



Institut für Stahlbau
Ingenieurholzbau

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Prof. Dr.-Ing. Benno Hoffmeister

Mies-van-der-Rohe-Str. 1

D-52074 Aachen

Telefon: +49 241 80-25183

Fax: +49 241 80-22140

hoff@stb.rwth-aachen.de

www.stb.rwth-aachen.de

Abschlussbericht

Klimamonitoring von Dächern in Nagelplattenbauweise

Lukas Rauber, M.Sc.

Vera Wilden, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Benno Hoffmeister

Bericht Nr.: 20-11-9001

Im Auftrag der

MiTek Industries GmbH

Aachen, 13.10.2023

Impressum

Abschlussbericht – Klimamonitoring von Dächern in Nagelplattenbauweise

Autor:innen

Lukas Rauber, M.Sc.

Vera Wilden, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Benno Hoffmeister

RWTH Aachen University

Institut für Stahlbau

Fachgebiet Ingenieurholzbau

Mies-van-der-Rohe-Str. 1

52074 Aachen

Germany

RWTH Aachen University

Templergraben 55

52062 Aachen

Germany

1. Auflage 2023

Verfügbar über das institutionelle Repositorium der RWTH Aachen University:

DOI: [10.18154/RWTH-2023-08440](https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-08440)



Diese Arbeit ist lizenziert unter einer [CC BY-NC-SA 3.0 DE Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/). Von der Lizenz ausgenommen sind Texte, Abbildungen, Karten oder anderes fremdes Material, soweit anders gekennzeichnet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik	1
2.1	Herauswachsen von Nagelplatten	1
2.2	Ausgleichsfeuchte von Holzbauteilen	2
2.3	Berechnung der Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche	3
2.4	Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit	4
2.5	Nutzungsklassen nach Eurocode 5	4
3	Methodik	5
3.1	Auswahl der Messobjekte	5
3.2	Instrumentierung	10
3.3	Datenauswertung	12
4	Ergebnisse	14
4.1	Auswertung von Ger08	14
4.2	Berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche	15
4.3	Berechnete absolute Luftfeuchtigkeit	19
4.4	Einfluss der Sensorposition im Dachraum	19
4.5	Vergleich mit Holzfeuchtemessungen nach DIN EN 13183-2	23
5	Diskussion und Schlussfolgerungen	24
6	Zusammenfassung und Fazit	26
7	Literatur	27
8	Anhang	28
8.1	Ergebnisverläufe der Einzelsensoren in Deutschland	28
8.2	Monitoring in Frankreich	47
8.3	Monitoring in Finnland	51

1 Einleitung

Das Fachgebiet Ingenieurholzbau am Institut für Stahlbau der RWTH Aachen University wurde von der Firma MiTek Industries GmbH mit der Auswertung und Interpretation von Messwerten im Rahmen eines Klimamonitorings von Dächern in Nagelplattenbauweise beauftragt. Anlass für die Beauftragung war das ungeklärte Auftreten herausstehender Nagelplatten in eingebauten Nagelplattenkonstruktionen, das in den letzten Jahren bei Begehungen festgestellt wurde.

Für das Herausstehen wurde neben Mängeln bei Herstellung und Ausführung das mechano-sorptive Verhalten von Holz als Ursprung vermutet. Das mechano-sorptive Verhalten von Holz führt bei Feuchteschwankungen zu Quellen und Schwinden von Holzbauteilen. Vermutet wird, dass es dadurch zu einem s. g. „Herauswandern“ oder „Herauswachsen“ von Nagelplatten aus dem Holz kommen kann.

Bisher lagen keine ausreichenden Informationen zum Dachraum-Klima von Nagelplattenkonstruktionen aus Deutschland vor. Zur Bewertung der klimatischen Randbedingungen von Nagelplattenkonstruktionen in Deutschland wurde deshalb im April 2020 ein umfangreiches Untersuchungsprogramm von der Firma MiTek Industries GmbH gestartet. Innerhalb dieses Programms wurden Sensoren zur Erfassung der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte in Dachräumen platziert und die RWTH Aachen mit der Auswertung und Bewertung der gemessenen Daten ergebnisoffen beauftragt.

Der RWTH Aachen wurden die erfassten Messwerte der Sensoren während des Untersuchungszeitraums kontinuierlich über ein Cloudsystem zur Verfügung gestellt. Im Mai 2021 wurde ein erster Zwischenbericht und im Juni 2022 ein zweiter Zwischenbericht durch die RWTH verfasst. Der vorliegende Abschlussbericht baut auf den Daten der Zwischenberichte auf und stellt die Analyse, Auswertung und Aufbereitung der Dachklimamessungen im Untersuchungszeitraum (Oktober 2020 bis März 2023) zusammen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel wird zunächst die aktuelle Thematik des Herauswachsens von Nagelplatten umrissen. Außerdem werden die verwendeten Berechnungsgrundlagen für die Ausgleichsfeuchte und die absolute Luftfeuchtigkeit vorgestellt. Abschließend werden die Nutzungsklassen nach DIN EN 1995-1-1 [1] vorgestellt.

2.1 Herauswachsen von Nagelplatten

Das „Herauswachsen“ von Nagelplatten beschreibt den Vorgang des Austritts von Nagelplatten aus der Holzkonstruktion über die Zeit und ist abzugrenzen vom einem reinen

„Herausstehen“, welches den Abstand der Nagelplatte zum Holz zu einen festen Zeitpunkt beschreibt.

Im Rahmen von Begehungen von Holzkonstruktionen in Nagelplattenbauweise wurde vereinzelt das Herausstehen von Nagelplatten festgestellt. Die Gründe für herausstehende Nagelplatten können vielfältig sein. Neben der fehlerhaften Einpressung bei der Fertigung sowie nicht planmäßigen Beanspruchungen während des Transportes oder der Montage, werden auch klimatische Schwankungen während der Nutzungsdauer in Zusammenspiel mit dem mechano-sorptiven Verhalten von Holz als eine mögliche Ursache für das Herausstehen von Nagelplatten vermutet. [2]

Ein Herauswachsen von Nagelplatten konnte unter Laborbedingungen in verschiedenen Untersuchungen mit großen Feuchteänderungen festgestellt werden. So liegen Untersuchungen aus den USA von Groom [3] sowie aus Australien von Paevere et al. [4] und Mainey et al. [5] vor. Allerdings beruhen diese Daten entweder auf einer sehr geringen Anzahl von untersuchten Dächern oder die örtlichen Gegebenheiten sind gar nicht oder nur bedingt auf die klimatische Situation in Deutschland übertragbar [6].

Daher wurden von Sieder [7] im Rahmen einer gutachterlichen Stellungnahme experimentelle Untersuchungen durchgeführt, mit denen das Herauswachsen von Nagelplatten im Labor durch wiederholtes Quellen und Schwinden verbundener Holzbauteile bestätigt werden konnte. Allerdings wurde auch festgestellt, dass es dazu großer Holzfeuchteänderungen im Inneren (gemessen in 2 cm Tiefe) der Holzbauteile bedarf. Zudem wurde gezeigt, dass nach 6 bis 8 beschleunigten Holzfeuchtezyklen zwischen ca. 7 und 18 % in 1 cm Tiefe, das Herauswachsen praktisch zum Stillstand kommt. Danach war keine signifikante Zunahme des Herausstehens mehr zu beobachten. [7] Dieser Stillstand wird auch von Groom [5] für Holzfeuchtezyklen zwischen 9 und 12 % (gemessen mit einem Widerstandsmessgerät ohne Angabe der Messtiefe) festgestellt; bei großen Holzfeuchteschwankungen zwischen 5 und 19 % wurde nach 8 Zyklen jedoch noch kein Stillstand beobachtet.

Aufgrund fehlender Dachklimadaten für übliche Nagelplattenkonstruktionen in Deutschland wurden die in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen durchgeführt. In diesem Bericht wird dabei ausschließlich das gemessene Klima in Dachräumen von Nagelplattenkonstruktionen sowie die damit einhergehenden Ausgleichsfeuchten im Holz untersucht. Das Herauswachsen von Nagelplatten war nicht Teil der Untersuchungen.

2.2 Ausgleichsfeuchte von Holzbauteilen

Holz besitzt hygroskopische Eigenschaften. Somit ändert sich der Feuchtegehalt von Holz durch Änderungen im Umgebungsklima. Die Holzfeuchte beeinflusst gleichzeitig auch die Querschnittsgeometrie (Quellen und Schwinden) sowie die mechanischen Eigenschaften.

Holzbauteile weisen ein Gefälle der Feuchte über den Querschnitt auf. Im Querschnittsinneren sind Feuchteschwankungen deutlich geringer als an der Oberfläche. Bereits wenige

Zentimeter im Inneren des Holzquerschnitts fällt die Schwankung der Holzfeuchte im Jahresverlauf deutlich kleiner aus. [8]

Die klimatischen Bedingungen von Dachkonstruktionen in Nagelplattenbauweise sind bisher für Deutschland nicht ausreichend untersucht. Für Deutschland sind einige wenige Daten für Dachträger aus Brettschichtholz vorhanden [8]. Diese Konstruktionen unterscheiden sich jedoch in der Nutzung und der Konstruktionsart von den meisten Dächern in Nagelplattenbauweise, da sie z.B. keine Unterdecken haben.

In diesem Vorhaben wurde daher untersucht, welche klimatischen Bedingungen in typischen Nagelplattenkonstruktionen in Deutschland (vorwiegend geschlossene Dachräume) herrschen. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit der Firma MiTek Industries GmbH ein Dach-Monitoring geplant, durchgeführt und die Ergebnisse aufbereitet.

Die Ausgleichsfeuchte U_{EMC} ist die Holzfeuchte, die sich nach dem Einbau eines Holzbauteils nach einer gewissen Zeit einstellt. Die zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte im gesamten Querschnitt benötigte Zeitspanne hängt von der Einbaufeuchte, den Abmessungen des Bauteils sowie vom Umgebungsklima ab. Das Umgebungsklima wird dabei primär durch die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit definiert.

2.3 Berechnung der Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche

Durch die Anwendung der Sorptionsisotherme für Fichtenholz nach Keylwerth und Noack [9] oder mithilfe einer analytischen Berechnung nach Simpson [10] kann die Ausgleichsfeuchte für gegebene Klimawertepaare (Lufttemperatur T und Luftfeuchte φ) abgeschätzt werden. Für die in diesen Untersuchungen vorliegenden instationären Randbedingungen kann hiermit nur die **Holzfeuchte an der Oberfläche** eines Bauteiles ermittelt werden. Eine Zeitkomponente ist in den Gleichungen nicht berücksichtigt. Die Formel nach Simpson [10] ist nachfolgend aufgeführt:

$$U_{EMC} = \frac{1800}{M_P} \cdot \left(\frac{K\varphi}{1 - K\varphi} + \frac{K_1 K \varphi + 2K_1 K_2 K^2 \varphi^2}{1 + K_1 K \varphi + K_1 K_2 K^2 \varphi^2} \right) \quad (1)$$

$$M_P = 349 + 1,29T + 1,35 \cdot 10^{-2}T^2 \quad (2)$$

$$K = 0,805 + 7,36 \cdot 10^{-4}T - 2,73 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (3)$$

$$K_1 = 6,27 - 9,38 \cdot 10^{-3}T - 3,03 \cdot 10^{-4}T^2 \quad (4)$$

$$K_2 = 1,91 + 4,07 \cdot 10^{-2}T - 2,93 \cdot 10^{-4}T^2 \quad (5)$$

Dabei ist: U_{EMC} die Ausgleichsfeuchte [%]
 1800 Molekulargewicht von Wasser $\cdot 100$ [g/mol]
 φ relative Luftfeuchtigkeit (RL) [%/100]
 T Trockentemperatur (Lufttemperatur) [°C]

2.4 Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit

Die absolute Luftfeuchtigkeit c , auch als Wasserdampfkonzentration bezeichnet, kann mit Hilfe der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte nach den folgenden Formeln aus [11] berechnet werden:

$$c = \frac{p_s \cdot \varphi}{R_D \cdot T} \quad (6)$$

$$p_s = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \text{ gilt für } \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$p_s = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \text{ gilt für } \theta < 0^\circ\text{C} \quad (8)$$

Dabei ist:

c	absolute Luftfeuchtigkeit [kg/m ³]
p_s	Wasserdampf-sättigungsdruck [Pa]
φ	relative Luftfeuchtigkeit (RL) [%/100]
R_D	spezifische Gaskonstante für Wasserdampf ($R_D = 461,5$) [J/kg K]
θ	Lufttemperatur [°C]
T	thermodynamische Temperatur ($T = \theta + 273,15$) [K]

2.5 Nutzungsklassen nach Eurocode 5

Um die Einflüsse des hygroskopischen Verhaltens von Holz zu berücksichtigen, werden Bauteile aus Holz entsprechend dem zu erwartenden Umgebungsklima während ihrer Nutzungsdauer nach Eurocode 5 [1] sogenannten Nutzungsklassen zugeordnet. In Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit und Bewitterung werden drei Nutzungsklassen unterschieden.

Nutzungsklasse 1 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt im Holz, der sich bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft einstellt, die nur für einige Wochen pro Jahr den Wert von 65 % übersteigt. In Nutzungsklasse 1 übersteigt der mittlere Feuchtegehalt der meisten Nadelhölzer nicht 12 %. [1]

Nutzungsklasse 2 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt im Holz, der sich bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft einstellt, die nur für einige Wochen pro Jahr den Wert von 85 % übersteigt. In Nutzungsklasse 2 übersteigt der mittlere Feuchtegehalt der meisten Nadelhölzer nicht 20 %. [1]

Nutzungsklasse 3 erfasst Klimabedingungen, die zu höheren Feuchtegehalten als in Nutzungsklasse 2 führen. [1]

Nutzungsklasse 4 wird voraussichtlich in der nächsten Generation des Eurocode 5 [12] ergänzt. Sie ist für wassergesättigte Bauteile vorgesehen.

Die in den verschiedenen Nutzungsklassen zu erwartenden Gleichgewichtsfeuchten (Holzfeuchte im Jahresmittel) können der folgenden Tabelle 2-1 entnommen werden:

Tabelle 2-1: Nutzungsklassen mit zugehörigen Gleichgewichtsfeuchten im Gebrauchszustand

Nutzungsklasse	EC 5 [1]	EC 5 NA [13]	prEN EC 5 [12]
NKL1	≤ 12 %	5 bis 15 %	≤ 12 % (± 2%*)
NKL 2	12 bis 20 %	10 bis 20 %	12 bis 20 % (± 3%*)
NKL 3	> 20 %	12 bis 24 %	< 24 %
NKL 4	-	-	Wasser gesättigt

* für ein Bauteil mit einer Breite von 50 mm

3 Methodik

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen sind Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur in Holzkonstruktionen in Nagelplattenbauweise durchgeführt worden. In diesem Kapitel wird auf die Auswahl der gemessenen Objekte eingegangen. Außerdem wird die gewählte Instrumentierung des Monitorings vorgestellt und das Vorgehen bei der Datenauswertung beschrieben.

3.1 Auswahl der Messobjekte

Nagelplattenbinder werden in verschiedensten Dachkonstruktion eingesetzt. In Abhängigkeit von den Randbedingungen und der Nutzung stehen eine Vielzahl von Konstruktionsarten zur Verfügung. In diesem Kapitel werden die ausgewählten Objekte vorgestellt, für die im Zeitraum von 3 Jahren ein Monitoring im Dachbereich durchgeführt wurde. Die Objekte wurden gemeinsam mit der Firma MiTek Industries GmbH ausgewählt.

Anhand einer aufgestellten Spezifikation [14] sowie einer gemeinsam erarbeiteten Kriterienliste [15] wurden potenzielle Gebäude für ein Monitoring bestimmt. Kriterien für die Standortwahl waren:

- Holzkonstruktion in Nagelplattenbauweise
- Technische Voraussetzungen (Mobilfunksignal, Zugänglichkeit, etc.)
- Abdeckung verschiedener Nutzungsarten und Dachtypen

Es sollte sichergestellt werden, dass eine Bandbreite verschiedener Nutzung mit unterschiedlichen Raumklimata und eine Vielfalt von Dachtypen abgedeckt wird.

Tabelle 3-1 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Objekte je Nutzung und Art der Dachkonstruktion. Einige Sensoren wurden erst nachträglich hinzugefügt, daher wird in der Tabelle die Anzahl der Sensoren nach Nutzungsart für zwei Zeiträume dargestellt.

Tabelle 3-1: Anzahl der Objekte in Abhängigkeit der Nutzung

Land	Nutzung	Anzahl im Zeitraum (Quartal) 04/2020 - 04/2021	Zusätzliche Anzahl im Zeitraum (Quartal) 01/2022 – 01/2023
Deutschland (GER)	Büro	1	-
	Kita	1	-
	Verbrauchermarkt	10	+1
	Reithalle	1	-
	Wohnhaus	0	+2
Frankreich (FRA)	Gartenlaube /Carport (Außenklima)	3	+1
	Wohnhaus	5	+2
Finnland (FIN)	Keine Angaben	2	-

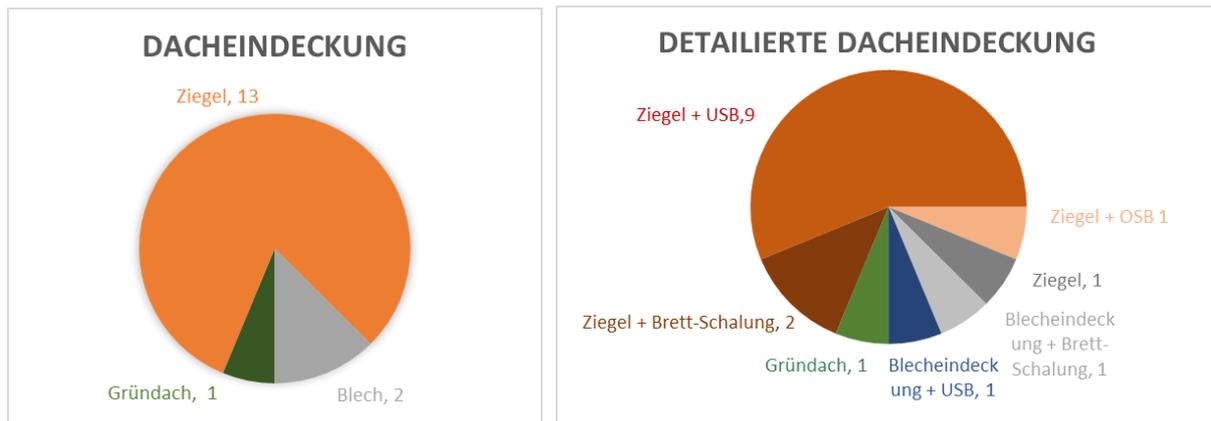
In folgender Tabelle wird die Anzahl der Objekte in Abhängigkeit von der Dachkonstruktion aufgezeigt:

Tabelle 3-2: Einteilung der Objekte in Abhängigkeit der Dachkonstruktion

Land	Nutzung	Kaltdach		Warmdach	k.A.
		<u>mit gedämmter UD*</u>	<u>ohne Dämmung in UD*</u>		
GER	Büro	1	0	0	0
	Kita	1	0	0	0
	Verbrauchermarkt	11	0	0	0
	Reithalle	0	1	0	0
	Wohnhaus	2	0	0	0
FRA	Wohnhaus	4	0	1	0
	Gartenhaus/Carport	0	4	0	0
FIN	k.A.	-	-	-	2

* UD = Unterdecke; k.A.= keine Angaben

Abbildung 3-1 zeigt die Aufteilung der Objekte nach der Dacheindeckung in vereinfachter sowie detaillierter Darstellung in zwei Kreisdiagrammen.



USB = Unterspannbahn
OSB = Oriented Strand Board

Abbildung 3-1: Anteile der Objekte in Abhängigkeit von der Dacheindeckung

Die unterschiedlichen Dachaufbauten sind in Tabelle 3-3 aufgeführt. Dabei werden sechs Dachtypen spezifiziert, die im weiteren Verlauf unterschieden werden.

Tabelle 3-3: Zuordnung der Sensoren in Deutschland zu Dachtypen

Typ	Sensoren (GerXX)	Dachaufbau
I	01	Blech mit OSB ¹ , gedämmte UD ²
II	02, 03, 08, 09 ³ , 10, 12, 13, 14, 15, 17	Ziegel, USB ⁴ , gedämmte UD ²
III	18, 19	Ziegel, Brett-Schalung, gedämmte UD ²
IV	06, 16 ³	Ziegel, gedämmte UD ²
V	04, 20 ³	Blecheindeckung, USB ⁴ , gedämmte UD ²
VI	11	Extensive Dachbegrünung, gedämmte UD ²
VII	05, 07 ³	Reithalle, Blecheindeckung, ungedämmt

¹ Oriented Strand Board

² Unterdecke

³ Zweiter Sensor innerhalb eines Standortes

⁴ Unterspannbahn

Abbildung 3-2 zeigt alle Gebäudestandorte für die ausgewählten Dächer in Deutschland. Ortsmarkierungen in Rot sind die Sensoren, die bereits ab dem vierten Quartal 2020 Messdaten sammelten. Ortsmarkierungen in Blau zeigen die Sensoren, die zwischen Mai 2021 und Mai 2022 zusätzlich installiert wurden.



Abbildung 3-2: Darstellung der Gebäudestandorte in Deutschland (Bildquelle: Kartendaten © 2023 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google, Inst. Geogr. Nacional)

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt Klimakarten für verschiedene Klimadaten, wie Lufttemperatur und Niederschlagshöhe, für Deutschland zur Verfügung. Eine gute Übersicht über klimatische Unterschiede erhält man aus den Klimakarten der Referenzperiode 1961 bis 1990, also aus den gemittelten Klimadaten über 30 Jahre. Die Klimakarten (siehe Abbildung 3-3) zeigen die Verteilung von Klimadaten, die an Wetterstationen des DWD gemessen und interpoliert wurden. Die Karten beinhalten die Daten für die Monatsmittel der Temperatur sowie die Monatssummen des Niederschlags. Die Messobjekte der hier vorgestellten Untersuchungen wurden so gewählt, dass sie die innerhalb Deutschlands auftretenden verschiedenen Klimata abdecken.

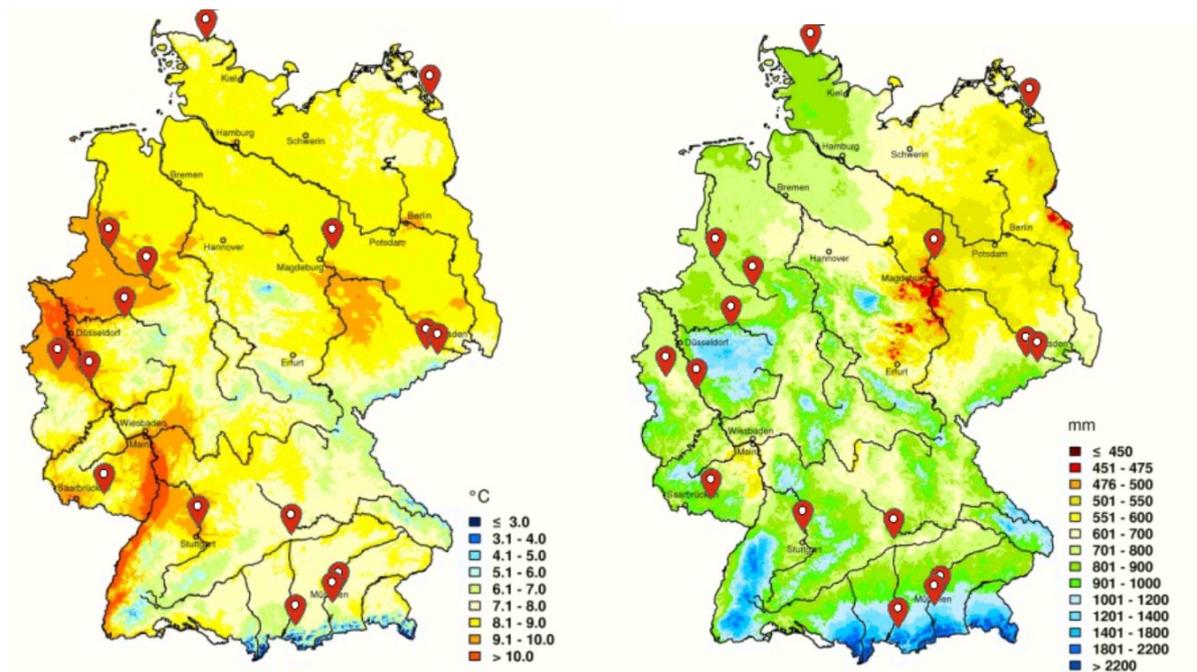


Abbildung 3-3: Darstellung der Objektstandorte auf DWD-Klimakarten der Referenzperiode 1961-1990: Lufttemperatur vieljähriger Mittelwert (links), Niederschlagshöhe vieljähriger Mittelwert (rechts), (Bildquelle: angepasst mit Genehmigung des © Deutscher Wetterdienst)

3.2 Instrumentierung

Für die Aufnahme der Klimadaten in den ausgewählten Dächern wurden Messinstrumente der Firma Comet (W3810) verwendet. Die Datenübertragung erfolgte über Mobilfunk. Das Gerät W3810 misst Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit mit darin integrierten Sensoren. Die Messwerte wurden in einem festen Zeitintervall von 3h erfasst und an die Comet-Cloud gesendet. Zur Identifizierung besaß jeder Sensor eine eigene Geräte ID.



Langzeit Klimamessung in Dachräumen

Ein Projekt der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule RWTH Aachen, und MiTek Industries GmbH.

Dieses Messgerät ist Eigentum der MiTek Industries GmbH, Schanzenstraße 23, 51063 Köln

Tel: +49(0) 221 802 85-0

mail: info@mitek.de

Geräte ID: 3659DB

Bei Fragen und Problemen bitte unter Angabe der Geräte ID melden bei
+49 (0) 221 802 85 -0

Abbildung 3-4: Sensor im eingebauten Zustand (links) und Plakette in unmittelbarer Nähe des Sensors (rechts)

Tabelle 3-4 gibt eine Übersicht über alle Sensoren, welche bis März 2022 eingebaut wurden. In der Reithalle mit den Sensoren Ger05 und Ger07 gab es Probleme beim Signalempfang aufgrund geringer Netzabdeckung, sodass für diesen Standort nur wenige Daten zur Verfügung stehen.

Tabelle 3-4: Übersicht der Sensoren

Land	Sensor-Name	Güte der Sigfox Netzabdeckung	Geräte ID	Beginn der Messung
GER	Ger01	excellent	3653B8	21.08.2020
	Ger02	excellent	2E971C	21.08.2020
	Ger03	excellent	3B0E17	21.08.2020
	Ger04	excellent	3940F1	30.04.2020
	Ger05	limited signal	365E5D	30.04.2020
	Ger06	excellent/okay	364F68	30.11.2020
	Ger07	limited signal	3659DB	03.06.2020
	Ger08	good/okay	364F3F	11.12.2020
	Ger09	excellent	364B2D	22.09.2020
	Ger10	good/okay	35EEBE	22.09.2020
	Ger11	good/okay	38D871	13.11.2020
	Ger12	excellent	393DEF	23.09.2020
	Ger13	excellent/good	3B317E	23.09.2020
	Ger14	excellent	385B16	16.09.2020
	Ger15	good/okay	36603E	29.05.2021
	Ger16	excellent	39407E	12.11.2021
	Ger17	limited signal	393DA4	03.09.2021
	Ger18	good/okay	341D42	23.11.2021
	Ger19	good/okay	3425F9	24.11.2021
	Ger20	excellent	3917C4	22.12.2021
FIN	FIN01	excellent	36538D	20.04.2020
	FIN02	excellent	36131E	20.04.2020
FRA	FRA01	excellent	385A5F	26.12.2020
	FRA02	excellent	39414C	26.12.2020
	FRA03	excellent	365BF3	26.12.2020
	FRA04	excellent	365DFA	26.12.2020
	FRA05	excellent	3664C5	27.12.2020
	FRA06	excellent	3662A0	27.12.2020
	FRA07	excellent	3AFF2B	08.03.2021
	FRA08	excellent	365DF6	08.03.2021
	FRA09	excellent	341D7B	23.08.2021
	FRA10	excellent	34196A	23.08.2021
	FRA11	excellent	341F53	23.08.2021

3.3 Datenauswertung

Im betrachteten Auswertungszeitraum vom 01.10.2020 bis 31.03.2023 wurde die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte für jeden Sensor aus den Datenloggern der Comet-Cloud ausgelesen. Tabelle 3-5 gibt eine Übersicht über den Auswertungszeitraum jedes Sensors. Ergänzend zu den lokal aufgezeichneten Messdaten wurde auch das Aussenklima (Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit) von den jeweils nächstgelegenen Wetterstationen (Zeitintervall: stündlich) ausgelesen.

Die Auswertung wurde mit Hilfe des Programms FlexPro2019 der Firma Weisang durchgeführt. Für jeden Sensor wurden die Rohdaten aufbereitet und in das Programm FlexPro2019 eingelesen. Für die erhaltenen Sensordaten wurden der monatlich und wöchentlich gleitende Mittelwert der relativen Luftfeuchte und der Temperatur ermittelt.

Im Anschluss wurden die Ausgleichsfeuchte nach Gleichung (1) berechnet. Dazu wurden die gleitenden monatlichen Mittelwerte verwendet. Eine Zeitkomponente bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte ist in den Formeln nicht enthalten. Diese Zeitkomponente sollte durch die Wahl der Mittelwerte als Eingangsvariablen berücksichtigt werden, da extreme Klimata nur kurzzeitig auftreten. Die **berechnete Ausgleichsfeuchte** ist im Rahmen dieser Untersuchungen trotzdem nur als **Holzfeuchte an der Bauteiloberfläche** zu verstehen.

Für jeden Sensor wurden die Klimadaten zwischen Sensor und nahegelegener Wetterstation verglichen. Es ist anzumerken, dass durch lokale Besonderheiten, wie bspw. stetige Beschattung, Wind, Höhenlage und Umgebungsbedingungen, das Mikroklima deutlich beeinflusst werden kann. Schwerpunkt dieses Berichtes sind die klimatischen Bedingungen im Dachraum, sodass nur diese Messwerte im Bericht dargestellt sind. Die absolute Luftfeuchtigkeit im Dachraum wurde nach Gleichung (6) mithilfe der gemessenen Dachklimadaten berechnet.

Durch Signalstörungen kam es bei Sensor Ger05 zu übermäßigen Datenübertragungsausfällen. Darum wurde dieser Sensor von der Wertung ausgeschlossen.

Tabelle 3-5: Übersicht des Auswertungszeitraums der Sensoren

Land	Sensor-Name	Zeitraum (Quartal) der Auswertung									
		04-2020	01-2021	02-2021	03-2021	04-2021	01-2022	02-2022	03-2022	04-2022	01-2023
GER	Ger01	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger03	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger04	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger05	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Ger06	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger07	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger08	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x
	Ger09	x	x	x	x	x	✓	x	x	x	x
	Ger10	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger11	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x
	GER12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	GER13	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	GER14	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	GER15	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
	GER16	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x
	GER17	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger18	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
	Ger19	x	x	x	x	x	✓	✓	x	x	✓
	Ger20	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
FIN	FIN01	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FIN02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x
FRA	FRA01	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA02	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA03	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA04	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x
	FRA05	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA06	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	x
	FRA07	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA08	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA09	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA10	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA11	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Ergebnisse

Nachfolgend werden zunächst beispielhaft die Ergebnisse der Messauswertung für den Sensor Ger08 gezeigt. Hiernach werden die Ergebnisse der berechneten Ausgleichsfeuchten an der Holzoberfläche, der berechneten absoluten Luftfeuchtigkeit sowie der Einfluss der Sensorposition innerhalb eines Dachraums erläutert. Abschließend folgt der Vergleich von berechneten mit gemessenen Holzfeuchten nach DIN EN 13183-2 für einige Dachräume.

4.1 Auswertung von Ger08

Beispielhaft wird hier die Auswertung der Sensoren am Sensor Ger08 erläutert und dargestellt. Ger08 war in der Nähe der Ostsee in einem Verbrauchermarkt mit Ziegeleindeckung und Unterspannbahn installiert. Die Dämmung in der UG-Ebene ist mit einer Dampfbremse versehen. Für die Sensordaten wurden der gleitende Mittelwert pro Woche sowie der gleitende Mittelwert pro Monat berechnet. Die folgenden Abbildungen zeigen für den Sensor Ger08 eine Gegenüberstellung von den berechneten gleitenden Mittelwerten (wöchentlich und monatlich) und den Sensordaten im drei Stunden Intervall. Hier ist die Intensität der Glättung in Abhängigkeit von dem gewählten Zeitintervall gut erkennbar. Durch Datenlücken und nachfolgenden Sensorausfall am 22.08.2022, konnten die Messdaten nur bis zum 30.06.2022 ausgewertet werden.

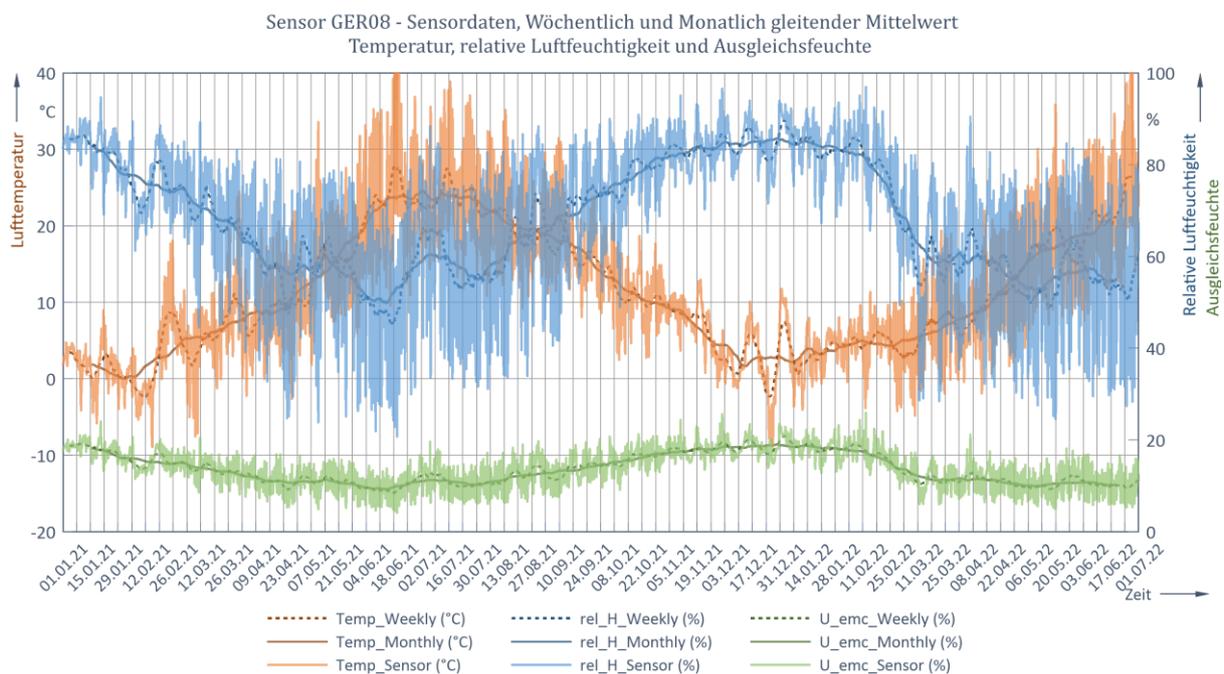


Abbildung 4-1: Klimaverlauf für das Objekt Ger08 im Messzeitraum Januar 2021 bis Juni 2022 für die Sensordaten sowie dem wöchentlich und monatlich gleitenden Mittelwert

4.2 Berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche

Für eine Übersicht der klimatischen Situation in den untersuchten Dächern, wurden die Ergebnisse der Objekte in Deutschland zusammengefasst. In der Auswertung wurde zwischen den Nutzungsarten Verbrauchermarkt, Reithalle, Wohnhaus und Büro/Kita unterschieden.

In Abbildung 4-2 ist die berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche aller Sensoren in Deutschland als monatlich gleitender Mittelwert über den gesamten Auswertungszeitraum dargestellt. Zudem sind die Grenzen der Gleichgewichtsfeuchten zur Einteilung in die Nutzungsklassen nach DIN 1995-1-1/NA [13] in dieser Abbildung dargestellt.

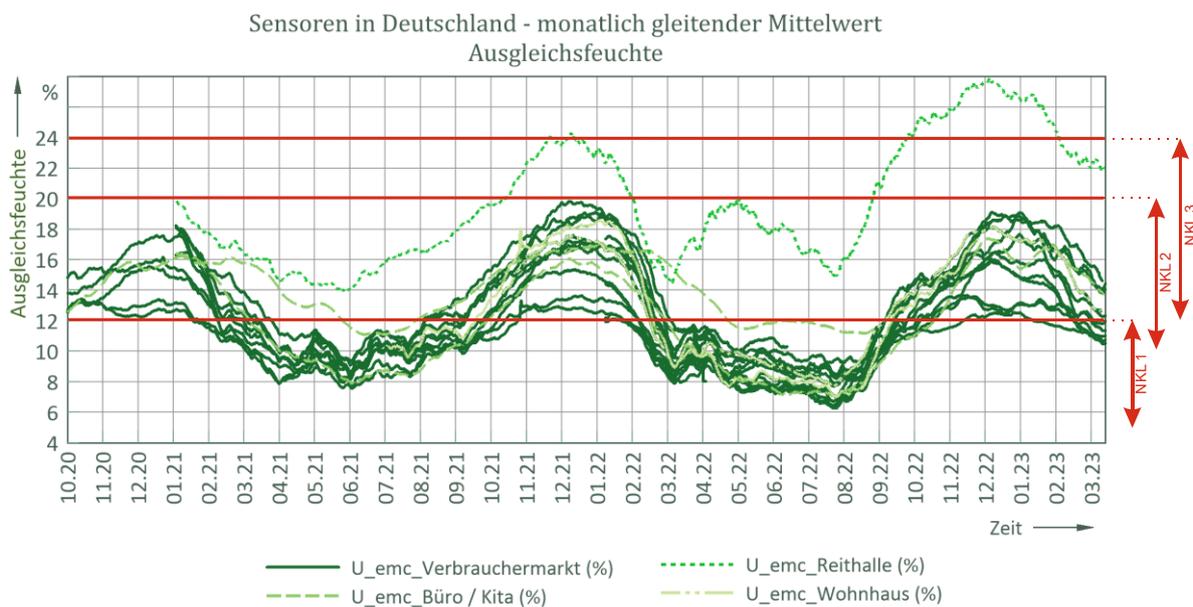


Abbildung 4-2: Berechnete Ausgleichsfeuchte der Sensoren in Deutschland als monatlich gleitende Mittelwerte mit Darstellung der Grenzen der Nutzungsklassen in DIN 1995-1-1/NA

In der nachfolgenden Abbildung 4-3 sind die Kurven der monatlich gleitenden Mittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der berechneten Ausgleichfeuchte aller Sensoren in Deutschland für den Auswertungszeitraum dargestellt.

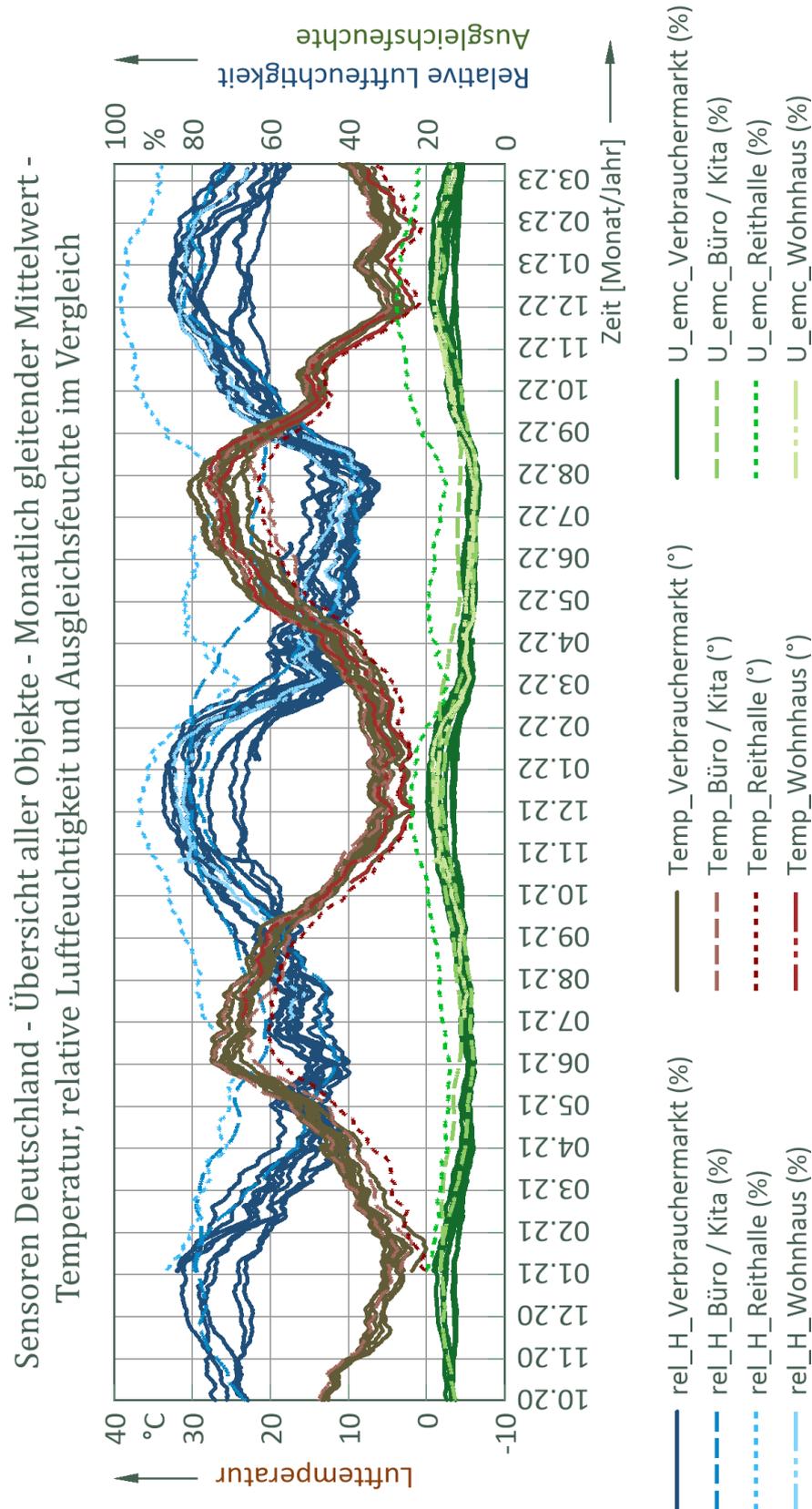


Abbildung 4-3: Vergleich der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der berechneten Ausgleichsfeuchte für die Sensoren in Deutschland als monatlich gleitende Mittelwerte

Für die **Zuordnung zu Nutzungsklassen** (NKL) wurden die Mittelwerte der berechneten Ausgleichsfeuchten aus dem Zeitraum von einem Jahr bestimmt. Tabelle 4-1 zeigt die vorgeschlagene Einordnung der Dachtypen aus Tabelle 3-3 in Nutzungsklassen. Aufgrund des gewählten Messzeitraums und durch Messausfälle, konnte in den meisten Fällen nur der einjährige Mittelwert bestimmt werden.

Dachtyp I, mit einer mittleren Ausgleichsfeuchte von 11,6 % im einjährigen Intervall, kann zusammen mit Typ III (10,3 %) und Typ V (10,9 %) der NKL 1 zugeordnet werden. Dachtyp II, mit einer Ausgleichsfeuchte von 12,2 %, Typ VI (14,2 %) und Typ IV (13,0 %) können der NKL 2 zugeordnet werden. Bei Typ VII (Reithalle) beträgt die Ausgleichsfeuchte im einjährigen Mittel 18,4 %. Im zweijährigen Mittel liegt der Wert jedoch bei 19,6 %. Somit kann Typ VII trotzdem noch NKL 2 zugeordnet werden.

Tabelle 4-1: Zuordnung der gewählten Dachtypen zu Nutzungsklassen (NKL)

Typ ¹	Dachaufbau	Mittelwerte d. Ausgleichsfeuchte ² für einjähriges Intervall [%]	NKL ³
I	Ziegel, OSB, gedämmte UD	11,6	NKL 1
II	Ziegel, USB, gedämmte UD	12,2	NKL 2
III	Ziegel, Brett-Schalung, gedämmte UD	10,3	NKL 1
IV	Ziegel, gedämmte UD	13,0	NKL 2
V	Blecheindeckung, USB, gedämmte UD	10,9	NKL 1
VI	Extensive Dachbegrünung, gedämmte UD	14,2	NKL 2
VII	Reithalle, Blecheindeckung, ungedämmt	18,4	NKL 2

¹ vgl. Tabelle 3-3; ² berechnet nach Gleichung (1); ³ vgl. Tabelle 2-1

In den folgenden Tabellen sind für die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche jeweils die **Extremwerte** (Maximum und Minimum) sowie die Schwankung (Delta) von Minimum zu Maximum des monatlich gleitenden Mittelwertes für den zugehörigen Untersuchungszeitraum aufgeführt.

Für die Sensordaten der **Verbrauchermärkte** (Tabelle 4-4) wurde ein Temperaturbereich von 0 °C bis 31 °C im Messzeitraum dokumentiert. Die relative Luftfeuchtigkeit wies einen Wertebereich zwischen 32 und 87 % auf. Ähnliche Wertebereiche wurden auch für die Nutzungsarten **Wohnhaus, Büro** und **Kita** festgestellt.

GER11 ist in einem Bogendach mit extensiver Dachbegrünung einer **Kindertagesstätte** installiert. Im Vergleich sind geringere Schwankungen bei der relativen Luftfeuchtigkeit (Tabelle 4-2) und auch in den Tagesschwankungen der Messwerte auffällig.

In der **Reithalle** liegen die Temperaturen in einem Wertebereich von 0 °C bis 22 °C, mit einem deutlich höheren Luftfeuchtebereiche von 68 bis 99 %. Hieraus resultiert eine berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche von 14 bis 28%.

Tabelle 4-2: Kita/Büro: Extremwerte (Max und Min) sowie Schwankungen (Delta) des monatlich gleitenden Mittelwerts im jeweiligen Untersuchungszeitraum

Sensor	Periode	Anzahl Monate	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Ber. Ausgleichsfeuchte ¹ [%]		
			Max	Min	Delta	Max	Min	Delta	Max	Min	Delta
Ger 01	10/20 -03/23	30	27,9	3,7	24,2	82,2	36,6	45,6	17,4	7,0	10,4
Ger 11	01/21 -03/23	27	23,1	1,9	21,2	81,5	60,8	20,7	17,1	11,1	6,0

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche

Tabelle 4-3: Wohnhäuser: Extremwerte (Max und Min) sowie Schwankungen (Delta) des monatlich gleitenden Mittelwerts im jeweiligen Untersuchungszeitraum

Sensor	Periode	Anzahl Monate	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Ber. Ausgleichsfeuchte ¹ [%]		
			Max	Min	Delta	Max	Min	Delta	Max	Min	Delta
Ger 15	07/21 -03/23	21	28,3	4,2	24,1	84,9	36,4	48,5	18,5	7,0	11,5
Ger 17	10/21 -03/23	18	26,7	1,5	25,2	83,7	40,6	43,1	18,1	7,7	10,4

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche

Tabelle 4-4: Verbrauchermärkte: Extremwerte (Max und Min) sowie Schwankungen (Delta) des monatlich gleitenden Mittelwerts im jeweiligen Untersuchungszeitraum

Sensor	Periode	Anzahl Monate	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Ber. Ausgleichsfeuchte ¹ [%]		
			Max	Min	Delta	Max	Min	Delta	Max	Min	Delta
Ger 02	10/20 -03/23	30	27,5	3,3	24,1	83,0	36,3	46,7	17,8	7,0	10,8
Ger 03	10/20 -03/23	30	26,1	4,1	22,0	85,5	42,5	43,0	19,1	8,1	11,0
Ger 04	10/20 -03/23	30	30,4	3,0	27,5	78,4	32,2	46,2	16,0	6,3	9,7
Ger 12	10/20 -03/23	30	28,1	4,6	23,5	70,4	34,6	35,8	13,7	6,7	7,0
Ger 13	10/20 -03/23	30	28,3	5,3	23,0	70,2	33,0	37,3	13,6	6,4	7,2
Ger 06	01/21 -03/23	27	26,5	1,9	24,6	85,9	44,0	41,9	19,1	8,4	10,7
Ger 08	01/21 -03/23	27	24,6	0,1	24,6	85,8	49,9	35,8	19,1	9,3	9,8
Ger 10	01/21 -03/23	27	26,8	2,7	24,1	87,4	40,8	46,6	19,8	7,8	12
Ger 14	01/21 -03/23	27	29,2	3,2	26,1	82,8	32,4	50,4	17,7	6,3	11,4
Ger 09	01/22 -03/23	15	10,0	4,6	5,4	82,5	50,8	31,8	17,5	9,7	7,8
Ger 16	01/22 -03/23	15	23,6	3,2	20,4	84,4	48,8	35,6	18,4	9,2	9,2
Ger 18	01/22 -03/23	15	25,1	3,7	21,4	65,9	41,8	24,1	12,5	7,9	4,6
Ger 19	01/22 -03/23	15	9,8	2,9	6,9	65,0	40,0	25,0	12,5	7,9	4,6
Ger 20	01/22 -03/23	15	30,5	3,5	27,0	78,0	33,1	44,9	15,9	6,4	9,5

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche

Tabelle 4-5: Reithalle: Extremwerte (Max und Min) sowie Schwankungen (Delta) des monatlich gleitenden Mittelwerts im jeweiligen Untersuchungszeitraum

Sensor	Periode	Anzahl Monate	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Ber. Ausgleichsfeuchte ¹ [%]		
			Max	Min	Delta	Max	Min	Delta	Max	Min	Delta
Ger 07	01/21 -03/23	27	21,6	0,0	21,5	98,6	68,0	30,6	27,9	14,0	13,9

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche

4.3 Berechnete absolute Luftfeuchtigkeit

Am Beispiel des Sensors Ger01 wird in Abbildung 4-4 die berechnete absolute Luftfeuchtigkeit über den Auswertungszeitraum zusammen mit der gemessenen Lufttemperatur und der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt.

Es ist ein zyklischer Verlauf der Messwerte über das Jahr hinweg zu beobachten. Der Hochpunkt der absoluten Feuchtigkeit im Dachraum ist im Sommer und der Tiefpunkt im Winter. Der Verlauf ist also gegenläufig zur relativen Luftfeuchtigkeit. Er steigt und fällt mit der Temperatur. Der Verlauf ist repräsentativ für die Verläufe der anderen Sensoren, die in Anhang 8.1 zu finden sind.

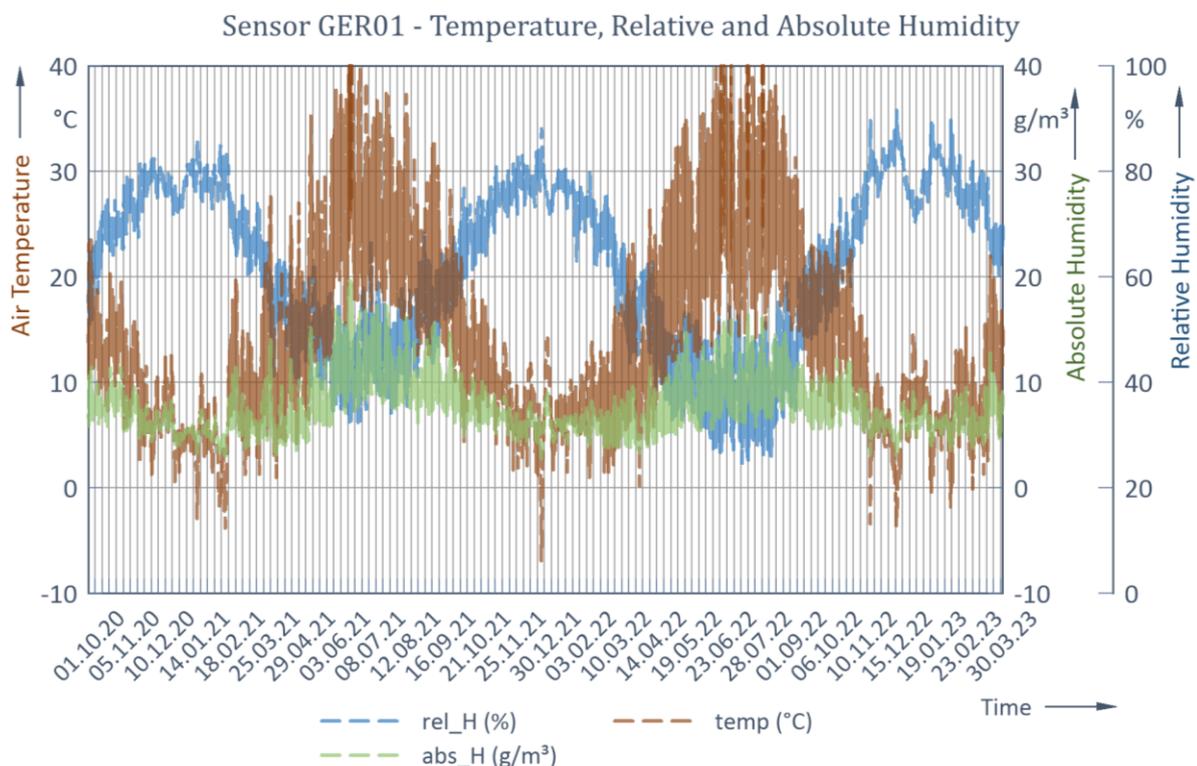


Abbildung 4-4: Verlauf der berechneten absoluten Feuchte, der gemessenen Temperatur und der gemessenen relativen Feuchte von Ger01

4.4 Einfluss der Sensorposition im Dachraum

Zur Prüfung der Übertragbarkeit der Messdaten von Einzelsensoren auf den gesamten Dachraum, wurde in den Verbrauchermärkten in Stuttgart (GER 04), Düren (GER02) und Menden (Ger06) jeweils zusätzlich ein zweiter Sensor im Dachraum installiert. Tabelle 4-6 bis Tabelle 4-8 geben eine Übersicht über die Position der installierten Sensoren im Dach. Alle drei Standorte wiesen ähnliche Dachaufbauten mit gedämmter Unterdecke jedoch anderen Eindeckungen auf.

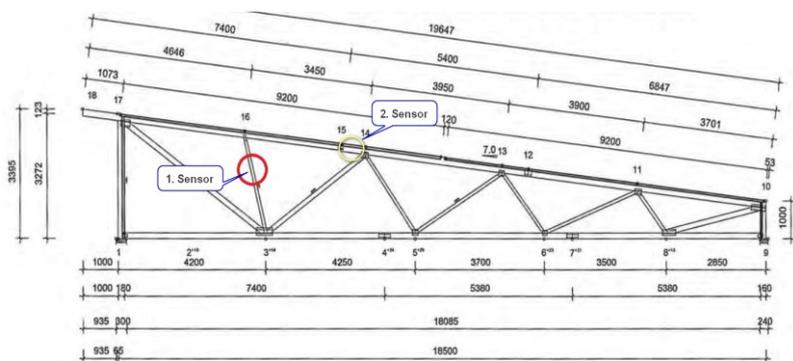
Die Klimaverläufe für die jeweiligen Standorte wurden für beide Sensoren ausgewertet. In Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-7 werden die Sensordaten mit einer Abtastrate von drei

Stunden und die wöchentlich gleitenden Mittelwerte dargestellt. Zwischen zwei Sensoren innerhalb eines Dachraums sind nur geringe Unterschiede in der Temperatur und Luftfeuchte zu erkennen. Die Auswirkung auf die berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche war so klein, sodass kein signifikanter Unterschied innerhalb eines Dachraumes zu erkennen ist.

Tabelle 4-6: Übersicht der Installation von zwei Sensoren in Stuttgart

Standort	Sensor	Installation
Stuttgart	Ger04	11.09.2020
	Ger20	22.12.2021

Installationsort



Vergleich der Sensoren am Standort Stuttgart - Wöchentlich gleitender Mittelwert - Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Ausgleichsfeuchte im Vergleich

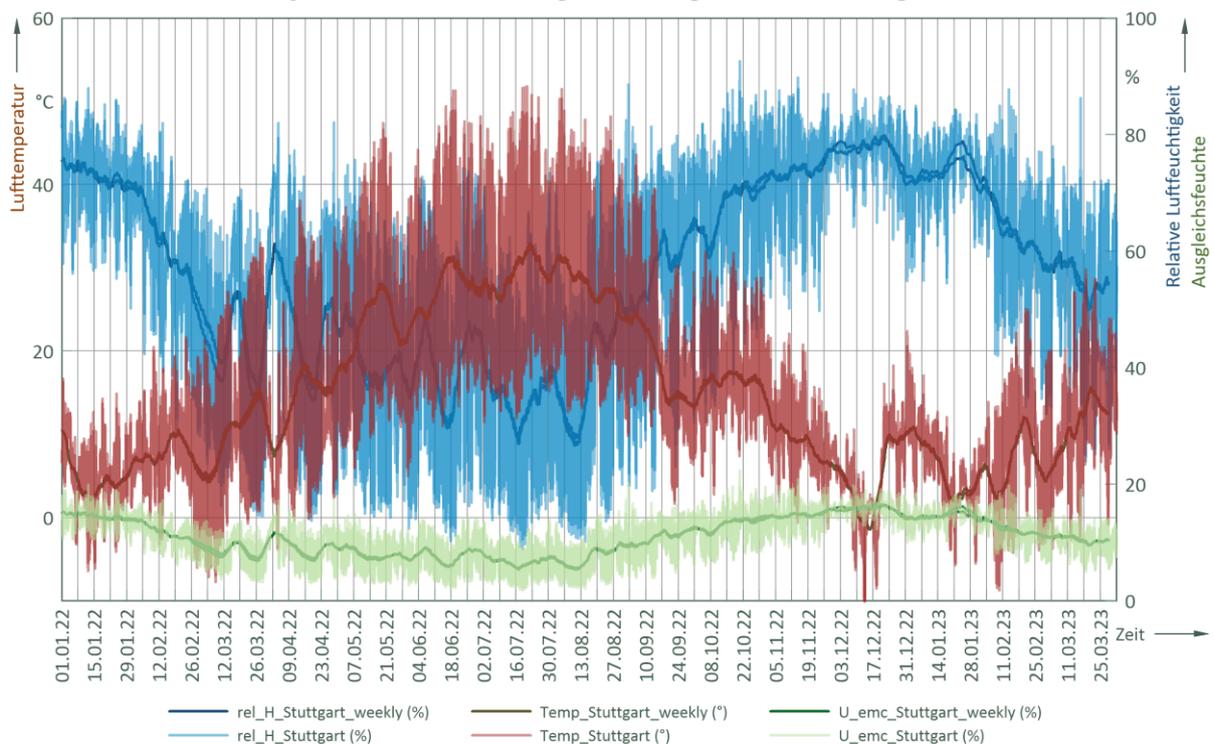


Abbildung 4-5: Vergleich der Sensoren innerhalb eines Daches in Stuttgart für Sensor GER04 und GER20: Verläufe sowie wöchentlich (weekly) gleitende Mittelwerte (Anmerkung: Es ist kein signifikanter Unterschied erkennbar, da die Kurven nahezu übereinander liegen)

Tabelle 4-7: Übersicht der Installation von zwei Sensoren in Düren

Standort	Sensor	Installation	Installationsort
Düren	Ger02	23.09.2020	
	Ger09	03.11.2021	

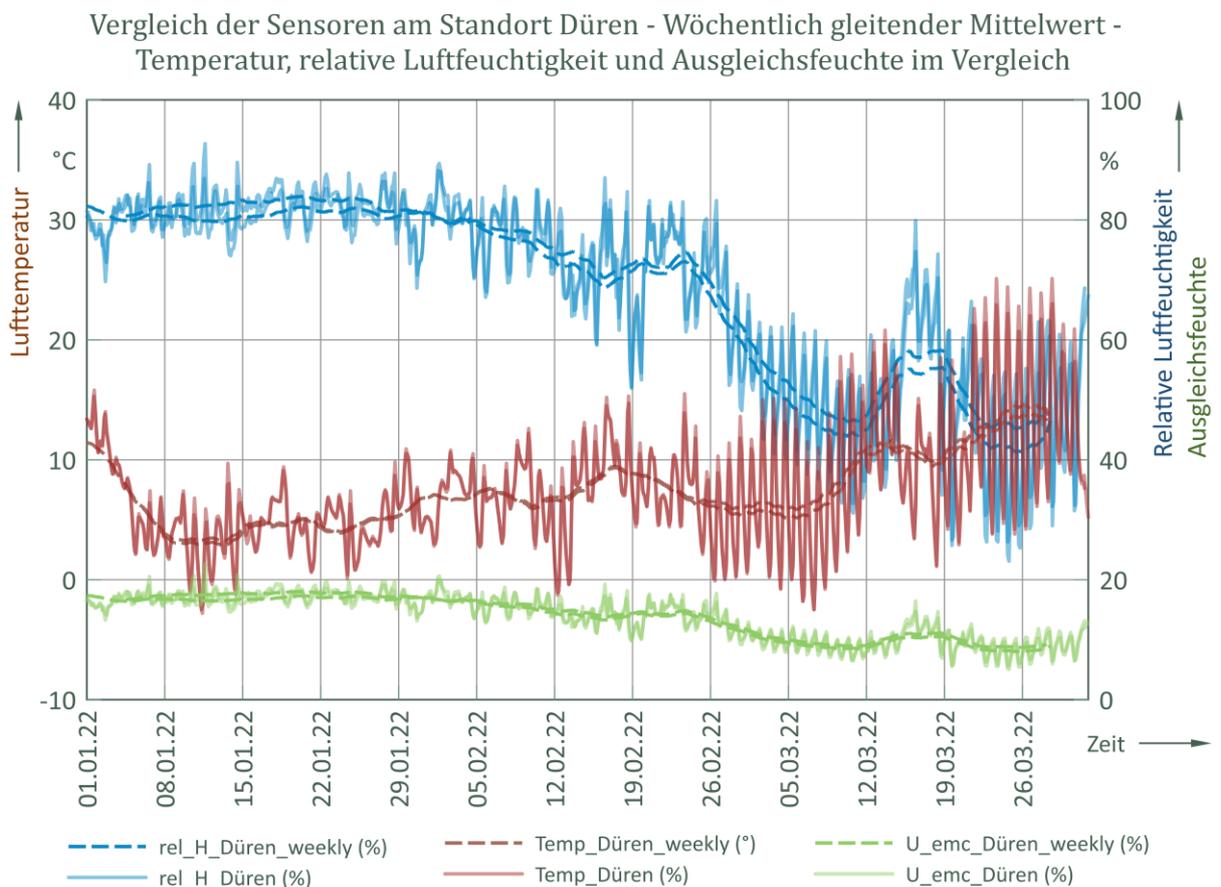


Abbildung 4-6: Vergleich innerhalb eines Daches in Düren für Sensor GER02 und GER09: Verläufe sowie wöchentlich gleitende Mittelwerte (Anmerkung: Sensor Ger09 ab 05.04.2022 ausgefallen)

Tabelle 4-8: Übersicht der Installation von zwei Sensoren in Menden

Standort	Sensor	Installation	Installationsort
Menden	Ger06	19.11.2020	
	Ger16	12.11.2021	

Vergleich der Sensoren am Standort Menden - Wöchentlich gleitender Mittelwert - Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Ausgleichsfeuchte im Vergleich

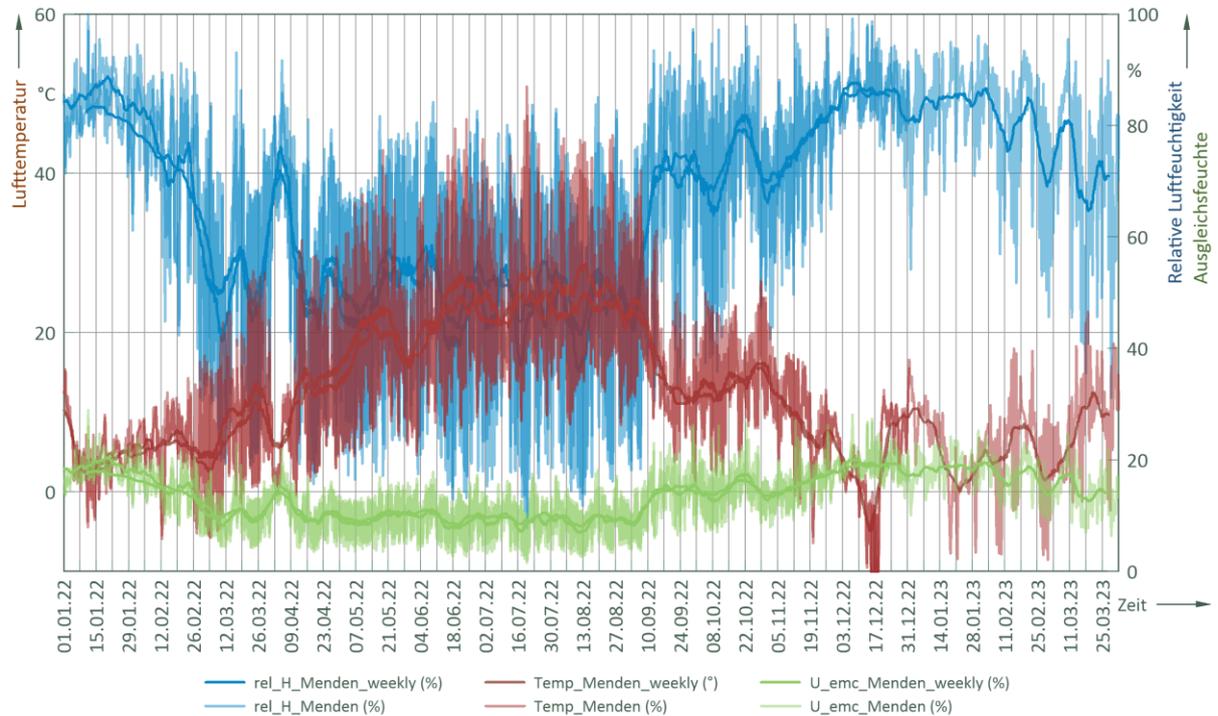


Abbildung 4-7: Vergleich innerhalb eines Daches in Menden: Sensor GER06 und GER16: Verläufe sowie wöchentlich (weekly) gleitende Mittelwerte (Anmerkung: Es ist kein signifikanter Unterschied erkennbar, da die Kurven nahezu übereinander liegen)

4.5 Vergleich mit Holzfeuchtemessungen nach DIN EN 13183-2

Nach dem Einbau der Sensoren wurde in unregelmäßigen zeitlichen Abständen die Holzfeuchte manuell durch die Firma MiTek Industries GmbH mit Hilfe eines Holzfeuchtemessgerätes (Widerstands-Messverfahren) nach DIN EN 13183-2 [16] gemessen und dokumentiert. Die dabei ermittelten Werte sind in Tabelle 4-9 aufgeführt.

Tabelle 4-9: Holzfeuchtemessungen nach DIN EN 13183-2 (Daten von MiTek Industries GmbH)

Land	Objekt	Datum der Holzfeuchtemessung	Holzfeuchte [%]	Einschlagtiefe [cm]	Bemerkung zum Prüfstift
GER	Ger01	16.12.2021	13,5	3,5	unisoliert ¹
	Ger02	03.11.2021	14,1	3,5	unisoliert ¹
	Ger04	22.12.2021	10,5 - 11,5	2,5	isoliert
		22.12.2021	13,6 - 13,8	3,5	unisoliert ¹
	Ger06	12.11.2021	13,6	3,5	unisoliert ¹
	Ger12	15.12.2021	9,6 - 11,3	2,5	isoliert
Ger13	24.09.2020	8,1	2,5	isoliert	
	15.12.2021	9,1 - 10,8	2,5	isoliert	

¹ unisolierte Sensoren messen über die gesamte Stiftlänge und damit auch oberflächennah

In Tabelle 4-10 erfolgt ein Vergleich zwischen den gemessenen Holzfeuchten und den berechneten Ausgleichsfeuchten an der Holzoberfläche. Für die berechneten Ausgleichsfeuchten wird einmal der Tagesmittelwert der Sensordaten und der Tageswert aus dem gleitenden Monatsmittelwert aufgeführt. Die berechneten Ausgleichsfeuchten des Tagesmittelwerts liegen im Mittel um 15 % (1,8 %-Holzfeuchte) höher als die in der Dachkonstruktion gemessenen Holzfeuchten. Die berechneten monatlichen Mittelwerte liegen im Mittel um 18 % (2,3 %-Holzfeuchte) höher als die gemessenen Holzfeuchten.

Tabelle 4-10: Vergleich der nach DIN EN 13183-2 bestimmten Holzfeuchte mit der berechneten Ausgleichsfeuchte aus den vorhandenen Klimadaten

Land	Objekt	Datum der Messung	In situ-Messung Holzfeuchte (Einschlagtiefe)	Ausgleichsfeuchte (Tagesmittelwert aus Daten) ¹	Ausgleichsfeuchte (Monats-MW aus Daten) ¹
GER	Ger01	16.12.2021	13,5 % (3,5 cm)	15,0 %	16,0 %
	Ger02	03.11.2021	14,1 % (3,5 cm)	15,6 %	15,4 %
	Ger04	22.12.2021	10,5 - 11,5 % (2,5 cm)	14,3 %	15,2 %
		22.12.2021	13,6 - 13,8 % (3,5 cm)		
	Ger06	12.11.2021	13,6 % (3,5 cm)	14,2 %	16,5 %
	Ger12	15.12.2021	9,6 - 11,3 % (2,5 cm)	14,0 %	13,4 %
Ger13	15.12.2021	9,1 - 10,8 % (2,5 cm)	13,6 %	12,8 %	

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die für die nachfolgende Diskussion und Schlussfolgerungen herangezogenen Ergebnisse sind in Kapitel 4 dargestellt. Die Ergebnisse beruhen auf der in Kapitel 3 vorgestellten Methodik. Die Diskussion erfolgt in der Reihenfolge der oben dargestellten Ergebnisse.

Klima von Dachräumen mit Nagelplattenkonstruktionen in Deutschland

In Kapitel 4.1 ist beispielhaft die Auswertung für den Sensor Ger08 aufgeführt. In Anhang 8.1 sind die weiteren Verläufe der übrigen Sensoren über deren Messzeiträume dargestellt. Allgemein lässt sich für alle Nutzungsarten (Verbrauchermärkte, Wohnhäuser, Büro, Kita und Reithalle) ein zyklischer Verlauf des Dachklimas über die Periode eines Jahres feststellen.

Die Lufttemperatur erreicht ihren Hochpunkt jeweils im Sommer und den Tiefpunkt im Winter. Die relative Luftfeuchtigkeit verhält sich gegenphasig zur Temperatur, hat also im Sommer den Tiefpunkt und im Winter den Hochpunkt. Für die berechneten Ausgleichsfeuchten ist der periodische Verlauf gleichphasig zur relativen Luftfeuchtigkeit mit Tiefpunkt im Sommer und Hochpunkt im Winter. Das Ergebnis ist nachvollziehbar und deckt sich qualitativ mit Ergebnisverläufen der Berner Fachhochschule [17].

Einteilung in Nutzungsklassen

In Kapitel 4.2 sind die Ergebnisse der berechneten Ausgleichsfeuchten für die verschiedenen Nutzungsarten (Tabelle 3-1) und Dachtypen (Tabelle 3-3) dargestellt. Außerdem wurde eine Einteilung in Nutzungsklassen (Tabelle 2-1) auf der Grundlage der Mittelwerte der berechneten Ausgleichsfeuchten über ein Jahr (also der damit geschätzten Gleichgewichtsfeuchten) vorgenommen.

Nach Tabelle 4-1 können die Dachtypen I, III und V der NKL 1 und die Dachtypen II, IV, VI und VII der NKL 2 zugeordnet werden. Diese Klassifizierungen liegen im erwarteten Bereich der jeweiligen Dachtypen, da überdachte Tragwerke in der Regel in NKL 2 eingestuft werden. Die Zuordnung von I, III & V in NKL 1 könnte auf den flächigen Dachabschluss zurückzuführen sein.

In Eurocode 5 [1] sind Grenzwerte für NKL 1 (65 %RL) und für NKL 2 (85 %RL) festgelegt, die „nur für einige Wochen je Jahr“ überstiegen werden. Die Anzahl von Wochen ist nicht genauer spezifiziert. Bei strenger Betrachtung dieser Grenzen, könnten die Dachtypen I bis VI (aufgrund der mehrwöchigen Überschreitung des Grenzwertes, siehe Abbildung 4-3) auch NKL 2 zugeordnet werden. Die Reithalle (Typ VII) könnte analog auch in NKL 3 eingestuft werden. Diese Einstufungen wären konservativ.

Die in den Ergebnissen vorliegenden höheren Werte der relativen Luftfeuchtigkeit und der berechneten Ausgleichsfeuchte der Reithalle lassen sich auf die Konstruktion des Daches zurückführen. Die Reithalle hatte ein offenes Tragwerk, das also direkt durch das Außenklima beeinflusst wurde. Die Untergurtebene war nicht gedämmt. Alle anderen gemessenen Dächer besaßen eine im Untergurt angeordnete Dämmebene (siehe Tabelle 3-3).

Absolute Feuchte

In Kapitel 4.3 wird der Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit für den Sensor Ger01 dargestellt. Der Verlauf ist repräsentativ für die anderen Sensoren (siehe Anhang 8.1).

Der Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit ist im Jahresverlauf zyklisch. Der Hochpunkt der absoluten Feuchtigkeit im Dachraum ist im Sommer und der Tiefpunkt im Winter. Der Verlauf ist also gegenläufig zur relativen Luftfeuchtigkeit und steigt und fällt mit der Temperatur. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch in Ergebnissen der TUM [8].

Unterschiede innerhalb eines Dachraums

Die Auswertung jeweils zweier individuell platzierter Sensoren innerhalb verschiedener Dachräume (siehe Kapitel 4.5) zeigt, dass nur geringe Unterschiede in der Lufttemperatur und Luftfeuchte vorhanden sind. Die Auswirkung auf die berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche ist vernachlässigbar gering. Die Ergebnisse zeigen, dass die gemessenen Werte der Einzelsensoren vereinfacht für den gesamten Dachraum gelten.

Vergleich mit Holzfeuchtemessungen nach DIN EN 13183-2

In Kapitel 4.5 werden Messwerte der Holzfeuchten einzelner Dachräume und Zeitpunkte mit den zugehörigen berechneten Ausgleichsfeuchten verglichen. Vorweg ist zu diesem Abschnitt anzumerken, dass die Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen nach DIN EN 13183-2 [16] von der MiTek Industries GmbH bereitgestellt und nicht von der RWTH bestimmt wurden. Die wenigen vorliegenden Messwerte und das ausschließliche Messen in den Monaten November und Dezember an einzelnen Objekten, machen eine allgemein gültige Aussage zum Vergleich zwischen Messwerten und berechneten Ausgleichsfeuchten schwierig.

Anzumerken ist auch, dass die Feuchteverteilung in Holzquerschnitten i. d. R. ungleichmäßig ist [8][17]. Die Messwerte nach dem Widerstands-Messverfahren (DIN EN 13183-2) wurden in einer Tiefe von 2,5 bis 3,5 cm aufgenommen. Die hier berechneten Ausgleichsfeuchten gelten jedoch nur für die Holzoberfläche [10]. Die Ergebnisse zeigen die Tendenz, dass die nach DIN EN 13183-2 bestimmten Holzfeuchten in 2,5 bis 3,5 cm Tiefe unter den berechneten Ausgleichsfeuchten liegen; Nagelplatten besitzen i. d. R. Nagellängen von 1 bis 2 cm.

Nach Ergebnissen der TUM [8] kann in einer Tiefe von 1,5 cm auch von wesentlich geringeren Holzfeuchteschwankungen ausgegangen werden, als es die Berechnungsergebnisse in den Tabellen des Kapitels 4.2 zeigen. Es sollte hierbei berücksichtigt werden, dass die Annahme über die Eignung des gleitenden Mittelwertes des Dachklimas (täglich bis monatlich) für die Berechnung der Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche, bisher nicht validiert worden ist.

Zur Verbesserung der Datenlage und zur Überprüfung der Korrelation zwischen veränderlichen Klimadaten und der hiervon abhängigen Ausgleichsfeuchte, sollten in Zukunft umfangreichere Messungen an Dachkonstruktionen in Nagelplattenbauweise durchgeführt werden. Neben der langfristigen und kontinuierlichen Messung sollten dabei auch Holzfeuchtedaten aus unterschiedlichen Tiefen der Holzquerschnitte erhoben werden.

6 Zusammenfassung und Fazit

Dieser Abschlussbericht gibt eine Übersicht über gemessene Klimadaten in Dächern in Nagelplattenbauweise. Die Daten wurden im Zeitraum von Oktober 2020 bis März 2023 von der MiTek Industries GmbH aufgezeichnet und durch die RWTH Aachen aufbereitet und analysiert. Zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurden in Dachkonstruktionen unterschiedlicher Objekte Sensoren in Deutschland, Frankreich und Finnland installiert. In diesem Schlussbericht wurden die Daten für Deutschland aufbereitet. Bei der Wahl der Objekte wurde es angestrebt möglichst viele klimatische Regionen in Deutschland, Nutzungsarten von Gebäuden sowie Dachtypen abzudecken.

Als Ergebnis der Datenauswertung wurden die Zeitverläufe der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit für die Messdaten graphisch dargestellt. Aus den dreistündlich gemessenen Daten wurden gleitende Mittelwerte (wöchentlich und monatlich) der Klimadaten, die Ausgleichsfeuchte der Holzoberflächen sowie die absolute Luftfeuchtigkeit im Dachraum berechnet. Auf Grundlage dieser berechneten Ergebnisse wurden Schlussfolgerungen zu folgenden Bedingungen bei Nagelplattenkonstruktionen in Deutschland gezogen: (i) Verlauf des Dachklimas über das Jahr, (ii) Einteilung der untersuchten Dachtypen in Nutzungsklassen, (iii) Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit, (iv) Unterschiede des Klimas innerhalb eines Dachraums und (v) Vergleich von gemessenen und berechneten Ausgleichsfeuchten.

Folgende **Erkenntnisse** konnten im Rahmen der Untersuchungen gewonnen werden:

- Das Dachklima verhält sich zyklisch im Verlauf eines Jahres. Dabei haben die relative Luftfeuchtigkeit und die berechnete Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche ihren Hochpunkt im Winter und den Tiefpunkt im Sommer. Im Mittel liegt die für die Dachtypen I bis VI berechnete Holzfeuchteschwankung an der Oberfläche bei 9,1 % (COV = 26 %); maximal wurden 12 % bei Sensor Ger10 berechnet (Tabelle 4-4).
- Alle Dachtypen konnten NKL 2 des Eurocode 5 [1] (oder besser) zugeordnet werden.
- Die gemessenen Unterschiede innerhalb eines Dachraums sind gering. Die Messwerte eines Sensors können vereinfachend im gesamten Dachraum angenommen werden.
- Die im Rahmen der stichprobenartigen Holzfeuchtemessungen mit dem Widerstandsmessverfahren nach DIN EN 13183-2 ermittelten Werte sind geringer als die berechneten Werte der Ausgleichsfeuchte. Die Anzahl dieser Messungen war allerdings gering. Ergebnisse der TUM [8] zeigten jedoch, dass in einer Tiefe von 1,5 cm (Nagelspitzen i.d.R. 1 - 2 cm) die Holzfeuchte deutlich weniger schwankt, als an der Holzoberfläche.

Auf Grundlage der in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse kann von einer Übertragbarkeit der experimentellen Untersuchungen von Sieder [7] für die in den Dachtypen I bis VI aufgetretenen Holzfeuchteschwankungen ausgegangen werden. Die im deutschen Raum in der Praxis auftretenden Holzfeuchteschwankungen in der für Nagelplatten relevanten Tiefe (1 bis 2 cm) sollten jedoch in einer umfangreicheren Messkampagne mit kontinuierlichen Holzfeuchtemessungen überprüft und die These belegt werden.

7 Literatur

- [1] DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Oktober 2010
- [2] Blaß, H.J.: Herauswandern von Nagelplatten aus dem Holz - Identifizierung wesentlicher Einflussparameter, Studie für das DIBt, 2020
- [3] Groom, L.H.: Effect of Moisture Cycling on Mechanical Response of Metal-Plate Connector Joints With and Without an Adhesive Interface, 1995
- [4] Paevere, P.; Nguyen, M.; Syme, M.; Leicester, R.; Ho, K.: Mechano-Sorptive Nailplate Backout in Nailplated Timber Trusses, Forest & Wood Products Australia, 2009
- [5] Mainey, A.J., Gilbert, B.P., Bailleres, H. et al.: Capacity of innovative nailplated joints subjected to accelerated moisture cycling. Eur. J. Wood Prod. 78, 237–256, 2020
- [6] Sieder, M.: Sachstands-Bericht: Mechanosorptives Herauswachsen von Nagelplatten in Nagelplattenbindern Übertragbarkeit eines Australischen Berichts über ein Forschungsvorhaben des CSIRO auf Anwendungen von Nagelplattenkonstruktionen in Deutschland, 2019
- [7] Sieder, M.: Mechanosorptives Verhalten von Nagelplatten in Nagelplattenbindern, Veröffentlichung der gutachterlichen Stellungnahme durch Gütegemeinschaft Nagelplattenprodukte e.V. Interessensverband Nagelplatten e.V., 2022
- [8] Gamper, A.; Dietsch, P.; Merk, M.: Schlussbericht für das Forschungsvorhaben: „Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen“, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013
- [9] Keylwerth, R., Noack, D.: Die Kammertrocknung von Schnittholz, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Reinbek, Betriebsblatt 1, 22. Jg., Heft 1, 1964
- [10] Simpson, W.T.: Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models, Wood and Fiber, Vol. 5, No. 1, p. 41-48, 1973
- [11] Willems, W.M.; Schild, K.; Stricker, D.: Formeln und Tabellen Bauphysik, 7. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2022
- [12] prEN 1995-1-1:20XX (E) (nicht veröffentlichte Quelle)
- [13] DIN EN 1995-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, August 2013
- [14] Spezifikation: Klima-Monitoring Nagelplattendächer, 22.05.2020 (nicht veröffentlichte Quelle)
- [15] Kriterienliste: Monitoring von Dachräumen bei Dächern mit Nagelplattenkonstruktionen, 21.07.2020 (nicht veröffentlichte Quelle)
- [16] DIN EN 13183-2: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren, Juli 2002
- [17] Franke, B.; Franke, S.; Schiere, M.; Müller, A.: „Praxisleitfaden - Beurteilung der Holzfeuchte für Tragwerke und Brücken für die Planung, Errichtung und Nutzung, Berner Fachhochschule, 2019

8 Anhang

8.1 Ergebnisverläufe der Einzelsensoren in Deutschland

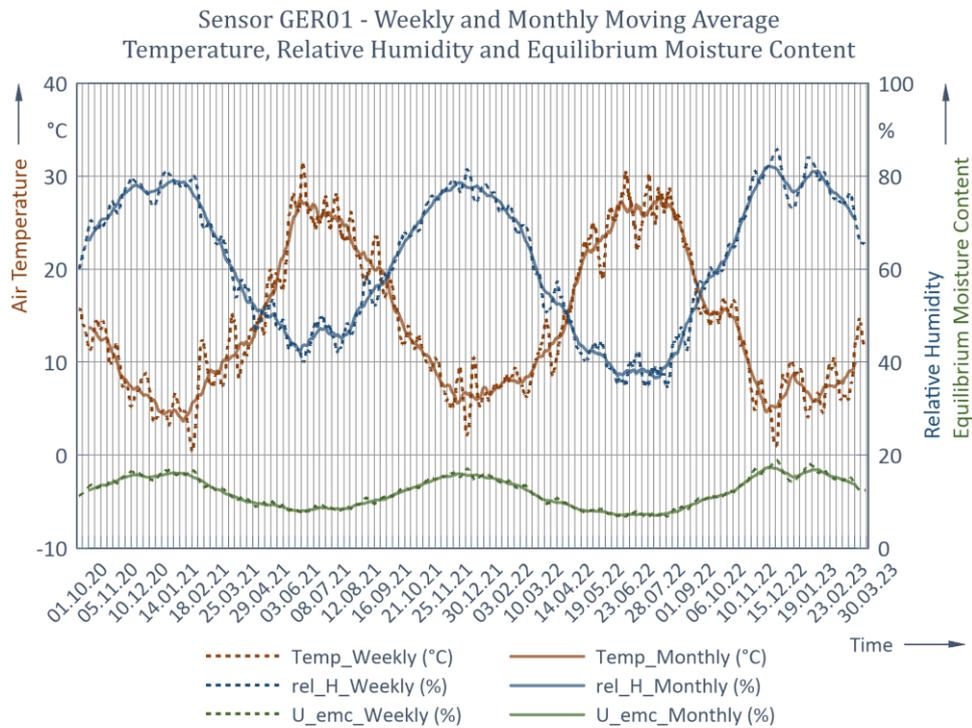


Abbildung 8-1: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger01

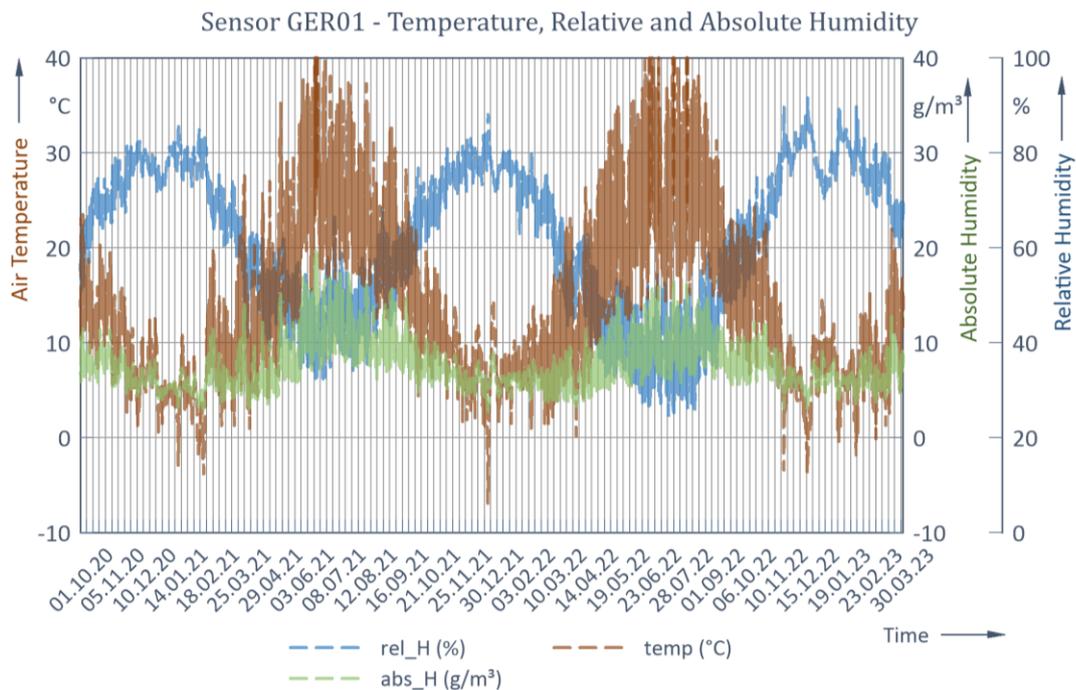


Abbildung 8-2: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger01

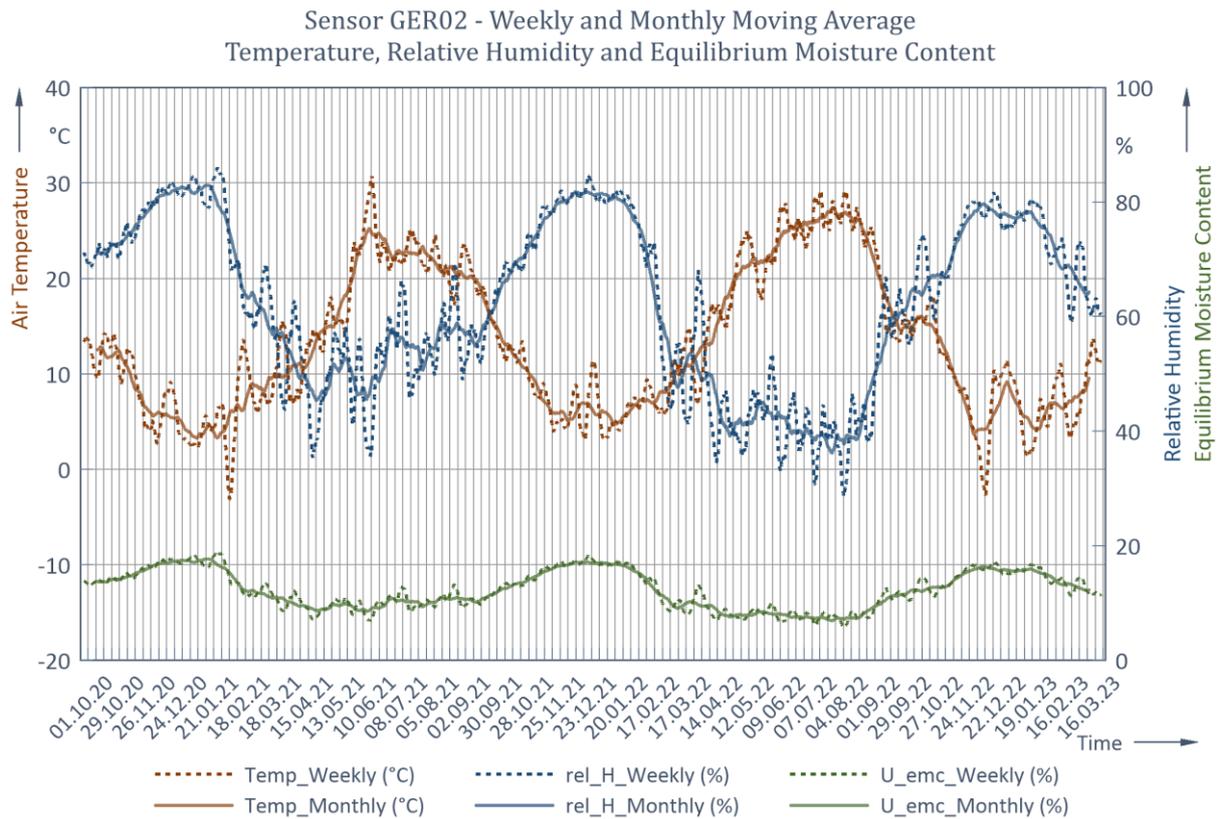


Abbildung 8-3: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger02

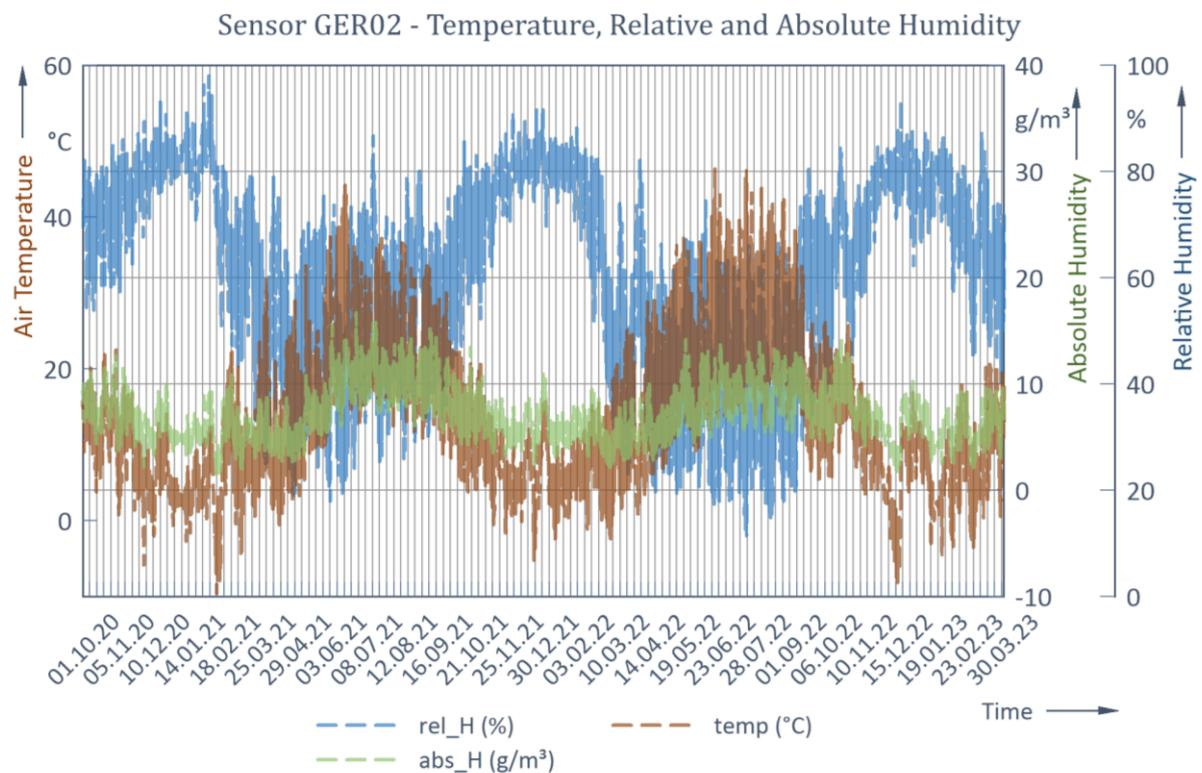


Abbildung 8-4: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger02

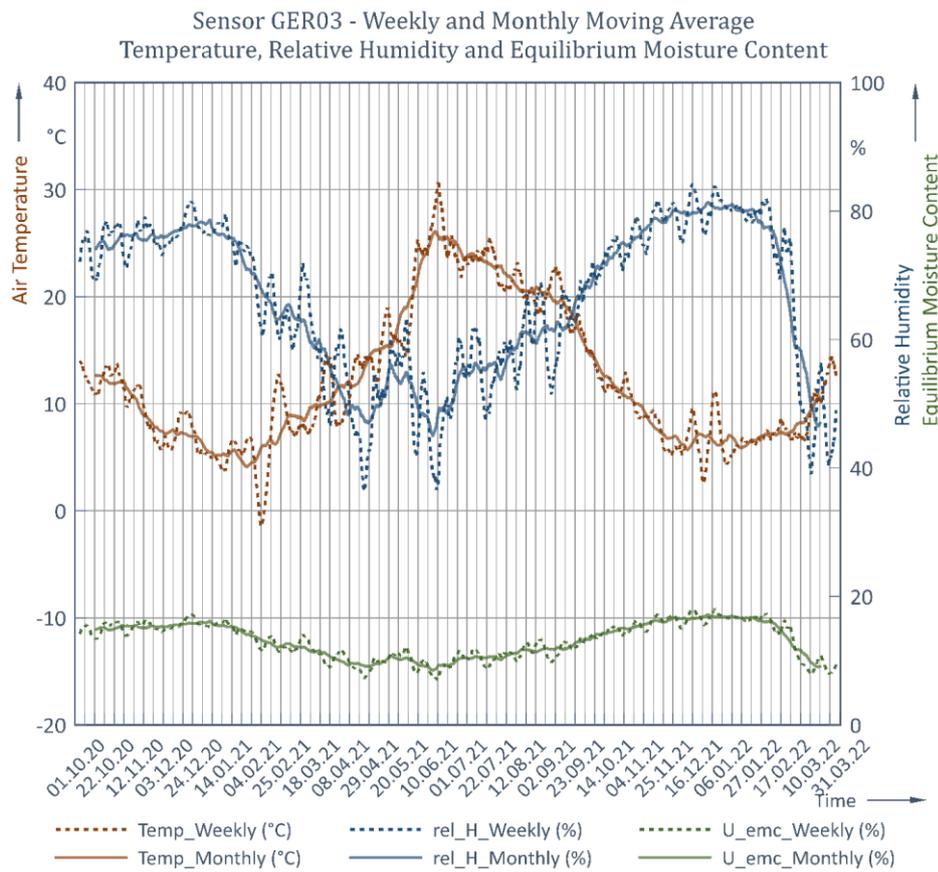


Abbildung 8-5: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger03

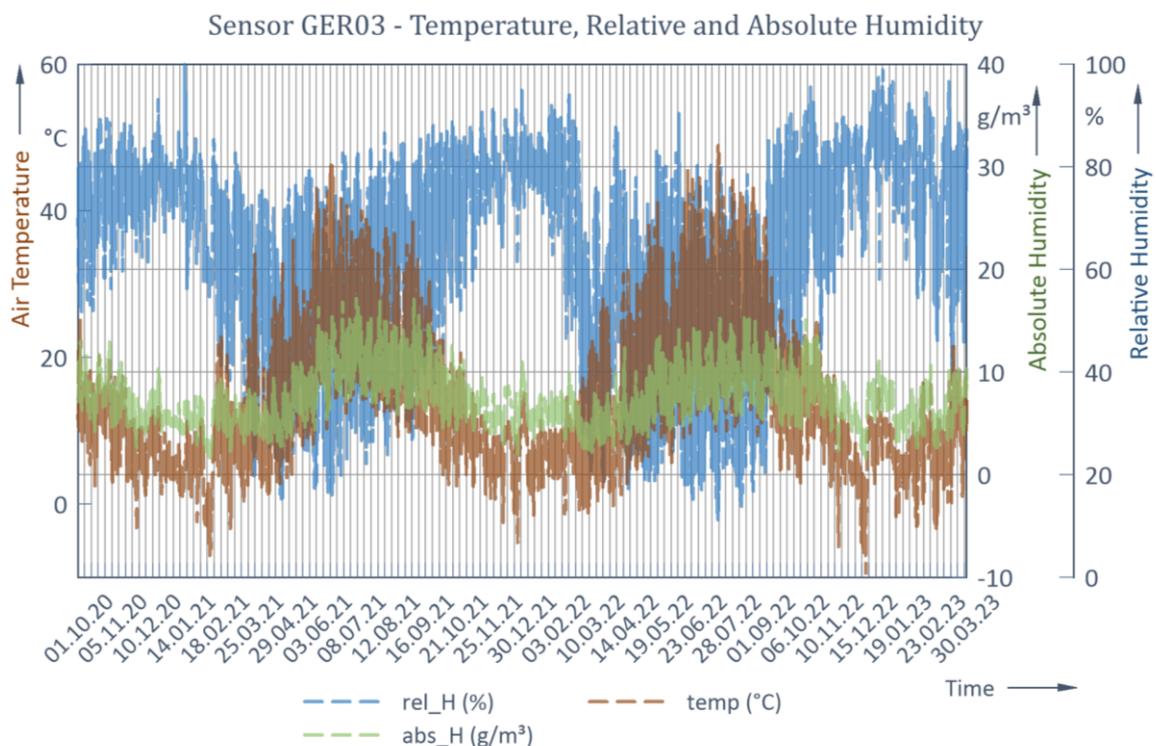


Abbildung 8-6: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger03

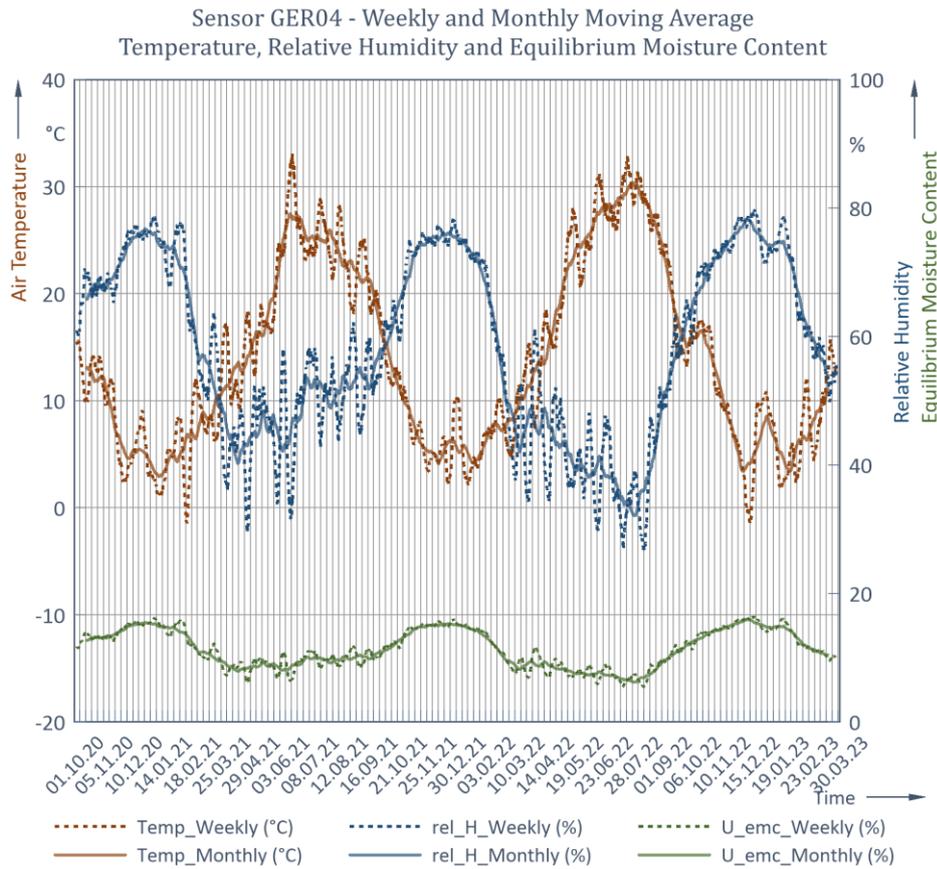


Abbildung 8-7: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger04

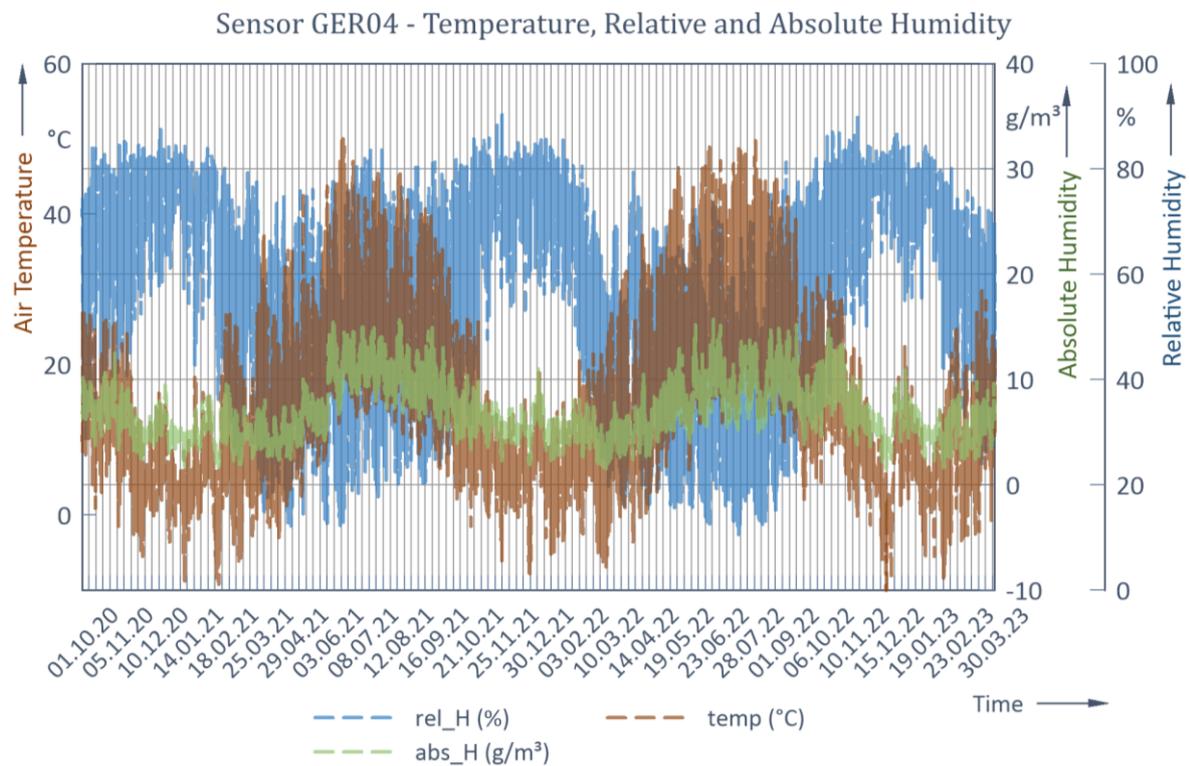


Abbildung 8-8: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger04

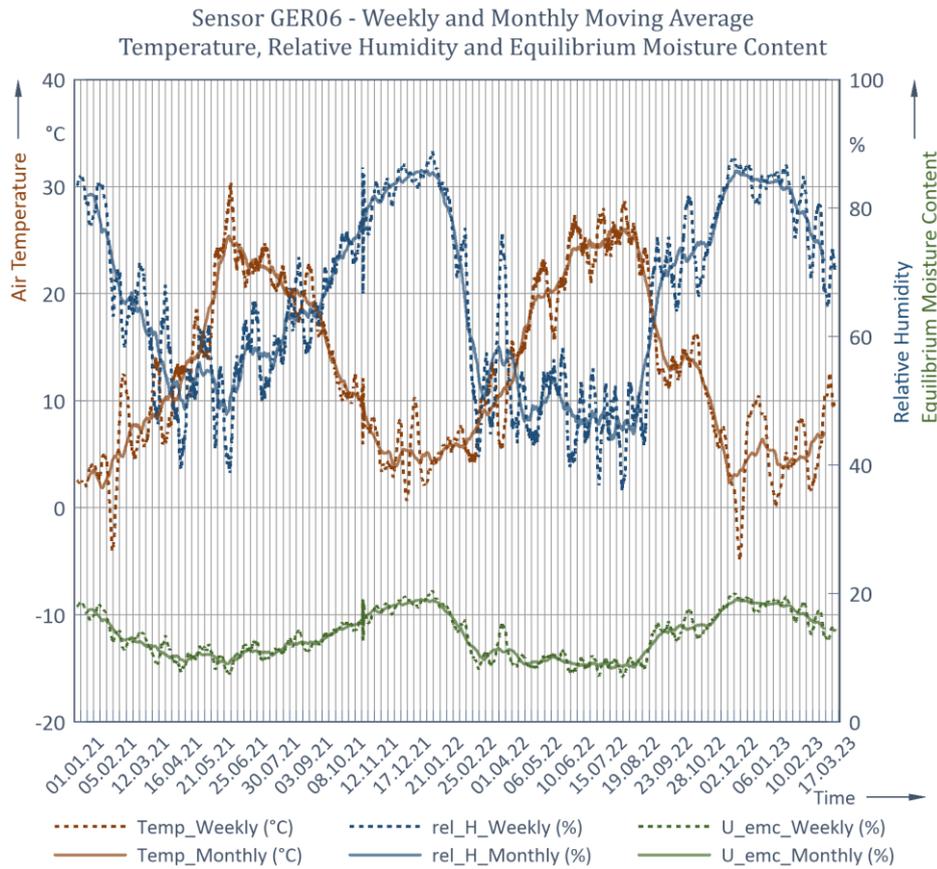


Abbildung 8-9: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger06

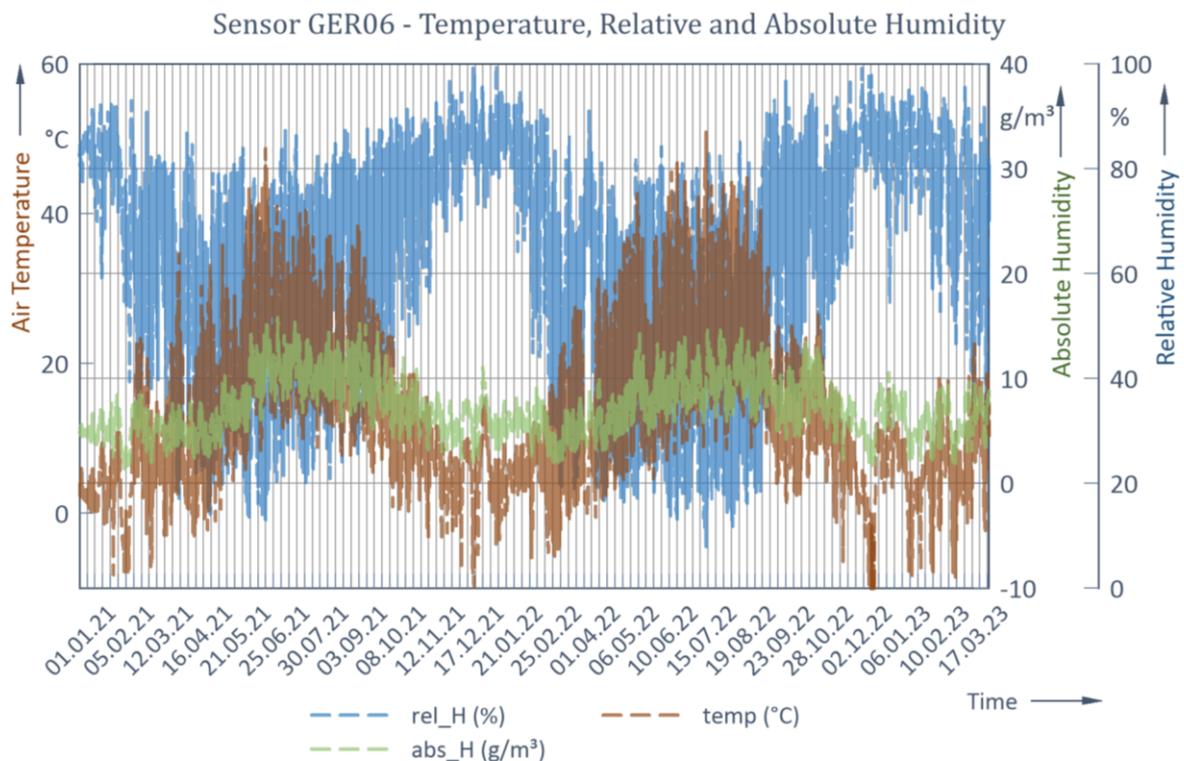


Abbildung 8-10: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger06

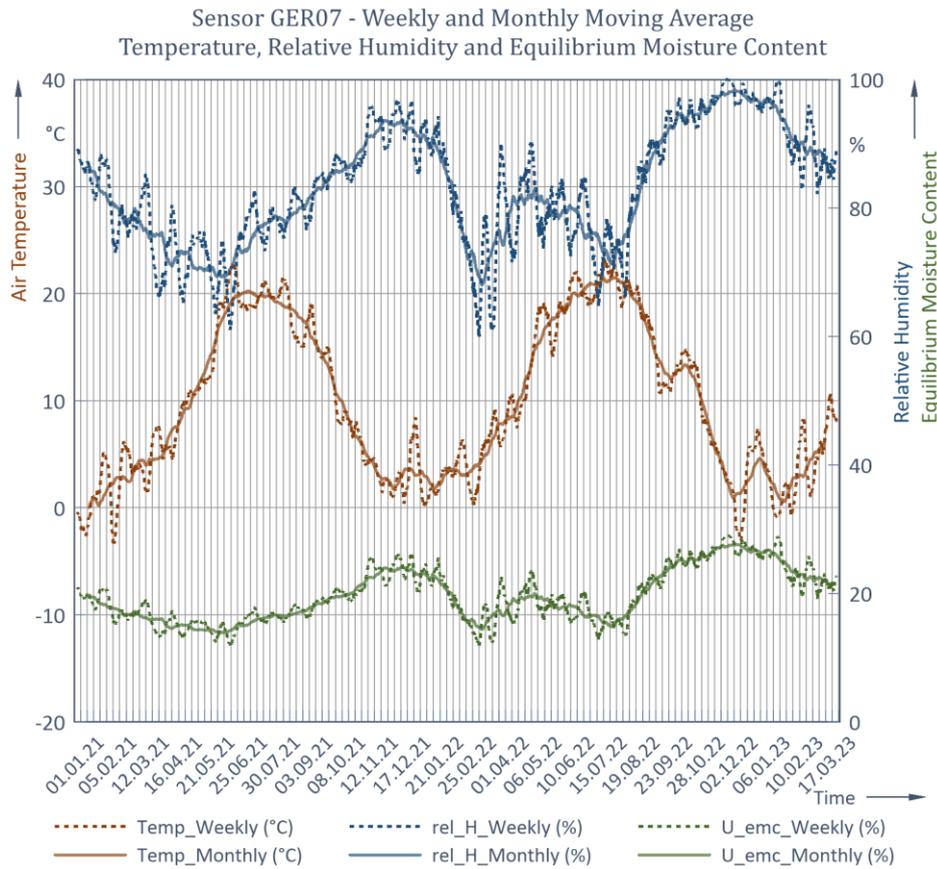


Abbildung 8-11: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger07

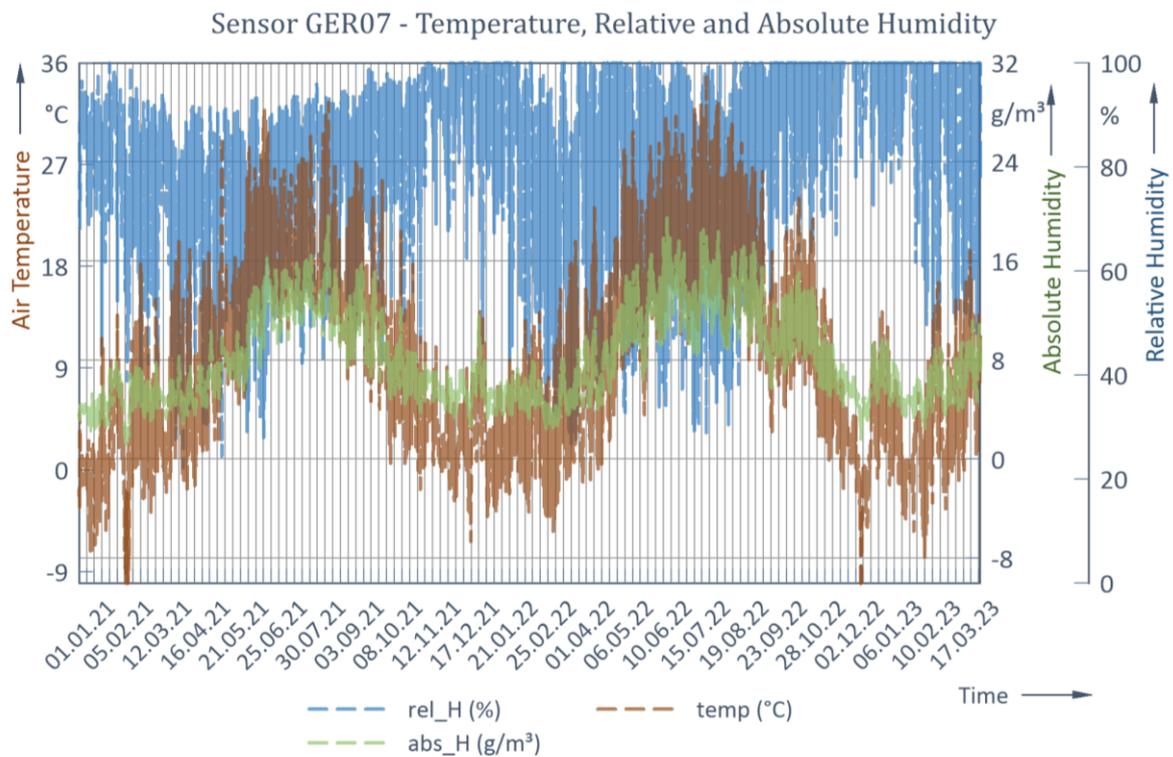


Abbildung 8-12: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger07

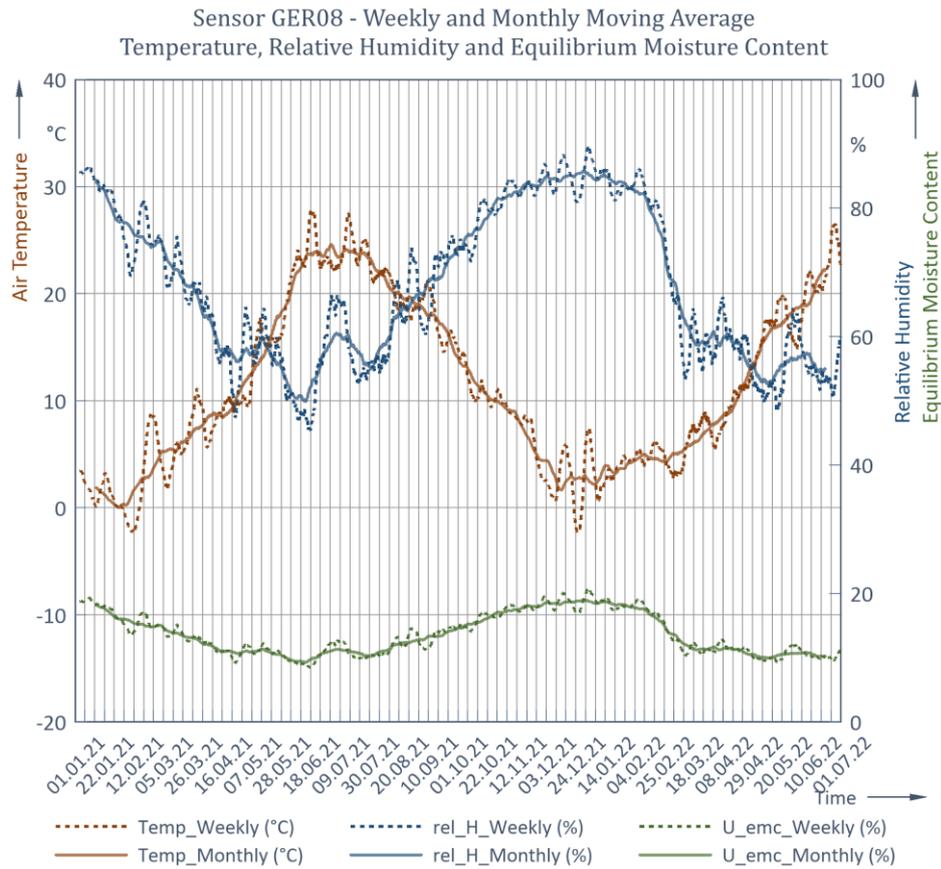


Abbildung 8-13: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger08

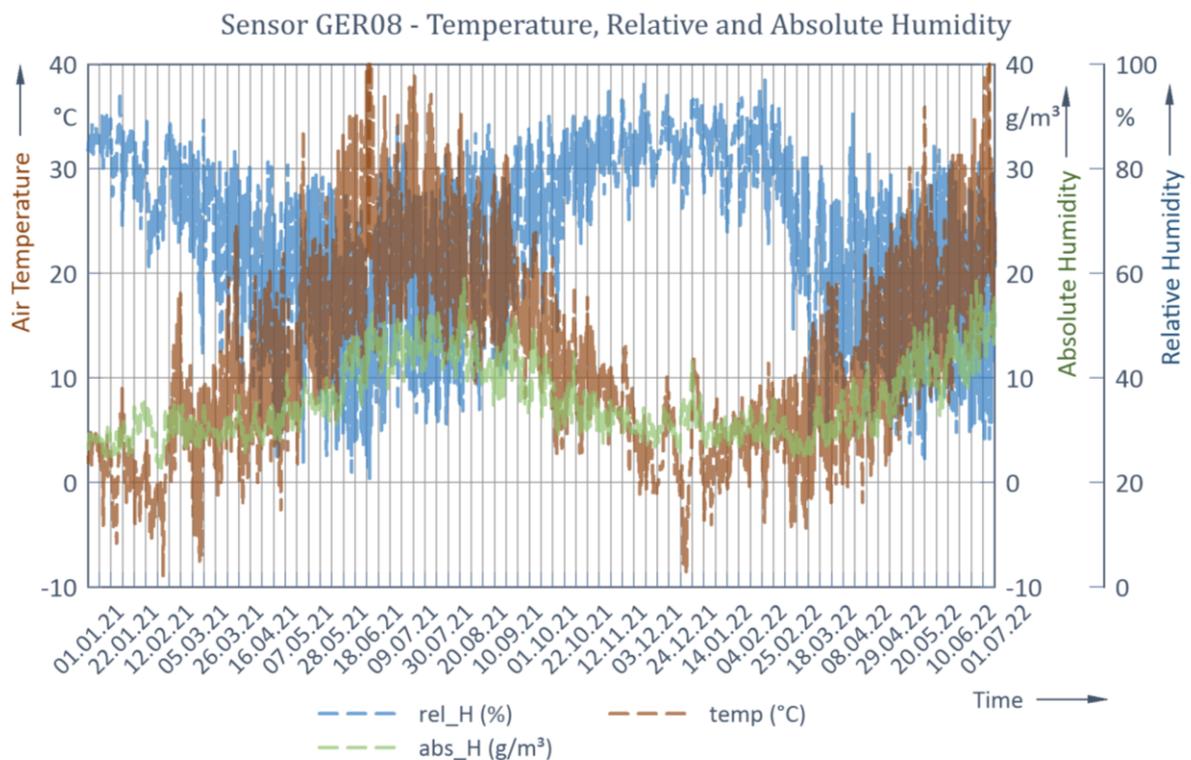


Abbildung 8-14: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger08

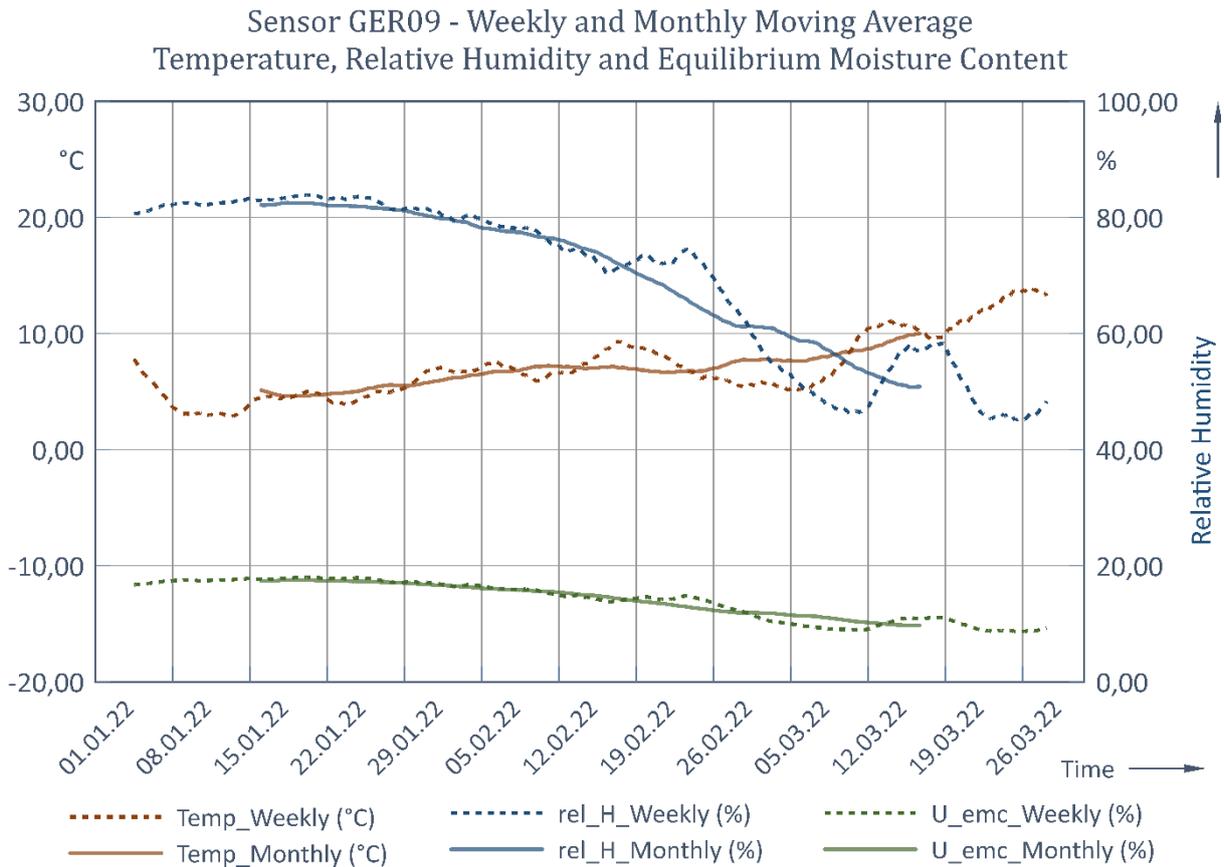


Abbildung 8-15: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger09

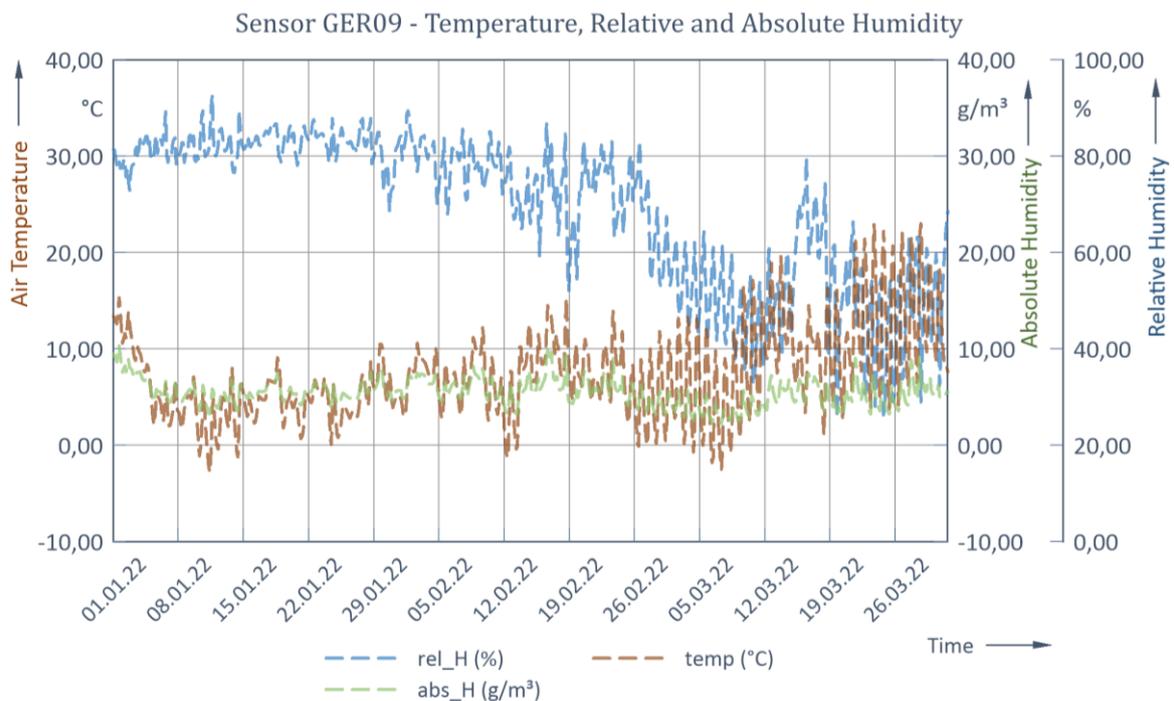


Abbildung 8-16: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger09

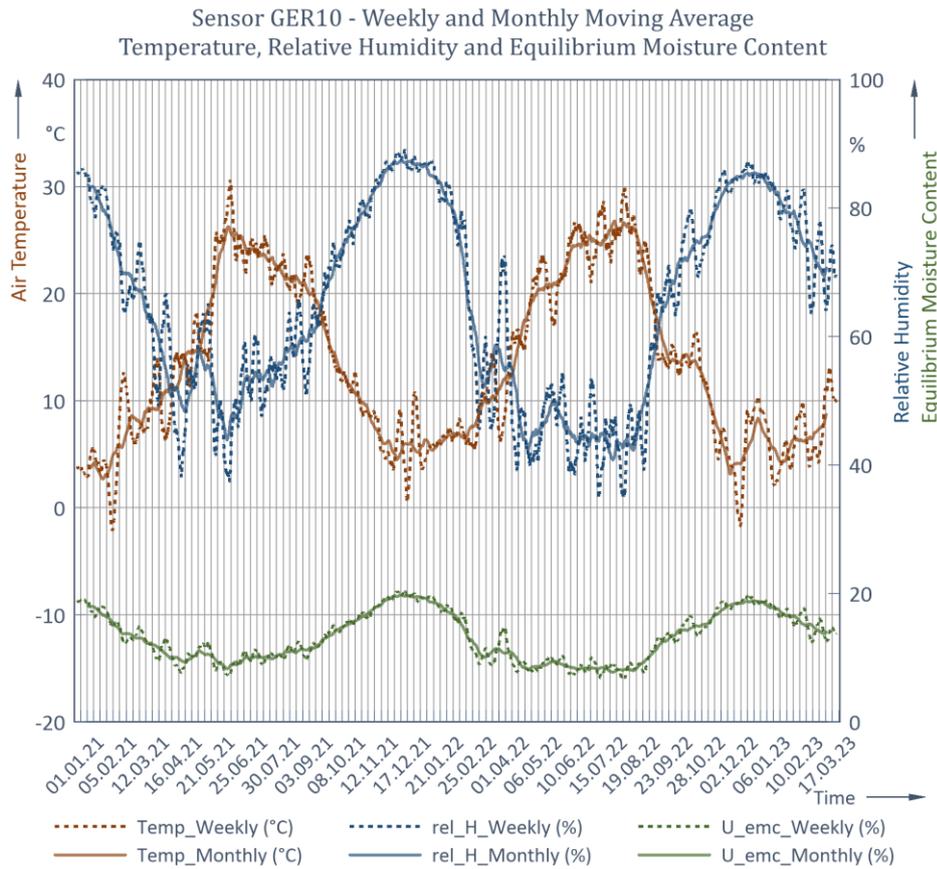


Abbildung 8-17: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger10

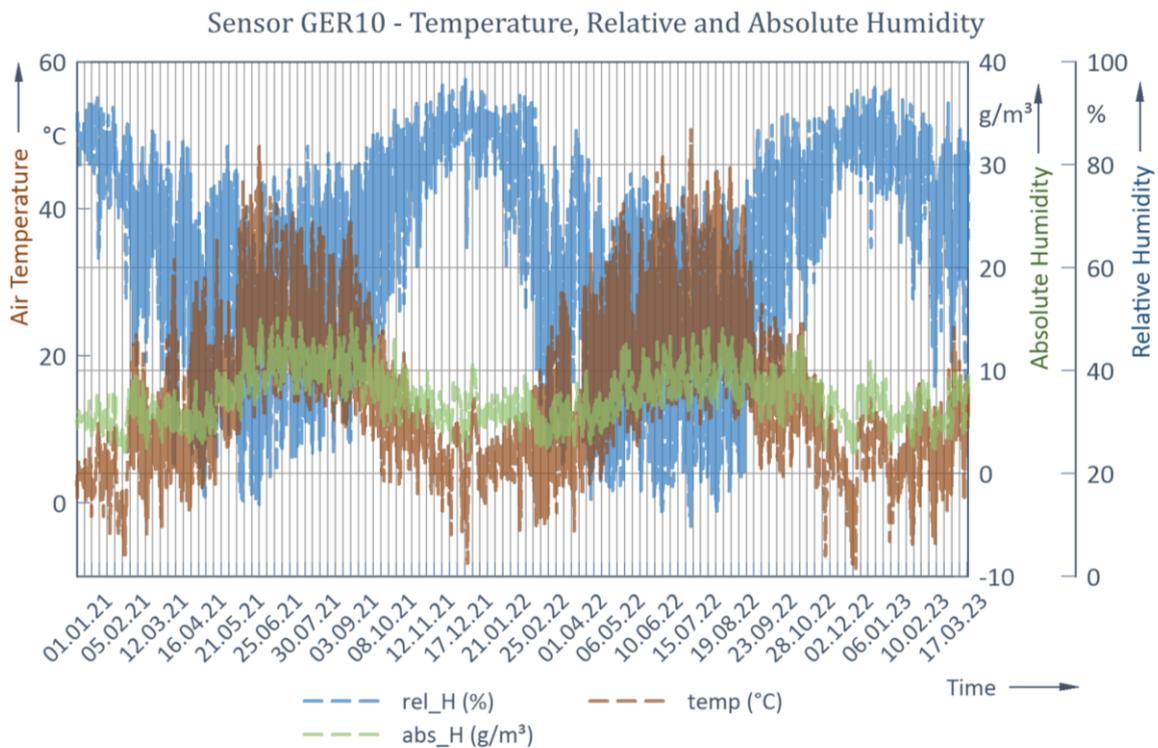


Abbildung 8-18: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger10

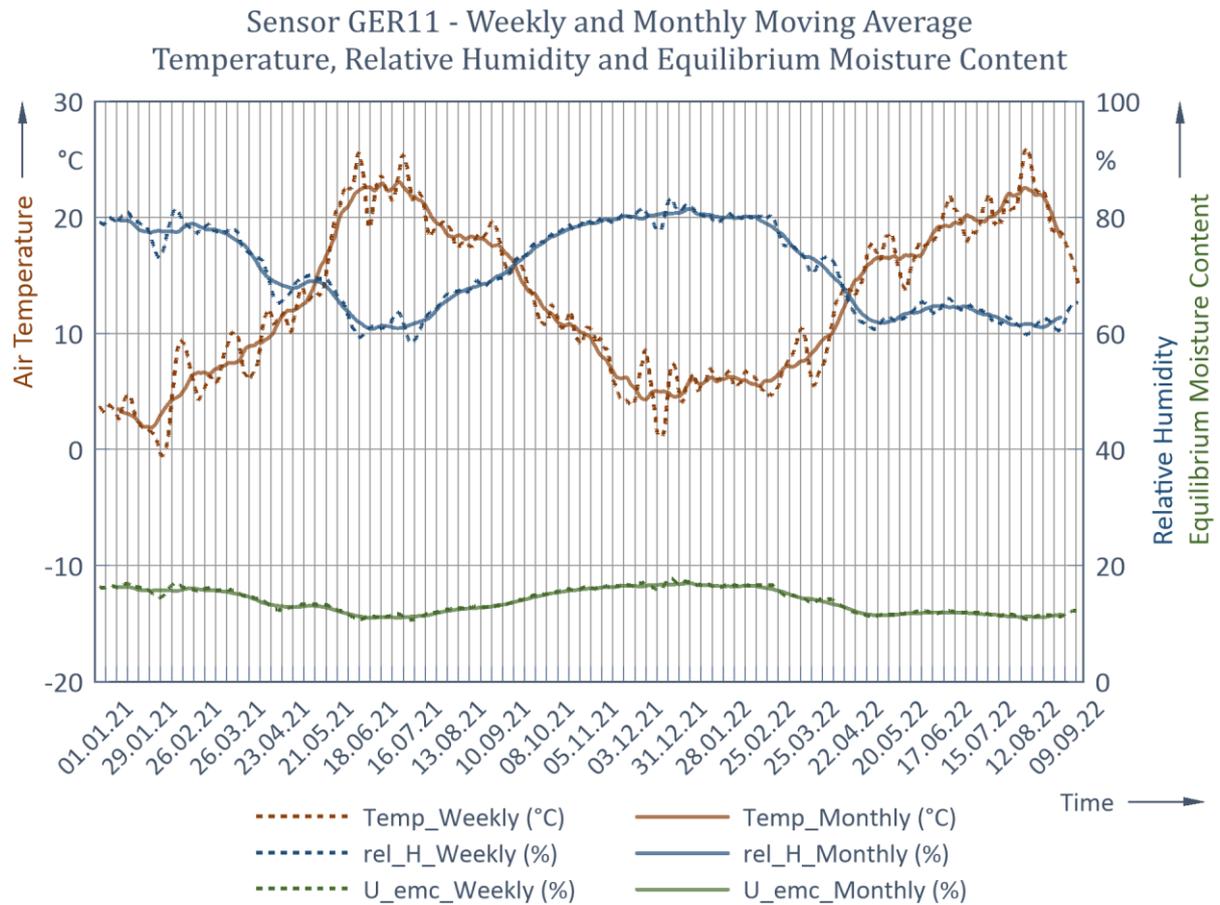


Abbildung 8-19: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger11

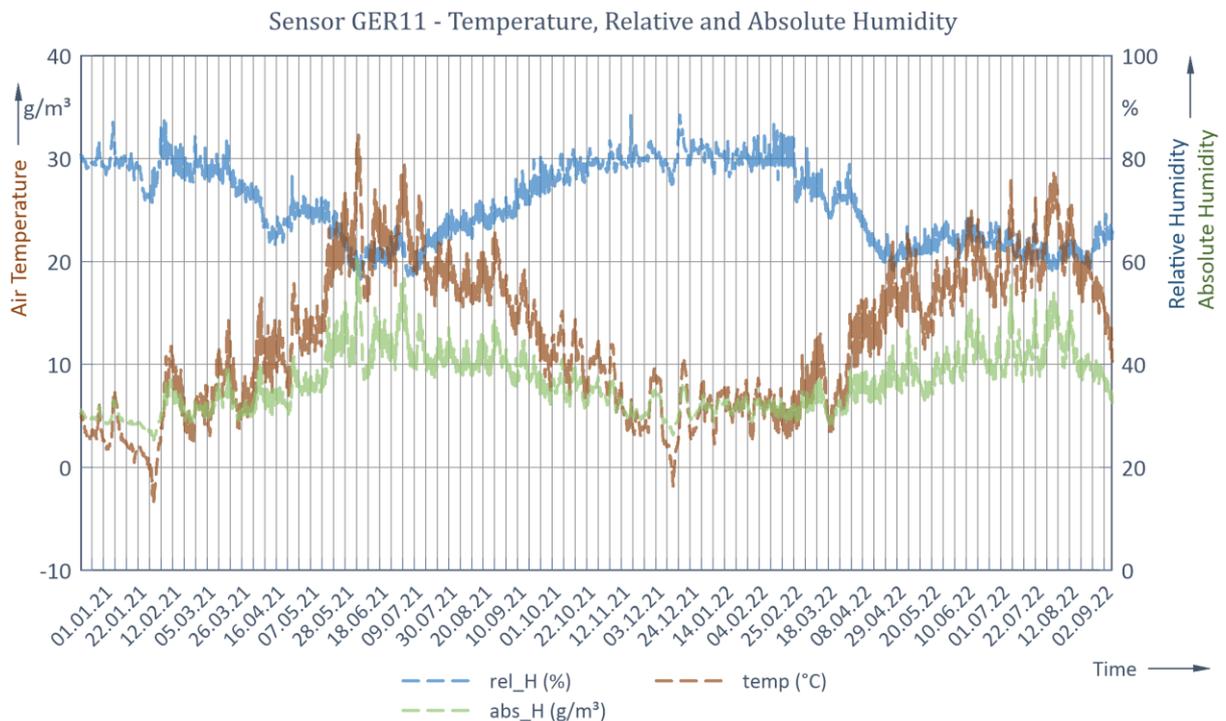


Abbildung 8-20: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger11

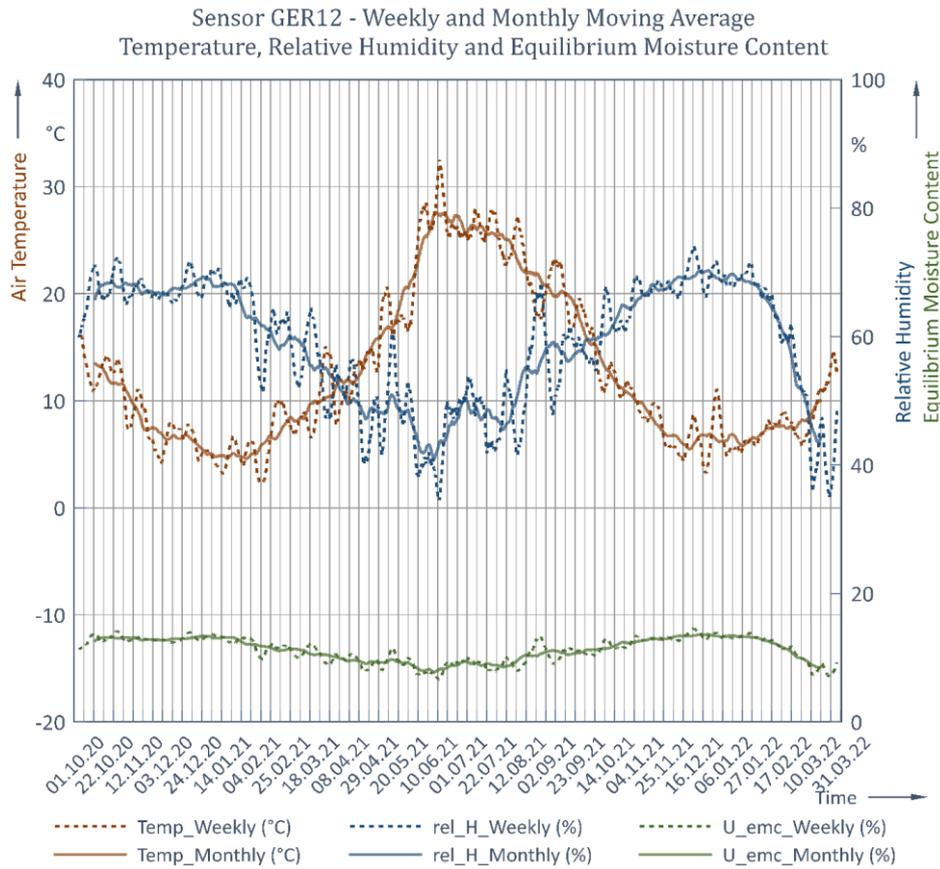


Abbildung 8-21: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger12

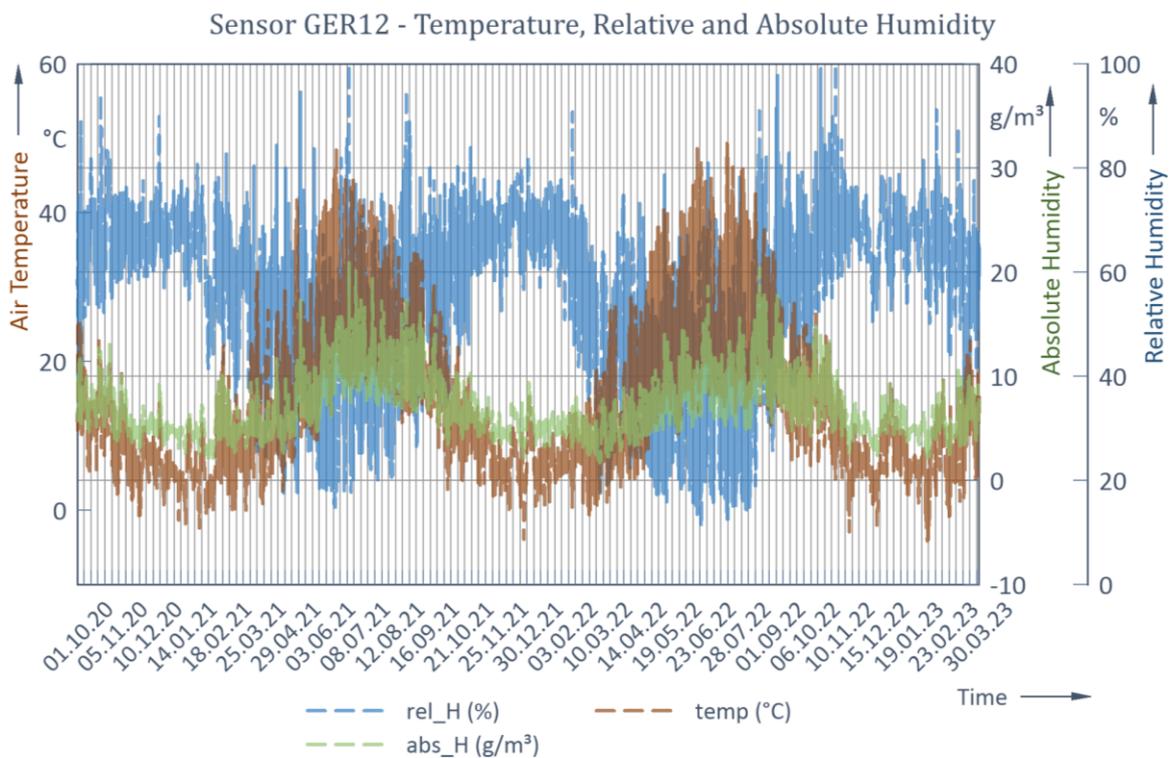


Abbildung 8-22: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger12

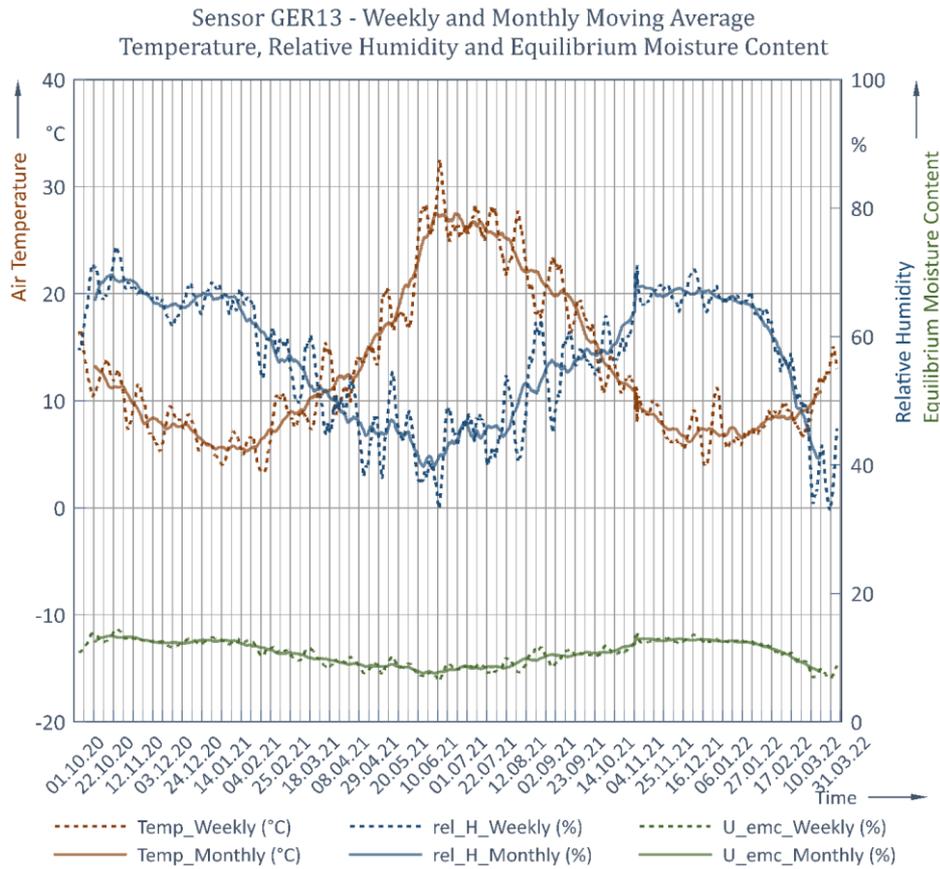


Abbildung 8-23: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger13

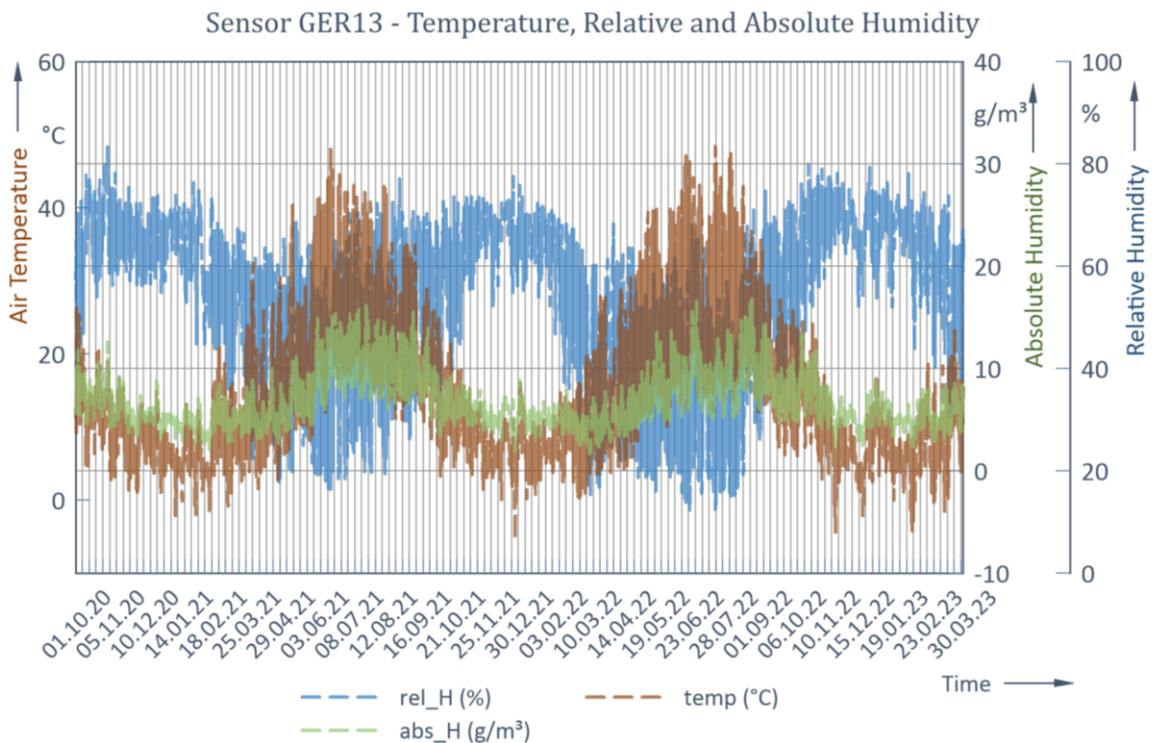


Abbildung 8-24: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger13

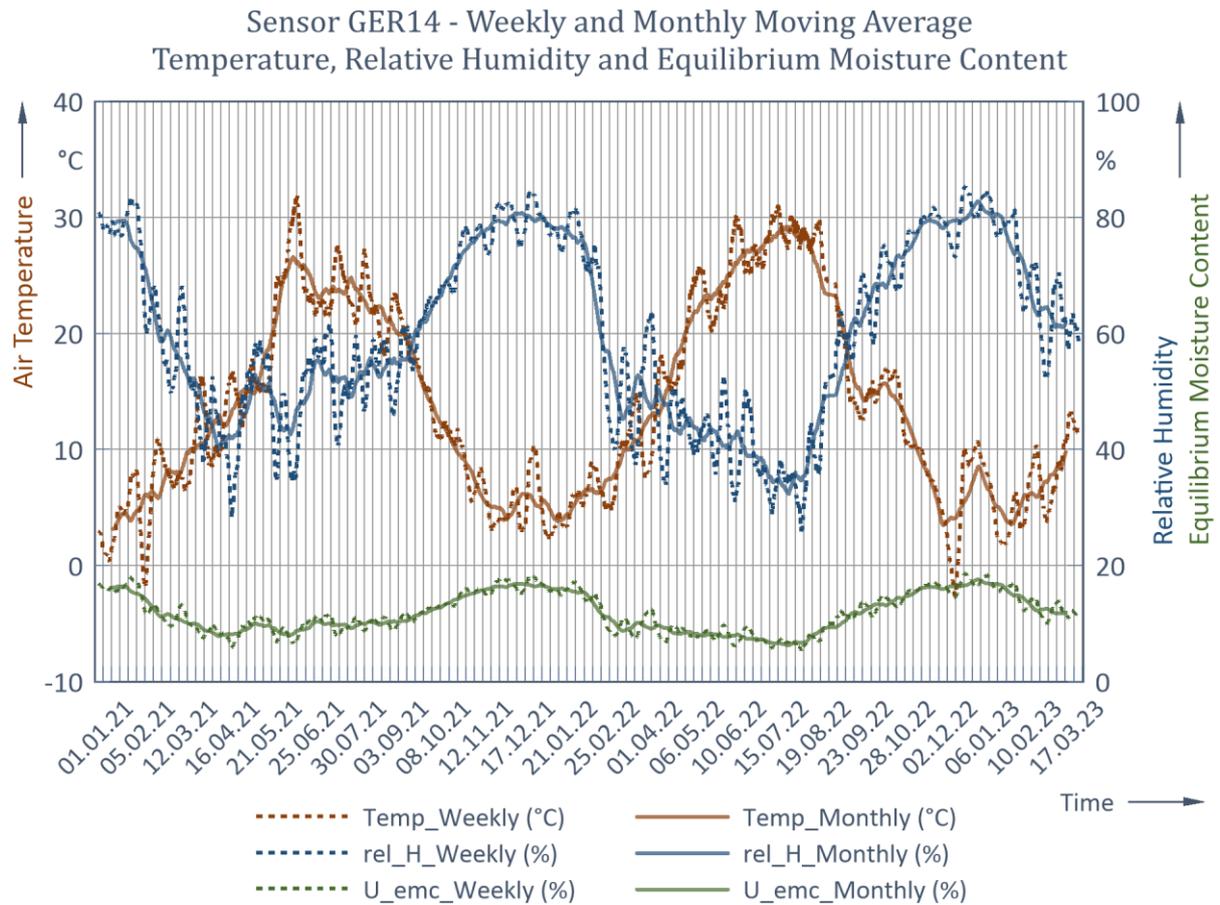


Abbildung 8-25: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger14

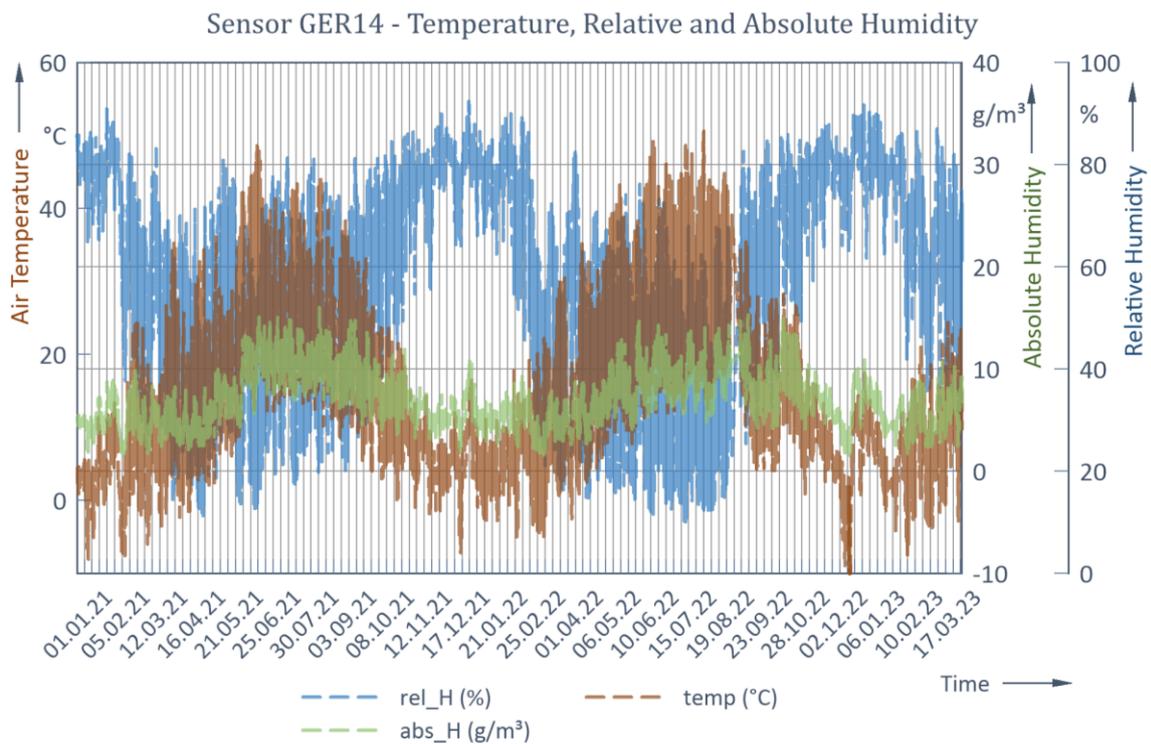


Abbildung 8-26: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger14

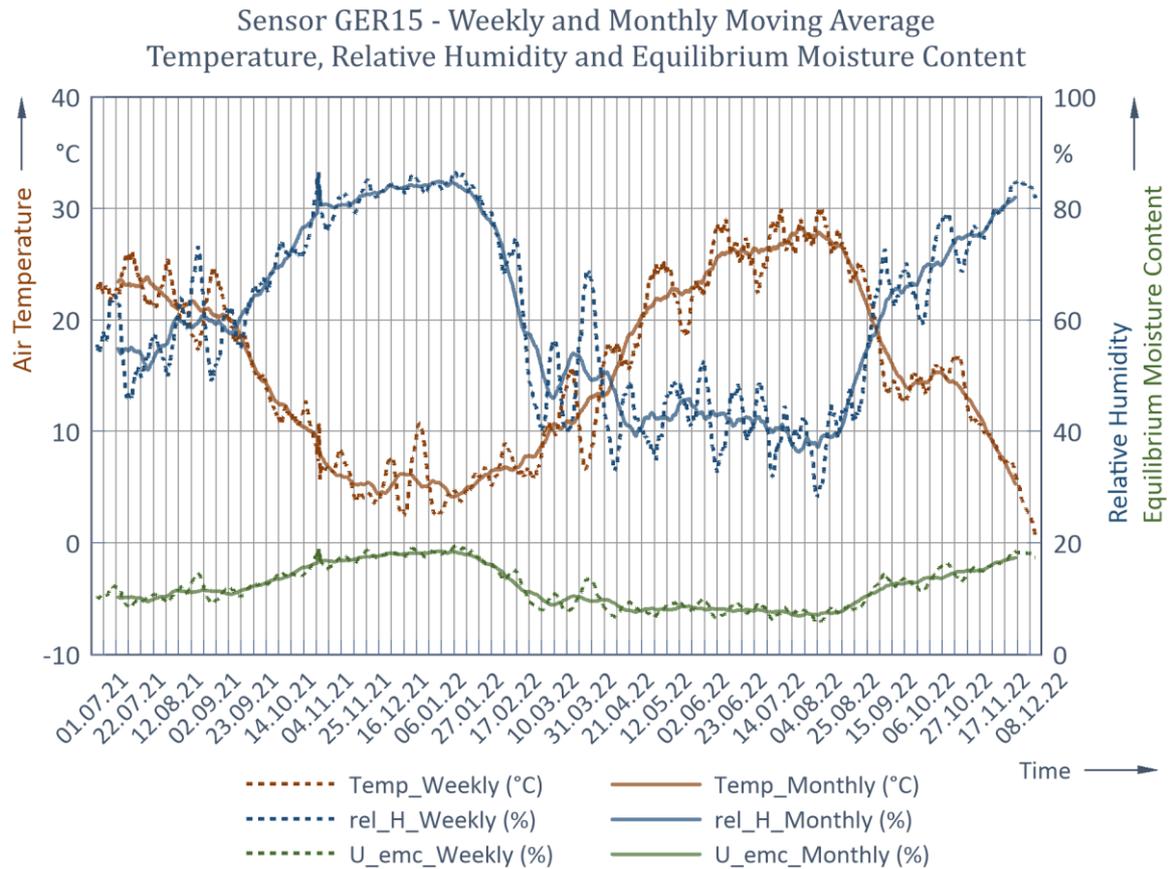


Abbildung 8-27: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger15

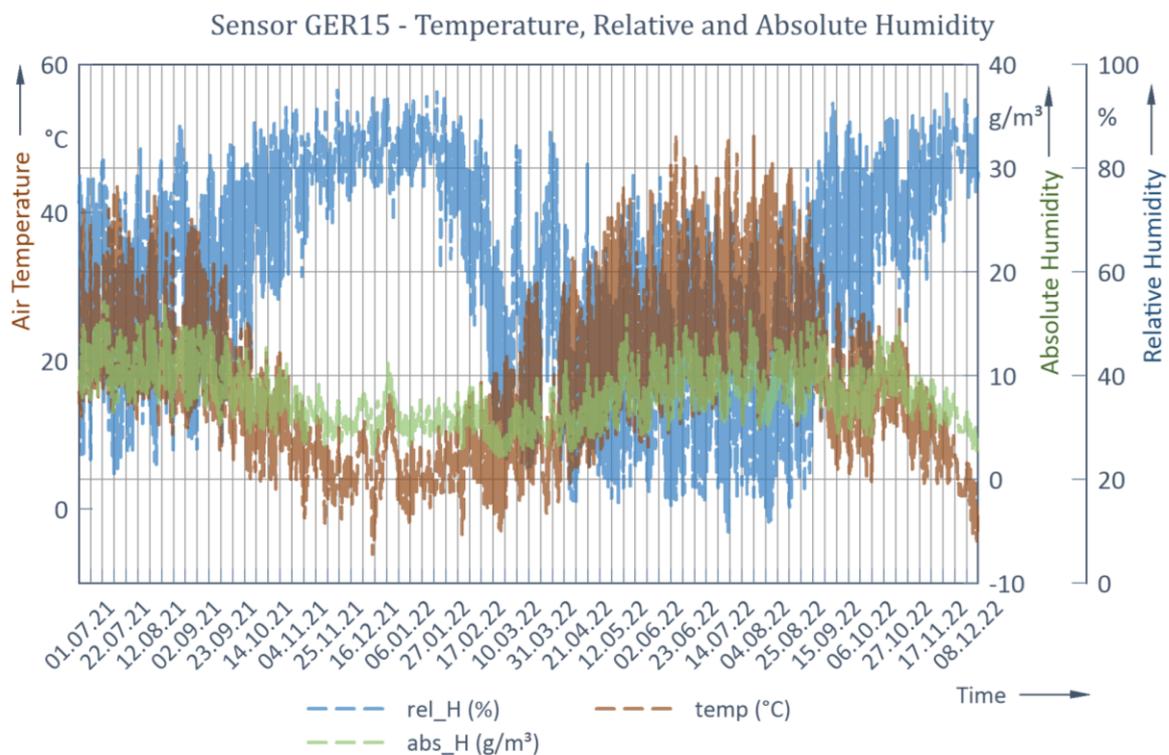


Abbildung 8-28: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger15

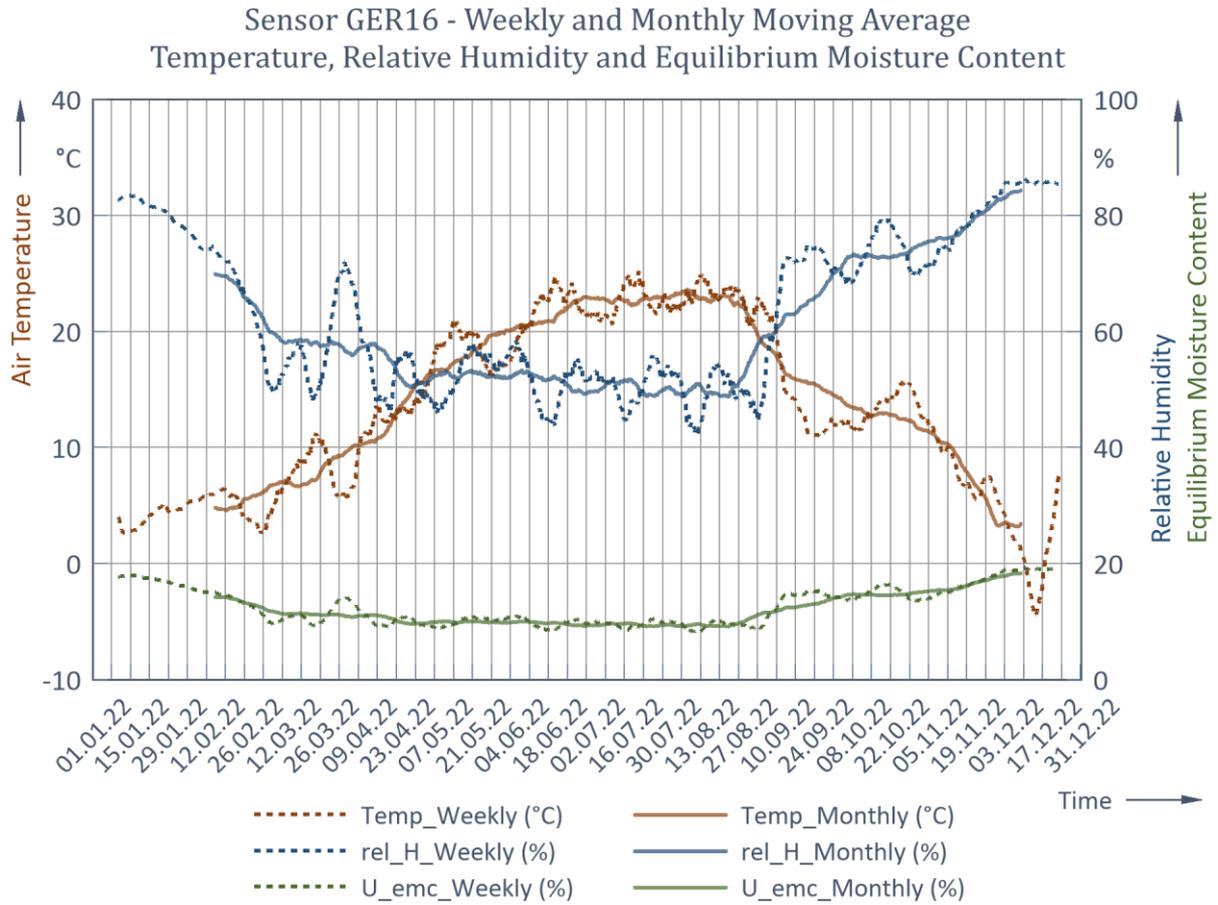


Abbildung 8-29: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger16

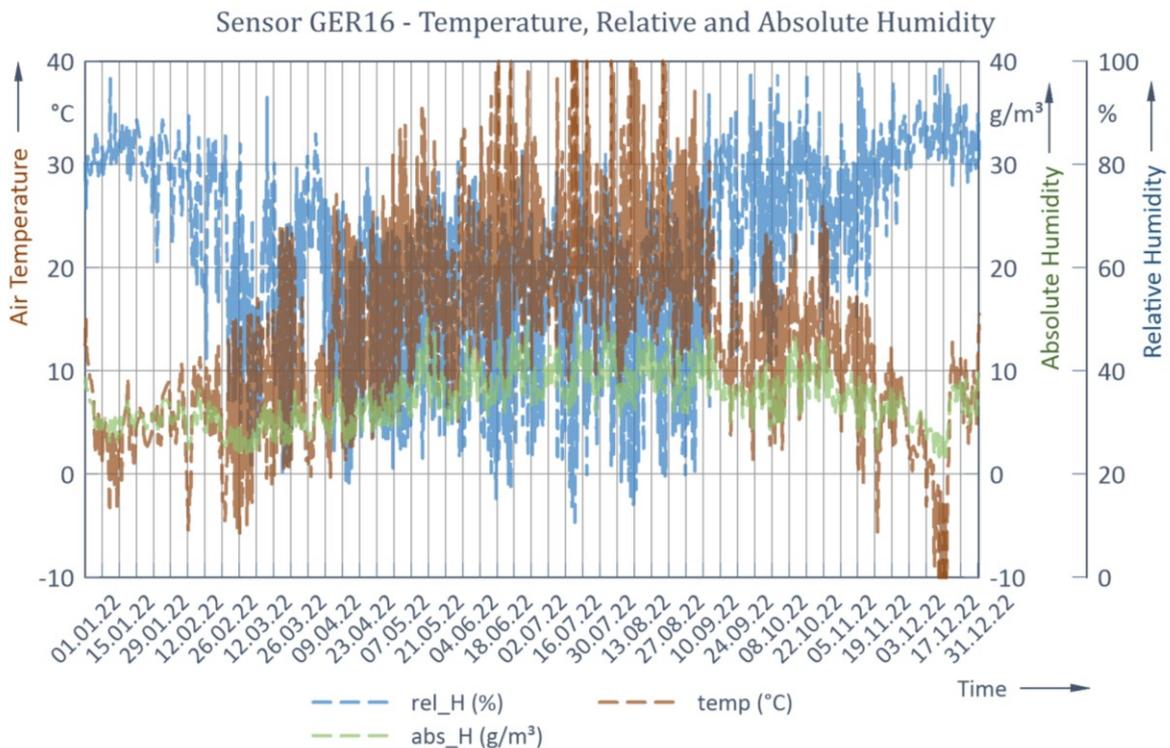


Abbildung 8-30: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger16

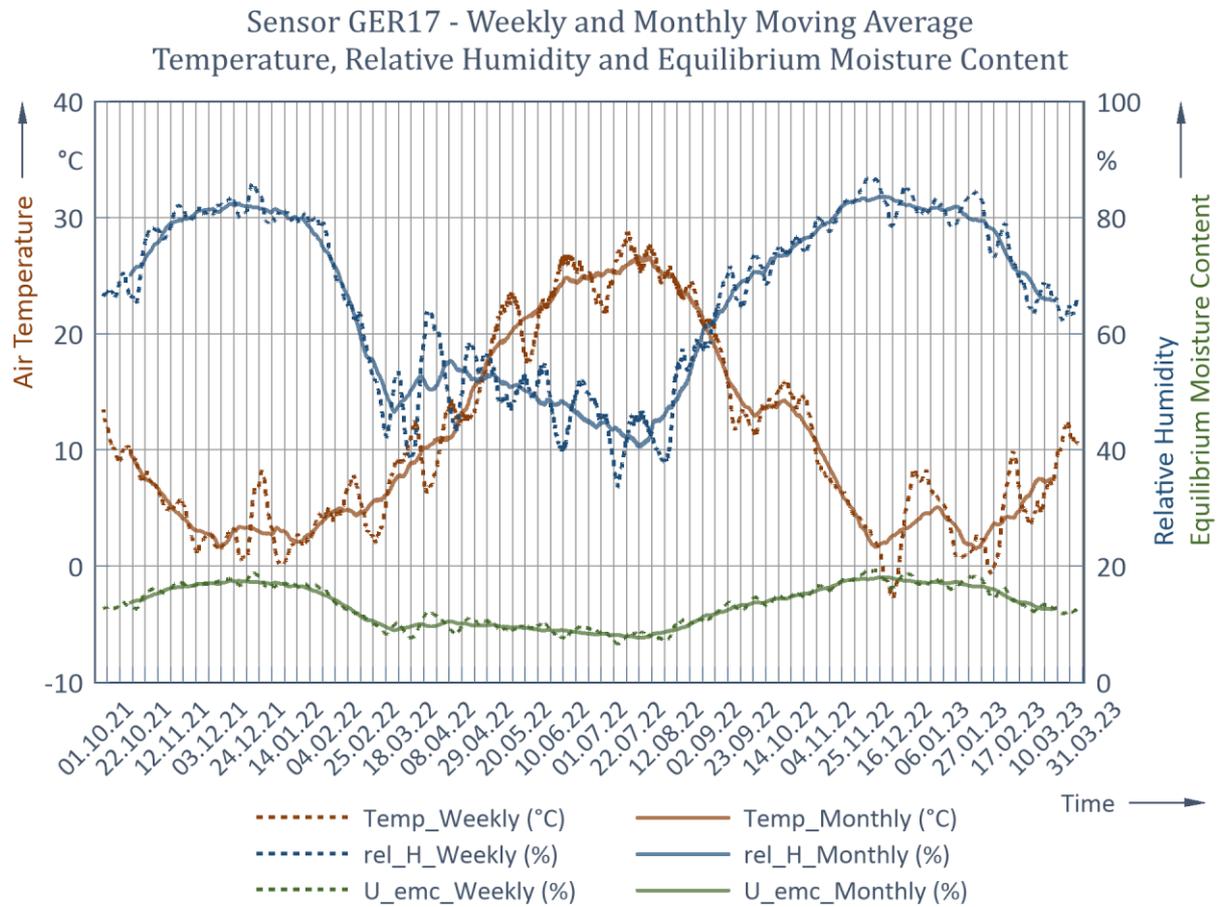


Abbildung 8-31: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger17

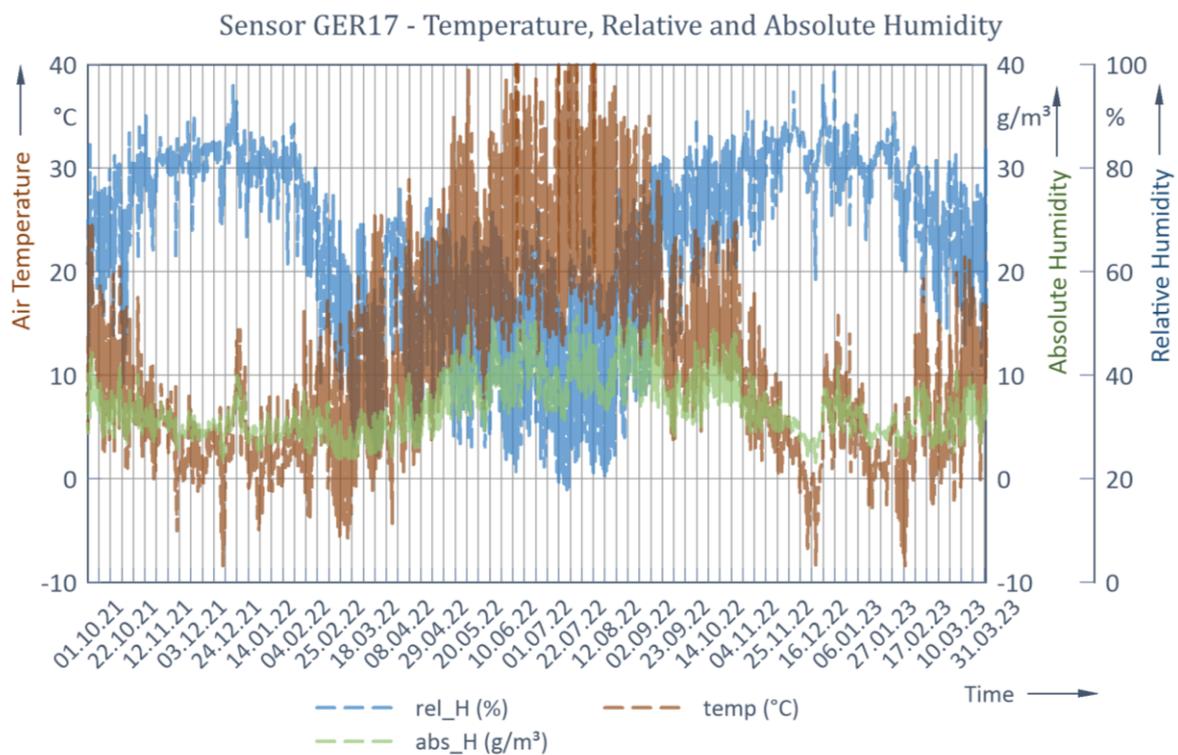


Abbildung 8-32: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger17

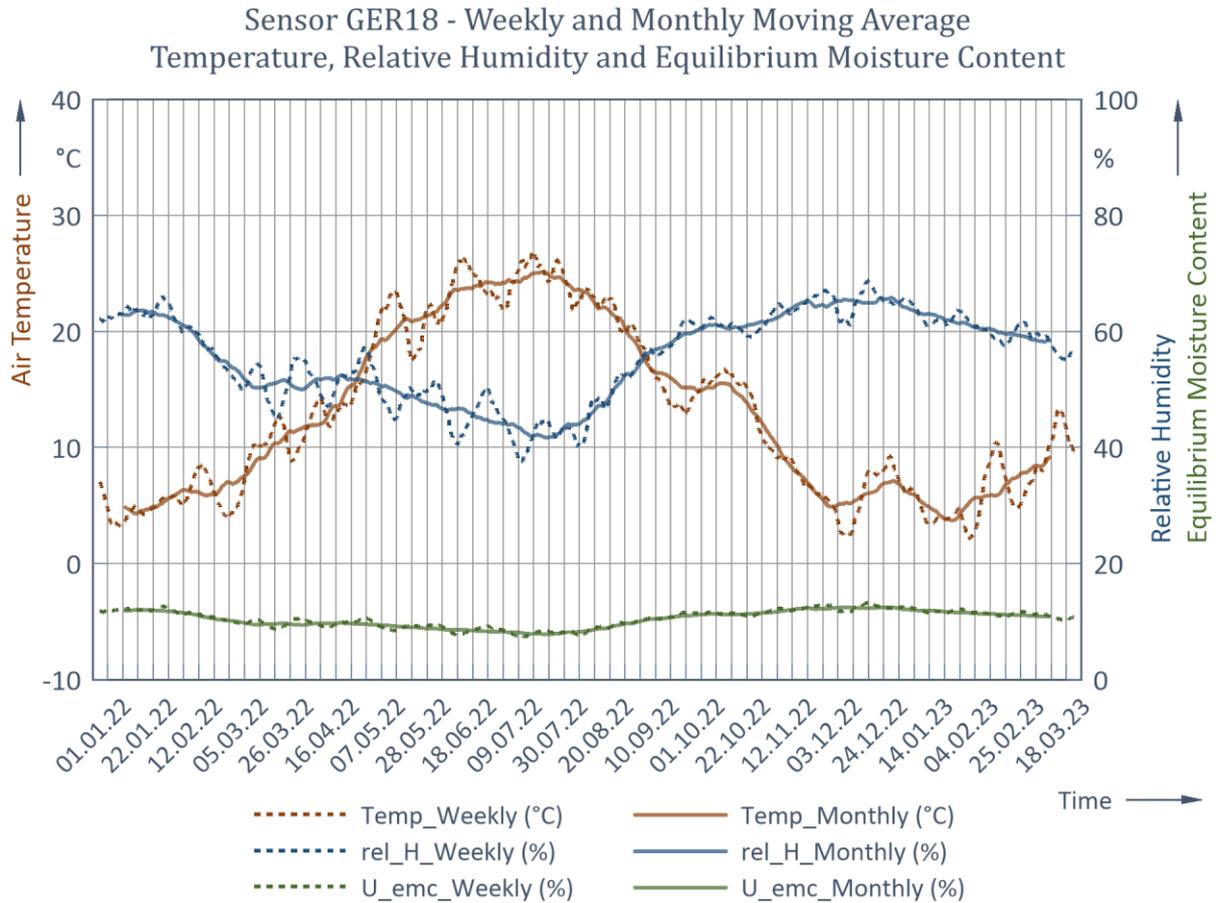


Abbildung 8-33: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger18

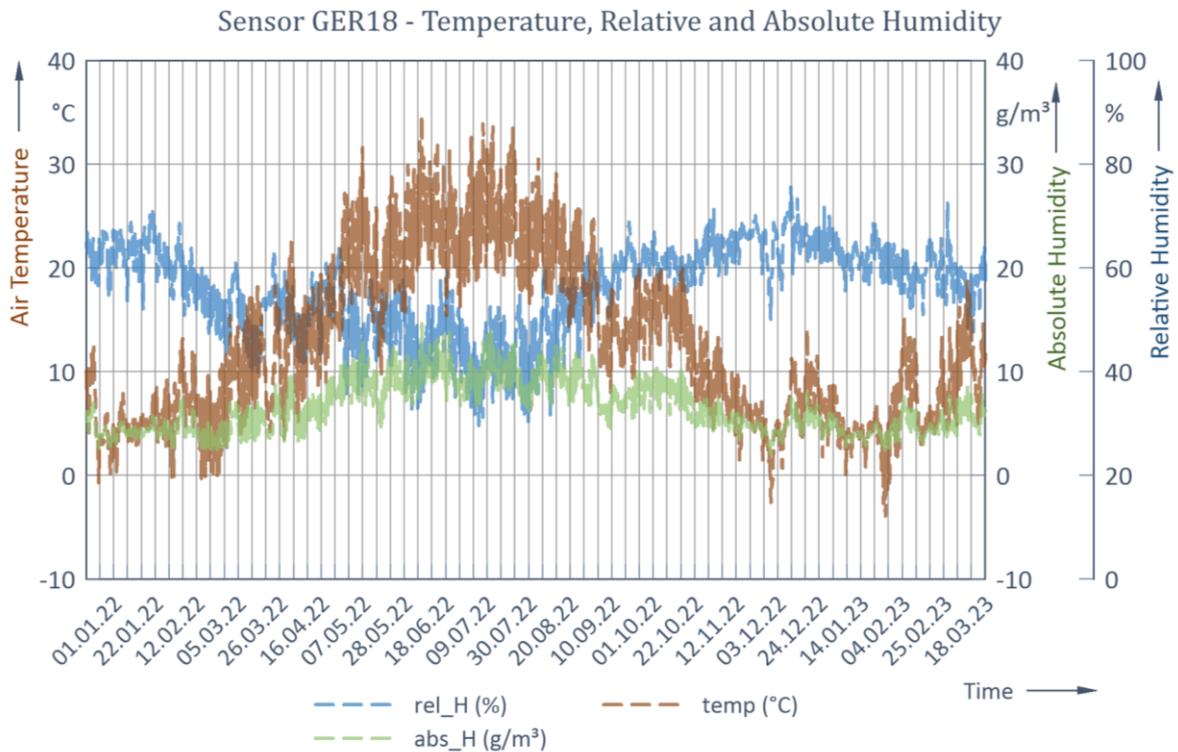


Abbildung 8-34: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger18

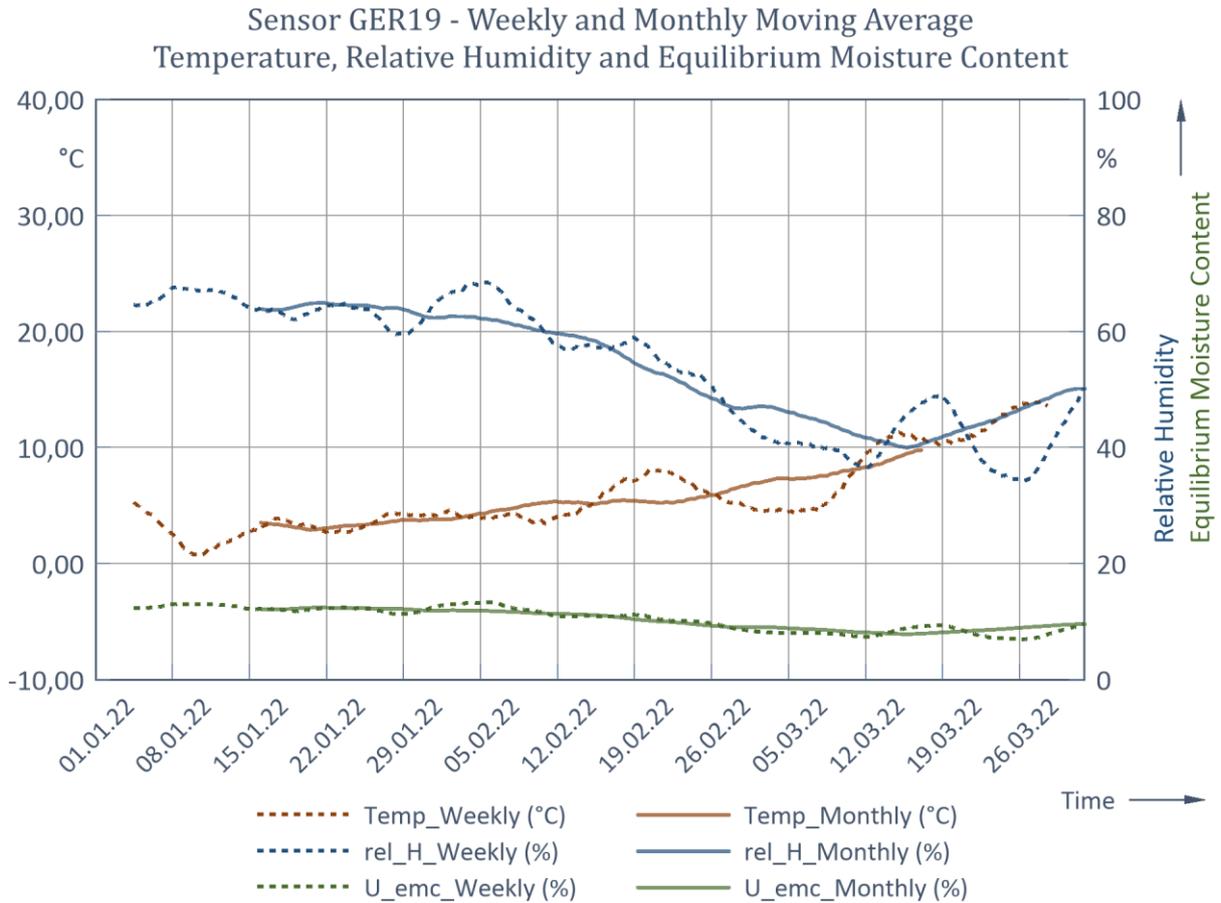


Abbildung 8-35: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger19

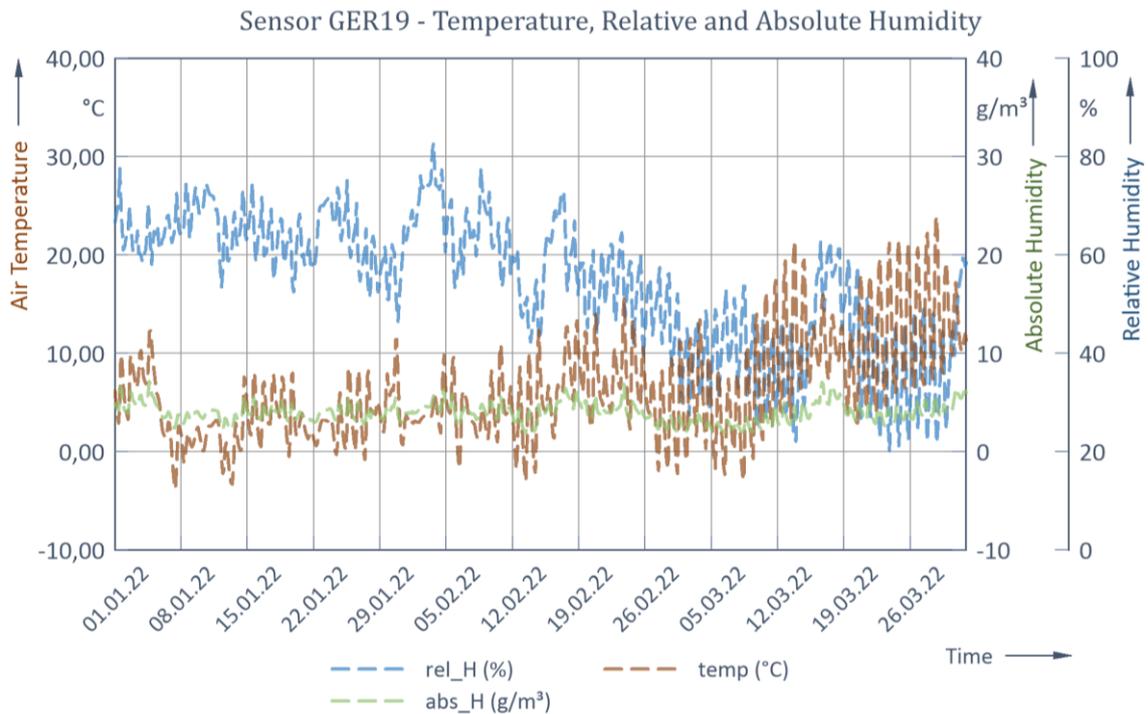


Abbildung 8-36: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger19

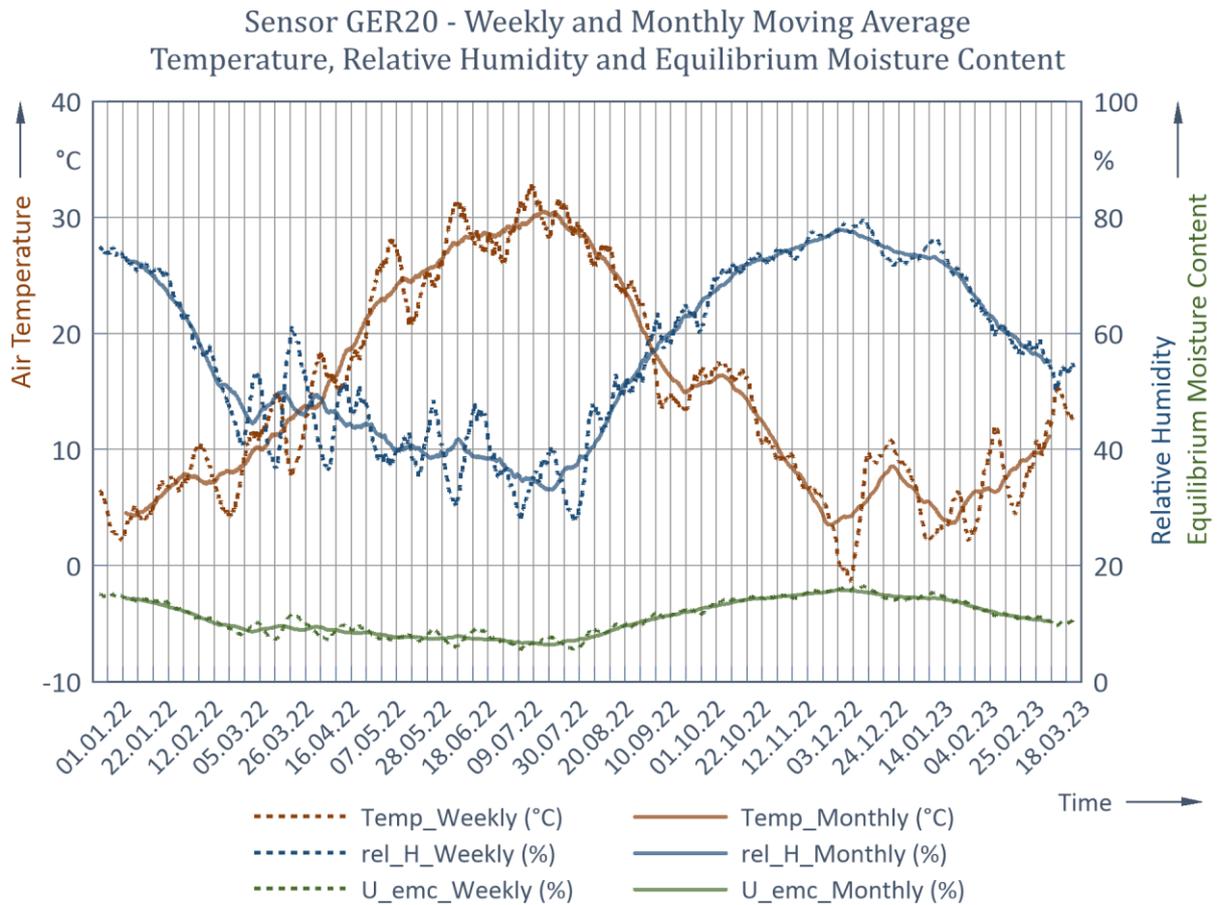


Abbildung 8-37: Daten über den gesamten Zeitraum für Ger20

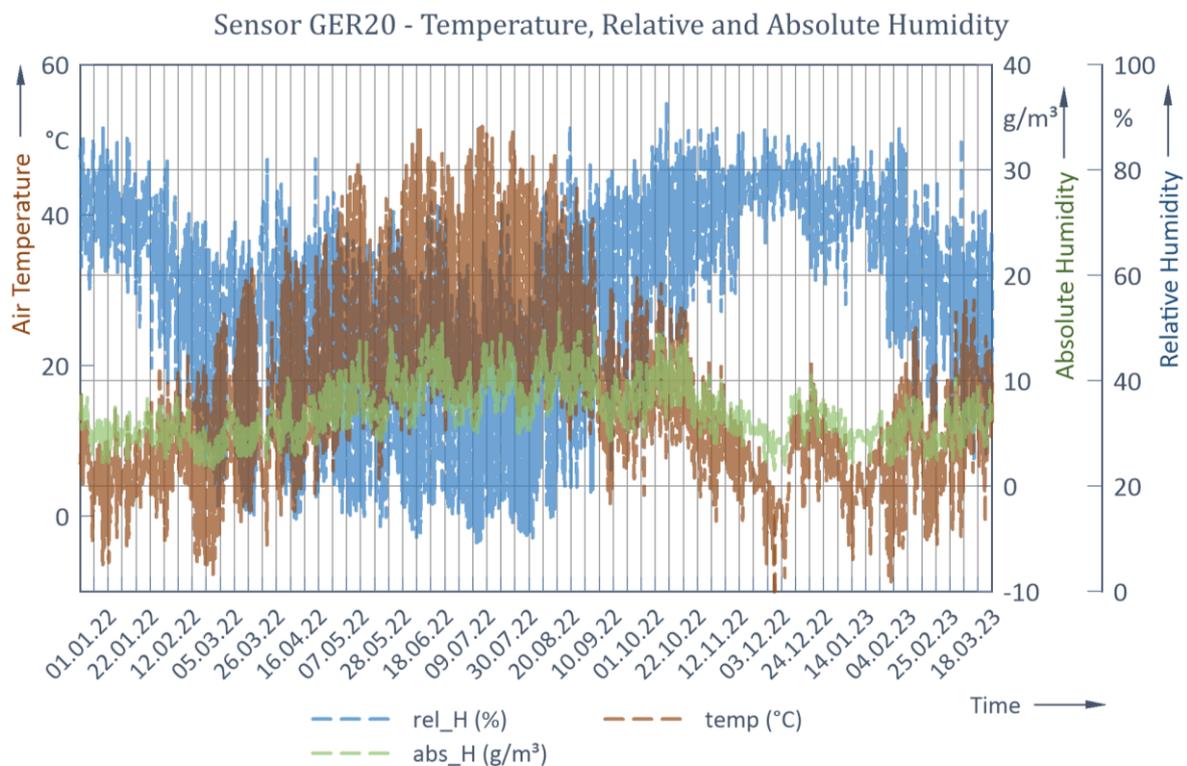


Abbildung 8-38: Berechnete absolute Feuchte, Temperatur und relative Feuchte für Ger20

8.2 Monitoring in Frankreich

In Frankreich wurden an vier verschiedenen Objekten insgesamt elf Sensoren installiert. Da Wetterdaten in diesem Land nicht verfügbar sind, wurden immer mindestens zwei Sensoren an jedem Standort installiert. Ein Sensor wurde im Außenbereich an einer Stelle, die nicht direkt der Witterung ausgesetzt war, montiert. Der andere Sensor wurde im Dachraum installiert. Alle Sensoren wurden in Dächern von Wohnhäusern installiert, sodass die Sensoren in Frankreich nur dieser Nutzungsart zugeordnet werden.

Darüber hinaus sind nur wenige Informationen zum Dachaufbau bekannt. Ob es Dächer in Nagelplattenbauweise sind, ist nicht bekannt.

Für die Sensordaten wurde der gleitende Mittelwert pro Monat berechnet. Die folgenden Abbildungen zeigt die Messdaten für alle vier Standorte in Frankreich; Temperatur, Luftfeuchte und berechnete Ausgleichsfeuchte (an der Holzoberfläche) im Dach sowie im Außenbereich. An jedem Standort werden die dort installierten Sensoren in einem Diagramm gemeinsam aufgeführt. Tabelle 8-1 gibt eine Übersicht der Auswertungszeiträume jedes Sensors.

Tabelle 8-1: Übersicht Auswertungszeitraum für die Sensoren in Frankreich

Standort	Sensor-Name	Zeitraum (Quartal) der Auswertung									
		04-2020	01-2021	02-2021	03-2021	04-2021	01-2022	02-2022	03-2022	04-2022	01-2023
Gilles	FRA01	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA02	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA03	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Amar	FRA04	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓
	FRA05	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA06	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
Yohann	FRA07	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA08	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ludo	FRA09	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA10	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FRA11	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Im Anschluss folgen Diagramme der Klimadaten sowie Tabellen der Extremwerte (Maximum und Minimum) sowie der Schwankung (Delta) von Minimum zu Maximum um des monatlich gleitenden Mittelwertes der Klimadaten im Untersuchungszeitraum.

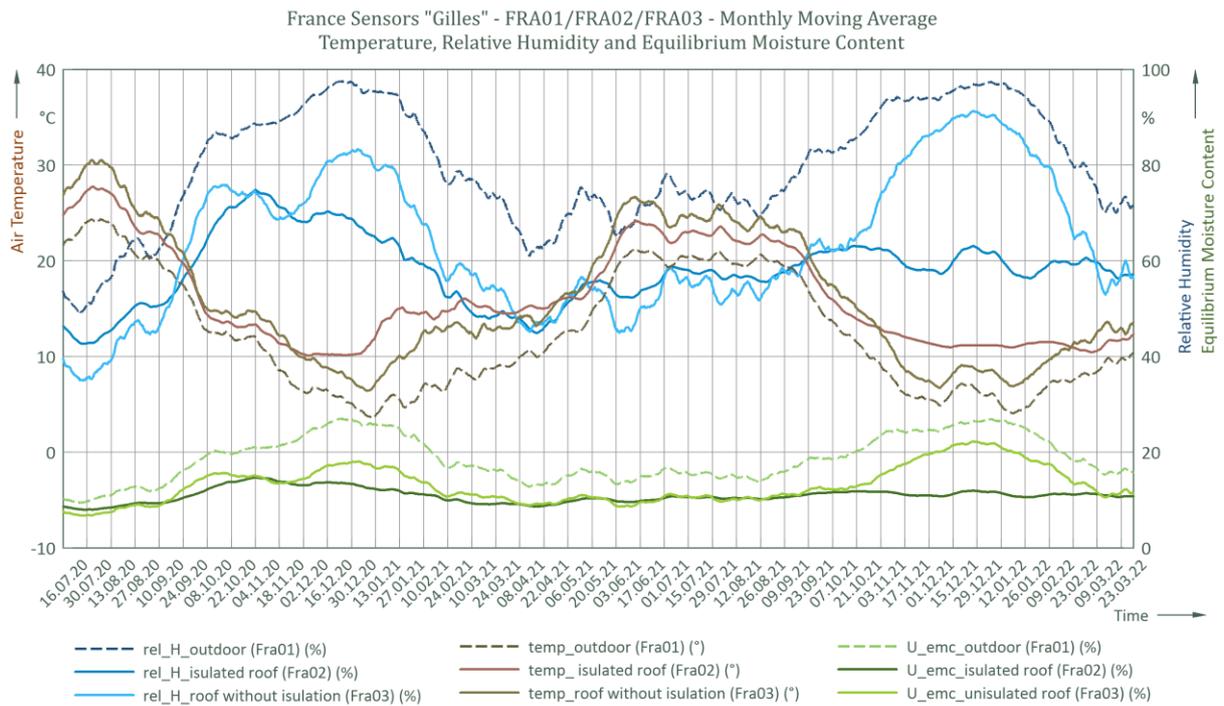


Abbildung 8-39: Vergleich Sensoren des Daches in Gilles: monatlich gleitende Mittelwerte

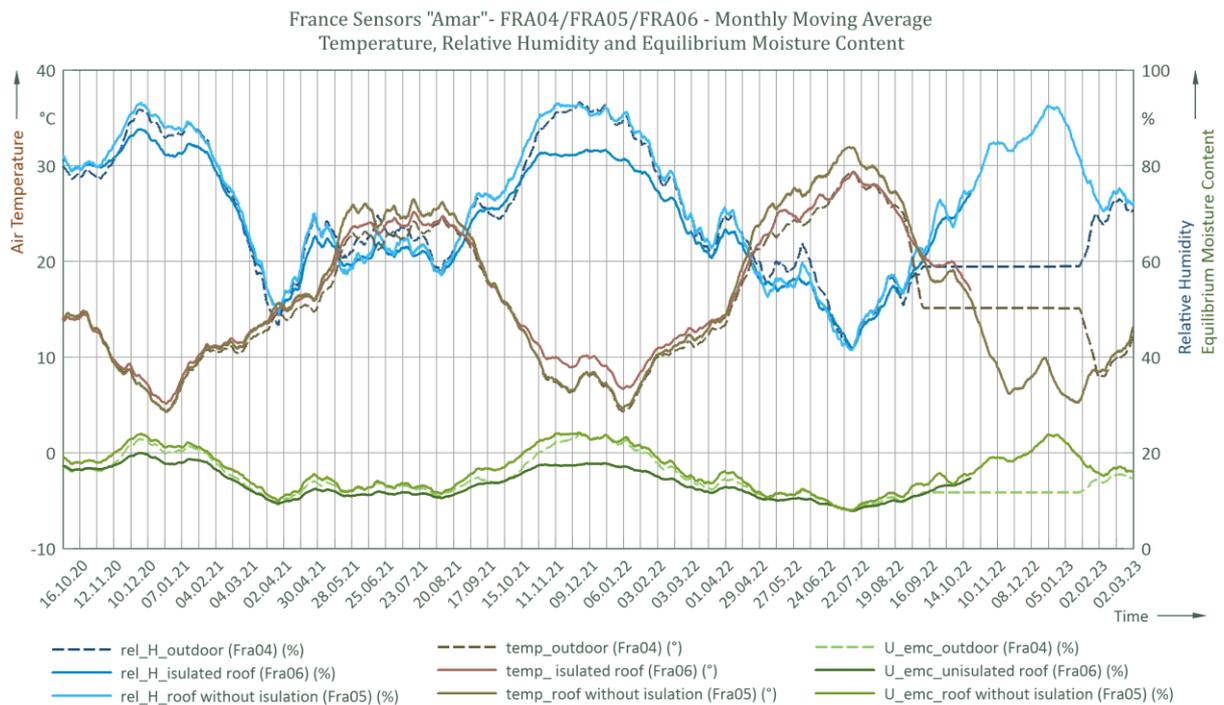


Abbildung 8-40: Vergleich Sensoren im Dach von Amar: monatlich gleitende Mittelwerte (Anmerkung: Da der Sensor Fra04 im vierten Quartal keine Werte sendet, befindet sich in dem Bereich eine horizontale Linie die aus den angrenzenden Werten extrapoliert wird)

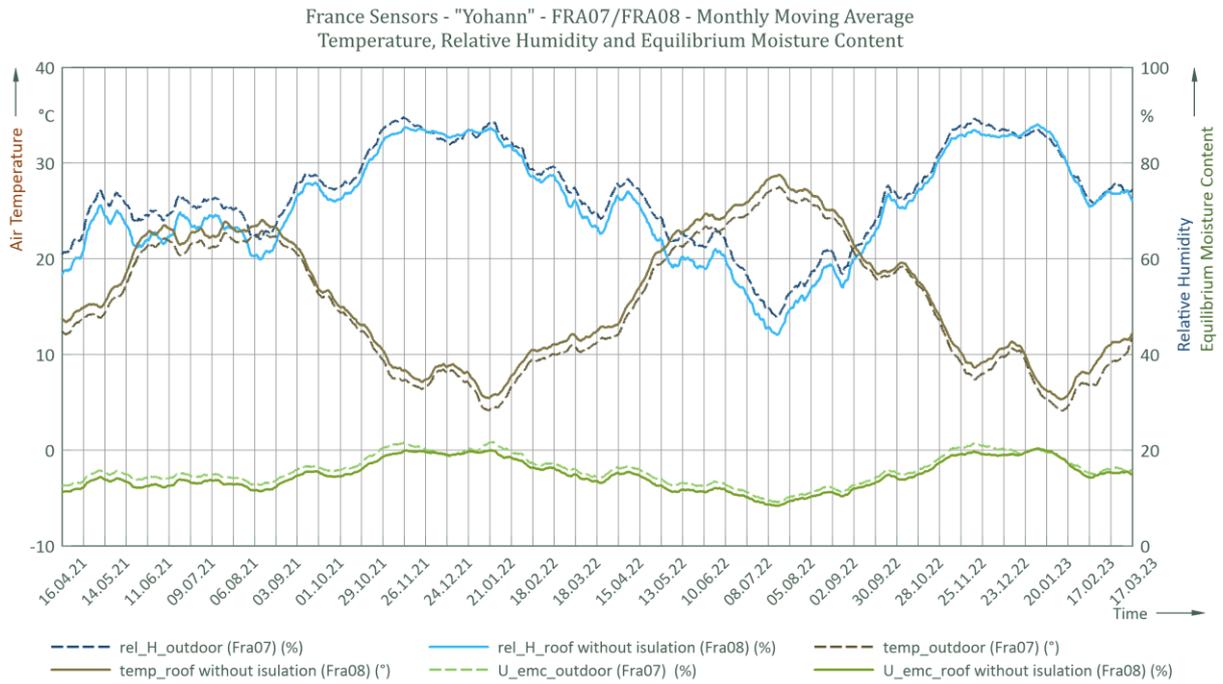


Abbildung 8-41: Vergleich Sensoren des Daches in Yohann: monatlich gleitende Mittelwerte

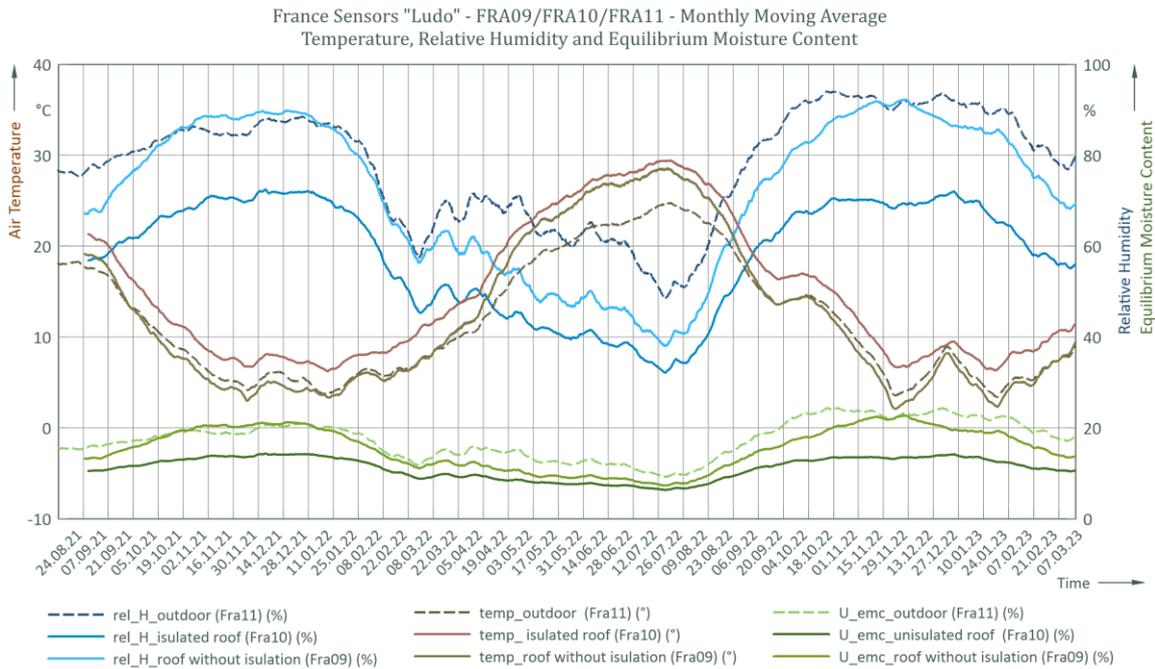


Abbildung 8-42: Vergleich Sensoren des Daches in Ludo: monatlich gleitende Mittelwerte

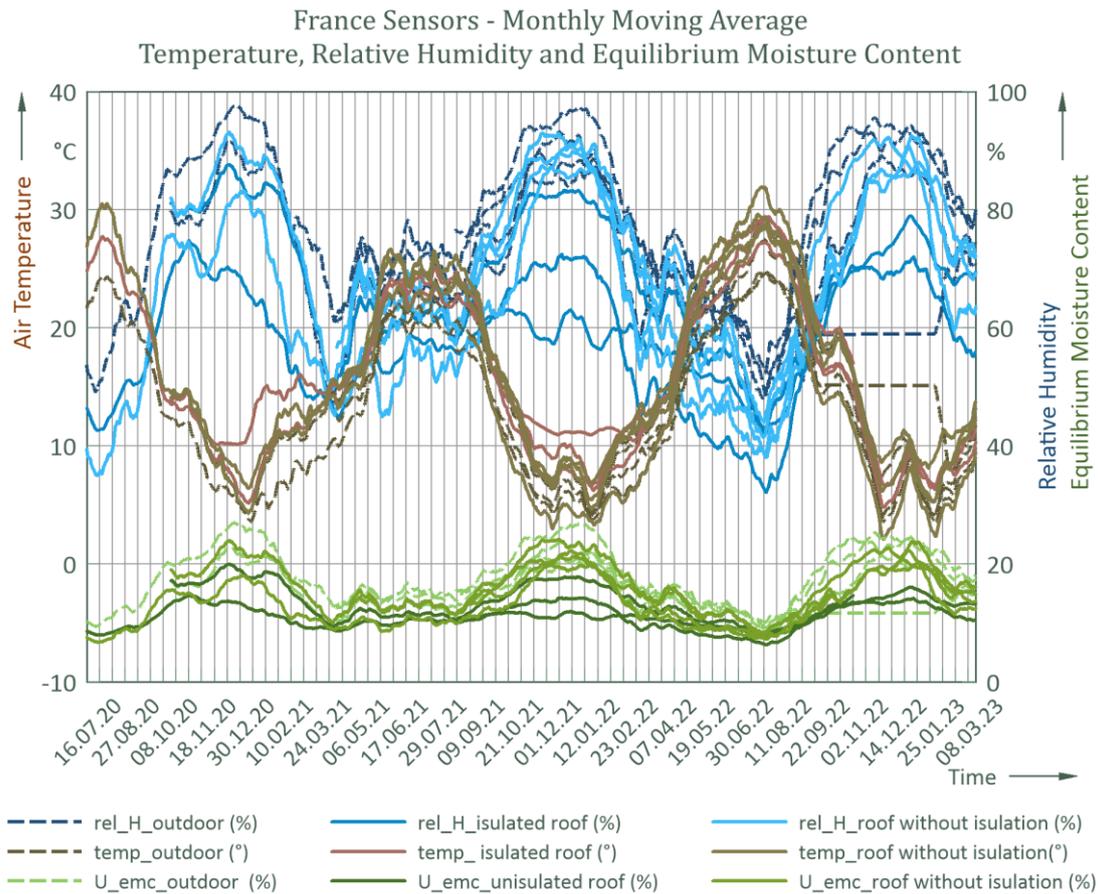


Abbildung 8-43: Vergleich der Sensordaten in Frankreich als monatlich gleitende Mittelwerte

Tabelle 8-2: Wohnhäuser mit gedämmten Dächern: Extremwerte (Max und Min) sowie Schwankungen (Delta) des monatlich gleitenden Mittelwerts im jeweiligen Untersuchungszeitraum

Sensor	Periode	Anzahl Monate	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Ber. Ausgleichsfeuchte ¹ [%]		
			Max	Min	Delta	Max	Min	Delta	Max	Min	Delta
FRA02	07/20 – 03/23	33	27,7	4,8	23,0	79,0	42,2	36,7	16,0	7,9	8,2
FRA06	10/20 – 03/23	30	29,4	5,1	24,3	87,6	41,8	45,9	19,9	7,8	12,1
FRA10	07/21 – 03/23	21	29,4	6,2	23,2	72,5	32,1	40,3	14,3	6,3	8,0

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche

Tabelle 8-3: Wohnhäuser mit ungedämmten Dächern: Extremwerte (Max und Min) sowie Schwankungen (Delta) des monatlich gleitenden Mittelwerts im jeweiligen Untersuchungszeitraum

Sensor	Periode	Anzahl Monate	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Ber. Ausgleichsfeuchte ¹ [%]		
			Max	Min	Delta	Max	Min	Delta	Max	Min	Delta
FRA03	07/20 – 03/23	33	30,5	6,2	24,4	91,3	34,9	56,3	22,3	6,7	15,6
FRA05	10/20 – 03/23	30	31,9	4,3	27,6	93,2	41,4	51,8	24,2	8,0	16,2
FRA08	03/21 – 03/23	24	28,8	5,3	23,5	88,1	44,1	44,0	20,4	8,3	12,0
FRA09	07/21 – 03/23	21	28,6	2,1	26,5	92,2	38,0	54,2	22,7	7,3	15,4

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche

8.3 Monitoring in Finnland

In Finnland wurden Sensoren in zwei Dächern installiert. Derzeit sind keine Angaben zu der Dachkonstruktion und des Dachaufbaus bekannt.

Im Anschluss folgen Diagramme der Klimadaten sowie eine Tabelle der Extremwerte (Maximum und Minimum) sowie der Schwankung (Delta) von Minimum zu Maximum um des monatlich gleitenden Mittelwertes der Klimadaten im Untersuchungszeitraum.

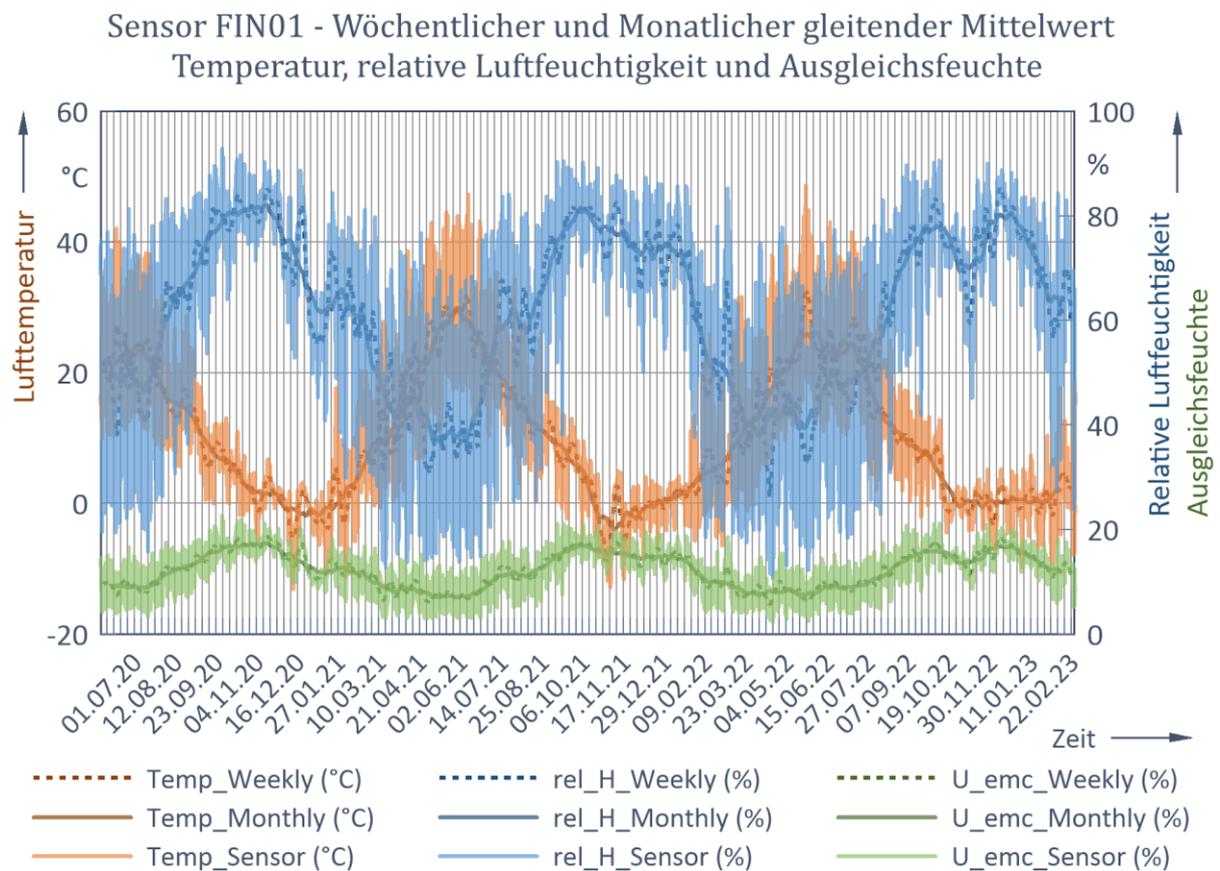


Abbildung 8-44: Sensoren in FIN 01: Sensordaten, wöchentlich und monatlich gleitender Mittelwert

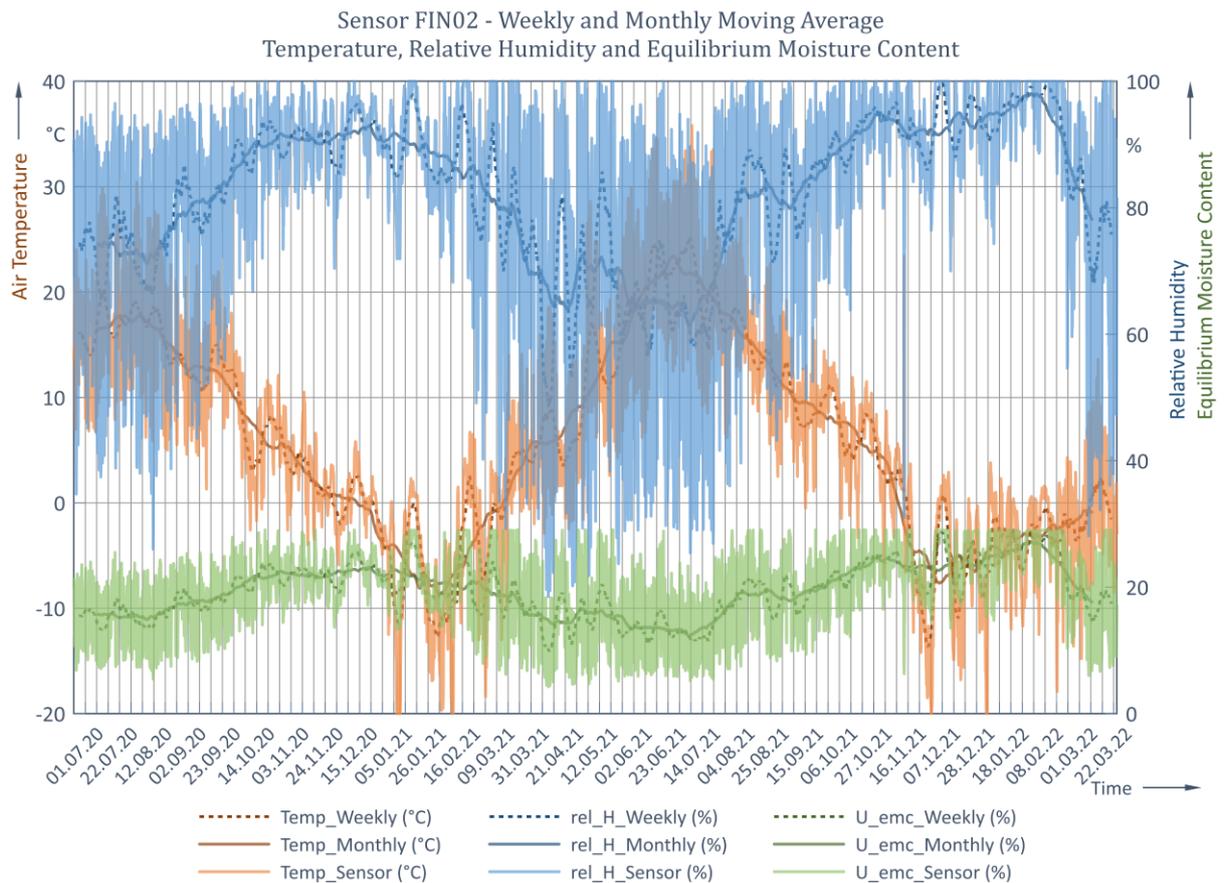


Abbildung 8-45: Sensoren in FIN 02: Sensordaten, wöchentlich und monatlich gleitender Mittelwert

Tabelle 8-4: Extremwerte (Max und Min) sowie Schwankungen (Delta) des monatlich gleitenden Mittelwerts im jeweiligen Untersuchungszeitraum der Sensoren in Finnland

Sensor	Periode	Anzahl Monate	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Ber. Ausgleichsfeuchte ¹ [%]		
			Max	Min	Delta	Max	Min	Delta	Max	Min	Delta
FIN01	07/20 – 03/23	33	30,0	-4,0	34,0	82,2	36,6	45,6	17,4	7,0	10,4
FIN02	07/20 - 03/22	21	23,4	-8,7	32,1	98,1	61,0	37,1	27,2	12,2	15,0

¹ berechnet nach Gleichung (1) an der Holzoberfläche