

**Untersuchung zu zeitlichen
Schwankungen der Feuchte in
Innenräumen im Hinblick auf
den Feuchtetransport durch
Bauteile und die Vermeidung
von Schimmelpilzbildung auf
Bauteilinnenoberflächen**

T 3371

T 3371

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0357-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

**Untersuchung zu zeitlichen Schwankungen der Feuchte in Innenräumen im
Hinblick auf den Feuchtetransport durch Bauteile und die Vermeidung von
Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen**

Durchführung der Untersuchungen im Auftrag des
Steinbeis-Transferzentrums Wasser und Infrastruktur, Minden

gefördert durch das
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Geschäftszeichen
ZP 52-5- 5.94-1328/09

Forschungsvorhaben

Untersuchung zu zeitlichen Schwankungen der Feuchte in Innenräumen im Hinblick auf den Feuchtetransport durch Bauteile und die Vermeidung von Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen

Geschäftszeichen
ZP 52-5- 5.94-1328/09

Forschende Stelle und Auftraggeber:

Steinbeis-Transferzentrum Wasser und Infrastruktur
Artilleriestraße 9
32427 Minden

Der Bericht umfasst: 83 Seiten Text
 6 Seiten Anhänge

Für die Bearbeitung:

Minden, den 27. Februar 2019

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ackermann

Inhalt

1. Einleitung
2. Mess- und Auswertprogramm
 - 2.1 Auswahl der Standorte
 - 2.2 Baualter und Zustand der untersuchten Gebäude
 - 2.3 Einflüsse auf Innenraumkonditionen
 - 2.4 Messgeräte
 - 2.5 Auswertegrößen
 - 2.6 Regressionskurven
 - 2.7 Verteilung der Zeitreihen
- 3 Einfluss der technischen Entwicklung im Bereich von Wohngebäuden auf die Temperatur und Feuchte der Raumluft
 - 3.1 Dokumentation der exemplarisch ausgewählten Gebäude
 - 3.2 Vergleich der Gebäude
 - 3.2.1 Gebäude am Standort 18
 - 3.2.1.1 Raumtemperatur θ
 - 3.2.1.2 Absolute Luftfeuchte c
 - 3.2.1.3 Relative Luftfeuchte ϕ
 - 3.2.2 Gebäude am Standort 109
 - 3.2.2.1 Raumtemperatur θ
 - 3.2.2.2 Absolute Luftfeuchte c
 - 3.2.2.3 Relative Luftfeuchte ϕ
 - 3.2.3 Gebäude am Standort 63
 - 3.2.3.1 Raumtemperatur θ
 - 3.2.3.2 Absolute Luftfeuchte c
 - 3.2.3.1 Relative Luftfeuchte ϕ
 - 3.2.4 Vergleich der Temperatur und absoluten Luftfeuchte im Raum
 - 3.3 Einfluss erhöhter Luftdichtheit auf die Raumluft
- 4 Systematisierung von Gebäuden in Abhängigkeit des Baualters

- 5 Grundlagen zur Verallgemeinerung von Zeitreihen
 - 5.1 Mittelwert- und Extremwertbetrachtungen
 - 5.2 Analyse des untersuchten Zeitfensters

- 6 Analyse von Mittelwerten der Temperatur θ , der absoluten Feuchte c und der relativen Feuchte ϕ der Luft
 - 6.1 Mittelwerte der Außenluft
 - 6.2 Mittelwerte der Raumluft
 - 6.3 Vergleich von Innen- und Außenluftdaten aus Regressionen
 - 6.4 Vergleich von Innen- und Außenluftdaten aus Messwerten
 - 6.5 Vergleich von Regressionen mit Messwerten

- 7 Vergleich der Auswertedaten mit geltenden Regeln der Technik
 - 7.1 Meteorologische Randbedingungen zur Simulation des Tauwasserausfalls in Bauteilen
 - 7.2 Hygienischer Wärmeschutz
 - 7.3 Positionierung von Möbeln und Einrichtungsgegenständen

- 8 Fazit

- 9 Zusammenfassung

Literaturangaben

Anhang A

Anhang B

Anhang C

1 Einleitung

Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz wurden in der Vergangenheit – und werden auch aktuell – immer nur eliminiert auf einzelne Fragestellungen bezogen, die dann ohne Berücksichtigung der Auswirkungen auf andere Themen fortgeschrieben wurden und werden. Unter anderem handelt es sich dabei um den hygienischen Wärmeschutz, d. h. um die Vermeidung der Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen und um den energiesparenden Wärmeschutz, aber auch um Fragen der Tauwasserbildung in Bauteilen. Konsequenzen die sich aus der Fortschreibung von Grenzwerten auf sich verändernde Innenraumtemperaturen und Feuchten ergeben wurden bisher ebenso wenig ganzheitlich betrachtet wie der Einsatz unterschiedlicher gebäudetechnischer Anlagen und Einrichtungen. Zur Analyse der Innenraumkonditionen von Gebäuden unterschiedlichen Alters und technischer Ausrüstung wurden im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens an ursprünglich 57 Standorten in der Bundesrepublik über einen Zeitraum von nunmehr 8 Jahren Daten der Raumlufttemperatur und relativen Luftfeuchte gesammelt. Damit soll folgenden Fragen nachgegangen werden:

1. Führen die technische Entwicklung im Bereich von Wohngebäuden und die kontinuierlich verschärften Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz zu einer Veränderung der Temperatur und der Feuchte der Luft in Gebäuden?
2. Kann eine Gebäudetypologie bezüglich Temperatur und absoluter Luftfeuchte auf der Basis des Baualters erstellt werden?
3. Können aus den Messdaten der Innen- und Außenluft an den unterschiedlichen Standorten unabhängige Zyklen für den zeitlichen Verlauf der Temperatur und der absoluten Feuchte der Luft abgeleitet werden?
4. Welche Konsequenzen für Regeln der Bautechnik, insbesondere für baurechtlich relevante Nachweisverfahren zum Tauwasserausfall in Bauteilen, den hygienischen Wärmeschutz und die Positionierung von Möbeln und Einrichtungsgegenständen ergeben sich aus den Messwerten?

2 Mess- und Auswerteprogramm

2.1 Auswahl der Standorte

Mit der Auswahl der Standorte sollte eine möglichst große Fläche der Bundesrepublik abgedeckt und unterschiedliche klimatische und meteorologische Eigenheiten erfasst werden. Es wurden daher sowohl küstennahe Lagen als auch sommerlich heiße Regionen und Standorte in Mittelgebirgen in die Untersuchungen einbezogen. Da eine Analyse extremer Messpunkte für allgemeine Aussagen als wenig aussagekräftig angesehen wurde, erfolgte der Ausschluss solche Standorte bei der Wahl der Messpunkte.

Neben der Berücksichtigung geographischer / meteorologischer Gesichtspunkte war die Auswahl der Standorte auch auf die Verfügbarkeit von Messstellen zurückzuführen. Dank der Vermittlung von Mitarbeitern des Deutschen Wetterdienstes (DWD) konnten bei der Einrichtung des Forschungsvorhabens und der Suche nach Teilnehmern 57 Standorte im gesamten Bundesgebiet gefunden werden, an denen die Bewohner bzw. Eigentümer bereit waren einen Thermohygrographen in ihrem Wohnbereich zu platzieren. Da es sich dabei um ehemalige ehrenamtliche Mitarbeiter des DWD handelte war auch gewährleistet, dass die Standorte zur Messung der Innenraumkonditionen im Wesentlichen in unmittelbarer Nähe zu einer Wetterstation des DWD lagen. Durch diese räumliche Nähe konnte eine Verfälschung des Bezugs der Außendaten auf die Ergebnisse der Innenraummessungen ausgeschlossen werden. Die räumliche Zuordnung der DWD Station zum untersuchten Gebäude wird in Bild 1 exemplarisch für einen Standort gezeigt.

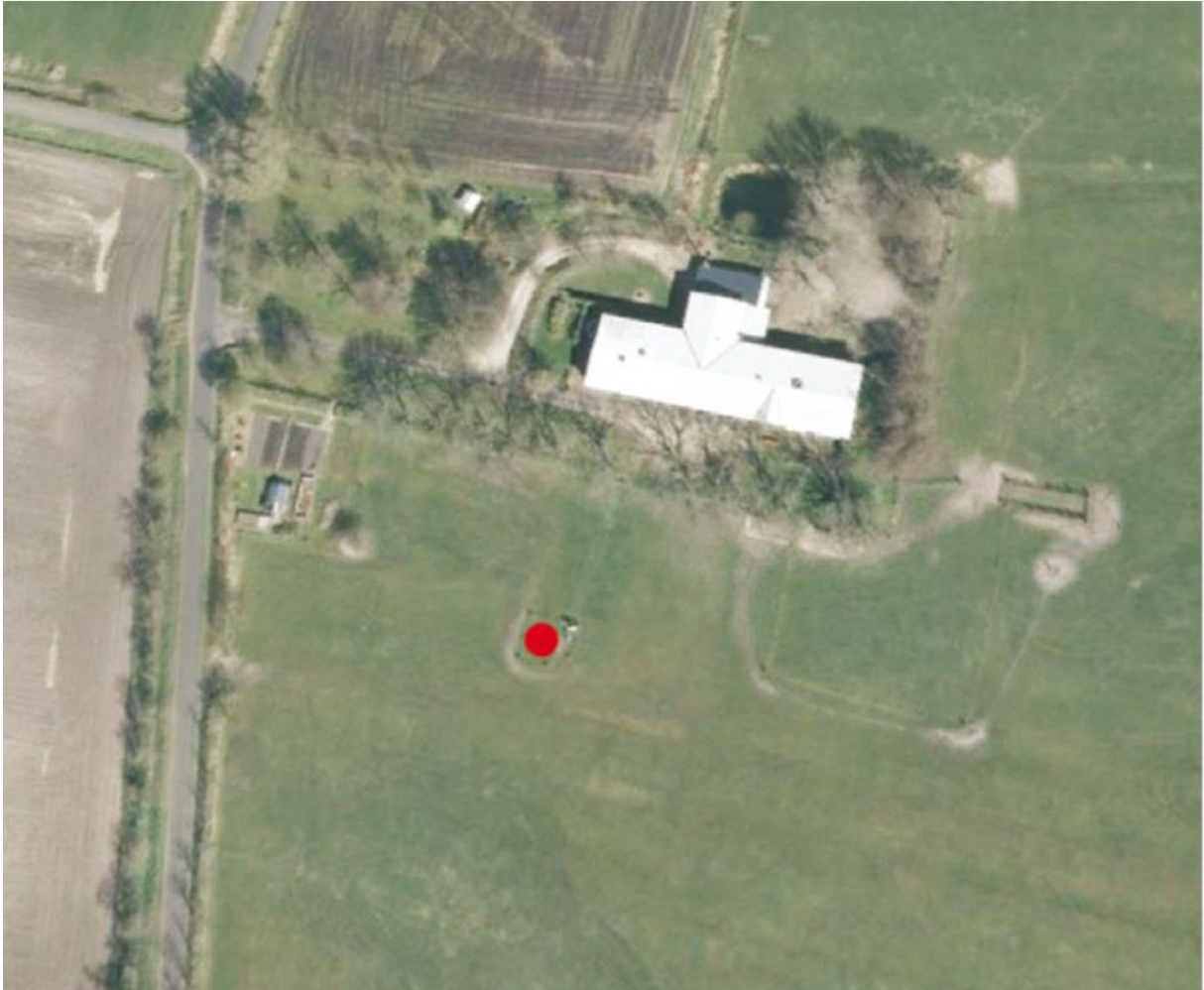


Bild 1: Position einer DWD Station (roter Punkt) und des untersuchten Gebäudes

Eine Übersicht der Standorte auf die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens Bezug genommen wurde, ist in Bild 2 dargestellt.

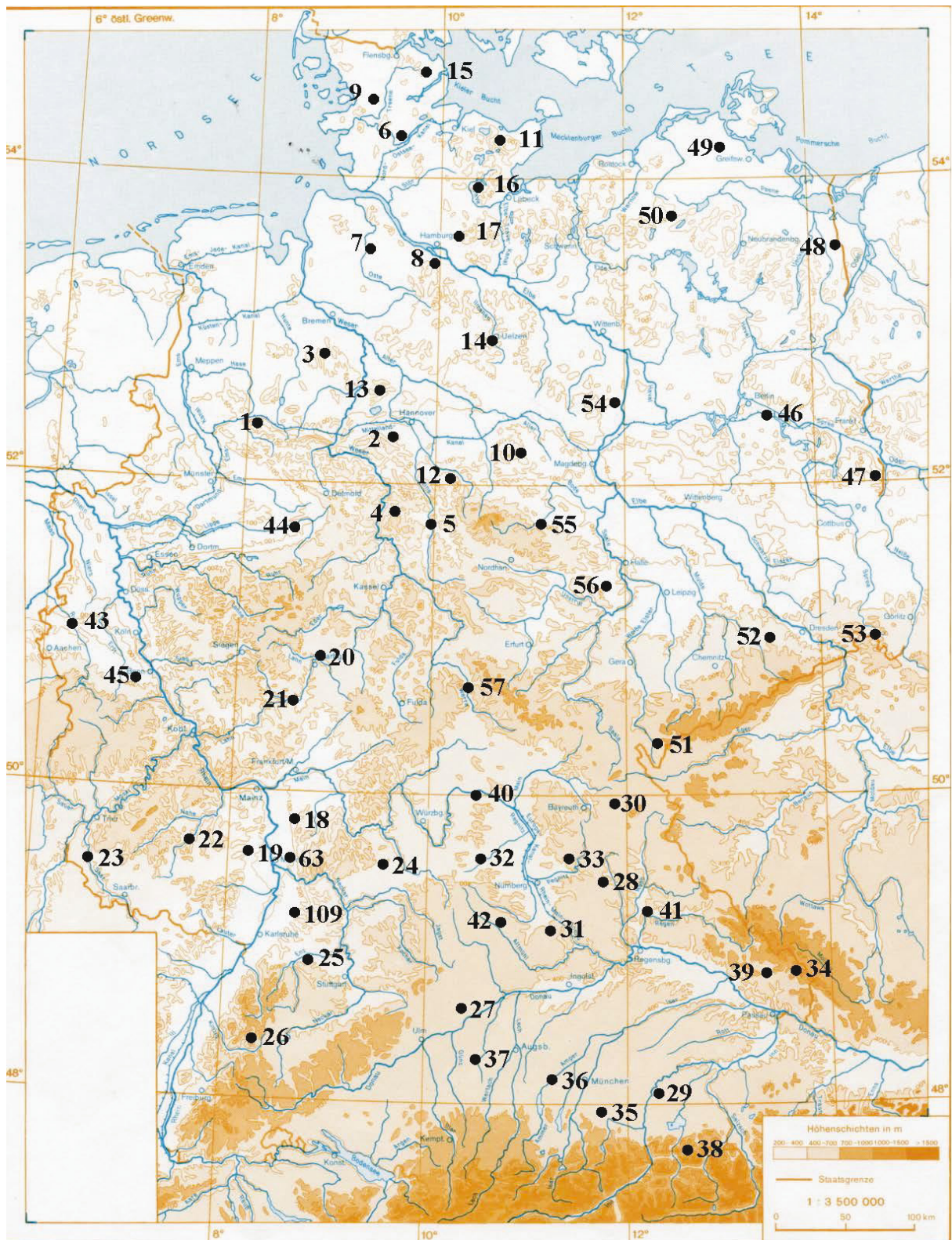


Bild 2: Standorte der Thermohygrographen

2.2 Baualter und Zustand der untersuchten Gebäude

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Gebäude wurden in der Zeit von 1750 bis 2010 erstellt. Zum Zweck einer Systematisierung erfolgte die Einteilung der Gebäude in fünf Gruppen (Baualterklassen) entsprechend ihres technischen Standards. Da die in der Literatur aufgeführten Einteilungen nicht einheitlich sind, sondern sich an der der Betrachtung zu Grunde liegenden Fragestellung orientieren, basiert die vorliegende Systematik auf folgenden Überlegungen:

- Bis zum Jahr 1900 folgten Baustoffe und Bautechniken traditionellen Wegen (Gruppe 1).
- Mit dem Fortschreiten der industriellen Revolution war eine Verbesserung von Materialien und Bauweisen verbunden. Bis zum Jahr 1944 gab es keine Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz (Gruppe 2).
- Im Jahr 1944 wurden in DIN 4710 erstmalig Anforderungen an Wärmeschutz von Gebäuden definiert, die 1952 in DIN 4108 überführt wurden und bezüglich des hygienischen Wärmeschutzes mehr oder weniger bis 1981 Bestand hatten (Gruppe 3).
- Nach der Ölkrise im Oktober 1973 wurde das Streben nach Energieeinsparung auch auf den Bausektor ausgeweitet, woraus dann 1976 das Energieeinspargesetz und 1977 die erste Wärmeschutzverordnung (WSchV) folgte (Gruppe 4).
- Während DIN 4108-2 im Jahr 2001 überarbeitet und die Anforderungen an den hygienischen Wärmeschutz verschärft wurden, erfolgte eine Anpassung des energiesparenden Wärmeschutzes in den verschiedenen Novellen der WSchV und der Energieeinsparverordnung (EnEV). Mit Einführung der EnEV im Jahr 2003 wurden erstmals auch Lüftungswärmeverluste in die Betrachtungen einbezogen, sodass seit dieser Zeit angestrebt wird, Gebäude zunehmend luftdicht auszuführen (Gruppe 5).
- Gebäude für die keine Angabe über den Erstellungsdatum gemacht werden konnten, wurden in der Gruppe 6 zusammengefasst.

Die Verteilung der untersuchten Gebäude in den definierten Kategorien ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Baualtersklassen und Anzahl der korrespondierenden Gebäude

Gruppe	Baujahr	Anzahl
1	≤ 1900	8
2	1900 bis ≤ 1945	11
3	1945 bis ≤ 1970	14
4	1970 bis ≤ 2000	17
5	> 2000	6
6	unbekannt	1

Neben dem Baualter, und daraus möglicherweise ableitbaren Bauweisen der wärmeübertragenden Bauteile, ist auch der Einbau bzw. die Erneuerung der Fenster für den Austausch der Raumluft gegen Außenluft relevant und stellt damit ein wichtiges Indiz zur Bewertung der Temperatur und Feuchte in Gebäuden bzw. Räumen dar. In Anhang A Table A.1 sind daher das Jahr der Erbauung der untersuchten Gebäude und des Einbaus bzw. der Erneuerung der Fenster zusammengestellt. Außerdem kann Übersicht der Fenstertyp, der Zeitpunkt deren Erneuerung sowie einige Besonderheiten in den untersuchten Objekten entnommen werden.

2.3 Einflüsse auf Innenraumkonditionen

Eine „punktgenaue“ Aussage über die Temperatur und Feuchte in Gebäude ist nur auf der Basis von Messungen möglich. Dabei ist jedoch zu beachten, dass daraus abgeleitet Angaben zu Gebäuden als Ganzes nur als ein grober Rahmen mit einer nicht zu unterschätzenden Schwankungsbreite der Daten aufgefasst werden können. Diese Schwankungen sind darauf zurückzuführen, dass sich die Messergebnisse – eigentlich – nur auf einzelne Räume in Gebäuden beziehen können / sollen da diese meist unterschiedliche Abmessungen der Grundfläche und daraus resultierend unterschiedlich große raumbegrenzende Oberflächen aufweisen. Darüber hinaus sind in den zu betrachtenden Räumen in der Regel verschieden große Fensterflächen und unterschiedliche Orientierungen gegeben. Neben diesen Aspekten sollten bei

einer Analyse von Innenraumkonditionen mindestens auch folgende Aspekte beachtet werden:

- Nutzung des Raumes (Wohnen / Küche/ Bad / Schlafen / Arbeiten)
- Nutzerverhalten (hohe bzw. geringe Luftwechselrate / Raumtemperaturen)
- Standort (Küste / Binnenland / Kontinentalklima / mediterranes Klima)
- Baualter (alter Bestandsbau / neuerer Bestandsbau / Neubau)
- Bauweise (schwere Bauweise / leichte Bauweise)
- gebäudetechnische Anlagen (Lüftungsanlage / Kaminofen / offener Kamin)
- Modernisierung (Fenster / Türen / Fassade / Dach / andere wärmeübertragende Bauteile).

Aber nicht nur die oben aufgelisteten Punkte im Einzelnen, sondern auch ihrer Kombinationen beeinflussen die Temperaturen in Räumen und den Gehalt an Wasser in der Raumluft. Aus dieser Erkenntnis heraus geben die vorliegenden Forschungsergebnisse – wie übrigens die Ergebnisse aus Messungen vor Ort generell – nur Bilder einzelner Situationen wider aus denen Trends und Tendenzen abgeleitet werden können.

2.4 Messgeräte

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Datenlogger der Firma Trotec Typ DL 100 und der Firma Lufft Typ Opus 10 verwendet.



Bild 3: Datenlogger der Firma Trotec mit Ständer

Um die Zugänglichkeit des Sensors an die Raumluft zu gewährleisten, wurden die Geräte, wie in Bild 3 dargestellt, auf einem Ständer platziert. Alle Datenlogger waren so eingestellt, dass die Temperatur und relative Feuchte am Standort im Minutentakt gemessen wurden. In Hinblick auf die Kapazität des Messwertspeichers und den sich daraus ergebenden notwendigen Gerätewechsel erfolgten die Einstellungen so, dass alle 15 Minuten Messwerte abgespeichert wurden, wobei für die beiden o. g. Auswertegrößen eine Aufzeichnung des Mittelwerts aus den 15 Einzelangaben sowie des maximalen und der minimalen Messwerts im Zeitintervall erfolgte; d. h. die Datenlogger zeichnen alle 15 Minuten sechs Werte auf.

Da die korrespondierenden Außendaten des DWD nur im Stundenintervall vorlagen, erfolgte zur Auswertung der raumseitigen Daten die Mittelwertbildung aus vier 15 Minutenintervallen und die Erfassung des Maximums und des Minimums während der betrachteten Stunde.

2.5 Auswertegrößen

Wie bereits dargestellt, zeichnen die Messgeräte im Raum und im Außenbereich die Temperatur θ und die relative Feuchte ϕ am jeweiligen Standort auf. Während die Temperatur – im Wesentlichen – von keinem weiteren Einfluss abhängig ist, ist die relative Feuchte ϕ von der Temperatur θ und der absoluten Luftfeuchte c abhängig. Die relative Feuchte ϕ kann daher stets nur im Zusammenhang mit der Temperatur θ und der absoluten Luftfeuchte c gesehen und interpretiert werden. Um über den Wassergehalt der Raum- und der Außenluft eine Aussage machen zu können die außer von der Temperatur von keiner anderen Einflussgröße abhängt, erfolgt bei der Betrachtung der Feuchte im Weiteren der Bezug auf die absolute Luftfeuchte c . Aus den Messwerten der Temperatur θ_i und θ_e in [°C] und der relativen Feuchte ϕ_i und ϕ_e vor Ort wurden auf der Basis von DIN 4108-3:2018-11 Anhang C [1] bzw. DIN EN ISO 13788:2013-05 Anhang E [2] folgende Auswertegrößen für die Innen- und die Außenverhältnisse entwickelt:

- Absolute Feuchte der Luft c_i und c_e [g/m³]
- Taupunkttemperatur $\theta_{\text{Tau},i}$ und $\theta_{\text{Tau},e}$ [°C]
- Partialdampfdruck p_i und p_e [Pa]
- Gerichteter Partialdampfdruck p_{\uparrow} [Pa].

Der Begriff des gerichteten Partialdampfdrucks p_{\uparrow} wurde zusätzlich zur absoluten Luftfeuchte, der Taupunkttemperatur und dem Partialdampfdruck eingeführt um eine Aussage über die Richtung der Partialdampfdrücke im zeitlichen Verlauf machen zu können; d. h. der gerichtete Partialdampfdruck p_{\uparrow} , ermittelt aus der Differenz des Partialdampfdrucks innen minus dem Partialdampfdruck außen, gibt an, wann ein Diffusionsstrom aus dem Innenraum nach außen und wann ein Diffusionsstrom aus der Außenluft in den Raum durch die umschließenden Bauteile hindurch vorliegt. In den Bildern 4 bis 10 sind exemplarisch die Messdaten für Temperatur und relative Feuchte innen und außen am Standort 109-A1 sowie die Verteilung der daraus abgeleiteten Auswertegrößen im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2016 dargestellt.

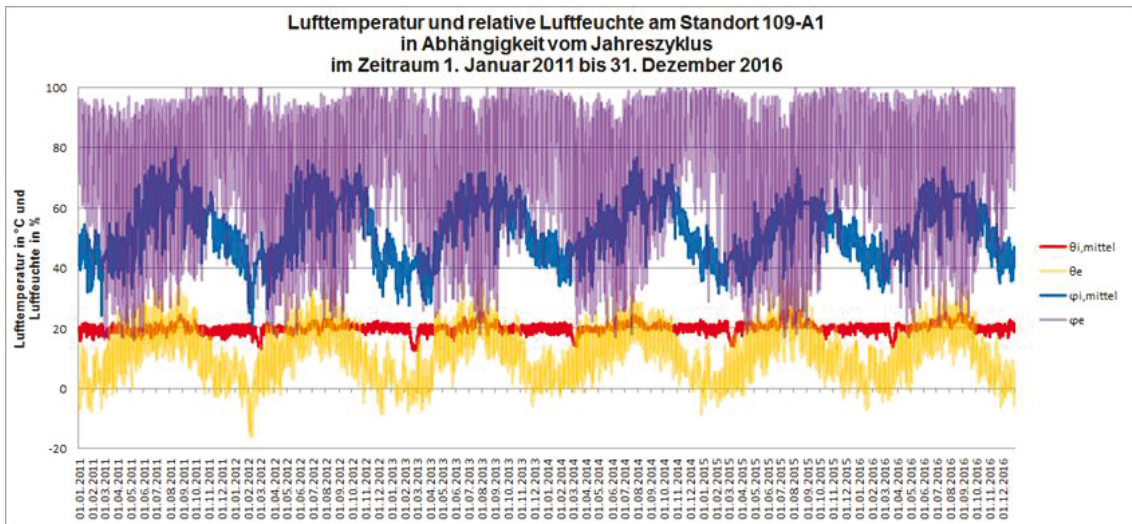


Bild 4: Messwerte innen und außen für Temperatur und relative Feuchte

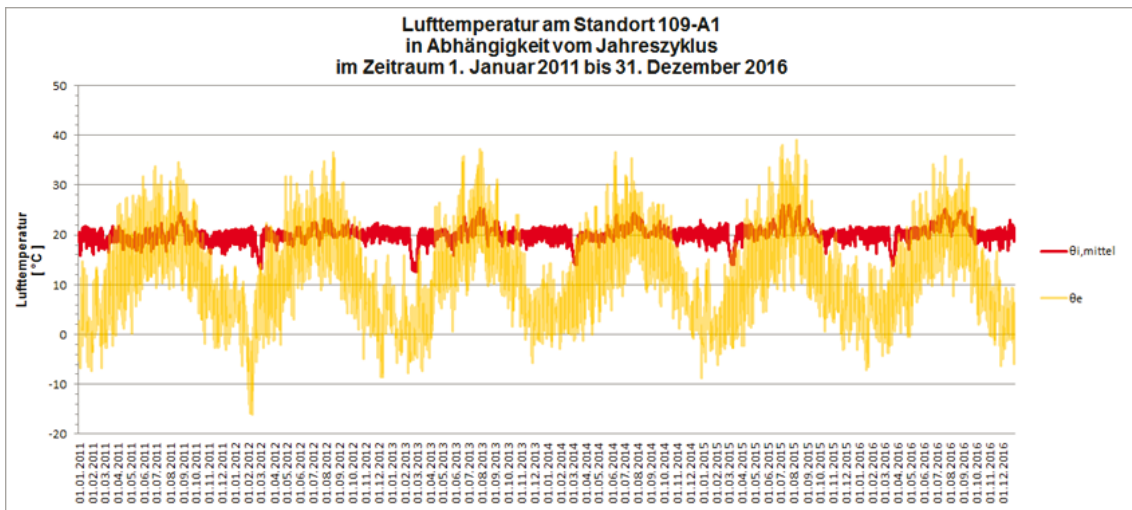


Bild 5: Messwerte der Innen- und Außenlufttemperatur

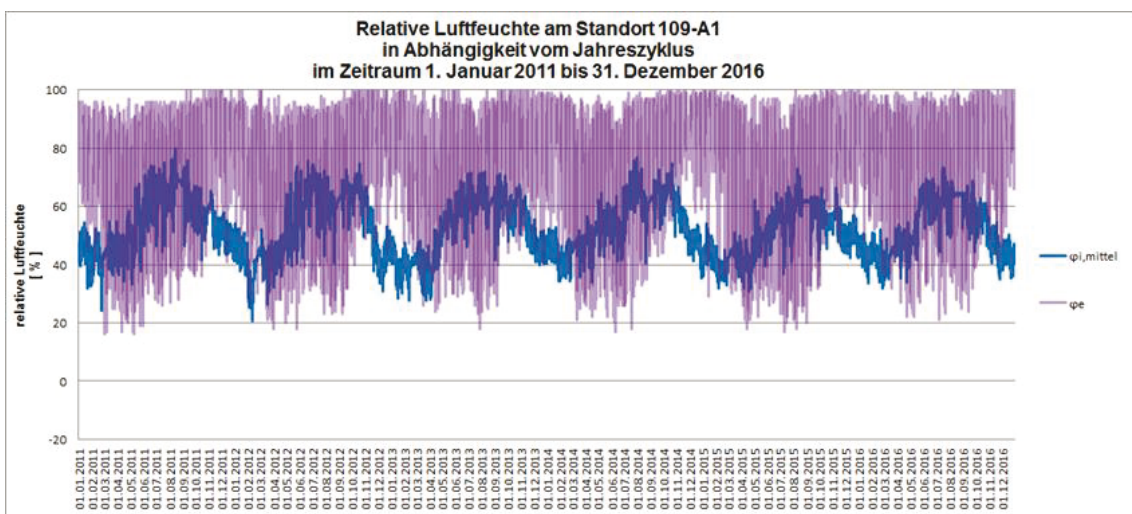


Bild 6: Messwerte der relativen Innen- und Außenluftfeuchte

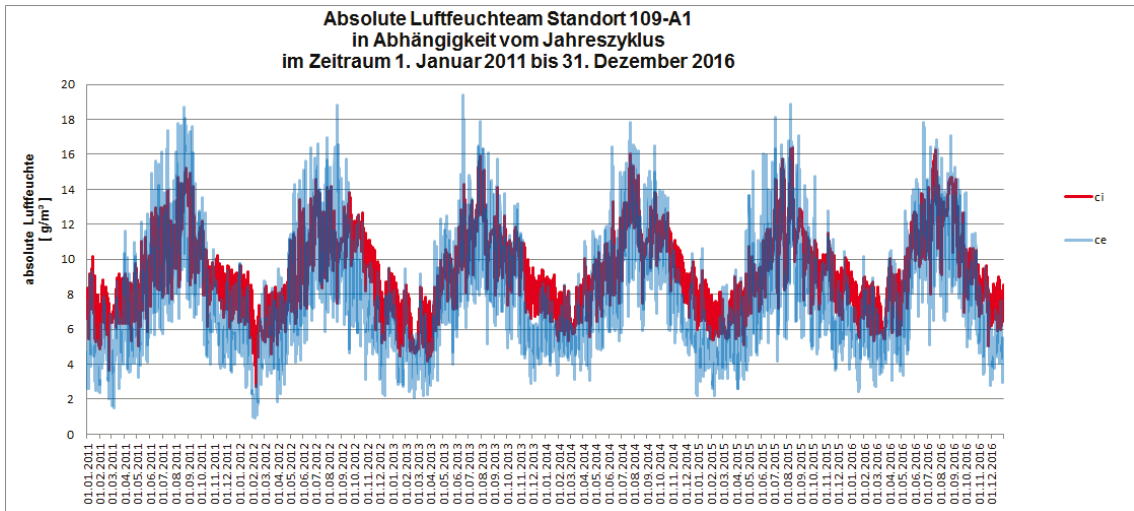


Bild 7: Absolute Luftfeuchte innen und außen

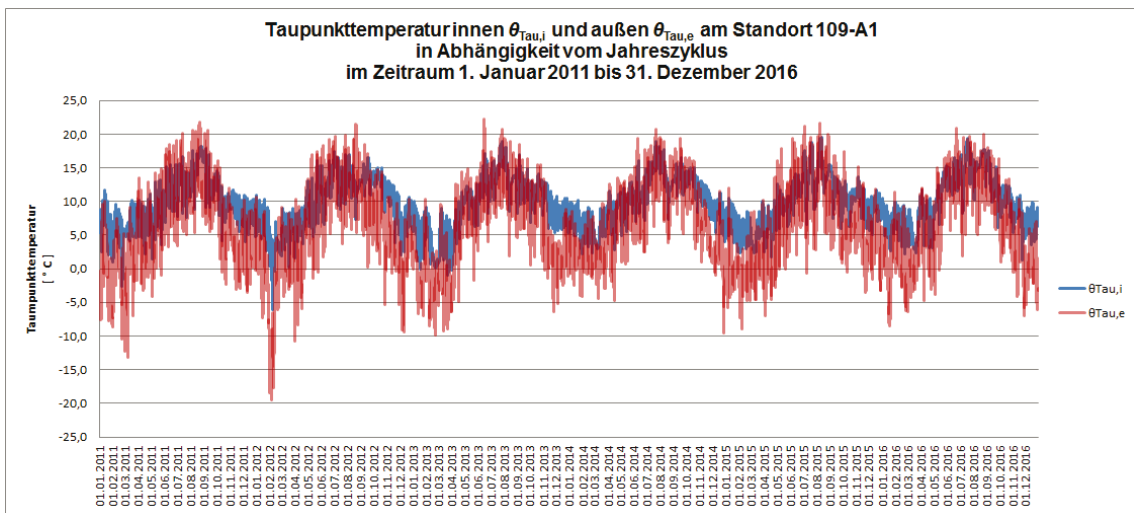


Bild 8: Taupunkttemperatur innen und außen

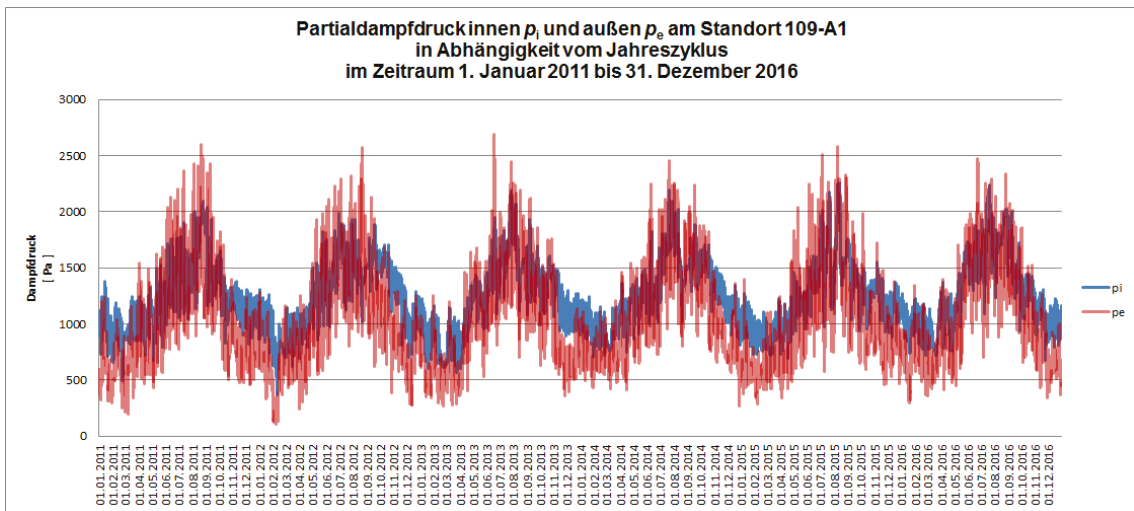


Bild 9: Partialdampfdruck innen und außen

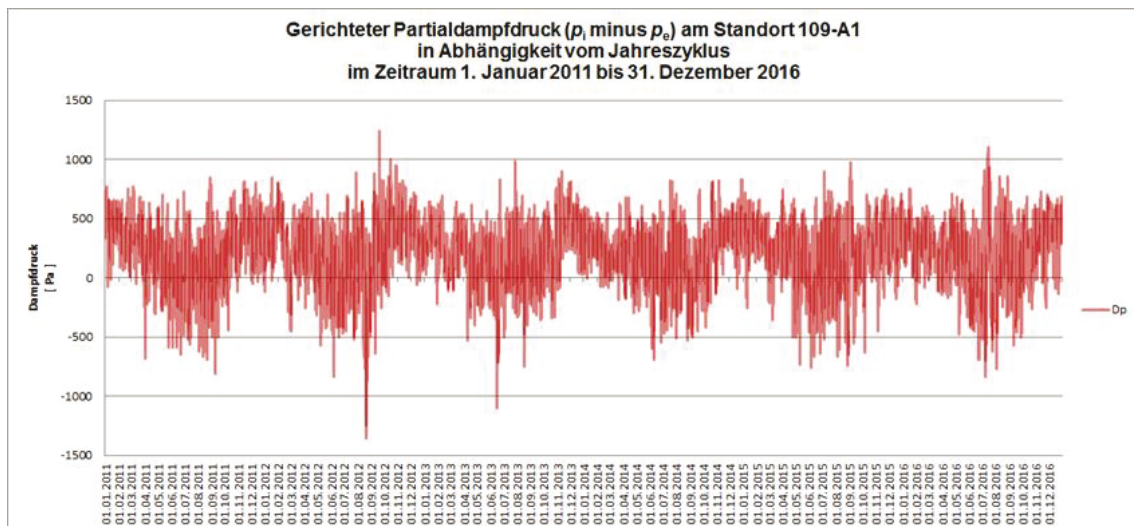


Bild 10: Gerichteter Partialdampfdruck

2.6 Regressionskurven

Da die Messwerte und die daraus abgeleiteten Auswertgrößen aufgrund der meteorologischen Schwankungen stark variieren, ist ein Vergleich dieser Daten nicht oder nur bedingt möglich. Für eine Analyse der Messergebnisse wurden daher durch Regression Mittelwertkurven für die o. g. zehn Auswertgrößen im jeweiligen Auswertzeitraum generiert. Als Algorithmus werden dabei häufig Sinusfunktionen verwendet. Diese haben den Vorteil, dass sie von Hause aus einen zeitlich veränderlichen Verlauf darstellen und die Stoßstellen der einzelnen Jahre keinen zusätzlichen Aufwand zur Glättung erfordern. Allerdings zeigten bereits erste Analysen der Messergebnisse, dass der Gradient des Mittelwertes der zu untersuchenden Auswertgrößen von Null verschieden ist. Für die Regressionskurven bedeutete dies, dass die mathematische Darstellung allein auf der Basis einer Sinuskurve die tatsächlichen Sachverhalte nicht hinreichend genau wiedergeben würde. Die Kurven wurden daher aus zwei Funktionen gebildet:

- Einer Geradengleichung und
- einer Sinusfunktion.

Dabei gibt $f(t)$ die Geradengleichung mit dem Mittelwert $\bar{y}(t)$ der Auswertgrößen und $g(t)$ den Sinus, d. h. die zeitlich veränderlichen Schwankungen mit der zugehörigen Amplituden \hat{y} wieder. Eine Analyse der Phasenverschiebung Δt ist erforderlich, um den zeitlichen Verlauf der Regressionskurven, insbesondere den Durchgang der

Sinuskurve durch die Mittelwertlinie beschreiben zu können. Die Regressionskurven wurden gemäß Gleichung (1) wie folgt gebildet:

$$y(t) = f(t) + g(t) \quad (1)$$

$$f(t) = a \cdot t + \bar{y}(t) \quad (2)$$

$$g(t) = \sin[2 \cdot \pi(t + \Delta t)] \cdot \hat{y} \quad (3)$$

Mit:

a : Gradient

$y(t)$: Auswertegröße in Abhängigkeit der Zeit

$\bar{y}(t)$: Mittelwert in Abhängigkeit der Zeit

\hat{y} : Amplitude

Δt : Phasenverschiebung

Die Optimierung der Regressionskurven, d. h. die Anpassung der Regressionskurven an die Messwerte, erfolgte über die Amplitude \hat{y} und die Phasenverschiebung Δt nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Der Zusammenhang und die Entwicklung zwischen Messwertverteilung und den daraus ermittelten Regressionskurven wird exemplarisch in den Bildern 11 bis 16 für die Temperatur und den absoluten Wasserhalt am Standort 109-A1 im Zeitraum 2011 bis 2016 dargestellt.

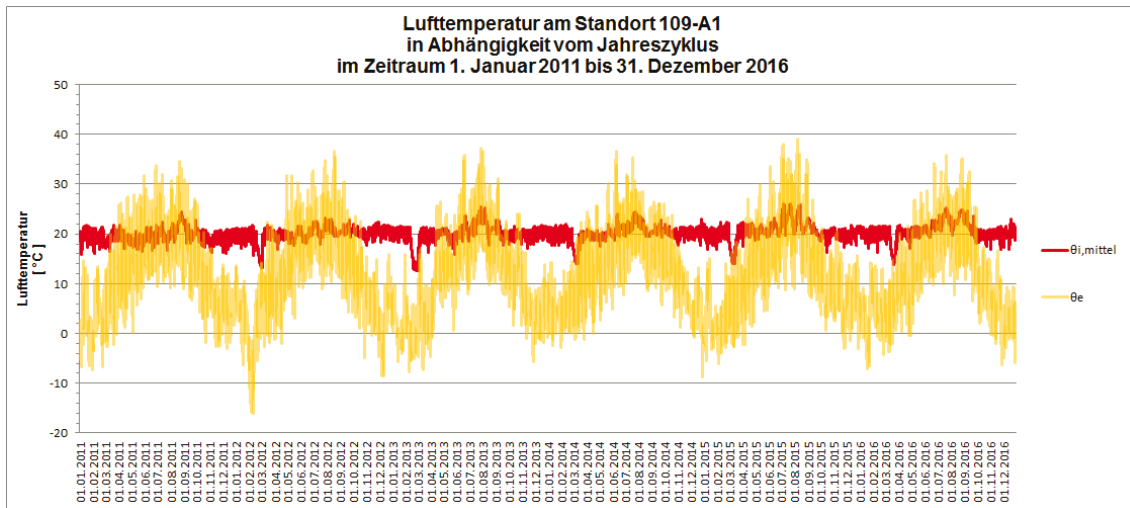


Bild 11: Zeitlicher Verlauf von Messwerten der Lufttemperatur

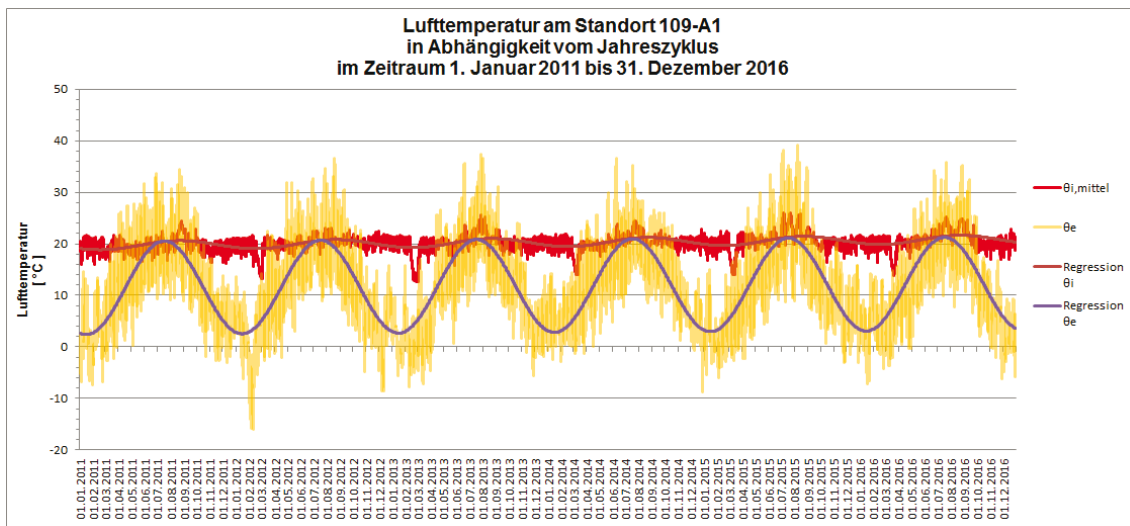


Bild 12: Zeitlicher Verlauf von Messwerten und Regressionskurven der Lufttemperatur

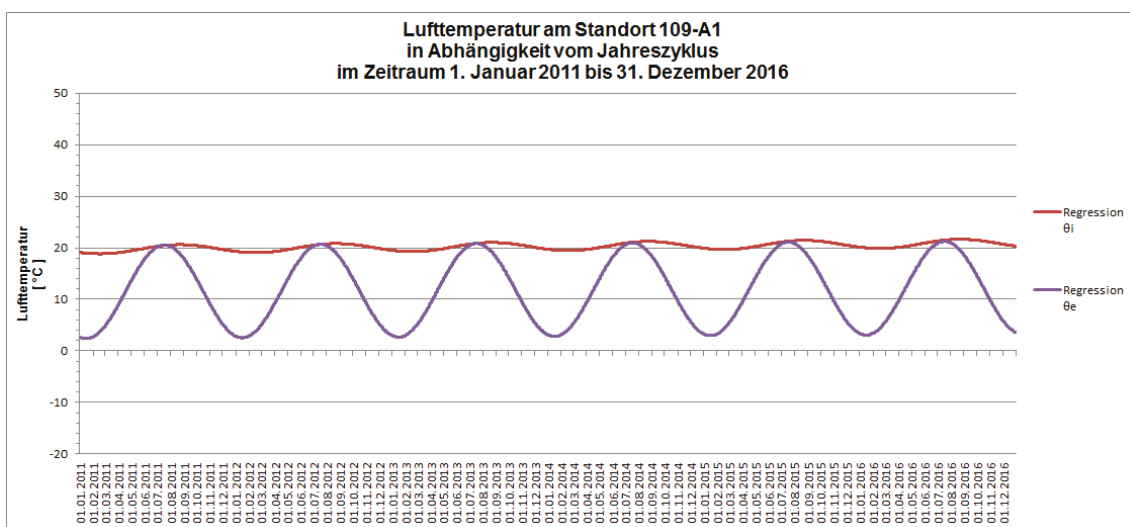


Bild 13: Zeitlicher Verlauf von Regressionskurven der Lufttemperatur

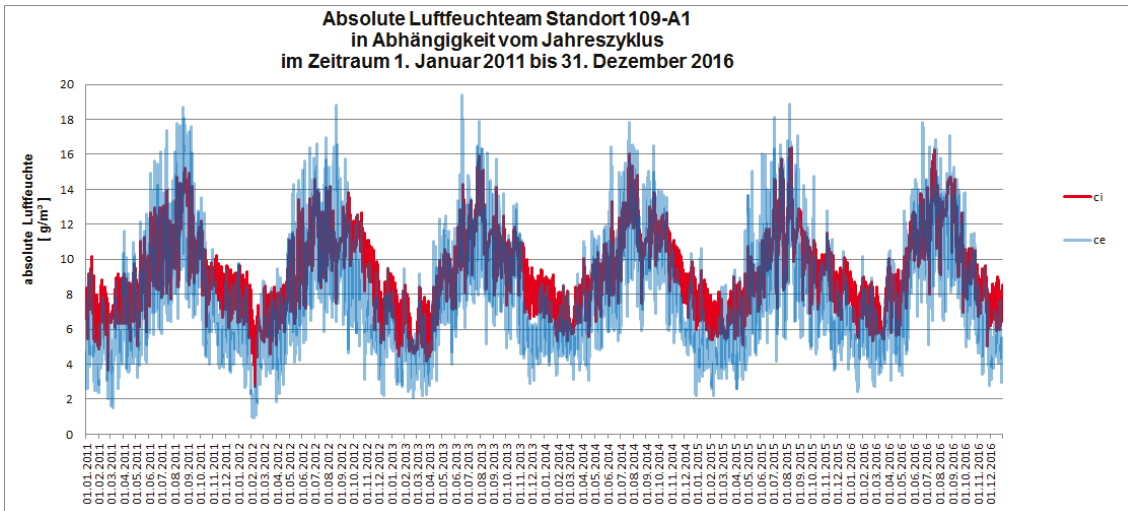


Bild 14: Zeitlicher Verlauf von Messwerten der absoluten Luftfeuchte

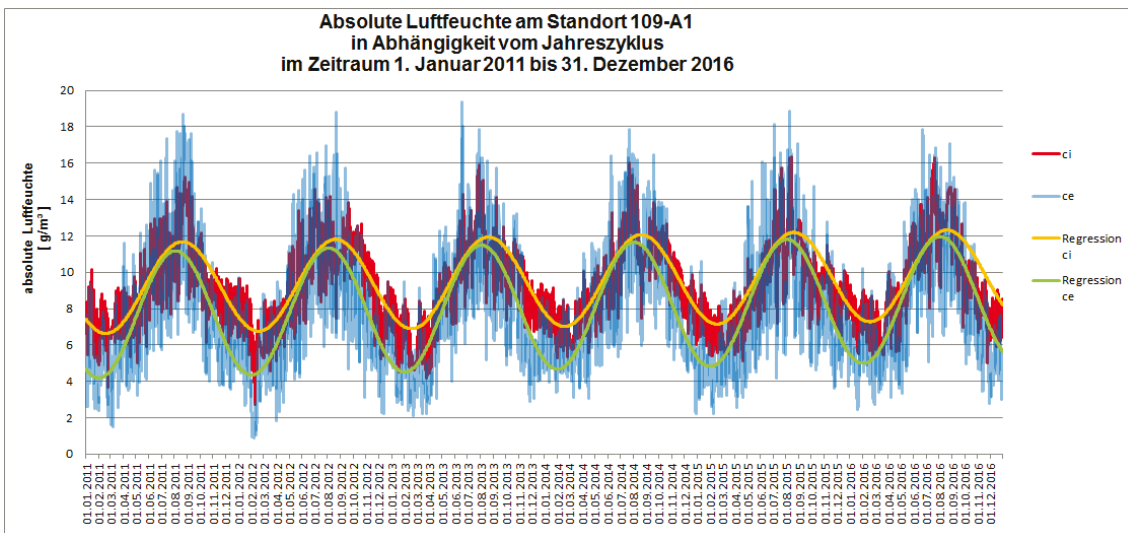


Bild 15: Zeitlicher Verlauf von Messwerten und Regressionskurven der absoluten Luftfeuchte

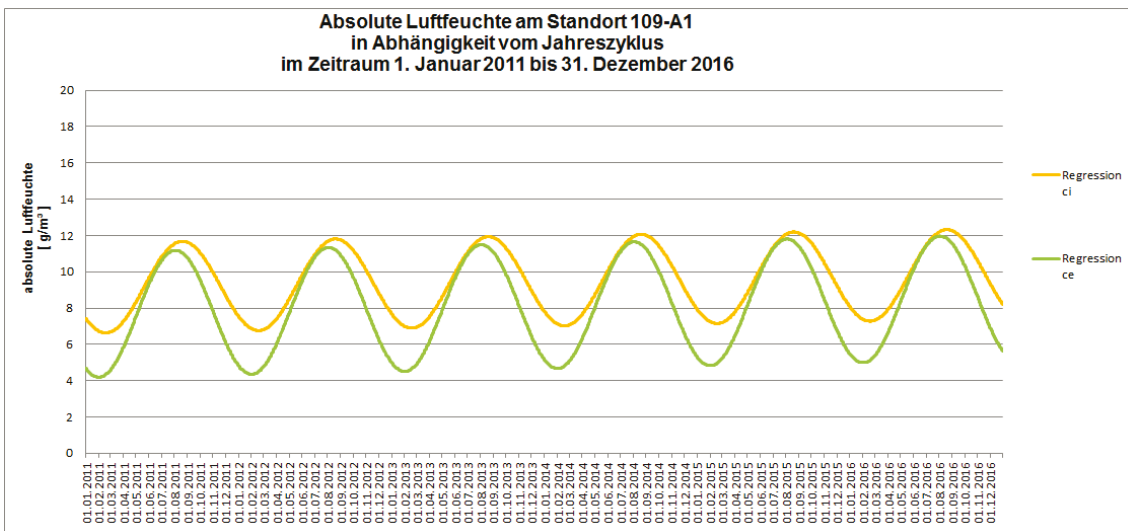


Bild 16: Zeitlicher Verlauf Regressionskurven der absoluten Luftfeuchte

2.7 Verteilung der Zeitreihen

Begonnen wurde das Forschungsvorhaben mit 57 Messstationen. Mit zunehmender Dauer der Datenerhebung fielen immer wieder Standorte aus. Dies lag u. a. daran, dass

- drei der Messgeräte auf dem Postweg verloren gingen,
- Messgeräte während eines Zyklus ausfielen,
- es Teilnehmer am Forschungsvorhaben versäumten die Thermohygrographen rechtzeitig zurückzusenden, sodass der Datenspeicher überschrieben wurde,
- Teilnehmer verstarben,
- Wechsel der Eigentümern oder Bewohner an Standorten stattfanden.

Durch diese Ursachen entstanden in allen Fällen Lücken in den Aufzeichnungen die eine weitere Auswertung der Daten in Zeitreihen unmöglich machte. Tabelle 2 zeigt die Anzahl der Datenreihen mit der maximalen Zeitdauer (in Jahren) durchgängiger Aufzeichnungen:

Tabelle 2: Anzahl der Datenreihen

Länge der Datenreihe [Jahre]	Anzahl
0	3
1	8
2	3
3	7
4	2
5	3
6	2
7	28

3 Einfluss der technischen Entwicklung im Bereich von Wohngebäuden auf die Temperatur und Feuchte der Raumluft

Wie in der Einleitung im Abschnitt 1 dargelegt, soll mit der vorliegenden Untersuchung u. a. der Frage nachgegangen werden, ob die gesteigerten Anforderungen an den hygienischen und den energiesparenden Wärmeschutz und die daraus resultierenden Bauweisen und technischen Ausstattungen von Gebäuden zu einer Veränderung der Temperatur und der Luftfeuchte in deren Innerem geführt haben. Zu diesem Zweck wird die Verteilung der Temperatur θ_i , der absoluten Feuchte c_i und der relativen Feuchte ϕ_i der Raumluft an drei exemplarisch ausgewählten Gebäuden unterschiedlichen Baualters, und damit unterschiedlicher Bauweisen sowie unterschiedlicher gebäudetechnischer Ausstattung untersucht. Die Analyse dieser Gebäude soll qualitative, nicht aber quantitative Unterschiede aufzeigen.

3.1 Dokumentation der exemplarisch ausgewählten Gebäude

Die drei Gebäude befinden sich alle im Oberrheingraben zwischen Frankfurt und Karlsruhe, wobei die Standorte hinsichtlich der Außenluftkonditionen (Temperatur θ_e , absolute Luftfeuchte c_e und relative Luftfeuchte ϕ_e) keine nennenswerten Unterschiede aufweisen.

Das Gebäude am Standort 18 wurde im Jahr 1960 errichtet und seitdem nicht modernisiert. Es sind noch immer die ursprünglichen Fenster mit Einfachverglasung eingebaut. Der Luftwechsel in diesem Gebäude erfolgt über die Fenster. Der Standort 18 spiegelt damit eine Bauausführung wider, die den Anforderungen an den hygienischen Wärmeschutz nach DIN 4108:1952 entspricht. Maßgaben zum energiesparenden Wärmeschutz waren zum Zeitpunkt der Erstellung nicht gegeben.

Das Gebäude am Standort 109 wurde im Jahr 2009 fertiggestellt, weist U -Werte der wärmeübertragenden Bauteile auf die deutlich über dem Niveau der zum Zeitpunkt der Ausführung geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV 2007) [3] lagen und erzielte bei einer Messung der Luftdichtheit nach dem Druckdifferenzenverfahren einen Wert von $n_{50} \approx 0,9 \text{ h}^{-1}$. Der Austausch der Innenluft gegen Außenluft erfolgt ausschließlich über nutzerintendiertes Fensterlüften.

Beim Gebäude am Standort 63 handelt es sich um ein Passivhaus. Es erfüllt die Anforderungen an den Dämmstandard sowie an die Luftdichtheit des Passivhausinsti-

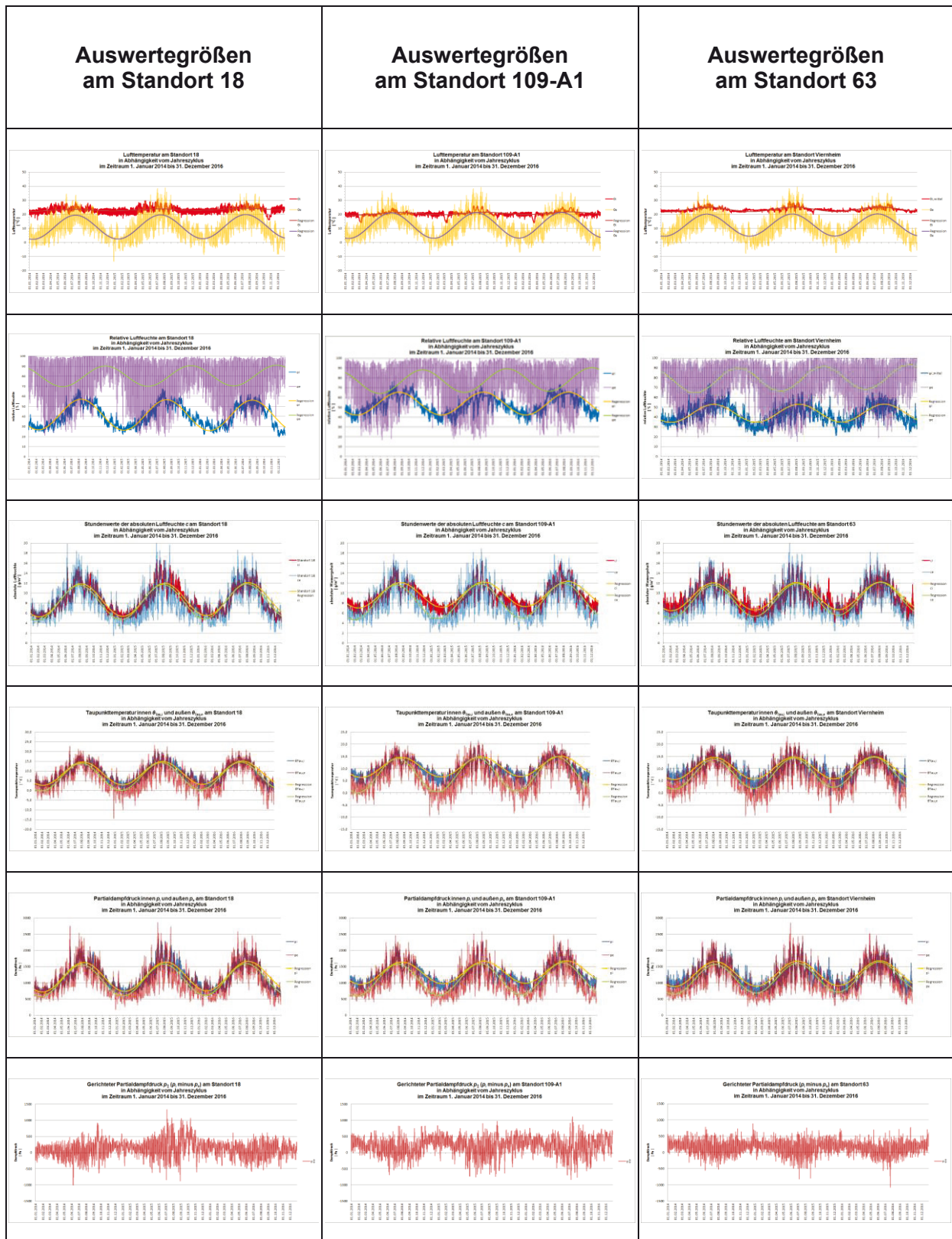
tuts Darmstadt und verfügt über eine Anlage zur mechanischen Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung.

Da für das Gebäude am Standort 63 erst seit dem Jahr 2013 Daten aus Messungen vorliegen, beziehen sich die Vergleiche der drei Gebäudetypen auf den Zeitraum vom 1. Januar 2014 bis zum 31. Dezember 2016.

3.2 Vergleich der Gebäude

Tabelle 3 zeigt eine Gegenüberstellung der Auswertegrößen an den drei Standorten 18, 109-A1 und 63. Im Anschluss erfolgt eine Zusammenstellung der Unterschiede in Bezug auf die Temperatur θ , und die absolute Feuchte c und die relative Feuchte ϕ der Raum- sowie der Außenluft und eine Analyse der Auswirkung aus den eingesetzten bau- und gebäudetechnischen Ausführungen auf die genannten Auswertegrößen. Obwohl in Abschnitt 2.5 darauf hingewiesen wird, dass eine Analyse der Feuchte sinnvollerweise auf der Basis der absoluten Luftfeuchte c erfolgen sollte, wird im Weiteren auch die relative Luftfeuchte ϕ in die Betrachtungen einbezogen, da im Bauwesen vielfach auf diese Größe Bezug genommen wird.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Auswertegrößen an den Standorten 18, 109-A1 und 63



Um die Ergebnisse aus der Analyse besser verdeutlichen zu können, werden ergänzend zu Tabelle 3 die zeitlichen Verläufe der Auswertegrößen Temperatur θ , absolu-

te Luftfeuchte c und relative Luftfeuchte ϕ in den Bildern 17 bis 25 noch einmal dargestellt.

3.2.1 Gebäude am Standort 18

3.2.1.1 Raumlufttemperatur θ_i

Betrachtet man die Temperaturverteilung θ am Standort 18 dann ist in Bild 17 zu erkennen, dass sich ab bzw. bis zu dem Zeitpunkt an dem die Außenlufttemperatur die Marke $\theta_e \approx 20 \text{ °C}$ unter- bzw. überschreitet eine gleichmäßige, von den Außenverhältnissen unabhängige Raumtemperatur einstellt; d. h. ab diesem Punkt beginnt bzw. endet die Heizperiode. Die Spreizung der Raumlufthtemperatur (der Unterschied zwischen minimaler und maximaler Temperatur unter normalen Verhältnissen) liegt bei $\Delta\theta_i \approx 4 - 5 \text{ K}$. Außerdem zeigt sich, dass in der sommerlich heißen Periode die Raumlufthtemperatur θ_i den Amplituden der Außenluft θ_e folgt und dabei im betrachteten Zeitraum vom 1. Januar 2014 bis 31. Dezember 2016 auf einen Wert von mehr als $\theta_i = 30 \text{ °C}$ ansteigt. Dies kann u. a. auf die hohe unkontrollierte Luftwechselrate zurückzuführen sein, durch die vermehrten nutzerspezifischen Lüftungsaktivitäten während der sommerlich heißen Phase ist eine solche Aussage jedoch nicht eindeutig zu belegen.

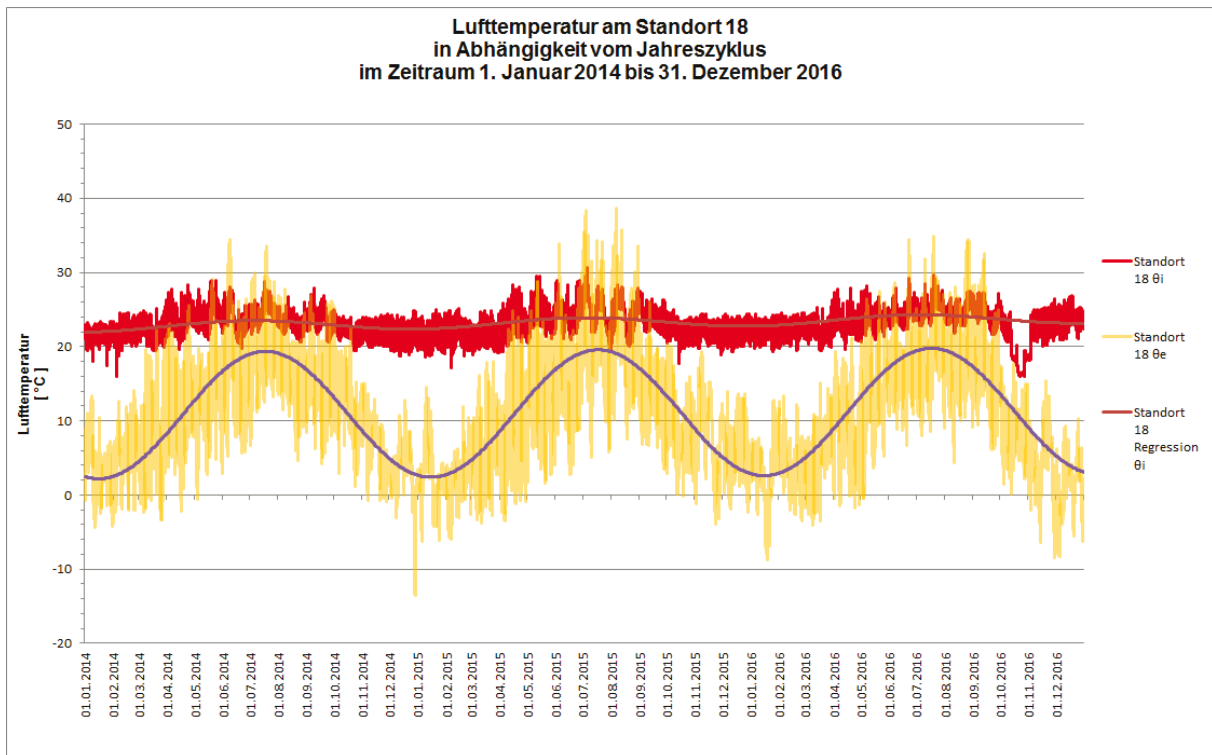


Bild 17: Lufttemperatur θ am Standort 18

3.2.1.2 Absolute Luftfeuchte c_i

Bild 18 ist zu entnehmen, dass die stündlichen Werte der absoluten Feuchte der Raumluft c_i und die korrespondierenden Außenwerte c_e nahezu deckungsgleich sind. Dies spiegelt sich auch in der Kongruenz der Regressionskurven wider. Der Grund hierfür liegt in der Luftdurchlässigkeit der Außenbauteile, insbesondere der Fenster; d. h. nimmt die absolute Luftfeuchte in der Außenluft c_e zu, dann steigt, aufgrund der hohen Luftwechselrate, auch der Wert der Innenluft c_i und umgekehrt. Aus Sicht des hygienischen Wärmeschutzes liegt somit für ein thermisch träges, d. h. schweres Gebäude in der kritischen Phase im Januar bis Februar eine niedrige Feuchtelast vor. Das Schimmelpilzrisiko wäre daher – bei einer Vernachlässigung der Bauteil Oberflächentemperaturen θ_{si} – eher gering, während die hohe Luftwechselrate auf einen erhöhten Heizwärmebedarf schließen lässt.

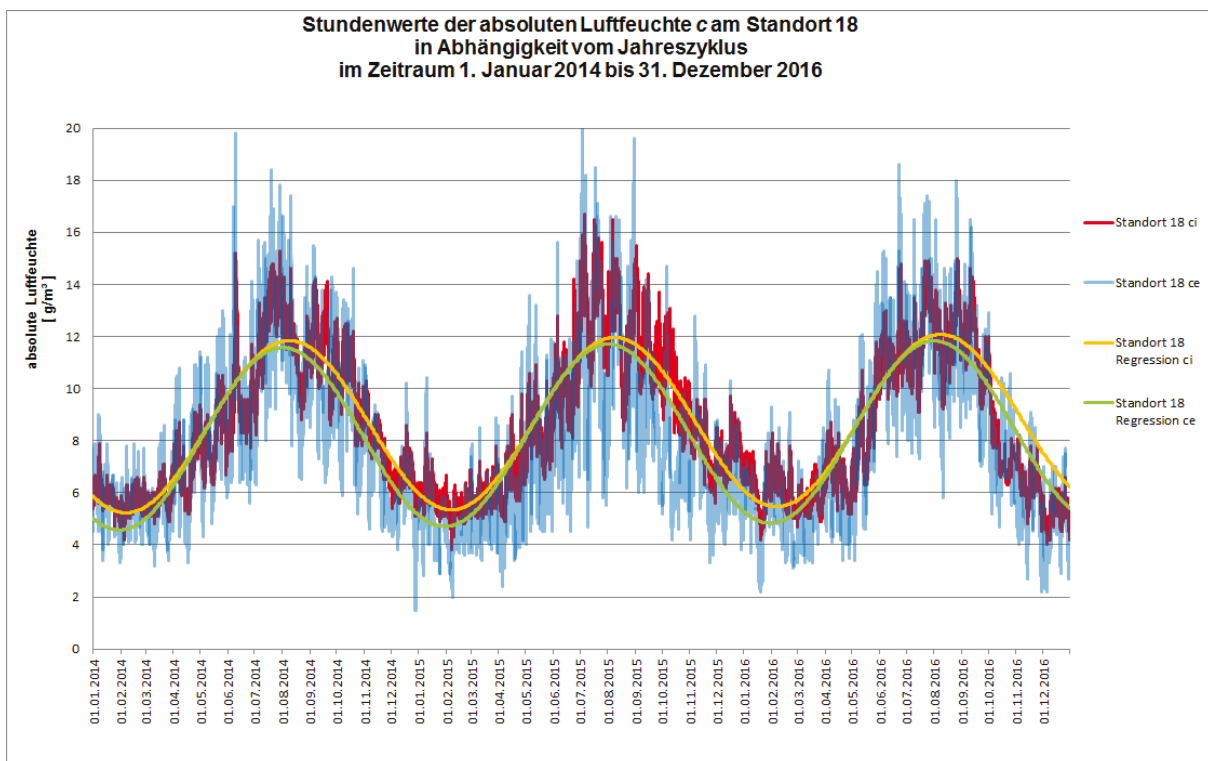


Bild 18: Absolute Luftfeuchte c am Standort 18

3.2.1.3 Relative Luftfeuchte ϕ_i

Die Messwerte der relativen Luftfeuchte im Raum ϕ_i sinken während der Periode mit niedrigen Außenlufttemperaturen θ_e auf Werte um $\phi_i \approx 22\%$, ein Effekt, der ebenfalls auf die hohe unkontrollierte Luftwechselrate zurückzuführen ist (Bild 19). Im Gegen-

satz hierzu befindet sich bei der Regressionskurve der untere Kurvendurchgang bei einem Werte von ca. $\phi_i = 35\%$. Die Abweichung zwischen Mess- und Regressionskurve ist auf die Mittelwertbildung bei der zweiten Kurve zurückzuführen. Den Ansatz eines verminderten Schimmelpilzrisikos bei hoher Luftwechselrat durch eine undichte Gebäudehülle kann man auch aus dem Verlauf der Taupunkttemperatur in Tabelle 3 und der relativen Feuchte im Raum in Bild 19 ablesen. Zwar liegt der kritische Wert der relativen Luftfeuchte auf der Bauteilinnenoberfläche bei Untersuchungen zum hygienischen Wärmeschutz nach DIN 4108-3:2018-11 bzw. DIN EN ISO 13788:2013-05 bei $\phi_{si,cr} = 0,8$ und nicht bei $\phi_{si,cr} = 1,0$ wie beim Kriterium des Tauwasserausfalls, die Grenzwerte des Tauwasserausfalls in der Raumluft stiegen während der Tabelle 3 dargestellten Zeitspanne im Gebäude am Standort 18 aber auch in der Phase niedriger Außenlufttemperaturen nie über $\theta_{T_{au,i}} = 5\text{ °C}$, sondern sank im Messintervall bei einer Außenlufttemperatur von $\theta_e = -17\text{ °C}$ sogar auf $\theta_{T_{au,i}} = -1\text{ °C}$. Damit ist unter normalen Randbedingungen auch hinsichtlich des hygienischen Wärmeschutzes eine ausreichende Sicherheit in Bezug auf Grenzzustände beim hygienischen Wärmeschutz gegeben. Mit einem erhöhten Risiko der Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen ist am Standort 18 am ehesten dann zu rechnen, wenn der Wärmestrom aus dem Raum hin zur Oberfläche wärmeübertragender Bauteile behindert oder unterbunden wird.

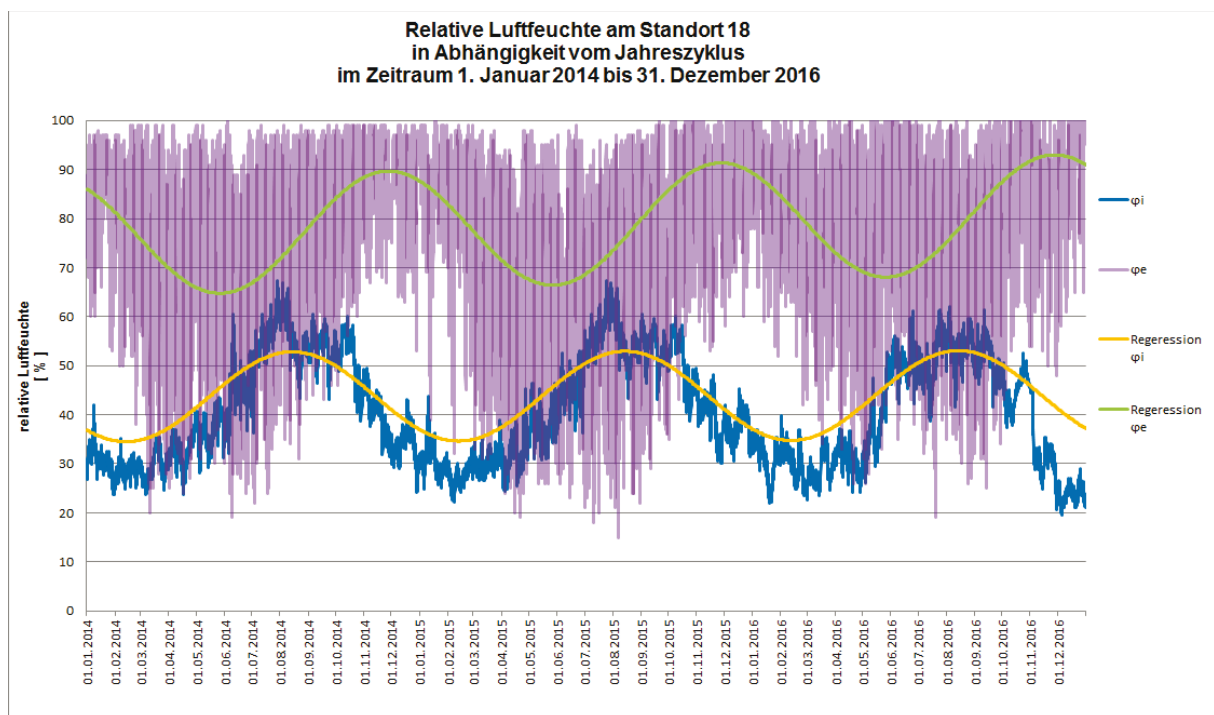


Bild 19: Relative Luftfeuchte ϕ am Standort 18

3.2.2 Gebäude am Standort 109

3.2.2.1 Raumlufttemperatur θ_i

Im Gegensatz zum Gebäude am Standort 18 weist das Gebäude am Standort 109 einen gleichmäßigeren Verlauf der Raumlufttemperatur θ_i auf – sowohl in Bezug auf die Schwankungen Sommer / Winter, als auch in Bezug auf die Amplituden während der kalten Jahreszeit (siehe Bild 20). Dies ist auf den höheren Dämmstandard bei den wärmeübertragenden Bauteilen und die größere Luftdichtheit der Gebäudehülle zurückzuführen. Außerdem liegt die Spreizung der Raumlufttemperaturen während der Heizperiode bei $\Delta\theta_i \approx 2 - 3$ K. Durch den höheren Dämmstandard des Gebäudes am Standort 109 weisen die wärmeübertragenden Bauteile im Gegensatz zum Gebäude am Standort 18 geringere Wärmeverluste auf, woraus einerseits höhere Temperaturen der Bauteilinnenoberflächen resultieren und damit eine geringere Heizleistung zur Wiederherstellung der gewünschten Raumlufttemperatur erforderlich ist und andererseits von den speicherfähigen Bauteilen mehr Wärme an den Raum zurückgegeben werden kann, sodass keine höheren Temperaturen aus dem Heizsystem erforderlich sind. Als positiv kann daher beim Gebäude am Standort 109 ein verminderter Heizwärmebedarf durch geringe Transmissions- und Lüftungswärmeverluste angesehen werden.

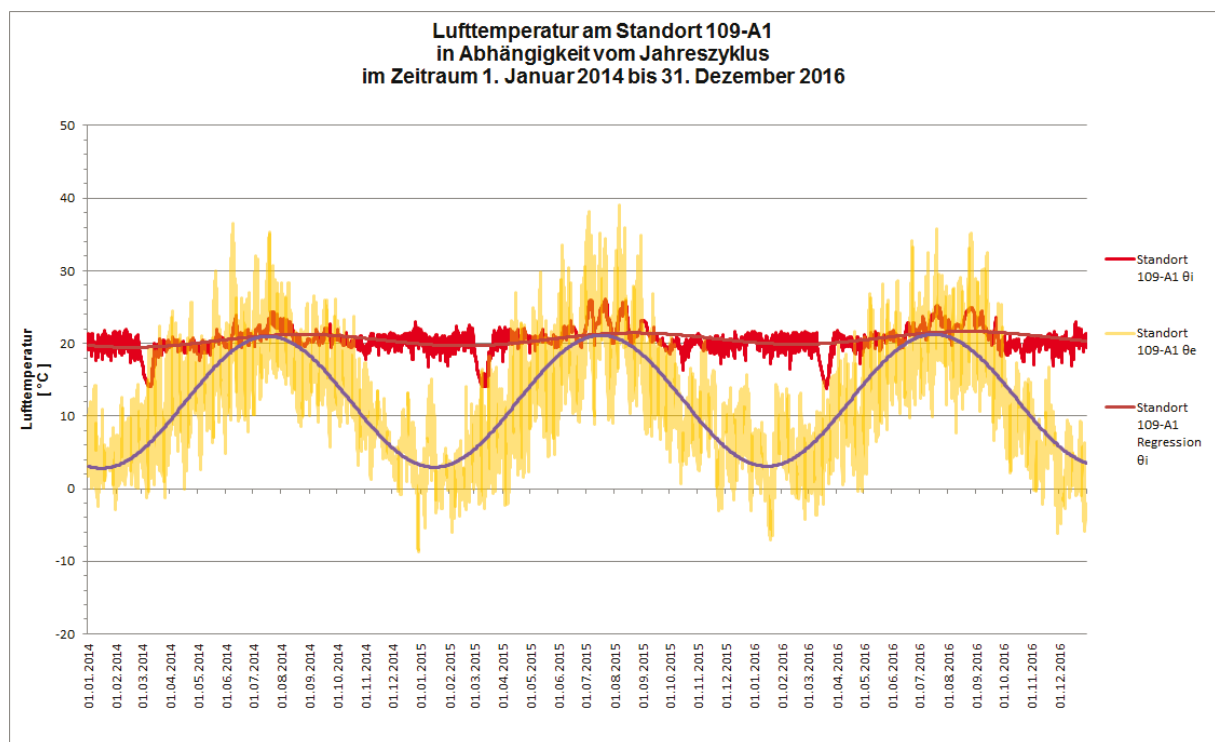


Bild 20: Lufttemperatur θ am Standort 109-A1

3.2.2.2 Absolute Luftfeuchte c_i

Die Kurvenverläufe der absoluten Luftfeuchte innen c_i zu außen c_e beim Gebäude am Standort 109, dargestellt im Bild 21, unterscheiden sich deutlich voneinander und von den Werten im Gebäude am Standort 18. Aufgrund der vergleichsweise hohen Luftdichtheit und in Ermangelung von Einrichtungen zur mechanischen Lüftung, erfolgt hier nur ein geringer Austausch der Raumluft gegen Außenluft über Undichtheiten in der Hülle, sodass die Feuchtigkeit die in das Gebäude eingetragen wird bzw. die im Gebäude entsteht, während der kalten Jahreszeit nur in geringem Maße durch trockenere Außenluft ersetzt werden kann. Darüberhinaus steigt die absolute Luftfeuchte der Raumluft c_i auch dann noch weiter an, wenn die Werte der Außenluft im Mittel bereits abnehmen. Dies ist ebenfalls auf den verminderten Luftaustausch über Undichtheiten sowie auf eingeschränkte Möglichkeiten zur Lüftung durch die Nutzer zurückzuführen. Es ist dabei zu beachten, dass weder am Aufstellungsort des Thermohygrographen noch an anderen Stellen im Gebäude am Standort 109 hohe Feuchteinträge z. B. durch Pflanzen, ein Aquarium oder ähnlichen Quellen vorliegen.

Da es sich beim Gebäude am Standort 109 um eine Konstruktion im Massivbauweise mit schweren, d. h. thermische speicherfähigen (trägen) Bauteilen handelt, liegt der kritische Zeitpunkt für eine Ausbildung von Schimmelpilzen auf Bauteilinnenoberflächen in der Regel in der Zeit von Januar bis Februar.

Zwar spiegelt die hohe Feuchtelast im Gebäude in Hinblick auf das Schimmelpilzrisiko ungünstige Verhältnisse wider, bedingt durch den guten Dämmstandard der wärmeübertragenden Bauteile und die daraus resultierenden hohen Oberflächentemperaturen ist das Risiko einer Schimmelpilzbildung jedoch gering. Selbst bei einem verminderten Wärmestrom vom Raum zu den umgebenden Bauteiloberflächen ist kaum mit einer Bildung von Schimmelpilzen zu rechnen. Dies wird auch durch die Auswertung der in Abschnitt 7.3 dargestellten Messergebnisse belegt.

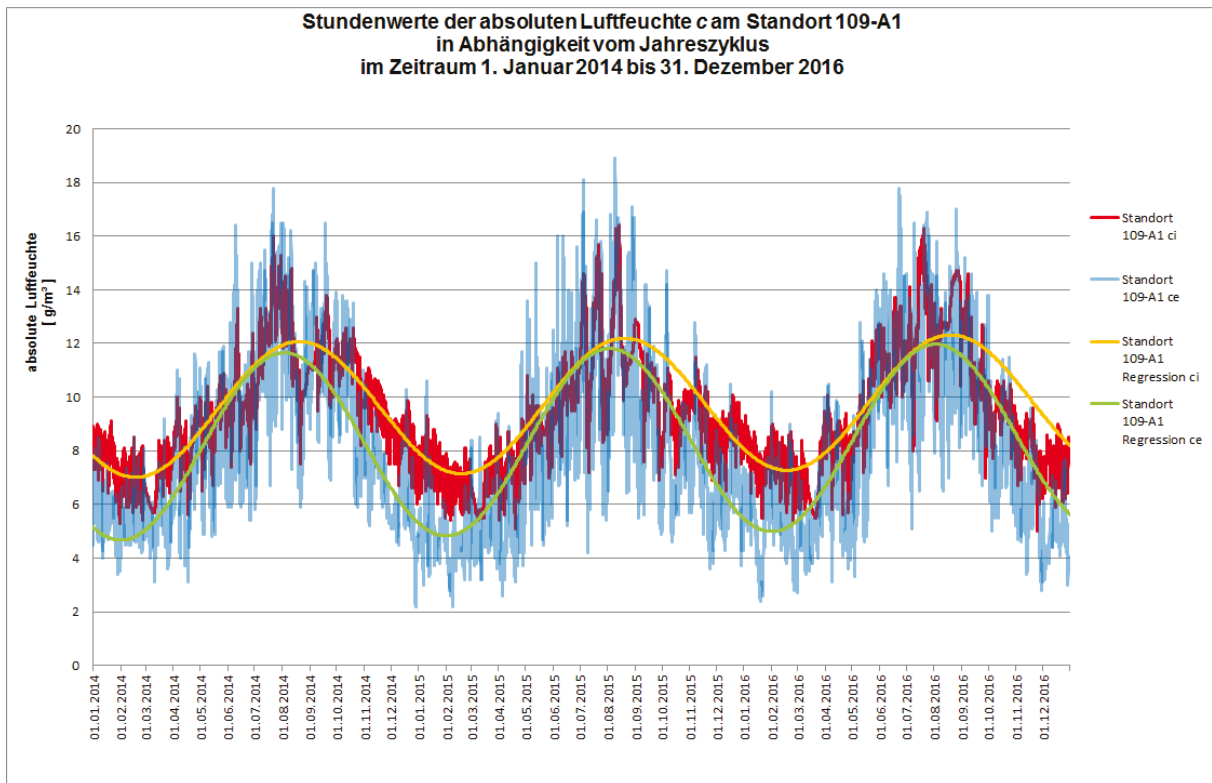


Bild 21: Absolute Luftfeuchte c am Standort 109-A1

3.2.2.3 Relative Luftfeuchte ϕ_i

Nicht nur die absolute Feuchte der Raumluft c_i , auch die relative Feuchte ϕ_i liegt am Standort 109 deutlich über den Werten am Standort 18. Während der bei einem Gebäude in Massivbauweise für das Schimmelpilzrisiko maßgeblichen Zeit, üblicherweise die Periode von Januar bis Februar, liegt die relative Innenraumfeuchte aus Regression bei $\phi_i \approx 45\%$ und damit deutlich über den Werten am Standort 18 mit $\phi_i \approx 35\%$. Der Effekt höherer relativer (und absoluter) Feuchte der Raumluft im Gebäude am Standort 109 weist aber auch einen positiven Aspekt auf: Während in den Gebäuden an den Standorten 18 und 63 die Messwerte der relativen Feuchte über Zeiträume von mehreren Wochen unter die Marke von $\phi_i = 30\%$ sinken, liegt der Wert am Standort 109 darüber. Üblicherweise werden Werte der relative Feuchten der Raumluft unter $\phi_i = 30\%$ als kritisch angesehen, da es dabei zu einer vermehrten Austrocknung der Nasen- und Mundschleimhäute bei Bewohnern und damit zu einem erhöhten Risiko von Erkrankungen kommen soll. Dieser Umstand, und der Versuch der Nutzer von Gebäuden mit mechanischer Be- und Entlüftungsanlagen der „trockenen Raumluft“ durch vermehrte Anstrengungen zur Verdunstung von Wasser entgegenzuwirken, wurde in Gesprächen mit betroffenen Personen bestätigt.

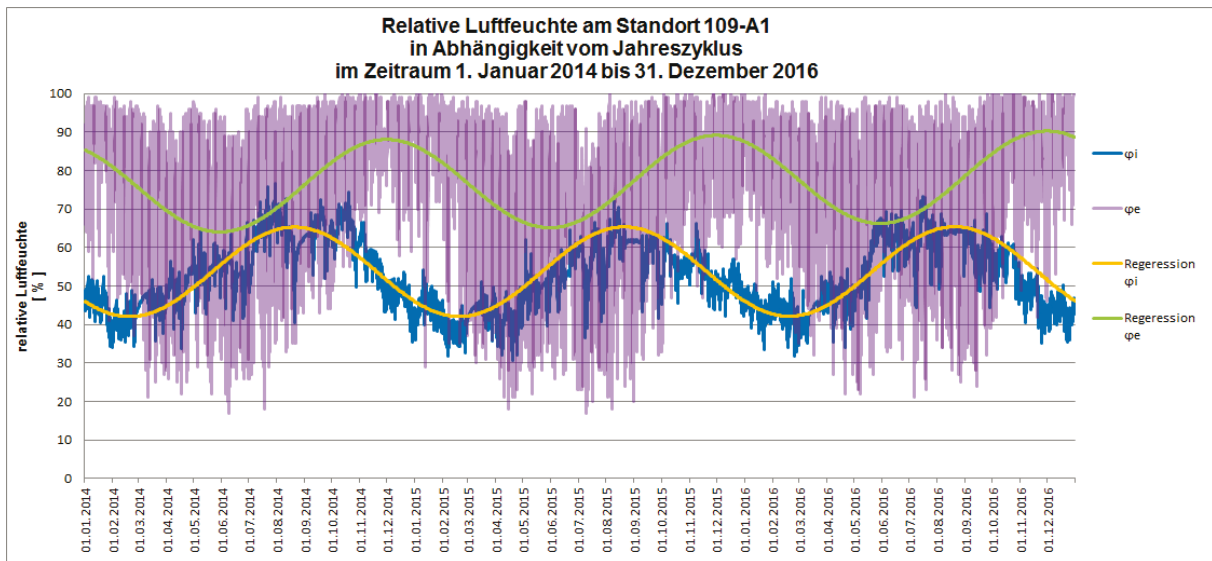


Bild 22: Relative Luftfeuchte ϕ am Standort 109-A1

3.2.3 Gebäude am Standort 63

3.2.3.1 Lufttemperatur θ_i

In Bild 23 ist deutlich zu erkennen, dass die Spreizung der Innenraumtemperaturen θ_i beim Gebäude am Standort 63 mit $\Delta\theta_i \approx 1 - 2 \text{ K}$ unter den Werten am Standort 109 liegen und wesentlich niedriger sind als die am Standort 18. Ursächlich hierfür ist neben dem hohen Dämmstandard die mechanische Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung des Gebäudes. Durch die kontinuierliche Belüftung der Räume mit vorgewärmter Außenluft wird ein starker Abfall der Innenraumtemperaturen – und damit ein Anstieg der Vorlauftemperaturen im Heizsystem – vermieden. Der Effekt gemäßigter Vorlauftemperaturen wird außerdem durch das Vorwärmen der Außenluft zur Aufrechterhaltung der gewünschten Raumlufthtemperatur ergänzt. Da die Temperatur der in den Raum eingeblasenen Frischluft wesentlich über der der Außenluft liegt, ist auch ein geringeres Maß an Wärme (-Energie) erforderlich um den Differenzbetrag auszugleichen. Auch diese beeinflusst die erforderliche Vorlauftemperatur des Heizsystems und reduziert damit die Spreizungen der Raumlufthtemperatur. Die verbleibenden Schwankungen sind im Wesentlichen auf die Wärmeeinträge durch interne Wärmequellen zurückzuführen und damit unvermeidbar. Wie bereits bei der Diskussion der Raumlufthtemperaturen am Standort 109 dargelegt, besteht auch am Standort 63 kein erhöhtes Risiko für den hygienischen Wärmeschutz wenn der Wär-

mestrom aus dem Raum hin zu den Oberflächen der wärmeübertragenden Bauteile beeinträchtigt ist.

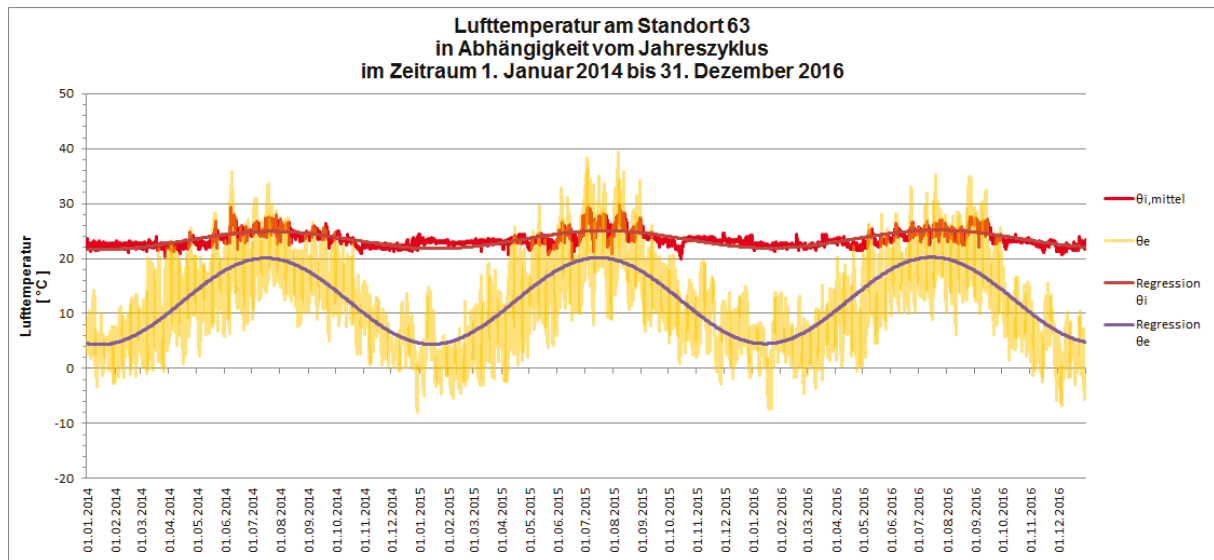


Bild 23: Lufttemperatur θ am Standort 63

3.2.3.2 Absolute Luftfeuchte c_i

Wie die Auswertung von Bild 24 zeigt, liegt auch im Fall eines Passivhauses die absolute Luftfeuchte der Raumluft deutlich über den Werten der Außenluft. Daraus folgt, dass auch durch den Einsatz von Anlagen zur mechanischen Be- und Entlüftung nicht die Innenraumkonditionen eines sehr luftdichten Gebäudes erreicht werden können. Jedoch sind die Minimalwerte der absoluten Luftfeuchte in diesem Gebäude, bedingt durch die raumluftechnische Anlage, geringer im Vergleich zu einem „energiesparenden“ Gebäude ohne Lüftungsanlage, ein Umstand der sich positiv auf den hygienischen Wärmeschutz auswirkt.

Eigentlich sollte man davon ausgehen können, dass beim Gebäude am Standort 63 durch die luftdichte Ausführung in Kombination mit einer mechanischen Anlage zur Be- und Entlüftung die positive Wirkung einer hohen Luftwechselrate analog zum Standort 18 mit dem geringen Heizwärmebedarf wie bei Gebäude 109 kombiniert wird. Bild 24 macht jedoch deutlich, dass beim Standort 63 im Vergleich zum Gebäude am Standort 109 ein niedrigerer absoluter Wasserhalt c_i zu verzeichnen ist, die Werte aber immer noch über dem Kurvenverlauf des Gebäudes am Standort 18 liegen. Dies bedeutet, dass Lüftungstechnische Anlagen in Gebäuden zwar zu einer Verminderung der Feuchtigkeit in Gebäuden beitragen, aber auch durch den Einsatz

haustechnischer Anlagen nicht die Wirkung einer starken unkontrollierten, natürlichen Lüftung erreicht wird. Die Auswertung der Daten zur absoluten Luftfeuchte für das Gebäude am Standort 63 mit mechanischer Be- und Entlüftung und Wärmerückgewinnung zeigt auch, dass – im Gegensatz zum luftdichten Gebäude ohne gebäudetechnische Lüftungsanlage am Standort 109 – die Zyklen der absoluten Feuchte der Raumluft und der Außenluft phasengleich schwingen.

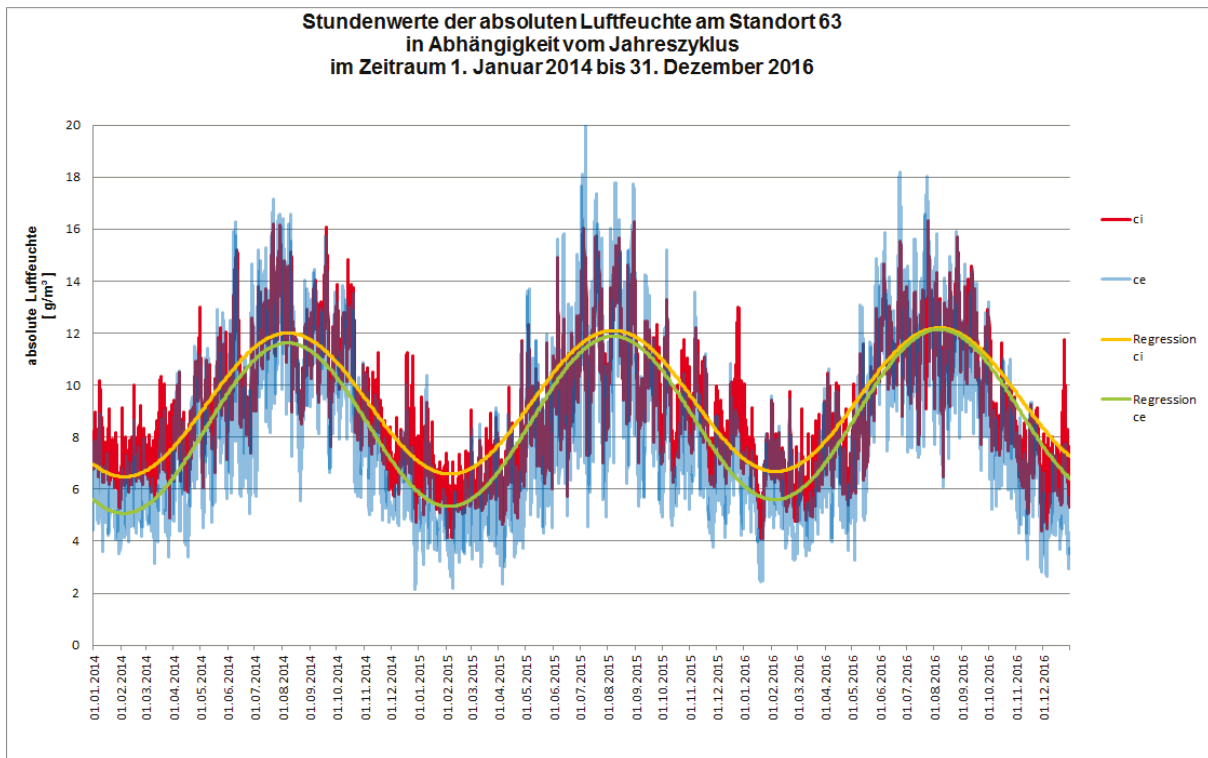


Bild 24: Absolute Luftfeuchte c am Standort 63

3.2.3.3 Relative Luftfeuchte ϕ_i

Ähnlich wie beim luftundichten Gebäude am Standort 18 durch den erhöhten Luftwechsel, zeigt auch das Gebäude am Standort 63 in Bild 25 – aufgrund der eingesetzten mechanischen Be- und Entlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung – Messwerte der relativen Luftfeuchte unter $\phi_i = 30\%$. Wie bereits im Abschnitt 3.2.2.3 dargestellt, werden solche Raumluftverhältnisse vielfach mit einem erhöhten Risiko für Atemwegserkrankungen in Verbindung gebracht. Aus den Berichten von Bewohnern solcher Gebäude geht hervor, dass einige durch den Einsatz von Geräten und Einrichtungen zur Verdunstung von Wasser versuchen die relative (und absolute) Feuchte der Raumluft zu erhöhen.

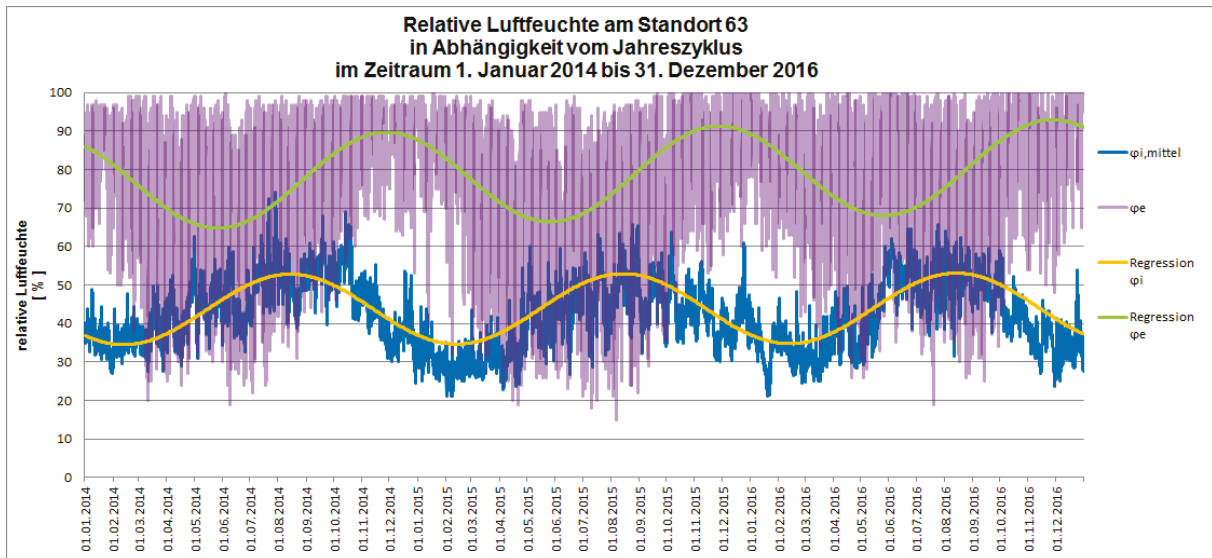


Bild 25: Relative Luftfeuchte ϕ am Standort 63

3.2.4 Vergleich der Temperatur und absoluten Luftfeuchte im Raum

Zur Verdeutlichung der Ausführungen in Abschnitt 3.2.3 soll mit den Bildern 26 und 27 ein direkter Vergleich von Regressions- und Messkurven der Temperatur und absoluten Feuchte für die drei exemplarischen Gebäude an den Standorten 18, 109 und 63 ermöglicht werden.

Bild 26 zeigt, dass die Regressionskurven der Außenlufttemperaturen θ_e an den drei untersuchten Standorten nur unwesentlich von einander abweichen. Es wurden daher auch nur die Messwerte der Außenlufttemperatur am Standort 63 dargestellt. Die Höhe der Innenraumtemperaturen θ_i unterliegt den nutzerspezifischen Anforderungen. Jedoch wird deutlich, dass die Spreizungen $\Delta\theta_i$ in den Gebäuden aufgrund der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Effekte sehr unterschiedlich ist. Hier zeigt sich der Einfluss der unkontrollierten Infiltration beim Gebäude am Standort 18 gegenüber dem Effekt einer luftdichten Gebäudehülle bei den Standorten 109-A1 und 63. Die Analysen beziehen sich dabei im Wesentlichen auf die Heizperiode während der davon ausgegangen werden kann, dass nur die notwendigen Luftwechsel durchgeführt werden. Aussagen während der Zeit außerhalb der Heizperiode sind nicht möglich, da hier einmal mehr das individuelle Verhalten und Empfinden der Nutzer maßgeblich ist. Dies wird beispielsweise beim Vergleich der Messwerte für die Raumlufttemperatur θ_i während der Sommerperiode von den Gebäuden am Standort 18 und 63 deutlich. In beiden Fällen steigen die Raumlufttemperaturen nutzerbedingt deutlich an.

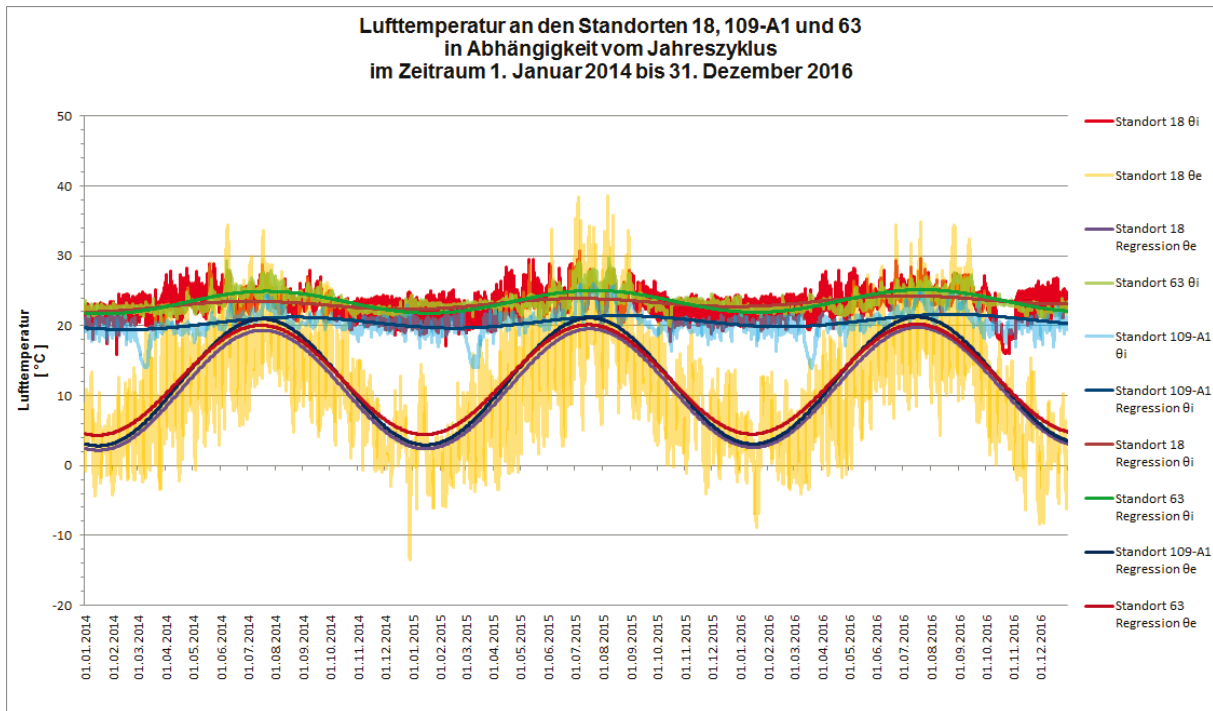


Bild 27: Vergleich der Temperatur der Raum- und Außenluft θ_i und θ_e

Bild 26 zeigt mit dem Vergleich der Regressionskurven für die absolute Feuchte der Raumluft c_i noch einmal die Konsequenzen vermehrter bzw. eingeschränkter Lüftung. Aufgrund der hohen Luftwechselrate, hervorgerufen durch die große Infiltration von Außenluft, sinkt die absolute Feuchte c_i im Gebäude am Standort 18 während der „kalten“ Jahreszeit deutlich ab. Ein ähnliches, wenn auch nicht gar so ausgeprägtes Ergebnis, zeigt das Gebäude am Standort 63 mit seiner gebäudetechnischen Anlage zur Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung. In beiden Fällen schwingen die Regressionskurven phasengleich zueinander und zur absoluten Feuchte der Außenluft c_e . Demgegenüber liegt der Wert der absoluten Feuchte der Raumluft c_i am Standort 109 über dem der beiden anderen Gebäude und ist außerdem noch phasenverschoben. Beide Effekte, sowohl die erhöhte absolute Feuchte im Raum als auch die Phasenverschiebung sind auf die eingeschränkten Möglichkeiten zur Lüftung der Nutzer am Standort 109 zurückzuführen. Zwar fällt nutzerbedingt nur wenig Feuchte am Standort 109 an, aber trotzdem kommt es durch den geringen Luftaustausch zu einer erhöhten Luftfeuchte im Gebäude. Bedingt durch den guten Wärmeschutz der Umfassungsbauteile und die damit verbundenen hohen Oberflächentemperaturen, kann jedoch ein Risiko hinsichtlich des hygienischen Wärmeschutzes ausgeschlossen werden.

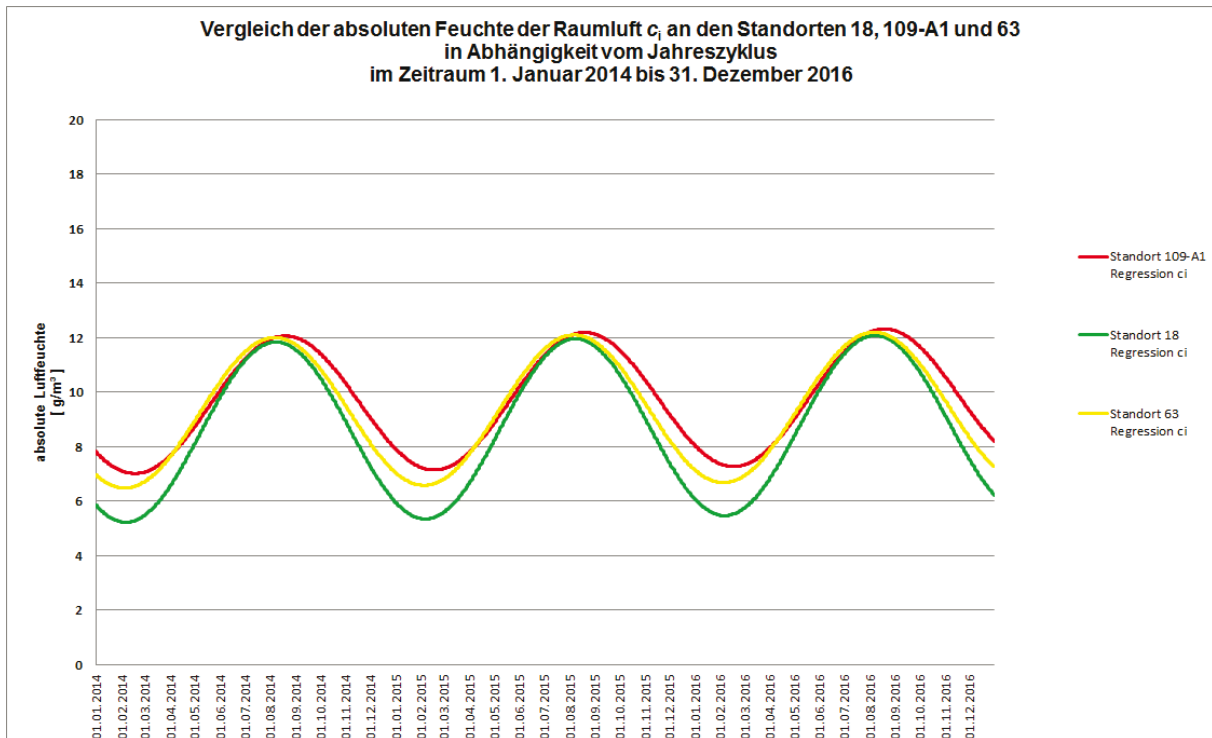


Bild 27: Vergleich der absoluten Feuchte der Raumluft c_i

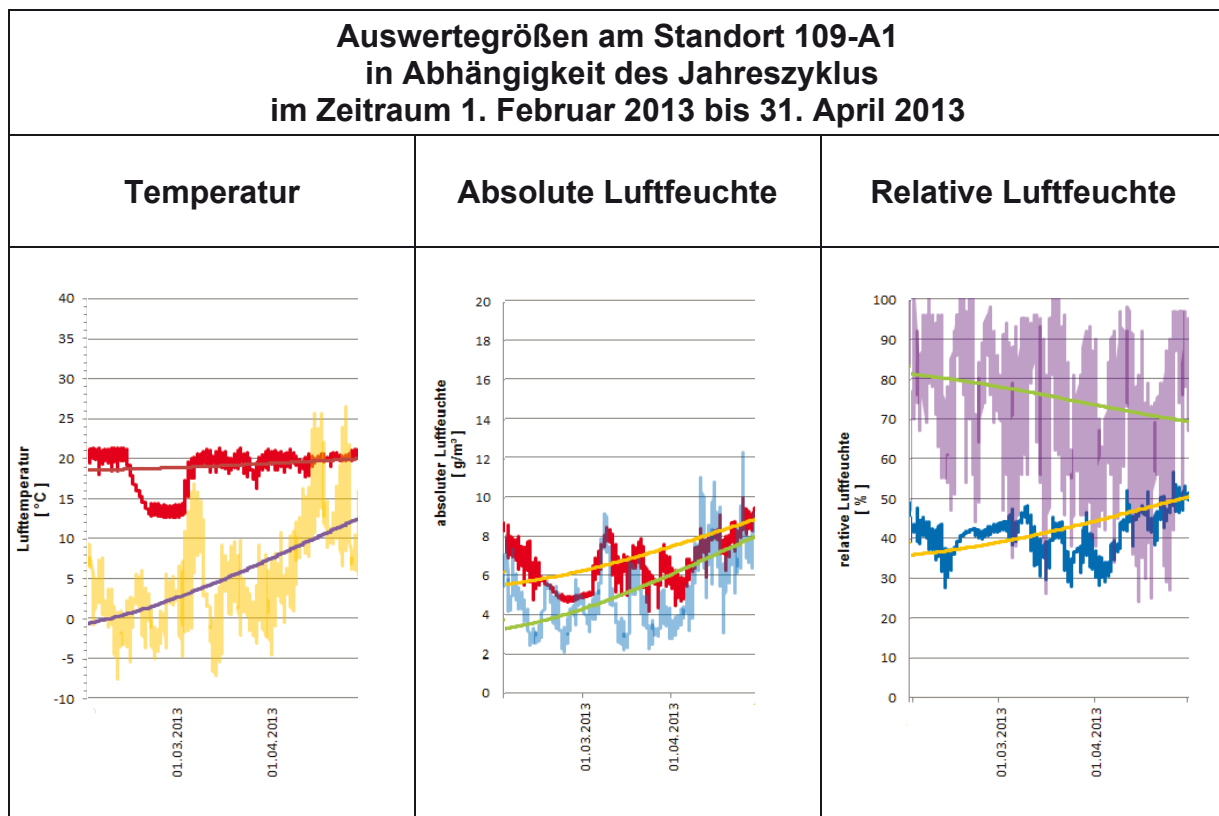
3.3 Einfluss erhöhter Luftdichtheit auf die Raumluft

Die drei Gebäude die im Abschnitt 3.2 vorgestellt wurden unterscheiden sich in einem wesentlichen Punkt: Dem Mechanismus der Zufuhr von Außenluft. Während beim Gebäude am Standort 18 eine hohe Infiltration von Außenluft durch Luftundichtheiten in der Gebäudehülle erreicht wird, wird dieser Mechanismus beim Gebäude am Standort 109 durch eine luftdichte Ausführung der Außenbauteile unterbunden. Beim Gebäude am Standort 63, welches ebenfalls luftdicht ausgeführt wurde, erfolgt die Be- und Entlüftung über eine gebäudetechnische Anlage mit Wärmerückgewinnung. Bisher nicht dokumentiert wurde, ob die Veränderungen bei der absoluten und relativen Feuchte der Raumluft tatsächlich auf Lüftungsgewohnheiten der Nutzer bzw. Einrichtungen zur Be- und Entlüftung zurückzuführen sind und ob sich die Auswirkungen erhöhter Luftdichtheit in den Protokollen der Messdaten belegen lassen. Zu diesem Zweck wurde in Tabelle 4 ein Ausschnitt aus dem Messprotokoll und der Regressionskurven für die Auswertegrößen Temperatur θ , absolute Feuchte c und relative Feuchte ϕ im Zeitraum 1. Februar bis 31. April 2013 am Standort 109-A1 dargestellt. Während dieser Zeitspanne war der Standort nicht bewohnt, d. h. Fenster, Türen und Rollläden waren geschlossen sodass ein Luftaustausch nur über Infiltrationen in der Gebäudehülle erfolgen konnte. Außerdem war für

die Heizungsanlage der Grenzwert im zugehörigen Referenzraum auf $\theta_i = 14 \text{ °C}$ eingestellt.

Die Auswertegrößen in Tabelle 4 zeigen einvernehmlich, dass vor und nach der Abwesenheit der Nutzer die Messwerte der Raumluft analog zu der Außenluft verlaufen. Außerdem lassen die Schwankungen in den Kurven der Raumluft den Einfluss auf die Auswertegrößen durch nutzerinduziertes Lüften erkennen. Anders dagegen die Verläufe der Messkurven während der Abwesenheit der Nutzer: Die Raumlufttemperatur fällt aufgrund der Außenlufttemperaturen linear bis zum Erreichen der Grenztemperatur von $\theta_i = 14 \text{ °C}$ ab um dann mit geringen Abweichungen um diesen Wert zu schwanken. Auch die absolute Feuchte der Raumluft geht zunächst zurück, ein Effekt der vermutlich auf einen Ausgleich der Raumluftfeuchte mit Innenoberflächen und Einrichtungen im betrachteten Bereich durch Sorption zurückzuführen ist. Aufgrund des Verhaltens von Temperatur und absoluter Feuchte im Raum zeigt die Messkurve der relativen Feuchte einen leichten Anstieg. Deutlich zu erkennen ist aber bei allen drei Auswertegrößen, dass die Verläufe der Messkurven – abgesehen vom Einfluss des Heizsystems – linear sind und kein Einfluss der Außenverhältnisse erkennbar ist. Dies bedeutet, dass bei Gebäuden mit hoher Luftdichtheit nutzerbedingte Feuchteinträge nur durch aktives Lüften beseitigt werden können, wodurch allerdings bei entsprechenden Witterungsverhältnissen auch das Gegenteil erreicht werden kann, d. h. dass auf diese Weise zusätzliche Feuchtigkeit in den Raum oder das Gebäude eingebracht wird. Sollte das Be- und Entlüften nur in eingeschränktem Umfang möglich sein oder praktiziert werden, dann ist einerseits mit einer ansteigenden Feuchte im Raum oder Gebäude und mit einer zeitverzögerten Abfuhr der Feuchte zu rechnen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken ist bei der Planung eines Gebäudes zu überlegen, ob eine gebäudetechnische Anlage vorgesehen oder die Luftdichtheit der Hülle soweit vermindert wird, bis eine ausreichende Luftwechselrate erreicht ist. Bei beiden Überlegungen ist jedoch auch dem Aspekt einer ausreichend hohen Luftfeuchte während der „kalten“ Jahreszeit Rechnung zu tragen; d. h. es ist zu überlegen wie hoch die Luftwechselrate durch Infiltration sein kann / darf bzw. welche Luftwechselrate bei einer gebäudetechnischen Anlage einzustellen ist, um Gesundheitsrisiken durch zu trockene Raumluft auszuschließen.

Tabelle 4: Ausschnitt der Temperatur, absoluten und relativen Feuchte am Standort 109-A1



4 Systematisierung von Gebäuden in Abhängigkeit des Baualters

Wie die Auswertung der Daten an den exemplarisch ausgewählten Standorte 18, 109 und 63 in Abschnitt 3 zeigt, weisen Gebäude unterschiedlichen Baualters und unterschiedlicher gebäudetechnischer Ausstattung deutliche Abweichungen bei Temperatur und Feuchte der Raumluft auf. Aus dieser Erkenntnis heraus soll im vorliegenden Abschnitt der Frage nachgegangen werden, ob es möglich ist aus dem Gebäudealter und / oder der Ausstattung mit gebäudetechnischen Anlagen und Einrichtungen Cluster repräsentativer Angaben für die Auswertegrößen zu generieren. Zur Eingruppierung gemäß des Baualters wird dabei auf die Systematik in Abschnitt 2.2 zurückgegriffen. Ergänzende Informationen zu den Gebäuden an den verschiedenen Standorten und eine Einteilung der Standorte entsprechend der Baualtersklasse können Anhang B Tabelle B.1 entnommen werden. In diesem Kontext haben die Untersuchungen bezüglich einer Systematisierung von Gebäuden gemäß der Baualtersklasse und der gebäudetechnischen Ausstattung einen qualitativen, aber keinen quantitativen Charakter, d. h. es wird die Möglichkeit einer Clusterbildung untersucht, ohne zahlenmäßige Unterschiede aufzuzeigen. Um Unterschiede oder Gemeinsamkeiten zu verdeutlichen, wurden in Tabelle 5 die Regressionskurven der

Gebäude an den ausgewerteten 33 Standorten für die Temperatur und die absolute Feuchte der Raumluft in den 5 Baualtersklassen (BAkl.) zusammengestellt.

Pauschale Bewertungen dieser Ergebnisse sind mit Unsicherheiten behaftet, da die Darstellungen für eine abgesicherte statistische Analyse zu wenige Elemente enthalten. So umfasst beispielsweise die Baualtersklasse 2 nur drei Gebäude wodurch nicht gewährleistet ist, dass die Kurvenverläufe nicht auf zufälligen Konfigurationen beruhen.

Bezüglich der Raulufttemperatur θ_i am Standort 37 in der Baualtersklasse 1 ist zu beachten, dass der untersuchte Raum durch einen Kohle-Holz-Kaminofen beheizt wird. Damit liegt während der „kalten Jahreszeit“ keine kontinuierliche sondern eine intermittierende Beheizung vor, sodass es durch die Aufheiz- und Abkühlphasen zu großen Temperaturschwankungen im Raum kommt. Da Heizungen dieser Art als Primärversorgung nicht mehr oft vorkommen, wurde dieser Kurvenverlauf nicht in die weiteren Analysen einbezogen. Auch die Raumlufttemperatur θ_i am Standort 15 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie am Standort 37. Es liegen zwar keine Erläuterungen über die Heizungsausstattung in diesem Raum / Gebäude vor, jedoch legt die Gleichartigkeit der beiden Temperaturverläufe die Vermutung nahe, dass es sich auch für an diesem Standort um eine Einzelofenheizung handelt. Der Standort 15 blieb daher bei den weiteren Erörterungen ebenfalls unberücksichtigt.

Eine einheitliche Zuordnung von Gebäude zu einer bestimmten Baualtersklasse ist für die Raumlufttemperatur θ_i auf der Basis der Regressionskurven nicht möglich. Neben den Bauweisen die für die Clusterbildung herangezogen wurden, spielen auch haustechnische Anlagen und Einrichtungen sowie nutzerspezifische Gewohnheiten eine wesentliche Rolle. Die verschiedenen für die untersuchten Gebäude vorliegenden Informationen sind hierbei nicht umfangreich genug. Die durch die Nutzer als behaglich eingestufte Raumtemperatur definiert sowohl deren Mittelwert als auch die Amplituden, während die Art der Heizungsanlagen den Kurvenverlauf beeinflusst. Beispielsweise verfügt das Gebäude am Standort 12 in der Baualtersklasse 4 (Tabelle 6, Spalte 1, BAkl. 4) über eine Fußbodenheizung und die daraus resultierenden, im Vergleich zu einer Radiatorenheizung, großen Heizflächen führen dazu, dass die Vorlauftemperatur des Heizsystems niedrig ist, was wiederum zu einem sehr flachen Kurvenverlauf der Raumlufttemperatur führt.

Auch in Hinblick auf die absolute Feuchte der Raumluft c_i kann aus den Verläufen der Regressionskurven keine eindeutige Zuordnung zu einer Baualtersklasse abge-

leitet werden. Ähnlich wie beim Versuch einheitliche Raumtemperatur aus der Clusterbildung die Baualtersklasse generieren, sind auch bei der absoluten Feuchte c_i neben der Baualtersklasse die Nutzereinflüsse und die Ausstattung mit gebäudetechnischen Anlagen und Einrichtungen wesentlich. Für diese Aspekte liegen hinsichtlich der absoluten Feuchte c_i bei den untersuchten Gebäuden keine ausreichenden Informationen vor.

Die Wichtigkeit haustechnischer Anlagen und Einrichtungen auf die Entwicklung der Feuchte in Räumen wird auch beim Kurvenverlauf für das Gebäude am Standort 40 in der Baualtersklasse 5 deutlich. Nach Aussage des Besitzers wurde eine Anlage mechanischen Be- und Entlüftung eingebaut. Wie bereits beim Gebäude am Standort 63, welches in Abschnitt 3 ausführlich analysiert wurde, folgt c_i auch beim Gebäude am Standort 40 dem Zyklus der Außenlufttemperatur und weist während der „kalten Jahreszeit“ vergleichsweise niedrige Werte der absoluten Feuchte in der Raumluft auf. Für das Gebäude am Standort 22 liegen keine diesbezüglichen Angaben vor, jedoch liegt auch in diesem Fall die Vermutung nahe, dass Einrichtungen zur Be- und Entlüftung vorhanden sind. Es muss sich dabei nicht automatisch um eine gebäudetechnische Anlage handeln, auch Nachströmeinrichtungen bei einer feststoffbefeuerten Heizeinrichtung und die daraus resultierende erhöhte Belüftung des Raumes können solche Effekte hervorrufen.

Wie der Versuch einer Zuordnung von Gebäuden einer Baualtersklasse in ein Cluster der Temperatur und absoluten Feuchte der Raumluft zeigt, sind es nicht nur Bautechniken die die Verläufe beeinflussen. Ebenso wichtig sind auch die Nutzergewohnheiten sowie Anlagen und Einrichtungen zur Heizung und Lüftung.

Tabelle 5: Verteilung der Temperatur θ absoluten Feuchte c nach Baualtersklassen (BAKl.)

	Spalte	
	1	2
BAKl.	Regressionskurven der Raumlufttemperatur θ_i	Regressionskurven der absoluten Raumluftfeuchte c_i
1	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der Raumlufttemperatur θ für Gebäude der Baualtersklasse 1 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der absoluten Feuchte der Raumluft c für Gebäude der Baualtersklasse 1 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>
2	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der Raumlufttemperatur θ für Gebäude der Baualtersklasse 2 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der absoluten Feuchte der Raumluft c für Gebäude der Baualtersklasse 2 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>
3	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der Raumlufttemperatur θ für Gebäude der Baualtersklasse 3 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der absoluten Feuchte der Raumluft c für Gebäude der Baualtersklasse 3 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>
4	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der Raumlufttemperatur θ für Gebäude der Baualtersklasse 4 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der absoluten Feuchte der Raumluft c für Gebäude der Baualtersklasse 4 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>
5	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der Raumlufttemperatur θ für Gebäude der Baualtersklasse 5 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>	<p>Regressionskurven aus stündlichen Werten der absoluten Feuchte der Raumluft c für Gebäude der Baualtersklasse 5 in Abhängigkeit vom Jahreszyklus im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015</p>

Nachdem in Tabelle 5 auf die Verläufe der Regressionskurven abgehoben wurde, diese aber nur Mittelwerte der Auswertegrößen darstellen, sollen zur Verdeutlichung der Effekt aus realen Verhältnisse in den Gebäuden und deren Auswirkungen auch Beispiele aus Messwerte dargestellt werden. Hierzu wurden in der Baualtersklasse 4 die Gebäude an den Standorten 12, 23 und 26 sowie in der Baualtersklasse 5 die Gebäude an den Standorten 25 und 40 ausgewählt. Das Gebäude am Standort 12 wurde im Jahr 1994, das Gebäude am Standort 23 im Jahr 1991, das Gebäude am Standort 26 im Jahr 1995, das Gebäude am Standort 25 im Jahr 2010 und das Gebäude am Standort 40 im Jahr 2002 errichte. Die Fertigstellung der Gebäude lag damit in den beiden Baualtersklassen in einem engen Zeitrahmen.

Tabelle 6: Verteilung der Temperatur θ und absoluten Feuchte c an den Standorten 12, 23 und 26 in der Baualtersklasse 4

	Spalte	
	1	2
StO.	Messwerte und Regressionskurven der Lufttemperatur θ	Messwerte und Regressionskurven der absoluten Luftfeuchte c
12		
23		
26		

Deutlich sichtbar sind die Unterschiede beim Mittelwert der Raumlufttemperatur θ_i aus Regression und die Spreizung aus Messwerten. Beim Gebäude am Standort 12 liegt der Mittelwert der Raumlufttemperatur aus Regression aus den Jahren 2011 bis 2015 bei $\bar{\theta}_i = 23,84$ °C, der Mittelwert der Maxima aus den Messwerten im Untersuchungszeitraum bei $\bar{\bar{\theta}}_i = 28,39$ °C und der Mittelwert der Minima aus den Messwerten während der betrachteten Periode bei $\bar{\check{\theta}}_i = 20,92$ °C. Der Standort 23 zeigt Werte von $\bar{\theta}_i = 22,52$ °C, $\bar{\bar{\theta}}_i = 28,53$ °C und $\bar{\check{\theta}}_i = 16,67$ °C, während die Angaben am Standort 26 bei $\bar{\theta}_i = 20,94$ °C, $\bar{\bar{\theta}}_i = 26,91$ °C und $\bar{\check{\theta}}_i = 14,89$ °C liegen. Daraus resultiert am Standort 12 eine Spreizung von $\Delta\theta_i = 7,47$ K, am Standort 23 von $\Delta\theta_i = 11,86$ K und am Standort 26 von $\Delta\theta_i = 12,02$ K, d. h. nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ weisen die Standort 23 und 26 bei der Betrachtung der Raumlufttemperatur θ_i Ähnlichkeiten auf. Anders dagegen bei einer Analyse der absoluten Feuchte c . Für diese Auswertegröße zeigen die Kurvenverläufe aus Regression an den Standorten 12 und 23 Übereinstimmungen. An beiden Positionen zeigen die Kurven der Feuchte im Raum c_i und der Außenluft c_e einen ähnlichen Verlauf. Anders dagegen die Regressionskurven für das Gebäude am Standort 26. Die große Spreizung zwischen c_i und c_e weist auf eine hohe Feuchtelast im Gebäudeinneren hin.

Die großen Abweichungen innerhalb einer Baualtersklasse werden auch aus den Darstellungen in Tabelle 7 sichtbar. Hier werden, wie bereits in Tabelle 6, die Temperatur θ und absolute Luftfeuchte c an zwei Standorten innerhalb der Baualtersklasse 5 dargestellt. Während das Gebäude am Standort 25 im Jahr 2010 fertiggestellt wurde, stammt das Gebäude am Standort 40 aus dem Jahr 2002. Auch hier könnte man aus der Baualtersklasse heraus auf ähnliche Verläufe der Regressionskurven und der Messwerte schließen. Während jedoch das Gebäude am Standort 25 vergleichsweise geringe Spreizungen bei der Raumlufttemperatur θ_i erkennen lässt, liegen an diesem Standort große Unterschiede zwischen der absoluten Feuchte im Raum und in der Außenluft vor. Dies bedeutet, dass entweder im Raum viel Wasser anfällt oder nur eine stark eingeschränkte Abfuhr der Raumluftfeuchte möglich ist. Im Gegensatz dazu weist der Standort 40 eine relative große Spreizung der Raumlufttemperatur auf, die auf ein entsprechendes Nutzerprofil schließen lässt. Bedingt durch die vorhandene Anlage zur mechanischen Be- und Entlüftung zeigen die Kurvenverläufe aus Regression für die absolute Feuchte eine große Kongruenz auf.

Tabelle 7: Verteilung der Temperatur θ und absoluten Feuchte c an den Standorten 25 und 40 in der Baualtersklasse 5

	Spalte	
	1	2
StO.	Messwerte und Regressionskurven der Lufttemperatur θ	Messwerte und Regressionskurven der absoluten Luftfeuchte c
25		
40		

Wie die Beispiele in den Tabelle 6 und 7 zeigen, kann alleine aus dem Baualter, d. h. aus der Güte des baulichen Wärmeschutzes, keine allgemeingültige Clusterbildung mit repräsentativen Verläufen der Auswertegrößen für Regressionskurven oder Messwerten abgeleitet werden.

5 Grundlagen zur Verallgemeinerung von Zeitreihen

Während in Abschnitt 3 aufgezeigt wurde, dass es durch die veränderten Bauweisen die auf die technische Weiterentwicklung im Bauwesen zurückzuführen sind zu Veränderungen der Temperaturen θ_i und der absoluten Feuchte c_i der Raumluft kommt und in Abschnitt 4 aus der Auswertung von Regressionskurven und Messwerte aus 33 Gebäuden deutlich wurde, dass aus der Zuordnung von Gebäuden zu einer Baualtersklasse nicht auf standardisierte Verhältnisse der Auswertegrößen in einem Cluster geschlossen werden kann, soll im Abschnitt 5 der Frage nachgegangen werden welche Andauer eine Zeitreihe im Minimum haben muss um allgemeinverbindliche Aussagen für die Auswertegrößen daraus ableiten zu können.

5.1 Mittelwert- oder Extremwertbetrachtungen

Vor der Entwicklung von Referenzzeiträumen, z. B. Referenzjahre, zur Bewertung von Gebäuden, Bauteilen oder technischen Einrichtungen unter zeitlich veränderlichen, d. h. instationären Einwirkungen ist zu klären, ob Mittelwerte oder Extremwerte zu betrachten sind und welches Sicherheitsniveau diesen Betrachtungen zugrunde gelegt werden soll.

Falls durch eine Analyse untersucht wird wie sich Bauteile in oder an Gebäuden, Bereiche in seinem Inneren oder technische Einrichtungen über längere Zeiträume hinweg unabhängig von einzelnen meteorologischen Ereignissen verhalten, sind Mittelwertverteilungen der Einwirkungen ausreichend. Dabei ist das Zeitfenster so zu wählen, dass es durch eine Verlängerung oder Verkürzung des Betrachtungszeitraums zu keiner signifikanten Veränderung der Parameter kommt die die Algorithmen bestimmen.

Sollen dagegen die Auswirkungen von Extremereignissen betrachtet werden, dann sind die der Analyse zugrundezulegenden Zeiträume so zu bestimmen und zu analysieren, dass, in Abhängigkeit des zu berücksichtigenden Sicherheitsniveaus, die Erfassung meteorologischer Spitzenwerte gewährleistet ist. Falls zur Untersuchung extremer Ereignisse Mittelwertverteilungen wie die Regressionskurven oder Testreferenzjahren (TRY) herangezogen werden muss man davon auszugehen, dass unter realen Verhältnissen deutlich ungünstigere Ergebnisse auftreten können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Mittelwertbildung die in den Einzeldaten enthaltenen extremen Ereignisse nivelliert werden (siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 7.1).

Auf Datensätze aus gemittelten Einwirkungen kann beispielsweise bei der Bestimmung des Energieverbrauchs von Gebäuden zurückgegriffen werden. Als Beispiel für die Anwendung extremer Einwirkungen gilt dagegen die statisch konstruktiven Bemessung von Bauteilen und Tragkonstruktionen oder die Untersuchung zu kritischen Innenraumverhältnissen oder dem Feuchteverhalten in Bauteilen oder auf Bauteiloberflächen.

Hinsichtlich des zu betrachtenden Zeitfensters wird in der Einleitung von DIN EN ISO 15927-4:2005-10 [4] folgendes ausgeführt: „Da es schwierig sein kann, diese in dem in diesem Teil von EN ISO 15927 betrachteten künstlich gebildeten Referenzjahr aufrechtzuerhalten, sollten nach Möglichkeit lange Zeiträume (mindestens zehn Jahre, wenn möglich jedoch längere Zeiträume) von stündlichen meteorologischen

Daten vorgezogen werden. Dadurch werden längere Perioden (über mehrere Monate) mit ungewöhnlich warmem oder kaltem Wetter berücksichtigt, die bei der Erstellung eines Referenzjahrs eliminiert werden.“

Wie bereits oben dargelegt, muss für die Ermittlung von Mittelwerten das Zeitfenster so groß sein, dass eine Verkürzung oder Verlängerung zu keinem signifikanten Unterschied führt. Bei der Betrachtung des zeitlichen Umfangs zur Bestimmung von extremen meteorologischen Ereignissen sind in einer weiteren Fallunterscheidung auch das Sicherheitsniveau und damit die Auswirkungen eines möglichen Schadens zu berücksichtigen: Handelt es sich bei dem zu untersuchenden Problem um eine Fragestellung analog der Musterbauordnung (MBO) [5] § 3 Absatz (1) Allgemeine Anforderungen: „Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“, entspricht dies Festlegungen zur Tragfähigkeit gemäß DIN EN 1990:2010-12 Kapitel 3.3 [6]. Dabei sind ungünstigere Einwirkungen zu berücksichtigen im Vergleich Untersuchungen mit dem Ziel der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1990:2010-12 Kapitel 3.4 [6]. Beeinträchtigungen von Leben und Gesundheit beziehen sich jedoch nicht nur auf die Tragfähigkeit (Standicherheit) von Konstruktionen und Bauteilen, sondern auch auf andere Einwirkungen von Nutzern eines Gebäudes, wie z. B. Schimmelsporen in Innenräumen oder zu hohe Raumlufttemperaturen, die zu einem Risiko für die Gesundheit der Nutzer werden können. Daraus resultiert für die Tragfähigkeit ein kleineres Quantil, z. B. 2 % oder 5 %-Quantil, und, verbunden mit der statistischen Nutzungsdauer von Gebäuden, ein längerer Betrachtungszeitraum, während die Gebrauchstauglichkeit mit einem größeren Quantil, beispielsweise 5 % oder 10 % oder mehr, und einem entsprechend kürzeren Untersuchungszeitraum zu koppeln ist. Das zu untersuchende Zeitfenster sollte daher, analog zu DIN EN ISO 15927-4:2005-10 mindestens 10 Jahre, besser 20 und im Idealfall 50 Jahren umfassen. Generell gilt: Je länger der untersuchte Zeitraum ist, umso sicherer ist die daraus abgeleitete Zeitreihe, sowohl bei Mittelwerten als auch bei extremen Ereignissen.

5.2 Analyse des untersuchten Zeitfensters

Unter dem Aspekt der Erkenntnisse aus Abschnitt 5.1 ist zu klären, ob das Zeitfenster von sieben Jahren welches dem vorliegenden Forschungsbericht zugrunde liegt für die untersuchten Auswertegrößen lang genug ist um daraus allgemeinverbindli-

che Aussagen ableiten zu können. Zu diesem Zweck wurden in Tabelle 8 exemplarisch die Parameter der Regressionskurve der absoluten Luftfeuchte der Raum- und der Außenluft für einzelne Jahre und die ausgewerteten Zeitreihen am Standort 109-A1 zusammengestellt.

Tabelle 8: Parameter der Regressionskurven der absoluten Luftfeuchte c am Standort 109-A1 in verschiedenen Zeitreihen

Zeit	Umfang der Zeitreihe	Parameter der absoluten Luftfeuchte c					
		Phasenverschiebung [h]		Amplitude [g/m ³]		Mittelwert [g/m ³]	
		innen	außen	innen	außen	innen	außen
2011	Ein Jahr	-2865	-2590	1,65	3,07	9,29	7,84
2012		-2333	-2451	1,76	3,12	8,58	7,72
2013		-2691	-2560	2,13	3,27	9,24	7,83
2014		-2864	-2715	1,74	2,82	9,61	8,42
2015		-2747	-2523	1,69	2,67	9,21	7,86
2016		-2638	-2556	2,51	3,53	9,58	8,16
2017		-2769	2445	2,14	3,33	9,62	7,96
2011 - 2012	Zwei Jahre	-3269	-2824	2,21	3,35	9,31	7,77
2012 - 2013		-3226	-2798	2,50	3,43	9,29	7,77
2013 - 2014		-3205	-2896	2,37	3,30	9,42	8,12
2014 - 2015		-3376	-3076	2,34	3,25	9,89	8,64
2011 - 2013	Drei Jahre	-3298	-2879	2,45	3,48	9,28	7,79
2012 - 2014		-3302	-2893	2,50	3,37	9,39	7,99
2013 - 2015		-3312	-2996	2,55	3,44	9,61	8,32
2011 - 2014	Vier Jahre	-3333	-2928	2,45	3,42	9,36	7,95
2012 - 2015		-3339	-2935	2,57	3,42	9,51	8,13
2011 - 2015	Fünf Jahre	-3351	-2947	2,49	3,44	9,44	8,05
2011 - 2016	Sechs Jahre	-3353	-2952	2,49	3,45	9,49	8,11
2011 - 2017	Sieben Jahre	-3355	-2958	2,49	3,46	9,53	8,10

Um die Entwicklung der Parameter über die Zeit sichtbar zu machen, wurden in Tabelle 8 die zum Jahr 2011 gehörenden Untersuchungszeiträume pinkfarben hinterlegt. Dargestellt wird damit eine Auswertespanne von einem bis hin zu sieben Jahren. Dabei wird deutlich, dass nicht nur zwischen den Parametern in den verschiede-

nen Zeiträumen deutliche Unterschiede zu verzeichnen sind, sondern dass erst ab sechs bzw. sieben Auswertejahren eine Verstetigung der Parameter beobachtet werden kann. Eine Ausweitung der Analyse auf die Gesamtheit der in Anlage A aufgeführten Standorte, die Parameter der Regressionskurven und unterschiedliche Zeitreihen der Auswertegrößen innen und außen bestätigt dieses Resultat. Es empfiehlt sich daher auch für eine Mittelwertbildung auf Zeitreihen von mindestens zehn Jahren zurückzugreifen. Kürze Betrachtungszeiträume weisen einen Einfluss der meteorologischen Verhältnisse einzelner Jahre auf die Algorithmen der Auswertegrößen von Innen- und Außenluft auf und lassen damit nur eine begrenzte Aussage zu. Da es für Daten aus dem Gebäudeinneren aber bislang nur die Angaben aus dem vorliegenden Forschungsbericht mit einem zeitlichen Umfang von sieben Jahren gibt, werden diese Angaben den Analysen zugrunde gelegt. Die aus diesen Zeitreihen abgeleiteten Ergebnisse sind dementsprechend mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

6 Analyse von Mittelwerten der Temperatur θ , der absoluten Feuchte c und relativen Feuchte ϕ der Luft

In Abschnitt 2.3 wurden bereits einige der Einflussfaktoren für Innenraumkonditionen von Gebäuden aufgelistet. Aus diesem Katalog heraus soll im vorliegenden Kapitel der Frage nachgegangen werden, wie groß die Unterschiede bei den Amplituden für Temperatur θ und absolute Luftfeuchte c an den ausgewerteten 33 Standorten sind und ob aus diesen Verläufen repräsentative Mittelwertkurven exzerpiert werden können. Da bei vielen Untersuchungen aus dem Bereich der Bauphysik statt auf die absolute Luftfeuchte c auf die relative Luftfeuchte ϕ abgehoben wird, beziehen sich die folgenden Analysen auch auf diesen Parameter.

6.1 Mittelwerte der Außenluft

Wie in Bild 2 zu sehen ist, sind die Standorte der Thermohygrographen über das gesamte Bundesgebiet verteilt. Sie reichen von der Nord- und Ostseeküste bis ins Alpengebiet, vom östlichen Brandenburg bis an die Westgrenze Nordrhein-Westfalens und erfassen das Erzgebirge ebenso wie den Oberrheingraben. Aufgrund dieser Flächenabdeckung kann der Frage nachgegangen werden, ob sich die Lufttemperatur θ_e , die absolute Feuchte c_e und die relative Feuchte ϕ_e der Außenluft an den ver-

schiedenen Standorten so stark unterscheiden, dass für das Bundesgebiet eine Differenzierung nach Standorten erforderlich ist. Zur Analyse dieses Problems wurden die Regressionskurven an 33 Standorten für den Zeitraum vom 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015, also über 5 Jahren hinweg, in den Bildern 28, 29 und 30 dargestellt. Auf ein Cluster aus dem Fünfjahreszyklus wurde zurückgegriffen, da dieser für die anstehenden Untersuchungen die größte Stichprobe ergab.

Die Daten der Außenlufttemperatur θ_e und der relativen Luftfeuchte ϕ_e basieren auf Messwerten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) an den untersuchten Standorten, während die absolute Luftfeuchte c_e aus den Messwerten der Temperatur θ_e und der relativen Feuchte ϕ_e der Außenluft bestimmt wurde. Um die Auswertegrößen Temperatur, absolute Luftfeuchte und relative Luftfeuchte an den verschiedenen Standorten vergleichen zu können werden nicht die Messdaten, sondern die daraus abgeleiteten Regressionskurven betrachtet.

Die Regressionskurven in den Bildern 28 bis 30 basieren auf stündlichen Mittelwerten der Außenluft.

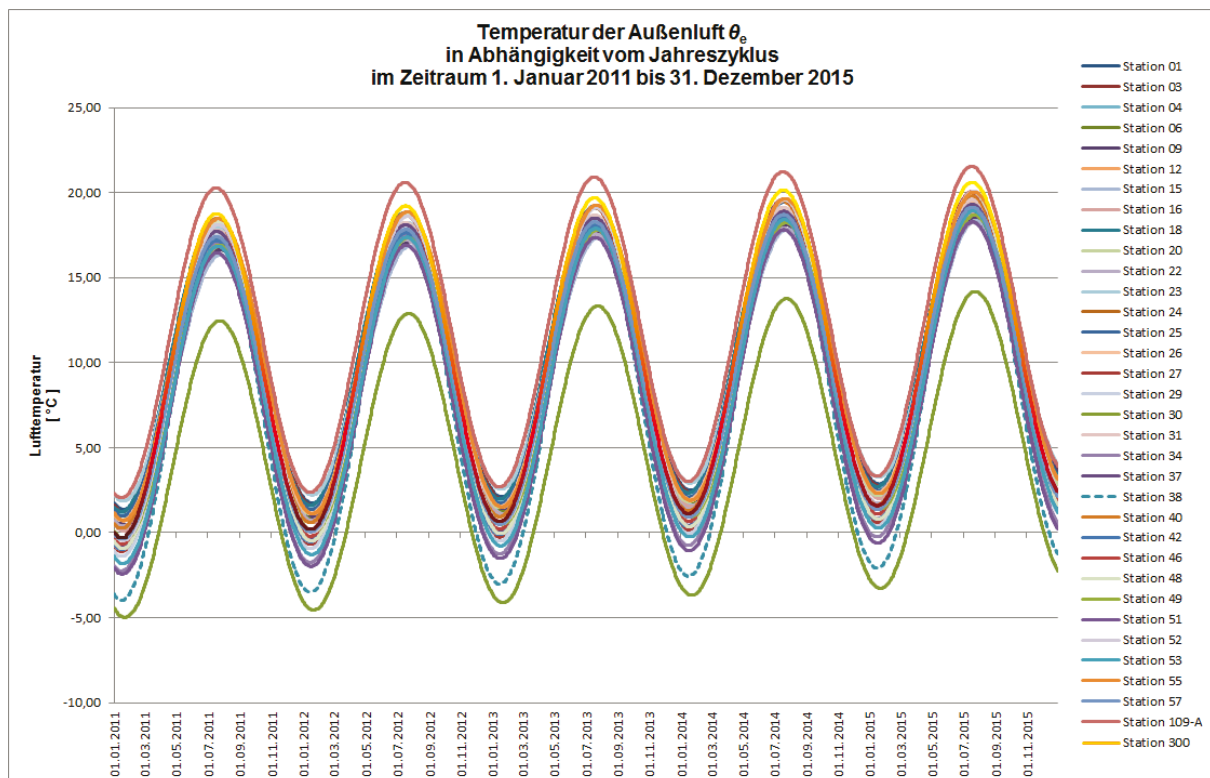


Bild 28: Regressionskurven der Außenlufttemperatur θ_e

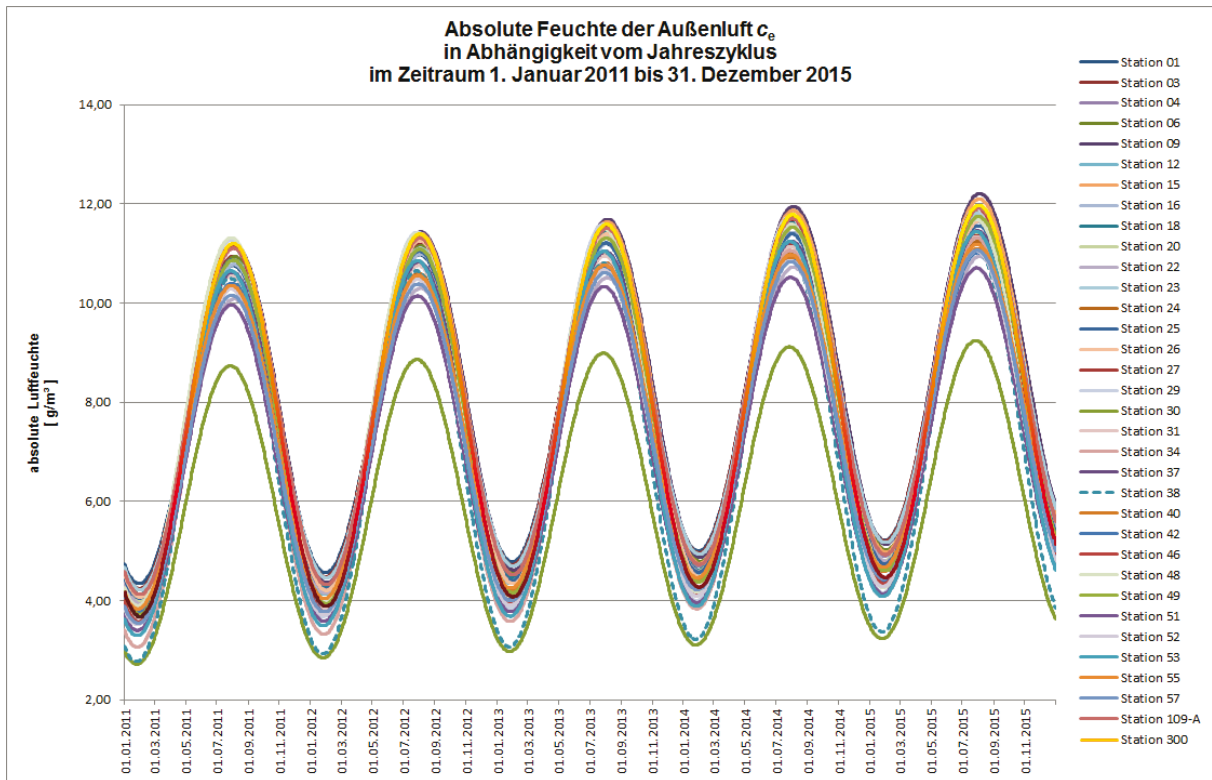


Bild 29: Regressionskurven der absoluten Feuchte c_e der Außenluft

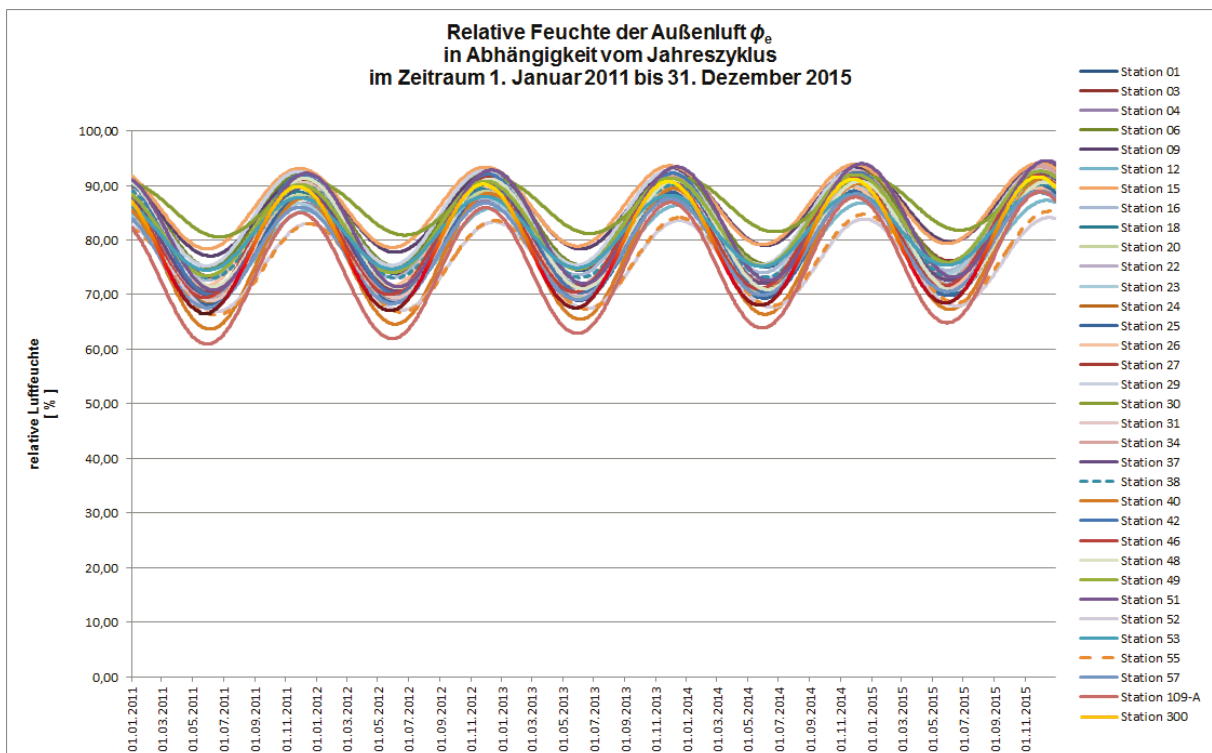


Bild 30: Regressionskurven der relativen Feuchte ϕ_e der Außenluft

Eine Analyse der Bilder 28, 29 und 30 macht deutlich, dass

- sowohl die Außenlufttemperaturen θ_e als auch die absolute Luftfeuchte c_e und die relative Luftfeuchte ϕ_e harmonisch schwingen und
- der Mittelwert der Kurvenverläufe in beiden Fällen nicht waagrecht ist, sondern eine Steigung aufweist.

Es ist außerdem zu sehen, dass alle drei Auswertegrößen am oberen und unteren Durchgang der Kurven bei den untersuchten Standorten Spreizungen aufweisen.

Diese schwanken bei der Außenlufttemperatur zwischen 2,0 und 4,5 K sowie bei der absoluten Luftfeuchte zwischen 1,0 und 1,3 g/m³. Lässt man die extremen Standorte 109, 30 und 38 unberücksichtigt, dann kann man aus den Kurvenscharen sowohl für die Außenlufttemperatur θ_e als auch für die absolute Luftfeuchte c_e folgern, dass für Untersuchungen an Gebäuden oder technischen Einrichtungen im Bundesgebiet die auf der Basis von Mittelwerten durchgeführt werden, aus den in den Bildern 28 bis 30 gezeigten Kurvenverläufen allgemeingültige Algorithmen entwickelt werden können.

Für Untersuchungen mit dem Fokus auf hohe mittlere Außenlufttemperaturen θ_e und Feuchten c_e kann der Standort 109 herangezogen werden, der in der Nähe von Mannheim liegt. Aufgrund der häufigen Südwest-Strömungen liegen im Oberrheingraben teilweise mediterrane Verhältnisse vor, da bei dieser Wetterlage über das Rhone Tal Luftmassen aus dem Mittelmeerraum herbeigeführt werden. Bei Fragestellungen mit dem Augenmerk auf niedrige mittlere Außenlufttemperaturen θ_e und absolute Feuchten c_e sollte der Standort 38 herangezogen werden. Die beiden Kurvenverläufe am unteren Ende der Skala in den Bildern 28 und 29 wurden an den Standorten 30 und 38 ermittelt. Die Messstation am Standort 30 liegt im Erzgebirge, während sich der Standort 38 in den Alpen befindet. Es ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass am Standort 30 die DWD-Station in 1213 m Höhe über NN liegt, der zugehörige Aufstellungsort des Thermohygrographen aber nur in ca. 800 m Höhe über NN. Am Standort 38 befindet sich dagegen sowohl die Wetterstation als auch das korrespondierende Wohngebäude in Ortsrandlage in einer Höhe von ca. 690 m über NN.

Da bei einer ganzen Reihe baurechtlicher Anforderungen aus dem Bereich der Bauphysik auf den Standort Potsdam Bezug genommen wird, wurde zur Information in den Bildern 28 bis 30 mit der Nummer 300 auch der Verlauf der Außenlufttemperatur θ_e , der absoluten Luftfeuchte c_e und der relativen Luftfeuchte ϕ_e an diesem Standort

im Betrachtungszeitraum dargestellt. Aus den Verläufen der Kurven am Standort Potsdam wird deutlich, dass die Scheitelwerte der Temperatur θ_e und der absoluten Luftfeuchte c_e der Außenluft jeweils zu den Spitzenreitern gehören. Potsdam ist daher – im betrachteten Zeitfenster – als Standort mit vergleichsweise hoher Temperatur θ_e und hoher absoluter Feuchte c_e der Außenluft einzustufen.

Bei der Verwendung der gezeigten Kurvenverläufe und ihrer Parameter ist zu beachten, dass es sich dabei um Regressionskurven, also Mittelwertbildungen handelt. Extreme Verläufe sind für Auswertegrößen durch die Anwendung statistischer Methoden aus den Messwerten zu generieren.

6.2 Mittelwerte der Raumluf

In Abschnitt 5.1 wurde bereits dargelegt, dass für allgemeinverbindliche Aussagen zu zeitlich veränderlichen meteorologischen Größen ein Zeitraum von mindestens 10 Jahren betrachtet werden sollte. Obwohl für Messungen der Innenraumkonditionen bisher keine Untersuchungen über einen so langen Zeitraum vorliegen und die Auswertung der Parameter von Regressionskurven aus diesem Forschungsvorhaben zeigt, dass erst ab einer Zeitreihe von mindestens sieben Jahren eine Verstetigung der Bestimmungsgrößen zu erkennen ist, erfolgen die weiteren Ausführungen auf der Basis der vorliegenden Daten. Begründet wird dieses Vorgehen mit den Zielen der durchgeführten Analysen: Mit den Aussagen aus den Kurvenverläufen der Bilder 28 bis 33 wird nicht auf quantitative sondern auf qualitative Ergebnisse abgezielt, d. h. mit dem Vergleich der Regressionskurven soll auf grundsätzliche Unterschiede hingewiesen werden.

Wie groß die Abweichungen zwischen den Mittelwerten der Innen- und Außenverhältnissen sind kann man sehen, wenn man die in den Bildern 28 bis 30 dargestellten Regressionskurven der Außenverhältnisse für die Lufttemperatur θ_e , die absolute Luftfeuchte c_e und die relative Luftfeuchte ϕ_e mit den korrespondierenden der Innenraumkonditionen θ_i , c_i und ϕ_i in den Bildern 31 bis 33 vergleicht.

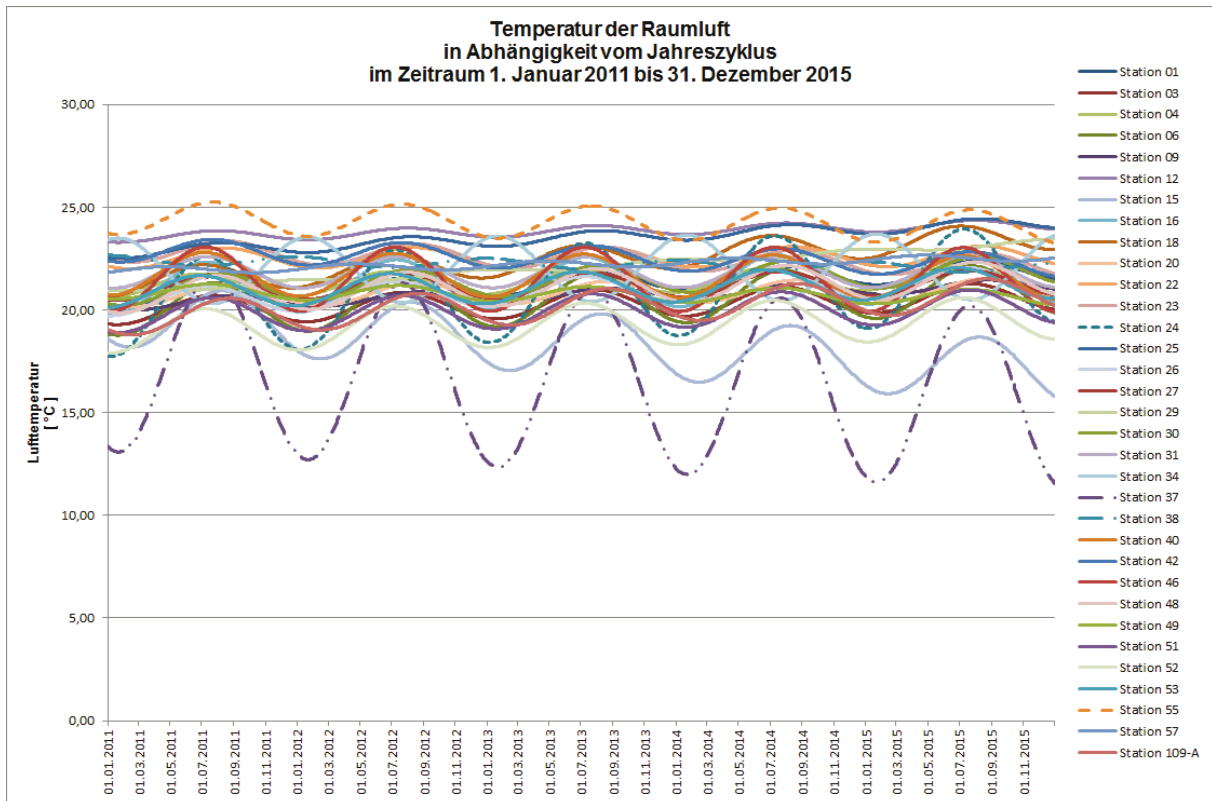


Bild 31: Regressionskurven der Raumluft θ_i

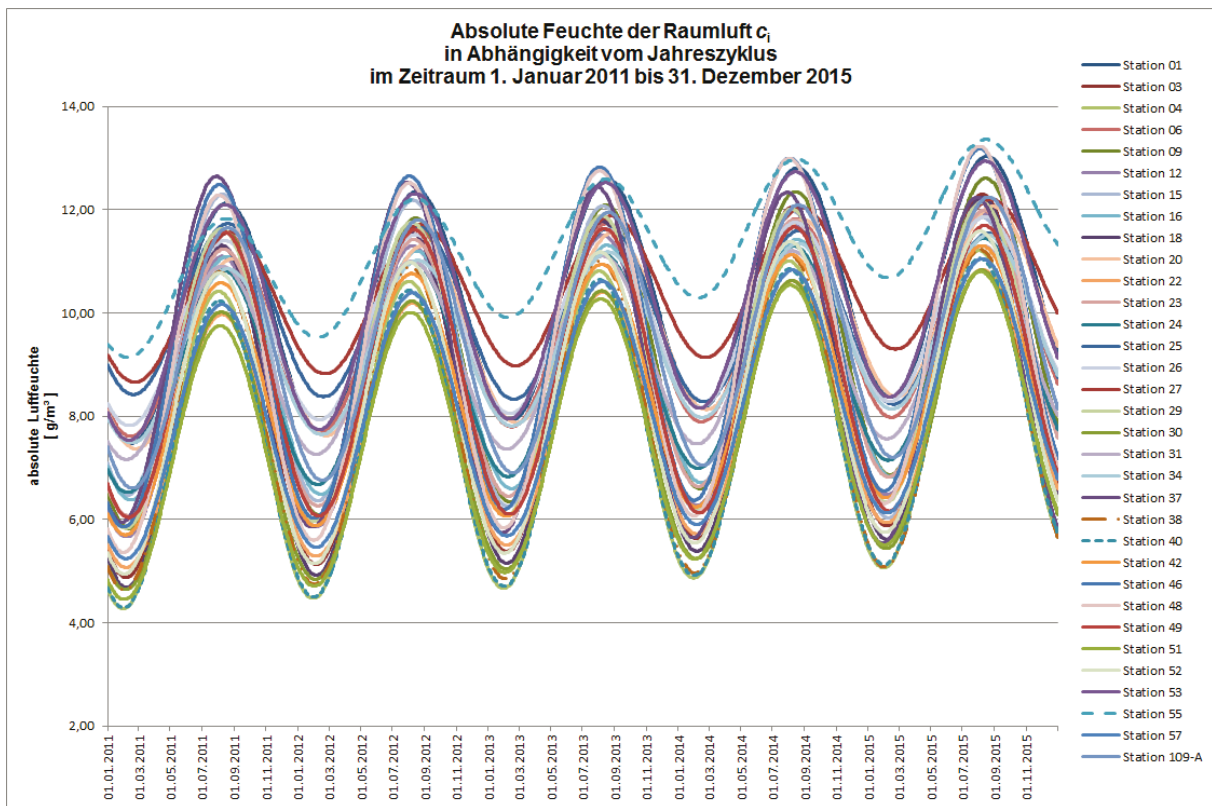


Bild 32: Regressionskurven der absoluten Feuchte der Raumluft c_i

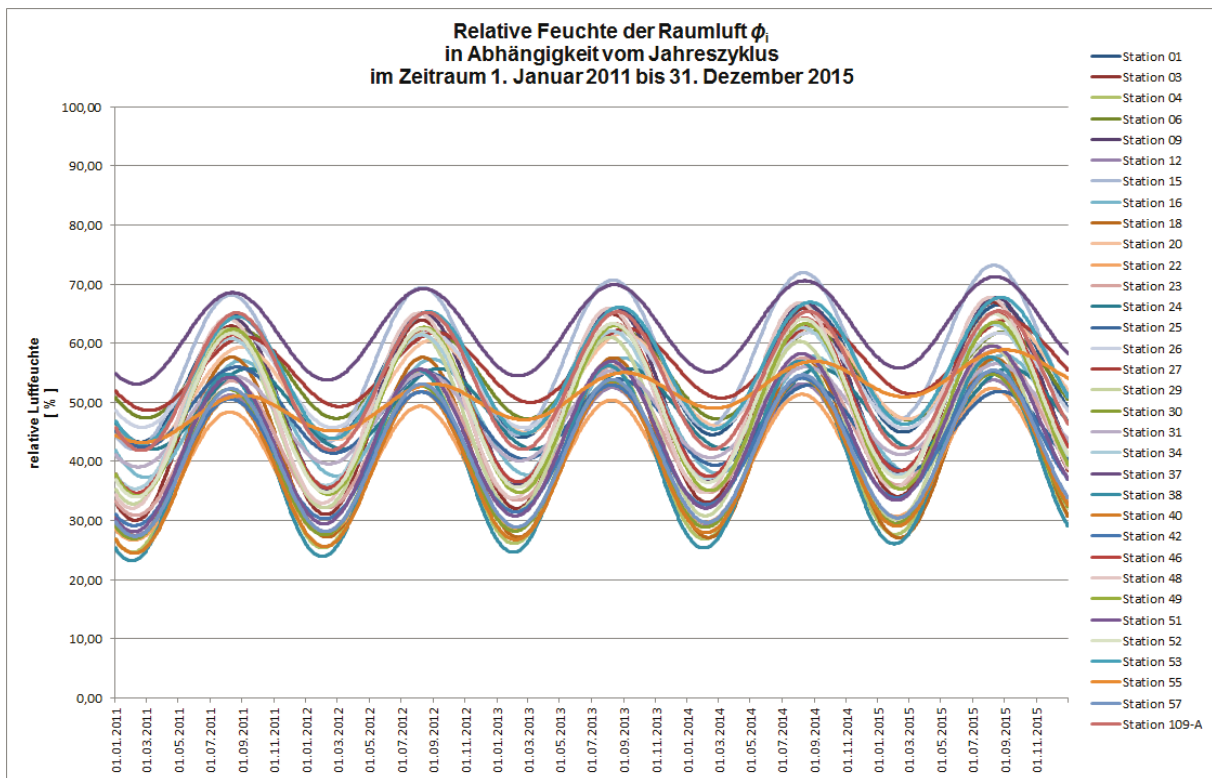


Bild 33: Regressionskurven der relativen Feuchte der Raumluft ϕ_i

Wie den Kurvenverläufen in Bild 31 zu entnehmen ist, hat die Heizungsart einen großen Einfluss auf die Raumlufttemperaturen. Während die Mehrzahl der untersuchten Standorte über eine Zentralheizung zur Raumwärmeerzeugung verfügt, steht am Aufstellungsort des Thermohygrographen am Messpunkt 37 nur ein Kohle-/Holzkaminofen als Primärheizung zur Verfügung. Da dieser Ofen nur im Bedarfsfall befeuert wird, sinkt die Innenraumtemperatur während der Zeit in der der untersuchte Raum nicht genutzt wird deutlich ab. Dies entspricht dem Heizverhalten welches den frühen Vorgaben an den hygienischen Wärmeschutz zugrunde lag. Demgegenüber zeigt der Kurvenverlauf der Innentemperatur θ_i im Gebäude am Standort 12 den Einfluss einer modernen Heizungsanlage mit Fußbodenheizung. Wie bereits im Abschnitt 4 dargelegt, sorgen die großen Heizflächen einerseits für niedrige Vorlauftemperaturen, andererseits aber auch für eine ausgeglichene Wärmezufuhr über die große wärmeabgebende Fläche. Aus diesen Randbedingungen resultiert eine vergleichsweise gleichmäßige Raumlufttemperatur θ_i , dargestellt in einem Verlauf der Regressionskurve nahezu ohne Amplituden.

Wie den Kurvenverläufe in Bild 29 zu entnehmen ist, sorgen moderne, zentral gesteuerte Heizungsanlagen für eine kontinuierliche und gleichmäßige Raumwärmeerzeugung, dadurch für höhere Temperaturen der raumschließenden Bauteile und

letztendlich für ein geringeres Risiko der Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen.

6.3 Vergleich von Innen- und Außenluftdaten aus Regressionen

Ermittelt man für die in den Bildern 28 bis 33 dargestellten Regressionskurven an den $j = 33$ Standorten jeweils die Mittelwerte $\bar{\theta}_j$, \bar{c}_j und $\bar{\phi}_j$ (j stellt in diesem Zusammenhang eine Laufvariable der Standorte dar) der Auswertegrößen Temperatur θ , absolute Luftfeuchte c und relative Luftfeuchte ϕ und von diesen 33 Mittelwerten wiederum den Mittelwert $\bar{\bar{\theta}}$, den Maximalwert $\hat{\hat{\theta}}$ aus Maximalwerten, den Mittelwert $\bar{\hat{\theta}}$ aus Maximalwerten, den Minimalwert $\check{\check{\theta}}$ aus Maximalwerten, den Maximalwert $\hat{\check{\theta}}$ aus Minimalwerten, den Mittelwert $\bar{\check{\theta}}$ aus Minimalwerten und den Minimalwert $\check{\bar{\theta}}$ aus Minimalwerten, dann erhält man in den Tabellen 9 bis 11 dargestellte Übersicht. Die Ergebnisse am Standort 37 blieben bei diesen Auswertungen unberücksichtigt, da der untersuchte Raum nur durch einen Kohl-/Holzkaminofen beheizt wird.

Tabelle 9: Auswertung der j Regressionskurven für die Temperatur θ

	Auswertung der Regressionskurven aus Temperatur	
	θ_i [°C] nach Bild 31	θ_e [°C] nach Bild 28
Mittelwert $\bar{\bar{\theta}}$ aus j Mittelwerten	21,46	9,50
Maximalwert $\hat{\hat{\theta}}$ aus j Maximalwerten	25,25	21,55
Mittelwert $\bar{\hat{\theta}}$ aus j Maximalwerten	22,56	19,12
Minimalwert $\check{\check{\theta}}$ aus j Maximalwerten	20,93	14,19
Maximalwert $\hat{\check{\theta}}$ aus j Minimalwerten	23,26	2,05
Mittelwert $\bar{\check{\theta}}$ aus j Minimalwerten	20,30	-0,29
Minimalwert $\check{\bar{\theta}}$ aus j Minimalwerten	15,78	-4,98

Tabelle 10: Auswertung der j Regressionskurven für die absolute Luftfeuchte c

	Auswertung der Regressionskurven aus absoluter Luftfeuchte	
	c_i [g/m ³] nach Bild 32	c_e [g/m ³] nach Bild 29
Mittelwert \bar{c} aus j Mittelwerten	9,06	7,63
Maximalwert \hat{c} aus j Maximalwerten	13,36	12,21
Mittelwert \bar{c} aus j Maximalwerten	11,90	11,43
Minimalwert \check{c} aus j Maximalwerten	10,81	9,24
Maximalwert \hat{c} aus j Minimalwerten	9,14	4,34
Mittelwert \bar{c} aus j Minimalwerten	6,17	3,76
Minimalwert \check{c} aus j Minimalwerten	4,27	2,72

Tabelle 11: Auswertung der j Regressionskurven für die relative Luftfeuchte

	Auswertung der Regressionskurven aus relativer Luftfeuchte	
	ϕ_i [%] nach Bild 33	ϕ_e [%] nach Bild 30
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Mittelwerten	48,40	80,88
Maximalwert $\hat{\phi}$ aus j Maximalwerten	73,19	94,58
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Maximalwerten	61,24	91,22
Minimalwert $\check{\phi}$ aus j Maximalwerten	52,36	84,13
Maximalwert $\hat{\phi}$ aus j Minimalwerten	53,10	80,59
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Minimalwerten	35,37	70,72
Minimalwert $\check{\phi}$ aus j Minimalwerten	23,18	60,95

Aus der Betrachtung der Regressionskurven der Raumluft in den Bildern 29 bis 30 und einem Vergleich mit den Außendaten in den Bildern 31 bis 33 lassen sich unter Einbeziehung der Tabellen 9 bis 11 folgende Schlüsse ziehen:

- Die Innenraumkonditionen der Auswertegrößen weisen an fast allen Standorten ähnlich Zyklen, d. h. ein ähnliches Schwingungsverhalten, wie die Außenwerte auf.
- Je nach Nutzergewohnheit, Heizungstyp und / oder gebäudetechnischer Anlage und Einrichtung sowie dem Baualter, treten bei den Innenraumtemperaturen θ_i deutliche Unterschiede zutage. So schwanken die Innentemperaturen am Standort 55 im Jahresgang beispielsweise zwischen einem Maximalwert $\theta_{i,\max} = 25,25$ °C sowie einem Minimalwert von $\theta_{i,\min} = 23,3$ °C und liegen während der Heizperiode bei einem Mittelwert von ca. $\bar{\theta}_{i,HP} \approx 24$ °C. Am Standort 52 schwanken die Innentemperaturen dagegen zwischen $\theta_{i,\max} = 20,6$ °C und $\theta_{i,\min} = 17,9$ °C und liegen als Mittelwerte während der Heizperiode bei ca. $\bar{\theta}_{i,HP} \approx 18,6$ °C.
- Bei einem Mittelwert der Minimalwerte aus den Regressionskurven der Raumlufttemperatur θ_i an den untersuchten Standorten nach Tabelle 9 von $\bar{\theta}_i = 20,30$ °C kann man davon auszugehen, dass die mittlere Raumlufttemperatur während der Heizperiode (HP) bei ca. $\bar{\theta}_{i,HP} = 21$ °C liegt. Es ist daher zu überdenken, ob Randbedingung der Innenraumtemperatur bei baurechtlichen Nachweisen – je nach Fragestellung – mit $\bar{\theta}_{i,HP} = 19$ °C noch zeitgemäß ist, da diese Festlegung auf Zeiten mit Einzelraumheizungen zurückgeht.
- Die Mittelwerte der Maximalwerte der absoluten Luftfeuchte innen \bar{c}_i und außen \bar{c}_e liegen nur $0,47$ g/m³ auseinander. Dies ist darauf zurückzuführen, dass während der „warmen“ Periode durch vermehrtes Lüften ein Angleichen der Innen- und Außenluftkonditionen erreicht wird.
- Die absolute Luftfeuchte der Raumluft c_i liegt – bei Mittelwerten – immer über der in der Außenluft c_e .
- Während es bei den Zyklen der Regressionskurven für Temperatur und absolute Feuchte der Außenluft an den betrachteten Standorten keine großen Unterschiede im zeitlichen Verlauf gibt, zeigen die Regressionskurven der Innenwerte Phasenverschiebungen. Besonders ausgeprägt ist die Phasenverschiebung bei der Raumlufttemperatur θ_i am Standort 34. Dies beträgt dort ca. eine halbe Periode.

Bei der Betrachtung und Analyse der Bilder 28 bis 33 und der Tabellen 9 bis 11 ist zu beachten, dass es sich hierbei um die Auswertung von Mittelwerten handelt. Die Maximal- bzw. Minimalwerte aus Messungen, d. h. die tatsächlichen Einwirkungen sind deutlich höher / niedriger. Anwendungen und Analysen die auf den o. g. genannten Bildern und Tabellen basieren, sollten sich daher auch nur auf Mittelwertverteilungen beziehen. Eine Auswertung der Messwerte erfolgt in Abschnitt 6.4.

6.4 Vergleich von Innen- und Außenluftdaten aus Messwerten

Wie bereits in Abschnitt 6.3 dargelegt, geben die Bilder 28 bis 33 und die Tabellen 9 bis 11 Daten aus Regressionen wider. Durch die Mittelwertbildung im Regressionsverfahren erfolgt eine Nivellierung der Eingangsdaten, d. h. der Messwerte. Da jedoch nicht die Mittelwerte, sondern die realen Verhältnisse Gebäude und / oder Bauteile beeinflussen, werden in den Tabellen 12 bis 14 die im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015 an den 33 Standorten gemessene Daten ausgewertet. Dazu erfolgte die Bestimmung der Mittelwerte $\bar{\theta}_j$, \bar{c}_j und $\bar{\phi}_j$ der Auswertegrößen Temperatur θ , absolute Luftfeuchte c und relative Luftfeuchte ϕ , aus den 33 Mittelwerten wiederum der Mittelwert $\bar{\bar{\theta}}$, der Maximalwert $\hat{\hat{\theta}}$ aus Maximalwerten, der Mittelwert $\bar{\hat{\theta}}$ aus Maximalwerten, der Minimalwert $\check{\check{\theta}}$ aus Maximalwerten, der Maximalwert $\hat{\check{\theta}}$ aus Minimalwerten, der Mittelwert $\bar{\check{\theta}}$ aus Minimalwerten und der Minimalwert $\check{\hat{\theta}}$ aus Minimalwerten.

Die untersuchten Messwerte stellen mittlere stündliche Daten der Auswertegrößen dar.

Tabelle 12: Auswertung der Messwerte an j Standorten für die Temperatur θ

	Auswertung der Messwerte aus Temperatur	
	θ_i [°C]	θ_e [°C]
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Mittelwerten	21,32	9,39
Maximalwert $\hat{\theta}$ aus j Maximalwerten	34,05	40,30
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Maximalwerten	29,34	35,91
Minimalwert $\check{\theta}$ aus j Maximalwerten	26,05	30,00
Maximalwert $\hat{\theta}$ aus j Minimalwerten	19,23	-15,20
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Minimalwerten	13,66	-19,53
Minimalwert $\check{\theta}$ aus j Minimalwerten	2,43	-30,80

Tabelle 13: Auswertung der Messwerte an j Standorten für die absolute Luftfeuchte c

	Auswertung der Messwerte aus absoluter Luftfeuchte	
	c_i [g/m ³]	c_e [g/m ³]
Mittelwert \bar{c} aus j Mittelwerten	8,97	7,53
Maximalwert \hat{c} aus j Maximalwerten	22,07	24,04
Mittelwert \bar{c} aus j Maximalwerten	17,59	19,60
Minimalwert \check{c} aus j Maximalwerten	14,67	16,96
Maximalwert \hat{c} aus j Minimalwerten	5,86	1,03
Mittelwert \bar{c} aus j Minimalwerten	3,48	0,74
Minimalwert \check{c} aus j Minimalwerten	2,39	0,24

Tabelle 14: Auswertung der Messwerte an j Standorten für die relativen Luftfeuchte ϕ

	Auswertung der Messwerte aus relativer Luftfeuchte	
	ϕ_i [%]	ϕ_e [%]
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Mittelwerten	47,90	80,36
Maximalwert $\hat{\phi}$ aus j Maximalwerten	89,43	100
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Maximalwerten	77,28	100
Minimalwert $\check{\phi}$ aus j Maximalwerten	65,73	100
Maximalwert $\hat{\phi}$ aus j Minimalwerten	35,05	22,00
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Minimalwerten	20,96	15,39
Minimalwert $\check{\phi}$ aus j Minimalwerten	12,50	3,00

Für die Auswertung von Messdaten, insbesondere zur Festlegung von Randbedingungen aus dem Bereich des hygienischen Wärmeschutzes, gibt es eine weitere Möglichkeit die bei der Festlegung von Maßgaben für die Außenlufttemperaturen in DIN 4108:1952 herangezogen wurde. Die dabei verwendete Vorgehensweise wurde im Kommentar zu DIN 4108 [7] wie folgt beschrieben: Um den unterschiedlichen Temperaturverhältnissen in der Bundesrepublik Rechnung zu tragen, war DIN 4108 in drei Wärmedämmgebiete I, II und III unterteilt. Die mittlere minimale Außenlufttemperatur lag im Wärmedämmgebiet I (WDG I) bei -10 °C, im WDG II bei -15 °C und im WDG III bei -20 °C. Dabei verstand man unter der tiefsten minimalen Außenlufttemperatur den langjährigen Mittelwert der tiefsten Außenlufttemperatur der jeweils in einem Jahr im betreffenden Dämmgebiet gemessen wurde. Setzt man diese Vorgehensweise auch bei den Messwerten in den untersuchten Gebäuden im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2015 ein, dann erhält man aus den 33 Standorten und dem Mittelwert der Minima bzw. Maxima in den jeweils untersuchten fünf Jahren für die Auswertegrößen Temperatur, absolute Luftfeuchte und relative Luftfeuchte die Werte gemäß Tabelle 15.

Tabelle 15: Auswertung der Messwerte an j Standorten

	Mittelwert aus den 33 Standorten und dem Mittelwert aus den Maxima bzw. Minima in den Jahren 2011 – 2015					
	Temperatur		absolute Feuchte		relative Feuchte	
	θ_i [°C]	θ_e [°C]	c_i [g/m ³]	c_e [g/m ³]	ϕ_i [%]	ϕ_e [%]
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Maximalwerten	27,96	33,58	27,96	18,11	72,82	99,98
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Minimalwerten	15,41	-13,35	15,41	1,41	24,74	19,90

Die Unterschiede zwischen den Tabellen 12 bis 14 und Tabelle 15 zeigen, dass der Mittelwert aus dem absoluten Maximum bzw. Minimum an den untersuchten 33 Standorten und dem Mittelwerte aus den Standorten und dem Mittelwert aus den einzelnen Maxima bzw. Minima der Jahre 2011 bis 2015 für die zweite Konfiguration geringere Anforderungen ergibt.

6.5 Vergleich von Regressionen mit Messwerten

In den Tabellen 16 bis 18 wurden die Ergebnisse aus Regressionen und Messdaten einander gegenübergestellt. Damit soll eine Möglichkeit geschaffen werden, die Abweichungen zwischen den Angaben aus Mittelwertbildungen und den tatsächlichen Randbedingungen darzustellen.

Tabelle 16: Vergleich Messwerte / Regressionen an j Standorten für die Temperatur θ

	Auswertung der Messwerte aus Temperatur		Auswertung der Regressionen aus Temperatur	
	θ_i [°C]	θ_e [°C]	θ_i [°C]	θ_e [°C]
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Mittelwerten	21,32	9,39	21,32	9,50
Maximalwert $\hat{\theta}$ aus j Maximalwerten	34,05	40,30	25,25	21,55
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Maximalwerten	29,34	35,91	22,56	19,12
Minimalwert $\check{\theta}$ aus j Maximalwerten	26,05	30,00	20,59	14,19
Maximalwert $\hat{\theta}$ aus j Minimalwerten	19,23	-15,20	23,28	2,05
Mittelwert $\bar{\theta}$ aus j Minimalwerten	13,66	-19,53	20,04	-0,29
Minimalwert $\check{\theta}$ aus j Minimalwerten	2,43	-30,80	11,55	-4,98

Tabelle 17: Vergleich Messwerte / Regressionen an j Standorten für die absolute Feuchte c

	Auswertung der Messwerte aus absoluter Feuchte		Auswertung der Regressionen aus absoluter Feuchte	
	c_i [g/m ³]	c_e [g/m ³]	c_i [g/m ³]	c_e [g/m ³]
Mittelwert \bar{c} aus j Mittelwerten	8,97	7,53	9,06	7,63
Maximalwert \hat{c} aus j Maximalwerten	22,07	24,04	13,36	12,21
Mittelwert \bar{c} aus j Maximalwerten	17,59	19,60	11,92	11,43
Minimalwert \check{c} aus j Maximalwerten	14,67	16,96	10,81	9,24
Maximalwert \hat{c} aus j Minimalwerten	5,86	1,03	9,14	4,34
Mittelwert \bar{c} aus j Minimalwerten	3,48	0,74	6,15	3,76
Minimalwert \check{c} aus j Minimalwerten	2,39	0,24	4,27	2,72

Tabelle 18: Vergleich Messwerte / Regressionen an j Standorten für die relative Feuchte ϕ

	Auswertung der Messwerte aus relativer Feuchte		Auswertung der Regressionen aus relativer Feuchte	
	ϕ_i [%]	ϕ_e [%]	ϕ_i [%]	ϕ_e [%]
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Mittelwerten	48	80	48	81
Maximalwert $\hat{\phi}$ aus j Maximalwerten	89	100	73	95
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Maximalwerten	77	100	61	91
Minimalwert $\check{\phi}$ aus j Maximalwerten	66	100	52	84
Maximalwert $\hat{\phi}$ aus j Minimalwerten	35	22	53	81
Mittelwert $\bar{\phi}$ aus j Minimalwerten	21	15,	35	71
Minimalwert $\check{\phi}$ aus j Minimalwerten	13	3	23	61

Bei der Auswertung der Tabellen 16 bis 18 zeigt sich, dass die Mittelwerte aus der gesamten Datensammlung für Regression und Messwerte nahezu identisch sind. Abweichungen die sich bei den absoluten Mittelwerten ergeben, sind auf Rundungsfehler zurückzuführen. Für die Spitzenwerte, sowohl bei Fragestellungen nach minimalen als auch bei maximalen Angaben, sind jedoch deutliche Abweichungen erkennbar. Diese Unterschiede sind auf die Mittelwertbildung, d. h. die Nivellierung beim Regressionsverfahren zurückzuführen. Wie bereits mehrfach betont, ist bei den zu untersuchenden Fragen zunächst zu klären ist, ob bei erforderlichen Berechnungen Mittelwerte oder Spitzenwerte als Parameter notwendig sind.

7 Vergleich der Auswertedaten mit geltenden Regeln der Technik

Neben einem Vergleich von Gebäuden unterschiedlichen Baualters und unterschiedlicher haustechnischer Ausstattung sowie Untersuchungen, ob aus den vorliegenden Daten standardisierte Werte der Auswertegrößen generiert werden können, besteht auch die Möglichkeit mit Hilfe der Regressionskurven und Messdaten Methoden und Vorgehensweisen von Untersuchungen und Nachweise im Zusammenhang mit baurechtlichen Anforderungen hinsichtlich ihrer Sinnhaftigkeit zu überprüfen. Ein beson-

deres Augenmerk ist dabei auf Nachweisverfahren durch Simulationen zu richten, da in diesen Fällen Daten aus instationäre Vorgängen zum Einsatz kommen.

Wie bereits im Abschnitt 5.1 dargelegt, sollte vor einer Definition von Randbedingungen in Nachweisverfahren zunächst der Frage nachgegangen werden, ob Mittelwerte oder Extremwerte erforderlich sind und welches Sicherheitsniveau zu wählen ist.

Während bei den in der Vergangenheit gebräuchlichen vereinfachenden Modellen zum Nachweis baurechtlicher Anforderungen, wie etwa dem Nachweis des Mindestwärmeschutzes bei Wärmebrücken nach DIN 4108-2:2013-02 oder der Tauwasserfreiheit in Bauteilen nach dem Periodenbilanzverfahren (Glaserverfahren) nach DIN 4108-3:2018-11 die Randbedingungen aus der Auswertung längerer Zeiträume und einem „Sicherheitsaufschlag“ generiert wurden, sind in einigen der derzeit gebräuchlichen baurechtlichen Nachweisverfahren solche Sicherheiten zur Berücksichtigung von Unwägbarkeiten nicht mehr enthalten. Bei einer Reihe von Simulationen wird den Anwendern durch ein – theoretisch – genaueres Nachweisverfahren eine Sicherheit der Ergebnisse suggeriert, die aufgrund der Streuung der Eingabedaten nicht gegeben ist.

7.1 Meteorologische Randbedingungen zur Simulation des Tauwasserausfalls in Bauteilen

Bei der Bestimmung meteorologischer Randbedingen zum Nachweis von Bauteilen und Einrichtungen in und an Gebäuden ist, wie bereits im Abschnitt 5.1 dargestellt zu unterscheiden, ob bei den Untersuchungen Mittelwerte oder Extremwerte zu verwenden sind. Werden aus diesen Überlegungen heraus bei den Analysen Extremwerte verwendet, dann sind bei deren Bestimmung außerdem das Sicherheitsniveau und daraus abgeleitet der auszuwertende Zeitraum zu berücksichtigen. Nach DIN EN 1990:2010-12 Tabelle 2.1 [6] liegt die Planungsgröße der Nutzungsdauer eines Gebäudes bei 50 Jahren. Aus der Wahrscheinlichkeit des Auftretens ungünstiger meteorologischer Ereignisse entsprechend einer 2 % Quantil folgt damit ein Auswertez Zeitraum von ebenfalls 50 Jahren. Bei einem Sicherheitsniveau entsprechend einer 5 % Quantil müsste sich die auszuwertende Zeitreihe dementsprechend über 20 Jahre erstrecken. Gemäß Abschnitt 5.1 sollte der minimale Zeitrahmen zur Analyse zeitlich veränderlicher Daten nicht unter zehn Jahren liegen, was einem 10 % Quantil entspricht. Die Länge des Auswertez Zeitraums ist damit unmittelbar mit dem veranschlagten Sicherheitsniveau und dieses wiederum mit der Frage gekoppelt, ob es sich bei

dem Nachweisverfahren um ein Problem der „Tragfähigkeit“ mit gesundheitsrelevanten Aspekten für den Nutzer gemäß MBO / LBO handelt (z. B. Standsicherheit oder Schimmelbelastung) oder ob die Gebrauchstauglichkeit eines Bauteils oder einer Konstruktion im Vordergrund steht.

Neben der Dauer der Zeitreihe zur Bestimmung von Mittel- oder Extremwerten ist jedoch auch das Zeitintervall (Stunden- / Tages- / Monatsmittelwerte) innerhalb dessen die Messwerte erhoben werden von Bedeutung. Außerdem sollte der Frage nachgegangen werden, ob die Messwerte zu einem definierten Zeitpunkt erfasst wurden oder ob die verwendeten Daten aus dem Mittelwert von Angaben aus kleineren Zeitintervallen resultieren; d. h. wurden Tageswerte beispielsweise immer um 14:30 Uhr abgelesen/aufgezeichnet oder gehen sie aus dem Mittelwert stündlicher Messungen hervor. Während ein fixer Ablesezeitpunkt ein eher zufälliges Ergebnis darstellt, dabei aber Extremwerte erfassen kann, birgt die Mittelwertbildung über längere Betrachtungszeiträume (Tag / Monat) das Problem, dass hierdurch extreme Ereignisse gemindert werden, was die Aussagekraft schmälert.

Die Problematik der Bezugnahme auf unterschiedliche Zeiträume (Stundenwerte / Tagesmittelwerte) bzw. auf Messwerte oder Regressionsdaten wird in Tabelle 19 für exemplarisch ausgewählte Standorte aus dem Forschungsvorhaben dargestellt. Als Vergleichsfall werden die Festlegungen in DIN 4108-3:2018-11 Anhang D Bild D.1 (siehe Bild 34) herangezogen.

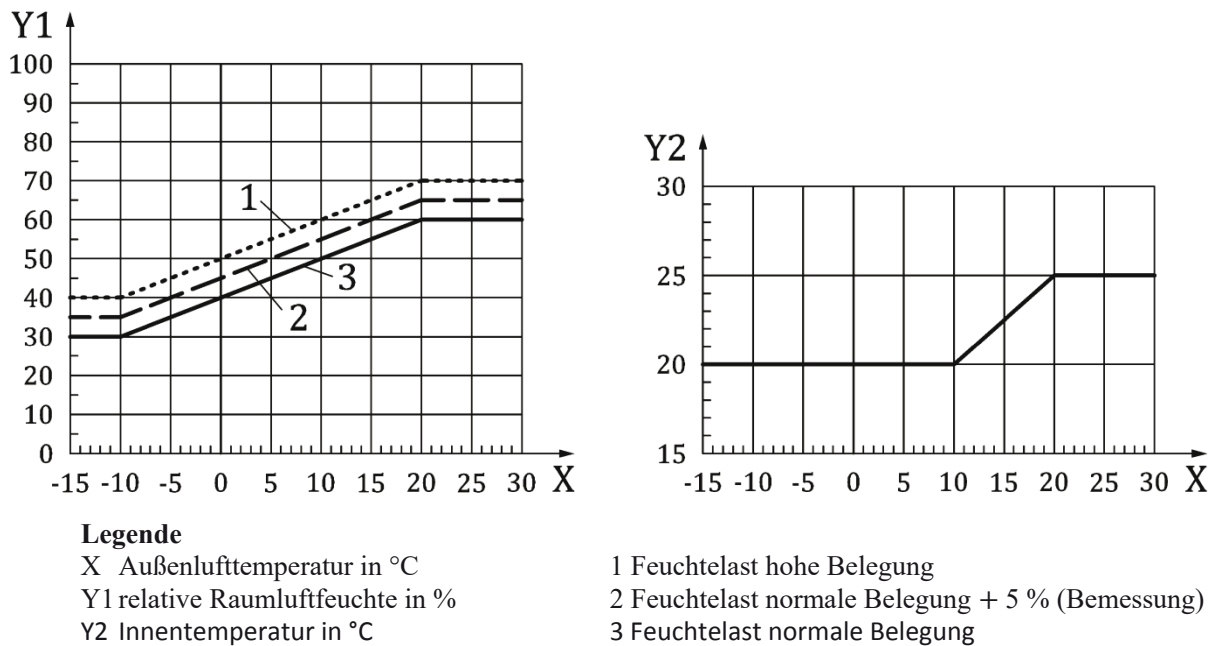


Bild 34: Raumlufftemperatur und -feuchte von Wohnräumen in Abhängigkeit von den Tagesmittelwerten der Außenlufttemperatur

Bezüglich der Anwendung von Bild 34 führt DIN 4108-3:2018-11 in Abschnitt D.3 „Raumseitige Randbedingungen“ aus: „Für nicht klimatisierte Wohn- oder wohnähnlich genutzte Gebäude ist, sofern nichts Genaueres bekannt ist, das Raumklima aus den gleitenden Mittelwerten der letzten 24 h der Außenlufttemperatur nach Bild D.1 zu verwenden.“ Das bedeutet, dass es sich gemäß DIN 4108-3:2018-11 bei den Angaben in Bild 34 um Tagesmittelwerte der Außenluft handelt. Demgegenüber empfiehlt DIN EN ISO 15927-4:2005-10 [4] jedoch die Verwendung von stündlichen meteorologischen Daten.

Zur Dokumentation und Verdeutlichung der Unterschiede aus Mittelwerten / Tagesmittelwerten / Stundenmittelwerten wurden entsprechend Analysen in graphischer Form aufbereitet und in Tabelle 19 zusammengestellt. Tabelle 19 zeigt die Verteilung der relativen Feuchte der Raumlufft ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in Spalte 1 für den Standort 38 und in Spalte 2 für den Standort 109. Diese beiden Standorte wurden für die exemplarische Darstellung gewählt, da der Standort 38 eine kalte und trockene Messstelle, der Standort 109 dagegen einen warmen und feuchten Ort dokumentieren. Es liegen damit die im Forschungsvorhaben aus meteorologischer Sicht am weitesten auseinander liegenden Positionen vor. Ausgewertet wurden die Daten der Jahre 2011 bis 2015.

Die Graphiken in Tabelle 19 geben folgende Zusammenhänge wider:

- Zeile 1 und 3: Verteilung der relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e , dargestellt als Regressionskurven
- Zeile 2 und 4: Verteilung der relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e , dargestellt aus Messwerten
- Zeile 1 und 2: Verteilung der relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e , dargestellt aus mittleren stündlichen Messwerten
- Zeile 3 und 4: Verteilung der relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e , dargestellt aus mittleren täglichen Messwerten.
- Als Grenzwerte bzw. Anhaltswerte wurden die Angaben aus DIN 4108-3:2018-11 [1] Abschnitt D.4 für normale Belegung, normale Belegung plus einen Sicherheitszuschlag von 5 % und hohe Belegung bzw. aus DIN 13788:2013-05 Anhang A [2] oder DIN EN 15026:2007-07 Anhang C [12] für normale Belegung und hohe Belegung eingefügt.

Tabelle 19: Relative Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e

	Spalte	
	1	2
Zeile	<p>relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e am Standort 38</p>	<p>relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e am Standort 109-A1</p>
1	<p>Regression aus stündlichen Mittelwerten der relative Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p>Regression aus stündlichen Mittelwerten der relative Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A</p>
2	<p>Messwerte von stündlichen Mittelwerten der relative Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p>Messwerte von stündlichen Mittelwerten der relative Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A</p>
3	<p>Regression aus täglichen Mittelwerten der rel. Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p>Regression aus täglichen Mittelwerten der rel. Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A</p>
4	<p>Tägliche Mittelwerte aus Messwerten der rel. Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p>Tägliche Mittelwerte aus Messwerten der rel. Feuchte der Raumluff ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A</p>

Aus den Darstellungen in Tabelle 19 können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- a) Die Verteilung der relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Zeile 1 und 3, ermittelt aus Regressionswerten, zeigt keinen linearen Verlauf, sondern hat die Form einer Ellipse.
- b) Einer gegebenen Außenlufttemperatur θ_e kann kein Einzahlwert der relativen Feuchte ϕ_i zugeordnet werden. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass während des Übergangs vom Winter hin zum Frühling, bedingt durch die vorangegangenen kalten Perioden, in der Luft weniger Wasser in Form von Wasserdampf enthalten ist (sein kann). Demgegenüber enthält die Luft nach der Phase hoher Temperaturen und hoher Feuchtemengen im Sommer auch in den folgenden kühleren Zeiten des Herbstes bei gleichen Temperaturen der Außenluft immer noch deutlich mehr Wasser (-dampf) im Vergleich zum Frühjahr.
- c) Die Kurvenverläufe der relativen Raumlufffeuchte ϕ_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Zeilen 1 und 3, die aus Stundenwerten bzw. aus Tagesmittelwerten der Regressionen erzeugt wurden, weisen keine nennenswerte Unterschiede auf. Dieser Umstand ist auf die Mittelwertbildung im Rahmen der Regression zurückzuführen.
- d) Die Umwandlung von stündlichen Messwerten (Zeile 2) in Tagesmittelwerte (Zeile 4) bzw. Regressionswerte (Zeile 1 und 3) ist mit einer Abflachung der Kurvenverläufe und damit mit einer Verringerung von Extremwerten verbunden. Während die Regressionskurven am Standort 38 (Spalte 1, Zeile 1 und 3) vollständig unter dem Grenzwert für normale Belegung nach DIN 4108-3:2018-11 liegen, sind die Kurven von Tagesmittelwerten aus Messdaten (Spalte 1, Zeile 4) zwischen normaler und hoher Belegung angesiedelt. Die Verläufe aus stündlichen Messwerten (Spalte 1, Zeile 2) liegen dagegen sogar am Standort 38 über der Grenzkurve der hohen Belegung. Deutlich drastischer sehen die Verhältnisse am Standort 109 aus. Hier ist bereits der Kurvenverlauf aus Regression (Spalte 2, Zeile 4) zwischen normaler und hoher Belegung angesiedelt, die Kurven von Tagesmittelwerten aus Messdaten (Spalte 2, Zeile 4) liegen während längerer Zeiträume über den Normwerten für hohe Belegung. Eine Steigerung ist bei der Auswertung von stündlichen Messwerten (Spalte 2, Zeile 2) festzustellen. In diesem Fall übersteigen die Realdaten die normativen Vorgaben für hohe Feuchte und das über einen langen Zeitraum.

Tabelle 20: Absolute Luftfeuchte der Raumluft c_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e

	Spalte	
	1	2
Zeile	<p style="text-align: center;">Absolute Luftfeuchte c_i in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e am Standort 38</p>	
1	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus den Regressions stündlicher Mittelwerte in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus den Regressions stündlicher Mittelwerte in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A</p>
2	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus stündlichen Messwerten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus stündlichen Messwerten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A1</p>
3	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus den Regressions täglicher Mittelwerte in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus den Regressions täglicher Mittelwerte in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A</p>
4	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus täglichen Mittelwerten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 38</p>	<p style="text-align: center;">Verteilung der absoluten Feuchte in der Raumluft c_i aus den Regressions täglicher Mittelwerte in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur θ_e in den Jahren 2011 bis 2015 am Standort der Station 109-A</p>

In Tabelle 20 wird der Zusammenhang zwischen den Zeiträumen der Messwerterhebung (Stunden- /Tagesmittel-/Regressionswerte) und der Spreizung der Kurvenverläufe in Bezug auf meteorologisch extrem weitauseinander liegende Standorte mit den Messpunkten 38 und 109 auch für die absolute Feuchte in der Raumluft c_i dargestellt:

- Auch für diese Auswertegröße ergibt die Darstellung von c_i über θ_e eine elliptische Form.
- Gleiche Werte der Außenlufttemperatur θ_e enthalten im Frühjahr und Herbst unterschiedlich große Mengen an Wasser.
- Der Vergleich der Zeilen 2 und 4 zeigt, dass sich die Regressionskurven aus Stundenwerten kaum von denen aus Tagesmittelwerten unterscheiden.
- In den Zeilen 2 und 4 wird ersichtlich dass es bei der Verwendung von Tagesmittelwerten im Vergleich zu Stundenwerten zu einer geringeren Spreizung von Extremwerten an einem Standort kommt. Die Verwendung von Tagesmittelwerten führt dementsprechend zu geringeren Ergebnissen und zu geringeren Anforderungen. Dies steht im Widerspruch zum sogenannten "ingenieurmäßigen" Denken, demzufolge Berechnungen so durchgeführt werden sollen, dass ein für die jeweilige Fragestellung ungünstiges Ergebnis und damit ein auf der „sicheren Seite“ liegende Resultat erzielt wird.

Da in DIN 4108-3:2018-11 Anhang D Bild D.1 der Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur θ_e und der relativen Feuchte der Raumluft ϕ_i nur für Tagesmittelwerte angegeben wird und nach Abschnitt D.3 das Raumklima aus den gleitenden Mittelwerten der letzten 24 h der Außenlufttemperatur gewonnen werden soll bedeutet dies, dass die solcherart erzielten Ergebnisse hinter Berechnungen auf der Basis von Stundenwerten zurückbleiben. Bevor DIN 4108-3:2018-11 Anhang D baurechtlich eingeführt wird, sollte daher zunächst das Sicherheitsniveau (Standicherheit / Gebrauchstauglichkeit) und das erforderliche Quantil definiert werden, um daraus die Dauer der zu untersuchenden Zeitreihe zu bestimmen. Wie die Auswertung erster Berechnungen in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des Deutschen Wetterdienstes zeigen, ist es auf der Basis der vorliegenden Messwert möglich Auswertegrößen der Innenluft aus den Daten der Außenluft zu generieren. Damit ließen sich Datenstränge der Innenluftkonditionen über längere als die durch die Messung belegten Zeiträume entwickeln. Des Weiteren ist zu prüfen, welches Zeitintervall (Stunden- / Tages- / Regressionswerte) bei den Berechnungen angesetzt werden soll und welcher Si-

cherheitsbeiwert daraus resultiert. Die Angaben in DIN 4108-3:2018-11 Anhang D, insbesondere in Bezug auf Bild D.1, sind mit einem Sicherheitszuschlag von 5 % in Hinblick auf die im vorliegenden Forschungsvorhaben ermittelten Ergebnisse nicht ausreichend.

7.2 Hygienischer Wärmeschutz

Der nichtlineare Zusammenhang zwischen der Raumlufffeuchte ϕ_i bzw. der absoluten Luftfeuchte c_i und der Außenlufttemperatur θ_e ist auch bei Untersuchungen zum hygienischen Wärmeschutz in Gebäuden zu berücksichtigen. Bei den derzeit baurechtlich eingeführten Nachweisen zum hygienischen Wärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 [8] handelt es sich um ein vereinfachendes Modell unter Verwendung stationärer Randbedingungen für Temperatur und Feuchte. Demgegenüber basiert die Realität jedoch auf zeitlich veränderlichen, d. h. instationären Verhältnissen. Der Diskrepanz zwischen stationären und instationären Verhältnissen war sich der zu dieser Zeit zuständige Normenausschuss wohl bewusst. Die Randbedingungen der Außenlufttemperatur basierten daher in DIN 4108:1952-07 [9] auf dem Mittelwert langjähriger Extremwerte. Damit war einerseits ein hinreichend großes Zeitfenster erfasst worden und andererseits resultierte aus der Betrachtung von Extremwerten ein ausreichendes Sicherheitsniveau.

Der Unterschied zwischen stationären und instationären Berechnungen beruht im Wesentlichen darauf, dass bei der Herleitung der Algorithmen für stationäre Untersuchung aus der Fourierrechnung Bauteil- bzw. Baustoffeigenschaften wie die spezifische Wärmespeicherkapazität c_{sp} , und Rohdichte ρ wegfallen. Die zeitliche Veränderung der Temperaturverteilung in Bauteilen und auf Bauteiloberflächen ist damit im Modell unabhängig von diesen Materialeigenschaften. Im Gegensatz dazu steht jedoch die Realität. Durch Materialien mit einer hohen spezifischen Wärmespeicherkapazität und hoher Rohdichte erfolgt die Veränderung von Temperaturen im Bauteil zeitverzögert. Für massive speicherfähige Konstruktionen, sogenannte thermisch träge Bauteile, bedeutet dies, dass sich kurzzeitige Schwankungen der Innen- oder Außentemperatur nicht oder nur geringfügig auf die Temperaturverteilung im Bauteil und auf den Oberflächen auswirken. Demgegenüber reagieren wenig speicherfähige, leichte Konstruktionen, d. h. thermisch dynamische Bauteile, sowohl im Inneren als auch auf der Oberfläche rasch auf Veränderungen angrenzender Temperaturen. Bei thermisch trägen Bauteilen ist eine länger andauernde Absenkung der Außenluft-

temperatur erforderlich um zu einer Verminderung der Verhältnisse im Bauteil und auf der Innenoberfläche zu kommen. Für solche Elemente liegt die kritische Phase der Schimmelpilzbildung daher in der kalten Zeit des Jahres, vornehmlich in den Monaten Januar oder Februar. Bei thermisch dynamischen Bauteilen genügt dagegen bereits ein vergleichsweise geringes Absinken der Außentemperatur um im Bauteil und auf der Innenoberfläche zu verminderten Temperaturen zu führen. Solche Verhältnisse stellen sich sehr häufig im Herbst ein. Dann führt eine kurzzeitige Abnahme der Außenlufttemperatur θ_e zu entsprechend zurückgehenden Temperaturen auf der Bauteilinnenoberfläche θ_{si} . Wie der Auswertung der Messwerte an den verschiedenen Standorten zu entnehmen ist, liegen zu diesen Zeiten häufig noch hohe Feuchtemengen in der Außen- und Raumluft vor. Damit liegt bei thermisch dynamischen Konstruktionen die kritische Phase der Schimmelpilzbildung auf Innenoberflächen nicht in der kalten Periode, sondern im Übergang von warm zu kalt in einem Zeitfenster von (Ende) August bis September, teilweise bis Oktober.

Eine Berechnung von Oberflächentemperaturen unter zeitlich veränderlichen Temperaturen kann nur mit einem instationären Wärmebrückenprogramm erfolgen. Zur Dokumentation des Verhaltens thermisch träger bzw. thermisch dynamischer Konstruktionen wurde eine zweidimensionale Ecke als geometrische Wärmebrücke mittels des instationären Wärmebrückenprogramms HEAT für zwei Bauteile berechnet. Als thermisch träge wurde eine Stahlbetonwand der Dicke $d = 0,14$ m mit einer außenliegenden Wärmedämmung angesetzt und als thermisch dynamisch ein Bauteil aus Mineralwolle. Die Abschätzung des Schimmelpilzrisikos unter instationären Randbedingungen erfolgte mit dem biohygrothermischen Modell von Prof. Sedlbauer [10]. Für die Untersuchung zur Schimmelpilzbildung wurde das Programm WUFI-Bio verwendet. Die Berechnungsergebnisse können für das thermisch träge Bauteil Bild 35 und für das thermisch dynamische Bauteil Bild 36 entnommen werden. Dabei kennzeichnet der Grenzwassergehalt den Feuchtezustand in einer Schimmelspore ab dem es zu einem Auskeimen bzw. zum Wachstum und der Vermehrung kommt. Der Wassergehalt in der Spore gibt dagegen die tatsächlich vorhandene Feuchte in der Spore an. Zum Auskeimen bzw. zum Wachstum der Mikroorganismen kommt es nach diesem Modell immer dann, wenn der Wassergehalt in der Spore den Grenzwassergehalt übersteigt.

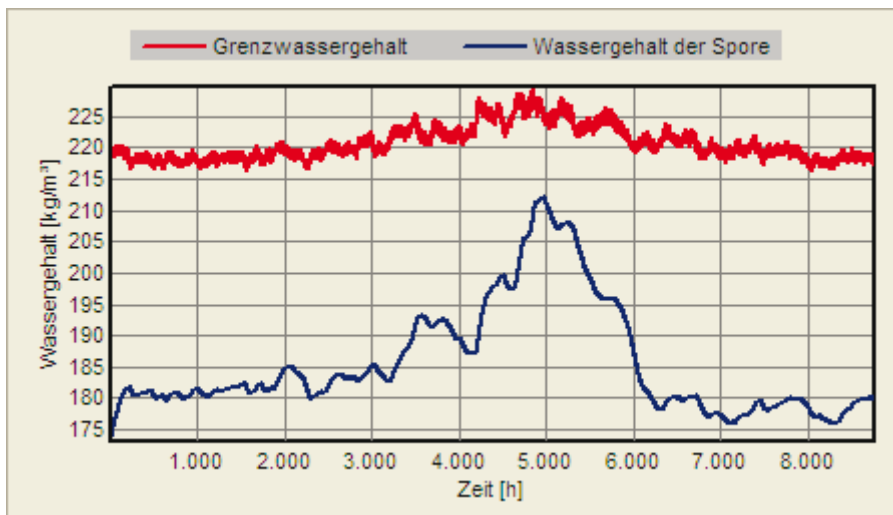


Bild 35: Untersuchung bei einer thermisch trägen Konstruktion

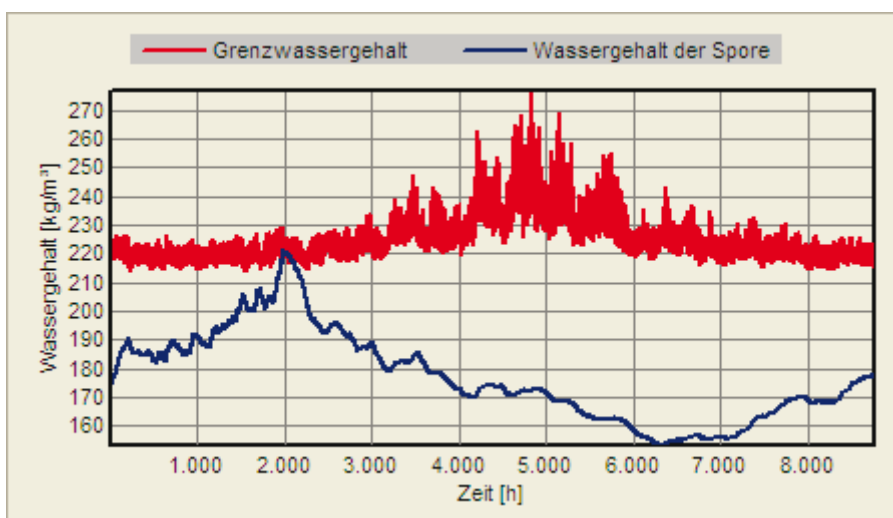


Bild 36: Untersuchung bei einer thermisch dynamischen Konstruktion

Bei der Interpretation dieser Bilder ist zu beachten, dass der Beginn der Berechnung mit dem 1. Juli angesetzt wurde. Damit liegt der kritische Zeitpunkt bei der simulierten thermisch trägen Konstruktion Ende Januar und beim untersuchten thermisch dynamischen Bauteil Mitte September. Wie den Darstellungen aus der Auswertung von Regressionskurven in den Tabellen 19 und 20 zu entnehmen ist, liegt der Zeitpunkt der maximalen relativen Raumlufffeuchte ϕ_i ebenfalls im Zeitfenster Juli bis September.

Hieraus folgt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Raumlufffeuchte ϕ_i und der Außenlufttemperatur θ_e die Gefährdung der Schimmelpilzbildung mindestens bei thermisch dynamischen Bauteilen nicht korrekt wiedergeben würde. Der hygienische Wärmeschutz würde bei einer solchen Vorgehensweise unterschätzt.

7.3 Positionierung von Möbeln und Einrichtungsgegenständen

Ein immer wiederkehrendes Thema beim hygienischen Wärmeschutz ist die Frage, ob Möbel direkt an der Raumseite wärmeübertragender Bauteile positioniert werden dürfen oder nicht. DIN Fachbericht 4108-8:2010-09 [11] führt dazu in Kapitel 6.5 aus: „Zur Schimmelpilzwachstumsvermeidung ist es vorteilhaft, große Möbel, wie z. B. Schrankwände, Sofas oder Betten, nicht an der Außenwand aufzustellen.“ Sollte dies nicht möglich sein, empfiehlt der Fachbericht entweder den Wärmeschutz der wärmeübertragenden Bauteile zu verbessern oder – zur Hinterlüftung – die Möbel mindestens 5 cm von den Außenbauteilen abzurücken.

Der Frage, ob Möbel generell von wärmeübertragenden Bauteile abgerückt werden sollten / müssen oder ob der Wärmeschutz dieser Bauteile für eine solche Entscheidung ein maßgebliches Kriterium ist, wurde im Gebäude am Standort 109 nachgegangen. Dort wurde vor einer Nordwand mit einer Fläche von ca. 7,5 m² eine Bücherwand mit rückseitiger Bekleidung eingebaut. Das Element steht mit einem Abstand von 10 cm vor der Außenwand und deckt deren raumseitige Oberfläche vollständig ab. Ein direkter Wärmestrom vom Raum an die Oberfläche des wärmeübertragenden Bauteils ist damit nicht möglich. Zur Messung der Auswertegrößen wurde sowohl in der Bücherwand als auch im Spalt zwischen Bücherwand und raumseitiger Oberfläche ein Thermohygrograph platziert.

Die Auswertegrößen der beiden Thermohygrographen sowie die der Außenbedingungen sind in den Bildern 37 bis 40 im Zeitraum 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2016 dargestellt. Die Bilder 37 und 38 zeigen die Temperaturverteilung θ vor und hinter der Bücherwand und die der Außenlufttemperatur, wobei Bild 38 zur Verdeutlichung der Effekte nur die Regressionskurven enthält. Analog dazu ist in den Bildern 39 und 40 die Verteilung der absoluten Luftfeuchte c vor und hinter der Bücherwand einschließlich der Außenwerte zu sehen. In Bild 40 werden, wie in Bild 38, zum besseren Verständnis der Vorgänge nur die Regressionskurven gezeigt.

Wie Bild 37 zu entnehmen ist, sind nicht nur die Innenraumtemperaturen im Vergleich zu den Amplituden der Außenwerte stark gedämpft, es zeigt sich auch, dass der Verlauf der Temperaturkurve hinter der Bücherwand niedrigere Ausschläge in Bezug auf die Schwankungsbreite und die Häufigkeit aufweist.; d. h. selbst eine 2 mm starke Spanplatte sorgt bereits für eine Dämpfung der Wärmeströme.

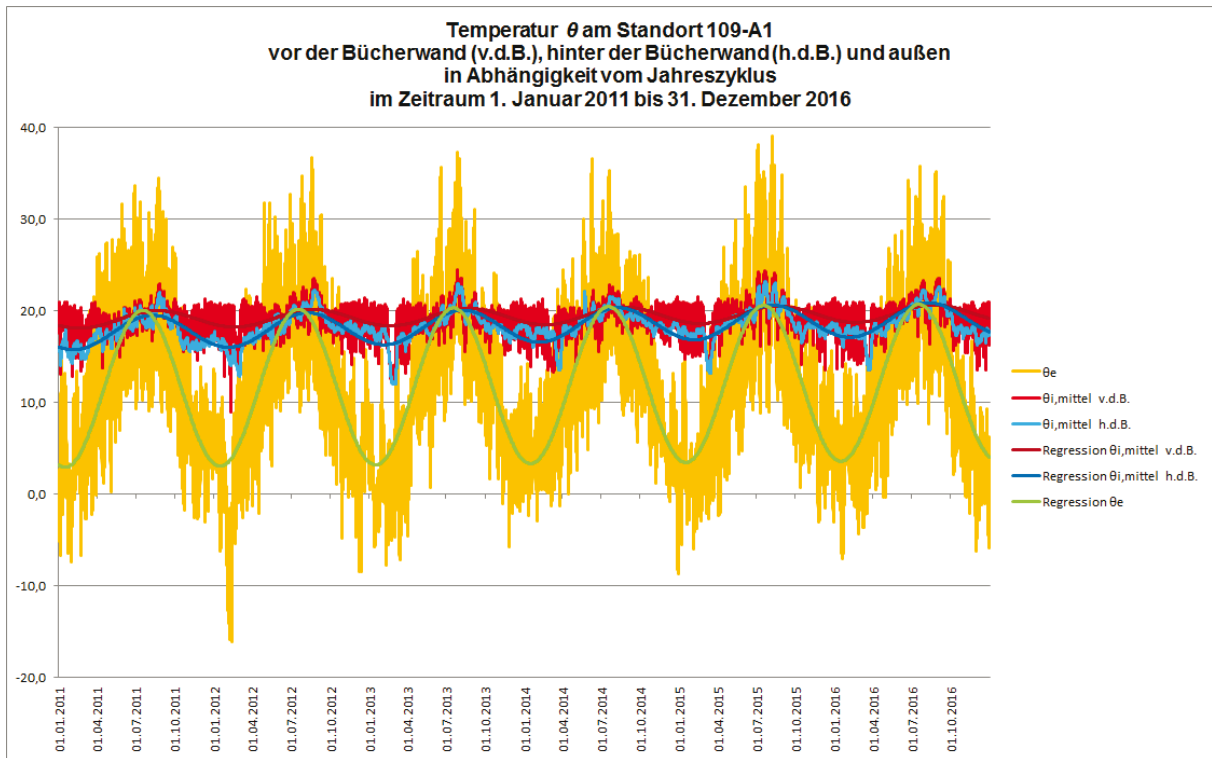


Bild 37: Temperatur vor und hinter der Bücherwand und der Außenluft

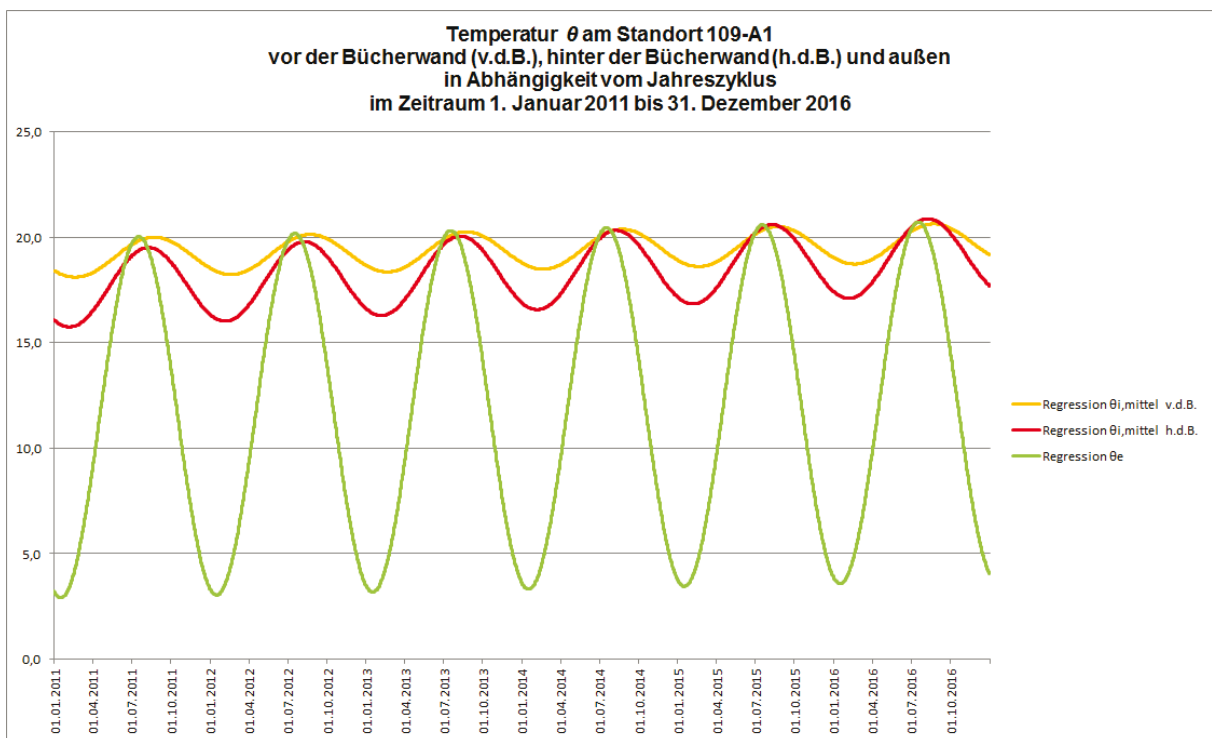


Bild 38: Regressionskurven der Temperatur vor und hinter der Bücherwand und der Außenluft

Die Bilder 39 und 40 zeigen, dass einerseits die absolute Luftfeuchte im Raum hinter den Werten der Außenluft zurückbleibt, andererseits aber auch hinter der Bücherwand eine geringere absolute Luftfeuchte gegeben ist im Vergleich zu den Verhältnissen vor der Bücherwand. Bei einer vollständigen Abdeckung der Außenwand durch die Bücherwand ist damit nicht nur die Temperatur im Spalt niedriger als im Raum sondern auch die absolute Feuchte. Daraus folgt, dass auch bei niedrigeren Temperaturen zwischen der Bücherwand und der Außenwand nicht mit einem gesteigerten Risiko einer Schimmelpilzbildung zu rechnen ist. Die Situation bleibt auch dann für die untersuchte Situation unkritisch wenn man die möglicherweise verminderte Oberflächentemperatur durch den Wärmeübergang von der Luft an die Bauteiloberfläche berücksichtigt.

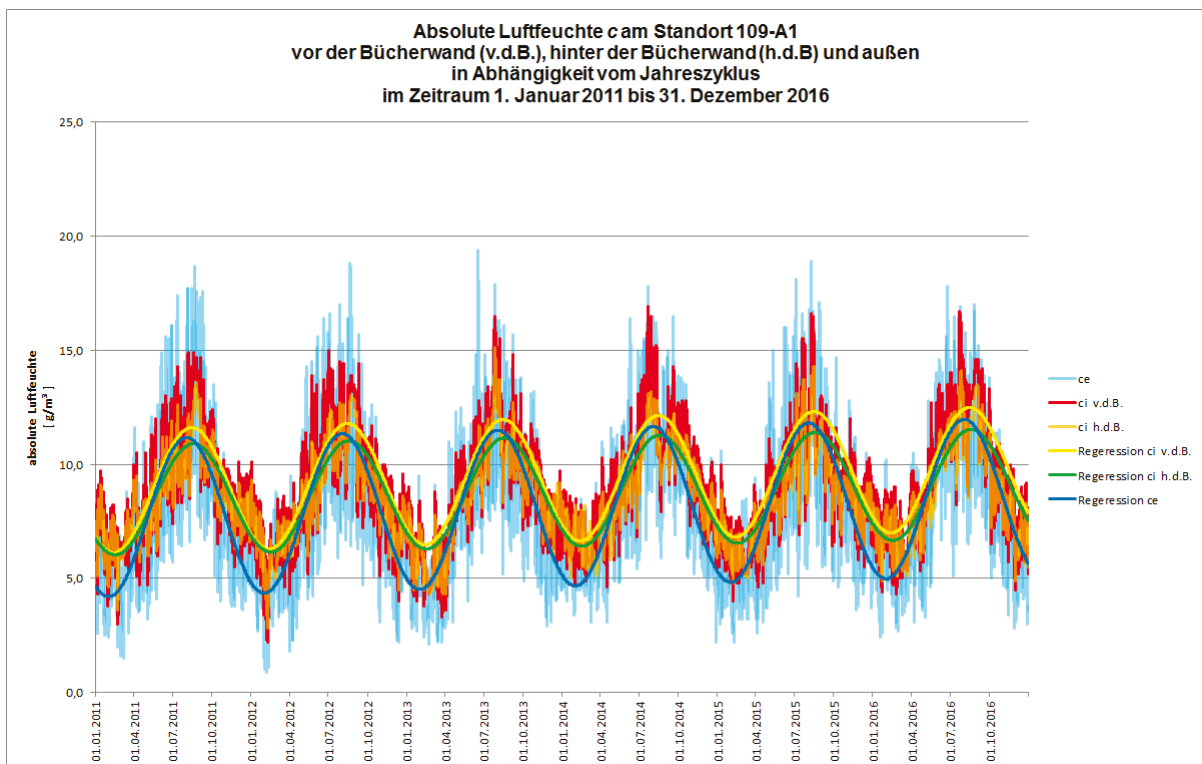


Bild 39: Absolute Feuchte vor und hinter der Bücherwand und der Außenluft

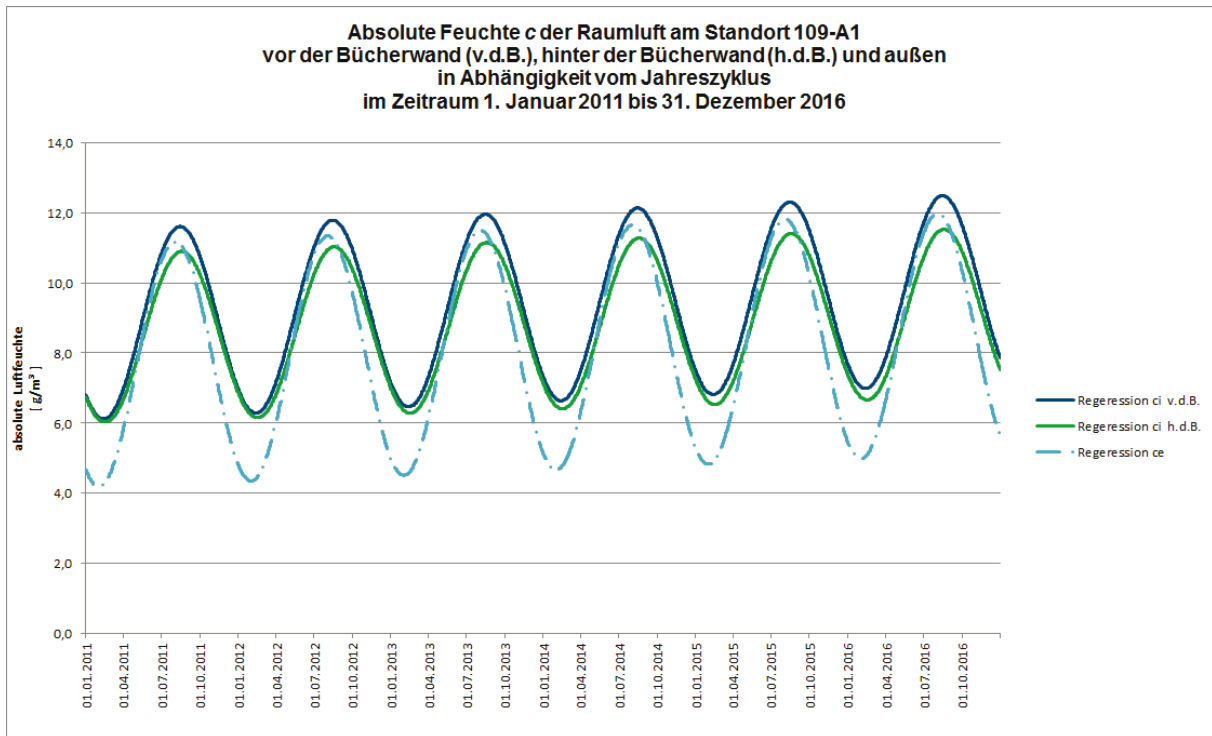


Bild 40: Regressionskurven der absoluten Feuchte vor und hinter der Bücherwand und der Außenluft

8 Fazit

Mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben zur Untersuchung der Temperatur und der absoluten Luftfeuchte in Gebäuden konnten erstmals Werte der Innenraumverhältnisse über einen Zeitraum ermittelt werden, die eine von einzelnen Jahren unabhängige mathematische Darstellung von Regressionskurven an verschiedenen Standort in der Bundesrepublik und von Gebäuden unterschiedlichen Baualters ermöglichen.

Die Auswertung der Daten führt zu folgenden Ergebnissen:

- Wie der Vergleich von drei exemplarisch ausgewählten Gebäuden unterschiedlichen Erstellungsdatums und unterschiedlicher haustechnischer Ausstattung zeigt, führt die Verschärfung von Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz zu einer Veränderung von Temperaturen und Luftfeuchte in dessen Innerem. Durch luftdichte neuzeitliche Bauweisen erhöht sich die absolute und relative Luftfeuchte in Gebäuden. Selbst bei einem Gebäude mit einer Anlage zur mechanischen Be- und Entlüftung liegt die Raumluftfeuchte über den Werten eines luftundichten Gebäudes aus dem Jahr 1960.

- Eine Einstufung von Gebäuden in Cluster auf der Grundlage ihres Baualters und die Ableitung spezifischer Algorithmen der Auswertegrößen für diese Gruppen ist nicht möglich. Zwar haben, wie in Abschnitt 3 aufgezeigt, das Baualter und die damit verbundene Qualität der Baustoffe und die Bauausführung großen Einfluss auf die Innenraumkonditionen, diese Effekte werden jedoch von Nutzereinflüssen und der Wirkung gebäudetechnischer Anlagen und Einrichtungen überlagert. Nutzerspezifisches Verhalten bezüglich Lüftungsgewohnheiten und gewünschter Raumlufttemperatur sowie Einflüsse von Heizungs- und Lüftungsanlagen beeinflussen die Auswertegrößen mindestens ebenso sehr wie die Bautechnik.
- Für Auswertegrößen der Außenluft (Temperatur, absolute Luftfeuchte, relative Luftfeuchte, Taupunkttemperatur, Partialdampfdruck) ist es möglich, deren zeitlichen Verlauf als Mittelwerte aus Regressionen in Form mathematischer Gleichungen darzustellen. Mit Ausnahme extremer Lagen wie der schwäbischen Alb, dem Alpengebiet oder dem Fichtel- und Erzgebirge genügt dabei ein Algorithmus.
- Hinsichtlich der Raumluft ist eine solche Vereinfachung, selbst auf der Basis von Regressionen nicht möglich.
- Der Vergleich der Auswertedaten aus Regressionen, Tagesmittel- und Stundenmittelwerten zeigt, dass bei einer Ausweitung der Mittelungszeiträume der Betrag der resultierenden Extremwerte immer kleiner wird. Daraus folgt, dass die Analyse von Extremereignissen immer unsicherer wird, je länger die Mittelungszeiträume sind.
- Vor der Festlegung von Randbedingungen bei Berechnungen für baurechtliche Nachweise sollte definiert werden, welcher Sicherheitsstatus als Grundlage dient. Es ist zu klären, ob es sich um einen Nachweis im Sinne der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit handelt.
- Aus dem Sicherheitsstatus ist das Sicherheitsniveau als Quantil und daraus die Länge der zu untersuchenden Zeitreihe zu ermitteln.
- Weiterhin ist zu bestimmen, ob die Berechnungen auf der Grundlage von Daten aus Mittelwertbildungen oder von Extremwerten durchgeführt werden.
- Bei Extremwerten ist festzulegen, ob Tagesmittelwerte oder Stundenwerte betrachtet werden.

- Je nachdem welches Zeitintervall gewählt wird (Mittelwerte aus Regression / Tagesmittelwerte / Stundenwerte), sind die Randbedingungen von Berechnungen mit einem Sicherheitswert zu beaufschlagen.
- Die Ableitung der relativen Feuchte der Raumlufte ϕ_i aus der Außenlufttemperatur θ_e führt zu keinem Einzahlergebnis. Die graphische Darstellung des Verhältnisses von θ_e / ϕ_i zeigt eine elliptische Form, sodass den Außenlufttemperaturen jeweils zwei Werte für relative Feuchten zugeordnet werden.
- Der gleiche Sachverhalt wie bei der relativen Luftfeuchte gilt auch für den Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur θ_e und der absoluten Feuchte der Raumlufte c_i .
- Aufgrund der Ellipse als Korrelation zwischen Außenlufttemperatur θ_e und absoluter bzw. relativer Luftfeuchte im Raum sowie der nicht vorhandenen Wärmespeicherkapazität, liegt bei thermisch dynamischen Bauteilen der kritische Zeitraum für die Auskeimung von Schimmelsporen bzw. für das Schimmelpilzwachstum in den Monaten August bis September.
- Bei thermisch trägen Bauteilen mit wärmespeicherfähigen Schichten liegt die kritische Phase der Schimmelbildung dagegen in der Regel in den Monaten Januar und Februar.
- Bei Gebäuden mit einem zeitgemäßen baulichen Wärmeschutz spielt eine Behinderung des Wärmestroms aus dem Raum hin zu den wärmeübertragenen Bauteilen keine Rolle in Bezug auf den hygienischen Wärmeschutz. Die Position von Möbeln und Einrichtungsgegenständen kann daher frei gewählt werden.

9 Zusammenfassung

Die Auswertung von Messwerten der Temperatur und Feuchte in der Raumlufte zeigt, dass in neuzeitlichen Gebäuden, im Vergleich zu Gebäuden aus den fünfziger und sechziger Jahren, mit veränderten Verläufen der Temperatur und Luftfeuchte gerechnet werden muss. Bedingt durch die größere Luftdichtheit der Hülle, weisen die energiesparenderen Gebäude höhere Werte der absoluten und relativen Feuchte der Raumlufte auf. Selbst durch den Einsatz gebäudetechnischer Anlagen zur Be- und Entlüftung gelingt es bei luftdichten Gebäuden nicht, den Wasserdampfgehalt in der Raumlufte durch den Austausch trockener Außenluft gegen feuchte Innenluft in gleicher Weise zu senken wie dies in einem älteren, luftundichten Gebäude der Fall ist.

Dagegen zeigt der Vergleich der aus den Messwerten abgeleiteten Regressionskurven, dass es, mit Ausnahme von meteorologisch extremen Gebieten, möglich ist für Auswertegrößen der Außenluft im Bundesgebiet Parameter festzulegen mit deren Hilfe der zeitliche Verlauf von Regressionskurven unabhängig von der Region bestimmt werden kann. Demgegenüber machen die untersuchten Kurvenverläufe deutlich, dass eine Standardisierung der Parameter von Bestimmungsgleichungen für die Auswertegrößen der Raumluft nicht möglich ist. Bei Innenraumverhältnissen weisen das Nutzerverhalten sowie die Ausstattung mit gebäudetechnischen Anlagen und Einrichtungen einen so hohen Einfluss auf, dass eine Clusterbildung, z. B. unter Bezug auf das Baualter, zu keinem befriedigenden Ergebnis führt.

Außerdem zeigen die ausgewerteten Daten, dass es entgegen der Darstellung in DIN 4108-3:2018-10, DIN EN ISO 13788:2013-05 und DIN EN ISO 15026:2007-07 nicht möglich ist, einer definierten Außenlufttemperatur ein Einzahlergebnis der relativen oder absoluten Feuchte der Raumluft zuzuordnen. Statt eines linearen Zusammenhangs zwischen θ_e / ϕ_i zeigt sich hier eine Korrelation in Form einer Ellipse. Stellt man darüber hinaus das Verhältnis der Außenlufttemperatur zur relativen bzw. absoluten Feuchte der Raumluft auf der Basis von Regressionen, von mittleren Tageswerte oder von mittleren Stundenwerten dar dann wird deutlich, dass eine Verlängerung des Zeitintervalls der Mittelwertbildung mit einer Verminderung der daraus abgeleiteten Extremwerte verbunden ist. Diese Ergebnisse führen wiederum zu dem Schluss, dass es vor der Festlegung von Randbedingungen zur Berechnung baurechtlich relevanter Nachweise, insbesondere bei Simulationen, erforderlich ist, das Sicherheitsniveau zu bestimmen; d. h. es ist im Sinn von DIN EN 1990 zu klären, ob es sich um eine Berechnung im Sinne der Tragfähigkeit oder um eine Berechnung im Sinne der Gebrauchstauglichkeit handelt. Aus dem daraus resultierenden Ansatz folgt dann das relevante Quantil und aus der statistischen Nutzungsdauer der Konstruktion oder des Gebäudes der auszuwertenden Zeitraum. Außerdem muss, in Abhängigkeit der Zeiteinheit (Mittelwerte / Tagesmittelwerte / Stundenmittelwerte), ein Sicherheitszuschlag definiert werden, um den Effekt verminderter Amplituden bei größeren Mittelungszeiträumen zu kompensieren.

Der elliptische Zusammenhang zwischen Außenlufttemperatur und Raumluftfeuchte führt darüber hinaus zu dem Schluss, dass für thermisch dynamische Konstruktionen das größte Risiko für die Auskeimung bzw. das Wachstum von Schimmelpilzsporen

in der Zeit von August bis September liegt, bei thermisch trägen Bauteilen dagegen im Januar bis Februar.

Bezüglich der Positionierung von Möbeln oder Einrichtungsgegenständen ist den Untersuchungen zu entnehmen, dass es trotz verminderter Wärmeströme vom Raum zur Oberfläche wärmeübertragender Bauteile bei Gebäuden mit einem zeitgemäßen baulichen Wärmeschutz zu keinem vermehrten Risiko der Schimmelpilzbildung kommt. Anforderungen an die Positionierung von Möbeln und Einrichtungsgegenständen in Bezug auf die wärmeübertragenden Bauteile sind daher in solchen Fällen entbehrlich.

Literaturangaben:

- [1] DIN 4108-3:2018-10 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [2] DIN EN ISO 13788:2013-05 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren
- [3] EnEV 2007 - Energieeinsparverordnung für Gebäude
Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)
vom 24. Juli 2007
- [4] DIN EN ISO 15927-4:2005-10 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden . Berechnung und Darstellung von Klimadaten . Teil 4: Stündliche Daten zur Abschätzung des Jahresenergiebedarfs für Heiz- und Kühlsysteme
- [5] Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05. 2016
- [6] DIN EN 1990:2010-12 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [7] W. Cämmerer, R. Neumann: Beuth-Kommentare – Wärmeschutz im Hochbau – Kommentar zu DIN 4108 Teil 1 bis Teil 5, Herausgeber DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 1992
- [8] DIN 4108-2:2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- [9] DIN 4108:1952-07 Wärmeschutz im Hochbau
- [10] Klaus Sedlbauer: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Universität Stuttgart 2001
- [11] DIN Fachbericht 4108-8:2010-09 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden

- [12] DIN EN 15026:2007-07 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation

Anhang A: Baujahr der untersuchten Gebäude und Einbau der Fenster

Tabelle A.1: Baujahr und Datum des Einbaus der Fenster während des Messzyklus

Standort	Baujahr des Gebäudes	Fenster			Einbaujahr der Fenster	Anmerkung
		Einscheibenverglasung	Kastenfenster	Isolierverglasung		
1	1949 / 1950			x	2010 Januar	
2	1850			x	1995	
3	1942			x	1997	
4	1969			x	1986	
5	1964			x	1970	
6	2000			x	2000	
7	1910			x	2000	
8	1956			x	1999	
9	1898			x	1962	
10	?			?	1994	
11	1935			x	1975	
12	1994			x	1994	Holz-Fertighaus mit Fußbodenheizung
13	1856			x	1982	
14	1990			x	1990	
15	1895 (Umbau 1995)			x	1995	
16	2004			x	2004	
17	1958			x	unbekannt	
18	1960	x			1960	
19	1991			x	1991	
20	1968			x	1988	
21	1975			x	1990	
22	2003			x	2003	
23	1991			x	1991	
24	1998			x	1998	
25	2010			x	2010	
26	1995			x	1995	
27	1982			x	10/1982	
28	1988			x	1988	
29	1955			x	1975	
30	1989	?	?	?	?	
31	1991			x	1992	

32	1912	x			?	
33	2009			x	2009	
34	1970			x	2002	
35	1961			x	1999	
36	1991			x	1991	
37	ca. 1810	x			?	Heizen durch Kohle-/Holz - Kaminofen
38	1960			x	1976	
39	1933			x	2000	
40	2002			x	2002	
41	1950			x	1990	
42	1960			doppelt	1986	
43	1999			zweifach	1999	
44	1924			x	1985	
45	1969 / 1970			x	1990	
46	1976			Verbundfenster	1976	
47	1931	?	?	?	?	
48	1800			x	1997	
49	1896			x	1995	
50	1920			x	1995	Undichte Fenster
51	1928			x	2000	
52	1934			Verbundfenster	1977	
53	1994			x	1994	
54	1905				1999	
55	1996				1996	
56	1981 (Umbau)				2000	
57	1750		x		1985	

Anhang B: Baujahr der untersuchten Gebäude und Einbau der Fenster

Tabelle 1: Baujahr und Datum des Einbaus der Fenster sortiert nach Baualtersklassen (BAkl.)

BAkl.	Standort	Baujahr des Gebäudes	Fenster			Einbaujahr der Fenster
			Einscheibenverglasung	Kastenfenster	Isolierverglasung	
1	2	1850			x	1995
	7	1910			x	2000
	9	1898			x	1962
	13	1856			x	1982
	15	1895			x	1995
	37	ca. 1810	x			?
	48	1800			x	1997
	49	1896			x	1995
	57	1750		x		1985
2	3	1942			x	1997
	11	1935			x	1975
	32	1912	x			?
	39	1933			x	2000
	44	1924			x	1985
	47	1931	?	?	?	?
	50	1920			x	1995
	51	1928			x	2000
	52	1934			Verbundfenster	1977
	54	1905				1999
3	1	1949 / 1950			x	2010 Januar
	4	1969			x	1986
	5	1964			x	1970
	8	1956			x	1999
	17	1958			x	unbekannt
	18	1960	x			1960
	20	1968			x	1988
	29	1955			x	1975
	34	1970			x	2002
	35	1961			x	1999
	38	1960			x	1976
	41	1950			x	1990
	42	1960			doppelt	1986
45	1969			x	1990	
4	6	2000			x	2000

	12	1994			x	1994
	14	1990			x	1990
	19	1991			x	1991
	21	1975			x	1990
	23	1991			x	1991
	24	1998			x	1998
	26	1995			x	1995
	27	1982			x	10/1982
	28	1988			x	1988
	30	1989	?	?	?	?
	31	1991			x	1992
	36	1991			x	1991
	43	1999			zweifach	1999
	46	1976			Verbund- fenster	1976
	53	1994			x	1994
	55	1996				1996
	56	1981				2000
5	16	2004			x	2004
	22	2003			x	2003
	25	2010			x	2010
	33	2009			x	2009
	40	2002			x	2002
6	10	?			?	1994

Anhang C: Verteilung der Temperatur und des absoluten Wassergehaltes aus Regression an den ausgewerteten Standorten in Abhängigkeit der Baualtersklasse (BAkl.)

Tabelle C.1: Verteilung der Temperatur in Abhängigkeit der Baualtersklasse

BAkl.	Standort	Baujahr des Gebäudes	Temperatur							
			$\bar{\theta}_i$	$\hat{\theta}_i$	$\check{\theta}_i$	$\hat{\theta}_e$	$\check{\theta}_e$	$\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_e$	$\check{\theta}_i - \check{\theta}_e$	$\hat{\theta}_i - \check{\theta}_e$
1	9	1898	20,73	21,45	19,97	18,58	0,45	2,87	19,52	21,00
	15	1895	18,35	20,93	15,78	18,35	0,09	2,58	15,69	20,84
	48	1800	21,12	22,32	19,86	20,03	-0,92	2,29	20,78	23,24
	49	1896	20,76	21,25	20,24	18,69	-0,38	2,56	20,62	21,63
	57	1750	22,23	22,66	21,81	19,15	-0,37	3,51	22,18	23,03
2	3	1942	20,3	21,27	19,28	18,86	1,17	2,41	18,11	20,10
	51	1928	19,94	20,97	18,88	18,28	-2,43	2,69	21,31	23,40
	52	1934	19,28	20,59	17,90	20,08	-0,45	0,51	18,35	21,04
3	1	1949	21,31	22,37	20,16	18,52	1,36	3,85	18,80	21,01
	4	1969	21,38	22,15	20,56	19,27	1,04	2,88	19,52	21,11
	18	1960	22,46	24,08	20,61	19,23	1,25	4,85	19,36	22,83
	20	1968	20,84	21,52	20,15	19,25	0,74	2,27	19,41	20,78
	29	1955	22,09	23,45	20,92	19,31	-1,39	4,14	22,31	24,84
	34	1970	22,00	23,69	20,30	19,03	-2,25	4,66	22,55	25,94
	38	1960	22,23	22,66	21,83	19,14	-3,98	3,52	25,81	26,64
	42	1960	22,55	23,42	21,63	18,96	-0,98	4,46	22,61	24,40
4	6	2000	20,49	22,13	18,76	18,68	0,28	3,45	18,48	21,85
	12	1994	23,84	24,36	23,28	19,30	0,70	5,06	22,58	23,66
	23	1991	22,52	23,36	21,72	19,31	1,86	4,05	19,86	21,50
	24	1998	20,91	23,94	17,93	19,17	-0,33	4,77	18,26	24,27
	26	1995	20,94	22,07	19,70	19,42	0,73	2,65	18,97	21,34
	27	1982	21,20	21,91	20,46	19,06	-1,10	2,85	21,56	23,01
	30	1989	21,44	22,59	20,22	14,19	-4,98	8,40	25,20	27,57
	31	1991	21,84	22,61	21,06	19,61	-0,99	3,00	22,05	23,60
	46	1976	21,49	23,06	19,92	20,06	-0,67	3,00	20,59	23,73
	53	1994	21,10	22,04	20,11	18,95	-1,82	3,09	21,93	23,86
	55	1996	24,26	25,25	23,26	20,04	0,73	5,21	22,53	24,52
5	16	2004	21,33	22,82	19,79	18,81	0,10	4,01	19,69	22,72
	22	2003	22,56	23,10	22,01	18,24	0,38	4,86	21,63	22,72
	25	2010	23,52	24,44	22,50	19,85	0,97	4,59	21,53	23,47
	40	2002	21,66	22,79	20,52	19,84	0,26	2,95	20,26	22,53
	109	2009	20,17	21,51	18,79	21,55	2,05	-0,04	16,74	19,46

Tabelle C.2: Verteilung des absoluten Wassergehaltes in Abhängigkeit der Baualtersklasse

BAkl.	Standort	Baujahr des Gebäudes	Absoluter Wassergehalt							
			\bar{c}_i	\hat{c}_i	\check{c}_i	\hat{c}_e	\check{c}_e	$\hat{c}_i - \hat{c}_e$	$\check{c}_i - \check{c}_e$	$\hat{c}_i - \check{c}_e$
1	9	1898	9,25	12,61	5,82	12,21	4,10	0,40	1,72	8,51
	15	1895	9,15	12,30	6,03	12,10	4,05	0,20	1,98	8,25
	48	1800	9,33	13,23	5,36	11,69	3,89	1,54	1,47	9,34
	49	1896	8,87	11,70	6,03	11,75	3,72	-0,05	2,31	7,98
	57	1750	8,18	11,05	5,24	11,06	3,54	-0,01	1,70	7,51
2	3	1942	8,62	12,30	4,87	11,90	4,24	0,40	0,63	8,06
	51	1928	7,67	10,81	4,45	10,71	3,39	0,10	1,06	7,42
	52	1934	8,30	11,59	4,94	11,05	3,52	0,54	1,42	8,07
3	1	1949	10,28	13,04	7,47	11,64	4,34	1,40	3,13	8,70
	4	1969	7,77	11,21	4,27	11,44	4,06	-0,23	0,21	7,15
	18	1960	8,49	12,24	4,68	11,79	4,12	0,45	0,56	8,12
	20	1968	9,74	12,06	7,37	11,39	3,99	0,67	3,38	8,07
	29	1955	9,00	12,14	5,83	11,90	3,52	0,24	2,31	8,62
	34	1970	9,52	11,51	7,48	11,32	3,06	0,19	4,42	8,45
	38	1960	7,95	11,23	4,63	11,10	2,77	0,13	1,86	8,46
	42	1960	8,53	11,30	5,70	11,02	3,76	0,28	1,94	7,54
4	6	2000	9,77	11,92	7,61	11,84	4,11	0,08	3,50	7,81
	12	1994	8,82	11,92	5,66	11,43	3,91	0,49	1,75	8,01
	23	1991	9,06	11,99	6,07	11,82	4,22	0,17	1,85	7,77
	24	1998	9,01	11,45	6,52	11,25	3,76	0,20	2,76	7,69
	26	1995	9,86	11,87	7,81	11,66	4,07	0,21	3,74	7,80
	27	1982	10,44	12,20	8,66	11,36	3,58	0,84	5,08	8,62
	30	1989	7,76	10,83	4,64	9,24	2,72	1,59	1,92	8,11
	31	1991	9,25	11,30	7,16	11,34	3,63	-0,04	3,53	7,67
	46	1976	9,54	13,18	5,85	11,93	3,57	1,25	2,28	9,61
	53	1994	10,26	12,94	7,53	11,44	3,29	1,50	4,24	9,65
	55	1996	11,30	13,36	9,14	11,18	3,83	2,18	5,31	9,53
5	16	2004	8,97	11,54	6,37	11,64	3,94	-0,10	2,43	7,60
	22	2003	7,99	10,84	5,07	10,94	3,93	-0,10	1,14	6,91
	25	2010	9,98	11,73	8,23	11,56	4,05	0,17	4,18	7,68
	40	2002	7,71	11,06	4,29	11,10	3,85	-0,04	0,44	7,21
	109	2009	9,44	12,24	6,61	11,91	4,12	0,33	2,49	8,12