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 bei Gebäuden mit und ohne gebäudetechnische Anlagen zur Lüftung und Kühlung

Durchführung der Untersuchungen im Auftrag des
Steinbeis-Transferzentrums Bauen.Energie.Umwelt

gefördert durch das
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Geschäftszeichen
P 52-5- 5.115-1447.14

Forschungsvorhaben

Untersuchung zu zeitlichen Schwankungen der Feuchte in Innenräumen im Hinblick auf den Feuchtetransport durch Bauteile und die Vermeidung von Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen bei Gebäuden mit und ohne gebäudetechnische Anlagen zur Lüftung und Kühlung

Geschäftszeichen
P 52-5- 5.115-1447.14

Forschende Stelle und Auftraggeber:

Steinbeis-Transferzentrum Bauen.Energie.Umwelt
Artilleriestraße 9
32427 Minden

Der Bericht umfasst: 32 Seiten Text
16 Seiten Anhänge

Für die Bearbeitung:

Minden, den 16. Dezember 2024

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ackermann

Inhalt

1. Einleitung

2. Mess- und Auswerteprogramm
2.1 Standorte
2.2 Einflüsse auf Innenraumkonditionen
2.3 Messgeräte
2.4 Auswertezeiträume
2.5 Auswertegrößen
2.6 Ansätze zur Datenauswertung
2.6.1 Regressionskurven
2.6.2 Vorgaben aus nationalen und internationalen Normen
2.7 Messstationen
2.7.1 Referenzgebäude
2.7.2 Passivhäuser und Energiesparhäuser

3 Analyse der Messergebnisse
3.1 Untersuchung der Regressionskurven
3.1.1 Raumlufttemperaturen
3.1.2 Absolute Feuchte
3.2 Untersuchung der Messwerte
3.2.1 Raumlufttemperatur ϑ_i
3.2.2 Absolute Luftfeuchte in Räumen c_i
3.2.3 Feuchtelast

4 Fazit

Literaturangaben

Anhang A Standortbezogene Verteilung der Temperaturen
Anhang B Standortbezogene Verteilung der absoluten Feuchte
Anhang C Standortbezogene Verteilung der Feuchtelast
Anhang D Standortbezogene Verteilung der Mess- und Vergleichsgrenzwerte

1 Einleitung

Um die auf nationaler und internationaler Ebene gesteckten Ziele des Klimaschutzes zu erreichen ist es erforderlich, dass neben den Sektoren Industrie und Verkehr auch der Baubereich einen Beitrag leistet. Das Instrument zur Verminderung des Ausstoßes klimaschädlicher Schadstoffe liegt bei Gebäuden in verstärkten Anstrengungen zur Energieeinsparung. Dieses Ziel soll durch verschärfte gesetzliche Anforderungen an den baulichen und den anlagentechnischen Wärmeschutz erreicht werden. Beim baulichen Wärmeschutz bedeutet diese eine Verringerung der Verluste über wärmeübertragende Bauteile sowie eine größere Luftdichtheit der Gebäudehülle und beim anlagentechnischen Wärmeschutz einen vermehrten Einsatz gebäudetechnischer Anlagen und Einrichtungen, wie z. B. den Einbau von Anlagen zur mechanischen Be- und Entlüftung.

Nicht geklärt ist in diesem Zusammenhang die Frage, ob die verstärkten Anstrengungen beim energiesparenden Wärmeschutz auch zu veränderten Randbedingungen bei der Untersuchung anderer bauphysikalische Anforderungen und Nachweisen des baulichen Wärme- und Feuchteschutz führen, die sich z. B. aus veränderten Raumlufttemperaturen und Feuchten ergeben. Diese Problematik betrifft beispielsweise den hygienische Wärmschutz, also die Vermeidung der Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen, oder die Tauwasserbildung in Bauteilen bzw. auf Bauteiloberflächen.

Mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben soll daher untersucht werden, ob die verstärkten Maßnahmen zur Energieeinsparung Auswirkungen auf die Temperatur und Feuchtigkeit in der Raumluft haben und wie der Zusammenhang aussieht zwischen Messergebnissen dieser beiden Parameter in Gebäuden und den Empfehlungen von Grenzwertkurven in nationalen und internationalen Normen des Wärme- und Feuchteschutzes.

Zur Analyse der Innenraumkonditionen wurden in einem ersten Untersuchungsprogramm in Gebäuden unterschiedlichen Alters an ursprünglich 57 Standorten in der Bundesrepublik über einen Zeitraum von 8 Jahren Daten der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte in Räumen gesammelt. In dem vorliegenden zweiten Arbeitsschritt wurde der Frage nachgegangen, ob die Temperatur- und Feuchtezustände in Gebäuden nicht nur von der Baualtersklasse, sondern auch von der technischen Ausstattung in Hinblick auf gebäudetechnische Anlagen und Einrichtungen sowie von deren Luftdichtheit abhängen. Hierzu erfolgte die Erhebung von

Messdaten zu Temperatur und Feuchte in Gebäuden, die sowohl mit Anlagen zur mechanischen Be- und Entlüftung ausgestattet sind, als auch einer Luftdichtheitsprüfung in Form einer Druckdifferenzenmessung unterzogen wurden. Beim zweiten Messprogramm handelte es sich um Passivhäuser und um Energiesparhäuser, also um Gebäude mit Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz die deutlich über den gesetzlichen Anforderungen liegen.
Durch einen Vergleich der Ergebnisse aus „älteren Bestandsbauten“ des ersten Messprogramms mit den Daten aus „energieeffizienteren Gebäuden“ der zweiten Messreihe soll den Fragen nachgegangen werden, ob energiesparende Gebäude andere – höhere Werte – der Temperatur und Feuchte aufweisen als konventionell errichte und wie die Messdaten des zweiten Zyklus im Vergleich mit Grenzwerten aus nationalen und internationalen Regelwerken des Feuchteschutzes zu interpretieren sind. Bei der letzteren Betrachtung beziehen sich die Vergleich im Wesentlichen auf Grenzwerte der hygrischen Bauphysik unter Verwendung instationärer Randbedingungen zur Simulation von Feuchtezuständen auf Bauteiloberflächen und im Bauteilinneren nach DIN 4108-3:2024-03, DIN ISO EN 13788:2013-05 und DIN EN ISO 15026:2023-12.

2 Mess- und Auswerteprogramm

2.1 Standorte

Im Gegensatz zum ersten Messprogramm, bei dem die Teilnehmer aus einer Gruppe ehrenamtlicher Mitarbeiter des DWD gewonnen wurden, war es bei der Untersuchung von Temperaturen und Feuchten in Gebäuden mit gebäudetechnischen Anlagen nicht möglich auf diesen Personenkreis zurückzugreifen, da die Gebäude der ehrenamtlichen DWD Mitarbeiter nicht über diesen Ausrüstungsstandard verfügen. Durch Nachfrage bei Architekten die sich mit dem Bau von Passivhäusern beschäftigen, konnten fünf Eigentümer dieses Gebäudetyps zur Teilnahme am Messprogramm gewonnen werden. Dabei lagen drei Passivhäuser im Stadtgebiet von Hannover (Stationen 206 bis 208), das vierte befindet sich 15 km süd-westlich von Hannover am Rande eines Mittelgebirgszugs (Station 209) während das fünfte Passivhaus in der Nähe von Mannheim im Oberrheingraben steht (Station 63).

Außerdem führte der Kontakt zu einem renommierten Unternehmen der Holzfertighausbranche dazu, dass sich aus diesem Bereich vier Eigentümer von Gebäude mit mechanischer Be- und Entlüftung zur Teilnahme am Messprogramm bereit erklärten. Diese Gebäude sind zwar keine Passivhäuser, weisen jedoch in Bezug auf den Energieverbrauch einen Standard als Energiesparhäuser auf und liegen damit deutlich unter den gesetzlichen Anforderungen zur Energieeinsparung nach EnEV bzw. GEG. Zwei der untersuchten Gebäude befinden sich im Oberrheingraben zwischen Baden-Baden und Freiburg (Stationen 201 und 2023), das dritte (Station 202) liegt bei Ludwigsburg (Baden-Württemberg), während sich der vierte Standort östlich von Schwäbischer Alb und Schwarzwald an der Donau befindet (Station 204).
Für den Vergleich der Untersuchungsergebnisse aus dem ersten und zweiten Zyklus erfolgte die Wahl der Standorte des ersten Messprogramms unter dem Aspekt ihrer geografischen Lage. Mit der Auswahl der Messpunkte soll ein Querschnitt unterschiedlicher geographischer Verhältnisse in der Bundesrepublik wie folgt abgebildet werden:

Küstenklima:	Station 9
Kontinentales Klima:	Station 53
Mittelgebirgsregion:	Station 51
Oberrheingraben:	Station 109-A1
Alpenregion:	Station 38

Dieser Ansatz wurde gewählt, da die Außenkonditionen großen Einfluss auf die Raumluft haben und über diese Vorgehensweise den unterschiedlichen Verhältnissen im Bundesgebiet Rechnung getragen werden soll.
Zum Vergleich der Innendaten mit den Daten der Außenluft wurde bei den Angaben zur Umgebungsluft jeweils auf die dem Messpunkt am nächsten gelegene Station des Deutschen Wetterdienstes DWD zurückgegriffen.

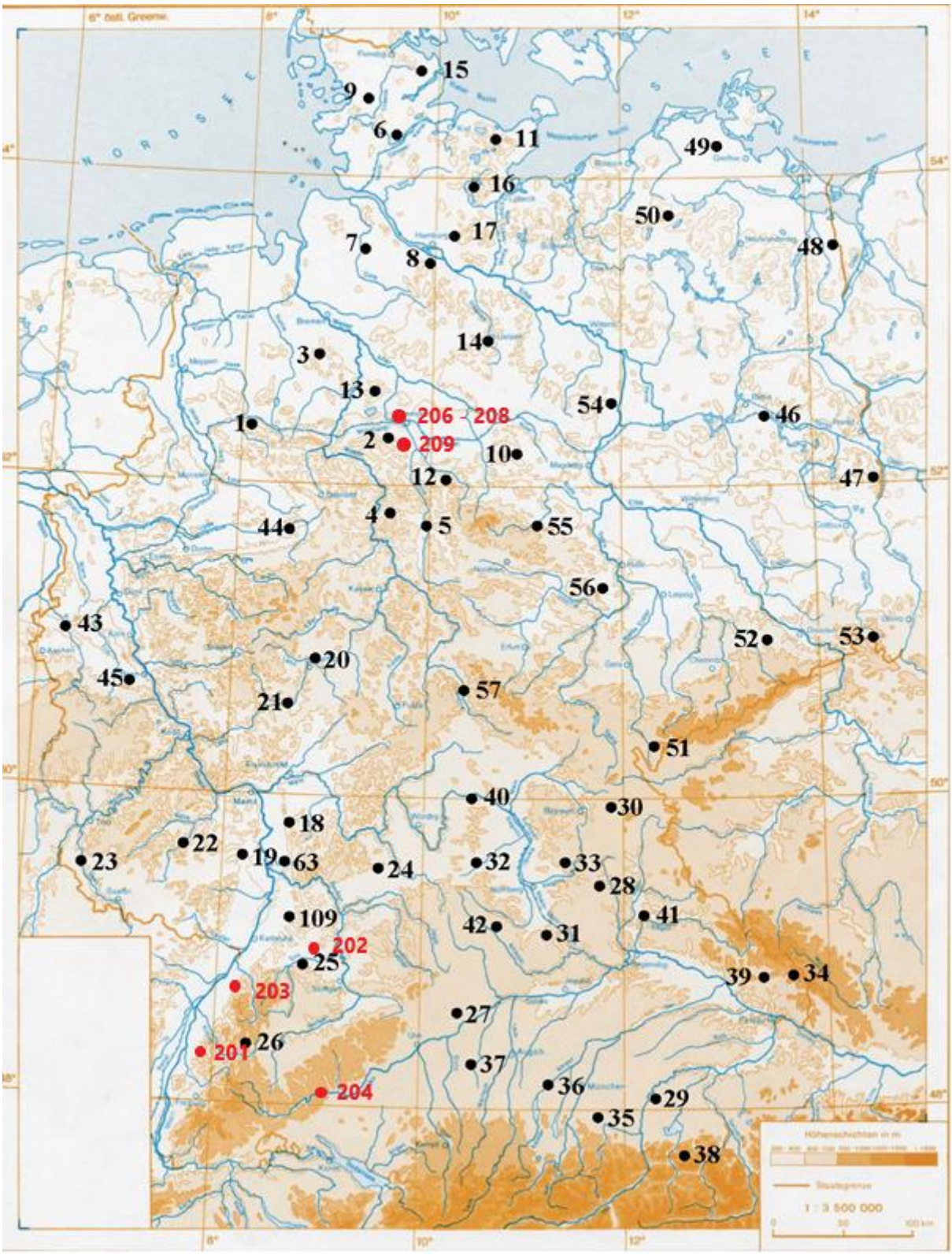


Bild 1: Standorte der Thermohygrographen

2.2 Einflüsse auf Innenraumkonditionen

Bei der Betrachtung der Verhältnisse in Gebäuden ist zu beachten, dass eine „punktgenaue“ Aussage über Temperaturen und Feuchten nur auf der Basis von Messungen möglich ist. Bei der Interpretation solcher „realer Angaben“ ist jedoch zu beachten, dass wenn aus diesen Angaben Einschätzungen zu Gebäuden als Ganzes abgeleitete werden, diese nur als ein grober Rahmen mit einer nicht zu unterschätzenden Schwankungsbreite der Daten angesehen werden können. Diese Schwankungen sind u. a. darauf zurückzuführen, dass sich die Messergebnisse auf einen einzelnen Raum im Gebäuden beziehen und es durch abweichende geometrischen Abmessungen in anderen Räumen zu unterschiedlich große Raumbegrenzungsflächen und damit zu Abweichungen in den Ergebnissen kommt. Darüber hinaus sind in den zu verschiedenen Räumen in der Regel unterschiedlich große Fensterflächen und 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).

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.

2.3 Messgeräte

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

Bild 2: Datenlogger der Firma Trotec mit Ständer

Um die Zugänglichkeit des Sensors an die Raumluft zu gewährleisten, wurden die Geräte, wie in Bild 2 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 vorliegen, erfolgte zur Auswertung der raumseitigen Daten die Mittelwertbildung aus vier 15 Minutenintervallen und die Erfassung des Maximums und des Minimums während der betrachteten Stunde.

2.4 Auswertezeiträume

Im ersten Messprogramm wurden die wesentlichen Ergebnisse in den Jahren 2011 bis 2018 ermittelt. Durch den Ausfall von Messgeräten, sei es durch Diebstahl, nicht erfolgte Wechsel oder durch die Rückgabe der Geräte durch die Helfer vor Ort, konnte zwar an einigen Standorten auch nach dem Jahr 2018 noch Daten erhoben und ausgewertet werden, eine verlässliche Aussage war aufgrund der dadurch stark eingeschränkten Basis allerdings nicht mehr möglich.
Bei der zweiten Messreihe ergab sich von Beginn an das Problem, dass Teilnehmer an den Messreihen die Geräte bereits nach kurzer Zeit zurückgaben (Passivhaus am Standort 202), ein Teilnehmer nach einem Zeitraum von zwei Jahren die Messungen beendete, durch Diebstahl und Geräteausfälle die Zeitreihen unterbrochen wurden und dass durch Widrigkeiten, hervorgerufen durch Corona, ab 2018 nur an wenigen Messpunkten noch vollständige Zeitreihen vorlagen. Für eine Interpretation wurde daher im ersten Abschnitt auf den Zeitraum 2011 bis 2018 und im zweiten Abschnitt – im Wesentlichen – auf den Zeitraum von 2016 bis 2018/2019 zurückgegriffen.

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 Wesentlich – von keinem weiteren Einfluss abhängig ist, wird die relative Feuchte ϕ als Funktion aus der Temperatur ϑ und der absoluten Luftfeuchte c bestimmt. Die relative Feuchte ϕ kann daher stets nur im Zusammenhang mit diesen beiden Größen, nämlich 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 den Betrachtungen 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 in [ ] vor Ort, wurde die absolute Feuchte (auch absoluter Wassergehalt genannt) der Luft c_i und c_e [g/m³] auf der Basis von DIN 4108-3:2024-03 Anhang C [1] bzw. DIN EN ISO 13788:2013-05 Anhang E [2] für die Innen- und die Außenverhältnisse berechnet.

2.6 Ansätze zur Datenauswertung

2.6.1 Regressionskurven

Eine Möglichkeit Unterschiede bezüglich der Temperatur und Feuchte innerhalb und außerhalb von Gebäuden an verschiedenen Standorten sichtbar zu machen kann darin bestehen, die aus Messwerten gewonnene Mittelwertdaten einzelner Zeitreihen miteinander zu vergleichen. Aufgrund der großen Spreizung und der hohen Anzahl der ermittelten Daten lässt sich jedoch aus einer solchen Analyse häufig kein eindeutig interpretierbares Bild erzeugen. In vielen Fällen ist es daher sinnvoller statt einer Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Einzelwerte, Kurven die auf einer Mittelwertverteilung der Messwerte basieren zu analysieren.

Vor diesem Hintergrund wurden im vorliegenden Forschungsvorhaben durch eine Regression Mittelwertkurven erzeugt deren Algorithmus auf einer Sinusfunktion beruht. Eine Sinusfunktion hat den Vorteil, dass sie alleine schon durch ihren Verlauf eine zeitlich veränderliche Entwicklung symbolisiert und dass darüber hinaus an den Stoßstellen der einzelnen Jahre keine Glättung erforderlich ist. Jedoch zeigten bereits erste Analysen, dass die Funktion der Regressionskurven nicht alleine auf einer Sinusfunktion basieren kann, da der Gradient des Mittelwertes der zu untersuchenden Auswertegrößen 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 linearen Geradengleichung und
- einer Sinusfunktion.

Dabei gibt $f(\mathrm{t})$ die Geradengleichung mit dem Mittelwert $\bar{y}(\mathrm{t})$ der Auswertegrößen und $g(\mathrm{t})$ den Sinus, d. h. die zeitlich veränderlichen Schwankungen mit der zugehörigen Amplituden $\hat{y}$ wieder. Außerdem war eine Analyse der Phasenverschiebung $\Delta\mathrm{t}$ erforderlich, um den zeitlichen Verlauf der Regressionskurven, insbesondere den Durchgang der Sinuskurve durch die Mittelwertlinie, beschreiben zu können. Die Regressionskurven wurden daher wie folgt gebildet:

$$y(\mathrm{t}) = f(\mathrm{t}) + g(\mathrm{t}) \tag{1}$$

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

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

Mit:

- a: Gradient
- $y(\mathrm{t})$: Auswertegröße in Abhängigkeit der Zeit
- $\bar{y}(\mathrm{t})$: Mittelwert in Abhängigkeit der Zeit
- $\hat{y}$: Amplitude
- $\Delta\mathrm{t}$: Phasenverschiebung

Die Optimierung der Regressionskurven, d. h. die Anpassung der Regressionskurven an die Messwerte, erfolgte über die Amplitude $\hat{y}$ und die Phasenverschiebung $\Delta\mathrm{t}$ nach der Methode der kleinsten Quadrate.
Der Zusammenhang und die Entwicklung zwischen Messwertverteilung und den daraus ermittelten Regressionskurven wird exemplarisch in den Bildern 3 bis 8 für die Temperatur und den absoluten Wasserhalt am Standort 109-A1 im Zeitraum 2011 bis 2016 dargestellt.

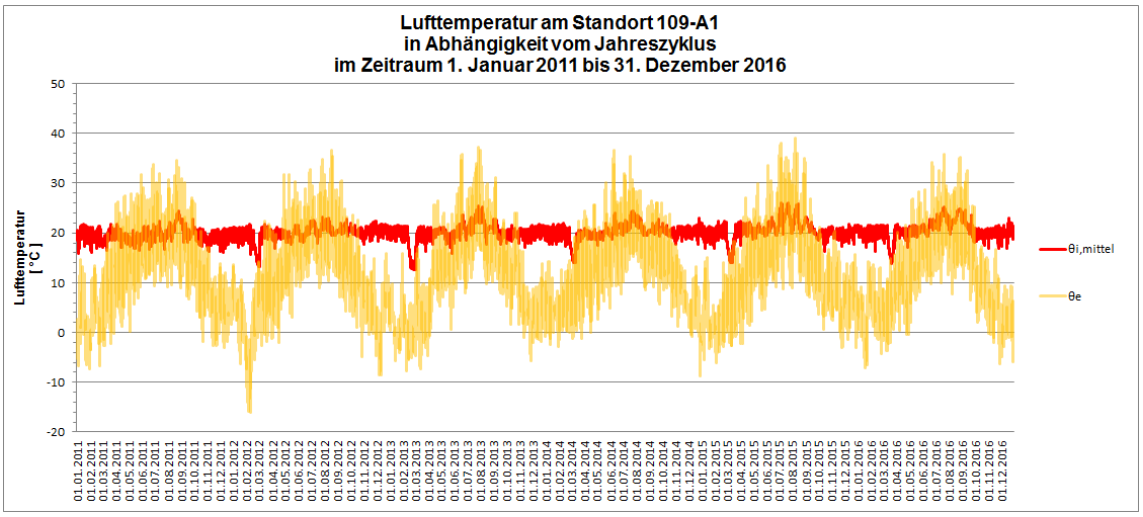


Bild 3 Zeitlicher Verlauf von Messwerten der Lufttemperatur

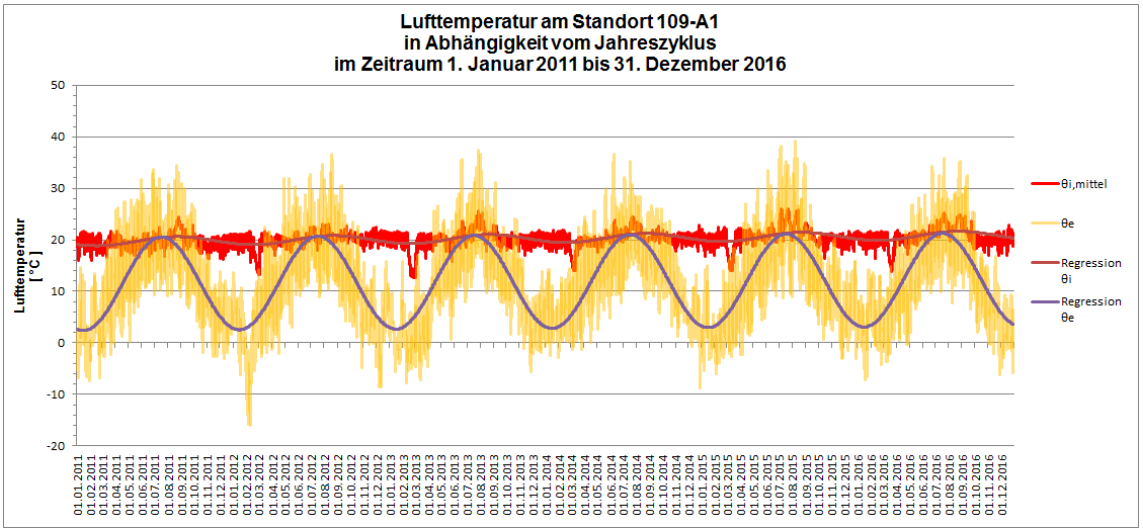


Bild 4: Zeitlicher Verlauf von Messwerten und Regressionskurven der Lufttemperatur

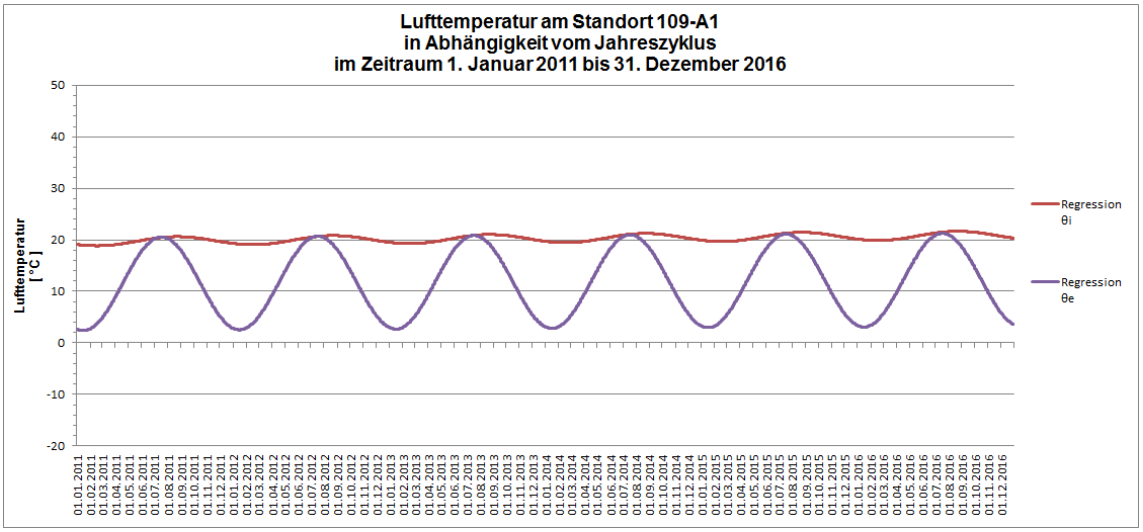


Bild 5: Zeitlicher Verlauf von Regressionskurven der Lufttemperatur

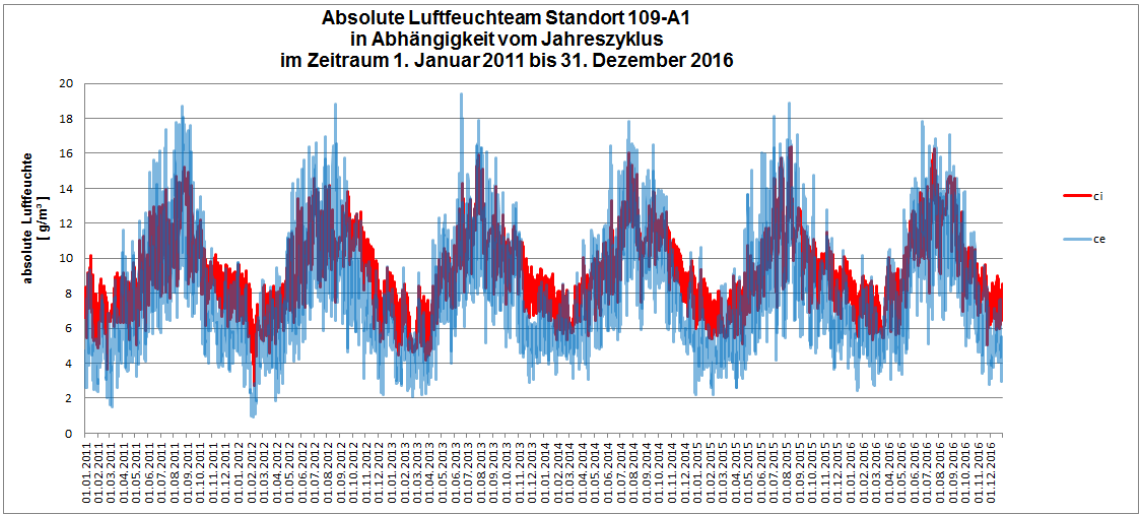


Bild 6: Zeitlicher Verlauf von Messwerten der absoluten Luftfeuchte

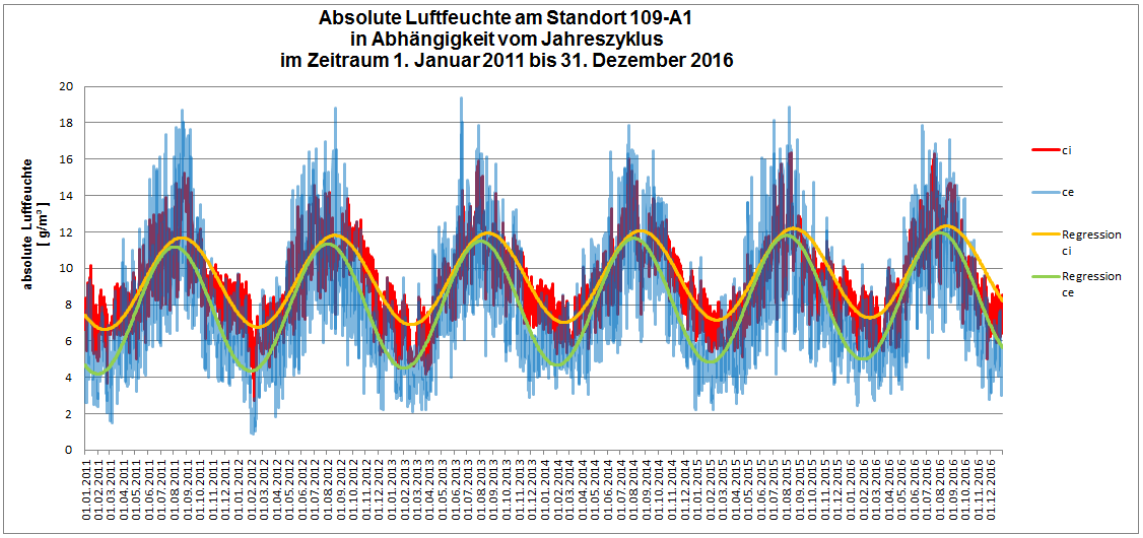


Bild 7: Zeitlicher Verlauf von Messwerten und Regressionskurven der absoluten Luftfeuchte

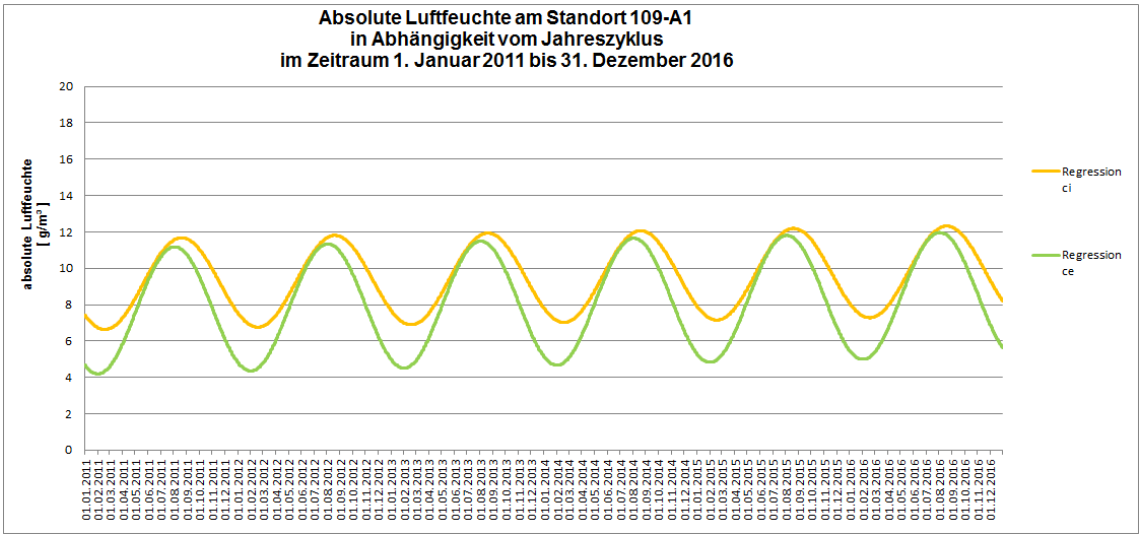


Bild 8: Zeitlicher Verlauf Regressionskurven der absoluten Luftfeuchte

2.6.2 Vorgaben aus nationalen und internationalen Normen

Neben der Frage, ob es in Gebäuden die mit einem erhöhten technischen Standard des energiesparenden Wärmeschutzes ausgeführt wurden im Vergleich zu Bestandsbauten älteren Erstellungsdatums zu höheren Innenraumtemperaturen und Werten der absoluten Feuchte kommt, sollte mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben auch untersucht werden, in welchem Maß die aufgezeichneten Messwerte mit Grenzwerten aus nationalen und internationalen Normen korrelieren.

Als Bezugsgrößen wurden dazu die Angaben aus den nationalen und internationalen Normen herangezogen, die sich mit hygrothermischen Betrachtung und insbesondere mit Simulationsrechnungen unter instationären Randbedingungen beschäftigen. Dies sind neben DIN 4108-3:2024-03 [1] und DIN EN ISO 13788:2024-03 [2] auch DIN EN 15026:2023-12 [3].

In DIN 4108-3:2024-03 Anhang D und DIN EN 15026:2023-12 Anhang D sind jeweils Anforderungen für Innenräume zu finden. Obwohl beide Normen die gleichen Kurvenverläufe für den Zusammenhang zwischen Feuchte und Temperatur in Räumen sowie der Außenlufttemperatur zeigen, beziehen sich die Angaben in DIN 4108-3:2024-03 auf Wohnräume, während sich DIN EN 15026:2023-12 auf Innenräume in Wohn- und Bürogebäuden bezieht. Dabei folgen beide Normen, ebenso wie das vorliegende Forschungsvorhaben, dem Ansatz, als maßgebliche Größe für die Untersuchungen der Feuchte die absolute Feuchte c_i heranzuziehen.

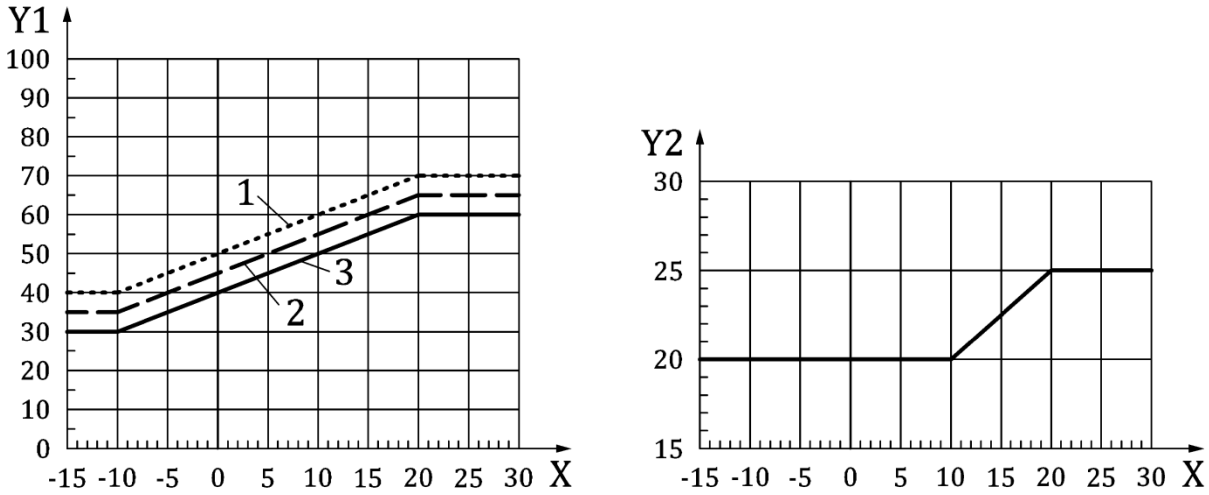


Bild 9: Raumlufttemperatur (Y2) und –feuchte (Y1) in Wohn- und Büroräumen in Abhängigkeit von den Tagesmittelwerten der Außenlufttemperatur (X) nach DIN 4108-3:2024-03 und DIN EN ISO 15026:2023-12

Als weiterer Parameter zum Vergleich der Messdaten mit normativen Vorgaben wurde die in DIN EN ISO 13788:2013-05 Anhang A aufgeführten Klassen der zu raumseitigen Luftfeuchte betrachtet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Klassen der raumseitigen Luftfeuchte

Luftfeuchteklasse	Gebäude
1	unbelegte Gebäude, Lagerung trockener Güter
2	Büros, Wohnhäuser bei normaler Belegung und Lüftung
3	Wohnhäuser mit unbekannter Belegung
4	Sporthallen, Küchen, Kantinen
5	besondere Gebäude, z. B. Wäschereien, Brauereien, Schwimmbäder

Für die Klassen der raumseitigen Feuchte nach Tabelle 1, wurden die in Bild 10 dargestellten Grenzwerte (Grenzkurven) der Feuchtelast bestimmt. Die Feuchtelast Δc (in Bild 10 als $\Delta \nu$ bezeichnet) gibt die Differenz zwischen der absoluten Feuchte der Raumluft c_i und der Außenluft c_e wieder.

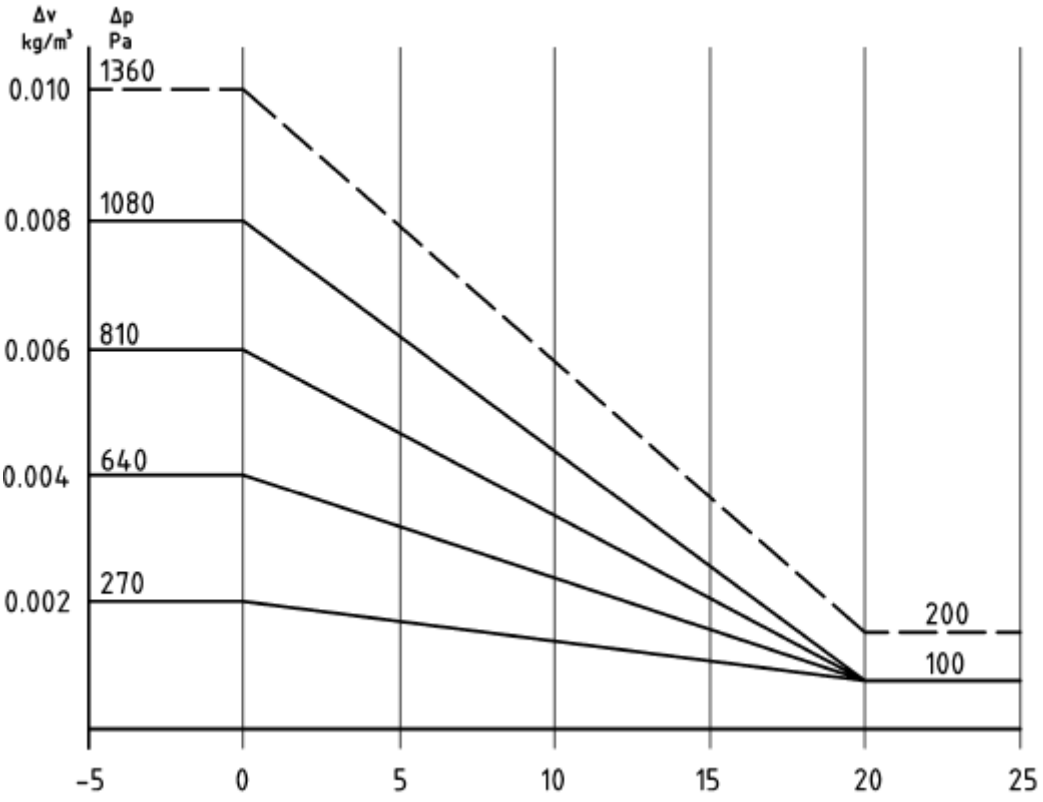


Bild 10: Schwankungen der Klassen der raumseitigen Luftfeuchte nach Tabelle 1 in Abhängigkeit von der monatlichen mittleren außenseitigen Temperatur

Bei der Anwendung der in DIN 4108-3:2024-03 und DIN EN 15026:2023-12 aufgeführten Grenzwertkurven ist zu beachten, dass es sich beim Zeitbezug nicht um Stundenwerte sondern um Tagesmittelwerte und bei der Feuchtelast nach DIN EN ISO 13788:2013-05 um Monatsmittelwerte handelt.

Das gewählte Zeitformat (Stunden, Tage, Monate) hat nicht nur Auswirkungen auf die Anzahl der dargestellten Messpunkte, sondern auch auf deren Amplitude. Durch eine Mittelung über Stunden, Tage oder Monate werden Werte am maximalen oder Minimalen Rand der Messskala zu Mittelwerten hin nivelliert. Das Nivellement wird immer ausgeprägter, je länger der Zeitraum ist über den hinweg die Betrachtung erfolgt. Bei einer Mittelwertbildung von Messdaten aus einem 15 minütigen Intervall in Stundenwerten ist der Effekt der Bereinigung von Extremwerten vergleichsweise gering. Wenn dagegen aus Stundenwerten Monatsmittelwerte gebildet werden, dann lässt sich aus den solcherart bestimmten Daten zwar ein Trend ablesen, Extremwerte sind jedoch nicht mehr vorhanden. Aus diesem Zusammenhang folgt, dass die Länge der Zeitreihe einerseits zu einer Einschränkung des Messergebnisses führen kann, dass es andererseits aber für die Verdeutlichung von Trends notwendig und wichtig sein kann, statt einer Betrachtung von kürzeren Zeitreihen mit extremen Ausschlägen längere Zeitreihen mit stark gemittelten Ergebnissen heranzuziehen. Anders formuliert, ist es in Abhängigkeit des angestrebten Ziels notwendig die entsprechend Länge der Zeitreihe vorzugeben. Wie sich der Wechsel von Stundenwerten über Tagesmittelwerten hin zu Monatsmittelwerten bei der Betrachtung der Innenraum Verhältnisse für Temperatur und absolute Feuchte sowie bei der Feuchtelast auswirkt, ist in den Bildern 11, 12 und 13 für den Standort 109-A1 dargestellt.

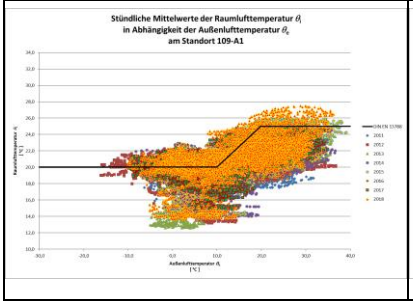
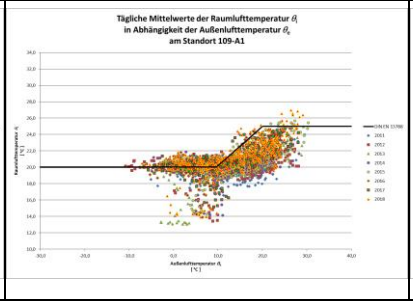
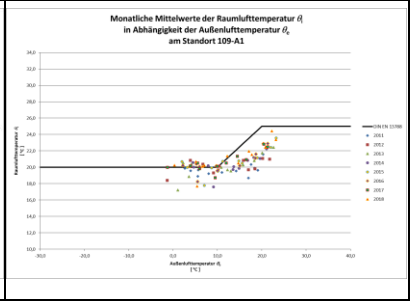
Raumlufttemperatur ϑ_i am Standort 109-A1		
Stundenmittelwerte	**Tagesmittelwerte**	**Monatsmittelwerte**
		

Bild 11: Verteilung der Raumlufttemperatur ϑ_i für Stunden-, Tages- und Monatsmittelwerte

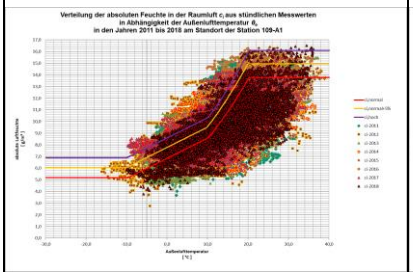
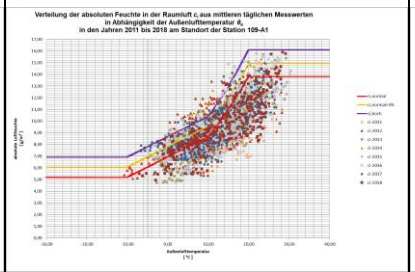
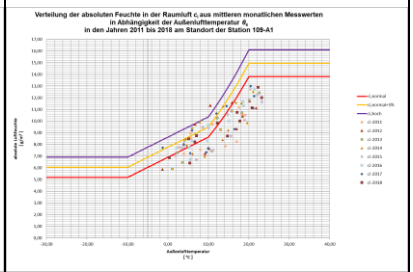
Absolute Feuchte c_i am Standort 109-A1		
Stundenmittelwerte	**Tagesmittelwerte**	**Monatsmittelwerte**
		

Bild 12: Verteilung der absoluten Feuchte c_i für Stunden-, Tages- und Monatsmittelwerte

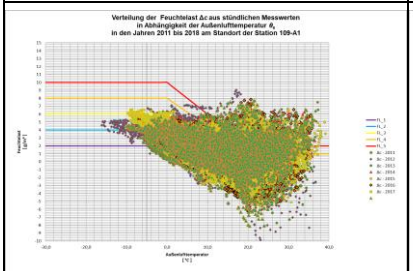
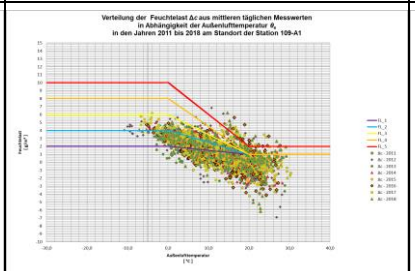
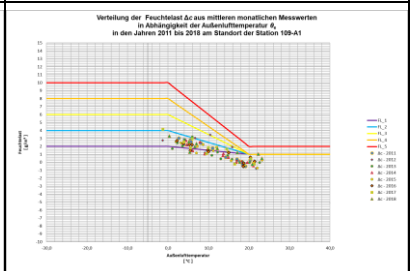
Feuchtelast Δc am Standort 109-A1		
Stundenmittelwerte	**Tagesmittelwerte**	**Monatsmittelwerte**
		

Bild 13: Verteilung der Feuchtelast Δc für Stunden-, Tages- und Monatsmittelwerte

2.7 Messstationen

2.7.1 Referenzgebäude

Die Referenzgebäude aus dem ersten Forschungszyklus weisen die in Tabelle 2 aufgeführten Daten der Erstellung bzw. zum Austausch der Fenster auf. Die Angaben zum Austausch der Fenster sind im Zusammenhang mit der Raumlufttemperatur und insbesondere der Raumluftfeuchte insofern von Bedeutung als man davon ausgehen kann, dass bei einem Fenstereinbau bzw. einer Fenstersanierung in jüngerer Vergangenheit dabei auch dem Aspekt der Luftdichtheit Rechnung getragen wurde. Die höhere Luftdichtheit der Gebäudehülle bedingt einen verminderten Austausch der Raumluft gegen Außenluft, womit zwar einerseits Energieverluste verringert werden, andererseits aber auch weniger Feuchtigkeit aus dem Gebäudeinneren nach außen abgeführt wird und damit der Feuchtegehalt in der Raumluft zunimmt.

Tabelle 2: Abgaben zu den repräsentativen Bestandsbauten

Stations-Nummer	Datum der Erstellung	Datum des Fenstereinbaus
9	**1898**	**1962**
38	**1960**	**1976**
51	**1928**	**2000**
53	**1994**	**1994**
109	**2009**	**2009**

Eine Luftdichtheitsprüfung erfolgte bei den Referenzstationen ausschließlich bei der Station 109, mit einem Mittelwert bei einer Messung nach dem Druckdifferenzenverfahren von $n_{50} \approx 1{,}0\ h^{-1}$.

2.7.2 Passivhäuser und Energiesparhäuser

Hinsichtlich den untersuchten Gebäuden die in Bezug auf den energiesparenden Wärmeschutzes einen Standard aufweisen der über die gesetzlichen Anforderungen nach EnEV bzw. GEG hinausgehen, den Energiesparhäusern, liegen dank den Unterlagen des Fertighausherstellers genaue Angaben zu den gebäudetechnischen Anlagen und Einrichtungen sowie den Ergebnissen der Luftdichtheitsprüfungen nach dem Druckdifferenzenverfahren vor. Das Erstellungsdatum der Gebäude lag zwischen den Jahren 2011 und 2013. Die n_{50}-Werte beim Druckdifferenzenverfahren lagen zwischen $0{,}67\ h^{-1} \leq n_{50} \leq 1{,}6\ h^{-1}$. Mit Ausnahme der Station 204 waren alle Energiesparhäuser mit einer Anlage zur mechanischen Be- und Entlüftung ausgestattet.

Bei den Passivhäusern war die Kommunikation mit den Planern bzw. den ausführenden Unternehmen leider nicht so gut wie bei den Energiesparhäusern. Es kann daher nur ausgesagt werden, dass sie generell von renommierten und erfahrenen Architekturbüros mit dem Schwerpunkt auf diese Bauweise geplant ausgeführt wurden und man daher davon ausgehen kann, dass die für diesen Gebäudetyp erforderlichen Anforderungen an den baulichen und anlagentechnischen Wärmeschutz sowie an die Luftdichtheit erfüllt sind. Bei zwei der untersuchten Gebäude ist dokumentiert, dass nicht nur die wärmeübertragenden Bauteile mit adäquaten *U*-Werten ausgeführt

wurden, sondern auch Luftdichtheitsmessungen erfolgten und Anlagen zur mechanischen Be- und Entlüftung eingebaut wurden.

3 Analyse der Messergebnisse

3.1 Untersuchung der Regressionskurven

3.1.1 Raumlufttemperaturen

Bei der Fülle der zur Verfügung stehenden Messwerte ist es nur schwer möglich die Daten an den verschiedenen untersuchten Stationen mit einander zu vergleichen. Daher wurden, wie in Abschnitt 2.6.1 dargestellt, aus den Messzyklen der Raumluft und der Außenluft Mittelwertkurven, sogenannte Regressionskurven generiert.

Mit Hilfe dieser Darstellungen soll der Frage nachgegangen werden, ob es hinsichtlich der Temperatur und der absoluten Feuchte zu Unterschieden zwischen höhergedämmten Gebäuden mit gebäudetechnischen Anlagen und Einrichtungen einerseits und mit Bestandsgebäuden älteren Datum andererseits kommt. Da die Innenraumkonditionen auch von den Außenluftverhältnissen beeinflusst werden, müssen für eine Analyse der Temperaturen ϑ und Feuchten c in der Raumluft nicht nur die Messwerte im Inneren, sondern die der Außenluft miteinander vergleichen werden.

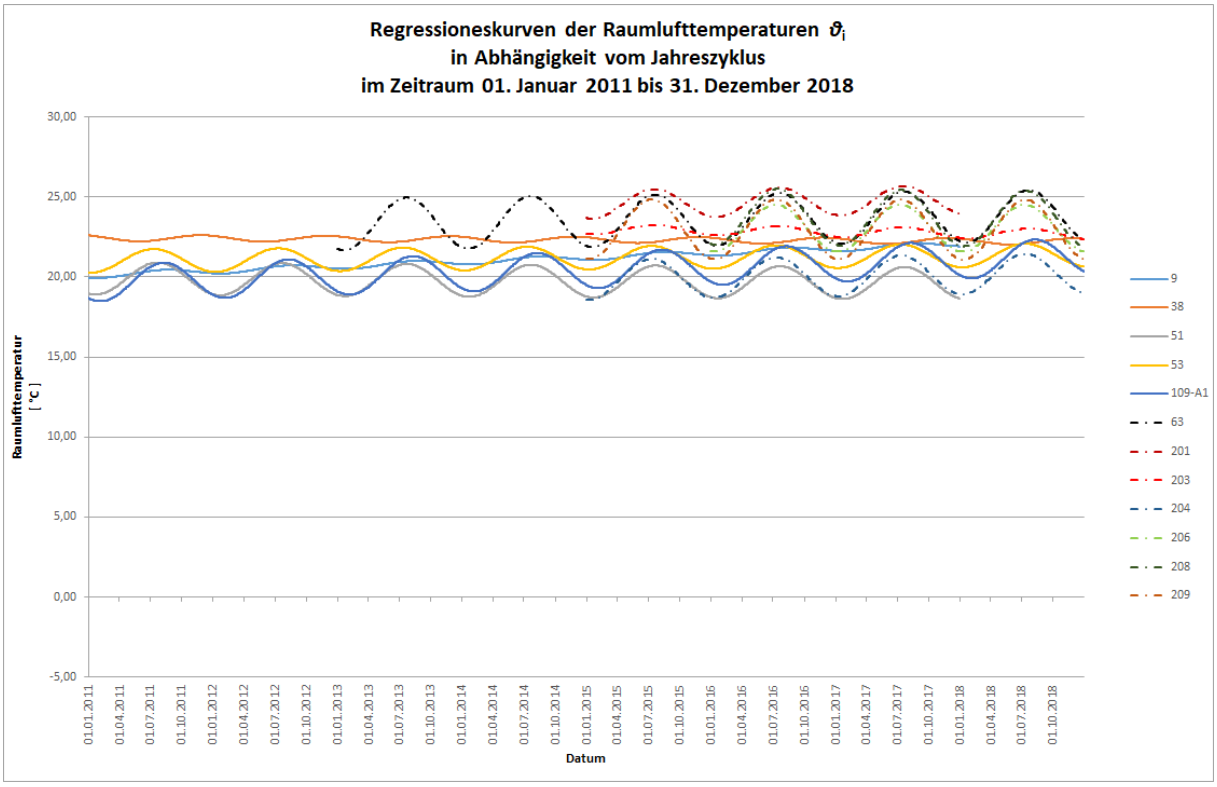


Bild 14: Regressionskurven der Raumlufttemperaturen ϑ_i

Wie die Regressionskurven der Innenraumtemperatur in Bild 14 zeigen, liegt der Mittelwerte für die älteren Bestandsbauten bei $\bar{\vartheta}_i$ = 20,5 °C, mit Amplituden von $\hat{\vartheta}_i$ = ± 2,0 K. Eine Ausnahme bilden die Daten der Messstation 38. Hier beträgt der Mittelwerte. $\bar{\vartheta}_i$ = 22,5 °C und die Amplituden schwanken mit $\hat{\vartheta}_i$ = ± 0,5 K um dieses Mittel. Die Ergebnisse der Passivhäuser und Energiesparhäuser liegen mit einem Mittelwerte von $\bar{\vartheta}_i$ = 23,5 °C und Amplituden von $\hat{\vartheta}_i$ = ± 2,0 K, wie erwartet, deutlich über denen der älteren Bestandsbauten. Dieser Effekt kann bei den hoch energiesparenden Gebäuden einerseits darauf zurückgeführt werden, dass dort größere Fensterflächen vorhanden sind mit deren Hilfen während der Heizperiode größere solare Wärmegewinnen erzielt werden sollen, was andererseits aber während der sommerlich heißen Phase zu höheren Raumtemperaturen führt und dass aufgrund der größeren Luftdichtheit der Gebäudehülle, sowohl in der Heizperiode als auch im Sommer, ein geringerer Austausch zwischen warmer Raumluft und kälterer Außenluft gegeben ist. Da die Innenraumwerte auch von den Außenwerten beeinflusst werden, muss vor einer endgültigen Antwort auf die Frage, ob die Raumtemperaturen vom Standard der gebäudetechnischen Ausrüstung abhängen untersucht werden, wie die Verteilung der Außenlufttemperaturen an den untersuchten Standorten aussieht. Hierzu wurden in Bild 15 die Regressionskurven der untersuchten Messstationen dargestellt.

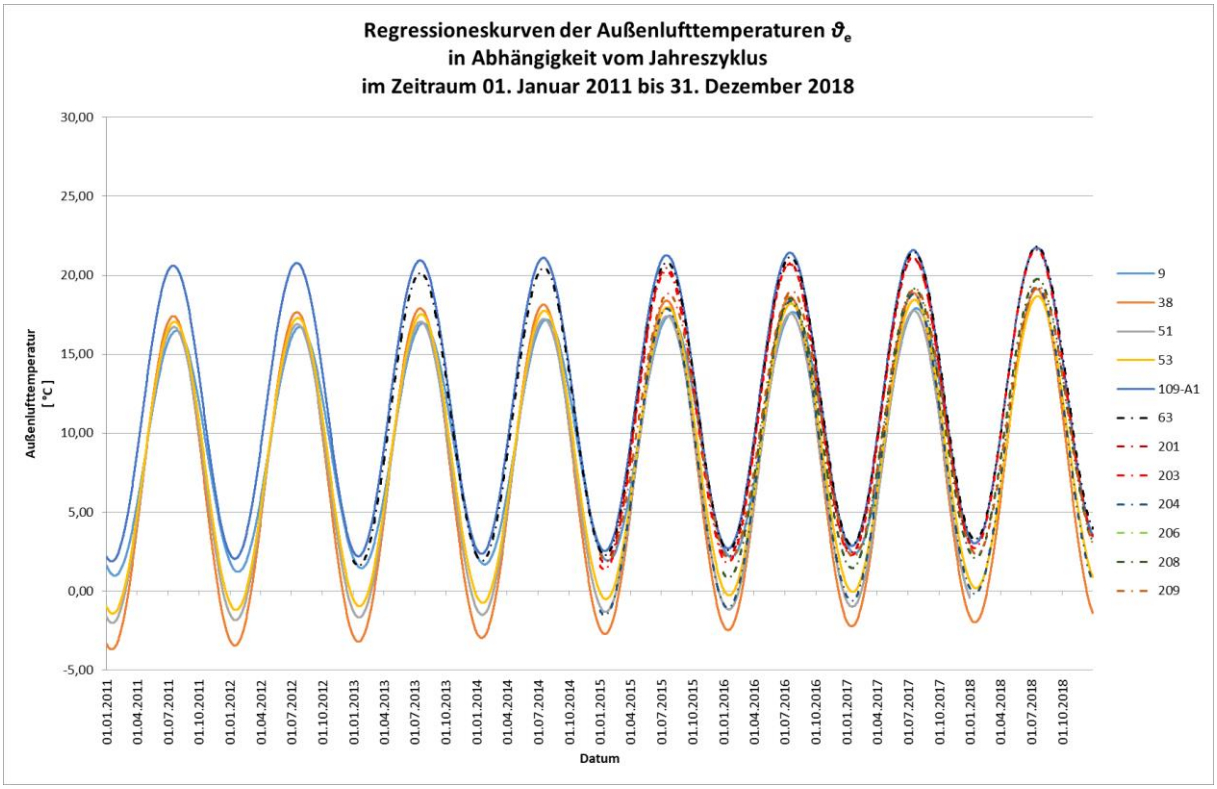


Bild 15: Regressionskurven der Außenlufttemperaturen ϑ_e

Wie man Bild 15 entnehmen kann, weisen die Messstationen im Oberrheingraben (Station 63, 109, 201, 203), bedingt durch die geographische Lage, deutlich höhere Werte der Außenluft auf als die anderen Standorte. Insgesamt kann man sagen, dass alle Standorte im Oberrheingraben hinsichtlich des Mittelwertes $\bar{\vartheta}_e$ und den Amplituden $\hat{\vartheta}_e$ nahezu gleich schwingen, ebenso wie die weiteren Messpunkte, unabhängig von in ihrer Lage in der Bundesrepublik.
Ein Vergleich der in den Bildern 14 und 15 dargestellten Regressionskurven der Innentemperaturen mit den Außenwerten an den untersuchten Standorten lässt deutlich erkennen, dass der Einfluss von baulichen Merkmalen wie Fenstergrößen und Orientierung sowie die Luftdichtheit der Gebäudehülle die Entwicklung der Temperaturen in Räumen dominieren, während der Einfluss des Standortes zwar nicht ohne Belang, aber eher von untergeordneter Bedeutung ist.

3.1.2 Absolute Feuchte

Analog zur Vorgehensweise bei der Betrachtung der Raumlufttemperaturen, sollen im Folgenden die Regressionskurven der absoluten Feuchte der Raumluft sowie der Außenluft an den verschiedenen Standorten untersucht und miteinander verglichen werden.

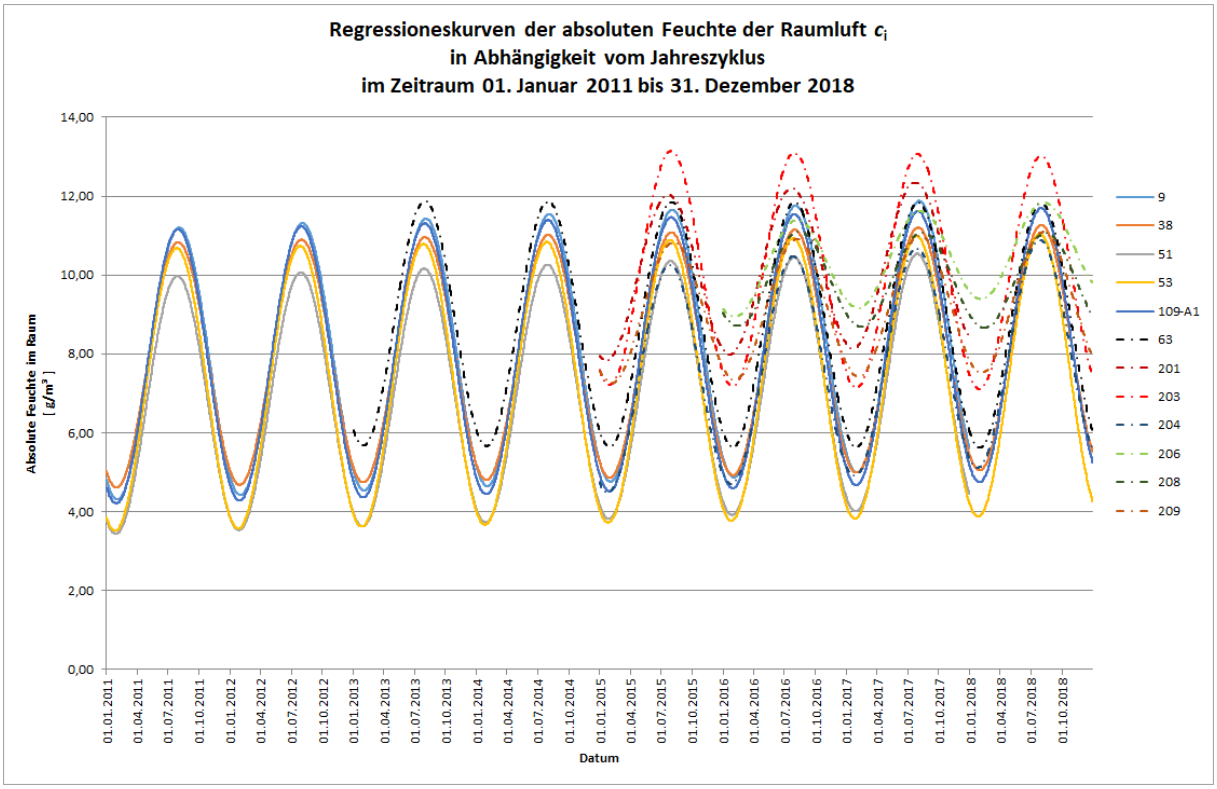


Bild 16: Regressionskurven der absoluten Feuchte im Raum c_i

Wie bereits bei der Betrachtung der Raumlufttemperaturen ϑ_i wird auch bei der absoluten Feuchte der Raumluft c_i in Bild 16 deutlich, dass es einen Zusammenhang gibt zwischen der Luftdichtheit und dem Vorhandensein raumlufttechnischen Anlagen zur Be- und Entlüftung einerseits und dem Feuchtegehalt im Gebäudeinneren andererseits. Die Regressionskurven der Raumluftfeuchte aus den älteren Bestandsgebäuden zeigen sowohl ein harmonisches Schwingungsverhalten als auch gleichmäßige Werte der Amplituden. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die Werte während der Heizperiode. Die Tiefpunkte der Regressionskurven liegen in dieser Zeit des Jahres bei Werten zwischen 3,8 g/m³ (4,3 g/m³) im Jahr 20211 und 4,0 g/m³ (4,5 g/m³) im Jahr 2018. Dabei geben die Werte ohne in Klammer den untersten Werte der Tiefpunkte, die Werte in Klammern den höchsten Wert an. Verallgemeinernd kann man bei den älteren Bestandsgebäuden sagen, dass sich die Angaben zur absoluten Feuchte in den Räumen innerhalb eines eng begrenzten Bereiches mit gleichmäßigem Verhalten bewegen. Abweichungen sind auf individuelles Nutzerverhalten zurückzuführen. Bezüglich den Verhältnissen während der Sommerphase zeigen die älteren Bestandsgebäude in den Hochpunkten der Regressionskurven einen Spreizung bei den Werten der absoluten Feuchte, jedoch bewegen sich die Unterschiede in einem Rahmen, die in Hinblick auf die regionalen Unterschiede der Außenverhältnisse unkritisch sind. Dies lässt sich u. a. auch durch eine Analyse der Regressionskurven für die absolute Feuchte der Außenluft in Bild 17 belegen. Wie ein Vergleich der Kurvenverläufe in den Bilder 16 und 17 zeigt, sind die erhöhten Innenraumwerte c_i während der sommerlich heißen Phase am Standort 203 im Wesentlichen auf den hohen Wassergehalt der Außenluft c_e zurückzuführen.

Die Regressionskurven der Passivhäuser und der Energiesparhäuser zeigen dagegen ein von den älteren Bestandbauten deutlich abweichendes Bild. Zwar unterscheiden sich die Spitzenwerte der absoluten Feuchte bei den älteren Bestandsbauten während der sommerlich heißen Phase nicht wesentliche von denen der energiesparenden Gebäude, während der Heizperiode, also der Winterzeit, liegen aber deutlich sichtbare Unterschiede vor. Bild 16 ist zu entnehmen, dass die absolute Feuchte in der Heizzeit bei den Passivhäusern und Energiesparhäusern im Gegensatz zu den älteren Bestandsgebäuden auf einem sehr viel höheren Niveau verbleibt. Dies ist im Wesentlichen auf die luftdichtere Gebäudehülle und den Einsatz gebäudetechnischer Anlagen und Einrichtungen zur Lüftung zurückzuführen. Die Luftwechselrate über Leckagen und das Lüften über das Fensteröffnen führt zu einem höheren Wert im

Vergleich zur rein mechanischen Lüftung über die Anlagentechnik. Bei gebäudetechnischen Anlagen werden häufig niedrigere Luftwechselraten eingestellt, um einerseits die Lüftungswärmeverluste zu minimieren und um andererseits unliebsame Zugerscheinungen an den Auslassöffnungen nicht aufkommen zu lassen. Dies führt dann allerdings während der Heizperiode zu einem geringeren Austausch der feuchten Luft im Raum gegen trockenere Außenluft. Dass sich dieser Effekt bei einer gesteigerten Luftwechselrate im Lüftungssystem vermeiden lässt, zeigt die Regressionskurve am Standort 63. Obwohl es sich auch hier um ein Passivhaus mit entsprechenden baulichen und anlagentechnischen Randbedingungen handelt, führt der erhöhte Luftwechsel im Gebäude zu einer Verringerung der absoluten Feuchte in den Räumen.

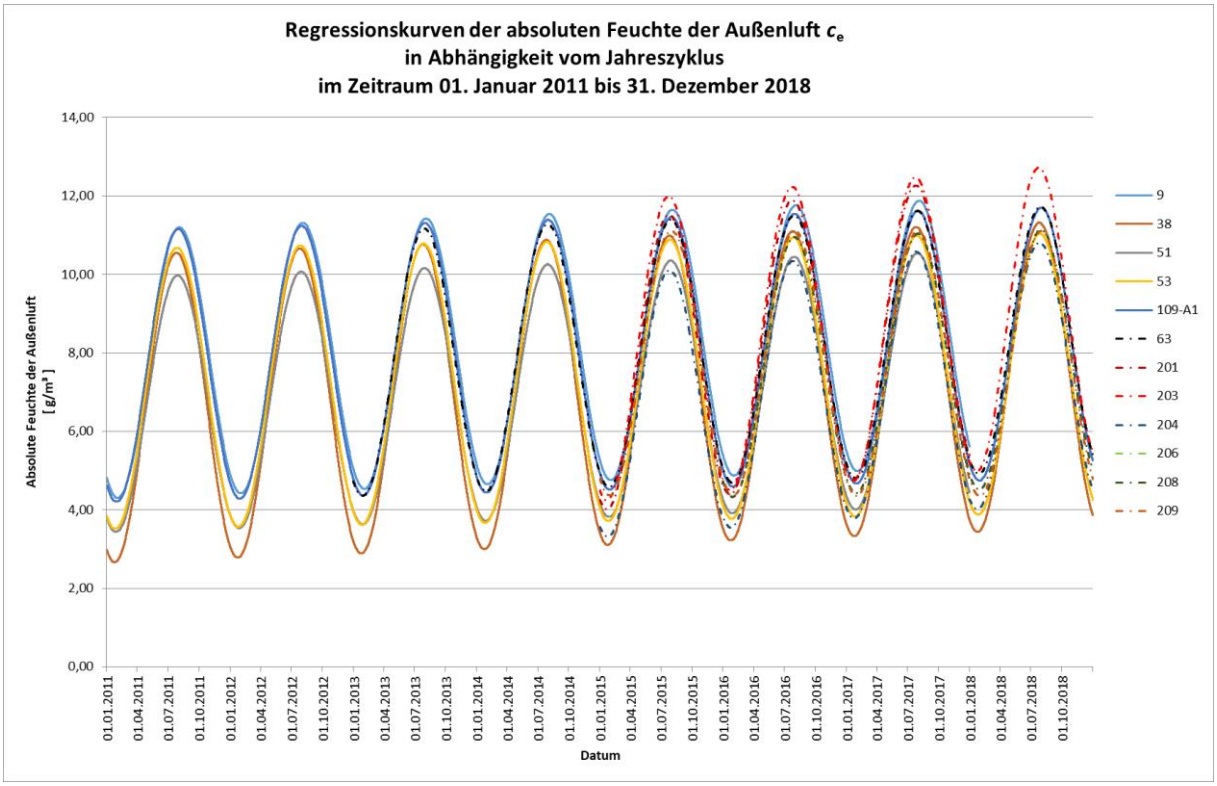


Bild 17: Regressionskurven der absoluten Feuchte der Außenluft c_e

Die Verläufe der Regressionskurven in Bild 17 zeigen an allen Standorten ein sehr ähnliches Schwingungsverhalten mit einem ähnlich gelagerten Mittelwert für die absolute Feuchte von ca. 7 g/m³. Auch die Amplituden der Zyklen liegen in einem eng begrenzten Bereich. Die Abweichungen zu niedrigen Werten der absoluten Feuchte am Standort 38 (Alpenregion) bzw. hohen Werten am Standort 203 (südlicher Oberrhein) sind jeweils auf die örtliche Lage zurückzuführen.

Verallgemeinert kann man aus der Betrachtung der Regressionskurven in den Bildern 16 und 17 hinsichtlich der absoluten Feuchte in Gebäuden folgern, dass die verstärkten Anstrengungen für eine größere Luftdichtheit bei Gebäuden, die auf eine verbesserte Energieeinsparung abzielen, als weitere Konsequenz auch zu höheren absoluten Feuchten in der Raumluft führen.

3.2 Untersuchung der Messwerte

Grundsätzlich soll vor einer detaillierten Untersuchung der Messwerte von Raumluftkonditionen und dem Vergleich mit Anforderungen aus nationalen und internationalen Normen der Frage nachgegangen werden, wo bei einer Analyse der Unterschied liegt zwischen der Betrachtung von Regressionskurven und der von Messwerten. Regressionskurven werden aus der Mittelwertbildung von Messergebnissen gebildet, was bedeutet, dass Extremwerte aus Messungen nicht mehr sichtbar sind, dafür aber Trends und Tendenzen deutlicher hervortreten. Außerdem lassen sich unterschiedliche Parameter oder verschiedene Standorte mit Hilfe von Regressionskurven leichter vergleichen, als dies mit Messdaten möglich wäre. Demgegenüber eignen sich die Ergebnisse aus Messwerten eher, um Grenzwertbetrachtungen vorzunehmen, da hierbei, je nach der Andauer des Zeitfensters über welches gemittelt wird, auch höhere oder niedrigere bzw. Extremwerte in die Betrachtungen eingehen. Nachdem im Abschnitt 3.1 die Regressionskurven hinsichtlich den Parametern Temperatur und absoluter Feuchte ausgewertet wurden, sollen im vorliegenden Abschnitt die Messwerte zu Temperatur, absoluter Feuchte und Feuchtelast mit den Anforderungen bzw. Empfehlungen aus DIN 4108-3:2024-03, DIN ISO EN 13788:2013-05 und DIN EN ISO 15026:2023-12 verglichen werden. Aber auch bei diesen Vergleichen ist zu beachten, dass sich die Mittelwertbildung bzw. die Grenzwerte auf unterschiedliche Zeitfenster der Mittelwertbildung beziehen. Während bei Temperaturen und Feuchtelasten auf mittlere tägliche Werte Bezug genommen wird, beziehen sich die Untersuchungsdaten der absoluten Feuchte auf Monatsmittelwerte; d. h. die Punktwolken in den Darstellungen von Temperatur und Feuchtelast können, ganz abgesehen davon dass es sich um verschiedene Parameter handelt, nicht mit denen der absoluten Feuchte verglichen werden.

3.2.1 Raumlufttemperaturen ϑ_i

Sollten für zu untersuchende Räume in Gebäuden keine Messwerte zu Raumlufttemperaturen vorliegen, dann kann, wie in Abschnitt 2.6.2 Bild 9 dargestellt, auf die in DIN 4108-3:2024-03 Anhang D und DIN EN 15026:2023-12 Anhang D vorgeschlagenen Daten zurückgegriffen werden. Dabei werden die in den Graphiken abgebildeten Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt. Bis zu mittleren täglichen Mittelwerten der Außenlufttemperatur von ϑ_e = 10 °C liegt die Raumlufttemperatur konstant bei ϑ_i = 20 °C, steigt dann zwischen $\vartheta_e \geq$ 10 °C und ϑ_e = 20 °C linear auf eine Raumlufttemperatur von bei ϑ_i = 25 °C an und verharrt bei Außenlufttemperaturen $\vartheta_e \geq$ 20 °C konstant bei einer Raumlufttemperatur von ϑ_i = 25 °C.

Eine Auswertung der Diagramme über die standortbezogene Verteilung der Raumlufttemperaturen aus Anhang A lässt für die Bestandsbauten älteren Datums erkennen, dass der Anstieg der Innentemperaturen nicht bereits bei mittleren täglichen Außenlufttemperaturen von 10 °C beginnt, sondern erst ab Werten von ca. bei ϑ_i = 15 °C. Darüber hinaus wird bei diesen Gebäudetypen deutlich, dass die mittleren täglichen Werte der Raumlufttemperaturen nur sehr selten die Marke von bei ϑ_i = 25 °C übersteigen. Der verspätete Anstieg der Innentemperaturen ist, wie bereits bei der Auswertung der Regressionskurven ersichtlich, auf niedrigere Heiztemperaturen zurückzuführen. Der Darstellung der Temperaturverteilung am Standort 9 (Küstenanrainer) kann man außerdem den Einfluss der Dämpfung von Temperaturschwankungen durch die thermische Trägheit des naheliegenden Meeres entnehmen.

Der Vergleich der Raumlufttemperaturen in den älteren Bestandgebäuden mit den Daten aus den Passivhäusern und den Energiesparhäusern macht bei den energiesparenden Gebäuden folgendes deutlich:

- Die Innentemperaturen liegen bei diesem Typ markant über Werten der älteren Objekte. Während bei den älteren Gebäuden von einem Mittelwert während der Heizperiode von ϑ_i = 20 °C ausgegangen werden kann, liegt der entsprechende Wert der energiesparenden Gebäude eher bei ϑ_i = 22 °C.
- Der Anstieg der Temperaturen im Inneren beginnt bereits vor dem Erreichen von Außenlufttemperaturen von ϑ_e = 10 °C. Dies hängt einerseits mit einem anderen (höheren) Komfortverständnis der Nutzer in hochwärmegedämmten Gebäuden

zusammen, andererseits aber auch mit geringeren Wärmeverlusten über die Gebäudehülle und größeren solaren Wärmegewinnen über größere Fensterflächen.

- Die Maximalwerte der täglichen mittleren Raumlufttemperaturen übersteigen während der sommerlich heißen Phase nicht nur punktweise den Wert von ϑ_i = 25 °C, sondern mit einer großen Häufigkeit. Aus diesem Grund kommt es in der Praxis häufig zu einer Gegenbewegung zur Energieeinsparung im Winter, nämlich, ebenfalls ausgelöst durch höhere Komfortanforderungen, zum Einbau raumlufttechnischer Anlagen zur Kühlung und damit zu steigenden Energieverbräuchen während der sommerlich heißen Zeit.

Zusammenfassend kann man bei der Betrachtung der Raumlufttemperaturen feststellen, dass sich die Empfehlungen aus den Normen gut an die Messwerte aus älteren Bestandgebäude anpassen, dass bei energiesparenden Gebäuden aber mit höheren Raumlufttemperaturen während der Heizperiode, einem früheren Anstieg der Innentemperaturen und häufigen Überschreitungen von komfortablen Innentemperaturen während der Sommerzeit gerechnet werden muss.

3.2.2 Absolute Feuchte in Räumen c_i

Die Darstellungen der Monatsmittelwerte der absoluten Feuchte in Räumen c_i sollten im Wesentlichen als Tendenzen verstanden werden, da durch die Mittelbildung über den Zeitraum von einem Monat Spitzenwerte herausgerechnet werden.

Die Auswertung der standortbezogenen Verteilung der absoluten Feuchte nach Anhang B lässt bei den älteren Bestandsgebäuden keinen eindeutigen Trend erkennen. Zwar liegen die Messwerte bei den Gebäuden in der Mittelgebirgs- und in der Alpenregion unter den Angaben zur „normalen absoluten Feuchte“, aber auch der Standort 109, mit einer Lage im mittleren Oberrheingraben und damit sehr hohen Feuchtegehalten der Außenluft, enthält vielfach Messpunkte unter der Normalkurve. Die geringe Streubreite bei Untersuchungen zur absoluten Feuchte in Räumen konnte bereits bei den Regressionskurven gezeigt werden.

Interessanter Weise zeigt aber auch die Untersuchung der Monatsmittelwerte von Passivhäusern und Energiesparhäusern eine Verteilung die der der älteren Bestandsgebäude ähnelt. Auch hier liegen die Angaben teilweise über, aber auch teilweise unter dem Kurvenzug für eine normale absolute Feuchte. Dieses Ergebnis ist, wie bereits eingangs dargestellt, auf den großen, der Mittelwertbildung zugrundeliegenden Zeitraum zurückzuführen.

Insgesamt kommt man bei der Betrachtung der absoluten Feuchte der Raumluft c_i auf der Basis von Monatsmittelwerten zu dem Ergebnis, dass sich die auf diese Weise gewonnenen Werte bei den älteren Bestandsgebäuden gut an die Richtwerte nach DIN 4108-3:2024-03 Anhang D und DIN EN 15026:2023-12 Anhang D anpassen, wohingegen sich die Auswirkungen aus einer luftdichteren Hülle sowie aus dem Einsatz gebäudetechnischer Anlagen zur Be- und Entlüftung mit diesen Grenzkurven nicht zielführend darstellen lassen. Um diese Effekte auf die absolute Feuchte für künftige Bauweisen und Nachweisverfahren in Grenzwertkurven darstellen zu können, sollte auch hier auf Tagesmittelwerte und nicht auf Monatsmittelwerte zurückgegriffen werden (siehe Anhang D). Außerdem sollten zum Vergleich von Ausstattungen mit unterschiedlichen gebäudetechnischen Anlagen und Einrichtungen oder verschiedenen Standorten Regressionskurven aus Stundenwerten herangezogen werden.

3.2.3 Feuchtelast

Mit der Feuchtelast als Differenz der absoluten Feuchte der Raumluft und der Außenluft kann eine Aussage über Feuchteströme durch Bauteile der Gebäudehülle gemacht werden. Feuchtelasten mit einem positiven Vorzeichen stehen für einen Feuchtestrom von innen nach außen, Feuchtelasten mit einem negativen Vorzeichen bedeuten einen Feuchtestrom von außen nach innen.
Ähnlich schwierig wie bei der Analyse der Messwerte zur absoluten Feuchte der Raumluft gestalten sich auch die Untersuchungen zur Feuchtelast, obwohl die Werte bei der Feuchtelast aus Tagesmittelwerten gewonnen wurden.
Bei den älteren Bestandsgebäuden kann man für die Feuchtelasten einen Mittelwert im Bereich des Kurvenzugs der Klasse 2 der Feuchtelast ansetzen, was einem Wert für normal belegte Gebäude entsprechen soll. Jedoch liegen die Ergebnisse bei den Gebäuden der Mittelgebirgs- und der Alpenregion im Bereich der Feuchteklasse 1 und hätten damit Verhältnisse wie bei nicht belegten Gebäuden. Ausschlaggebend für die geringe Feuchtelast sind dabei die vergleichsweise niedrigeren Werte der absoluten Feuchte sowohl im Winter, als auch im Sommer.
Die Passivhäuser liegen demgegenüber bei einem Kurvenzug der Klasse 3 der Feuchte und damit höher als die älteren Bestandsgebäude. Dies entspräche dem Planungswert, wenn im Vorfeld über die Belegung keine Aussage gemacht werden kann. Nicht in dieses Bild passen jedoch das Passivhaus im Oberrheintal (Standort

63) und das Energiespargebäude im Donautal (Standort 204) die beide im Bereich der Klasse 1 der Feuchte liegen würden. Beim Passivhaus 63 liegt der Grund hierfür in einer höheren Luftwechselrate durch die mechanische Be- und Entlüftungsanlage und die damit verbundene vermehrte Feuchteabfuhr, beim Energiesparhaus im Donautal sind die Gründe auf das Nichtvorhandensein einer gebäudetechnischen Anlage zur Lüftung und der ganzjährig kühleren und damit trockeneren Außenluft zurückzuführen.

4 Fazit

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde in Passivhäuser sowie in Energiesparhäusern die alle mit einer hohen Luftdichtheit der Gebäudehülle und gebäudetechnischen Anlagen zur Be- und Entlüftung ausgestattet sind, über einen Zeitraum von acht Jahren hinweg Messungen der Temperatur und absoluten Feuchte der Innen- und Außenluft durchgeführt. Diese Messergebnisse wurden mit den Daten aus ausgewählten älteren Bestandsgebäuden verglichen um herauszufinden, ob die energieoptimierten Bauweisen, die erhöhte Luftdichtheit und die Anlagentechnik zu Unterschieden bei der Raumlufttemperatur und der absoluten Feuchte in den Räumen führen.

Wie die Auswertung und der Vergleich der verschiedenen Gebäudetypen zeigt, muss bei den energiesparenden Gebäuden mit höheren Raumlufttemperaturen und einer höheren absoluten Feuchte gerechnet werden. Deutlich sichtbar wird dies bei der Betrachtung von Regressionskurven die aus stündlichen Messwerten gebildet wurden. Die Zyklen der Raumlufttemperaturen liegen bei den Passivhäusern und Energiesparhäusern, unabhängig vom Standort, über den korrespondierenden Werten der älteren Bestandsgebäude. Gleiches gilt auch für die Betrachtung der absoluten Feuchte. Auch hier liegen, insbesondere während der für die Feuchteabfuhr in Gebäuden wichtigen Heizzeit, in den hoch wärmegedämmten Gebäuden höhere Werte der absoluten Feuchte vor im Vergleich zu den luftundichteren älteren Bestandsgebäuden.

Als wenig tauglich für den Ansatz beim Feuchtenachweis künftiger Gebäude erweisen sich die Empfehlungen zur Temperatur und Feuchteverteilung nach DIN 4108-3 Anhang D und DIN EN 15026:2023-12 Anhang D. In diesem Zusammenhang gilt für ältere Bestandsbauten: Liegen keine Messergebnisse zur Raumlufttemperatur und absoluten Feuchte vor, dann können mit den Werten nach Norm abschätzende Be-

rechnungen zur Feuchtigkeit in Bauteilen vorgenommen werden. Als Planungsinstrument bei Neubauten, insbesondere bei solchen mit einem hohen Anspruch an die Energieeinsparung, sind diese Angaben aber wenig geeignet.
Ähnlich schwierig ist auch eine Analyse des Schimmelpilzrisikos auf Bauteilinnenoberflächen bei Passivhäusern bzw. energiesparenden Gebäuden. Die derzeit gültigen Randbedingungen bei Untersuchungen zum hygienischen Wärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 gehen auf Angaben aus den 1940er- und 1950er-Jahren zurück. In Zeiten des Klimawandels sind diese Randbedingungen jedoch nur noch bedingt verwendbar. Außerdem hat sich die Situation der damaligen Bauweisen im Vergleich zu heutigen bzw. künftigen stark verändert. In den 1940er- und 1950er-Jahren war die Qualität der Baustoffe deutlich schlechter als heute, die Gebäude waren weniger luftdicht und die Raumlufttemperaturen lagen, bedingt durch den Stand der gebäudetechnischen Anlagen wesentlich niedriger. Daraus den Schluss zu ziehen, dass moderne Gebäuden in Hinsicht auf eine mögliche Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen unkritischer sind, ist so nicht uneingeschränkt richtig. Denn wie die vorliegenden Untersuchen zeigen, kann auch bei modernen, energieoptimierten Bauweisen, bedingt durch höhere Feuchtelasten in den Räumen, ein Schadensrisiko beim hygienischen Wärmeschutz entstehen. Für die untersuchten Gebäude gilt jedoch, dass keine Angaben über mögliche Schimmelpilzbildungen auf Bauteilinnenoberflächen bekannt sind. Dies mag einerseits auf die konstruktionsbedingten höheren Oberflächentemperaturen zurückzuführen sein, kann aber auch damit zusammenhängen, dass die Gebäudenutzer über vertiefte Kenntnisse zum Wärme- und Feuchteschutz verfügen und damit ein problembewusstes Verhalten zeigen.
Generell ist ein direkter Rückschluss von den vorliegenden Messwerten für die Temperatur und Feucht in der Raum- und Außenluft auf eine mögliche Schimmelpilzbildung auf Bauteilinnenoberflächen und den Tauwasserausfall in Bauteilen nicht möglich, da es sich bei den rechnerischen Nachweisen nach DIN 4108-2:2013-02 und DIN 4108-3:2024-03 um Modelle handelt, mit deren Hilfe „auf der sicheren Seite liegende“ Bemessungen von Bauteilen vorgenommen werden sollen. Darüber hinaus beruhen die normativen Berechnungen auf stationären, also zeitlich konstanten Randbedingungen, während die Messwerte instationäre, d. h. zeitlich veränderliche Daten widerspiegeln.
Trotzdem stellen die Untersuchungen und die daraus gewonnen Daten für die Aktualisierung normativer und damit gesetzlicher Vorgaben für den hygienischen Wärme-

schutz und den Feuchteschutz von Bauteilen ein wertvolles Hilfsmittel dar. Erstmalig wurden an einer Vielzahl von Standorten in der Bundesrepublik über eine lange Reihe von Jahre hinweg Messungen durchgeführt die es ermöglichen (können / sollten) die Randbedingungen für Berechnungen zum hygienischen Wärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 und zum Periodenbilanzverfahren nach DIN 4108-3:2024-03 zu überprüfen und für die Untersuchungen zum Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2024-03 Anhang D „Feuchteschutzbemessung durch hygrothermische Simulation“ Eingangsdaten zu entwickeln, die für die Bundesrepublik allgemein anwendbar sind. Um unter den vorab genannten, im Wandel befindlichen Randbedingungen auch künftig kostengünstige und gesundheitlich unbedenkliche Bauweisen zu ermöglichen, sollte eine Überarbeitung der Berechnungsrandbedingungen für die baurechtlich verbindlichen Normen DIN 4108-2:2013-02 und DIN 4108-3:2024-03 in Angriff genommen werden.

Literaturangaben:

[1] DIN 4108-3:2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

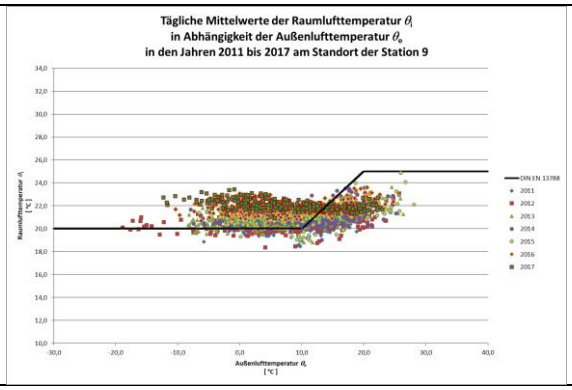
[2] DIN 4108-3:2024-03 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung

[3] 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

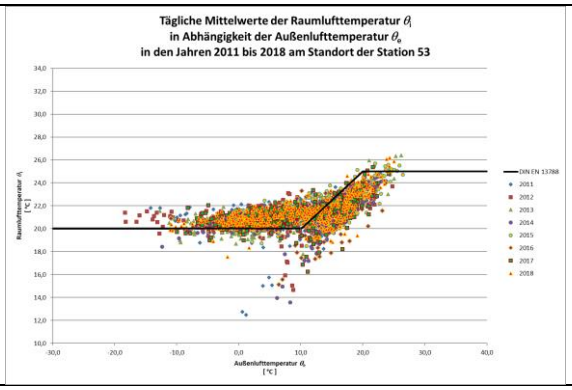
[4] DIN EN 15026:2007-07 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation

Anhang A: Standortbezogene Verteilung der Temperaturen

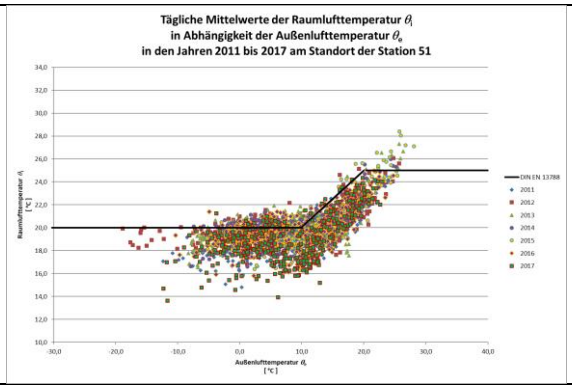
Küstenklima



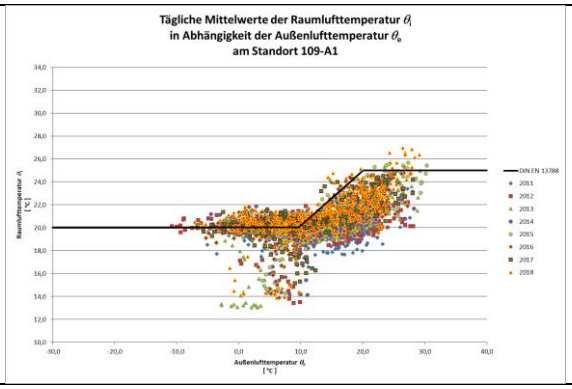
Kontinentales Klima



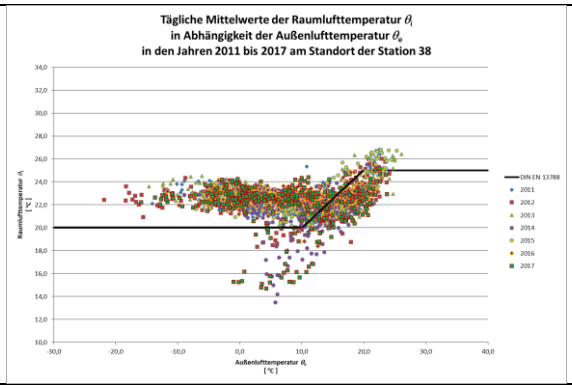
Mittelgebirgsregion



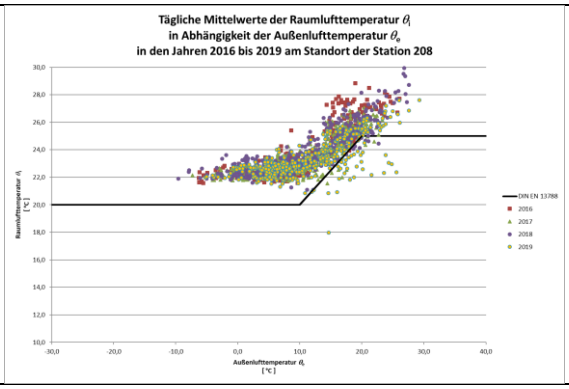
Oberrheingraben



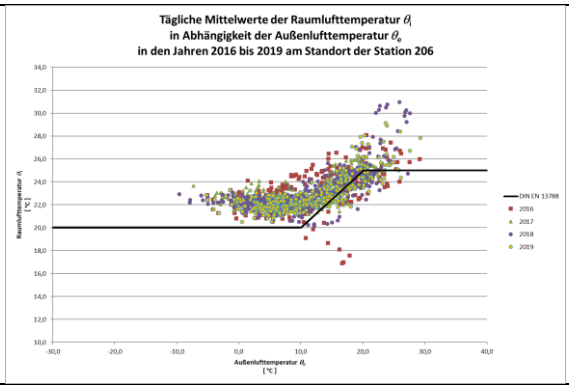
Alpenregion



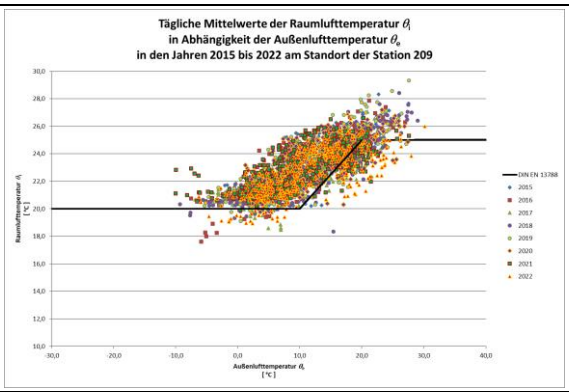
Passivhaus 1 kontinentales Klima



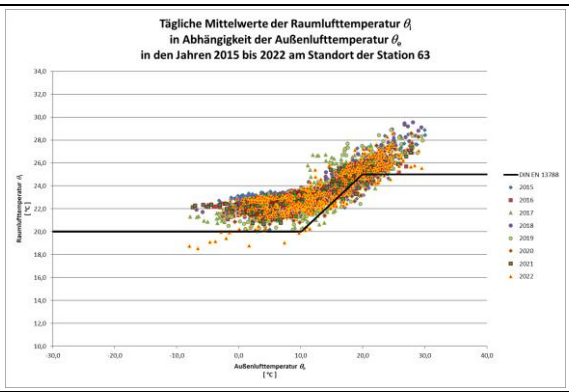
Passivhaus 2 kontinentales Klima



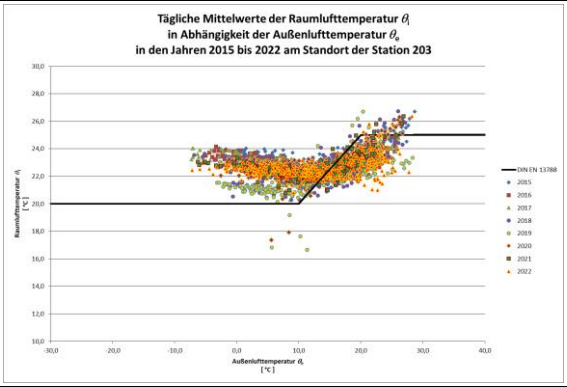
Passivhaus 3 Mittelgebirge



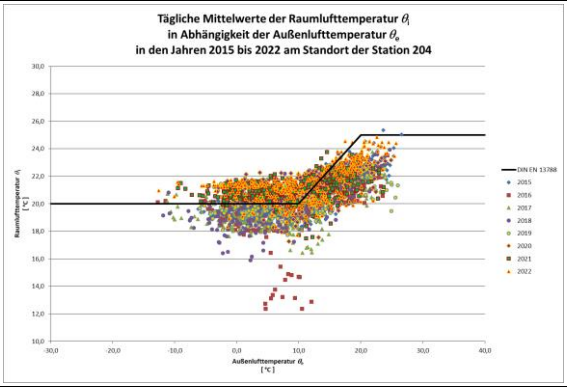
Passivhaus 4 Oberrheingraben



Energiesparhaus 1 Oberrheingraben

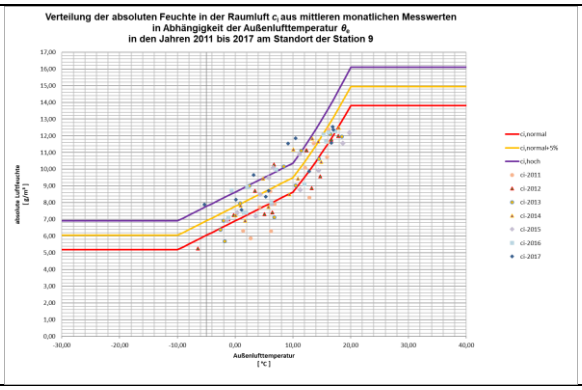


Energiesparhaus 2 Donautal

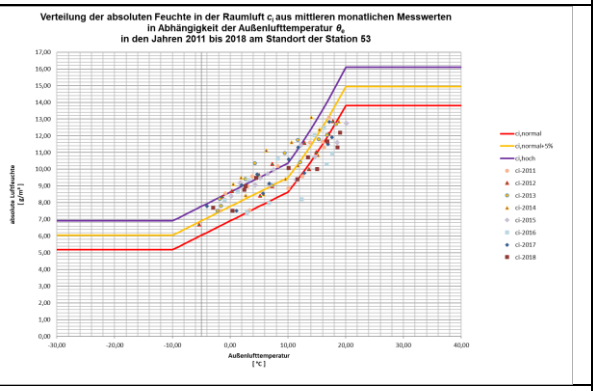


Anhang B: Standortbezogene Verteilung der absoluten Feuchte

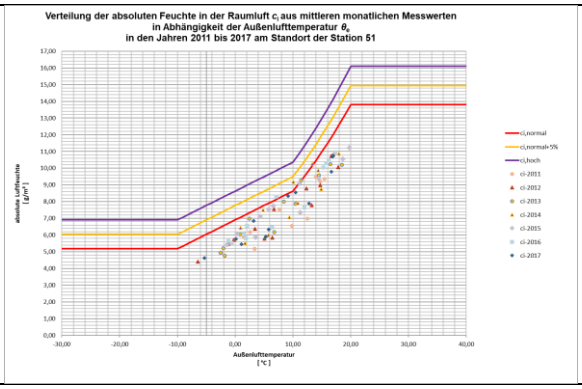
Küstenklima



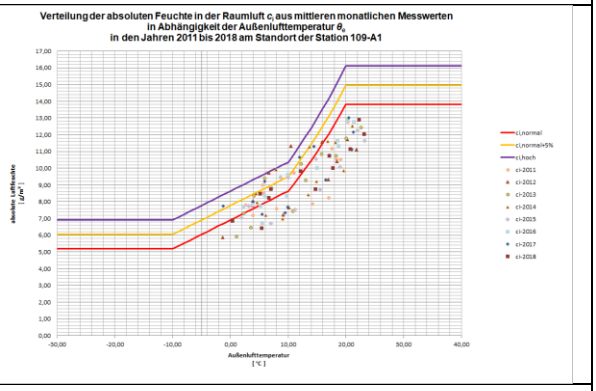
Kontinentales Klima



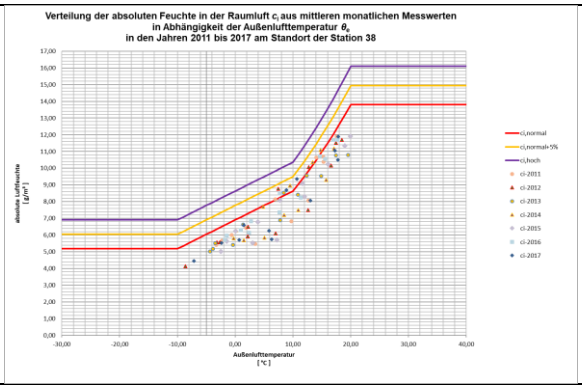
Mittelgebirgsregion



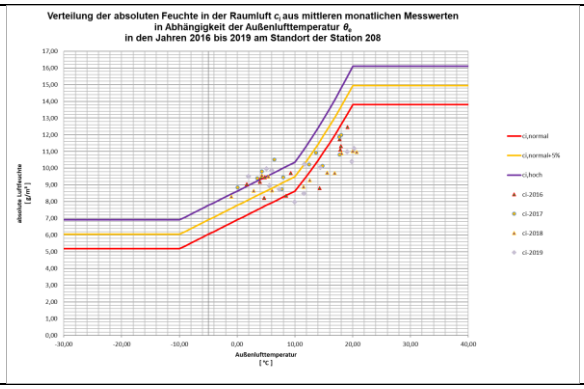
Oberrheingraben



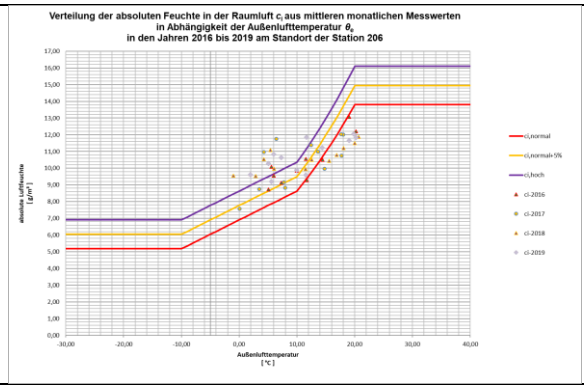
Alpenregion



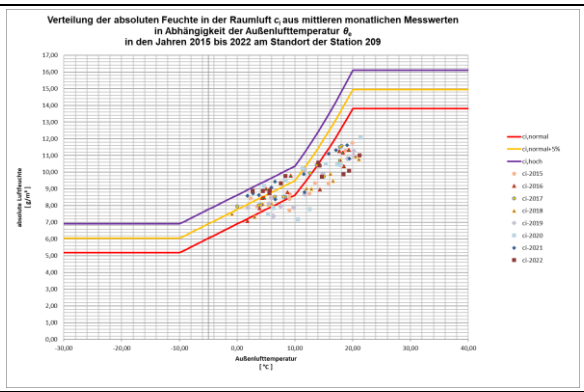
Passivhaus 1 kontinentales Klima



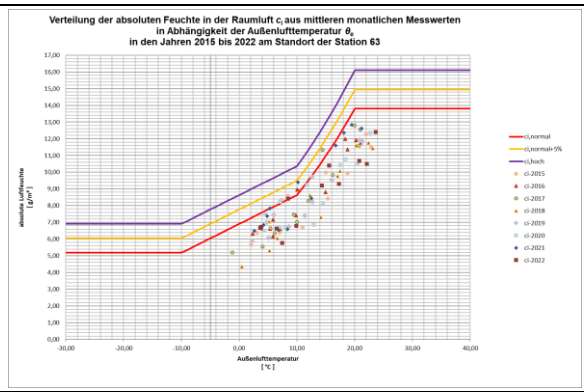
Passivhaus 2 kontinentales Klima



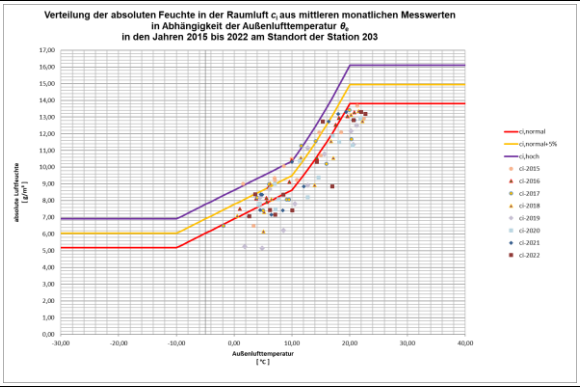
Passivhaus 3 Mittelgebirge



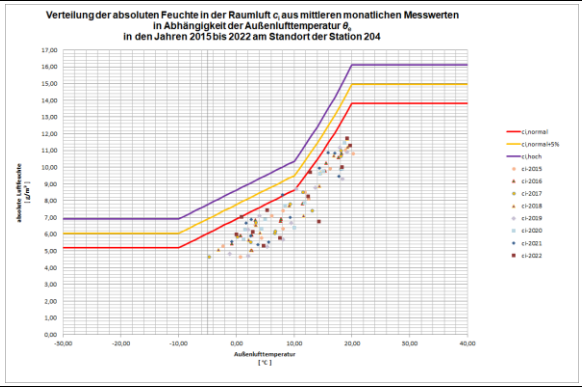
Passivhaus 4 Oberrheingraben



Energiesparhaus 1 Oberrheingraben

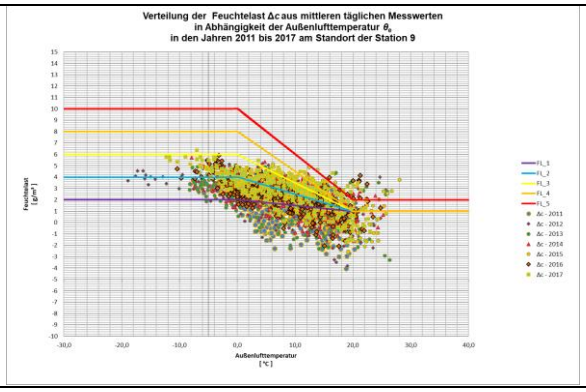


Energiesparhaus 2 Donautal

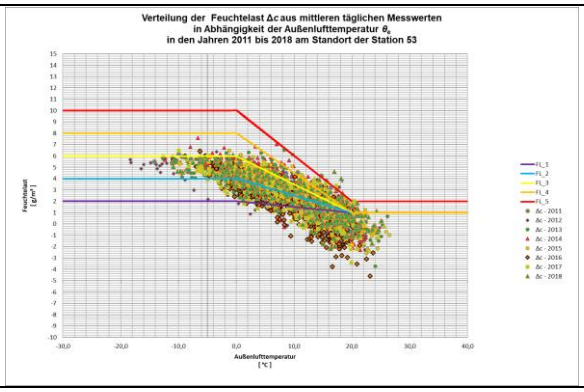


Anhang C: Standortbezogene Verteilung der Feuchtelast

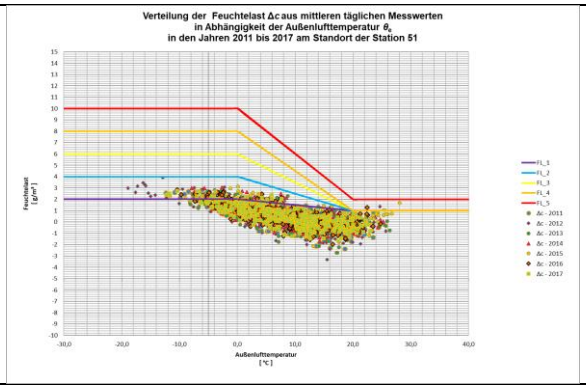
Küstenklima



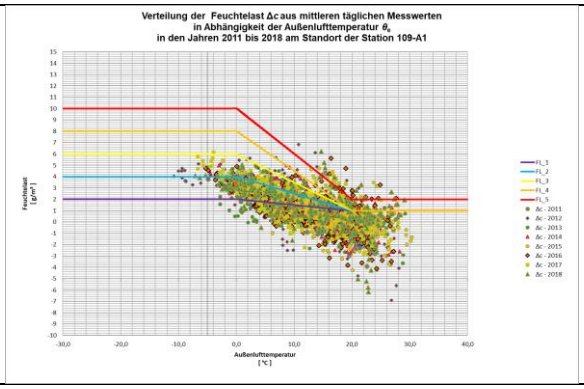
Kontinentales Klima



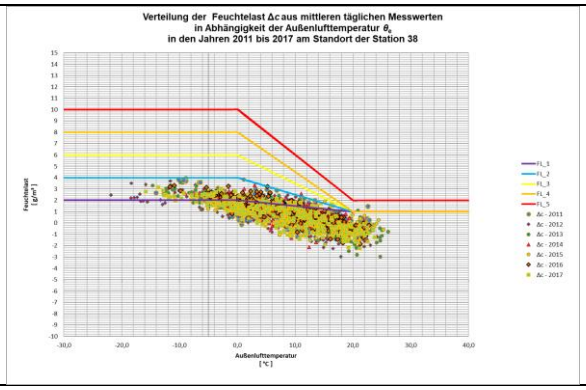
Mittelgebirgsregion



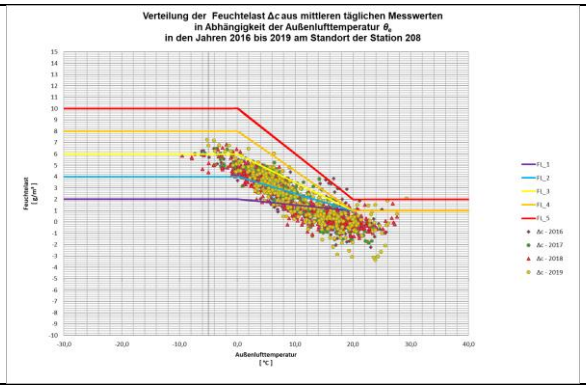
Oberrheingraben



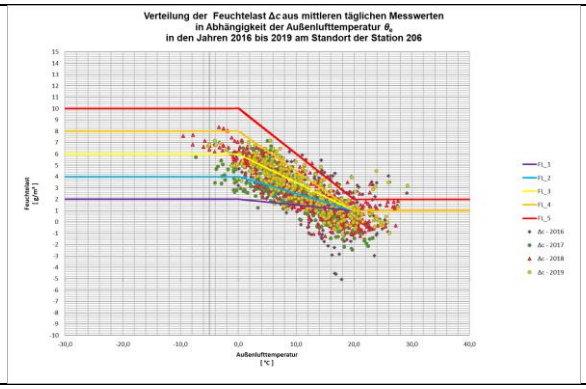
Alpenregion



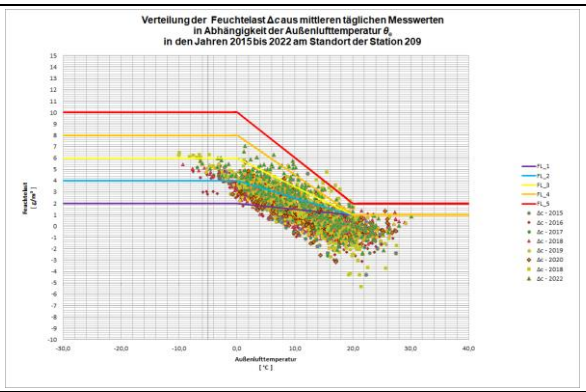
Passivhaus 1 kontinentales Klima



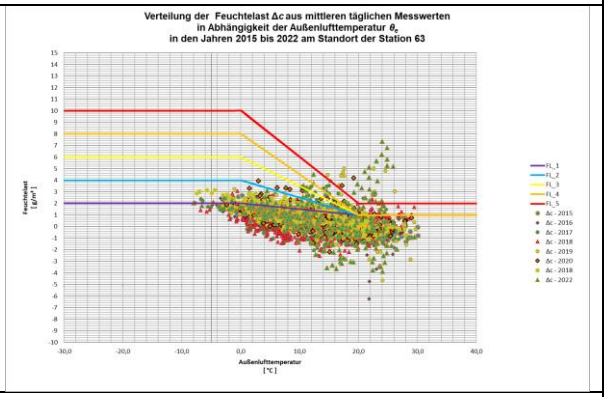
Passivhaus 2 kontinentales Klima



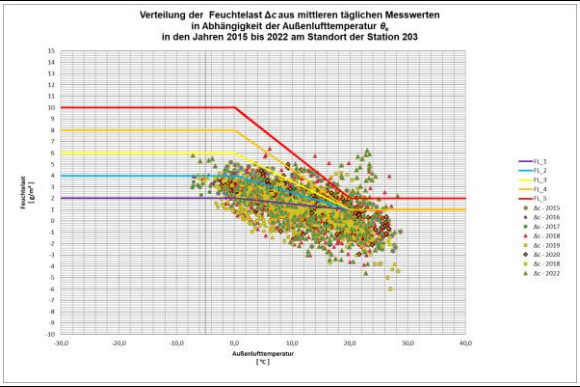
Passivhaus 3 Mittelgebirge



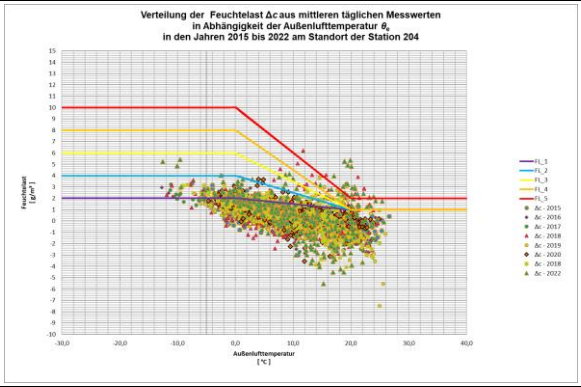
Passivhaus 4 Oberrheingraben



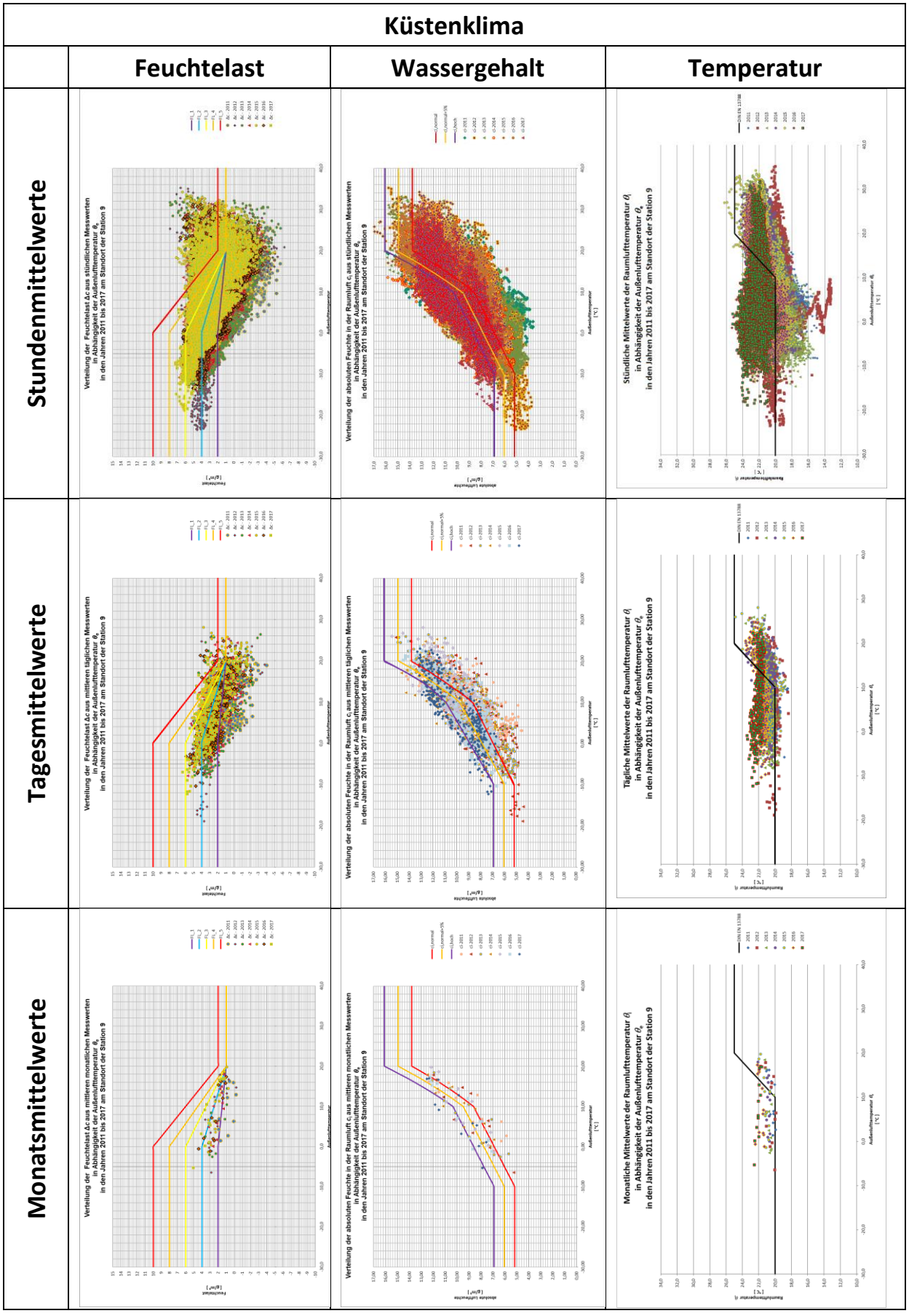
Energiesparhaus 1 Oberrheingraben

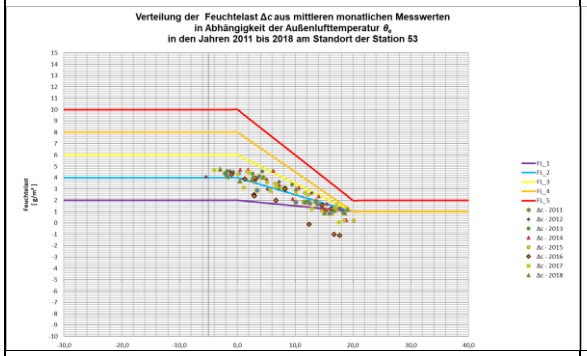
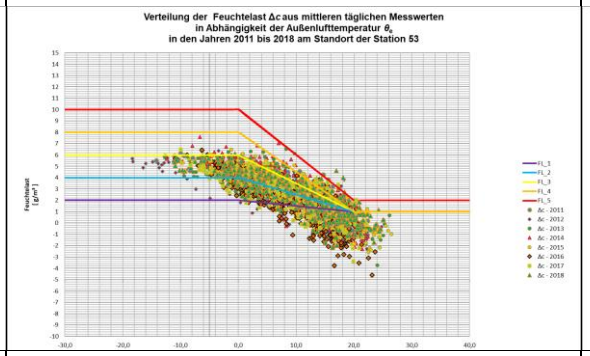
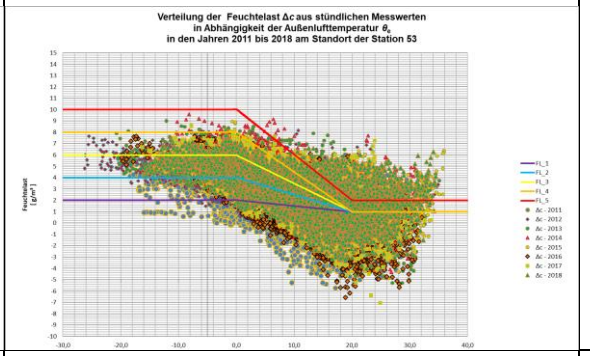
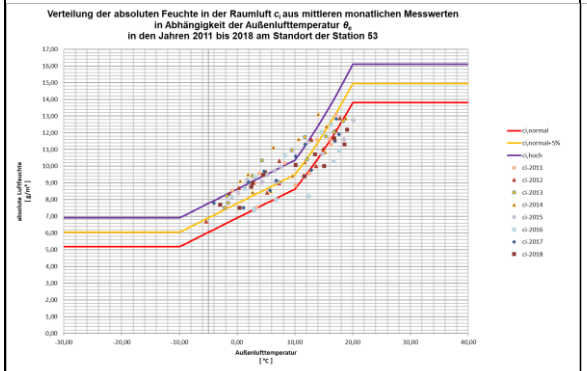
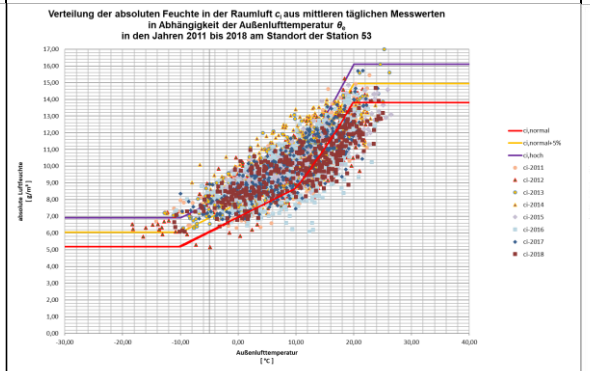
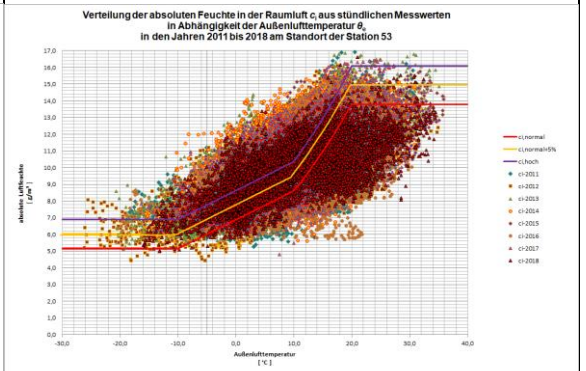
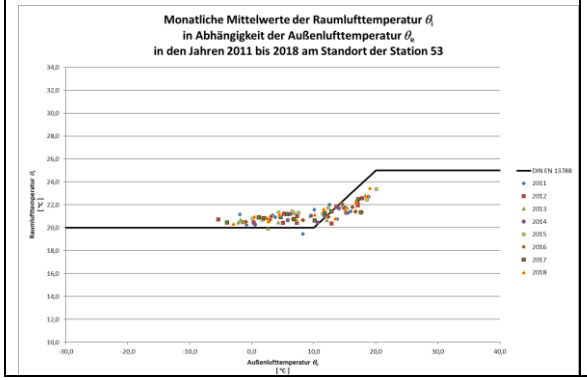
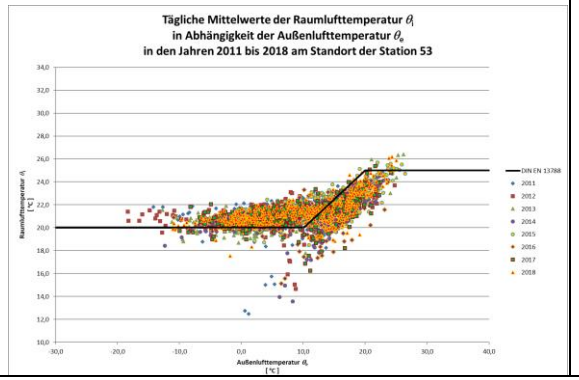
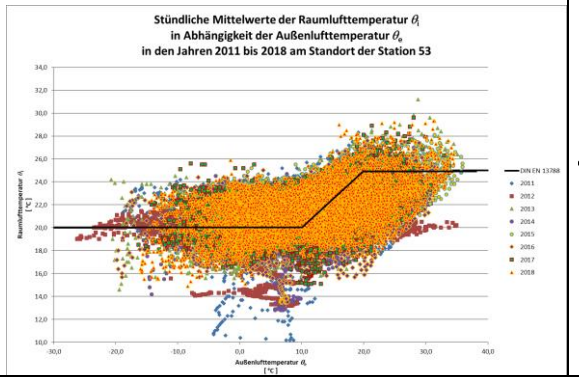


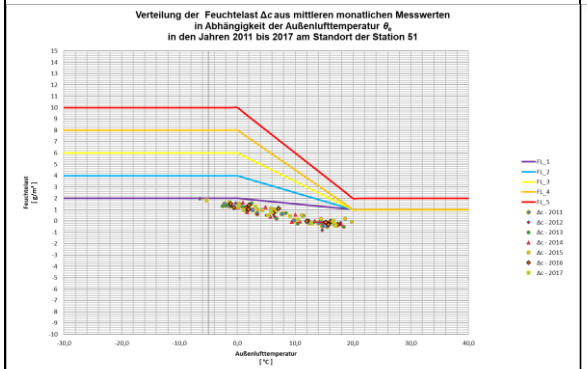
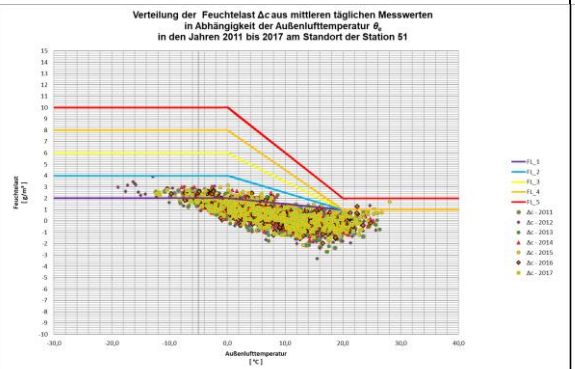
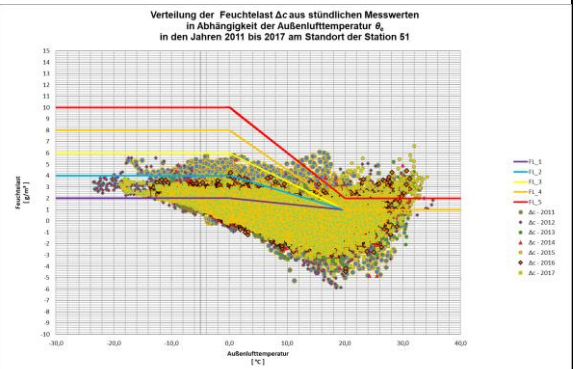
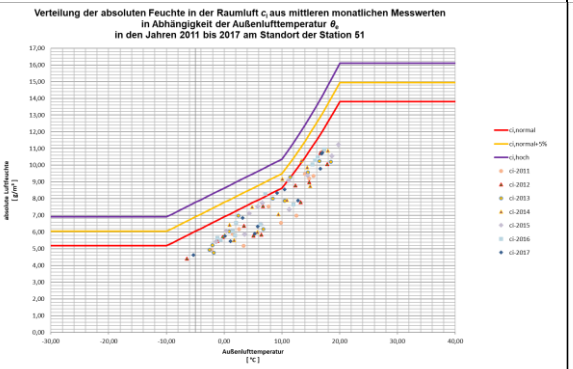
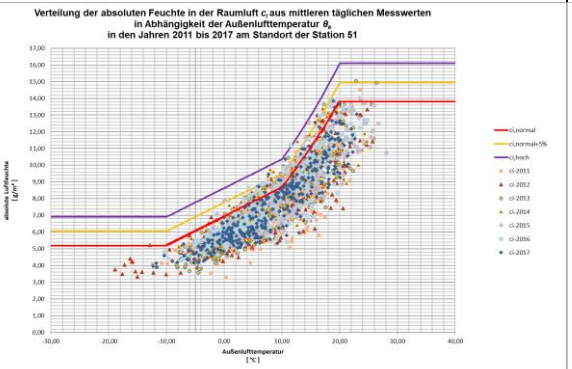
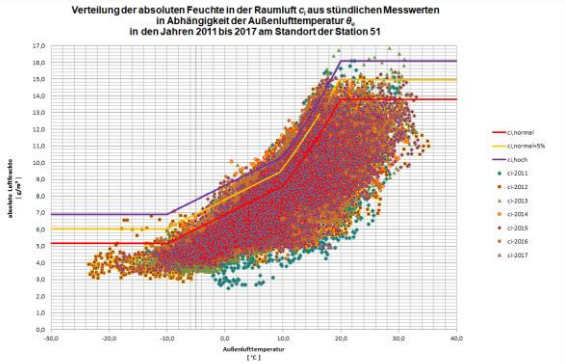
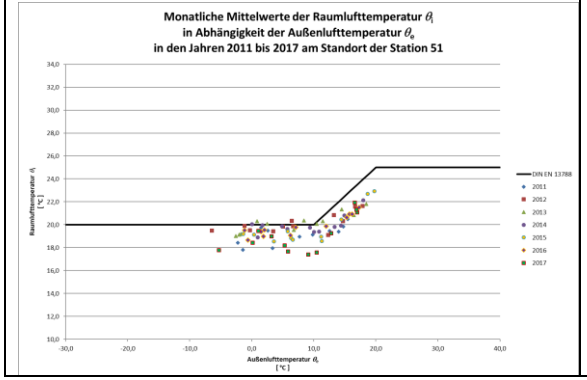
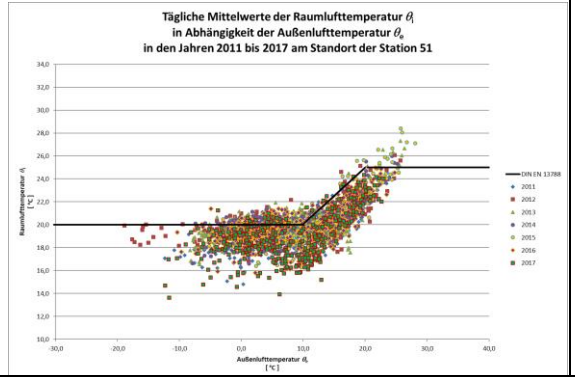
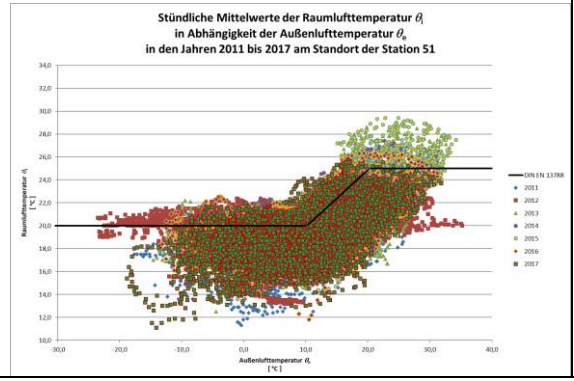
Energiesparhaus 2 Donautal

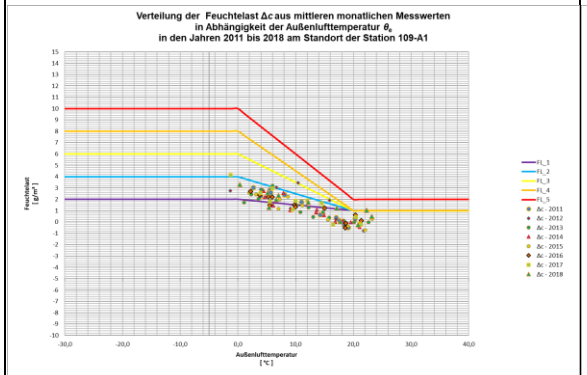
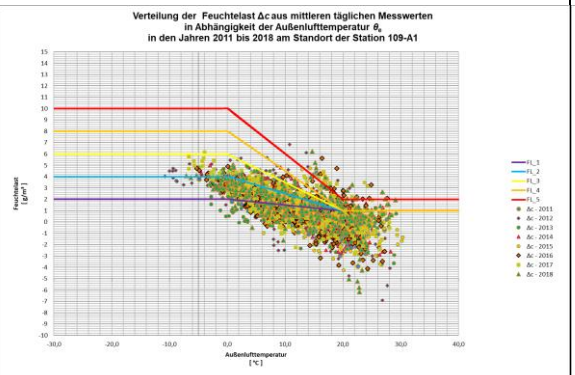
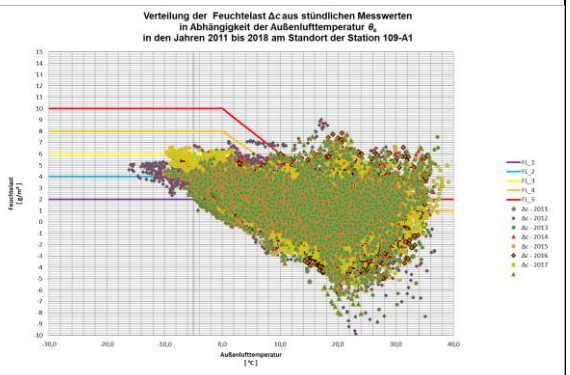
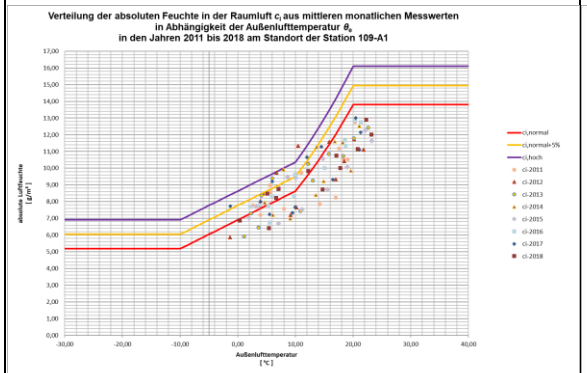
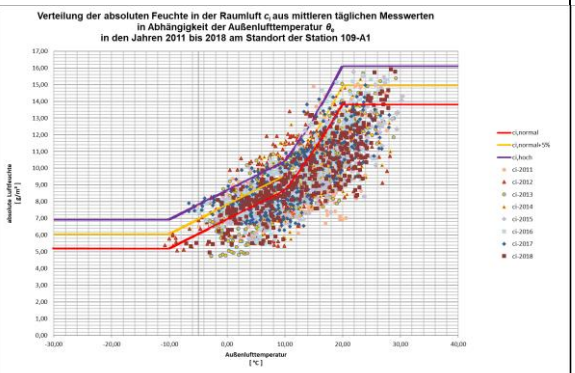
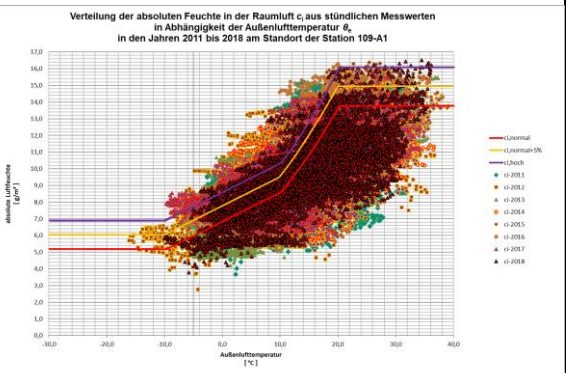
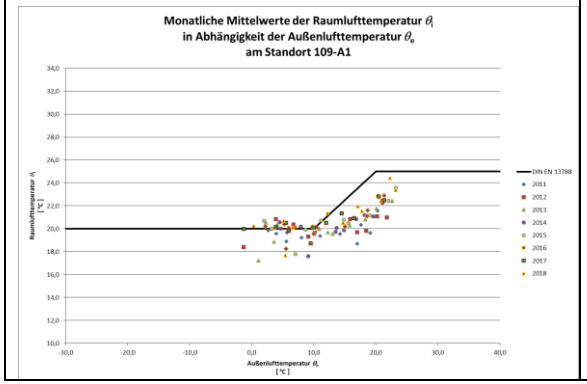
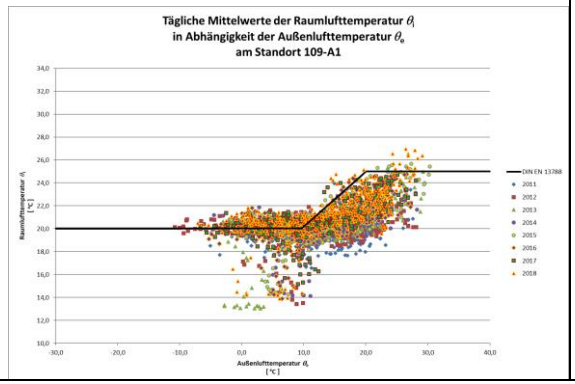
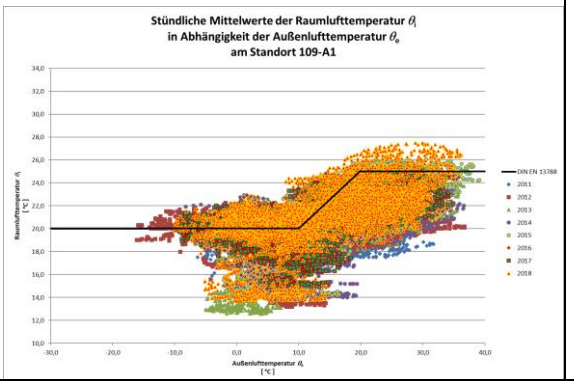


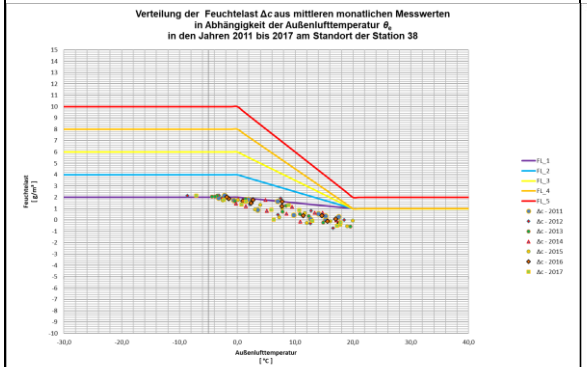
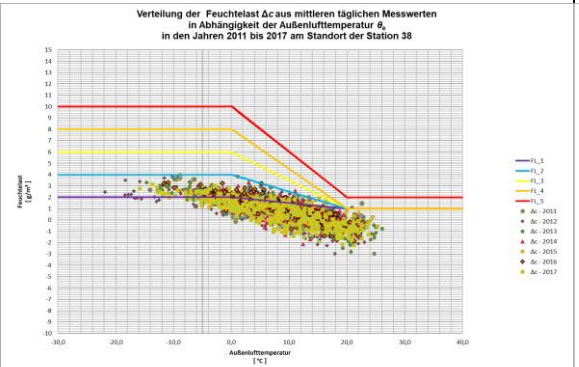
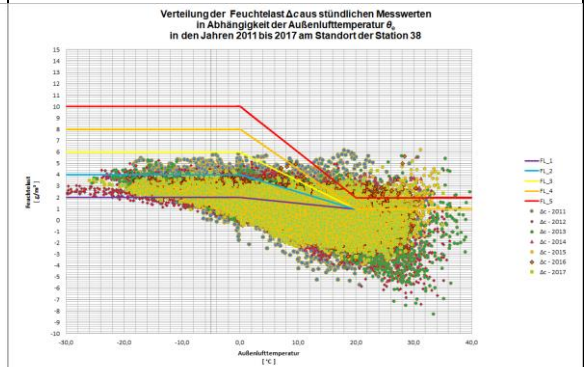
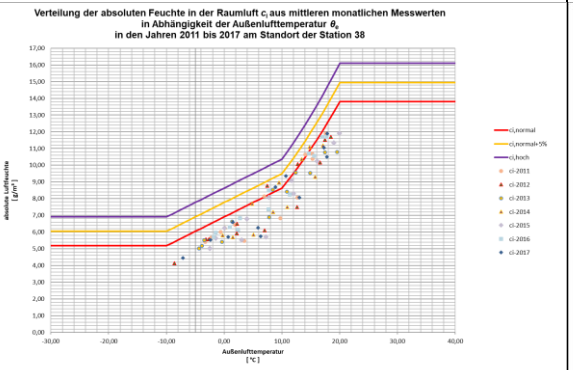
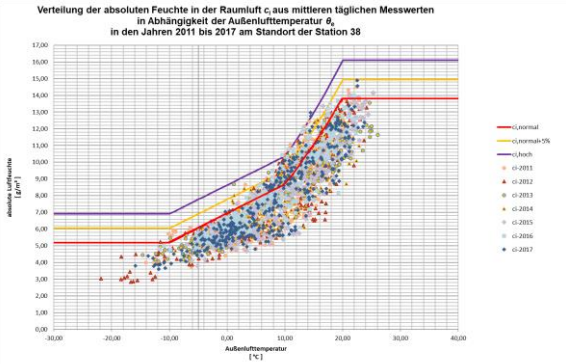
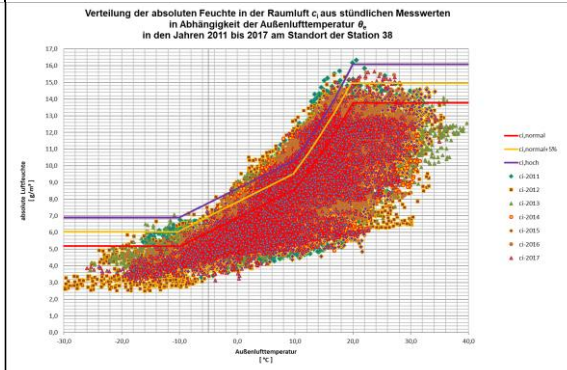
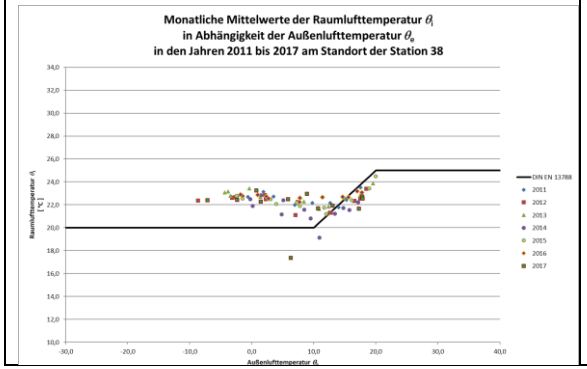
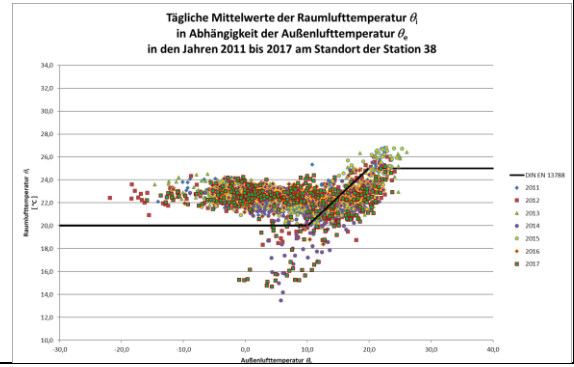
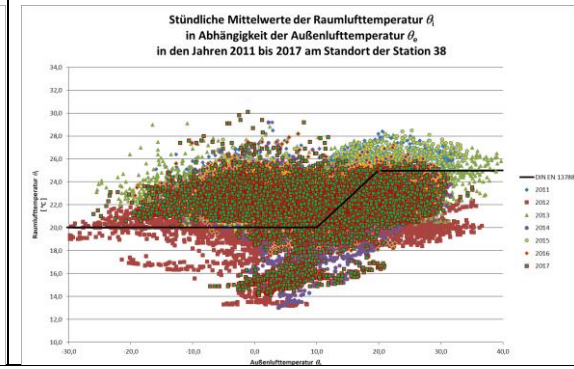
Anhang D: Standortbezogene Verteilung der Mess- und Vergleichsgrenzwerte



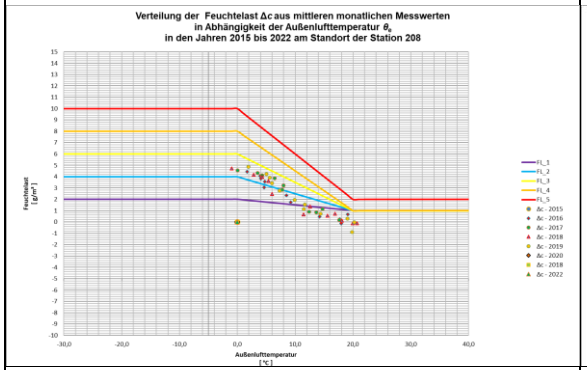
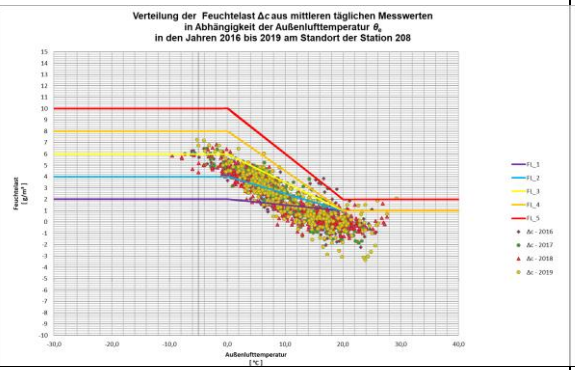
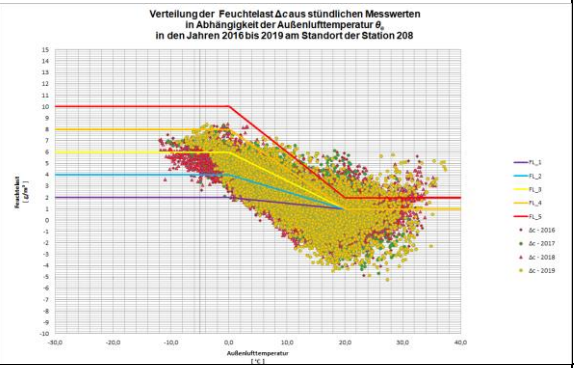
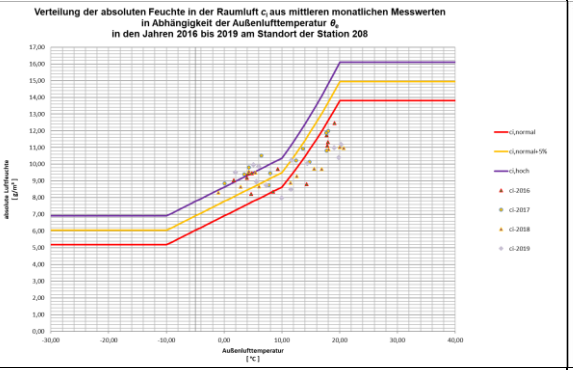
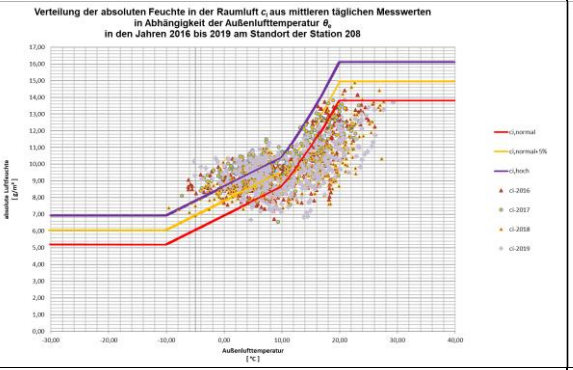
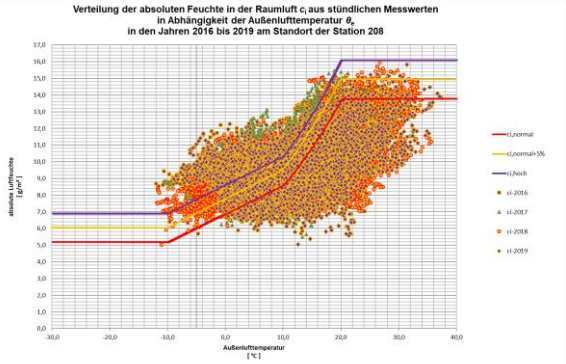
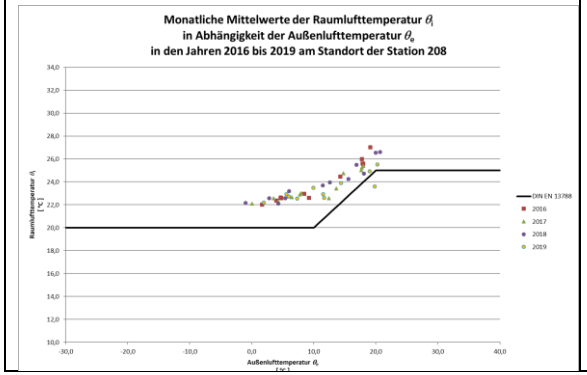
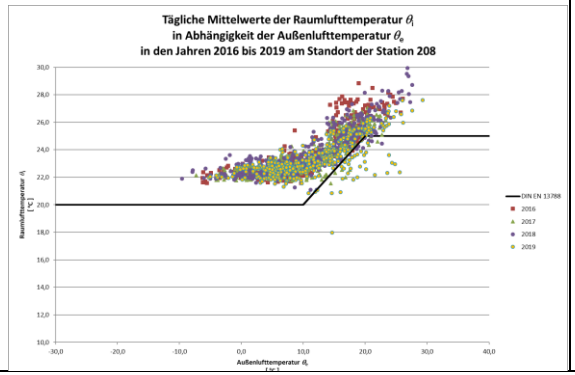
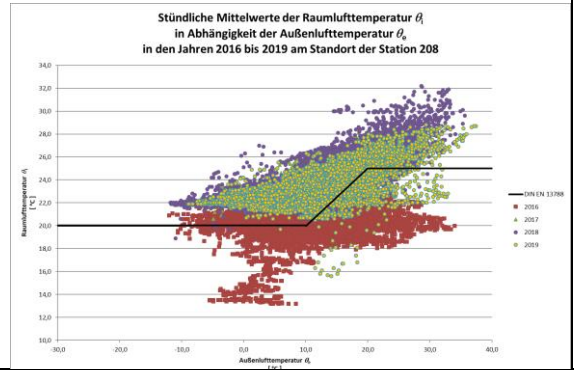
	Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte		
Feuchtelast				Feuchtelast	Kontinentales Klima
Wassergehalt				Wassergehalt	
Temperatur				Temperatur	

	Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte	
Mittelgebirgsregion				Feuchtelast
				Wassergehalt
				Temperatur

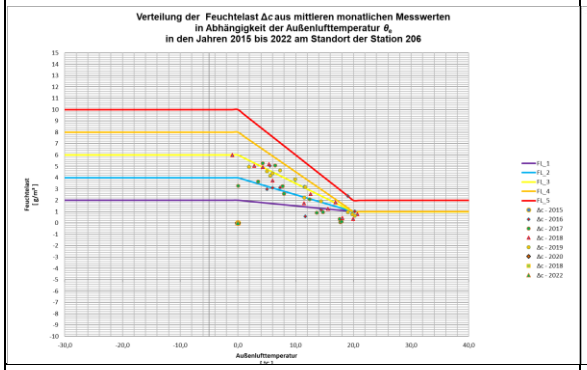
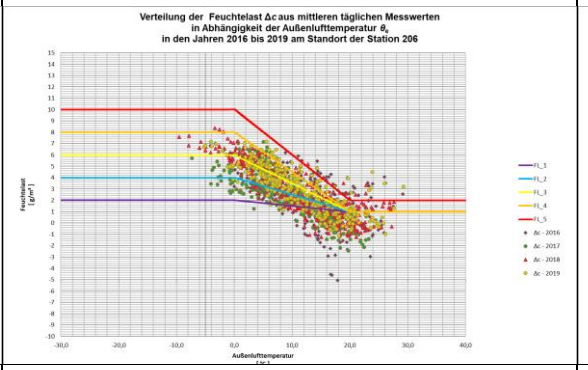
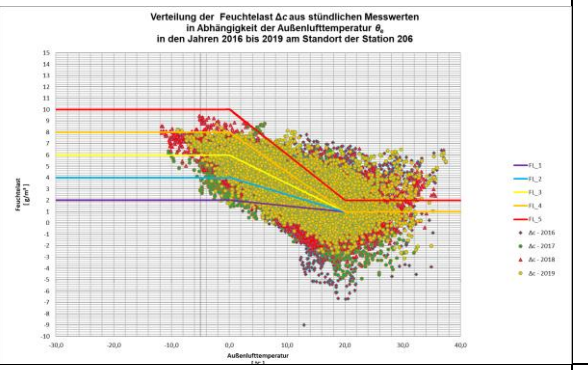
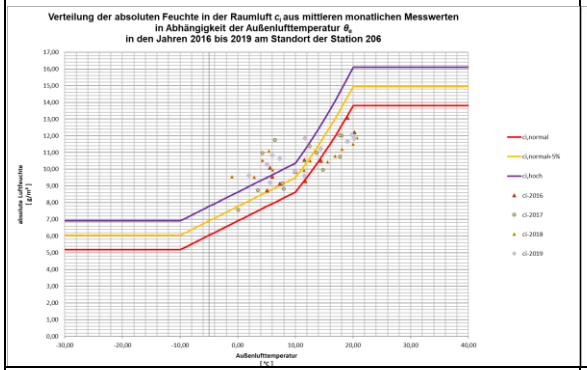
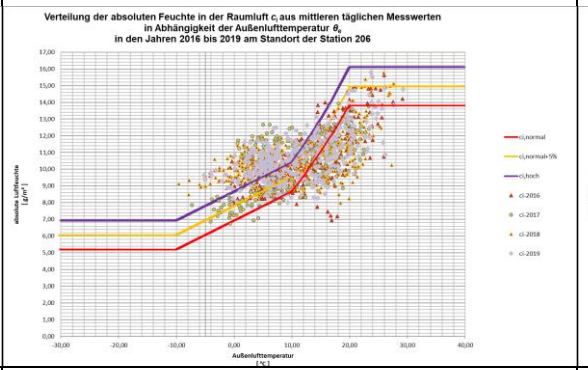
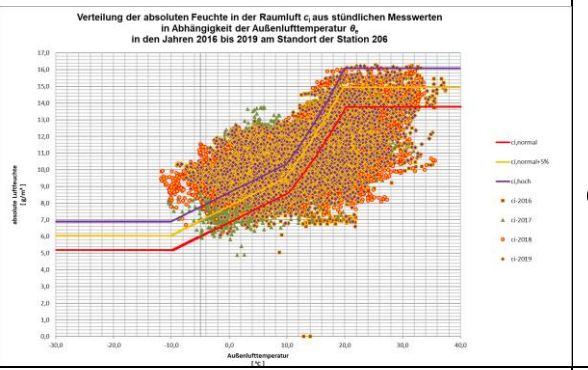
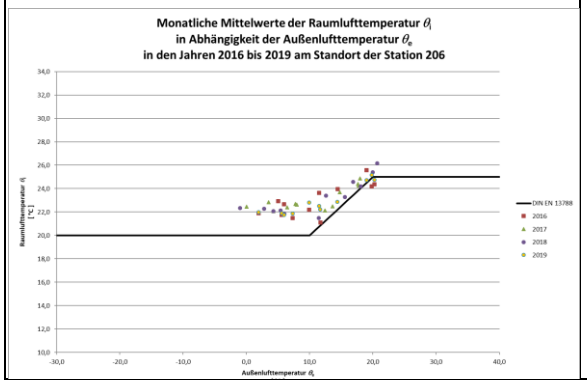
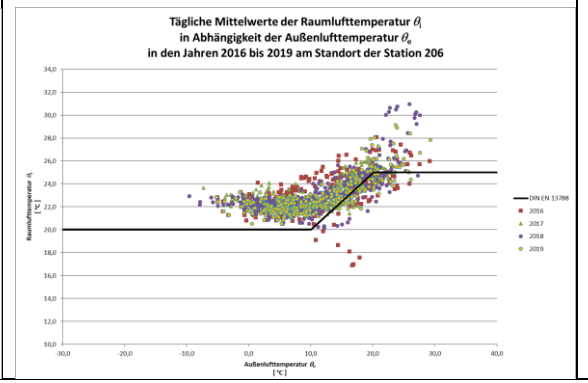
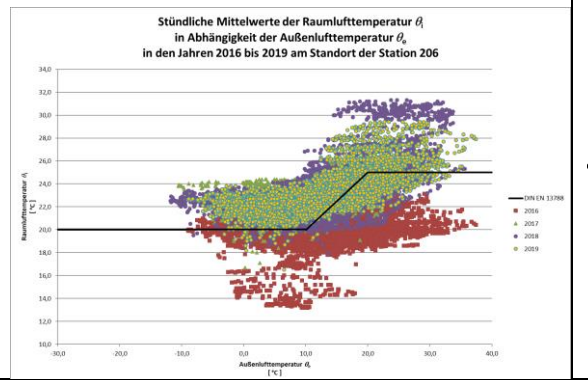
Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte		
			Feuchtelast	Oberrheingraben
			Wassergehalt	
			Temperatur	

	Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte		
Feuchtelast					
Wassergehalt					
Temperatur					

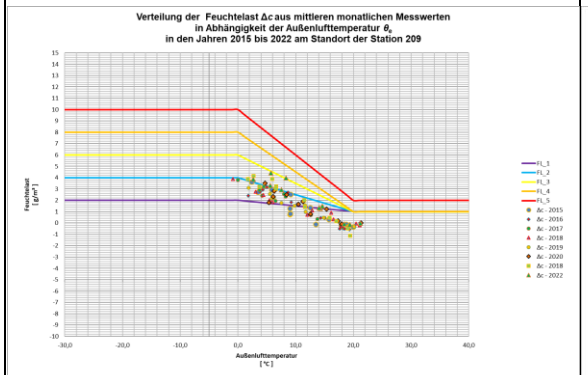
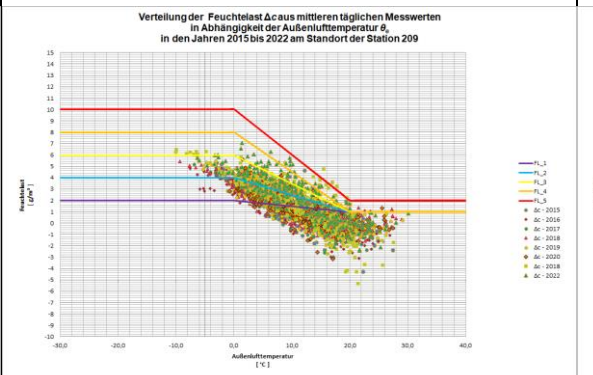
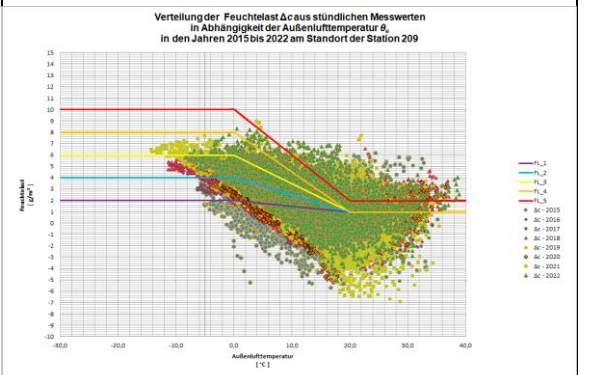
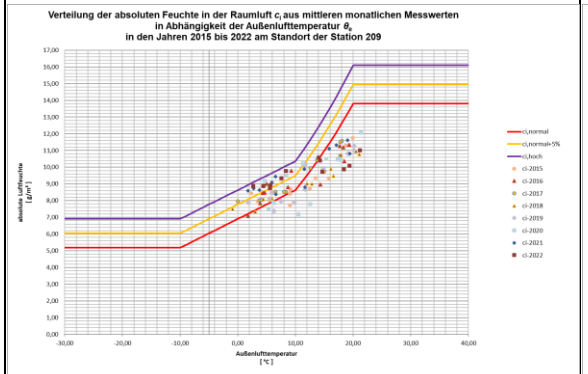
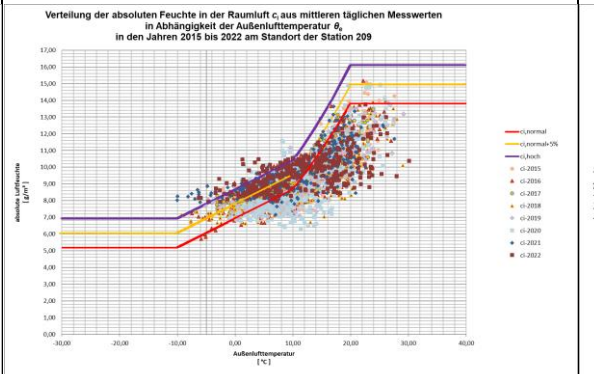
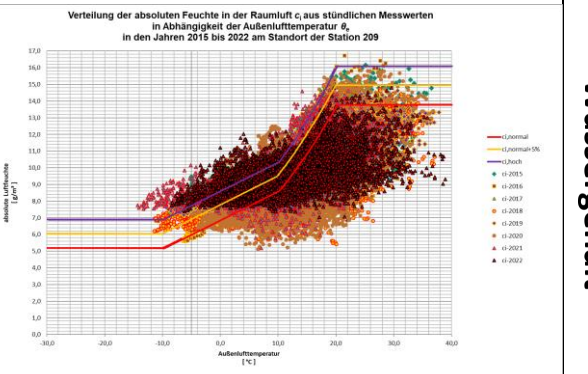
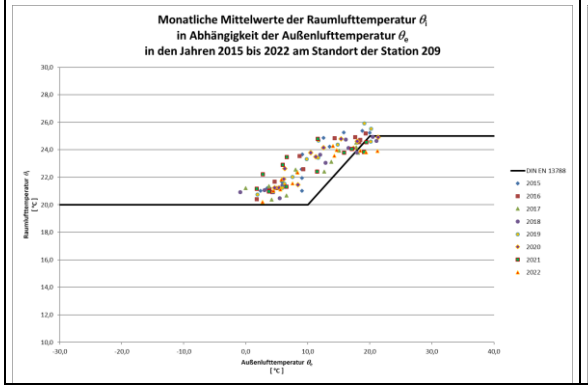
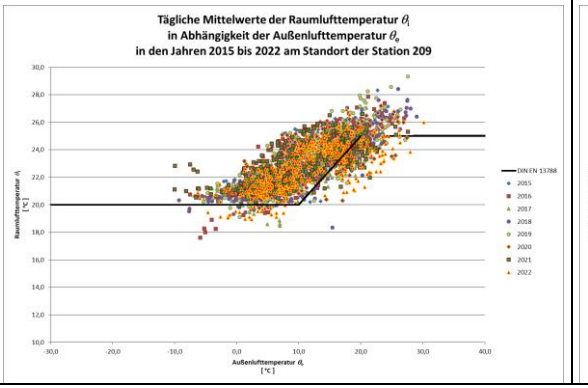
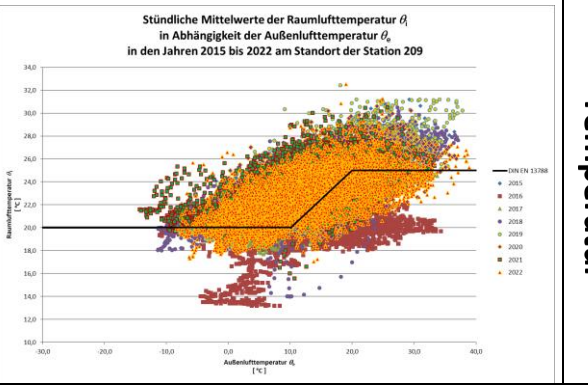
Alpenregion

	Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte
Feuchtelast			
Wassergehalt			
Temperatur			

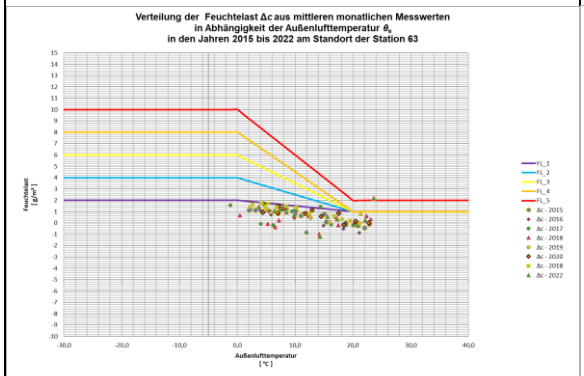
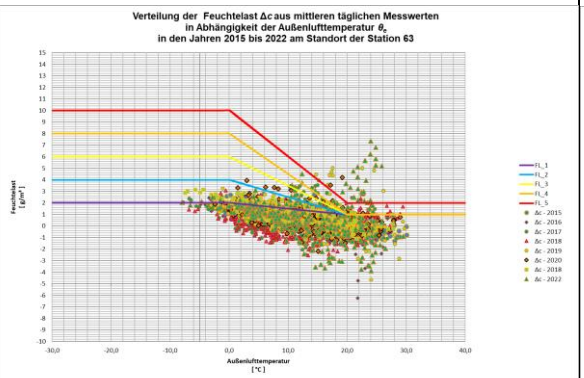
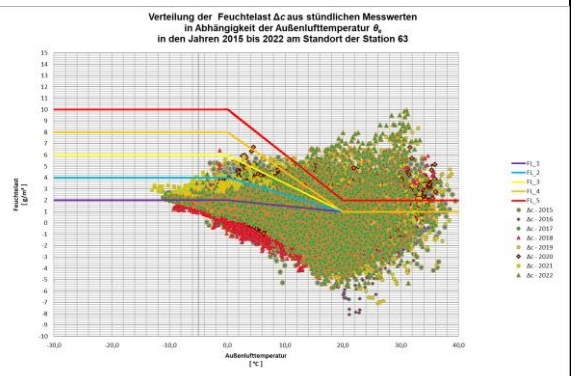
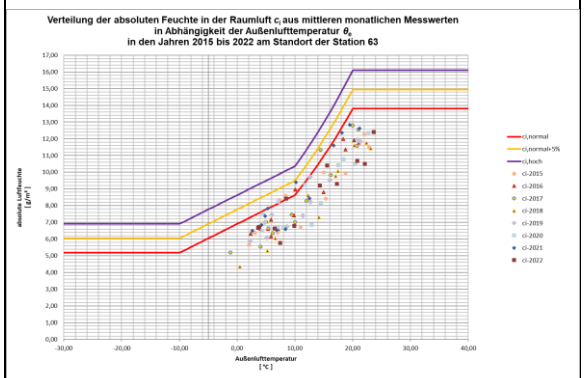
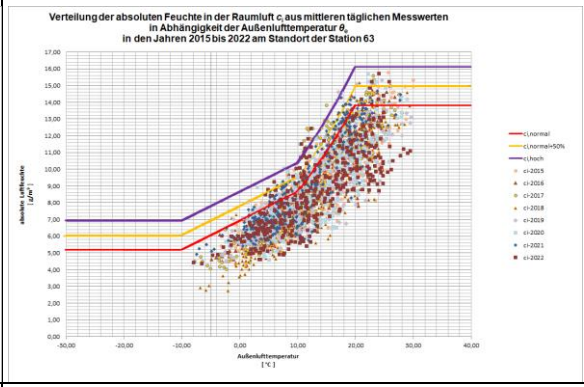
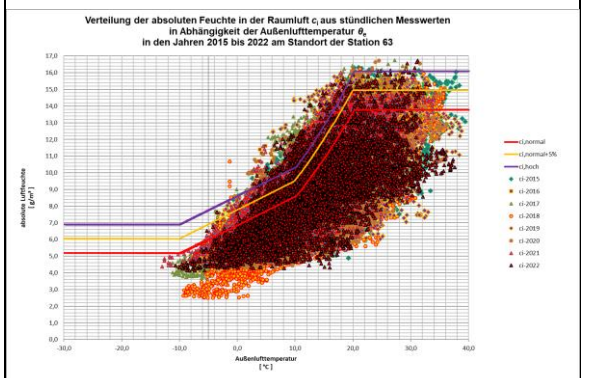
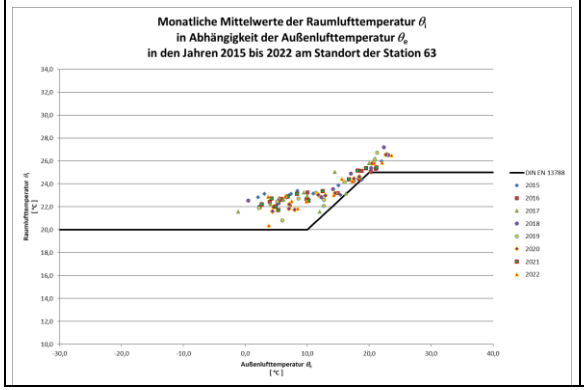
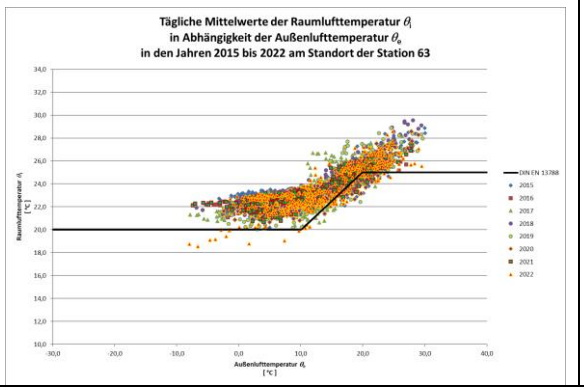
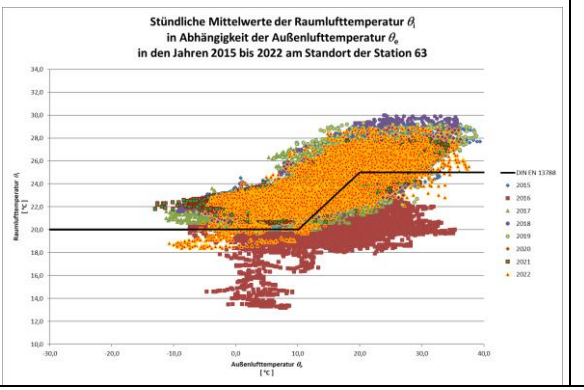
Passivhaus 2 Kontinentalklima

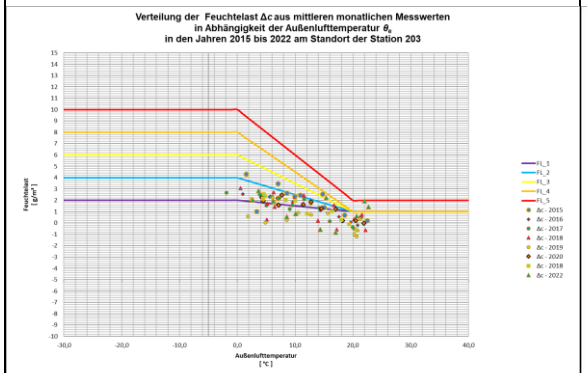
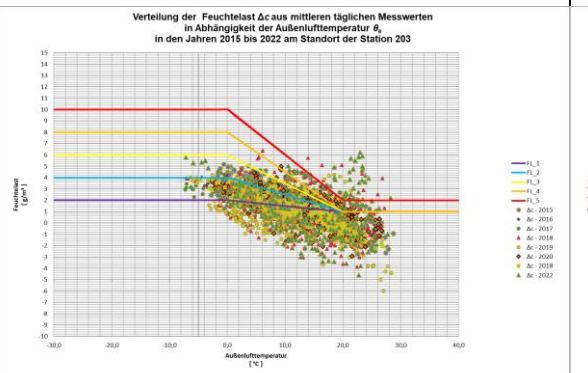
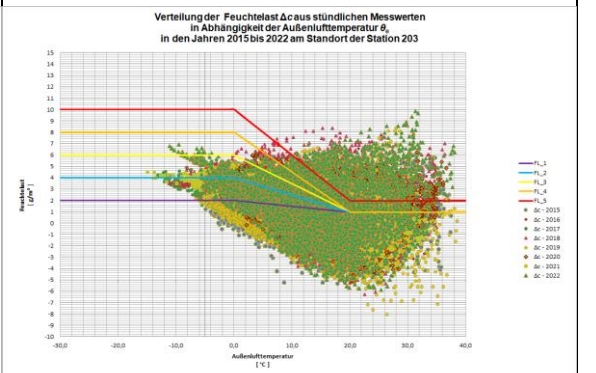
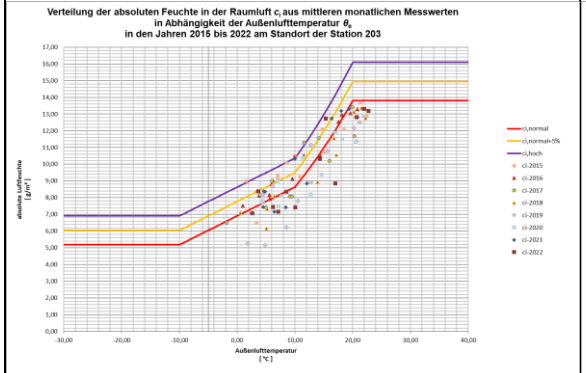
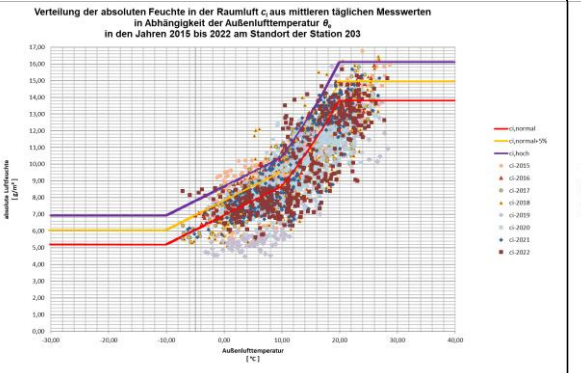
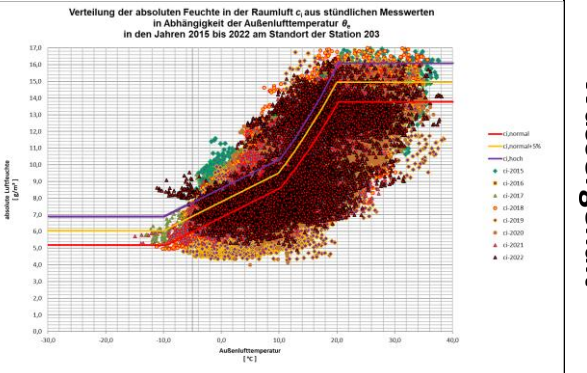
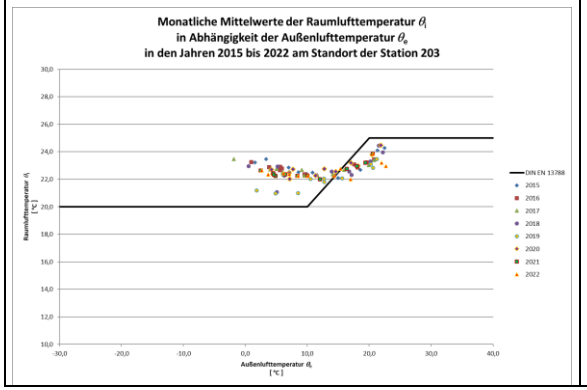
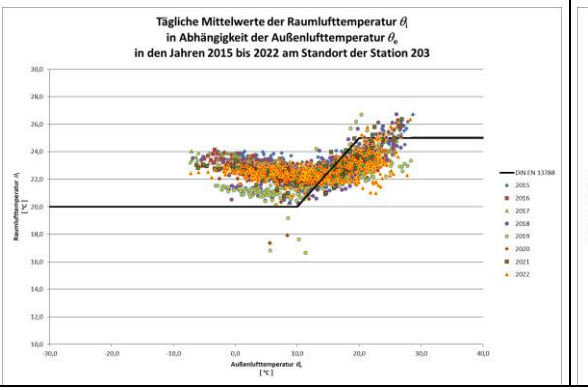
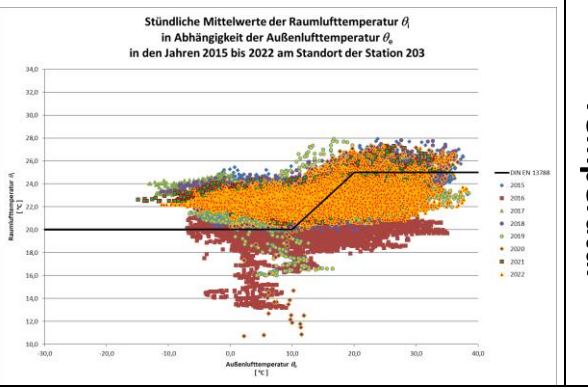
	Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte
Feuchtelast			
Wassergehalt			
Temperatur			

Passivhaus 3 Mittelgebirge

	Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte
Feuchtelast			
Wassergehalt			
Temperatur			

Passivhaus 4 Oberrheingraben

Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte	
			**Feuchtelast**
			**Wassergehalt**
			**Temperatur**

	Monatsmittelwerte	Tagesmittelwerte	Stundenmittelwerte
Feuchtelast			
Wassergehalt			
Temperatur