

Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
FRAUNHOFER-IBP

Forschung, Entwicklung,  
Demonstration und Beratung auf  
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,  
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für  
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

**Institutsleitung**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht RK 015/2012/294

## **Sanierung Kloster Roggenburg – Innovatives Heizsystem in denkmalgeschützten Gebäuden Kurztitel: Roggenburg Klosterräume**

Durchgeführt im Auftrag:  
Kloster Roggenburg  
Klosterstrasse 5  
89297 Roggenburg

Der Bericht umfasst  
56 Seiten Text  
2 Tabellen  
35 Abbildungen

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit  
schriftlicher Genehmigung des Fraun-  
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

Dipl.-Rest. Univ. Ralf Kilian / M.Eng. Stefan Bichlmair  
Dipl.-Rest. Kristina Holl / Dipl.-Ing. Doris Rösler

Valley, 18. Juni 2012

Abteilungsleiter



Dr.-Ing.  
Gunnar Grün

Gruppenleiter



Dipl.-Restaurator Univ.  
Ralf Kilian

Bearbeiter



M.Eng.  
Stefan Bichlmair

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Hintergrund der Untersuchungen</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Untersuchung für Bauabschnitt 1</b>	<b>4</b>
2.1	Messtechnische Begleitung der Sanierungsmaßnahmen	4
2.2	Untersuchung zur Fensterlüftung – Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels mittels Blower Door	30
2.3	Strömungsmessung	31
<b>3</b>	<b>Simulation des Einflusses der Sanierungsmaßnahmen auf Innenraumklima und Energiebedarf</b>	<b>32</b>
	Durchführung der Berechnungen	32
3.1.1	Hygrothermisches Raumklimamodell	32
3.1.2	Hygrothermische Berechnungen zum Innenraumklima vor der Sanierung	33
3.1.3	Hygrothermische Berechnungen zum Innenraumklima nach der Sanierung	39
3.1.4	Hygrothermische Berechnungen zum Einfluss der Lüftungsöffnungen auf das Innenraumklima	41
3.2	Ergebnisse der Berechnungen und Bewertung	41
3.2.1	Einfluss der Sanierungsmaßnahmen auf das Innenraumklima	41
3.2.2	Einfluss der Sanierungsmaßnahmen auf die Behaglichkeit	43
3.2.3	Einfluss der einzelnen Sanierungsmaßnahmen auf den Heizenergiebedarf	45
3.2.4	Einfluss der Lüftungsöffnungen auf das Innenraumklima	47
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>51</b>

# 1 Hintergrund der Untersuchungen

Das Prämonstratenserklöster Roggenburg wurde 1126 gegründet. Nach der Säkularisation 1802 wurde das Gebäude als Schule und Verwaltungszentrum genutzt. Seit 1982 ist das Kloster wieder in seiner ursprünglichen Funktion in Betrieb.

Als Heizsystem fungierte vor der Sanierung im ersten Stock eine Ölheizung (ursprünglich wurde mit Holz geheizt), im Erdgeschoss und im zweitem Obergeschoss wurde mit Nachtspeicheröfen geheizt. Die vorgefundene Heizsituation ist weder verträglich für die langfristige Erhaltung der wertvollen künstlerischen Ausstattung wie Decken- und Wandmalereien oder Gemälden, noch auf die Behaglichkeit der Bewohner abgestimmt.

Vor allem im ersten Obergeschoss ist die künstlerische Ausstattung der Klosteranlage durch die zu groß dimensionierte Konvektionsheizung verschmutzt bzw. beschädigt, die Stuckierungen in den Gängen sind aufgrund von ungeeigneten Klimabedingungen (zu geringe relative Feuchte) stark gelockert und mussten notgesichert werden. An Gemälden treten starke Schäden in Form von Aufschüsselungen und Schollenbildung auf. Die beobachteten Schäden sind im Wesentlichen durch falsches Heizen und Lüften durch die Nutzer der letzten Jahrhunderte verursacht.

Im Rahmen der Sanierung der Klosteranlage soll das Heizsystem in mehreren Bauabschnitten innovativ und denkmalverträglich, unter Berücksichtigung von Aspekten der Präventiven Konservierung, erneuert werden. Dazu wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) ein Projekt gefördert, das die Entwicklung der Wärme-Heizkörper und die wissenschaftliche Begleitung der Sanierungs-Maßnahmen umfasst.

Die Ausstattung der Räume im Obergeschoss ist aufgrund der bisherigen Heizsituation v.a. durch Verstaubung und Verrußung gefährdet. Die punktuell höhere Wärme hat bereits an Kunstwerken, die sich in der Nähe der Heizung befinden, zu Schäden (Substanzverluste der Fassung) geführt, z. B. im Refektorium.

Im Sinne der Präventiven Konservierung ist es notwendig in Zukunft ein Heizsystem zu verwenden, das keine weiteren Schäden an Gemälden, Wand- und Deckenmalereien sowie Stuckarbeiten hervorruft. So können langfristig konservatorische und restauratorische Maßnahmen vermieden bzw. die Wartungsintervalle ausgedehnt werden.

In den Gängen im Erdgeschoss soll eine Fußbodenheizung eingebaut werden. Da dies nicht überall im Kloster möglich ist, werden im OG Wärmekörper eingesetzt. Der Konvektionsanteil ist verantwortlich für die Luftbewegung im Raum. Daher werden für die Sanierung Heizkörper mit einem geringen Konvektionsanteil und hohem Strahlungsanteil eingesetzt.

Im Zusammenhang mit dem Einbau eines Heizungssystems muss auch nach Lösungen für eine geeignete Belüftung gesucht werden. Vor allem im Winter

sinkt durch zu hohen Luftwechsel die relative Luftfeuchte in Räumen zu sehr ab, bei Räumen, die einer Nutzung mit erhöhter Feuchtelast erfahren (Bäder, Küche), sollte dagegen ein notwendiger Mindestluftwechsel eingehalten werden, um Schimmelpilzbildung an kritischen Punkten der Gebäudehülle (Wärmebrücken) zu vermeiden.

Die Belüftung ist ein wichtiger Bestandteil des Heizkonzeptes, da hiermit eine Regelung des Raumklimas möglich ist. In den Nasszellen werden Abluftanlagen eingebaut, in den Wohn- Schlaf- und Arbeitsräumen soll die Lüftung über die Fenster erfolgen.

Zur wissenschaftlichen Beurteilung des innovativen Strahlungsheizungssystems in Kloster Roggenburg wurden verschiedene Messungen und eine Gebäudesimulation eines Teilbereichs vorgesehen. Es konnte wegen Verlust von Datenloggern während der Umbaumaßnahmen nur ein Teil dieser Messungen gemäß beauftragtem Angebot vom 5. Juli 2010 am Kloster durchgeführt und in einem ersten Zwischenbericht vom 14. November 2011 zusammengestellt werden. Anhand der Ergebnisse und weiteren Besprechungen mit dem Auftraggeber in Abstimmung mit dem Fördergeber, erfolgte ein angepasstes Angebot vom 18.01.2012 mit weiteren Messungen zu den Raumluftbedingungen sowie einer Gebäudesimulation eines Wohnraums. Der hier vorgestellte Abschlussbericht beinhaltet die Ergebnisse aus dem ersten Zwischenbericht sowie den zusätzlich durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der Gebäudesimulation zum Innenklima und Heizenergiebedarf vor und nach der Sanierung sowie zu der Wirkung der Lüftungsöffnungen auf das Innenklima werden beschrieben.

## 2 Untersuchung für Bauabschnitt 1

### 2.1 Messtechnische Begleitung der Sanierungsmaßnahmen

Für die Durchführung der messtechnischen Begleitung wurden in den 2 Bauabschnitten die nachfolgenden Datenlogger gemäß Angebot positioniert.

Datenlogger für Temperatur, relative Feuchte:

- EG Raum saniert
- EG Raum unsaniert
- EG Gang saniert
- EG Gang unsaniert
- 1. OG Raum saniert
- 1. OG Raum unsaniert
- 1. OG Gang saniert
- 1. OG Gang unsaniert
- 1. OG Refektorium (nach Sanierung, Betrachtung der Kunstwerke)
  
- Erfassung des Außenklimas

In Tabelle 1 sind die Datenlogger aufgelistet, von denen Daten ausgelesen werden konnten. Die einzelnen Positionen im Kloster sind im Bild 1 und Bild 2 eingetragen und bezeichnet.

Durch die Unwägbarkeiten des Baubetriebes gingen bedauerlicherweise einige Datenlogger, und damit Messergebnisse verloren. Von zusätzlichen weiteren Messungen wurde vorerst abgesehen. Es wurden lediglich Datenlogger für die Außenklimamessung und für den Raum 111 vor Ort belassen.

Die neu hinzugekommenen Datenlogger für die ergänzenden Messungen aus dem zweiten beauftragten Angebot sind in der Tabelle und dem Messplan ergänzend eingetragen und gekennzeichnet.

- 1. OG Gang saniert 94
- 1. OG Konventzimmer 98

Es wurde eine Periode im Winter gemessen, da gerade durch die Beheizung in historischen Gebäuden, die einen höheren Infiltrationsluftwechsel aufweisen, geringe relative Luftfeuchte zu einem Risiko für die Ausstattung und Kunstwerke des Klosters werden kann.

Dies zeigt sich insbesondere am Beispiel des Refektoriums (Bild 13 – 16), wo die relative Feuchtigkeit in einer langen Frostperiode außen bis unter 20% R.F. absinkt. Vor dem Hintergrund der Erhaltung von Kunstwerken befindet sich das Raumklima damit in einem kritischen Bereich, in dem Materialien verspröden. Zudem ist davon auszugehen, dass im Sommer hohe Feuchteereignisse auftreten, was zu einer starken Belastung der Kunstwerke im Raum führt. Dies ist deutlich an verschiedenen Schäden ablesbar.

Tabelle 1:  
Übersicht der zugänglichen Aufzeichnungen der noch vorhandenen Datenlogger für Temperatur und relative Feuchte. Die Räume auf denen für die energetische Bewertung Bezug genommen wird, sind farbig markiert.

	Raumbezeichnung	Raumnummer	Bauabschnitt	Geräte- nummer	Zeitraum		Messstatus
EG	Raum saniert	31	BA 1	1040-323	03.11.2010	-	beendet
EG	Gang saniert	29b	BA 1	1040-321	03.11.2010	30.05.2011	beendet
OG	Konventz. saniert	98	BA 1	1104-122	10.01.2012	19.04.2012	beendet
OG	Gang saniert	94	BA 1	1104-106	10.01.2012	19.04.2012	beendet
EG	Gang unsaniert	29c	BA 2	0931-198	03.11.2010	21.01.2011	beendet
EG	Gang unsaniert	29c	BA 2	1040-325	24.01.2010	30.05.2011	beendet
EG	Pfarrbüro unsaniert	48	BA 2	1032-105	03.11.2010	30.05.2011	beendet
OG	Refektorium Klavier	104	BA 2	1032-118	03.11.2010	03.11.2010	beendet
OG	Refektorium Schrank	104	BA 2	0931-172	03.11.2010	21.01.2011	beendet
OG	Zimmer/Büro	111	BA 2	1032-103	03.11.2010	21.01.2011	beendet
OG	Gang	106	BA 2	1032-119	03.11.2010	21.01.2011	beendet
OG	Außenklima		BA 1	0931-016	03.11.2010	19.04.2012	beendet

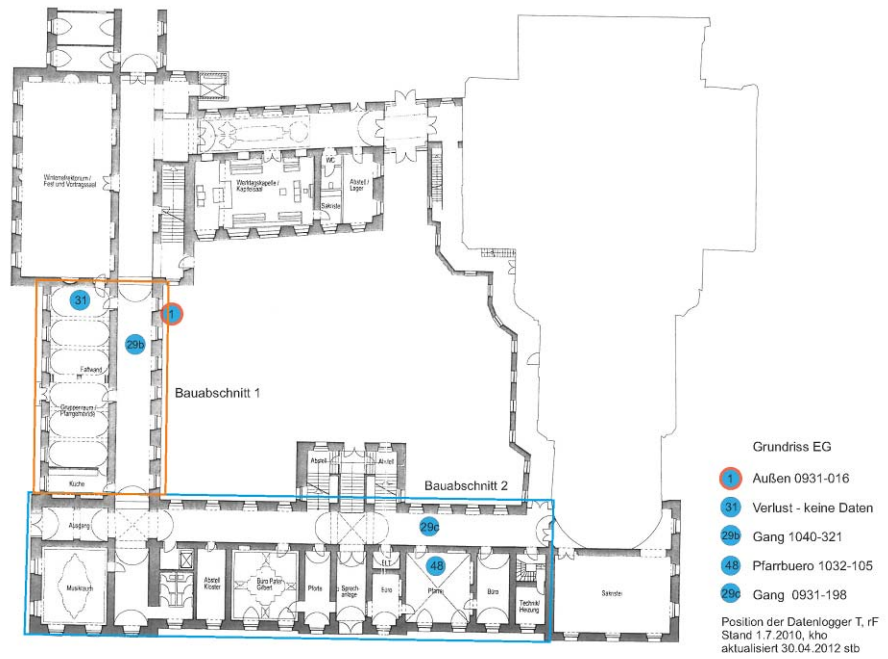


Bild 1:  
Grundriss im Erdgeschoss mit Übersicht der Positionierung der Datenlogger.



Bild 2:  
Grundriss im Obergeschoss mit Übersicht der Positionierung der Datenlogger.  
Der Raum für die Blower Door Messung ist orange markiert.

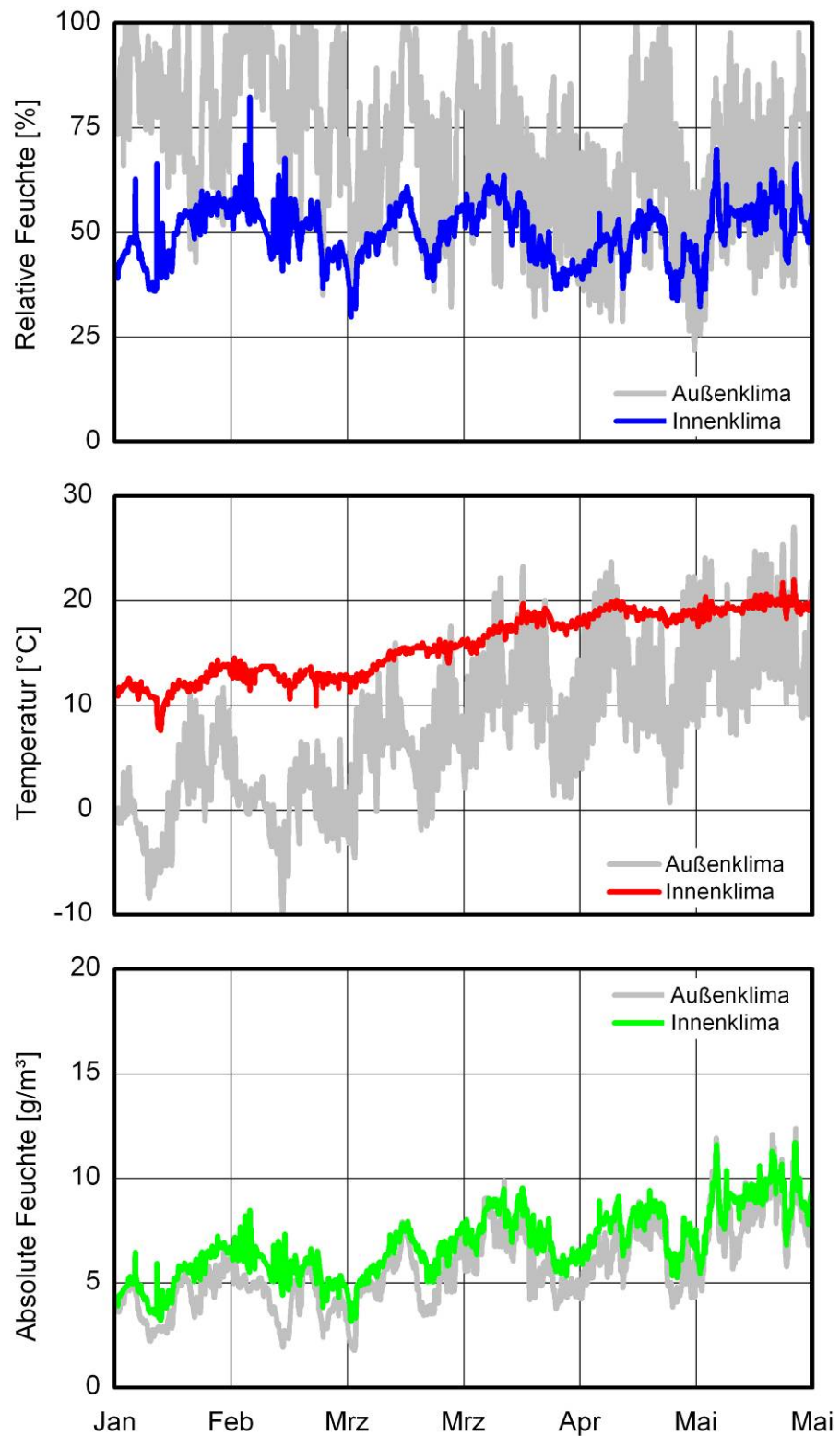


Bild 3:  
 Datenlogger 1040-321: Gang 29b, EG, BA1.  
 Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündlicher Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.



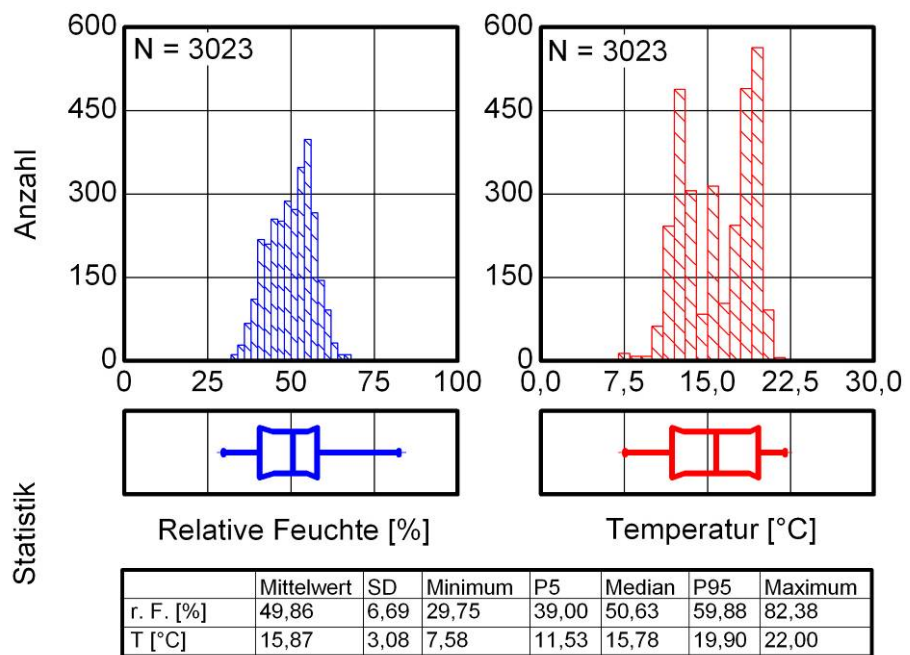
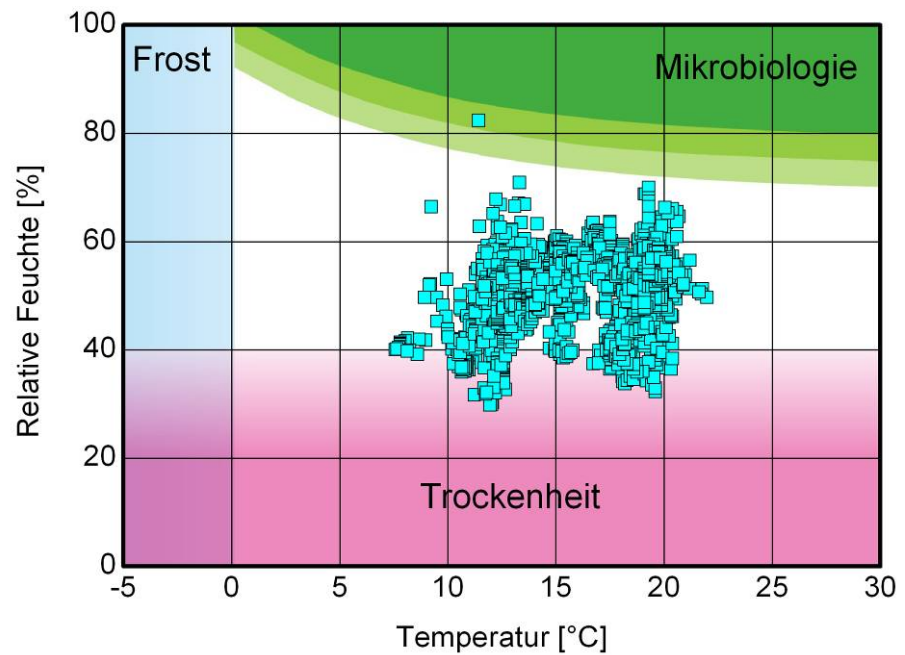


Bild 4:  
 Datenlogger 1040-321: Gang 29b, EG, BA1.  
 Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.  
 Unten Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.

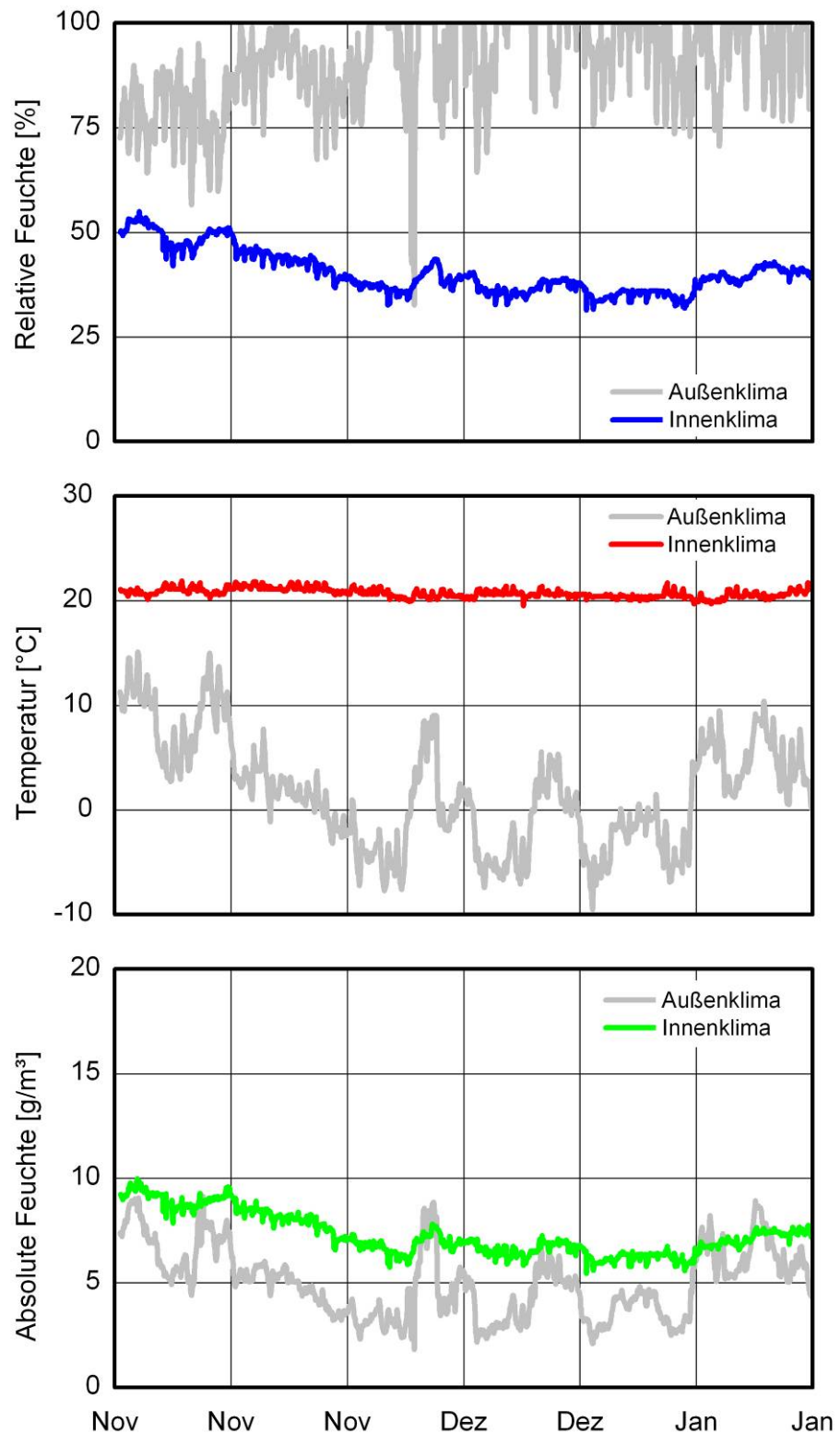


Bild 5:  
 Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2.  
 Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluten Feuchte als stündlicher Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

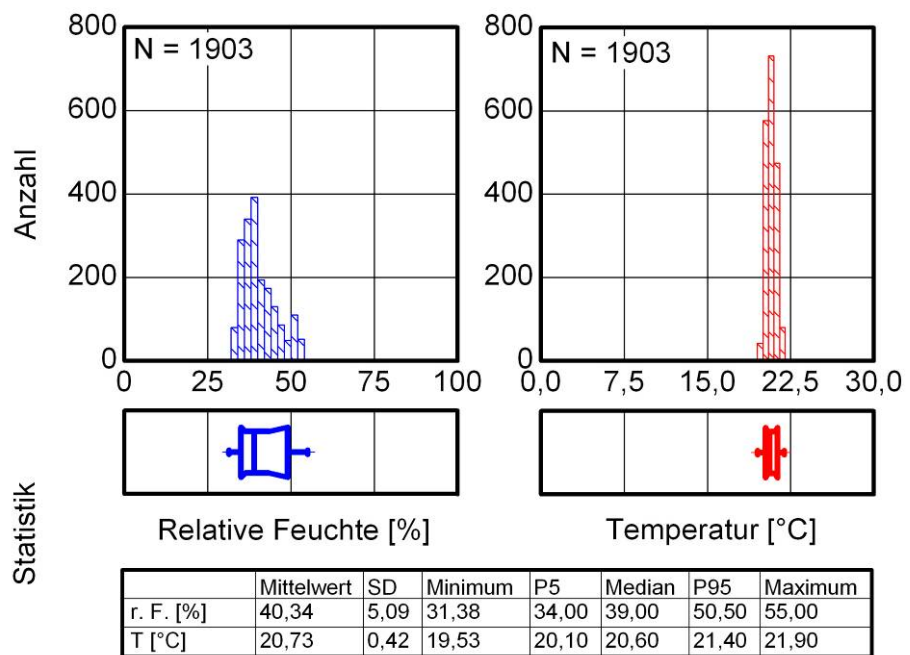
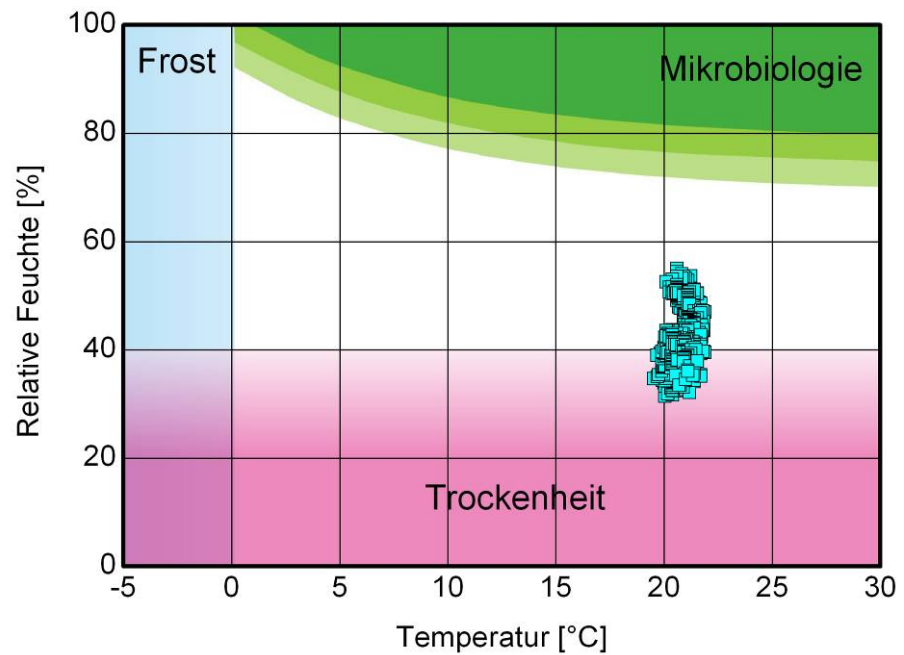


Bild 6:  
 Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2.  
 Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.  
 Unten Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

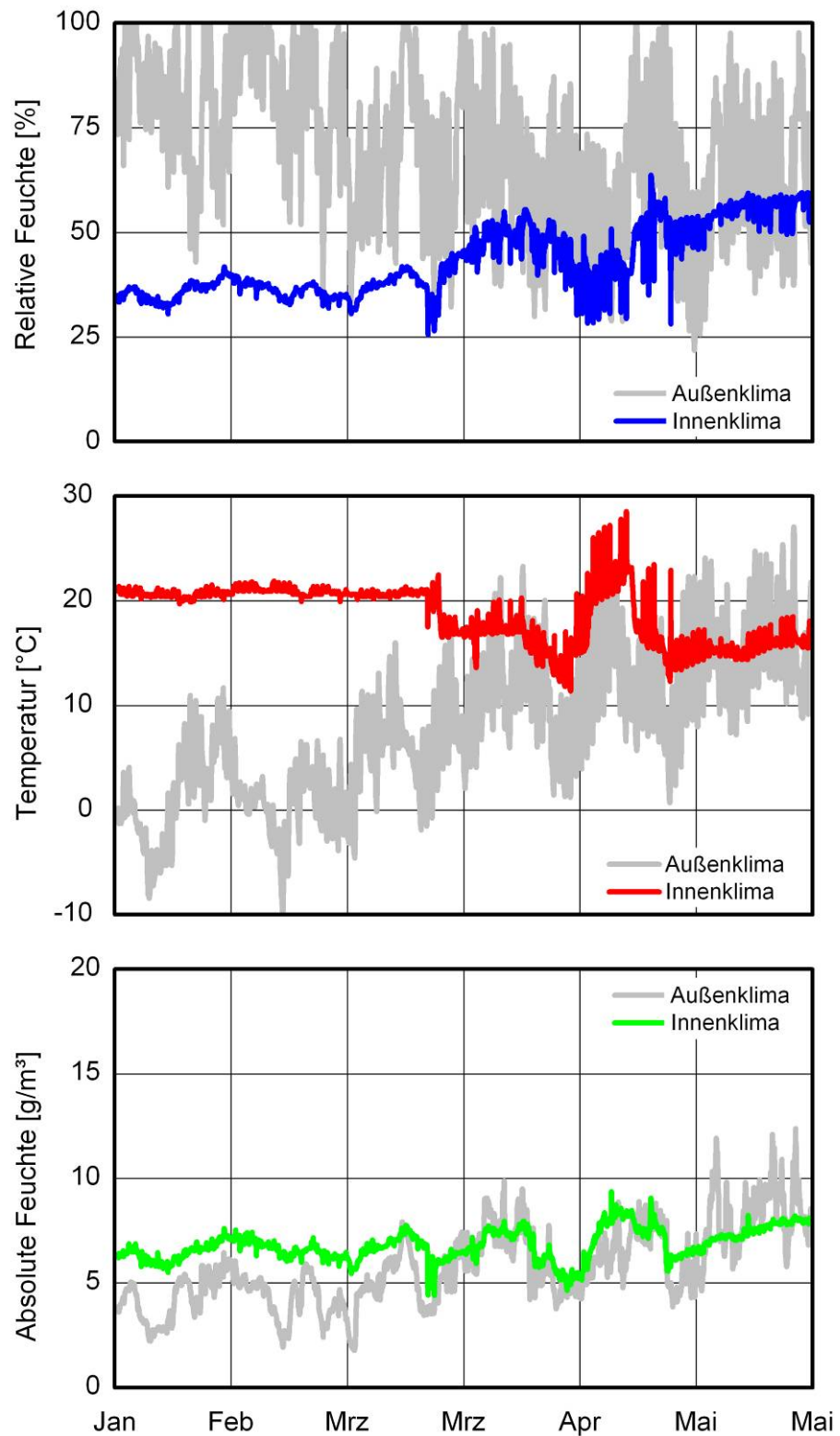


Bild 7:  
 Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2.  
 Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.

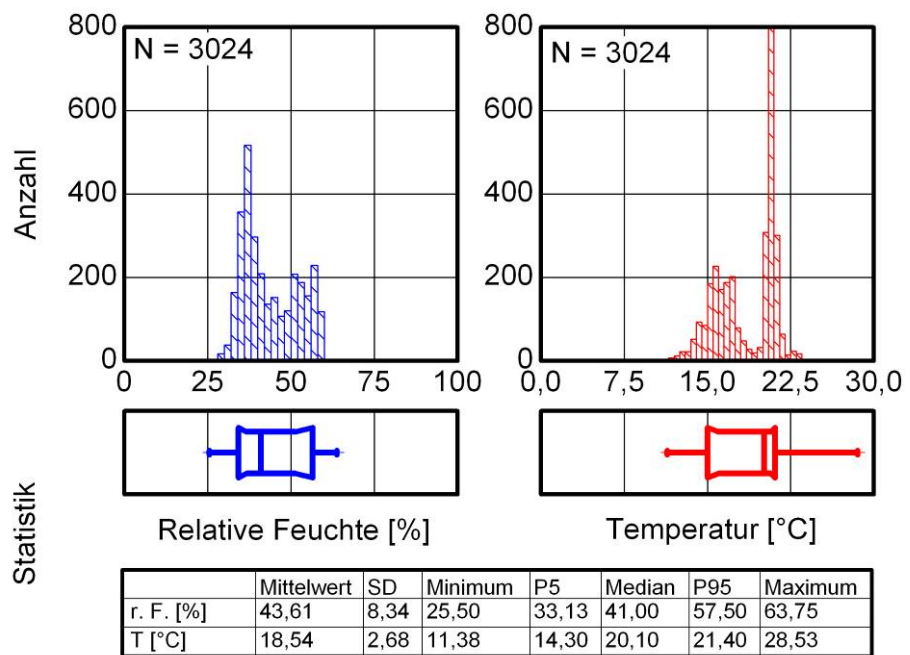
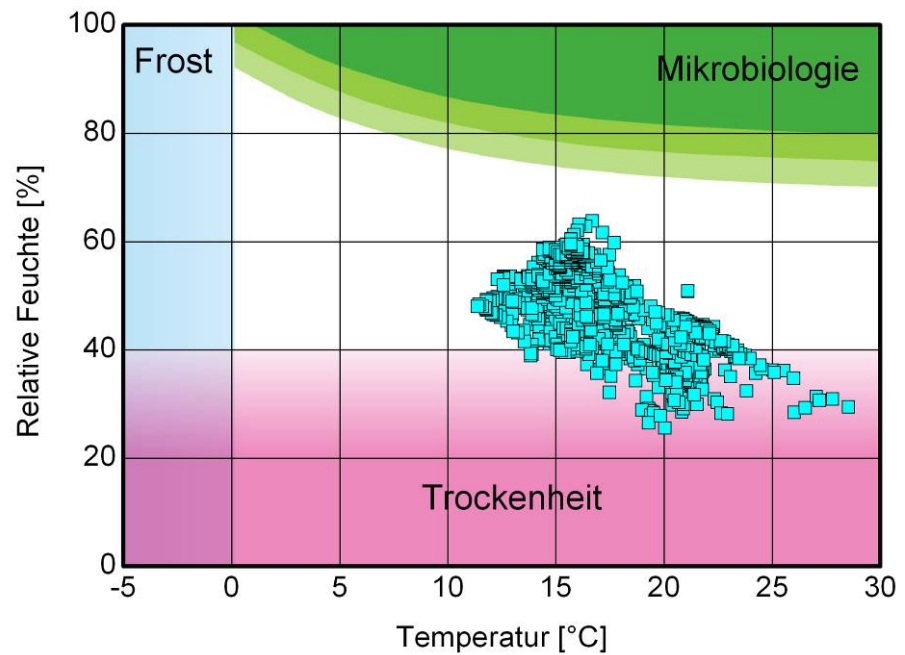


Bild 8:

Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2.

Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.

Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.

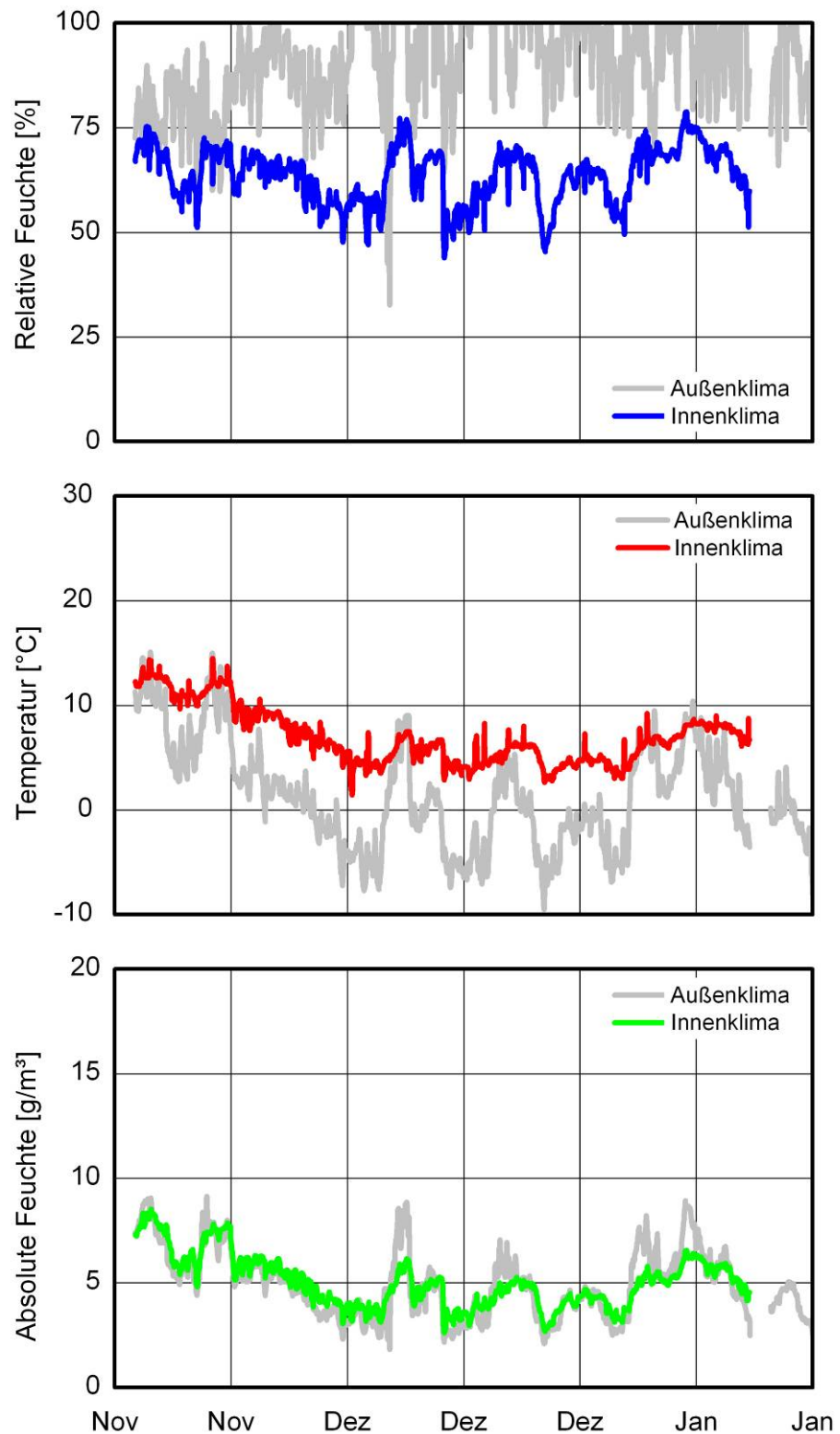


Bild 9:  
 Datenlogger 0931-198: Gang 29c, EG, BA 2.  
 Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

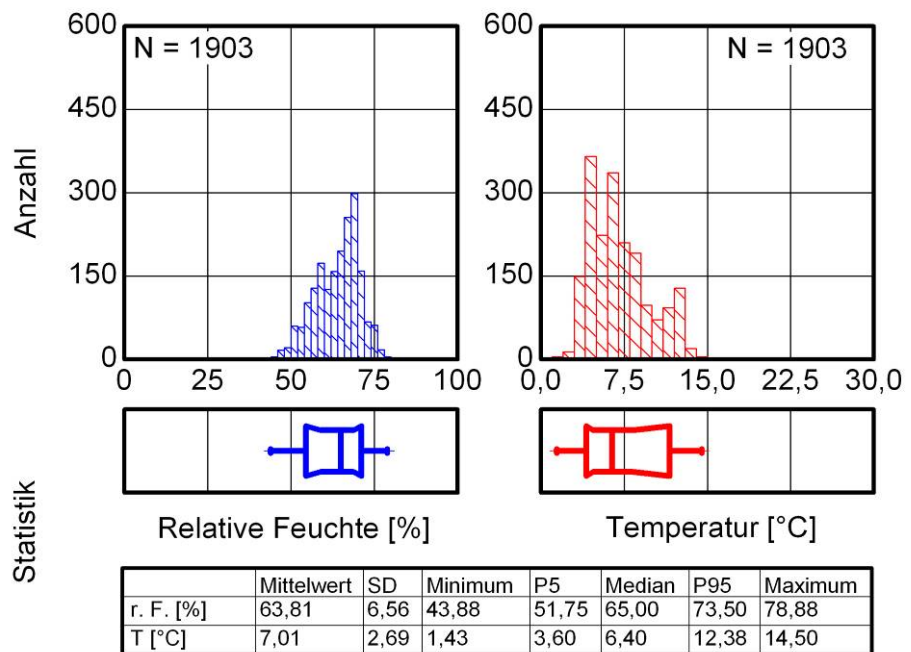
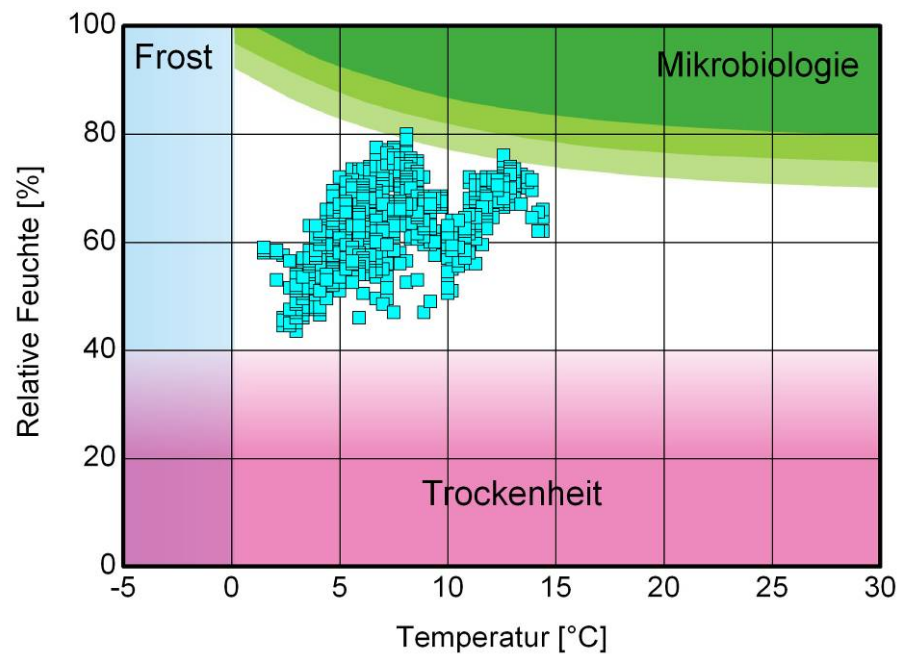


Bild 10:

Datenlogger 0931-198: Gang 29c, EG, BA 2.

Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.

Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

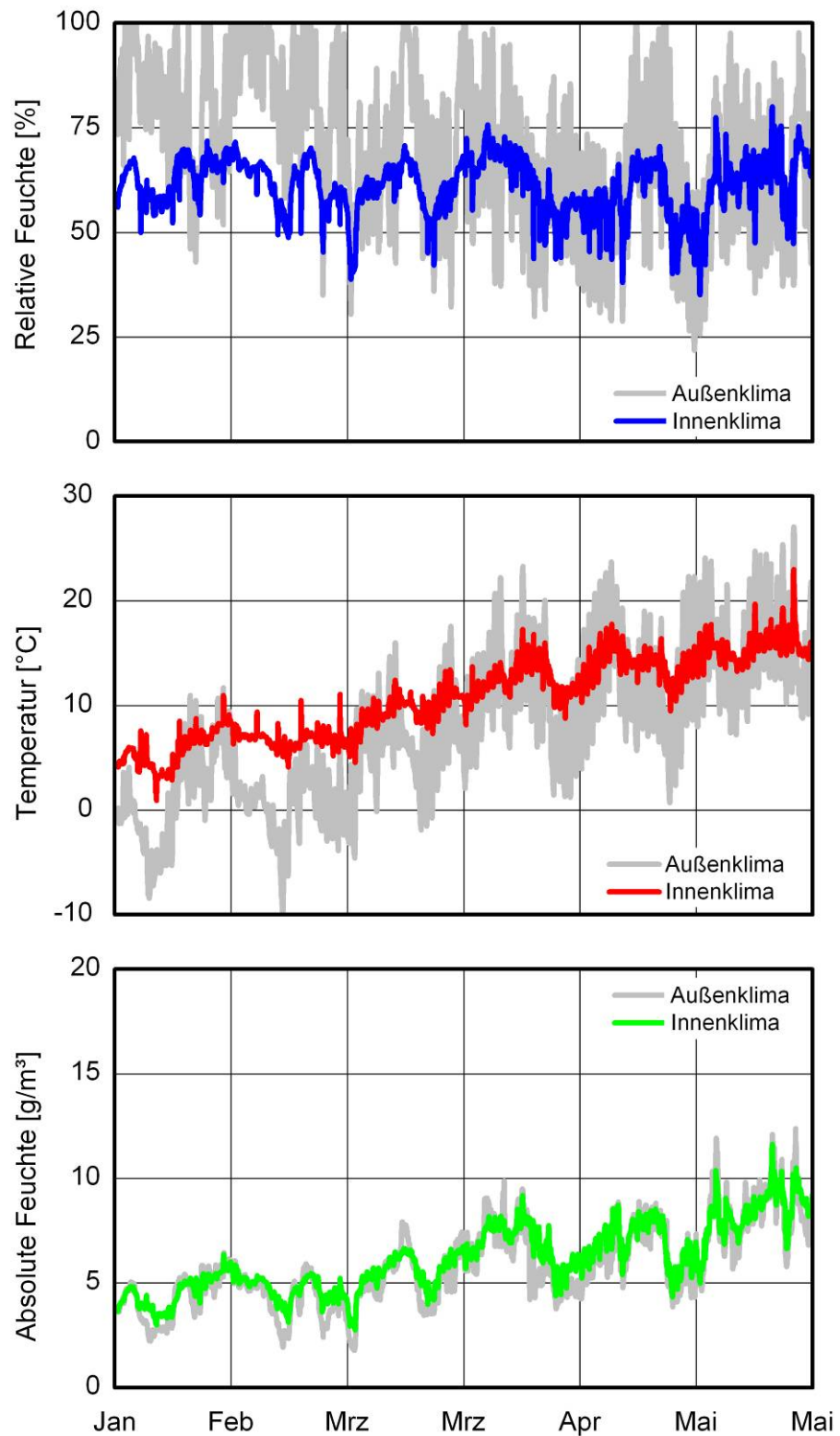


Bild 11:  
 Datenlogger 1040-325: Gang 29c, EG, BA 2.  
 Datenlogger neu wegen Verlust des Sensors.  
 Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündlicher Mittelwert der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.



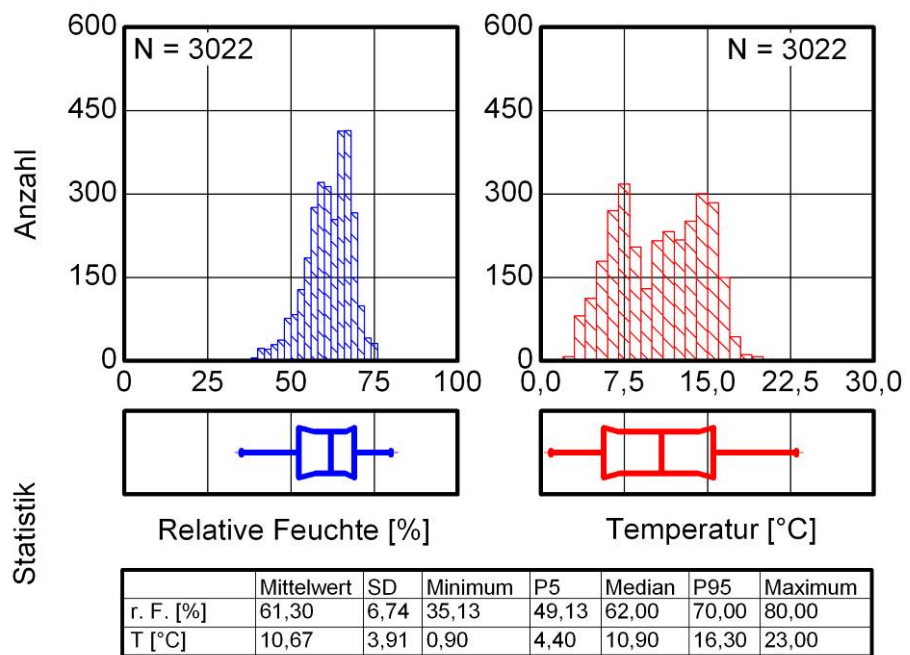
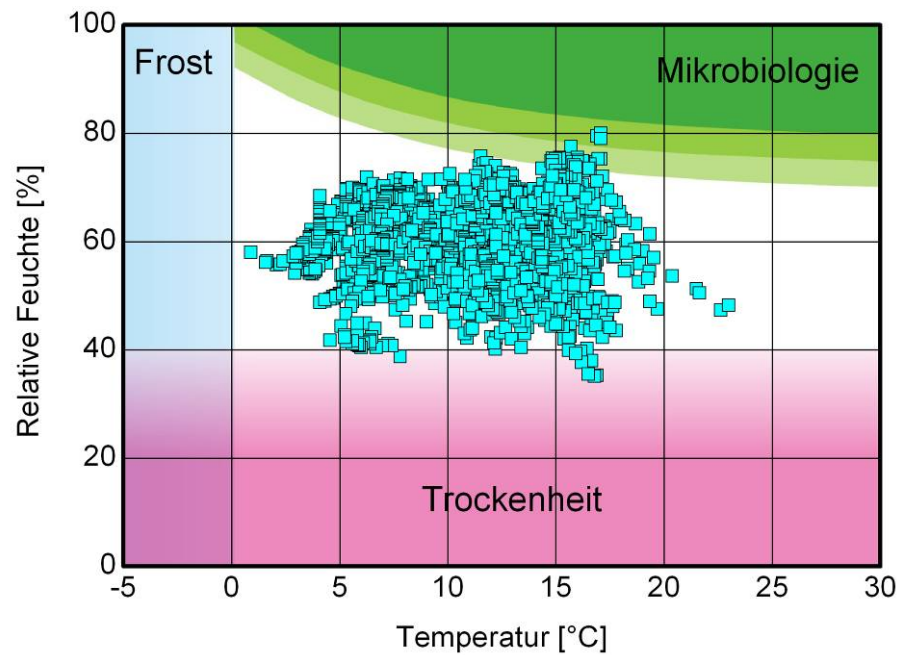


Bild 12:

Datenlogger 1040-325: Gang 29c, EG, BA 2.

Datenlogger neu wegen Verlust des Sensors.

Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.

Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.

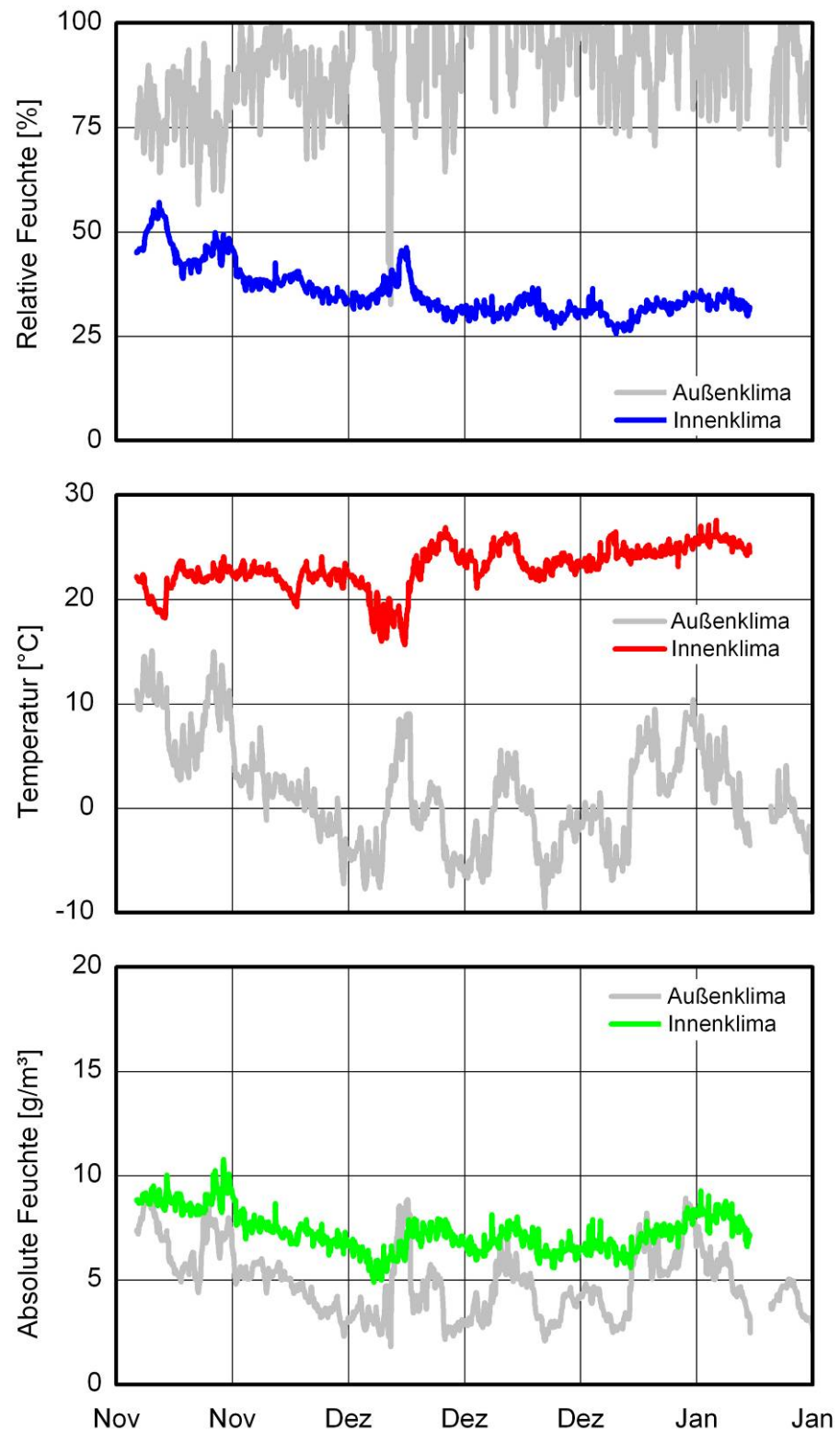


Bild 13:

Datenlogger 1032-118: Speisesaal 104, Klavier, OG, BA2.

Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

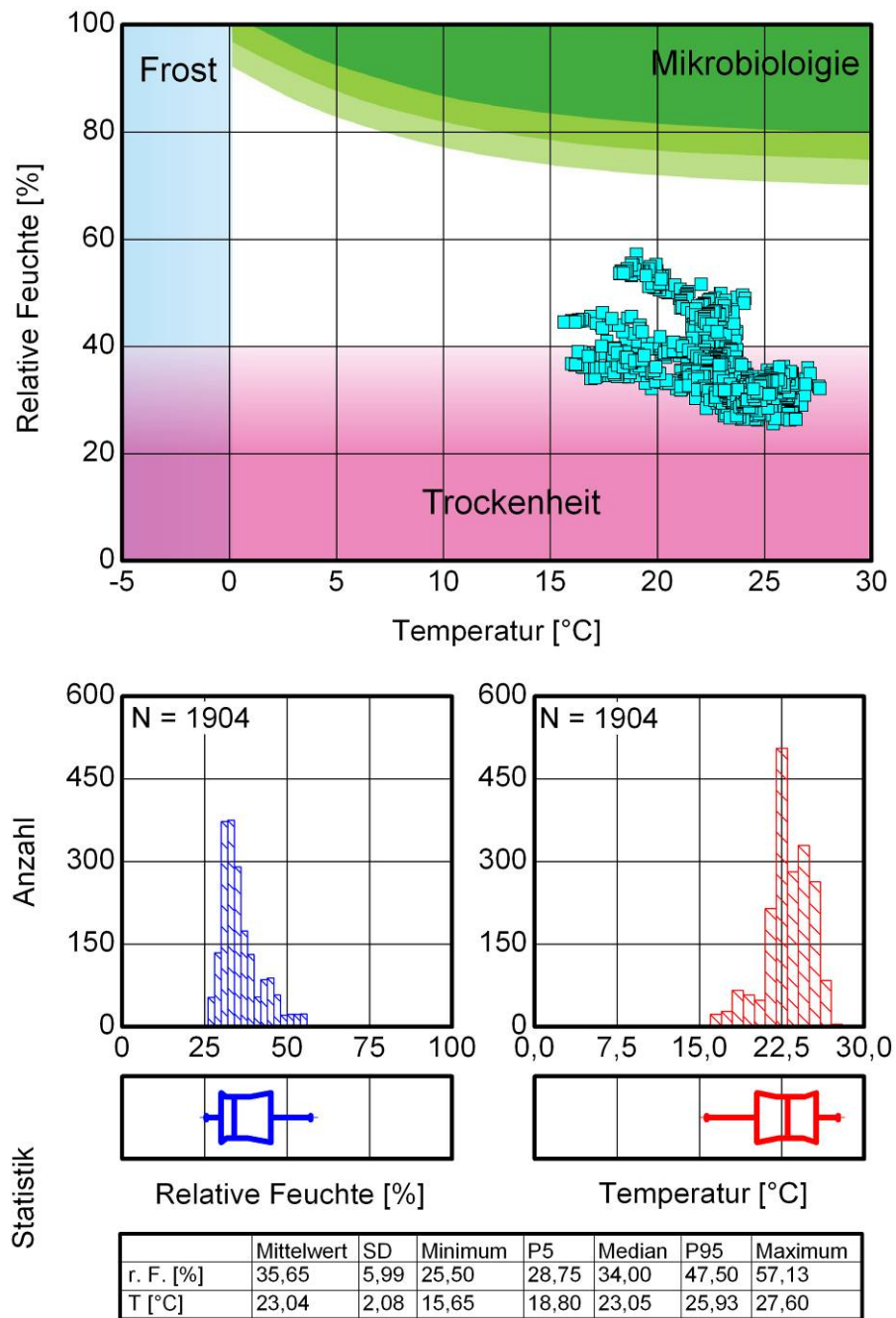


Bild 14:

Datenlogger 1032-118: Speisesaal 104, Klavier, OG, BA2.

Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.

Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

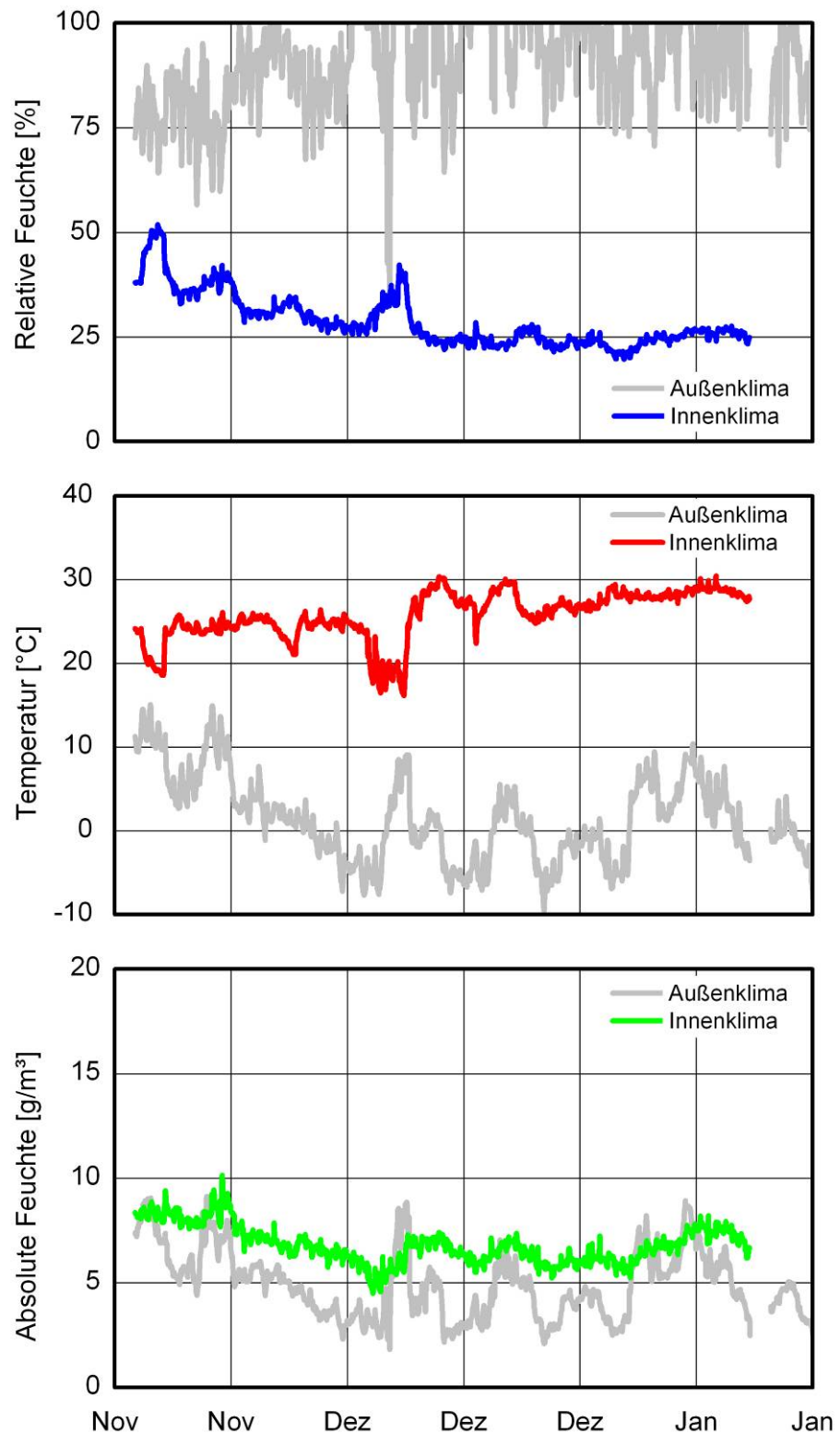


Bild 15:

Datenlogger 0931-172: Speisesaal 104, Schrank, OG, BA2.

Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

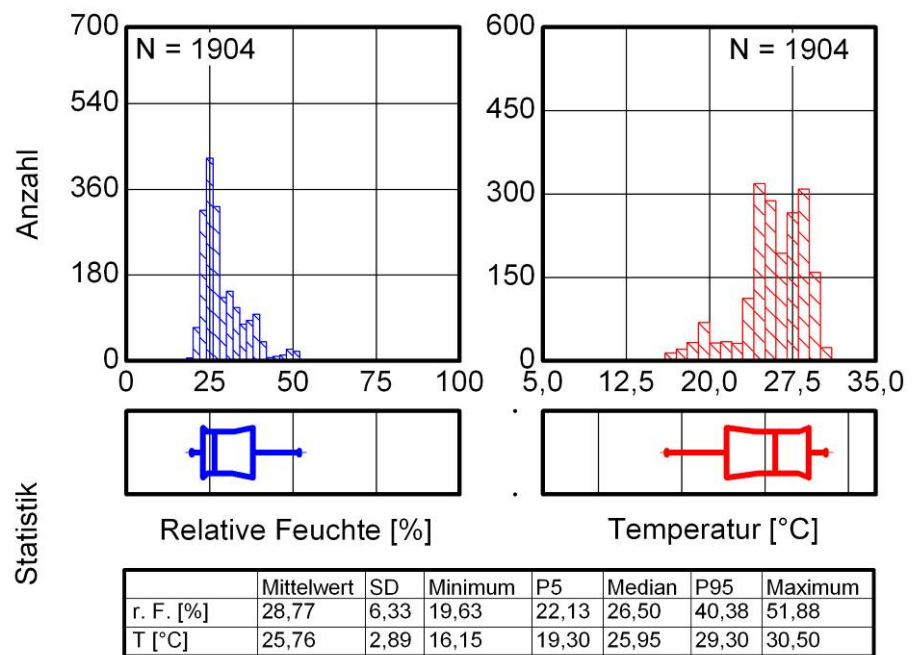
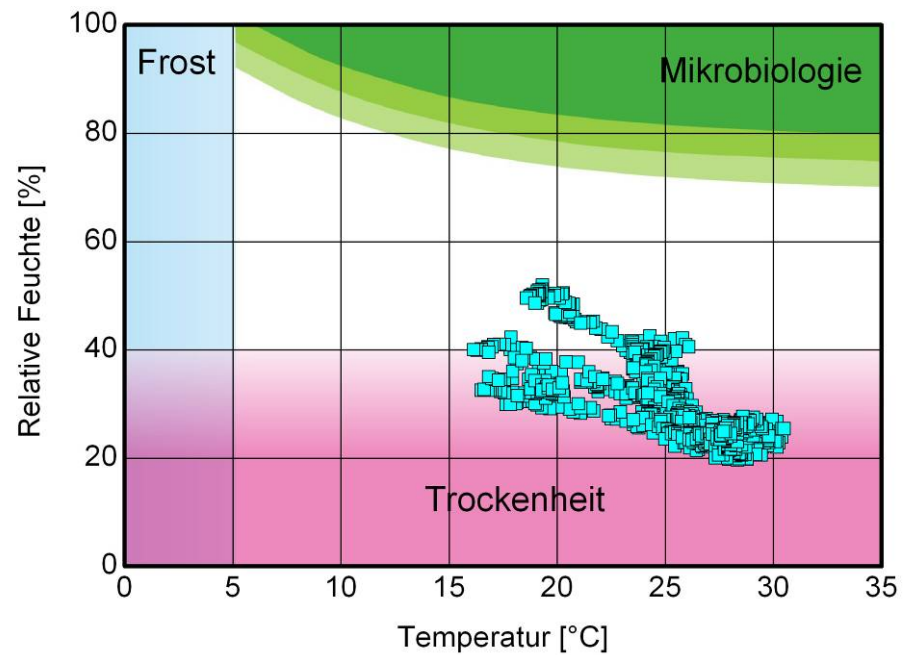


Bild 16:  
 Datenlogger 0931-172: Speisesaal 104, Schrank, OG, BA2.  
 Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.  
 Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

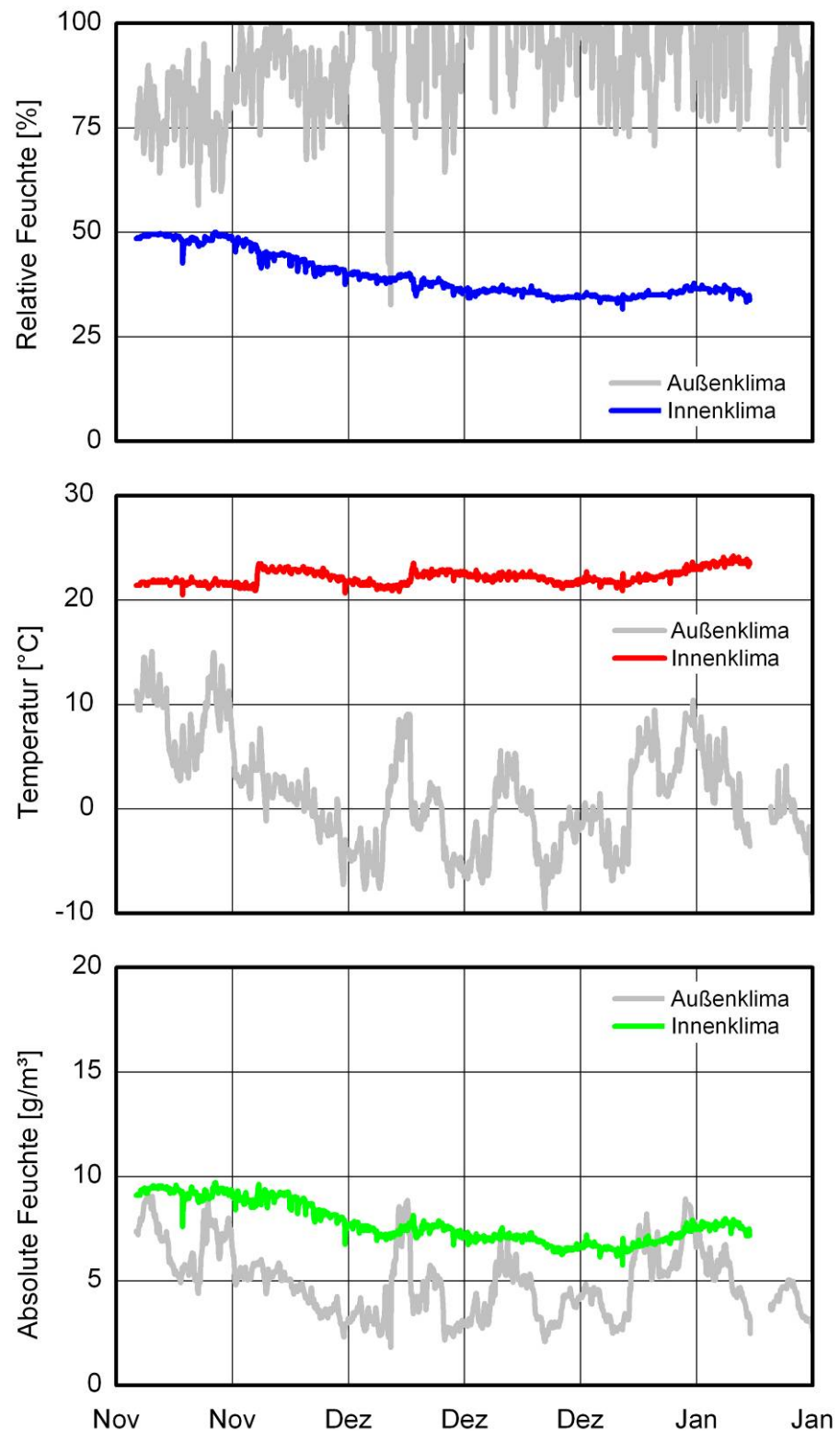


Bild 17:

Datenlogger 1032-103: Zimmer/Büro 111, OG, BA2.

Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011. Das Zimmer war in diesem Zeitraum durch einen Mitbruder bewohnt.

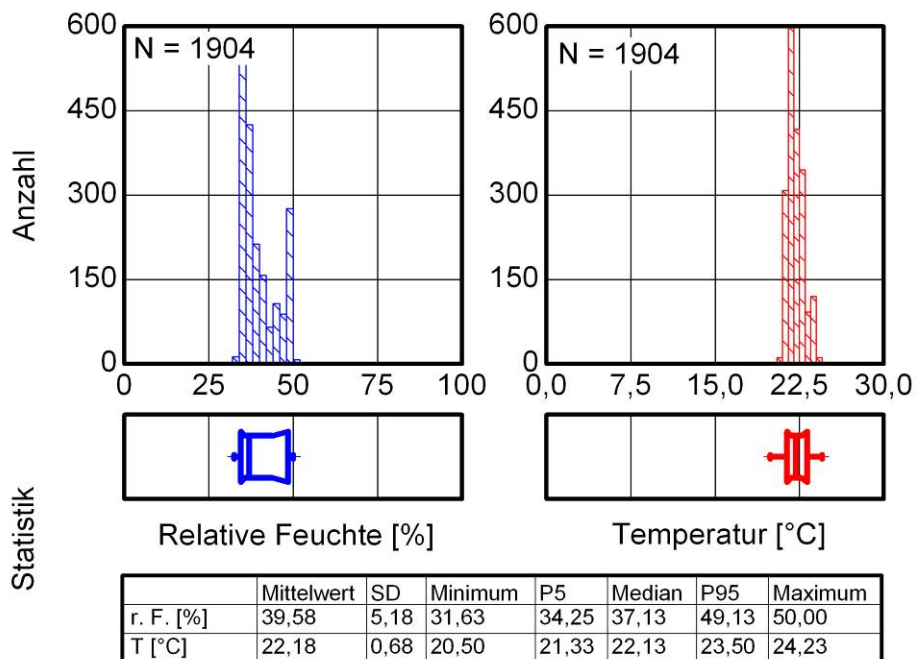
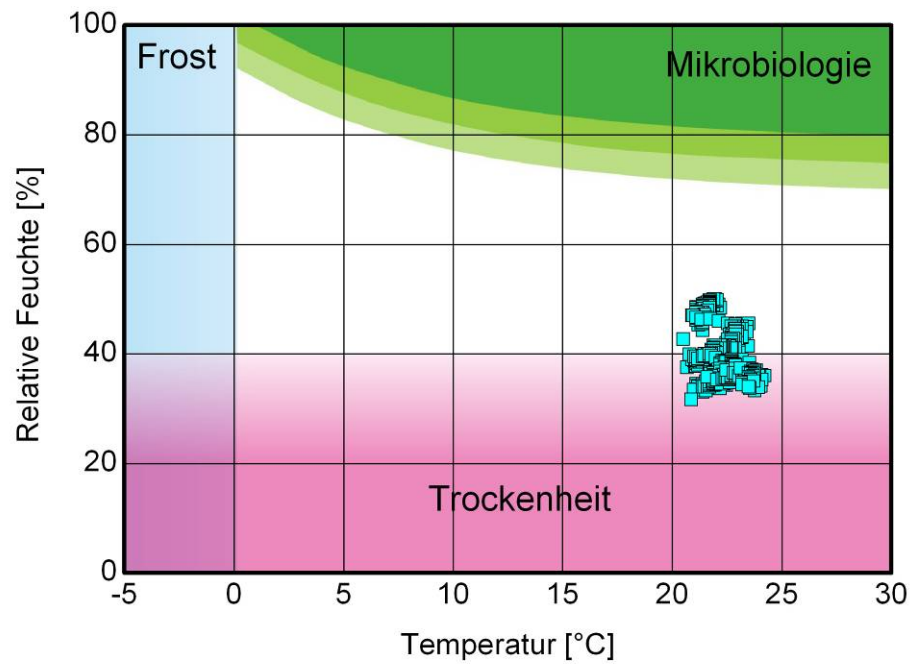


Bild 18:

Datenlogger 1032-103: Zimmer/Büro 111, OG, BA2.

Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.

Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

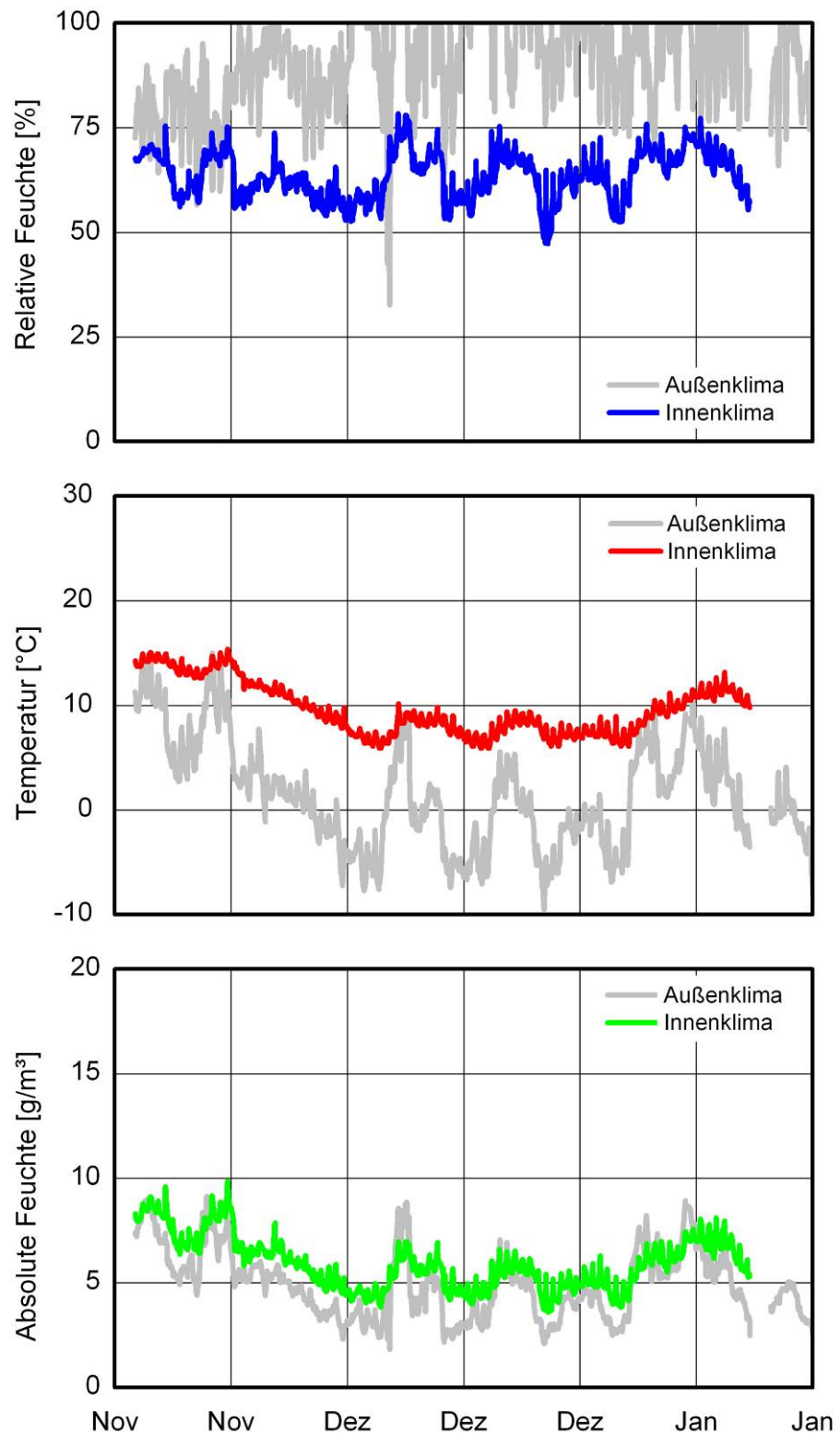


Bild 19:  
 Datenlogger 1032-119: Gang 106, OG, BA2.  
 Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten. Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.



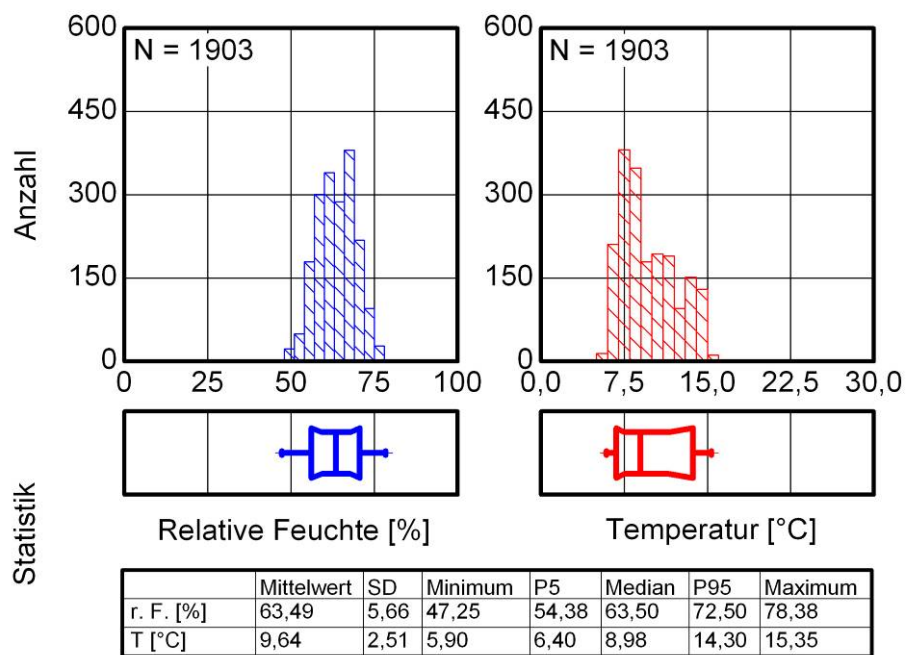
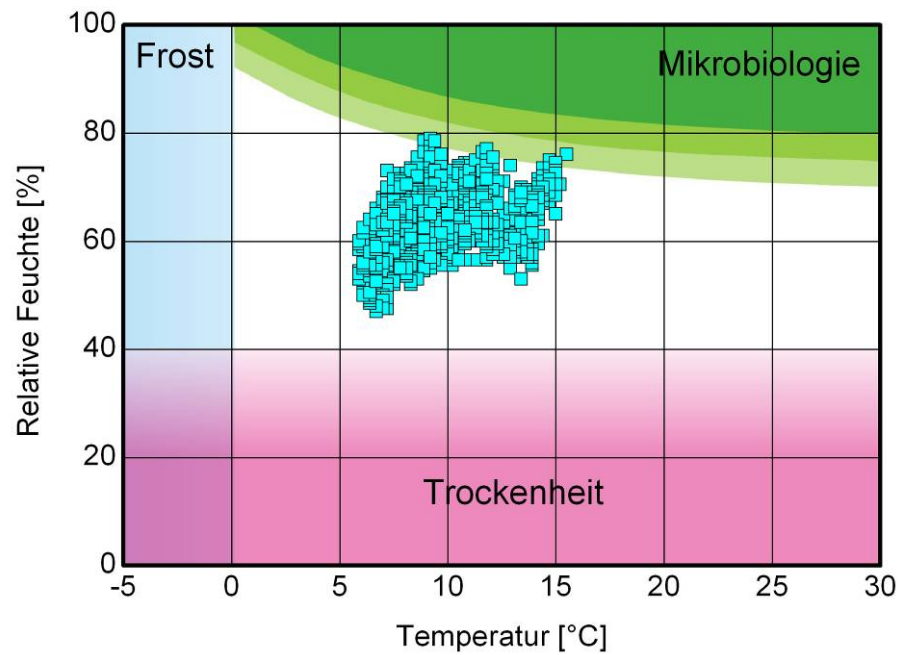


Bild 20:  
 Datenlogger 1032-119: Gang 106, OG, BA2.  
 Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.  
 Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.

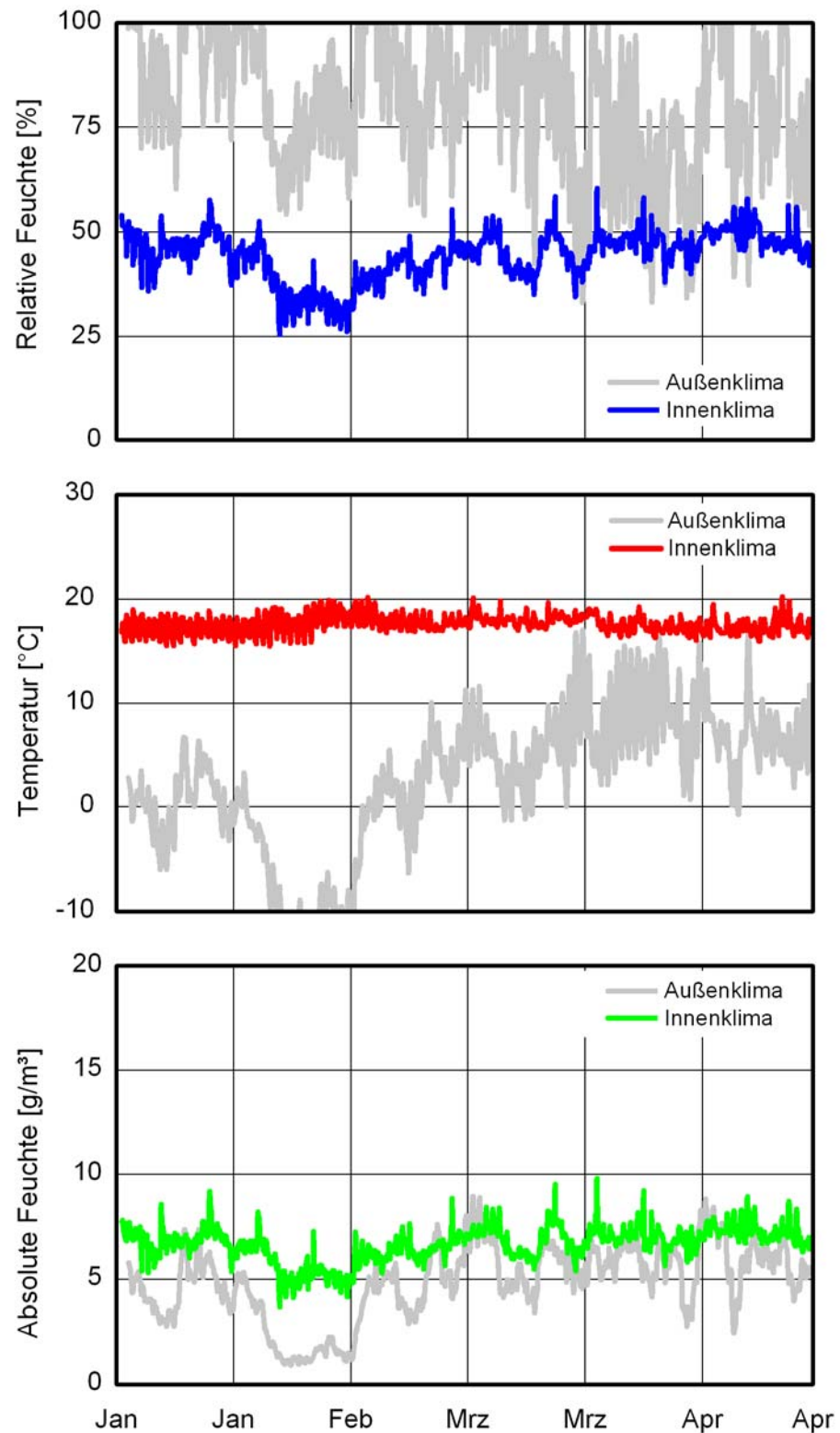


Bild 21:

Datenlogger 1104-106: Gang 94, OG1, BA1.

Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten. Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012.

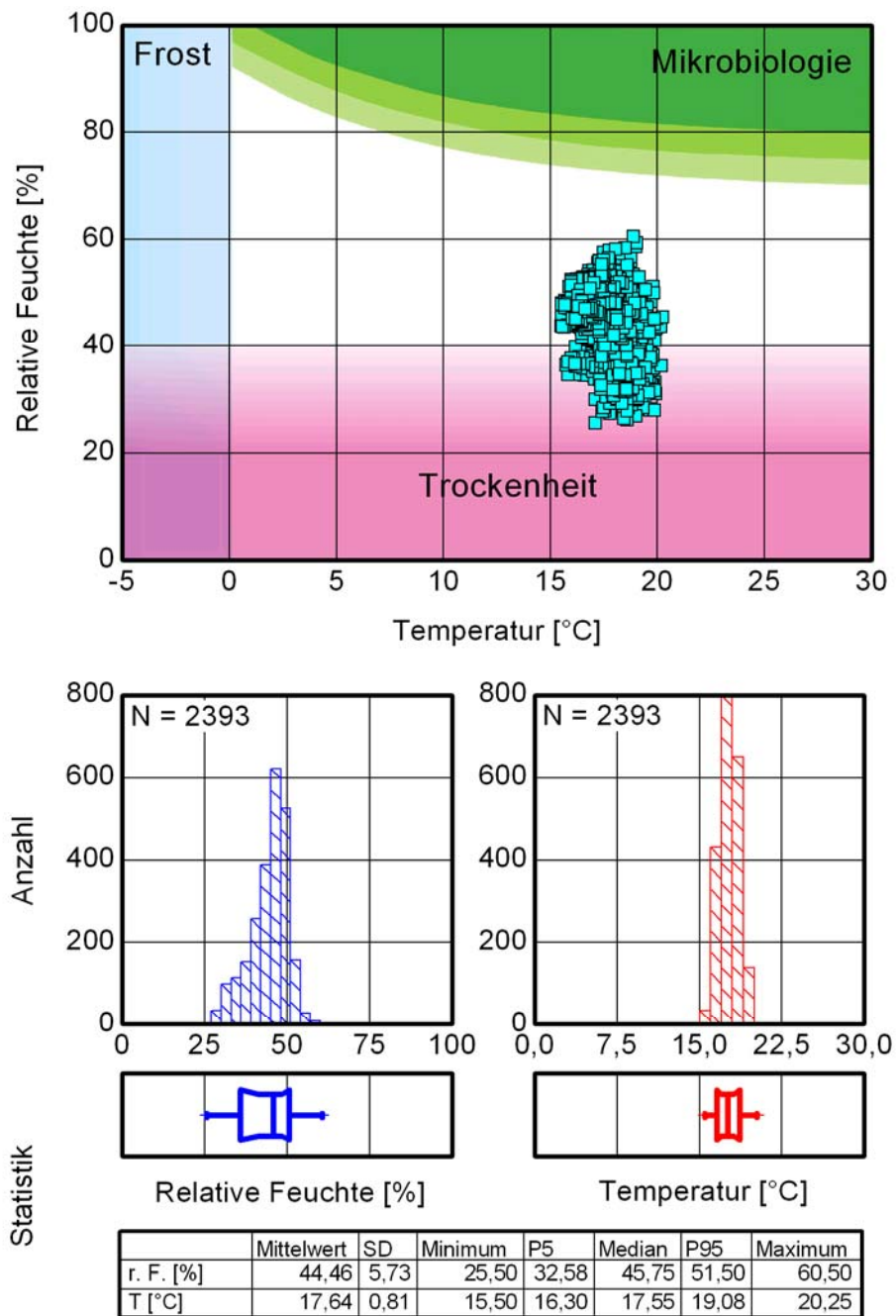


Bild 22:

Datenlogger 1104-106: Gang 94, OG1, BA1.

Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.

Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012.

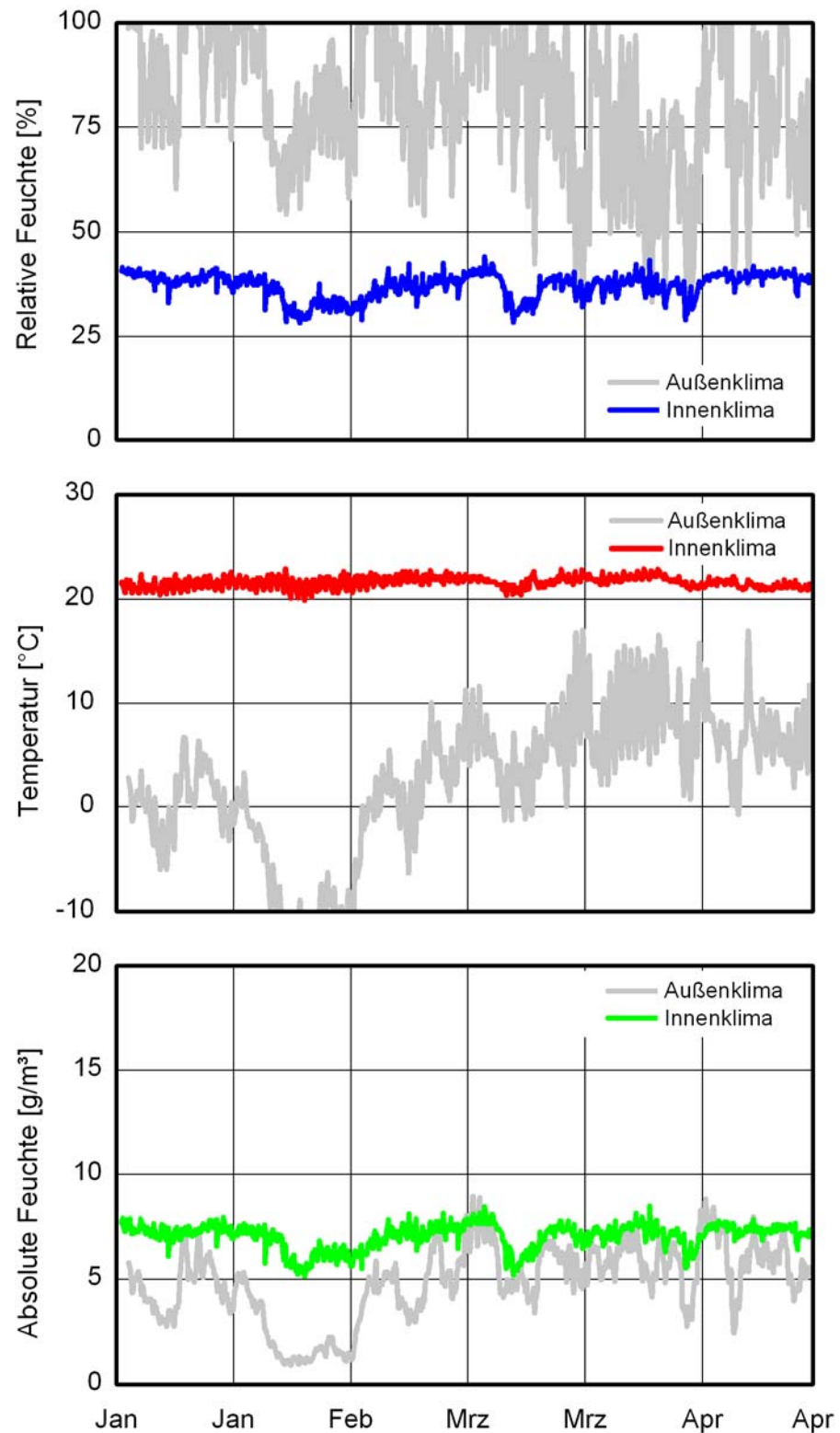


Bild 23:

Datenlogger 1104-122: Konventzimmer 98, OG1, BA1, nach der Sanierung, gleicher Nutzer wie Bild 17 und 18 (vormals in Zimmer/Büro 111, OG, BA2). Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten. Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012.

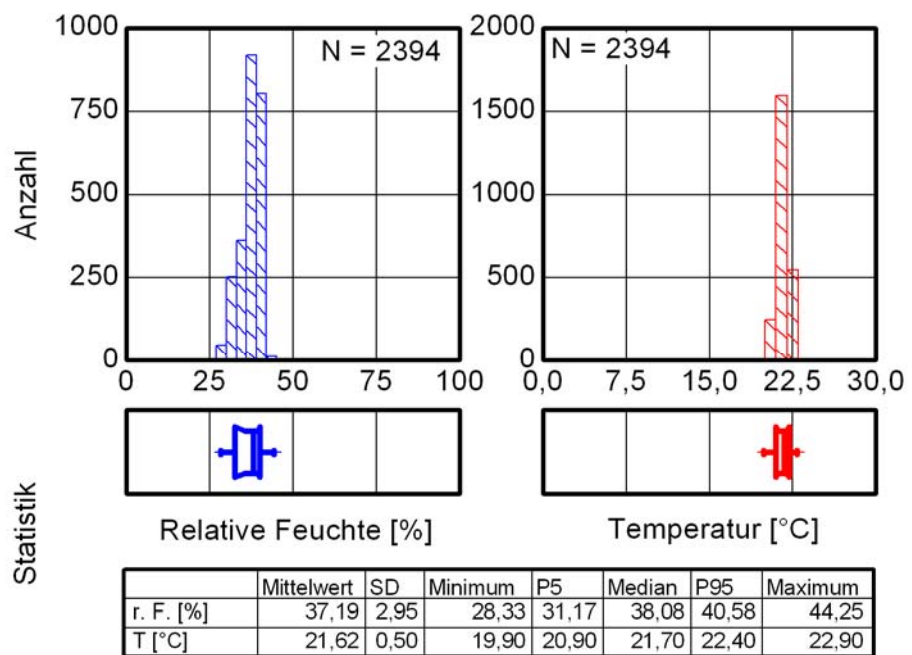
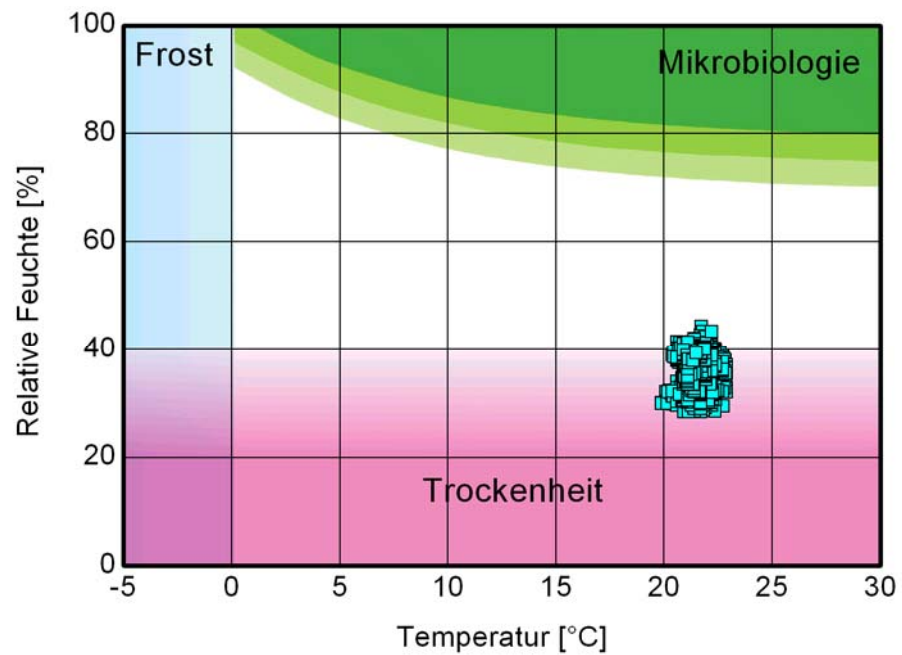


Bild 24:

Datenlogger 1104-122: Konventzimmer 98, OG1, BA1, nach der Sanierung, gleicher Nutzer wie Bild 17 und 18 (vormals in Zimmer/Büro 111, OG, BA2).  
 Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte.

Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012.

## 2.2 Untersuchung zur Fensterlüftung – Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels mittels Blower Door

Die Messungen wurden in dem Raum 99 Gästerefektorium durchgeführt, das als gelegentliches Besprechungszimmer dient. Der Raum wurde komplett saniert, inklusive neuem Fenster, Boden, Elektroinstallation, Heizkörper und Malerarbeiten. In Bild 25 ist die Anordnung der Blower Door zu sehen, sowie das neue Fenster. Die Ergebnisse der Messung fließen in die Bewertung des Sanierungserfolges mittels der hygrothermischen Gebäudesimulation ein.



Bild 25:  
Blower Door Messung im Gästerefektorium Raum 99. Das linke Bild zeigt die Anordnung der Blower Door für die Unterdruckmessung mit verschlossener Ventilatorblende für Messung des natürlichen Druckunterschiedes. Im Rechten Bild ist im gleichen Raum das neue Fenster zu sehen. Im Fenster, nicht sichtbar oben angeordnet, befindet sich eine selbstbetätigende Lüftungsklappe.

Tabelle 2:  
Ergebnistabelle der Blower Door Messung. Die unterschiedlichen Druckwerte ergeben sich zum einen durch die schrittweise vorgenommene Abklebung von Nebenstromwegen, zum anderen durch die Überdruckmessung.

Nr.	Druckart	Bemerkung	n <sub>50</sub> Wert
1	Unterdruck	Ohne Abklebung	4,37
2	Unterdruck	Teilweise Abklebung Bodendosen	3,68
3	Unterdruck	Abklebung Bodendosen, Steckdosen	3,48
4	Überdruck	Abklebung Bodendosen, Steckdosen	4,86
5	Überdruck	Abklebung Bodend., Steckd., Sockelleisten, Lüftungsklappe	4,62
6	Unterdruck	Abklebung Bodend., Steckd., Sockelleisten, Lüftungsklappe	2,14
7	Unterdruck	Wie 6: jedoch Drucktest nur bis 35Pa o. Blendenwechsel	2,34

Datum: 19.04.2012 Dateiname: Roggenburg\_2012-08-19-Messung3

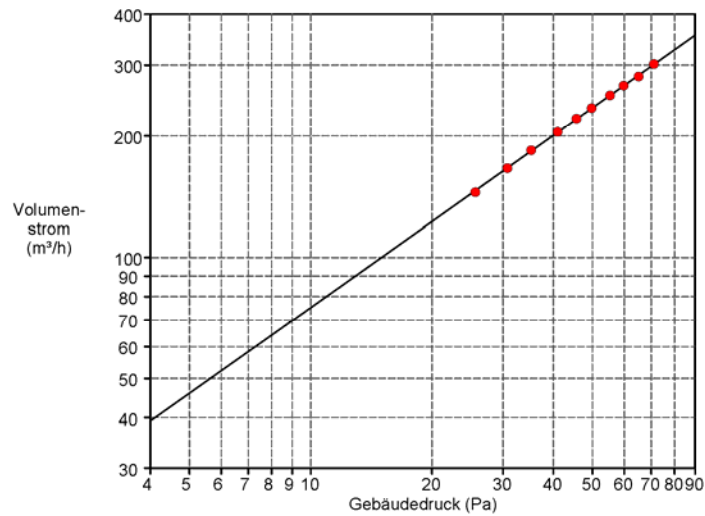


Bild 26:  
Ergebnis der Blower Door Messung Nr. 3 Unterdruck mit offener Lüftungs-  
klappe.

Datum: 19.04.2012 Dateiname: Roggenburg\_2012-08-19-Messung6

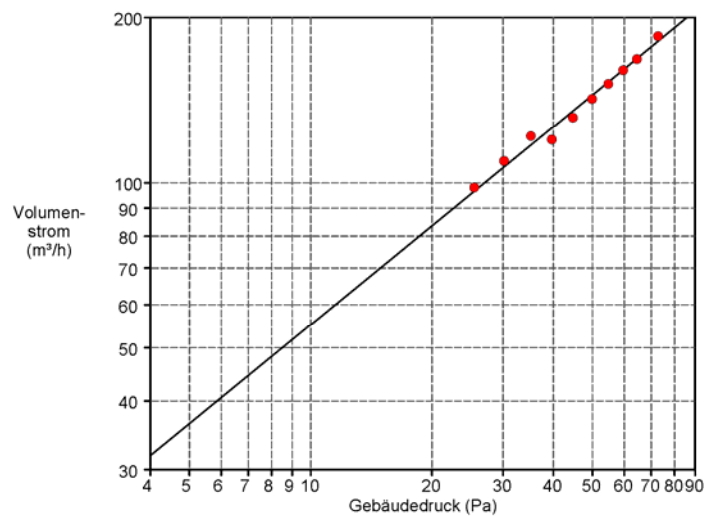


Bild 27:  
Ergebnis der Blower Door Messung Nr. 6 Unterdruck mit geschlossener, abge-  
klebter Lüftungs-klappe.

## 2.3 Strömungsmessung

Die Strömungsmessung ermöglicht eine Einschätzung der Luftgeschwindigkeiten der neuen Heizung. Da jedoch alle alten Heizkörper bereits abgebaut waren, bevor eine Messung an diesen durchgeführt werden konnte, ist ein Vergleich zu dem ursprünglichen System nicht gegeben.

### 3 Simulation des Einflusses der Sanierungsmaßnahmen auf Innenraumklima und Energiebedarf

Mit Hilfe des am Fraunhofer IBP entwickelten Raummodells WUFI® Plus wird am Beispiel einer Klosterzelle der Einfluss der Sanierungsmaßnahme auf das Innenklima und den Heizenergiebedarf rechnerisch beurteilt. Dafür wird in einem ersten Schritt der Zustand des Raumes vor der Sanierung simuliert. Im Anschluss werden bei den Berechnungen die vorgenommenen Sanierungsarbeiten berücksichtigt und bezüglich ihrer Wirkung auf das Raumklima sowie den Heizenergiebedarf bewertet. Es wird außerdem untersucht, welchen Einfluss der Einbau der Lüftungsöffnungen an den Fenstern auf das Innenraumklima hat. Dafür werden zum Vergleich zusätzliche Berechnungen mit dem für neue dichte Fenster typischerweise sehr niedrigen Infiltrationswechsel von 0,1 1/h durchgeführt.

#### 3.1 Durchführung der Berechnungen

##### 3.1.1 Hygrothermisches Raumklimamodell

Die Berechnungen werden mit dem am Fraunhofer IBP entwickelten und mehrfach validierten Raumklimamodell WUFI®-Plus durchgeführt [1-7]. Sie erfolgen nach dem in Bild 28 dargestellten Ablaufschema. Mithilfe des Softwaretools WUFI®-Plus können die hygrothermischen Verhältnisse der Umschließungsflächen, der Innenraumluft sowie der Energieaufwand bzw. -bedarf bei instationären Randbedingungen berechnet werden. Als Eingangsgröße für die Berechnungen dienen u. a. die Außenklimarandbedingungen, der Aufbau des Gebäudes, die Nutzung des Raumes (damit die Feuchtelast und die thermische Last) und die Lüftung. Das hygrothermischen Raumklimasimulationsmodell WUFI®-Plus ist ein 1-Zonen-Modell.



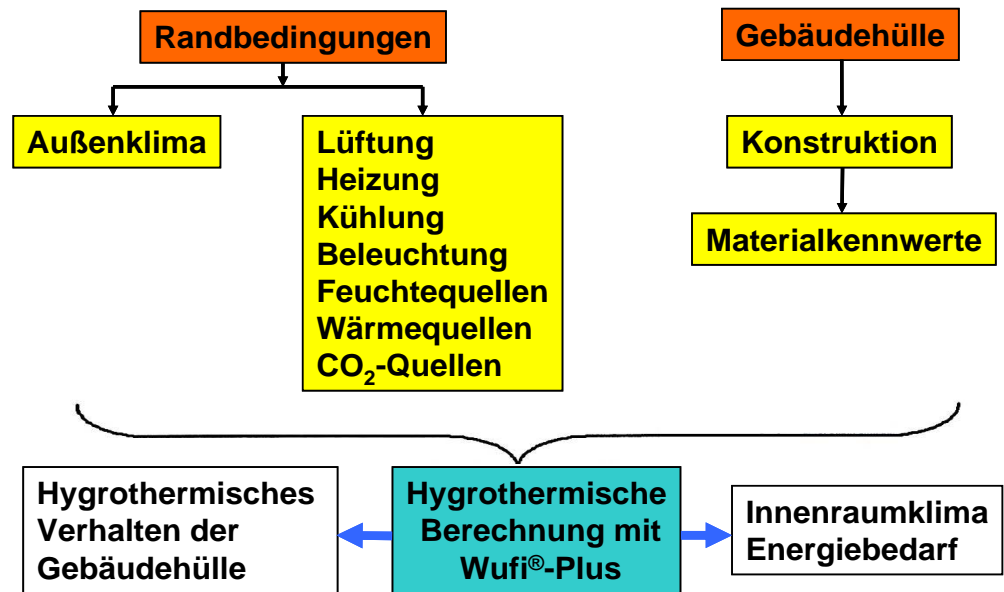


Bild 28:  
Ablaufschema für die Durchführung einer hygrothermischen Raumklimaberechnung mit Angabe der benötigten Parameter und Ergebnismöglichkeiten.

### 3.1.2 Hygrothermische Berechnungen zum Innenraumklima vor der Sanierung

#### Implementierte Raumgeometrie

Die Berechnungen werden für den Raum 111 im 1. Obergeschoss des Gebäudes auf der Grundlage der in Bild 29 vorgegebenen Raumgeometrie und der Wand-, Fußboden- und Deckenaufbauten durchgeführt. Für diesen Raum liegen Messwerte für die Raumtemperatur und die relative Raumluftfeuchte vor der Sanierung vor (Bild 17). Der Raum ist nach Nord-Osten ausgerichtet.

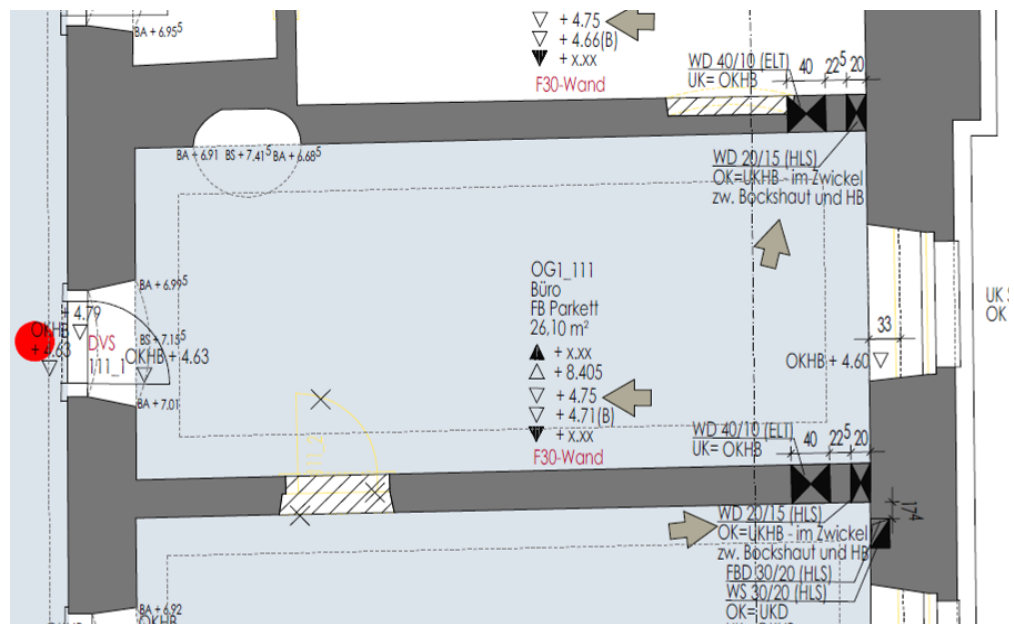


Bild 29:  
Ausschnitt aus Gebäudebestandsplan: Grundriss 1. Obergeschoss, Raum 111.

Es wurden folgende Angaben für die Berechnungen verwendet: Die Außenwand besteht aus 91,4 cm innen- und außenseitig verputztem Ziegelmauerwerk. Für die alten Fenster wird ein Gesamtwärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  angesetzt. Die Wände zu den Nebenräumen und zum Flur bestehen aus 40 cm bzw. 70,5 cm verputztem Ziegelmauerwerk. Für die Türen zum Nebenraum und zum Flur wird von einem Gesamtwärmedurchgangskoeffizient von  $3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  ausgegangen. Der Boden und die Decke sind folgendermaßen aufgebaut:

3 cm Holzdielen, Trennlage, 3 cm Estrichwabe, 2,5 cm Ausgleichsschüttung, 1 cm TSD-Platte, dann folgen 3 cm Trockenestrich und 2,5 cm Parkett.

Sämtliche Materialkennwerte kommen als Standardwerte aus der WUFI®-Materialdatenbank. Die Wärmeübergangskoeffizienten liegen innenseitig bei  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$  und außenseitig bei  $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der Absorptionskoeffizient der Außenwand wird mit 0,4 und der Emissionskoeffizient mit 0,9 angesetzt. Dies entspricht den Werten für hellen bewitterten Putz.

In Bild 30 ist der in das Softwaretool WUFI®-Plus implementierte Aufbau des Raumes 111 im 1. Obergeschosses als grafische Darstellung zu sehen. Zu erkennen ist das Außenfenster und die Tür zum Nachbarraum.

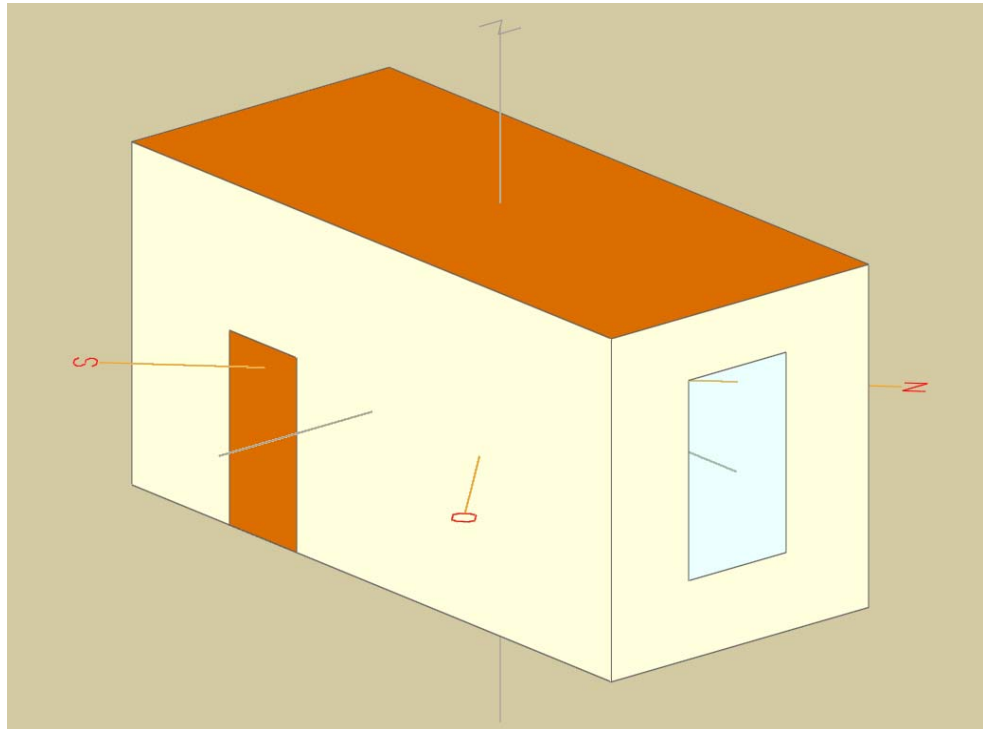


Bild 30:  
In WUFI®-Plus implementierte Aufbau des Raumes 111 im 1. Obergeschoss.

### **Außenklimadaten**

Für die Berechnungen werden die Außenklimadaten des Testreferenzjahres von Augsburg herangezogen. Die klimatischen Verhältnisse in Augsburg sind denen in Roggenburg sehr ähnlich. Bild 31 zeigt die für die Berechnung zugrunde gelegten Außenklimaverläufe.

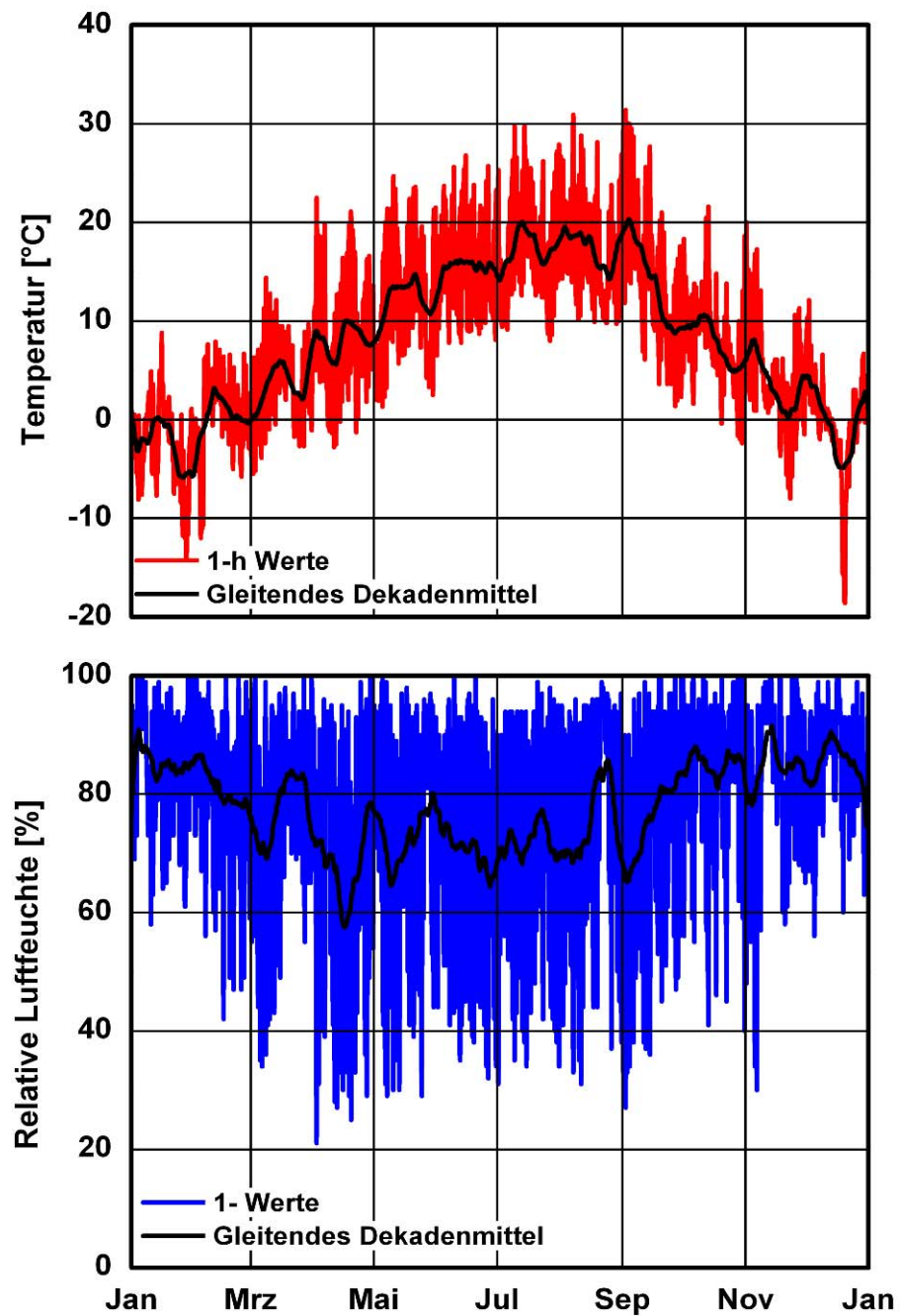


Bild 31:  
Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) in Augsburg als 1 h-Werte und als gleitendes Dekadenmittel (Testreferenzjahr).

### Innenraumklima in den benachbarten Räumen und im Gang

Es wird davon ausgegangen, dass das Innenraumklima der benachbarten Räume sowie des darunterliegenden Erdgeschosses und des 2. Obergeschosses im Wesentlichen dem des zu untersuchenden Raumes entspricht. Ausgehend von

den Messergebnissen vor der Sanierung wird in den benachbarten Räumen eine Mindesttemperatur im Winter von 22 °C angenommen.

Im an den Raum 111 angrenzenden Gang 106 im 1. Obergeschoss zeigen die Messwerte deutlich niedrigere Temperaturen und höhere relative Feuchten im Winter (siehe Bild 19). Deshalb wird für den Gang das in Bild 32 dargestellte Klima für die Berechnungen angesetzt. Die Temperatur schwankt im jahreszeitlichen Verlauf um 15 °C mit einem Maximum im Sommer mit 20 C und einem Minimum im Winter von 10 °C. Die relative Feuchte schwankt um 65 %.

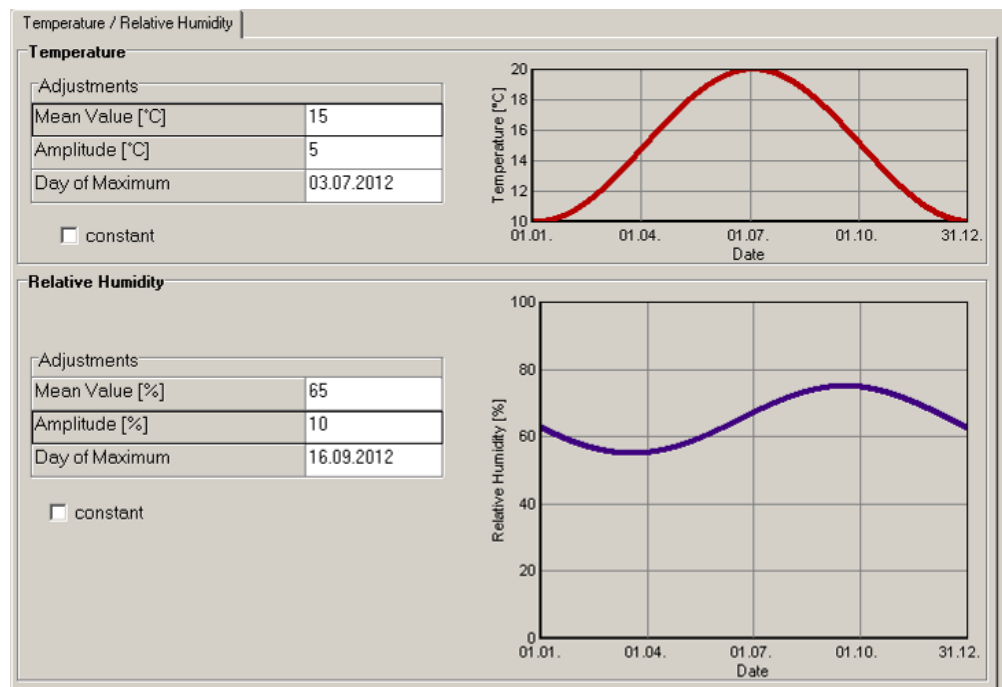


Bild 32:  
Für die Berechnungen angesetzt Innenraumklima für den benachbarten Gang vor der Sanierung.

## Die Heizung

In Anlehnung an die Messergebnisse in Raum 111 (Bild 17 und 18) wird durch die Heizung für die Zeit vor der Sanierung eine Mindesttemperatur von 22 °C sichergestellt.

## Der Luftwechsel

Vor der Sanierung befindet sich ein altes undichtetes Fenster in dem Raum, welches teilweise durch Schaumstoffdichtungen abgedichtet worden ist. Als Luftwechsel durch Infiltration und Nutzerverhalten, also gelegentliches Lüften, wird deshalb ein typischer Wert von 0,5 1/h angesetzt.

## Der Feuchteintrag

Für das Innenraumklima ist neben der Heizung und dem Luftwechsel von Einfluss, wann, wie oft und wie lange sich wie viele Personen in dem zu untersuchenden Raum aufhalten und ob es weitere Feuchtequellen gibt. Das könnten z. B. trocknende Handtücher oder auch eine größere Anzahl von Zimmerpflanzen sein. Da der Raum vor der Sanierung als Wohn- und Arbeitsraum genutzt wurde, wird folgender täglicher Eintrag von Feuchtigkeit in den Raum angesetzt:

In der Zeit von 7 bis 11 Uhr und von 13 bis 17 Uhr ist eine Person anwesend und gibt im Schnitt 90 g/h Feuchtigkeit in den Raum ab. Dieser Wert entspricht laut [8] der Feuchteabgabe eines Menschen bei durchschnittlicher Aktivität. Zusätzlich wird von einem konstanten Feuchteintrag von 5 g/h durch Zimmerpflanzen ausgegangen.

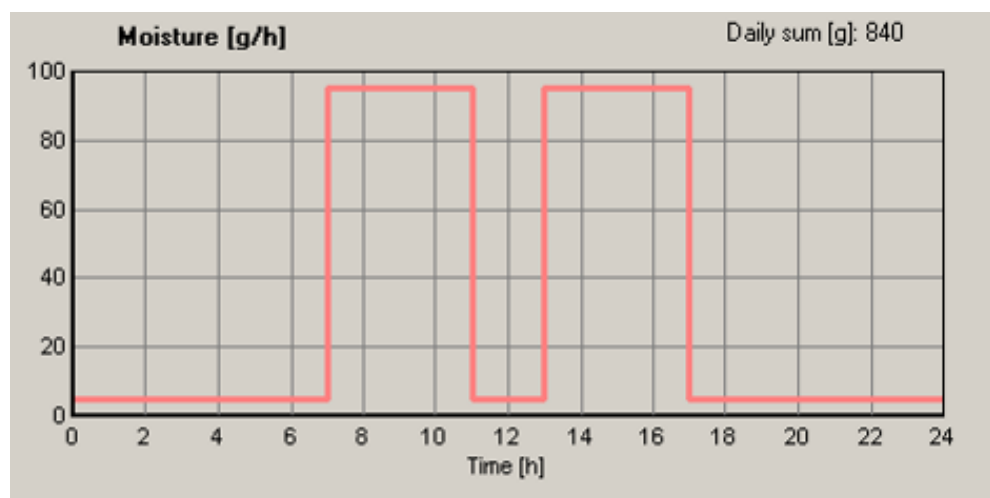


Bild 33:  
Über den Tag verteilter Feuchteintrag in den Raum.

## Der Wärmeeintrag

Durch die Anwesenheit von Personen im Raum wird von diesen Personen auch Wärme abgegeben, wobei die Wärmemenge sowohl von der Art der Tätigkeit, der Raumtemperatur und der Oberfläche des Körpers der Person sowie der Bekleidung abhängt. Bei leichter Bürotätigkeit liegt die Wärmeabgabe zwischen 100 und 125 W [9]. Es muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass bei der Anwesenheit von Personen oft z. B. die Beleuchtung oder auch Geräte angeschaltet werden. In Bild 34 ist der über den Tag verteilte Wärmeeintrag bei Anwesenheit einer Person mit Anwesenheitszeiten analog zum Feuchteintrag dargestellt. Die Wärmeabgabe von Geräten im Standby wird mit einem konstanten Wärmeeintrag von 5 W/h zusätzlich berücksichtigt.

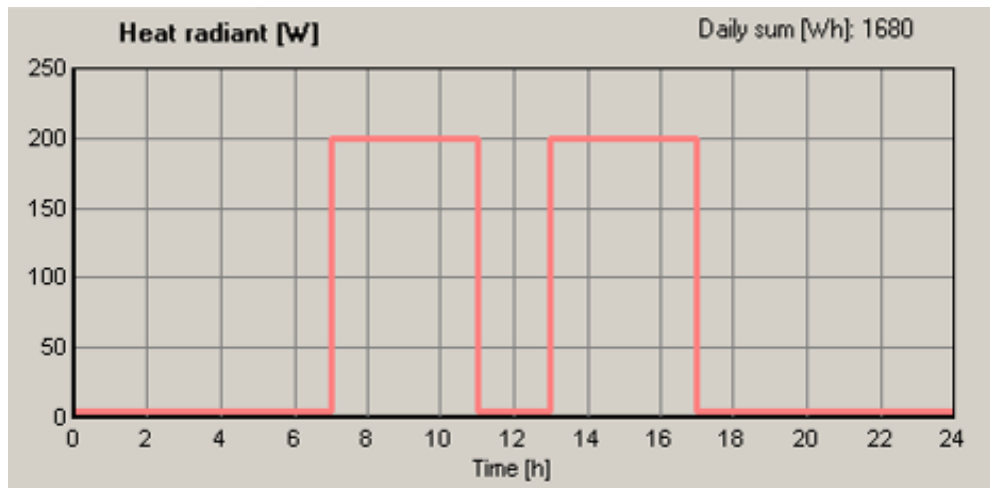


Bild 34:  
Über den Tag verteilter Wärmeeintrag in den Raum.

### Das Interieur

Da sich in dem Raum befindliche Gegenstände, wie zum Beispiel Möbel oder auch gefüllte Bücherregale, durch ihre Art und Menge einen Einfluss auf die thermische und hygri-sche Trägheit des Raumes haben, wird das Interieur bei den hier durchgeführten Berechnungen berücksichtigt. Da der Raum als Wohn- und Arbeitsraum genutzt wird, wird von einem Bücherregal, Schränken und einem Schreibtisch ausgegangen. Es werden  $0,3 \text{ m}^3$  Holz und  $2,8 \text{ m}^3$  Papier an-gesetzt.

### Durchführung der Berechnungen

Die Berechnungen in 1 h-Schritten beginnen einige Zeit vor dem Messzeitraum, um einen eingeschwungenen Zustand der Raumklimaverhältnisse zu erhalten. Besonderes Augenmerk bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse wird auf das Innenraumklima und den Energiebedarf während der Heizperiode ge-legt. Als Auswertezeitraum wird der Zeitraum vom 15.09. bis zum 15.04. des Folgejahres herangezogen.

### 3.1.3 Hygrothermische Berechnungen zum Innenraumklima nach der Sanierung

Durch die Sanierung treten folgende, für die Berechnungen maßgebliche, Ver-änderungen ein:

- Es werden neue Fenster mit speziellen Lüftungsöffnungen eingebaut. Anhand der Blower-Door-Messung nach der Sanierung lässt sich ein In-filtrationsluftwechsel von ca.  $0,25 \text{ 1/h}$  abschätzen. Dieser Luftwechsel wird für die Berechnungen nach der Sanierung angesetzt.

- Der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient der neuen Fenster ist mit  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  deutlich besser als der U- Wert der alten Fenster.
- Nach der Sanierung werden auch die Flure beheizt (siehe Bild 21). Dadurch ergibt sich für den Gang ein anderes Innenraumklima, welches einen Einfluss auf den Heizenergiebedarf des zu betrachtenden Raumes hat. Bild 35 zeigt das für die Berechnungen angesetzte Innenraumklima für den Gang nach der Sanierung. Die Temperatur schwankt, jahreszeitlich bedingt, um  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ .

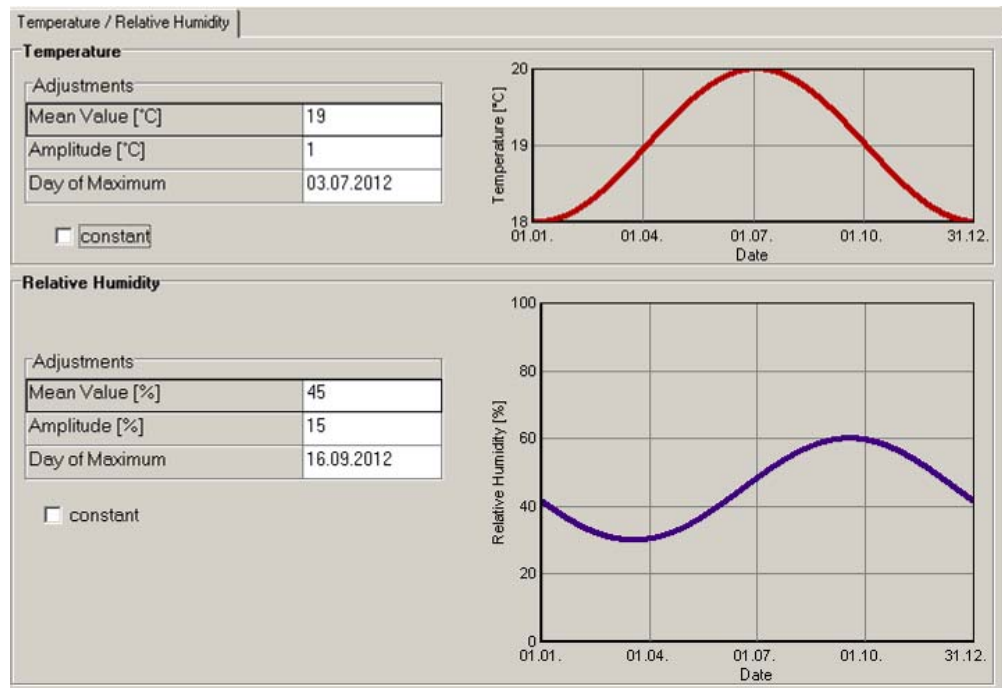


Bild 35:  
Für die Berechnungen angesetzte Innenraumklima für den benachbarten Gang nach der Sanierung.

- Die Messwerte für eine nach der Sanierung ebenfalls als Wohn- und Arbeitsraum genutzte Klosterzelle, Konventzimmer 98, (siehe Bild 23) zeigen, dass die Zimmertemperatur bei gleichem Nutzer im Mittel nach der Sanierung um  $0,5 \text{ K}$  niedriger als vor der Sanierung liegt. Deshalb wird für die Berechnungen nach der Sanierung die Temperatur, ab der geheizt wird, auf  $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$  gesetzt.

Alle anderen Angaben werden wie für den Zustand vor der Sanierung verwendet.

Um die Wirkung der einzelnen Sanierungsmaßnahmen auf den Heizenergiebedarf quantifizieren zu können, werden, neben der Berechnung mit allen Sanierungsmaßnahmen gemeinsam, zusätzliche Berechnungen durchgeführt, bei denen immer nur eine Sanierungsmaßnahme berücksichtigt wird.



### **3.1.4 Hygrothermische Berechnungen zum Einfluss der Lüftungsöffnungen auf das Innenraumklima**

Durch den Einbau der neuen Fenster mit den speziellen Lüftungsöffnungen wird ein Infiltrationsluftwechsel von ca. 0,25 1/h erreicht. Um festzustellen, welches Innenraumklima sich ergeben würde, wenn diese Lüftungsöffnungen nicht vorhanden wären, werden zusätzliche Berechnungen mit einem Luftwechsel von 0,1 1/h durchgeführt. Dies entspricht dem Infiltrationsluftwechsel von neuen Fenstern ohne Lüftungsklappen.

## **3.2 Ergebnisse der Berechnungen und Bewertung**

### **3.2.1 Einfluss der Sanierungsmaßnahmen auf das Innenraumklima**

Den berechneten zeitlichen Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte im Raum vor und nach der Sanierung während der Heizperiode zeigt Bild 36. Bei gleich bleibender Nutzung des Raumes und dem damit verbundenen gleich bleibenden Eintrag von Feuchtigkeit und Wärme zeigen sich durch die Sanierung folgende Änderungen des Innenraumklimas:

Vor der Sanierung treten im Raum infolge des höheren Luftwechsels durch die undichten Fenster im Winter sehr niedrige relative und absolute Luftfeuchten auf. Durch den hohen Luftwechsel wird in größerem Umfang kalte trockene Luft in den Raum eingebracht. Die relative Raumluftfeuchte sinkt zeitweise auf unter 20 %. Über einen Zeitraum von mehr als 2 Monaten liegt die relative Raumluftfeuchte unter 25 %. Nach der Sanierung sind höhere relative und absolute Raumluftfeuchten zu verzeichnen. Dies wird durch den auf die Hälfte reduzierten Luftwechsel der neuen Fenster mit den Lüftungsöffnungen erreicht. Der Luftwechsel nach der Sanierung ist groß genug, die, z. B. durch die Person, in den Raum eingetragene Feuchtemenge in die Außenluft abzuführen und gleichzeitig gering genug, um die relative Feuchte im Raum auch im Winter nicht zu sehr absinken zu lassen.

Durch die Heizung während der Heizperiode wird eine konstante Temperatur im Raum sichergestellt.

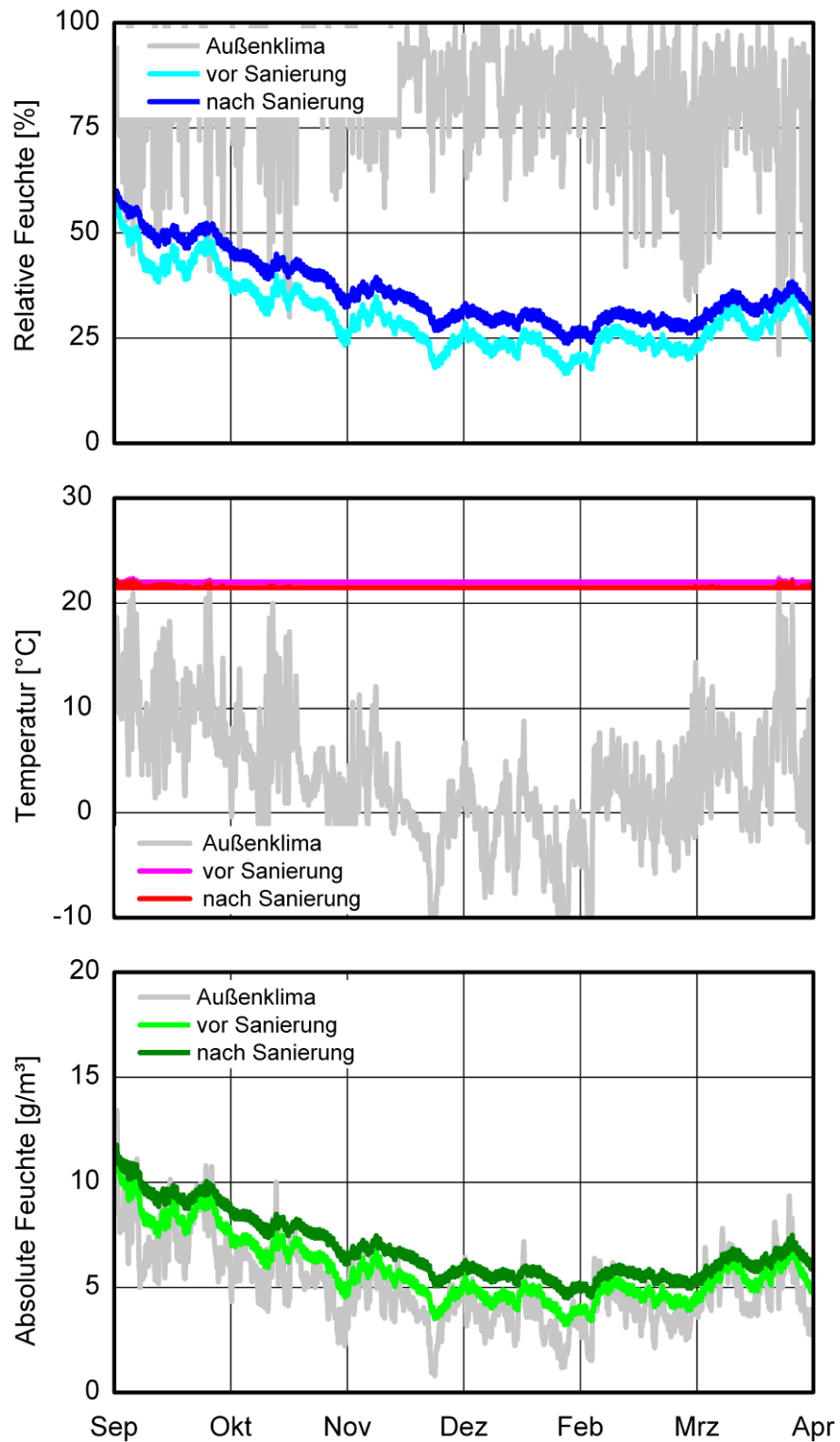


Bild 36:  
 Berechneter Verlauf der relativen Feuchte (oben) und der Temperatur (Mitte) sowie der absoluten Feuchte (unten) vor und nach der Sanierung während der Heizperiode. Mit dargestellt sind die klimatischen Randbedingungen der Außenluft.

### 3.2.2 Einfluss der Sanierungsmaßnahmen auf die Behaglichkeit

Infolge der Sanierungsmaßnahmen ergeben sich Änderungen im Innenraumklima, die sich auch auf die Behaglichkeit auswirken. Bild 37 und Bild 38 zeigen die relative Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur vor und nach der Sanierung während der Heizperiode im Behaglichkeitsdiagramm nach [10]. Der grüne Bereich in den folgenden Bildern kennzeichnet den behaglichen Bereich, wohingegen gelb als „noch behaglich“ einzuordnen ist.

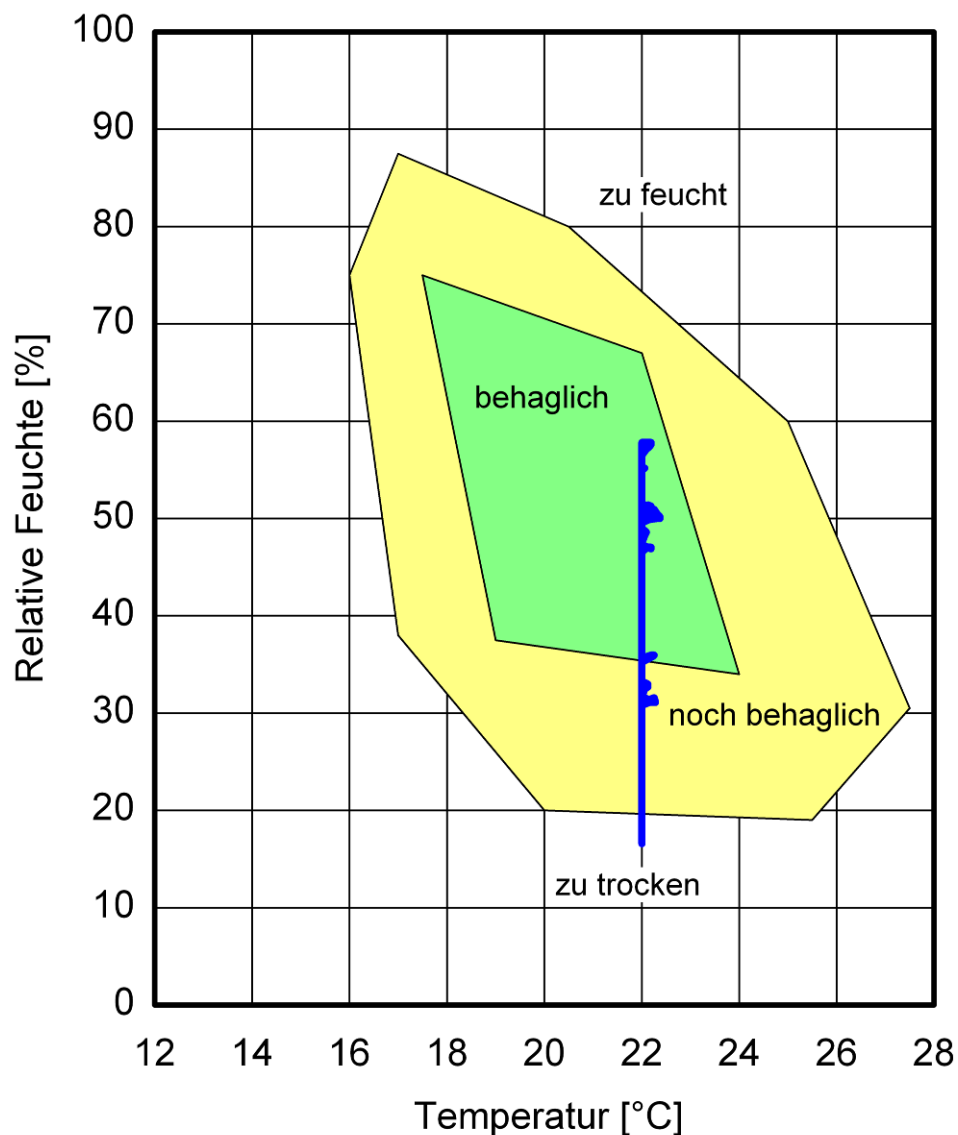


Bild 37:

Die relative Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur während der Heizperiode vor der Sanierung mit Kennzeichnung der Behaglichkeitsbereiche.

Bei dem baulichen Zustand vor der Sanierung gibt es Zeiten, in denen die relative Feuchte im Raum zu niedrig ist. Das Innenraumklima ist „zu trocken“ und damit unbehaglich. Über einen gewissen Zeitraum ist das Raumklima nur noch als „noch behaglich“ einzustufen.

Nach der Sanierung ist das Raumklima bei nicht geänderter Nutzung stets im „behaglichen“ oder „noch behaglichen“ Bereich. Die geringfügig verringerte Raumtemperatur wirkt sich nicht negativ auf die Behaglichkeit aus.

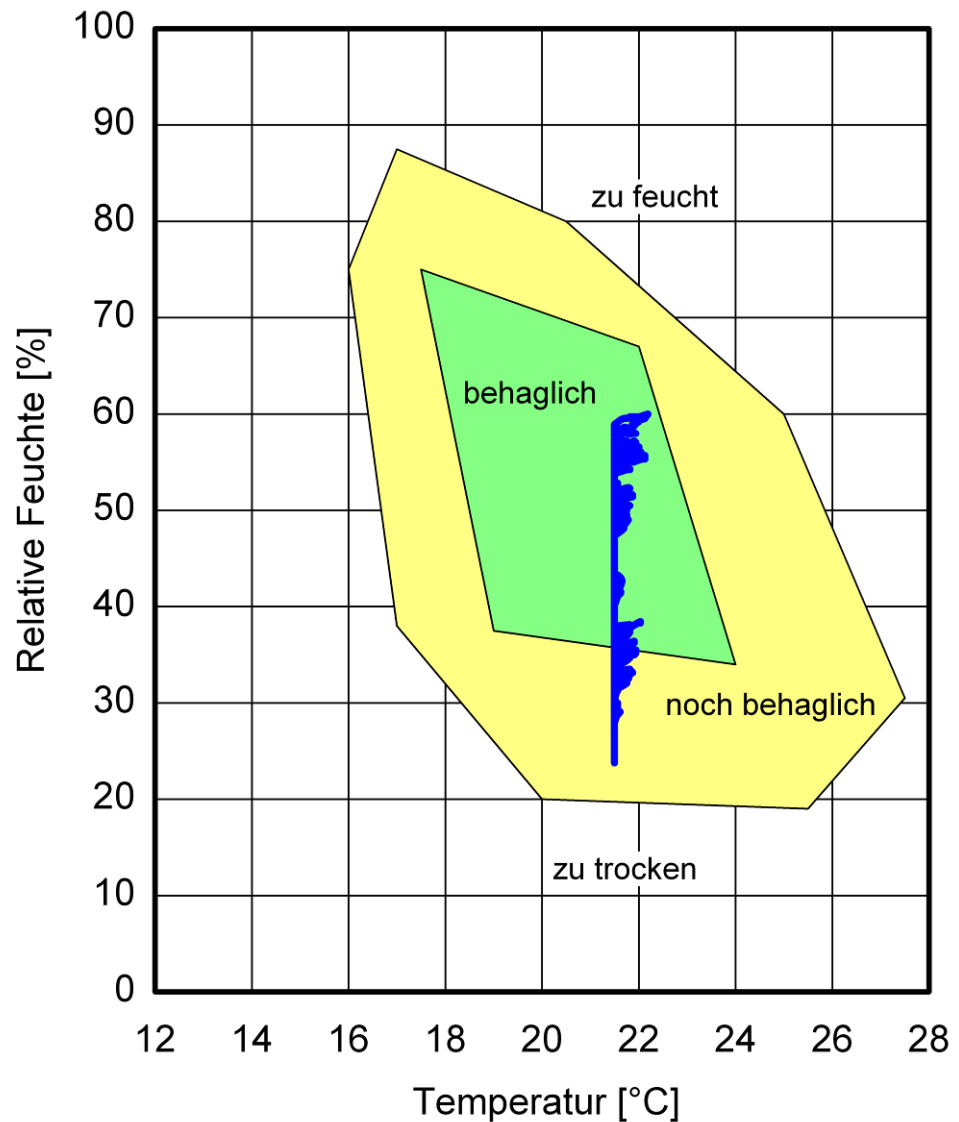


Bild 38:  
Die relative Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur während der Heizperiode nach der Sanierung mit Kennzeichnung der Behaglichkeitsbereiche.

Sowohl vor als auch nach der Sanierung gibt es während der Heizperiode keinen Zeitraum, in dem die relative Raumluftfeuchte so hoch ist, dass das Innenraumklima unbehaglich im Sinne von „zu feucht“ ist.

Zu besserer Beurteilung der Wirkung der Sanierungsmaßnahmen auf die Behaglichkeit und damit auf den Wohnkomfort sind in

Tabelle 3 die prozentualen Anteile der Zeit angegeben, während der das Innenraumklima vor und nach der Sanierung „behaglich“, „noch behaglich“ oder „unbehaglich“ (hier im Sinne von „zu trocken“) ist.

Tabelle 3:  
Prozentualer Anteil der Zeit während der Heizperiode in den Behaglichkeitsbereichen vor und nach der Sanierung.

	vor der Sanierung	nach der Sanierung
unbehaglich (zu trocken)	3,7 %	0,0 %
noch behaglich	72,3 %	58,3 %
behaglich	24,0 %	41,7 %

Während vor der Sanierung das Raumklima in nur 24 % der Zeit „behaglich“ ist, ist nach der Sanierung das Innenraumklima in fast 42 % der Zeit als „behaglich“ zu bezeichnen. Während vor der Sanierung das Innenklima für einen gewissen Zeitraum „unbehaglich“ trocken ist, tritt dieser Zustand nach der Sanierung nicht mehr ein. Die Sanierungsmaßnahmen haben somit einen positiven Einfluss auf das Raumklima bezüglich Behaglichkeit.

### 3.2.3 Einfluss der einzelnen Sanierungsmaßnahmen auf den Heizenergiebedarf

Die Sanierungsmaßnahmen haben einen großen Einfluss auf den Heizenergiebedarf für den untersuchten Raum. In Tabelle 4 ist der für den Raum notwendige Heizenergiebedarf während der Heizperiode vor und nach der Sanierung aufgelistet. Infolge der Sanierungsmaßnahmen sinkt der Heizenergiebedarf auf lediglich 35,2 % der Heizenergie, die vor der Sanierung notwendig war. Der Heizenergiebedarf wird also um nahezu 2/3 gesenkt.

Tabelle 4:  
Heizenergiebedarf in dem Raum während der Heizperiode vor und nach der Sanierung.

	vor der Sanierung	nach der Sanierung
Heizenergiebedarf	3.533 kWh	1.243 kWh

Die einzelnen Sanierungsmaßnahmen haben einen unterschiedlichen Beitrag zu der Einsparung am Heizenergiebedarf. Um die einzelnen Effekte zu quantifizieren, wurden zusätzliche Varianten berechnet, bei denen jeweils nur eine Maßnahme durchgeführt wird. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen.

Tabelle 5:  
Anteile der einzelnen Sanierungsmaßnahmen auf die Reduzierung des Heizenergiebedarfes während der Heizperiode.

Anteile	Heizenergiebedarf	bezogen auf die Gesamteinsparung von 2290 kWh
reduzierter Infiltrationsluftwechsel	741 kWh	32 %
Fenster mit geringerem U-Wert	1.022 kWh	45 %
beheizter Flur	452 kWh	20 %
reduzierte Zimmertemperatur	75 kWh	3 %

Den größten Anteil an der Einsparung an Heizenergie hat der verbesserte Gesamtwärmedurchlasskoeffizient (U-Wert) des Fensters, da das Fenster eine große Fläche hat und der Gesamtwärmedurchlasskoeffizient der alten Fenster recht hoch ist.

Der Einbau des neuen Fensters reduziert auch den Infiltrationsluftwechsel. Dadurch wird ebenfalls ein hoher Anteil an Heizenergie eingespart, wobei der durch die Lüftungsöffnungen gewährleistete Mindestluftwechsel berücksichtigt wird.

Dadurch, dass der benachbarte Flur nach der Sanierung beheizt wird, sinkt der Heizenergiebedarf für den Raum ebenfalls. Die Einsparung an Heizenergie für den Raum muss allerdings dem Aufwand an Heizenergie für die Beheizung des Flures gegenüber gestellt werden. Gleichzeitig kann argumentiert werden: Für die Beheizung des Flures wird zwar Heizenergie benötigt. Gleichzeitig reduziert sich aber dadurch der Heizenergiebedarf der angrenzenden Räume.

Die Messwerte vor und nach der Sanierung zeigen eine um 0,5 K reduzierte Zimmertemperatur bei gleicher Nutzung des Raumes. Dies könnte im Einfluss der Strahlenheizung begründet sein. Die Einsparung an Heizenergie durch die reduzierte Raumtemperatur hat zwar nur einen geringen Anteil an der Gesamteinsparung, dennoch ist sie mit 75 kWh während der Heizperiode nicht zu vernachlässigen.

### **3.2.4 Einfluss der Lüftungsöffnungen auf das Innenraumklima**

Die Wirkung der Lüftungsöffnungen auf das Innenklima ist in Bild 39 zu erkennen. Während bei neuen dichten Fenstern ohne Lüftungsklappen ein Infiltrationsluftwechsel von ca. 0,1 1/h vorliegt, wird durch die Lüftungsklappen ein Luftwechsel von ca. 0,25 1/h gewährleistet.

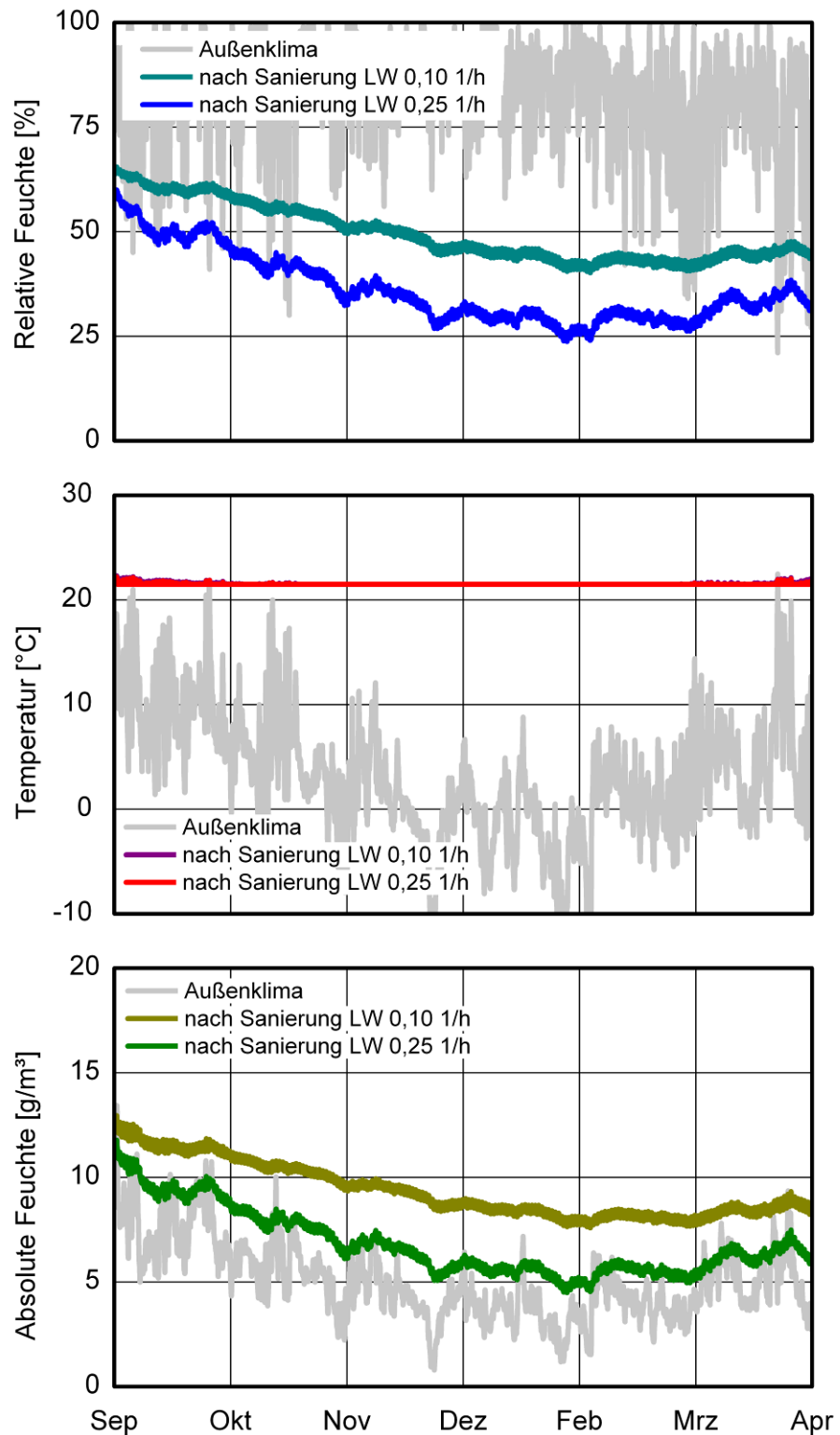


Bild 39: Berechneter Verlauf der relativen Feuchte (oben) und der Temperatur (Mitte) sowie der absoluten Feuchte (unten) während der Heizperiode bei unterschiedlichem Luftwechsel (Fenster mit und ohne Lüftungsklappen). Mit dargestellt sind die klimatischen Randbedingungen der Außenluft.



Wenn keine Lüftungsöffnungen vorhanden sind, findet nur ein sehr geringer Luftaustausch mit der Außenluft statt. Feuchtigkeit, die in den Raum eingebracht wird, kann gegebenenfalls nicht mehr in ausreichendem Maß nach außen abgeführt werden. In der Folge steigt die relative Feuchte und somit, bei gleichbleibender Temperatur, auch die absolute Feuchte im Raum an und kann zu Schäden, z.B. Schimmelpilzbildung in den Außenwandraumecken, führen.

Bild 39 zeigt, dass die relative und die absolute Feuchte im Raum deutlich höher sind, wenn keine Lüftungsöffnungen an den Fenstern vorhanden sind. Da über einen längeren Zeitraum die relative Feuchte deutlich über 50 %, teilweise sogar über 65 %, liegt, wäre mit feuchtetechnischen Problemen zu rechnen. Durch die Lüftungsöffnungen wird das gewünschte schadensrisikoarme Innenklima realisiert.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Berechnungen zeigen, dass die Sanierungsmaßnahmen einen positiven Einfluss auf das Innenraumklima bezüglich der Behaglichkeit und des Heizenergiebedarfs haben.

Durch die Sanierungsmaßnahmen wird verhindert, dass die Raumluftfeuchte im Winter zu gering, es im Raum also zu trocken, ist. Gleichzeitig stellen die Lüftungsöffnungen einen ausreichenden Luftwechsel sicher, so dass mit feuchtetechnischen Problemen nicht zu rechnen ist. Das Innenraumklima kann für die gesamte Heizperiode als „behaglich“ oder „noch behaglich“ eingestuft werden. Das ist eine deutliche Verbesserung bezogen auf den Zustand vor der Sanierung.

Die reduzierte Heiztemperatur nach der Sanierung bei gleich bleibender Nutzung kann als Indiz für den positiven Einfluss der Strahlungsheizung auf die Behaglichkeit gewertet werden. Gleichzeitig steigt durch den geringeren U-Wert des Fensters auch die Innenoberflächentemperatur der Fensterfläche, was sich ebenfalls positiv auf die Behaglichkeit auswirkt.

Nahezu 65 % der Heizenergie, die vor der Sanierung für die Beheizung des Raumes notwendig waren, werden durch die Sanierung eingespart.

In Bezug auf die Präventive Konservierung hat die Reduzierung der Zeiten mit extrem niedriger Feuchte im Winter einen erheblichen Einfluss auf die Klimastabilität über das ganze Jahr und damit auf die Bedingungen für die Erhaltung von Kunstwerken in den Räumen. Auch der reduzierte Infiltrationsluftwechsel trägt dazu bei, kurzzeitige Schwankungen der relativen Feuchte zu verringern.

Die Wirkung der Strahlungsheizkörper konnte in Roggenburg nur ansatzweise in dem Vergleich der gemessenen Raum-Temperatur im Winter desselben Nutzers nachvollzogen werden, bei dem eine geringfügige Verringerung der Raumlufttemperatur zu beobachten war. Um diese ersten Ergebnisse auf eine breitere Basis zu stellen sind allerdings weitere Untersuchungen in einem Labor-

Umfeld notwendig, in dem die Einflüsse von Nutzung und Baubetrieb ausgeschlossen werden können. Derartige Messungen finden derzeit am Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern unter der Mitwirkung der Firma Güttinger Ingenieure statt, die die in Roggenburg eingesetzten Wärmekörper entwickelt haben. Erste Ergebnisse zeigen, dass auch in den Messräumen in Benediktbeuern eine geringfügig niedrigere Raumlufthtemperatur für entsprechendes Komfortempfinden ausreichend ist, müssen aber in der kommenden Winterperiode 2012 / 2013 noch validiert werden. Diese Untersuchungen sollen insgesamt bis Ende 2013 abgeschlossen sein und werden umfangreiche neue Erkenntnisse zu Flächenheizungen, Strahlungsheizung und konvektiven Systemen im Vergleich liefern.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Holm, A.; Radon, J.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81 – 94. Hrsg.: WTA-Publications, München.
- [2] Lengsfeld, K.; Holm, A.: Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI-Plus. Bauphysik 29 (2007), Heft 3, Seite 178-186. Ernst & Sohn Verlag Berlin.
- [3] Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K. (1996): Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart.
- [4] Künzel, H.M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedification Verlag.
- [5] Künzel, H.M., Krus, M. (1995): Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 1, S. 5-19.
- [6] Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M. (1995): Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 4, S. 267-279
- [7] Künzel, H.M. und Kießl, K. (1998): Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau.
- [8] VDI 4300-7:2001 Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Juni 2001.
- [9] EN 15251:2007 (D): Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung, Beuth Verlag 2007-2008
- [10] Leusden, F.P. und Freymark, H. (1951) Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch, Gesundheitsingenieur 72, H. 16, S. 271-273.

## Bildverzeichnis

Bild 1: Grundriss im Erdgeschoss mit Übersicht der Positionierung der Datenlogger.	7
Bild 2: Grundriss im Obergeschoss mit Übersicht der Positionierung der Datenlogger. Der Raum für die Blower Door Messung ist orange markiert.	7
Bild 3: Datenlogger 1040-321: Gang 29b, EG, BA1. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündlicher Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.	8
Bild 4: Datenlogger 1040-321: Gang 29b, EG, BA1. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.	9
Bild 5: Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluten Feuchte als stündlicher Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	10
Bild 6: Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	11
Bild 7: Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.	12
Bild 8: Datenlogger 1032-105: Pfarrbüro 48, EG, BA2. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.	13
Bild 9: Datenlogger 0931-198: Gang 29c, EG, BA 2. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	14
Bild 10: Datenlogger 0931-198: Gang 29c, EG, BA 2. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit	

Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	15
Bild 11: Datenlogger 1040-325: Gang 29c, EG, BA 2. Datenlogger neu wegen Verlust des Sensors. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündlicher Mittelwert der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.	16
Bild 12: Datenlogger 1040-325: Gang 29c, EG, BA 2. Datenlogger neu wegen Verlust des Sensors. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 24.01.2011 bis 30.05.2011.	17
Bild 13: Datenlogger 1032-118: Speisesaal 104, Klavier, OG, BA2. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	18
Bild 14: Datenlogger 1032-118: Speisesaal 104, Klavier, OG, BA2. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	19
Bild 15: Datenlogger 0931-172: Speisesaal 104, Schrank, OG, BA2. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	20
Bild 16: Datenlogger 0931-172: Speisesaal 104, Schrank, OG, BA2. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011.	21
Bild 17: Datenlogger 1032-103: Zimmer/Büro 111, OG, BA2. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten vom 03.11.2010 bis 21.01.2011. Das Zimmer war in diesem Zeitraum durch einen Mitbruder bewohnt.	22

- Bild 18: Datenlogger 1032-103: Zimmer/Büro 111, OG, BA2. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011. 23
- Bild 19: Datenlogger 1032-119: Gang 106, OG, BA2. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten. Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011. 24
- Bild 20: Datenlogger 1032-119: Gang 106, OG, BA2. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 03.11.2010 bis 21.01.2011. 25
- Bild 21: Datenlogger 1104-106: Gang 94, OG1, BA1. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten. Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012. 26
- Bild 22: Datenlogger 1104-106: Gang 94, OG1, BA1. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012. 27
- Bild 23: Datenlogger 1104-122: Konventzimmer 98, OG1, BA1. Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur mit berechneter absoluter Feuchte als stündliche Mittelwerte der im 15 Minuten Intervall aufgezeichneten Messdaten. Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012. 28
- Bild 24: Datenlogger 1104-122: Konventzimmer 98, OG1, BA1. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte mit Temperatur und relativer Feuchte. Unten: Histogramm mit Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie statistische Grundwerte über die vorhandenen Messdaten im Zeitraum vom 10.01.2012 bis 19.04.2012. 29
- Bild 25: Blower Door Messung im Gästerefektorium Raum 99. Das linke Bild zeigt die Anordnung der Blower Door für die Unterdruckmessung mit verschlossener Ventilatorblende für Messung des natürlichen Druckunterschiedes. Im Rechten Bild ist im gleichen Raum das neue Fenster zu sehen. Im Fenster nicht sichtbar oben angeordnet befindet sich eine selbstbetätigende Lüftungsklappe. 30

Bild 26: Ergebnis der Blower Door Messung Nr. 3 Unterdruck mit offener Lüftungsklappe.	31
Bild 27: Ergebnis der Blower Door Messung Nr. 6 Unterdruck mit geschlossener, abgeklebter Lüftungsklappe.	31
Bild 28: Ablaufschema für die Durchführung einer hygrothermischen Raumklimaberechnung mit Angabe der benötigten Parameter und Ergebnismöglichkeiten.	33
Bild 29: Ausschnitt aus Gebäudebestandsplan: Grundriss 1. Obergeschoss, Raum 111.	34
Bild 30: In WUFI®-Plus implementierte Aufbau des Raumes 111 im 1. Obergeschoss.	35
Bild 31: Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) in Augsburg als 1 h-Werte und als gleitendes Dekadenmittel (Testreferenzjahr).	36
Bild 32: Für die Berechnungen angesetzte Innenklima für den benachbarten Gang vor der Sanierung.	37
Bild 33: Über den Tag verteilter Feuchteeintrag in den Raum.	38
Bild 34: Über den Tag verteilter Wärmeeintrag in den Raum.	39
Bild 35: Für die Berechnungen angesetzte Innenklima für den benachbarten Gang nach der Sanierung.	40

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der zugänglichen Aufzeichnungen der noch vorhandenen Datenlogger für Temperatur und relative Feuchte. Die Räume auf denen für die energetische Bewertung Bezug genommen wird, sind farbig markiert.	6
Tabelle 2: Ergebnistabelle der Blowerdoor Messung. Die unterschiedlichen Druckwerte ergeben zum einen durch die schrittweise vorgenommene Abklebung von Nebenstromwegen, zum anderen durch die Überdruckmessung.	30