüneten Klassen liegt ein offensichtlicher Unterschied. Raum 255 scheint am konstantesten zu sein.

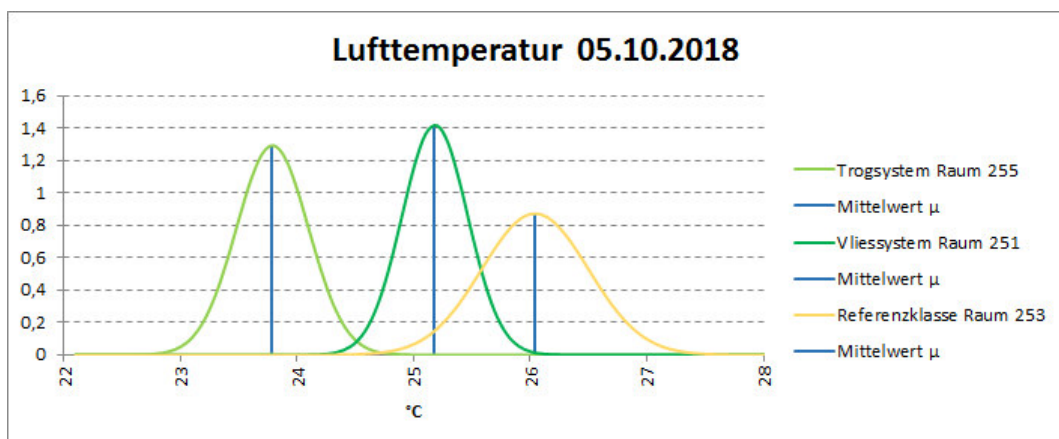


Abb. C2b: Normalverteilung der gesamten Messwerte für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Es stellt ein gutes Abbild der Situation in **Abb. C2** und **C1** dar. Zum einen die Abstände der Mittelwerte und zum anderen die unterschiedlichen Streuungen, besonders stark im Referenzraum erkennbar.

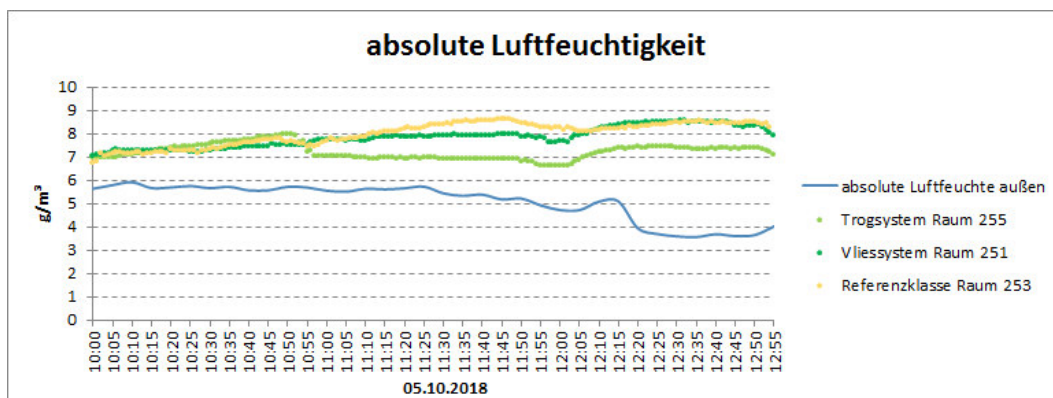


Abb. C3: Tatsächliche Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungszeitraum an dem Freitag. Gut auszumachen sind die Abfälle kurz vor der vollen Stunde. Mittelwerte: Raum 253 $7,83\text{g/m}^3$, Raum 251 $7,66\text{g/m}^3$, Raum 255 $7,16\text{g/m}^3$.

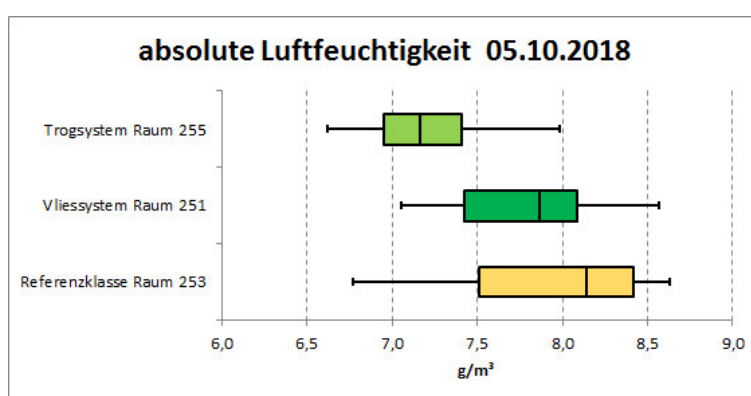


Abb. C4: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts an dem Freitag im Beobachtungszeitraum aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. C3**.

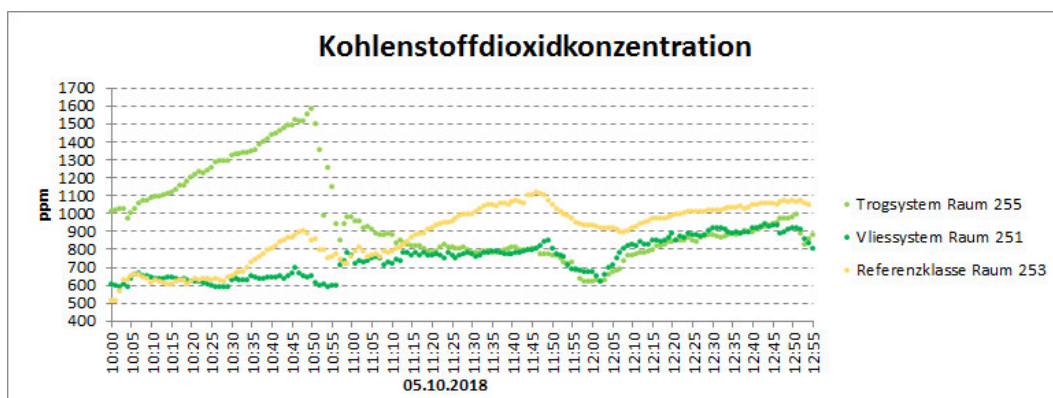


Abb. C5: Messwerte für die CO_2 -Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungszeitraum an dem Freitag. Auffällig sind wieder die Abfälle kurz vor der vollen Stunde. Der Raum 255 hat offensichtlich die stärkere Schwankung. Abgesehen vom ersten Drittel verlaufen die Graphen der begrünter Räume unterhalb vom Referenzraum.

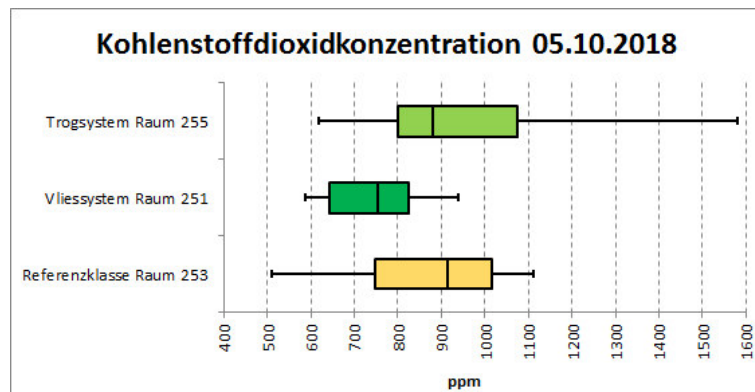


Abb. C6: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts an dem Freitag im besagten Zeitraum aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. C5**. Die kleinste Streuung ist in Raum 251 abgebildet.

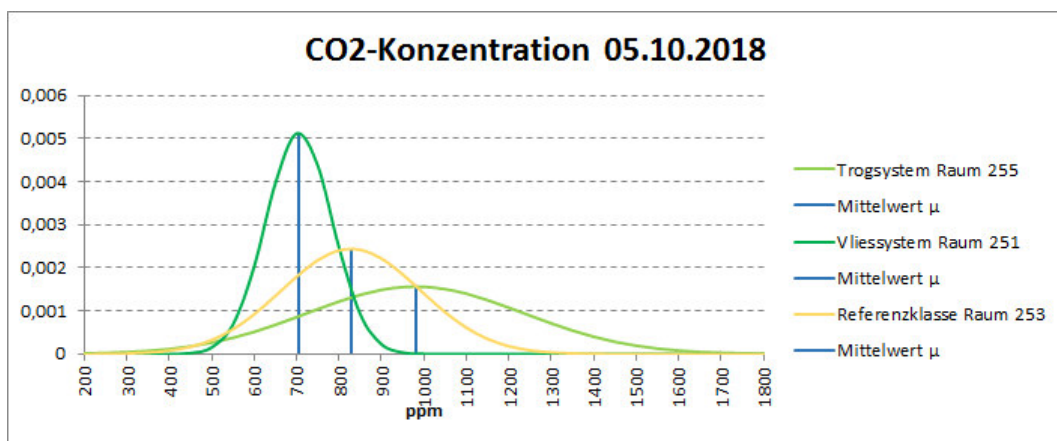


Abb. C6b: Normalverteilung der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Es spiegelt die Situation in **Abb. C6** und **C5** wieder. Raum 251 wird mit der geringen Streuung hervorgehoben.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 253 (05.10.18)

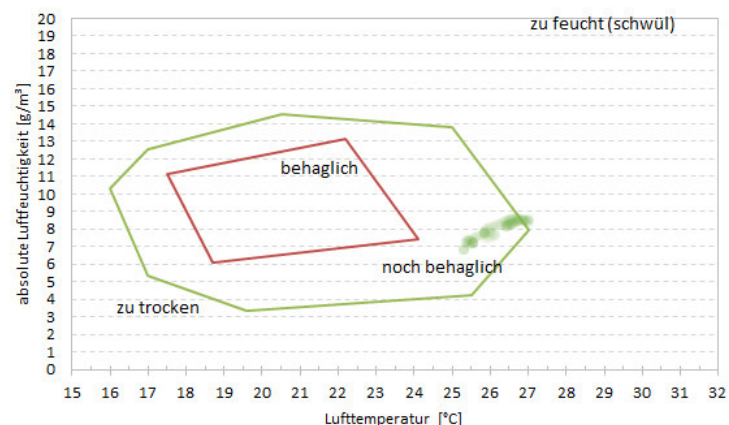


Abb. C7: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum vom 05.10.2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich verstreut. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 25-27°C und 7-9g/m³.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 253 (05.10.18)

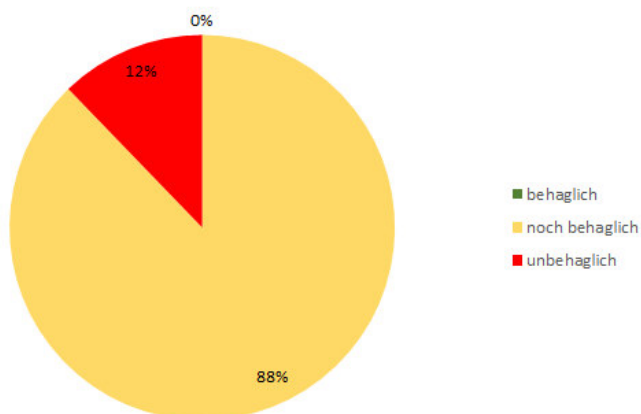


Abb. C8: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.C7** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp vier Fünftel der Werte im „noch beaglichen“ (gelb) Bereich.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 251 (05.10.18)

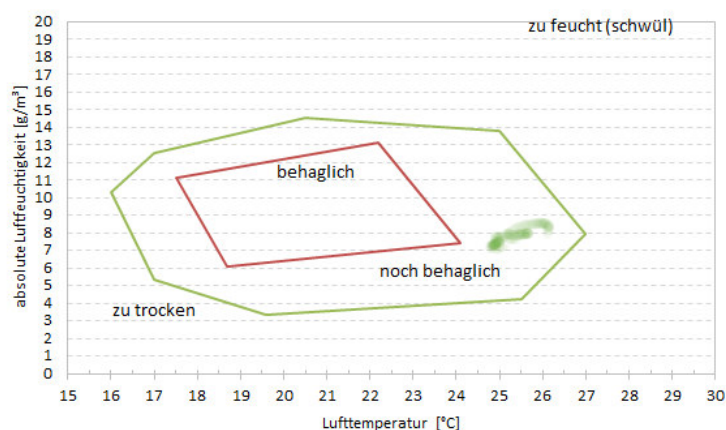


Abb. C9: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum vom 05.10.2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch beaglichen“ Bereich verstreut. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 24,5-26°C und 7-9g/m³. Die Messdatenwolke hat sich im Vergleich zum Raum 253 nach links verschoben.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 251 (05.10.18)

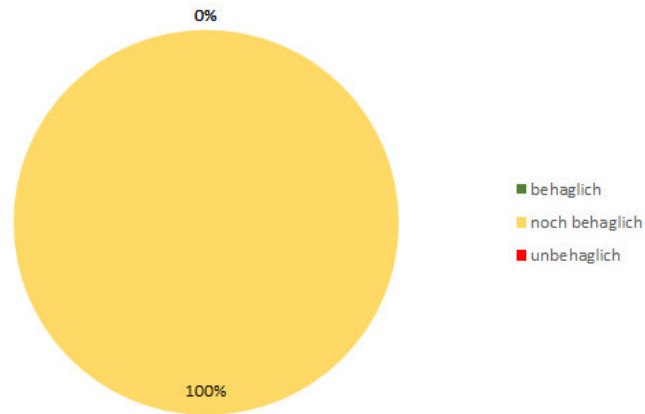


Abb. C10: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.C9** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen alle Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Dementsprechend eine deutliche Verbesserung gegenüber Raum 253.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 255 (05.10.18)

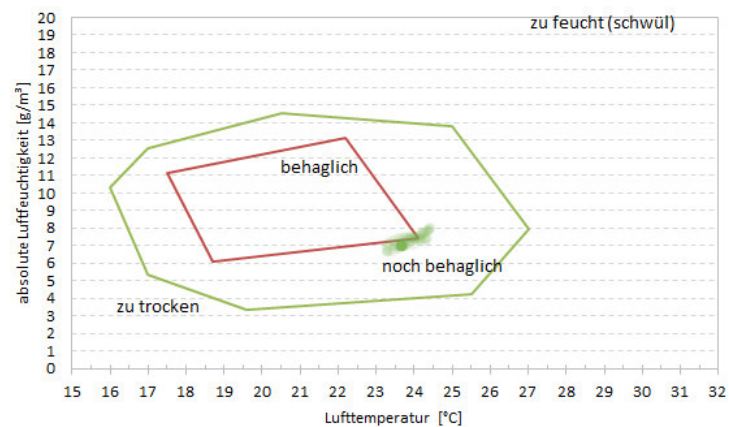


Abb. C11: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum vom 05.10.2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich verstreut. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 23-24,5°C und 6-8g/m³. Die Messdatenwolke hat sich im Vergleich zum Raum 253 nach links verschoben.

Hygrothermische Behaglichkeit BRG 15 Raum 255 (05.10.18)

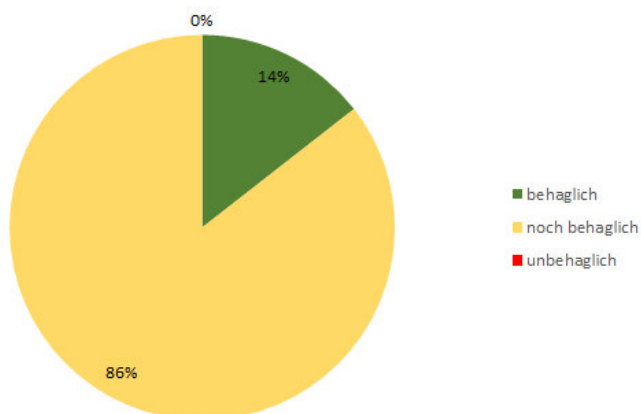


Abb. C12: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.C11** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein Achtel der Werte im behaglichen (grün) Bereich. Dementsprechend eine deutliche Verbesserung gegenüber den Räumen 253 und 251.

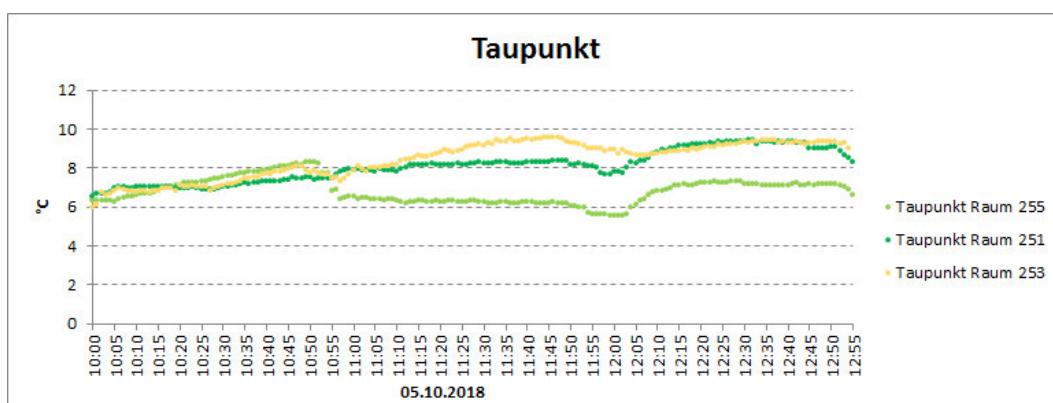


Abb. C13: Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für den jeweiligen Beobachtungszeitraum. Hier lässt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei der absoluten Luftfeuchtigkeit ablesen (vgl. **Abb. C3**). Die begrünten Räume liegen im Mittel unter dem Raum 253.

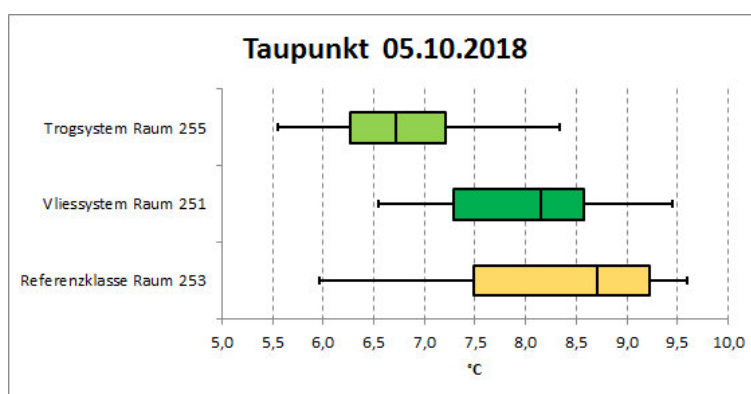


Abb. C14: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts an dem Freitag im besagten Zeitraum aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. C13**. Im Bereich zwischen dem 1. und 3. Quartil ist die Streuung in Raum 255 am geringsten.

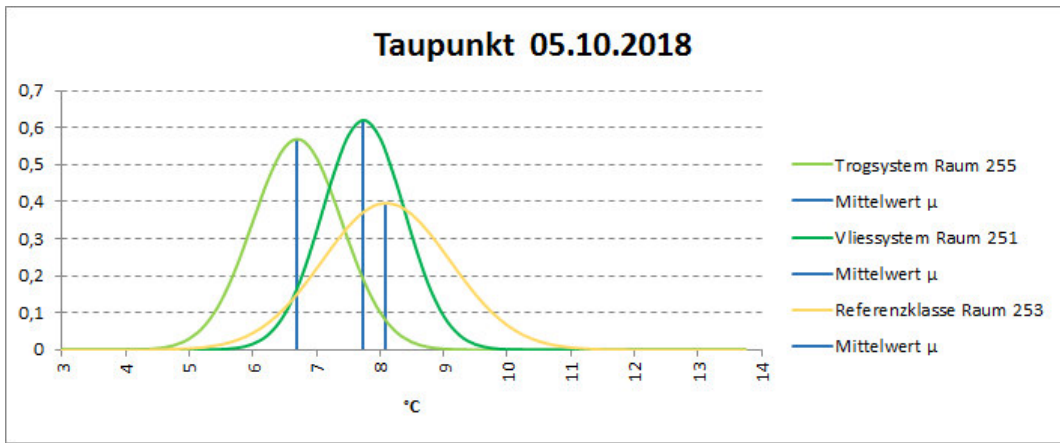


Abb. C14b: Normalverteilung der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Es stellt die Situation in **Abb. C14** und **C13** gut dar. Deutlich liegen die Erwartungswerte der begrünten Klassen unterhalb vom Referenzraum und sind spitzzulaufend.

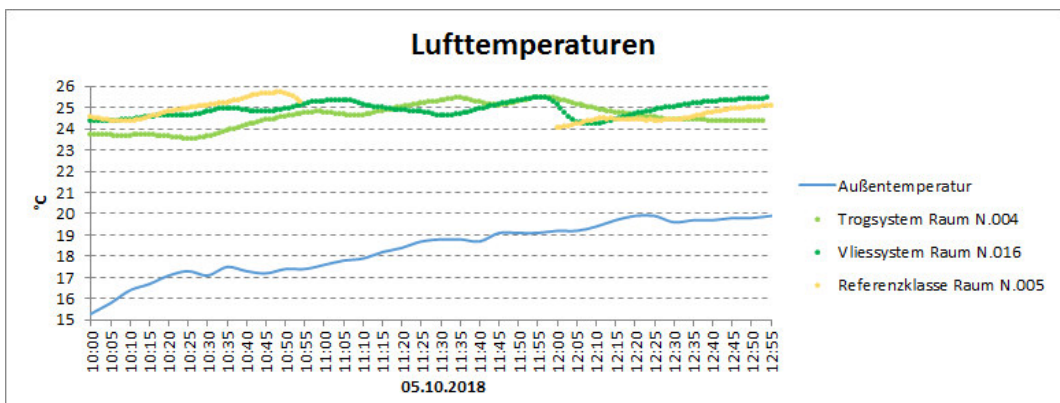


Abb. C15: Tatsächliche Messwerte für die Lufttemperatur, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungszeitraum an dem Freitag. Stark oszillierende Verläufe, jedoch relativ konstant. Deutliche Abfälle lassen sich einmal in Raum N.005 kurz vor 11 Uhr und zum anderen in Raum N.016 kurz vor 12 Uhr ablesen.

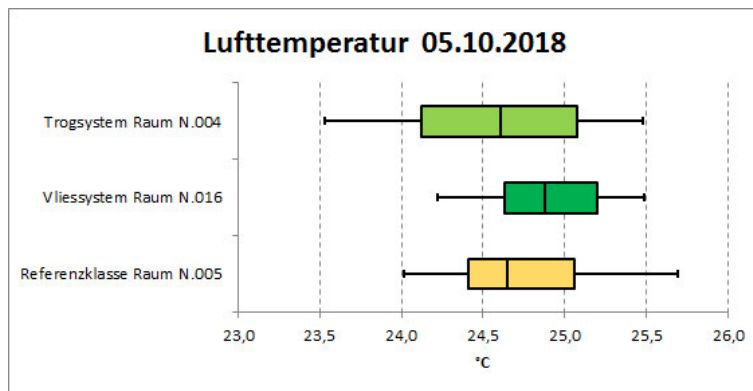


Abb. C16: Boxplot der gesamten Messdaten die während des Unterrichts in der KW 23 aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm stellt die Situation in **Abb. C15** nochmal dar. Grob liegt Raum N.005 leicht zwischen den begrünten Klassen. Größte Streuung ist in Raum N.004 abgebildet.

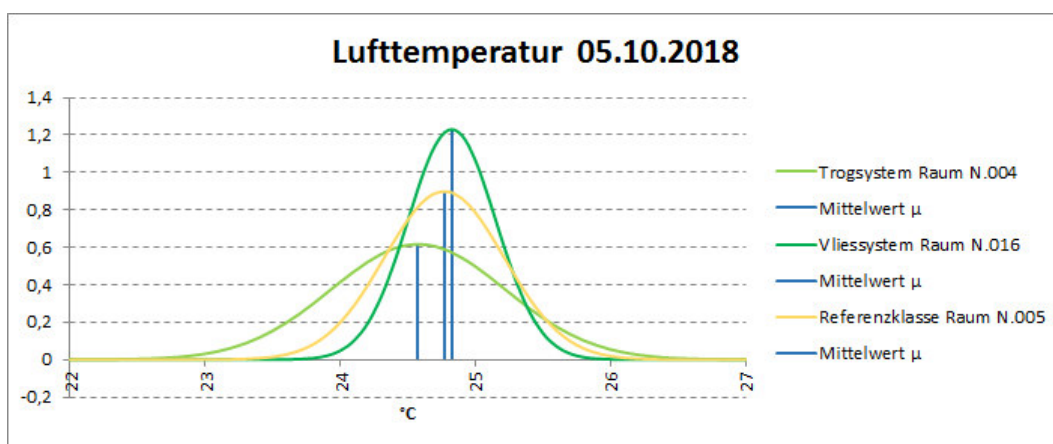


Abb. C16b: Normalverteilung der gesamten Messwerte für die Lufttemperatur, die während des Unterrichts erhoben wurden. Es stellt ein gutes Abbild der Situation in **Abb. C16** und **C15** dar. Anhand der Glockenkurven lässt sich die weite Streuung in Raum N.004 sichtbar werden. Mittelwerte liegen nah beieinander.

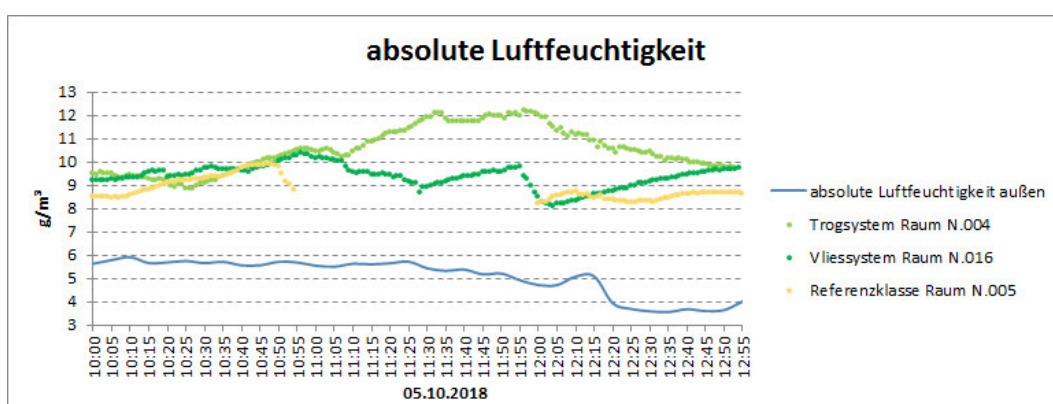


Abb. C17: Tatsächliche Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungszeitraum an dem Freitag. Allgemein liegen die begrüneten Klassen über dem Referenzraum. Mittelwerte: Raum N.005 $8,84\text{g/m}^3$, Raum N.016 $9,38\text{g/m}^3$, Raum N.004 $10,57\text{g/m}^3$.

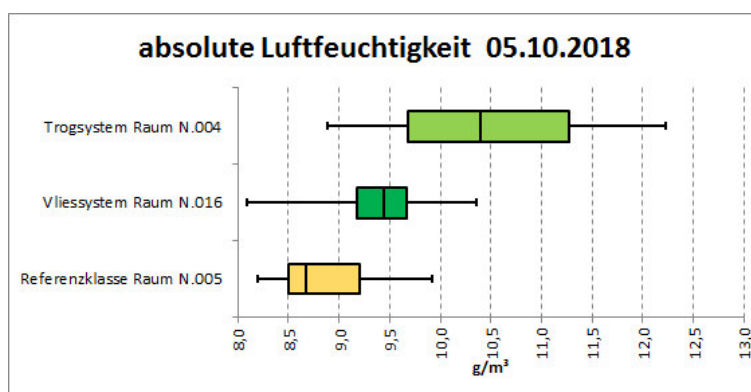


Abb. C18: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts an dem Freitag im Beobachtungszeitraum aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. C18**. Raum N.004 hat offensichtlich die größte Streuung im Zentralbereich.

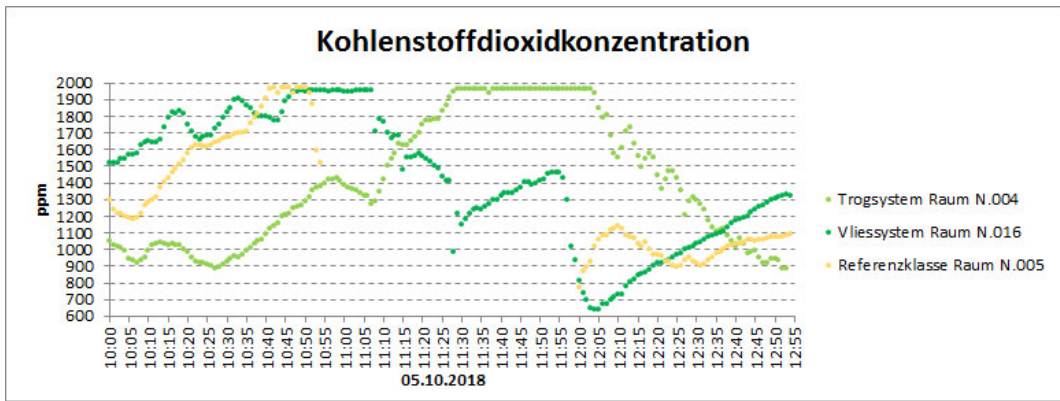


Abb. C19: Messwerte für die CO₂-Konzentration, aufgezeichnet während des Unterrichts für die jeweilige Beobachtungszeitraum an dem Freitag. Es sind starke Wellenbewegungen im Verlauf erkennbar. Deutliche Abfälle lassen sich einmal in Raum N.005 kurz vor 11 Uhr und zum anderen in Raum N.016 kurz vor 12 Uhr ablesen.

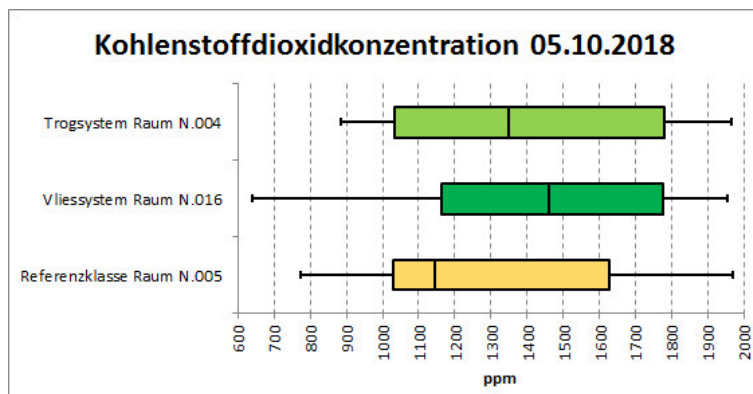


Abb. C20: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts an dem Freitag im besagten Zeitraum aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. C20**. Alle Klassen haben eine krasse Streuung im Bereich zwischen dem 25%- und 75%-Fraktile.

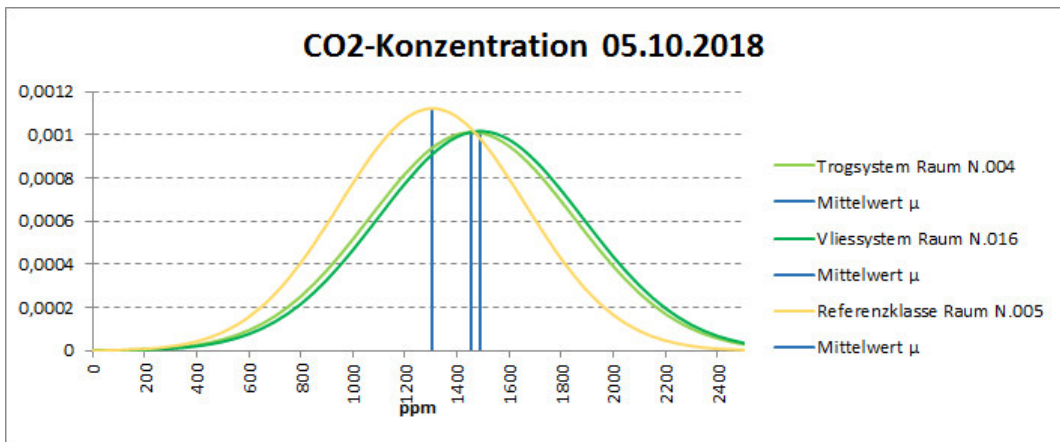


Abb. C20b: Normalverteilung der gesamten Messwerte für die CO₂-Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Es spiegelt die Situation in **Abb. C20** und **C19** wieder. Die Glockenkurven der begrüneten Klassen sind fast deckungsgleich. Der Raum N.005 liegt im Mittel etwas niedriger.

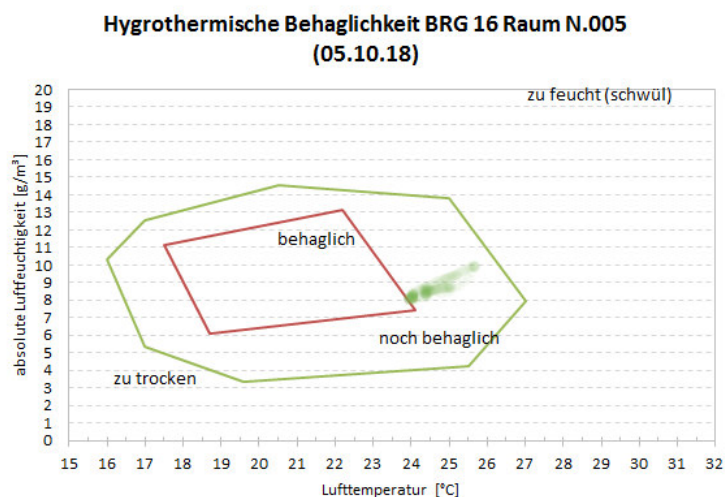


Abb. C21: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum vom 05.10.2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich verstreut. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 24-26°C und 8-10g/m³.

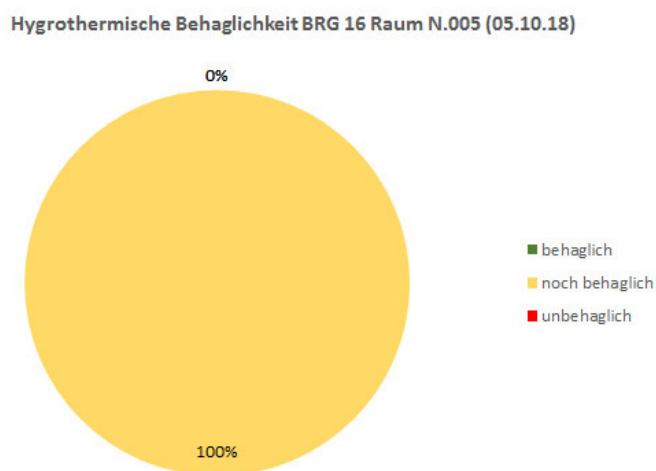


Abb. C22: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.C21** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein Achtel der Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Im Vergleich zum Referenzraum des BRG 15 ist die Ausgangssituation besser.

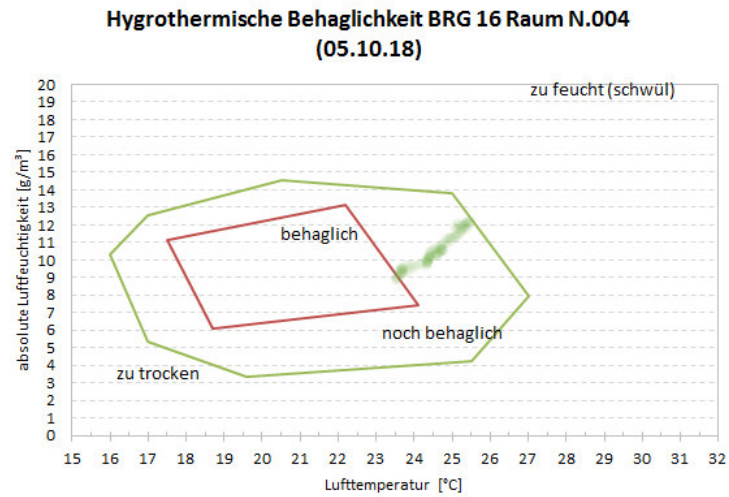


Abb. C23: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum vom 05.10.2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich weit verstreut. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 23,5-26°C und 9-12g/m³.

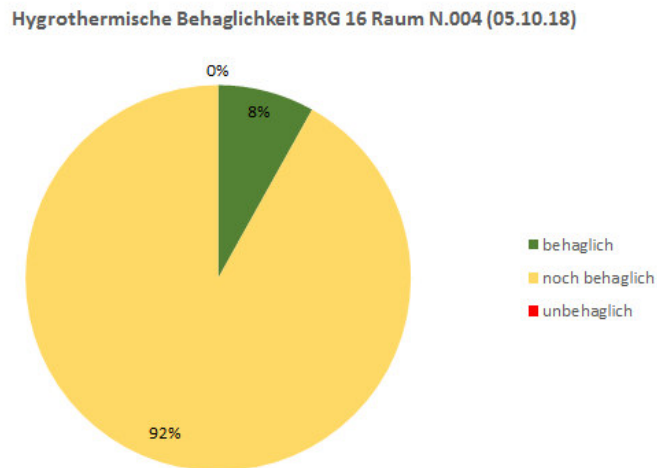


Abb. C24: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.C23** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen knapp ein Zehntel der Werte im behaglichen (grün) Bereich. Dem Diagramm zufolge steht der Raum besser da als Raum N.005

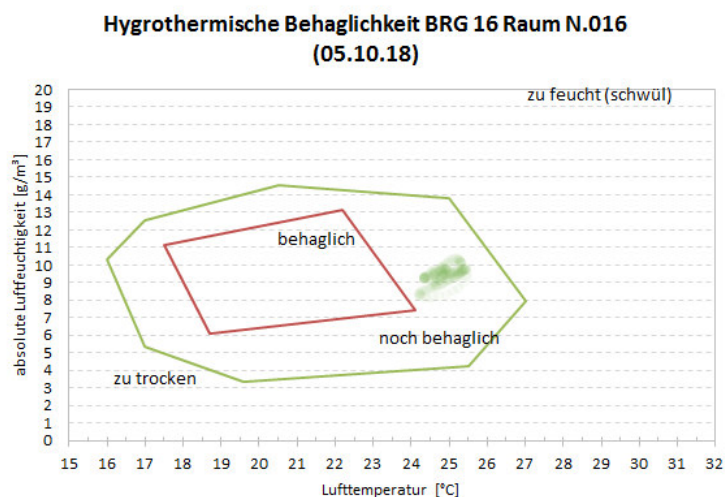


Abb. C25: Es wurden alle Messwerte während des Unterrichts im Zeitraum vom 05.10.2018 berücksichtigt. Deutlich befinden sich die Wertpaare überwiegend im „noch behaglichen“ Bereich konzentriert. Grob befinden sich die Werte im Bereich von 23-26°C und 8-10g/m³.

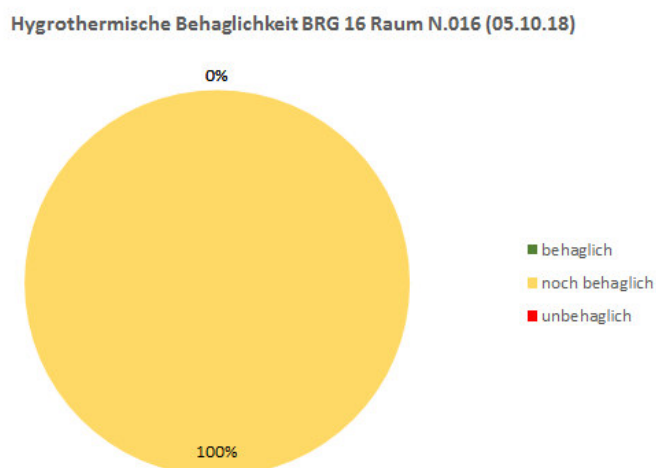


Abb. C26: In diesem Kuchendiagramm wird die Gesamtsituation aus **Abb.C25** in Prozent und mithilfe des Ampelfarbschemas ausgedrückt. Es liegen alle Werte im „noch behaglichen“ (gelb) Bereich. Dem Diagramm zufolge steht der Raum schlechter da als Raum N.004.

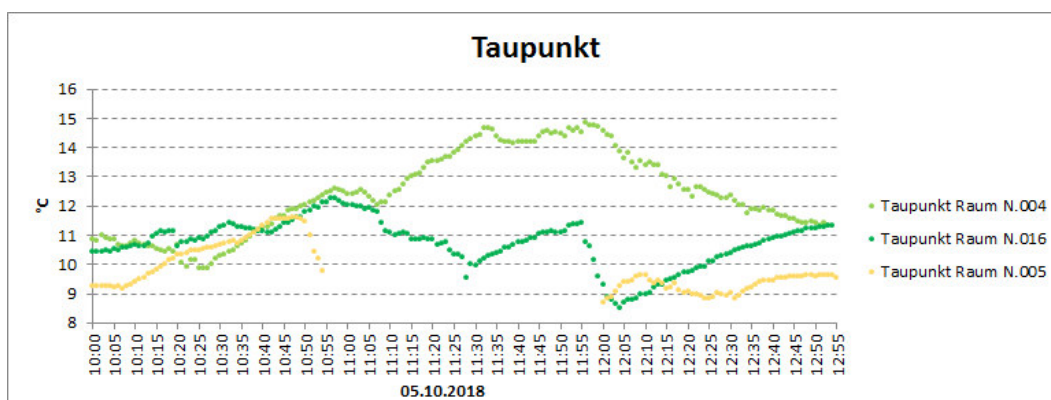


Abb. C27: Werte, errechnet aus Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, für die absolute Luftfeuchtigkeit, aufgezeichnet während des Unterrichts für den jeweiligen Beobachtungszeitraum. Hier lässt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei der absoluten Luftfeuchtigkeit ablesen (vgl. **Abb. C17**). Die Räume N.016 und N.004 liegen über dem Referenzraum.

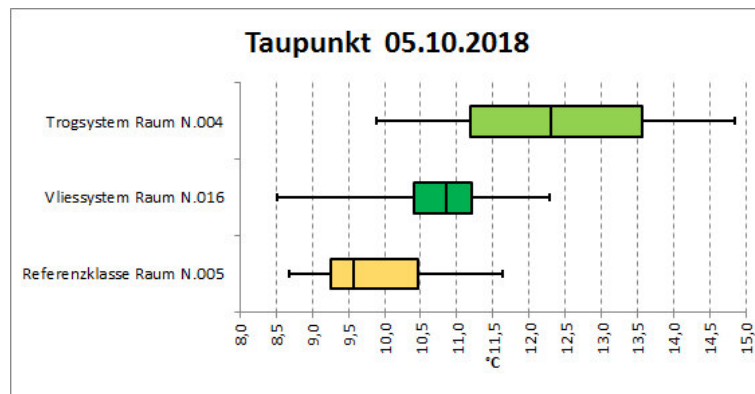


Abb. C28: Boxplot der gesamten Daten die während des Unterrichts an dem Freitag im besagten Zeitraum aufgezeichnet wurden. Dieses Diagramm widerspiegelt die Situation in **Abb. C28**. Im Bereich zwischen dem 1. und 3. Quartil ist die Streuung in Raum N.016 am geringsten. Die größte Streuung weist Raum N.004 auf.

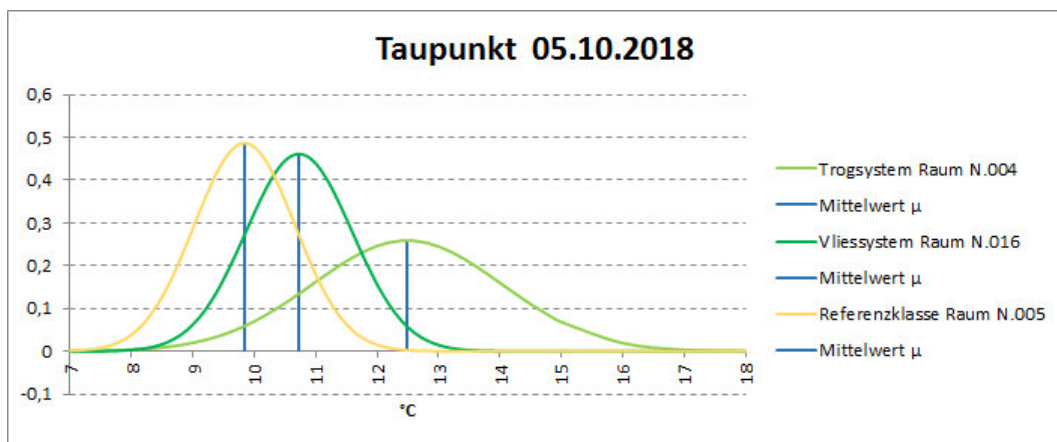


Abb. C29: Normalverteilung der gesamten Messwerte für die CO_2 -Konzentration, die während des Unterrichts erhoben wurden. Es stellt die Situation in **Abb. C28** und **C27** gut dar. Die Klassen mit Grünwand liegen im Schnitt über Raum N.005. Mit der flachen Kurve hat Raum N.004 die weiteste Streuung.

Klassenraum-Survey – BRG 16

Datum: 05.10.2018

Mo Di Mi Do Fr

Schule

BRG 15 BRG 16 GR 7

Raum: N.004

Trog Vlies Referenz

| Uhrzeit | Anzahl der Schüler | Anzahl u. Art d. Elektronikgeräte in Betrieb | Lüften 1 | Dauer [min] | Lüften 2 | Dauer [min] | Lüften 3 | Von wann bis wann im Raum [min] |
|--|--------------------|--|---|--|--|---------------------------------------|--|---------------------------------|
| 3te Stunde 10:00-10:50 Oder 10:05-10:55 | 15 | -Tageslichtprojektor -Laptop | <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | 10:12 – 10:22 Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 3 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |
| 4te Stunde 11:00-11:50 Oder 11:05-11:55 | 27 | -Beamer -Laptop | <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | 11:45 – 11:55 Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 1 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |
| 5te Stunde 12:00-12:50 Oder 12:05-12:55 | 0 | X | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |

Anmerkungen:

Klassenraum-Survey – BRG 16

Datum: 05.10.2018

Mo Di Mi Do Fr

Schule

BRG 15 BRG 16 GR 7

Raum: N.016

Trog Vlies Referenz

| Uhrzeit | Anzahl der Schüler | Anzahl u. Art d. Elektronikgeräte in Betrieb | Lüften 1 | Dauer [min] | Lüften 2 | Dauer [min] | Lüften 3 | Von wann bis wann im Raum [min] |
|--|--------------------|--|--|--|---|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| 3te Stunde 10:00-10:50 Oder 10:05-10:55 | 23 | -Computer -Beamer | <input checked="" type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | 10:50 – 10:55 Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 2 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | |
| 4te Stunde 11:00-11:50 Oder 11:05-11:55 | 23 | Computer | <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | 11:05 – 11:55 Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 2 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | |
| 5te Stunde 12:00-12:50 Oder 12:05-12:55 | 12 | Computer | <input checked="" type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | 12:05 – 12:55 Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 2 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür _ | |

Anmerkungen:

Klassenraum-Survey – BRG 16

Datum: 05.10.2018

Mo Di Mi Do Fr

Schule

BRG 15 BRG 16 GR 7

Raum: N. 005

Trog Vlies Referenz

| Uhrzeit | Anzahl der Schüler | Anzahl u. Art d. Elektronikgeräte in Betrieb | Lüften 1 | Dauer [min] | Lüften 2 | Dauer [min] | Lüften 3 | Von wann bis wann im Raum [min] |
|--|--------------------|--|--|--|--|---------------------------------------|--|---------------------------------|
| 3te Stunde 10:00-10:50 Oder 10:05-10:55 | 23 | -Computer (Standby) -Beamer (Standby) | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | 10:12 – 10:22 Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 1 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |
| 4te Stunde 11:00-11:50 Oder 11:05-11:55 | 0 | X | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |
| 5te Stunde 12:00-12:50 Oder 12:05-12:55 | 20 | -Computer (Standby) -Beamer (Standby) | <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input checked="" type="checkbox"/> Tür __ | 12:30 – 12:55 Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 2 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | Große Fenster: 0 Kleine Fenster: 0 | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |

Anmerkungen:

3te Stunde Raum leer von 10:32 – 10:42

Klassenraum-Survey – BRG 15

Datum: _____ .2018



Türen geschlossen

Mo Di Mi Do Fr

10:00 - 10:03 : Haupt-Tür

Schule

BRG 15 BRG 16 GR 7

10:03 - 10: 50 : großes Fenster ganz offen ☺

Raum:

Trog Vlies Referenz

| Uhrzeit | Anzahl der Schüler | Anzahl u. Art d. Elektronikgeräte in Betrieb | Lüften 1 | Dauer [min] | Lüften 2 | Dauer [min] | Lüften 3 | Von wann bis wann im Raum [min] |
|---|-------------------------|---|--|--|--|-------------|--|---------------------------------|
| 3te Stunde 10:00-10:50 Oder 10:05-10:55 | 21 + Ich + Lehrer | 5 min Beamer genutzt ↓ | <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | 10:00 60 10:50 Beamer | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | 10:00 10:22 22 min |
| 4te Stunde 11:00-11:50 Oder 11:05-11:55 | 22+ Ich + Lehrer | Beamer an + halb verdunkelt (Beleuchtung aus) | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ Nichts offen | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | 11:22 - 11:50 28 min |
| 5te Stunde 12:00-12:50 Oder 12:05-12:55 | 21 + Lehrer + Ich | Beamer an halb- schatten | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |

Anmerkungen:

Klassenraum-Survey – BRG 15

Datum: _____ .2018

Mo Di Mi Do Fr

Schule

BRG 15 BRG 16 GR 7

Raum:

Trog Vlies Referenz

| Uhrzeit | Anzahl der Schüler | Anzahl u. Art d. Elektronikgeräte in Betrieb | Lüften 1 | Dauer [min] | Lüften 2 | Dauer [min] | Lüften 3 | Von wann bis wann im Raum [min] |
|--|------------------------|--|--|-------------|--|-------------|--|---------------------------------|
| 3te Stunde 10:00-10:50 Oder 10:05-10:55 | | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |
| 4te Stunde 11:00-11:50 Oder 11:05-11:55 | | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | |
| 5te Stunde 12:00-12:50 Oder 12:05-12:55 | 21 + Ich + Leber | Belichtung aus + Beamer an | im der Pause <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ und offen bis schluss | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür __ | 12:00-12:15 15 min |

Anmerkungen:

Klassenraum-Survey – BRG 15

Datum: _____ .2018

Mo Di Mi Do Fr

Schule

BRG 15 BRG 16 GR 7

Raum:

Trog Vlies Referenz

10:22 – 10:50
keine Lüftung

no

| Uhrzeit | Anzahl der Schüler | Anzahl u. Art d. Elektronikgeräte in Betrieb | Lüften 1 | Dauer [min] | Lüften 2 | Dauer [min] | Lüften 3 | Von wann bis wann im Raum [min] |
|--|---|---|---|------------------------------|---|-------------|---|---------------------------------|
| 3te Stunde 10:00-10:50 Oder in der Pause abgucken 10:05-10:55 | 25 + Tsch + Lehrer | Fenster offen Beamer auch am Anfang Beleuchtung aus | keine Lüftung Wohi <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | geöffnet mittels Rolläden | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | 10:22-10:50 28 min |
| 4te Stunde 11:00-11:50 Oder 11:05-11:55 | ganz geöffnet auch 11:00 bis 11:50 24x Tsch Lehrer | Beleuchtung 113 an | 11:00-11:50 <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | 11:00 bis 11:22 22 min |
| 5te Stunde 12:00-12:50 Oder 12:05-12:55 | 26 + Tsch + Tsch | Ballen Verdunkelung + Beamer | ganz <input type="checkbox"/> Kipp <input checked="" type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | | <input type="checkbox"/> Kipp <input type="checkbox"/> offen <input type="checkbox"/> Tür | |

Anmerkungen:

251

10:00 LEHRER + 15 Schüler
TÜR zu R252 offen
1 Fenster offen

10⁰⁰ - 10⁵⁰ Beamer
an

10:18 TÜR ^{raus} offen (Kollege TU): Luftzug

10:46 TÜR zu R252 zu

10:50 _____ auf
Tür raus offen (Pause): Luftzug

10:55 LEHRER + 20 Schüler
TÜR zu R252 offen
TÜR raus zu
1 Fenster offen

11:06 Beamer AN

11:44 Beamer AUS

11:45 Schüler raus