

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

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

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-021/2016

Energieoptimiertes Bauen: Klima- und Oberflächenübergangsbedingungen für die hygrothermische Bauteilsimulation Kurztitel: Klimamodelle

Durchgeführt im Auftrag vom Projektträger Jülich (PTJ UMW)

Der Bericht umfasst
410 Seiten Text
62 Tabellen
417 Bilder

Daniel Zirkelbach
Tobias Schöner
Eri Tanaka
Beate Stöckl
Philipp Kölsch
Eleonora Marra
Christian Schiessl
Thomas Schmidt
Timo Hevesi-Toth
Yasmin Flucke

Holzkirchen, 22. Juli 2016

Abteilungsleiter



Prof. Dr. H.M. Künzel

Gruppenleiter



Dipl.-Ing. D. Zirkelbach

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	6
2	Erstellung hygrothermischer Referenzjahre	7
2.1	Einführung	7
2.2	Voruntersuchungen und Stand der Technik	8
2.2.1	Überprüfung verfügbarer Klimadaten	8
2.2.2	Verwendete Klimadaten	9
2.2.3	Einfluss von Klimafaktoren	19
2.2.4	Einfluss von Klimaelementen auf den Wassergehalt von Bauteilen	24
2.2.5	Interaktion von Klimaelementen	26
2.2.6	Vorhandene zonale Einteilung der TRY	29
2.2.7	Typische Jahre	31
2.2.8	Folgerungen für die Erstellung der HRY	31
2.3	Erstellung hygrischer Referenzjahre (HRY)	36
2.3.1	Sensitive Konstruktionen zur Auswahl der HRY	36
2.3.2	Auswahl eines kritischen Jahres	37
2.3.3	Statistische Auswahl eines hygrischen Referenzjahres auf Monatsbasis	39
2.3.4	Überprüfung und Modifikation der Datensätze anhand des hygrothermischen Bauteilverhaltens	44
2.4	Zonale Einteilung der HRY	50
2.4.1	Zone 1	56
2.4.2	Zone 2	62
2.4.3	Zone 3	66
2.4.4	Zone 4	71
2.4.5	Zonale Einteilung der HRY	73
2.5	Erstellung kalter HRY nach EN 15026	74
2.5.1	Erstellung der kalten HRY	77
2.5.2	Kombination kalter HRY und HRY	84
2.6	Zusammenfassung	89
2.7	Abgrenzung	90
3	Lokalklimamodell	93
3.1	Einleitung	93
3.2	Stand der Forschung	96
3.2.1	Verfügbare Lokalklimaanpassungsmodelle	96
3.2.2	Einflussfaktoren auf die lokalen Klimaverhältnisse	98
3.2.3	Klimasimulationsmodelle	103
3.2.4	Konsequenzen für die Entwicklung der Lokalklimamodelle	105
3.3	Eigene Lokalklimamessungen in der Umgebung des Fraunhofer	106

3.3.1	Eingesetzte Messtechnik	110
3.3.2	Vergleich der Messdaten mit der neutralen Referenzstation	111
3.4	Voruntersuchungen zur quantitativen Erfassung der Lokalklimadifferenzen ohne Modellbildung	116
3.4.1	Vergleich des Lokalklimas von exemplarischen Standortpaaren	117
3.4.2	Einfluss der Flächennutzung	127
3.5	Erstellung der Lokalklimamodelle	138
3.5.1	Lagekategorien	138
3.5.2	Höhenkorrektur	139
3.5.3	Anpassungsmethode von Wind und Regen	144
3.5.4	Lokalklimakorrekturen für die übrigen Klimaelemente	150
3.5.5	Zusammenstellung der Lokalanpassungsmethode für einzelnen Klimaelement	173
3.6	Validierung	175
3.6.1	Hygrothermischen Bauteilsimulationen mit lokalangepassten Klimadaten	175
3.6.2	Effektivität der Lokalklimamodelle	181
3.6.3	Überprüfung anhand der Messdaten in der Umgebung des IBP	184
3.7	Softwaretechnische Umsetzung im Lokalklimagenerator	192
3.8	Zusammenfassung, Anwendungsgrenzen und Ausblick	194
4	Nebenraumklima	196
4.1	Unbeheizte Dachräume	197
4.1.1	Raumklimamessungen in Dachräumen und theoretische Grundlagen	198
4.1.2	Modellansatz	201
4.1.3	Validierung des Modells durch Vergleich der simulierten Feuchteverhältnisse in einer Dachkonstruktion	207
4.1.4	Ausblick	213
4.1.5	Zusammenfassung Dachraumklimamodell	215
4.2	Unbeheizte Kellerräume	215
4.2.1	Raumklimamessungen in Kellerräumen	216
4.2.2	Modellansätze und Validierung	221
4.2.3	Zusammenfassung	250
4.3	Anliegertiefgaragen	251
4.3.1	Raumklimamessungen in Anliegertiefgaragen	252
4.3.2	Rechnerische Identifikation der Einflussfaktoren auf das Raumklima in Tiefgaragen	259
4.3.3	Empirischer Modellansatz für Anliegertiefgaragen auf Basis von Messdaten	261
4.3.4	Zusammenfassung, Anwendungsbereiche und Grenzen des Modells	302
4.4	Kriechkeller	303
4.5	Treppenhäuser	320

5	Oberflächenübergang	323
5.1	Hinterlüftete Steildächer	323
5.1.1	Einführung und Beschreibung der betrachteten Konstruktionen	323
5.1.2	Freilanduntersuchungen	324
5.1.3	Ermittlung der Übergangsparameter	331
5.1.4	Modellentwicklung zur vereinfachten Betrachtung in der Simulation	332
5.1.5	Zusammenfassung	335
5.2	Effektive Auswirkungen von Deckschichten auf Flachdächern	335
5.2.1	Berücksichtigung einer Kiesschicht	335
5.2.2	Vereinfachte Berücksichtigung einer Dachbegrünung	340
5.3	Bestimmung der Variation von Oberflächenübergangskoeffizienten auf Fassaden	343
5.3.1	Zusammenfassung	349
5.4	Identifikation von Positionen mit kritischer Windexposition	350
5.4.1	Zusammenfassung	354
5.5	Zweidimensionalen Wärmebrücken an Wandecken in der ein- und zweidimensionalen hygrothermische Simulation	354
5.5.1	Problemstellung und Ziel	354
5.5.2	Literaturrecherche	356
5.5.3	Freilandversuche	365
5.5.4	Abbildung von zweidimensionalen Wärmebrücken in einer eindimensionalen hygrothermischen Simulation	373
5.5.5	Durchgeführte Simulationen	373
5.5.6	Ergebnisse nicht gedämmte Massivwände	378
5.5.7	Ergebnisse gedämmte Massivwände	379
5.5.8	Ergebnisse Leichtbauwände	380
5.5.9	Zusammenfassung und Anwendungsbereich	383
5.6	Effektive Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen	385
5.6.1	Beurteilungsmöglichkeiten von Tauwasser- und Schimmelpilzrisiko im Laibungsbereich	385
5.6.2	Durchgeführte Untersuchungen	386
5.6.3	Ergebnisse	395
5.6.4	Diskussion und Schlussfolgerung	399
5.6.5	Zusammenfassung	400
6	Zusammenfassung	401
7	Abschlussarbeiten	402
8	Literaturverzeichnis	404
A.1	Abkürzungsverzeichnis	411

1 Einleitung und Problemstellung

Die notwendige Reduzierung des CO₂-Ausstoßes im Rahmen eines nachhaltigen Umwelt- und Klimaschutzes sowie der verantwortungsvolle Umgang mit knapper werdenden Energieressourcen machen eine weitere energetische Optimierung von Gebäuden unumgänglich. Dazu muss bei mitteleuropäischen Klimaverhältnissen vor allem die Dämmung der Gebäudehülle verbessert und eine gezielte Belüftung möglichst unter Ausschluss von unkontrollierten Nebenwegen erreicht werden. Mit dem geringeren Infiltrationsluftwechsel steigt die Feuchtelast in Innenräumen und kann in ungünstigen Fällen zu erhöhten Oberflächenfeuchten und Schimmelpilzbildung oder bei Planungs- oder Ausführungsfehlern zu Feuchteansammlungen innerhalb der Konstruktion führen. Die steigende Wärmeleitfähigkeit der feuchten Materialien kann dann wiederum unerwünschte Wärmeverluste verursachen – ein Problem, das beispielsweise auch ohne Fehlstellen in der Konstruktion sowohl bei Dachkonstruktionen (z.B. durch die Migration eingebauter Feuchte) als auch bei der nachträglichen Dämmung von innen auftreten kann.

Auf der Außenoberfläche resultiert die niedrigere Temperatur der gedämmten Bauteile in längeren Betauungszeiten und einem größeren Risiko von mikrobiellem Bewuchs. Die heute noch sehr häufige Bekämpfung dieses Bewuchses mit Bioziden ist aus ökologischer Sicht u.a. wegen der Anreicherung der Substanzen in Boden und Abwasser als kritisch zu bewerten – in der neuen Gefahrstoffverordnung der EU wird deren Anwendung weiter eingeschränkt.

Aufgrund der oben genannten Risiken kommt einer sorgfältigen Planung von Sanierungsmaßnahmen unter Einbeziehung des Feuchteschutzes eine erhöhte Bedeutung zu. Da mit den langsam zurückgehenden aber immer noch üblichen stationären Diffusionsberechnungsverfahren weder die Feuchteinflüsse auf die Wärmedämmwirkung noch die meisten Schadensursachen erfasst werden können, kommen immer häufiger umfassende computerbasierte Simulationen der Wärme- und Feuchteverhältnisse in Konstruktionen zum Einsatz. Die Anwendung solcher Simulationen wird u.a. durch die europäische Norm DIN EN 15026 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation“ vom Juli 2007 geregelt.

Die Ergebnisse der modernen Simulationsverfahren haben sich als sehr zuverlässig erwiesen; in der Regel ist eine relativ genaue Vorhersage der durch eine energetische Sanierung geänderten Temperatur- und Feuchteverhältnisse in der Konstruktion und im Raum möglich. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die erforderlichen Eingabeparameter hinreichend genau vorliegen.

Für das Außenklima wurden bisher meist die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes herangezogen, die allerdings ein v.a. aufgrund von thermischen Aspekten mittleres Klima einer Region repräsentieren und damit aus hygrothermischer Sicht keine kritische Belastung darstellen. Zudem enthalten die Datensätze keine Niederschlagsdaten. Lokale Unterschiede aufgrund verschie-

dener Ortshöhen, die Lage an einem Gewässer oder mitten in einer Ortschaft blieben bei einer solchen Betrachtung meist unberücksichtigt, obwohl sie bekanntermaßen in vielen Fällen von maßgeblicher Bedeutung wären. Ebenfalls nur unzureichend differenziert werden konnten bisher gebäudespezifische Besonderheiten wie Schlagregenexposition, Einfluss von Eindeckungen usw. Auf der Innenseite waren vor allem die Raumklimaverhältnisse in nur temporär genutzten Gebäuden oder unbeheizten Nebenräumen weitgehend unbekannt.

Wenn Gebäude mit aktuellem Dämmstandard und eigentlich sorgfältiger Planung trotzdem erhöhte Transmissionswärmeverluste oder Feuchteschäden aufweisen, ist bei der nachträglichen Analyse meist eine der folgenden zwei Ursachen feststellbar: eine mangelhafte handwerkliche Ausführung oder eine unzureichende Berücksichtigung der spezifischen klimatischen Randbedingungen. Besonders die Sorge vor Algen und Schimmel, vermeintlich aufgrund von zuviel Dämmung oder zu luftdichter Bauweise, lässt dabei manchen Eigentümer vor eigentlich sinnvollen Sanierungsmaßnahmen zurückschrecken.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten zahlreiche Untersuchungen durchgeführt und bisher noch bestehende Lücken bei den Randbedingungen für die Simulationsverfahren geschlossen werden.

Da die Themenbereiche teilweise nur wenige Überschneidungen aufweisen, sind die einzelnen Kapitel sowohl bezüglich des bisherigen Stands der Forschung als auch bezüglich der Ergebnisse weitgehend getrennt voneinander dargestellt.

2 Erstellung hygrothermischer Referenzjahre

2.1 Einführung

Durch die zunehmende Bedeutung von hygrothermischen Simulationen für die Auslegung und Beurteilung von Baukonstruktionen steigt auch der Bedarf an geeigneten Außenklimadaten. Diese Klimadaten sollen für die Anwendung in der Simulation kritisch repräsentativ sein. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse, im Sinne einer hygrothermischen Bewertung typisch, aber tendenziell leicht kritischer sein sollten als eine Simulation mit realen langjährigen Klimadaten.

Im WTA-Merkblatt 6-1 [1] aus dem Jahr 2001 wurden in Anbetracht der wenigen frei verfügbaren Außenklimadaten noch vereinfacht Sinuskurven für Außenlufttemperatur und die relative Luftfeuchte vorgeschlagen. Hintergrund war, dass die alten 1986er-Testreferenzjahre des DWD damals noch kostenpflichtig waren und einzeln zu vergleichsweise hohen Kosten (etwa 500 Euro) erworben werden mussten. Dies kam für viele Planer somit nicht in Frage. Die Erstellung neuer Testreferenzjahre für ganz Deutschland, also auch für die neuen Bundesländer, zog sich nach der Wiedervereinigung noch bis zum Jahr 2004 hin. Die teilweise bemängelte künstliche Verteilung der Niederschlagsdaten in den 1986er Testreferenzjahre (TRY) führte dazu, dass der DWD bei den 2004er-

Datensätzen die Regendaten gar nicht mehr mitlieferte. Diese werden für thermische Simulationen nicht benötigt und hygrothermische Bauteilbeurteilungen mit den Regen beinhaltenden alten TRY stellen aus Sicht des DWD explizit eine „Zweckentfremdung“ der Daten dar.

Abgesehen vom Fehlen der Niederschlagsdaten war fraglich, ob die für thermische Bemessungen ausgelegten Datensätze für hygrothermische Belange überhaupt geeignet und repräsentativ sind. Seitens des Fraunhofer-IBP wurden daher seinerzeit repräsentative Daten für den Standort Holzkirchen zur Verfügung gestellt. Holzkirchen galt aufgrund seiner Lage als kritisch repräsentativ für die meisten dichter besiedelten Regionen in Deutschland. Nur ein Klimadatenatz für ganz Deutschland erscheint aber für viele Anwendungsbereiche als unzureichend – insbesondere wenn bei der Sanierung von Bestandsgebäuden keine großen Sicherheitsreserven eingeräumt werden können. Ein typisches Beispiel sind nachträglich von innen gedämmte Bauteile, bei denen keine Verbesserung des Schlagregenschutzes möglich ist. Eine Bemessung mit dem Holzkirchener Klimadatenatz führt aufgrund der extremen Schlagregenbelastung schnell zum Versagen, während ein solches Bauteil in vielen schlagregenärmeren Regionen gut funktioniert. Auch bezüglich der Solarstrahlungsmengen und der daraus resultierenden Erwärmung von Dachbauteilen ist Holzkirchen nicht kritisch repräsentativ – hier gibt es viele Standorte mit deutlich geringeren Strahlungsgewinnen, die infolgedessen ungünstiger Abschneiden als Holzkirchen.

2.2 Voruntersuchungen und Stand der Technik

Die nachfolgenden Kapitel geben einen Überblick über verfügbare Klimadaten und die klimatische Einteilung von Deutschland. Sie stellen Vorüberlegungen für die Erstellung der hygrischen Referenzjahre (HRY) in Kapitel 2.3 dar.

2.2.1 Überprüfung verfügbarer Klimadaten

Die im Rahmen des Projektes entstandene Bachelorarbeit „Einfluss von Klimadaten verschiedener Quellen auf die hygrothermische Beurteilung von Bauteilen“ [2] beschäftigt sich mit der Überprüfung von frei verfügbaren Klimadaten. Diese Wetterdaten werden z.B. von Universitäten oder privaten Wetterstationen erfasst häufig aber nicht auf Ihre Konsistenz geprüft. Daher war es notwendig zu untersuchen ob derartige Datensätze eine hinreichende Genauigkeit aufweisen, um aus ihnen Referenzdatensätze zu erstellen. Dabei zeigte sich, dass es schwer ist, flächendeckend Wetterdatensätze zu erhalten die alle notwendigen Klimaelemente enthalten. Als Klimaelemente werden „mess- und beobachtbare Elemente des Wetters bezeichnet, die zur Beschreibung des Klimas herangezogen werden“ [3]. Dies können z.B. die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Globalstrahlung oder der Niederschlag sein. Vor allem der Niederschlag fehlte in den in [2] untersuchten Daten häufig. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass zwar manche Klimaelemente, wie die Temperatur meist mit großer Genauigkeit bestimmt werden, andere diskontinuierliche Messgrößen wie der Regen oder die Windrichtung dagegen häufig ungenau bis falsch erfasst werden. Dabei ist diskontinuierlich, in diesem Zusammenhang, nicht als

zeitliche Unterbrechung zu verstehen, sondern bezeichnet Klimaelemente die, wie z.B. der Wind nicht ständig auftreten. Generell war die Qualität der Temperaturmessdaten am besten, während der Niederschlag und die Windgeschwindigkeit am häufigsten fehlten oder unplausibel waren [2]. Darüber hinaus war es schwierig die benötigten Klimadaten flächendeckend zusammenzustellen. Neben den frei verfügbaren Wetterdaten existieren auch einige kommerzielle Anbieter, deren Datenqualität tendenziell deutlich besser ist.

2.2.2 Verwendete Klimadaten

Die im Rahmen dieses Projektes verwendeten Klimadaten der Meteomedia AG enthalten die in Tabelle 1 aufgeführten Klimaelemente.

Tabelle 1:
Klimaelemente der Meteomedia-Daten.

Klimagröße	Einheit
Windrichtung	°
Windgeschwindigkeit	m/s
Lufttemperatur	°C
Taupunkttemperatur	°C
Temperatur 5cm über dem Grund	°C
rel. Luftfeuchte	%
Normalregen	mm
Globalstrahlung	W/m ²

Die Globalstrahlung beruht dabei auf Satellitendaten und wird für die betrachteten Standorte erst ab dem Jahr 2003 zur Verfügung gestellt. Dies bedeutet, dass für die nachfolgende Erstellung der Referenzjahre anstelle der ursprünglich vorgesehenen und z.B. in DIN EN 15026 [4] empfohlenen 10 Jahre, nur der Zeitraum von 2003 – 2010, also 8 Jahre verwendet werden kann. Dies war im Vergleich zu anderen Datenquellen der längste verfügbare Zeitraum mit vollständigen Datensätzen aller benötigten Klimaelemente.

Um kurzzeitige Messausfälle, von bis zu fünf Stunden, zu kompensieren wurde zwischen den jeweils noch verfügbaren Werten linear interpoliert. Ausnahmen bilden hier die relative Luftfeuchte welche aus der oftmals trotzdem verfügbaren Taupunkttemperatur ergänzt wurde und die Globalstrahlung, welche auf Grund der starken Veränderlichkeit nicht sinnvoll interpoliert werden kann. Der für die hygrothermische Bauteilsimulation notwendige diffuse Strahlungsanteil der Globalstrahlung wird nach dem Berechnungsmodell von Perez [5] ergänzt. Der direkte Solarstrahlungsanteil ist dann die Differenz zwischen dem diffusen Anteil und der Globalstrahlungssumme. Längere Messausfälle wurden durch „mittlere Tage“ ergänzt. Dazu wurden jeweils Mittelwerte des gleichen Kalendertags aus den übrigen verfügbaren Jahren des 8-Jahres-Zeitraums erstellt und der Messausfall mit diesem „mittleren Tag“ geschlossen.

Die in den Messdaten nicht enthaltene langwellige atmosphärische Gegenstrahlung (ILAH) wurde ebenfalls rechnerisch ergänzt. Die vollständige Strahlungsbilanz an der Bauteiloberfläche wird dabei nach [6] wie folgt berechnet:

$$I = \alpha \cdot I_s + \epsilon \cdot I_l - I_e$$

mit:

I	Nettostrahlung an der Bauteiloberfläche [W/m^2]
α	kurzwellig Absorptionszahl der Bauteiloberfläche
I_s	kurzwellig Solarstrahlung [W/m^2]
ϵ	langwellige Emissionszahl der Bauteiloberfläche
I_l	langwellige Gegenstrahlung [W/m^2]
I_e	langwellige Emission der Bauteiloberfläche

Die Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches ist notwendig, um Unterkühlungseffekte korrekt berechnen zu können. Für zahlreiche hygrothermische Fragestellungen wie z.B. die Prognose des Algenwachstums auf Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) [7] ist es nicht ausreichend diesen Wärmeverlust pauschal anzusetzen. Vielmehr muss der langwellige Strahlungsaustausch der betrachteten Oberfläche explizit berücksichtigt werden.

Die explizite Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen dem Bauteil und der Umgebung setzt jedoch voraus, dass in den als Randbedingung dienenden Wetterdaten Angaben zur Wärmestrahlung der Atmosphäre - der so genannten atmosphärischen Gegenstrahlung - vorliegen. Es ist daher wünschenswert, dass die neuen HRY, die möglichst vielseitig verwendbar sein sollen, Angaben zur atmosphärischen Gegenstrahlung enthalten. Da die für die Erstellung der HRY zur Verfügung stehenden Ausgangsdatensätze keine Gegenstrahlungsdaten enthielten, wurde ein Modell entwickelt, welches erlaubte, auf Grundlage der in den Datensätzen vorhandenen Wetterelemente die jeweilige atmosphärische Gegenstrahlung zu schätzen.

Die atmosphärische Gegenstrahlung ist die von der Atmosphäre ausgesandte Wärmestrahlung. Die Strahlungsquellen sind zum einen die Atmosphäregase, insbesondere Wasserdampf und Kohlendioxid, zum anderen feste und flüssige Atmosphärenbestandteile wie Wolkentröpfchen und Aerosole. Letztere strahlen bei gegebener Temperatur stärker als die Gase, so dass bei diesigem oder bewölktem Himmel die Gegenstrahlung zunimmt. Für die Gegenstrahlung bei klarem Himmel (A_{gk}) kann auf das Strahlungsmodell zurückgegriffen werden, das vom DWD bei der Erstellung der 1986er Testreferenzjahre verwendet wurde [8].

$$A_{gk} = \sigma \cdot T_{St}^4 (0,790 - 0,174 \cdot 10^{-0,041 \cdot e})$$

mit:

A_{gk}	Gegenstrahlung bei klarem Himmel [W/m^2]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W/(m^2 K^4)$]
T_{St}	Stationstemperatur in 2 m Höhe [K]
e	Wasserdampfpartialdruck [hPa]

Für die Gegenstrahlung bei bedecktem Himmel wurde vom DWD die Wärmestrahlung der Wolkenuntergrenze angesetzt [8], deren Temperatur zumindest bei konvektiven Verhältnissen in guter Näherung durch die an der Wetterstation gemessene Taupunkttemperatur gegeben ist (in den konvektiv aufsteigenden Luftpaketen kondensiert die Luftfeuchte zu Wolken, sobald die beim Aufsteigen sinkende Temperatur die Taupunkttemperatur des Luftpakets unterschreitet).

$$A_{gw} = \sigma \cdot T_{d,St}^4$$

mit:

A_{gw}	Gegenstrahlung bei klarem Himmel [W/m^2]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W/(m^2 K^4)$]
$T_{d,St}$	Taupunkttemperatur an der Station in 2 m Höhe [K]

Auch dieser Ansatz stimmt gut mit den Gegenstrahlungsmessungen an der Wetterstation des IBP überein. Wenn in den Wetterdaten Bewölkungsgrade vorliegen, kann die Gegenstrahlung bei teilbewölktem Himmel als entsprechend gewichtetes Mittel aus der Strahlung des klaren Himmels und der Strahlung des bewölkten Himmels ermittelt werden. Da jedoch in den für das vorliegende Projekt zur Verfügung stehenden Wetterdatensätzen keine Bewölkungsgrade enthalten waren, musste ein anderer Indikator zur Beschreibung des atmosphärischen Klarheitszustands gefunden werden. Der von Perez [5] zur rechnerischen Trennung gemessener solarer Globalstrahlung in ihre Direkt- und Diffusanteile eingeführte "Clearness Index" (CI) ist das Verhältnis von gemessener Globalstrahlung zur astronomisch möglichen Globalstrahlung. Zusätzlich wird der CI um die Dicke der durchstrahlten Luftmasse, welche von der Sonnenhöhe abhängig ist, korrigiert. Berechnet wird der CI dabei wie folgt.

$$Kt = \frac{Kt_0}{1,031 \cdot e^{\left(\frac{-1,4}{\left(0,9 + \frac{9,4}{m \cdot c_{at}}\right)}\right)} + 0,1}$$

mit:

Kt	Clearness Index [-]
------	---------------------

Kt_0	Verhältnis der gemessenen Globalstrahlung zur maximal möglichen [-]
m	Durchstrahlte Luftmasse [-]
c_{alt}	Höhenabhängige Luftdruckreduktion = $e^{(-0,0001184 \cdot \text{Standorthöhe})}$ [-]

Das hierfür notwendige Verhältnis der Globalstrahlung zur maximal möglichen und die vom Sonnenstrahl durchlaufene Luftmasse lassen sich dabei wie folgt berechnen.

$$Kt_0 = \frac{ISGH}{(I_0 \cdot \max(0,052336; cz))}$$

mit:

Kt_0	Verhältnis der gemessenen Globalstrahlung zur maximal möglichen [-]
$ISGH$	Gemessene Globalstrahlung [W/m^2]
I_0	Solarkonstante = 1367 [W/m^2]
cz	Cosinus des Zenitwinkels der Sonne [-]

$$m = \min(15,25; \frac{1}{(cz + 0,15 \cdot (93,885 - (90 - sa))^{-1,253})})$$

mit:

m	Durchlaufene Luftmasse [-]
sa	Sonnenhöhenwinkel [°]
cz	Cosinus des Zenitwinkels der Sonne [-]

Der CI nimmt bei klarem Himmel hohe Werte und bei diesigem oder bewölktem Himmel niedrige Werte an. Dies ist auch die Unterscheidung, die für die Abschätzung der Gegenstrahlungsintensität benötigt wird. Der konkrete quantitative Zusammenhang zwischen CI und Gegenstrahlung wurde durch Abgleich mit stündlichen Messdaten der Wetterstation des IBP ermittelt. Der für die Auswertung gewählte Ansatz geht davon aus, dass die Intensität sowie die Temperatur- und Luftfeuchteabhängigkeit der Gegenstrahlung bereits weitgehend durch das vorhandene Modell für klaren Himmel (A_{gk}) beschrieben werden und die Erhöhung der Strahlung bei nicht-klarem Himmel einfach durch einen vom CI abhängigen Aufschlag berücksichtigt werden kann. Das Streudiagramm zeigt auf der y-Achse den benötigten Aufschlag (die Differenz zwischen gemessener Strahlung und der vom Modell für klaren Himmel geschätzten Strahlung A_{gk}) und auf der x-Achse den aus den gleichzeitig erfassten Globalstrahlungsdaten ermittelten Clearness Index.

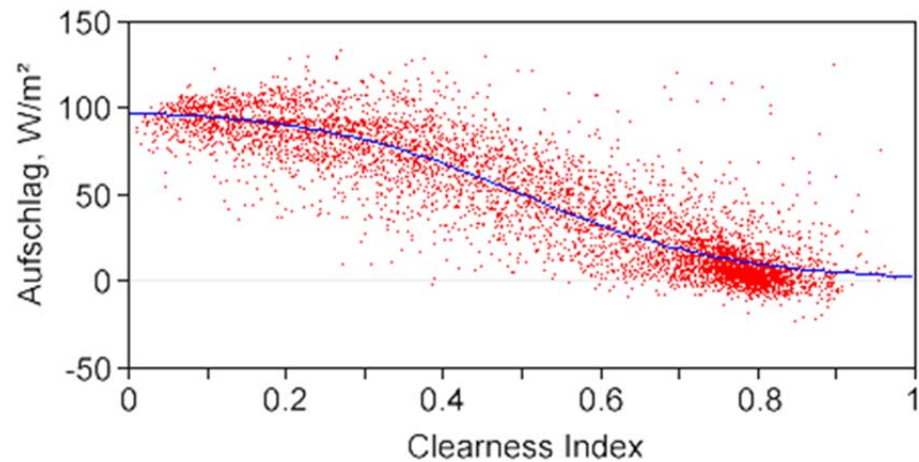


Bild 1:
Strahlungsaufschlag bei Bewölkung für unterschiedliche CI am Standort Holz-
kirchen. In blau dargestellt ist die Regressionskurve.

Der im obigen Streudiagramm (Bild 1) erkennbare Verlauf der Punktwolke lässt sich durch eine Sigmoid-Kurve wie folgt beschreiben.

$$\Delta_{rad} = 100,4 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{(-7,45 \cdot (Kt - 0,5))}} \right)$$

mit:

Δ_{rad} Strahlungsaufschlag [W/m²]
Kt Clearness Index [-]

Zur Schätzung der Gegenstrahlung wird zunächst mit dem Modell des DWD die für klaren Himmel zu erwartende Gegenstrahlung A_{gk} in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte bestimmt und anschließend ein Aufschlag angebracht, der in Abhängigkeit von dem aus der Globalstrahlung abgeleiteten CI ermittelt wird. Nachfolgend ist in Bild 2 die nach dieser Methode modellierte atmosphärische Gegenstrahlung mit Messwerte vom IBP Standort Holzkirchen verglichen.

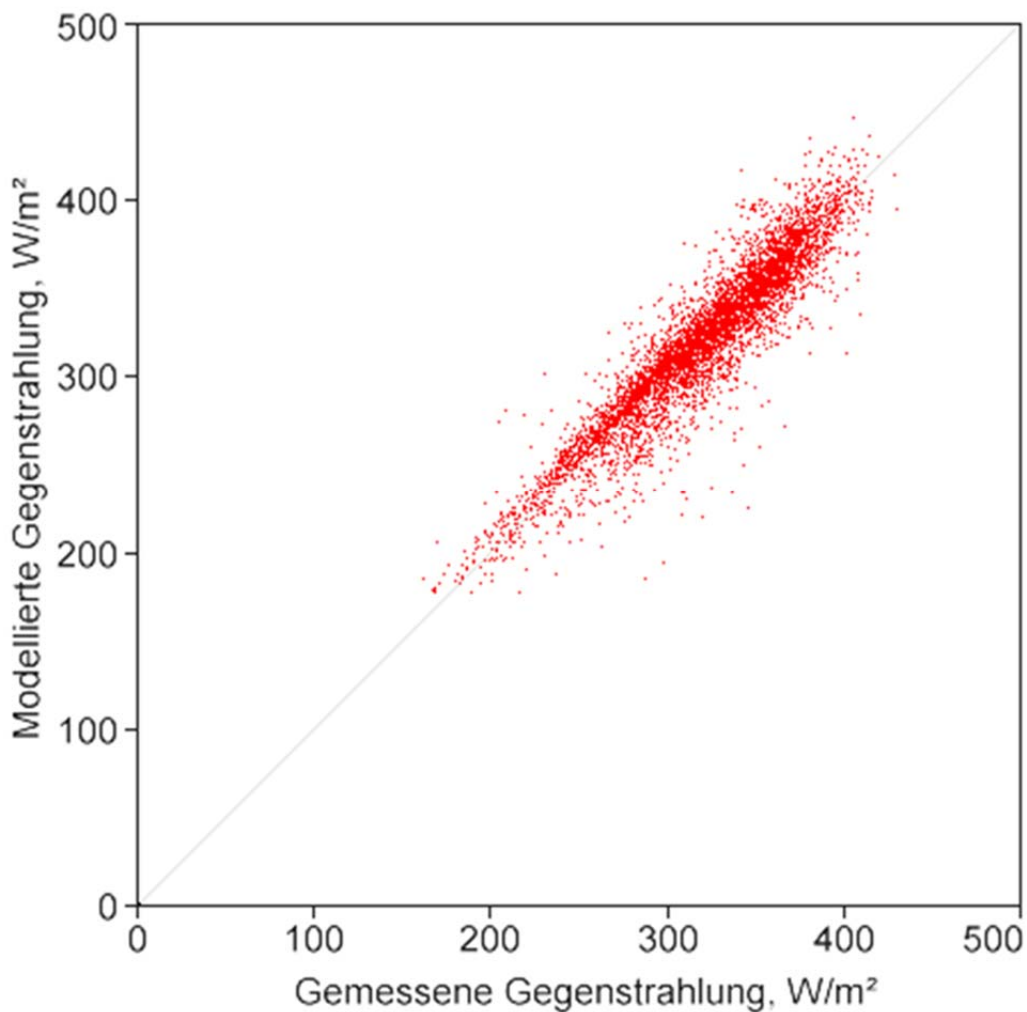


Bild 2:
Vergleich der modellierten atmosphärischen Gegenstrahlung mit stündlich gemessenen Werten am IBP Standort Holzkirchen tagsüber.

Der Vergleich modellierten Gegenstrahlungswerte mit den an der Wetterstation des IBP gemessenen stündlichen Werten zeigt, dass eine systematische Abweichung (Mean Bias Error, MBE) von nur $0,1 \text{ W/m}^2$ vorhanden ist und die Streuung um die wahren Werte (Root Mean Square Error, RMSE) 16 W/m^2 beträgt. Nachts kann wegen fehlender Globalstrahlung kein CI ermittelt werden. Die zur Verfügung stehenden Datensätze enthielten jedoch die in 5 cm Höhe gemessene Erdbodentemperatur. Das Ausmaß der nächtlichen Unterkühlung der bodennahen Luft unter die in 2 m Höhe gemessene Temperatur ist unmittelbar ein Maß für den langwelligen Strahlungsaustausch zwischen Erdboden und Atmosphäre und kann daher zur Schätzung der nächtlichen atmosphärischen Gegenstrahlung genutzt werden. Der für die Auswertung gewählte Ansatz geht davon aus, dass der Erdboden die Wärme als Planck'scher Strahler mit dem Emissionsgrad eins abstrahlt. Bei bedecktem Himmel ist der Strahlungsaustausch ausgeglichen und die Unterkühlung der bodennahen Luft gering; in die-

sem Fall wird die Atmosphäre ebenfalls als planckscher Strahler angesetzt, dessen Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur ist. Mit zunehmender Klarheit des Himmels wird die bodennahe Luft zunehmend unterkühlen. Die Temperaturdifferenz wird als Indikator für das Maß der Klarheit verwendet und die Strahlung der Atmosphäre ergibt sich, indem von ihrer Planck'schen Strahlung ein von der beobachteten Temperaturdifferenz abhängiger Betrag abgezogen wird. Der konkrete quantitative Zusammenhang zwischen der beobachteten Temperaturdifferenz und der zur Berücksichtigung der Klarheit abzuziehenden Strahlungsintensität wurde durch Abgleich mit stündlichen Messdaten der Wetterstation des IBP ermittelt und ist nachfolgend in Bild 3 dargestellt.

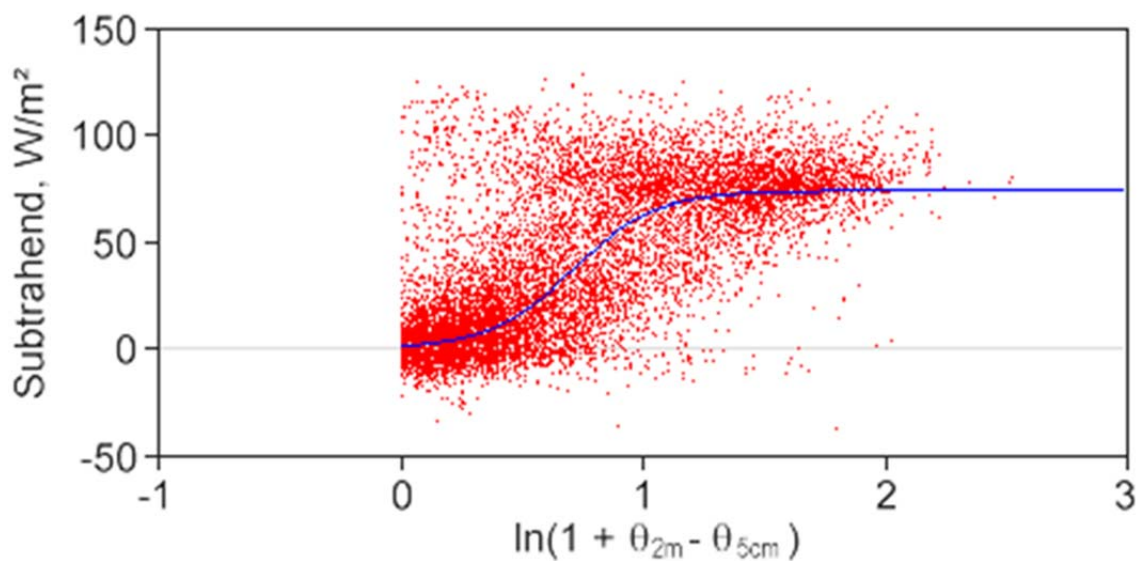


Bild 3:
Abziehende Strahlungsintensität in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied zwischen 2 m und 5 cm Höhe am Standort Holzkirchen.

Dabei wurden jene Nachtstunden nicht berücksichtigt, in denen die bodennahe Temperatur höher war als die Temperatur in 2 m Höhe, da in diesen Fällen die Temperaturen durch andere Effekte beeinflusst wurden (z.B. Restwärme des Tages). Anstelle der Temperaturdifferenz selbst wurde ihr Logarithmus aufgetragen, um eine einfachere Struktur der Punktwolke zu erzielen. Der im Streudiagramm erkennbare Verlauf der Punktwolke lässt sich durch eine Sigmoide wie folgt beschreiben (vgl. blaue Kurve in Bild 3).

$$\Delta_{rad} = 74,6 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{(5,8 \cdot (\ln(1 + \vartheta_{2m} - \vartheta_{5cm}) - 0,71))}} \right)$$

mit:

Δ_{rad}	<i>Strahlungsabschlag [W/m²]</i>
ϑ_{2m}	<i>Temperatur in 2 m Höhe [°C]</i>
ϑ_{5cm}	<i>Temperatur in 5 cm Höhe [°C]</i>

Zur Schätzung der nächtlichen Gegenstrahlung wird zunächst von vollständig trübem Himmel ausgegangen, der als planckscher Strahler behandelt wird. Seine Strahlungstemperatur ist identisch mit der Lufttemperatur in 2 m Höhe. Von dieser Strahlungsintensität wird ein Betrag subtrahiert, der in Abhängigkeit von der Differenz der Temperaturen in 2 m Höhe und in 5 cm Höhe ermittelt wird. Der Vergleich der auf diese Weise geschätzten Gegenstrahlungswerte mit den an der Wetterstation des IBP gemessenen stündlichen Werten ist nachfolgend in Bild 4 dargestellt.

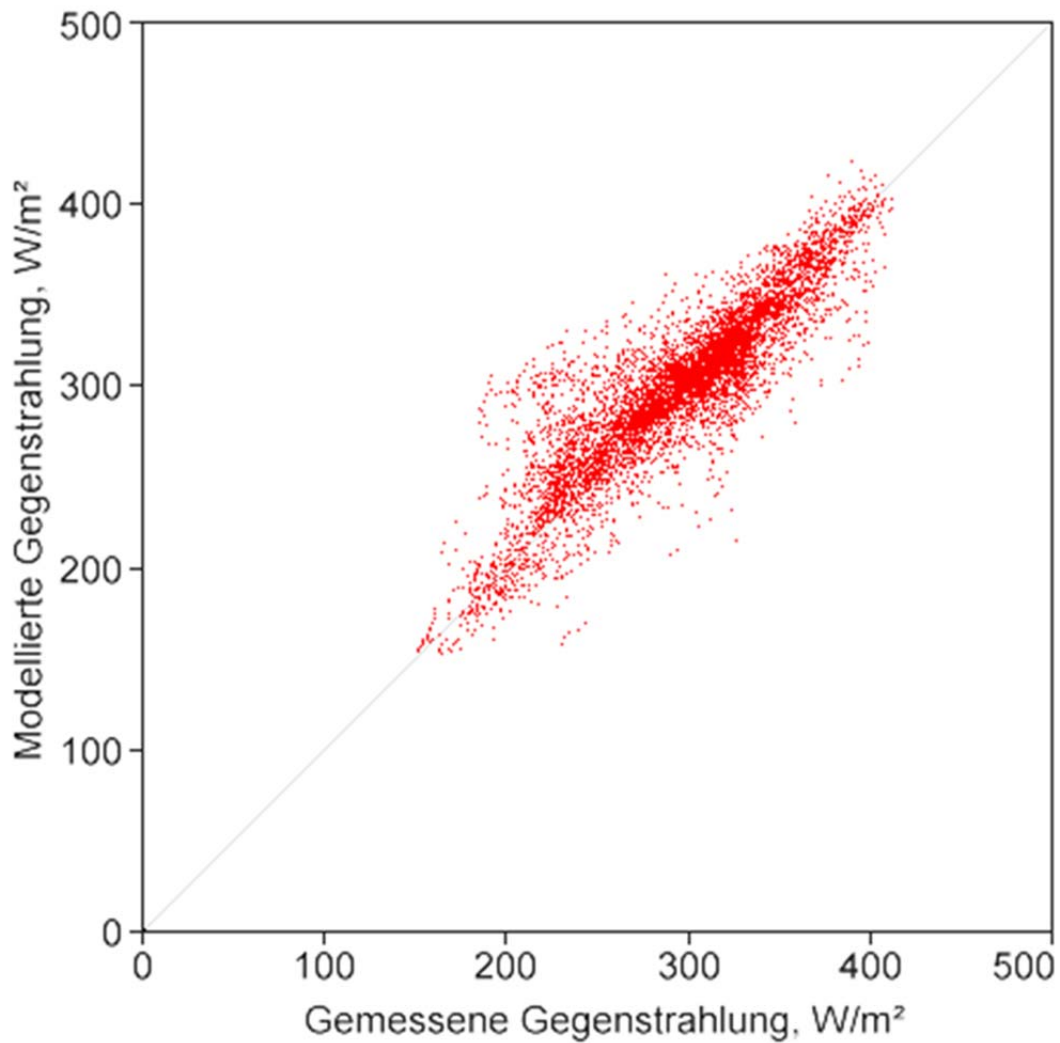


Bild 4:
Vergleich der modellierten atmosphärischen Gegenstrahlung mit stündlich gemessenen Werten am IBP Standort Holzkirchen während der Nacht.

Für den Vergleich der modellierten atmosphärischen Gegenstrahlung mit den am IBP stündlich gemessenen Werten ergibt sich ein Mean Bias Error (MBE) von 2 W/m^2 und ein Root Mean Square Error (RMSE) von 22 W/m^2 . Falls die Wetterdaten für eine nächtliche Stunde Regen anzeigen, kann die Gegenstrahlung ohne Rücksicht auf die bodennahe Temperatur auf den Modellwert für bedeckten Himmel (A_{gw}) gesetzt werden. Das beschriebene Modell für die Gegenstrahlung während des Tages wurde nur für Sonnenhöhen über 15° verwendet, da die Modellergebnisse für niedrigere Sonnenhöhen starke Streuungen aufwiesen. Ursache sind vermutlich horizontnahe Dunstschichten und Wolkenbänke, deren Einfluss auf die Globalstrahlung nicht repräsentativ für den Zustand des restlichen Himmels ist. Außerdem erübrigt sich so die Berücksichtigung der Zeiten des Sonnenaufgangs und des Sonnenuntergangs für die Globalstrahlungssumme der betreffenden Stunden. Zu diesen Lücken am Beginn und am Ende des Tages kommen eventuelle Messausfälle in den Ausgangsdatensätzen. Diese Lücken wurden durch lineare Interpolation gefüllt. Es wurde

jedoch nicht die modellierte Gegenstrahlung interpoliert, sondern der aus der Gegenstrahlung abgeleitete Bewölkungsgrad. Wäre der Bewölkungsgrad bekannt, so könnte - wie oben erwähnt - die Gegenstrahlung als gewichtetes Mittel aus den Modellwerten A_{gk} und A_{gw} für klaren und bedeckten Himmel ermittelt werden. Damit ergibt sich folgende Gleichung für die Berechnung der atmosphärischen Gegenstrahlung:

$$A_g = B \cdot A_{gw} + (1 - B) \cdot A_{gk}$$

mit:

A_g	<i>Atmosphärische Gegenstrahlung [W/m²]</i>
B	<i>Bewölkungsgrad [-]</i>
A_{gw}	<i>Atmosphärische Gegenstrahlung bei bedecktem Himmel [W/m²]</i>
A_{gk}	<i>Atmosphärische Gegenstrahlung bei klarem Himmel [W/m²]</i>

Im vorliegenden Fall standen keine Bewölkungsgrade zur Verfügung und die Gegenstrahlung für teilbedeckten Himmel musste mit Hilfe der beschriebenen alternativen Indikatoren ermittelt werden. Sobald eine Schätzung der Gegenstrahlung vorliegt, kann jedoch durch Umkehrung der obigen Formel auch der jeweilige Bewölkungsgrad wie folgt abgeschätzt werden.

$$B = \frac{A_g - A_{gk}}{A_{gw} - A_{gk}}$$

mit:

A_g	<i>Atmosphärische Gegenstrahlung [W/m²]</i>
B	<i>Bewölkungsgrad [-]</i>
A_{gw}	<i>Atmosphärische Gegenstrahlung bei bedecktem Himmel [W/m²]</i>
A_{gk}	<i>Atmosphärische Gegenstrahlung bei klarem Himmel [W/m²]</i>

Zur Füllung der verbliebenen Lücken wurden die Bewölkungsgrade linear interpoliert und aus den interpolierten Bewölkungsgraden wieder auf die Gegenstrahlung zurückgerechnet. Dies hat den Vorteil, dass die in A_{gk} und A_{gw} enthaltene Information über die temperatur- und feuchteabhängigen Tagesgänge der Gegenstrahlung berücksichtigt wird und außerdem die interpolierte Strahlung stets innerhalb des möglichen Bereichs zwischen A_{gk} und A_{kw} bleibt, was bei Interpolation der Strahlungswerte selbst nicht gewährleistet wäre.

Für die Aufbereitung der relativen Luftfeuchtigkeit wurde ebenfalls ein Ansatz entwickelt. Da Messdaten sowohl für die relative Luftfeuchtigkeit als auch für die Taupunkttemperatur zur Verfügung standen, war es möglich die Messausfälle der relativen Luftfeuchtigkeit zu ergänzen. Hierzu wurde nach der Vorlage des DWD [9] der Sättigungsdampfdruck für die Temperatur in 2m Höhe und

die zugehörige Taupunkttemperatur bestimmt. Das Verhältnis aus beiden entspricht dann der relativen Luftfeuchtigkeit.

Um die weitere Bearbeitung zu erleichtern, wurden die Schalttage aus den Datensätzen entfernt. Der für hygrothermische Simulationen wichtige Schlagregen liegt nicht als direkte Messgröße vor. Er wird in der Simulation für die jeweilige Konstruktion und Ausrichtung aus der Windgeschwindigkeit und dem Normalregen nach [10] berechnet.

2.2.3 Einfluss von Klimafaktoren

Die geografische Lage eines Standortes hat einen starken Einfluss auf die gemessenen Klimaelemente. Nachdem die neu zu erstellenden Referenzklimadaten jeweils an einem Standort gemessen wurden, jedoch idealerweise auf eine ganze Zone anwendbar sein sollen wird in diesem Kapitel der Einfluss der Umgebungsfaktoren näher betrachtet. Umgebungsfaktoren werden nachfolgend als Klimafaktoren bezeichnet. Klimafaktoren sind nach Definition des DWD die Faktoren des Raumes, „welche die Klimaelemente und damit das Klima eines Ortes beeinflussen. Die wesentlichen natürlichen Klimafaktoren sind geographische Breite, topographische Höhe und Exposition, Entfernung vom Meer und anderen größeren Wasserflächen, Bodenart und Bodenbedeckung.“ [11].

Standorthöhe

In diesem Zusammenhang wird zuerst die Höhenabhängigkeit der Temperatur betrachtet. Die Temperatur nimmt i.d.R. mit zunehmender Höhe ab. Unterschieden wird hier zwischen dem trocken- und dem feuchteadiabatischen Temperaturgradienten. Findet kein Phasenübergang – also Kondensation von Wasserdampf statt, kann der trockenadiabatische Temperaturgradient verwendet werden. Dieser liegt z.B. nach [12] bei 1 K Temperaturabnahme je 100 m Höhenzunahme. Bei dem feuchteadiabatischen Temperaturgradienten wird hingegen die frei werdende latente Wärme beim Kondensationsvorgang berücksichtigt. Er ist somit kleiner als der trockenadiabatische Temperaturgradient und liegt zwischen 0,301 K und 0,965 K bezogen auf einen Temperaturbereich von 40°C bis -50°C und einen Umgebungsluftdruck von 1000 mbar nach [12]. Der DWD gibt für seine TRY aus dem Jahr 2004 monatliche Temperaturkorrekturfaktoren je 100m Höhenzunahmen für jeden Referenzstandort an. Diese Schwanken zwischen 0,43K (Januar, Stötten) und -1,77 K (Januar, Bad Marienberg) [9]. Über das Jahr gemittelt liegen sie zwischen -0,34 K und -1,16 K je 100m [9]. Dies veranschaulicht, dass es unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung einer Höhenkorrektur der Temperatur gibt welche aus hygrothermischer Sicht zu Unterschieden führen können. Daher ist es notwendig, die für eine Lokalanpassung verwendete Höhenkorrektur auf Ihre Eignung hin zu überprüfen.

Neben der Temperatur weisen auch andere Klimaelemente gewisse Höhenabhängigkeiten auf. In [13] wurde beispielsweise für die Steiermark ein empirisch ermittelter Zusammenhang zwischen der Niederschlagsmenge und der Stand-

orthöhe ermittelt. Für das dortige Vorland der Alpen wird dabei folgender Zusammenhang zwischen der Regenmenge bzw. den Regenstunden und der Standorthöhe, angegeben:

$$RN = \frac{h - 710,6179}{0,6758}$$

$$t = \frac{h - 4,1854}{0,0106}$$

mit:

h Höhe in m

RN Niederschlagsmenge in mm

t Regenstunden in h

Was dieser Einfluss der Gebirgslage für die hygrothermische Simulation bedeutet wurde anhand der beiden Standorte Garmisch-Partenkirchen und Hohenpeißenberg untersucht. Für diese beiden Standorte ergeben sich nach dem obigen Ansatz zu geringe Schlagregenmengen, sodass diese Anpassung nicht einfach auf die dortige voralpine Region übernommen werden kann. Beide Standorte werden vom DWD betrieben. Mit einer Entfernung von ca. 34 km Luftlinie liegen beide zwar nicht weit auseinander, auf Grund der stark unterschiedlichen Geografie ist hier jedoch von einer größeren Abweichung der Simulationsergebnisse auszugehen. Garmisch-Partenkirchen liegt auf 700 m über NN in einer geschützten Tallage mit direkter Nähe zum Fluss Partnach, die Wetterstation befindet sich im Ort. Die Wetterstation Hohenpeißenberg befindet sich hingegen auf 990 m über Normalnull (NN) in einer exponierten Berglage und außerhalb der Ortschaft.

Auch ein erster Vergleich der Klimaelemente (vgl. Bild 267) bestätigt diese Einschätzung. Die Globalstrahlung fehlt in den Daten für den Hohenpeißenberg für das komplette Jahr 2005. Die Normalregenmenge ist in Garmisch-Partenkirchen höher als auf dem Hohenpeißenberg. Dafür ist auf dem Hohenpeißenberg die Windgeschwindigkeit in der westlichen Ausrichtung und im Jahresmittel deutlich höher. Dies lässt größere Unterschiede vor allem bei schlagregensensitiven Konstruktionen vermuten, da sich sowohl die Normalregenmenge als auch die Windverhältnisse deutlich unterscheiden. Da der Schlagregen aus beiden Klimaelementen abgeleitet wird unterscheidet sich auch das Schlagregenangebot an beiden Standorten. Während am Hohenpeißenberg die Hauptwindrichtung im Westen liegt, ist sie auf Grund der Tallage in Garmisch-Partenkirchen im Südwesten bzw. im Nordosten. Auch die mittlere Windgeschwindigkeit (für den Zeitraum von 2003 - 2010) liegt am Hohenpeißenberg mit 5,4 m/s deutlich über der von Garmisch - Partenkirchen mit $1,5 \frac{m}{s}$. Da die Windgeschwindigkeit auch den Schlagregen beeinflusst hat dies auch einen Einfluss auf das hygrische Verhalten der jeweiligen Konstruktion.

Um auszuschließen, dass für diese beiden Standorte, untypisch extreme Zeiträume ausgewählt wurden, können die Windgeschwindigkeiten mit den langjährigen Mittelwerten des DWD für Südbayern verglichen werden (vgl. Bild 268 im Anhang). Dabei zeigt sich, dass für Garmisch-Partenkirchen eine mittlere Windgeschwindigkeit von $1,7 \frac{m}{s}$ und für den Hohenpeißenberg ein Mittelwert zwischen $4,4 \frac{m}{s}$ - $5,5 \frac{m}{s}$ vorherrscht. Dies deckt sich mit den Mittelwerten der verwendeten Klimadaten, sodass von deren Konsistenz ausgegangen werden kann.

Gewässernähe

Um den Einfluss der Gewässernähe zu betrachten, wurden ein Küstenstandort mit einem Standort im Hinterland und eine städtische Lage mit und ohne Flusslauf im Stadtgebiet verglichen. Für den ersten Vergleich werden die Standorte Bremen und Bremerhaven herangezogen. Der DWD beschreibt die Umgebung seiner Messstation in Bremerhaven wie folgt „am Ufer der Außenweser gelegen und befindet sich in einer Randlage zur Stadt. Die nähere Umgebung (Hafengebiet) ist locker bebaut und hat einen mäßigen Bewuchs mit höheren Bäumen.“ [9]. Beide Stationen sind ca. 50 km Luftlinie voneinander entfernt. Da es sich bei der Station Bremerhaven um einen „Küstenstandort“ handelt, ist hier mit Abweichungen zum weiter im Landesinneren gelegenen Bremen vor allem beim Schlagregen zu rechnen. Die Normalregenmengen sind im Anhang unter Bild 269 gegenübergestellt, hier zeigt sich für den Standort Bremerhaven eine deutlich höhere Normalregenmenge während die Schlagregenverteilung sowie die Hauptschlagregenrichtung vergleichbar ist. Es ist daher davon auszugehen, dass sich Konstruktionen am näher an der Küste gelegenen Standort Bremerhaven leicht kritischer verhalten.

Als nächstes werden die Standorte Dresden und Oschatz miteinander verglichen. Mögliche Einflussfaktoren auf das lokale Klima sind die Standorthöhe (Dresden 220 m und Oschatz 120 m über NN), die Stadtlage (Dresden) und die Flussnähe (Elbe in Dresden). Beim direkten Vergleich der beiden Klimadaten-sätze (vgl. Bild 270) fallen einige Unterschiede zwischen den Standorten auf. Die Normalregenmenge ist in Dresden ab dem Jahr 2006 etwas höher als am Standort Oschatz. Gleichzeitig sind die Hauptwindrichtungen für den Standort Dresden im Westen bzw. Südosten, während die Hauptwindrichtung am Standort Oschatz im Südwesten liegt. Darüber hinaus ist trotz eines Messausfalls im Jahr 2008 das solare Strahlungsangebot am Standort Dresden etwas höher. Dies lässt darauf schließen, dass sich mit Ausnahme von Schlagregen sensitiven Konstruktionen beide Standorte ähnlich verhalten.

Städtische Wärmeinsel

Auch andere ortsspezifische Faktoren wie z.B. eine städtische Lage haben einen Einfluss auf einzelne Klimaparameter. So weisen Städte auf Grund der hohen Bewohnerdichte höhere Temperaturen als die Umgebung auf. Dieser Effekt wird nach [14] als „städtische Wärmeinsel“ bezeichnet. Für nordamerikanische

und europäische Städte wurde dieser Zusammenhang u.a. von [14] betrachtet und eine Abhängigkeit von der Einwohnerzahl empirisch ermittelt.

$$UHI_{Max,Europa} = 2,01 \cdot \log(P) - 4,06$$

$$UHI_{Max,Nordamerika} = 2,96 \cdot \log(P) - 6,41$$

mit
UHI Urban heat index (Temperaturerhöhung gegenüber dem Umland)
in °C
P Einwohnerzahl der Stadt

Die so ermittelte maximale Überhitzung wird dann mittels mehrerer Faktoren auf die örtlichen Gegebenheiten angepasst: Im Einzelnen werden hierfür die Windgeschwindigkeit, der Bedeckungsgrad, die Jahres- bzw. Tageszeit und die Dichte der städtischen Bebauung berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projektes wurde diese Korrektur für die beiden Standorte München und Berlin angewandt. Hierzu wurde in der im Rahmen des Projektes entstandenen Abschlussarbeit [15] eine Messstation aus dem Umland der jeweiligen Stadt um die nach [14] berechnete städtische Überwärmung erhöht. Anschließend wurden die angepassten Messdaten der Umlandstation mit direkt in der Stadt gemessenen Daten verglichen. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Temperaturverläufen solange die verwendeten Umgebungsstationen möglichst nahe an der jeweiligen Metropole liegen. In Bild 5 sind die Temperaturverläufe für Berlin bzw. Potsdam auf Basis der Anpassungen mittels des Modells von [14] gegenübergestellt. Der schwarze Graph ist der direkt in Berlin gemessene Temperaturverlauf, in rot dargestellt ist der im Umland von Potsdam gemessene Temperaturverlauf und grün ist der mit dem städtischen Überwärmungseffekt angepasste Verlauf.

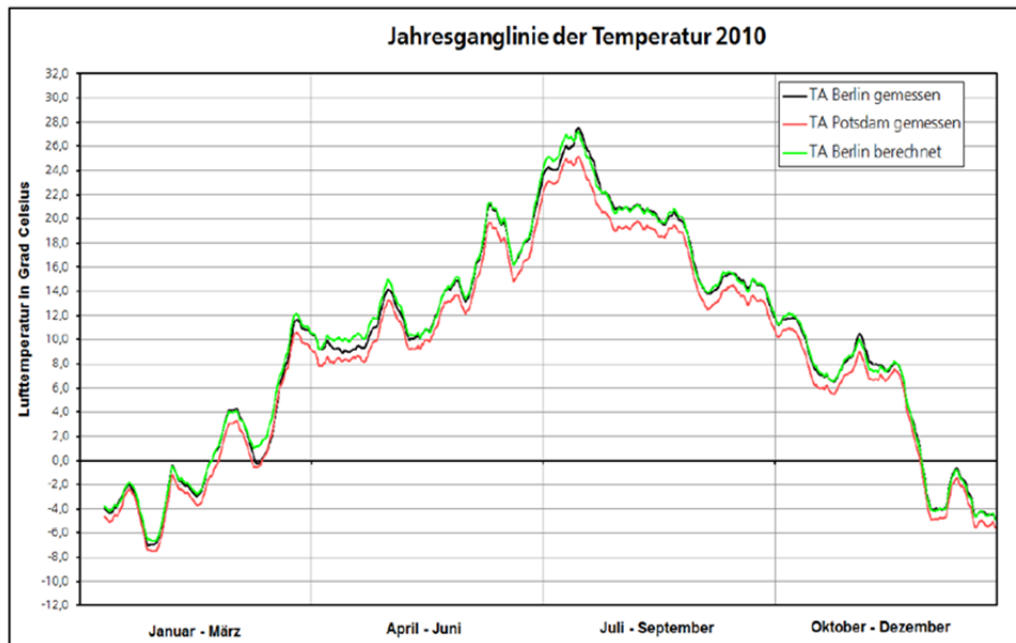


Bild 5:
Vergleich der gemessenen Temperaturen am Standort Berlin mit den über den Urban-Heat-Index angepassten Temperaturen des Standortes Potsdam aus der im Rahmen des Projektes entstandenen Arbeit [15].

Wie Bild 5 verdeutlicht, stimmen die Temperaturverläufe zwischen der angepassten Variante und der in der Stadt gemessenen gut überein. Die mittlere absolute Abweichung zwischen beiden Verläufen beträgt $+0,1^{\circ}\text{C}$.

Nimmt die Entfernung jedoch zu, steigt auch die Abweichung. Gut sichtbar ist dies am Standortvergleich zwischen München und Fürstenzell, welche ca. 140 km Luftlinie voneinander entfernt sind. Für dieses Standortpaar ist der Vergleich nachfolgend in Bild 6 dargestellt.

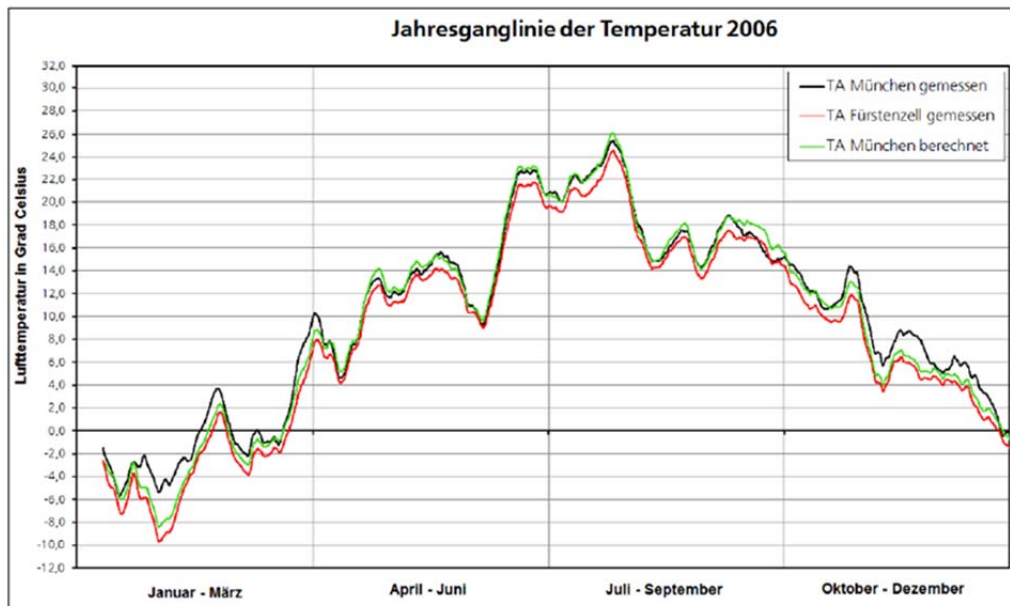


Bild 6:

Vergleich der gemessenen Temperaturen am Standort München mit den über den Urban-Heat-Index angepassten Temperaturen des Standortes Fürstzell aus der im Rahmen des Projektes entstandenen Arbeit [15].

Hier wird deutlich, dass die Abweichung abhängig von der jeweiligen Jahreszeit größer ausfällt. Für das Sommerhalbjahr ist die mittlere absolute Abweichung $+0,2^{\circ}\text{C}$ während sie im Winter $-1,2^{\circ}\text{C}$ beträgt. Dies ist auf die deutlich größere Distanz der beiden Stationen zurückzuführen.

2.2.4 Einfluss von Klimaelementen auf den Wassergehalt von Bauteilen

Einzelne Klimaelemente wie z.B. der Normalregen und die Temperatur haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf den Wassergehalt einer Konstruktion. Als Klimaelemente bezeichnet der DWD ein „mess- und beobachtbares Element des Wetters“ [16]. Da die neu zu entwickelnden hygrischen Referenzjahre für die hygrothermische Bauteilbewertung eingesetzt werden sollen, wurde zuerst der Einfluss einzelner Klimaelemente auf verschiedene Konstruktionen näher betrachtet. Hierzu wurden die später in Kapitel 2.3.1 genauer beschriebenen Konstruktionen unter Zuhilfenahme von Methoden der Sensitivitätsanalysen untersucht. Unter Sensitivitätsanalysen versteht man in der Statistik die Zuordnung einer Unsicherheit im Ergebnis zu den unterschiedlichen Unsicherheiten der Eingabegrößen [17], die Eingabegrößen sind im konkreten Fall die einzelnen Klimaelemente. Der Vorteil der Sensitivitätsanalyse Methoden besteht darin, dass davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Eingabegrößen nicht unabhängig voneinander sind. Dies trifft besonders bei klimatischen Zeitreihen zu, hier sind einzelne Klimaelemente voneinander abhängig. Dies ist, je nach Wahl der Methode, im konkreten Fall nach Morris [18] oder FAST [19] kann auch zwischen einem direkten Einfluss auf die Ausgangsgröße und dem Einfluss über die Interaktion mit anderen Elementen unterschieden werden.

Betrachtet wurden in den durchgeführten Analysen die Endwassergehalte der jeweils kritischen Bauteilschicht von sensitiven Konstruktionen (vgl. Kapitel 2.2.4) in Abhängigkeit der einzelnen Klimaelemente. Die betrachteten Konstruktionen waren im Einzelnen, ein Blech-, ein Flach-, ein Gründach und eine nördlich orientierte Außenwand. Die Sensitivitätsanalyse wurde dazu in zwei Abschnitten durchgeführt, zuerst wurde die schnellere Betrachtung nach Morris [18] durchgeführt. Diese erlaubt die Auswahl der Klimaelemente die den größten Einfluss auf den Endwassergehalt haben. Eine Unterteilung in einen Haupt- und einen Interaktionseffekt ist dabei jedoch nicht möglich. Der Haupteffekt ist dabei der direkte Einfluss eines Elementes auf die Ergebnisgröße. Der Interaktionseffekt ist der Einfluss den das betrachtete Element über die Zusammenwirkung mit anderen Elementen auf die Ergebnisgröße ausübt. Ausführlich ist dieses Vorgehen in der im Rahmen des Projektes entstandenen Abschlussarbeit [20] beschrieben. Daher wurden die vier Klimaelemente mit dem größten Einfluss auf den Wassergehalt im zweiten Schritt mit der aufwendigeren Fast Methode betrachtet. Bei der FAST Methode nach [19] wird zusätzlich zwischen einem Haupt- und eine Interaktionseffekt unterschieden.

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalysen war eine Rangfolge der Klimaelemente, welche den größten Einfluss auf den Wassergehalt der jeweiligen Konstruktion haben. Nachfolgend ist in Bild 7 ein exemplarisches Ergebnis dieser Untersuchung für das Flachdach am Standort Chemnitz dargestellt.

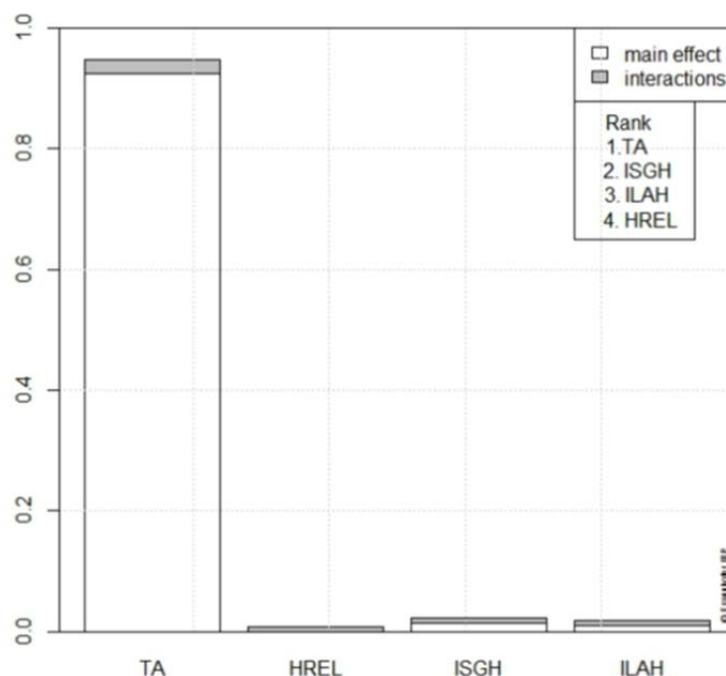


Bild 7:

Ergebnis der Sensitivitätsanalyse mit der Fast Methode für ein Flachdach am Standort Chemnitz. Betrachtet wurden die Temperatur (TA) die relative Luftfeuchtigkeit (HREL), die Globalstrahlung (ISGH) und die atmosphärische Gegenstrahlung (ILAH) aus [20].

Das Bild 7 zeigt den Einfluss der einzelnen Klimaelemente auf den Endwassergehalt. Der Haupteffekt ist dabei der direkte Einfluss eines Elementes auf den Endwassergehalt. Der Interaktionseffekt ist der Einfluss den das betrachtete Element über die Zusammenwirkung mit anderen Elementen auf die Ergebnisgröße, in diesem Fall den Endwassergehalt, ausübt. Für das Flachdach und den Standort Chemnitz hat beispielsweise die Temperatur den größten Einfluss gefolgt von der Globalstrahlung.

Diese Untersuchung wurde insgesamt an 17 Standorten durchgeführt. Das für jede Konstruktion gemittelte Ergebnis dieser Betrachtung ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2:

Rangfolge der verschiedenen Klimaelemente geordnet nach der Größe Ihres Einflusses auf den Gesamtwassergehalt einzelner Konstruktionen aus [20].

Konstruktion	Blechdach	Nordwand	Gründach	Flachdach
Rangfolge	1. TA	1. TA	1. TA	1. TA
	2. ISGH	2. ILAH	2. ISGH	2. ISGH
	3. ILAH	3. ISD	3. RN	3. ILAH
	4. HREL	4. HREL	4. HREL	4. HREL

Wie sich zeigte, hat die Temperatur unter allen betrachteten Konstruktionen den größten Einfluss auf den Wassergehalt der Konstruktionen. Dies deckt sich mit den Erfahrungen aus der Simulationspraxis und wird dementsprechend bei der späteren Gewichtung der einzelnen Klimaelemente bezüglich der Repräsentativität eines Datensatzes berücksichtigt.

2.2.5 Interaktion von Klimaelementen

Einzelne Klimaelemente wie z.B. der Normalregen und die Temperatur beeinflussen sich gegenseitig und haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf den Wassergehalt einer Konstruktion. Die Unterscheidung der Sensitivitätsanalysen in einen direkten Einfluss und in einen Einfluss über die Interaktion mit anderen Klimaelemente entsteht verdeutlicht, dass Klimaelemente nicht für sich allein betrachtet oder verändert werden können da sie sich teilweise gegensei-

tig beeinflussen. Der wohl bekannteste Zusammenhang besteht zwischen der Temperatur, und der relativen Luftfeuchte. Nach [21] beschreibt die relative Luftfeuchte das Verhältnis zwischen Wasserdampfpartialdruck und Wasserdampfsättigungsdruck. Damit lässt sich nach [21] dieser Zusammenhang wie folgt formulieren:

$$\phi = \frac{m_d}{V} \cdot \frac{R_d \cdot T}{p_s}$$

mit:

ϕ rel. Luftfeuchtigkeit in %

m_d Masse des Wasserdampfes in kg

V Volumen in m^3

R_d spez. Gaskonstante von Wasserdampf in $\frac{J}{kgK}$

T thermodynamische Temperatur in K

p_s Wasserdampfsättigungsdruck in Pa

Der ebenfalls temperaturabhängige Wasserdampfsättigungsdruck lässt sich nach [21] für den bauphysikalisch relevanten Temperaturbereich von etwa -20°C bis 30°C wie folgt beschreiben:

$$p_s = a \cdot \left(b + \frac{\theta}{100} \right)^c$$

mit

θ Temperatur in °C

p_s Wasserdampfsättigungsdruck in Pa

Die verwendeten Berechnungsparameter aus [21] sind nachfolgend in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3:

Temperaturabhängige Parameter für die Berechnung des Wasserdampfsättigungsdrucks.

	$-20 \leq \theta < 0$	$0 \leq \theta \leq 30$
a	4,689	288,68
b	1,486	1,098
c	12,3	8,02

Der Zusammenhang zwischen Temperatur, relativer Luftfeuchte und Dampfdruck wird auch in experimentellen Untersuchungen wie z.B. [22] bestätigt. Auch zwischen der Temperatur und dem Niederschlag besteht ein Zusammenhang. Niederschlag geht mit einer erhöhten Bewölkung und einer verminderten solaren Einstrahlung einher. In [23] wird die Korrelation zwischen der Temperatur und dem Niederschlag für das Tschadsee-Gebiet während des Zeitraumes von 1949 – 1980 näher untersucht. Dabei wird eine Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von -0.69 festgestellt. Dies bedeutet am konkreten Beispiel, dass bei abnehmender Niederschlagsmenge die mittlere Temperatur zunimmt. Dieser Zusammenhang könnte laut dem Autor mit einer längeren Zeitreihe, als der vorhandenen, auch statistisch signifikant nachgewiesen werden.

Neben den für dieses Projekt ausgewerteten Klimaelementen gibt es noch weitere, die je nach Anwendungsgebiet von Interesse sein können. So ist beispielsweise die Erdreichtemperatur ein Klimaelement welches sehr anschaulich das Zusammenspiel verschiedener Klimaelemente verdeutlicht. Die Erdreichtemperatur ist kein Klimaelement welches standardmäßig in einem Klimadatensatz enthalten ist, da es messtechnisch aufwendiger zu erfassen ist. Für die bauphysikalische Praxis ist es für erdberührte Bauteile dennoch notwendig. Der einfachste Weg diese Temperatur zu erhalten, ist daher die indirekte Ableitung aus dem Umgebungsklima. Einen Ansatz hierzu stellt [24] vor. Der Autor ermittelt dabei die Temperatur des ungestörten Erdreiches in Abhängigkeit des Umgebungsklimas. Dazu wird der Bereich des ungestörten Erdreiches ab einer Tiefe von 15m unterhalb der Oberfläche definiert. Durch die thermische Trägheit des Erdreiches führt die solare Einstrahlung ab dieser Tiefe nicht mehr zu einer täglichen Schwankung der Temperatur. Damit lässt sich die ungestörte Erdreichtemperatur in Abhängigkeit der Luft-, der Himmelstemperatur, der Windgeschwindigkeit und der jährlichen Solarstrahlungsintensität berechnen. Der Autor fasst sein Modell in folgender Gleichung zusammen:

$$T_g = 1.205 \cdot T_{amb} - 0.201 \cdot T_{sky} - 0.466 \cdot v_w + 0.0049 Q_{sol}$$

<i>mit</i>	
T_g	<i>ungestörte Erdreichtemperatur in K</i>
T_{amb}	<i>Lufttemperatur in K</i>
T_{sky}	<i>Himmelstemperatur (zur Berechnung des langwelliger Strahlungsaustausch) in K</i>
V_w	<i>mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in m/s</i>
Q_{so}	<i>durchschnittlicher jährlicher Wärmestrom durch horizontale solare Strahlung in W/m²</i>

Bei der Messwert-basierten Validierung dieses Ansatzes durch den Autor an mehrerer Stationen weltweit ergab sich eine fast perfekte Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von $R^2 = 0,99$ zwischen gemessenen und modellierten Temperaturen. In einem nächsten Schritt werden die Einflüsse der Himmelstemperatur, der solaren Einstrahlung und der Windgeschwindigkeit untersucht. Dabei kommt der Autor zu dem Schluss, dass sich diese für die be-

trachteten kanadischen Standorte nicht stark unterscheiden. Daher vereinfacht er die obige Gleichung wie folgt:

$$T_g = 17.898 + 0.95T_{amb}$$

mit

T_g ungestörte Erdreichtemperatur in K
 T_{amb} Lufttemperatur in K

Die betrachtete ungestörte Erdreichtemperatur in Tiefen ab 15 m unter der Oberfläche ist für den Anwendungsbereich der hygrothermischen Bauteilsimulation von untergeordneter Bedeutung. Für oberflächennähere Erdreichtemperaturen werden meist sinusförmige Näherungen verwendet. Eine Näherung wird in [25] beschrieben und ist nachfolgend aufgeführt:

$$T_{Erde}(z, t) = T_{Obf,m} + \Delta T_{Obf} \cdot e^{-\zeta} \cdot \cos\left(\pi + \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_0} + \varphi_{obf} - \zeta\right)$$

mit

T_{Erde} ungestörte Erdreichtemperatur in °C
 $T_{Obf,m}$ Mittlere Temperatur an der Oberfläche in °C
 ΔT_{Obf} Schwankung der Oberflächentemperatur in °C
 ζ Dämpfung der Temperaturschwingung $\zeta = z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{Erde} \cdot t_0}}$
 t Aktueller Zeitpunkt in s
 T_0 Dauer der Schwingung in s

Dieser Ansatz erlaubt, ausgehend von der Erdoberflächentemperatur die tiefenabhängige Berechnung der Erdreichtemperatur. Was vernachlässigt wird ist der Einfluss des Windes auf den Wärmeübergang zwischen der Luft und der Erdoberfläche. Darüber hinaus wird der Einfluss der Feuchtigkeit wie z.B. des Grundwassers in diesem Ansatz vernachlässigt. Zur genaueren Betrachtung wäre ein numerisches Modell des Erdreiches wie es z.B. [25] skizziert notwendig.

2.2.6 Vorhandene zonale Einteilung der TRY

Um Deutschland flächendeckend mit Referenzklimadaten abzudecken, ist es sinnvoll Regionen zu bilden innerhalb derer ähnliche klimatische Verhältnisse herrschen. Die Einteilung dieser „typischen“ Regionen kann anhand statistischer und meteorologischer Überlegungen erfolgen wie z.B. in [9]. Eine Einteilung Deutschlands in Regionen wurde vom DWD bereits für die ersten TRY im Jahre 1986 durchgeführt. Dafür wurde 253 Messstationen in der damaligen Bundesrepublik Deutschland (BRD) ausgewertet [8]. Die Erstellung der TRY Regionen erfolgte dann durch eine Faktoren- und Clusteranalyse [8] die Faktorenanalyse wurde hierzu zweimal nacheinander durchgeführt um die Anzahl der Datensätze zu reduzieren [26]. Daraus entstanden die 12 TRY Regionen. Für die neuen Testreferenzjahre aus dem Jahre 2004 wurde dieses Vorgehen beibehal-

ten aber eine größere Datenbasis von ca. 600 Messstationen verwendet [9]. Der auf Basis der statistischen Verfahren entstandene Kartenentwurf wurde dann im Bereich der Zonengrenzen mit phänologischen Karten des DWD und des statistischen Bundesamtes abgeglichen [8]. Phänologische Karten enthalten Informationen über die Dauer des aktiven Pflanzenwachstums, den Zeitpunkt der Laubentfärbung und der Laubentfaltung [8]. Die Aufteilung Deutschlands in die unterschiedlichen Zonen der TRY ist in Bild 8 dargestellt.

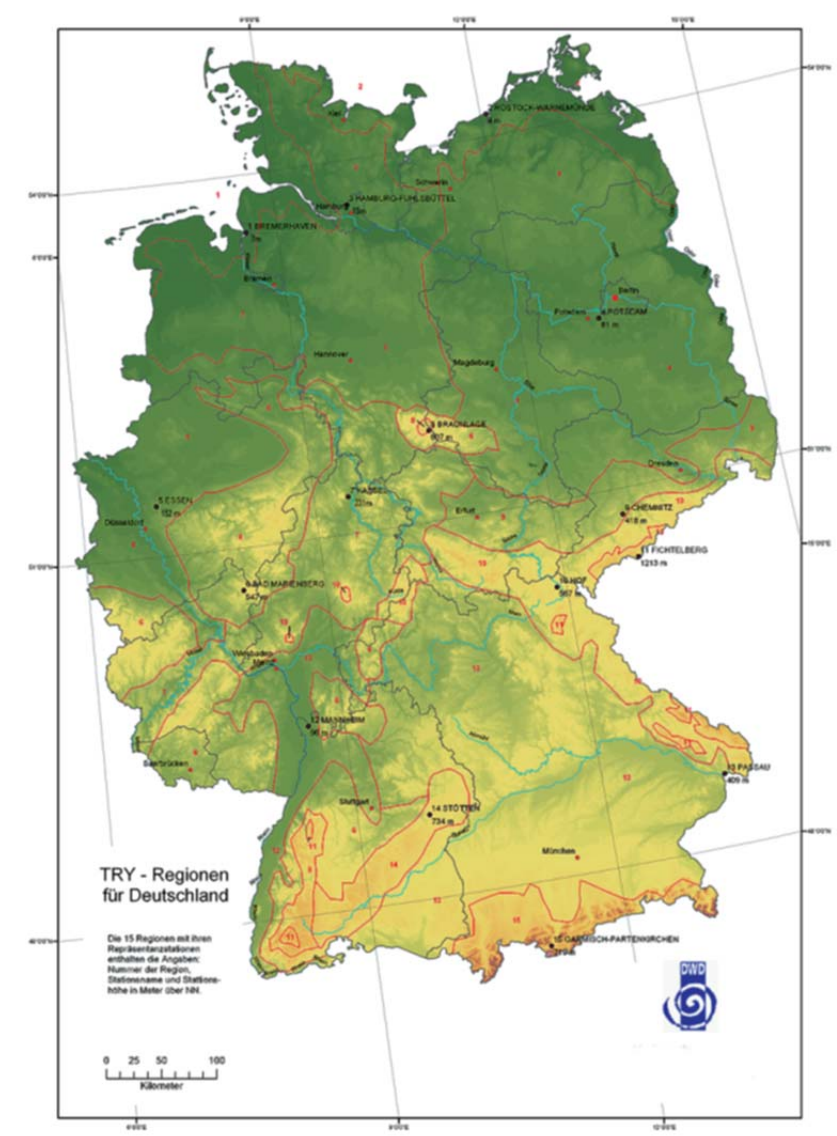


Bild 8:
TRY Regionen für Deutschland aus [9].

Eine andere Möglichkeit, größere Regionen mit Referenzklimadatenätzen abzudecken stellt die Interpolation zwischen benachbarten Messstationen dar. Damit ist es möglich für jeden beliebigen Standort Messdaten zu erzeugen. Die Qualität dieser interpolierten Daten hängt von dem Abstand und der Anzahl

der benachbarten Messstationen ab. Dieses Vorgehen wird derzeit bereits in der Klimadatenbank Meteororm [27] angewandt.

2.2.7 Typische Jahre

Zur Erstellung von Klimareferenzjahren, sogenannten TRY oder auch Typical Meteorological Years (TMY) gibt es verschiedene Ansätze. TMY sind für die USA und angrenzende Staaten verfügbar [28] und werden vor allem in der Gebäudesimulation eingesetzt. Erzeugt wurden die TMY mit einem leicht modifizierten Ansatz der EN ISO 15927-4.

Der DWD nutzt beispielsweise, für die Erstellung seiner Referenzjahre, die Analyse typischer Abfolgen von Großwetterlagen, um das natürliche Verhalten möglichst realitätsnah wiederzugeben [8]. Der Fokus der TRY lag dabei von Anfang an auf der thermischen Simulation von Gebäuden und deren Anlagentechnik. Um die mögliche Verwendung für andere Anwendungen, für die diese Referenzjahre nicht konzipiert wurden, auszuschließen, ist der Niederschlag in den neuen TRY Datensätzen nicht mehr enthalten. In der im Rahmen des Projektes entstandenen Arbeit [29] wurden für den Standort Bremerhaven die TRY aus 1986, 2004 und 2010 sowie Messdaten von 2003 -2010 verglichen. Die Autorin kommt dabei zu dem Schluss, dass sich die TRY durch die fehlenden oder untypischen Niederschlagsdaten nicht zur hygrothermischen Bauteilsimulation eignen. Als Vorschlag wird das gemessene Jahr 2005 als Referenzjahr zur Bewertung ausgewählt und auf Basis der Betrachtung von kritischen Konstruktionen um $-0,25K$ angepasst. Das Jahr 2005 wurde ausgewählt, da sich für dieses Jahr ein mittlerer Wassergehalt in den betrachteten Konstruktionen eingestellt hatte.

Ein anderes Vorgehen stellt die EN ISO 15927-4 vor, deren Vorgehensweise basiert auf statistischen Verfahren wie der kumulativen Verteilungsfunktion (CDF) und der Kennzahl nach Finkelstein und Schafer [30]. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Erstellung eines Referenzjahres für thermische Zwecke. Dieselbe Norm lässt zugleich aber ein Abweichen bei anderen Fragestellungen zu. Da der Schwerpunkt dieses Verfahrens auf der thermischen Gebäudebetrachtung liegt (Heiz- und Kühlsysteme) und wichtige hygrische Klimaparameter wie z.B. der Regen nicht berücksichtigt werden, wird für die Erstellung der hygrischen Referenzjahre (HRY) von der Norm abgewichen.

2.2.8 Folgerungen für die Erstellung der HRY

Die Überprüfung von frei verfügbaren Klimadaten in Kapitel 2.2.1 zeigte, dass Messgrößen wie die Temperatur sehr gut erfasst werden. Andere Messgrößen wie z.B. der Niederschlag oder die Windrichtung weisen dagegen eine deutlich schlechtere Qualität auf. Da eine Aufbereitung dieser Daten nicht in einem vertretbaren Zeitrahmen möglich ist und die frei verfügbaren Klimadaten auch nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, wird von einer Verwendung abgesehen. Auf Grund ihrer besseren Eignung werden kommerzielle Klimadaten für die Erstellung der hygrischen Referenz-Klimadatensätze verwendet. Dafür wer-

den, in geeignetem Umfang, Zugriffs- und Verwertungsrechte für den Datenbestand der Meteomedia AG erworben. Diese wurden wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, aufbereitet bzw. um die atmosphärische Gegenstrahlung ergänzt. Die Verwendung von sensitiven Bauteilen für die Auswahl von geeigneten Referenzklimata wird für die Erstellung der HRY beibehalten.

Die Literaturrecherche im Bereich der Klimafaktoren (vgl. Kapitel 2.2.3) hat gezeigt, dass sich das lokale Mikroklima anders verhalten kann als am Referenzstandort. Mit Mikroklima ist nach der Definition des DWD „das spezielle Klima eines Areals gemeint, das sich in den bodennahen Luftschichten ausbildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung),...“ [31]. Das Areal kann dabei bis zu einigen hundert Meter groß sein [31]. Besonders ausgeprägt ist dies z.B. in innerstädtischen Lagen. Das etablierte Modell zur Berücksichtigung der städtischen Überhitzung nach [14] wurde hierfür im Rahmen des Forschungsprojektes näher betrachtet. Dabei zeigte sich in [15], dass bei größeren Distanzen zwischen der Referenzstation und dem betrachteten Standort die saisonale Abweichung der angepassten Daten zunimmt. Um diese Abweichung möglichst zu minimieren sollte eine gesonderte Anpassungsmethodik nach der Erstellung der eigentlichen HRY erfolgen, die es erlaubt auf besondere örtliche Gegebenheiten einzugehen. Auch bei geringen Distanzen aber unterschiedlichen Expositionen kann es zu Abweichungen kommen. Für geschützte Tallagen und exponierte Berglagen wurde dies am Standortvergleich von Garmisch-Partenkirchen mit dem Hohenpeißenberg deutlich. Aus diesem Vergleich konnten mehrere Dinge abgeleitet werden:

1. Die Standorte können auf Grund ihrer geographischen Unterschiede nicht sinnvoll miteinander verglichen werden oder mit demselben Klimadatensatz bewertet werden.
2. Garmisch-Partenkirchen eignet sich eher zur Beurteilung geschützter Tallagen im Voralpenland wobei hier ggf. die Ausrichtung des Tals zu berücksichtigen ist.
3. Der Hohenpeißenberg hingegen eignet sich zur Beurteilung von exponierten Standorten im Voralpenbereich jedoch auch nicht für das gesamte Voralpenland.
4. Als Referenzstandort für das gesamte Voralpenland sind beide Standorte nicht geeignet. Sollte Garmisch-Partenkirchen dennoch als Einzelstandort erhalten bleiben ist darauf zu achten, dass nur geschützte Tallagen mit einer vergleichbaren Talausrichtung bewertet werden. Eventuell können über Anpassungen im Rahmen des in Kapitel 3 vorgestellten Lokalklimamodells weitere Lagen abgedeckt werden.

Der stichpunktartige Vergleich bzgl. des Einflusses der Nähe zur Küste hat gezeigt, dass Bremerhaven etwas kritischer ist als Bremen und damit als Referenzstandort in Kapitel 2.3 betrachtet werden sollte. Der Vergleich der Klimadaten an den Standorten Dresden und Oschatz hat gezeigt, dass die Klimadaten, mit

Ausnahme des Schlagregenangebots relativ ähnlich sind. Da sich lokale Unterschiede auf Grund der Schlagregenexposition ergeben können sollte Oschatz als Vergleichsstandort für die nachfolgende Erstellung der HRY beibehalten werden. Generell haben die stichpunktartigen Vergleiche der Klimadaten gezeigt, dass sich lokal unterschiedliche Bedingungen einstellen können auch wenn die geografische Nähe dies zuerst nicht vermuten lassen. Um dies genauer zu berücksichtigen sind detaillierte Vergleiche notwendig. Diese werden ausführlich in Kapitel 3 beschrieben.

Kapitel 2.2.6 hat gezeigt, dass es möglich ist größere Regionen klimatisch durch einen Referenzstandort zu beschreiben. Die Interpolation des Standortklimas aus den umgebenden Stationen ist hingegen auf Grund der zu geringen Anzahl an zur Verfügung stehenden Datensätzen nicht sinnvoll. Durch die Wahl von Referenzstationen die nahe den TRY Referenzstationen liegen kann für die HRY ebenfalls die zonale Einteilung des DWD verwendet werden. Ob es möglich ist diese Zonen weiter zusammenzufassen wird später in Kapitel 2.4 geprüft.

Wenn es, auf Grund der Ergebnisse einer Bauteilsimulation notwendig wird einzelne Klimaelemente anzupassen ist es notwendig, dass passende Klimaelemente zur Anpassung auszuwählen. Dabei muss das Risiko von Fehlinterpretationen auf Grund von Scheinkorrelationen möglichst minimiert werden. „Von einer Scheinkorrelation spricht man, wenn man eine hohe Korrelation zwischen zwei Merkmalen beobachtet, die inhaltlich nicht gerechtfertigt ist.“ [32]. Dies kann z.B. entstehen wenn ein hochkorreliertes weiteres Merkmal die beiden betrachteten Merkmale beeinflusst, dieses Merkmal in der Analyse aber nicht berücksichtigt wurde [32]. Um dies näher zu untersuchen wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Betrachtet wurden dabei die 17 Klimastandorte und die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Konstruktionen. Dabei zeigte sich, dass die Lufttemperatur den größten Einfluss auf den Wassergehalt der betrachteten Konstruktionen hat. Den zweitgrößten Einfluss hatte die Globalstrahlung bzw. die atmosphärische Gegenstrahlung bei der nördlich orientierten Außenwand. Sind im weiteren Projektverlauf Anpassungen der Klimadaten notwendig, dann sollte zuerst die Temperatur verändert werden. Der Aspekt der Korrelation von einzelnen Klimaparametern untereinander scheint bisher eher von untergeordneter Bedeutung gewesen zu sein. Die einschlägige Literatur konzentriert sich hier auf die jeweils wichtigsten Parameterpaare z.B. [22] auf den Zusammenhang von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit oder [13] auf den Einfluss der Standorthöhe auf die Lufttemperatur. Eine umfassende Beurteilung der Wechselwirkung aller in der Praxis vorhandenen Klimaparameter ist auf Basis der vorliegenden Literatur daher nicht möglich. Daher sollte die zonale Einteilung nicht auf der alleinigen Basis von statistischen Kennzahlen sondern auch am real zu erwartenden Bauteilverhalten erfolgen.

Zur Bestimmung der Erdreichtemperaturen gibt es verschiedene Ansätze welche z.B. die Ableitung der ungestörten Erdreichtemperatur aus der Lufttemperatur erlauben. Da im realen Anwendungsfall z.B. einer Kellerwand im Erdreich aber keine ungestörte Erdreichtemperatur mehr vorliegt sind diese nur bedingt

anwendbar. Darüber hinaus gibt es weitere Einflussfaktoren wie z.B. die Oberflächenalbedo, die Windanströmung und die Feuchtigkeit des Erdreiches die sich in einem derartigen Ansatz nicht abbilden lassen. Die Lösung hierfür wäre die Simulation eines eigenen Erdreichmodells wie in [25] vorgeschlagen. Dies würde aber den Rahmen des Forschungsprojektes überschreiten und muss daher als zukünftiger Forschungsbedarf definiert werden.

Um das gesamte Gebiet der BRD, mit den HRY abzudecken wird auf die zonale Einteilung der Testreferenzjahre (TRY) des DWD zurückgegriffen. Eine eigene Einteilung erscheint nicht erforderlich und ist auf Grund der geringen Anzahl an Messstationen nicht möglich. Zur Erstellung der Referenzjahre werden Messdaten für die 15 DWD-Regionen jeweils für einen Zeitraum von 8 Jahren aufbereitet. Bei der Auswahl der Standorte wird darauf geachtet, dass diese möglichst nahe an den Referenzstandorten der TRY des Deutschen Wetterdienstes (DWD) liegen und eine ähnliche lokale Exposition (Berglage, Stadtlage, etc.) haben. Zur Veranschaulichung sind die jeweiligen Standorte der TRY und der erworbenen Wetterdaten nachfolgend in Bild 9 gegenübergestellt.

▽ TRY

+ Messdaten

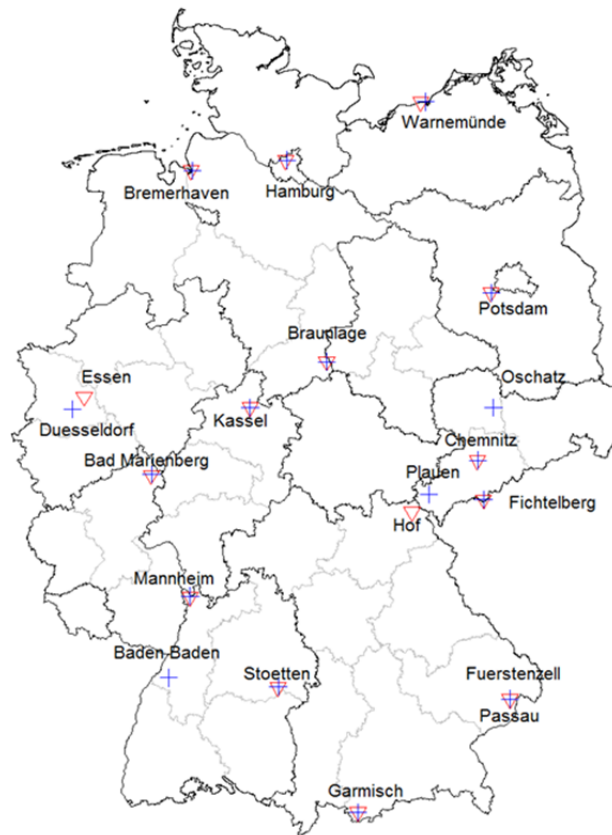


Bild 9:
Standorte der TRY Repräsentanz Stationen und der verwendeten Messstationen der Meteomedia AG.

Wie Bild 9 verdeutlicht, stimmen die Standorte zwischen beiden Datenquellen geographisch sehr gut überein. Auch die lokale Exposition z.B. Höhenlage, Umgebungsbebauung oder die Nähe zu Gewässern ist identisch zu den Referenzstandorten der TRY aus dem Jahr 2004. Zusätzlich sind mit Baden-Baden und Oschatz noch zwei Vergleichsstandorte enthalten. Dadurch ist gewährleistet, dass für jede „Zone“ eines TRY bzw. zu jedem Bezugsklima zunächst auch ein Hygrisches Referenzjahr erzeugt wird. Im späteren Verlauf wird überprüft ob sich, für hygrothermische Belangen, einzelne Zonen zusammenfassen lassen.

Das bestehende Verfahren zur Erstellung der mittleren Jahre auf Basis der EN ISO 15927-4 hat den Schwerpunkt auf der rein thermischen Bewertung von Gebäuden. Es ist daher nicht direkt für die hygrothermische Bauteilbewertung verwendbar. Das Vorgehen des DWD für die Erstellung der TRY basierend auf langjährigen Messdaten und auf der Abfolge der Großwetterlagen vgl. Kapitel 2.2.1. Auf Grund der hierfür notwendigen, sehr umfangreichen Datenlage ebenfalls kann dieses Vorgehen in diesem Projekt nicht angewandt werden.

Darüber hinaus liegt auch bei den TRY der Schwerpunkt auf thermischen Fragenstellungen. Es muss daher ein anderes Vorgehen zur Erstellung von HRY definiert werden. Das in [29] angewandte Verfahren, ein mittleres gemessenes Jahr auf Basis der Bewertung des hygrothermischen Bauteilverhaltens zu wählen, scheint hierzu ein vielversprechender Ansatz zu sein. Ein ähnliches Vorgehen wurde u.a. in [33] zur Erstellung von Feuchtereferenzjahren für Kanada angewandt. Abweichend von [29] sollte jedoch ein für alle Konstruktionen möglichst kritisches Jahr gewählt werden um trotz des beschränkten Messzeitraumes auf der sicheren Seite zu liegen.

2.3 Erstellung hygrischer Referenzjahre (HRY)

In diesem Kapitel wird die Erstellung der hygrischen Referenzjahre (HRY) beschrieben. Wie in Kapitel 2.2.8 festgestellt wurde ist die Beurteilung von sensiblen Konstruktionen ein geeignetes Auswahlkriterium für HRY. Daher sollen nun zunächst die hierfür verwendeten Konstruktionen genauer beschrieben werden.

2.3.1 Sensitive Konstruktionen zur Auswahl der HRY

Für die Validierung anhand der hygrothermischen Bauteilsimulation wurden verschiedene kritische Konstruktionen ausgewählt. Diese reagieren aus der Erfahrung heraus sensitiv auf einzelne Klimatelemente.

Blechdach

Das nördlich orientierte Blechdach hat eine Dachneigung von 50° und eine Blecheindeckung. Durch diese wird gleichzeitig der Einfluss von Schlagregen abgeschaltet. Darüber hinaus wird das Austrocknungspotential der darunter liegenden Holzschalung in Richtung der Außenseite minimiert. Daraus ergibt sich, dass die kritische Schicht dieser Konstruktion, hinsichtlich der Schadensanfälligkeit, die äußere Holzschalung ist. Für die verwendete Weichholzschalung ist ein Grenzwert des Wassergehaltes von 20 M. % nach [34] einzuhalten. Die Strahlungsabsorptionszahl (α) wird mit 0,6 und die langwellige Strahlungsemission (ϵ) mit 0,4 berücksichtigt. Auf Grund der metallischen Oberflächeneigenschaften fällt die Strahlungsemission geringer aus als z.B. bei dem ebenfalls betrachteten Flachdach. Der vollständige Aufbau ist im Anhang in Tabelle 53 aufgeführt.

Flachdach

Bei der Flachdachkonstruktion handelt es sich um eine Holzbauvariante mit 28 cm Zwischensparrendämmung und einer hellen Dachbahn als äußerste Dachhaut (vgl. Tabelle 54). Die kritische Schicht ist hier die verwendete OSB-Schalung (*oriented strand board*). Diese Schicht ist kritisch, da sie wenig Rücktrocknungspotential besitzt. Grund hierfür ist die relativ dampfdichte Dachbahn in Kombination mit den verminderten Oberflächentemperaturen durch die helle Farbgebung der Außenoberfläche. Als Holzwerkstoff wird für diese der Grenz-

wassergehalt von 18 M. % nach der DIN 68800-2 [34] verwendet. Bleibt der Wassergehalt unterhalb dieses Grenzwertes kann eine Schädigung des Holzwerkstoffes ausgeschlossen werden. Im Gegensatz zur Blechdach Variante ist zusätzlich die Strahlungsabsorption für eine helle Oberfläche ausgelegt ($\alpha = 0,3$, $\varepsilon = 0,9$). Der vollständige Aufbau ist im Anhang in Tabelle 54 aufgeführt.

Gründach

Auf Grund des geringen Rücktrocknungspotentials reagiert diese Konstruktion äußerst sensibel auf Witterungseinflüsse. Darüber hinaus sorgt das aufgenommene und im Substrat gespeicherte Wasser (für die Simulation als interne Feuchtigkeitsquelle berücksichtigt) für eine ständige Feuchtelast auf der Außenseite der Konstruktion. Die kritische Schicht ist hier die OSB Schalung an der Außenseite unterhalb des Substrates. Als Holzwerkstoff wird für diese der Grenzwassergehalt von 18 M. % nach [34] verwendet. Bleibt der Wassergehalt unterhalb dieses Grenzwertes kann eine Schädigung des Holzwerkstoffes ausgeschlossen werden. Der vollständige Aufbau ist im Anhang in Tabelle 55 aufgeführt.

Nordwand

Für einige Analysen wurde zusätzlich eine ungedämmte Nordwand aus Kalksandstein betrachtet. Bewertet wurde hierbei die relative Feuchte an der inneren Oberfläche des Kalksandsteins. Überschreitet diese den Grenzwert von 80% besteht nach der DIN 4108-3 [35] das Risiko von Schimmelbildung. Die Regenwasserabsorption wird vernachlässigt. Die Konstruktion ist nach Norden orientiert und außenseitig nicht verputzt. Die Nordorientierung wurde gewählt, da hier die solare Einstrahlung am geringsten ist. Die kurzwellige Strahlungsabsorption α wird mit 0,4 und die langwellige Strahlungsemission ε mit 0,9 berücksichtigt. Der vollständige Aufbau ist im Anhang in Tabelle 56 aufgeführt.

Westwand

In diesem Fall wird ein nachträglich energetisch verbessertes Vollziegelmauerwerk genauer betrachtet. Die Dämmmaßnahme ist hierbei eine nachträglich angebrachte Innendämmung. Die Innendämmung senkt die äußere Oberflächentemperatur des Mauerwerks und verringert gleichzeitig das Rücktrocknungspotential. Daher wird hier der mittlere Wassergehalt des Vollziegelmauerwerks als kritische Schicht betrachtet. Der Haupteinflussfaktor ist hierbei die Schlagregenbelastung auf der Oberfläche. Der vollständige Aufbau ist im Anhang in Tabelle 57 aufgeführt.

2.3.2 Auswahl eines kritischen Jahres

In einer, im Rahmen dieses Projekts als Abschlussarbeit ausgeführten Voruntersuchung [29] wurde am Beispiel des Klimastandorts Bremerhaven ein Verfahren entwickelt, um aus realen Messreihen ein kritisch repräsentatives Messjahr auszuwählen, das ggf. als Referenzklima geeignet sein kann. Dabei wurde je

Standort und Konstruktion der gemittelte Wassergehalt der jeweils kritischen Schicht ausgewertet. Die betrachteten Konstruktionen waren das in Kapitel 2.3.1 beschriebene Blechdach, Gründach, Nord- und Westwand. Um einen bewertbaren Kurvenverlauf zu erhalten wurde das jeweilige Messjahr 8mal wiederholt. Dieses Vorgehen wurde dann von Bremerhaven auf die übrigen 17 Standorte übertragen. Exemplarisch ist dies nachfolgend in Bild 10 für die Westwand am Standort Chemnitz dargestellt.

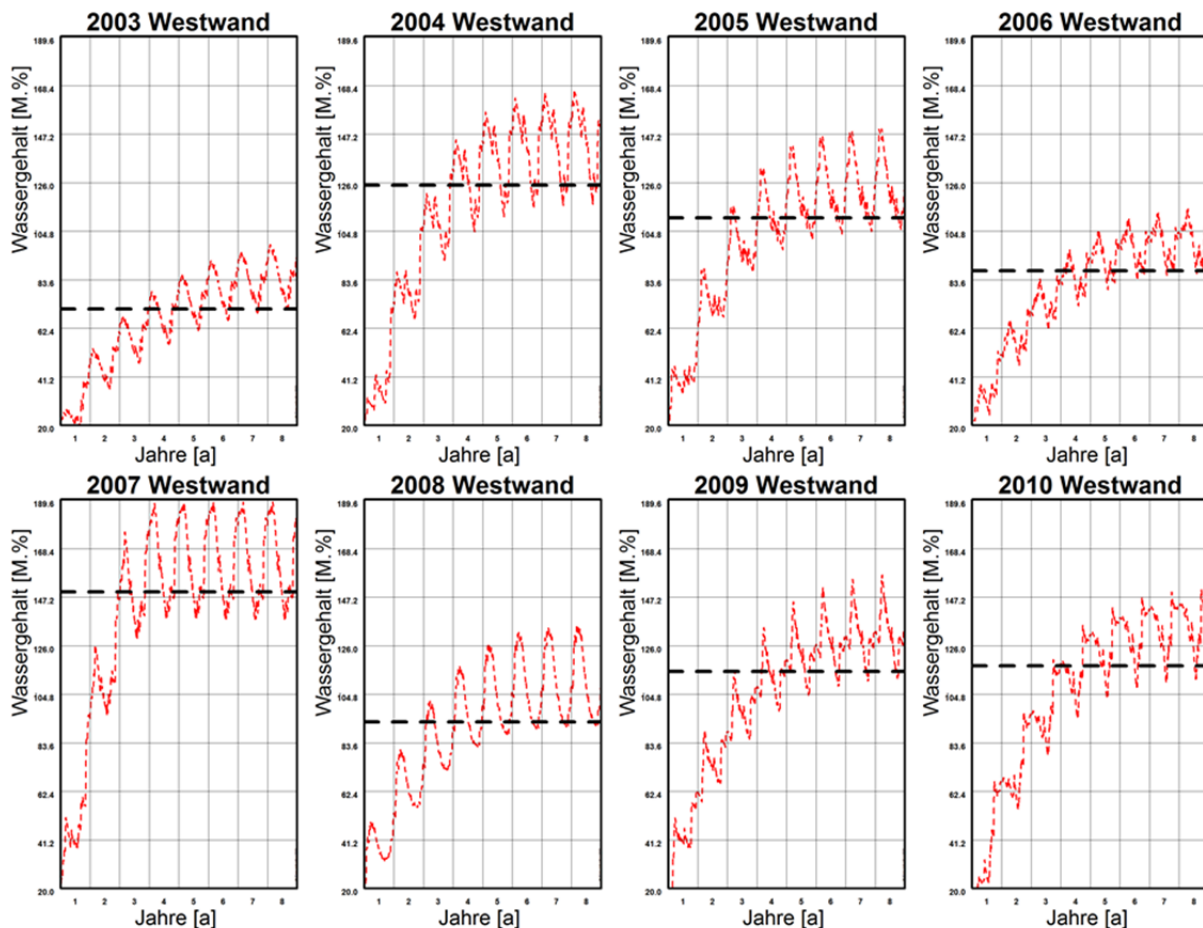


Bild 10:
Vergleich der Wassergehalte der westlich orientierten Außenwand am Standort Chemnitz für die Jahre 2003 -2010. Die schwarze Gerade entspricht dem Mittelwert über 8 Jahre Berechnungsdauer.

Wie obige Abbildung exemplarisch veranschaulicht stellt sich der höchste und damit kritische Wassergehaltsverlauf bei Verwendung des Jahres 2007 ein. Dieses Vorgehen wurde auf die verbleibenden 67 Kombinationen aus Standort und Konstruktion angewandt. Dabei zeigte sich keine klare Tendenz für ein Jahr je Standort. Zwar gibt es gemessene Jahre wie z.B. 2010 oder 2004 die häufiger zu kritischen Bedingungen führen als andere Jahre dies ist jedoch nicht für alle Konstruktionen an einem Standort so. Es ist daher nicht möglich aus

den vorhandenen Daten ein kritisches Jahr auszuwählen und dieses als Referenzjahr zu verwenden.

2.3.3 Statistische Auswahl eines hygrischen Referenzjahres auf Monatsbasis

Nachdem die Wahl eines einzelnen kritischen Jahres zu keinem überzeugenden Ergebnis geführt hat, wird als nächstes die Möglichkeit geprüft ein Hygrisches Referenzjahr (HRY) aus einzelnen Monaten zusammenzusetzen. Zur Erstellung der HRY werden die Messdaten der Meteomedia AG verwendet, welche wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben aufbereitet wurden. Der größte Unterschied zu den TRY des DWD besteht dabei darin, dass die bisherigen Referenzjahre rein auf Basis der Temperatur zusammengestellt wurden. Hygrische Kenngrößen, wie der Niederschlag, wurden dabei nicht berücksichtigt. Dieser ist daher auch in neueren TRY nicht mehr enthalten. Die Zusammenstellung der hygrischen Referenzjahre erfolgt hingegen auf Basis der Temperatur und des Niederschlags. Die Relevanz der gewählten Klimaelemente für die betrachteten Konstruktionen wurde in einer Sensitivitätsanalyse [20] untersucht (vgl. Kapitel 2.2.4). Die Untersuchung bestätigte den großen Einfluss der Temperatur für alle Konstruktionen. Die Regenmenge ist dagegen z.B. für berechnete Außenwände, insbesondere mit Innendämmung, aber auch für Gründächer ein wichtiger Parameter.

Nach den Voruntersuchungen in Kapitel 2.2 wurde ein mehrstufiges Verfahren zur Erstellung der HRY gewählt. Im ersten Schritt wird basierend auf dem Messzeitraum ein mittlerer Monat gebildet. Anschließend werden die einzelnen Jahresmonate mit diesem mittleren Monat, auf Basis von statistischen Kennzahlen, verglichen. Ausgewählt wird der Monat welcher die geringste Abweichung zu dem mittleren Monat aufweist. Aus diesen standortspezifischen Monaten wird dann im nächsten Schritt ein mittleres Jahr für jeden Standort erstellt und numerisch aufbereitet. Das so entstandene vorläufige Referenzjahr wird dann im nächsten Schritt durch die Beurteilung des hygrothermischen Bauteilverhaltens von kritischen Konstruktionen auf seine Tauglichkeit geprüft. Diese in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Konstruktionen verhalten sich aus der Erfahrung heraus unterschiedlich kritisch für verschiedene Klimaelemente. Beispielsweise reagiert ein Gründach sensibel auf die vorhandene Normalregenmenge. Für die Betrachtung werden die Wassergehalte einzelner Schichten bei Verwendung der mittleren Jahre und bei Verwendung des gemessenen Außenklimas miteinander verglichen.

Das genaue Vorgehen zur Erstellung der Feuchtereferenzjahre ist zum besseren Verständnis nachfolgend in Bild 11 als vereinfachtes Ablaufschema dargestellt.

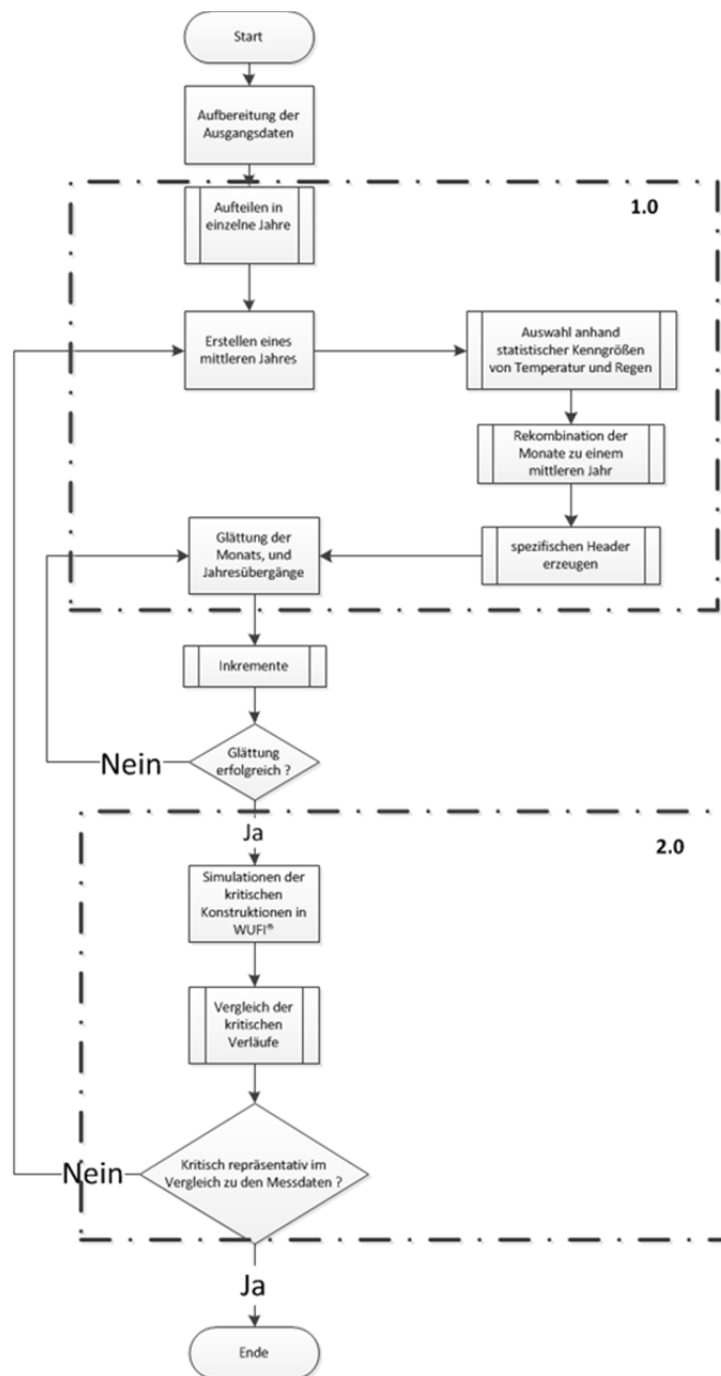


Bild 11:
Vereinfachter Algorithmus zur Erstellung eines Hygrischen Referenzjahres (HRY).

Wie Bild 11 verdeutlicht, erfolgt die Auswahl der repräsentativen Monate auf Basis von statistischen Kenngrößen der Außenlufttemperatur und des Niederschlags. Zur Automatisierung des Kernbereiches (1.0 in Bild 14) wird die Open Source Statistik Software R [36] verwendet. Auf Grund der Bedeutung für den weiteren Ablauf wird auf diesen Punkt nun etwas genauer eingegangen.

Am Beispiel der Außenlufttemperatur wird die Auswahl anhand der Boxplots durchgeführt. In einem Boxplot oder auch Box-Whiskers-Plot nach [37] werden in der zentralen Box das 25%-Quartil, der Median und das 75%-Quartil des Datensatzes dargestellt. Die sogenannten „Whiskers“ kennzeichnen das Minimum und das Maximum eines Datensatzes. Diese Plots wurden je Standort, Jahr und Monat für den verwertbaren Messzeitraum von 2003 - 2010 erstellt und mit dem jeweiligen mittleren Monat verglichen. Der mittlere Monat wurde dabei über alle Monate Januar des Messzeitraums gebildet. Zur Veranschaulichung ist eine exemplarische Gegenüberstellung für den Monat Januar nachfolgend in Bild 12 dargestellt.

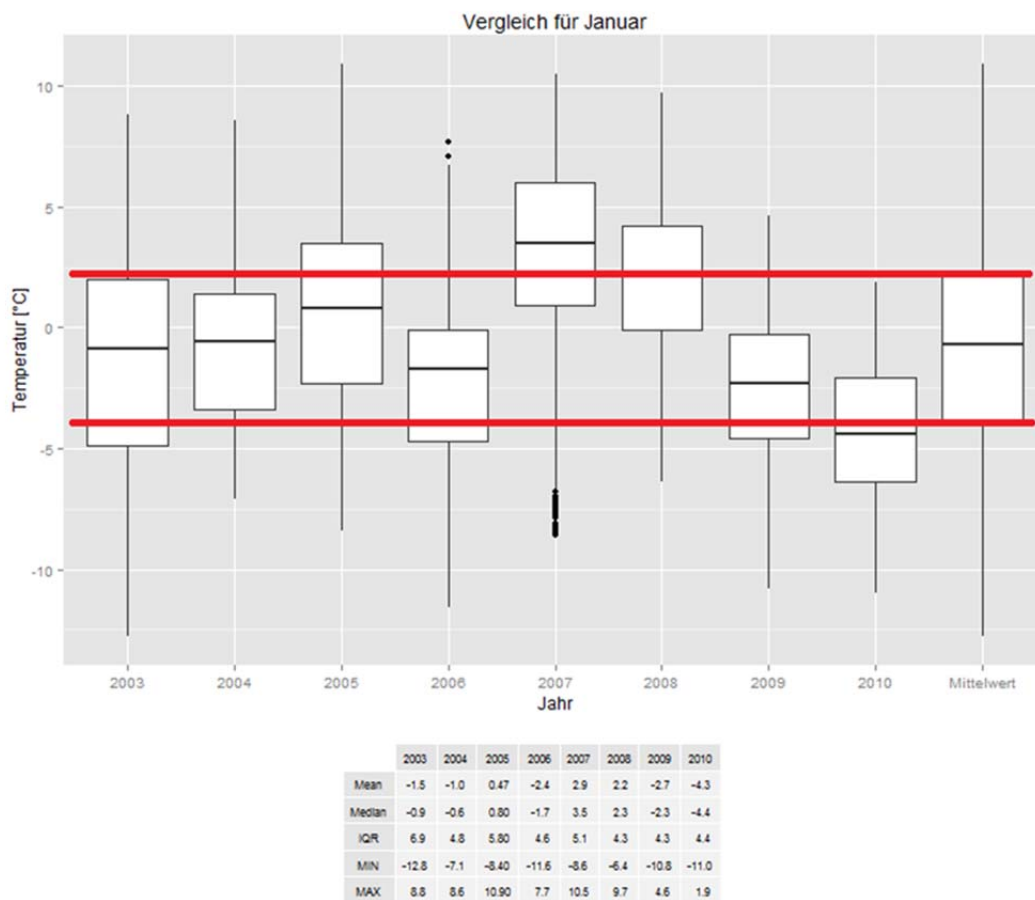


Bild 12:

Exemplarischer Vergleich der Boxplots der Temperatur für den Monat Januar der 8 ausgewerteten Jahre von 2003 bis 2010 mit dem mittleren Juni über den gesamten Zeitraum. Unten dargestellt sind die wichtigsten Kennzahlen der einzelnen Boxplots für die jeweiligen Jahre.

Der Monat, welcher am besten mit dem mittleren Monat übereinstimmt, wird jeweils für das mittlere Jahr ausgewählt. Die Güte der Übereinstimmung ergibt sich dabei aus dem Vergleich der Kennzahlen des betrachteten Monats mit denen des mittleren Monats. Hierfür wird für jeden Kennwert die Abweichung

vom mittleren Monat bestimmt. Damit ergibt sich je Kennzahl ein Ranking der einzelnen betrachteten Jahre, das Ranking richtet sich dabei nach dem Betrag der Abweichung vom Mittelwert. Bezogen auf das obige Beispiel zeigt das Jahr 2004 die geringste Abweichung und wird daher für diese Kenngröße als repräsentativ ausgewählt. Das gleiche Vorgehen wird auch auf den Niederschlag angewandt, die statistischen Maßzahlen sind hier, das arithmetische Mittel, das Maximum, das 99%-Percentil und die kumulierte Regenmenge. Am Ende wird der Jahresmonat ausgewählt der am häufigsten repräsentativ für alle Kennzahlen war.

Die für die HRY, nach diesem Vorgehen, ausgewählten Monate sind nachfolgend in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4:
Ergebnis der Monatsauswahl nach dem in Bild 14 dargestelltem Vorgehen.

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Bad Marienberg	2004	2004	2010	2010	2006	2005	2003	2008	2008	2006	2010	2009
Braunlage	2003	2009	2004	2004	2009	2008	2003	2007	2004	2008	2008	2004
Bremerhaven	2004	2009	2004	2010	2009	2006	2009	2007	2009	2004	2008	2010
Chemnitz	2003	2009	2005	2004	2009	2010	2003	2008	2004	2008	2009	2009
Düsseldorf	2005	2009	2008	2004	2006	2005	2003	2008	2003	2008	2004	2009
Fichtelberg	2006	2004	2004	2005	2009	2010	2009	2007	2005	2008	2008	2007
Fürstzell	2005	2009	2008	2004	2009	2006	2007	2008	2004	2008	2004	2003
Garmisch-Partenkirchen	2003	2009	2008	2005	2006	2007	2009	2006	2010	2008	2008	2010
Hamburg	2003	2009	2004	2005	2006	2010	2009	2007	2004	2008	2008	2005
Kassel	2008	2009	2004	2004	2006	2006	2009	2008	2010	2008	2010	2007
Mannheim	2007	2010	2010	2004	2004	2007	2007	2008	2003	2008	2008	2007
Plauen	2003	2010	2007	2006	2006	2010	2005	2008	2005	2008	2009	2005
Potsdam	2003	2009	2003	2004	2006	2008	2003	2005	2005	2008	2008	2003
Stötten	2004	2010	2008	2004	2009	2008	2009	2008	2006	2007	2008	2005
Warnemünde	2005	2003	2010	2010	2006	2006	2004	2010	2006	2008	2006	2005

Der nächste Schritt nach der Zusammenstellung der mittleren Jahre ist die weitere Bearbeitung zur Erstellung eines lückenlos zusammenhängenden Gesamtklimadatensatzes aus den einzelnen Monaten. Um numerische Probleme auch für zweidimensionale Bauteilsimulationen zu minimieren, wurden die Übergänge zwischen den einzelnen Monaten, für die Temperatur und die relative

Luftfeuchtigkeit, geglättet wenn die Monate aus unterschiedlichen Ursprungsjahren stammen. Dies ist erforderlich, weil bei diesen Klimaelementen im Unterschied zu z.B. Strahlung und Niederschlag bei realen Messdaten meist keine größeren Sprünge von einer Stunde zu nächsten auftreten können. Am nachfolgenden Beispiel in Bild 13 wird dies für den Monatsübergang von Januar 2003 an Februar 2009 veranschaulicht. Durch die Zusammenstellung des mittleren Jahres aus Einzelmonaten von unterschiedlichen Jahren kann es am Monatsübergang mitunter zu einer sprunghaften Veränderung eines Klimaparameters kommen. Um dies auszugleichen werden gewichtete Mittelwerte, wie in [8] beschrieben, verwendet. Dabei werden die 24 h des Monatsüberganges näher betrachtet. Die Gewichtung des folgenden Monats steigt im gleichen Maße wie die des aktuellen Monats abnimmt. Für den Standort Baden-Baden ist dieses Vorgehen für den Monatsübergang von Januar 2003 auf Februar 2009 nachfolgend in Bild 13 dargestellt.

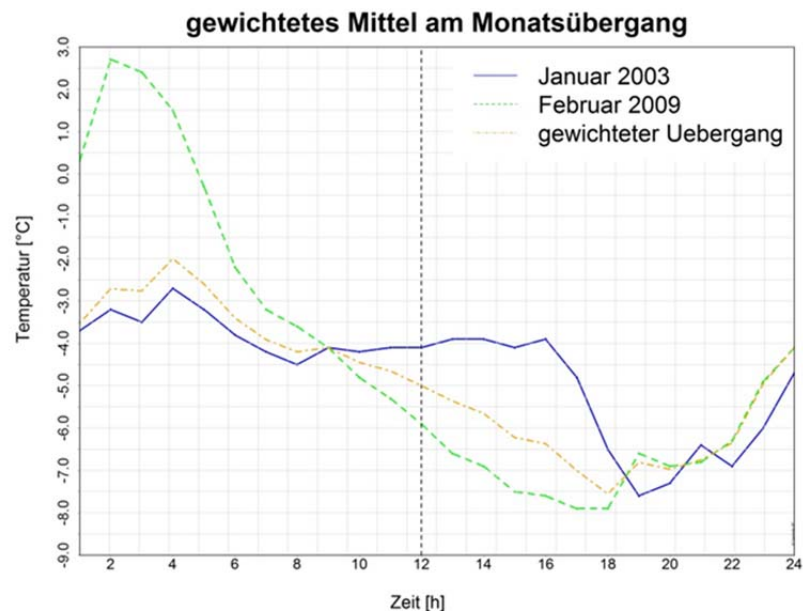


Bild 13:
Monatsübergang am Standort Baden-Baden von Januar 2003 auf Februar 2009.

Die Anpassung wird für die stetigen Messgrößen Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchte vorgenommen. Bei den diskontinuierlichen Größen z.B. Globalstrahlung oder Normalregen treten im „normalen“ Tagesverlauf bereits große Schwankungen auf, sodass die zusätzlichen Schwankungen am Monatsübergang nicht ins Gewicht fallen und daher auch nicht korrigiert werden.

Wird ein Zeitraum betrachtet, welcher länger als ein Jahr ist, ist es notwendig ein Referenzjahr mehrfach hintereinander zu verwenden. Dies führt dazu, dass auch der Jahresübergang (31. Dezember auf 1. Januar) geglättet werden muss

um dort keine numerischen Probleme zu erzeugen. Für die Glättung des Jahresübergangs wurde jeweils zwischen 12:00 am 31. Dezember und 12:00 am 1. Januar linear interpoliert. Für den Standort Bad Marienberg und den Übergang von Dezember 2003 auf Januar 2009 ist dies nachfolgend in Bild 14 dargestellt.

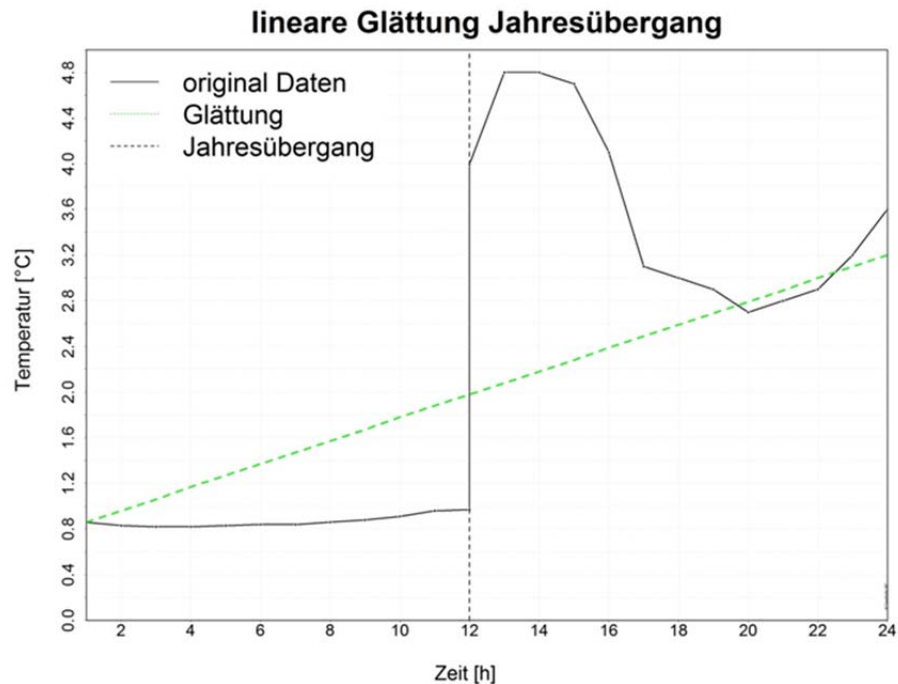


Bild 14:
Exemplarische Glättung eines Jahresüberganges am Standort Bad Marienberg.

2.3.4 Überprüfung und Modifikation der Datensätze anhand des hygrothermischen Bauteilverhaltens

Der zweite Schritt nach der Erstellung der vorläufigen Referenzjahre ist die Überprüfung Anhand des hygrothermischen Bauteilverhaltens. In Bild 11 entspricht dies dem Bereich 2.0. Dabei wird die Qualität der HRY anhand des Vergleiches des Wassergehaltes der kritischen Schicht spezifischer Konstruktionen überprüft. Hierfür werden die Simulationsergebnisse auf Basis der realen Messreihen mit denen des zusammengestellten HRY verglichen. Die für den Vergleich gewählten Konstruktionen sind im vorherigen Kapitel 2.3.1 beschrieben.

Diese Konstruktionen wurden ausgewählt, da sie aus der langjährigen Erfahrung heraus besonders kritisch auf einzelne Klimatelemente reagieren. Für mitteleuropäische Verhältnisse ist z.B. die Schlagregenexposition ein entscheidender Faktor für die Funktionsfähigkeit einer westlich orientierten Außenwand, da die Hauptschlagregenbelastung meist im Westen auftritt. Der jeweils vollständige Aufbau ist im Anhang in Tabelle 53 bis Tabelle 57 aufgeführt. Für die Kon-

struktionen wurden folgende Randbedingungen gewählt. Als Außenklimata werden zum einen das gemessene Klima über den achtjährigen Zeitraum und zum anderen acht Mal hintereinander das mittlere Jahr verwendet. Als Innenklima werden konstante Bedingungen (Lufttemperatur 20 °C; 50 % r.F.) gewählt. Für die Konstruktionen wird von einer Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 50 % r.F. ausgegangen. Würde ein vom Außenklima abgeleitetes Innenraumklima wie z.B. nach DIN 15026 [4] verwendet, hätte das Außenklima einen stärkeren Einfluss auf das betrachtete Bauteil, da in diesem Fall auch das Innenraumklima indirekt durch das Außenklima beeinflusst wird. Real beeinflusst das Außenklima zwar auch das Innenklima, weswegen diese Abhängigkeiten in die entsprechenden Normen aufgenommen wurden, da hier jedoch keine Konstruktionen bewertet werden, sondern lediglich die Klimadaten selbst, ist diese Maßnahme in diesem Fall trotzdem vertretbar.

Für das Blechdach, das Flachdach, das Gründach und die westlich orientierte Außenwand werden nun die Wassergehalte der kritischen Schichten an den einzelnen Standorte verglichen. Die beiden Standorte Oschatz und Baden-Baden werden erst für die zonale Einteilung mit betrachtet. Ein HRY wird dann als kritisch repräsentativ angesehen, wenn es zu geringfügig höheren Wassergehalten führt als die Messdaten oder zur gleichen Bewertung führen würde. Exemplarisch für den Standort Fichtelberg ist dies nachfolgend in Bild 15 dargestellt.

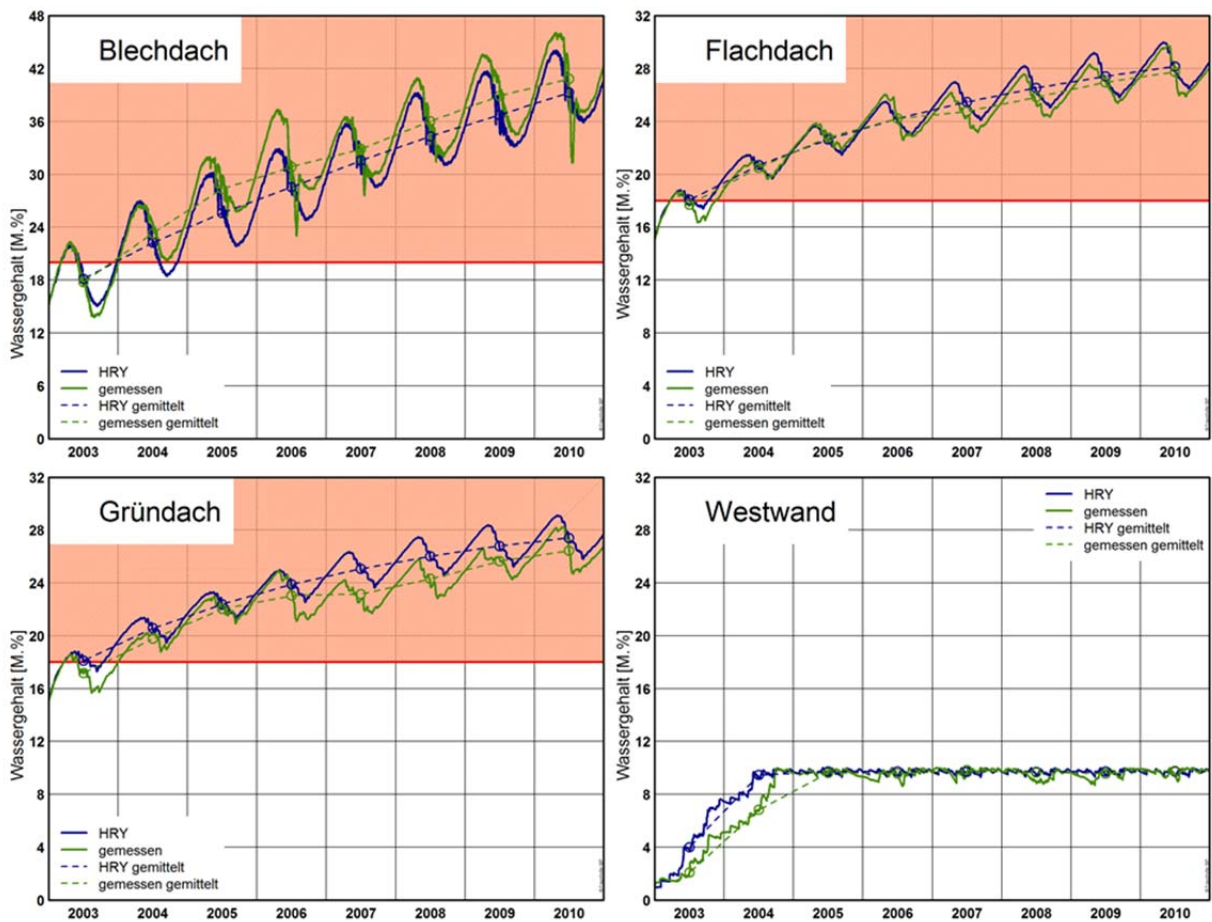


Bild 15:
Vergleich der Wassergehalte am Standort Fichtelberg für vier kritische Konstruktionen. In blau dargestellt, die Ergebnisse bei Verwendung der HRY in grün die resultierenden Wassergehalte bei Verwendung der Messdaten.

Für das betrachtete Blechdach zeigt sich, dass während der Jahre 2005 und 2006 bei Verwendung der Messdaten höhere Wassergehalte auftreten. Da die Konstruktion aber bereits zu Beginn des Jahres 2004 als funktionsunfähig eingestuft werden würde kann auf eine weitere Anpassung der Klimadaten verzichtet werden. Solche vereinzelt auftretenden extremen Jahre können nicht mit HRY berücksichtigt werden, hierzu sind gesonderte kalte Jahre notwendig. Deren Erstellung wird in Kapitel 2.5 beschrieben. Dies gilt natürlich auch im Umkehrschluss für die Bewertung von funktionsfähigen Konstruktionen wie z.B. das Blechdach am Standort Düsseldorf welches in Bild 16 dargestellt ist.

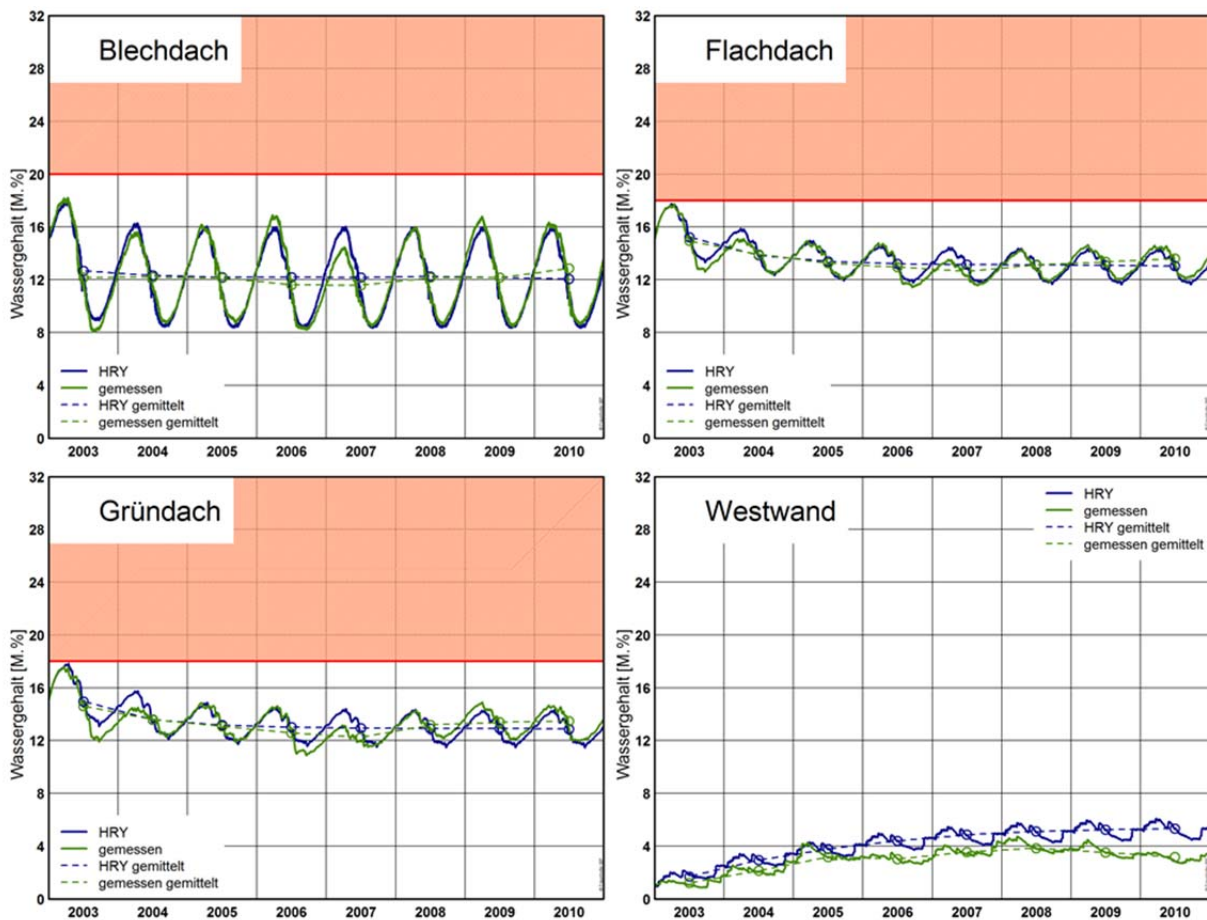


Bild 16:

Vergleich der Wassergehalte am Standort Düsseldorf für vier kritische Konstruktionen. In Blau dargestellt, die Ergebnisse bei Verwendung der HRY in Grün die resultierenden Wassergehalte bei Verwendung der Messdaten.

Für diesen Standort würde das Blechdach basierend auf beiden Datensätzen als funktionsfähig eingestuft. Die Abweichung in den Jahren 2006 und 2009 hat keinen Einfluss auf die Bewertung des Bauteils. Für die Berücksichtigung solcher extremen Jahre muss ein gesondertes Vorgehen entwickelt werden. Dies wird im späteren Verlauf im Kapitel 2.5 beschrieben.

Nachdem die Voruntersuchungen in Kapitel 2.2 gezeigt haben, dass für das Voralpenland weder Garmisch-Partenkirchen noch der Hohenpeißenberg, aus hygrothermischer Sicht repräsentative Bedingungen erzeugen wird diese Region genauer betrachtet. Der Vergleich des Standortes Garmisch-Partenkirchen mit dem Standort Hohenpeißenberg hat gezeigt, dass vor allem die Schlagregenbelastung auf dem Hohenpeißenberg deutlich höher ausfällt als dies auf Basis eines Referenzjahres für Garmisch-Partenkirchen zu erwarten wäre. Die Schlagregenexposition ist in Garmisch-Partenkirchen durch die geschützte Tal-lage im Vergleich zum exponierten Hohen Peißenberg deutlich geringer. Durch seine exponierte Berglage im Bereich des Alpenvorlandes bildet der Hohenpeißenberg, bezogen auf den Schlagregen allerdings den anderen Extremfall ab. Daher ist der Hohen Peißenberg ebenfalls nicht als Repräsentanz Standort

für diese Zone verwendbar. Auf Basis der folgenden geografischen Faktoren wurden daher zwei alternative Standorte ausgewählt:

1. Im Voralpenland gelegen
2. Keine ausgeprägte Tallage
3. Keine ausgeprägte exponierte Berglage
4. Höher gelegen als Fürstzell

Aufgrund dieser Kriterien werden die beiden Standorte Oberstaufen und Lindenberg ausgewählt. Beide Standorte liegen im Osten des Allgäus auf ca. 800m über NN. Nachfolgend werden in Bild 17 die Wassergehaltsverläufe auf Basis von Oberstaufen und Lindenberg mit Garmisch-Partenkirchen und dem Hohenpeißenberg verglichen.

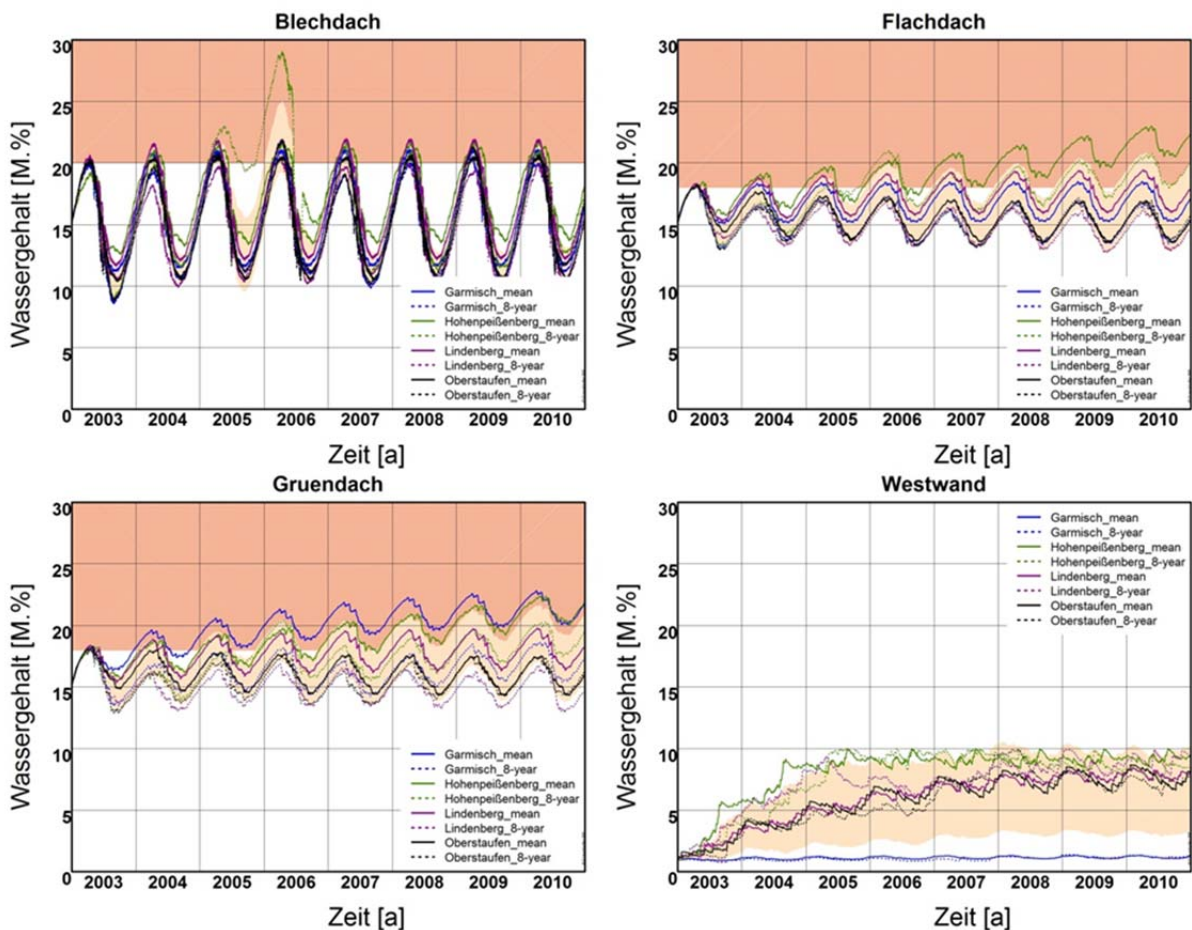


Bild 17:
Verlauf der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen an den Standorten Garmisch – Partenkirchen, Oberstaufen, Lindenberg und Hohenpeißenberg. Die

durchgezogenen Linien stehen dabei jeweils für die Varianten auf Basis der Referenzjahre. Die roten Bereiche stellen den jeweils kritischen Wassergehalt nach [34] dar.

In Bild 17 werden die Wassergehaltsverläufe basierend auf den Messdaten und auf den Referenzjahren für alle vier Standorte miteinander verglichen. Für das Blechdach liegen alle Variante, mit Ausnahme der Messdaten des Hohenpeißenberges nahe beisammen. Der höchste Wassergehalt der HRY stellt sich für den Standort Lindenberg ein. Das betrachtete Flachdach würde an den Standorten Hohenpeißenberg, Garmisch und Lindenberg nach ca. einem Jahr versagen. Das Gründach zeigt ebenfalls an allen Standorten, außer in Oberstaufen eine Überschreitung des zulässigen Grenzwassergehaltes. Für die westlich orientierte Außenwand fällt auf, dass Garmisch-Partenkirchen zu zu niedrigen Wassergehalten führt, während die Verwendung von Klimadaten des Hohenpeißenberges zu leicht erhöhten Wassergehalten führt. Im eingeschwungenen Zustand liegen die Wassergehalte um die 9 M. %. Das HRY des Standortes Lindenberg erzeugt kritisch repräsentative Wassergehalte in den vier betrachteten Konstruktionen ohne die deutliche Überbewertung der Klimadaten des Hohenpeißenberges oder die zu geringen Schlagregenmengen von Garmisch-Partenkirchen. Oberstaufen liefert im Vergleich zu Lindenberg für das Gründach und das Flachdach zu geringe Wassergehalte. Dies würde zu einer anderen Bewertung der Konstruktion führen würden, was nicht im Sinne der Sicherheitsannahme ist. Daher wird basierend auf der Gegenüberstellung in Bild 17 Lindenberg als Referenzstandort für diese Region gewählt.

Als nächster Standort wird Warnemünde betrachtet. Die Wassergehaltsverläufe, basierend auf den einzelnen Klimadaten sind nachfolgend in Bild 18 dargestellt. Da hier für das Blechdach in 6 von 8 Jahren der Wassergehalt basierend auf den Messwerte höher ist und für das Flach in 5 von 8 Jahren wird das HRY angepasst. Nachdem die Untersuchungen in Kapitel 2.2.4 gezeigt habe, dass die Temperatur bei diesen Konstruktionen den größten Einfluss hat wird diese um 0,5 K abgesenkt. Die Anpassung wird in zwei Varianten durchgeführt, für die erste wird nur die Temperatur abgesenkt die relative Luftfeuchtigkeit wird nicht angepasst. Für die zweite Variante wird zusätzlich die relative Luftfeuchtigkeit an das niedrigere Temperaturniveau angepasst, sodass das Niveau der absoluten Luftfeuchtigkeit gleich bleibt (Variante TAHREL in Bild 18).

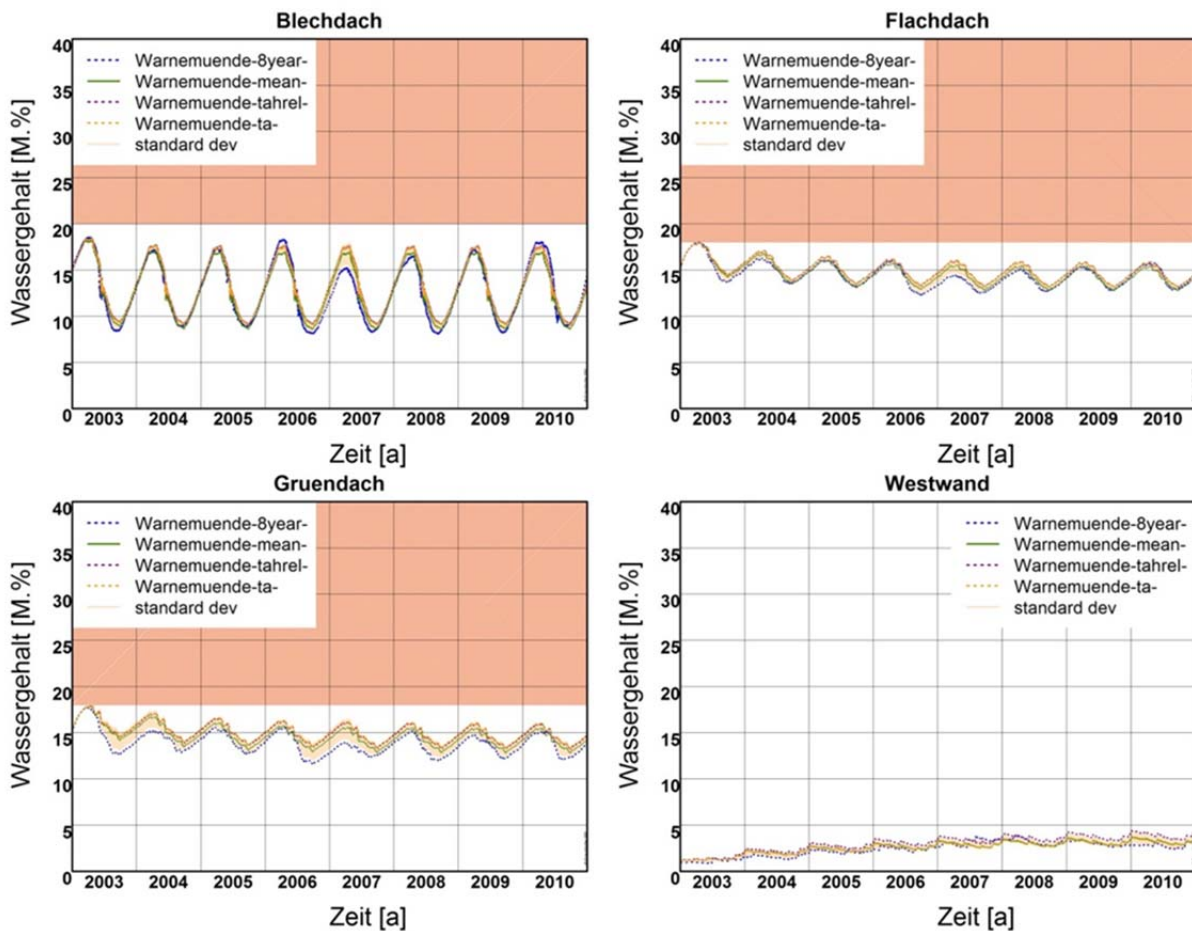


Bild 18:

Gegenüberstellung der berechneten Wassergehalte am Standort Warnemünde bei Verwendung der gemessenen Daten (8year), des nicht angepassten Referenzjahres (mean), des Referenzjahres mit Temperaturabsenkung um 0,5 K (ta) und des Referenzjahres mit gleicher Temperaturabsenkung und Korrektur der rel. Luftfeuchte (tahrel). Rot dargestellt sind die kritischen Grenzwerte nach DIN 68800 [34].

Wie Bild 18 zeigt, führt die Anpassung des HRY wie gewünscht zu etwas höheren Wassergehalten in den betrachteten Konstruktionen. Zwischen den beiden Anpassungsvarianten gibt es hingegen nur einen vernachlässigbar geringen Unterschied. Daher wird für weitere Fälle auf eine kombinierte Anpassung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit verzichtet.

Für die HRY Referenzstationen ist der grafische Vergleich mit den gemessenen Klimadaten im Anhang in den Bild 271 bis Bild 282 dargestellt. Eine weitere Anpassung war für diese Standorte nicht notwendig. Gegebenenfalls werden die HRY im Rahmen der zonalen Einteilung in Kapitel 2.4 weiter angepasst.

2.4 Zonale Einteilung der HRY

In diesem Kapitel wird überprüft, ob es möglich ist für das spezielle Anwendungsgebiet der hygrothermischen Bauteilsimulation, die Anzahl der Regionen,

im Vergleich zur Einteilung des DWD, zu verringern. Ziel ist hier die Anzahl der Zonen zu reduzieren um die Bauteilbewertung möglichst einfach zu gestalten. Hierzu wird im Sinne des Grundsatzes, „so wenig wie möglich, so viel wie notwendig“ die Anzahl der Zonen angepasst.

Um zu überprüfen ob die Einteilung in die 15 Klimazonen der TRY noch weiter zusammengefasst werden kann wurde zunächst eine Clusteranalyse durchgeführt. Dieses statistische Verfahren wurde bereits zur Erstellung der TRY Karte des DWD verwendet [8]. Da die Zusammenfassung durch partitionierende und hierarchische Clusteranalysen auf Grund der geringen Anzahl an verfügbaren Klimadatensätzen (17) und der sehr unterschiedlichen Verläufe der Wassergehalte auf der Bauteilebene zu keinen befriedigenden Ergebnissen geführt hat, wird ein anderes Vorgehen angewandt. Einzig der Standort Fichtelberg wurde in allen Analysen als Einzelstandort gruppiert. Bei Clusteranalysen handelt es sich im Allgemeinen um statistische Verfahren zur Gruppenbildung [38]. Im speziellen wird bei partitionierenden Clusteranalysen die gewünschte Anzahl an Gruppen vorgegeben während bei hierarchischen Clusteranalysen die Gruppen immer weiter zusammengefasst (agglomerative Verfahren) oder aufgeteilt (diversive Verfahren) werden [39]. Die Anzahl der Gruppen bestimmt sich damit für die hierarchischen Verfahren über die Anzahl der Verfahrensschritte. Diese Ansätze führten, auf Grund der relativ geringen Anzahl an Datensätzen, zu keiner realistischen Anzahl an Gruppen die gleichzeitig noch den geografischen Ansprüchen genügte.

Anstelle der Clusteranalyse wird eine Korrelationsmatrix für das jeweilige Klimaelement zur Bildung von Gruppen herangezogen. Unter der Korrelation im statistischen Sinne wird der Zusammenhang von zwei Merkmalen z.B. Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit verstanden. Die Stärke dieses Zusammenhangs wird durch den Korrelationskoeffizienten (r) ausgedrückt [32]. Der Korrelationskoeffizient ist von 0 bis 1 definiert. Nach [32] spricht man ab einem $|r| \geq 0,8$ von einer starken Korrelation und unterhalb von $|r| < 0,5$ von einer schwachen Korrelation. Für die Korrelationsmatrix werden die Koeffizienten nach Bravais – Pearson [32] für die Klimaelemente Außenlufttemperatur, Wasserdampfpartialdruck und Globalstrahlung je Standort gebildet. Zusätzlich wird das jeweils zugehörige Streudiagramm auf etwaige Ausreißer hin überprüft. Zu beachten ist des Weiteren, dass der Korrelationskoeffizient keine Aussage über einen kausalen Zusammenhang zulässt [32]. Hierfür wären weitere Untersuchungen und statistische Signifikanztests notwendig. Er darf also nicht als „Beweis“ im Sinne einer Ursache – Wirkung - Argumentation gesehen werden sondern dient lediglich als Hilfsgröße zur Vorauswahl. Beispielsweise deutet ein hoher Korrelationskoeffizient zwischen zwei Klimaparametern nicht zwangsweise auf eine gegenseitige Beeinflussung hin, auch eine Beeinflussung durch eine dritte nicht betrachtete Größe (Scheinkorrelation [32]) wäre theoretisch möglich. Es muss auch beachtet werden, dass der Korrelationskoeffizient nur eine zeitliche Verschiebung bzw. das Fehlen einer solchen abbilden kann. Sind hingegen die Kurven um eine konstanten Werte verschoben z.B. bei einer Temperaturverschiebung wird weiterhin eine perfekte Korrelation angezeigt. Gleiches gilt für eine Dämpfung des Verlaufs, auch diese wird in den Korrelati-

onskoeffizienten nicht erfasst. Zur Veranschaulichung ist dies exemplarisch für zwei Sinuskurven in Bild 19 dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten nach Bravais – Pearson und Spearman sind jeweils in der linken unteren Ecke der linken Grafik dargestellt. Wie die Abbildung verdeutlicht, führt nur die zeitliche Verschiebung zu niedrigen Korrelationskoeffizienten. Eine Dämpfung wie auch eine parallel Verschiebung bleiben im Korrelationskoeffizienten unberücksichtigt. In Kombination mit einem Streudiagramm bzw. einem Quantil-Quantil Diagramm ließen sich auch diese Unterschiede erkennen.

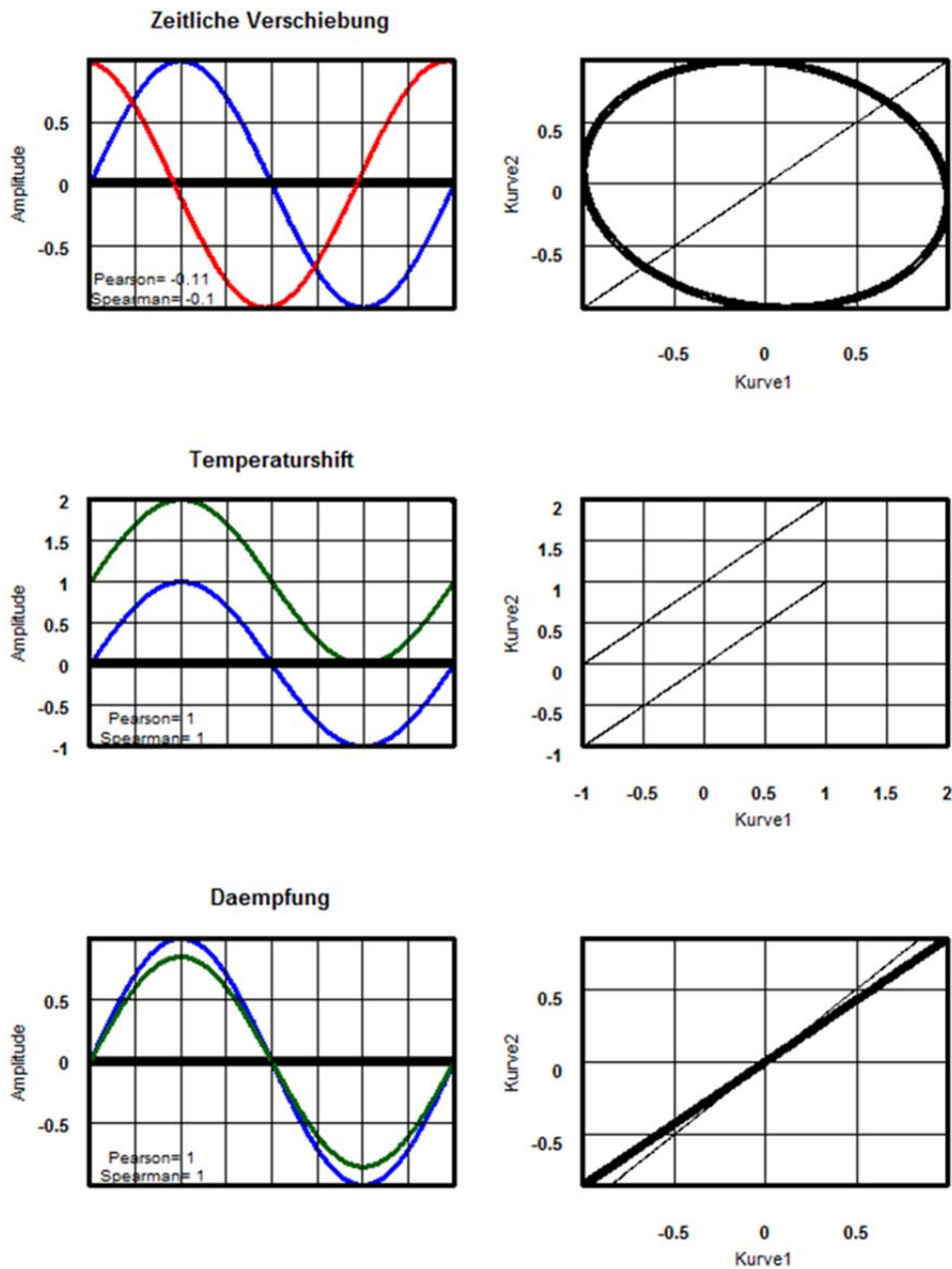


Bild 19:

Grafischer Vergleich verschiedener Abweichungen auf den Korrelationskoeffizienten. Jeweils auf der linken Seite sind die beiden zu vergleichenden Kurven dargestellt auf der rechten Seite sind die zugehörigen Streudiagramme dargestellt.

Dieser Vergleich dient nur zur ersten groben Einteilung. Die Auswahl des kritischen Standorts erfolgt dann im zweiten Schritt auf Bauteilebene anhand der hygrothermischen Verhältnisse in der kritischen Schicht. Zur besseren Übersicht ist dieses Vorgehen in Bild 20 dargestellt.

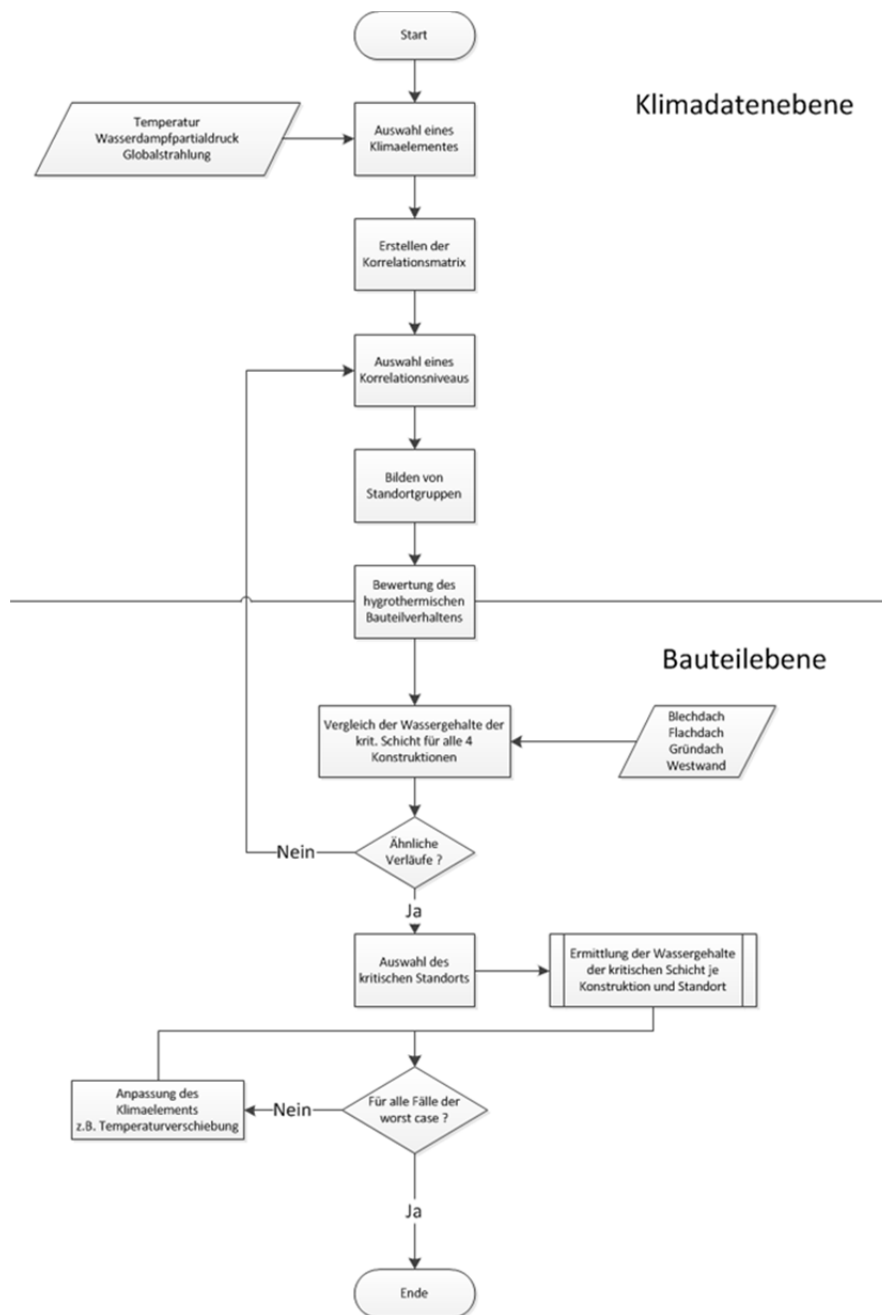


Bild 20:
Algorithmus zur Zoneneinteilung hygrischen Referenzjahre (HRY).

Angewendet wird dieses Vorgehen auf die Lufttemperatur (TA), die Globalstrahlung (ISGH) und den höhenkorrigierten Wasserdampfpartialdruck (PPART). Diese Parameter haben laut [20] den größten Einfluss auf die betrachteten Konstruktionen. Da der Regen zwischen den einzelnen Standorten so stark schwankt, um eine vergleichbare Korrelation zu erhalten, wird dieses Klimaelement nicht in den Vergleich mit aufgenommen. Um die lokalen Besonderheiten im Bereich des Niederschlags berücksichtigen zu können, ist mitunter eine Anpassung der Referenzjahre notwendig.

Zur Höhenkorrektur des Wasserdampfpartialdrucks werden die in [9] veröffentlichten, jährlichen standortspezifischen Korrekturfaktoren für die Temperatur und den Wasserdampfgehalt verwendet. Die Höhenkorrektur ist erforderlich um die unterschiedlichen Standorte auf ein vergleichbares Höhenniveau zu bringen. Die Auswahl des Korrelationsniveaus und damit auch der entstehenden Gruppen erfolgte iterativ unter Beachtung folgender Grundsätze:

- Ein möglichst hoher Korrelationskoeffizient nach Bravais - Pearson [32]
- Eindeutigkeit (keine oder möglichst wenig Fälle die mehreren Gruppen zugeordnet sind)
- Ähnliche geografische Lage z.B. durch die örtliche Nähe oder durch ähnliche Exposition (Berglage)

Bei Anwendung dieser Kriterien ergeben sich für die nachfolgend in Tabelle 5 angegebenen maximalen Korrelationsniveaus für die jeweils aufgeführten Standortgruppen.

Tabelle 5:
Standortgruppen bezogen auf das jeweilige Klimaelement und das Niveau des Korrelationskoeffizienten zur Erstellung der HRY. Die Standorte in den Klammern haben keine TRY Referenzstation und wurden zu Vergleichszwecken mit betrachtet.

Lufttemperatur $cor \geq 0.96$		ISGH $cor \geq 0.90$		Ppart $cor \geq 0.93$	
Gruppe	Standort	Gruppe	Standort	Gruppe	Standort
1	Plauen Chemnitz (Oschatz)	1	Plauen Chemnitz (Oschatz)	1	Plauen Chemnitz (Oschatz)
		2	Düsseldorf Kassel Braunlage Bad Marienberg	2	Düsseldorf Kassel Braunlage Bad Marienberg
2	Düsseldorf Kassel Braunlage Bad Marienberg	3	Hamburg Bremerhaven Warnemünde	3	Hamburg Bremerhaven Warnemünde
3	Hamburg Bremerhaven				

Fichtelberg wurde auf Grund vorangegangener Clusteranalysen und der exponierten Berglage nicht betrachtet. Die Clusteranalysen haben gezeigt, dass sich Fichtelberg als einzige Standort, unabhängig vom gewählt Clusterverfahren, nicht mit den anderen Standorten zusammenfassen lässt.

Für die in Tabelle 5 aufgeführten Standortgruppen, werden nun im zweiten Schritt die Ergebnisse auf Bauteilebene für die unterschiedlichen Konstruktionen verglichen. Die übrigen Standorte Potsdam, Fürstenzell, Lindenberg,

Mannheim, Fichtelberg und Stötten weisen einen geringeren Korrelationskoeffizienten auf und werden daher nicht weiter für eine Gruppierung herangezogen. Ziel ist es einen Worst-Case-Standort für jede einzelne Gruppen zu definieren. Hierfür werden die mit WUFI® simulierten Verläufe der kritischen Wassergehalte aller vier Konstruktionen gegenübergestellt. Das genaue Vorgehen wird in Bild 20 veranschaulicht. Bezogen auf die einzelnen Zonen wird dieses Vorgehen in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer beschrieben.

2.4.1 Zone 1

Nach Tabelle 5 ergibt sich die erste Zone für die Standorte Plauen, Chemnitz und Oschatz. Nachfolgend sind in Bild 21 die Wassergehalte des Blechdaches für die drei Standorte in Zone 1 jeweils mit dem mittleren Jahr und dem realen 8 Jahres Messdaten als Basis dargestellt.

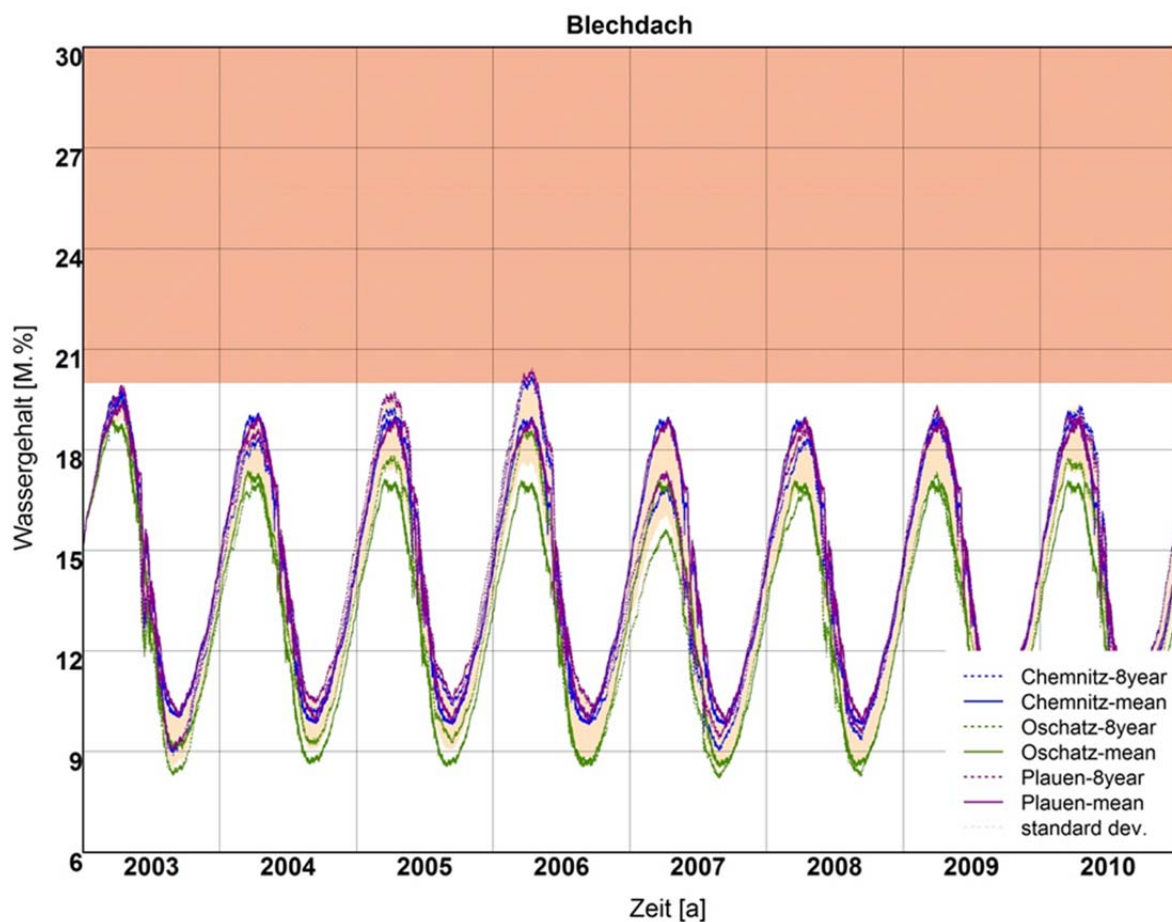


Bild 21:
Berechneter Verlauf der Wassergehalte in der Weichholzschalung des Blechdachs an den Standorten Chemnitz, Oschatz und Plauen jeweils bei Verwendung des gemessenen 8-Jahres-Klimadatensatzes und des jeweiligen HRY.

Das hellrote Band im Hintergrund zwischen den Kurven stellt die einfache Standardabweichung ermittelt aus den 6 Varianten dar. Dies ermöglicht das schnellere Erkennen von stark abweichenden Varianten. Der rote Bereich im oberen Teil der Grafik kennzeichnet den für die Konstruktion kritischen Wassergehalt, in diesem Fall oberhalb von 20 M. % Holzfeuchte nach [34]. Für das Blechdach liegen die Wassergehalte auf Basis der mittleren Jahre an den Standorten Chemnitz und Plauen am höchsten. Diese werden in den Jahren 2005 und 2006 von den Wassergehalten, auf Basis der Messwerte, überschritten. Oschatz liegt leicht unterhalb der einfachen Standardabweichung. Die kritischsten Referenzjahre sind für diese Konstruktion Plauen und Chemnitz.

In Bild 22 sind die entsprechenden Ergebnisse in gleicher Weise für das helle Flachdach dargestellt.

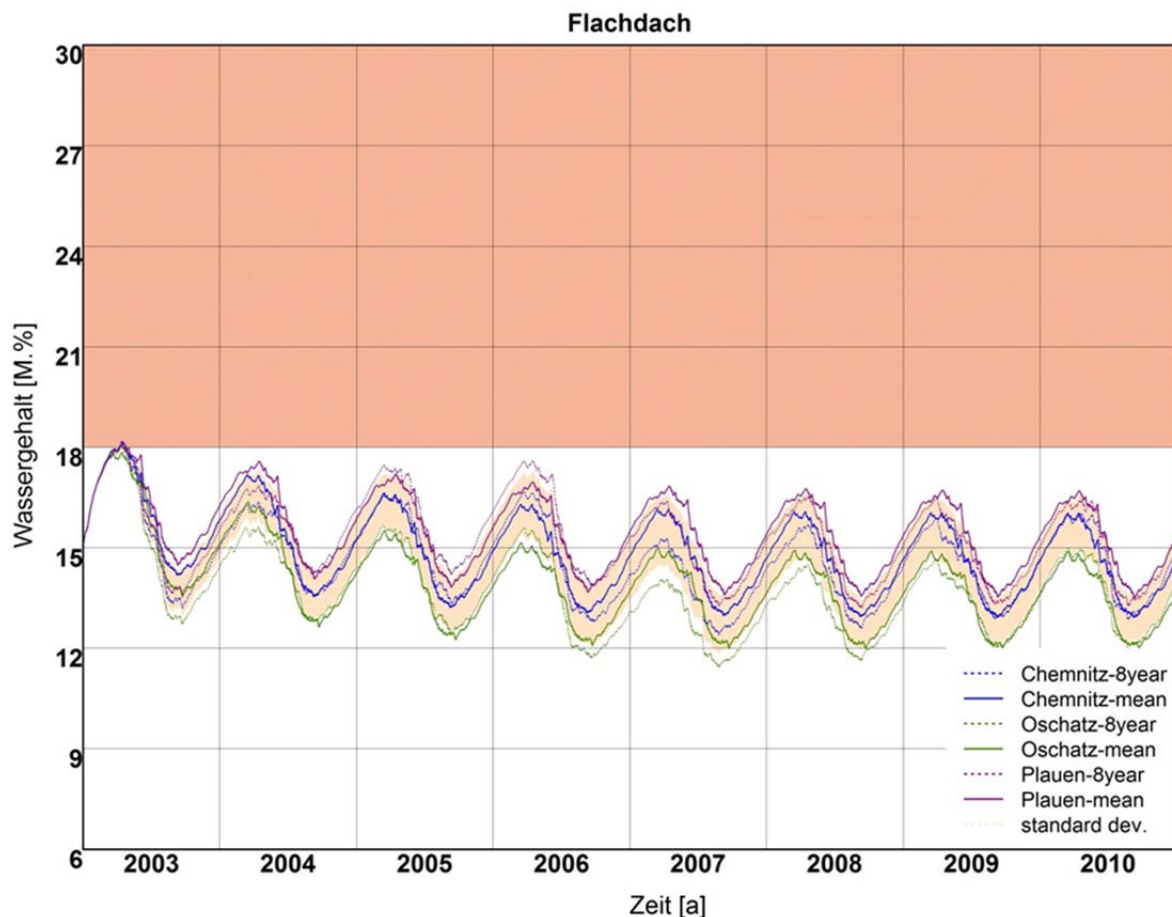


Bild 22: Berechneter Verlauf der Wassergehalte für das helle Flachdach an den Standorten Chemnitz, Oschatz und Plauen jeweils bei Verwendung des gemessenen 8-Jahres-Klimadatensatzes und des jeweiligen HRY.

Für das Flachdach liegt der kritische Wassergehalt nach [34] bei 18 M. %. Da bei dieser Konstruktion die äußere Schalung aus einem Holzwerkstoff besteht,

wird hier der Grenzwert von 18 M. % verwendet. Der Bereich darüber ist in den Grafiken Bild 22 und Bild 23 rot markiert. Für das Flachdach ergibt sich der höchste massebezogene Wassergehalt bei der Verwendung des HRY am Standort Plauen. Das gemessene Jahr für Oschatz nahe Dresden liegt dagegen ab dem vierten Jahr sogar unterhalb des Bereichs der einfachen Standardabweichung und ist somit als Referenzort nicht geeignet. Chemnitz liegt im Mittel um ca. 0,2M% unterhalb des Wassergehaltsverlaufes von Plauen.

Die berechneten Wassergehalte der Holzschalung im begrünten Flachdach sind für die unterschiedlichen Varianten in Bild 23 dargestellt.

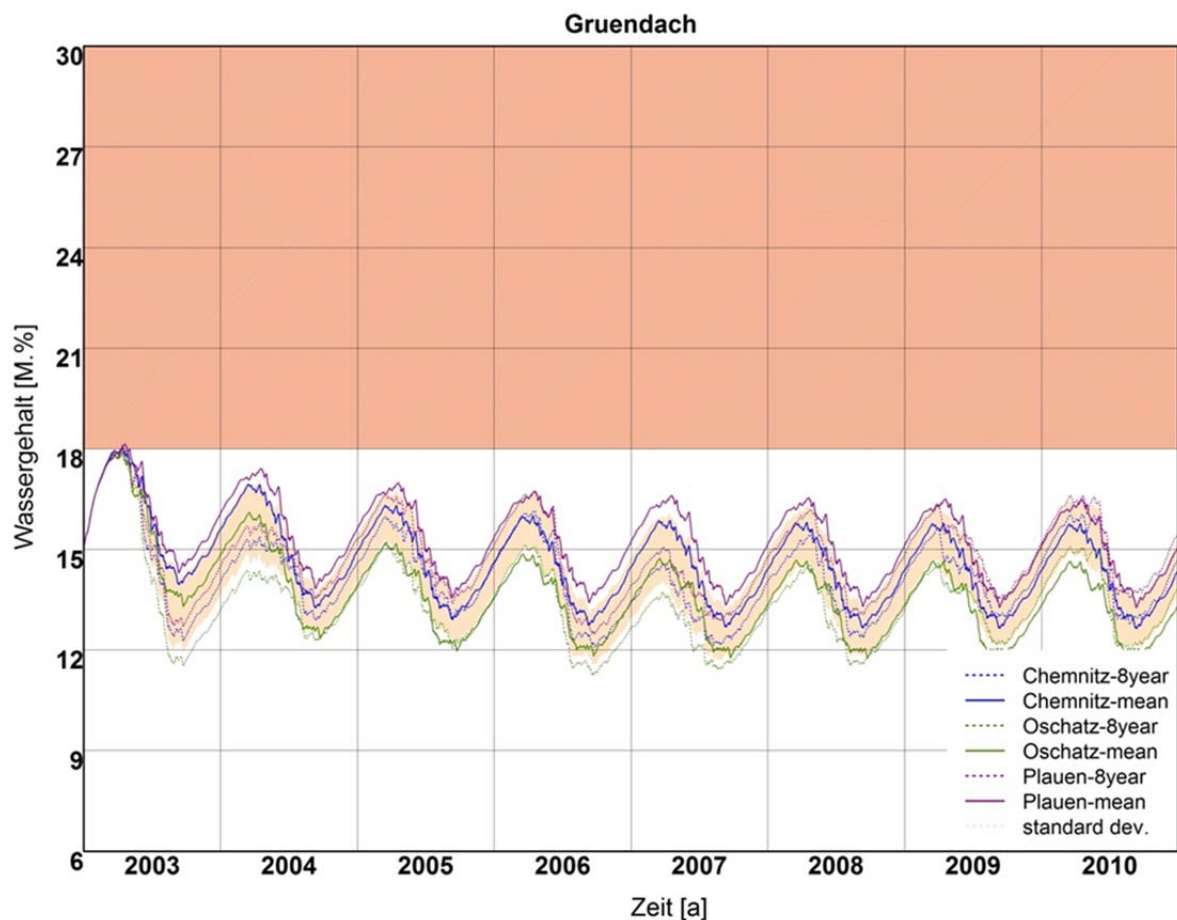


Bild 23:
Verlauf der Wassergehalte für das Gründach an den Standorten Chemnitz, Oschatz und Plauen jeweils bei Verwendung des gemessenen 8-Jahres-Klimadatensatzes und des jeweiligen HRY.

Für das Gründach trocknen alle betrachteten Varianten leicht aus und liegen unterhalb des kritischen Grenzwassergehaltes. Die maximalen Wassergehalte liegen im Winter bei 14 M. % – 16 M. %. Die höchsten Wassergehalte ergeben sich bei Verwendung des Referenzjahres am Standort Plauen, die niedrigsten ergeben sich bei Verwendung der Messdaten am Standort Oschatz.

Die Ergebnisse für die westlich orientierte Außenwand mit geringem Schlagregenschutz sind in Bild 24 dargestellt.

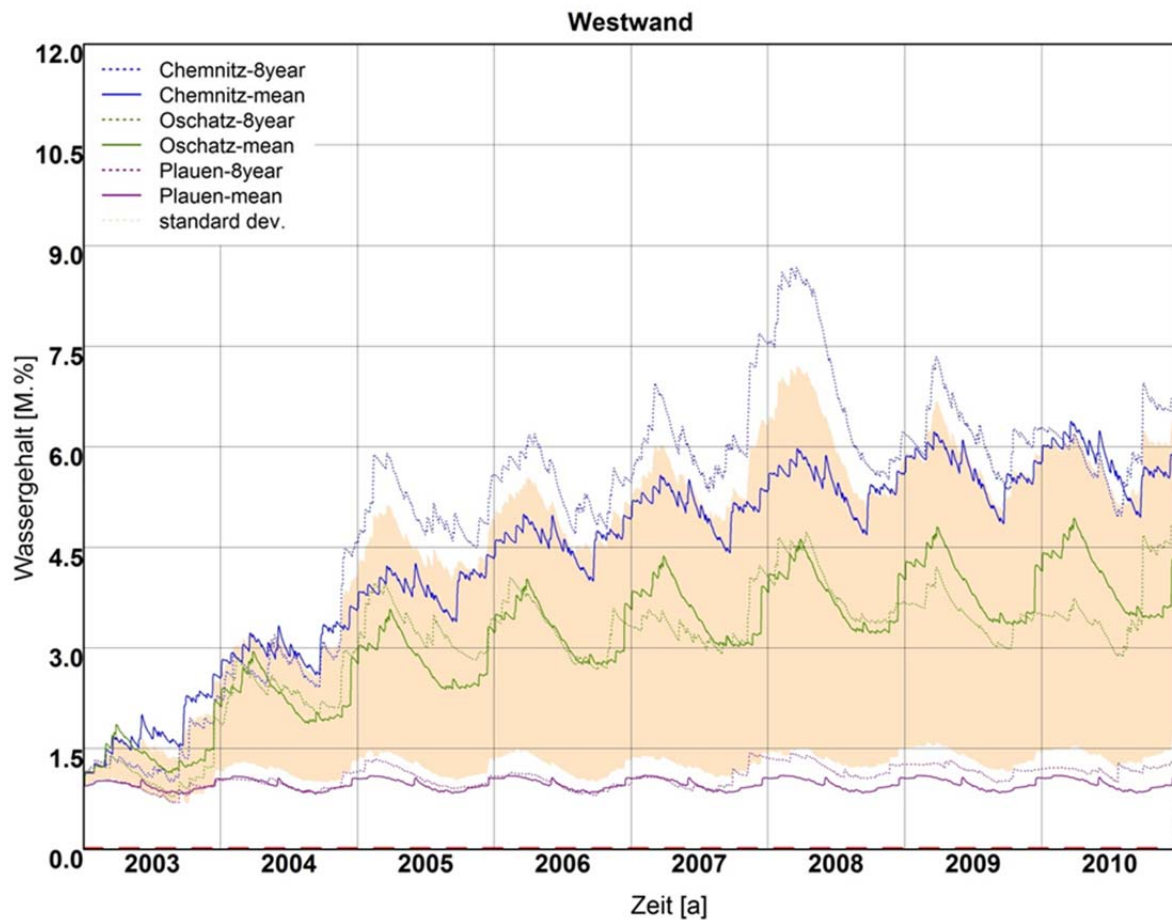


Bild 24:
Berechneter Verlauf der Wassergehalte für die Westwand an den Standorten Chemnitz, Oschatz und Plauen jeweils bei Verwendung des gemessenen 8-Jahres-Klimadatensatzes und des jeweiligen HRY.

Für diese Konstruktion ergibt sich der höchste Wassergehaltsverlauf für das gemessene Jahr am Standort Chemnitz. Dieser pendelt sich nach ca. sieben Jahren ein. Die niedrigsten Wassergehaltsverläufe ergeben sich für den Standort Plauen. Da dies die Konstruktion ist, bei der der Schlagregen eine entscheidende Rolle spielt, liegt die Vermutung nahe, dass sich die Standorte Chemnitz und Plauen bezüglich der Schlagregenbelastung stark unterscheiden. Daher sind in Tabelle 58 die Schlagregensmengen der Messdaten der drei Standorte gegenübergestellt. Zusätzlich sind in Bild 283 die Schlagregensrosen für die drei Standorte gegenüber gestellt.

Dabei zeigt sich, dass Chemnitz deutlich mehr Schlagregen aufweist als die anderen beiden Standorte. Das Maximum liegt sowohl für Chemnitz als auch für Oschatz im Westen. Plauen zeigt keine ausgeprägte Hauptschlagregenrichtung.

Die Schlagregenmenge für die westliche Ausrichtung liegt für den Standort Chemnitz um ca. 25% höher als für den Standort Plauen. Der Vergleichsstandort Oschatz liefert für alle betrachteten Konstruktionen zu geringe Wassergehalte und kommt daher nicht als Referenzstation in Betracht. Da Plauen trotz der exponierteren Lage bzgl. des Schlagregenangebots und der Schlagregenverteilung für die Zone niedrigere Werte liefert und Chemnitz der Referenzstandort für die TRY des DWD ist wird Chemnitz als kritisch repräsentativer Standort für die Zone 1 gewählt.

Da die Wassergehalte auf Basis der Messdaten des Standortes Chemnitz für das Blechdach und die Westwand etwas höher sind als bei Verwendung des Referenzjahres, wird dieses angepasst. Um mit dem mittleren Jahr am Standort Chemnitz den Worst Case für alle vier Konstruktionen abzubilden, wird die Temperatur um 1 K abgesenkt und die Regenmenge um 15% erhöht. Die Erhöhung der Regenmenge ist notwendig, da die Temperatur abgesenkt wurde und die Luftfeuchtigkeit unverändert belassen wurde. Daraus ergibt sich eine geringere absolute Feuchte und somit auch ein geringerer Diffusionsstrom in das Bauteil. Dies wird durch die erhöhte Regenmenge ausgeglichen.

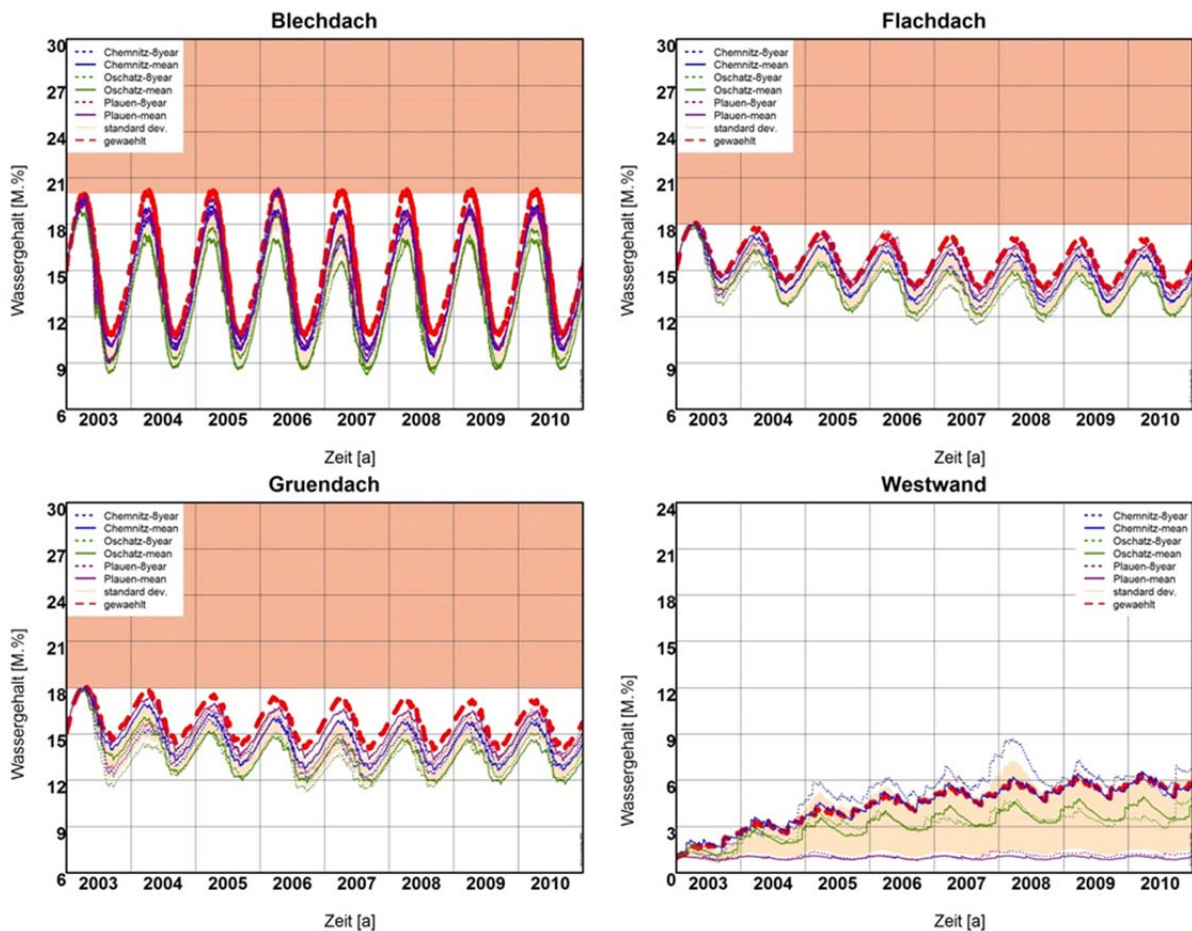


Bild 25: Berechneter Verlauf der Wassergehalte in der jeweils kritischen Schicht der vier Konstruktionen für die Standorte der Zone 1 mit der angepassten Variante (rot gestrichelte Variante).

Durch die Anpassungen ergeben sich die höchsten Wassergehalte im eingeschwungenen Zustand bei allen vier Konstruktionen bei Verwendung des HRY am Standort Chemnitz. Dies entspricht den roten Kurvenverläufen in Bild 25.

Wie die Abbildung veranschaulicht, stellt das angepasste mittlere Jahr am Standort Chemnitz den Worst-Case für alle vier Varianten dar. Auffallend ist, dass sich während der Einschwingphase höhere Wassergehalte ergeben wenn der in Chemnitz gemessene Klimadatensatz verwendet wird. Im eingeschwungenen Zustand nach ca. 7 Jahren liegen beide im Mittel bei 6,5 M. %. Darüber hinaus zeigt der Vergleich in Bild 24 das die Messdaten ab dem zweiten Jahr deutlich von den übrigen Verläufen abweichen. Eine weitere Erhöhung der Regenmenge würde zudem die Bewertung anderer Konstruktionen wie dem Gründach negativ beeinflussen. Der Standort Chemnitz kann als HRY Referenzstandort für die Zone 1 verwendet werden.

2.4.2 Zone 2

Als nächste Zone legt die statistische Auswertung die Zusammenfassung der Standorte aus Gruppe 3 aus Tabelle 5 mit Bad Marienberg, Braunlage, Düsseldorf und Kassel nahe. In Bild 26 sind die kritischen Wassergehalte des betrachteten Blechdaches an den vier Standorten gegenübergestellt.

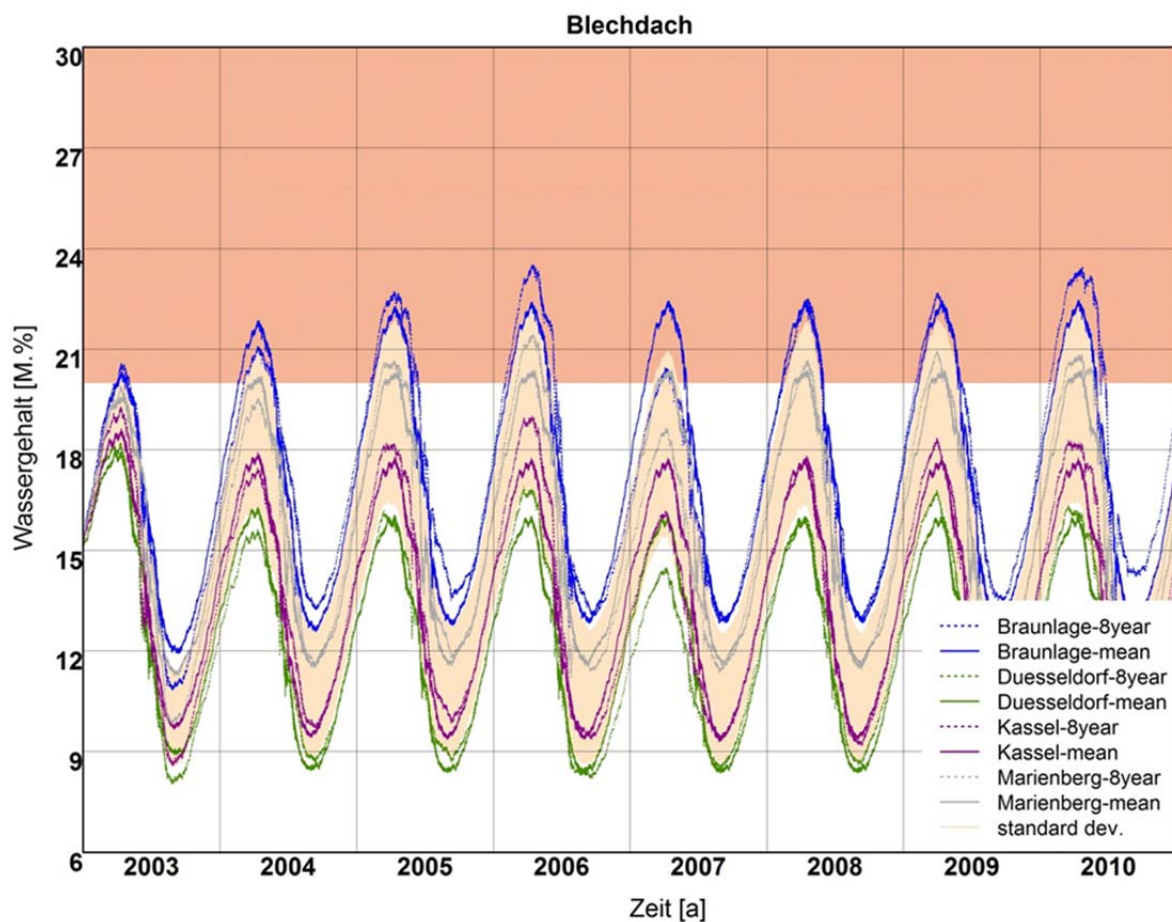


Bild 26: Berechneter Verlauf der Wassergehalte für das Blehdach an den Standorten Braunlage, Düsseldorf, Kassel und Bad Marienberg jeweils bei Verwendung des gemessenen 8-Jahres-Klimadatensatzes und des jeweiligen HRY.

Der höchste Wassergehalt tritt für den Standort Braunlage auf. Der kritische Grenzwassergehalt von 20 M. % wird, zuerst am Standort Braunlage, zu Beginn des Jahres 2004 erreicht. Am Standort Bad Marienberg wird dieser das erste Mal am Anfang des Jahres 2005 überschritten. Die gemessenen Klimadaten am Standort Braunlage liefern in einigen Jahren geringfügig höherer Wassergehalte als das zugehörige mittlere Jahr. Die Bewertung der Konstruktion würde dies aber nicht verändern. In beiden Fällen versagt die Konstruktion bereits zu einem früheren Zeitpunkt. Zwischen dem mittleren Jahr am Worst-Case-Standort Braunlage und dem Standort mit dem niedrigsten Wassergehalt

(Düsseldorf) liegen ca. 6 M. %. Für diese Konstruktion ist dies eine vergleichsweise große Schwankungsbreite. Die nächste, in Bild 27 betrachtete, Konstruktion ist das helle Flachdach.

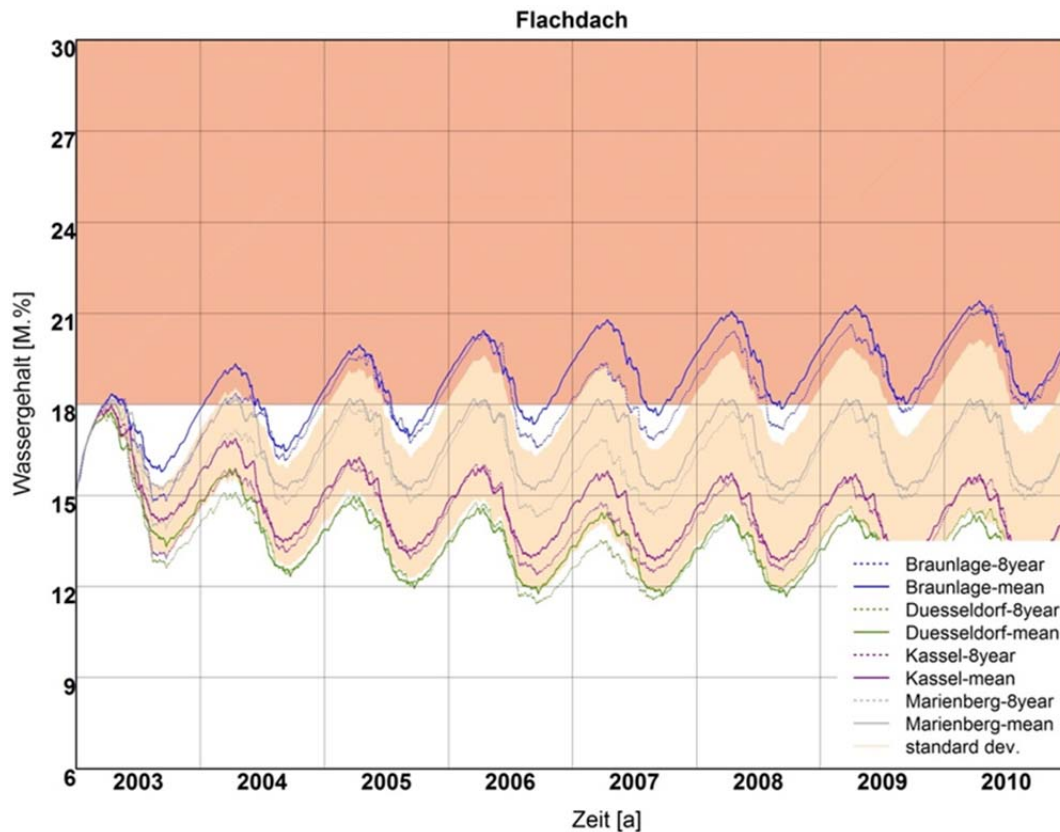


Bild 27: Berechneter Verlauf der Wassergehalte in der OSB Schalung des betrachteten Flachdaches an den Standorten Braunlage, Düsseldorf, Kassel und Bad Marienberg. Unter Verwendung der gemessenen Klimadaten und der HRY.

Für das Flachdach ist der Standort Braunlage der Worst Case. Am Standort Braunlage kommt es zur Feuchteakkumulation im Bauteil. Von einer Feuchteakkumulation spricht man, wenn sich über einen längeren Zeitraum Kondensat in der Konstruktion bildet, sodass die Feuchtigkeit über den Betrachtungszeitraum ansteigt ohne einen eingeschwungenen Zustand zu erreichen. Der eingeschwungene Zustand gilt dann als erreicht, wenn sich unter den gegebenen klimatischen Randbedingungen der Wassergehalt im Bauteil um weniger als 1%, im Vergleich zum Vorjahr, ändert [40]. Bei Verwendung des mittleren Jahres wird der kritische Wassergehalt zu Beginn des Jahres 2004 überschritten, bei Verwendung der Messdaten ca. 3 Monate später. Lediglich am Standort Bad Marienberg kommt es ebenfalls zu einer Überschreitung des kritischen Grenzwassergehaltes. Die beiden anderen Standorte Kassel und Düsseldorf liegen deutlich näher zusammen und deutlich unterhalb des kritischen Grenzwassergehaltes. Von diesen beiden Standorten wäre Kassel der kritischere.

Die nächste ausgewertete Bauteilschicht ist die OSB Schalung im Gründach. Die Verläufe der massebezogenen Wassergehalte sind nachfolgend in Bild 28 dargestellt.

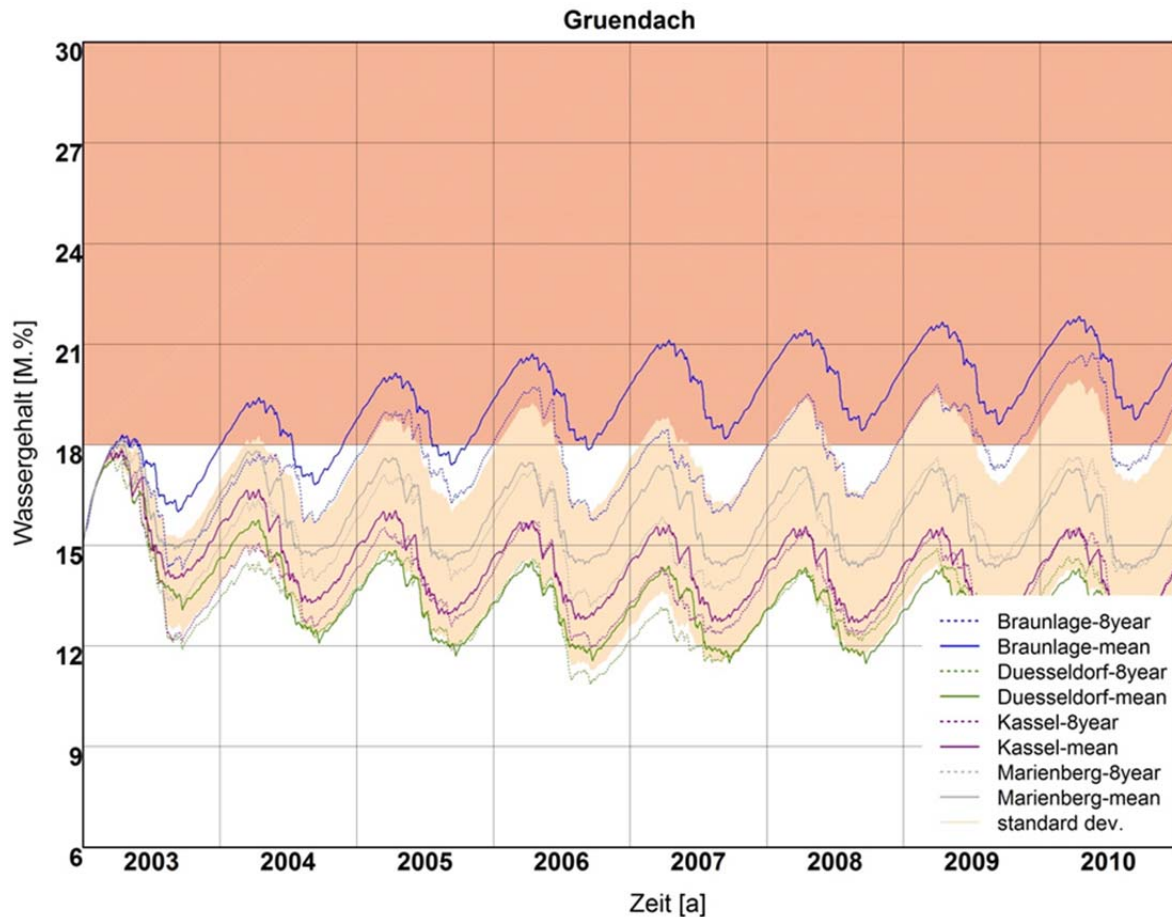


Bild 28:
Berechneter Verlauf der Wassergehalte in der OSB des betrachteten Gründaches an den Standorten Braunlage, Düsseldorf, Kassel und Bad Marienberg. Unter Verwendung der gemessenen Klimadaten und der HRY.

Die Verläufe der Wassergehalte sind ähnlich zu dem zuvor betrachteten Flachdach. Der kritischste Fall (mittleres Jahr Braunlage) zeigt hier einen noch höheren Wassergehalt als bei dem zuvor betrachteten Flachdach. Auch hier kommt es wieder zur Feuchteakkumulation im Bauteil. Die übrigen Standorte pendeln sich im Maximum zwischen 14 M.-% (Düsseldorf) und 17 M.-% (Bad Marienberg) ein. Zwischen dem niedrigsten (Düsseldorf) und dem höchsten mittleren Jahr (Braunlage) liegen am Ende des Betrachtungszeitraumes 7 M.-%.

Die letzte betrachtete Konstruktion ist die westlich orientierte Massivbauwand mit mäßigem Regenschutz wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben. Die Verläufe der kritischen Wassergehalte der einzelnen Varianten sind in Bild 29 dargestellt.

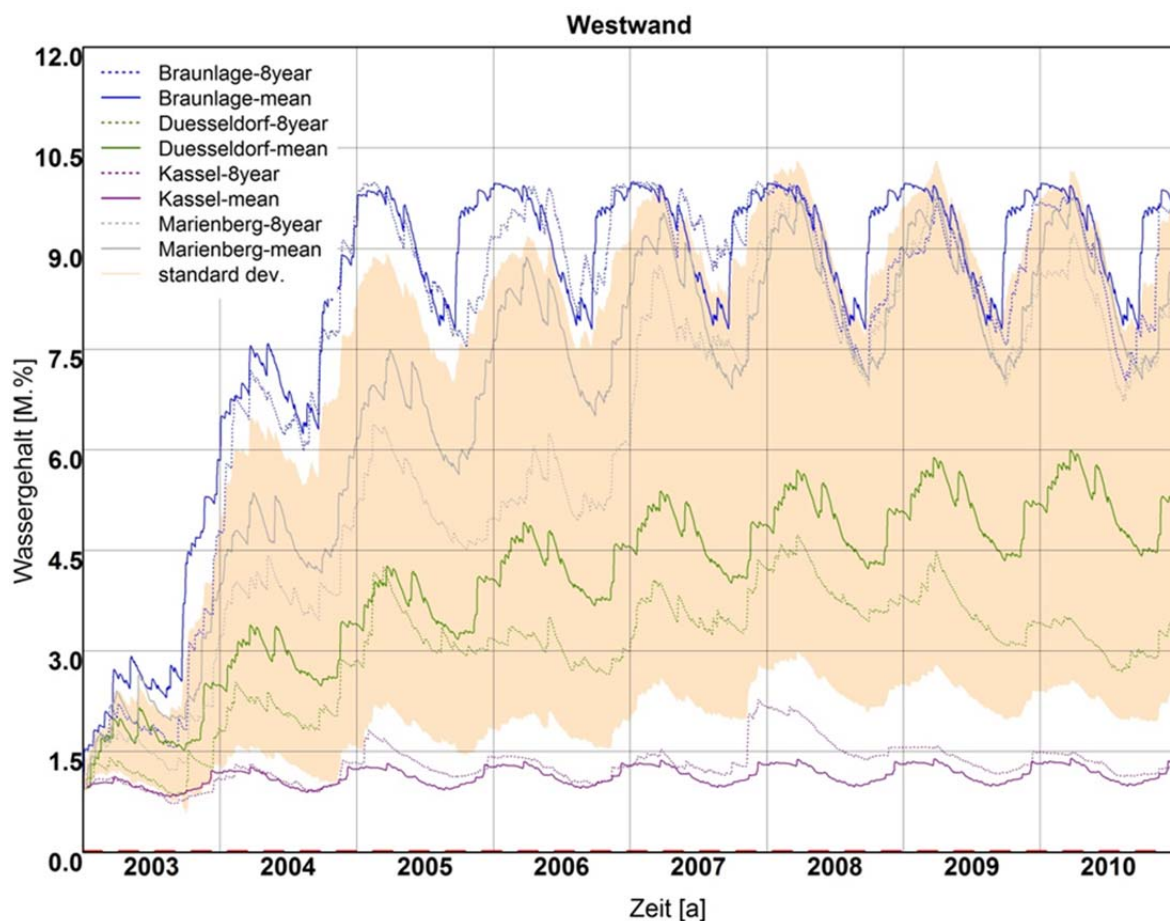


Bild 29:
Berechneter Verlauf der Wassergehalte im Mauerwerk der betrachteten Außenwand an den Standorten Braunlage, Düsseldorf, Kassel und Bad Marienberg. Unter Verwendung der gemessenen Klimadaten und der HRY.

Für die Westwand stellt auch das mittlere Jahr am Standort Braunlage den Worst Case dar. Für diese Variante treten die höchsten Wassergehalte am frühesten auf. Der Gleichgewichtszustand wird zu Beginn des Jahres 2005 erreicht. Braunlage und Bad Marienberg verlaufen im eingeschwungenen Zustand auf einem ähnlichen Niveau, Kassel zeigt den geringsten Wassergehalt während Düsseldorf etwa im Mittelfeld liegt.

Die Vergleiche auf Bauteilebene haben gezeigt, dass Braunlage der Worst Case ist bei dem die höchsten Wassergehalte auftreten. Es hat sich aber auch gezeigt, dass der Abstand zu den Standorten Düsseldorf und Kassel teilweise sehr groß ist. Eine Gruppierung aller vier Standorte erscheint auf Grund dieser Ergebnisse nicht sinnvoll. Auch die Geografie legt hier eine Unterscheidung nahe, während z.B. Braunlage relativ exponiert auf ca. 700m über NN liegt, liegt Düsseldorf auf nur 50m über NN am eher gemäßigten Rheinufer. Daher werden Düsseldorf und Kassel zu einer Gruppe zusammengefasst. Da Kassel in drei von vier Fällen höhere Wassergehalte liefert wird es als Referenzstandort für diese

Zone gewählt. Die Normalregenmenge ist an beiden Standorten ähnlich. Das unterschiedliche Verhalten der Westwand ist auf die lokale Exposition zurückzuführen. Eine Anpassung ist hier durch das Lokalklimamodell (vgl. Kapitel 3) möglich. Bad Marienberg liegt mit den Wassergehaltsverläufen näher an Braunlage, sodass es mit Braunlage zu einer Zone zusammengelegt wird. Aufgrund der höheren Wassergehalte wird Braunlage als Referenzstandort gewählt. Eine weitere Anpassung der Klimadaten ist hier nicht notwendig daher sind die beiden Kurven in der Grafik identisch. In Bild 30 sind zur Veranschaulichung die Wassergehalte aller vier Konstruktionen noch einmal gegenüber gestellt.

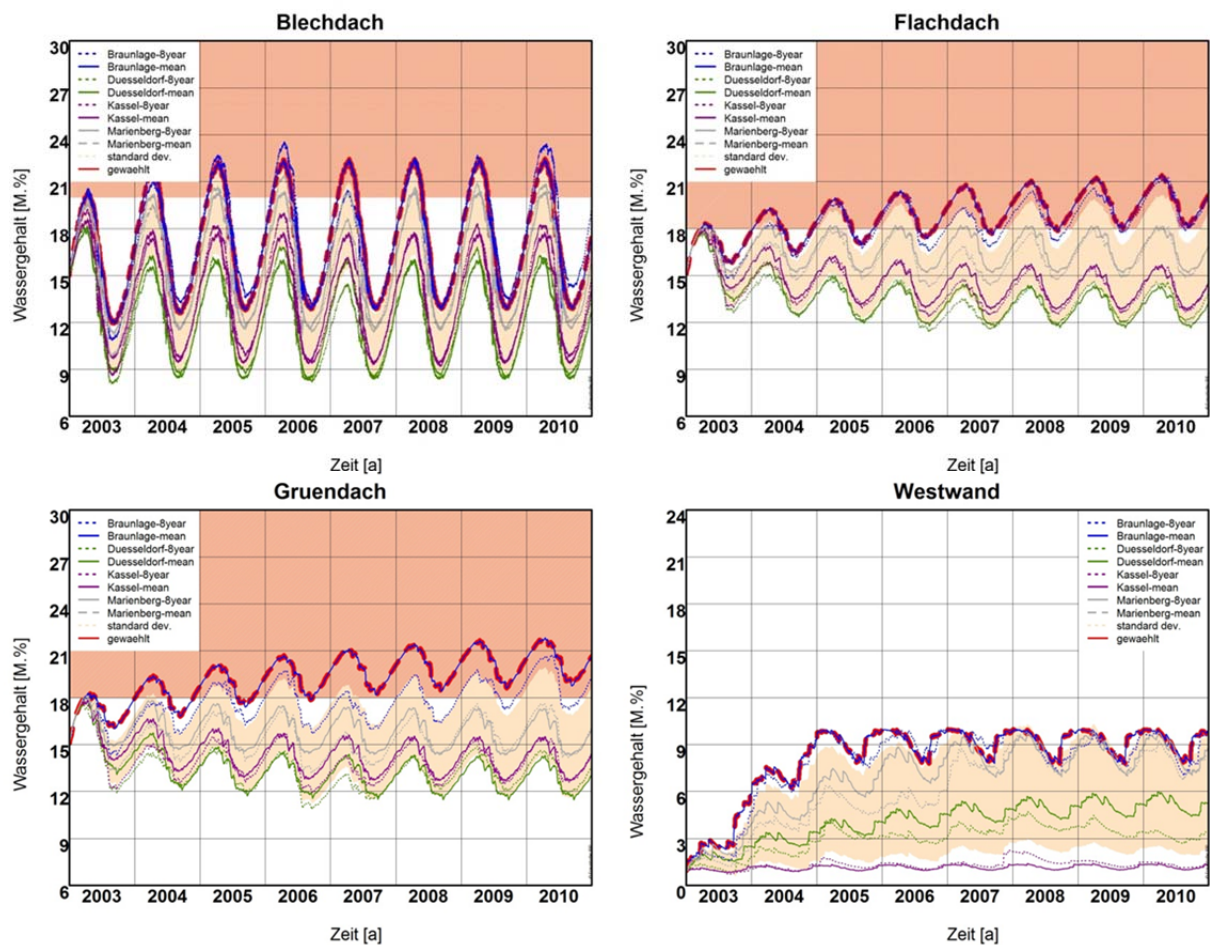


Bild 30: Gegenüberstellung aller Standortvarianten. Die rote/blau Kurve kennzeichnet das HRY Braunlage. Das zweite gewählte HRY ist der Standort Kassel hier in dunkel grün dargestellt.

2.4.3 Zone 3

Die nächste Zone ist aus Gruppe 4 der Tabelle 5 entstanden. Der Standortvergleich wird dabei für die Standorte Bremerhaven, Hamburg und Warnemünde durchgeführt. Für zwei der drei verglichenen Klimaparameter weisen diese drei

Standorte einen hohen Korrelationskoeffizienten auf. Auf Grund der geographischen Nähe und ähnlicher Exposition wurde der Standort Warnemünde ebenfalls in dieser Gruppe betrachtet.

Die Wassergehalte der Holzschalung des Blechdachs sind für die einzelnen Varianten nachfolgend in Bild 31 gegenübergestellt.

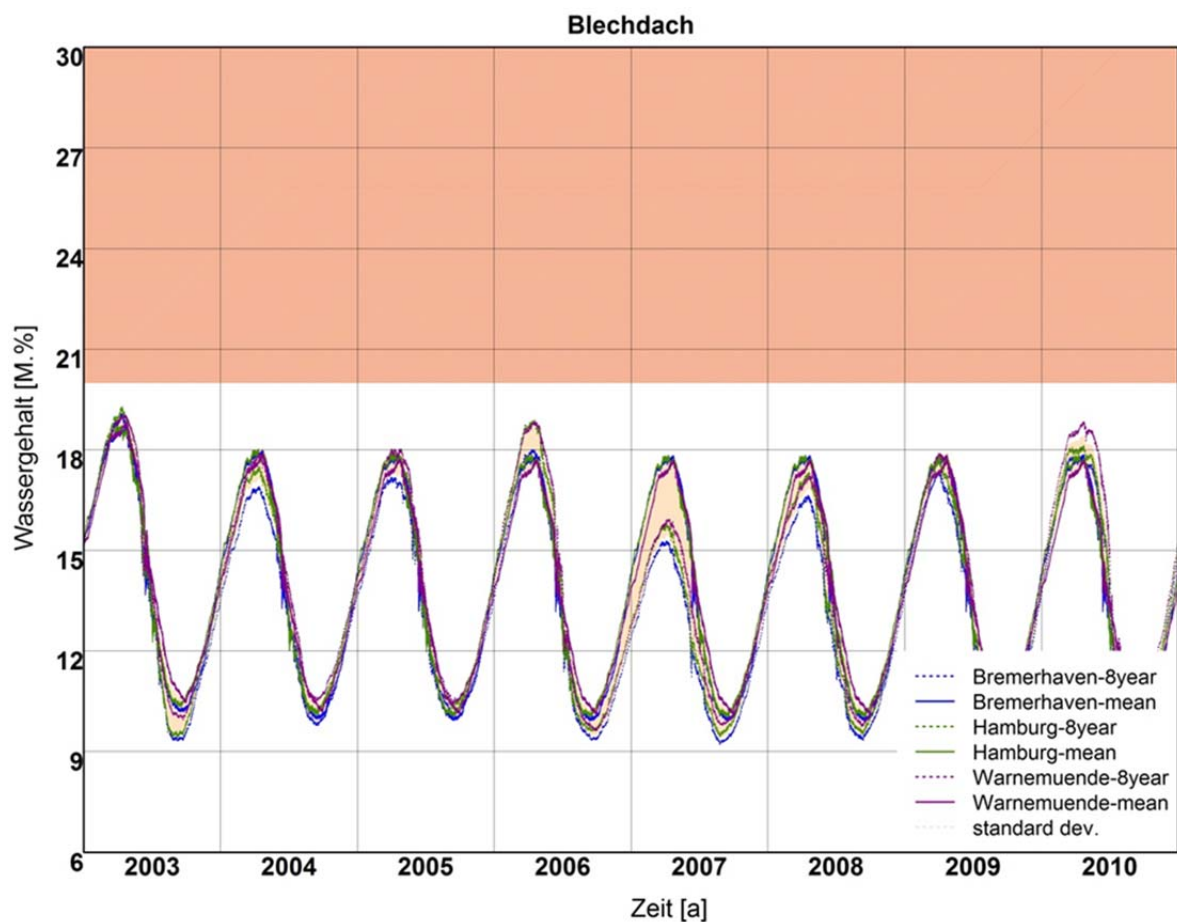


Bild 31:
Verlauf der Wassergehalte in der Weihholzschalung des betrachteten Blechdaches. An den Standorten Hamburg, Bremerhaven und Warnmünde. Unter Verwendung der gemessenen Klimadaten und der HRY.

Wie Bild 31 verdeutlicht, liegen alle Standortvarianten nahe zusammen. Die Maximalwerte schwanken zwischen 15 M. % (2007) und 18,5 M. % (2010). Alle betrachteten Varianten bleiben unterhalb des kritischen Wassergehaltes.

Die nächste in Bild 32 betrachtete Konstruktion ist das Flachdach mit heller Dachhaut.

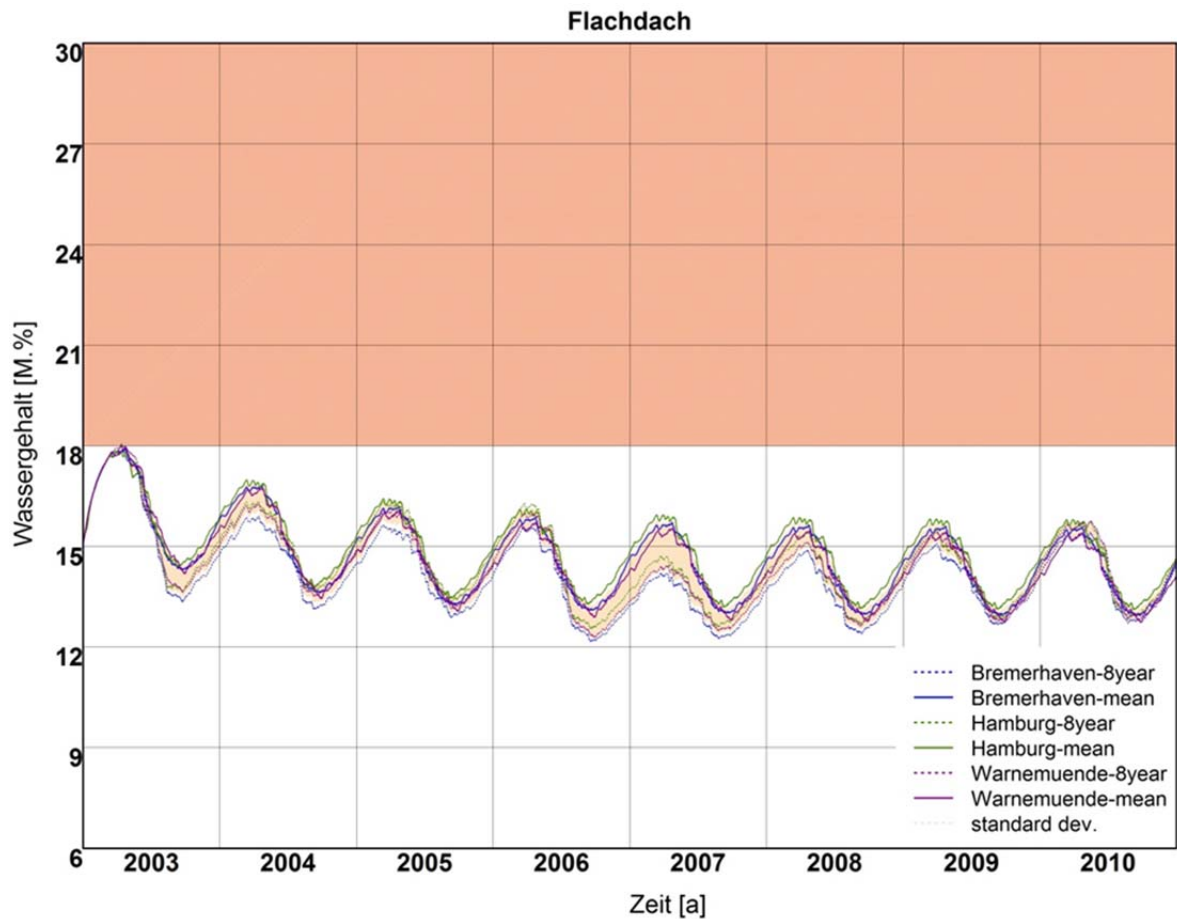


Bild 32:

Verlauf der Wassergehalte in der OSB des betrachteten Flachdaches. An den Standorten Hamburg, Bremerhaven und Warnmünde. Unter Verwendung der gemessenen Klimadaten und der HRY.

Auch für diesen Aufbau liegen alle Klimavarianten sehr eng zusammen. Die Variante mit gemessenen Klimadaten am Standort Bremerhaven zeigt dabei die niedrigsten Wassergehalte, während sich die maximalen Wassergehalte bei Verwendung des HRY am Standort Hamburger ergeben. Alle HRY liegen generell etwas höher als die Ergebnisse auf Basis der zugehörigen Messdaten und pendeln sich etwas langsamer auf den mittleren Wassergehalt von 14 M.-% ein.

Die dritte in Bild 33 betrachtete Konstruktion ist das Gründach.

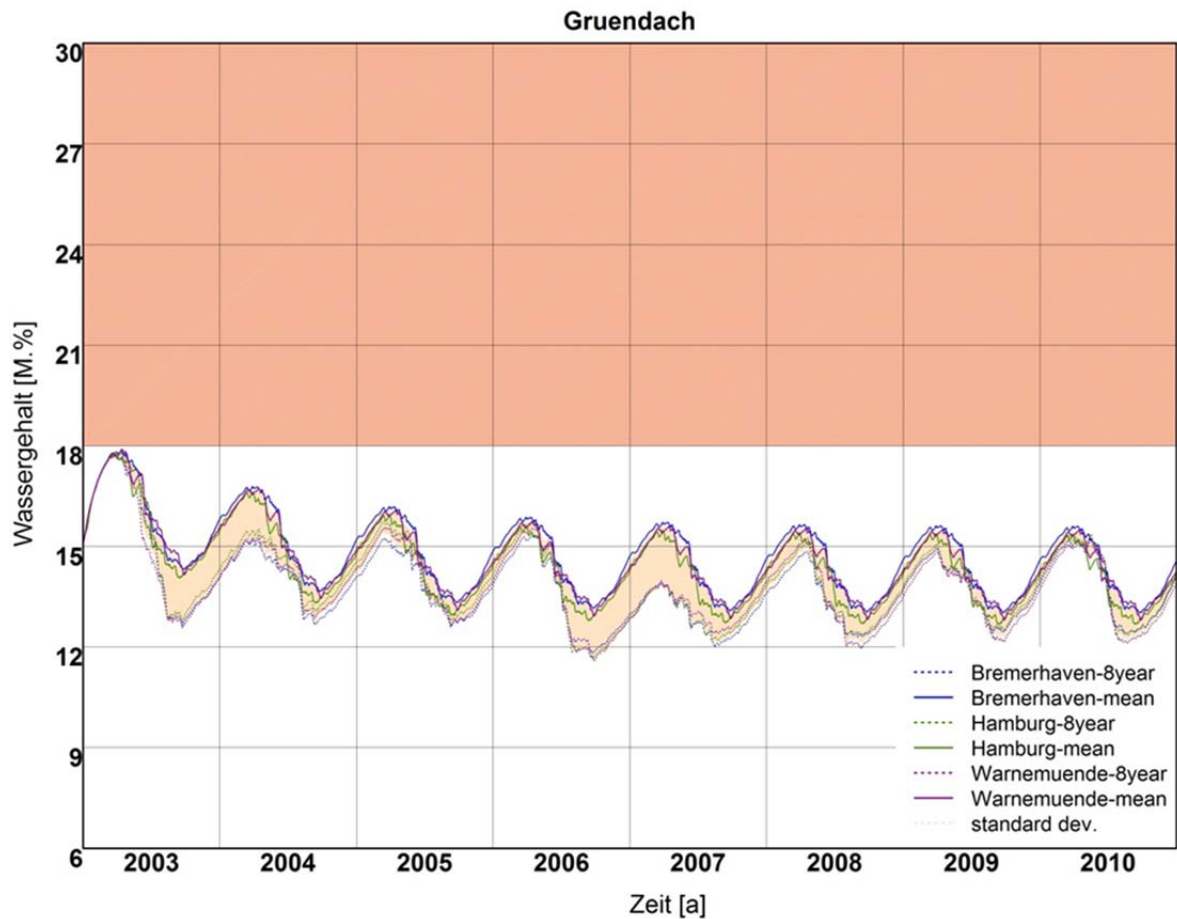


Bild 33:
Verlauf der Wassergehalte in der OSB des betrachteten Gründaches. An den Standorten Hamburg, Bremerhaven und Warnmünde. Unter Verwendung der gemessenen Klimadaten und der HRY.

Mit Ausnahme der Jahresübergänge 2003-2004 bzw. 2006-2007 liegen auch für die betrachtet OSB Schalung des Gründaches die Wassergehalte aller Varianten nahe zusammen. Für die Varianten mit gemessenen Klimadaten ergeben sich die niedrigeren Wassergehalte während Varianten mit den mittleren Jahren die höheren Wassergehalte erzielen. Die höchsten Wassergehalte ergeben sich bei Verwendung des HRY am Standort Bremerhaven.

Für die westlich orientierte Außenwand ist der Wassergehalt des Vollziegel-mauerwerks in Bild 34 für alle Varianten gegenübergestellt.

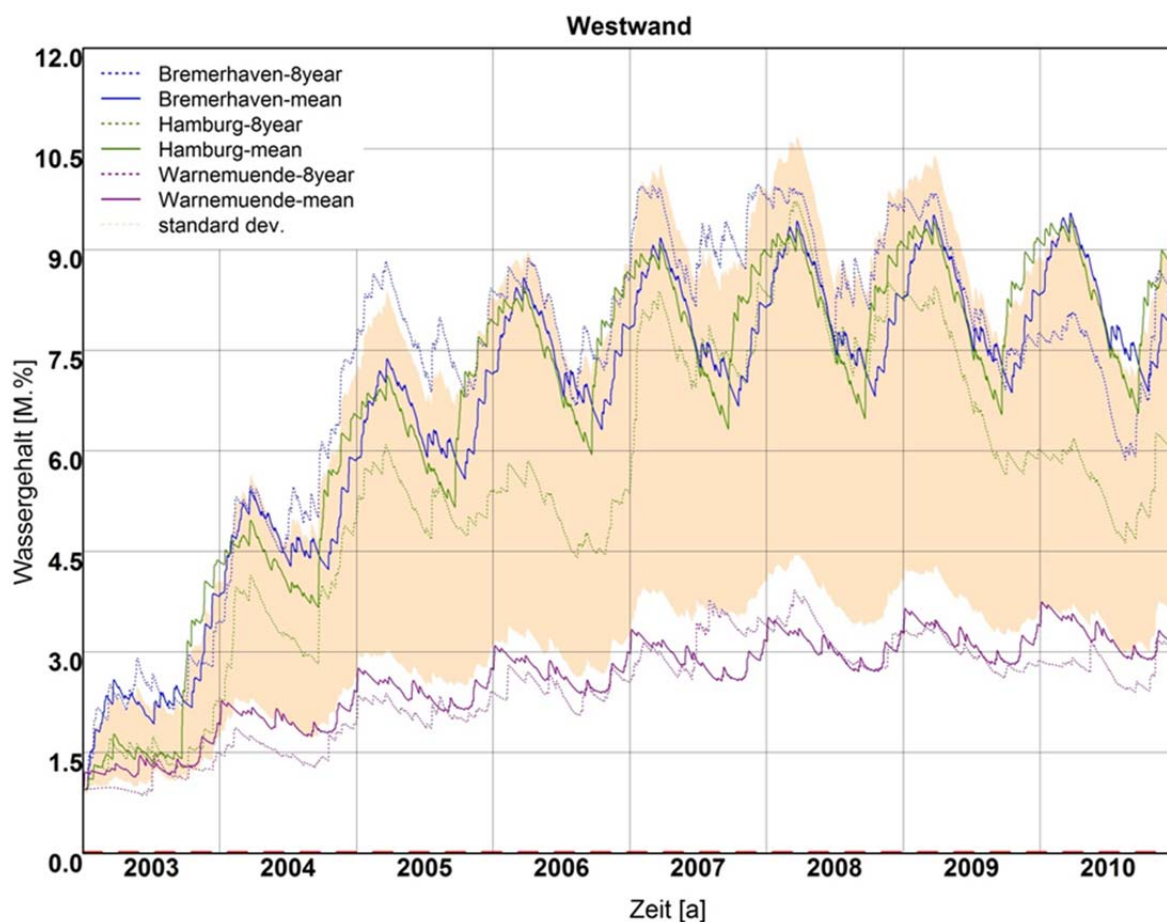


Bild 34:
Verlauf der Wassergehalte im Mauerwerk der betrachteten Außenwand. An den Standorten Hamburg, Bremerhaven und Warnemünde. Unter Verwendung der gemessenen Klimadaten und der HRY.

In Bild 34 zeigt sich, dass die Wassergehalte für die Varianten am Standort Warnemünde deutlich unterhalb der Varianten für Hamburg und Bremerhaven liegen. Die maximalen Wassergehalte ergeben sich bei Verwendung der Messdaten vom Standort Bremerhaven in den Jahren 2007 und 2008. Die mittleren Jahre der Standorte Bremerhaven und Hamburg sind nahezu identisch.

Wie die vorhergegangenen Vergleiche gezeigt haben, liegen abgesehen von der Westwand, die Wassergehalte der einzelnen Konstruktionen nahe beisammen. Da jedoch die Westwand deutlich zu kritisch bewertet würde und die Regendaten für den Standort Warnemünde deutlich von den anderen beiden Standorten abweichen (vgl. Tabelle 59) wird von einer Gruppierung abgesehen. Für die beiden westlich gelegenen Standorte wird Hamburg als kritischer Standort gewählt. Für die betrachtete Westwand treten in den Jahren 2007 – 2009 höhere Schlagregenschläge auf, was zu einem höheren Wassergehalt in der Konstruktion führt. Um eine zusätzliche Sicherheit gegenüber einzelnen „Ausreißer“ Jahren zu haben und auch das Flachdach kritisch repräsentativ bewerten zu können wird das mittlere Jahr am Standort Hamburg noch leicht korrigiert. Folgende Modifikation ist ausreichend, um die Maximalwerte der

einzelnen Jahre (v.a. 2007-2009) durch das mittlere Jahr ebenfalls mit abzudecken: Die Temperatur wird -0.4 K abgesenkt, die Schlagregenmenge um ca. 8 % erhöht. Die Ergebnisse der simulierten Wassergehalte mit dem angepassten Klima sind in Bild 35 im Vergleich zu den übrigen Standorten dargestellt.

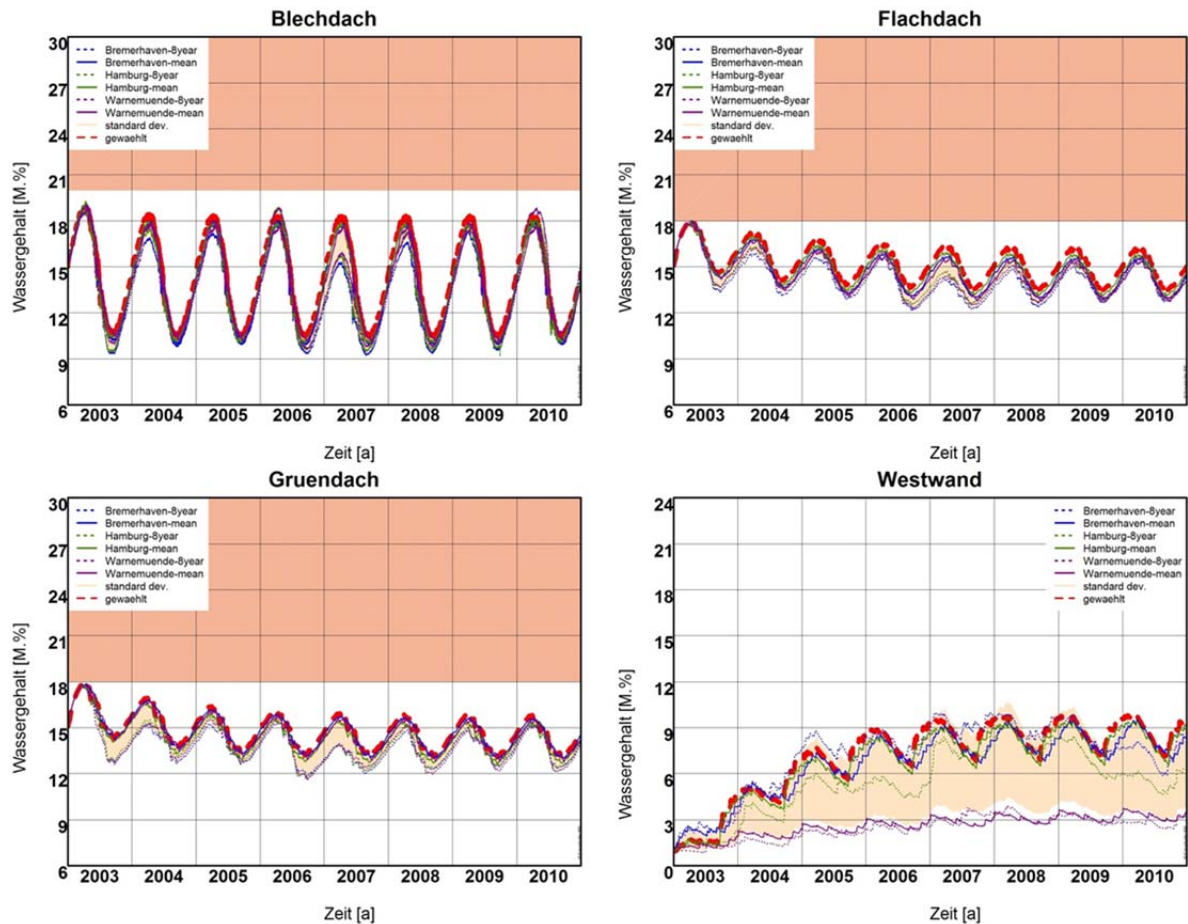


Bild 35:
Vergleich der Variante mit angepasstem Klima mit den übrigen Varianten der Zone 3.

2.4.4 Zone 4

Bei der TRY Zone 13 handelt es sich um eine sehr große Region, welche auch nach der neuerlichen Zonierung erhalten bleibt. Daher wird stichpunktartig überprüft, ob auch bei größerer Entfernung vom Referenzstandort aber vergleichbarer Lage der Referenzstandort für eine Bauteilbewertung verwendet werden kann.

Hierzu wird der Referenzstandort Fürstencell mit dem ca. 180km Luftlinie entfernten Standort Weißenburg verglichen. Für die TRY aus dem Jahr 2004 wurde das im Südosten gelegene Passau als Referenzstandort gewählt. Für die HRY

wird die 8 km entfernte Messstation Fürstenzell verwendet. Weissenburg hingegen liegt zentral im Nordosten der TRY Zone 13. Der Vergleich soll stichpunktartig zeigen, ob ein Referenzstandort, auch im Vergleich zu lokal vorhandenen Klimadaten, einen kritisch repräsentativen Wassergehaltsverlauf erzeugt. Nachfolgend werden in Bild 36 die Wassergehalte der vier Konstruktionen bei Verwendung der jeweiligen Klimadaten am Standort Fürstenzell bzw. am Standort Weissenburg gegenübergestellt.

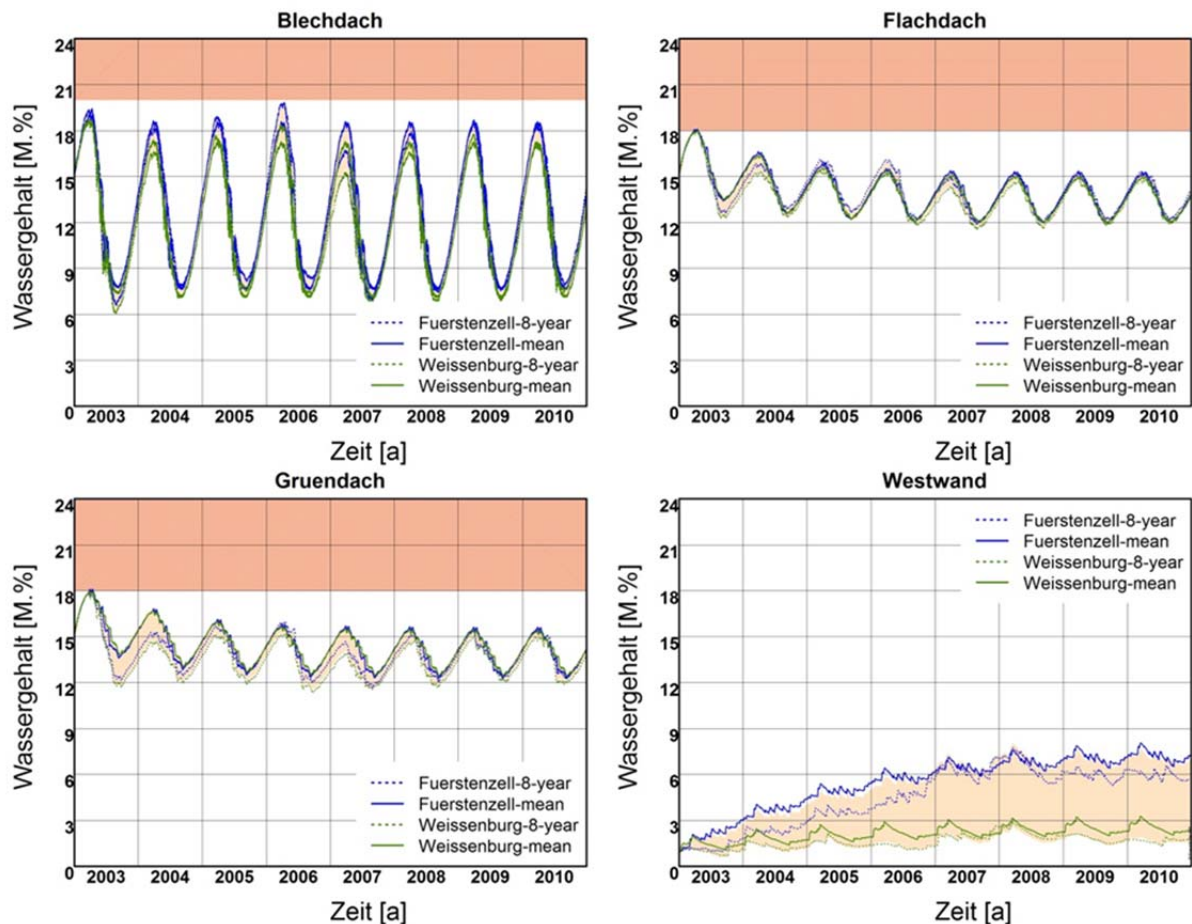


Bild 36: Vergleich der resultierenden Wassergehalte an den Standorten Fürstenzell und Weissenburg. Die durchgezogenen Kurven stehen dabei für die Varianten auf Basis der mittleren Jahre, die gestrichelten für die 8-Jahres-Messdaten. Die roten Bereiche markieren den kritischen Wassergehalt nach [34]. Der hellrote Bereich in der dritten Grafik veranschaulicht die Schwankung auf Basis der einfachen Standardabweichung.

Der Vergleich in Bild 36 verdeutlicht, dass Fürstenzell für alle vier Konstruktionen kritisch repräsentativ ist. Dies bedeutet, dass das HRY aus Fürstenzell höhere Wassergehalte erzeugt als bei Verwendung der vor Ort gemessenen Klimadaten. Dies belegt, dass die Zonen Einteilung der TRY des DWD auch bei

größerer Flächenausdehnung verwendet werden kann, bzw. am konkreten Beispiel, dass das HRY aus Fürstencell kritisch repräsentativ für Weissenburg ist.

2.4.5 Zonale Einteilung der HRY

Nach der Betrachtung der einzelnen Standorte in Kapitel 2.3.3 und der Zusammenfassung der bestehenden Zonen in den Kapitel 2.4.1 bis 2.4.4 ergeben sich die 11 in Tabelle 6 aufgeführten Referenzstationen für die HRY. Zusätzlich sind die korrespondierenden Zonen der TRY des DWD in der Tabelle mit aufgeführt.

Tabelle 6:
Standorte der Referenzstationen der Feuchtereferenzjahre (HRY).

Nr.	korrespondierende TRY Zone	Standorthöhe [m] über NN	Referenzstation HRY	Latitude [°]	Longitudo [°]
1	2	10	Warnemünde	54,18	12,08
2	1;3	16	Hamburg	53,63	10,0
3	4	100	Potsdam	52,38	13,07
4	6; 8	610	Braunlage	51,73	10,60
5	5;7	233	Kassel	51,3	9,45
6	9 ;10	419	Chemnitz	50,80	12,87
7	11	1215	Fichtelberg	50,43	12,95
8	12	100	Mannheim	49,52	8,55
9	13	476	Fürstencell	48,55	13,35
10	14	737	Stötten	48,67	9,87
11	15	818	Lindenberg	47,62	9,9

Werden die Grenzen der TRY als Ausgangsbasis verwendet und die Zonen der TRY gemäß Tabelle 6 zusammengefasst ergeben sich die in Bild 37 dargestellten 11 Zonen für die HRY die das gesamte Gebiet der BRD abdecken.

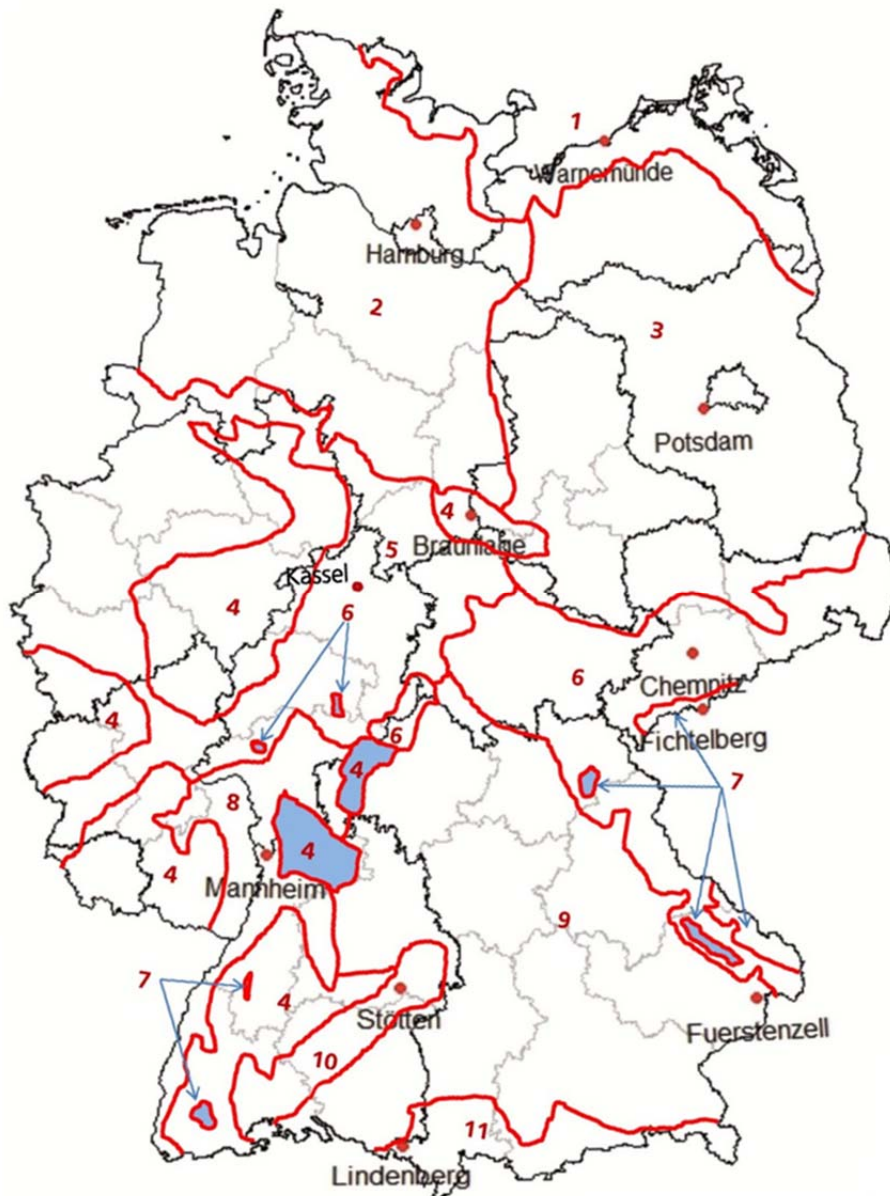


Bild 37:
 Zonale Einteilung Deutschlands für die erstellten hygrischen Referenzjahre (HRY) auf Basis der TRY Karte des DWD (vgl. Bild 8). Die roten Grenzen beziehen sich auf die Zonengrenzen der TRY, die schwarzen Grenzlinien Kennzeichnen die einzelnen Bundesländer und die grauen die jeweiligen Regierungsbezirke.

2.5 Erstellung kalter HRY nach EN 15026

Die im vorigen Kapitel vorgestellten Hygrischen Referenzjahre (HRY) sollen vor allem das langfristige Bauteilverhalten realistisch, jedoch leicht kritisch wiedergeben. Dies ist in den meisten Fällen maßgeblich für das Funktionieren oder Versagen einer Konstruktion. Wie die Kapitel 2.3 und 2.4 auch gezeigt haben

können für manche Konstruktionen einzelne gemessene Jahre zu kritischeren Bedingungen führen. Des Weiteren gibt es Schadensmechanismen, die kurzfristig bei bestimmten Wettersituationen auftreten. Hier können schon einjährige, oder noch kürzere, Zeiträume ausreichen um Konstruktionen dauerhaft zu schädigen. Viele solcher Wettersituationen wie z.B. schwere Stürme mit starkem Niederschlag o.ä. können nicht sinnvoll durch Referenzklimadaten abgedeckt werden. Auch die Erstellung eines „extrem kritischen Jahres“, welches alle kritische Einflussfaktor abdeckt ist aus zweierlei Gründen nicht sinnvoll. Erstens wäre ein solcher Datensatz nur schwierig konsistent zu halten, da sich die Anpassungen einzelner Klimaelemente unterschiedlich auf die Konstruktionen auswirken. Der zweite Grund ist das mit einem derartigen Jahr auch Konstruktionen als kritisch oder funktionsunfähig bewertet würden die sich unter realen Standortbedingungen als funktionsfähig bewiesen haben. Wenn in der Praxis bauphysikalisch bedingte Schäden auftreten, die maßgeblich auf das Klima eines spezifischen Jahres zurückzuführen sind, sind dies v.a. Schäden durch Frost oder Schimmel in besonders kalten Wintern. Bereits die Analysen in Kapitel 2.2.4 haben gezeigt, dass die Temperaturverhältnisse eines Klimadatensatzes das hygrothermische Verhalten der Bauteile stärker als alle anderen Klimaelemente beeinflussen. Daher werden zusätzlich zu den normalen HRY-Datensätzen kritisch kalte HRY zur Verfügung gestellt werden, die bezogen auf die Temperatur einem extrem kalten Jahr entsprechen, bezüglich der anderen Klimaelemente aber immer noch typisch sind. Nach der eigentlichen Erstellung erfolgt die Bewertung auf Basis des Bauteilverhaltens des Blech-, Flach- und Gründaches sowie einer nördlich orientierten Außenwand. Dabei werden die gemessenen Jahre 2003 bis 2010 für die vier Konstruktionen an den 11 Referenzstandorten den zugehörigen HRY gegenübergestellt. Daraus ergeben sich 32 Fälle je Standort bzw. 352 Fälle für die gesamte Datenbasis. Die Auswertung erfolgte wie in Bild 38 dargestellt bezogen auf die Überschreitungsdauer der kritischen Grenzwerte nach der DIN 68800 bzw. nach der kumulierten Überschreitungshäufigkeit der kritischen Innenoberflächenfeuchte nach der DIN 4108. Hier kommt es vor, dass real gemessene Jahre zu höheren und damit kritischeren Wassergehalten in einer Konstruktion führen als die Verwendung der HRY. Dieses Verhalten tritt an unterschiedlichen Standorten und Konstruktionen auf. Exemplarisch wurde das Blechdach am Standort Braunlage ausgewählt um dieses Verhalten zu veranschaulichen. Es ist nachfolgend in Bild 38 dargestellt. Am Beispiel der Jahre 2009 und 2010 führt das gemessene Klima zu 3931 bzw. 4269 Überschreitungsstunden während das mittlere Jahr lediglich bei 3454 Überschreitungsstunden bleibt.

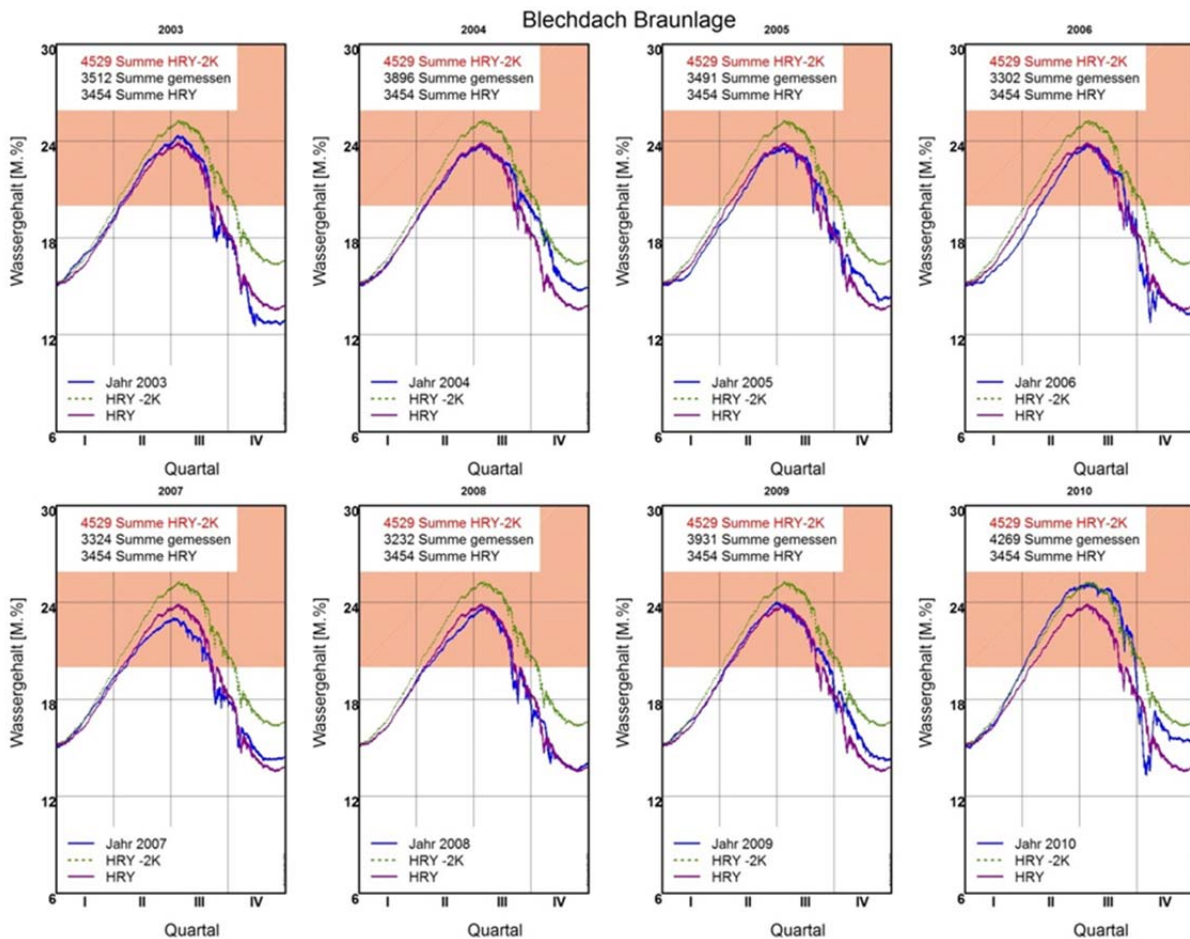


Bild 38:

Vergleich der berechneten Wassergehalte des Blechdaches am Standort Braunlage für die Jahre 2003 bis 2010. Die violette Kurve entspricht der Berechnung mit dem neuen HRY, die grüne Kurve mit dem um 2 K abgesenkten HRY und in blau ist der berechnete Wassergehalt bei Verwendung des jeweils real gemessenen Jahres dargestellt. Zusätzlich sind jeweils noch die Überschreitungsdauern des kritischen Grenzwassergehaltes von 20 M.-% in Stunden angegeben.

Die übrigen Ergebnisse für den Standort Braunlage sind zum besseren Verständnis im Anhang als Bild 284 bis Bild 286 abgebildet. Der Datensatz welcher zu den kritischsten Bedingungen führt wird dann für die jeweilige Variante als Worst case bezeichnet und für jedes gemessene Jahr aufsummiert. Das Ergebnis ist nachfolgend in Bild 39 dargestellt. Dabei wurde jeweils bewertet welcher Klimadatensatz zu einer längeren Überschreitungsdauer führt.

Worst Case Fälle

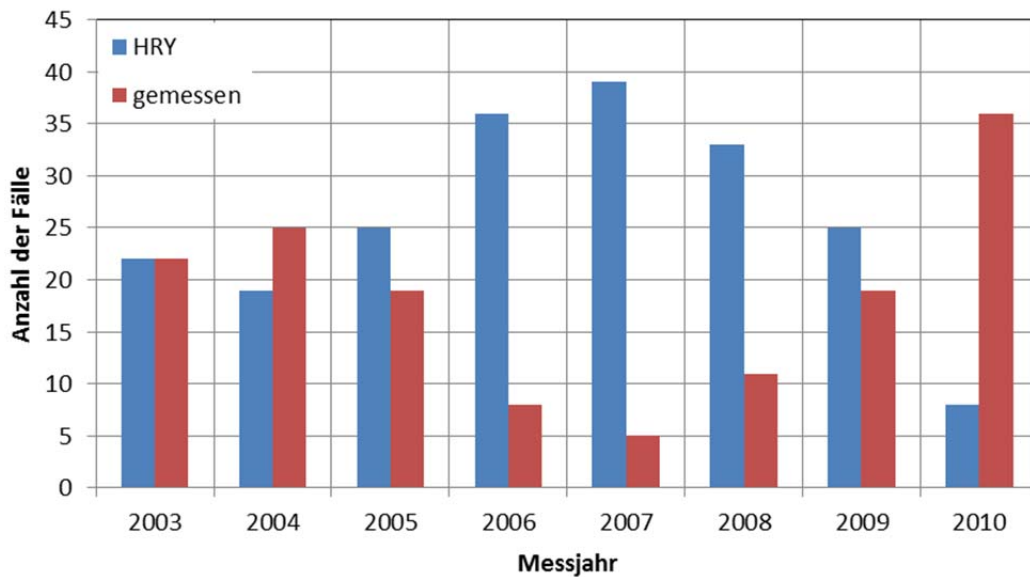


Bild 39:
Vergleichsfälle über alle betrachteten Standorte in Relation zum jeweiligen Messjahr.

Bild 39 zeigt, dass im Vergleich zu den Einzeljahren das neu erstellte HRY häufiger zu kritischen Bedingungen führt. Ausnahmen bilden die Messjahre 2004 und 2010. Wie diese Aufstellung darüber hinaus zeigt, liegen zwischen den beiden extremen Messjahren 5 Jahre sodass bei einem mehrjährigen Bewertungszeitraum wieder die HRY zu kritischeren Bedingungen im Bauteil führen. Es zeigt aber auch, wie die vorherigen Auswertungen in Kapitel 2.3 und Kapitel 2.4 das in Einzelfällen extreme gemessene Jahre zu kritischeren Bedingungen in der Konstruktion führen können als die HRY. Diese einzelnen kritischen Jahre können in der Erstellung der HRY nicht stärker berücksichtigt werden, da sonst die übrigen Varianten unrealistisch schlecht abschneiden würden. Um dennoch auch diese Jahre abdecken zu können ist ein weiterführender Ansatz notwendig.

2.5.1 Erstellung der kalten HRY

Zur Erstellung von kalten Jahren schlägt DIN EN 150216 [4] eine generelle Temperaturabsenkung von 2K vor. Die relative Luftfeuchte bleibt dabei unverändert. Inwieweit diese Anpassung zu repräsentativen kalten Datensätzen führt wird anhand der entsprechend dem Normvorschlag temperaturkorrigierten HRY im Vergleich mit den Messdaten überprüft. Diese Referenzjahre werden im Folgenden als „kalte“ HRY bezeichnet. Die Überprüfung erfolgt wie zuvor anhand der simulierten Feuchteverhältnisse der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Aufbauten.

Im ersten Schritt wird dabei je Konstruktion und Standort das Feuchteverhalten ausgewertet, das Vorgehen ist identisch zu dem in Kapitel 2.4.5 beschriebenen. Dabei wird die Überschreitung der jeweiligen Grenzwerte in den kritischen Schichten verglichen. Für den Vergleich wird jeweils das HRY mit einem nach EN 15026 um 2K abgesenkten HRY und den acht gemessenen Jahren verglichen. Diese Auswertung wird für die vier Konstruktionen, über acht Jahre an den 11 HRY Referenzstationen durchgeführt. Daraus ergeben sich 352 Varianten. In nachfolgendem Bild 40 ist das Ergebnis der um 2K abgesenkten HRY dem jeweiligen gemessenen Jahr gegenübergestellt.

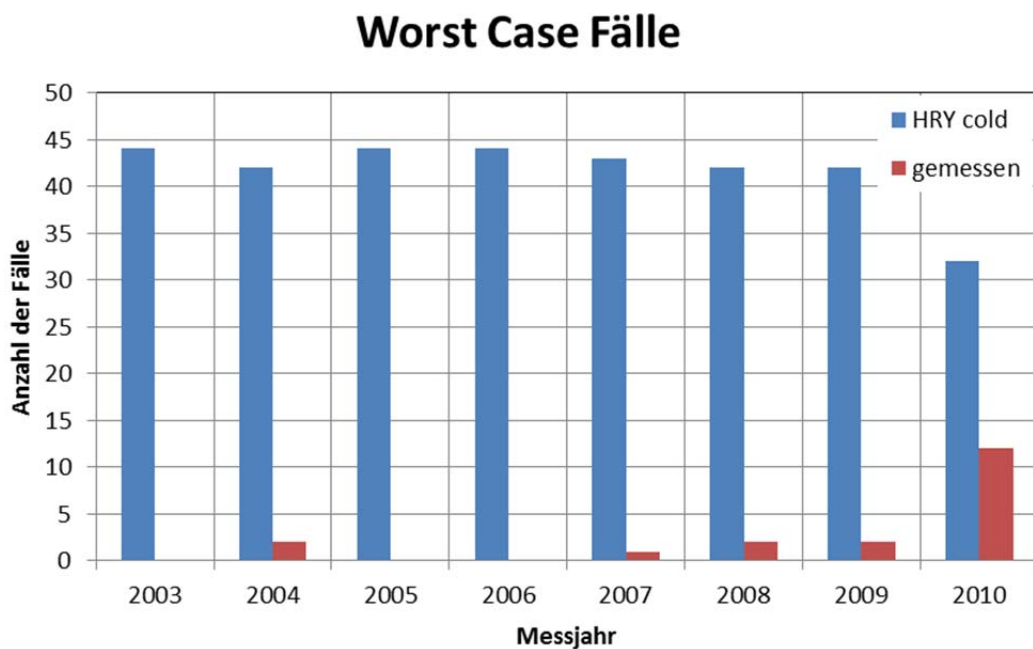


Bild 40:
Vergleichsfälle über alle betrachteten Standorte in Relation zum jeweiligen Messjahr.

Wie Bild 40 führt die Verwendung des „kalten“ HRY im Vergleich zu jedem der gemessenen Jahre häufiger zu kritischen Bedingungen. Im Vergleich zur Auswertung mit den HRY in Bild 39 zeigt sich, dass die „kalten“ HRY deutlich häufiger zu kritischen Bedingungen führen. Für die Nordwand wurde die kumulierte Überschreitungsdauer, der kritischen Oberflächenfeuchte von 80 % r.F. nach DIN 4108 [35] ausgewertet. Für die Standorte Hamburg, Kassel, Lindenberg, Mannheim und Potsdam kommt es vor, dass einzelne gemessene Jahre zu mehr Überschreitungsstunden führen als die um 2K abgesenkten HRY. Für die Nordwand am Standort Hamburg ist dies beispielhaft im Anhang unter Bild 287 dargestellt. Wie die Abbildung veranschaulicht, kommt es auch hier bei Verwendung des gemessenen Jahres 2010 zu mehr Überschreitungsstunden als bei Verwendung des „kalten“ HRY. Das Jahr 2010 erzeugt 2003 Überschreitungsstunden während das Referenzjahr nur zu 1384 Überschreitungs-

stunden führt. Die kritische Oberflächenfeuchte von 80% nach der DIN 4108-3 [35] darf nach Norm auch an Wärmebrücken nicht überschritten werden um ein Schimmelpilzwachstum zu vermeiden. Nach [41] erlaubt dieser Ansatz aber keine Wachstumsprognose, da die Materialabhängigkeit nicht weiter berücksichtigt wird. Für eine genaue Bewertung des möglichen Schimmelpilzrisikos ist darüber hinaus nicht nur die absolute Überschreitungsdauer in Stunden entscheidend, sondern wie lang Randbedingungen am Stück vorherrschen die ein Schimmelpilzwachstum ermöglichen. Um diesen Einfluss entsprechend zu berücksichtigen, wurden die Ergebnisse zusätzlich exemplarisch mit dem Postprozessor WUFI® Bio [41] betrachtet. Dieser ermöglicht es, die Bedingungen für eine Modellspore auf der Bauteiloberfläche zu überprüfen und festzustellen, ob die Voraussetzungen für Keimung und Wachstum erfüllt sind. Ist dies der Fall, kann die Intensität des Schimmelwachstums prognostiziert werden. Die darauf folgende Wachstumsprognose kann in Millimeter des Myzel-Wachstums nach Sedlbauer [41] oder nach dem Mould-Index von Viitanen [42] erfolgen. Dies wird exemplarisch für die Standorte Hamburg und Potsdam durchgeführt. In Bild 41 ist die Wachstumskurve auf Basis der Messdaten mit der Kurve des um 2 K abgesenkten Jahres für den Standort Hamburg verglichen.

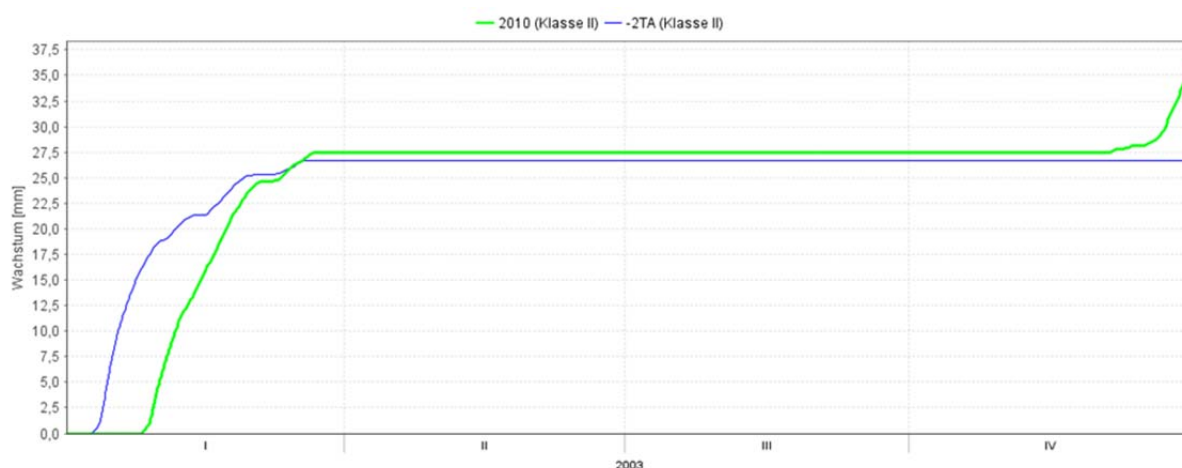


Bild 41:
Vergleich der Wachstumskurven des Myzels am Standort Hamburg bei Verwendung des kritischen Jahres (-2K, blaue Kurve) und bei Verwendung des Messdatensatzes aus dem Jahre 2010 (grüne Kurve).

Es zeigt sich, dass die Kurven nahezu gleichen Zuwachs prognostizieren, jedoch kommt es bei Verwendung der Messdaten zu einem erneuten Zuwachs im vierten Quartal der bei Verwendung des um 2 K abgesenkten Referenzjahres nicht eintritt. Diese Zuwachsrate würde umgerechnet in etwa einem Mould-Index von 0,5 entsprechen. Erst ab einem Mould-Index von 2 geht man von mit bloßem Auge sichtbarem Bewuchs aus. In nachfolgendem Bild 42 sind die Zuwachskurven für den Standort Potsdam gegenübergestellt.

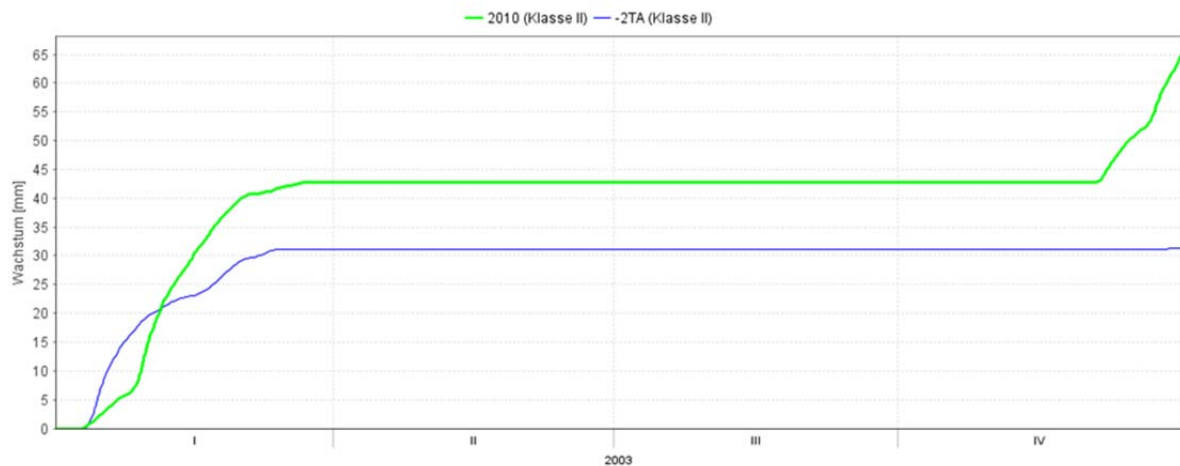


Bild 42:

Vergleich der Wachstumskurven des Myzels am Standort Potsdam bei Verwendung des kritischen Jahres (-2K, blaue Kurve) und bei Verwendung des Messdatensatzes aus dem Jahre 2010 (grüne Kurve).

Das „kalte“ HRY würde hier ebenfalls zu einem geringeren Wachstum umgerechnet ergäbe sich ein Mould-Index von ca.1. Daraus lässt sich erkennen, dass die alleinige Betrachtung der Überschreitungsdauer zwar nicht ausreichend ist um eine Prognose des Schimmelwachstums durchzuführen aber gut als erster Indikator verwendet werden kann. Die Auswertung der Wachstumskurven zeigt darüber hinaus, dass einzelne Jahre zu einem höheren Schimmelpilzwachstum führen können als die „kalten“ HRY. Da die vorhergehenden Untersuchungen der Worst Case Fälle jedoch gezeigt hat, dass diese extremen Jahre nicht direkt aufeinander folgen wird die gleiche Betrachtung für den Standort Potsdam über 2 Jahre von 2009 -2010 durchgeführt. Das Ergebnis ist in Bild 43 dargestellt.

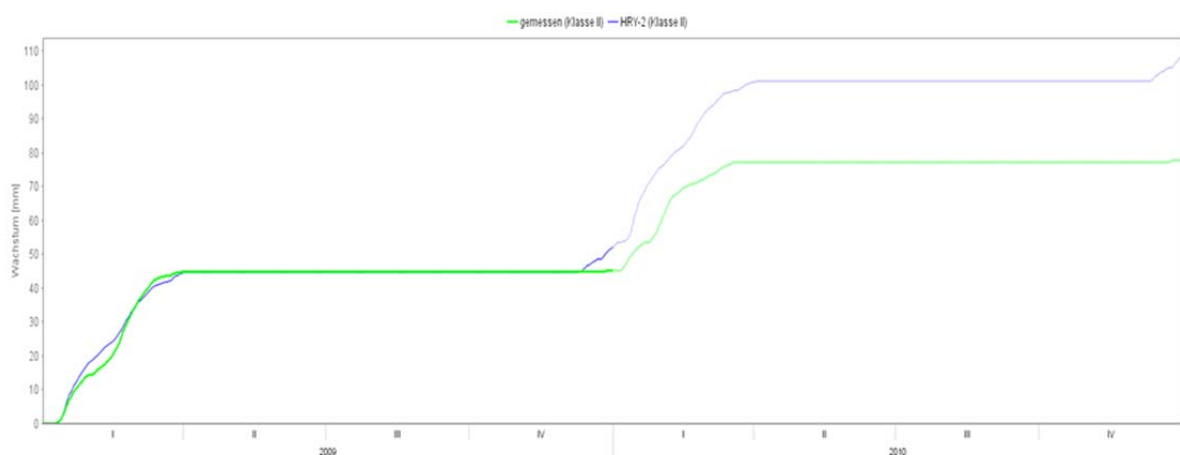


Bild 43:

Vergleich der Wachstumskurven des Myzels am Standort Potsdam bei Verwen-

dung des kritischen Jahres (-2K, blaue Kurve) und bei Verwendung des Messdatensatzes für den Zeitraum 2009 und 2010 (grüne Kurve).

Die Abbildung verdeutlicht, dass sich bei Verwendung von zwei kritischen Jahren nacheinander ein höheres Wachstum ergibt als bei der Verwendung des Messzeitraumes. Darüber hinaus wird deutlich das bei Berücksichtigung des Jahres 2009, der Zuwachs im Jahr 2010 mit ca. 35mm geringer ausfällt als bei alleiniger Verwendung des Jahres 2010. Dies ist auf das Einschwingverhalten der Konstruktion zurückzuführen, welches offensichtlich auch einen Einfluss auf die Wachstumsbedingungen hat. Für die weiteren Betrachtungen ergibt sich daraus die Folgerung, dass ein längerer Bewertungszeitraum als ein Jahr sinnvoll ist, da sich singuläre Ereignisse so besser in einen Gesamtzusammenhang einordnen lassen. Darüber hinaus sollte das Einschwingverhalten berücksichtigt werden d.h. es sollte ein Zeitraum von mindestens 3 Jahren betrachtet werden, besser aber länger. Wenn das „kalte“ HRY am Beginn des Betrachtungszeitraumes steht muss danach ein längerer Zeitraum zum einschwingen der Konstruktion zur Verfügung stehen.

Nachdem ein achtjähriger Messzeitraum zur Verfügung stand wird dieser mit verschiedenen Kombinationen aus HRY und „kalten“ HRY verglichen. Nachdem die Absenkung der Temperatur für die „kalten“ HRY auf der Empfehlung der EN 15026 [4] beruht wird für diesen Vergleich auch das Innenraumklima der Norm verwendet. Hierbei wird das Innenraumklima direkt vom Außenklima abgeleitet und nicht mehr als konstant über den Berechnungszeitraum angenommen, es wird von einer zusätzlichen „normalen“ Feuchtelast entsprechend der Norm ausgegangen. Im Einzelnen werden folgende Klimata miteinander verglichen, das real gemessene 8-Jahres-Klima, 8 Mal das HRY nacheinander sowie eine Kombination aus drei normalen HRY, zwei kalten HRY und wieder drei HRY. Der Gedanke hierbei ist, dass die beiden extremen Jahre natürlich vorkommende extrem „kalte“ Jahre abbilden. Die drei mittleren Jahre am Anfang sollen hingegen dafür sorgen, dass sich der Wassergehalt der Konstruktion einschwingt. Die drei letzten Jahre dienen zur Beurteilung des Verhaltens der Konstruktion nach einer Feuchtezunahme. Sie erlauben eine qualitative Einschätzung des vorhandenen Rücktrocknungspotentials.

Exemplarisch werden die Standorte Braunlage und Fichtelberg betrachtet. Fichtelberg wurde als Vertreter eines extremen Standortes ausgewählt und Braunlage als Referenzstandort einer zentral gelegene HRY Zone. Die Verläufe für das Flach- und das Gründach am Standort Braunlage sind im Anhang Bild 288 und Bild 289 aufgeführt. Die sich für das Blechdach ergebenden Verläufe für Fichtelberg und Braunlage sind nachfolgend in Bild 44 und Bild 45 abgebildet.

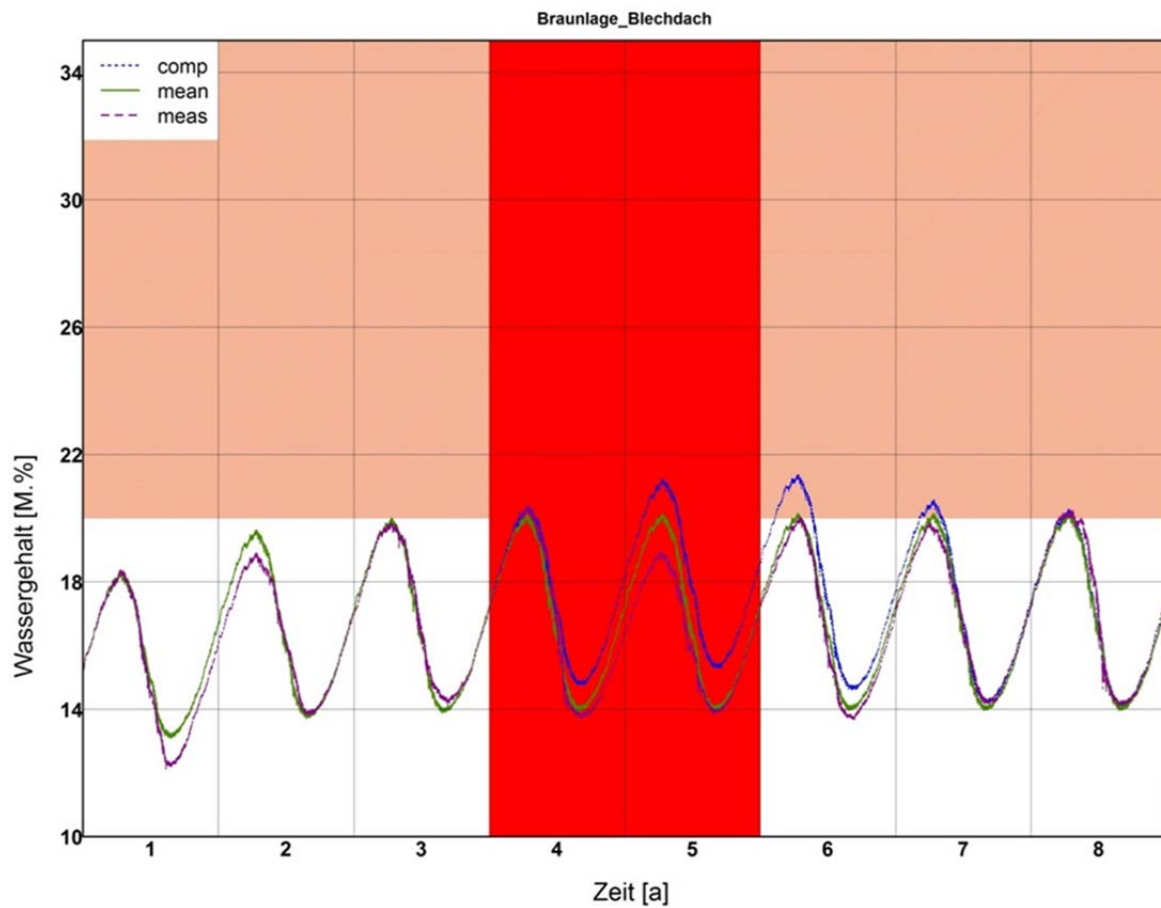


Bild 44:
 Vergleich der Wassergehalte der kritischen Schicht des Blechdaches am Standort Braunlage. Die grüne Kurve stellt dabei den Verlauf bei Verwendung der mittleren Jahre dar, die lila Kurve den Verlauf bei Verwendung der Messdaten und der blaue Verlauf entsteht bei Verwendung der Kombination aus mittleren und extremen Jahren. Der hellrote Bereich stellt den kritischen Wassergehalt nach [34] dar. Der rote Bereich in der Mitte markiert die beiden „kalten“ HRY des kombinierten Datensatzes.

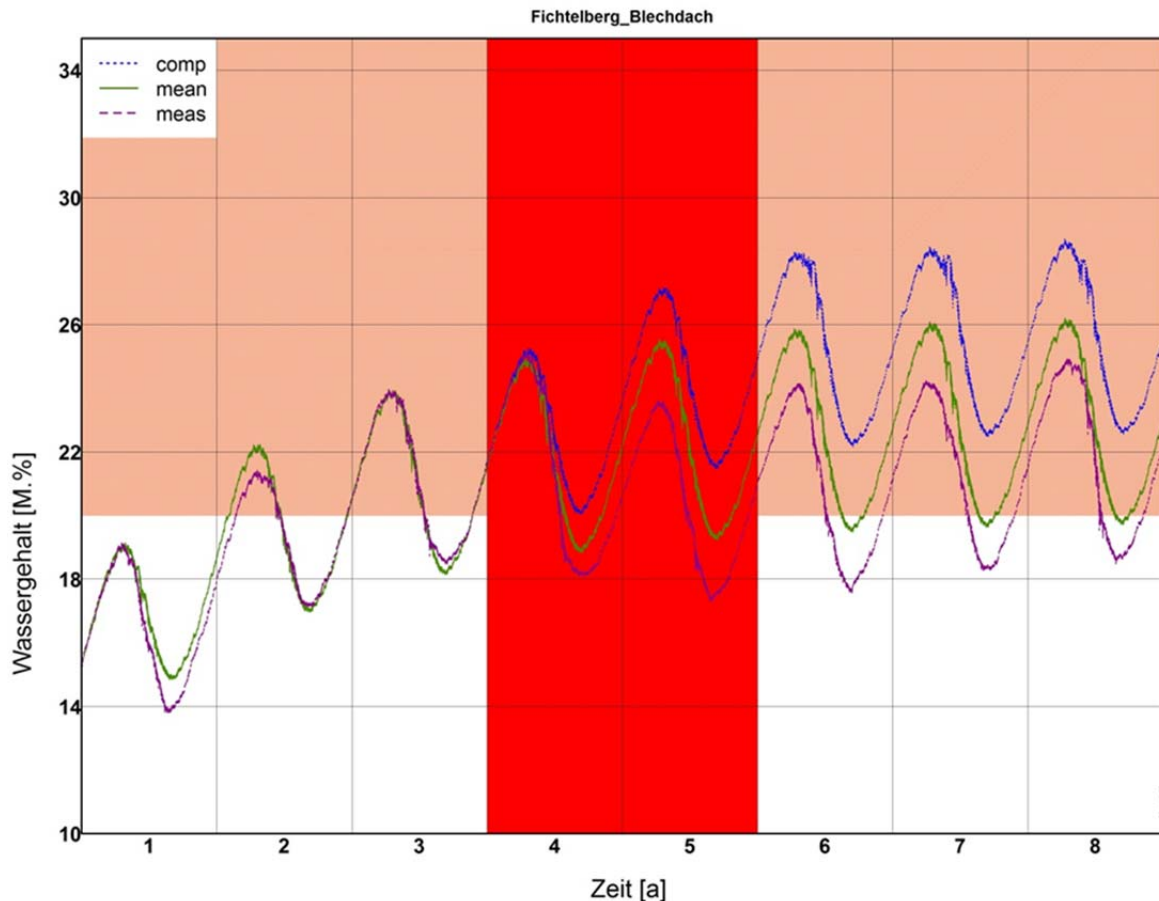


Bild 45:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Schicht des Blehdaches am Standort Fichtelberg. Die grüne Kurve stellt dabei den Verlauf bei Verwendung der mittleren Jahre dar, die lila Kurve den Verlauf bei Verwendung der Messdaten und der blaue Verlauf entsteht bei Verwendung der Kombination aus mittleren und extremen Jahren. Der hellrote Bereich stellt den kritischen Wassergehalt nach [34] dar. Der rote Bereich in der Mitte markiert die beiden „kalten“ HRY des kombinierten Datensatzes.

In beiden Fällen deckt bereits das mittlere Jahr die meisten Maximalwerte ab. Es zeigt sich darüber hinaus, dass der Einfluss von Standort zu Standort verschieden ist. Während die extremen Jahre am Standort Braunlage zu einer Erhöhung um max. 1 M.-% führen, erhöhen sie auf dem Fichtelberg den maximalen Wassergehalt um mehr 2 M.-%. Durch die Trägheit des Systems sind die Wassergehaltsverläufe zeitlich verschoben. Die maximalen Werte treten erst in den Jahren 5 und 6 auf, obwohl die kalten Jahre das vierte und fünfte Jahr waren. Als letzte Information kann noch das Rücktrocknungspotential der Konstruktion, in Abhängigkeit vom Standort, den Abbildungen entnommen werden. Während das Blehdach am Standort Braunlage (vgl. Bild 44) im Verlauf des achten Jahres wieder seinen eingeschwungenen Zustand erreicht hat, ist dieser am Standort Fichtelberg (vgl. Bild 45) am Ende des Berechnungszeitraums noch nicht wieder erreicht. Dieser Effekt kann sich zwischen einzelnen Konstruktionen am gleichen Standort auch unterscheiden. Während der Wassergehalt des Blech-

daches am Standort Braunlage in Bild 44 nach dem Anstieg infolge der „kalten“ HRY wieder absinkt, steigt der Wassergehalt am gleichen Standort für das Flach- und das Gründach weiter an. Dargestellt ist dies im Anhang in Bild 288 und in Bild 289. Während das kalte HRY innerhalb eines Jahres beim Blechdach zu einer maximalen Erhöhung des Wassergehaltes von ca. 2 M.-% führt, erhöhen sich die maximalen Wassergehalte bei dem betrachteten Flach- und Gründach nur noch um ca. 0,4 M.-% bzw. 1 M.-% pro Jahr. Durch die höheren Temperaturen der Außenoberfläche trocknet das Blechdach dennoch wieder aus.

2.5.2 Kombination kalter HRY und HRY

Wie unter anderem Bild 44 und Bild 45 zeigen, genügt häufig bereits die Bauteilbewertung auf Basis der HRY um Wassergehaltsverläufe zu erzeugen die leicht auf der sicheren Seite liegen. Jedoch können einzelne, in der Realität vorkommende extrem „kalte“ Jahre kurzfristig zu höheren Wassergehalten in der Konstruktion führen. Ein Beispiel hierfür ist das Jahr 2010 am Standort Fichtelberg. Um auch dieses Risiko einschätzen zu können, kann als zusätzliche Sicherheit eine Kombination aus HRY und „kalten“ HRY verwendet werden. Ausgehend von den Betrachtungen am Anfang des Kapitels werden folgende Kombinationen von HRY und „kalten“ HRY hinsichtlich ihres hygrothermischen Verhaltens untersucht. Die erste Kombination besteht aus drei HRY, zwei „kalten“ HRY und drei HRY welche aus der Bewertung des Schimmelpilzrisikos entstanden ist. Diese Variante soll nun auf Ihre Auswirkungen auf die Wassergehalte der kritischen Schichten der übrigen Konstruktionen hin untersucht werden. Als Worst Case wird dabei das Auftreten von zwei kalten Jahren nacheinander beibehalten.

Zusätzlich wird untersucht wie sich die Wassergehaltsverläufe entwickeln wenn die beiden „kalten“ HRY am Anfang der Simulation (Jahr 1 & 2) und am Ende (Jahr 7 & 8) verwendet werden. Der erste Fall erlaubt eine bessere Beurteilung des Rücktrocknungspotentials, da die Konstruktion über 6 Jahre Rücktrocknen kann und nicht nur über 3 Jahre wie in der bisherigen Kombination. Die zweite Variante erlaubt eine bessere Beurteilung des eingeschwungenen Zustandes, da die Konstruktion 6 Jahre Zeit hat diesen zu erreichen. Darüber hinaus zeigt diese Variante, wie sich zwei extreme Jahre auf den Endwassergehalt auswirken können. Zur Abschätzung des maximalen Einflusses wird zusätzlich der Wassergehalt bei Verwendung von 8 "kalten" HRY mit aufgenommen.

Für den zuvor betrachteten Standort Hamburg werden für das Blech-, das Flach- und das Gründachs die Verläufe der Wassergehalte bei Verwendung der einzelnen Kombinationsvarianten verglichen. Diese sind nachfolgend in Bild 46 für das Blechdach in Bild 47 für das Flachdach und in Bild 48 für das Gründach abgebildet.

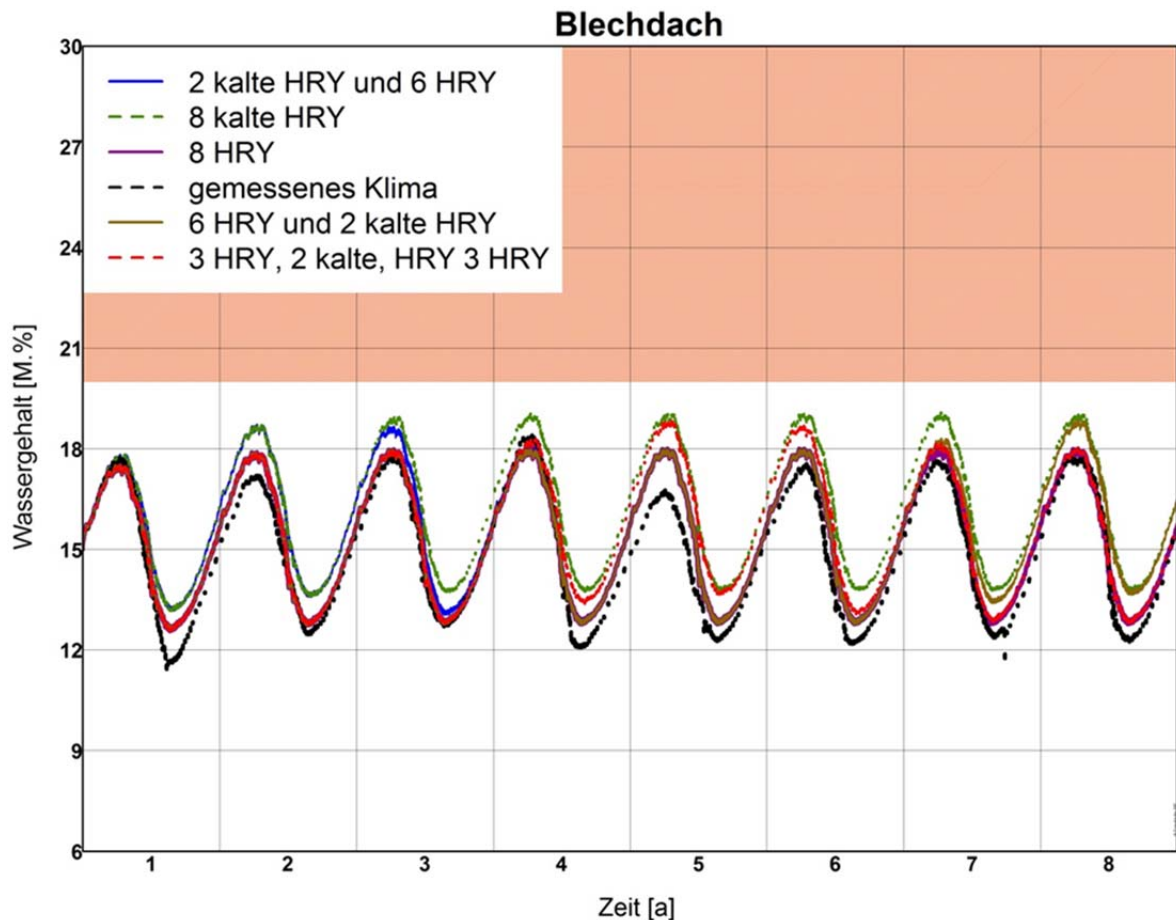


Bild 46:

Wassergehalt in der kritischen Schicht des Blechdaches am Standort Hamburg auf Basis verschiedener Klimadatensätze. Die verschiedenen Varianten sind dabei verschiedene Abfolgen von HRY bzw. der um 2K abgesenkten HRY hier als „kalte“ HRY bezeichnet. In schwarz ist der Wassergehaltsverlauf bei Verwendung der Messdaten dargestellt. Der rote Bereich stellt den kritischen Grenzwassergehalt nach [34] dar.

Im Vergleich zum Ergebnis auf Basis der Messdaten erzeugt die Variante mit den beiden „kalten“ HRY in der Mitte des Bewertungszeitraumes kritischere Bedingungen, vor allem die Jahre 5 und 6 werden um ca. 2 bzw. 1 M.-% überbewertet. Die Variante mit den beiden „kalten“ HRY am Anfang des Bewertungszeitraumes zeigt, dass es ca. 1,5 Jahre dauert bis der Wassergehalt wieder eingeschwungen ist. Die Kombination aus 8 „kalten“ HRY liefert dauerhaft zu hohe Wassergehalte zeigt aber keine Feuchteakkumulation. Die Kombination aus 8 HRY hingegen unterschätzt im ersten und im 4. Jahr den Wassergehalt leicht.

Im Anhang in Bild 290 sind die unterschiedlichen Varianten für das Blechdach am Standort Braunlage gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass 8 „kalte“ HRY zu einem Versagen der Konstruktion führen würden und der Endwassergehalt im Vergleich zur normalen Messreihe um ca. 1,5 M.-% zu hoch berechnet werden würde. Auch die Variante mit den beiden kalten Jahren am Ende des Berech-

nungszeitraumes würde zu einem zu hohen Endwassergehalt führen. Die Ergebnisse auf Basis der Messdaten liegen im vierten und achten Jahr über den Ergebnissen des Referenzjahres. Das reale Verhalten wird am besten durch die Kombination aus drei Referenzjahren zwei kalten Jahren und drei Referenzjahren abgebildet, die Endwassergehalte unterscheiden sich dabei nur geringfügig. Es stellt sich in der Konstruktion wieder die ursprüngliche Gleichgewichtsfeuchte ein.

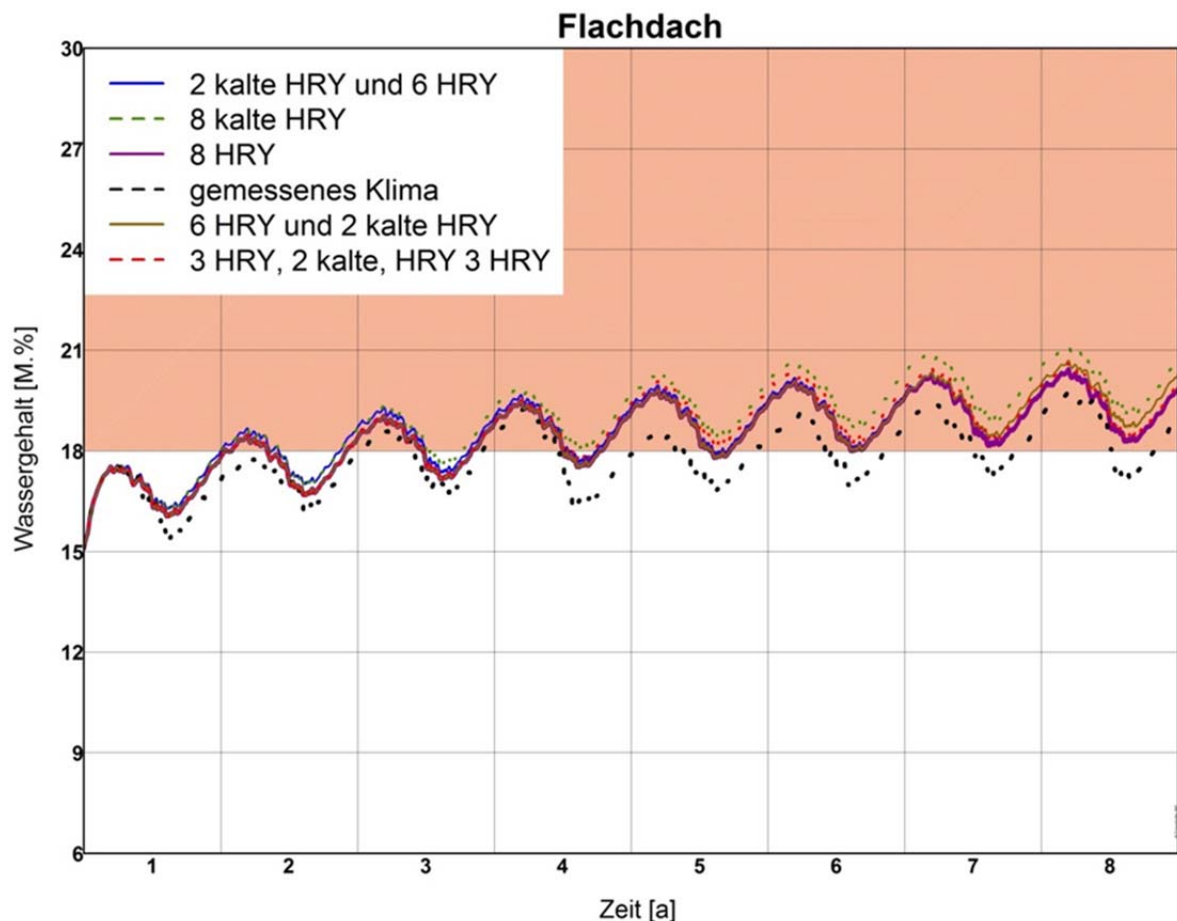


Bild 47: Wassergehalt in der kritischen Schicht des Flachdaches am Standort Hamburg auf Basis verschiedener Klimadatensätze. Die verschiedenen Varianten sind dabei verschiedene Abfolgen von HRY bzw. der um 2K abgesenkten HRY hier als „kalte“ HRY bezeichnet. In schwarz ist der Wassergehaltsverlauf bei Verwendung der Messdaten dargestellt. Der rote Bereich stellt den kritischen Grenzwassergehalt nach [34] dar.

Das Flachdach am Standort Hamburg würde mit alle Varianten versagen, der Zeitpunkt des Versagens ist jedoch unterschiedlich. Alle Kombinationen aus HRY würden nach 1,5 Jahren zum Versagen führen, während dies bei Verwendung der Messdaten erst nach ca. 2,5 Jahren eintreten würde. Für das Flachdach am Standort Hamburg kann daher gesagt werden, dass alle HRY auf der

sicheren Seite liegende Ergebnisse erzeugen. Der höchste Wassergehaltsverlauf ergibt sich bei Verwendung von 8 „kalten“ HRY. Der zweithöchste Wassergehaltsverlauf ergibt sich bei Verwendung der beiden „kalten“ HRY in der Mitte des Bewertungszeitraumes. Die Feuchteakkumulation weist auf das zu geringe Rücktrocknungspotential dieser Konstruktion hin. Dieses führt dann in Kombination mit den beiden „kalten“ Jahren zu einer Überbewertung des Wassergehaltsverlaufes um maximal 1 M.-%, im Vergleich zu Variante mit 8 HRY. Für diese Konstruktion am Standort Hamburg würde also schon die Verwendung von 8 HRY zu einer kritisch repräsentativen Beurteilung führen.

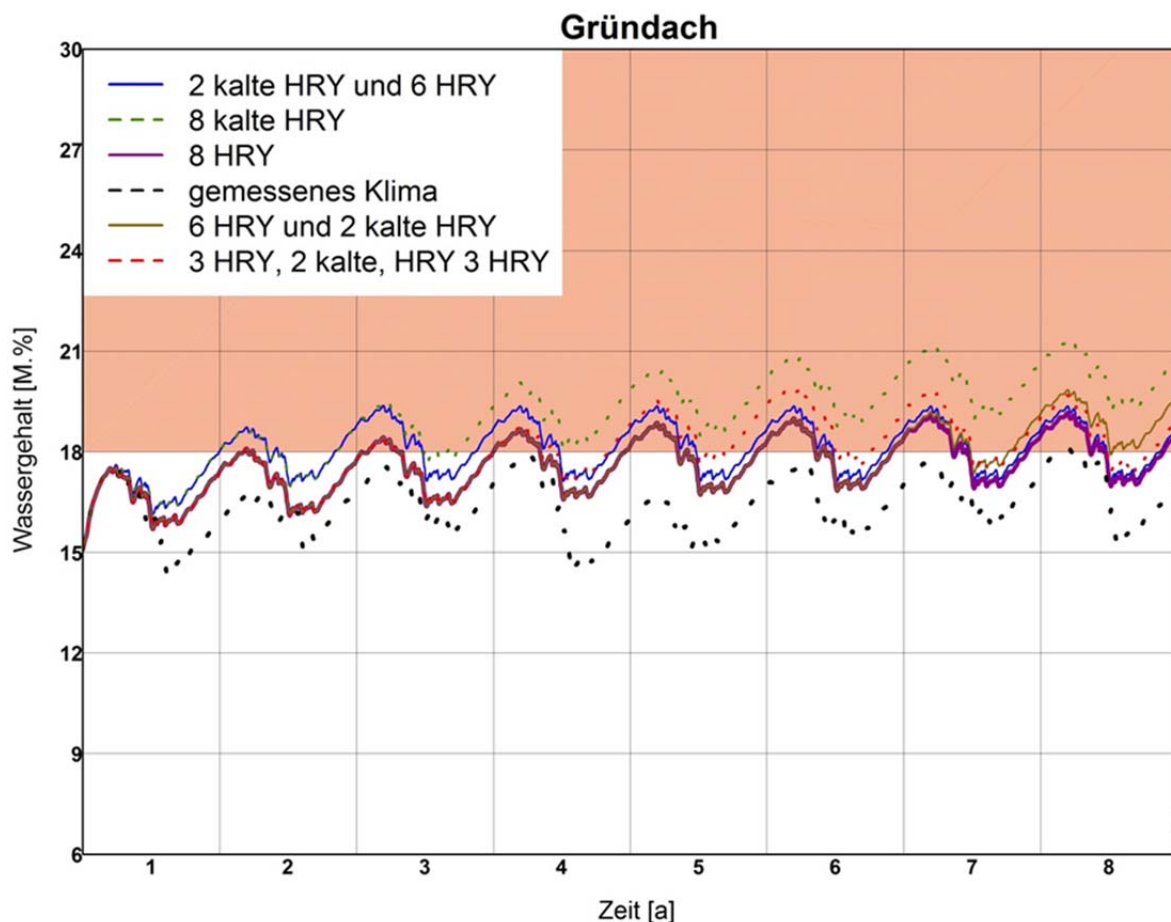


Bild 48:
Wassergehalt in der kritischen Schicht des Gründaches am Standort Hamburg auf Basis verschiedener Klimadatensätze. Die verschiedenen Varianten sind dabei verschiedene Abfolgen von HRY bzw. der um 2K abgesenkten HRY hier als „kalte“ HRY bezeichnet. In schwarz ist der Wassergehaltsverlauf bei Verwendung der Messdaten dargestellt. Der rote Bereich stellt den kritischen Grenzwassergehalt nach [34] dar.

Als letztes wird das Gründach am Standort Hamburg betrachtet. Wie die Abbildung zeigt, führen die Kombinationen aus HRY und „kalten“ HRY nach 1,5 – 2,5 Jahren alle zum Versagen der Konstruktion. Bei Verwendung der Messda-

ten zeigt sich zwar eine Feuchteakkumulation, der kritische Grenzwassergehalt wird aber erst am Ende des Bewertungszeitraumes überschritten. Alle Kombinationsvarianten würden hier also zu einer deutlich kritischeren Bewertung führen. Die Verwendung von 8 „kalten“ HRY erzeugt maximal einen um ca. 3 M.-% höheren Wassergehalt. Die Variante mit der niedrigsten maximalen Abweichung ist die Kombination aus 8 HRY.

Im Anhang in Bild 291 sind die Wassergehaltsverläufe des Gründaches am Standort Lindenberg gegenübergestellt. Hier versagt das Gründach auch bei Verwendung der Messdaten nach 3,5 Jahren bzw. bei Verwendung der HRY Kombinationen nach 1,5 Jahren. Der Unterschied zwischen der höchsten Variante mit 8 „kalten“ HRY und den Messdaten liegt bei maximal 6 M.-%, diese Variante liegt auch deutlich über den übrigen Kombinationen aus „kalten“ HRY und HRY. Die niedrigste Abweichung ergibt sich bei Verwendung von 8 HRY.

Zusammenfassend können folgende Aussagen aus den Betrachtungen abgeleitet werden:

- Um einzeln auftretenden kritische Jahre berücksichtigen zu können, stellt die Kombination aus 6 Referenzjahren mit 2 kalten Jahren in der Mitte des Betrachtungszeitraumes eine gute Möglichkeit dar. Diese Kombination stellt nicht nur aus Sicht der Schimmelpilzbewertung sondern auch bei der Betrachtung der Wassergehalte einzelner Schichten eine auf der sicheren Seite liegende Alternative zum HRY dar. Die Kombination erlaubt darüber hinaus eine bessere Beurteilung des Rücktrocknungspotentials, da Sie das Verhalten nach einer temperaturbedingten Feuchtezunahme von zwei Jahren darstellt. Wie die Untersuchungen in Kapitel 2.4 gezeigt haben treten solche Bedingungen auch vereinzelt bei realen mehrjährigen Klimamessungen auf. Da die Konstruktion nach den „kalten“ HRY wieder drei Jahre Zeit zur etwaigen Rücktrocknung unter Verwendung der normalen HRY hat. Dabei führt diese Kombination, bezogen auf die Endwassergehalte, zu einer deutlich geringeren Erhöhung als z.B. die Variante aus 8 „kalten“ HRY oder die Variante mit den beiden „kalten“ HRY am Ende des Betrachtungszeitraumes. Zusätzlich wird die hygrothermische Analyse um die Bewertung des Rücktrocknungspotentials nach einem singulären Feuchteeintrag erweitert.
- Für Konstruktionen mit einem geringen Rücktrocknungspotential wie z.B. die betrachteten Gründächer, führt die Verwendung der Kombination aus „kalten“ HRY und HRY, zu einer gegenüber den unangepassten HRY, verstärkten Feuchteakkumulation (vgl. Bild 290 und Bild 48).
- Trocknet die Konstruktion nicht innerhalb von drei Jahren wieder aus, stellt die Kombination mit den beiden „kalten“ HRY am Beginn eine alternative Bewertungsmöglichkeit dar.

- Die Wahl von 8 „kalten“ HRY nacheinander erzeugt deutlich erhöhte Wassergehalte in der Konstruktion, es ist fraglich ob diese Bedingungen realistisch sind.
- Durch die Kombination von 2 „kalten“ HRY ergeben sich kritischere Bedingungen als diese Normalerweise in der Realität auftreten. Der Vergleich mit den Messreihen zeigt, dass es unwahrscheinlich ist das kritische Jahre direkt aufeinander folgen.

2.6 Zusammenfassung

Im Kapitel 2 wurde zunächst der Kenntnisstand für die Erstellung von Referenzjahren zusammengetragen. Neben den spezifischen Besonderheiten von klimatischen Zeitreihen wurden auch standortspezifische Faktoren in Kapitel 2.2.3 näher betrachtet. Dabei zeigte sich, dass weniger die Entfernung von zwei Standorten als deren lokale Exposition von entscheidender Bedeutung für die Vergleichbarkeit sein können. Dies hat zur Folge, dass schon bei geringen Distanzunterschieden aber deutlich anderer Exposition deutliche klimatische Unterschiede entstehen können. Dies kann mit HRY Referenzstationen, die über eine große räumliche Ausdehnung Gültigkeit haben, nicht alleine abgedeckt werden. Die hierzu notwendig Anpassungen müssen mit einem geeigneten weiterführenden Modellansatz erfolgen (vgl. Kapitel 3).

Kapitel 2.2.5 hat gezeigt, dass für klimatische Zeitreihen verschiedene teils komplexe Zusammenhänge bestehen. Die verwendeten Methoden zur Sensitivitätsanalyse stellen eine interessante Möglichkeit zur Betrachtung des Einflusses einzelner Klimaelemente auf das hygrothermische Bauteilverhalten dar. Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass auf Grund der Voraussetzungen für die Verfahren, nur die Rangfolge der wichtigsten Klimaelemente nicht aber deren absolute Einflussgröße aus der Analyse entnommen werden kann [20]. Da zur Anwendung von Sensitivitätsbetrachtungen im Bereich der Klimadatenanalyse in der Literatur keine weiteren Beispiele gefunden wurden, besteht in diesem Bereich zukünftig weiterer Forschungsbedarf es muss geprüft werden, ob bzw. welchen Einfluss verschiedene Parameter einer Zeitreihe (z.B. Frequenz und Amplitude) auf die Wertung der Sensitivitätsmethoden haben, bzw. inwieweit auch hier Anwendungsgrenzen für weiterführende Analysen bestehen.

Die Folgerungen für die Erstellung der HRY wurden in Kapitel 2.2.8 zusammengefasst und werden nachfolgend kurz aufgelistet:

- Verwendung von kommerziellen Klimadaten
- Für die Berücksichtigung von Mikroklimata ist eine gesonderte Anpassung notwendig
- Die Bewertung der hygrischen Referenzjahre (HRY) erfolgt auf Basis von hygrothermischer Bauteilsimulation
- Die zonale Einteilung der BRD für die TRY wird für die HRY beibehalten

Ausgehend von diesen Betrachtungen wurden dann hygrische Referenzjahre (HRY) erstellt. Für die dazu notwendige Bauteilsimulationen wurden zunächst in Kapitel 2.3.1 sensitive Konstruktionen definiert. Die Erstellung der HRY erfolgte dann anhand der Temperatur und des Niederschlags auf Monatsbasis. Das hygrothermische Bauteilverhalten der so entstandenen Referenzdatensätze wurden dann mit den real gemessenen Zeitreihen verglichen und die Referenzdatensätze gegebenenfalls angepasst.

Im nächsten Schritt wurde in Kapitel 2.4 geprüft ob es möglich ist die Anzahl der Zonen für die HRY weiter zu reduzieren. Für diese potentielle Zusammenfassung wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt. Zuerst wurden auf Basis der Korrelation einzelner Klimaelemente an verschiedenen Standorten Gruppen gebildet. Sobald diese den Anforderungen in Kapitel 2.4 genügten wurde dann im zweiten Schritt eine hygrothermische Bauteilbetrachtung mit WUFI® durchgeführt. Dabei wurde jeweils der kritisch repräsentative Standort für eine Zone ausgewählt. Als kritisch repräsentativ wurde dabei ein Wassergehaltsverlauf angesehen, der für alle vier betrachteten Konstruktionen leicht über dem Verlauf bei Verwendung der gemessenen Daten liegt. Der Standort an dem diese Kriterien erfüllt waren wurde dann als Repräsentanz Station für die HRY Region gewählt. Das Ergebnis dieses Vorgehens sind 11 HRY mit jeweils einem Referenzstandort, welcher ein für die jeweilige Zone repräsentatives Klima aufweist.

Da sowohl bei der Erstellung der HRY (vgl. Kapitel 2.3) als auch bei der zonalen Einteilung (vgl. Kapitel 2.4) deutlich wurde, dass sich real vorkommende Einzeljahre kritischer verhalten können, wurden zusätzlich „kalte“ HRY entwickelt. Dies geschah in Kapitel 2.5 nach dem Vorbild der EN 15026 [4]. Für diese sogenannten „kalten“ HRY wurde die Temperatur um 2K abgesenkt. Da ersten stichpunktartige Untersuchungen gezeigt hatte, dass es sinnvoll ist die Bewertung über einen längeren Zeitraum durchzuführen wurden darüber hinaus verschiedene Kombinationen von HRY und „kalten“ HRY untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Kombination aus drei HRY zwei „kalten“ HRY und drei HRY zu kritisch repräsentativen Bedingungen in den betrachteten Bauteilen führt.

Die Untersuchungen in Kapitel 2 haben darüber hinaus an verschiedenen Stellen gezeigt, dass lokale Unterschiede das Mikroklima entscheidend beeinflussen können. Da ein Referenzstandort aber für eine größere Region repräsentative Ergebnisse liefern soll lassen sich derartige Unterschiede nicht in einem Datensatz berücksichtigen. Hierzu ist eine detaillierte Anpassung im Rahmen des Lokalklimamodells notwendig. Die Entwicklung dieses Modells wird im nachfolgenden Kapitel 3 beschrieben.

2.7 Abgrenzung

Die Einteilung der Zonen für die HRY erfolgte auf Basis der Zonengrenzen der TRY des DWD. Die hier vorgestellten HRY sind für die hygrothermische Bauteilbemessung entwickelt. Die der Auswahl zugrunde gelegten sensitiven Konstruktionen wurden sorgfältig nach dem Stand des Wissens ausgewählt. Es ist

dennoch vorstellbar, dass es Sonderfälle gibt die sich anders verhalten, hier ist im Zweifel die Anwendbarkeit der Klimadaten zu überprüfen.

Die Bewertung der Schimmelbildung Kapitel 2.5 erfolgte auf Basis der Bewertung der kritischen Oberflächenfeuchte gemäß der DIN 4108 und des Ergebnisses aus WUFI® Bio [41]. Dies stellt eine Wachstumsprognose basierend auf den angenommenen Randbedingungen im Regelquerschnitt dar. Durch Wärmebrücken und andere Untergründe wie z.B. Tapeten sind bessere Wachstumsbedingungen möglich.

Aufgrund des zur Verfügung stehenden begrenzten Messzeitraums sind längerfristige Aussagen nicht möglich. Dies betrifft u.a. die Häufigkeit des Auftretens von extremen gemessenen Jahren.

Die HRY sind im Vergleich zu den TRY anhand der Temperatur und des Niederschlags erstellt und für die hygrothermische Bauteilbewertung konzipiert. Ihre Eignung für eine rein thermische Bewertung wurde basierend auf den Heizgradtagen der VDI 4710: Blatt2 [43] geprüft. In Tabelle 60 sind die Heizgradtage der einzelnen TRY Repräsentanz Stationen aus der [43] den Heizgradtagen der HRY auf Basis der Klimadaten der Meteomedia AG gegenübergestellt. In Tabelle 61 ist die gleiche Gegenüberstellung für die Heizgrenztemperatur von 19,4°C angegeben. Laut des [43] kann die Annahme von 19,4°C als Näherung für die „alten“ Heiztage mit konstanter Innenraumtemperatur verwendet werden. Beim Vergleich der beiden Tabellen zeigt sich, dass die HRY um 3,8% bzw. 4,6% weniger Heizgradtage liefern also bezogen auf das thermische Verhalten leicht günstigere Bedingungen erzeugen würden. Einzige Ausnahme ist der Standort Chemnitz, welcher auf Grund der Anpassungen bei der Zoneneinteilung 6,7% bzw. 2,2% mehr Heizgradtage prognostizieren würde.

Abschließend werden die HRY noch mit dem ebenfalls für thermische Fragestellungen gedachten Verfahren nach ISO 15927 [30] verglichen. Hierzu wurden basierend auf den Klimadaten der Meteomedia AG, Klimadatensätze nach dem Vorgehen der ISO 15927 erzeugt und das Bauteilverhalten mit dem Verhalten bei Verwendung der HRY verglichen. Exemplarisch ist dies für den Standort Fichtelberg nachfolgend in Bild 49 dargestellt.

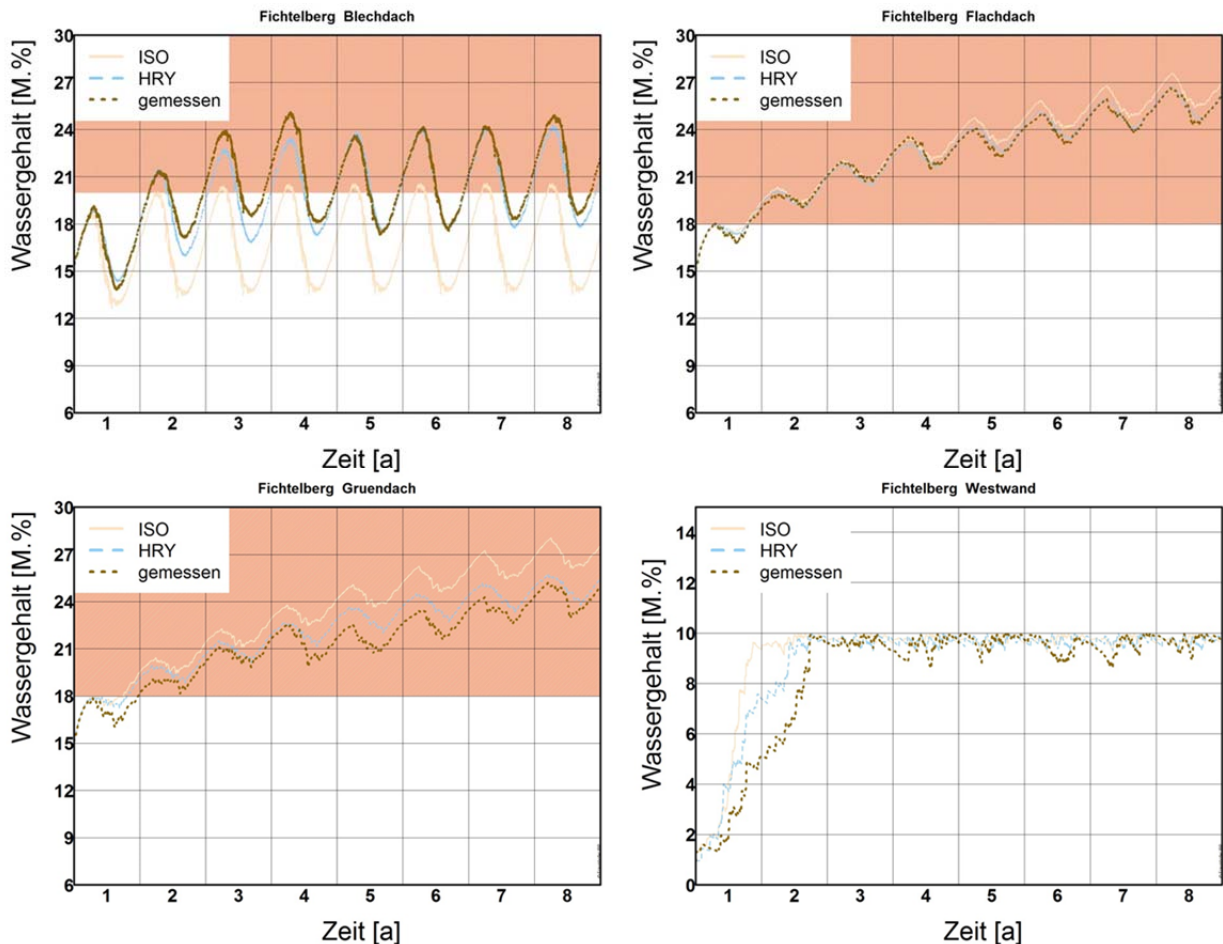


Bild 49:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen bei Verwendung der Referenzjahre nach Kapitel 2.2.7 (gelb) bzw. nach [30] (blau) mit dem Ergebnis bei Verwendung der Messwerte (schwarz).

Wie obige Grafik veranschaulicht liegen die Wassergehalte bei Verwendung der HRY näher an den Verläufen auf Basis der realen Messung. Die Ergebnisse auf Basis der Referenzjahre nach [30] zeigen entweder zu niedrige Wassergehalte (vgl. Bild 49 Blechdach) oder zu hohe Wassergehalte (vgl. Bild 49 Gründach). Alles in allem liefern aber auch die Simulationen auf Basis dieser ISO Referenzjahre Wassergehalte in einem realistischen Ergebnisspektrum. Durch die Verwendung von anderen Klimaparametern bei der Auswahl der Referenzjahre nach ISO 15927-4 [30] oder die Einführung von Gewichtungsfaktoren [44] könnte dieses Ergebnis jedoch noch weiter angepasst werden. Hierfür wären jedoch weiterführende Betrachtungen notwendig. Wie eine Zusammenstellung gebräuchlicher Gewichtungsfaktoren in [45] zeigt, beruht die Annahme von Faktoren auf der eigenen Erfahrung der Autoren oder auf dem Test verschiedener Kombinationen und nicht auf einer empirischen oder statistischen Analyse.

Trotz einer eingehenden Prüfung der verwendeten Messdaten im Vorfeld ist es möglich, dass lokal andere kritischer Bedingungen auftreten. Dies ist durch eine

gesonderte Anpassung z.B. mittels des Lokalklimamodells (vgl. Kapitel 3) zu berücksichtigen.

3 Lokalklimamodell

3.1 Einleitung

Über die hygrothermischen Verhältnisse in einem Bauteil entscheidet in vielen Fällen die direkte Umgebung eines Gebäudes stärker als das regionale Klima. So treten Algen- und Schimmelprobleme z.B. verstärkt an Standorten auf, die besonders hohe Luftfeuchten aufweisen und die Innendämmung von Außenwänden ist vor allem dort problematisch, wo eine starke Schlagregenbelastung vorliegt. Beide Situationen können sogar innerhalb eines Tales oder Ortes deutlich variieren und daher mit den im ersten Kapitel vorgestellten Referenzjahren ohne Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse nicht hinreichend genau abgedeckt werden.

Bisher gibt es nur wenige Korrekturmodelle, die die Referenzklimata z.B. für die geänderten Temperaturverhältnisse in innerstädtischen Lagen korrigieren. Für andere Expositionen wie z.B. eine exponierte Lage auf einem Berg oder an einem Gewässer aber auch für andere Klimaelemente, wie z.B. Niederschlag oder Luftfeuchte gibt es bisher kaum Anpassungsmöglichkeiten.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden daher Lokalklimamodelle entwickelt, die es ermöglichen, mit einfachen Korrekturfaktoren lokale klimatische Einflüsse zu berücksichtigen, die eine Relevanz für hygrothermische Fragestellung aufweisen.

Bild 50 zeigt exemplarisch die Abweichungen der Simulationsergebnisse von vier Konstruktionen auf Grund von verschiedenen Klimabedingungen innerhalb derselben Regionalklimazone. Die betrachteten Konstruktionen sind ein Blechdach, ein Gründach, ein helles Flachdach sowie eine nach Westen orientierte Wand. Diese hygrothermisch bezüglich verschiedener Klimaelemente besonders sensitiven Bauteile wurden, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, zur Erstellung und Bewertung der hygrischen Referenzjahre (HRY) herangezogen. Für das Außenklima wurde das hygrische Referenzjahr für die HRY-Zone 9 sowie zum Vergleich die gemessenen Klimadatensätze an vier Stationen mit unterschiedlichen Lokalbedingungen innerhalb dieser Zone verwendet.

Diese Stationen sind:

- München - Exposition Stadt
- Argenbühl - Exposition Berg
- Eschenfelden - Exposition Tal
- Lindau - Exposition Gewässer (Bodensee)

Der Referenzstandort für die HRY-Zone 9 ist Fürstzell als kleinere Stadt mit einer weitgehend flachen Umgebung ohne Gebirge oder Gewässer. Eine solche Lage wird zur Beschreibung der lokalen Bedingung im Folgenden als „neutral“ bezeichnet. Der berechnete Zeitraum beträgt vier Jahre vom 01.10.2006 bis 31.12.2010. In Bild 50 sind für jede Konstruktion sowohl der berechnete Gesamtwassergehalt (links im Bild) als auch der Wassergehalt in der jeweils kritischen Schicht der Konstruktion (rechts im Bild) dargestellt. Die rote gestrichelte Linie stellt im Vergleich dazu den ggf. kritischen Wassergehalt nach [34] dar. Bei allen Konstruktionen ergeben sich langfristig die höchsten Wassergehalte sowohl in der gesamten Konstruktion als auch in der jeweiligen kritischen Schicht mit dem Klimadatensatz von Argenbühl (Berg). Ähnlich ungünstig sind die Ergebnisse der drei Dachkonstruktionen bei Verwendung des Klimadatensatzes von Eschenfelden (Tal). Die Wassergehalte in den jeweils kritischen Schichten von Blech- und Gründach bleiben mit diesen beiden Klimadatensätzen während der ersten drei Jahre nur knapp unter dem Grenzwerten von 20 M.-%, während sie an den anderen drei Standorten bereits ab dem zweiten Jahr unter 17 M.-% liegen. Im Gegensatz zu den Dachkonstruktionen sind die Wassergehalte der Westwand bei Berechnung mit den Klimabedingungen von Eschenfelden am günstigsten. Dies ist dadurch erklärbar, dass bei den Dachkonstruktionen üblicherweise Temperatur, Global- und atmosphärische Gegenstrahlungen eine große Rolle spielen, während bei der nach Westen orientierten Wand mit schlecht schlagregengeschütztem Mauerwerk die Schlagregenmenge die entscheidende Rolle spielt. Die beiden weiteren betrachteten Standorte München und Lindau sind aufgrund ihrer Lage in der Stadt und am Bodensee für die betrachteten Konstruktionen dagegen günstiger als der Referenzstandort und führen zu niedrigeren Feuchtegehalten in den Konstruktionen als der HRY Datensatz.

Die hier entwickelten Lokalklimaanpassungsmodelle sollen dazu beitragen, lokalklimatische Effekte, wie die oben gezeigten, bei hygrothermischen Simulationen mit den neuen HRY Datensätzen berücksichtigen zu können.

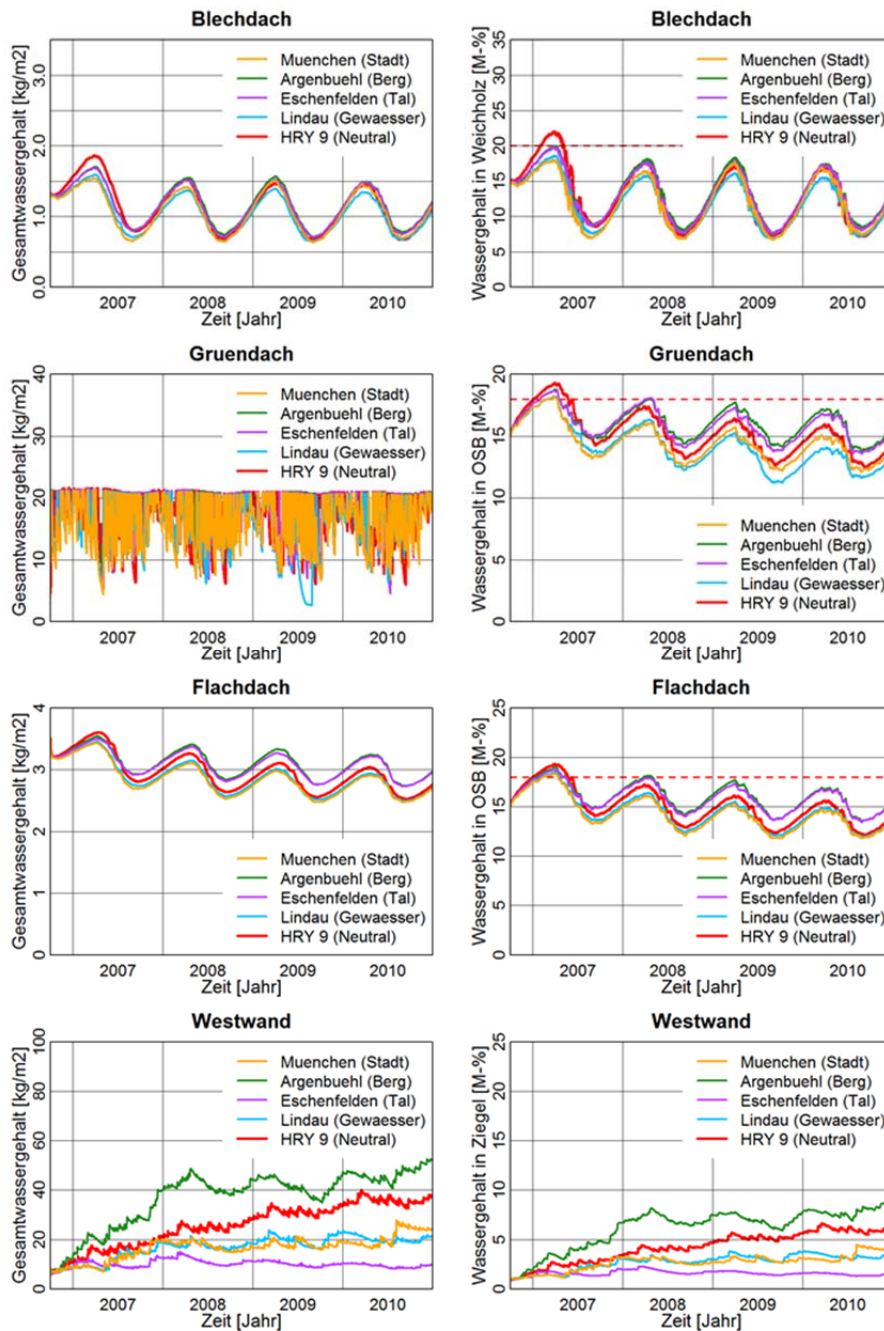


Bild 50:

Vergleich der hygrothermischen Simulationsergebnisse mit verschiedenen lokalen Klimadatensätzen. Die verwendeten Klimadatensätze sind München (Stadt), Argenbühl (Berg), Eschenfelden (Tal) und Lindau (Gewässer) im Vergleich zu Fürstzell als Referenzjahr der für diese Standorte gültigen HRY-Zone 9. Für die vier Konstruktionen sind jeweils der Gesamtwassergehalt (links) und der Wassergehalt in der kritischen Schicht (rechts) dargestellt. Die roten gestrichelte Linien markieren den kritischen Wassergehalt nach [34].

3.2 Stand der Forschung

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Stand der Forschung im Bereich der Lokalklimaanpassung zusammengefasst.

3.2.1 Verfügbare Lokalklimaanpassungsmodelle

Zunächst werden bereits verfügbare Modelle vorgestellt, mit Hilfe derer Klimadaten von einem Referenzort an einen anderen Ort unter Berücksichtigung der lokalbedingten Einflüsse auf einzelne Klimaelementen übertragen werden können.

Eine im Baubereich häufig eingesetzte Software zur Generierung künstlicher stündlicher Klimadaten auf Basis von Monatsmittelwerten stellt Meteonorm dar [46]. Die zugrunde liegende Datenbank enthält für weltweite Standorte gemessene langjährige Monatsmittelwerte für Globalstrahlung, Lufttemperatur, Feuchtigkeit, Niederschlag, Tage mit Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Sonnenscheindauer. Diese Daten stammen von insgesamt 8325 Stationen – die meisten davon gehören zu den Netzwerken Global Energy Balance Archive [47], World Meteorological Organization [48], Climatological Normals [49] oder MeteoSwiss [50]. Aus diesen Daten können über statistische Verfahren typische oder kritische Jahresdatensätze in stündlicher Auflösung erzeugt werden. Sind für einen Standort keine Messdaten vorhanden werden diese aus den nächstgelegenen Messstandorten interpoliert. Darüber hinaus bietet Meteonorm dem Benutzer die Möglichkeit, die Temperatur und die Windgeschwindigkeit für die lokalen Verhältnisse anzupassen. Zur Anpassung der Temperatur werden monatliche Additionsfaktoren für die verschiedenen Lage-Typen verwendet. Dabei werden die folgenden Expositionen (in den englischen Originalbezeichnungen) unterschieden: „level ground“, „depression“, „cold hollow“, „lake“, „city“, „South-facing incline“, „West/East-facing incline“ und „valley“ (Bild 51). Die Windgeschwindigkeiten werden für die Lagekategorien „Geschützte Lage (Stadt)“, „An der Küste“ und „Hügel“ per Addition eines entsprechend diesen Lagen definierten, konstanten Korrekturfaktors angepasst. Die in Meteonorm hinterlegten Korrekturwerte der Windgeschwindigkeit stammen aus einem vergleichsweise einfachen WASP Modell (Wind Atlas Analysis and Application Program) [51]. Die verwendeten Werte sind abhängig von der topographischen Lage des Standorts in Tabelle 7 aufgelistet [27].

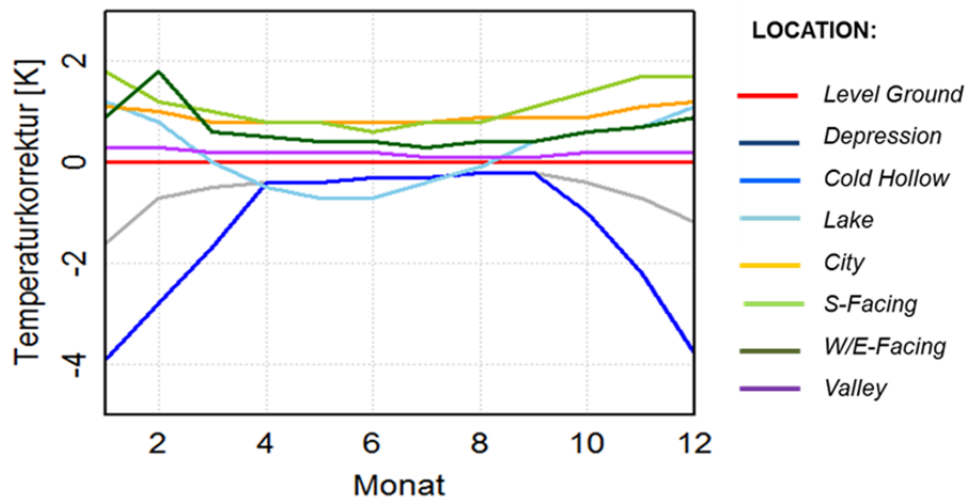


Bild 51:
 Monatliche Korrekturfunktionen der Temperatur für verschiedene Lagebedingungen aus Meteonorm [46].

Tabelle 7:
 Windgeschwindigkeitskorrekturwerte des WAsP-Modells aus Meteonorm. [27].

Exposition	Korrekturwerte [m/s]
Geschützte Lage (Stadt)	-1,0
Feld	0,0
An der Küste	+1,0
Hügel	+3,0

Die bei Gebäudesimulationen in Deutschland ebenfalls häufig verwendeten TRY-Klimatensätze des DWD enthalten seit der Aktualisierung im Jahr 2011 ebenfalls eine Möglichkeit zur Berücksichtigung des Stadteinflusses auf die Temperatur [52]. In diesem Berechnungsmodul können als Einflussfaktoren die Einwohnerzahl der betrachteten Stadt, der Versiegelungsgrad des Untersuchungsgebietes eingegeben werden. Die weiteren Einflussfaktoren wie z.B. die Windgeschwindigkeit oder der Bedeckungsgrad werden basierend auf den Ausgangsdaten berechnet [52].

In der, im Rahmen dieses Forschungsprojekts als Bachelorarbeit durchgeführten Untersuchung von [15], wurde dieses Berechnungsmodul einmal für Potsdam als Umland von Berlin und einmal für Fürstzell als Umland von München eingesetzt und die erzeugte Klimatensätze mit den Messdaten der jeweiligen Innenstadt verglichen. Die gemessene Temperatur ist in Berlin im Jahresdurchschnitt um 1,16 K höher als in Potsdam und in München um 1,12 K höher als Fürstzell. Die mittlere Abweichung zwischen der angepassten Station des Umlandes und der jeweiligen gemessenen Temperatur in der Innenstadt beträgt für Potsdam/Berlin +0,05 K und für Fürstzell/München -0,2 K. Der Grund für die unterschiedlichen Abweichungen an den beiden Standorten könnte in der unterschiedlichen Entfernung zwischen den Referenz- und Zielorten liegen. Potsdam liegt etwa 28 km südwestlich von Berlin, während die Entfernung zwischen Fürstzell und München etwa 140 km beträgt. Die pau-

schale Temperaturerhöhung nach dem Modell des DWD Modells scheint somit für Stationen, die nahe beim Zielort liegen, recht genau zu sein, während bei größerer Distanz zwischen den Stationen die Abweichung zunimmt. Neben dem Stadteinfluss bieten die TRY seit 2004 die Möglichkeit einer Höhenkorrektur der Temperatur und der absoluten Feuchte [9]. Dieser Ansatz wird im Kontext der Höhenkorrektur der einzelnen Klimaelemente im folgenden Kapitel genauer erläutert.

Bei den beiden Lokalklimaanpassungen nach Meteororm und DWD fehlen allerdings Korrekturmöglichkeiten für weitere Klimaelemente, die ebenfalls die hygrothermische Verhältnisse in Bauteilen stark beeinflussen können. Dies sind vor allem die Luftfeuchte, die Schlagregenbelastung aber auch eventuell die Solarstrahlung und die atmosphärische Gegenstrahlung.

3.2.2 Einflussfaktoren auf die lokalen Klimaverhältnisse

In diesem Kapitel werden die im Rahmen einer durchgeführten Literaturrecherche gefundenen Einflussfaktoren auf die lokalen Klimaverhältnisse vorgestellt.

Höhenabhängigkeit der Klimaelemente

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, können beim Modell des DWD für die Testreferenzjahre, Temperatur und absolute Feuchte durch Höhenkorrekturfaktoren entsprechend der Lage des Zielortes angepasst werden. Weitere Modellansätze konnten für die Höhenabhängigkeit der Niederschlagsmenge gefunden werden. Die in den verschiedenen Untersuchungen ermittelten Zusammenhänge für diese drei Klimaelemente werden im Folgenden kurz dargestellt.

Höhenabhängigkeit der Temperatur

Allgemein ist zu beobachten, dass mit steigender Höhe niedrigere Temperaturverhältnisse auftreten. Zur Höhenkorrektur der Temperatur wird meist ein pauschaler mittlerer Korrekturfaktor verwendet. Dieser Korrekturfaktor variiert aber je nach Literaturquelle - so werden beispielsweise bei [53] $-0,005 \text{ K/m}$, bei [54] dagegen $-0,0065 \text{ K/m}$ verwendet. Beide Quellen weisen darauf hin, dass die Höhenkorrekturwerte der Temperatur zeitlich und räumlich variieren können. Die Variation wird von [53] mit Werten zwischen 0 und $-0,01 \text{ K/m}$ angegeben – in den allermeisten Fällen lässt sich die Bandbreite aber auf $-0,008$ und $-0,005 \text{ K/m}$ eingrenzen.

Bei den Testreferenzjahren TRY können die Temperaturen generell auf andere Meereshöhen korrigiert werden. In Bild 53 sind die zugehörigen monatlichen Höhenkorrekturfaktoren der Temperatur im Jahresverlauf für die verschiedenen TRY-Zone dargestellt (s. Bild 52). Diese Faktoren zeigen zeitliche und räumliche Abweichungen zwischen $-0,009$ und $0,001$, wobei der Korrekturwert von ca. $0,001$ in TRY-Zone 1 im Januar eine ansonsten nicht auftretende Temperaturinversion bedeutet – also eine höhere Temperatur trotz einer höheren Lage. Für eher flache Regionen ohne Täler oder größere Erhebungen wie in TRY Zo-

ne 1 und 2 an der Ost- und Nordseeküste werden keine Höhenkorrekturwerte festgelegt.

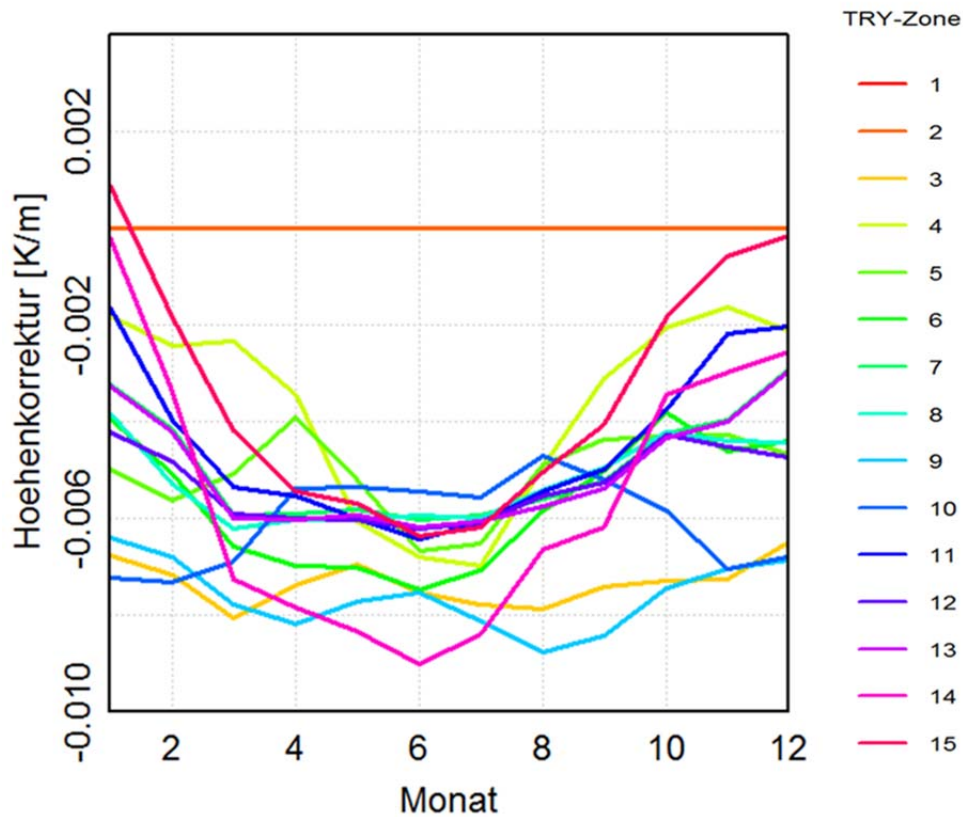


Bild 52: Monatliche Höhenkorrekturfaktoren der Temperatur für die verschiedenen TRY-Regionen nach Christoffer et al. [52].

Höhenabhängigkeit der absoluten Feuchte

Auch zur Höhenabhängigkeit der absoluten Feuchte wurden bereits Zusammenhänge untersucht. Nach [53] ist wie bei der Temperatur der Höheneinfluss auf die absolute Feuchte zeitlich und räumlich variabel, wobei der Korrekturfaktor mit zunehmender geografischer Breite kleiner wird. Als ein Beispiel ist in [53] der Höhenkorrekturfaktor der absoluten Feuchte für Larkhill (England, Geogr. Breite 51°N wie Erfurt und Köln) mit $-0,0014 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ angegeben. Der Wert schwankt im Jahresverlauf zwischen $-0,0017 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ im Sommer und $-0,0011 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ im Winter. Bild 53 zeigt im Vergleich dazu die monatlichen Höhenkorrekturen der absoluten Feuchte für die deutschen TRY-Datensätze. Auch hier wird in mehreren Regionen im Sommer eine größere Diskrepanz als im Winter festgestellt, nur in den Regionen 4, 5, 10 und 15 sind die Unterschiede im Winter etwas größer. In diesen Regionen, vor allem in der Region 10 (Erzgebirge) ist dabei eine leichte Inversion zu erkennen, wobei untypischer-

weise die absoluten Feuchten mit zunehmender Höhe leicht ansteigen. Wie bei der Temperatur erfolgt auch für die absolute Feuchte in den TRY-Zonen 1 und 2 keine Höhenkorrektur.

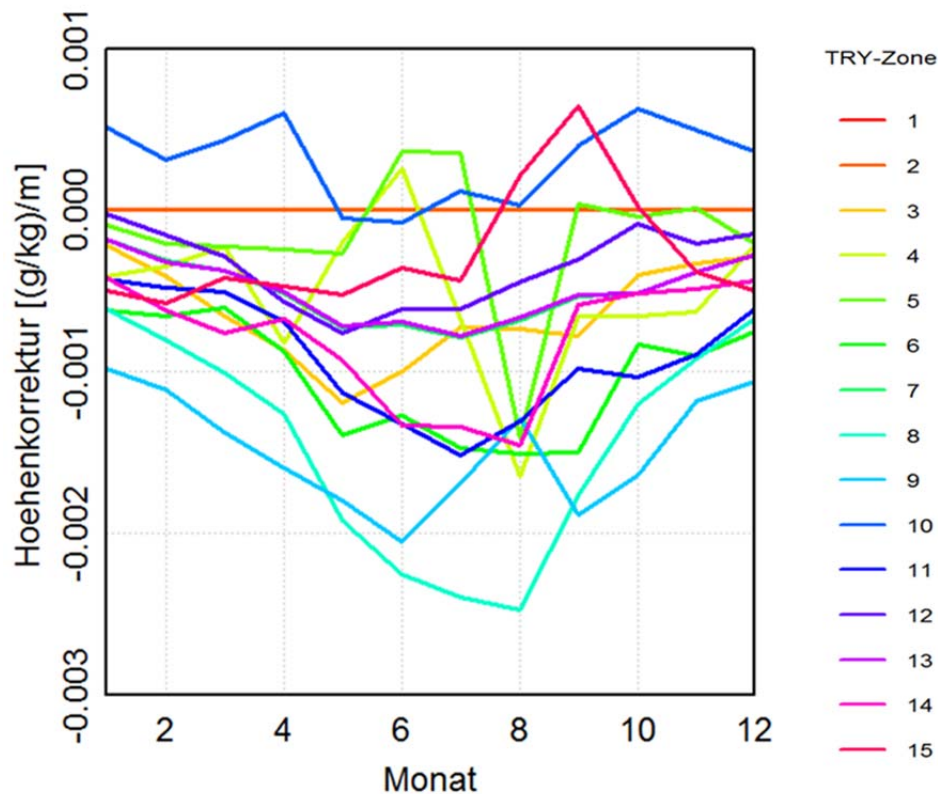


Bild 53:
 Monatliche Höhenkorrekturfaktor der absoluten Feuchte für die TRY nach Christoffer [52].

Höhenabhängigkeit der Niederschlagsmenge

Pilger untersucht ausführlich die Höhenabhängigkeit der Niederschlagsmenge für die Steiermark in Österreich [13]. Dabei werden die Werte von 232 Messstationen in unterschiedlichen Lagen im „Vorland“ und im „Norden“ in Abhängigkeit von der Meereshöhe ausgewertet. Anhand der Plots werden Korrelationskoeffizienten zwischen der Jahresniederschlagsmenge und der Meereshöhe sowie der Zuschlagswert für die Jahresniederschlagsmenge in Abhängigkeit von der Höhe ermittelt. Der Korrelationskoeffizient liegt für die Standorte im Vorland im Mittel bei 0,9 und für die im Norden bei 0,6. Die Jahresniederschlagssumme nimmt im Vorland um 68 mm und im Norden um 72 mm pro 100 Meter Höhenanstieg zu. Die größere Zunahme der Niederschlagssumme im Norden wird auf die dort häufigen West- oder Nordwestwetterlagen zurückgeführt, bei denen der Niederschlag hauptsächlich auf dem Wind zugewandte

Seiten auftritt. Auch nach [55] gibt es Unterschiede bezüglich der Höhenkorrektur für die Niederschlagsmenge je nach topographischer Situation – die Tendenz des Anstiegs der Niederschlagsmenge mit zunehmender Höhe wird aber in ähnlicher Weise bestätigt.

Lokalklima für unterschiedliche Expositionen

Im Folgenden werden tendenzielle klimatische Eigenschaften bei unterschiedlichen, in der Literatur beschriebenen Expositionen vorgestellt.

Gebirgsklima

Das Gebirgsklima hängt maßgeblich von Höhe, Exposition und Orientierung bezüglich der umgebenden Bergmassive ab. Wegen der größeren Standorthöhe sind in der Regel sowohl die Temperatur als auch die absolute Feuchte auf den Bergen niedriger als in tieferen Lagen (vgl. Kapitel Höhenabhängigkeit). Darüber hinaus sind nach [55] die Tages- und Jahresschwankungen der Temperatur geringer als in tieferen Lagen. Ob ein Standort in einer Gebirgslage bezüglich der Haupt-Windrichtung auf der windzugewandten (Luv) oder windabgewandten Seite (Lee) liegt, hat ebenfalls einen großen Einfluss auf Temperatur, Luftfeuchte und Niederschlagsmenge vor Ort. Auf der Luvseite wird die Luft zum Aufsteigen „gezwungen“, wobei es zu verstärkter Wolkenbildung und intensivem Niederschlag kommen kann. Dieser Staulageneffekt hängt von Größe und Form des Gebirges und vom Feuchtegehalt der heranströmenden Luftmassen ab [55]. Nach Überschreiten des Gebirgskamms werden die Luftmassen an der Leeseite erwärmt wobei die relative Luftfeuchte sinkt – die Luft wird sozusagen trockener. Dies wird z.B. als Föhnwetterlage bezeichnet. Auch die einfallende Strahlungsmenge wird durch Ausrichtung und Neigung der jeweiligen Berg- bzw. Hangflächen stark beeinflusst. Beispielsweise ist ein Nordhang mit einer Neigung von etwa 30° im Winter fast vollständig verschattet. Im Gegenzug sind vor allem die nach Süden orientierten Flächen in höheren Gebirgslagen bei klarem Himmel teilweise intensiverer Direktstrahlung ausgesetzt als Standorte in der Ebene [55].

Stadtklima

Die erhöhte Temperatur in der Stadt wird als *Wärmeinseleffekt* oder in Englisch als *Heat Island Effect* bezeichnet. Verantwortlich für die höheren Temperaturen sind z.B. die Art und Dichte der Bebauung, die vermehrte Emission von Abgasen und Aerosolen, die Abwärme von Gebäuden, Fahrzeugen usw. sowie die Versiegelung des natürlichen Erdbodens und das weitgehende Fehlen von Vegetation [55]. In der Stadt gibt es somit eine höhere Wärmeproduktion auf der einen und ein verringertes Verdunstungspotenzial auf der anderen Seite. Daher liegen die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur in der Stadt um 0,5 bis 1,5 K höher als im unbebauten Umland. Als Folge der von der Erwärmung beschleunigten thermischen Aufwinde wird auch die Wolkenbildung verstärkt und es erhöht sich der Bedeckungsgrad. Der bedeckte Himmel in Kombination mit mehr Aerosolen und Staub über der Stadt schwächt die direkte Sonneneinstrahlung ab und führt zu einer Zunahme der diffusen Strahlung. Gleichzeitig

erhöhen sie die atmosphärische Gegenstrahlung zurück auf die Erdoberfläche, was die nächtliche Abkühlung durch langwellige Abstrahlung reduziert.

Die dichte Bebauung in einer Stadt bildet ein Hindernis für horizontale Luftströmungen und kann so die Windgeschwindigkeit um 20 bis 30 % im Vergleich zum Umland verringern. In Einzelfällen entstehen an Engstellen durch den sog. Düseneffekt aber auch deutlich höhere Windgeschwindigkeiten [55].

Bezüglich der absoluten Feuchte in Städten gibt es nach [52] keine allgemeingültigen Zusammenhänge – Abweichungen sind demnach nicht systematisch und eher gering. Unter der Annahme, dass sich die absolute Feuchte in der Stadt nur unwesentlich von der im Umland unterscheidet, wird die relative Luftfeuchte meist entsprechend der durch den Wärmeinseleffekte erhöhten Temperatur reduziert.

Klima am Gewässer

Wasser besitzt eine bis zu fünfmal höhere spezifische Wärmekapazität als Erdreich. Durch die höhere Wärmekapazität und die sich einstellenden Konvektionsströmungen ändert sich die Temperatur eines stehenden Gewässers langsamer als die der umgebenden Luft. Hinzu kommt, dass Gewässer ein größeres Verdunstungspotenzial aufweisen als das normale umgebende Festland [55]. Daher ist die absolute Feuchte im Bereich der Wasseroberfläche meist höher als über dem umgebenden Land. Die Verdunstungsmenge hängt von der Lufttemperatur, der relative Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der Oberflächentemperatur der Gewässerfläche ab [54]. Die Luft über der Gewässerfläche und über dem angrenzenden Festland wird durch das sog. Land-See-Windsystem vermischt. Das Land-See-Windsystem ist durch temperaturbedingte Druckdifferenzen zwischen den Luftschichten über dem Gewässer und über dem umgebenden Festland bestimmt. Nach dem Sonnenaufgang wird das Land schneller erwärmt als die Wasseroberfläche, sodass die Luftmasse auf dem Land nach oben steigt und zur kälteren Wasseroberfläche hin abfällt. Infolgedessen weht der Wind von der Wasseroberfläche hin zum Land. Nach dem Sonnenuntergang kehrt sich dieser Effekt um und es entsteht Wind vom Land hin zu der Wasseroberfläche [55].

Klima in Tallagen

Die Temperatur in einer Tallage ist tendenziell niedriger als sie auf der neutralen Ebene mit gleicher Meereshöhe. Die Gründe dafür sind, dass die Sonneneinstrahlung in der vertieften Tallage vor allem morgens und abends vermindert ist und zusätzlich die kalte und dadurch „schwerere“ Luft sich in den Vertiefungen (Mulden, Täler) sammelt und dort länger hält. Die ankommende Strahlungsmenge hängt von der Ausrichtung der Talsohle ab. So dringt z.B. in ein Nord/Süd ausgerichtetes Tal nur im Sommer bei hohen Sonnenständen die volle Direktstrahlungsmenge, während ein Ost/West ausgerichtetes Tal nur am Vor- und Nachmittag die volle solare Einstrahlung aufweist. Ferner ist das Lokalklima im Tal vom Tal- und Bergwind beeinflusst. Nach dem Sonnenaufgang werden

die in Richtung Sonne orientierten Tal- bzw. Berghänge schnell erwärmt und die erwärmte Luft steigt auf. Um die aufgestiegenen Luftmassen zu „ersetzen“, stellt sich aus dem Vorland der Täler eine hinauffließende Ausgleichsströmung der sog. Talwind ein [55]. Nach Sonnenuntergang kühlt sich die Luft über den höheren Talseiten bzw. Bergen infolge der durch die dünnere Atmosphäre stärkeren langwelligen Abstrahlung schneller ab und die kalte, schwerere Luft strömt nach unten – der sogenannte Bergwind. In der Folge bildet sich im Tal ein Kaltluftsee mit durchaus ausgeprägter Inversionswetterlage, bei dem die Temperaturen vor allem abends im Tal deutlich niedriger liegen als auf den umgebenden höheren Lagen. Diese ragen sozusagen aus dem Kaltluftsee heraus. Ferner bleibt der Himmel nachts über den Tälern nach [56] wegen der absinkenden Tendenz der Luftmassen häufiger wolkenlos, was in der Folge zu einer geringeren Gegenstrahlung führt.

3.2.3 Klimasimulationsmodelle

Neben den zuvor beschriebenen Lokalklimamodellen, die bei Meteonorm bzw. zur Anpassung der DWD TRY-Daten (s. Kapitel 3.2.1) herangezogen werden und nur die Temperatur und die Windgeschwindigkeit anpassen, gibt es bereits Ansätze, um stündliche Klimadatenätze für einen bestimmten Ort mit Hilfe von Klimasimulationsprogrammen unter Berücksichtigung aller Klimaelemente zu erzeugen. Wenn diese Ansätze eine ausreichende Genauigkeit und gute Übereinstimmung mit Messdaten aufweisen, müsste es möglich sein, aus solchen Simulationen vereinfachte Lokalklimaanpassungsfaktoren abzuleiten. Daher werden solche Modelle zunächst exemplarisch untersucht.

Weltweit werden immer neue Klimasimulationsmodelle entwickelt - schwerpunktmäßig in Europa, den USA, Kanada, Australien und ostasiatischen Ländern. Der Zweck der Klimasimulationsmodelle besteht zum einen in der kurzfristigeren Wettervorhersage und zum anderen in der Analyse und Prognose des langfristigen Klimawandels. Die Klimasimulationsmodelle berechnen das klimatische Verhalten in globalem bzw. regionalem Maßstab basierend auf physikalischen Modellen z.B. für die Strömung von Wärme, Luft und Wasserdampf in der Atmosphäre. Meist wird dabei auch die Interaktion dieser Ströme mit der Erdoberfläche berücksichtigt [57]. Ein weltweit verwendetes Modell ist das vom US-amerikanischen Forschungsinstitut NCAR (National Center for Atmospheric Research) in den USA entwickelte WRF (Weather Research and Forecasting Model) nach [58]. Weil das WRF-Modell in mehreren internationalen Forschungsvorhaben validiert wurde und für wissenschaftliche Zweck frei zur Verfügung steht [59], wird dieser Ansatz hier exemplarisch näher betrachtet. Bei dem WRF-Modell ist eine Rastergröße von wenigen Metern bis zu mehreren Tausend Kilometern möglich; das Programm bietet darüber hinaus eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten für die verwendeten physikalischen Modelle. Unter anderem stehen z.B. 14 optionale Ansätze für die sog. Mikrophysik der Wolken (zur Entwicklung der Wolken und den Voraussetzungen für Niederschlag), 13 verschiedene Strahlungsmodelle (für Sonnenstrahlung und atmosphärische Gegenstrahlung), 7 Landoberflächenmodelle (Oberflächenerwär-

mung, Simulation der Schneebedeckung) und 10 Konvektionsparametrisierungen (Wind, Turbulenzen) zur Auswahl.

Ein Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen von WRF und Messwerten von insgesamt 148 Klimastationen bzgl. Temperatur, absoluter Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung wird in [60] vorgestellt. Die oben erwähnten Optionen bezüglich der physikalischen Modelle und Parameter wurden vor der Klimasimulation durch geeignete Sensitivitätsanalysen ausgewählt. Die für die Validierung gesetzten Anforderungskriterien an die stündlichen Werte von $\pm 0,5$ K für die Temperatur und $\pm 0,75$ g/kg für die absolute Feuchte bei nicht komplexen Lagen wie Küste oder Stadt bzw. von $\pm 1,0$ K und $\pm 1,0$ g/kg bei komplexen Lagen wie im Gebirge oder einem Tal werden für alle untersuchten Standorte erfüllt. Im Gegensatz dazu wird die Windgeschwindigkeit tendenziell zu hoch berechnet und die Windrichtung weicht insbesondere in komplexen Situationen wie z.B. in bebauter Umgebung deutlich von den Messdaten ab. Ein Grund hierfür ist die Beeinflussung der Windrichtung durch die Nachbarbebauung der Messstation, die im Modell nicht berücksichtigt wird. Niederschlagsmengen und Globalstrahlung werden auf Basis von Jahres- und Monatsmittelwerten sowie des Verlaufs im Januar und Juni miteinander verglichen. Die Korrelation der WRF- mit den Messdaten ist bezüglich der Niederschlagsmenge schwach mit einem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten von nur etwa 0,4. Auch die räumliche Verteilung der Niederschlagsmengen wird nur unzureichend wiedergegeben. Die simulierte Globalstrahlung liegt generell etwa 5 bis 15 % zu hoch und weist ebenfalls nur eine sehr niedrige Korrelation mit den Messdaten auf.

Eine weitere Validierung des WRF Modells anhand von repräsentativen Klimamessdaten für die verschiedenen klimatischen Verhältnisse in Japan von Wakazuki et al. [61] zeigt bezüglich der Temperaturen wiederum eine recht gute Übereinstimmung. Die Abweichung bleibt in den meisten Regionen Japans im Mittel unter 0,5 K. Allerdings fällt auf, dass sich in einigen Fällen keine konstante Temperaturverschiebung einstellt, sondern z.B. das Modell die Temperaturen im Sommer im Norden Japans zu niedrig, im Winter in der Umgebung von Tokyo dagegen zu hoch berechnet – in diesen Fällen war allerdings auch die mittlere Temperatur-Abweichung größer (ohne Wertangabe). Bei den anderen Klimaelementen fällt die Übereinstimmung wie in der vorigen Validierung schlechter aus – vor allem die prognostizierten Niederschlagsmengen liegen im Norden Japans im Winter um den Faktor zwei zu hoch.

In einer weiteren japanischen Untersuchung [62] wurde ausschließlich die Übereinstimmung der Niederschlagsmengen zwischen Messdaten und drei verschiedenen Regionalklimamodellen überprüft. Die untersuchten Ansätze sind das schon beschriebene WRF-Modell, das NHRCM-Modell des Japanischen Meteorologischen Forschungsinstituts [63] und das RAMS-Modell des Institute for Earth Science and Disaster Prevention [64]. Der Korrelationskoeffizient zwischen den Messdaten und den Simulationsergebnissen bzgl. der Niederschlagsmengen im Sommer (Juni bis August) lag bei allen drei Modellen in den meisten Regionen nur etwas über 0,7, was eine eher mäßige Übereinstimmung bedeu-

tet. Einige Regionen zeigten zwar auch eine perfekte Korrelation von fast 1,0 - dagegen lag die Korrelation an der Nordwestküste in einigen Regionen nahe 0. Werden die Prognosen aller drei Modelle gewichtet und zu einer Gesamtprognose zusammengefasst, ist dieses Ergebnis deutlich besser als wenn nur ein einzelnes Modell verwendet wird. Am Beispiel der nördlichen Küste von Japan erhöht sich die Korrelation von knapp über 0 auf immerhin ca. 0,6. Vor allem in Anbetracht des großen Aufwandes bleibt dieses Ergebnis allerdings unzufriedenstellend.

Die Abweichung der simulierten Ergebnisse von den tatsächlichen Messdaten ist nach [61] auf drei Ursachen zurückzuführen: Erstens können die physikalischen Modelle einige Einflussfaktoren nicht ausreichend genau erfassen. Zweitens ist die Auflösung der verwendeten topographischen Daten nicht genau genug, um damit z.B. die steigenden bzw. fallenden Luftströmungen entlang von Gebirgen realitätsnah widerzuspiegeln - dies ist der Hauptgrund für die großen Abweichungen bei den Niederschlagsmengen. Als dritte Ursache wird angegeben, dass sich auch geringe Abweichung bei den Ausgangsdaten langfristig multiplikativ auswirken und in der Folge zu größeren Differenzen führen können.

Die bisher verfügbaren Klimasimulationsmodelle sind auf einem Entwicklungsstand, bei dem sowohl die Temperaturen als auch die Luftfeuchten für viele Standorte realitätsnah wiedergegeben werden können. Die übrigen Klimaelemente wie Niederschlagsmengen, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, die für das hygrothermische Verhalten von Außenbauteilen ebenfalls einen großen Einfluss haben können, weichen dagegen mitunter stark von den realen Verhältnissen ab. Die Erstellung von Lokalklimadaten bzw. daraus abgeleiteten Modellen ohne weitere Validierung und Prüfung anhand von realen Messdaten ist nicht möglich.

3.2.4 Konsequenzen für die Entwicklung der Lokalklimamodelle

In diesem Kapitel wurden bereits verfügbare Modelle bezüglich der Lokalklimaanpassung einzelner Klimaelemente sowie bekannte Zusammenhänge von lokalen Einflussfaktoren auf die Klimaverhältnisse vorgestellt sowie die Anwendbarkeit von Klimasimulationsmodellen als Datenbasis für die zu erstellenden Lokalklimamodelle überprüft.

Auch wenn bereits Modelle verfügbar sind, die die Temperatur für Situationen wie Stadt-, Berg- oder Tal-Lage bzw. für Städte unter Berücksichtigung von Bebauungsgrad und Bevölkerungszahl anpassen, fehlen doch die für hygrothermische Beurteilungen ebenfalls wichtigen Anpassungsmöglichkeiten für Luftfeuchte, Globalstrahlung, atmosphärische Gegenstrahlung sowie Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge. Darüber hinaus wurde eine Höhenabhängigkeit von Temperatur, absoluter Feuchte sowie Niederschlagsmenge in verschiedenen Untersuchungen belegt und Korrekturfaktoren zu deren Berücksichtigung ermittelt. Diese Faktoren variieren regional und zeitlich - beispielsweise betragen die Höhenkorrekturfaktoren für die Temperatur zwi-

schen 0,00 und 0,01 K pro Meter Höhenunterschied. Auf die Niederschlagsmengen in Berglagen haben nicht nur deren absolute Höhe einen Einfluss sondern auch deren Neigung sowie die Orientierung zur Hauptwindrichtung (Lee- oder Luvseite). Weiterhin konnten Einflussfaktoren auf einzelne Klimatelemente für verschiedene Expositionen wie Lage im Gebirge oder in einer Stadt recherchiert werden. Diese im Rahmen der Literaturrecherche gewonnen Erkenntnisse sind zwar nicht ausreichend, um die Lokalklimaanpassungsmodelle direkt darauf zu basieren. Sie dienen aber als Orientierungshilfe bei der Erstellung und anschließend auch zur Kontrolle der neu entwickelten Anpassungsmodelle.

Die überprüften Klimasimulationsmodelle, mit Hilfe derer auf Basis von physikalischer Modelle, detaillierten Informationen zur Topographie und vorhandenen Referenzklimamessdaten Klimadatenätze für beliebige Unterregionen und Standorte erzeugt werden, können Temperatur und Luftfeuchte mit guter Genauigkeit abdecken. Voraussetzung dafür ist, dass die Eingabedaten wie Umgebungsklima und Topographie sowie die verwendeten physikalischen Modelle geeignet sind. Die Auswahl der verwendeten Modelle ist jedoch häufig nur durch den Abgleich mit entsprechenden Datensätzen möglich, zu deren Erzeugung die Verfahren eigentlich eingesetzt werden sollen. Abgesehen davon weisen die erzeugten Daten für Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung meist nur eine mäßige Übereinstimmung (sehr schwache Korrelationskoeffizienten) mit den gemessenen Daten auf. Daher wurde entschieden, die Lokalklimamodelle nicht mithilfe von Klimasimulationsprogrammen sondern basierend auf mehrjährigen gemessenen Klimadaten von Klimastationen mit unterschiedlicher Exposition innerhalb der neuen HRY-Referenzregionen in Deutschland zu entwickeln.

3.3 Eigene Lokalklimamessungen in der Umgebung des Fraunhofer

Um die klimatischen Abweichungen zu erfassen, die innerhalb geringer Distanzen durch die unterschiedlichen geographischen Randbedingungen auftreten können, wurden an drei Standorten in unmittelbarer Umgebung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) entsprechende Messungen durchgeführt. Dazu wurden die Temperatur, die relative Feuchte, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit, der barometrische Druck, die Regenmenge und -intensität und die Globalstrahlung gemessen und die Unterschiede zur Klimastation des IBP in „neutraler“ Exposition ermittelt. Die Beschreibungen der Umgebung der Messstandorte ist in Tabelle 8 angegeben - Satellitenansichten inkl. der Entfernungen zum Institutsgelände und der dortigen Messstation sind in Bild 54 dargestellt.

Tabelle 8:
Messstationen und deren Beschreibung.

Standort	Standorthöhe [m]	Umgebung
IBP	682	Auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Valley.

Mangfalltal	579	An der von Nord nach Süd verlaufenden Mangfall (ca. 20 m Breite) mit einer Entfernung zum Fluss von ca. 80 m. Jeweils ca. 100 m westlich und östlich stehen Bäume.
Taubenberg	870	Auf einer leicht nach Südwesten geneigten Wiese nahe am Gipfel. Etwa 50 m entfernt vom Wald.
Wald	685	Auf einer baumfreien Fläche (ca. 10 m x 10 m) im Wald, umgeben von hohen Bäumen.

Die Klimastation des IBP, an der seit Anfang der 1950er Jahre Klimadaten erfasst werden, dient zusätzlich als Vergleichsstation. In Bild 55 bis Bild 58 sind die Aufnahmen der einzelnen Messstationen abgebildet. Die Messungen an den drei Außenstandorten wurden am 18.04.2013 gestartet. Für das Lokalklimamodell wurden Messwerte über ein Jahr vom 01.06.2013 bis 31.05.2014 ausgewertet.

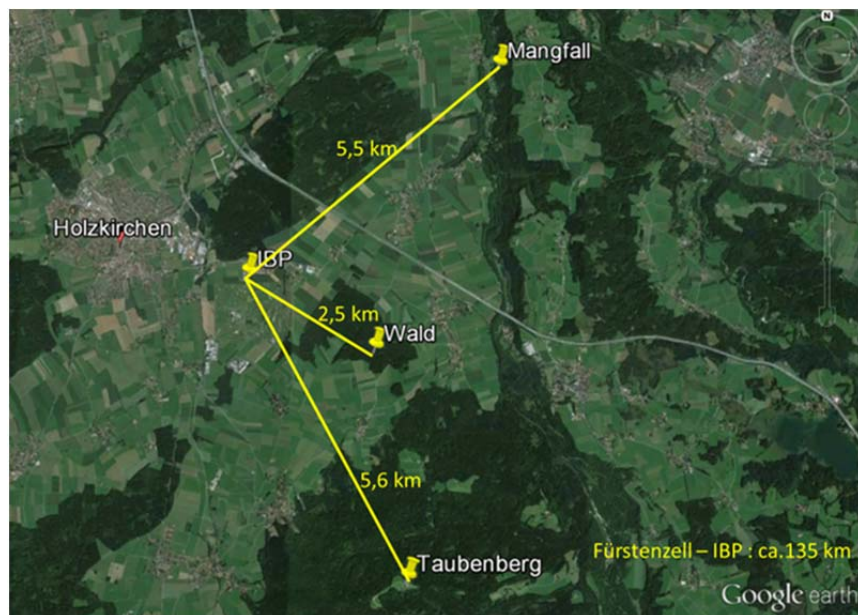


Bild 54:
Satellitenansicht der Messstationen und Entfernung von IBP.



Bild 55:
Wetterstation auf dem Freilandversuchsgelände des IBP.



Bild 56:
Wetterstation im Mangfalltal.



Bild 57:
Wetterstation auf dem Taubenberg.



Bild 58:
Wetterstation im Wald.

3.3.1 Eingesetzte Messtechnik

Der Wettermesswertgeber ist ein kompaktes und leichtes Multisensor-Messsystem zur Erfassung verschiedener meteorologischer Messgrößen. Das System registriert Lufttemperatur, relative Feuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und flüssigen Niederschlag. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt über einen zusätzlichen Datenlogger direkt an den Wetterstationen. Der Messbereich und die Messgenauigkeit der Sensoren ist laut Hersteller wie folgt (s. Tabelle 9):

Tabelle 9:
Technische Informationen zu den Sensoren.

Sensor	Bereich	Genauigkeit
Windrichtung	0 - 360 °	± 3 °
Windgeschwindigkeit	0,5 - 60 m/s	± 3% bei 10 m/s
Barometrischer Druck	600 - 1100 mbar	± 0,5 mbar bei 0 - 30 °C ± 1 mbar bei -52 - +60 °C
Lufttemperatur	-52 - 60 °C	± 0,3 K bei 20 °C
Relative Feuchte	0 - 100 % RH	± 3 % RH 0 - 90 % RH ± 5 % RH 90 - 100 % RH
Regenmenge	Erfassungsfläche 60 cm ² , Ausgabe des Summenwertes	± 5 %
Regenintensität	0 - 200 mm/h	Nicht angegeben.

Die Messgenauigkeit für die relative Luftfeuchtigkeit der eingesetzten Wetterstationen liegt im Bereich von 0 bis 90 % bei ±3 % und im Bereich von 90 bis 100% bei ±5 %. Im Laufe der Messungen stellte sich heraus, dass die Wetterstationen selten eine relative Luftfeuchtigkeit größer als 95 % messen, während beim IBP regelmäßig höhere Luftfeuchten registriert werden. So liegt die Anzahl der Stunden mit über 95 % r.F. bei der Wetterstation auf dem Taubenberg nur bei etwa 5 % im Vergleich zur knapp 200 m tiefer gelegenen IBP-Station. Zur Überprüfung der eingesetzten Messsysteme wurde die Luftfeuchte mit einem anderen Messsystem an den gleichen Standorten ermittelt. Dabei wurden im Überprüfungszeitraum immer wieder auch höhere Luftfeuchten als 95 % erfasst. Von Seiten des Herstellers Vaisala wurde bei der Wetterstation WXT 520 im ersten Schritt der Messkopf ausgetauscht. Nach dem Wechsel war das Maximum bei der Messung aber abgesehen von wenigen Stunden weiterhin bei 95 %. Als zweite Maßnahme tauschte der Hersteller die gesamte Wetterstation aus, doch dies änderte auch nichts an dem Ergebnis. Weiterhin überprüfte der Hersteller die Wetterstationen in einer Klimakammer: Bei einem Testzyklus mit 100 % r.F. in der Klimakammer und aktivierter Ventilation lag auch hier der maximal messbare Wert bei etwa 95 % - allerdings entspricht dies gerade noch der angegebenen Messgenauigkeit von ±5 % für den Bereich über 90 % r.F.. Bei deaktivierter Ventilation lagen die Ergebnisse aber unter 95 %. Das Ergebnis der Untersuchung welche der Hersteller durchgeführt hat, [65], lautet wie folgt:

Fehler mit Luftzirkulation: 3 % - 5,7 % bei relativer Feuchte > 90 %
Fehler ohne Luftzirkulation: 3,6 % - 8,6 % bei relativer Feuchte > 90 %

Der Hersteller zog sich dann auf die Position zurück, dass die Messgenauigkeit mit Luftzirkulation erreicht wird und eine weitere Verbesserung nicht möglich bzw. nicht erforderlich sei.

Bedauerlicherweise ist somit nur eine eingeschränkte Auswertung der relativen Feuchte an den drei Lokalklimamessstationen möglich, da alle Zeiträume mit Messwerten um 95 % mit der o.g. Unsicherheit behaftet sind. Weiter Recherchen haben allerdings gezeigt, dass die Messungenauigkeiten im Bereich hoher relativer Luftfeuchten (zwischen 95 und 100 % r.F.) vermutlich ein Problem bei zahlreichen Wetterstationen und Klimadatensätzen darstellen dürfte.

Das Messprinzip für die Messung des Regens beruht auf einem akustischen Sensor. Entsprechend der Masse und der Geschwindigkeit des Regentropfens verändert sich das akustische Signal: Größere Tropfen erzeugen ein stärkeres akustisches Signal als kleinere Tropfen. Der Piezoelektronische Sensor wandelt das akustische Signal in ein analoges Spannungssignal um. Bei der herkömmlichen Regenmessung wird der Niederschlag auf einer Messwaage gesammelt. Diese entleert sich bei Erreichen eines Schwellenwertes, der Kippvorgang wird elektronisch erfasst und aus der Anzahl der Kippvorgänge lässt sich die Regenmenge ermitteln. Die Messergebnisse bezüglich der Regenmenge lagen fast immer deutlich niedriger als ab der IBP-Messstation und konnten daher nicht sinnvoll ausgewertet werden. Da, wie später noch beschrieben wird, Regen und Wind aber sowieso gesondert behandelt werden, blieb dieser Mangel der Messdaten ohne nachteilige Folgen.

Alle anderen Klimaelemente wurden durch die Wetterstation gut erfasst und konnten auch in geeigneter Form ausgewertet und planmäßig für Modellbildung und Validierung herangezogen werden.

3.3.2 Vergleich der Messdaten mit der neutralen Referenzstation

Zum Vergleich des Lokalklimas an den vier Messstationen werden die Messwerte für ein Jahr vom 01.06.2013 bis zum 31.05.2014 ausgewertet.

Temperatur

In Bild 59 sind die Monatsmittelwerte der Temperatur an den vier Standorten einander gegenübergestellt. Bei den absoluten Werten zeigt sich, dass die Werte auf dem Freilandversuchsgelände des IBP als Referenzstation meist höher liegen als an den anderen Stationen. Überraschend ist der deutliche Anstieg der Temperaturen auf dem Taubenberg in den Monaten Dezember bis März. Auch Einzelmessungen haben gezeigt, dass es hier häufig zu sog. Inversionswetterlagen kommt, bei denen die Temperatur in den höheren Lagen deutlich über denen in der Ebene oder im Tal bleiben. Eine hier nicht dargestellte Auswertung der Tagesmittelwerte zeigt allerdings, dass der Taubenberg die meiste Zeit

über die niedrigsten Temperaturen aufweist, dann aber während der Inversionswetterlagen für einige Tage oder sogar Wochen so deutlich höhere Werte erreicht, dass im Monats-Mittel die Temperaturen über denen der anderen Stationen liegen können. Da diese Effekte je nach Großwetterlage und genauem Standort zwar gehäuft auftreten können, bezogen auf die „normalen“ Verhältnisse aber doch Ausnahmesituationen darstellen, erscheint deren Vernachlässigung trotzdem angemessen und für die Bemessung auch geboten.

Bei den beiden Standorten in Tal und Wald entsprechen die beobachteten Temperaturunterschiede dagegen im Wesentlichen den Erwartungen. Die Messungen bestätigen, dass die unterschiedlichen Expositionen trotz der großen lokalen Nähe zu erkennbaren Temperaturunterschieden führen. Die Unterschiede sind – abgesehen von der Wintersituation auf dem Taubenberg – systematisch und sollten damit in geeigneten Modellen erfass- und abbildbar sein.

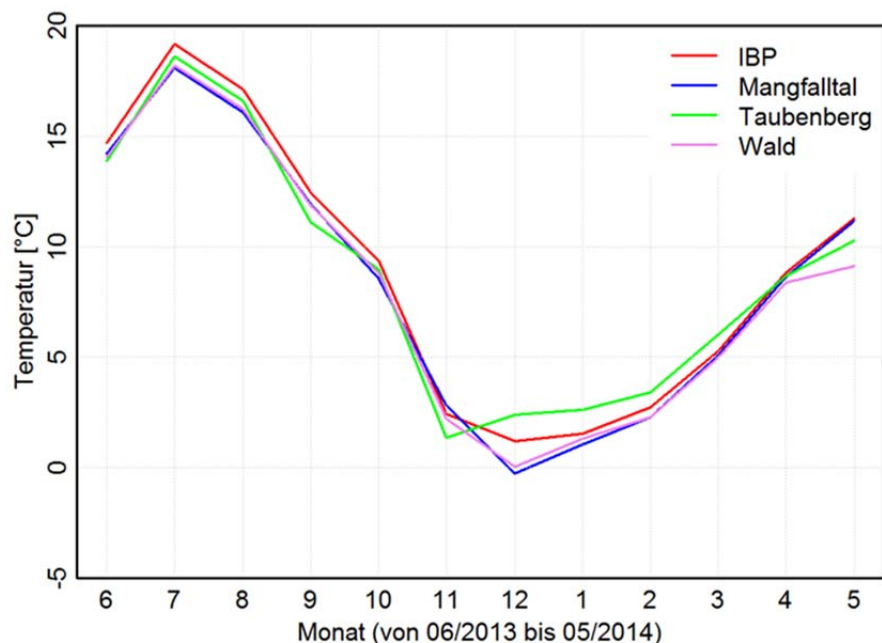


Bild 59:
Monatsmittelwerte der Temperatur von Juni 2013 bis Mai 2014.

Globalstrahlung

Die Monatsmittelwerte der Globalstrahlung sind in Bild 60 dargestellt. Die Verläufe von IBP und Taubenberg sind dabei sehr ähnlich, während die Werte im Mangfalltal mit Ausnahme der Monate Juni und Juli um ca. 10 W/m^2 - im Dezember sogar um etwa 20 W/m^2 - niedriger liegen als an den beiden anderen Stationen. Aufgrund des nur kleinen Sichtfaktors der von hohen Bäumen umgebenen Station bleibt die Globalstrahlungsmenge im Wald deutlich geringer. Nur im Juni bei Sonnenhöchststand scheint die Sonne während einiger Tage

auch direkt auf den Strahlungssensor – ansonsten wird nur ein Teil der Diffusstrahlung registriert. Trotz der deutlich geringeren Strahlungsgewinne ist die Temperatur im Wald meist recht ähnlich wie die Situation im Mangfalltal. Dies liegt zum einen daran, dass die Strahlung natürlich trotzdem an den Bäumen absorbiert wird und damit zur Erwärmung beiträgt, und zum anderen daran, dass aufgrund des geringen Sichtfaktors zur Atmosphäre auch die - durch langwellige Abstrahlung bedingte - nächtliche Abkühlung reduziert ist.

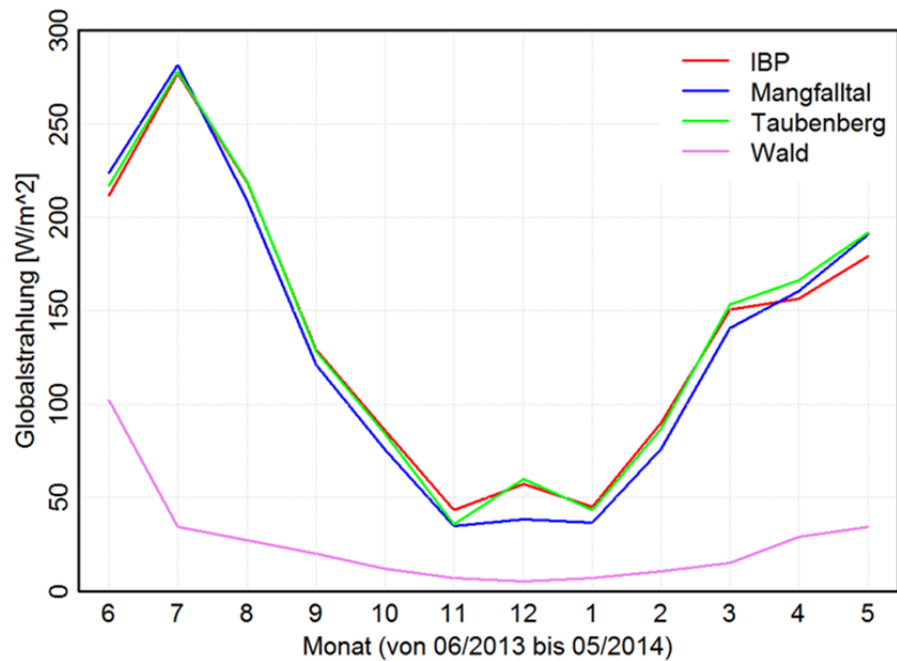


Bild 60:
Monatsmittelwerte der Globalstrahlung von Juni 2013 bis Mai 2014.

Luftfeuchte

Die Auswertung der relativen Feuchte ist auf Grund von den zuvor bereits beschriebenen Messungenauigkeiten nur eingeschränkt möglich. Während die relative Feuchte am IBP häufig 100 % erreicht, wurde an den Messstationen maximal 98,8% (Taubenberg), 95,7 % (Mangfalltal) und 95,9 % im Wald gemessen. In Bild 62 sind die Monatsmittelwerte der relativen Feuchte basierend auf den Mess-Rohdaten ohne weitere Korrekturen für die vier Standorte dargestellt und vergleichend dazu in Bild 62 die Monatsmittelwerte unter Ausschluss aller Stunden mit Messwerten über 95 % (einzeln für jede Station).



Bild 61:
Monatsmittelwert der relativen Feuchte von Juni 2013 bis Mai 2004.

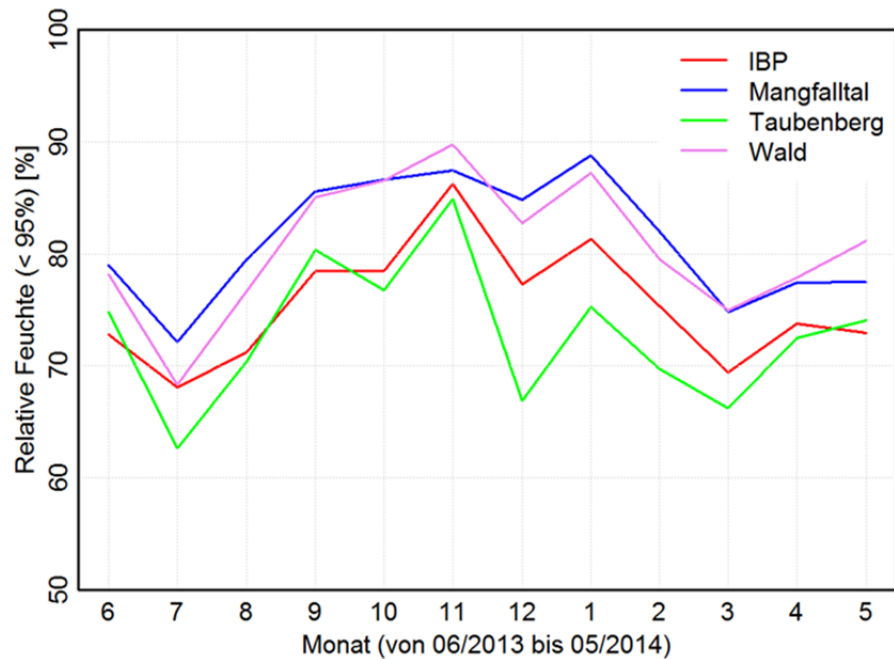


Bild 62:
Monatsmittelwert der relativen Feuchten von Juni 2013 bis Mai 2014. Hier sind nur die Messdaten unter 95 % RH berücksichtigt.

Im Bild 62 verlaufen die Kurven für das Mangfalltal und den Wald recht ähnlich und liegen etwas höher als an den anderen beiden Stationen. Die Werte an der Messstation des IBP liegen um ca. 5 bis 15 % niedriger. Die relative Feuchte am Taubenberg bleibt meist am niedrigsten. Besonders deutlich ist der Unterschied im Dezember, was allerdings aufgrund der Abhängigkeit der relativen Feuchte von der Temperatur nicht überrascht: Im Dezember lag die Temperatur auf dem Taubenberg etwa 4 K über der der Vergleichsstationen. Die Feuchtwerte verhalten sich hier umgekehrt proportional zu den Temperaturen.

Durch den Ausschluss der Werte über 95 % werden die Monatsmittelwerte der relativen Feuchte am IBP-Gelände im Vergleich zu Bild 62 durchschnittlich um ca. 8 % reduziert. Die Mittelwerte auf dem Taubenberg sinken um ca. 2 %, während die Abweichung durch die Begrenzung der Werte auf 95 % im Wald sowie im Mangfall kleiner als 1 % bleiben. Aus diesem Vergleich wird deutlich, dass das Weglassen der Stunden mit hohen relativen Feuchten aufgrund der Messunsicherheit sich am stärksten an der Station des IBP auswirkt und das dortige Klima (fälschlicherweise) trockener erscheinen lässt. Das Weglassen der zu hohen Werte erscheint daher nicht zielführend – benötigt würden stattdessen die tatsächlichen Feuchtwerte an den anderen Stationen, wenn dort Werte von 95 % r.F. angezeigt werden.

Alternativ werden daher zum Vergleich der Feuchteverhältnisse bei den verschiedenen Expositionen die Zeiträume ausgewertet, in denen an keiner der Messstationen Werte über 95 % ermittelt werden. Exemplarisch ist dies für eine Woche im April in Bild 63 dargestellt, die als repräsentativ für die anderen Zeiträume mit Messwerten unter 95 % ausgewählt wurde.

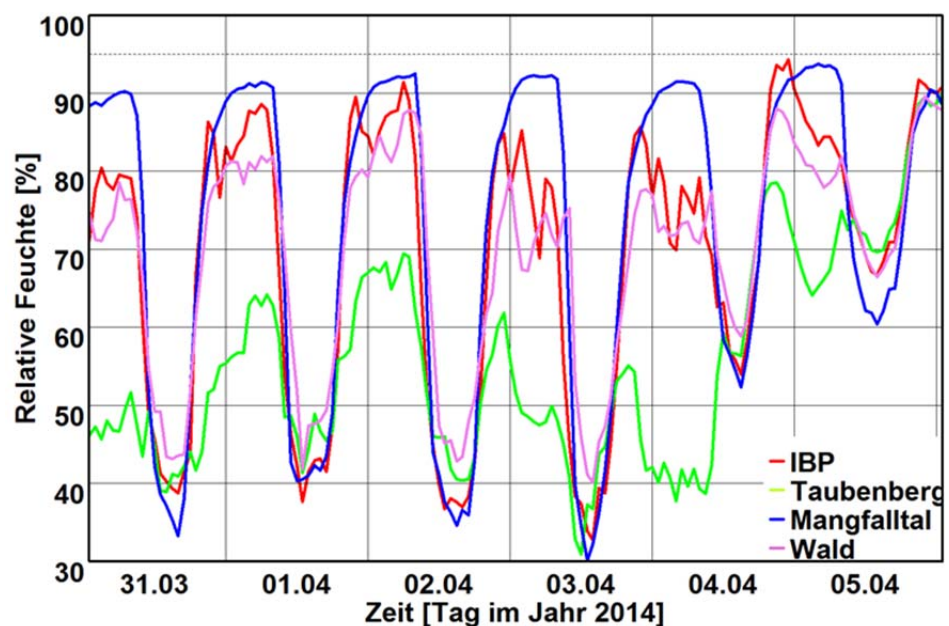


Bild 63:
Stündliche Werte der relativen Feuchte während einer Woche im April.

In dieser Woche steigt die relative Feuchte im Mangfalltal nachts auf das höchste Niveau und sinkt am Mittag auf das niedrigste Niveau ab. Am IBP steigen die Werte nachts nicht so hoch wie im Mangfalltal, sinken tagsüber aber fast genauso weit ab. Im Wald ist die Schwankungsbreite generell geringer mit niedrigeren nächtlichen Maximalwerten und höheren Minimalwerten am Tag. Im Mittel bleiben die Werte niedriger als am IBP. Auch bei den anderen – hier nicht dargestellten Perioden – ist die Verteilung ähnlich. Der Verlauf der relativen Feuchte am Taubenberg zeigt das niedrigste Niveau und ebenso die geringsten Schwankungen im Tagesverlauf. Aus der Auswertung der repräsentativen Woche wird folgendes deutlich: auch bei der relativen Feuchte sind deutliche Unterschiede zwischen der Station am IBP und den beiden Messstationen im Mangfalltal und auf dem Taubenberg deutlich. Die Verhältnisse im Wald liegen dagegen zwischen diesen Extremen und am ähnlichsten den Werten am IBP – ohne diese aber zu überschreiten. Während eine Berücksichtigung der Abweichungen in Tal- und Berg-Lage also auch aus diesen Messungen abzuleiten ist, bestätigen sich die vermuteten erhöhten Feuchten im Wald nicht.

Die Auswertung der lokalbedingten klimatischen Unterschiede der eigenen Messdaten bestätigt im Wesentlichen die Erkenntnisse aus der Literatur. Trotz der sehr nahe beieinander liegenden Stationen werden je nach Exposition und Klimatelement durchaus signifikante Unterschiede festgestellt – dies betrifft insbesondere Temperatur, Feuchte und Strahlung im Tal und auf dem Berg. Für die Station im Wald werden zwar ebenfalls leicht abweichende Bedingungen festgestellt, diese sind aber nur schwach ausgeprägt und zeigen insbesondere nicht die erwarteten erhöhten Luftfeuchtwerte. Somit wäre für diese Lokalexposition kein Handlungsbedarf im Sinne der Erstellung eines eigenen Modellsatzes festzustellen. Ggf. kann eine solche Lage durch die spezifische Verschattung abgebildet werden.

3.4 Voruntersuchungen zur quantitativen Erfassung der Lokalklimadifferenzen ohne Modellbildung

Für die Entwicklung der Lokalklimaanpassungsmodelle wurden verschiedene Ansätze untersucht, die nur teilweise erfolgreich waren. In diesem Kapitel werden die Ansätze vorgestellt, die sich als weniger erfolgversprechend herausgestellt haben und daher nicht zur Modellbildung herangezogen wurden.

Basis für die Untersuchungen sind gemessene Klimadaten an Orten mit unterschiedlicher topographischer Umgebung. Die Umgebung wird zunächst qualitativ kategorisiert und die Flächenanteile quantitativ ermittelt. Die Klimadaten stammen aus derselben Quelle wie die Rohdaten für die hygrothermischen Referenzjahre und auch die Aufbereitung der Daten erfolgt analog zur der in Kapitel 2.2.2. Zusätzlich wird die absolute Feuchte rechnerisch ergänzt, um die absoluten Feuchtemengen in der Luftmasse sowie deren Höhenabhängigkeit

entsprechend den Zusammenhängen aus der Literatur auszuwerten. Dazu wird die absolute Feuchte aus der relativen Feuchte und der Lufttemperatur entsprechend der folgenden Formel aus [66] ermittelt:

$$X = \frac{622 \cdot V}{P - V}$$

$$V = C1 \cdot e^{\frac{C2 \cdot t}{C3 + t}} \cdot RH$$

mit:

X	absoluter Feuchtegehalt [g/kg]
V	Sättigungsdampfdruck [hPa]
P	Luftdruck (kost.=1013 hPa)
RH	relative Feuchte [%]
t	Lufttemperatur [°C]
C1	Konstante (6,1078 bei $t \geq 0$, 6,1071 bei $t < 0$)
C2	Konstante (17,08 bei $t \geq 0$, 17,84 bei $t < 0$)
C3	Konstante (234,18 bei $t \geq 0$, 245,425 bei $t < 0$)

Anschließend werden die Datensätze analysiert und unter Berücksichtigung der topographischen Unterschiede miteinander verglichen sowie der Zusammenhang zwischen den Klimaverhältnissen und der Topographie der Umgebung statistisch untersucht.

3.4.1 Vergleich des Lokalklimas von exemplarischen Standortpaaren

Im ersten Untersuchungsansatz wird die Variationsbreite einzelner Klimaelemente an mehreren Standorten innerhalb einer HRY-Zone in Abhängigkeit von den lokalen Randbedingungen genauer betrachtet. Hierzu werden Standortgruppen in örtlicher Nähe aber unterschiedlicher Lage bzw. Exposition gebildet und die Differenzen analysiert. Die Standorte sollen jeweils maximal 30 km voneinander entfernt sein und in ihrer Lage deutlich variieren. Die hierbei betrachteten Expositionen sind neben der neutralen Lage auf dem flachen Land außerhalb einer großen Stadt:

- die Lage innerhalb eines städtischen Siedlungsraums oder einer vergleichbaren Situation wie z.B. in einem Gewerbegebiet (Stadt-Lage)
- exponiert auf einem Berg oder einer deutlichen Anhöhe (Berg-Lage)
- direkt an einer Gewässerfläche z.B. See oder andere stehende oder nur langsam fließende Gewässer (Gewässer-Lage).

Die ausgewählten Stationen liegen in der Nähe von Hamburg, Karlsruhe, Baden-Baden oder Lindau und die Gruppen mit zwei oder drei Stationen werden entsprechend diesen Ortsnamen z.B. als Gruppe „Hamburg“ bezeichnet. Die

Stationen werden im Folgenden gruppenweise betrachtet. Die Informationen jeder Station sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Zum Vergleich der klimatischen Eigenschaften werden die Klimaelemente Temperatur, relative Feuchte, absolute Feuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, Diffusstrahlung und Direktstrahlung aller Stationen einer Gruppe einander jeweils als Boxplot dargestellt. Nur für Windrichtungsverteilung wird eine Windrosendarstellung gewählt.

Tabelle 10:

Auflistung der vier Gruppen mit zwei oder drei betrachteten Stationen sowie deren Höhe und Exposition.

Gruppe	Standort	Höhe [m]	Exposition
Hamburg	Flughafen	11	Neutral (Stadttrand)
	Veddel	7	Gewerbegebiet am Gewässer
Karlsruhe	Karlsruhe	116	Neutral (Stadttrand)
	Wörth am Rhein	100	Am Fluss
	Neuenbürg	453	Auf einem Berg
Baden-Baden	Baden-Baden	166	Stadt auf einem Berg
	Bühl	130	Neutral (Stadttrand)
	Bühlerhöhe	770	Auf einem Berg
Lindau	Lindau	400	Am See
	Argenbühl	684	Auf einem Berg
	Lindenberg	818	Auf einem Berg

Gruppe Hamburg

In der Gruppe Hamburg werden zwei Standorte betrachtet: Der Flughafen auf eine Höhe von 11 m ü. NN außerhalb der Stadt und das 14 km südlicher gelegene Gewerbegebiet in Veddel (7 m ü. NN) mit großen Gewässerflächen (vgl. Bild 64).



Bild 64:
Betrachtete Standorte der Gruppe Hamburg mit Angabe der Meereshöhe und der Entfernung zwischen den Standorten (Quelle der Karte: Google Maps, 2014).

Im Bild 65 sind die einzelnen Klimaelemente an den Stationen Flughafen und Veddel als Boxplot dargestellt. Die Temperaturen in Veddel liegen leicht höher als am Flughafen, was auf einen gewissen Wärmeinseleffekt aufgrund der innerstädtischen Lage zurückgeführt werden könnte (siehe Kapitel 3.2.2 unter „Stadtklima“) – der Unterschied bleibt aber sehr gering. Die höhere relative Luftfeuchte in Veddel ist möglicherweise auf die Verdunstung der zahlreichen benachbarten Kanäle und Wasserflächen zurückzuführen. Global-, Diffus- und atmosphärische Gegenstrahlung zeigen keine relevanten Unterschiede zwischen den beiden Stationen. Die Windrose zeigt eine ähnliche Verteilung der Windrichtungen mit leichter höherer Windgeschwindigkeit in Veddel. Dies könnte eine Folge des geringeren Windwiderstands der Wasserflächen aber auch eines gewissen Land-See-Windsystem-Effekts (siehe Kapitel 3.2.2) sein, der sich in den Bereichen um die großen Wasserflächen im Zentrum Hamburgs einstellt, aber am Flughafen in 14 km Entfernung kaum mehr Wirkung zeigt.

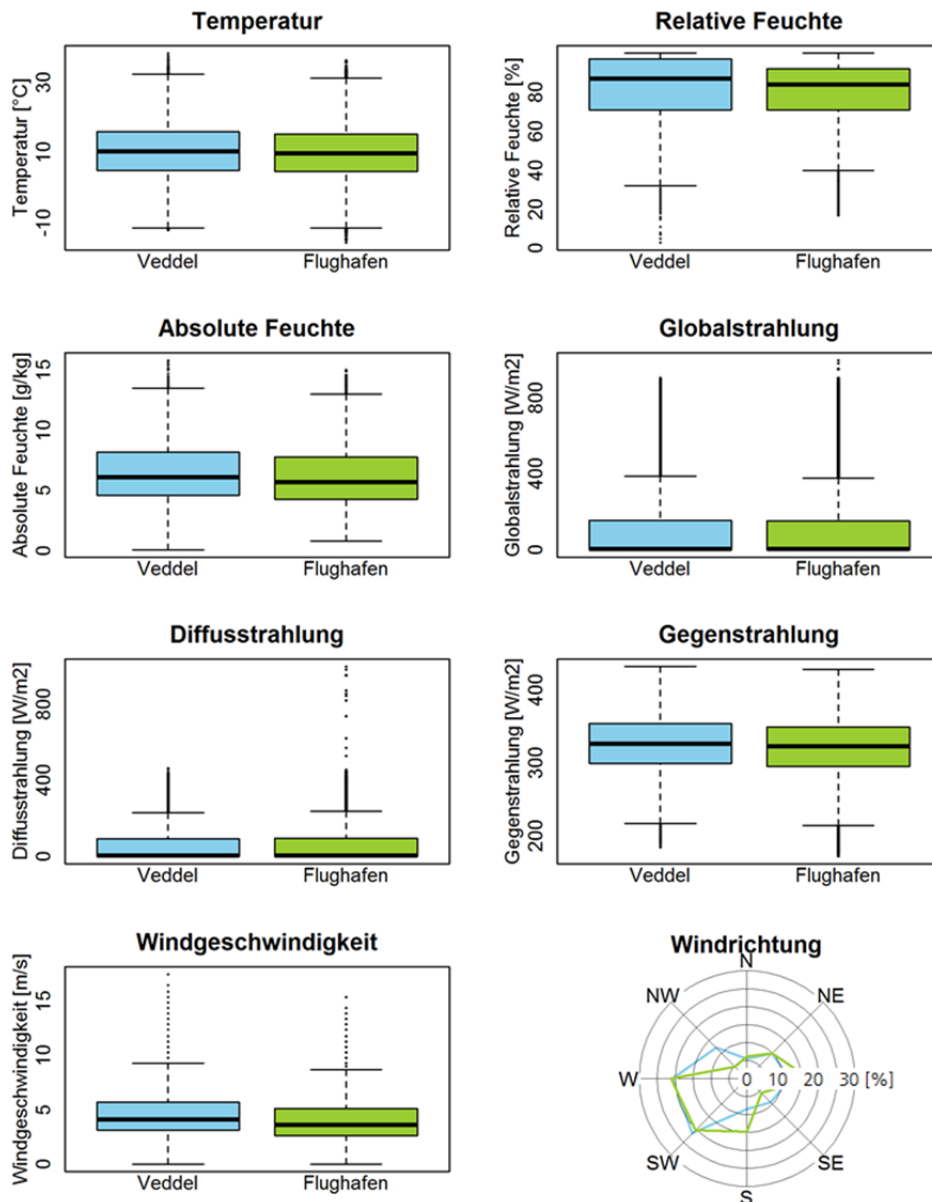


Bild 65:
Vergleich der Klimaelemente der beiden Standorte in der Gruppe Hamburg.

Gruppe Karlsruhe

Zur Gruppe Karlsruhe gehören eine am Stadtrand (4,8 km vom Zentrum) gelegene Station auf 116 m Höhe, das davon ca. 4 km entfernte Gewerbegebiet Wörth am Rhein (100 m ü. NN) sowie das etwa 30 km südöstlich, auf einem leicht nach Norden geneigten Berg gelegene Neuenbürg (453 m ü. NN) (vgl. Bild 66).



Bild 66:
Betrachtete Standorte der Gruppe Karlsruhe mit Angabe der Meereshöhe und der Entfernung zwischen den Standorten (Quelle der Karte: Google Maps, 2014).

Im Bild 67 werden die einzelnen Klimatelemente der drei Stationen der Gruppe Karlsruhe verglichen. Die Temperatur bleibt in Neuenbürg etwas niedriger als an den anderen beiden Standorten. Dies lässt sich auf die um etwa 400 m höhere Lage zurückführen. Die relativen und absoluten Feuchtwerte in Wörth am Rhein liegen jeweils etwas höher als in Karlsruhe, während die Temperatur an beiden Standorten mit nur ca. 16 m Höhenunterschied fast identisch sind. Hier scheint der Einfluss des Rheins dominant zu sein über die Effekte der geringen Höhendifferenz. Die Global- sowie die Diffusstrahlung sind an allen betrachteten Orten sehr ähnlich. Die Gegenstrahlung erreicht in Karlsruhe etwas höhere Werte als in Wörth am Rhein, während sie in Neuenbürg deutlich niedriger bleibt als an den beiden anderen Standorten. Da die Gegenstrahlung von den einzelnen Bestandteilen (Molekülen) der Luft sowie den enthaltenen Partikeln und Aerosolen emittiert wird, ändert sich deren Wert mit der Anzahl der Moleküle und Partikel in der Luft. Die niedrigere Gegenstrahlung in Neuenbürg kann somit auf die niedrigere Feuchte sowie die klarere Luft im Vergleich zu Stadt- und Rheinlage zurückgeführt werden. Die Windrose zeigt, dass die Windrichtungsverteilung in Karlsruhe und Wörth am Rhein relativ ähnlich ist (Maximum im Südwesten). In Neuenbürg kommt der Wind dagegen kaum aus Südwest, sondern aus Westen und Südosten. Offensichtlich wird der Wind durch die umgebenden Hügel und Täler in Neuenbürg entsprechend umgelenkt.

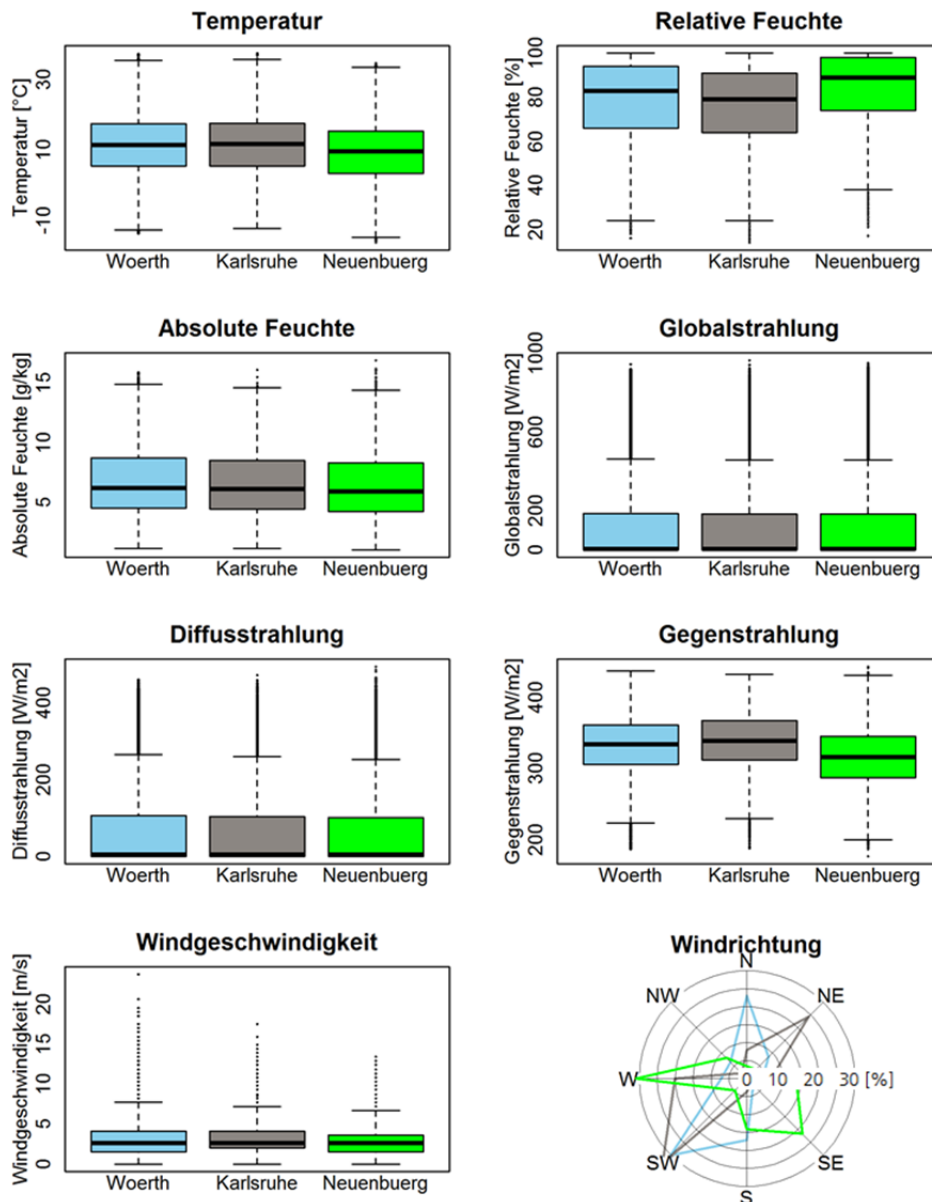


Bild 67:
Vergleich der Klimaelemente der drei Standorte in der Gruppe Karlsruhe.

Gruppe Baden-Baden

Zur Gruppe Baden-Baden gehören der Ort selber mit der Station in 166 m ü. NN am Stadtrand in einer Tallage, das ca. 10 km südwestlich gelegene Bühl am Rand eines ähnlich großen Siedlungsgebiets wie Baden-Baden (130 m ü. NN) und die 7 km südlich gelegene Bühlerhöhe, 770 m ü. NN auf einem Gebirgskamm (vgl. Bild 68).

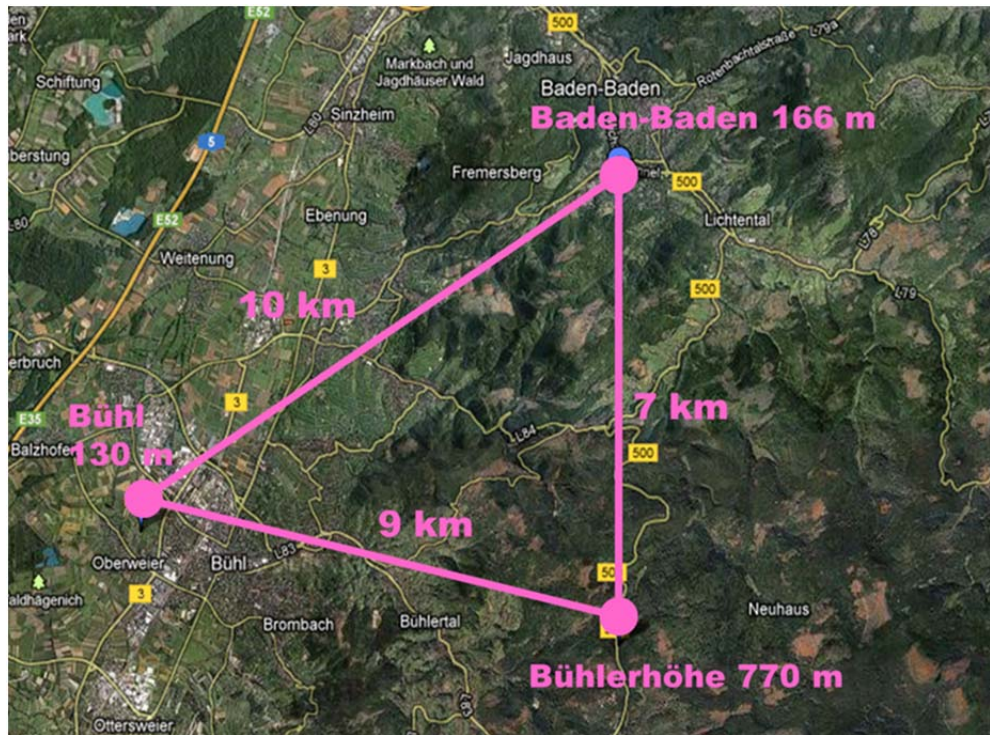


Bild 68:
Betrachtete Standorte der Gruppe Baden-Baden mit Angabe der Meereshöhe und der Entfernung zwischen den Standorten (Quelle der Karte: Google Maps, 2014).

Die Auswertung der Klimaelemente zeigt Bild 69. Die Temperaturen sinken erwartungsgemäß mit zunehmender Höhe der Standorte ab. Bei den absoluten Feuchten werden in Baden-Baden höhere Werte als in Bühl erreicht – die Bühlerhöhe zeigt dagegen wiederum erwartungsgemäß die niedrigsten Feuchtekonzentrationen. Der Reihenfolge der absoluten Feuchte entspricht auch die die Gegenstrahlungsmenge: bei den höchsten absoluten Feuchten ergibt sich die höchste Gegenstrahlung, bei der niedrigste Luftfeuchte bleibt auch die Gegenstrahlung entsprechend niedriger. Die Global- und die Diffusstrahlung sind hingegen an allen drei Standorten ähnlich. Die Windgeschwindigkeiten variieren stark. Der niedrigste Mittelwert wird in der Tallage von Baden-Baden mit unter 2 m/s und der höchste mit knapp 5 m/s auf der exponierten Lage der Bühlerhöhe erreicht. Die Windrichtungen sind an allen Standorten Orten ähnlich mit dem Maximum aus Süden bzw. Südwesten.

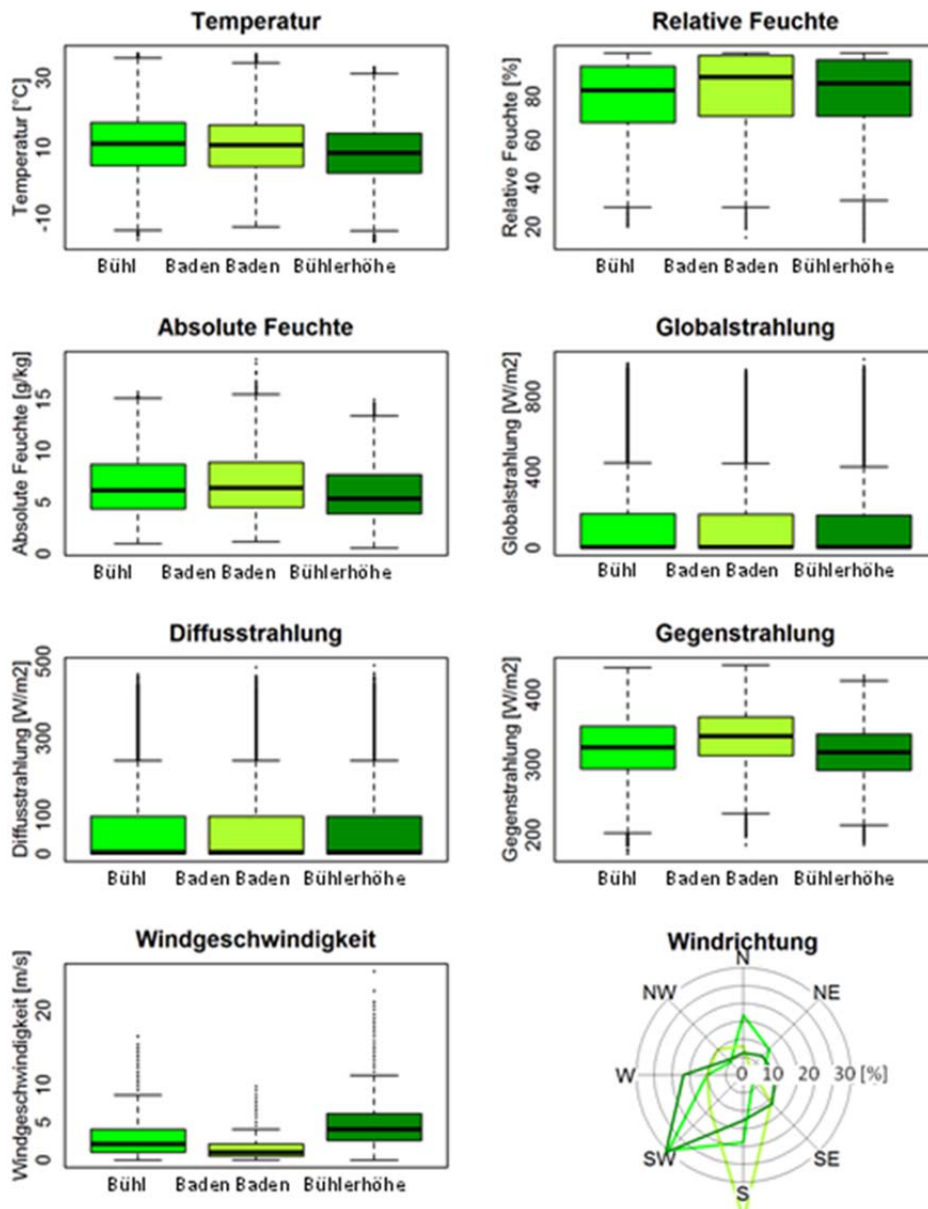


Bild 69:
Vergleich der Klimaelemente der drei Standorte in der Gruppe Baden-Baden.
VERWEIS?!

Gruppe Lindau

Zur Gruppe Lindau gehören die Station in der Stadt, nahe am Bodensee auf 400 m Höhe, das 26 km nordöstlich auf einem Berg in 684 m Höhe gelegene Argenbühl (Dorfcharakter mit lockerer Bebauung) und am Stadtrand von Lindenberg in 818 m ü. NN auf einem Berg in 18 km Entfernung nordöstlich von Lindau. Lindenberg ist eine kleinere Stadt mit 11.000 Einwohnern. Die Lage der Standorte ist in Bild 70 dargestellt.

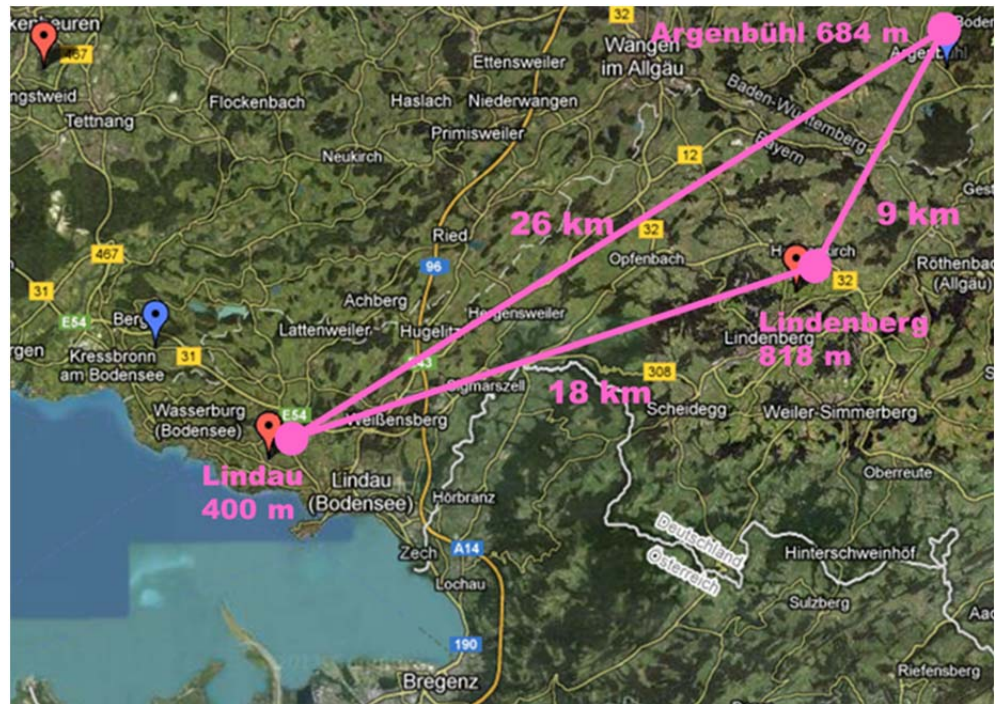


Bild 70:
Betrachtete Standorte der Gruppe Lindau mit Angabe der Meereshöhe und der Entfernung zwischen den Standorten (Quelle der Karte: Google Maps, 2014).

Die Temperatur und die absolute Feuchte (Bild 71) sind in Lindau höher als an den beiden anderen, in größerer Höhe gelegenen Standorten. Ursächlich dürften sowohl die Lage am Bodensees als auch der Höheneinfluss auf diese beiden Klimaelemente sein. Zwischen Argenbühl und Lindenberg ist dieser Zusammenhang allerdings nicht gegeben – obwohl Lindenberg 134 m höher liegt, bleiben die Temperaturen hier doch etwas höher. Dies auf die städtische Erwärmung zurückzuführen erscheint aufgrund der Lage der Station am Stadtrand und der nur geringen Größe von Lindenberg auch nur bedingt plausibel. Die Windgeschwindigkeiten sind an den beiden Berg-Standorten erwartungsgemäß größer als in Lindau – aber deutlich weniger ausgeprägt als in der Gruppe Baden-Baden. Die Windrose zeigt sehr unterschiedliche Windrichtungsverteilungen an den drei Orten. Dies weist einmal mehr darauf hin, dass für die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit vermutlich keine generellen Zusammenhänge ohne Berücksichtigung der lokalen Topographie möglich sind.

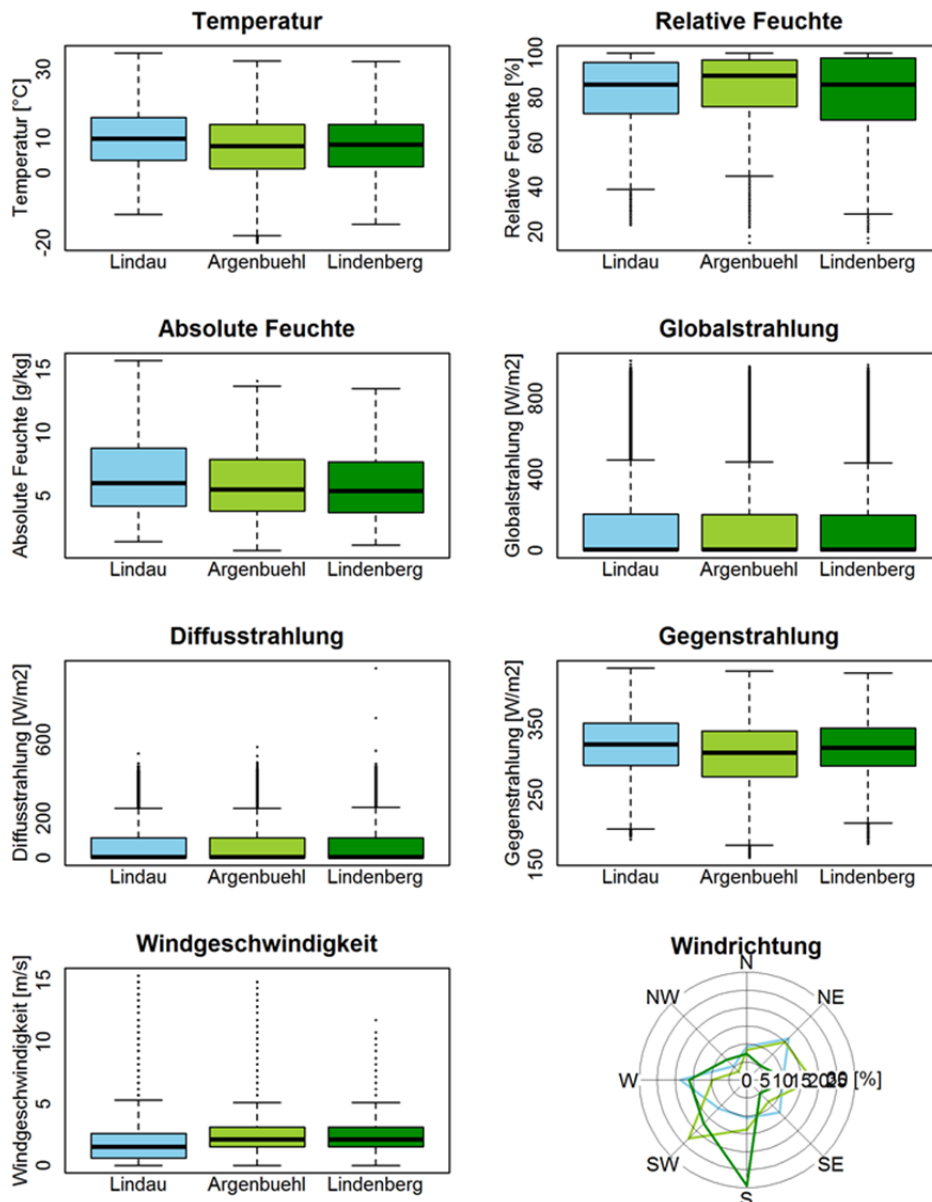


Bild 71:
Vergleich der Klimaelemente der drei Standorte in der Gruppe Lindau.

Erkenntnisse aus den Standortvergleichen

Aus den Vergleichen der Standorte in den verschiedenen Gruppen konnten folgende Erkenntnisse über lokale klimatische Unterschiede gewonnen werden:

- Der prinzipielle Zusammenhang von Absinken der Temperatur und der absoluten Feuchte bei zunehmender Meereshöhe bestätigt sich im Wesentlichen auch bei den eigenen Auswertungen. In Einzelfällen können diese Effekte aber durch andere Einflüsse wie Stadtlage oder umgebenden Gewässer überlagert werden, so dass sich die Effekte gegenseitig kompensieren.

- Die Windgeschwindigkeit variiert lokal stark vor allem in Gebirgslagen – ein Zusammenhang nur mit der Exposition und der Höhe des Standorts scheint hier nicht ausreichend zu sein.
- Auch die Windrichtungsverteilung variiert stark. Wie bei der Windgeschwindigkeit reichen zur Beschreibung aus bestimmten lokalen Expositionen (z.B. Stadtlage oder Berglage) abgeleitete Tendenzen nicht aus.
- Die Global- sowie die Diffusstrahlung variieren weniger stark – die Tendenzen weisen auf einen klareren Zusammenhang zwischen den Werten und der lokalen Exposition hin. Allerdings scheint auch hier eine zusätzliche Höhenkorrektur erforderlich zu sein.
- Die atmosphärische Gegenstrahlung steigt tendenziell bei höheren absoluten Luftfeuchten sowie in Stadtnähe.

Um aus den erkennbaren Tendenzen belastbare Modelle abzuleiten sind quantitative Beschreibungen der Zusammenhänge erforderlich.

3.4.2 Einfluss der Flächennutzung

Im vorherigen Kapitel wurden stichprobenartig anhand von Standortpaaren tendenzielle Abweichungen beim Klima infolge der lokalen Exposition analysiert. Dabei zeigte sich in den unterschiedlichen Gruppen auch eine recht eindeutige Höhenabhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte sowie ein Anstieg der Luftfeuchte in der Umgebung von Gewässern sowie der Temperatur in Stadtlagen.

Um die gruppenweise betrachteten, qualitativen Erkenntnisse nun quantitativ und gruppenübergreifend zu erfassen, wird versucht, einen zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen lokalen Einflussfaktoren und klimatischen Abweichungen herzustellen. Dabei werden die Standorte aller Gruppen mit Hilfe einer Korrelationsanalyse zwischen Exposition und Klimaabweichung untersucht. Diese erfolgt anhand von Standortpaaren aus jeweils zwei Stationen einer Gruppe. Die Exposition wird hier durch die umgebenden Flächenanteile (Wohngebiet, Gewässer etc.) beschrieben – die Höhe des Standorts wird separat, qualitative topographische Lagesituationen wie Berg oder Tallage jedoch nicht berücksichtigt. Die Standortpaare sind in Tabelle 11 angegeben.

Tabelle 11:
Standortpaare mit Kurzbezeichnung für die Korrelationsanalyse.

Gruppe	Bezeichnung	Standort 1	Standort 2
Hamburg	H1	Veddel	Flughafen
Baden-Baden	B1	Bühl	Baden-Baden
	B2	Baden-Baden	Bühlerhöhe
	B3	Bühl	Bühlerhöhe
Karlsruhe	K1	Karlsruhe	Neuenbürg
	K2	Wörth am Rhein	Karlsruhe

	K3	Wörth am Rhein	Neuenbürg
Lindau	L1	Lindau	Lindenberg
	L2	Lindau	Argenbühl
	L3	Lindenberg	Argenbühl

Als Vorbereitung der Korrelationsanalyse wird zunächst die Umgebung eines Standorts genauer untersucht und dann über eine Korrelationsanalyse der Einfluss der jeweiligen Umgebung auf die einzelnen Klimaelementen ermittelt.

Ermittlung der Unterschiede in der Flächennutzung der Standortpaare

Zur quantitativen Beschreibung der Umgebung der Standorte wird auf das frei verfügbare Kartenmaterial von „Open Street Map“ [67] zurückgegriffen. In diesen Karten sind die Flächen je nach geographischen Kategorien wie z.B. Feld, Gewässer, Nutzung als Wohn- bzw. Gewerbegebiet oder Straßen in unterschiedlichen Farben gekennzeichnet.

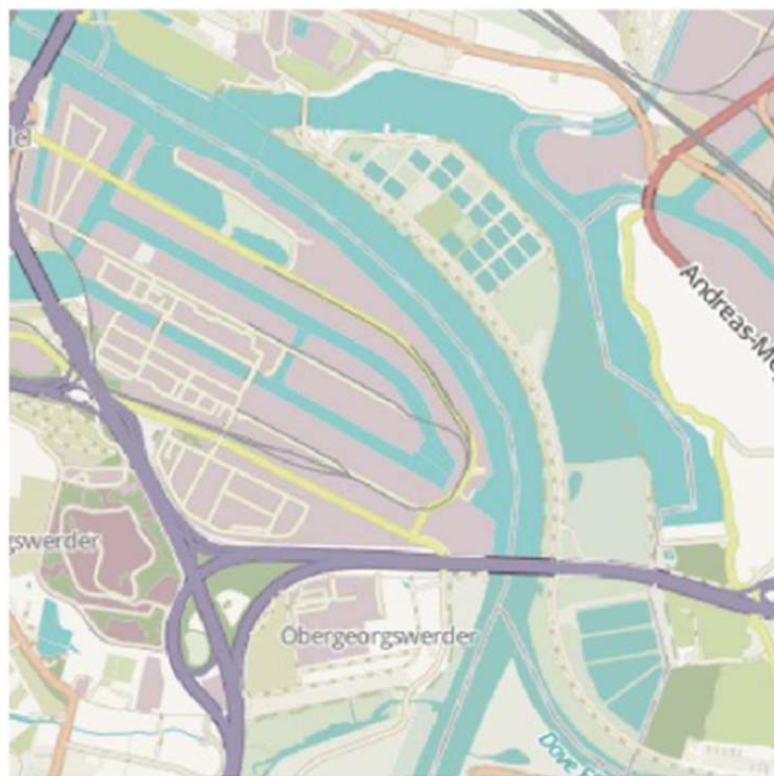


Bild 72:
Kartenausschnitt von 4 km x 4 km um die Klimastation Veddell in Hamburg [67].

Um jede Messstation wird ein Bereich von 4 km mal 4 km Größe analysiert und die jeweiligen Flächenanteile der verschiedenen Kategorien ermittelt. Bild 72

zeigt als Beispiel die Karte von Veddel in Hamburg. Darin sind Gewässer in blau, Feld in hellgrün, Wald bzw. Gehölzflächen in dunkelgrün, Wohn- sowie Gewerbegebiete in hell-violett und Straßen je nach Typ in violett, rot oder orange dargestellt. Die Kategorisierung der Farben ist nicht angegeben sondern wurde anhand eines Vergleichs mit Satellitenbildern selbst vorgenommen. Folgende Kategorien wurden dabei festgestellt:

- Wald / Gehölz
- Feld / Wiese
- Wohn- / Gewerbegebiet
- Gewässer
- Straße
- Sonstiges

Unter Sonstiges wurden neben nicht definierbaren Bereichen auch die Beschriftungstexte und Ortsnamen einsortiert – dieser Anteil bleibt aber immer unter 8 % und sollte daher kaum Einfluss auf die Auswertung haben. Die Flächenanteile der einzelnen Standorte sind im Bild 73 als Balkendiagramm dargestellt.

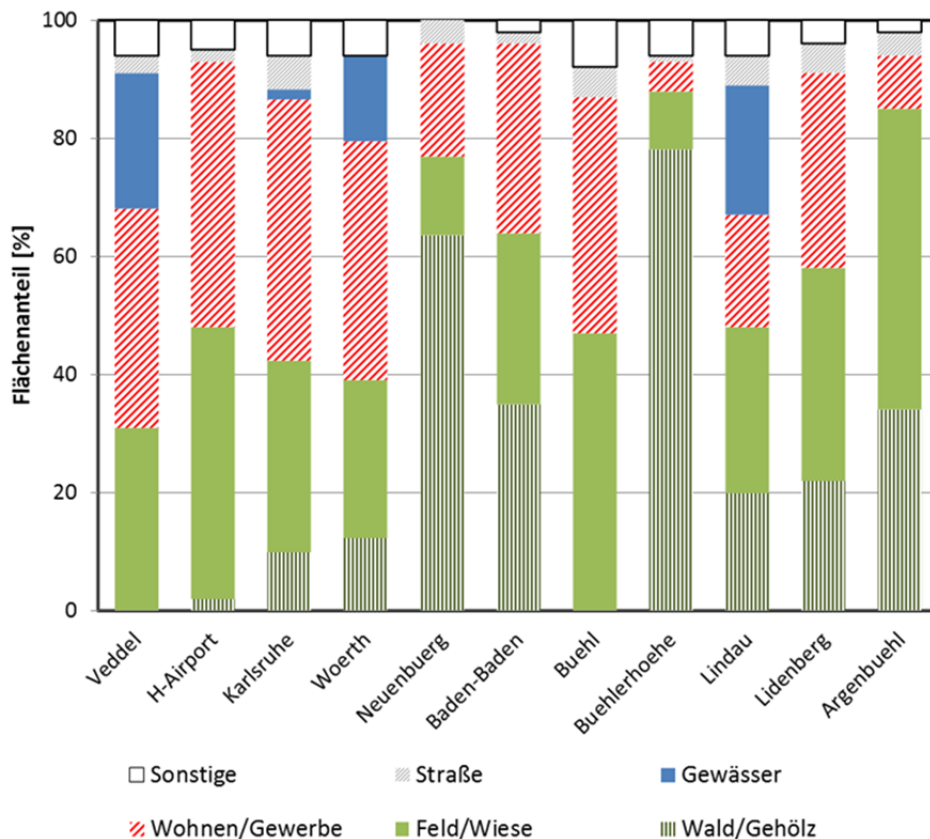


Bild 73:
Gegenüberstellung der jeweiligen Flächenanteile der betrachteten Klimastationen.

Die Unterschiede fallen teilweise auch bei geringer Distanz deutlich aus. Die Höhenlage der jeweiligen Messstation wird in Ergänzung zu den Informationen aus den zweidimensionalen Karten separat mit dem jeweiligen Zahlenwert berücksichtigt. Am Beispiel des Vergleichs zwischen Hamburg Veddel und Hamburg Flughafen zeigt sich ein deutlicher Unterschied sowohl in der Wasserfläche als auch im Anteil der Grünflächen. In Veddel liegt der Flächenanteil der Gewässer bei 23 % im Gegensatz zum Flughafen, bei dem sich gar keine Wasserflächen, dafür aber 15 % mehr Feld-Flächen befinden.

Für die Korrelationsanalyse werden die Prozentzahlen der Anteile der einzelnen Flächenkategorien sowie die Höhe des jeweils ersten Standorts der Paare aus Tabelle 7 vom entsprechenden Wert des zweiten Standorts subtrahiert. Die Differenzwerte sind in Tabelle 12 angegeben. Am Beispiel des Standort-Paars H1 werden die 23 % Gewässerfläche in Veddel von den 0 % am Standort Flughafen abgezogen. Dadurch ergeben sich 23 % Gewässerfläche.

Tabelle 12:
Differenz von Höhe und Flächenanteilen der Standortpaare. Die Differenz wird durch Subtraktion der Werte von Standort 1 von den Werten von Standort 2 erstellt.

Standort-Paar	Standort 1	Standort 2	Differenz der lokalen Bedingungen				
			Standort höhe [m]	Flächenanteile [%]			
				Wald/ Gehölz	Feld/ Wiese	Wohnen/ Gewerbe	Gewässer
H1	Veddel	Flughafen	-4	-2	-15	-8	23
B1	Bühl	Baden-Baden	-36	-35	18	8	0
B2	Baden-Baden	Bühlerhöhe	-604	-43	19	27	0
B3	Bühl	Bühlerhöhe	-640	-78	37	35	0
K1	Karlsruhe	Neuenbürg	-337	-54	19	25	2
K2	Wörth	Karlsruhe	-16	2	-6	-4	13
K3	Wörth	Neuenbürg	-353	-51	14	21	14
L1	Lindau	Lindenberg	-418	-2	-8	-14	22
L2	Lindau	Argenbühl	-284	-14	-23	10	22
L3	Lindenberg	Argenbühl	-134	12	15	-24	0

Anschließend wird der Zusammenhang zwischen der Differenz der Mittelwerte der einzelner Klimaelemente und der Differenz der Anteile der Flächennutzung analysiert.

Ermittlung der klimatischen Unterschiede der Standortpaare

Zur Ermittlung der klimatischen Unterschiede werden die Monatsmittelwerte der einzelnen Klimaelemente der Standortpaare aus Tabelle 11 herangezogen. Dazu werden zunächst die Differenzen der Monatsmittelwerte für die verschiedenen Klimaelemente Temperatur, relative Feuchte, absolute Feuchte, Global- und Diffusstrahlung, atmosphärische Gegenstrahlung und Windgeschwindigkeit berechnet. Wie zuvor werden die Werte von Standort 1 von den Werten von Standort 2 subtrahiert. Für jedes Standort-Paar werden die Differenzen der Monatsmittelwerte im Jahresverlauf geplottet (schwarze Punkte). Zusätzlich zu den gemessenen Differenzen wird vereinfacht jeweils eine Sinuskurve auf Basis der monatlichen Differenzen erstellt - diese ist als rote Kurve in den Bildern dargestellt. Als Extremwerte dieser Sinuskurven - entweder Maxima oder Minima - werden im Sommer der Mittelwert von Juni und Juli und im Winter der Mittelwert von Dezember und Januar herangezogen. Der Vorteil dieser vereinfachten Betrachtung ist die Glättung des Jahresverlaufs und die einfache Beschreibung des gesamten Jahres über zwei Parameter: Mittelwert (gestrichelte rote Linie) und Amplitude der Sinuskurve. Der Mittelwert der Sinuskurve ergibt sich aus dem Mittelwert und die Amplitude aus der halben Differenz der beiden Extremwerte. Die Auswertung ist exemplarisch für die Temperatur in Bild 74 dargestellt. Die Auswertung für die weiteren Klimaelemente befindet sich im Anhang (Bild 292 bis Bild 297).

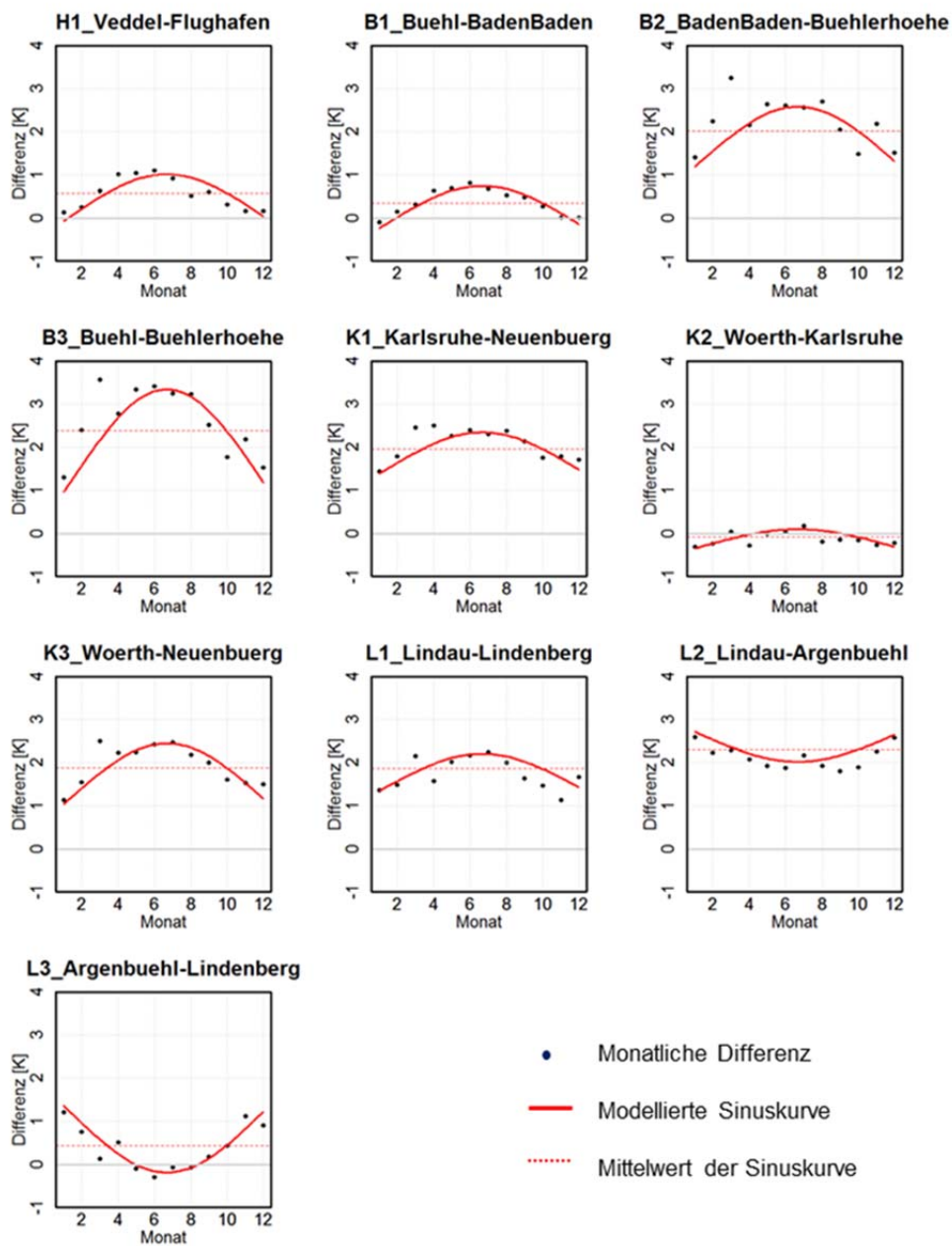


Bild 74:

Absolute Differenz der Monatsmittelwerte der Temperatur zwischen den untersuchten Standortpaaren (schwarze Punkte). Auf Basis dieser Punkte wird für jedes Standortpaar eine vereinfachte Sinuskurve für den Jahresverlauf der Abweichung modelliert (rote Kurve). Die Bilder für die anderen Klimaelemente sind im Anhang als Bild 292 bis Bild 297 aufgeführt.

Die Darstellungen zeigen, dass vor allem die Temperatur, die absolute Luftfeuchte sowie die Global-, Diffus- und Direktstrahlung auch an zwei nahe beieinander liegenden Standorten erkennbar unterschiedlich ausfallen. Ebenso

wird deutlich, dass die Abweichungen nicht konstant sondern im Jahresverlauf unterschiedlich ausfallen. Eine pauschale ganzjährige Korrektur um einen konstanten Wert, wie sie bei den meisten bisher verwendeten Korrekturmodellen eingesetzt werden, erscheint daher nicht ausreichend. Tendenziell nehmen die Differenzen von Temperatur, absoluter Luftfeuchte, Global- und Diffusstrahlung während der Sommermonate zu und in den Wintermonaten wieder ab. Für einige, wenige Standortpaare zeigt sich allerdings auch ein umgekehrter Zusammenhang mit kleineren Differenzen im Sommer als im Winter. Dies ist z.B. für die Windgeschwindigkeit und die Diffusstrahlung an einigen Standortpaaren erkennbar. Generell weniger stark ausgeprägt sind die jahreszeitlich bedingten Unterschiede für die atmosphärische Gegenstrahlung und die relative Luftfeuchte.

Für die Korrelationsanalyse werden die vereinfacht über die Sinuskurven abgebildeten Differenzen der Klimaelemente (Mittelwerte und Amplituden) zwischen den Stationen der verschiedenen Standortpaare ermittelt. Dazu werden wiederum die Werte von *Standort 2* von den Werten von *Standort 1* subtrahiert. Ziel ist dabei, einen belastbaren Zusammenhang zwischen den Verläufen der Sinuskurven und den jeweiligen lokalen Expositionen (Standorthöhen und Flächennutzung) herzustellen.

Tabelle 13:
Differenz der Mittelwerte der Sinuskurven für die untersuchten Standortpaare. Die Werte von Standort 2 werden von Standort 1 subtrahiert (Standortangaben vgl. Tabelle 11).

Standortpaar	Differenz der Mittelwerte der Klimaelemente						
	TA	HREL	X	ISGH	DIS	ILAH	WS
	[K]	[%]	[g/kg]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[m/s]
H1	0,57	2,39	0,37	1,23	-1,19	3,63	0,57
B1	0,37	-3,76	-0,16	2,76	-1,04	-16,15	1,35
B2	2,23	1,11	0,96	4,32	-0,98	22,36	-3,09
B3	2,61	-2,66	0,8	7,08	-2,02	6,21	-1,73
K1	2,08	-7,81	0,13	1,74	-0,18	22,48	0,44
K2	-0,13	2,47	0,17	-0,37	0,32	-5,36	0,02
K3	1,95	-5,34	0,3	1,37	0,14	17,12	0,45
L1	1,74	0,53	0,76	1,27	-2,11	4,72	-0,47
L2	2,14	-2,17	0,65	0,54	-1,8	13,79	-0,63
L3	0,39	-2,7	-0,12	-0,72	0,32	9,07	-0,16

Kürzel der Klimaelemente :

TA: Temperatur, HREL: Relative Feuchte, X: Absolute Feuchte, ISGH: Globalstrahlung, DIS: Diffusestrahlung, ILAH: atmosphärische Gegenstrahlung, WS: Windgeschwindigkeit

Tabelle 14:
Differenz der Amplituden der Sinuskurven für die untersuchten Standortpaare.

Die Werte von Standort 2 werden von Standort 1 subtrahiert (Standortangaben vgl. Tabelle 11).

Standortpaar	Differenz der Amplituden der Klimaelemente						
	TA	HREL	X	ISGH	DIS	ILAH	WS
	[K]	[%]	[g/kg]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[m/s]
H1	-0,97	-5,82	-0,24	-11,98	-7,82	-6,93	-0,34
B1	-0,91	-4,05	-0,21	-8,23	-5,9	-10,35	-0,88
B2	-1,84	-8,03	-0,91	-15,85	-8,93	-12,17	-1,44
B3	-2,26	-9,13	-0,76	-23,44	-13,36	-10,93	-0,93
K1	-1,06	-6,8	-0,46	-15,21	-4,63	-9,19	-0,52
K2	-0,48	-1,76	-0,34	-9,04	-3,94	-8,13	-0,35
K3	-1,37	-7,5	-0,44	-17,92	-4,61	-6,13	-0,59
L1	-1,11	-4,37	-0,81	-10,55	-8,36	-9,76	-0,57
L2	-0,78	-3,26	-0,56	-10,61	-9,4	-9,48	-0,66
L3	-1,51	-3,87	-0,41	-4,59	-1,86	-12,33	-0,45

Abkürzung der Klimaelemente:

TA: Temperatur, HREL: Relative Feuchte, X: Absolute Feuchte, ISGH: Globalstrahlung, DIS: Diffusestrahlung, ILAH: atmosphärische Gegenstrahlung, WS: Windgeschwindigkeit

Korrelationsanalyse

Um den Zusammenhang zwischen den Unterschieden der lokalen Exposition (Flächenanteile und Höhenlage) und den Unterschieden der klimatischen Verhältnisse quantitativ zu erfassen, wird eine Korrelationsanalyse nach Bravais-Pearson [32] durchgeführt. Als Ergebnis dieser Analyse wird der Korrelationskoeffizient r angegeben, der Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhangs von zwei Variablen angibt. [32]. Die Korrelationskoeffizienten können Werte zwischen -1 und +1 annehmen, wobei -1 für eine „vollständige“ negative Korrelation (eindeutiger, negativ-linearer Zusammenhang) und +1 eine „vollständige“ positive Korrelation (eindeutiger, positiv-linearer Zusammenhang) der beiden Variablen steht. Nimmt der Korrelationskoeffizient dagegen den Wert 0 an, bedeutet dies, dass zwischen den zwei Variablen keinerlei Zusammenhang besteht. Nach Fahrmeier [32] lassen sich die Korrelationen r in etwa wie folgt einordnen:

- „schwache Korrelation“ $|r| < 0,5$
- „mittlere Korrelation“ $0,5 \leq |r| < 0,8$
- „starke Korrelation“ $0,8 \leq |r|$

Im Folgenden wird eine Korrelation als ausreichend belastbar angesehen, wenn der Korrelationskoeffizient mindestens 0,8 beträgt.

Auf Grund der Literaturstudie in Kapitel 3.2.2 wären in etwa folgende Zusammenhänge zu erwarten:

- Sinkende Temperatur und sinkende absolute Feuchte bei steigender Höhe
- Steigende absolute Feuchte mit steigendem Anteil der Gewässerflächen
- Steigende Temperatur mit steigendem Anteil bebauter bzw. versiegelter Flächen (hier ohne Straßen)

Für die Korrelationsanalyse werden für die Variation der lokalen Exposition die Werte aus Tabelle 12 und für die Unterschiede im lokalen Klima die Werte aus Tabelle 13 und Tabelle 14 verwendet. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind nachfolgend in Tabelle 15 und Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 15:

Korrelationskoeffizient r zwischen den Differenzen der Mittelwerte der Klimaelemente und den Differenzen der Flächenanteile. Die Koeffizienten sind bei mittlerer Korrelation grau und bei starker Korrelation gelb hinterlegt.

Lokalbedingung		Korrelationskoeffizienten						
		Klimaelemente						
		TA	HREL	X	ISGH	DIS	ILAH	WS
Standorthöhe		-0,87	0,15	-0,74	-0,81	0,57	-0,65	0,77
Flächenanteil	Wald/Gehölz	-0,62	0,50	-0,24	-0,88	0,21	-0,32	0,26
	Feld	0,19	-0,43	-0,11	0,60	0,09	0,07	-0,25
	Wohn- / Gewerbegebiet	0,65	-0,38	0,35	0,84	-0,22	0,41	-0,38
	Gewässer	0,04	0,36	0,28	-0,33	-0,19	0,03	0,24

Abkürzung der Klimaelemente:

TA: Temperatur, HREL: Relative Feuchte, X: Absolute Feuchte, ISGH: Globalstrahlung, DIS: Diffusestrahlung, ILAH: atmosphärische Gegenstrahlung, WS: Windgeschwindigkeit

Tabelle 15 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den Mittelwerten der einzelnen Klimaelemente und den Höhen und Flächennutzungsanteilen der Standorte. Die Korrelationskoeffizienten zeigen entsprechend der o.g. Erwartung eine negative Korrelation zwischen der Standorthöhe und der Temperatur sowie der absoluten Feuchte. Allerdings ist diese nur bei der Temperatur mit Werten von -0,87 ausreichend stark ausgeprägt. Ebenfalls eine belastbare Korrelation ergibt sich zwischen der Standorthöhe und der Globalstrahlung ($r = -0,81$) - die mit der Windgeschwindigkeit bleibt mit $r = 0,77$ etwas geringer. Der Zusammenhang zwischen der Diffusstrahlung bzw. der atmosphärischen Gegenstrahlung von der Höhenlage bleibt jeweils deutlich geringer.

Im Gegensatz zur Standorthöhe zeigen die jeweiligen Flächenanteile nur eine schwache Korrelation mit den Klimaelementen. Bei der Globalstrahlung werden vor allem zu Wald/Gehölz und Wohn-/Gewerbegebiet Korrelationskoeffizienten $|r|$ größer als 0,8 erreicht, obwohl solche Zusammenhänge beim Vergleich mittels der Boxplot-Darstellung in Kapitel 3.4.1 kaum erkennbar waren. Das kann daran liegen, dass die Y-Achse des Boxplots der Globalstrahlung eine große Bandbreite von 0 W/m² in der Nacht bis zu ca. 1000 W/m² am Mittag aufweist.

Durch die Betrachtung der Globalstrahlung als Differenz der Monatsmittelwerte zweier Standorte wird der durch die Exposition bedingte Unterschied in der Korrelationsanalyse offensichtlich deutlicher. Dieses Ergebnis zeigt, dass auch für die Globalstrahlung eine entsprechende Anpassung in den neu zu entwickelnden Lokalklimamodellen sinnvoll ist. Die Flächenanteile der Wohn-/Gewerbegebiete zeigen mit der Temperatur nur eine schwache positive Korrelation ($r = 0,65$) – dies bestätigt in gewissem Umfang die häufig beschriebene städtische Erwärmung, die Korrelation bleibt aber schwächer als erwartet. Weiterhin zeigt der Flächenanteil von Wald/Gehölz eine schwache negative Korrelation von $r = -0,62$ mit der Temperatur, die durch die Verschattung der Bäume bzw. Sträucher und die ggf. etwas erhöhte Verdunstung bedingt sein könnte. Die zuvor formulierte Erwartung, dass die absolute Feuchte mit einem zunehmenden Anteil an Gewässerflächen ansteigt, wird durch einen Korrelationskoeffizienten von nur 0,28 allerdings gar nicht wiedergespiegelt.

Tabelle 16 zeigt die Korrelation zwischen den Amplituden der einzelnen Klimaelemente und den der Höhen und Flächenanteilen der Standorte. Die Amplitude entspricht, wie bereits beschrieben, der halben Differenz der Extremwerte der Sinuskurven. Höhere absolute Werte für die Korrelationskoeffizienten ($|r|$) weisen auf eine größere Amplitude – also eine stärkere jahreszeitlich bedingte Variation der Klimaelemente bei größeren Höhen- oder Flächenanteilsdifferenzen hin. Die Korrelation der Amplitude mit der Standorthöhe beträgt bei der absoluten Feuchte -0,59, bei der Globalstrahlung -0,79, bei der Diffusstrahlung 0,58 und bei der Windgeschwindigkeit -0,55 – die Korrelationen bleiben also eher schwach mit Werten unter 0,8. Im Gegensatz zur Korrelation mit dem Mittelwert der Sinuskurven weist die Standorthöhe mit der Temperatur und der absoluten Feuchte praktisch keinen relevanten Zusammenhang auf. Die Globalstrahlung zeigt auch bezüglich der Amplituden einen starken Zusammenhang mit der Standorthöhe sowie mit den Flächennutzungen Wald/Gehölz und Wohn-/Gewerbegebiet. Eine Korrelation zu Feld/Wiesefläche ist noch vorhanden mit Gewässer dagegen praktisch nicht. Die Amplituden von Temperatur und relativer Feuchte zeigen ebenfalls einen Zusammenhang mit den Flächenanteilen von Wald/Gehölz sowie Wohn-/Gewerbegebiet – allerdings wird nur bei der Amplitude der relativen Feuchte und dem Flächenanteil von Wald/Gehölz eine Korrelation von 0,8 erreicht. Die Tendenz ist bei Temperatur und relativer Feuchte jeweils gegenläufig: bei einem größeren Flächenanteil Wald/Gehölz fällt die jährliche Amplitude der Temperatur und es steigt die der relativen Feuchte, bei einem größeren Flächenanteil Wohn-/Gewerbegebiet steigt die Temperatur und die relative Feuchte sinkt.

Tabelle 16:
Korrelationskoeffizienten (r) zwischen den Differenzen der *Amplituden* der Klimaelemente und den Differenzen der Flächenanteile. Die Koeffizienten sind bei mittlerer Korrelation grau und bei starker Korrelation gelb hinterlegt.

Lokalbedingung	Korrelationskoeffizienten						
	Klimaelemente						
	TA	HREL	X	ISGH	DIS	ILAH	WS

Standorthöhe		-0,48	0,46	-0,59	-0,79	0,58	-0,38	-0,55
Flächen- anteil	Wald/Gehölz	-0,75	0,80	-0,12	-0,95	0,40	-0,45	-0,05
	Feld	0,46	-0,43	-0,15	0,62	-0,24	0,35	-0,06
	Wohn- / Gewerbegebiet	0,69	-0,73	0,22	0,90	-0,39	0,42	0,18
	Gewässer	-0,13	0,08	0,29	-0,31	0,13	-0,17	0,11

Abkürzung der Klimaelemente:

TA: Temperatur, HREL: Relative Feuchte, X: Absolute Feuchte, ISGH: Globalstrahlung, DIS: Diffusstrahlung, ILAH: atmosphärische Gegenstrahlung, WS: Windgeschwindigkeit

Insgesamt ergibt die Korrelationsanalyse schwächere Zusammenhänge zwischen den Flächennutzungen und den Mittelwerten und Amplituden der Klimaelemente als erwartet. Nur bei der Globalstrahlung werden Werte über 0,8 und auch nur bezüglich zwei Flächennutzungen ermittelt. Bei Temperatur und relativer Feuchte sind noch schwache Korrelationen mit Werten zwischen 0,6 und 0,8 feststellbar. Bei allen anderen Klimaelementen bleibt die Korrelation sogar unter 0,5 – also vernachlässigbar gering. Die Zusammenhänge scheinen durch die gewählte Vorgehensweise also zumindest bei den bisher untersuchten Standorten nur sehr bedingt erfassbar zu sein.

Dies könnte an einer Überlagerung verschiedener Faktoren wie z.B. Stadtlage in Kombination mit Berg und Gewässer liegen. Außerdem weist die Höhenlage Korrelationen mit fast allen Klimaelementen auf und dürfte daher in allen Fällen die Auswirkungen der lokalen Exposition überlagern. Auch die Vereinfachung der jahreszeitlichen Verläufe in Form von Sinuskurven könnte mit zu einer Verschlechterung der Korrelation beitragen, da diese in einigen Fällen die tatsächlich ermittelten Werte nur mäßig gut wiedergeben. Eine Korrelationsanalyse mit jeweils 12 Differenzwerten wäre allerdings mit einem sehr hohen Aufwand verbunden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Korrelationsanalyse in der vorgestellten Form für den komplexen Anwendungsbereich mit verschiedenen Fehlerquellen wie z.B. Multi-Kollinearität sowie der breiten geografische Verteilung der Standorte von der Nordseeküste bis ins Voralpenland nicht gut geeignet zu sein scheint. Diese Vorgehensweise wird daher nicht weiter verfolgt. Für die weitere Vorgehensweise konnten aber die folgenden Erkenntnisse für die weitere Modellierung gewonnen werden:

- Zunächst sollten Höhenkorrekturfaktoren für die einzelnen Klimaelemente ermittelt werden, da dieser Einfluss in vielen Fällen dominant über die lokale Exposition zu sein scheint.
- Erst nach der Höhenkorrektur sollte der Einfluss der lokalen Exposition ermittelt werden.
- Die Zahl der untersuchten Messstandorte sollte erhöht werden, um klarere Tendenzen zu erhalten, die bei wenigen Standorten durch Kombinationen verschiedener Lokalexpositionen überlagert werden könnten.

- Die Lokalklimakorrekturfaktoren sollten zunächst innerhalb einer Region erstellt werden, um makroklimatische Einflüsse möglichst auszuschließen. In einem weiteren Schritt kann die Übertragbarkeit auf andere Regionen mit innerhalb der Region ähnlichem Makroklima überprüft werden.
- Anstelle von Sinuskurven sollten eher monatliche Lokalkorrekturfunktionen definiert werden.

3.5 Erstellung der Lokalklimamodelle

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Literatur und den Voruntersuchungen werden zunächst Höhenkorrekturfaktoren für die Klimaelemente ermittelt, die deutlich höhenabhängig sind. Danach werden zusätzliche Lokalanpassungsmodelle für die einzelne Klimaelemente und verschiedene Lagekategorien entwickelt. Dies erfolgt anhand von Messdaten von insgesamt 74 Standorten in ganz Deutschland. Der Messzeitraum der Klimadaten umfasst fünf Jahre von 01.01.2006 bis zum 31.12.2010. Die Klimadatensätze stammen aus derselben Datenquelle wie die für die Feuchtereferenzjahre und werden auch in der gleichen Weise aufbereitet. Details dazu sind in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Die betrachteten 74 Standorte sind im Anhang in Tabelle 62 aufgelistet.

3.5.1 Lagekategorien

Entsprechend den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche erscheint neben „neutral“ eine Einteilung der Standorte in vier verschiedene Lagekategorien sinnvoll, nämlich die Lage

- Auf einem Berg
- Innerhalb einer Stadt
- An einem (größeren) Gewässer
- In einer Tallage

Für diese vier Kategorien werden Lokalanpassungsmodelle entwickelt. Alle Standorte die nicht zu einer der vier genannten Kategorien gehören, werden der Gruppe der neutralen Standorte zugeordnet. Zusätzliche Informationen zur Unterscheidung innerhalb einer Kategorie wie z.B. an der Luv- oder Leeseite eines Bergs oder auf dessen Gipfel oder auch die Lage am Meer, am See oder auf einer Insel werden während des Entwicklungsprozesses mitgeführt, um ggf. vorhandene Verfeinerungsbedarf zu erkennen. Da die quantitative Beschreibung der Flächenanteile um die Klimastation, so wie sie bei den Voruntersuchungen in Kapitel 3.4 durchgeführt wurde, keine eindeutigen Zusammenhänge erkennen ließ, und eine quantitative Einteilung auch bei der späteren Anwendung aufwändig wäre, erfolgt die Einteilung der 74 Standorte in die verschiedenen Lagekategorien anhand einer qualitativen Beurteilung der Umgebung mithilfe von Karten und Satellitenbildern. In Tabelle 17 sind die fünf Lagekategorien (inkl. Neutral) zusammengefasst und für die Einteilung definiert.

Tabelle 17:
Lagekategorien.

Lagekategorie	Definition
Neutral	Ohne benachbarte Gewässer, Berge oder große Städte. Keine oder nur geringe Höhenunterschiede in der Umgebung.
Berg	Höhere Lagen im Mittelgebirge bzw. im Alpenvorland oder erhöht auf einem Hügel (bei niedrigerer Umgebung).
Tal	Tiefere Lage im Vergleich zur Umgebung.
Stadt	In einer (größeren) Stadt mit dichter Bebauung in der Umgebung.
Gewässer	An einem (größeren) Gewässer wie See oder Meer. i.d.R. nicht an einem Fluss.

Die 74 Standorte sind im Anhang zusammen mit deren Höhe über NN und den zugeordneten Lagekategorien in Tabelle 62 dargestellt. Manche Standorte wurden dabei auch mehreren Kategorien zugeordnet.

3.5.2 Höhenkorrektur

Die Höhenabhängigkeit des Jahresmittelwerts einzelner Klimaelemente kann aufgrund des einfachen Zusammenhangs mit Hilfe einer Korrelationsanalyse nach Bravais-Pearson [32] überprüft werden. Beim Ansatz des DWD wird zwar zusätzlich die zeitliche und örtliche Abweichung der Korrekturfaktoren (Jahresverlauf und verschiedene Regionen) berücksichtigt – diese kann allerdings je nach Messzeitraum stärker variieren, was z.B. anhand der recht unterschiedlichen Korrekturkurven für die Datensätze von 2004 und 2011 ersichtlich wird. Eine stichprobenartige Überprüfung hat auch gezeigt, dass die DWD-Korrekturkurven für den im Rahmen dieses Projekts verwendeten Messzeitraum nicht gut geeignet sind. Da die hier erstellten Lokalklimamodelle möglichst allgemein sowie bezüglich der zeitlichen Messdatenbasis und regional unabhängig bleiben soll, wird ein mittlerer Korrekturwert verwendet.

Dazu werden zunächst die Mittelwerte von Temperatur, relativer Feuchte, absoluter Feuchte, Global- und Diffusstrahlung, atmosphärischer Gegenstrahlung, Windgeschwindigkeit sowie die mittlere jährliche Niederschlagsmenge und die Niederschlagsdauer aus den Fünfjahres-Messdatensätzen aller Standorte ermittelt. Durch die Korrelationsanalyse werden die Korrelationskoeffizienten zwischen den Mittelwerten der einzelnen Klimaelemente und der Standorthöhe ermittelt. In Bild 75 sind die 5-Jahres-Mittelwerte der Klimaelemente für die untersuchten Messstationen über deren Standorthöhe aufgetragen. Darüber ist der jeweils ermittelte Korrelationskoeffizient zwischen dem Klimaelement und Standorthöhe angegeben.

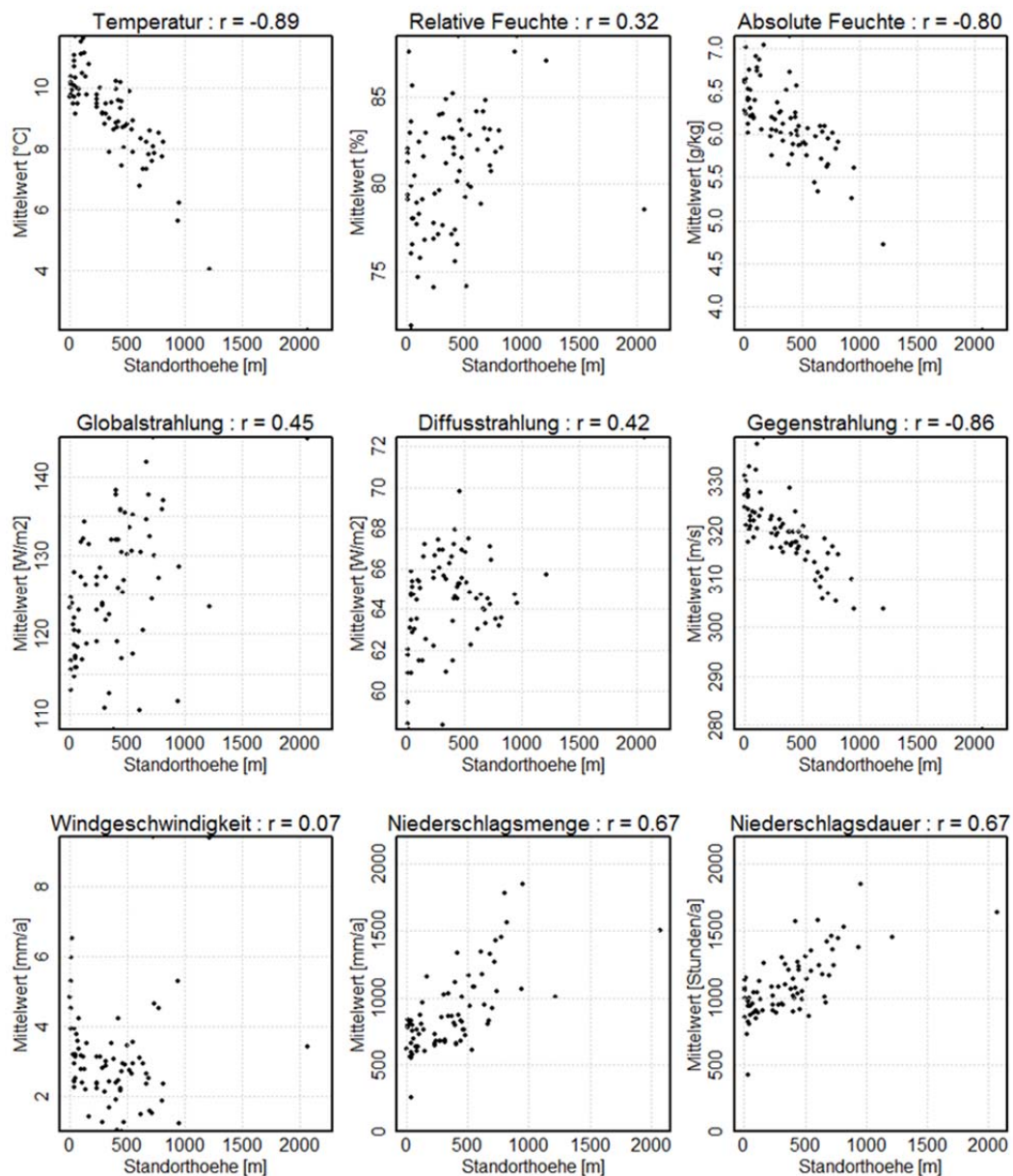


Bild 75:

Mittelwerte der Klimatelemente aller 74 Standorte aufgetragen über der Stationshöhe. Über den einzelnen Diagrammen ist der Korrelationskoeffizient zwischen dem jeweiligen Klimatelemente der Stationshöhe angegeben.

Für die Temperatur, die absolute Feuchte und die atmosphärische Gegenstrahlung ergeben sich ausreichend starke Korrelation mit Koeffizienten von $-0,89$, $-0,80$ und $-0,86$. Die negativen Koeffizienten bedeuten dabei, dass die Werte der Klimatelemente mit steigender Stationshöhe abnehmen. Eine Höhenabhängigkeit der Temperatur und der absolute Feuchte ist in der Literatur bereits mehrfach beschrieben (vgl. Kapitel 3.2.2). Es erscheint aber auch plausibel, dass sich die atmosphärische Gegenstrahlung mit der zunehmenden Höhe verringert. Die Gegenstrahlung wird von den Gasen, Aerosolen und Partikeln in der Atmosphäre emittiert. Je dünner die über dem Standorte liegende

Atmosphäre ist, desto weniger emittierende Teilchen stehen zur Verfügung. Nach [53] nimmt mit zunehmender Höhe auch die Anzahl der Wassermoleküle ab.

Die relative Feuchte, die Globalstrahlung, die Diffusstrahlung sowie die Windgeschwindigkeit weisen dagegen nur schwache Korrelationen mit Koeffizienten $< 0,5$ mit der Standorthöhe auf. Ein Grund für die geringe Korrelation zwischen Standorthöhe und Global- und Diffusstrahlung (Koeffizienten 0,45 und 0,42), könnte der starke Einfluss der spezifischen Neigung und Ausrichtung einer Hangfläche auf die eintreffende Strahlungsmenge sein. Obwohl die Temperatur und die absolute Feuchte jeweils einen starken Zusammenhang mit den Standorthöhen aufweisen, besteht für die aus diesen Größen abgeleitete relative Feuchte praktisch kein Zusammenhang mit der Stationshöhe. Der Korrelationskoeffizient liegt nur bei $r = 0,32$. Daher sollte auch die Lokalklimaanpassung der Luftfeuchte nicht anhand der relativen sondern anhand der absoluten Feuchte erfolgen. Die relative Feuchte wird dann wieder aus den beiden korrigierten Werten der Temperatur und der absoluten Feuchte berechnet.

Die Niederschlagsmengen und -dauern zeigen nur schwache Korrelationen mit den Standorthöhen (r jeweils 0,67). In Kapitel 3.2.2 wurde erwähnt, dass Pilger [13] für die Steiermark einen recht eindeutigen Zusammenhang zwischen Höhe und Niederschlagsmenge ermitteln konnte. Andere Quellen wie Schirmer [55] weisen aber darauf hin, dass die Höhenzuschläge für die Niederschlagsmenge bei verschiedenen topographischen Bedingungen deutlich voneinander abweichen können. Daher wird auch für die Niederschlagsmenge kein Korrekturan-satz entwickelt. Die alternativ gewählte Berücksichtigung dieses u.U. sehr maßgeblichen Einflusses wird in Kapitel 3.5.3 genauer beschrieben.

Dementsprechend im Folgenden nur für die Temperatur, die absolute Feuchte und die atmosphärische Gegenstrahlung Höhenkorrekturfaktoren anhand von Regressionsanalysen zwischen den Klimagrößen und den Standorthöhen ermittelt.

Höhenkorrektur für die Temperatur

In Bild 76 sind die Fünf-Jahres-Mittelwerte der Temperatur der 74 Standorte in Abhängigkeit von deren Standorthöhen dargestellt. Die Steigung der durch lineare Regression ermittelten und ebenfalls eingezeichneten Geraden entspricht dem Höhenkorrekturfaktor der Temperatur. Dieser liegt bei $-0,0041$ K/m.

Da für langjährige Temperaturmessungen viele Datensätze zur Verfügung stehen, wird dieser empirisch ermittelte Korrekturfaktor nochmals mit einer breiten Datenbasis überprüft. Die hierfür verwendeten Daten stammen von der Website des DWD [68]. Dort stehen Höhenangaben der Stationen sowie 30-Jahres-Mittelwerte der Temperatur von 1981 bis 2010 für 264 Klimamessstationen in Deutschland zur Verfügung.

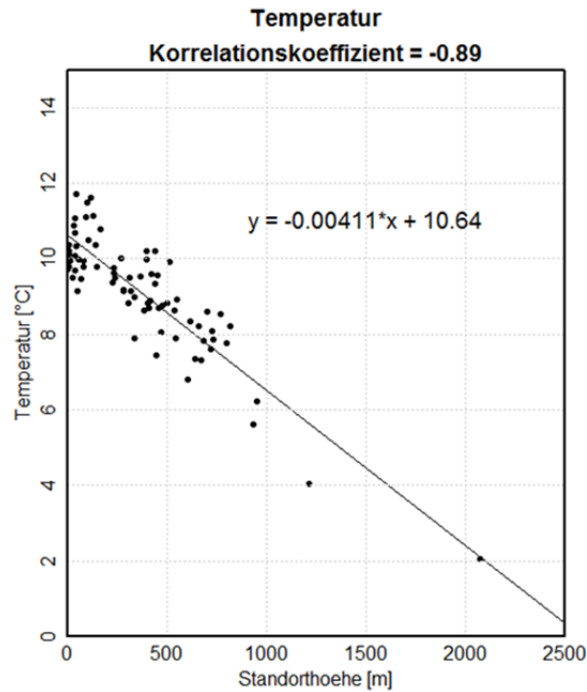


Bild 76:

Höhenabhängigkeit der Temperatur: Fünf-Jahres-Mittelwerte der Temperatur der 74 Klimastationen in Abhängigkeit von der Standorthöhe. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,89. Die Regressionsgrade weist eine Steigung von -0,0041 K/m auf.

Durch die Regressionsanalyse dieser Daten ergibt sich ein Höhenkorrekturfaktor von -0,0039 K/m. Werden nur die bezüglich der Stationshöhe besonders stark variierenden Klimastationen im Süden Deutschlands (geografische Breite südlich 51° N) ausgewertet, bleiben 151 Stationen übrig und der Korrekturfaktor beträgt hier -0,0051 K/m. In der Literatur (vgl. Kapitel 3.2.2) variieren die Höhenkorrekturfaktoren für die Temperatur im Bereich zwischen 0 und -0,01 K/m [53]. Der anhand der 74 verfügbaren Klimadatensätze ermittelte Korrekturwert liegt also sowohl im Bereich der Literaturangaben als auch ziemlich nahe an dem anhand der umfangreicheren Auswertung der DWD-Daten ermittelten Werte. Da zudem die Höhenkorrektur der absoluten Feuchte und der atmosphärischen Gegenstrahlung, mangels anderer Daten, ausschließlich anhand der 74 Meteomedia-Datensätze ermittelt werden können, wird auch die Temperaturkorrektur auf diese Daten bezogen. Der Korrekturfaktor bleibt somit bei einem Wert von -0,0041 K/m.

Höhenkorrektur für die absolute Feuchte

In Bild 77 sind die Fünf-Jahres-Mittelwerte der absoluten Feuchte der untersuchten Standorten über der Stationshöhe aufgetragen. Aus der Regressionsanalyse wird ein Höhenkorrekturfaktor für die absolute Feuchte von -0,0012 g/(kg·m) ermittelt. Auch dieser Korrekturfaktor erscheint im Vergleich mit den in der Literatur in Kapitel 3.2.2 genannten Werten plausibel –

weitere Informationen zur langjährigen Messwerten stehen hier für eine weitere Überprüfung leider nicht zur Verfügung. Somit wird der Wert von $-0,0012 \text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ für die Höhenkorrektur der absoluten Feuchte im Folgenden so verwendet. Da sich die Höhenkorrektur der aus Temperatur und relativer Feuchte berechneten absoluten Feuchte und die die Höhenkorrektur der Temperatur selber gegenseitig beeinflussen, ergeben sich für die relative Feuchte nach den beiden Korrekturen wieder recht ähnliche Werte wie am Referenzstandort. Alternativ wäre auch möglich gewesen, die relative Feuchte unkorrigiert vom Referenzort zu übernehmen, woraus sich bei der geänderten Temperatur eine entsprechend andere absolute Feuchte ergeben würde. Der Ansatz mit der Höhenkorrektur der absoluten Feuchte erzielte aber leicht bessere Übereinstimmung mit den Messwerten. Da auch die spätere Lokalanpassung anhand der absoluten Feuchte erfolgt, wird diese Korrektur ausgewählt.

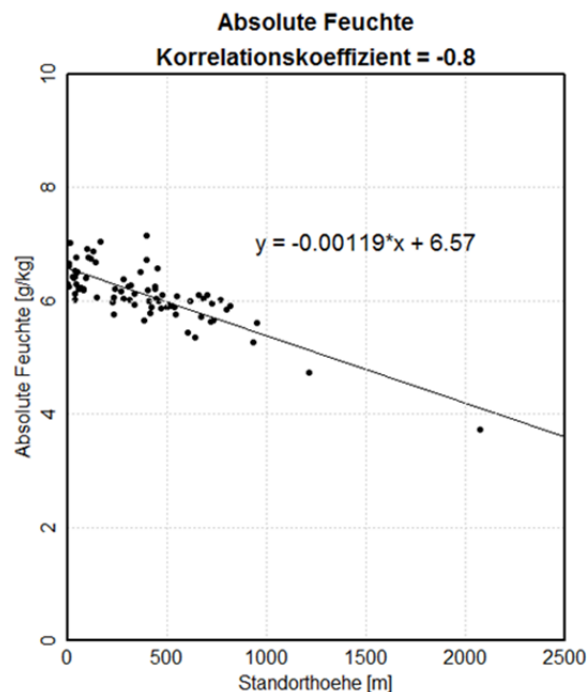


Bild 77:

Höhenabhängigkeit der absoluten Feuchte: Fünf-Jahres-Mittelwerte der absoluten Feuchte der 74 Klimastationen in Abhängigkeit von der Standorthöhe. Der Korrelationskoeffizient beträgt $-0,80$. Die Regressionsgrade weist eine Steigung von $-0,0019 \text{ (g/kg)/m}$ auf.

Höhenkorrektur der atmosphärischen Gegenstrahlung

In Bild 78 sind die Fünf-Jahres-Mittelwerte der atmosphärischen Gegenstrahlung der untersuchten 74 Standorte in Abhängigkeit von der Standorthöhe aufgetragen. Aus der Regressionsanalyse wird ein Höhenkorrekturfaktor von $-0,0213 \text{ (W/m}^2\text{)/m}$ ermittelt. Im Unterschied zur Temperatur und zur abso-

luten Feuchte konnte in der Literatur kein Referenzwert für die Höhenkorrektur der Gegenstrahlung gefunden werden. Für die Lokalanpassungsmodelle wird daher der hier empirisch ermittelte Wert von $-0,0213 \text{ (W/m}^2\text{)/m}$ verwendet.

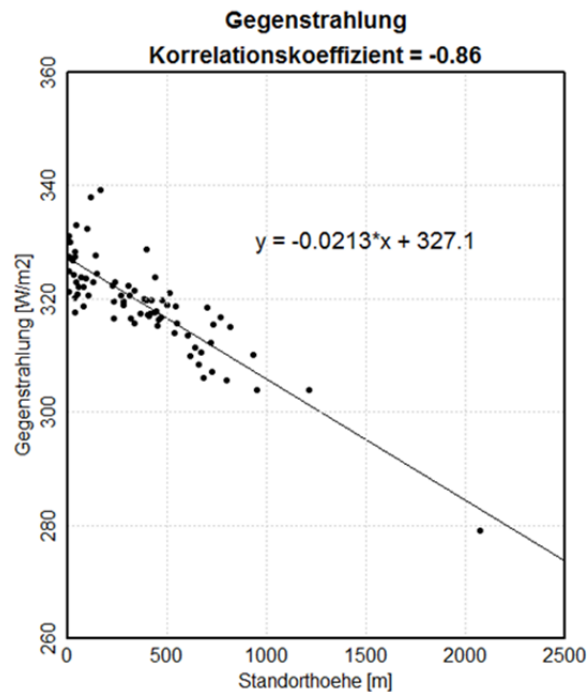


Bild 78:
Höhenabhängigkeit der atmosphärischen Gegenstrahlung: Fünf-Jahres-Mittelwerte der atmosphärischen Gegenstrahlung der 74 Klimastationen in Abhängigkeit von der Standorthöhe. Der Korrelationskoeffizient beträgt $-0,86$. Die Regressionsgrade weist eine Steigung von $-0,0213 \text{ (W/m}^2\text{)/m}$ auf.

3.5.3 Anpassungsmethode von Wind und Regen

Die Literaturrecherche in Kapitel 3.2 hat gezeigt, dass Windgeschwindigkeit und -richtung nur teilweise von der lokalen Exposition abhängen. So ist zum Beispiel die Tallage an sich zwar von Bedeutung, einen größeren Einfluss kann aber die Orientierung des Tals haben. Von noch größerer Bedeutung ist die Bebauungssituation oder andere benachbarte Objekte, die den Wind umlenken, behindern oder auch verstärken. Auch die Niederschlagsmenge ist nur wenig von den unter Kapitel 3.5.1 definierten Kategorien abhängig. Hier spielt vor allem die Makro-Topographie eine Rolle – so ist der Niederschlag in gleicher Höhe auf einem Berg oder in einer Tallage ganz anders, wenn sich die Position in Wetterrichtung vor oder hinter höheren Bergen befindet – die Luftmassen also noch steigen oder schon abfallen. Da diese Klimaelemente also entweder zusätzlich oder auch ausschließlich von Faktoren abhängen, die in den verwendeten Kategorien nicht berücksichtigt werden, ist eine andere Berücksichtigung erforderlich als bei den übrigen Klimaelementen.

Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit wird prinzipiell natürlich schon durch die gewählten Kategorien beeinflusst. Dies gilt insbesondere für die eher windgeschützte Lage in einer Stadt oder die exponierte Lage auf einem Berg. Allerdings gibt es hier eben auch häufig Ausnahmen von der Regel, wie z.B. ein Gebäude das am Ende einer Straßenflucht sogar einer im Vergleich zum Umland höheren Windgeschwindigkeit ausgesetzt ist (vgl. Kapitel 3.2.2) oder ein Gebäude, das zwar auf einem Berg, aber auf der windabgewandten Seite besonders geschützt ist. Wald oder Bebauung haben also eine mindestens ebenso große Bedeutung wie die genannten Kategorien.

Aus diesem Grund wird für die Lokalklimamodelle jeweils die Bandbreite der Windgeschwindigkeit für die verschiedenen Lagekategorien ermittelt, die bei der Anpassung verwendet werden kann. Die Entscheidung, ob ein spezifisches Gebäude innerhalb dieser Bandbreite eher am oberen oder am unteren Rand einzuordnen ist, kann nicht allgemein getroffen werden, sondern muss durch den Planer unter Berücksichtigung der Verhältnisse vor Ort eingeschätzt werden.

Um die Bandbreite der Windgeschwindigkeit zu bestimmen, werden zunächst die Fünf-Jahres-Mittelwerte der 74 Standorte ermittelt. Die Standorte werden dabei entsprechend ihren Lagekategorien gruppiert. Bild 79 zeigt auf der X-Achse die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und auf der Y-Achse den Unterschied zwischen maximalem und minimalem Monatsmittelwert. Die einzelnen Standorte werden durch ein Kürzel aus den jeweils ersten drei Buchstaben des Stationsnamens (vgl. Tabelle 62) repräsentiert und farblich entsprechend der jeweiligen Lagekategorie gekennzeichnet. Die Kategorie Gewässer ist bei dieser Auswertung zusätzlich in See und Küste/Insel sowie die Kategorie Berg in Berg und Gipfel unterteilt, da bezüglich der Windgeschwindigkeit hier deutlich größere Unterschiede auftreten als bei allen anderen Klimaelementen. Die Position des Kürzels im Diagramm definiert Mittelwert und jährliche Schwankungsbreite der Windgeschwindigkeit.

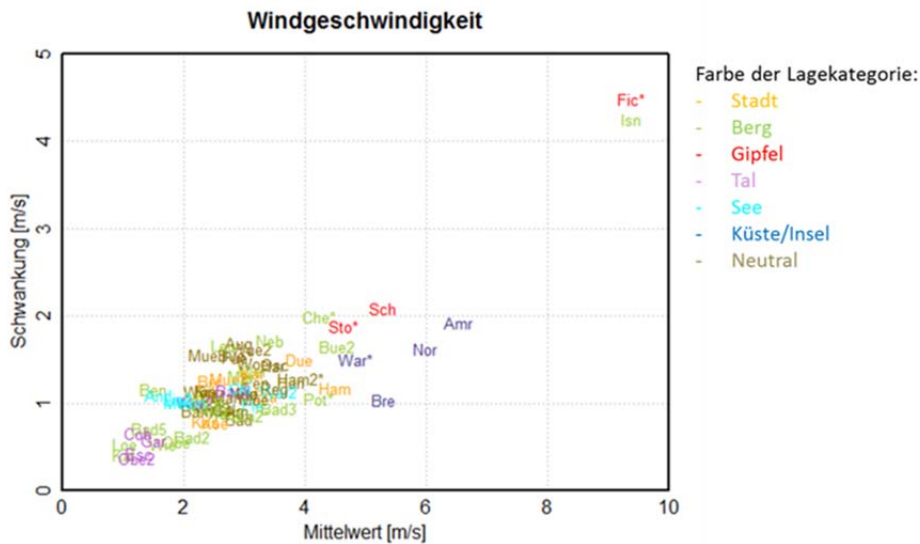


Bild 79:
 Mittelwert (X-Achse) und jährliche Schwankungsbreite (Y-Achse) der Windgeschwindigkeit für die betrachteten 74 Standorte. Die Werte basieren auf Fünf-Jahres-Datensätzen von 2006 – 2010. Die vollständigen Namen der Standorte sind in Tabelle 62 aufgeführt.

Die so festgestellten Mittelwerte und Bandbreiten werden zusätzlich anhand der Windgeschwindigkeitskarte des DWD (siehe Bild 80) überprüft. Auf dieser Karte sind die Jahresmittelwert von 1981 bis 2000 für ganz Deutschland durch eine Farbskala dargestellt [69].

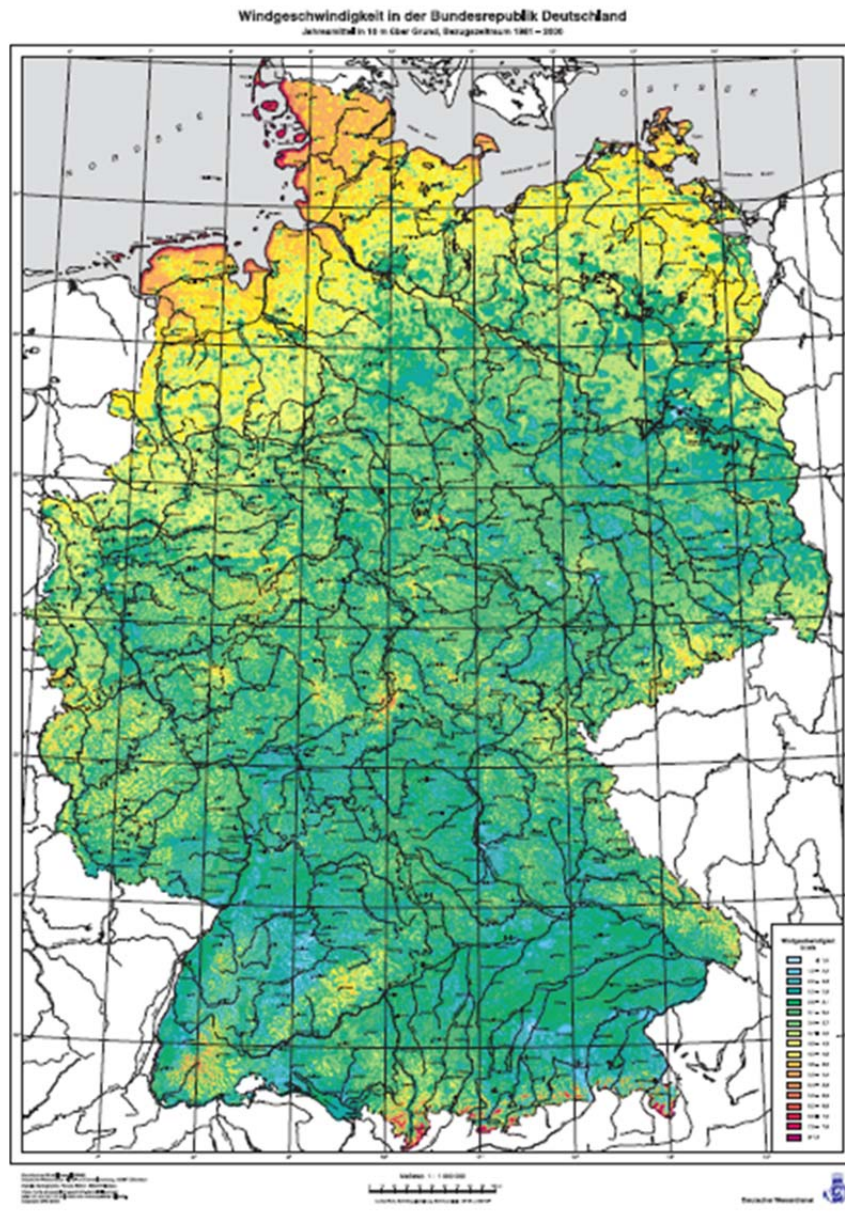


Bild 80:
 Lokale Windgeschwindigkeit (Jahresmittel) in der Bundesrepublik Deutschland
 (Quelle: Deutscher Wetterdienst [69]).

Aus der eigenen Analyse der 74 Standorte und der zusätzlichen Auswertung der Windkarte werden für die hier untersuchten Lagekategorien die in Tabelle 18 angegebenen Bandbreiten für die mittlere Windgeschwindigkeit ermittelt.

Tabelle 18:
 Bandbreite der Windgeschwindigkeit bei den verschiedenen (bei Berg und Gewässer weiter verfeinerten) Lagekategorien.

Lagekategorie	Windgeschwindigkeit [m/s]	
	Minimal	Maximal
Neutral	2	4
Stadt	2	5

Berg (Berg)	1	5
Berg (Gipfel)	4	10
Tal	1	4
Gewässer (See)	2	4
Gewässer (Küste, Insel)	4	7

Um die Windgeschwindigkeit auf Basis des Referenzklimadatensatzes an den Zielort anzupassen wird dementsprechend die mittlere Windgeschwindigkeit am Zielort gewählt und die Einzelwerte aus der Klimadatei des Referenzorts mit dem Verhältnis der beiden Windgeschwindigkeiten (Zielort/Referenzort) multipliziert.

Windrichtung

Die Windrichtung lässt sich nicht nach Lagekategorien modifizieren (vgl. Kapitel 3.2.2). Die entscheidende Rolle für die Windrichtung spielt vor allem die Umgebung des jeweiligen Standorts wie Orientierung der Topographie, benachbarte Bebauung oder große Bäume bzw. Wald. Deshalb wird die Windrichtung in den Lokalklimamodellen in der Regel nicht automatisch angepasst. Es erscheint aber sinnvoll, die Möglichkeit einzuräumen, die Windrichtung im Vergleich zum Referenzort bei Kenntnis der Hauptwindrichtung am Zielort verschieben zu können. Durch diese Anpassung wird die komplette Windrichtungsverteilung entsprechend gedreht – die Windgeschwindigkeiten bleiben davon jedoch unverändert. Ein möglicher Anwendungsfall sind Tallagen in denen die Hauptwindrichtung der Orientierung der Talsohle entspricht. Das ggf. in Querichtung der Talsohle die Windgeschwindigkeiten reduziert, oder in Talrichtung erhöht sind, kann durch die Anpassung nicht erfasst werden. Weitere Infos zu dieser Anpassungsmöglichkeit werden in Kapitel 3.7 beschrieben.

Regen

Wie bereits bei der Untersuchung der Höhenabhängigkeit der Niederschlagsmenge in Kapitel 3.5.1 erwähnt, werden für dieses Klimaelement auf Grund der zur geringen Korrelationen weder Korrekturfaktoren für die Höhe noch für die Lagekategorien ermittelt. Die Niederschlagsmengen hängen von weiteren Faktoren ab, die im Rahmen der hier erstellten Modelle nicht sinnvoll erfasst werden können. Eine einfache und vermutlich genauere Alternative bietet die Niederschlagskarte des DWD (Bild 81). Diese enthält die langjährige mittlere Niederschlagsmengen-Verteilung innerhalb Deutschlands für den Zeitraum von 1961 bis 1990. Dieser Zeitraum entspricht zwar nicht der Datenbasis der Hygrothermischen Referenzjahre HRY, da aber nur die relative Regenmenge zwischen Referenz- und Zielort herangezogen wird, erscheint dies vertretbar. Die Daten der Karte wurden mittels eines statistischen Verfahrens von dem Mittelwerte der verfügbaren Messstationen auf eine Gitterauflösung mit einem 1-km-Raster übertragen. Damit wird eine flächige Abdeckung ganz Deutschlands gewährleistet.

Für die Übertragung wird das Verhältnis der Jahresniederschlagsmenge am Zielort und am Referenzort gebildet. Die stündlichen Werte werden dann mit dem resultierenden (über das Jahr konstanten) Faktor multipliziert. Regendauer und zeitliche Verteilung bleiben darüber hinaus unberührt. Bei der Wahl der Regenmenge am Zielort sollte im Zweifel die nächsthöhere Menge gewählt werden, um bei der Bemessung auf der sicheren Seite zu liegen.

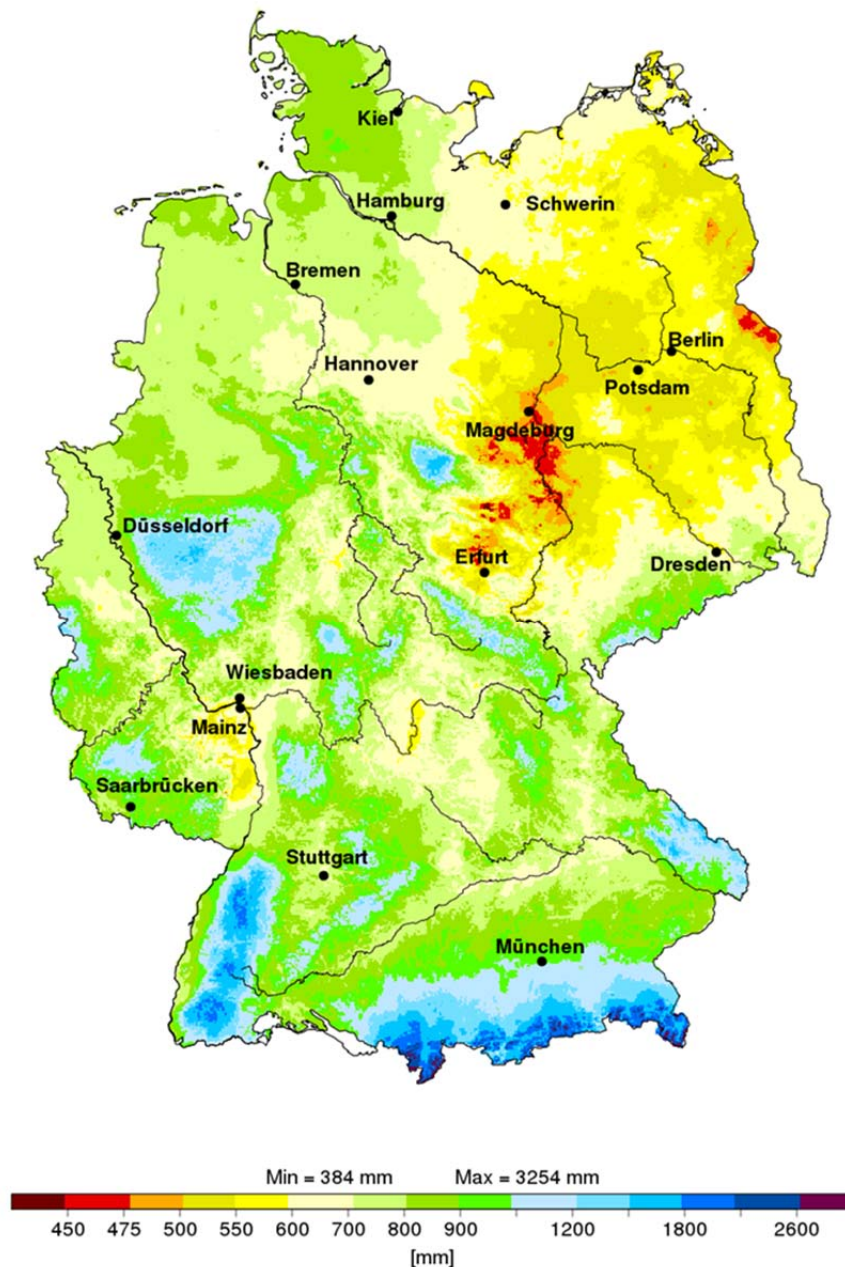


Bild 81:
Jahresniederschlagskarte mit der örtlichen Verteilung der mittleren Jahressumme des Zeitraums von 1961 bis 1990 (Quelle: Deutscher Wetterdienst [70]).

Bei hygrothermischen Bauteilsimulationen mit stärker saugfähigen Oberflächenmaterialien ist nicht nur die absolute Regenmenge als Jahressumme maßgeblich für den Feuchtegehalt der Konstruktion, sondern auch deren zeitliche Verteilung [71]. Bei der vorgeschlagenen Vorgehensweise wird jedoch die Anzahl der Stunden mit Niederschlag nicht verändert. Es wird lediglich die Niederschlagsmenge entsprechend der mittleren Jahressummen korrigiert. Wenn es am Referenzort zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht regnet, kann dementsprechend auch am Zielort kein Niederschlag erzeugt werden.

Eine Änderung der Regendauern würde allerdings einen zu tiefen Eingriff in die Konsistenz des Referenzklimastandorts bedeuten. Außerdem wären hier noch umfangreichere Untersuchungen erforderlich, die auch die gegenseitige Beeinflussung der Klimaelemente genauer berücksichtigen. So ist z.B. davon auszugehen, dass bei Niederschlag in vielen Fällen die relative Luftfeuchte steigt, während die Temperatur aufgrund der Verdunstungskühlung sinkt. Dies ist aber abhängig von der Größe der Regentropfen, der Temperaturdifferenz zwischen Tropfen und Umgebung und der vorhandenen relativen Luftfeuchte. Da die Informationen zu Regentemperatur und Tropfengröße bei Klimamessungen i.d.R. nicht erfasst werden, ist eine Berücksichtigung nur pauschal möglich. Eindeutiger ist dagegen, dass sich wegen des höheren Bedeckungsgrads die Direktstrahlung verringert und die langwellige Gegenstrahlung erhöht.

3.5.4 Lokalklimakorrekturfunktionen für die übrigen Klimaelemente

Für die verbleibenden Klimaelemente Temperatur, absolute Feuchte, Global- und Diffusstrahlung sowie atmosphärische Gegenstrahlung werden im Folgenden Lokalklimakorrekturfaktoren für die unter Kapitel 3.5.1 definierten vier Lagekategorien entwickelt. Die relative Feuchte wird ebenso wie bei der Höhenkorrektur aus den korrigierten Werten für Temperatur und absolute Feuchte berechnet und nicht separat angepasst. Die monatlichen Korrekturfaktoren werden auf den stündlichen Wert in den Klimadaten von Referenzstandort addiert.

Vorgehensweise bei der Entwicklung der Lokalklimakorrekturfunktionen

Zur Entwicklung der Lokalkorrekturfunktionen werden zunächst Standorte mit unterschiedlichen lokalen Expositionen innerhalb der HRY-Zone 9 (vgl. Bild 36) mit dem Referenzstandort Fürstzell betrachtet. Mit der Betrachtung von nur einer Zone sollen makroklimatische Einflüsse, die die Lokalklimaabweichung überlagern, möglichst eliminiert werden. Die Zone 9 zeichnet sich durch sehr unterschiedliche Expositionen und Höhenlagen von ca. 140 m bis 820 m ü. NN aus. Der Referenzstandort Fürstzell kann eindeutig der Kategorie „Neutral“ zugewiesen werden (Kapitel 3.5.1), so dass alle anderen Stationen in ihrer Abweichung zum neutralen Referenzort beschrieben werden können.

In der HRY-Zone 9 werden exemplarisch 28 Messstandorte ausgewertet. Diese Standorte werden anhand von Karten und Satellitenbildern mit Höhenangaben

einer der fünf Lagekategorien zugeteilt. Tabelle 19 enthält die Einteilung in die Lagekategorien sowie eine topographische Beschreibung der einzelnen Stationen.

Tabelle 19:
Betrachtete Messstationen innerhalb von HRY-Zone 9 und deren Lagebeschreibung.

Ort	Höhe [m]	Lagekategorie	Lagebeschreibung
Bamberg	239	Neutral	Stadtrand, leichte Tallage mit ca. 50 m höherem Gelände in Richtung West und Ost.
Würzburg	268	Neutral	Leichte Tallage. 350 m höherer Berg 10 km südlich.
Nürnberg	314	Neutral	Stadtrand mit Wald in Richtung Nord-Ost
Arnstein	318	Neutral	30 km westlich befindet sich ein ca. 450 m höherer Berg.
Mühlendorf am Inn	405	Neutral	Leichte Tallage. Der Inn fließt durch die Stadt. Das Gelände in Richtung Norden und Süden liegt etwa 100 m höher.
Weißenburg	422	Neutral	Windzugewandte Seite eines ca. 180 m höheren Hügels.
Augsburg	461	Neutral	Stadtrand. Ca. 7 km entfernt von der Stadtmitte.
Fürstenzell	476	Neutral	Kleinstadt mit lockerer Bebauung. Leichte Steigung des Geländes Richtung Norden.
Harburg	503	Neutral	Am Rand eines Dorfes
Gelbsee	536	Neutral	Richtung Osten befindet sich ein Wald.
Kisslegg	662	Neutral	30 km entfernt von einem See.
München-Neuhausen	515	Stadt	Nahe des Zentrums - dicht bebautes Gebiet.
Wertheim	140	Tal	Gelände in Richtung West und Ost ca. 150 m höher.
Bad Kissingen	281	Tal	Gelände in Richtung West und Ost ca. 100 m höher.
Coburg	285	Tal	Gelände in Richtung West und Ost ca. 100 m höher.
Regensburg	365	Tal	Gelände in Richtung West und Nord ca. 100 m höher.
Weingarten	440	Tal	Gelände in Richtung West und Ost ca. 100 m höher.
Eschenfelden	474	Tal	Tallage im Mittelgebirge in ca. 500-600 m Höhe
Meersburg	399	Gewässer	Direkt am Bodensee.
Lindau	400	Gewässer	Direkt am Bodensee, 100 m höheres Gelände Richtung Norden
Konstanz	442	Gewässer	Direkt am Bodensee.
Chieming	551	Gewässer	Ostseite des Chiemsees. Station ca. 700 m vom See entfernt und 30 m höher. Ca. 10 km nördlich der ersten Alpengipfel (bis ca. 1700m).
Andechs	700	Gewässer	Ca. 2 km vom Ammersee entfernt - 160 m höher auf einem nach West geneigten Hang gelegen.
Benediktbeuern	617	Berg	Alpenrand
Leutkirch	671	Berg	Alpenrand

Argenbühl	684	Berg	Alpenrand, 1000 m hohe Berge in Richtung West und Süd
Isny	725	Berg	Ähnlich wie Argenbühl, aber ca. 5 km westlich.

Aus den 28 Standorten werden zunächst kritisch-repräsentative Standorte für die verschiedenen Lagekategorien ausgewählt, die entsprechend der Informationen aus der Literatur und der, in den Voruntersuchungen ermittelten Kriterien, typisch für die Lagekategorie sind und bezüglich der hygrothermischen Bauteilbeurteilung eher kritische Abweichungen aufweisen.

Nach der Auswahl der „Repräsentanzorte“ für die verschiedenen Lagekategorien werden die Abweichungen der einzelnen Klimaelemente zum Referenzort Fürstzell in neutraler Lage ermittelt. Die daraus resultierenden Lokalkorrekturfunktionen beschreiben also die durch die Lagekategorie bedingten Abweichung der einzelnen Klimaelemente zur neutralen Lage als Monatswerte im Jahresverlauf. Als Referenzort wird im Rahmen des Projekts immer der HRY-Datensatz der jeweiligen Zone verwendet.

Die Korrekturfunktionen werden anhand der Standorte aus der HRY-Zone 9 ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Überprüfung und bei Bedarf Modifikation der Korrekturfunktionen anhand der anderen 10 HRY-Zonen. Ziel ist, dass diese für alle 11 HRY-Zonen in Deutschland gleichermaßen einsetzbar sind.

Zur Kontrolle der Eignung der Korrekturfunktionen werden zusätzlich hygrothermischen Simulationen von sensitiven Bauteilen durchgeführt, bei denen der gemessene Repräsentanzort der jeweiligen Zone mit dem aus dem Referenzort mit Hilfe der Lokalkorrekturfunktion erzeugten Datensatz verglichen wird. Die dazu verwendeten Bauteile entsprechen den für die Erstellung der HRY verwendeten und in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Konstruktionen. Sind die Ergebnisse, die mit dem angepassten Datensatz erzielt werden leicht kritischer als bei Verwendung der gemessenen Daten des Repräsentanzorts, ist die Überprüfung abgeschlossen und die Korrekturfunktion kann abschließend festgelegt werden. Andernfalls ist eine weitere Modifikation der Lokalkorrekturfunktion erforderlich.

Das beschriebene Vorgehen bei der Entwicklung der Lokalkorrekturfunktionen ist im Bild 82 als Flussdiagramm dargestellt und wird detailliert in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

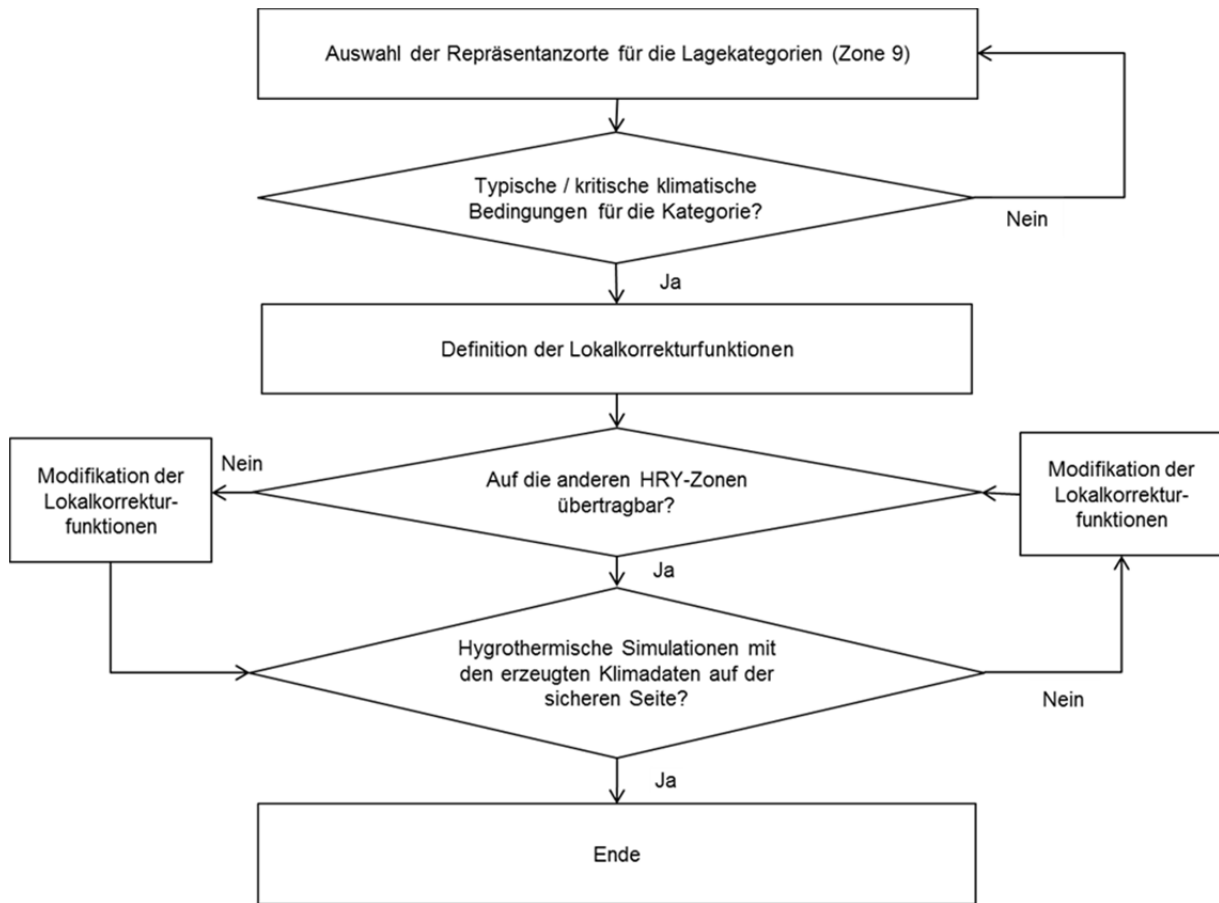


Bild 82:
Flussdiagramm zur Erstellung der Lokalkorrekturfunktionen.

Auswahl der Repräsentanzorte für die Lagekategorien in Zone 9

Aus den 28 Standorten der HRY-Zone 9 werden zunächst kritisch-repräsentative Standorte („Repräsentanzorte“) für die verschiedenen Lagekategorien nach den folgenden Vorgaben ausgewählt:

- Der Standort soll bezüglich der Informationen aus der Literatur und der in den Voruntersuchungen ermittelten Kriterien typische bzw. leicht kritische Lokalklimaverhältnisse aufweisen, aber nicht die extremsten beobachteten Bedingungen abdecken.
- Der Klimadatensatz soll bei der hygrothermischen Bauteilsimulation zu Ergebnissen auf der sicheren Seite führen.

Bezüglich des ersten Kriteriums wird auf die Literaturlauswertung und die in den Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse verwiesen (Kapitel 3.2 bis 3.4).

Bezüglich der kritischen Bedingungen für die Feuchteverhältnisse in Bauteilen werden die folgenden, aus der Anwendung der hygrothermischen Simulationen bekannten, empirischen Kriterien verwendet:

- Eine niedrigere Temperatur führt zu höheren Feuchten in den Winter- und geringerer Trocknung in den Sommermonaten.
- Eine geringere atmosphärische Gegenstrahlung verstärkt die nächtliche Unterkühlung der Bauteilaußenoberfläche und erhöht dadurch die Feuchte an der Oberfläche und in der Konstruktion.
- Höhere relative Luftfeuchten erhöhen den Feuchteeintrag in die Konstruktion und verringern das Trocknungspotenzial nach außen.

In Bild 83 sind auf der X-Achse die Fünf-Jahres-Mittelwerte und auf der Y-Achse die jährlichen Schwankungsbreiten der einzelnen Klimaelemente der 28 Stationen aus HRY-Zone 9 dargestellt. Die Stationen werden wieder mit den in Tabelle 62 vergebenen Kürzeln und in der Farbe der jeweiligen Lagekategorie im Diagramm dargestellt. Dabei wird deutlich, dass zwar auch innerhalb der gleichen Lagekategorie größere Unterschiede zwischen den Standorten auftreten können - es lassen sich anhand der Häufungen der gleich gefärbten Standorte aber auch klare Tendenzen ablesen. So sind beispielsweise die Standorte am Gewässer tendenziell wärmer, weisen eine höhere absolute Feuchte auf und haben demzufolge auch eine höhere Gegenstrahlung. Die Bergstandorte fallen dagegen durch Temperaturen im unteren Bereich, niedrige Diffusstrahlung und niedrige Gegenstrahlung auf. Die höchsten mittleren Temperaturen werden erwartungsgemäß in der Stadt erreicht.

HRY Zone 9

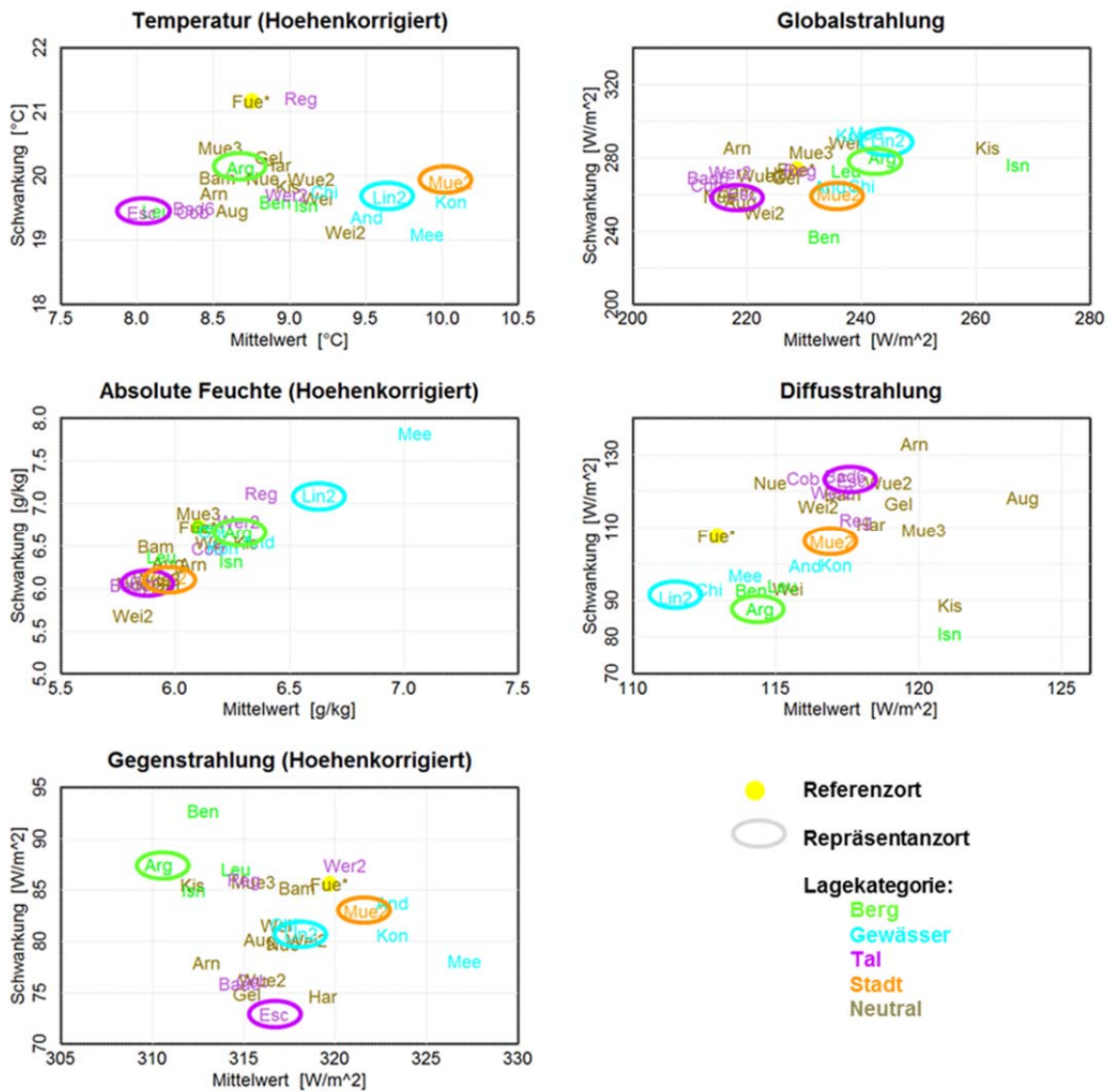


Bild 83:

Fünf-Jahres-Mittelwerte (X-Achse) und jährliche Schwankungsbreite der Monatsmittelwerte (Y-Achse) der verschiedenen Klimatelemente an den 28 Messstationen der HRY-Zone 9. Der Mittelwert der Temperatur, der absoluten Feuchte und der atmosphärischen Gegenstrahlung sind bereits höhenkorrigiert auf 475 m über NN wie Fürstencell. Die Standorte sind mit ihren Kürzeln und der Farbe der zugewiesenen Lagekategorie entsprechend Tabelle 62 dargestellt.

Zur Auswahl der Repräsentanzorte werden die Standorte innerhalb einer Lagekategorie anhand von Bild 83 miteinander verglichen.

Zur Berg-Lage gehören in der HRY-Zone 9 vier Standorte: Argenbühl, Benediktbeuern, Isny und Leutkirch. Isny ist aufgrund der im Vergleich zu den anderen Standorten deutlich höheren Global- und Diffusstrahlung sowie der höheren Windgeschwindigkeit nicht typisch (s. Bild 79). In Benediktbeuern ist die Tem-

peratur höher als in Argenbühl und Leutkirch und die absolute Feuchte niedriger als in Argenbühl. Infolgedessen kann der Standort nicht als kritisch repräsentativ angesehen werden. Bei den übrigen beiden Standorten sind die Global- und Diffusstrahlung sehr ähnlich. In Leutkirch ist die Temperatur niedriger, in Argenbühl dagegen die absolute Feuchte höher, was sich ggf. gegenseitig kompensiert. Daher wird stattdessen die relative Feuchte der beiden Messdatensätze verglichen. Diese ist in Argenbühl im Mittel mit 85 % höher als in Leutkirch mit ca. 83 %. Weiterhin bleibt die atmosphärische Gegenstrahlung in Argenbühl um ca. 5 W/m² niedriger als in Leutkirch, was das Risiko der nächtlichen Unterkühlung an der Bauteiloberfläche erhöht. Daher wird Argenbühl als der leicht kritischere Standort als Repräsentanzort für die Berg-Lage in HRY-Zone 9 ausgewählt.

Zur Gewässer-Lage gehören die vier Standorte Andechs, Chiemsee, Lindau und Meersburg. Andechs fällt hierbei etwas aus der Reihe, da die Station etwas erhöht auf dem Klosterberg liegt. Für Gewässer-Lagen ist entsprechend der Literatur-Recherche (Kapitel 3.2.2) und den eigenen Voruntersuchungen (Kapitel 3.4) eine höhere Luftfeuchte als in neutraler Lage zu erwarten. Diese Tendenz ist bei Lindau sowie Meersburg deutlich ausgeprägt, wobei die Erhöhung der absoluten Feuchte im Vergleich zu Fürstzell in Lindau ca. 0,5 g/kg und in Meersburg ca. 0,9 g/kg beträgt, also fast doppelt so hoch liegt. Meersburg wäre damit bezüglich der Feuchtverhältnisse zwar besonders kritisch, aber aufgrund der deutlich erhöhten Werte ggf. nicht mehr typisch. Aus diesem Grund wird hier die Überprüfung anhand der anderen HRY-Zonen, die ansonsten erst im Anschluss durchgeführt wird, vorgezogen, um anhand weiterer Gewässerstandorte und deren Feuchteerhöhungen zu prüfen, ob Lindau oder Meersburg als Repräsentanzort besser geeignet ist. Dieser Vergleich wird anhand der graphischen Darstellungen in Bild 84 durchgeführt. In diesem Bild sind die Jahresmittelwerte sowie die Schwankungsbreite der absoluten Feuchten der Standorte in den HRY Zonen 2, 3 und 9 dargestellt, da in diesen Zonen jeweils mehrere Standorte in der Lagekategorie Gewässer verfügbar sind. Die Abweichungen in Lindau und Meersburg gegenüber Fürstzell sind jeweils als Vektor dargestellt. Am Vektor von Lindau kann man zum Beispiel erkennen, dass der Mittelwerte um ca. 1,0 K höher die jährliche Schwankung um ca. 0,5 K größer ist als in Fürstzell. Die beiden Vektoren werden in die Graphiken der HRY Zone 2 und 3 übertragen. Der Startpunkt in Zone 2 ist deren Referenzort Hamburg-Flughafen in neutraler Lage. Der Referenzort der Zone 3 ist Potsdam, wobei die Wetterstation hier auf einem Hügel gelegen ist und daher zusätzlich der Kategorie Berg zugewiesen werden kann. Potsdam liegt zwar ebenfalls in Gewässernähe, die Wetterstation weist aber keine typischen Merkmale für Gewässer auf und die absolute Feuchte bleibt dort sogar niedriger als in Barleben, der neutralen Lage von Zone 2. Deswegen kann Potsdam hier als Vergleichsort herangezogen werden. Da die Vektoren die Unterschiede zur neutralen Lagen beschreiben, ist bei der Klimastation von Potsdam zuvor eine inverse Korrektur für die Lage auf dem Hang erforderlich (grüner Pfeil) von der aus dann die Differenzen zu den Gewässerstandorten eingezeichnet werden. Die gleiche Methode wird später auch bei der weiteren Überprüfung der Lokalkorrekturfunktionen eingesetzt. Bild 84 zeigt, dass der Vektor von Lindau in Zone 2 und 3 die

dortigen Gewässerlagen besser repräsentiert, während Meersburg zu deutlich extremen Bedingungen führen würde. Da zudem die Gegenstrahlung in Lindau um ca. 10 W/m²K niedriger bleibt als in Meersburg, wird Lindau als Repräsentanzort für die „Gewässer-Lage“ ausgewählt.

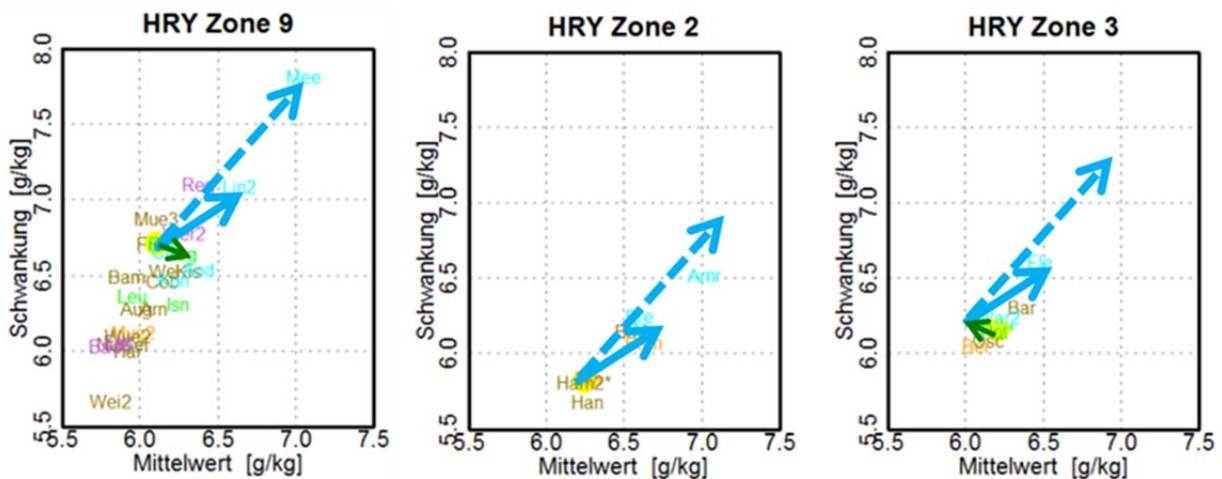


Bild 84:

Jahresmittelwerte (X-Achse) und Schwankungsbreite (Y-Achse) der absoluten Feuchten an den Standorten der HRY-Zonen 9, 2 und 3. Die blauen Vektoren beschreiben die Differenz zwischen Fürstzell und Lindau, die gestrichelten blauen Vektoren die zwischen Fürstzell und Meersburg. Beide Vektoren wurden zum Vergleich in die Zonen 2 und 3 ausgehend von deren Referenzort übertragen. Die grünen Vektoren beschreiben die Korrektur der Referenzorte zwischen neutraler Lage und Berg-Lage. Die Abkürzung jedes Standortes stehen in Tabelle 62.

Zur Tal-Lage in Zone 9 gehören die fünf Standorte Bad Kissingen, Coburg, Eschenfelden, Regensburg und Wertheim. Entsprechend der Literaturrecherche sind in Tal-Lagen je nach Orientierung und Jahreszeit weniger Sonnenstrahlung und Ansammlungen von kalter Luft zu erwarten. Infolgedessen stellen sich v.a. niedrigere Temperaturen ein als an neutralen Standorten. Diese Abweichung findet sich in Bild 83 für Eschenfelden und Bad Kissingen recht deutlich, während Coburg, Regensburg und Wertheim, bei denen die Tallage auch geographisch weniger deutlich ausgeprägt ist, näher an den neutralen Standorten bleiben. Beide Standorte weisen bezüglich der untersuchten Klimatelemente recht ähnliche Bedingungen auf. Eschenfelden bleibt etwas kühler und feuchte, während Bad Kissingen etwas weniger Global- und Gegenstrahlung aufweist. Gewählt wird hier der Standort Eschenfelden, wobei Bad Kissingen aufgrund der geringen Unterschiede in ähnlicher Weise in Frage kommen würde.

Für die Stadt-Lage steht lediglich die Station „München-Neuhausen“ zur Verfügung, die damit als Repräsentanzort für die Stadt-Lage gewählt wird. Inwiefern diese Station bezüglich der Stadt-Lage auch in den anderen HRY-Zonen typisch ist, wird in weiteren Schnitten, genauso wie für die bisher festgelegten

Repräsentanzorte, noch überprüft und ggf. die Korrekturfunktion weiter modifiziert.

Entsprechend den o.g. Begründungen werden folgende vier Repräsentanzorte in HRY Zone 9 für die verschiedenen Lagekategorien ausgewählt:

- Berg-Lage: Argenbühl
- Gewässer-Lage: Lindau
- Stadt-Lage: München-Neuhausen
- Tal-Lage: Eschenfelden

Im nächsten Schritt werden die klimatischen Abweichungen der hier ausgewählten Repräsentanzorten gegenüber Fürstencell ermittelt und auf Basis der Differenzen die Lokalkorrekturfunktionen definiert.

Ermittlung der Lokalkorrekturfunktionen für Zone 9

Zunächst werden die Temperatur, die absolute Feuchte und die atmosphärische Gegenstrahlung entsprechend Kapitel 3.5.2 auf die Höhe von Fürstencell (476 m ü. NN) als Referenzort der Zone 9 umgerechnet. Im zweiten Schritt werden für die zu überprüfenden Klimaelemente die Monatsmittelwerte des Fünf-Jahres-Zeitraums sowie die mittleren jährlichen Schwankungsbreiten dieser Monatsmittelwerte ermittelt. Für Fürstencell selbst sind die fünf Einzeljahre sowie die gemittelte Kurve exemplarisch in Bild 85 dargestellt. Dieselben Auswertungen werden für die Repräsentanzorte für die verschiedenen Lagen erstellt und anschließend die einzelnen Klimaelemente anhand des mittleren Jahres mit den Werten von Fürstencell verglichen sowie die Differenzkurven ermittelt.

Fürstenczell

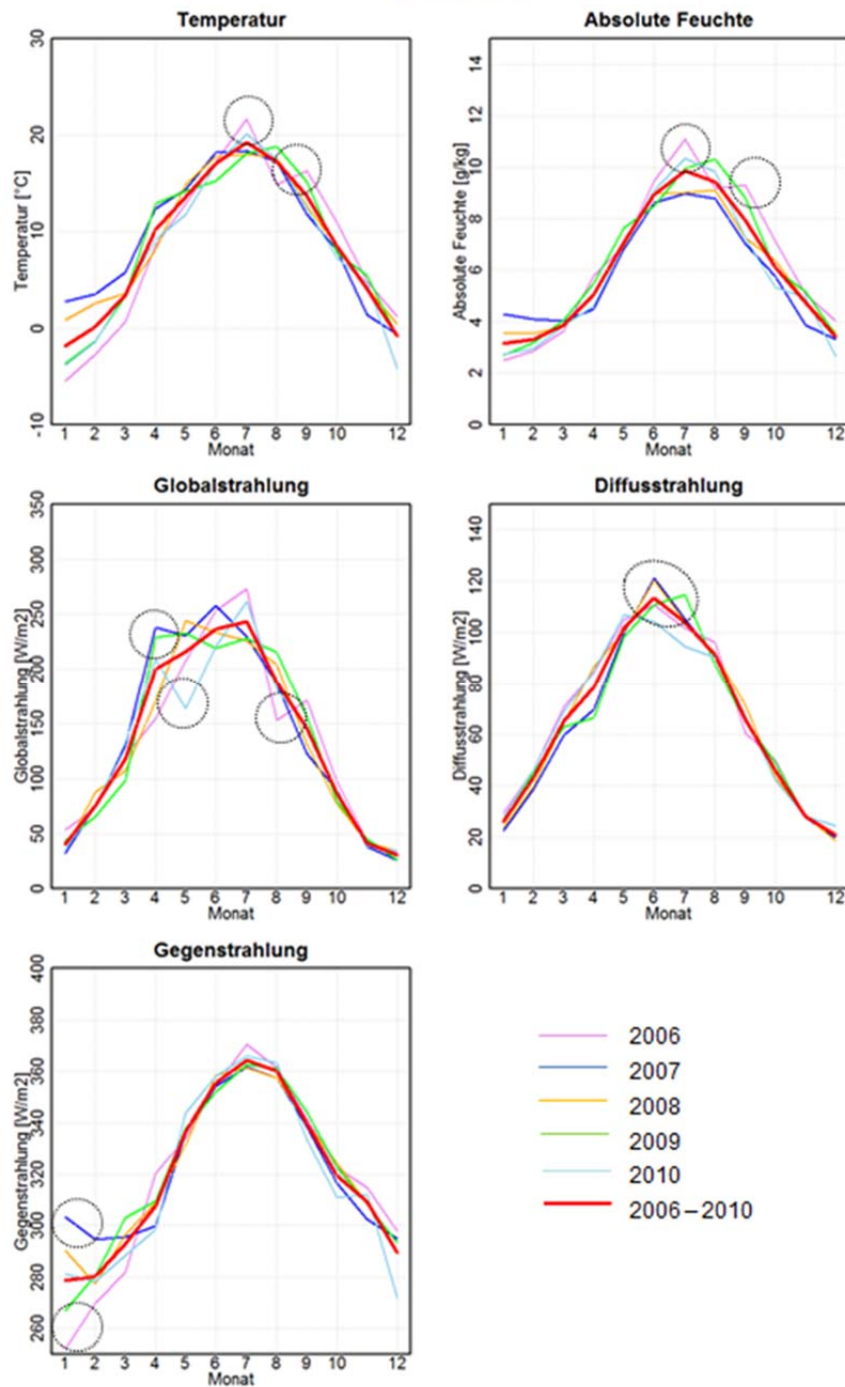


Bild 85:
Darstellung der Monatsmittelwerte der verschiedenen Klimatelemente in Fürstenczell als Monatsmittel über die fünf einzelnen Jahre und als mittlere Monatsmittelwerte (rote Kurve). Die Kreise markieren einzelne Ausreißer, die zu Sprüngen in der Korrekturfunktion führen.

Exemplarisch erfolgt dies für die Temperatur der beiden Bergstandorte Argenbühl und Leutkirch mit Fürstenczell in Bild 86. Rot sind jeweils der mittlere Verlauf in Fürstenczell, blau der höhenkorrigierte Temperaturverlauf an den Berg-

standorten und grün darunter die Differenzkurve der beiden Standorte zu Fürstencell. Die Differenzkurven sind in Bild 87 auch nochmals separat in etwas größerem Maßstab dargestellt und weisen recht große Sprünge zwischen den einzelnen Monatswerten auf, was für die Korrekturfunktion wenig sinnvoll erscheint. Ursächlich sind „Ausreißer“ in einem oder beiden Ausgangsdatensätzen, die in Bild 85 durch Kreise markiert sind. Diese fließen in die mittlere Kurve mit ein. Um eine einigermaßen kontinuierlich verlaufende, für mehrere Standorte repräsentative Korrekturfunktion zu erhalten, wird die Differenzkurven durch Mittelwertbildung geglättet.

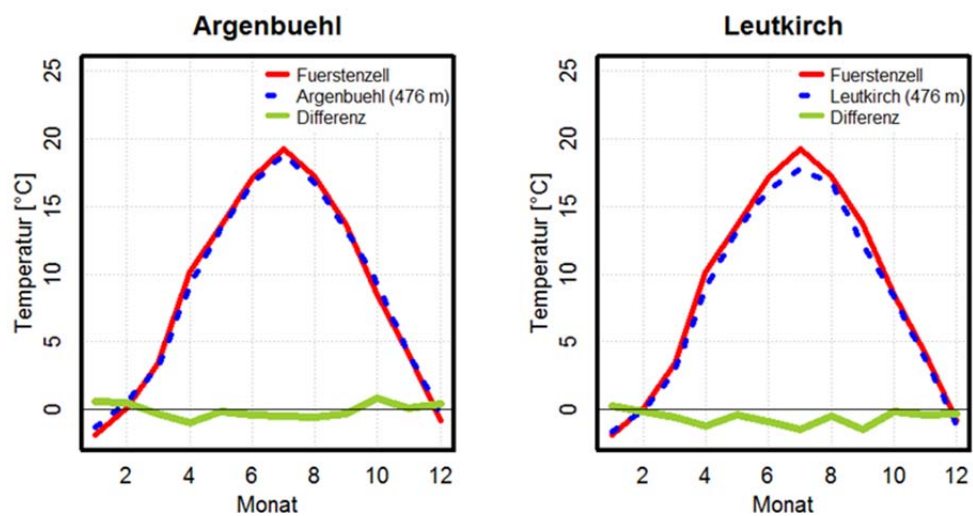


Bild 86:

Monatsmittelwerte (des Fünf-Jahres-Zeitraums) der auf die Höhe von Fürstencell korrigierten Temperaturen von Argenbühl und Leutkirch (beide Berg-Lage) im Vergleich zu Fürstencell. Die grünen Kurven stellen die Differenzen der Standorte zu Fürstencell dar.

In Bild 87 werden neben der ursprünglichen Differenzkurve verschiedene Mittelungszeiträume für die Glättung miteinander verglichen. Dabei erweist sich die gleitende Mittelung über fünf Monate als günstigste Variante: die monatlichen Sprünge werden weitgehend eliminiert und der qualitative Verlauf der zwei Standorte Argenbühl und Leutkirch wird deutlich ähnlicher (mit dem Minimum jeweils im Juni und dem Maximum im Dezember). Gleitende Mittelung über fünf Monate bedeutet, dass z.B. der Wert für März aus den Mittelwerten der fünf Monate von Januar bis Mai berechnet wird, der für Oktober dagegen aus den Monaten August bis Dezember. Als Repräsentanzort für die Berg-Lage in Zone 9 dient dabei Argenbühl. Leutkirch wurde zu Vergleichszwecken und zur Auswahl des Mittelungsverfahrens mit dargestellt.

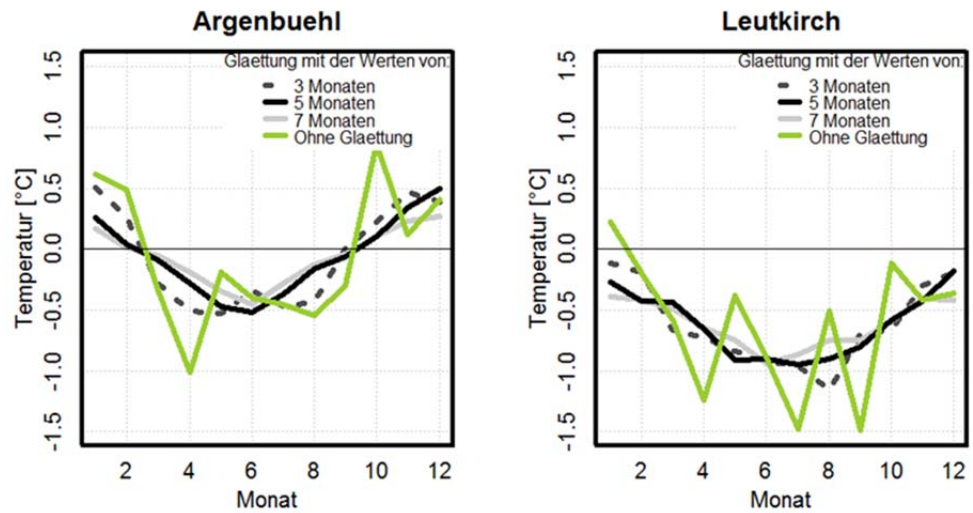


Bild 87:
Differenzkurve (grün) und Vergleich verschiedener Glättungsverfahren bei Verwendung des gleitenden Mittelwerts über drei, fünf und sieben Monate.

In Bild 88 sind die für Zone 9 aus dem Vergleich zwischen Referenzort und den Repräsentanzorten resultierenden, geglätteten Differenzkurven für die vier verschiedenen Lagekategorien dargestellt. Diese Differenzkurven stellen die Basis für die Lokalkorrekturfunktionen dar, müssen aber im nächsten Abschnitt zunächst noch anhand der anderen HRY-Zonen sowie des hygrothermischen Bauteilverhaltens überprüft und bei Bedarf weiter modifiziert werden.

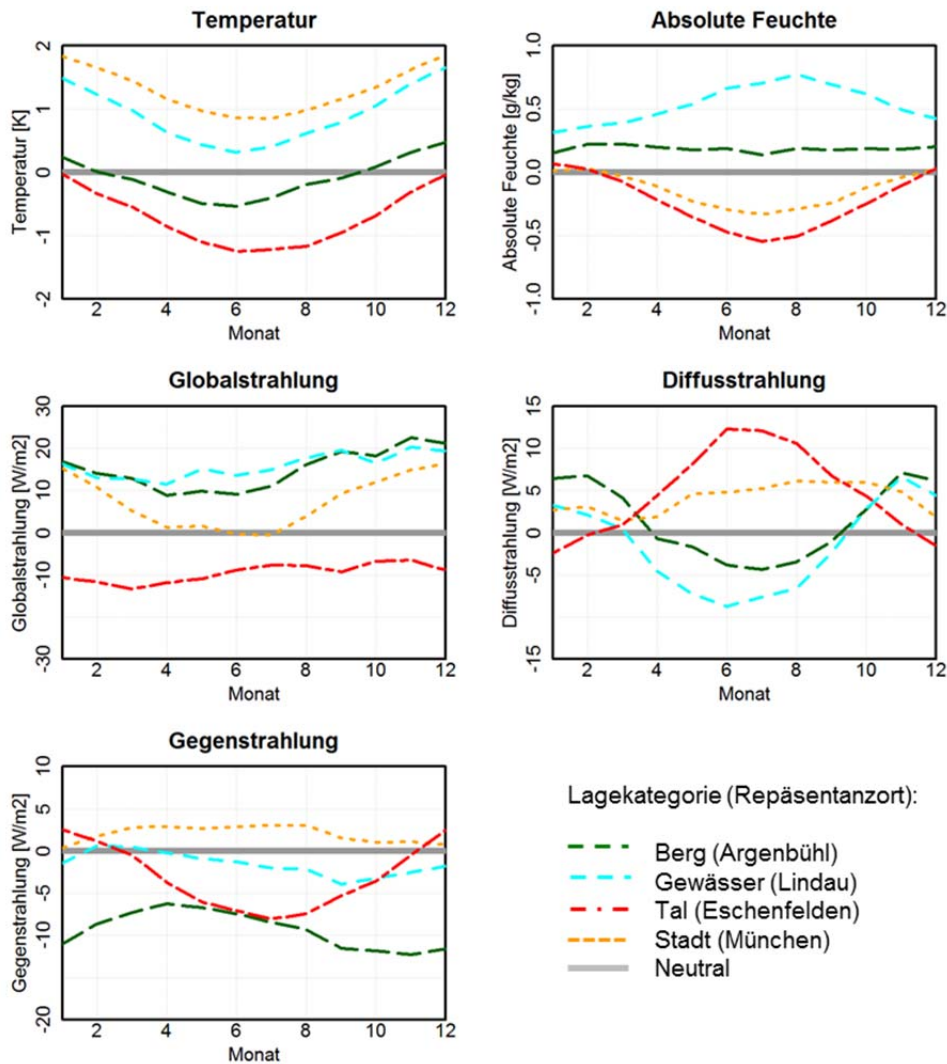


Bild 88:
Geglättete Differenzkurven zwischen den Repräsentanzorten für die vier verschiedenen Lagekategorien und dem Referenzort der HRY-Zone 9.

Überprüfung und Modifikation der Korrekturfunktionen anhand der anderen 10 HRY-Zonen

Die anhand der HRY-Zone 9 ermittelten Korrekturfunktionen werden im nächsten Schritt für die anderen Zonen überprüft und bei Bedarf modifiziert. Ziel ist es, für alle Regionen gleichermaßen gültige Lokalkorrekturfunktionen zu erstellen. Für die abschließende Festlegung der Lokalkorrekturfunktionen werden also die monatlichen Differenzkurven zwischen dem jeweiligen Repräsentanzort und Fürstenzell (Referenzstandort für die HRY-Zone 9) herangezogen und falls erforderlich so modifiziert, dass die Korrektur auch in den anderen Zonen zu repräsentativen Ergebnissen führt und zugleich die hygrothermischen Verhältnisse in den Konstruktionen tendenziell eher auf der sicheren Seite liegen.

Zur Überprüfung der Verwendbarkeit jeder Lokalkorrekturfunktion in den anderen HRY-Zonen werden die klimatischen Bedingungen an den Standorten der einzelnen Zonen mit Mittelwerten und jährlicher Schwankungsbreite aus den Fünf-Jahres-Datensätzen dargestellt (die Diagramme sind aufgrund ihrer Größe im Anhang in Bild 298 bis Bild 302 dargestellt). Dabei sind die Standorte je nach Lokalkategorie (vgl. Tabelle 62) farblich markiert. Die Standorte, die zu mehreren Lagekategorien gehören, werden in der Farbe der Kategorie eingetragen, die die größte Relevanz aufweist. Zur anschaulichen Überprüfung werden die Abweichungen der fünf Klimaelemente zwischen Repräsentanzorten und Fürstenzell als Vektor dargestellt. Bild 89 zeigt beispielhaft die Vektoren für die Temperatur in HRY-Zone 9. Dabei bedeutet z.B. der Vektor für Gewässer-Lage (blau) eine Korrektur der Temperatur (von Fürstenzell zum Repräsentanzort Lindau) um +0,9 K und der Schwankungsbreite um -1,2 K. Die Korrekturvektoren werden für alle Klimaelemente in die Diagramme der verschiedenen HRY-Zonen übertragen, so dass deren Startpunkt mit der Position des dortigen Referenzortes zusammenfällt. Wenn der Referenzstandort keine neutrale Lage aufweist, wie z.B. Warnemünde in Zone 1 (Gewässer-Lage) oder Kassel in Zone 5 (Stadt-Lage), erfolgt zuerst eine inverse Korrektur des Referenzstandorts auf die neutrale Lage. Nach einer Modifikation der Lokalkorrekturfunktionen werden die diesbezüglichen Vektoren neu definiert und die Überprüfung wird wiederholt.

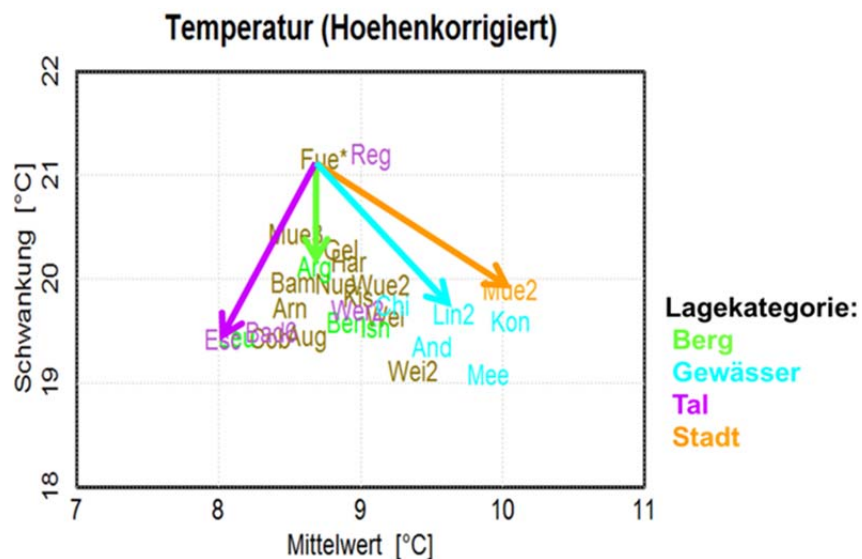


Bild 89:
 Höhenkorrigierte Mittelwerte (X-Achse) und jährliche Schwankungsbreite (Y-Achse) der Temperaturen ermittelt aus den Fünf-Jahres-Messdatensätzen der Standorte in HRY-Zone 9. Die Vektoren repräsentieren die Abweichungen zwischen den vier Lage-Repräsentanzorten und Fürstenzell.

Dabei ist zu beachten, dass zwar die Mittelwertdifferenzen zwischen Repräsentanzort und Fürstenzell durch die zuvor durchgeführte Glättung der Korrektur-

kurve nicht beeinträchtigt wird, die Differenzen der Schwankungsbreite dagegen schon. Da die Extremwerte bei der Mittelwertbildung über fünf Monate (vgl. Bild 88) deutlich reduziert werden, wären die Differenzen geringer als bei einem Vergleich der realen Messwerte. Für die Korrektur der Schwankungsbreite wird daher nicht auf die gemittelte Korrekturfunktion sondern ausnahmsweise auf die Originalmessdaten zurückgegriffen.

Für den Vergleich wird im Folgenden als Hauptkriterium der Mittelwert der Klimaelemente herangezogen und als ergänzendes Kriterium die Tendenz zu einer größeren oder kleineren jährlichen Schwankungsbreite, jedoch ohne Berücksichtigung der genauen Werte. Die vorgenommenen Modifikationen der Korrekturfunktionen werden im Folgenden für die einzelnen Lagekategorien beschrieben.

Stadt-Lage

Die gemessene Abweichung der Temperatur zwischen München als Repräsentanzort für die Stadt-Lage und Fürstzell als Referenzort der HRY-Zone 9 (Neutral) beträgt im Jahresmittel +1,3 K, d.h. München ist im Jahresdurchschnitt um 1,3 K wärmer als Fürstzell. Dieser Korrekturwert wird nun für die anderen Zonen überprüft, soweit ein Standort mit der Exposition „Stadt“ zur Verfügung steht.

Zur Kategorisierung der Lage wurde die Umgebung der einzelnen Standorte anhand von Satellitenbildern und geographischem Profil bewertet. Für die Kategorie Stadt ist eine hohe Bebauungsdichte in der Umgebung mit Wohn- bzw. Gewerbenutzung erforderlich. Standorte, die sich zwar politisch in der Stadt, aber in unbebauter Umgebung oder am locker bebauten Stadtrand befinden, bleiben in der Kategorie „Neutral“. Dies ist bei der Bezeichnung der Standorte in Einzelfällen zu berücksichtigen und betrifft z.B. die Station Münster/Osnabrück, die sich am Flughafen zwischen den beiden Städten befindet oder Mannheim mit der Station am Stadtrand.

In HRY-Zone 5 gehören Kassel, Köln und Dortmund zur Lagekategorie Stadt. Allerdings befinden sich die jeweiligen Messstationen in diesen Orten nicht in der Stadtmitte sondern eher am Stadtrand in nicht sehr dicht bebauter Umgebung. Weil die Station des eigentlichen Referenzorts Kassel selbst innerhalb einer Stadt liegt, wird stattdessen der Flughafen Münster/Osnabrück in neutraler Lage als Referenzstation verwendet. In HRY-Zone 5 ergibt sich für die Stadt Köln ähnlich wie bei München in Zone 9 eine um 1,4 K höhere Temperatur im Vergleich zur Referenzstation. Für die beiden anderen Städte ist der Zuschlag allerdings zu groß: In Dortmund ist die Temperatur nur etwa 0,4 K höher und in Kassel sogar um ca. 0,2 K niedriger als an der Referenzstation. Auch in HRY-Zone 8 ist z.B. Karlsruhe nur 0,6 K wärmer als der Referenzort Mannheim.

Betrachtet man die jährliche Schwankungsbreite der Temperatur bleibt diese in München um ca. 1,0 K kleiner als in Fürstzell. In anderen städtischen Standorten wie Berlin oder Hamburg sind die Schwankungen dagegen um ca. 0,2 bis 1,0 K größer als am jeweiligen Referenzort bzw. als in neutrale Lage (vgl. Bild

298). Weil sowohl bezüglich der Temperaturerhöhung als auch bezüglich der jährlichen Schwankungsbreite größere Differenzen zwischen den verschiedenen Stadt-Standorten festgestellt werden und in Zone 9 nur ein einzelner Standort für die Lokalkorrekturfunktion herangezogen werden konnte, wird für die abschließende Festlegung der Korrekturfunktion zusätzlich die Stadt-Temperatur-Korrektur von Meteonorm [27] berücksichtigt. Bei dieser Korrekturfunktion liegt der Mittelwert bei 0,9 K und die Schwankungsbreite bei 0,3 K – also beides deutlich niedriger als anhand von München in der HRY-Zone 9 ermittelt. Die gemessene jährliche Schwankungsbreite der Temperaturdifferenz zwischen München und Fürstenzell beträgt im Mittel 1,0 K bei +1,8 K im Winter und +0,8 K im Sommer. Zusammen mit den geringeren Differenzen in den anderen HRY-Zonen erscheint es daher sinnvoll, sowohl die mittlere Differenz als auch die Schwankungsbreite etwas zu reduzieren. Mit einer im Mittel um 1,0 statt 1,3 K erhöhten Temperatur und einer jährlichen Schwankungsbreite vom 0,5 statt 1,0 K wird in München noch eine zufriedenstellende und in den anderen HRY-Zonen eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Verhältnissen erzielt.

Die absolute Feuchte in München ist durchschnittlich 0,1 g/kg niedriger als in Fürstenzell. Diese Differenz trifft aber in anderen HRY-Zonen vor allem auf größere Ballungsgebiete wie Köln nicht zu. In diesen Stadtlagen ist die absolute Feuchte sogar höher als an der Referenzstation Münster/Osnabrück. Die Erhöhung der absoluten Feuchten in Dortmund und Köln im Vergleich zu Münster/Osnabrück beträgt 0,8 g/kg bzw. 0,7 g/kg. Da auch in der Literatur darauf hingewiesen wird, dass keine allgemeingültigen Aussagen über die Änderung der absoluten Feuchte in Städten bekannt sind [52], erfolgt bei der Lagekategorie Stadt keine Korrektur für die absolute Feuchte.

Ebenfalls keine klare Tendenz ergibt sich für die Globalstrahlung in Stadtlagen. Während diese in München durchschnittlich um ca. 7,4 W/m² höher liegt als in Fürstenzell, ist sie in Städten der anderen HRY-Zonen nicht höher als am jeweiligen Referenzstandort bzw. als an Standorten in neutraler Lage. Ferner zeigt der Vergleich der Ergebnisse der hygrothermischen Bauteilsimulation, dass eine Erhöhung der Globalstrahlung für Städte besonderes bei Flachdächern günstigere hygrothermische Verhältnisse ergeben (siehe Bild 90). Da im Zweifel Abweichungen aber nur auf der aus hygrothermischer Sicht ungünstigen Seite berücksichtigt werden, erfolgt für die Globalstrahlung ebenfalls keine Korrektur. Weil aber die Diffusstrahlung bei allen hier untersuchten Städten durchschnittlich um ca. 3,5 W/m² höher ist als an den neutralen Referenzorten und sich dies gut mit den Aussagen aus der Literatur wie z.B. bei Schirmer [55] deckt, wird der Anteil der Diffusstrahlung an der Globalstrahlung in der Stadt um diesen Wert erhöht, die Direktstrahlung dagegen entsprechend reduziert.

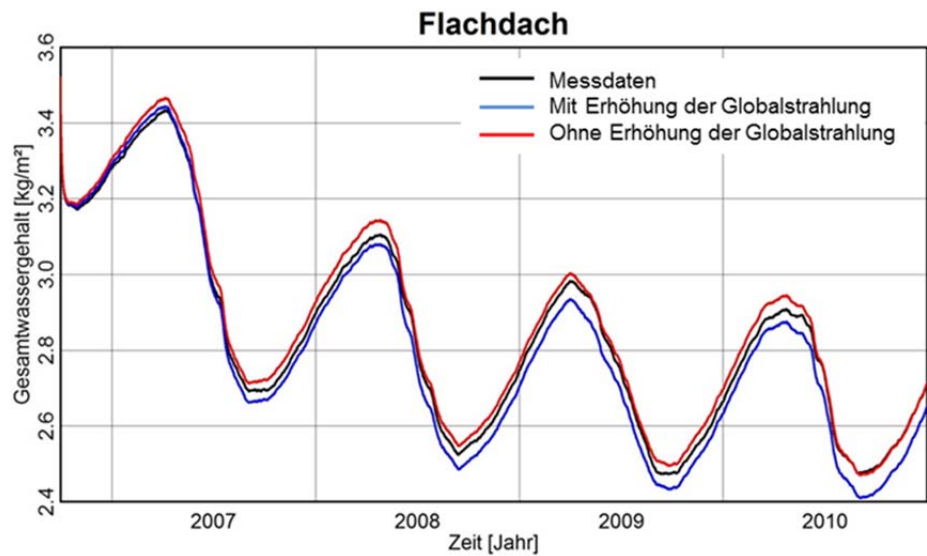


Bild 90:
Vergleich des Gesamtwassergehalts eines Flachdachs bei Berechnung mit den Messdaten von München im Vergleich zur Berechnung mit den Lokal-klima-modell-Daten mit und ohne Anpassung der Globalstrahlung.

Gewässer-Lage

Die gemessene mittlere Jahrestemperaturdifferenz des Repräsentanzorts der Zone 9 für Gewässer Lindau beträgt im Vergleich zum Referenzort Fürstencell +0,9 K. Im Vergleich zu anderen Standorten am Gewässer erscheint diese Erhöhung der Temperatur gegenüber der Lage „Neutral“ allerdings zu groß. So sind die Temperaturen z.B. in Bremerhaven am Meer und in Amrum auf einer Insel im Meer (beide in HRY-Zone 2) nur +0,4 K bzw. +0,15 K höher als am Hamburger Flughafen (Referenzort der HRY-Zone 2). Bei Waren und Fleesensee in HRY-Zone 3 ist die Temperatur sogar um ca. 0,8 K bzw. 0,4 K niedriger als in neutraler Lage. Aufgrund der wiederum großen Bandbreite der Temperaturunterschiede wird auch hier zum Vergleich die Temperaturanpassung aus Meteonorm [27] herangezogen. Bei dieser liegt der Mittelwert der monatlichen Korrektur für die Gewässerlage bei 0,1 K (vgl. Bild 51), also um 0,8 K niedriger als die Temperaturdifferenz zwischen Lindau und Fürstencell. Berücksichtigt man die anderen Gewässerstandorte in den verschiedenen Zonen würde sich ein Korrekturwert von im Mittel etwa 0,5 K ergeben. Die Korrektur der Temperatur würde aber zu günstigeren Bedingungen an den angepassten Standorten führen. Entsprechend der Prämisse, dass Anpassungen im Zweifel nur dann vorgenommen werden, wenn sie zu ungünstigeren Ergebnissen führen, wird hier bezüglich des Mittelwerts der niedrigere Korrekturwert aus Meteonorm übernommen. Dadurch ergeben sich für die Temperatur am Gewässer im Sommer um 0,5 K niedrigere und im Winter um 0,8 K höhere Werte als am neutralen Referenzort. Diese Korrektur entspricht im Wesentlichen auch den Informationen aus der Literatur (vgl. Kapitel 3.2.2): Eine generelle Temperaturerhöhung wird dort nicht angegeben, die jährlichen Temperaturschwankungen bleiben nach Schirmer [55] wegen der großen Wärmekapazität des Wassers

aber geringer als an anderen Standorten. Eine Reduktion der Temperaturschwankung in Gewässer-Lage ist in allen relevanten Zonen zu erkennen (vgl. Bild 298).

Die in Lindau im Vergleich zu Fürstzell im Mittel um ca. 0,5 g/kg höhere absolute Feuchte findet sich so auch bei den Gewässerstandorten in den HRY-Zonen 2 und 3 wieder. Die jährliche Schwankungsbreite in Lindau ist um ca. 0,3 g/kg größer als in Fürstzell. Diese Tendenz bestätigt sich auch in den HRY Zonen 2 und 3. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Standorte Warnemünde an der Ostsee und Penkun in HRY-Zone 1 bezüglich Mittelwerte und Schwankungsbreite jedoch kaum voneinander (vgl. Bild 299) – allerdings liegt Penkun selbst in einem Sumpfgebiet, also in einer Lage, die ebenfalls zu erhöhten Feuchten führen könnte. Da die ursprüngliche Korrekturfunktion aber etwas auf der sichereren Seite liegt, ist keine weitere Modifikation erforderlich.

Die Globalstrahlung in Lindau erreicht einen um 15 W/m^2 höheren Wert als in Fürstzell, während die Diffusstrahlung um $1,5 \text{ W/m}^2$ niedriger bleibt. Hier sind die Ergebnisse in den anderen HRY-Zonen nicht einheitlich, so dass die Werte nicht bestätigt werden können (vgl. Bild 300 und Bild 301). Da sowohl eine höhere Global- als auch eine höhere Gegenstrahlung in den Bauteilen zu günstigeren Bedingungen führen, wird für die Lokalkategorie Gewässer keine Strahlungskorrektur vorgenommen.

Die atmosphärische Gegenstrahlung in Lindau ist um ca. $1,5 \text{ W/m}^2$ geringer als in Fürstzell. Diese Reduktion ist auch für die Standorte in den HRY-Zonen 1 und 3 geeignet. In der HRY-Zone 2 sowie an den anderen Standorten am Gewässer in der HRY-Zone 9 bleibt die Gegenstrahlung aber um durchschnittlich ca. 5 W/m^2 höher als in neutraler Lage (vgl. Bild 302). Bei dieser Bandbreite führt die geringere Erhöhung der Original-Korrekturfunktion von $1,5 \text{ W/m}^2$ zu hygrophthermisch kritischeren Verhältnissen als eine Korrektur um 5 W/m^2 . Daher erfolgt hier ebenfalls keine weitere Modifikation.

Berg-Lage

Die Temperatur in Argenbühl ist durchschnittlich ca. 0,1 K niedriger als in Fürstzell; die absolute Feuchte liegt dagegen ca. 0,2 g/kg höher. An anderen Standorten ist zu beobachten, dass tendenziell auf der Leeseite trockenere Bedingungen und in Südlagen aufgrund der größeren Strahlungsintensitäten höhere Temperaturen als in neutralen Lagen erreicht werden (z.B. Wernigerode in HRY-Zone 4). Im Gegensatz dazu ist die Temperatur auf den Luvseiten z.B. in Baden-Baden (HRY-Zone 7) niedriger als am Referenzstandort.

Auch bei der Solarstrahlungsmenge ist eine starke Abhängigkeit von der genauen Exposition und Ausrichtung des betroffenen Standorts erkennbar. An den sieben Standorten mit Berg-Lage in der HRY-Zone 4 ergibt sich dadurch eine Bandbreite von 190 W/m^2 in Braunlage und 227 W/m^2 (jeweils Mittelwert der Stunden mit Strahlung) in Bad Suderode (vgl. Bild 300). Während in Zone 9 eine Korrektur von 14 W/m^2 sinnvoll erscheint, bestätigt sich dieser Wert in Zone 3, 6 und 8 nicht. Um auch hier v.a. die kritischen Anpassungen vorzu-

nehmen, wird auf eine Erhöhung der Globalstrahlungsmenge bei der Berg-Lage verzichtet. Dies führt allerdings bei den Simulationsvergleichen zu deutlich kritischeren Verhältnissen, wenn das Flachdach mit dem Lokklimadatensatz berechnet wird als bei Berechnung mit den realen Messdaten von Argenbühl (siehe Bild 91). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Globalstrahlung zwar nicht erhöht, die atmosphärische Gegenstrahlung aber abgesenkt wird. Da beide Größen normalerweise parallel zu- oder abnehmen, scheint die Korrektur in dieser Form zu kritisch zu sein. Um die Korrektur etwas zu relativieren und die Gesamtstrahlungsbilanz nicht zu stark zu verändern wird daher die atmosphärische Gegenstrahlung weniger stark reduziert. Die Gegenstrahlung in Argenbühl liegt durchschnittlich ca. 9 W/m^2 geringer als in Fürstenzell. In Leutkirch (ebenfalls Berg-Lage) bleibt die Gegenstrahlung dagegen nur $0,6 \text{ W/m}^2$ niedriger. Wird bei der Lokalkorrektur dieser Wert für die Gegenstrahlungskorrektur angesetzt, ergibt sich bezüglich der hygrothermischen Verhältnisse eine bessere Übereinstimmung mit der Berechnung mit den Messdaten von Argenbühl (siehe Bild 91). In der Konsequenz wird die gemessene monatliche Differenzkurve der atmosphärischen Gegenstrahlung von Argenbühl zu Fürstenzell um $8,4 \text{ W/m}^2$ nach oben verschoben.

Zusammenfassend ist bei der Berg-Lage eine Abbildung der verschiedenen Abweichungen nicht mit vertretbarem Aufwand machbar, aber auch nicht notwendig. Da die Lokalklimamodelle im Zweifel die kritischeren Bedingungen abdecken sollen, beschränkt sich die Korrektur hier auf die ungünstigeren Abweichungen bei Temperatur und absoluter Feuchte. Bei der Solarstrahlung erfolgt keine Korrektur nach oben – um die Strahlungsbilanz der Standorte einigermaßen zu erhalten wird im Gegenzug aber auch nur eine leichte Reduktion der atmosphärischen Gegenstrahlung vorgenommen.

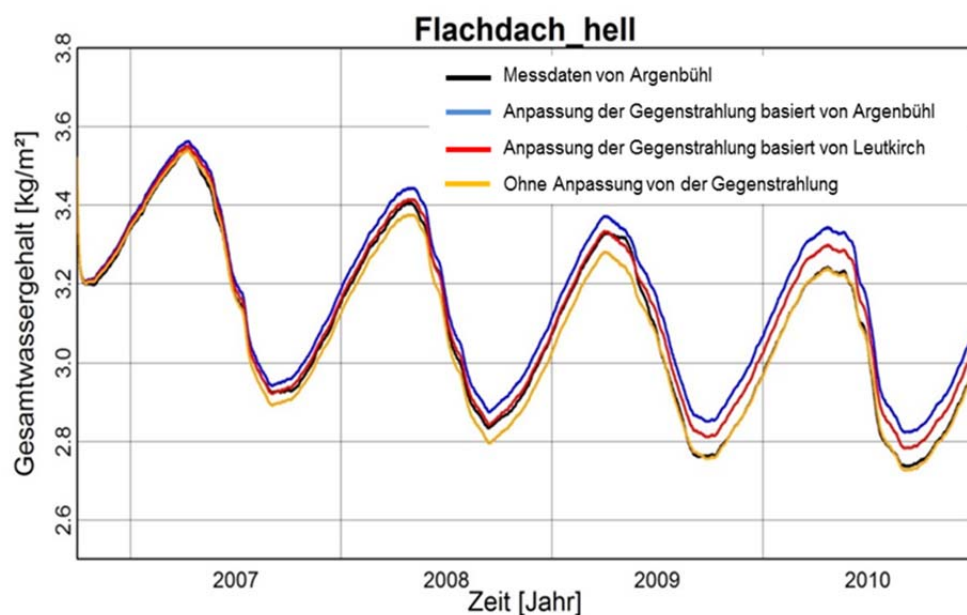


Bild 91:

Vergleich des berechneten Gesamtwassergehalts im Flachdach bei Verwendung des Lokalklimadatensatzes für die Berg-Lage mit unterschiedlich korrigierten Strahlungswerten im Vergleich zu den Messwerten in Argenbühl.

Tal-Lage

Außerhalb der HRY-Zone 9 stehen für die Tal-Lage nur die beiden Standorte Garmisch-Partenkirchen und Oberstdorf in Zone 11 zur Verfügung. Im Vergleich zu dem auf neutrale Lage korrigierten Referenzort der Zone 11, Lindenberg, sind die Abweichungen sehr ähnlich wie zwischen Eschenfelden und Fürstzell in Zone 9. Die anhand der dortigen Differenzen vorgesehene Reduktion von Temperatur, absoluter Feuchte, Globalstrahlung und Gegenstrahlung sowie die Erhöhung der Diffusstrahlung kann somit unverändert beibehalten werden.

Finale Lokalkorrekturfunktion

Nach den in diesem Kapitel vorgenommenen Modifikationen und Verallgemeinerungen sind in Bild 92 nun die finalen Korrekturfunktionen für die vier Lokalkategorien dargestellt. Angepasst werden dabei die Klimaelemente Temperatur, absolute Feuchte, atmosphärische Gegenstrahlung, Globalstrahlung und Diffusstrahlung – wobei nicht bei allen Lagen alle Klimaelemente angepasst werden müssen. Die monatlichen Korrekturfaktoren Lokalkorrekturfunktionen werden dabei auf die stündlichen Werte des Referenzstandortes addiert bzw. bei negativen Werten subtrahiert. Bei Global- und Diffusstrahlung werden die bei Subtraktion resultierenden Werte „0“ begrenzt, um keine negative Strahlung zu erzeugen. Sind im Referenzort-Datensatz keine Strahlungswerte vorhanden, wird auch am Zielort keine Strahlung erzeugt. Zur Erstellung der monatlichen Anpassungsfaktoren für die Global- und Diffusstrahlung wurden dementsprechend die Strahlungssummen über einen Monat nur durch die Anzahl der „Strahlungsstunden“ und nicht durch alle Stunden geteilt.

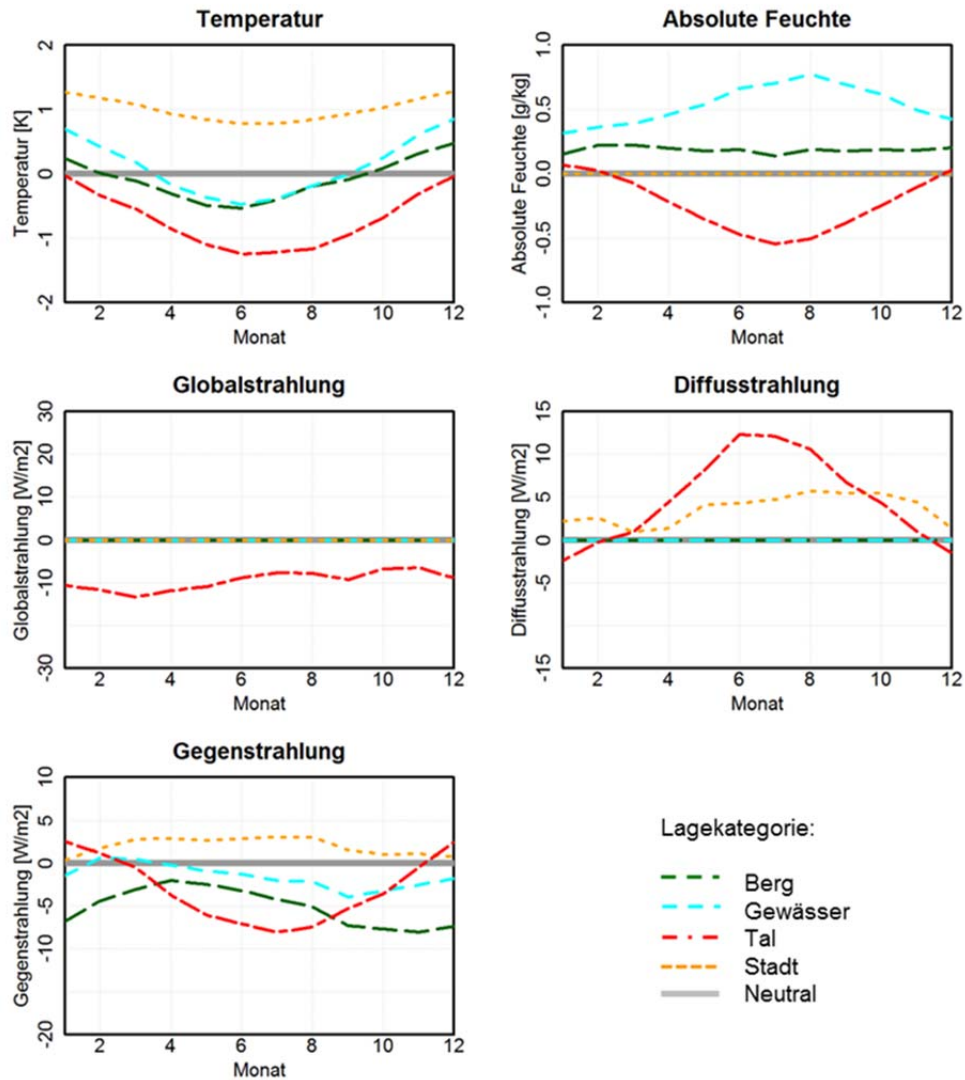


Bild 92:
Lokalkorrekturfunktionen der jeweiligen Lagekategorie für verschiedene Klimatelemente.

Gewichtung und Kombination verschiedener Lokalkorrekturfunktionen

Bei der Überprüfung der Übertragbarkeit der Lokalkorrekturfunktionen auf die anderen HRY-Zonen ist aufgefallen, dass die Übereinstimmung der Klimatelemente zwischen den abgeleiteten und den gemessenen Lokalklimadaten in einigen Fällen verbessert werden kann, wenn die Lokalklimakorrekturfaktoren verschiedener Kategorien miteinander kombiniert werden.

Ein Beispiel hierfür ist Veddel (in der HRY-Zone 2), da der Standort in einem eher dicht bebauten Gewerbegebiet liegt in dem sich aber auch zahlreiche Kanäle und Wasserflächen befinden. Damit kann Veddel sowohl in die Kategorie „Stadt“ als auch in „Gewässer“ eingeteilt werden.

Der Referenzort der HRY-Zone 2 ist der Flughafen Hamburg in der Lokalkategorie „Neutral“. Zur Prüfung, welcher Ansatz am besten für die Ableitung des Lokalklimas für Veddel geeignet ist, werden drei Varianten betrachtet: die Lokalkorrektur für „Stadt“, die für „Gewässer“ sowie eine Mittelung der Lokalkorrekturfaktoren für „Stadt“ und „Gewässer“. Die verschiedenen angepassten Werte werden wiederum mit den Messdaten von Veddel verglichen. Die angepassten sowie gemessenen Mittelwerte sind in Tabelle 20 einander gegenübergestellt. Die gemessene Temperatur in Veddel ist im Mittel um ca. 0,55 K höher als die am Flughafen. Die Temperaturerhöhung durch die Lokalkorrektur für „Stadt“ von 1,01 K ist für Veddel zu groß, die für „Gewässer“ von 0,12 K dagegen zu klein. Der Mittelwert der beiden Korrekturen von 0,56 K passt dagegen gut. Der gemessene Mittelwert der absoluten Feuchte von Veddel ist ca. 0,39 g/kg höher als am Flughafen. Mit der Lokalkorrektur „Stadt“ würde die absolute Feuchte nicht geändert, aber mit der Korrektur „Gewässer“ um 0,54 g/kg erhöht. Der Mittelwert der beiden Korrekturen beträgt 0,27 g/kg und stimmt damit ebenfalls besser mit dem Messwert überein als eine der beiden Einzelkorrekturen. Auch bei der Diffusstrahlung führt die gemittelte Korrektur zu einem besseren Ergebnis: Bei „Stadt“ würde die Diffusstrahlung um 3,55 W/m² erhöht, während bei „Gewässer“ keine Anpassung erfolgt. Die gemittelte Korrektur würde somit eine Erhöhung um 1,78 W/m² ergeben, während der gemessene Wert der Diffusstrahlung in Veddel um 2 W/m² höher ist als am Flughafen. Die Globalstrahlungswerte werden weder bei „Stadt“ noch bei „Gewässer“ korrigiert, so dass dieser Vergleich entfällt. Der Mittelwert der atmosphärischen Gegenstrahlung lässt sich dagegen etwas besser durch die Lokalkorrektur „Stadt“ mit den Messwerten in Veddel in Übereinstimmung bringen. Insgesamt aber führen die gemittelten Korrekturfaktoren für „Stadt“ und „Gewässer“ zur besten Übereinstimmung des vom Flughafen abgeleiteten Klimas mit den gemessenen Bedingungen.

Tabelle 20:

Vergleich der Mittelwerte der in Veddel gemessenen Klimaelemente mit den vom Standort Flughafen mit verschiedenen Korrekturfaktoren abgeleiteten Daten. Es erfolgt einmal eine Korrektur mit der Lokalklimakorrektur „Stadt“, einmal mit „Gewässer“ und einmal als Kombination der beiden Kategorien (mittlere Werte). Die Variante mit der jeweils besten Übereinstimmung mit den Messdaten von Veddel ist grau markiert.

Klimaelement	Mittelwert von Messdaten		Lokalangepassten Mittelwert mit Lokalklimakorrekturfaktoren von verschiedenen Lagekategorien		
	Flughafen	Veddel	Lagekategorien		
			Stadt	Gewässer	Stadt + Gewässer
Temperatur	9,79	10,34	10,80	9,91	10,35
Absolute Feuchte	6,24	6,63	6,24	6,78	6,51
Diffusstrahlung	134,19	136,24	137,74	134,19	135,96
Gegenstrahlung	321,14	324,69	323,14	319,61	321,61

Als weiteres Beispiel wird Dortmund in der HRY-Zone 5 herangezogen. Hier befindet sich Klimamessstation nicht in der Stadtmitte sondern am Stadtrand. Die Werte von Dortmund werden mit denen der Station Münster/Osnabrück in neutraler Lage am Flughafen verglichen. Der Vergleich in Tabelle 21 zeigt in Dortmund jeweils höhere Werte für Temperatur, Diffusstrahlung und Gegenstrahlung. Durch die Lokalkorrektur „Stadt“ werden diese drei Klimaelemente erhöht - die Erhöhungen sind aber im Vergleich zu den Messwerten zu hoch. Da Dortmund keine andere Lagekategorie aufweist, der Standort der Messstation aber nicht in der Stadt sondern an deren Rand liegt, erfolgt in einer zweiten Variante die Korrektur nur mit einem Faktor von 0,5 der eigentlichen Anpassung. Diese „halbierten“ Korrekturfaktoren führen zu einer besseren Übereinstimmung der angepassten mit den gemessenen. In der Tabelle sind beide Anpassungsvarianten angegeben und die besser übereinstimmenden Werte wiederum grau markiert.

Tabelle 21:

Vergleich der Mittelwerte der in Dortmund gemessenen Klimaelemente mit den vom Standort Münster/Osnabrück abgeleiteten Daten. Es erfolgt eine Korrektur für „Stadt“ mit einer Gewichtung von 1,0 und von 0,5. Die Variante mit der jeweils besten Übereinstimmung mit den Messdaten von Dortmund ist grau markiert.

Klimaelement	Mittelwert von Messdaten		Lokalangepassten Mittelwert mit Lokalklimakorrekturfaktoren von „Stadt“ mit verschiedenen Gewichtung	
	Münster	Dortmund	Gewichtung	
			1,0	0,5
Temperatur	8,03	8,43	9,04	8,53
Diffusstrahlung	112,76	115,05	116,31	114,53
Gegenstrahlung	310,36	309,81	312,36	311,36

Wie die beiden beschriebenen Beispiele zeigen, können die Lokalklimakorrekturfaktoren für die vier verschiedenen Lagekategorien bei Bedarf auch kombiniert und gewichtet angewendet werden, um eine bessere Übereinstimmung mit den realen Klimabedingungen am Zielort zu erreichen. Auch wenn andere Kombinationen bei den untersuchten Standorten nicht aufgetreten sind, kann doch davon ausgegangen werden, dass auch andere Kombinationen sinnvoll eingesetzt werden können. Beispielsweise können sich bei einem Ort am See und in Tal-Lage durch die Kombination der beiden Lokalkorrekturfunktionen eine höhere Feuchte (als Effekt der Gewässer-Lage) sowie eine geringere Globalstrahlung (als Effekt der Tal-Lage) als am Referenzort in neutraler Lage ergeben.

Die Gewichtung kann auf Basis der bisherigen Untersuchungen lediglich anhand von Schätzungen erfolgen. Bei für die Bauteilbeurteilung günstigeren lo-

kalen Bedingungen wird empfohlen, die Gewichtungen im Zweifel geringer zu wählen. Dies gilt beispielsweise für die Korrektur „Stadt“ bei der die Erhöhung der Temperaturen und der Gegenstrahlung höhere Temperaturen im Bauteil und damit geringere Feuchteanreicherungen und eine bessere Trocknung bedingen. Im Gegensatz dazu sollte die Gewichtung von „Berg“ und „Tal“, mit im Vergleich zum neutralen Standort kritischeren Bedingungen im Zweifel eher höher angesetzt werden, um für den Zielstandort auf der sicheren Seite zu liegen. Bei diesen beiden Korrekturen werden die Temperatur sowie die Gegenstrahlung gesenkt sowie bei „Berg“ zusätzlich die absolute Feuchte erhöht.

Bild 93 zeigt ein Schema mit den verschiedenen Lokalkategorien und den möglichen Gewichtungen bei der Ableitung vom Referenzort. Richtwert für die Gewichtung in den dunkel gefärbten Bereichen ist 1,0 und in den heller gefärbten Bereichen 0,5. Befindet sich ein Zielort in einem, mehreren Lagekategorien zuzuordnenden Bereich können die Korrekturfunktionen mit jeweils geeigneten Gewichtungen miteinander kombiniert werden.

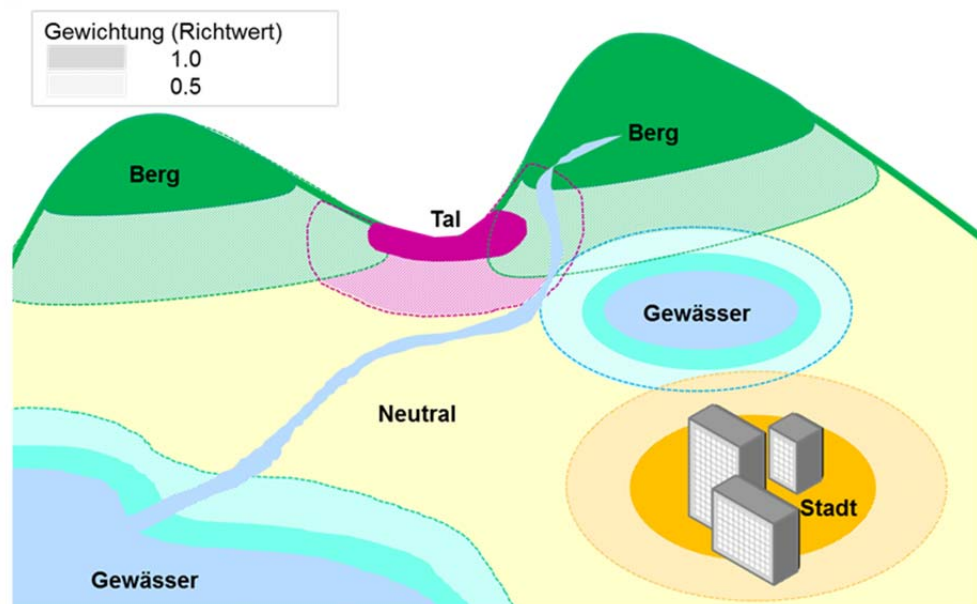


Bild 93: Schematische Darstellung der fünf Lagekategorien als Orientierungshilfe für Auswahl und Gewichtung der Lokalklimakorrektur.

3.5.5 Zusammenstellung der Lokalanpassungsmethode für einzelnen Klimaelement

In Tabelle 22 sind die zuvor beschriebenen Lokalanpassungsmethoden für die einzelnen Klimaelemente zusammengefasst. Die stündlichen Werte der Temperatur, absoluten Feuchte und Gegenstrahlung des Referenzorts werden zunächst mit der jeweiligen Höhenkorrektur auf die Meereshöhe des Zielstandorts übertragen.

Tabelle 22:
Lokalanpassungsmethode.

Klimaelement	Lokalanpassungsmethode		
	Höhenkorrektur	Korrekturfunktion	Sonstige
Temperatur	✓	✓	-
Relative Feuchte	-	-	Abgeleitet aus der bereits angepassten Temperatur und der absoluten Feuchte
Absolute Feuchte	✓	✓	-
Globalstrahlung	-	✓	-
Diffusstrahlung	-	✓	-
Gegenstrahlung	✓	✓	-
Windrichtung	-	-	I.d.R. keine Anpassung; Optional eine globale Richtungskorrektur möglich
Windgeschwindigkeit	-	-	Multiplikation mit konstantem Anpassungsfaktor
Niederschlag	-	-	Multiplikation mit konstantem Anpassungsfaktor

Im zweiten Schritt werden die Werte von Temperatur, absoluter Feuchte, Global-, Diffus- und Gegenstrahlung mit Hilfe der Lokalkorrekturfunktionen entsprechend der Lagekategorie des Zielorts angepasst. Für die nicht lagespezifisch definierbare Klimaelementen wie die Sonnenstrahlung in der Berg- sowie Gewässer-Lage sind aber keine Korrekturfunktionen definiert. Tabelle 23 zeigt den Überblick über die vorhandenen Korrekturfunktionen für jede Lagekategorie. Anhand der definierten Korrekturfunktionen erfolgt eine Addition oder Subtraktion der Korrekturwerte des jeweiligen Monats (Monatsmittelwerte) auf die stündlichen Daten des Referenzdatensatzes. Falls der Referenzort selbst sich nicht in einer neutralen Lage befindet, wird zuvor mit der gleichen Methode eine inverse Korrektur des Referenzstandorts auf die neutrale Lage durchgeführt. Die relative Feuchte wird nicht direkt angepasst, sondern anhand der bereits angepassten Temperatur und absoluten Feuchte berechnet.

Tabelle 23:
Die vorhandene Lokalkorrekturfunktion für jede Lagekategorie.

Klimaelement	Lage			
	Berg	Gewässer	Stadt	Tal
Temperatur	✓	✓	✓	✓
Absolute Feuchte	✓	✓	-	✓
Globalstrahlung	-	-	-	✓
Diffusstrahlung	-	-	✓	✓
Gegenstrahlung	✓	✓	✓	✓

Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Niederschlagsmenge am Zielort werden anhand der Jahresmittelwerte oder -summen z.B. aus lokalen Messungen oder Wind- und Niederschlagskarten des DWD (Bild 80, Bild 81) sowie zusätzlich durch Beurteilung der lokalen Exposition durch den Nutzer angepasst.

So kann die Windrichtung z.B. so gedreht werden, dass Sie der Achse eines Tales entspricht.

3.6 Validierung

Die Übertragbarkeit und Gültigkeit der Lokalklimakorrekturfaktoren für alle HRY-Zonen wurde im vorigen Kapitel überprüft und bestätigt. Das Kriterium, dass die mit den Modellen generierten Klimadatenätze im Vergleich zu den gemessenen tendenziell bei einer hygrothermischen Simulation eher etwas kritischere Feuchteverhältnisse erzeugen sollen, wurde bei der Festlegung der finalen Korrekturfunktionen für alle Lagekategorien berücksichtigt. In Einzelfällen wurde diese Überprüfung auch bereits beschrieben. In diesem Kapitel wird nun das hygrothermische Verhalten der vier verschiedenen Konstruktionen mit den für alle Lagekategorien abgeleiteten und den gemessenen Klimadaten miteinander verglichen und zusammenfassend dargestellt. Im zweiten Unterkapitel wird statistisch die Effektivität der Lokalklimamodelle anhand der sich ergebenden Mittelwerte und Bandbreiten der einzelnen Klimaelemente an allen 74 Standorte untersucht und überprüft, ob die Lokalklimaanpassungen zu einer realitätsnäheren und aus hygrothermischer Sicht sichereren Bewertung beitragen. Eine weitere Überprüfung der Modelle erfolgt anhand der eigenen Klimamessungen in der Umgebung des IBP-Versuchsgeländes in Holzkirchen.

3.6.1 Hygrothermischen Bauteilsimulationen mit lokalangepassten Klimadatenätzen

In diesem Kapitel wird die Eignung der Lokalklimamodelle anhand der mit Hilfe hygrothermischer Bauteilsimulationen ermittelten Feuchteverhältnisse in repräsentativen Bauteilen überprüft. Hierfür werden bei den Simulationen jeweils gemessene und mit den Modellen erstellte Klimadatenätze miteinander verglichen. Als Messdaten werden die Datenätze der jeweiligen Repräsentanzorte für die Lagekategorie verwendet. In Zone 9 sind dies München für Stadt-Lage, Lindau für Gewässer-Lage, Argenbühl für Berg-Lage und Eschenfelden für Tal-Lage. Die Modelldatenätze werden mit den Korrekturfunktionen vom Referenzstandort Fürstentzell abgeleitet (im Folgenden als „Lokalklimadatenatz“ bezeichnet). Dabei werden Windrichtung und –geschwindigkeit, die nicht von der Lagekategorie sondern von der jeweiligen Umgebung des Standorts beeinflusst werden, nicht angepasst. Für die Niederschlagsmenge wird dagegen die Jahressumme des jeweiligen Repräsentanzorts aus der Niederschlagskarte des DWD (Bild 80) übernommen. Die hygrothermischen Simulationen werden mit dem am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelten Programm WUFI® durchgeführt. Bewertet werden die berechneten Wassergehaltsverläufe der bereits beschriebenen vier verschiedenen Konstruktionen. Die genauen Aufbauten und die Berechnungsrandbedingungen der Simulation sind in Kapitel 2.3.1 beschrieben.

In Bild 95 bis Bild 98 sind die Simulationsergebnisse der vier Standorte mit gemessenen und abgeleiteten Daten einander gegenübergestellt. In jeder Graphik sind zwei Kurven: die roten Linien stellen die Ergebnisse auf Basis der Lokalklimadatenätze und die blauen auf Basis der Messdaten dar. Dabei sind je-

weils links die Verläufe des Gesamtwassergehalts der Konstruktion und rechts die Verläufe des Wassergehalts in der jeweils kritischen Schicht (Holzschalung, OSB-Platte oder Ziegel) der Konstruktion angegeben. Sofern ein kritischer Wassergehalt bekannt ist, wird dieses Niveau durch die gestrichelte rote Linie markiert wie z.B. die zulässige Holzfeuchte in Holz oder Holzwerkstoffen nach DIN 68800 [34].

Die abgeleiteten Datensätze sollen im Sinne des Projektziels zu ähnlichen oder leicht kritischeren (=höheren) Werten führen als die Messdaten - also die rote Kurve jeweils über der blauen Kurve liegen. Dieses Ergebnis wird auch bei allen vier Standorten und allen Konstruktionen erreicht. Einzige Ausnahme ist das Blechdach am Standort München. Hier ist der Wassergehalt sowohl in der gesamten Konstruktion als auch in der Weichholzschicht zwar im ersten Winter bei Anwendung des Lokalklimadatensatzes (rot) noch leicht höher als mit den Messdaten von München (blau). Ab dem zweiten Winter dreht sich dieses Verhältnis aber um, und in der Folge bleiben die mit den Messdaten berechneten Wassergehalte aber leicht höher als die abgeleiteten Daten. Da die Abweichung aber nur gering ist, sich über die Jahre nicht akkumuliert und der absolut höchste Wassergehalt im ersten Winter mit dem Lokalklimadatensatz erreicht wird, kann dies noch toleriert werden.

Ansonsten wird deutlich, dass die verschiedenen Lagekategorien durchaus zu signifikanten Unterschieden bei den Ergebnissen führen. Beim Blechdach ist der Wassergehalt in der kritischen Weichholzschalung im letzten Winter in München mit gut 16 M.-% am niedrigsten, gefolgt Lindau von mit 17 M.-% sowie Eschenfelden und Argenbühl mit jeweils gut 18 M.-%. Noch etwas größer ist die Spreizung beim Gründach mit maximal 15 M.-% im ersten Winter im milden Stadtklima von München und gut 19 M.-% in der strahlungsarmen Tal-Lage von Eschenfelden. Auch beim hellen Flachdach bleibt die Feuchte in Eschenfelden mit gut 17 % ähnlich deutlich über dem Wert von 15 M.-% in München.

Bei der Westwand in Lindau, Eschenfelden und München zeigen die roten Kurven (Lokalklimadatensatz) einen deutlich höheren Wassergehalt als die blauen Kurven (gemessenen Datensätze). Diese Differenz ist auf die unterschiedlichen Schlagregenmengen auf die zurückzuführen. In Lindau liegt der Gesamtwassergehalt mit dem Lokalklimadatensatz (roten Kurve) um ca. 30 kg/m² höher als die blaue Kurve mit Verwendung der Messdaten (Bild 95). Die jährliche Schlagregensumme aus Westen beträgt bei Lokalklimadatensatz mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 3,2 m/s bei 950 mm/a und bei der Messung aufgrund der deutlich geringeren Windgeschwindigkeit von im Mittel 1,9 m/s nur 300 mm/a. In Bild 94 sind die Schlagregenrose sowie die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und die Jahresniederschlagsmenge beider Datensätze dargestellt. Auch die Hauptwindrichtung unterscheidet sich leicht mit Südwest in Lindau und West im Lokalklimadatensatz. In Eschenfelden ist der Unterschied mit 700 mm/a im abgeleiteten und aufgrund der deutlich geringeren Windgeschwindigkeit nur 160 mm/a im Messdatensatz ebenfalls sehr deutlich. Dementsprechend sollten für Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Nieder-

schlagsmenge nicht die Lagekategorien herangezogen werden, sondern die standortspezifischen Daten z.B. aus der Niederschlagskarte und der Windkarte des DWD verwendet werde. Beim Wind ist allerdings zu beachten, dass unabhängig von der lokalen Windgeschwindigkeit die genaue Lage des Gebäudes von entscheidendem Einfluss ist und vom Planer selbst eingeschätzt werden muss.

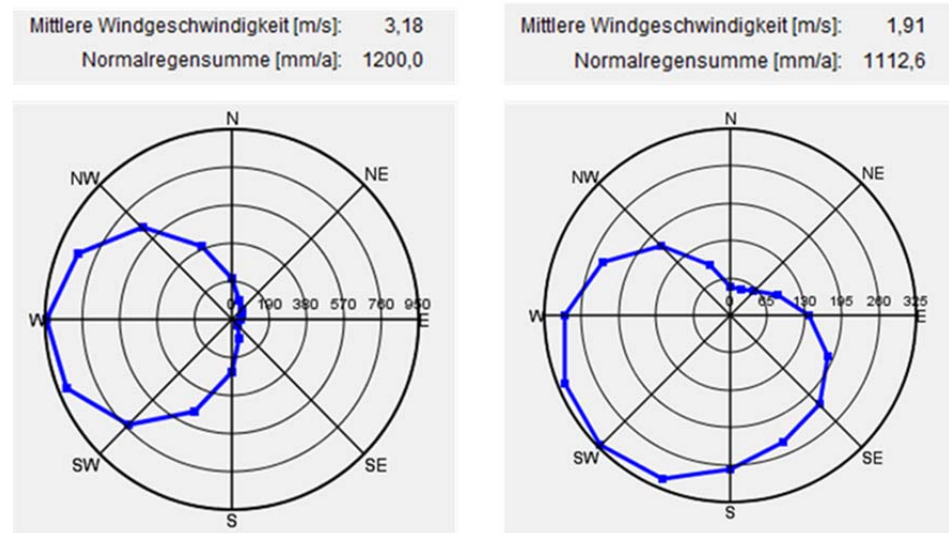


Bild 94:
Schlagregenrose aus WUFI®. Links basierend auf dem Lokalklimadatenatz und rechts auf den Messdaten von Lindau.

Durch den Vergleich der hygrothermischen Simulationen zwischen dem Lokalklimadatenatz und den Messdaten wird bestätigt, dass das Lokalklimamodell sehr ähnliche Klimabedingungen bezüglich Temperatur, Luftfeuchte, Global- und Diffusstrahlung sowie atmosphärische Gegenstrahlung wie die jeweiligen Repräsentanzorte erzeugt. Bei Abweichungen führen die abgeleiteten Datensätze tendenziell zu etwas kritischen Bewertungen bei der hygrothermischen Simulation.

Lindau, Gewaesser

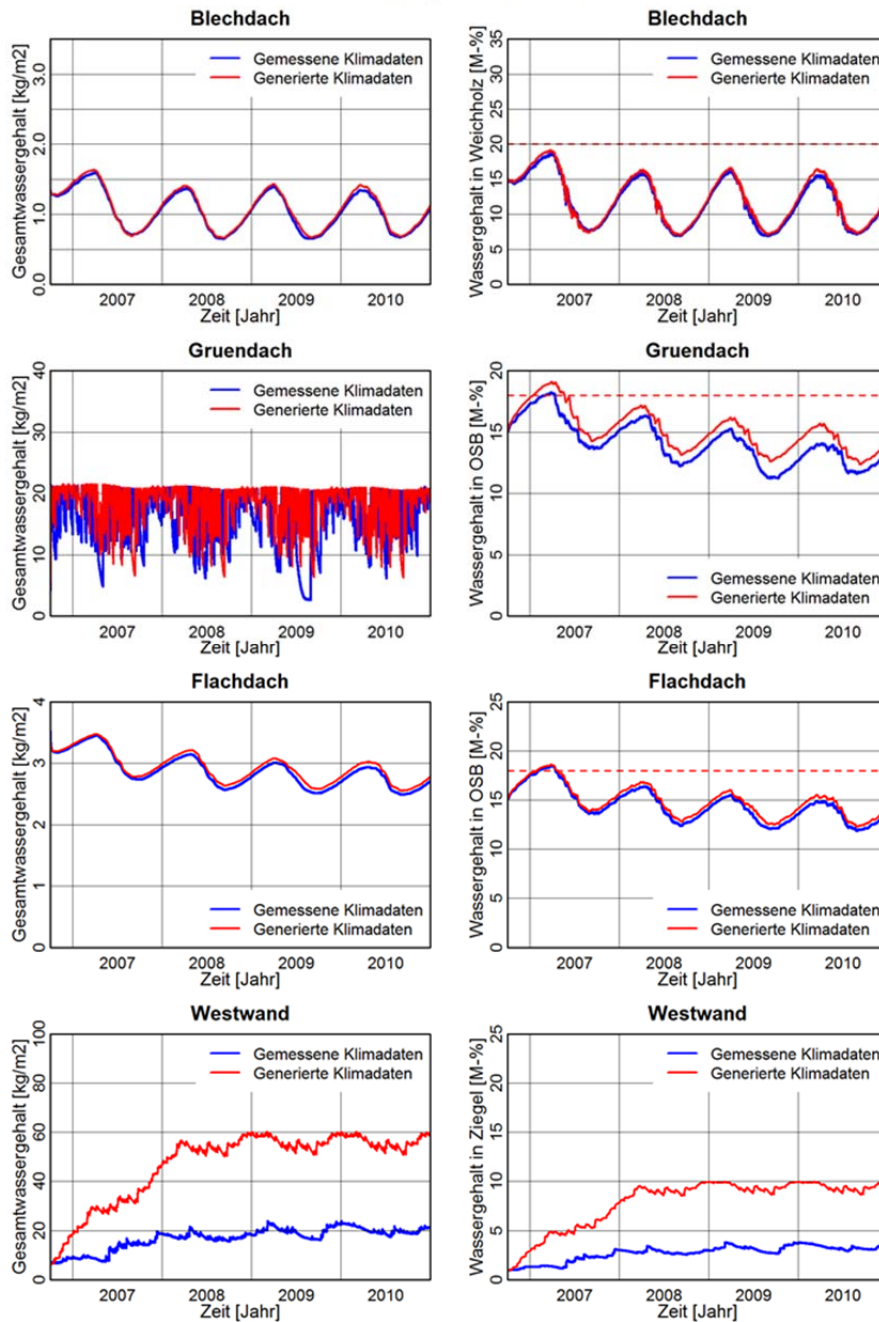


Bild 95:

Ergebnis der hygrothermischen Simulation. Die verwendete Klimadaten sind der Lokalklimatensatz (rot: basiert auf der Messdaten von Fürstenzell mit den Lokalklimamodellen für „Gewässer“ erstellt) und die Messdaten von Lindau (blau). Für vier Konstruktionen jeweils Gesamtwassergehalt (links) sowie Wassergehalt in Schicht mit Schadenspotenzial (rechts). Die roten gestrichelten Linien markieren den kritischen Wassergehalt nach [34].

Argenbuehl, Berg

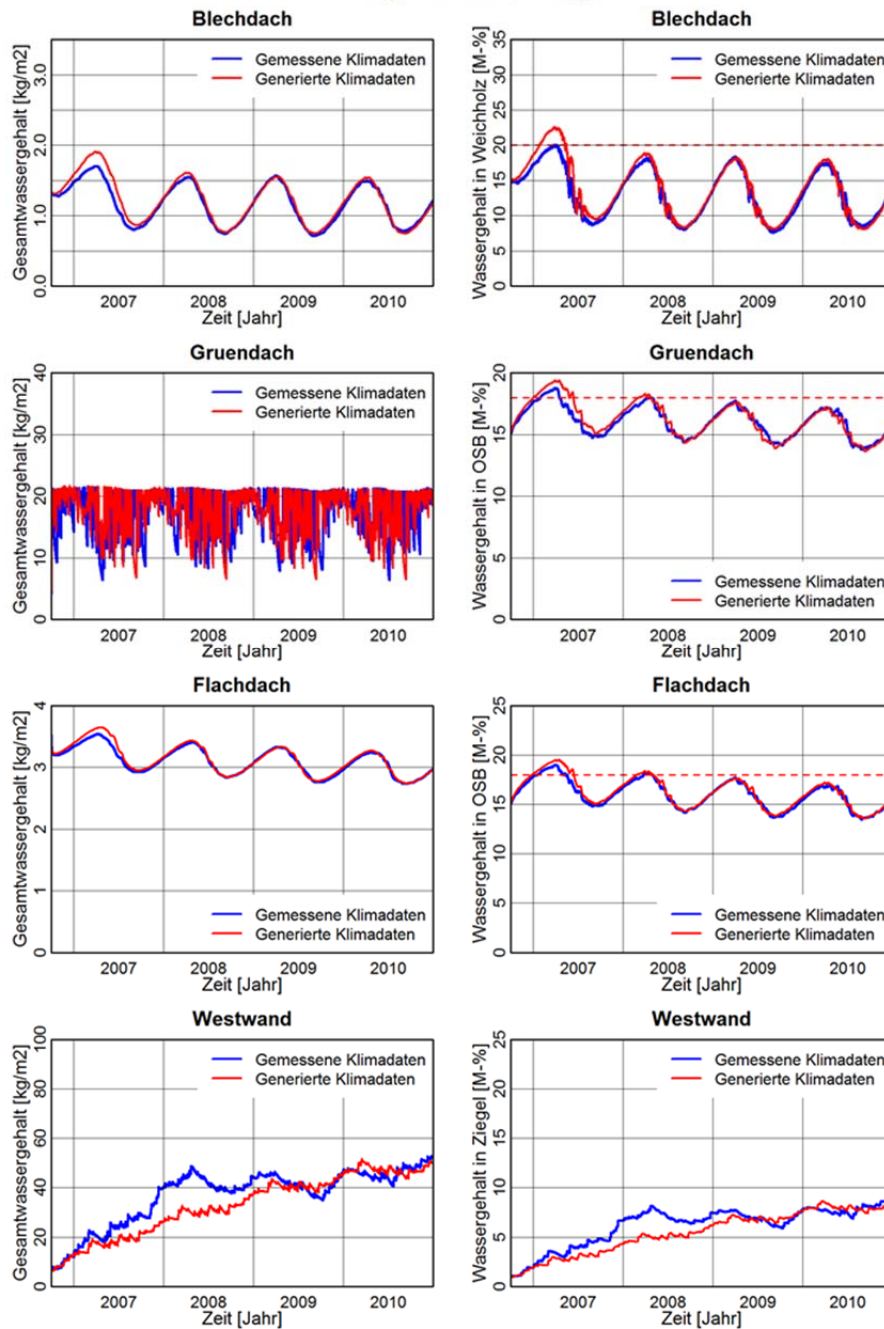


Bild 96:

Ergebnis der hygrothermischen Simulation. Die verwendete Klimadaten sind der Lokalklimadatenatz (rot: basiert auf der Messdaten von Fürstenzell mit den Lokalklimamodellen für „Berg“ erstellt) und die Messdaten von Argenbühl (blau). Für vier Konstruktionen jeweils Gesamtwassergehalt (links) sowie Wassergehalt in Schicht mit Schadenspotenzial (rechts). Die roten gestrichelten Linien markieren den kritischen Wassergehalt nach [34].

Eschenfelden, Tal

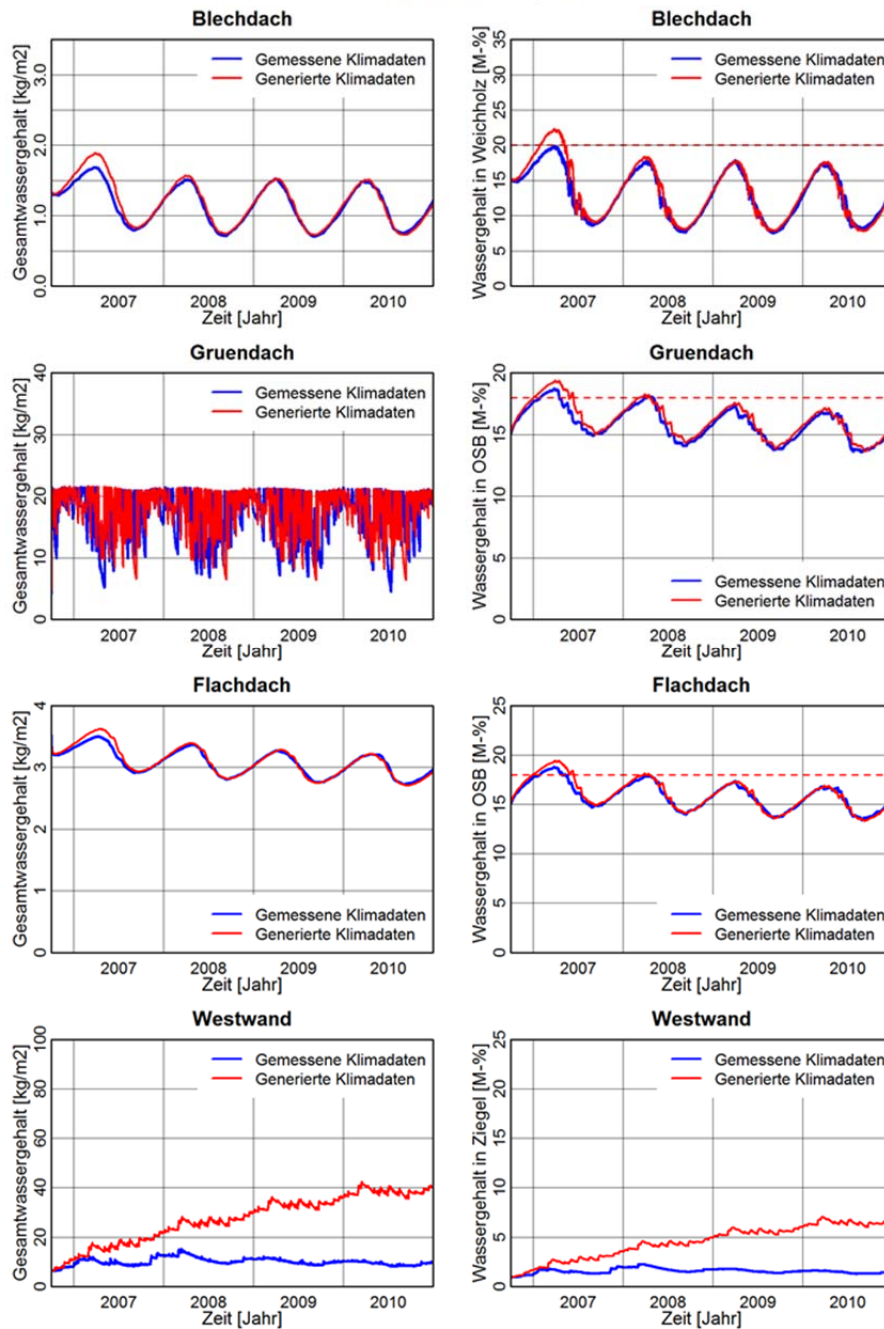


Bild 97:

Ergebnis der hygrothermischen Simulation. Die verwendete Klimadaten sind der Lokalklimadatenatz (rot: basiert auf der Messdaten von Fürstencell mit den Lokalklimamodellen für „Tal“ erstellt) und die Messdaten von Eschenfelden (blau). Für vier Konstruktionen jeweils Gesamtwassergehalt (links) sowie Wassergehalt in Schicht mit Schadenspotenzial (rechts). Die roten gestrichelten Linien markieren den kritischen Wassergehalt nach [34].

Muenchen, Stadt

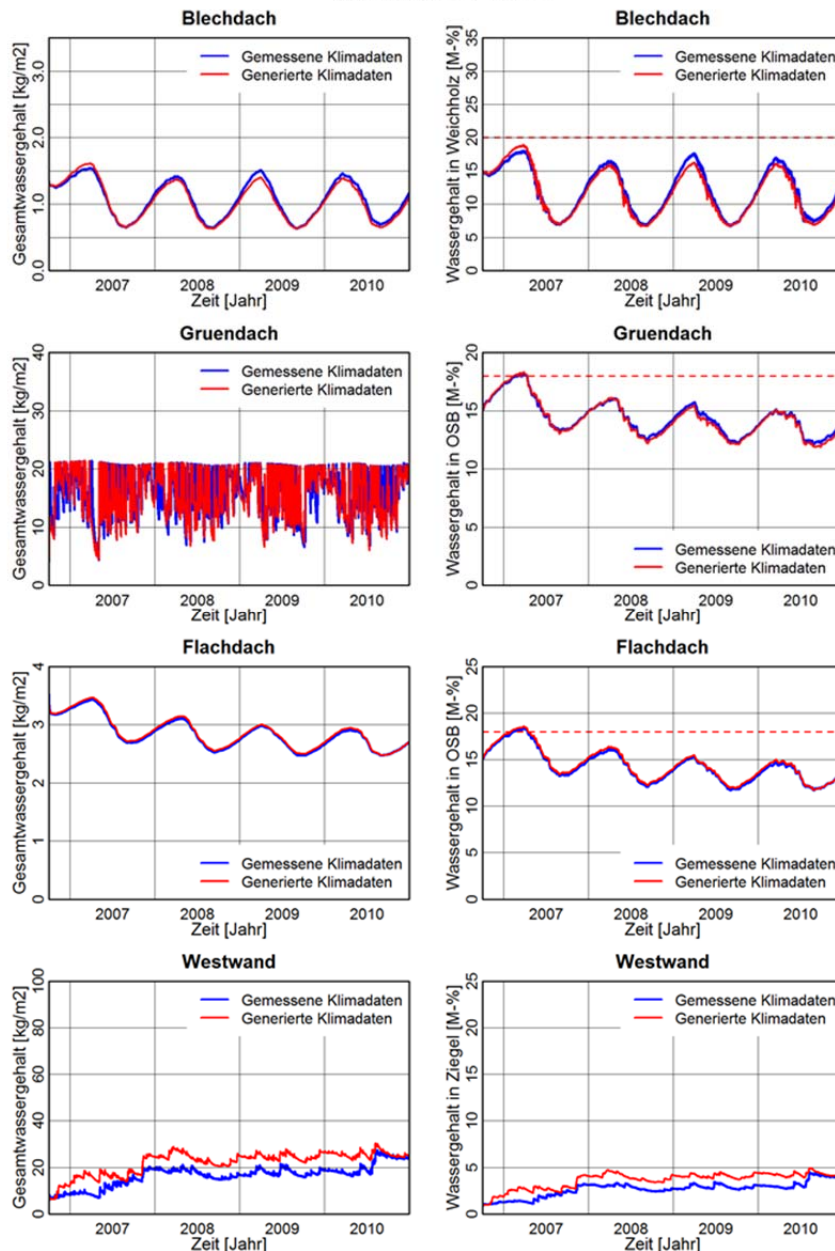


Bild 98:

Ergebnis der hygrothermischen Simulation. Die verwendete Klimadaten sind der Lokalklimadatensatz (rot: basiert auf der Messdaten von Fürstencell mit den Lokalklimamodellen für „Stadt“ erstellt) und die Messdaten von München (blau). Für vier Konstruktionen jeweils Gesamtwassergehalt (links) sowie Wassergehalt in Schicht mit Schadenspotenzial (rechts). Die roten gestrichelten Linien markieren den kritischen Wassergehalt nach [34].

3.6.2 Effektivität der Lokalklimamodelle

In diesem Kapitel wird anhand einer statistischen Auswertung kurz abgeschätzt, welche Verbesserung die Anwendung der Lokalklimamodelle auf die

HRY-Datensätze im Vergleich zu den unangepassten HRY-Daten und zu den real gemessenen Werten erzielt. Hierfür werden die Fünf-Jahres-Messdaten der 74 Lokalklimastandorte in Deutschland (siehe auch Tabelle 62) ausgewertet und der Mittelwert für jedes Klimaelement erstellt. Ebenso werden die Mittelwerte der 11 HRY-Referenzdatensätze gebildet.

Die Abweichungen zwischen den Referenzdatensätzen und den Messdatensätzen der jeweiligen HRY-Zone sind mit Mittelwert und Bandbreite als Boxplot Bild 99 jeweils im rechten Diagramm dargestellt. Für diesen Vergleich werden die 11 HRY-Referenzdatensätze entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise für die 74 Lokalklimastandorte angepasst (Höhenkorrektur und Lokalkorrekturfunktion) und ebenfalls die Abweichung zu den Messdaten angegeben (Bild 99 Diagramme jeweils rechts). Bei den Standorten, die entsprechend Tabelle 62 in zwei Lokalkategorien einzuteilen sind, werden die Lokalkorrekturfaktoren der entsprechenden Kategorien jeweils mit dem Faktor 0,5 gewichtet.

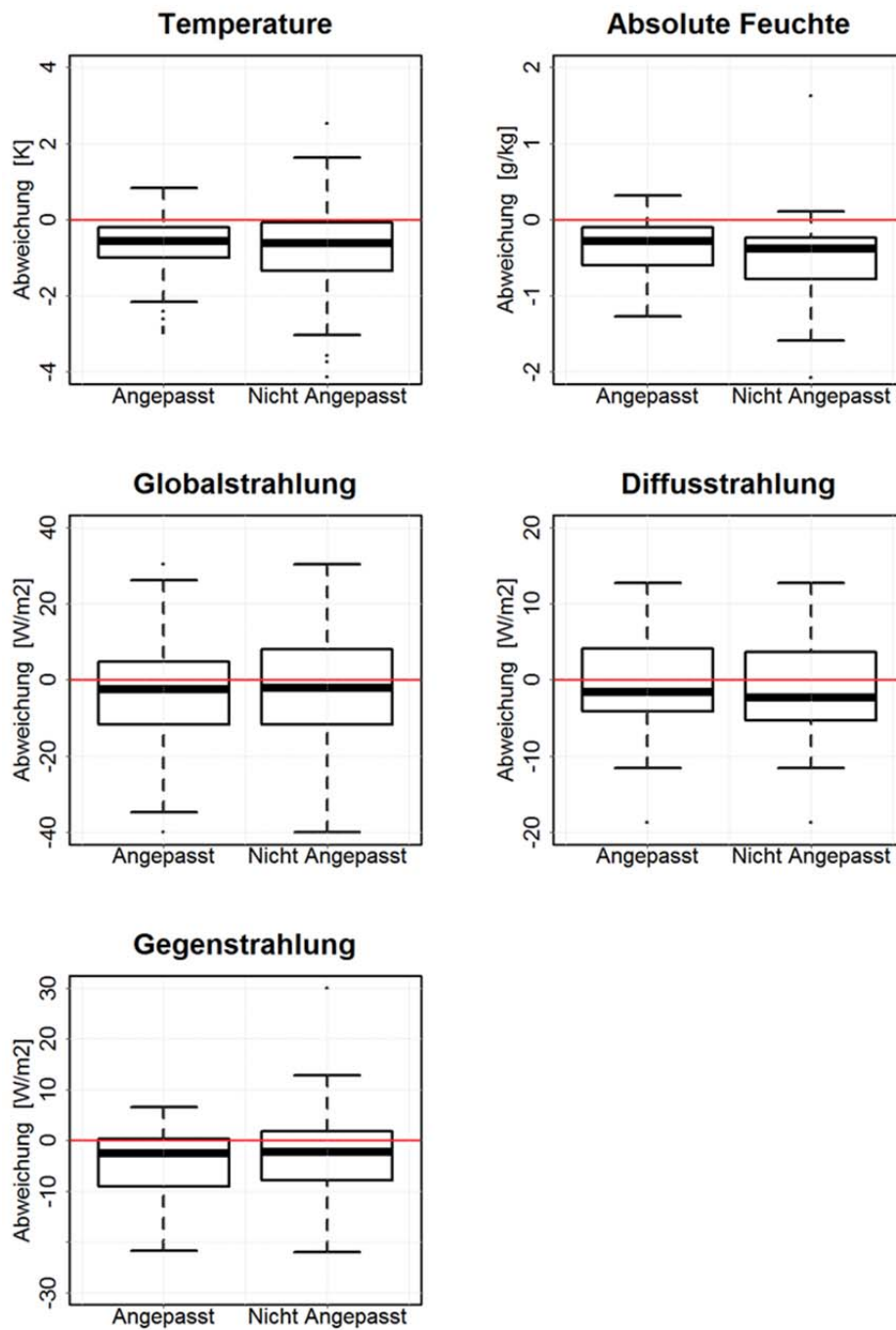


Bild 99:

Abweichungen zwischen den Mittelwerten der lokalkorrigierten (jeweils links) und unveränderten HRY-Datensätze (jeweils rechts) zu den 74 Messdatensätzen.

Zur Bewertung der Übereinstimmung der lokalkorrigierten und unveränderten HRY mit den Messdaten, werden für jeden Standort die Abweichungen der Mittelwerte zwischen den Referenzdatensätzen der zugehörigen Zone und dem Messdatensatz verglichen. Es gilt: Je kleiner die Abweichung bezüglich Mittelwert und Bandbreite ist, desto besser stimmen die HRY mit den Messdaten

überein. Hierbei bedeutet der Wert 0 auf der Y-Achse (rote Linie) eine perfekte Übereinstimmung der HRY-Datensätze (links mit, rechts ohne Lokalklimakorrektur) mit den Messdatensätzen. Ein positiver Wert besagt, dass die Mittelwerte der HRY-Datensätze höher als die der Messdatensätze liegen. Dabei kann festgestellt werden, dass sich durch die Lokalkorrektur die Differenzen zu den Messdaten bei Temperatur, absolute Feuchte und Diffusstrahlung im Vergleich zu den unveränderten HRY verringern. Ebenso werden auch die Bandbreiten der Abweichungen bei Temperatur und Globalstrahlung kleiner.

Die absoluten Feuchten bleiben mit und ohne Lokalkorrektur der HRY an den meisten betrachteten Standorten etwas niedriger als bei den Messdaten. Durch das Lokalklimamodell werden die absoluten Feuchten jedoch erhöht, was zu einer besseren Übereinstimmung mit den Messdaten führt. Die Schwankungsbreite der Abweichungen der Diffusstrahlung lässt sich durch die Lokalkorrekturen nicht reduzieren bzw. verbessern. Jedoch bringt die leichte Erhöhung der Diffusstrahlung der HRY durch das Lokalklimamodell eine bessere Übereinstimmung mit den Messdaten. Eine mögliche Überbewertung der atmosphärischen Gegenstrahlung der HRY wird durch die lokale Anpassung vermieden. Die Veränderungen der absoluten Feuchte und der atmosphärischen Gegenstrahlung führen dazu, dass die hygrothermischen Bauteilsimulationen auf der sicheren Seite liegen.

Zusammenfassend führt die Anwendung der Lokalklimamodelle also zu einer besseren Übereinstimmung mit den Messdaten als die Verwendung der unangepassten Referenzdatensätze (HRY).

3.6.3 Überprüfung anhand der Messdaten in der Umgebung des IBP

In Kapitel 3.3 wurden bereits die gemessenen Klimadaten an den vier im Umkreis des IBP installierten Lokalklimastationen miteinander verglichen. Diese Daten werden nun ebenfalls zur Validierung der entwickelten Lokalklimamodelle herangezogen. Dazu werden die gemessenen Klimadaten auf dem Gelände des IBP mit den Lokalklimamodellen angepasst und die angepassten Klimadaten mit den Messdaten der Stationen verglichen. Neben der jeweiligen Höhenkorrektur werden zur Anpassung für das Mangfalltal die Lokalklimakorrekturfunktion „Tal“ sowie für den Taubenberg die Korrekturfunktion „Berg“ verwendet.

Höhenkorrektur

Um den Einfluss der Höhendifferenz herauszurechnen, werden die ermittelten Temperaturwerte mit der in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Höhenkorrektur von $-0,0041 \text{ K/m}$ auf die Höhe des IBP (682 m) umgerechnet. Die höhenkorrigierte Darstellung in Bild 100 zeigt, dass die Temperaturen im Mangfalltal generell am niedrigsten liegen, gefolgt von der Station im Wald mit ca. 0,5 K höheren Werten. Die Temperaturen auf dem Freilandversuchsgelände des IBP liegen nochmals um ca. 0,5 K höher als im Wald. Während die Kurven der drei Stationen im Mangfalltal, im Wald und am IBP über das Jahr hinweg ungefähr parallel verlaufen, liegt der Temperaturverlauf am Taubenberg vor allem im

Dezember deutlich höher (bis zu ca. 2,5 K) als an den anderen Messstationen. Dieser Effekt wurde bereits in Kapitel 3.3.2 diskutiert.

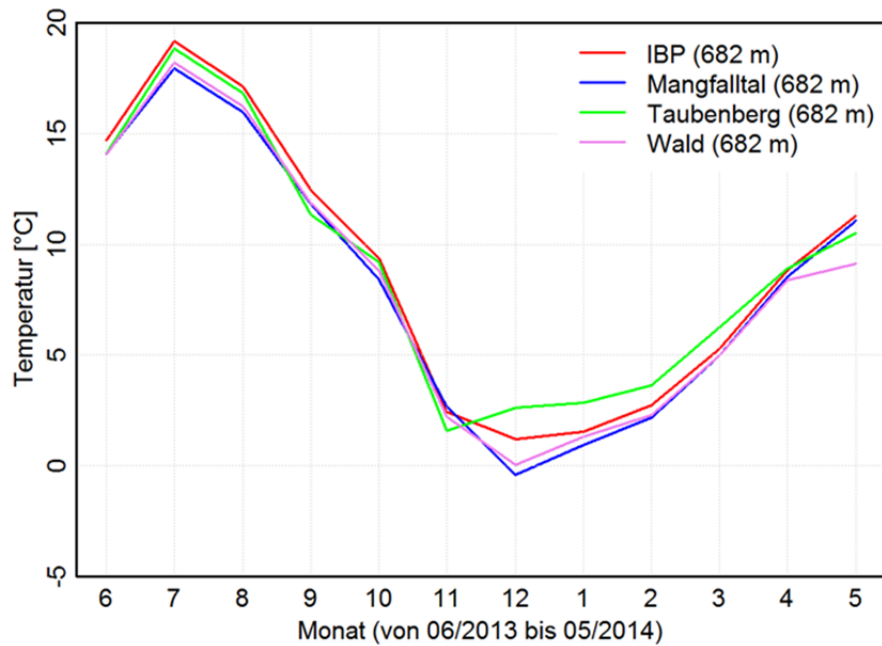


Bild 100:
Auf die Höhe der IBP-Station (682 m) umgerechnete Monatsmittelwerte der Temperatur von Juni 2013 bis Mai 2014.

Ebenso werden die absoluten Feuchten mit den in Kapitel 3.5.2 ermittelten Höhenkorrekturfaktoren von $-0,0012 \text{ (g/kg)/m}$ auf die Höhe des IBP von 682 m umgerechnet. Das Ergebnis ist in Bild 101 dargestellt und enthält somit nur noch den Einfluss der unterschiedlichen Lagen. Die Unterschiede der Monatsmittelwerte der vier Stationen sind im Sommer größer als im Winter. Am IBP liegt die absolute Feuchte über das gesamte Jahr am höchsten. Die Werte am Taubenberg sind in den Sommermonaten am niedrigsten und im restlichen Jahr etwa auf dem gleichen Niveau wie im Wald und auf dem Taubenberg.

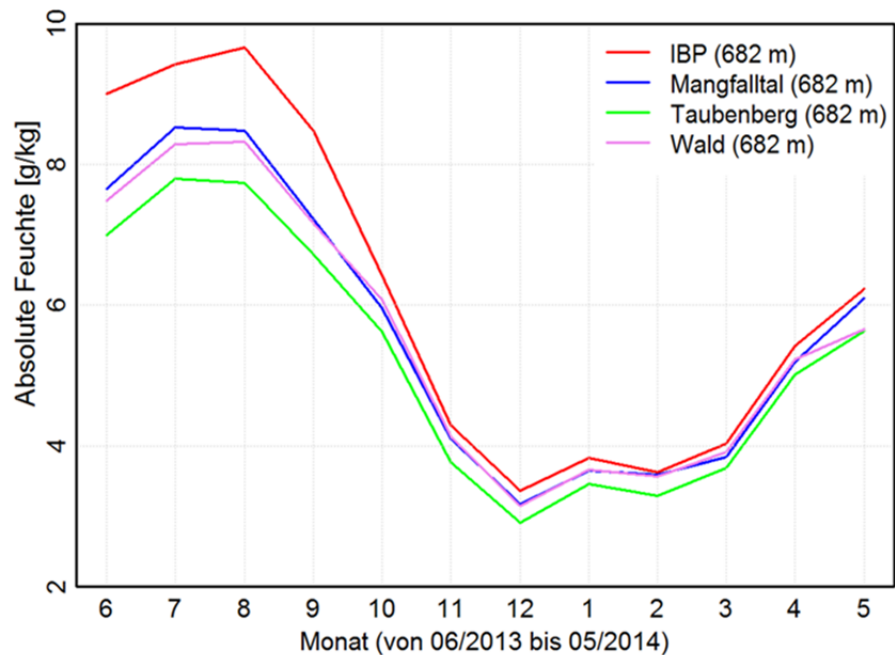


Bild 101:
 Auf die Höhe der IBP-Station (682 m) umgerechnete Monatsmittelwerte der absoluten Feuchten von Juni 2013 bis Mai 2014. Bei der Berechnung wurden nur Messdaten unter 95 % RH berücksichtigt.

Lokalkorrekturfunktion

Im Folgenden werden nun die Temperaturen zusätzlich zur Höhenkorrektur mit Hilfe der Lokalkorrekturfunktionen für Mangfalltal und Taubenberg angepasst. Da für die Lageexposition Wald aufgrund der nicht relevant erhöhten Luftfeuchte und mangels weiterer Stationen für die Überprüfung keine Korrekturfunktionen entwickelt wurden, erfolgt für diese Station auch keine Auswertung. In Bild 102 bis Bild 106 werden anhand der Jahresverläufe der Temperatur, der relativen Feuchte sowie der Globalstrahlung die Messdaten mit den abgeleiteten Daten sowie mit denen der Station des IBP verglichen. Zusätzlich zu den Stundenwerten wird auch das gleitende Mittel dargestellt (dicke Kurven).

Die abgeleiteten Temperaturkurven liegen im Mangfalltal meist zwischen den Kurven der IBP-Station und den dortigen Messdaten (Bild 102). Die Anpassung deckt die gemessenen Werte dabei teilweise gut ab, es gibt aber auch Perioden (v.a. in Dezember und Januar) während derer sie im Mittel um bis zu etwa 5 K unter den abgeleiteten Temperaturen bleiben. Da weitgehend zeitgleich die Globalstrahlungswerte niedriger und v.a. die relativen Feuchten höher sind als an der Station des IBP, könnte dies durch längere Nebelperioden mit entsprechend geringer Erwärmung der Talsohle bedingt sein. Die Temperaturen am Taubenberg (Bild 103) sind wie bereits im Vergleich der gemessenen Daten im Kapitel 3.3 erläutert, von November 2013 bis April 2014 deutlich höher als am IBP. Sie bleiben auch deutlich höher, als durch die Lokalanpassung für die Berglage zu erwarten wäre, die im Mittel etwa 2 K unter den Messdaten liegen.

Höhere Temperaturen auf dem Taubenberg im Vergleich zur davor liegenden Ebene mit der Wetterstation des IBP konnten im Jahresverlauf immer wieder, sowohl kurz- als auch längerfristig beobachtet werden. Abgesehen von diesen Zeiträumen liegen die abgeleiteten Temperaturen ebenfalls meist zwischen den Messdaten am IBP und am Taubenberg. Für die Temperaturen kann somit zusammenfassend festgestellt werden, dass die Lokalkorrekturfunktion die durch eigene Messungen ermittelten Tendenzen richtig wiedergibt. Singuläre Ereignisse wie längere Nebelphasen im Tal oder Inversionswetterlagen mit deutlich höheren Temperaturen auf dem Berg als auf geringeren Höhen können allerdings nicht abgebildet werden. Bezüglich der höheren Temperaturen auf dem Berg liegt deren Nicht-Berücksichtigung für die Bemessung auf der sicheren Seite, die temporär kälteren Bedingungen in dem sehr engen Flusstal würden dagegen zu kritischeren Verhältnissen führen als ein auf Tal-Lage angepasster Lokalklimadatensatz.

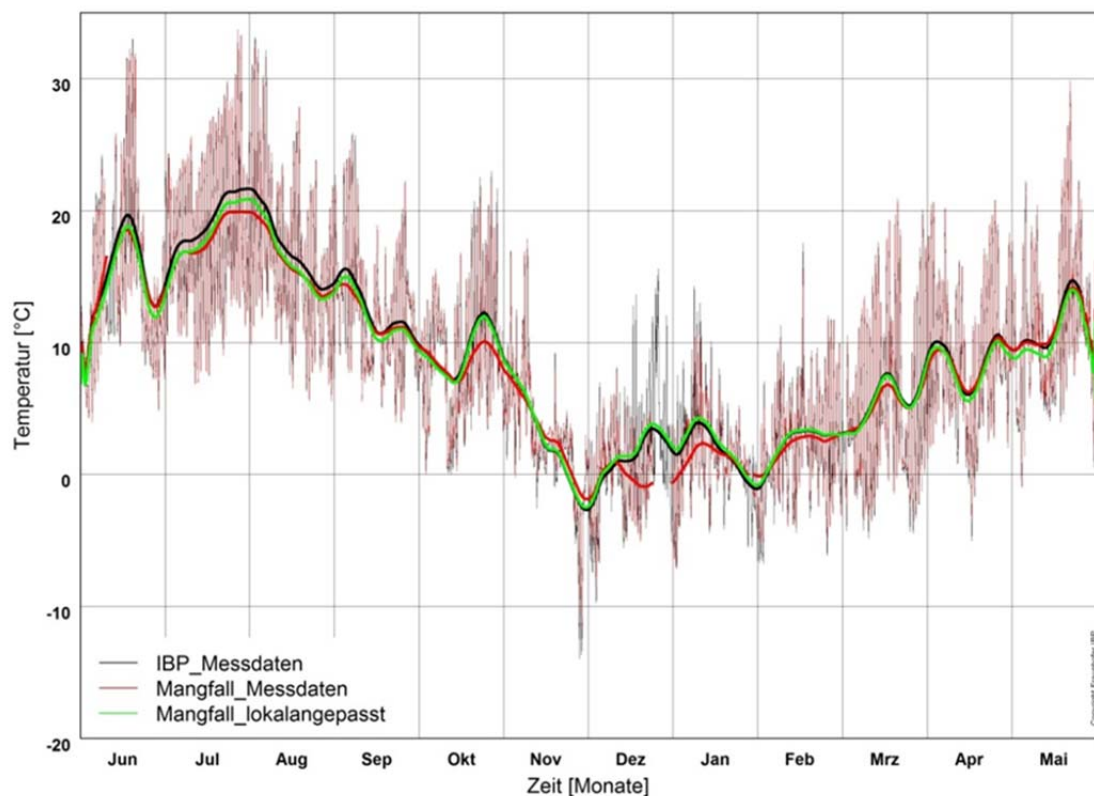


Bild 102:

Die Temperatur von Mangfalltal und IBP sowohl Messwerte und lokalangepassten Werte. Die dicken Kurven sind die gleitenden Mittelwerte. Die stündlichen gemessenen Werte sind als dünne Kurven angezeigt.

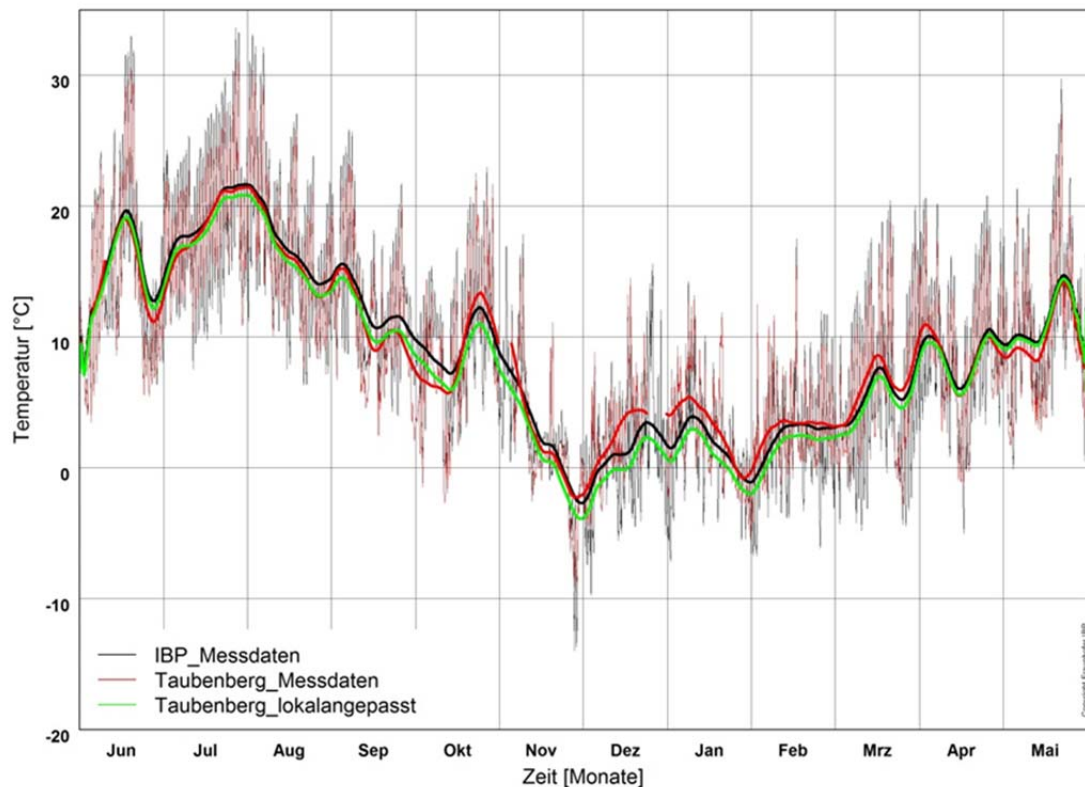


Bild 103:

Die Temperatur von Taubenberg und IBP sowohl Messwerte und lo-kalangepassten Werte. Die dicken Kurven sind die gleitenden Mittelwerte. Die stündlichen gemessenen Werte sind als dünne Kurven angezeigt.

Die Globalstrahlung wird nur für das Mangfalltal mit dem Lokalklimamodell ermittelt, da bei der Berg-Lage keine entsprechende Korrektur vorgesehen ist. Dabei erfolgt eine Reduzierung der am IBP gemessenen Strahlungsmengen, wodurch die abgeleitete Strahlungskurve über weite Teile des Jahres näher an der gemessenen Kurve liegt. Auch hier wird durch die Lokalanpassung also eine auf der sicheren Seite liegende Verbesserung gegenüber den unkorrigierten Daten erzielt.

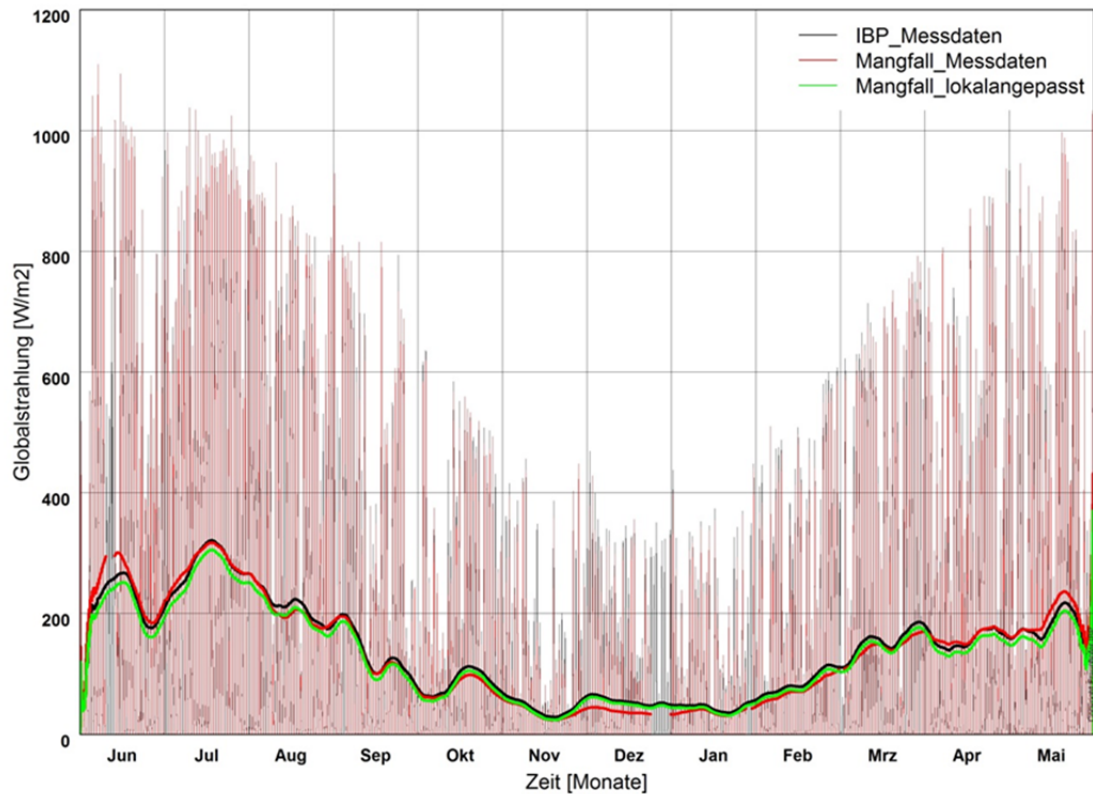


Bild 104:

Die Globalstrahlung von Mangfalltal und IBP sowohl Messwerte und lokalangepassten Werte. Die dicken Kurven sind die gleitenden Mittelwerte. Die stündlichen gemessenen Werte sind als dünne Kurven angezeigt.

In Bild 105 und Bild 106 sind die Darstellungen der relativen Feuchten für die drei Standorte abgebildet. Für die relative Luftfeuchte ist zu berücksichtigen, dass die gleitenden Mittelwerte der Messdaten bei den drei Außenstationen (rote dicke Linien in den Bildern) eigentlich höher liegen, die Stationen aber auch bei höheren Werten, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, maximal etwa 95 % erfassen. Die relativen Feuchten an den Zielorten werden durch das Lokalklimamodell entweder fast gleich oder geringfügig erhöht ermittelt.

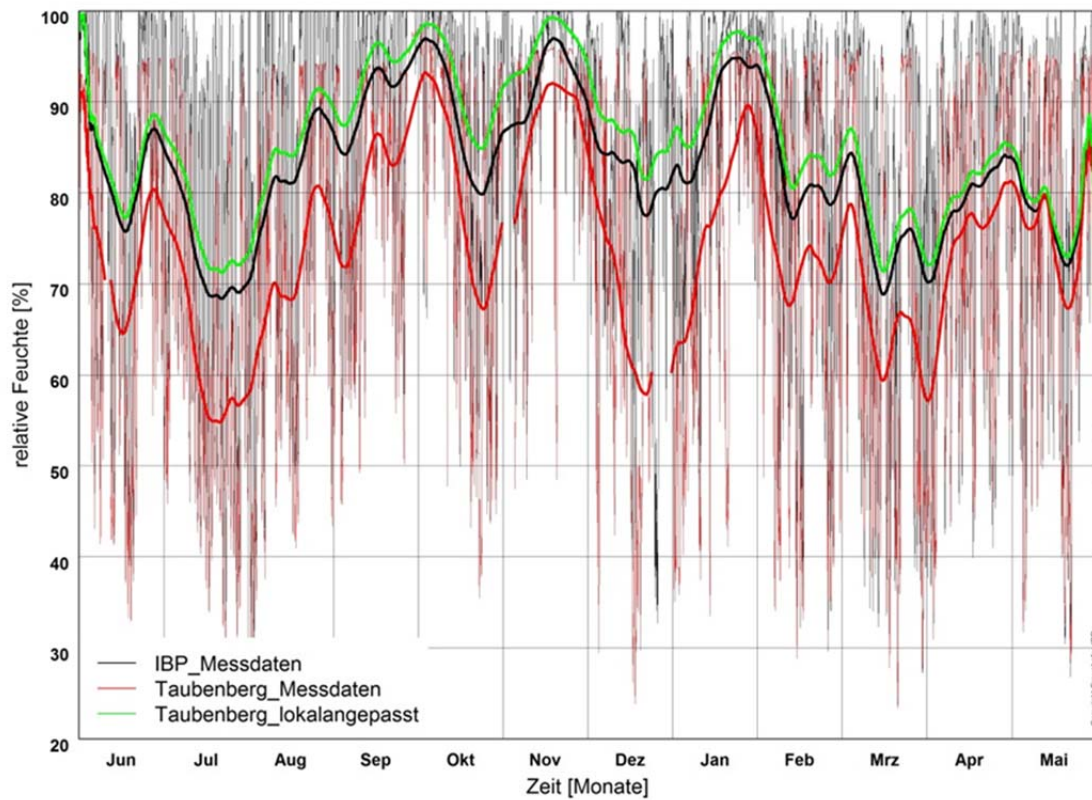


Bild 105:
 Die relative Feuchte von Taubenberg und IBP sowohl Messwerte und lokalan-
 gepassten Werte. Die dicken Kurven sind die gleitenden Mittelwerte. Die stünd-
 lichen gemessenen Werte sind als dünne Kurven angezeigt.

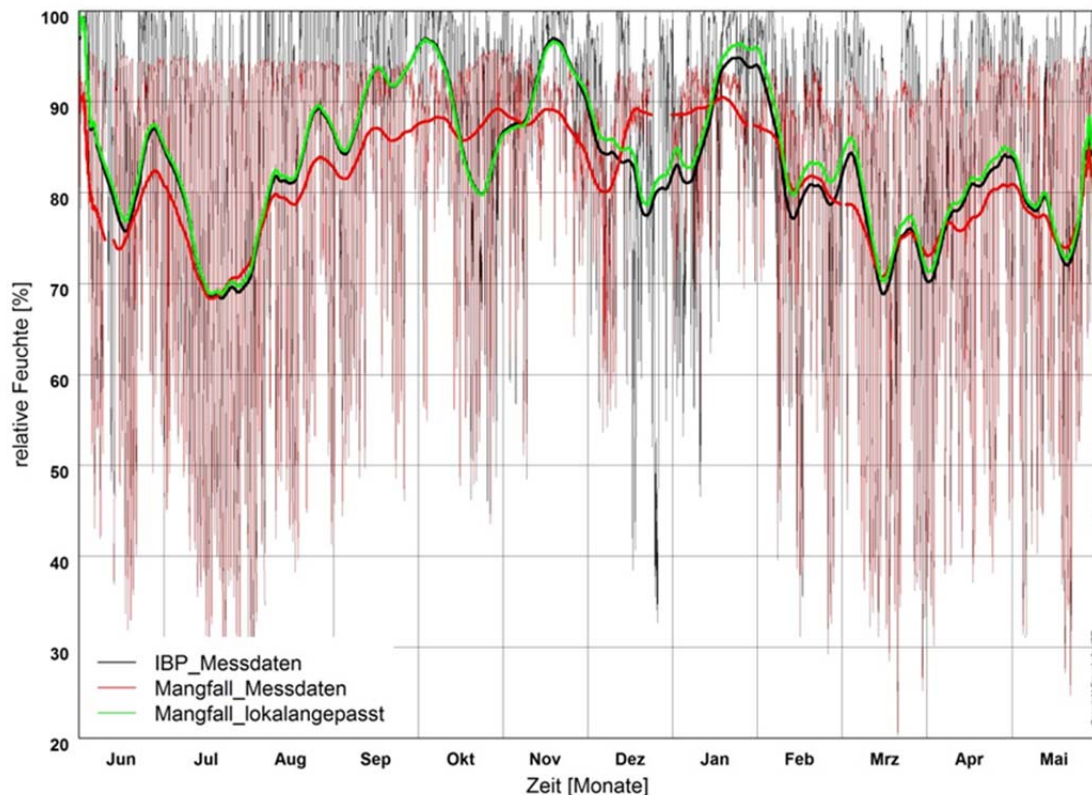


Bild 106:

Die relative Feuchte von Mangfalltal und IBP sowohl Messwerte und lokalangepassten Werte. Die dicken Kurven sind die gleitenden Mittelwerte. Die stündlichen gemessenen Werte sind als dünne Kurven angezeigt.

Aufgrund der infolgedessen nur eingeschränkten Aussagekraft des Vergleichs wird zusätzlich ein repräsentativer Zeitraum von einer Woche Anfang April herangezogen, in der die Messwerte an allen Stationen unter 95 % r.F. verbleiben. Der Vergleich zwischen diesen Messdaten und den Lokalklimamodellen ist in Bild 107 dargestellt - der Zeitraum wurde als exemplarisch bezüglich der Messergebnisse ausgewählt (vgl. Kapitel 3.3.1). Dieses Bild veranschaulicht, dass die lokalangepassten relativen Feuchte im Mangfalltal insgesamt sehr gut mit den Messdaten übereinstimmen.

Die angepassten Werte für den Taubenberg liegen dagegen höher als die Messdaten. Die bei den Messdaten deutlich niedrigere relative Feuchte auf dem Taubenberg hängt offensichtlich mit den dort temporär immer wieder erhöhten Temperaturen ab, die durch die Lokalanpassung nicht erfasst werden. Dass dies auch nicht sinnvoll ist, wurde bereits in Kapitel 3.3.1 diskutiert.

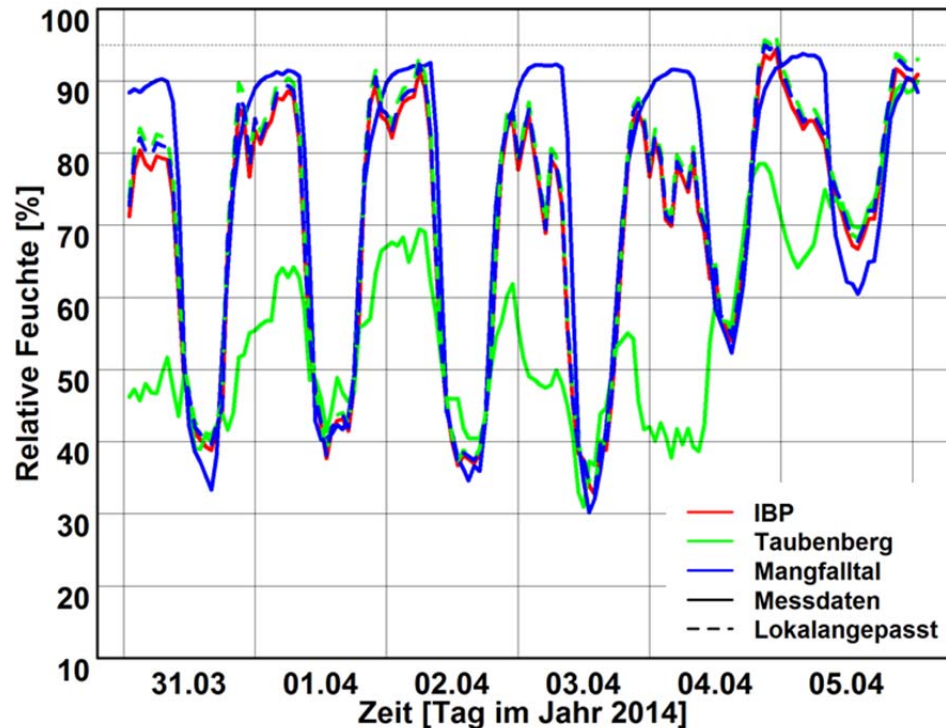


Bild 107:
 Messdaten und lokalangepassten Daten von relativen Feuchte zwischen
 31.03.2014 und 05.04.2014.

3.7 Softwaretechnische Umsetzung im Lokalklimagenerator

Die entwickelten Lokalklimamodelle wurden in eine Software implementiert, die eine einfache Anwendung durch den Nutzer ermöglichen soll. In diesem sog. Lokalklimagenerator sind die neu erstellten HRY-Referenz-Datensätze der verschiedenen Regionen als Ausgangsdatenbasis bereits hinterlegt.

Bild 108 zeigt das Hauptmenü des Programms. Auf der linken Seite erfolgt die Eingabe der Anpassungsparameter. Über die Eingabe der Höhenlage des Zielstandorts werden zunächst die Temperatur, die absolute Feuchte und die atmosphärische Gegenstrahlung angepasst. Die Anpassungen der vier Lagekategorien „Berg“, „Gewässer“, „Tal“ und „Stadt“ kann kombiniert und gewichtet erfolgen, indem die jeweiligen Schieberegler auf Werte von 0 (keine Anpassung) bis 1 (Anpassung mit 100 % Gewichtung) eingestellt werden. Falls die Referenzorte selbst keine neutrale Lage aufweisen, werden zuvor die Bedingungen mit einer im Programm bereits vorgelegten inversen Korrektur auf die neutralen Verhältnisse umgerechnet.

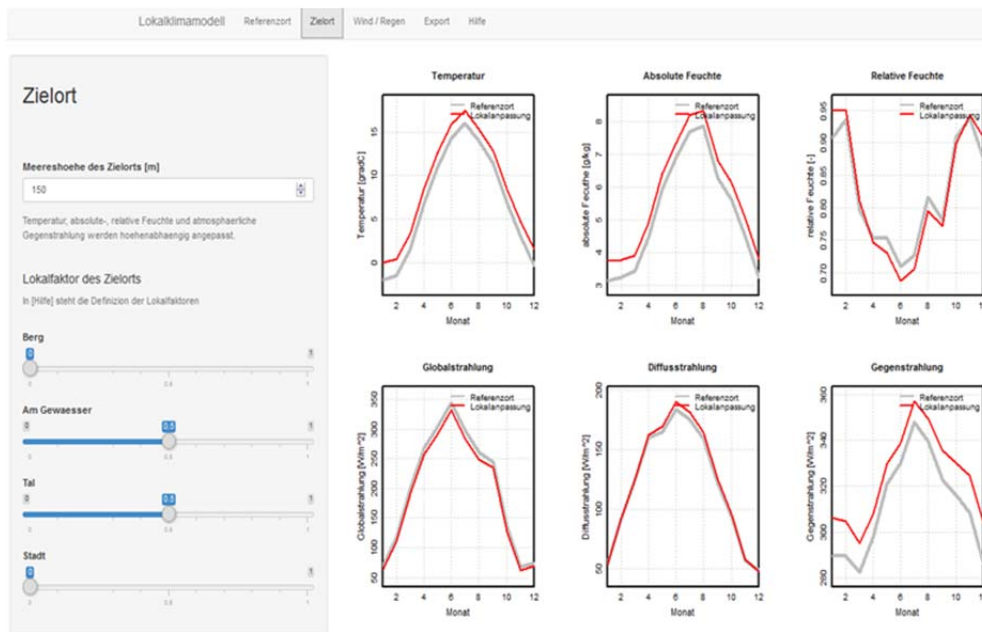


Bild 108:

Bildschirmansicht des Hauptmenüs des Lokalklimagenerators. Links erfolgt die Eingabe der Anpassungsparameter (Höhenlage, Auswahl und Gewichtung der Lagekategorie), rechts wird die resultierende Lokalklimaanpassung für die einzelnen Klimatelemente im Monatsmittel (rote Kurve) im Vergleich zum Referenzort (graue Kurve) dargestellt.

Im rechten Teil des Fensters werden die Klimatelemente Temperatur, relative Feuchte, Global- und Diffusstrahlung sowie die atmosphärische Gegenstrahlung als Monatsmittelwerte für den Referenzstandort (grau) und den Zielstandort (rot) dargestellt. Jede Änderung der Anpassungsparameter wird somit unmittelbar in ihrer Wirkung auf den Zielklimadatensatz dargestellt.

Für die Festlegung der Windgeschwindigkeit am Zielort werden die in Kapitel 3.5.3 ermittelten Bandbreiten der Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Lagekategorien berücksichtigt – im Rahmen dieser Bandbreite muss der Nutzer selbst einschätzen, ob der spezifische Standort aufgrund seiner genauen Exposition eher am oberen oder unteren Ende der Bandbreite liegt. Eine Drehung der Windrichtung ist ebenfalls möglich. Da eine Einschätzung der lokalen Niederschlagsmengen kaum möglich ist, wird hier auf die DWD-Niederschlagskarte zurückgegriffen, die eine lokale Verteilung der langjährigen Niederschlagsmengen in Deutschland enthält. Als Ergebnis werden der Vergleich der Windgeschwindigkeit sowie der Schlagregenverteilung an Referenz- und Zielort dargestellt. Eine Bildschirmansicht des Menüs mit Eingabeparametern, Niederschlagskarte und resultierenden Werten ist in Bild 109 dargestellt.

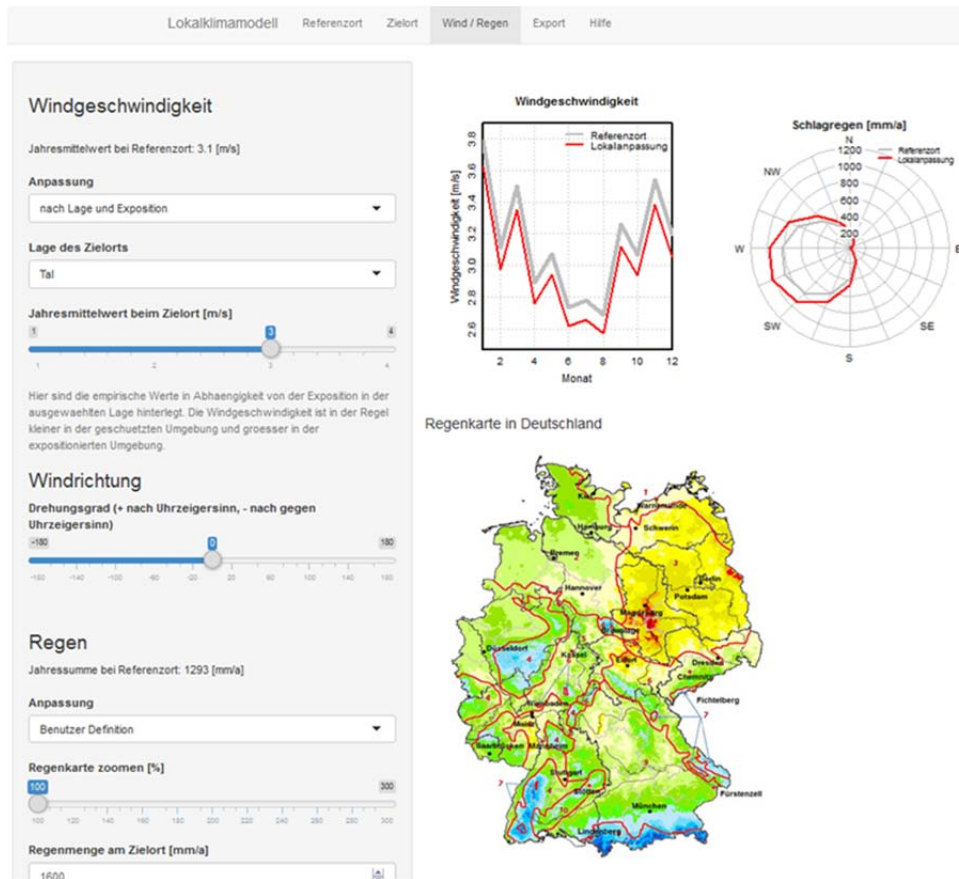


Bild 109: Bildschirmsicht des Wind- und Niederschlagsmenüs des Lokalklimagenerators. Links erfolgt die Eingabe der Anpassungsparameter (Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Regenmenge anhand der rechts unten dargestellten Niederschlagskarte), rechts oben wird der resultierende Lokalklimadatensatz (rote Kurve) im Vergleich zum Referenzort (graue Kurve) dargestellt.

Die fertig angepasste Klimadatei kann im Anschluss exportiert und in externen Programmen für die hygrothermische Simulation verwendet werden. Mittelfristig ist auch eine Implementierung der Anpassungsmodelle in die Bauteilsimulationsprogramme der WUFI®-Familie vorgesehen.

3.8 Zusammenfassung, Anwendungsgrenzen und Ausblick

Die in diesem Projekt entwickelten Lokalklimamodelle verbessern und erweitern die Möglichkeiten, Klimadatensätze von einem Referenzort auf einen Zielort mit unterschiedlicher Lage und Exposition zu übertragen bzw. anzupassen. Auf Basis der Analyse von Fünf-Jahres-Messdatensätzen für insgesamt 74 Standort in Deutschland wurden zum einen Höhenkorrekturfunktionen für Temperatur, absolute Feuchte und atmosphärische Gegenstrahlung und zum anderen Lokal-korrekturfunktionen für die Expositionen „Berg“, „Gewässer“, „Stadt“ und „Tal“ entwickelt. Für die Anpassung der Windgeschwindigkeit wird entsprechend der Lagekategorie auf die ermittelten typischen Bandbreiten zurückgegriffen, wobei der Nutzer die Belastung innerhalb dieser Bandbreite selbst wäh-

len muss. Dabei können auch Windmessdaten hilfreich sein. Für die Niederschlagsmenge sollte generell auf langjährigen Messdaten z.B. in der Niederschlagskarte des DWD zurückgegriffen werden.

Bei bisher verfügbaren Anpassungsmethoden wurde meist nur die Temperatur, teilweise auch der Wind korrigiert. Die neuen Modelle beinhalten neben den für mitteleuropäische Verhältnisse noch etwas besser geeigneten Ansätzen für die Temperatur auch Korrekturfunktionen für die absolute Feuchte, die Global-, die Diffus-, und die atmosphärischen Gegenstrahlung. Die Anpassungen der feuchterelevanten Klimaelemente sind für die hygrothermische Beurteilung ebenso von großer Bedeutung und wurden auch anhand von Simulationsberechnungen validiert.

Singuläre Situationen wie Inversionswetterlagen oder Nebelperioden im Winter, die von der typischen Tendenz u.U. deutlich abweichen, können dagegen in diesem Detaillierungsgrad nicht berücksichtigt werden. Dies gilt sowohl für die bereits in ähnlicher Form auch in anderen Modellen verwendeten Korrekturen, wie die der Temperatur bezüglich Höhe oder Stadtlage, als auch für die im Rahmen dieses Projekts neu erstellten Modelle. Da solche Situationen aber eher bei vergleichsweise extremen Expositionen auftreten, wie z.B. in Gipfelnähe oder in engen Flusstälern, betreffen sie, wenn überhaupt Bebauung vorhanden ist, nur wenige Gebäude. Mit den eigenen Lokalklimamessungen in der Umgebung des IBP wurden solche Situationen erfasst, die durch die Modelle nur teilweise wiedergegeben werden können.

Die Fünf-Jahres-Klimadatensätze der Meteomedia AG [72] dagegen wurden meist so ausgewählt, dass sie in der Nähe eines Ortes liegen. Für diese Expositionen liefern die Lokalkorrekturfunktionen gute Ergebnisse. Bei der Anwendung muss trotzdem noch berücksichtigt werden, dass im Einzelfall immer Abweichungen von den typischen Tendenzen auftreten können. Dies ist aber auch bei den anderen, bereits verfügbaren Lokalanpassungsmodellen der Fall, wie eine Überprüfung der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Ansätze gezeigt hat. Die dort verwendeten Korrekturfaktoren zeigten bezüglich der hier untersuchten Standorte größere Abweichungen und eine weniger gute Übereinstimmung als die neu erstellten Modelle (vgl. Kapitel 3.5.2 bis Kapitel 3.6.3).

Die im Rahmen dieses Projekts erstellten Korrekturfunktionen sind zudem aufgrund der Datenbasis spezifischer für die klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa und die Anwendung der Datensätze für die hygrothermische Beurteilung. Für andere Anwendungsbereiche können ggf. andere Anpassungsmodelle zu besseren Ergebnissen führen.

Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Modelle wurden ebenfalls an einigen Punkten erkennbar. So könnten z.B. wie im Kapitel 3.5.3 beschrieben, die Kopplungseffekte zwischen Niederschlagsereignissen und den übrigen Klimaelementen noch genauer untersucht werden, um nicht nur eine Anpassung der Menge des Niederschlags, sondern auch der Dauern sowie eine entsprechende Anpassung der anderen Klimaelemente zu ermöglichen. Weiterhin

erfolgte die Anpassung der Klimabedingungen in Berglagen auf die kritischeren Verhältnisse – also eher auf Nord- und Westorientierung mit niedriger Temperatur höherer Feuchte, geringerer Gegenstrahlung sowie mehr Wind und Niederschlag. Auf nach Süden orientierten Neigungen können die Temperaturen und Strahlungsmengen aber auch höher und in geschützten Lagen Wind und Schlagregen niedriger ausfallen als in der neutralen Exposition in der Ebene. Die Berücksichtigung solcher Einflüsse könnte ebenfalls durch eine weitere Verfeinerung und Optimierung der Modelle unter Einbezug der genauen Orientierungen des Standorts im Vergleich zum Berg sowie die Berücksichtigung von Verschattungen ermöglicht werden.

Trotz dieser Einschränkungen zeigt die Validierung, dass die Anwendung der neuen Lokalklimamodelle auf die regionalen Hygrischen Referenzjahre (HRY) zu einer besseren Übereinstimmung mit den lokalen Klimabedingungen führt und damit auch eine zuverlässigere Beurteilung von Bauteilen und Gebäuden ermöglichen.

Die neuen Lokalklimamodelle erfüllen die folgenden Anforderungen:

- Sie repräsentieren die durch die lokale Exposition bedingten typischen klimatischen Unterschiede für die vier genannten Lagekategorien.
- Die mit den Modellen generierten Lokalklimadaten führen bei der hygrothermischen Beurteilungen von Bauteilen im Vergleich zu typischen gemessenen Standorten tendenziell zu leicht auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen.

Die Lokalklimamodelle stellen somit eine sinnvolle Ergänzung der in Kapitel 2 erstellten Hygrischen Referenzjahre dar. Mithilfe des in Kapitel 3.7 vorgestellten Lokalklimagenerators ist die Anwendung der verschiedenen Modelle für die Höhenkorrektur und den Lokalklimaefluss auf die HRY-Datensätze oder auch auf andere regionale Klimadaten einfach möglich.

Das Werkzeug ermöglicht zusätzlich die Anpassung von Windrichtung, Windstärke und Niederschlagsmengen und damit die Beurteilung der lokalen Schlagregenbelastung. Dazu werden die in den Regionen nach Lagekategorie auftretenden Windgeschwindigkeitsbandbreiten, die Expositionseinschätzung vor Ort sowie die langjährigen örtlichen Niederschlagsmengen herangezogen. Vor allem bei der Bemessung von Innendämmungsmaßnahmen ist die tatsächliche Schlagregenbelastung vor Ort häufig die wichtigste Einflussgröße, die bisher aber nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden konnte.

4 Nebenraumklima

Im Zuge des Mindestwärmeschutzes und der Energieeinsparung werden heute nicht nur Bauteile gedämmt, die an die Außenluft angrenzen, sondern zunehmend auch solche zu unbeheizten Nebenräumen wie z.B. Dach oder Keller. Die Bedingungen in solchen Räumen unterscheiden sich deutlich vom Außenklima

und sollten daher bei thermischen und feuchtetechnischen Bemessungen in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Sie sind mitentscheidend für den erforderlichen R-Wert sowie ggf. die Art der Dämmung und die Notwendigkeit eine zusätzliche Dampfbremse zu verwenden.

Da bei hygrothermischen Simulationen das jeweilige Außenklima immer mitberechnet wird, erscheint eine Ermittlung der Bedingungen in den Nebenräumen in Abhängigkeit vom Außenklima am sinnvollsten, da dies konsistente Randbedingungen auf beiden Seiten der Konstruktionen gewährleistet. Auch bei Raumklimamodellen für die normale Nutzung als Wohn- oder Büroraum hat sich diese Vorgehensweise bewährt und in den letzten Jahren durchgesetzt. Während im WTA-Merkblatt 6-1 [73] in der Fassung von 2001 noch statische Sinuskurven für Temperatur- und Luftfeuchte in Wohnräumen verwendet wurden, greifen sowohl die Neufassung dieses Merkblatts von 2002 [1] als auch die europäischen Normen EN 15026 [4] und EN 13788 [74] auf Modelle zurück, die das Innenraumklima vom jeweiligen Außenklima ableiten.

In der Praxis wurde in den letzten Jahren vor allem der Bedarf solcher Modelle für unbeheizte Dach- und Kellerräume deutlich, da sie in fast jedem Gebäude vorkommen und die Planer, gerade bei Sanierungsmaßnahmen, u.U. vor große Herausforderungen stellen. Bei Dächern kommen zudem häufig feuchteempfindliche Materialien aus Holz- und Holzwerkstoffen zum Einsatz, die vor zu hohen Feuchtegehalten geschützt werden müssen. Vor allem für diese beiden Bereiche werden daher zahlreiche neue Messungen durchgeführt und Modelle entwickelt, die die Raumklimaverhältnisse bei Berücksichtigung der wichtigsten Einflussparameter aus dem Außenklima ableiten können.

Da ebenfalls für die hygrothermische Bemessung relevant, werden im Rahmen dieses Projekts weiterhin die Klimabedingungen in Kriechkellern, Tiefgaragen und Treppenhäusern betrachtet. Hier stehen teilweise eigene Messdaten zur Verfügung, die im Rahmen des Projekts neu ausgewertet werden, zum Teil wird aber auch auf Werte aus der Literatur bzw. zur Verfügung gestellte Daten anderer Forschungseinrichtungen zurückgegriffen. Die dazu erstellten Modelle bleiben aufgrund der kleineren Datenbasis etwas weiter auf der sicheren Seite, stellen aber trotzdem gegenüber der bisher häufigen Verwendung der Außenklimaverhältnisse eine deutliche Verbesserung dar.

4.1 Unbeheizte Dachräume

Als Grundlage für das Dachraumklimamodell werden Messungen in verschiedenen Dachräumen sowohl in Gebäuden der Freilandversuchsstelle des IBP als auch in normal bewohnten Objekten durchgeführt. Anhand von theoretischen Überlegungen und rechnerischen Untersuchungen werden die maßgeblichen Einflussfaktoren identifiziert und anhand dieser die Grundzüge eines Modellansatzes festgelegt.

Anschließend erfolgt eine Klassifizierung der untersuchten Dachräume in verschiedene Dachraumklassen in Abhängigkeit von der Winddichtheit des Dach-

raumes und dem Dämmstandard der Dachkonstruktion. Auf Basis der Messdaten erfolgt eine Feinjustierung und bei Bedarf Anpassung des formulierten Modells sowie eine erste Validierung durch einen umfangreichen Vergleich von Nebenraummessungen mit den über die zugehörigen Dachraumklassen aus dem Außenklima abgeleiteten Bedingungen. Der zweite Teil der Validierung umfasst eine Überprüfung mit Hilfe hygrothermischer Bauteilsimulationen. Dazu wird das hygrothermische Verhalten einer kritischen Konstruktion durch den Vergleich des gemessenen mit dem modellierten Nebenraumklima bei sonst gleichen Randbedingungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine gute, auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung von Messung und Modell.

Auf dieser Grundlage erfolgt eine Umsetzung des Modells für die hygrothermische Bauteilbemessung. Bei der hygrothermischen Simulation von an unbeheizte Dachräume angrenzenden Bauteilen, wie z.B. oberste Geschossdecken, kann bei Kenntnis der beiden wesentlichen Dachraumparameter, Bauteilaufbau des Steildaches und dem damit eng zusammenhängenden Luftwechsel, eine Zuordnung der Dachraumklasse erfolgen und somit das abweichende Raumklima des unbeheizten Dachraumes berücksichtigt werden.

Die Arbeiten erfolgten teilweise im Rahmen der Masterarbeit "Entwicklung eines vereinfachten Modells zur Bestimmung der Klimarandbedingungen unbeheizter Gebäudezonen für die hygrothermische Bauteilsimulation" [75].

4.1.1 Raumklimamessungen in Dachräumen und theoretische Grundlagen

In Tabelle 24 wird eine Übersicht der durchgeführten Messungen aufgelistet. Dabei wurde eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Dachräume in Bezug auf Größe, Geometrie, Dachausrichtung, Art des Dachaufbaus, Belüftung etc. angestrebt. Die Messungen wurden über einen möglichst langen Zeitraum durchgeführt, um das hygrothermische Verhalten der Dachräume unter allen Witterungsbedingungen zu erfassen. Die Messungen wurden auf Basis von stündlichen Werten für Temperatur und rel. Feuchte mittels hierfür üblichen, batteriebetriebenen Mess-Daten-Loggern aufgezeichnet.

Bei den Dachräumen auf dem Freilandversuchsgelände des IBP konnte für das Außenklima auf die Messdaten der Wetterstation des IBP zurückgegriffen werden. Auch für die Standorte im Süden und Osten von München wurden aufgrund der nur geringen Unterschiede diese Daten verwendet. Bei den anderen Standorten konnte teilweise auf Messungen von in der Nähe liegenden Wetterstationen zurückgegriffen werden oder es wurden parallel Messungen der Außenlufttemperatur und -feuchte an einer geeigneten Position in der direkten Umgebung des jeweiligen Gebäudes durchgeführt (vgl. Angaben in Tabelle 24).

Tabelle 24:
Übersicht der durchgeführten Messungen.

Nebenraumklimamodelle Übersicht von Messdaten, Klimadateien																								
Objekt Messungen Klimadatei	1. Jahr												2. Jahr											
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Kassel 1																								
1. Messung (Logger innen+aussen)			27.03.2010	-	09.08.2011																			
Kassel 2																								
1. Messung (Logger innen+aussen)										19.10.-31.12.2009			01.01.-29.11.2009											
Oschatz																								
1. Messung (Logger innen+aussen)				04.05.2010	-	27.04.2012																		
Dienstwohnung IBP																								
1. Messung (Logger innen)									16.10.-15.11.		08.12.-01.05.2013		02.05.-18.10.2013											
Klimadatei IBP - Okt 2013																								
Institutsgebäude IBP																								
1. Messung (Logger innen)									10.10.-28.02.2013								06.06.-15.10.2013							
Klimadatei IBP - Okt 2013																								
Vaterstetten																								
1. Messung (Logger innen)									16.10.-15.		08.12.-05.05.2013		13.07.-18.10.2013											
Klimadatei IBP - Okt 2013																								
Planegg																								
1. Messung (Logger innen)									16.10.-15.		08.12.-01.05.2013		06.06.-15.10.2013											
Klimadatei IBP - Okt 2013																								
Gauting																								
1. Messung (Logger innen+ aussen)									16.10.-15.		19.12.-01.05.2013													
Klimadatei IBP - Okt 2013									16.10.-15.															
Hohenbrunn																								
1. Messung (Logger innen)									16.10.-15.								09.05.-29.08.2013							
Klimadatei IBP - Okt 2013																								
Dachau																								
1. Messung (Logger innen+ aussen)																	30.04.-07.10.2013							

Anhand der dargestellten Messungen unterschiedlicher Dachraumtypen und Vergleichssimulationen mit der hygrothermischen Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus, erfolgt eine Abschätzung, welche Einflussgrößen das Dachraumklima maßgeblich beeinflussen und welche von eher untergeordneter Bedeutung sind. Die Untersuchungen sind in [75] ausführlich beschrieben. Dabei zeigte sich, dass das Nebenraumklima vor allem durch die Ausführungsart des Bauteilaufbaus bestimmt wird. Der Einfluss des Luftwechsels nach außen und auch der Strahlungseinfluss werden hierüber maßgeblich mitbestimmt.

Zur Entwicklung des Modells wurden die Einflussgrößen des Nebenraumklimas, wie etwa die Winddichtheit oder die Bauteilqualität aus vorhandenen Literaturquellen, Normen und bestehenden Modellen (z.B. in [76]) herausgearbeitet und festgelegt, wie die Einflussgrößen im unbeheizten Dachraum zusammengefasst werden können. Dies erfolgt schließlich durch die Abstufung bzw. Klassifizierung der Bauteile bzgl. ihrer U-Werte und Luftwechselraten in Abhängigkeit vom Bauzustand des Dachraums. Die Klassifizierung ist in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25:
Klassifizierung von Dachräumen (U in [W/(m²K)], n in [h⁻¹]).

		Bauteilqualität (außen)		
		A _{WD}	B _{WD}	C _{WD}
		mit WD (10 cm) U < 0,7	mäßig WD (4 cm) 0,7 < U < 2,5	ohne WD 0,7 < U < 2,5
Winddichtheit (außen)	A _n	A _n A _{WD} (neues Gebäude)	A _n B _{WD}	
	dicht 0 < n < 1	- mit Schalung, Unterspannbahn, Dampfbremse, mit WD	- mit Schalung, Unterspannbahn, Dampfbremse, mäßig WD	
	B _n	B _n A _{WD}	B _n B _{WD} (Gebäude 60-80er)	B _n C _{WD}
	mäßig dicht 1 < n < 5	- mit Schalung, Unterspannbahn, mit WD	- mit Schalung, Unterspannbahn, mäßig WD	- mit Schalung und ggf. Unterdeckung
	C _n		C _n B _{WD}	C _n C _{WD} (Altes Gebäude)
	undicht 5 < n < 10		- mit Schalung, Folie nicht mehr intakt, gr. Lüftungsöffn., mäßig WD	- nur Dachdeckung, Lüfterziegel

So wirkt sich bereits eine mäßige Wärmedämmung des Daches dahingehend aus, dass sich der Dachraum gegenüber einem rein ziegelgedeckten Dach bei tiefen Außentemperaturen deutlich geringer abkühlt, die Abweichung von der Außentemperatur also deutlich zunimmt. Bei warmen Außentemperaturen weicht der mittlere Temperaturanstieg der Dachräume bezogen auf die Außentemperaturen untereinander schwächer voneinander ab. Signifikante Änderungen der absoluten Raumluftheuchte konnten nicht durchgängig festgestellt werden.

Bei undichten, ungedämmten Konstruktionen wurden leicht erhöhte Feuchtegehalte festgestellt. Die Winddichtheit nimmt mit jüngerem Baualter und steigender Ausführungsqualität deutlich zu. Parallel dazu ist auch eine Zunahme der Dämmstärke zu verzeichnen.

Aus den Messergebnissen konnte ein weitgehend linearer Zusammenhang von Außentemperatur und Nebenraumtemperatur abgeleitet werden. Bild 110 zeigt exemplarisch für vier Dachräume während eines Monats den linearen Zusammenhang der Tagesmittelwerte der Nebenraumtemperatur von der Außentemperatur.

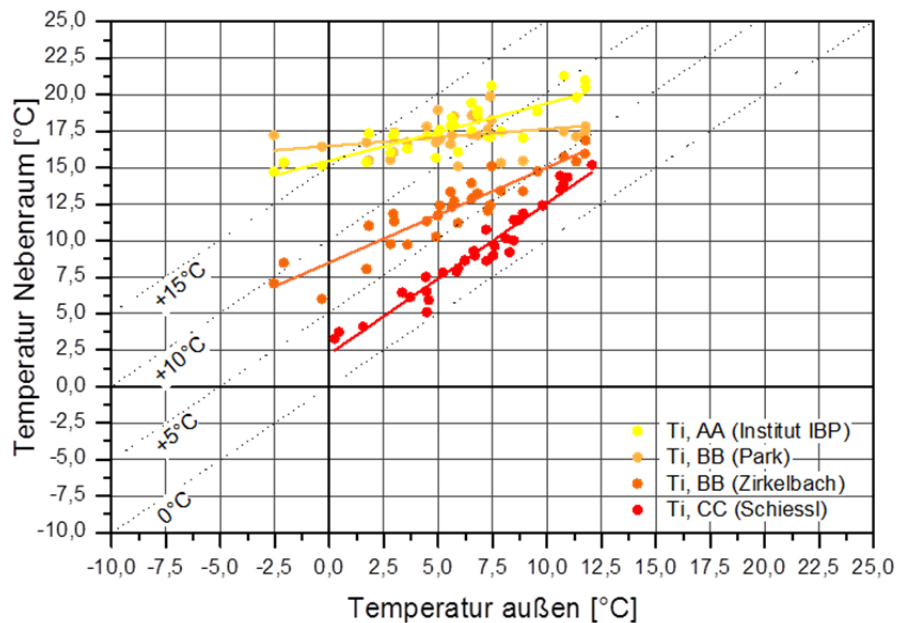


Bild 110:
 Linearer Zusammenhang von Außen- und Nebenraumtemperatur in Abhängigkeit der Dachausführung exemplarisch für vier Dachräume über einen Monat.

4.1.2 Modellansatz

Auf Basis der Eingruppierung in die definierten Dachraumklassen und der Auswertungen der Abhängigkeiten von Temperatur und Feuchte der Messergebnisse wurde zunächst der in Bild 111 dargestellte Modellansatz entwickelt.

Die Temperaturdifferenz leitet sich dabei aus einer linearen Beziehung zwischen Außentemperatur und korrespondierender Nebenraumtemperatur ab. Um die Trägheit des Raums zu berücksichtigen, die keine sofortige Reaktion des Raumklimas auf das Außenklima ermöglicht wird – wie bei anderen Raumklimamodellen auch - außen und innen jeweils der gleitende Tagesmittelwert der Temperatur verwendet. Durch eine Steigungsgleichung kann jedem Außentemperaturtageswert ein entsprechender Temperaturtageswert im Dachraum zugewiesen werden. Steigung und Niveau der Kurve hängen dabei von der jeweiligen Dachraumklasse ab. Die Steigungsgleichungen wurde für einen Temperaturbereich von -5 °C bis + 20 °C festgelegt; darüber und darunter werden konstante Werte, also kein weiterer Einfluss des Außen- auf das Dachraumklima angenommen.

Abhängigkeit der Dachausführung

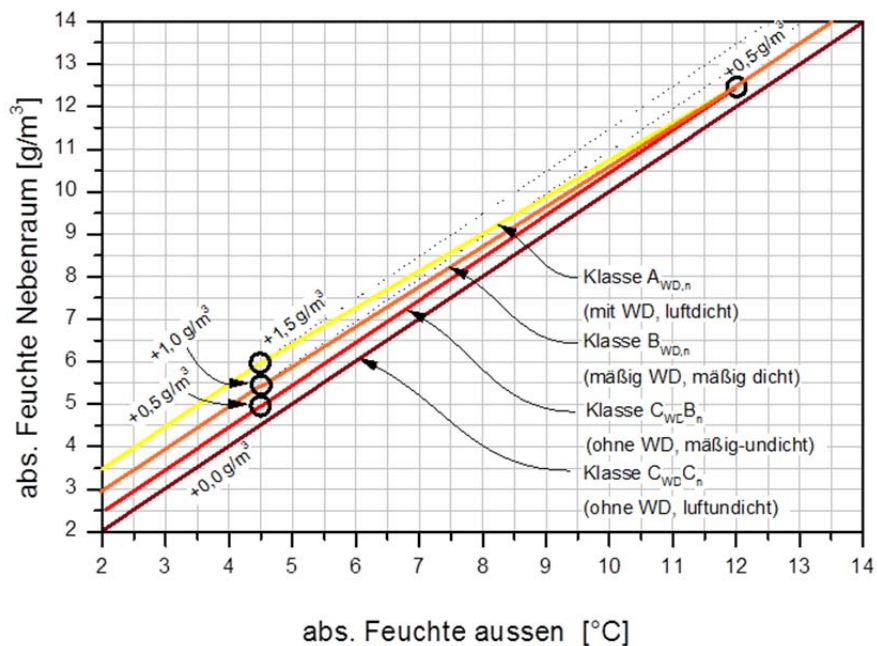
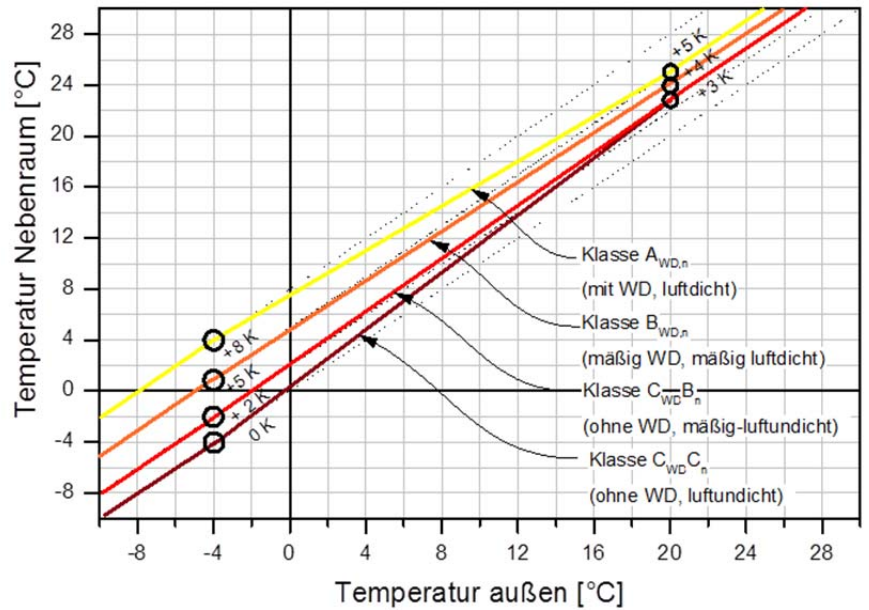


Bild 111:

Modellvorschlag: Temperatur im Nebenraum in Abhängigkeit von der Außentemperatur (oben) und abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit von der abs. Feuchte außen (unten) für die vier Dachraumklassen.

Die Feuchtedifferenz wird ebenfalls über eine lineare Beziehung zwischen der absoluten Außenluftfeuchte und der korrespondierenden Nebenraumfeuchte abgeleitet. Auch hier werden die Tagesmittelwerte herangezogen. Durch eine Steigungsgleichung kann so jedem Tagesmittelwert der absoluten Außenluft-

feuchte ein entsprechender Nebenraumfeuchtewert zugeordnet werden. Steigung und Niveau hängen wiederum von der Dachraumklasse ab.

Da das Dämmniveau und das Winddichtheitsniveau in der Praxis offenbar stark korrelieren konnte im weiteren Verlauf der Untersuchungen die Einteilung auf vier wesentliche Dachraumklassen reduziert werden (vgl. Tabelle 26):

A) Gedämmtes Dach

A1) gut gedämmten Dächern (z.B. Vollsparrendämmung);

A2) gering gedämmten Dächern (z.B. alte Dachdämmung und Folie vorhanden, z.T. schadhaft oder fehlend).

B) Ungedämmtes Dach:

B1) Dachaufbau mit Schalung und ggf. Unterdeckung;

B2) Dachraum mit Ziegeldeckung, ohne Unterdeckung.

Dächer mit mäßiger Wärmedämmung und offensichtlich größeren Winddichtheiten sind evtl. noch Klasse A2, eher aber B1 zuzuordnen.

Tabelle 26:

Dachraumklasse in Abhängigkeit von der Bauteilqualität und der Winddichtheit des Steildaches. U in $W/(m^2K)$, n in h^{-1} .

		Bauteilqualität außen		
		A1 _{WD}	A2 _{WD}	B _{WD}
		mit WD (10 cm) $U < 0,7$	mäßig WD (4 cm) $0,7 < U < 2,5$	ohne WD $0,7 < U < 2,5$
Winddichtheit außen	A_n	Klasse A1	A_nB_{WD}	
	dicht $0 < n < 1$	- mit Schalung, Unterspannbahn, Dampf bremse, mit WD	- mit Schalung, Unterspannbahn, Dampf - bremse, mäßig WD	
	B1_n	B_nA_{WD}	Klasse A2	Klasse B1
	mäßig dicht $1 < n < 5$	- mit Schalung, Unterspannbahn, mit WD	- mit Schalung, Unterspannbahn, mäßig WD	- mit Schalung, und ggf. Unterdeckung
	B2_n		Klasse A2 oder B1	Klasse B2
undicht $5 < n < 10$		- mit Schalung, Folie nicht mehr intakt, gr. Lüftungsöff., mäßig WD	- nur Dachdeckung, Lüfterziegel	

Weiterhin wurde der Einfluss der Mittelung von Außen- und Dachraumklima überprüft. Dabei zeigte sich, dass die beste Übereinstimmung zwischen Modell und Messung nicht bei einem 24-Stunden-Mittel sondern bei einem gleitenden 4-Tages-Mittelwert (also 96-Stunden-Mittel) erreicht wird. Auch die Tempera-

tur- und Feuchteanpassungsparameter wurden anhand der Messdaten noch weiter optimiert.

Bild 112 zeigt oben als Schema den Optimierungsprozess für das Modell sowie unten eine Bildschirmsicht der Excel-Tabelle zur Berechnung der Dachraumklimabedingungen aus dem Außenklima.

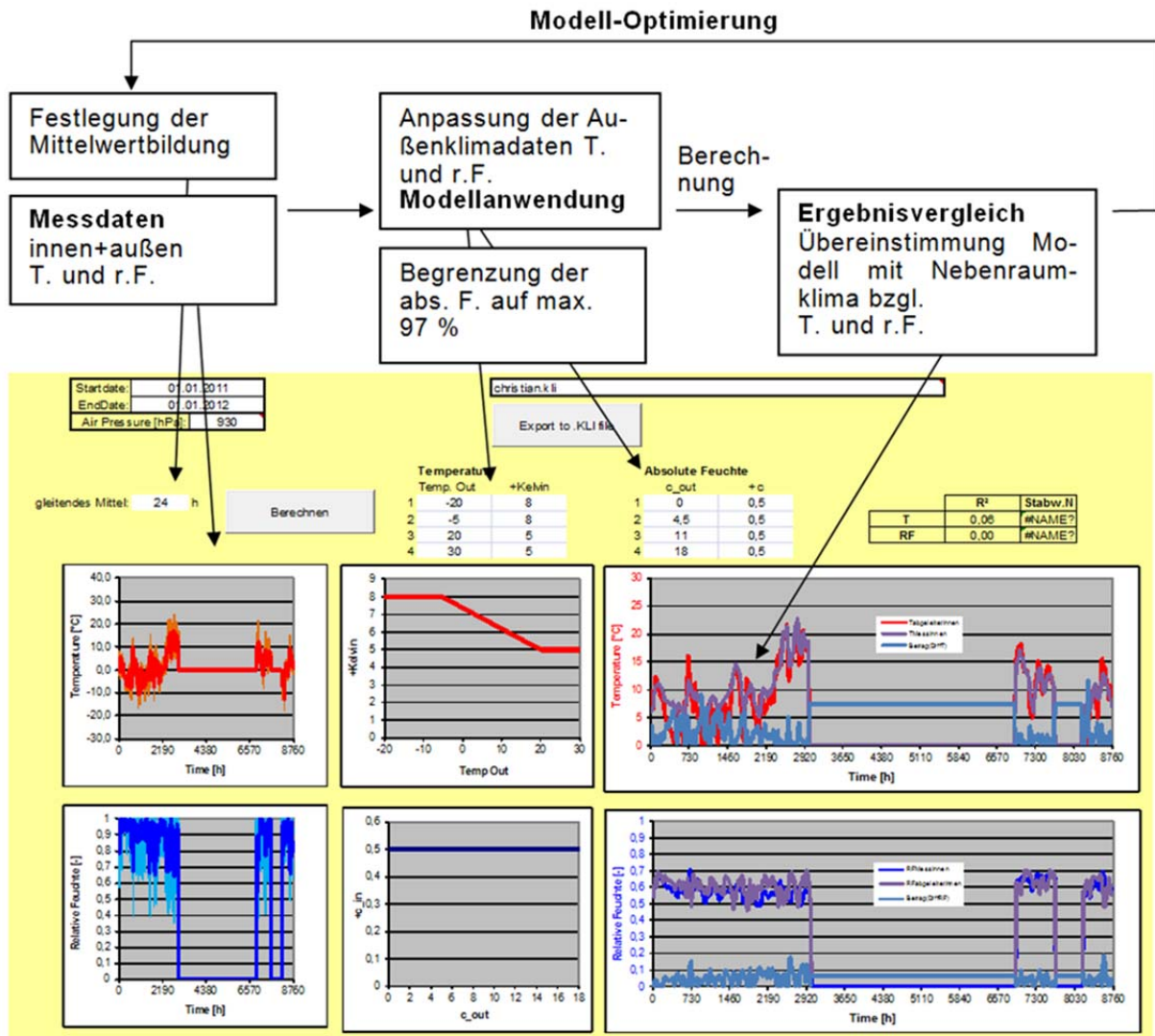


Bild 112: Schema des Optimierungsvorgangs und des Excel-Berechnungstools für die Festlegung von Temperatur- und Feuchteanpassung der Dachraumklassen.

Die aus dem Optimierungsprozess resultierende, abschließende Klassifizierung der Dachräume sowie die zugehörigen Temperatur- und Feuchteanpassungsfaktoren wird im Folgenden kurz beschrieben und ist in Tabelle 27 zusammengefasst sowie in Bild 113 grafisch dargestellt.

Klasse A1 (gut gedämmt, winddicht) wird bei kalten Außentemperaturen ab -5°C mit einer Temperaturerhöhung von $+10\text{ K}$ beaufschlagt. Bei 20°C Außentemperatur und mehr die resultierende Nebenraumtemperatur um $+4\text{ K}$ angehoben. Beim gut gedämmten, winddichten Dachraum findet keine Feuchteanpassung statt. Dies gilt insgesamt für die Klasse A, da hier davon ausgegangen werden kann, dass kein Feuchteeintrag in die Dachkonstruktion stattfindet, weder von außen noch vom Innenraum. Sorption und Desorption der Oberflächen gleichen sich im Mittel wieder aus.

Klasse A2 (mäßig gedämmt, im Wesentlichen winddicht) wird bei kalten Außentemperaturen ab -5°C mit einer Temperaturerhöhung von $+8\text{ K}$ beaufschlagt. Bei 20°C Außentemperatur und mehr die resultierende Nebenraumtemperatur um ebenfalls $+4\text{ K}$ angehoben. Beim mäßig gedämmten, im Wesentlichen winddichten Dachraum findet ebenfalls keine Feuchteanpassung statt.

Klasse B1 (ungedämmt, mit Schalung, wenig winddicht) wird bei kalten Außentemperaturen ab -5°C mit einer Temperaturerhöhung von $+3\text{ K}$ beaufschlagt. Bei 20°C Außentemperatur und mehr die resultierende Nebenraumtemperatur um $+2\text{ K}$ angehoben. Bei der Klasse B, also auch beim ungedämmten, wenig winddichten Dachraum mit Schalung, findet eine geringfügige Feuchteanpassung von $0,5\text{ g/m}^3$ statt. Gleichzeitig wird die rel. Feuchte auf max. 97% begrenzt, davon ausgehend, dass ein gewisses Sorptionsvermögen der den Dachraum umgebenden Bauteile dauerhaft gegeben ist. Andernfalls entstehen bei niedrigen Außentemperaturen durch die Feuchteanpassung rel. Feuchtegehalte im Dachraum, die in den Messungen nicht festgestellt werden konnten.

Klasse B2 (ungedämmt, rein ziegelgedeckt, windundicht) wird bei kalten Außentemperaturen keine Temperaturerhöhung vorgenommen. Ab -5°C bis $+20^{\circ}\text{C}$ Außentemperatur wird die resultierende Nebenraumtemperatur zunehmend um bis $+2\text{ K}$ angehoben. Beim ungedämmten, wenig winddichten Dachraum mit Schalung, findet die für die Klasse B festgelegte geringfügige Feuchteanpassung von $0,5\text{ g/m}^3$ statt.

Tabelle 27:
Temperatur- und Feuchtekorrekturfaktoren der vier Dachraum klassen.

Steildach- aufbau	Dachraum- klasse	+ K	+K	+ c
		-5°C	$+20^{\circ}\text{C}$	g/m^3
A) gedämmt, winddicht	Klasse A1	+10	+4	0
	Klasse A2	+8	+4	0
B) unge- dämmt, luftundicht	Klasse B1	+3	+2	0,5
	Klasse B2	0	+2	0,5

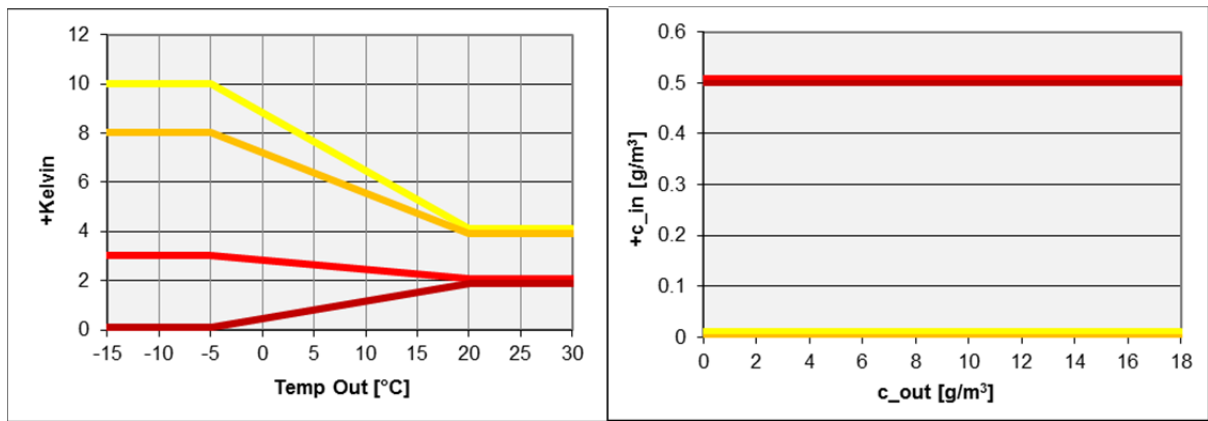


Bild 113:

Nebenraumklimamodell für den unbeheizten Dachraum, Temperaturanpassung der Außentemperatur (links) und Feuchteanpassung der Außenluftfeuchte.

Ein Vergleich der modellierten Temperaturen und relativen Feuchten für einen Dachraum der Klasse B1 am Standort Oschatz ist exemplarisch in Bild 114 dargestellt. Für jede Klasse ist dieser Vergleich im Anhang ab Bild 303 bis Bild 312 dargestellt.

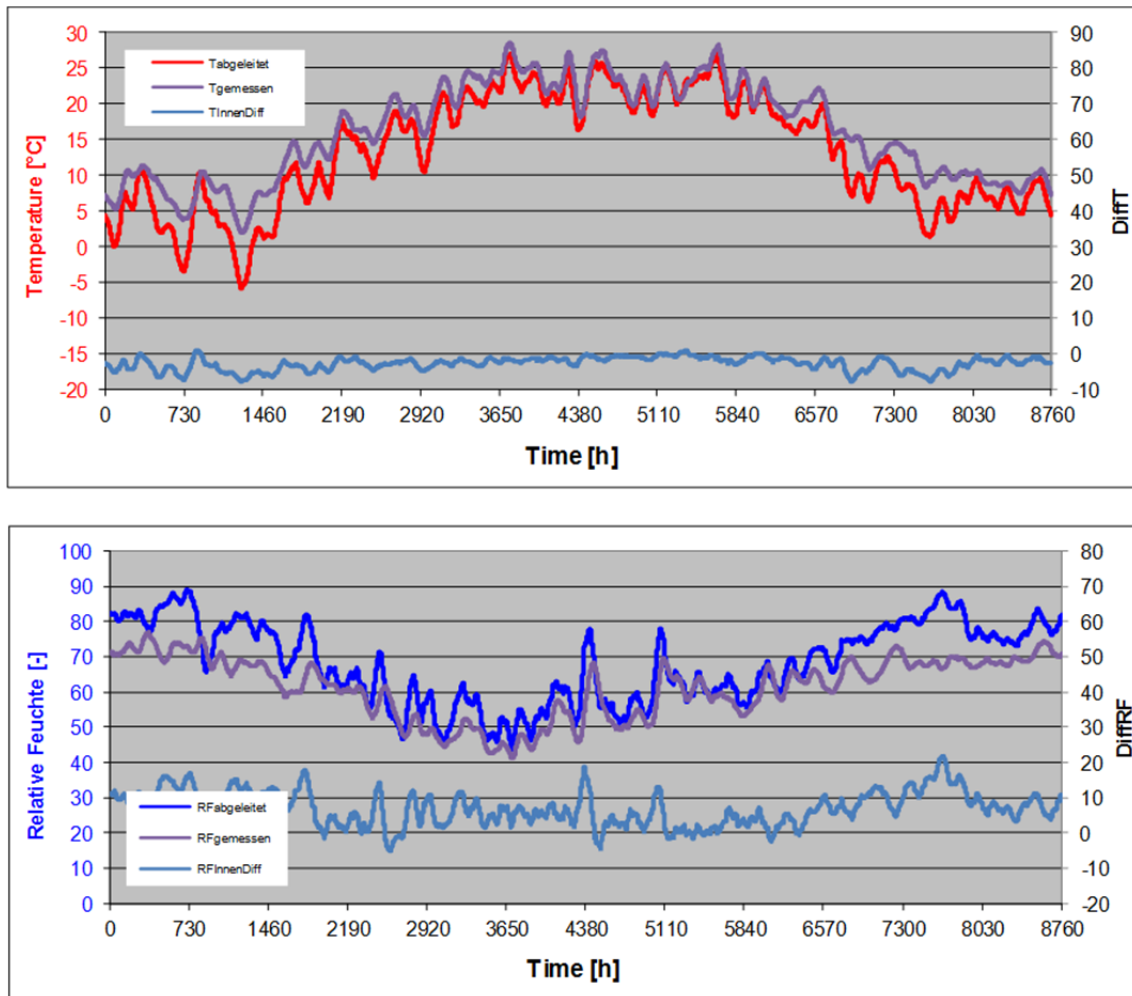


Bild 114:
Vergleich von Temperatur- und Feuchteanpassung der Dachraumklass B1 (für den Dachraum Oschatz).

4.1.3 Validierung des Modells durch Vergleich der simulierten Feuchteverhältnisse in einer Dachkonstruktion

Die gewählte Konstruktion für die Validierung stellt einen möglichen Schichtaufbau einer Konstruktion bei nachträglicher Dämmung einer obersten Geschossdecke dar. Um die Begehbarkeit der nachträglich gedämmten Holzbalkeendecke zu ermöglichen, könnte beispielsweise eine OSB-Platte auf die nachträgliche Holzfaserdämmung aufgebracht werden, die aufgrund ihres s_d -Wertes bzgl. kritischer Feuchtegehalte z.B. gem. [4] zu überprüfen wäre.

Für die Konstruktion werden s_d -Werte lt. Baustoffkatalogen oder gem. Herstellerangaben verwendet. Der Aufbau der obersten Geschossdecke wurde beispielhaft entsprechend Bild 115 gewählt. Nach dem Glaser-Verfahren mit normalem Außenklima im Dachraum bewertet, ergibt sich erwartungsgemäß auf der Innenseite der OSB-Platte ein unzulässig hoher Tauwasserausfall. Die Konstruktion erscheint daher gut geeignet, das entwickelte Modell und die unterschiedlichen Modellklassen hieran zu untersuchen.

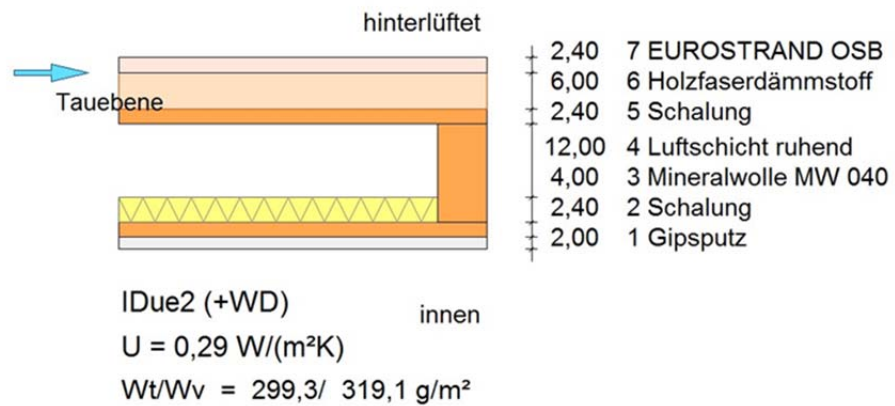


Bild 115:

Oberste Geschossdecke einer üblichen Holzbalkendecke mit Angabe der Ebene in der Tauwasser ausfällt und der Tauwassermenge W_t und der Verdunstungsmenge W_v .

Die Konstruktion wird zum Vergleich einmal mit dem gemessenen und einmal mit dem anhand des neuen Modells ermittelten Dachraumklima mit Hilfe des hygrothermischen Simulationsprogramms WUFI® in der eindimensionalen Version nach [4] berechnet. Bild 116 zeigt den Konstruktionsaufbau mit den einzelnen Schichten in WUFI®. Die weiteren Simulationsparameter werden wie folgt angenommen:

- Für die Oberflächenübergangskoeffizienten werden Strahlungs- und Regeneinflüsse ausgeschaltet. Es werden keine zusätzlichen Beschichtungen auf der Außenseite angenommen, d.h. außenseitig ist auch hier der s_d -Wert des Belages maßgeblich.
- Nach DIN 68800 [34] muss der Einfluss von konvektivem Feuchteeintrag in Leichtbauteile bei der Beurteilung berücksichtigt werden. Dies erfolgt über eine Luftinfiltrationsquelle gemäß dem Infiltrationsmodell des IBP [77].
- Als Startbedingungen wird die Gleichgewichtsfeuchte der Materialien bei 80 % angenommen (bei einer Temperatur von 20 °C). Der Rechenzeitraum beträgt 5 Jahre ab Anfang Oktober.
- Die Klimarandbedingungen werden für alle Klassen in unterschiedlichen Varianten betrachtet:
- Die Klimarandbedingungen werden im Wohnraum nach WTA-Merkblatt 6-1 [1] für normale Feuchtelast angesetzt.
- Das Außenklima (also Nebenraumklima) wird variiert. Aus den stündlichen Werten des abgeleiteten Modellklimas und den Messwerten des Nebenraums lassen sich erzeugen Klimabedingungen als Datei einlesen. Es werden 1 Jahr d.h. 8760 Stundenwerte abgebildet. So können die

gemessenen Werte unbeheizter Dachräume direkt mit den korrespondierenden, aus den Außenklimadaten abgeleiteten Klassen verglichen werden. vgl. Bild 117.

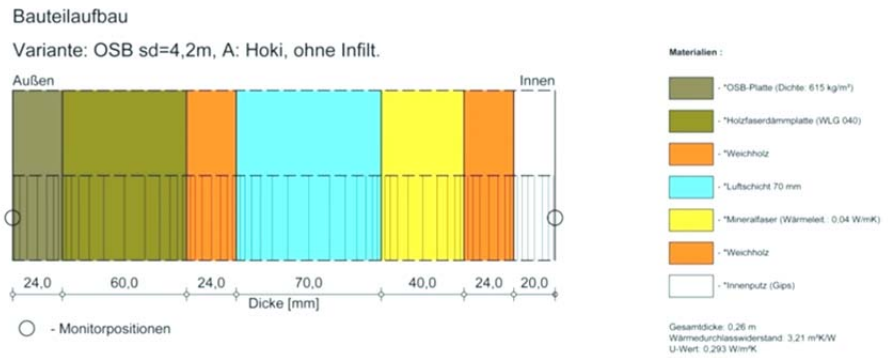


Bild 116:
 Konstruktionsaufbau in WUFI® Pro.

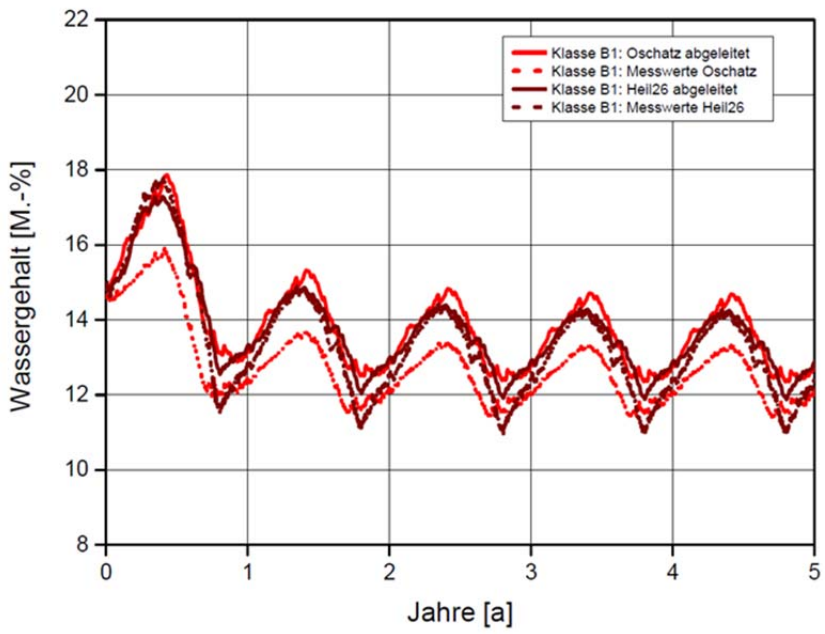
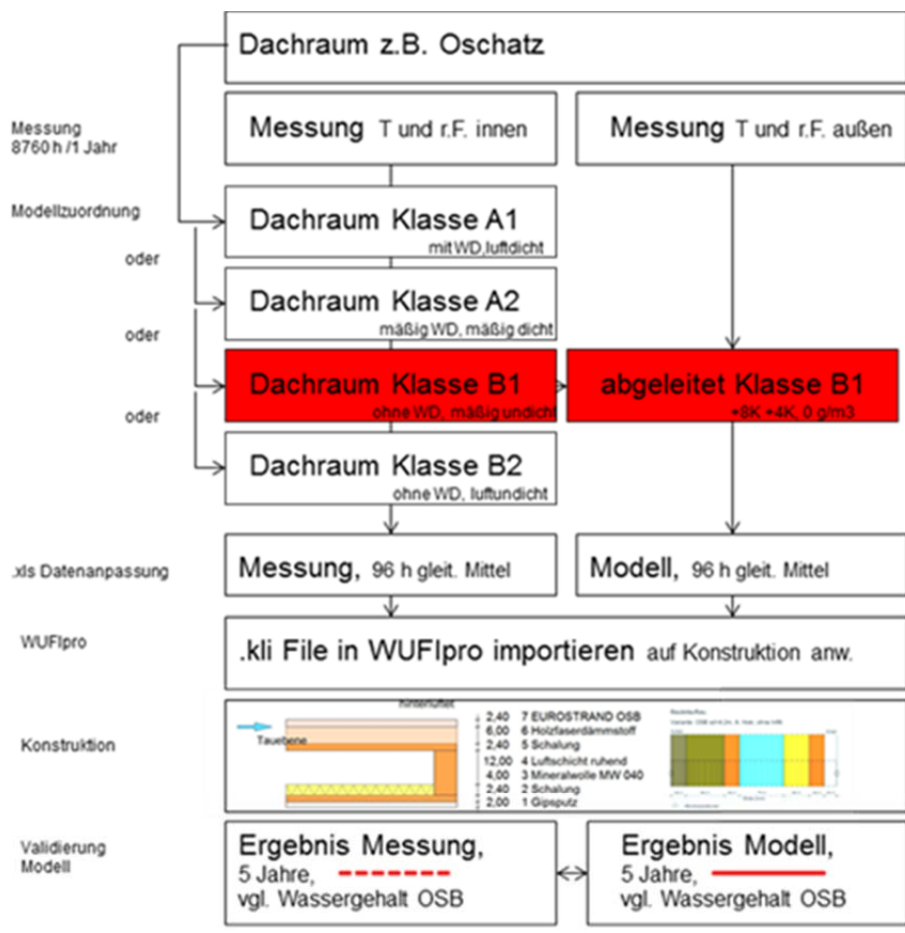


Bild 117: Vorgehensweise bei der Validierung der Dachraumklassen (oben) und Vergleich der resultierenden Wassergehalte in der kritischen oberen OSB-Abdeckung (unten).

Ergibt sich aus den Zeitverläufen der Feuchtegehalte eine gute Übereinstimmung und liegen diese bei Abweichung leicht auf der sicheren Seite, d.h. sind sie höher als die sich bei einer Simulation mit den Messdaten ergebenden Werte, kann das Modell als geeignet betrachtet werden und das Nebenraumklima für Bemessungszwecke ausreichend genau abbilden.

Das Modell wurde für alle Klassen mit dem gemessenen Innen- und Außenklima des jeweils dazugehörigen Dachraums überprüft. Die Ergebnisse für den Wassergehalt der oben liegenden OSB-Platte sind alle Dachräume der verschiedenen untersuchten Klassen in Bild 118 dargestellt. Insgesamt ergibt sich bei allen Klassen eine gute Übereinstimmung bei Berechnung mit dem Modell im Vergleich zu einer Berechnung mit den tatsächlich gemessenen Klimarandbedingungen. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Ergebnisse für die verschiedenen Dachraumklasse untereinander relativ deutlich.

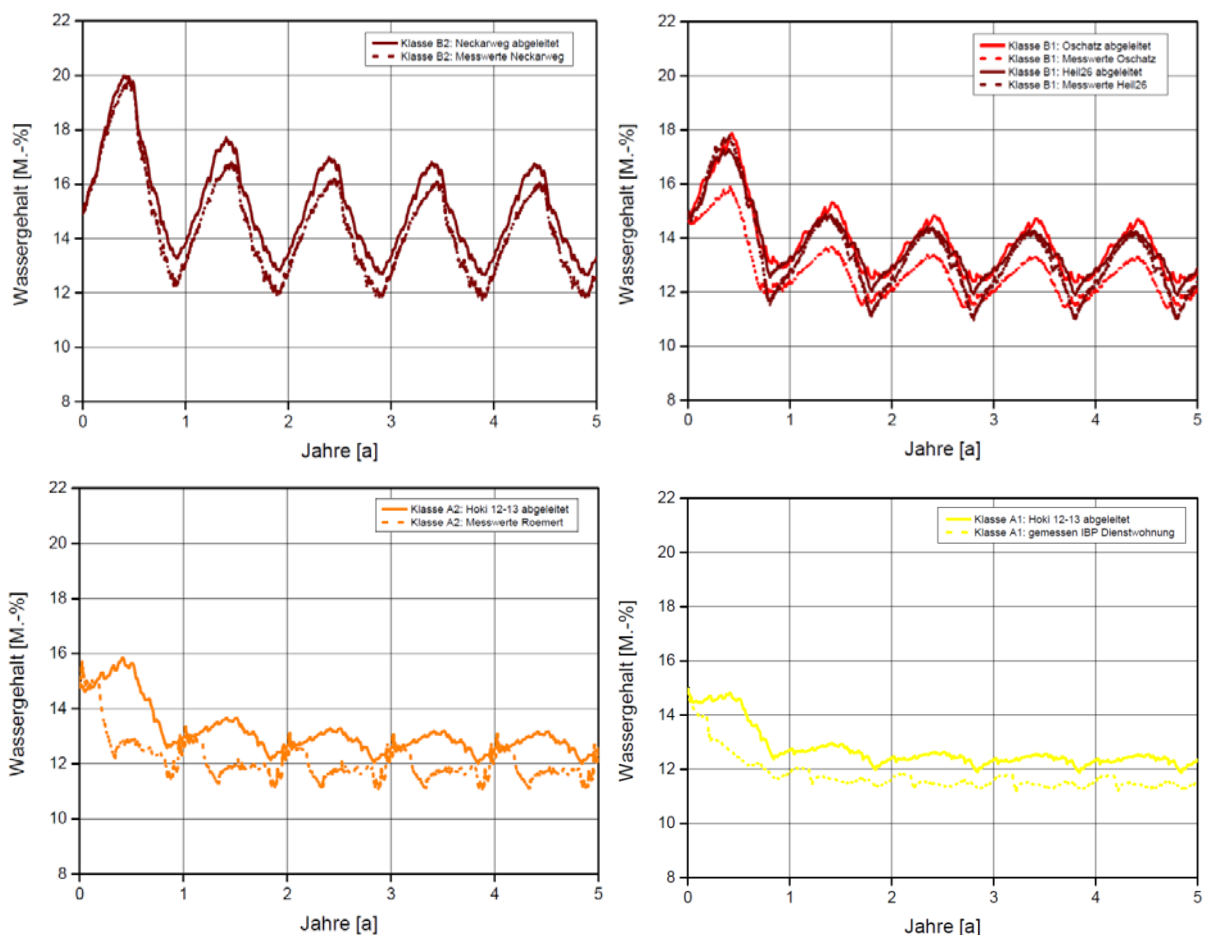


Bild 118:
Validierungsergebnisse für unterschiedliche Klassen, Feuchtegehalt der OSB Platte.

Das vorgestellte Modell stellt somit eine geeignete Möglichkeit dar, das sich in Abhängigkeit der Ausführungsart der Hüllfläche des Dachraumes ändernden Nebenraumklima im unbeheizten Dachraum auf einfache Art abzubilden. Weitere Messdaten wären wünschenswert, um die getroffenen Annahmen weiter zu verifizieren und ggf. weiter anpassen zu können.

Bild 119 zeigt nochmals separat, wie sich die Feuchtegehalte in der OSB-Platte in Abhängigkeit der gewählten Dachraumklasse verändert. Dazu wurden alle vier Modellklassen aus dem hygrothermischen Referenzjahr Holzkirchen abgeleitet und einander gegenüber gestellt sowie mit einer Berechnung bei Annahme des Außenklimas im Dachraum verglichen.

Für den Fall mit Außenluftverhältnisse im Dachraum steigt die Holzfeuchte in der OSB-Platte an und erreicht im 5. Jahr Werte über 24 M.-%. Diese Lösung erscheint nicht akzeptabel. Bereits die Verwendung des Dachraumklimamodells für Klasse B2 (lediglich mit Ziegeleindeckung) führt schon zu einer Reduktion der Holzfeuchten auf nur noch knapp über 20 M.-%. Mit Klasse B1 (Eindeckung mit Schalung) sinkt die Holzfeuchte unter 18 M.-% und liegt dann entsprechend DIN 68800 schon im zulässigen Bereich. Für die gedämmten Dachräume der Klassen A1 und A2 bleiben die maximalen Feuchtegehalte sogar unter 14 M.-%.

Das Beispiel zeigt also, dass man bei vereinfachter Betrachtung mit Außenluftverhältnissen im Dachraum am nachträglichen Einbau einer Dampfbremse nicht vorbeikommt. Das ergab ja auch die ebenfalls durchgeführte Glaser-Berechnung. Bei realistischem Ansatz des sich nach Art der Eindeckung und einer evtl. zusätzlich vorhandenen Dämmung einstellenden Dachraumklimas, das durch die neuen Modelle einfach berücksichtigt werden kann, funktioniert der Aufbau in der Regel aber auch ohne diese aufwändige Zusatzmaßnahme.

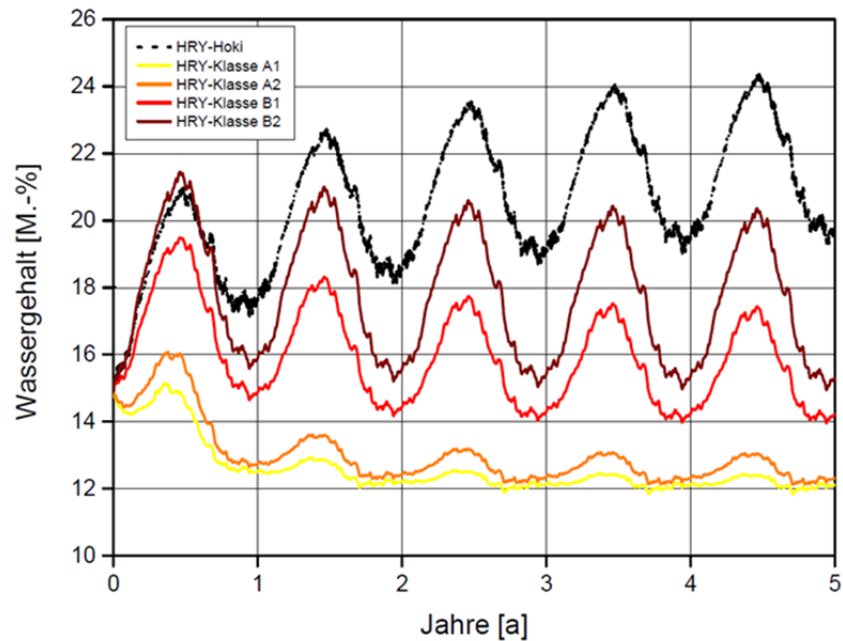


Bild 119:
Vergleich der Feuchtegehaltsänderung in der OSB-Platte je nach Anwendung des Außenklimas hygrothermischen Referenzjahres Holzkirchen bzw. den daraus entwickelten unterschiedlichen Modellklassen.

4.1.4 Ausblick

Das in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellte Modell basiert auf 4-Tages-Mittelwerten. Dabei werden insbesondere tageszeitliche Schwankungen außer Acht gelassen, die für detailliertere Betrachtung z.B. maximaler Wärmeeinträge um die Mittagszeit relevant sein können. Im Lauf der Arbeiten wurde bereits ein auf stündlichen Werten beruhender Zusammenhang zwischen Außen- und Nebenraumklima ermittelt und eine Modellgleichung für die Nebenraumtemperatur aufgestellt. Dieser Ansatz beruht auf der Tagesmittelaußentemperatur wobei zusätzlich die stündlichen Differenzen der Nebenraumtemperatur gegenüber der Außentemperatur sowie deren Phasenverschiebung berücksichtigt werden.

Der stündliche Zusammenhang zwischen Außen- und Nebenraumtemperaturen wird exemplarisch in Bild 120 gezeigt.

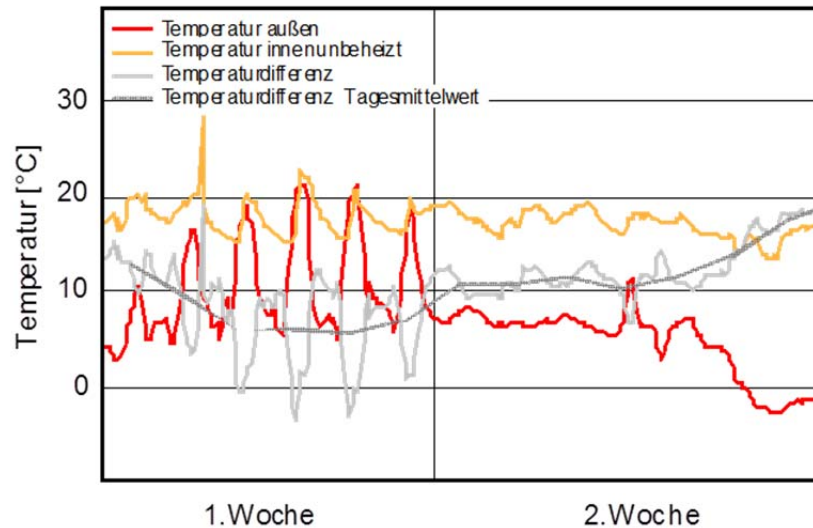


Bild 120:

Temperaturverhältnisse in einem mäßig gedämmten Dachraum im Vergleich zur Außenlufttemperatur. In der ersten Woche treten eher große Temperaturschwankungen auf, während diese in der zweiten Woche deutlich geringer bleiben. Neben der mittleren Temperaturdifferenz (dunkelgraue Kurve) ist ein deutlicher Zusammenhang der stündlichen Temperaturdifferenz (hellgraue Kurve) mit den Temperaturamplituden der Außenluft zu erkennen.

Die stündlichen Werte sowie die tageszeitlichen Schwankungen der Außentemperatur zeigen einen deutlichen Zusammenhang mit den Temperaturamplituden im Dachraum. Bei den stündlichen Differenzen im Tagesverlauf ist bezüglich der Amplituden ein deutlicher Zusammenhang mit den Amplituden des Verlaufs der Außenlufttemperatur erkennbar. Bei großen Amplituden im Außenklima ist auch die Differenzamplitude hoch. Bei geringen Amplituden der Außentemperatur ist die Differenzamplitude gering.

Abzubilden wäre demnach das Nebenraumklima über einen direkten Zusammenhang zwischen der Differenzamplitude und der Außentemperaturamplitude in Abhängigkeit der Dachraumklasse. Zur Abbildung des Tagesgangs müssten also für die verschiedenen Dachraumklassen tägliche Differenzamplituden aus den Außenlufttemperaturen abgeleitet und der längerfristigen (4-Tages-Mittelwerte) Kurve überlagert werden. Erste Ansätze dazu sind in [75] näher beschrieben, konnten aber im Rahmen dieses Projekts und auf Basis der verfügbaren Dachraumklimamessungen nicht weiter verfolgt werden.

Die zuvor vorgestellte Validierung belegt zudem, dass eine stündliche Differenzierung des Dachraumklimas für die hygrothermische Bemessung von Bauteilen offensichtlich nur von geringerer Bedeutung ist.

4.1.5 Zusammenfassung Dachraumklimamodell

Das Dachraummodell leitet für vier verschiedene Dachraumklassen aus stündlichen Werten das gleitende 4-Tages-Mittel der Bedingungen im jeweiligen Dachraum ab. Die Temperatur wird in Abhängigkeit der Modellklassen und in Abhängigkeit der vorliegenden Außentemperatur unterschiedlich stark angehoben, da sich im Dachraum i.d.R. höhere Temperaturen ergeben als in der Außenluft. Eine Feuchtanpassung findet nur bei undichten Dächern statt. Hier wird der absolute Feuchtgehalt leicht um $0,5 \text{ g/m}^3$ gegenüber der Außenluft angehoben. Eine Validierung des Modells erfolgte anhand von Bauteilsimulationen bei beiden Klimarandbedingungen. Die Ergebnisse zeigen eine gute, auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung von Messung und Modell.

4.2 Unbeheizte Kellerräume

Bei unbeheizten Kellerräumen handelt es sich in der Regel um nicht oder nur teilweise zu Aufenthaltszwecken genutzte Nebenräume, deren Außenwände bei neueren Gebäuden meist aus Stahlbeton, bei älteren Gebäuden häufig auch aus Mauerwerk (Betonsteine, Ziegel, Kalksandstein) bestehen. In den letzten Jahren werden Keller meist standardmäßig mit einer Perimeterdämmung versehen. Bei älteren Kellern ist dagegen oft nur eine dünne oder gar keine Wärmedämmung vorhanden. Die hygrothermischen Bedingungen in Kellerräumen werden daher stärker vom Außenklima beeinflusst, als die anderer Räume. Da Kellerräume aber zumindest teilweise ins Erdreich einbinden, spielt dessen Temperatur und Speichermasse ebenfalls eine wichtige Rolle. Meist liegen die Temperaturen an den Bauteilinnenoberflächen und im Keller daher etwas höher aber doch nahe an denen des umgebenden Erdreichs. Darüber hinaus wird das Raumklima auch durch die Nutzung des Kellerraums z.B. als Lagerraum oder Waschküche, durch die Art der Belüftung und durch Nähe zu einem Heizraum beeinflusst.

Da die hygrothermische Bemessung von an Kellern angrenzenden Bauteilen bisher meist mit stark vereinfachten Annahmen erfolgt, wird im Folgenden die Entwicklung eines auf Messdaten basierenden empirischen Nebenraumklimamodells für unbeheizte Kellerräume vorgestellt.

Ein solches Modell ist aus verschiedenen Gründen von Bedeutung. Zunächst hat der Transmissionswärmeverlust aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen aneinander angrenzenden beheizten und unbeheizten Räumen direkten Einfluss auf den Heizenergiebedarf – ein unrealistischer Ansatz der Randbedingungen in diesen Räumen führt also zu einer Fehleinschätzung des tatsächlichen Energiebedarfs sowie des möglichen Einsparpotentials. Auch an den Feuchteschutz von gedämmten Bauteilen, die Wohnraum gegen den Keller abgrenzen, sind ggf. geringere Anforderungen zu stellen, wenn die Bedingungen in Kellerräumen weniger extrem angenommen werden. Dies wurde zuvor bereits am Beispiel der Dachräume deutlich. Auch für die Bemessung von Kellerwänden, die an das Erdreich angrenzen – z.B. zur Vermeidung von Schimmel-

pilzbildung infolge zu hoher Oberflächenfeuchten – ist eine realistische Annahme des Raumklimas wesentlich.

Bisher ist eine solche hygrothermische Planung schwierig, weil die Raumklima-Verhältnisse nur unzureichend genau bekannt sind und in Normen oder Richtlinien allenfalls pauschale Angaben gemacht werden (vgl. Tabelle 5 in [78], [79], [80]). Diese betreffen z.B. häufig nur die Temperaturbedingungen während die Feuchteverhältnisse vernachlässigt werden.

4.2.1 Raumklimamessungen in Kellerräumen

Die Messungen in verschiedenen Kellerräumen werden über einen möglichst langen Zeitraum durchgeführt, um das hygrothermische Verhalten der Kellerräume unter allen Witterungsbedingungen zu erfassen. Der Messzeitraum liegt dementsprechend bei mindestens einem Jahr, bei etwa der Hälfte der Räume konnten die Daten über zwei Jahre (von Juli 2013 bis Mai 2015) erfasst werden. Dies ermöglicht die Berücksichtigung von zwei Winterperioden und eine genauere Analyse der gemessenen Daten in der kritischsten Jahreszeit.

Im näheren Umfeld des IBP-Standorts in Valley wurden insgesamt in 15 verschiedenen Kellern die Werte für Temperatur und rel. Feuchte aufgezeichnet. Dazu kamen kombinierten Mess-Daten-Logger zum Einsatz, die parallel in einem einstellbaren Zeitschritt Temperatur und relative Feuchte messen und im integrierten Speicher ablegen. Vorteil dieser Datenlogger ist, dass Sie ohne Netz- oder Stromverbindung selbständig messen können und nur von Zeit zu Zeit ausgelesen werden müssen. Für die aktuelle Untersuchung wurde ein Messzeitschritt von 60 Minuten und eine Ausleserhythmus von etwa 6 Wochen gewählt. Das Außenklima, das als Ausgangsbasis für die Modelle dient, wird von der Wetterstation des IBP bezogen – aufgrund der Nähe aller untersuchten Kellerräume zum IBP-Standort und des nur gedämpften Einflusses des Außenklimas auf das Kellerklima erscheint dies gut vertretbar.

In Tabelle 28 wird eine Übersicht der durchgeführten Messungen aufgelistet. Zu Anfang der Untersuchung wurden zehn Kellerräume berücksichtigt (erster Satz). Um das Modell noch etwas genauer definieren und validieren zu können und weil zusätzliche Datenlogger aus den beendeten Dachraumklimamessungen verfügbar waren, wurden ab Dezember 2013 noch fünf weitere Kellerräume aufgenommen (zweiter Satz).

Durchgeführte Messungen

Die untersuchten Kellerräume befinden sich in der Umgebung des IBP in einer maximalen Entfernung von 30 km vom Standort der Wetterstation, bei der die Außenklimamessungen durchgeführt wurden.

Tabelle 28:
Übersicht der durchgeführten Messungen (Zeitraum).

Kellerräumen	2013						2014												2015								
	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	März	Apr	Mai				
Wetterstation Holzkirchen	27.07.2013 – 05.05.2015																										
Keller (BaL)	14.08.2013 – 05.04.2015																										
Keller (BeS)	14.08.2013 – 29.07.2014																										
Keller (ChB-Ost)	31.08.2013 – 03.05.2015																										
Keller (ChB-West)	31.08.2013 – 03.05.2015																										
Keller (ChS)	27.07.2013 – 16.07.2014																										
Keller (ChS-Bis)	21.08.2013 – 16.07.2014																										
Keller (ErT)	14.08.2013 – 16.02.2014																										
Keller (KiA)	14.08.2013 – 15.09.2014																										
Keller (MiB)			19.09.2013 – 27.07.2014																								
Keller (TiH)	14.08.2013 – 16.07.2014																										
Keller (EIM)							14.12.2013 – 23.04.2015																				
Keller (PhK)	13.12.2013 – 19.04.2015																										
Keller (TeG)							21.12.2013 – 24.06.2014																				
Keller (ThN)	13.12.2013 – 05.05.2015																										
Keller ToS)	13.12.2013 – 27.04.2015																										

Die Gebäude, zu denen die Kellerräume gehören, weisen verschiedene Typologien auf: kleine Ein- und Zweifamilienhäuser, Reihenmittelhäuser und große Mehrfamilienhäuser. Sie wurden hauptsächlich in den 1970er bis 1990er Jahren gebaut; einige Gebäude sind aber auch zwischen 1920 und 1970 sowie einige nach 1990 errichtet.

In dieser Zeit haben sich sowohl die Konstruktionsweisen als auch das Wärmedämmniveau geändert, was von großer Bedeutung für die Charakterisierung des Kellerraums ist. Tatsächlich besteht ein Großteil der Kelleraußenwände aus Stahlbeton oder Mauerwerk, bei denen keine Dämmung vorhanden ist (U-Wert des Bauteils ca. 2.5 W/m²K). Ab 1990 weisen die Wandkonstruktionen eine zunächst dünne Dämmschicht von 50 mm (U-Wert ca. 0.6 W/m²K), und ab 2000 eine dickere Dämmung von 100 mm auf (U-Wert ca. 0.3 W/m²K).

Das angrenzende „Klima“ besteht zum größten Teil aus Erdreich (30 – 60 % der Umschließungsflächen), gefolgt von beheizten Innenräumen (15 – 35 %), unbeheizten Innenräumen (10 – 40 %) und schließlich dem Außenklima (ca. 10 %). In den Außenwänden befinden sich oben meist kleine Fenster, welche die Belüftung der Kellerräume ermöglichen sollen. Die Keller weisen eine Fläche von 10 – 30 m² und eine Höhe von 2 – 2.5 m auf. Sie werden meist als Lagerraum, manchmal auch als Hobbyraum, Werkstatt oder Waschküche verwendet (vgl. Bild 121). In dem später aufgenommenen Messungs-Satz wurden zwei Trockenräume berücksichtigt, um den Einfluss einer höheren Feuchtebelastung erfassen zu können (*Keller EIM* und *ToS*). Eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Kellerräume ist in Tabelle 29 (erster Satz) und Tabelle 30 (zweiter Satz) enthalten.

Die Sensoren wurden einheitlich direkt unter der Decke angebracht. Diese Position wurde v.a. aus praktischen Gründen gewählt um Beschädigungen der Messgeräte möglichst auszuschließen.



Bild 121:
Fotografien unterschiedlich genutzter Kellerräume im Rahmen der Messungen (Waschküche, Trockenraum und Lagerraum).

Klassifizierung der gemessenen Kellerräume

Die Anzahl der betrachteten Kellerräume bietet eine ausreichend große Bandbreite in Bezug auf Größe, Geometrie, Art der Wände, angrenzendes Klima, Belüftung, Nutzung etc.. Da die Wände und deren Wärmedämmung einen der stärksten Einflussfaktoren darstellt, wurden die Räume in verschiedene Gruppen in Abhängigkeit vom jeweiligen Dämmstandard (U-Wert), eingeteilt:

- Gruppe A: gut gedämmt: $U\text{-Wert} < 0.4 \text{ [W/m}^2\text{K]}$;
- Gruppe B: mäßig gedämmt: $0.4 < U\text{-Wert} < 0.7 \text{ [W/m}^2\text{K]}$;
- Gruppe C: nicht gedämmt: $U\text{-Wert} > 0.7 \text{ [W/m}^2\text{K]}$.

In engem Zusammenhang mit dem Dämmstandard der Wand steht in den meisten Fällen die Art der Fenster sowie deren Luftdichtheit. Je besser die Wand gedämmt ist, desto luftdichter sind in der Regel auch die Fensteröffnungen ausgeführt.

Tabelle 29:

Übersicht der wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Kellerräume des ersten Satzes.

Gebäudetyp: EFH = Einfamilienhaus; MFH = Mehrfamilienhaus; RMH = Reihenmittelhaus; ZFH = Zweifamilienhaus.

Nutzung: H = Hobbyraum; L = Lagerraum; WK = Waschküche; WT = Trockenraum.

Bauteile: Dä = Dämmung; StB = Stahlbeton; ZM = Ziegelmauerwerk.

n.v. = nicht vorhanden.

	Kellerräume	BaL	BeS	ChB-O	ChB-W	ChS	ChS-bis	ErT	KiA	MiB	TiH
Allgemeine Infos	Standort	Otterfing	Höhenkirchen	Sollach	Sollach	Gauting	Gauting	Holzkirchen	Hofolding	Oberlaindern	Holzkirchen
	Entfernung vom IBP [km]	5.5	16	4.5	4.5	30	30	1.4	12	0.5	2
	Gebäudetyp	MFH	ZFH	EFH	EFH	MFH	MFH	RMH	EFH	EFH	MFH
	Baujahr	1990er	2000er	1980er	1980er	1950er	1970er	2000er	1980er	2010er	1970er
	Nutzung	WK	L	L	L	L	H	L	L	L	L
Maße	Höhe [m]	2.3	2.2	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	2.05	2.2	2.05
	Fläche [m ²]	13.8	22.5	9.9	15.5	28	12	10.2	14.5	23.3	6
	Fensterfläche [m ²]	0.15	1	0.6	0.6	0.45	0.15	0.4	0.3	0.9	0
	Türfläche [m ²]	1.7	1.7	0.9	0.9	1.7	1.7	1.5	1.4	1.7	1.7
Sensor	Höhe [m]	2	1.7	1.8	1.8	2	2	2	2	2	2
	Fensterentfernung [m]	1.7	2	0.5	0.5	0.2	3	0.3	0.2	n.v.	n.v.
Bauteile	Innenwände	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton	Holz
	Außenwände	StB+Dä	StB+Dä	StB	StB	StB	StB	ZM	StB	StB+Dä	ZM
	Decke	StB+Dä	StB+Dä	StB	StB	StB+Dä	StB	StB+Dä	StB	StB+Dä	StB
	Boden	Estrich	Estrich	Estrich	Estrich	Estrich	Estrich	Estrich	Estrich	EstrichDä	Estrich
Randklima [%]	Beheizter Innenraum	24	23	34	18	20	32	21	29	32	16
	Unbeheizter Innenraum	37	26	16	41	43	10	46	16	12	37
	Erdreich	31	51	50	41	31	58	34	45	56	32
	Außenklima	8	0	0	0	6	0	0	10	0	16

Tabelle 30:

Übersicht der wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Kellerräume des zweiten Satzes.

Gebäudetyp: EFH = Einfamilienhaus; MFH = Mehrfamilienhaus; RMH = Reihenmittelhaus; ZFH = Zweifamilienhaus.

Nutzung: H = Hobbyraum; L = Lagerraum; WK = Waschküche; WT = Trockenraum.

Bauteile: Dä = Dämmung; StB = Stahlbeton; ZM = Ziegelmauerwerk.

n.v. = nicht vorhanden.

	Kellerräumen	EIM	PhK	TeG	ThN	ToS
Allgemeine Infos	Standort	Weyarn	München Süd	Holz-kirchen	Holz-kirchen	Stephans-kirchen
	Entfernung vom IBP [km]	4.0	30	1.0	2.0	32
	Gebäudetyp	MFH	RMH	MFH	RMH	MFH
	Baujahr	2000er	1920er	2000er	1980er	1970er
	Nutzung	WT	L	L	L	WT
Ausmaß	Höhe [m]	2.05	2.40	2.20	2.05	2.40
	Fläche [m ²]	20.0	14.0	12.0	10.0	32.2
	Fensterfläche [m ²]	1.00	1.00	n.v.	n.v.	1.80
	Türfläche [m ²]	1.70	2.00	1.70	1.70	1.60
Sensor	Höhe [m]	1.90	2.00	2.00	1.50	2.00
	Fensterentfernung [m]	1.00	1.00	n.v.	0.10	0.20
Bauteile	Innenwände	Beton	ZM	Beton	Beton	Beton
	Außenwände	StB+Dä	ZM	StB+Dä	StB	StB
	Decke	StB+Dä	Holz+ZM	StB+Dä	StB	StB
	Boden	Estrich	Estrich	Estrich	Estrich	Estrich
Randklima [%]	Beheizt Innenraum	24	23	n.v.	n.v.	34
	Unbeheizt Innenraum	34	41	n.v.	n.v.	9
	Erdreich	33	30	n.v.	n.v.	47
	Außenklima	10	7	n.v.	n.v.	10

Zur Gruppe A gehören meist Keller, die ab dem Jahr 2000 gebaut wurden und einen U-Wert der Außenwände von ca. 0.3 W/m²K aufweisen (*Keller ErT*, *EIM*, *MiB* und *TeG*). Diese bestehen aus 260 mm Stahlbeton und 100 mm XPS (WLG 040) oder aus 365 mm Ziegel (*Keller ErT*). Bei diesen gut gedämmten Konstruktionen ist auch der Infiltrationsluftwechsel durch die Fenster, sprich die Belüftung reduziert, was eine höhere Temperatur und ggf. auch eine höhere Feuchtelastung zur Folge hat.

Nur zwei Keller (*BaL* und *BeS*) können der Gruppe B zugewiesen werden. Diese Keller wurden zwischen 1990 und 2000 gebaut und weisen, aufgrund einer eher dünneren Dämmschicht einen U-Wert der Außenwände von etwa

0.6 W/m²K auf (50 mm XPS, WLG 040). Auch in diesem Fall ist die Belüftung eher niedrig.

Der Großteil der Nebenräume gehört zur Gruppe C (*Keller ChB-Ost, ChB-West, ChS, ChS-bis, KiA, PhK, TiH, ThN und ToS*). Die Keller dieser Gruppe sind aufgrund nicht vorhandener, offener oder undichter Fenster wenig luftdicht und nicht gedämmt. Die Außenwände bestehen aus Mauerwerk und weisen einen U-Wert von ca. 2,5 W/m²K (Beton) bzw. 1,0 W/m²K (Ziegel) auf.

4.2.2 Modellansätze und Validierung

Da bisher keine Modelle bzgl. der Raumklimaverhältnisse in Kellern in Abhängigkeit des Außenklimas zur Verfügung stehen, werden zunächst verschiedene Ansätze überprüft, die für die Ableitung des Wohnraumklimas aus dem Außenklima zum Einsatz kommen. Dazu wird z.B. der Ansatz nach EN 15026 [4] herangezogen, der die Raumlufttemperatur und -feuchte in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur beschreibt.

Wie beim Wohnraumklima nach EN 15026 oder dem im vorigen Kapitel beschriebenen Dachraumklimamodell werden zur Auswertung im Folgenden die gleitenden Tagesmittelwerte der Messdaten verwendet, da die stündlichen Schwankungen im Tagesverlauf für die hygrothermische Bemessung im hier auftretenden Temperaturbereich nur von geringer Bedeutung sind. Die gemessenen Kellerräume werden in die drei zuvor beschriebenen Gruppen eingeteilt und in den Diagrammen wie folgt farblich markiert: blau für die Gruppe A, grau für die Gruppe B und rot für die Gruppe C.

Modellansatz und Validierung für die Temperatur in Kellerräumen

Für die Kellertemperatur kommt nur eine direkte Abhängigkeit von der Außentemperatur in Frage. Bild 122 zeigt die Messdaten aller fünfzehn Räume. Direkt dargestellt sind die darauf basierenden Ableitungskurven, die die Kellerraumtemperaturen für die verschiedenen Gruppen so ableiten, dass sie im Mittelfeld der jeweils zugehörigen Messdaten liegen. Wie beim Wohnraummodell in EN 15026 [4] werden für die Ableitung drei verschiedene Temperaturbereiche verwendet: unter 0 °C, von 0 °C bis 15 °C und über 15 °C. Bei Außentemperaturen unter 0 °C sowie über 15 °C ist die Nebenraumtemperatur konstant. Im Bereich dazwischen kann vereinfacht eine lineare Beziehung zwischen Außen- und Nebenraumtemperatur angenommen werden. Diese Bereiche entsprechend dabei gut der in der Abbildung dargestellten Verteilung der Messwerte.

Im Folgenden werden die sich im Keller einstellenden Temperaturen allgemein und für die einzelnen Gruppen etwas genauer beschrieben. Die durchschnittlich für alle Gruppen gemessenen Temperaturen im Keller liegen zwischen 10 °C und 16 °C, wenn die Außentemperatur unter 0 °C bleibt. Im Bereich über 15 °C wurden Mittelwerte zwischen 18 °C und 20 °C gemessen, welche aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung auf die Außenwände sowie der Erd-

reichentemperatur und -speichermasse meist tiefer liegen als die Außenlufttemperatur.

Durch die gute Dämmung ist bei den Kellerräumen von Gruppe A (vgl. Bild 123) auch bei tiefen Außentemperaturen nur eine geringere Abkühlung auf durchschnittlich 16 °C zu beobachten. Im Gegenzug ergeben sich im Sommer höhere Mitteltemperaturen von bis zu 20 °C. Dieser Wert liegt höher als die etwa 18 °C bei mäßig (vgl. Bild 124) oder nicht gedämmten Kellern (vgl. Bild 125), da die besser gedämmten Räume in der Nacht weniger abkühlen. Das gegenteilige Verhalten kann in Bild 125 bei den nicht gedämmten Kellerräumen von Gruppe C (vgl.) beobachtet werden: Hier liegen im Winter die Tiefstwerte im Mittel bei etwa 10 °C während sich die Räume im Sommer tagsüber rasch erwärmen, dann in der Nacht aber auch schnell wieder abkühlen. Die mäßig gedämmten Keller liegen bezüglich der Tiefsttemperaturen mit im Mittel etwa 12 °C zwischen den beiden anderen Gruppen. Dementsprechend verläuft die Temperaturableitungskurve der Keller der Gruppe A von minimal 16 bis maximal 20 °C, der Gruppe B von 12 bis 18 °C und die der Gruppe C von 10 bis 18 °C.

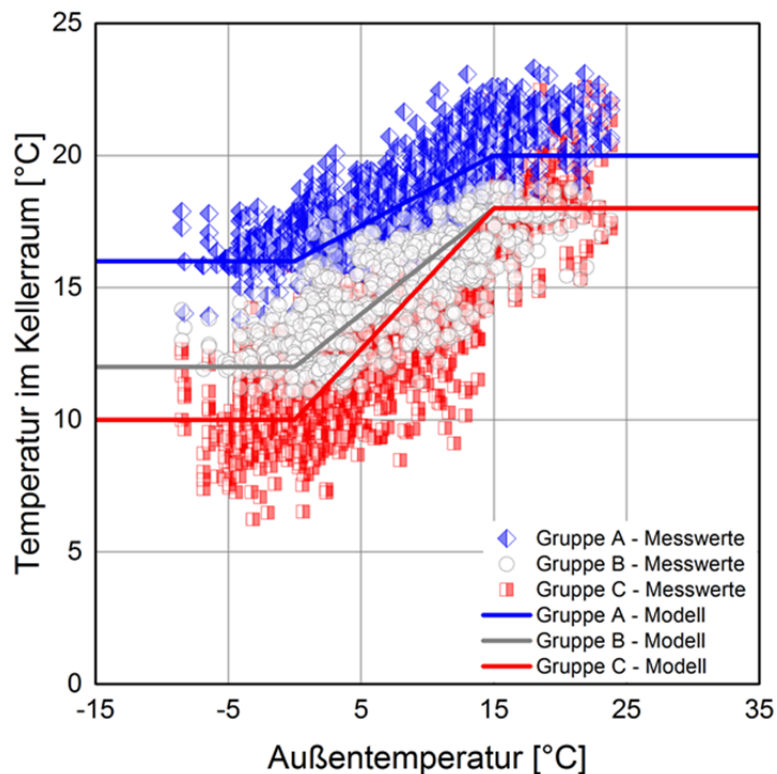


Bild 122:
Modellvorschlag für Temperatur – Temperatur im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur für alle drei Kellerraumgruppen.

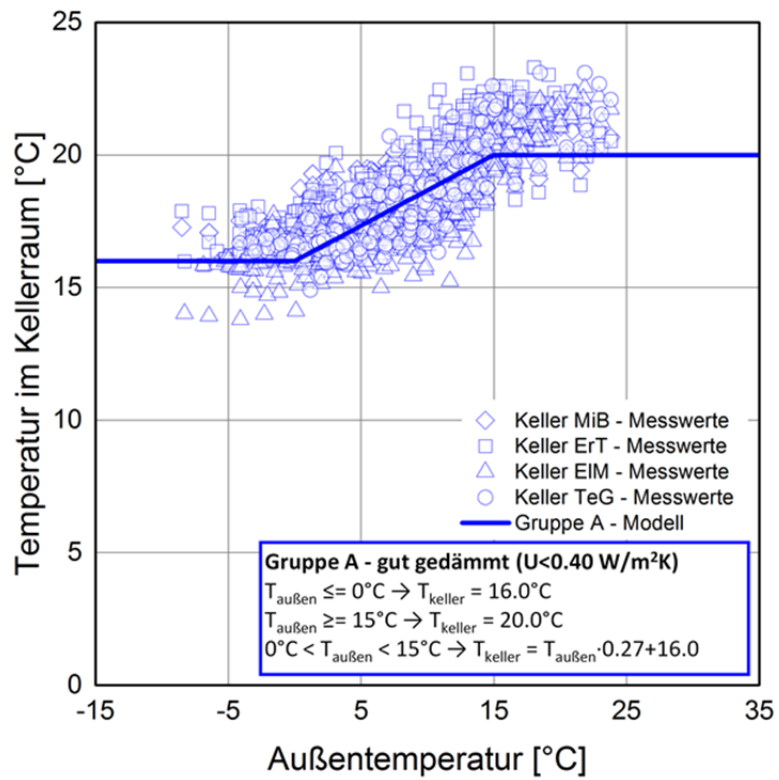


Bild 123:
 Modellvorschlag für Temperatur – Temperatur im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur für Gruppe A (gut gedämmt).

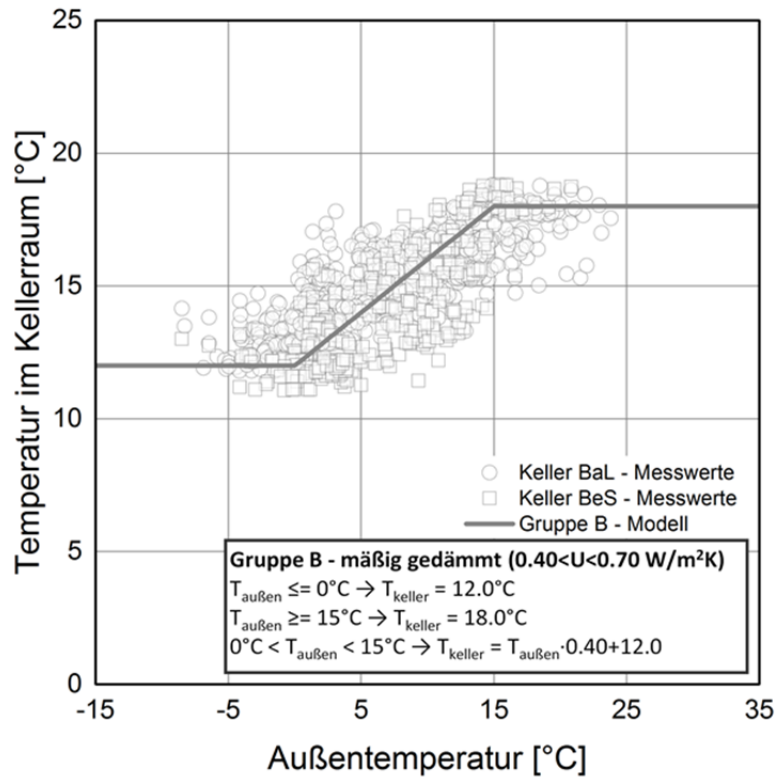


Bild 124:
 Modellvorschlag für Temperatur – Temperatur im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur für Gruppe B (mäßig gedämmt).

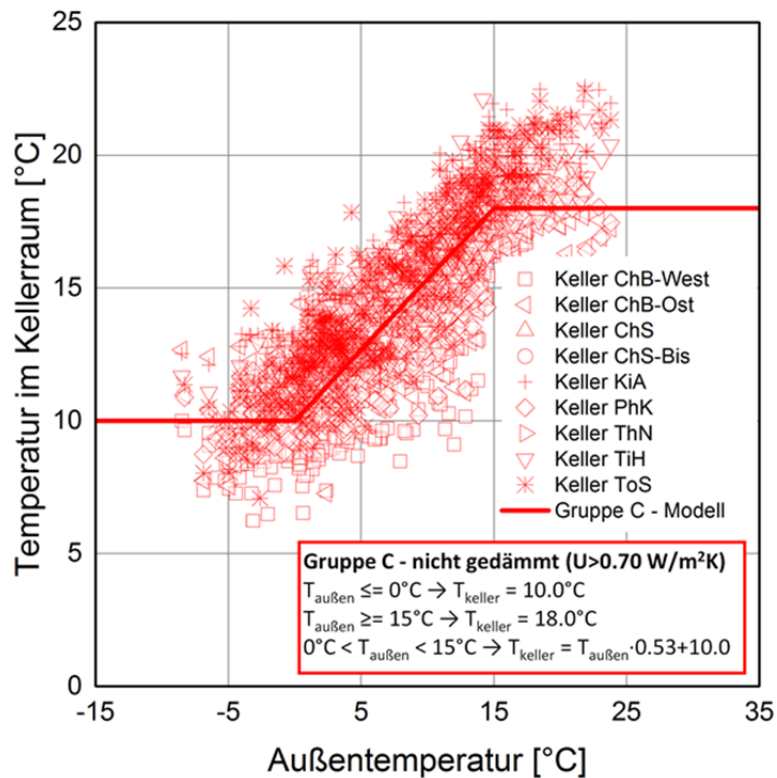


Bild 125:

Modellvorschlag für Temperatur – Temperatur im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur für Gruppe C (nicht gedämmt).

Die Validierung des Temperaturmodells für die Kellerräume erfolgt anhand des zeitlichen Verlaufs der Messdaten. Bild 126 stellt den Vergleich zwischen den gemessenen (schwarze Linie) und den abgeleiteten Werten (rote Linie) für einen Keller der Gruppe A (*Keller MiB*) über ein Jahr dar. Die hellblaue Linie stellt die Differenzkurve ($T_{\text{abgeleitet}} - T_{\text{gemessen}}$) mit der zugehörigen Skala auf der rechten Seite dar. Dieselbe Validierung erfolgt für die Keller der Gruppe B (*Keller BaL*, vgl. Bild 127) und C (*Keller TiH*, vgl. Bild 128). Die vollständige Validierung für alle Keller ist hier nicht dargestellt, kann aber auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

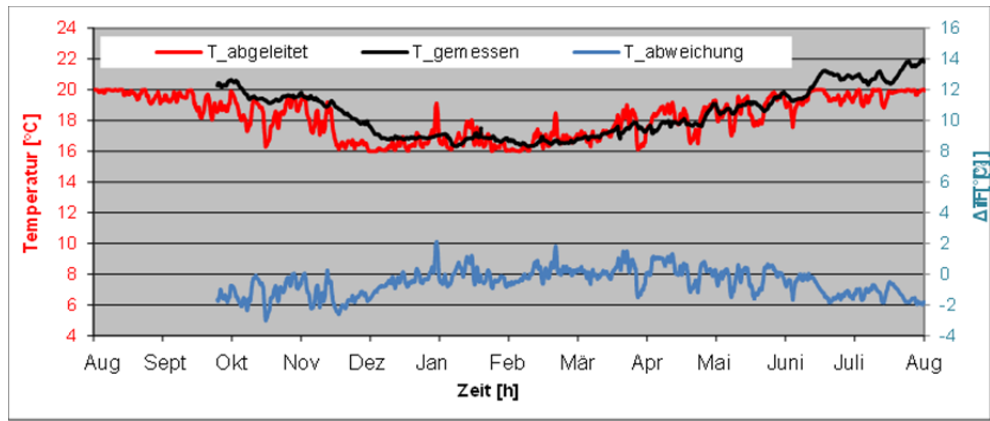


Bild 126:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. *Keller MiB* (Gruppe A).

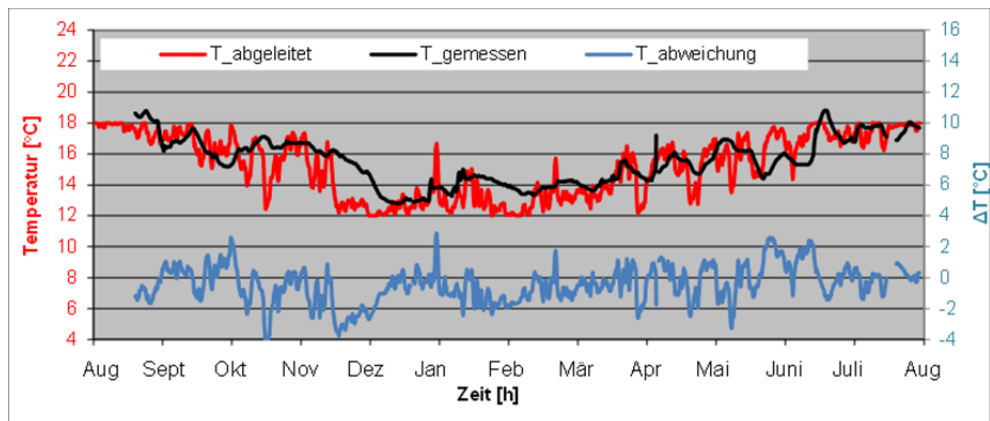


Bild 127:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. *Keller BaL* (Gruppe B).

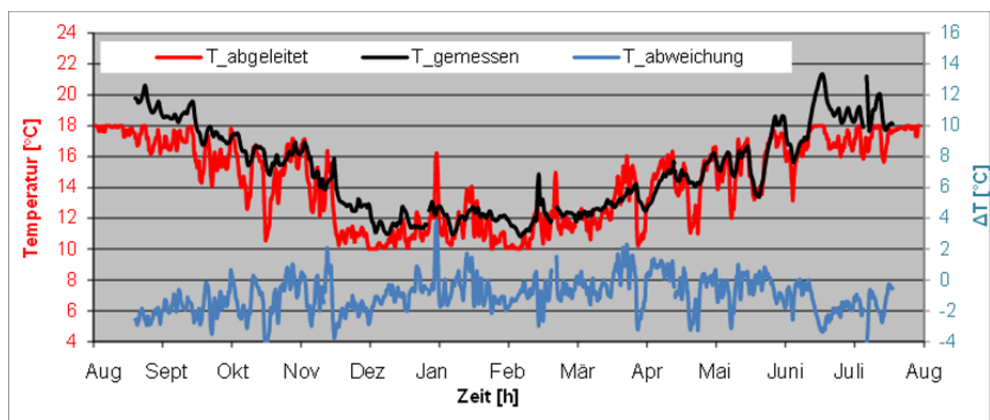


Bild 128:

Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. *Keller TiH* (Gruppe C).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Vergleich der über den Modellansatz ermittelten Kurven mit den gemessenen Werten in den Kellern eine gute, im Mittel etwas auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung zeigt. D.h. die Temperaturen bleiben im Mittel etwas niedriger als die Messwerte. Dies ist deutlich zu erkennen, wenn man die mittleren Differenzen zwischen den abgeleiteten und gemessenen Werten in der Tabelle 31 vergleicht: die Abweichung liegt i.d.R. unter 1 °C und ist meist negativ.

Tabelle 31:

Übersicht der gemessenen Temperaturmittelwerte sowie der mittleren Differenzen und Standardabweichungen zwischen den abgeleiteten und den gemessenen Werten für die einzelnen Kellergruppen. Die Werte werden separat nach Jahreszeiten und für das Gesamtjahr angegeben.

Zeichenerklärung: μ = gemessene Mittelwerte; Δ = mittlere Differenzen zwischen abgeleiteten und gemessenen Werte; σ = mittlere Standardabweichungen der abgeleiteten Werten.

		T [°C]	T(T) [°C]	
		μ	Δ	σ
Gruppe A	Gesamtjahr	18.3	-0.3	1.0
	Winter (Dez-Feb)	16.8	-0.1	0.5
	Frühling (März-Mai)	17.8	0.4	0.7
	Sommer (Juni-Aug)	20.8	-1.2	0.8
	Herbst (Sep-Nov)	19.3	-1.3	0.8
Gruppe B	Gesamtjahr	14.7	0.1	1.3
	Winter (Dez-Feb)	12.8	0.2	0.8
	Frühling (März-Mai)	14.3	0.9	1.1
	Sommer (Juni-Aug)	17.8	-0.5	0.7
	Herbst (Sep-Nov)	15.8	-0.7	1.2
Gruppe C	Gesamtjahr	14.9	-1.1	1.3
	Winter (Dez-Feb)	12.3	-0.9	1.0
	Frühling (März-Mai)	14.9	-0.7	1.2
	Sommer (Juni-Aug)	18.7	-1.5	0.8
	Herbst (Sep-Nov)	16.1	-1.9	1.4

Modellansatz und Validierung für die Feuchte in Kellerräumen

Für den Wohnraum wird nach EN 15026 [4] die relative Luftfeuchte ebenfalls aus der Außenlufttemperatur abgeleitet.

Zuerst wird daher ein Modellansatz überprüft, der die rel. Feuchte [%] im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur (vgl. Bild 129) zeigt. Hier ist eine schwache, lineare Beziehung zwischen den beiden Größen der relativen

Feuchte und der Außentemperatur zu erkennen – die Messwerte streuen aber sehr breit um die Regressionskurven. Die rel. Nebenraumfeuchte bleibt bei niedrigen Außentemperaturen zwischen 50 % und 60 %. Die höchsten Werte sind in den gedämmten Kellern von Gruppe A und B zu sehen (vgl. Bild 130 und Bild 131). In der Sommerzeit ist vor allem in den nicht oder nur mäßig gedämmten Kellern ein Anstieg der rel. Feuchte bis auf 80 % zu erkennen (vgl. Bild 131 und Bild 132). Im Gegensatz dazu wurde bei den luftdichten, gut gedämmten Konstruktionen von Gruppe A im Sommer nur ein geringer Anstieg der rel. Feuchte bis etwa 65 %, beobachtet, (d.h. die relative Feuchte bleibt während des Jahres weitgehend konstant. Dies hängt damit zusammen, dass die gut gedämmten Keller ganzjährig und damit auch im Sommer die höchsten Temperaturen aufweisen (vgl. Modellansatz und Validierung für die Temperatur in Kellerräumen). Da der Dampfdruck ohne zusätzliche Feuchtelasten gleich bleibt, sinkt die rel. Feuchte mit den höheren Temperaturen.

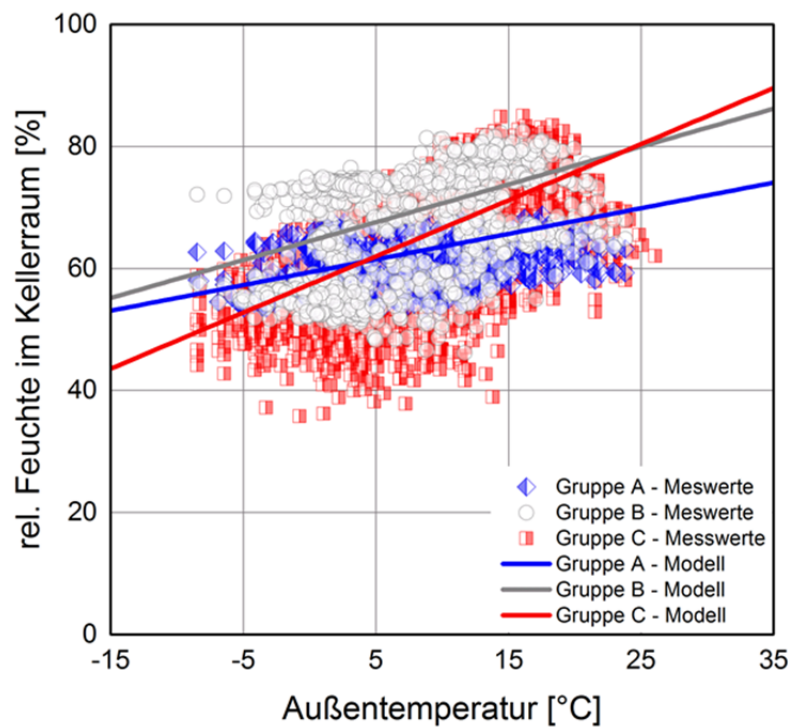


Bild 129:
Modellansatz für Feuchte – Relative Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur je nach Kellerraumgruppe.

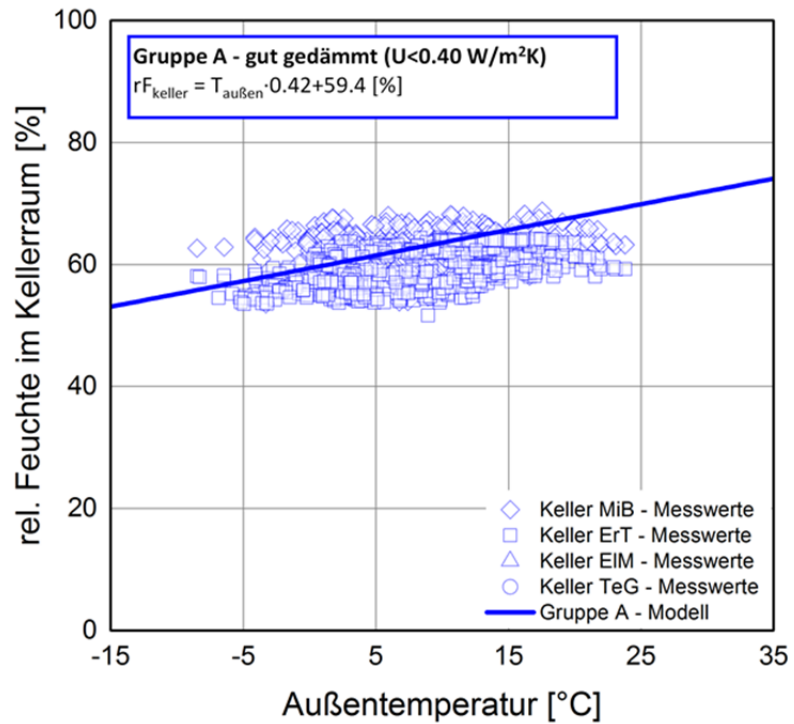


Bild 130:
 Modellansatz für Feuchte – Relative Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur für Gruppe A (gut gedämmt).

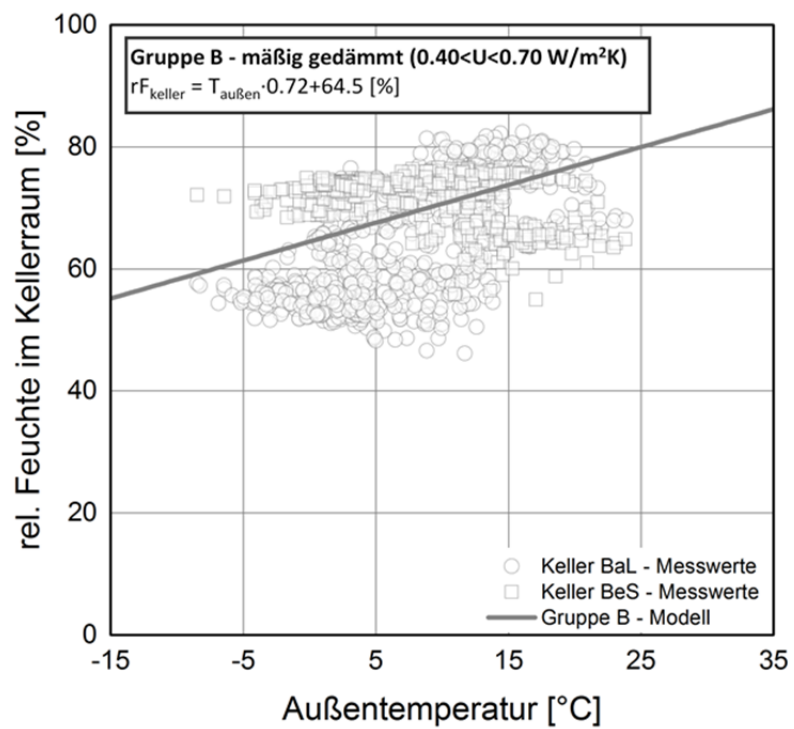


Bild 131:
 Modellansatz für Feuchte – Relative Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit
 der Außentemperatur für Gruppe B (mäßig gedämmt).

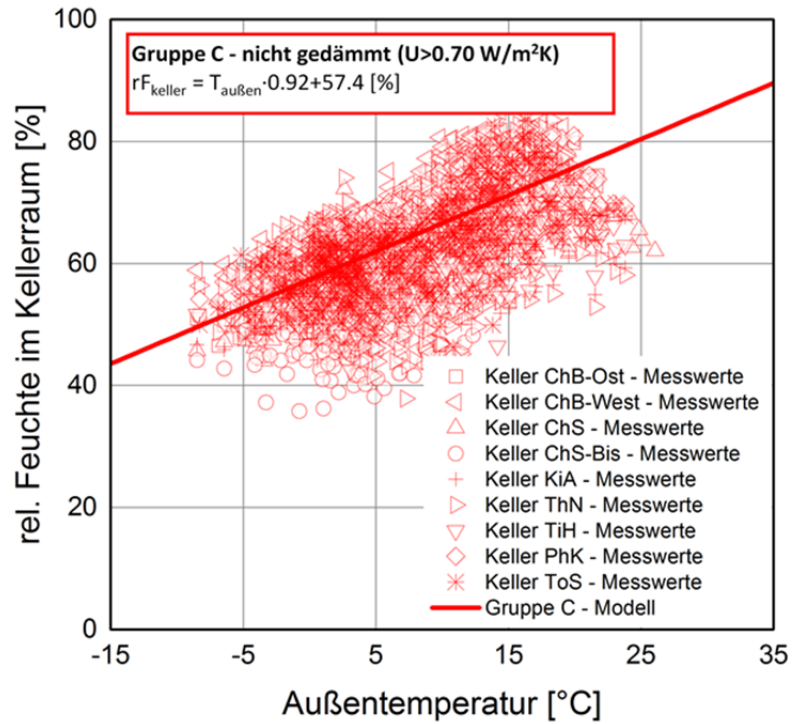


Bild 132:
 Modellansatz für Feuchte – Relative Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit
 der Außentemperatur für Gruppe C (nicht gedämmt).

Bei der Überprüfung dieses Ansatzes mit den Messdaten ergibt sich eine noch schlechtere Übereinstimmung als beim ersten Ansatz. Im Bild 133 ist eine deutliche Abweichung der abgeleiteten von den gemessenen Werten von -20 bis +20 % r.F. zu erkennen. Zudem ist die Streuung der Messdaten im gesamten Temperaturbereich sehr hoch, d.h. eine direkte Ableitung der relativen Feuchte aus der Außentemperatur wie in EN 15026 für den Wohnraum ist beim Keller nicht möglich.

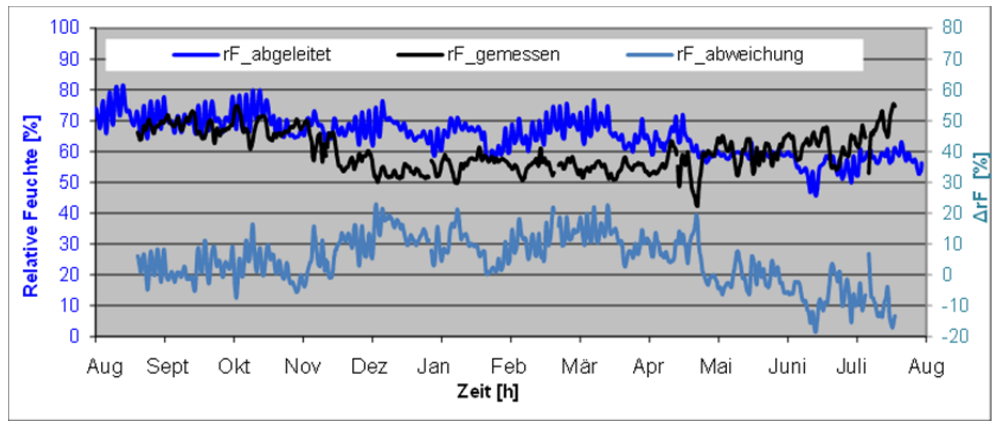


Bild 133:

Validierung für das Feuchtemodell $r.F.(T)$ – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller TiH* (Gruppe C).

Aufgrund dessen wird ein zweiter Modellansatz überprüft, welcher die abs. Feuchte [g/m^3] im Nebenraum in Abhängigkeit von der Außentemperatur beschreibt. Dies ist im Bild 134 dargestellt. Genau wie im Fall des Nebenraumtemperaturmodells sind drei Bereiche mit einer gewissen Grenze bei $0\text{ }^\circ\text{C}$ und $15\text{ }^\circ\text{C}$ Außentemperatur zu erkennen. Unter $0\text{ }^\circ\text{C}$, sowie über $15\text{ }^\circ\text{C}$ Außentemperatur bleibt die abs. Feuchte weitgehend konstant. Im Bereich dazwischen kann eine lineare Beziehung zwischen abs. Außen- und Nebenraumfeuchte beobachtet werden.

Die Nebenraumfeuchte bleibt bei niedrigen Außentemperaturen (unter $0\text{ }^\circ\text{C}$) zwischen $3.5\text{ g}/\text{m}^3$ und $5.5\text{ g}/\text{m}^3$. Dabei tritt in den gut gedämmten Kellern der Gruppe A (vgl. Bild 135), welche die geringste Belüftung aufweisen, die höchste Feuchtebelastung auf. Bei undichten, ungedämmten Konstruktionen wurden geringere Feuchtebelastungen beobachtet (vgl. Bild 136 und Bild 137). Liegt die Außentemperatur im Bereich unter $0\text{ }^\circ\text{C}$, sind zwischen den verschiedenen Gruppen in der Feuchtelast Stufen von etwa $1.0\text{ g}/\text{m}^3$ zu erkennen. Diese Unterschiede nehmen mit steigender Außentemperatur ab, bis im Bereich von über $15\text{ }^\circ\text{C}$ in allen Kellern eine Feuchtelast von im Mittel etwa $8.5\text{ g}/\text{m}^3$ beobachtet werden kann.

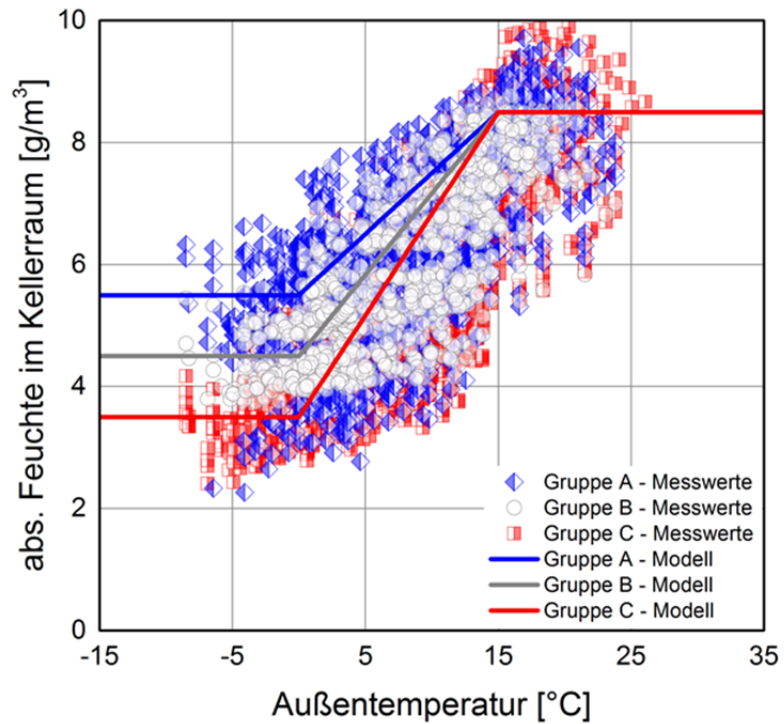


Bild 134:
 Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur je nach Kellerraumgruppe.

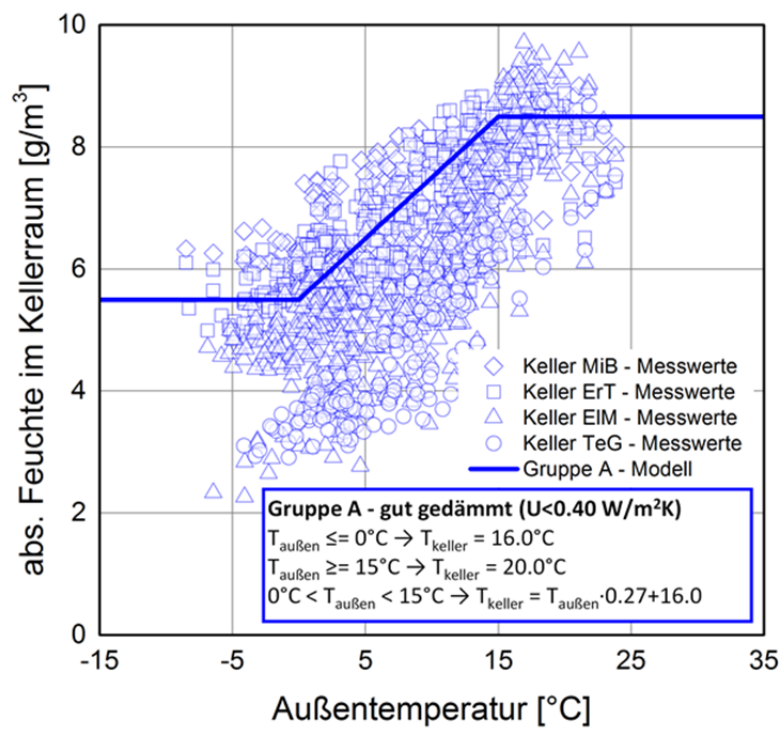


Bild 135:
 Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der
 Außentemperatur für Gruppe A (gut gedämmt).

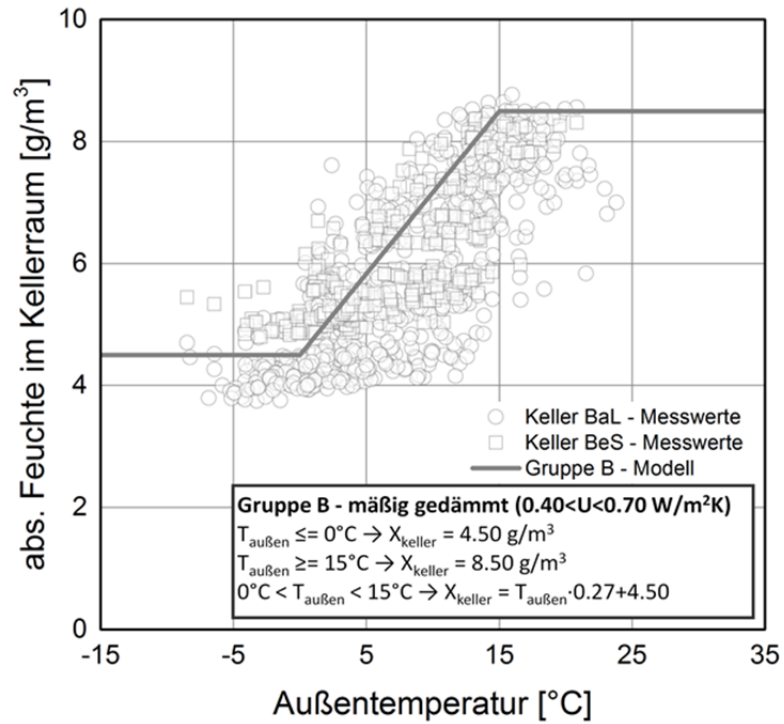


Bild 136:
 Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der
 Außentemperatur für Gruppe B (mäßig gedämmt).

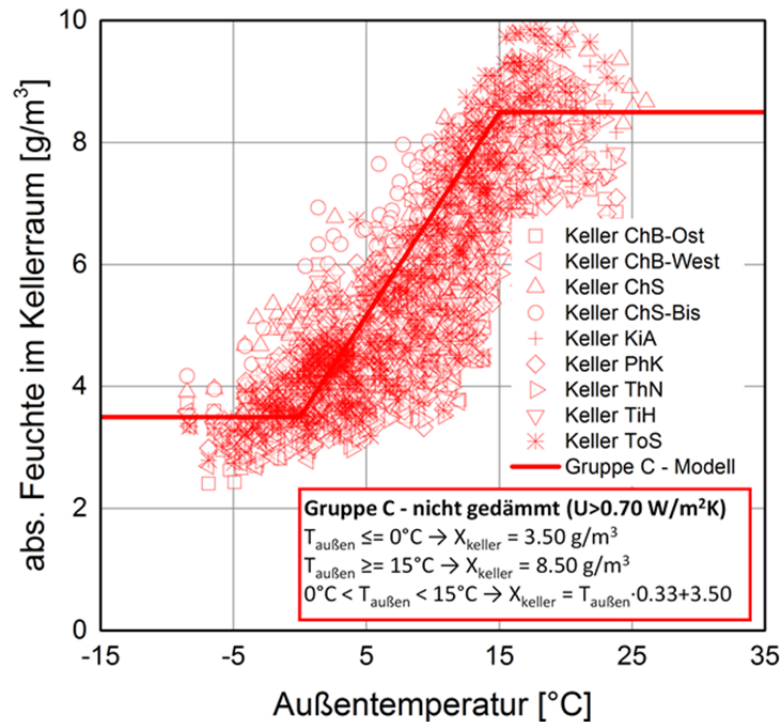


Bild 137:
Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der Außentemperatur für Gruppe C (nicht gedämmt).

Im Folgenden wird das Modell für die Nebenraumfeuchte validiert. Dementsprechend wird sowohl die abs. Feuchte als auch die rel. Feuchte (auf Basis von abs. Feuchte und der abgeleiteten Temperatur umgerechnet) betrachtet. Bild 138 und Bild 139 zeigen je für die absolute und die relative Feuchte exemplarisch den Vergleich zwischen gemessenen (schwarze Linie) und abgeleiteten Werten (grüne / blaue Linie) für einen Keller der Gruppe C (*Keller TiH*). Die hellblaue Linie entspricht der Abweichung zwischen den beiden Kurven. Dabei wird der Messwert jeweils vom Wert der Modellkurve abgezogen. Positive Werte in der Differenzkurve bedeuten also, dass das Modell zu höheren Feuchten führt, negative dagegen, dass der Modellansatz trockener bleibt. Für weitere Details bzw. Vergleiche zwischen Messungen und Rechnungen vgl. Diagramme im Anhang ab Bild 313 bis Bild 402.

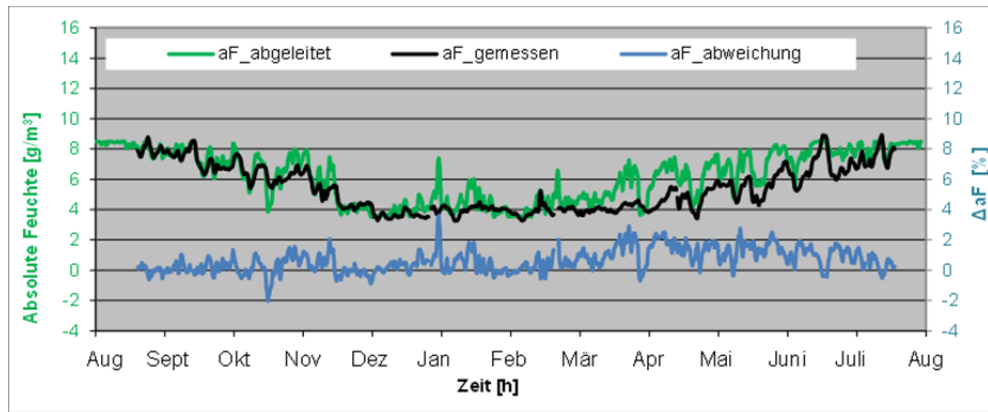


Bild 138:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

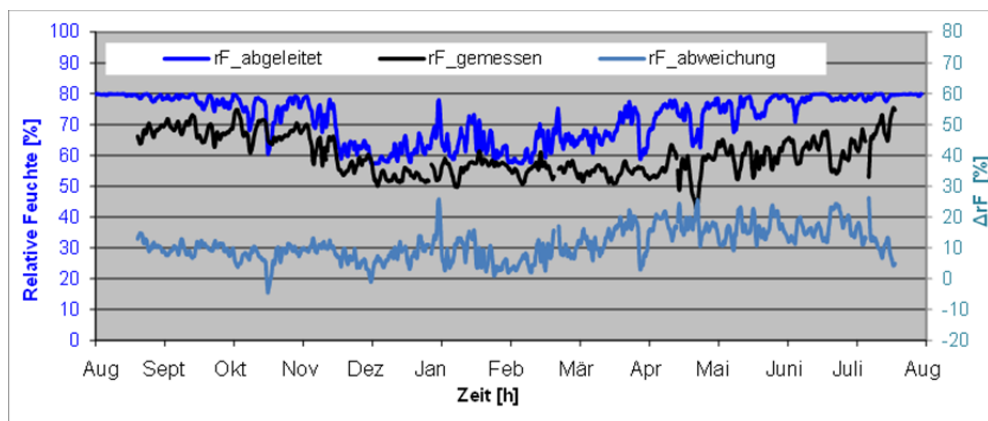


Bild 139:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

Die Überprüfung anhand der Messwerte zeigt, dass der Ansatz für die Kellerräume wegen der stark schwankenden Raumtemperaturen und damit auch relativen Feuchten weitgehend ungeeignet ist: in beiden Bildern (vgl. Bild 138 und Bild 139) ist eine recht große Abweichung der abgeleiteten von den gemessenen Werten von bis zu $\pm 2 \text{ g/m}^3$ bzw. 0 bis etwa 25 % r.F. zu erkennen. Auch der qualitative Verlauf wird nur mäßig wiedergegeben.

Die bisher präsentierten Ansätze in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur erweisen sich für die Kellerräume auf Grund der stark schwankenden Raumtemperaturen und damit auch relativen Feuchten (aufgrund deren starker Temperaturabhängigkeit) als ungeeignet: die Abweichungen zwischen Messungen und Modell bleiben bei den in Anlehnung an die Norm gewählten Ansätzen zu groß.

Als gut geeignet stellt sich dagegen der Zusammenhang zwischen den abs. Feuchten in $[g/m^3]$ in den Kellern und in der Außenluft heraus, die sich über die in Bild 140 dargestellten linearen Beziehungen beschreiben lässt. Diese Zusammenhänge können für die Keller gewählt werden, weil keine größeren Schwankungen der Feuchteproduktion im Keller auftreten und die Belüftungssituation kaum außentemperaturabhängig ist.

Die abs. Nebenraumfeuchten weisen im Winter die tiefsten Werte auf, die im Mittel zwischen ca. $3 g/m^3$ und $6 g/m^3$ liegen. Zu dieser Zeit sind auch größere Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen zu erkennen. Beispielsweise kann man bei $2 g/m^3$ abs. Feuchte außen eine zusätzliche Feuchtebelastung von $3.5 g/m^3$ für Gruppe A (blau), $2.5 g/m^3$ für Gruppe B (grau) und $1.5 g/m^3$ für Gruppe C (rot) erkennen (vgl. Bild 141 bis Bild 143). Die Unterschiede zwischen außen und innen nehmen mit steigender abs. Feuchte bzw. Außentemperatur ab, bis sich die absoluten Feuchtegehalte im Sommer mit ca. $9 g/m^3$ weitgehend angeglichen haben.

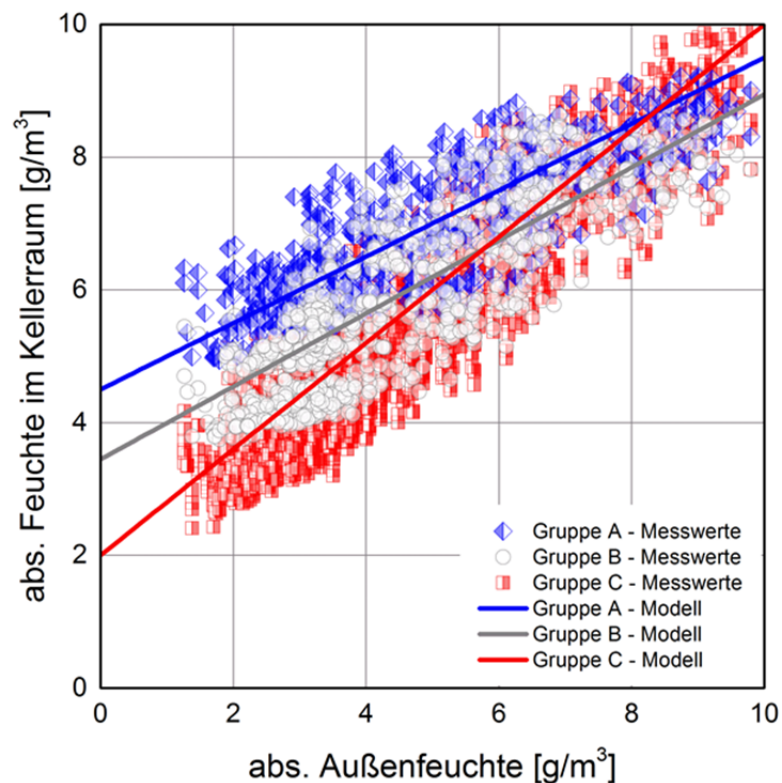


Bild 140:
Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der abs. Außenfeuchte je nach Kellerraumgruppe.

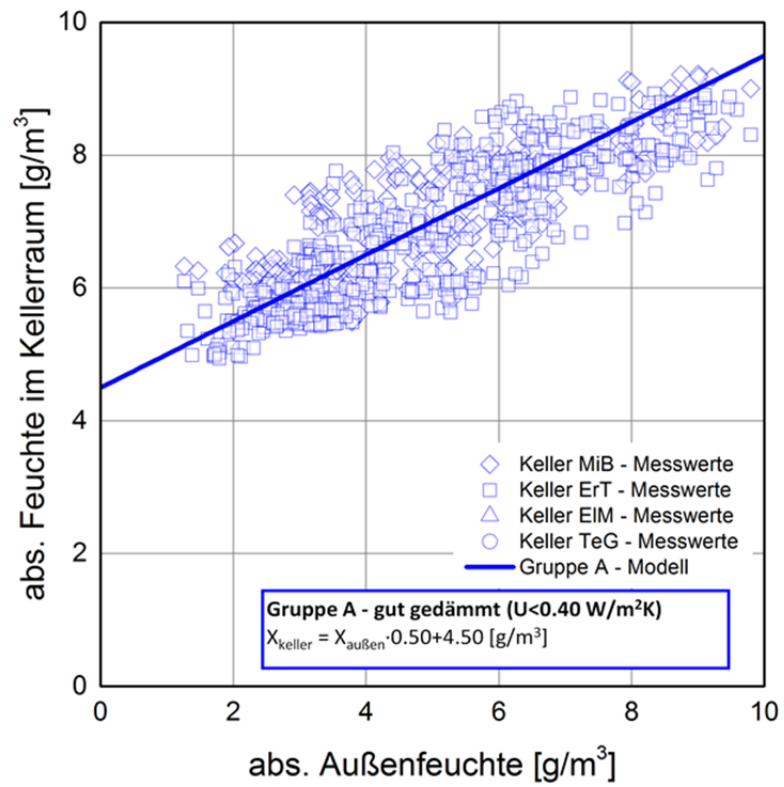


Bild 141:
 Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der
 abs. Außenfeuchte für Gruppe A (gut gedämmt).

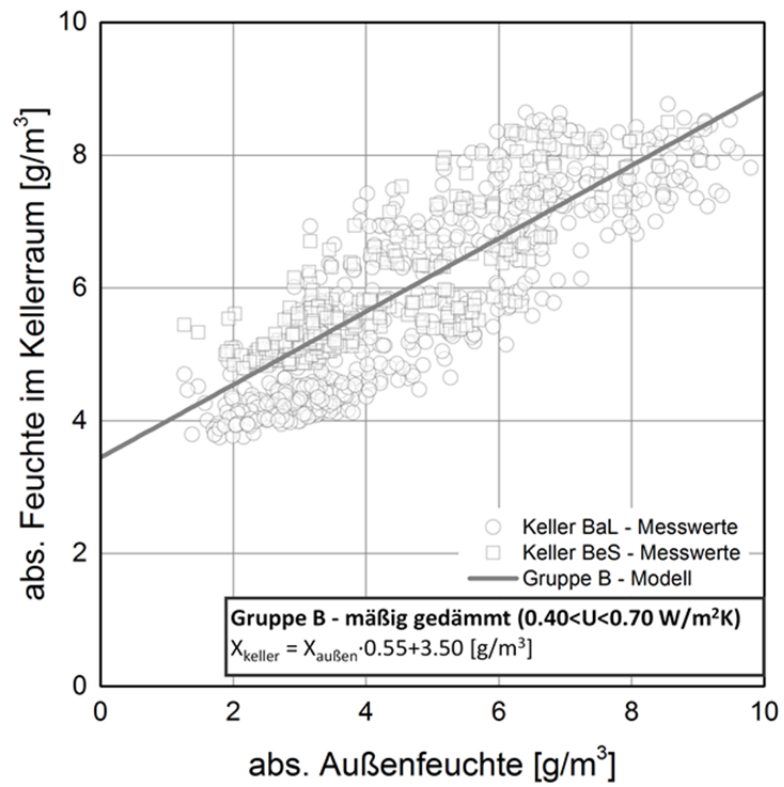


Bild 142:
 Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der abs. Außenfeuchte für Gruppe B (mäßig gedämmt).

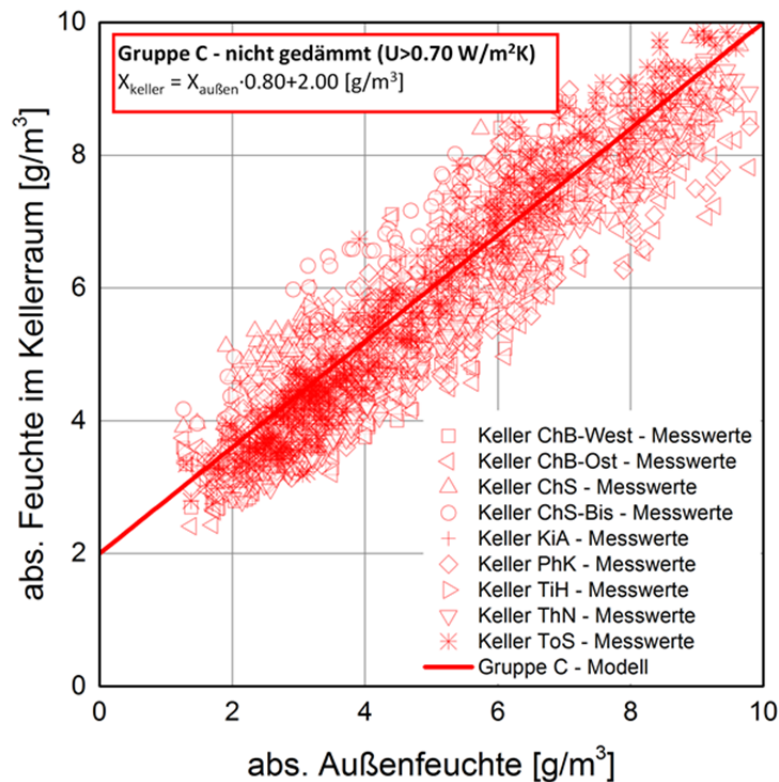


Bild 143:

Modellansatz für Feuchte – Abs. Feuchte im Nebenraum in Abhängigkeit der abs. Außenfeuchte für Gruppe C (nicht gedämmt).

Die Validierung erfolgt wie zuvor für die einzelnen Kellerkategorien separat und bei Ansatz der mit Hilfe des Temperaturmodells abgeleiteten Kellertemperaturen. Dabei werden sowohl die abs. Feuchte als auch die rel. Feuchte (umgerechnet aus abs. Feuchte und Temperatur) betrachtet. Bild 144 und Bild 145 zeigen für die abs. und die rel. Feuchte den Vergleich zwischen gemessenen (schwarze Kurve) und abgeleiteten Werten (grüne / blaue Kurve) für einen Keller der Gruppe A (*Keller MiB*). Die hellblaue Linie entspricht der Abweichung zwischen den zwei Kurven, wobei positive Werte wiederum bedeuten, dass die Modellwerte höher liegen als die gemessenen. Derselbe Vergleich erfolgt für die Keller der Gruppe B (*Keller BaL*, vgl. Bild 146 und Bild 147) und C (*Keller TiH*, vgl. Bild 148 und Bild 149). Die Validierung anhand der weiteren Kellerräume ist im Anhang von Bild 313 bis Bild 402 dargestellt.

Insgesamt ist die Übereinstimmung dieses Modellansatzes mit den gemessenen Feuchteverhältnissen sowohl bezüglich des qualitativen als auch des quantitativen Verlaufs deutlich besser als bei den vorigen Ansätzen. Besonders gut ist die Übereinstimmung bei den absoluten Feuchten. Hier bleiben die Abweichungen meist im Bereich von $\pm 1 \text{ g/m}^3$ oder liegen bei größeren Differenzen auf der sicheren Seite. Bei den relativen Feuchten sind die Abweichungen meist im Bereich von $\pm 10 \%$ r.F. Die im ersten Sommer größeren Abweichungen der relativen Feuchte beim Keller *BaL* hängen dabei eher an der in diesem Zeitraum zu hoch abgeleiteten Temperatur. Im Winter und im folgenden Sommer bleiben

sowohl die absoluten als auch die relativen abgeleiteten Feuchten über den gemessenen Werten und damit wieder auf der sicheren Seite.

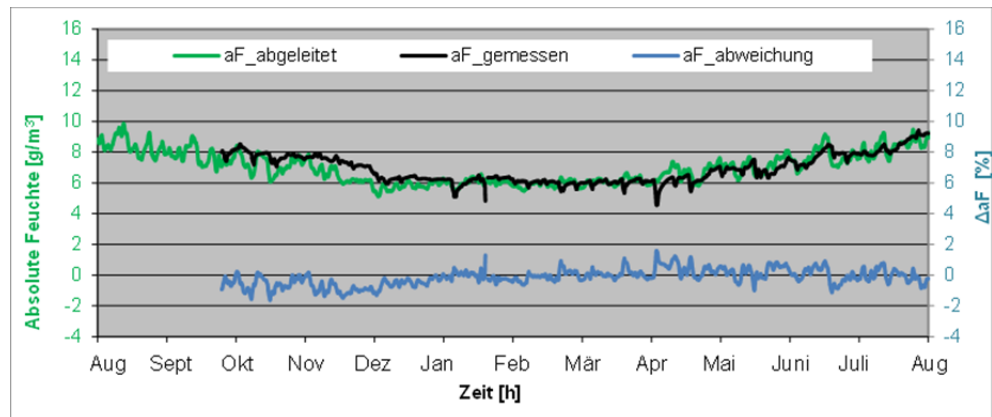


Bild 144:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

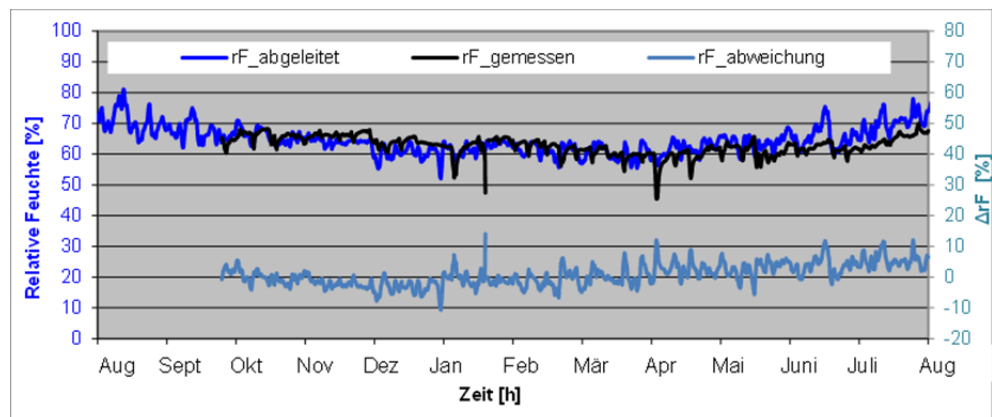


Bild 145:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

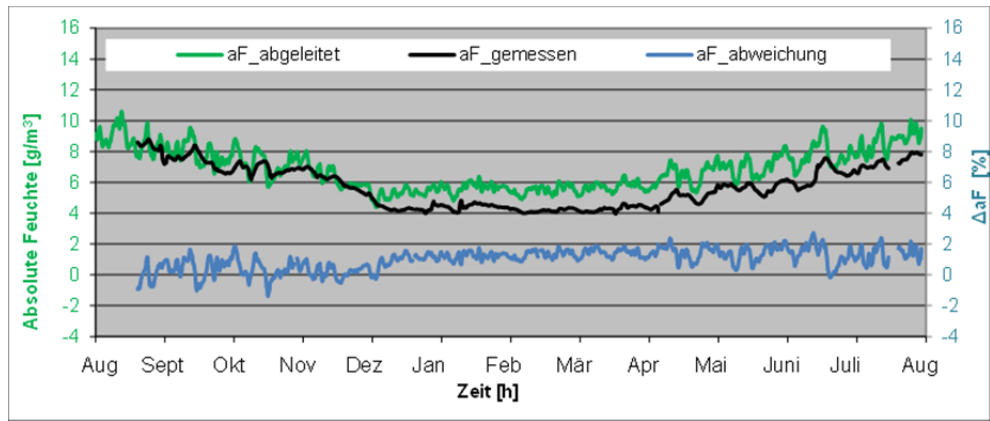


Bild 146:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

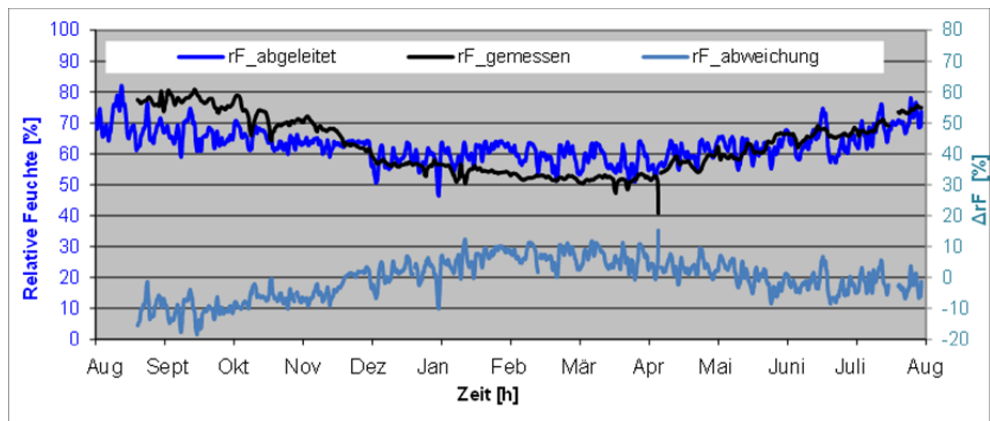


Bild 147:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

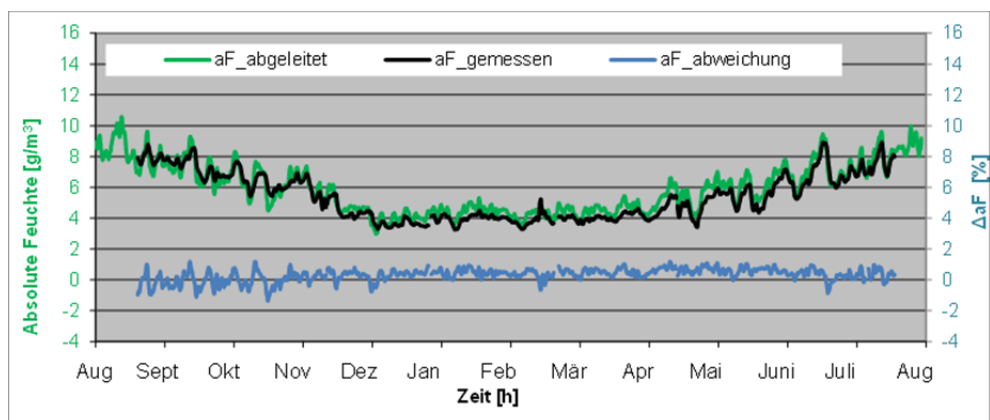


Bild 148:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

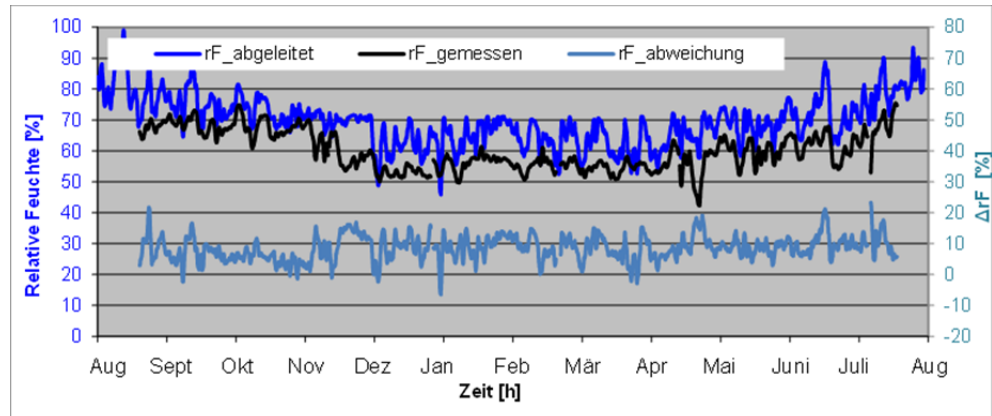


Bild 149:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

Wie bereits erwähnt, wurden auch zwei Trockenräume untersucht (*Keller ToS* und *EIM*). Da in diesen allerdings keine besondere Auswirkung auf die Feuchtebelastung der Kellerräume zu erkennen ist, wird dasselbe Modell ebenfalls für Trockenräume verwendet und die Validierung dementsprechend durchgeführt. Bild 150 und Bild 151 beziehen sich auf die abs. und rel. Feuchte im Trockenraum *EIM* (Gruppe A), während Bild 152 und Bild 153 den Trockenraum *ToS* (Gruppe C) darstellen. Wiederum ist eine besonders gute Übereinstimmung bei den absoluten Feuchten zu erkennen, während bei den relativen Feuchten tendenziell etwas zu hohe Werte erreicht werden. Dies ist wiederum auf die im Vergleich zu den Messdaten etwas niedriger abgeleiteten Temperaturen zurückzuführen.

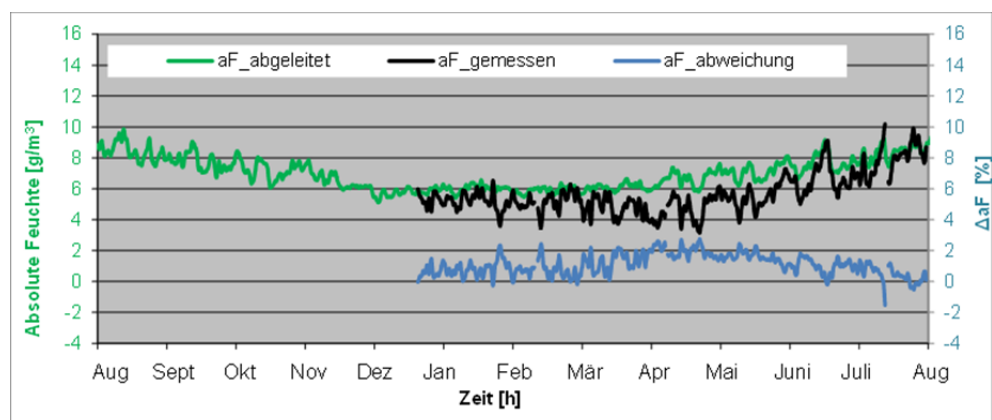


Bild 150:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. *Keller EIM* (Gruppe A, Trockenraum).

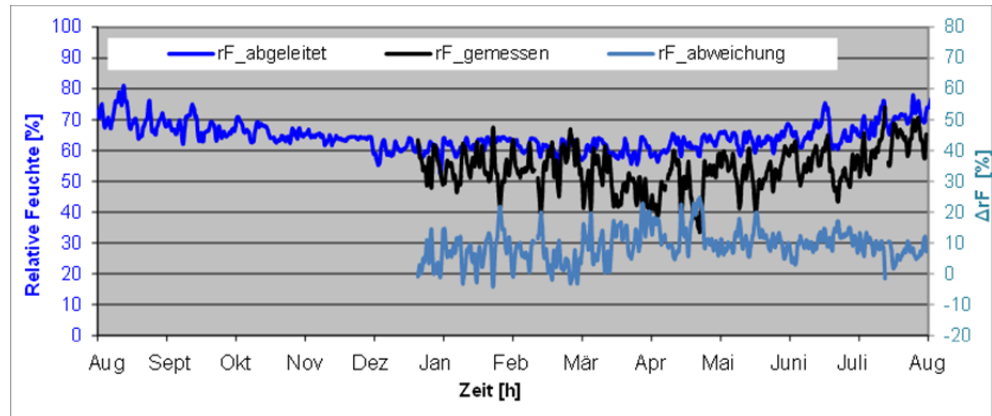


Bild 151:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller EIM* (Gruppe A, Trockenraum).

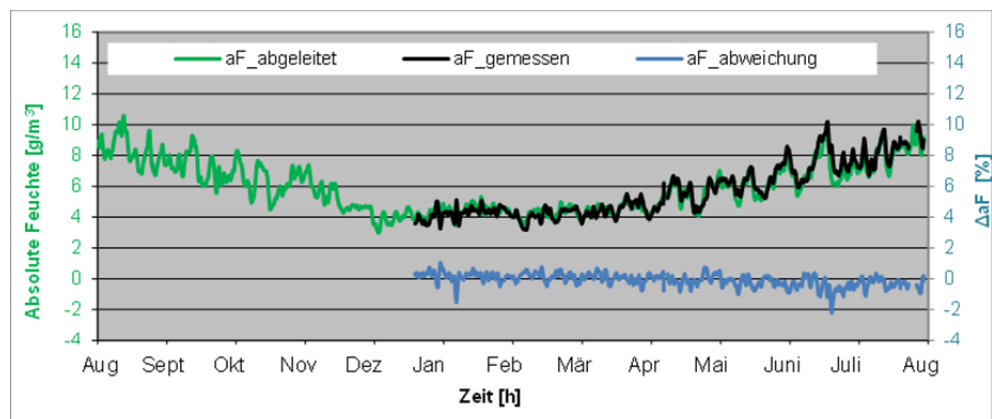


Bild 152:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. *Keller ToS* (Gruppe C, Trockenraum).

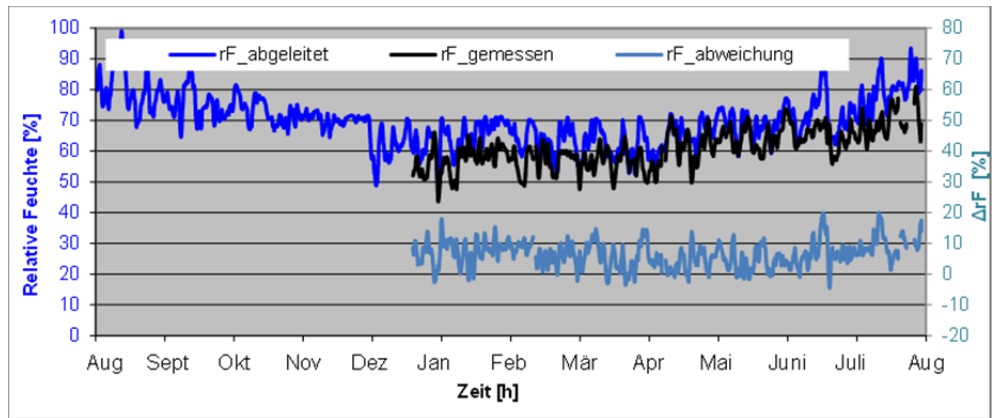


Bild 153:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller ToS* (Gruppe C, Trockenraum).

Das Feuchtemodell bei dem die Kellerraumfeuchte aus der absoluten Feuchte des Außenklimas abgeleitet wird, weist eine recht gute Übereinstimmung mit den Messdaten auf. Dies zeigt sich auch in Tabelle 32, welche die gemessenen Mittelwerte der absoluten Feuchte sowie die mittleren Differenzen und Standardabweichungen zwischen den abgeleiteten und den gemessenen Werten für die einzelnen Kellergruppen darstellt. Dabei werden sowohl die Jahreszeiten-Werte als auch die für das Gesamtjahr angegeben. Die Standardabweichung des ausgewählten Modells (absolute Feuchte innen im Vergleich zur absoluten Feuchte außen) ist in sowohl bei den Jahreszeiten-Werten als auch im Gesamtjahr bei allen Kellergruppen niedriger und damit besser als bei dem Modell, bei dem die absolute Feuchte in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur beschrieben wird. Auch die mittleren Differenzen bleiben sehr gering mit Abweichungen unter 1 g/m^3 und meistens positiv, d.h. das Modell erzeugt leicht höhere absolute Feuchten in den Kellerräumen also dort gemessen wurden.

Aufgrund der meist etwas niedriger abgeleiteten Temperaturen bleiben die Werte der relativen Feuchte i.d.R. etwas höher und damit mehr auf der sicheren Seite. Die ansonsten auftretenden Abweichungen liegen meist auf der sicheren Seite, da die abgeleiteten Werte größtenteils höher als die gemessenen sind. Abschließend zeigt dieser Modellansatz eher geringe Streuungen und erlaubt eine akzeptable und einfache Vorhersage der Nebenraumfeuchte im Keller.

Tabelle 32:

Gemessene Mittelwerte der absoluten Feuchte sowie mittlere Differenzen und Standardabweichungen zwischen den abgeleiteten und den gemessenen Werten für die einzelnen Kellergruppen. Die Werte werden separat nach Jahreszeiten und für das Gesamtjahr angegeben.

Zeichenerklärung: μ = gemessene Mittelwerte; Δ = mittlere Differenzen zwischen abgeleiteten und gemessenen Werte; σ = mittlere Standardabweichungen der abgeleiteten Werten.

		X [g/m ³]	X(T) [g/m ³]		X(X) [g/m ³]	
		μ	Δ	σ	Δ	σ
Gruppe A	Gesamtjahr	6.4	0.6	0.8	0.4	0.6
	Winter (Dez-Feb)	5.6	0.4	0.5	0.3	0.4
	Frühling (März-Mai)	5.8	1.3	0.6	0.8	0.4
	Sommer (Juni-Aug)	7.8	0.4	0.6	0.3	0.5
	Herbst (Sep-Nov)	7.4	-0.4	0.6	-0.4	0.4
Gruppe B	Gesamtjahr	5.8	0.6	0.8	0.7	0.6
	Winter (Dez-Feb)	4.7	0.5	0.5	0.9	0.3
	Frühling (März-Mai)	5.3	1.3	0.7	1.1	0.5
	Sommer (Juni-Aug)	7.7	0.3	0.5	0.5	0.5
	Herbst (Sep-Nov)	6.6	0.0	0.7	0.3	0.6
Gruppe C	Gesamtjahr	5.3	0.6	0.8	0.2	0.5
	Winter (Dez-Feb)	4.0	0.4	0.7	0.3	0.3
	Frühling (März-Mai)	4.9	1.2	0.7	0.4	0.4
	Sommer (Juni-Aug)	7.6	0.4	0.6	0.1	0.5
	Herbst (Sep-Nov)	6.1	0.0	0.7	-0.1	0.5

Eine stichprobenartige Validierung des Modells in Bezug auf den Hauptanwendungsbereich der hygrothermischen Simulation erfolgt exemplarisch anhand von Bauteilsimulationen mit WUFI® Pro. Für jede Kellergruppe wird eine typische Konstruktion ausgewählt und dementsprechend einmal mit dem gemessenen und einmal mit dem, mit dem neuen Modell erzeugten Kellerklima berechnet: 250 mm Betonwand + 100 mm XPS (WLG 040) für Gruppe A ($U=0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$); 250 mm Betonwand + 50 mm XPS für Gruppe B ($U=0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$); 350 mm Ziegelmauerwerk für die Keller der Gruppe C ($U=1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Als Außenklima wird die Temperatur des Erdreichs in 0.5 m Tiefe unter der Erdoberfläche am Standort Holzkirchen verwendet. Die relative Feuchte liegt bei konstant 99 %. Für das Innenraumklima werden jeweils sowohl die realen Messwerte als auch die anhand der unterschiedlichen Modelle abgeleiteten Feuchteverhältnisse herangezogen.

An der Außenoberfläche werden aufgrund des Kontakts mit dem Erdreiche keine Strahlungs- und Regeneinflüsse berücksichtigt. Als Startbedingungen wird die Gleichgewichtsfeuchte der Materialien bei 80 % bei einer Temperatur

von 20 °C angenommen. Der Rechenzeitraum beträgt 5 Jahre ab Anfang Oktober.

Das neue Kellerraumklimamodell wird für alle Gruppen überprüft und zusätzlich mit den vorherigen Ansätzen verglichen. Die Ergebnisse für den Gesamtwassergehalt sind in Bild 154 dargestellt.

Insgesamt ergibt sich bei allen Gruppen eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung mit dem Modell und mit den tatsächlich gemessenen Klimarandbedingungen. Der Vergleich der verschiedenen Feuchtemodelle zeigt, dass die Übereinstimmung bei Gruppe A mit den gut gedämmten und eher luftdichten Kellern für alle Modelle gut ist. Bei Gruppe B mit mäßiger Dämmung und Luftdichtheit sind die Ergebnisse mit dem gewählten Modell (X(X)) nahezu deckungsgleich mit denen der Berechnung mit Messdaten. Die beiden anderen Modelle mit Ableitung der Feuchte von der Temperatur (r.F.(T) und X(T)) liegen jeweils etwas höher. Bei Gruppe C, die aufgrund von fehlender Dämmung und stärkerem Luftaustausch auch etwas stärker vom Außenklima beeinflusst wird, ergeben sich für die ersten beiden Modelle mit der Temperaturabhängigkeit deutliche qualitative Unterschiede zur Berechnung mit den Messwerten. Die Feuchten sind beim Modell r.F.(T) im Sommer ähnlich wie bei der Messung, steigen im Winter dann aber deutlich an. Beim Modell X(T) ist sowohl das Niveau höher als auch der qualitative Verlauf unterschiedlich. Beim gewählten Modellansatz X(X) ist zwar ebenfalls das Niveau etwas höher, der qualitative Verlauf aber fast identisch wie bei der Berechnung mit den Messdaten.

Da der Gesamtwassergehalt stark vom Außenklima abhängig ist, wird zusätzlich auch die relative Feuchte an der Innenoberfläche der Kellerräume überprüft, welche mehr von den Raumklimabedingungen beeinflusst wird. Bild 155, Bild 156 und Bild 157 stellen für die jeweilige Kellergruppe den Vergleich zwischen der Berechnung mit den Messdaten und den Ergebnissen der unterschiedlichen Modellansätze für die Feuchte. Bei der Gruppe A (vgl. Bild 155) mit den gut gedämmten und eher luftdichten Kellern liegen alle Ansätze leicht über denen der Berechnung mit Messdaten, allerdings wird bei dem gewählten Modell X(X) ein deutlich bessere qualitative Übereinstimmung erzielt. Hier ergibt sich ein Unterschied von max. 10 %. Bei Gruppe B (Bild 156) mit mäßiger Dämmung und Luftdichtheit sind die Ergebnisse mit dem gewählten Modell (X(X)) bezüglich Werten und qualitativem Verlauf ebenfalls deutlich besser als bei den beiden anderen Modellen mit Ableitung der Feuchte von der Temperatur (r.F.(T) und X(T)). Aus den Ergebnissen der Gruppe C (Bild 157) lassen sich dieselben Rückschlüsse ziehen wie bei Gruppe A.

Man kann also feststellen, dass auch die Validierung des ausgewählten Modellansatzes X(X) anhand von Bauteilsimulationen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten aufweist. Die Übereinstimmung ist bei den beiden anderen Ansätzen X(T) und r.F.(T) weniger gut.

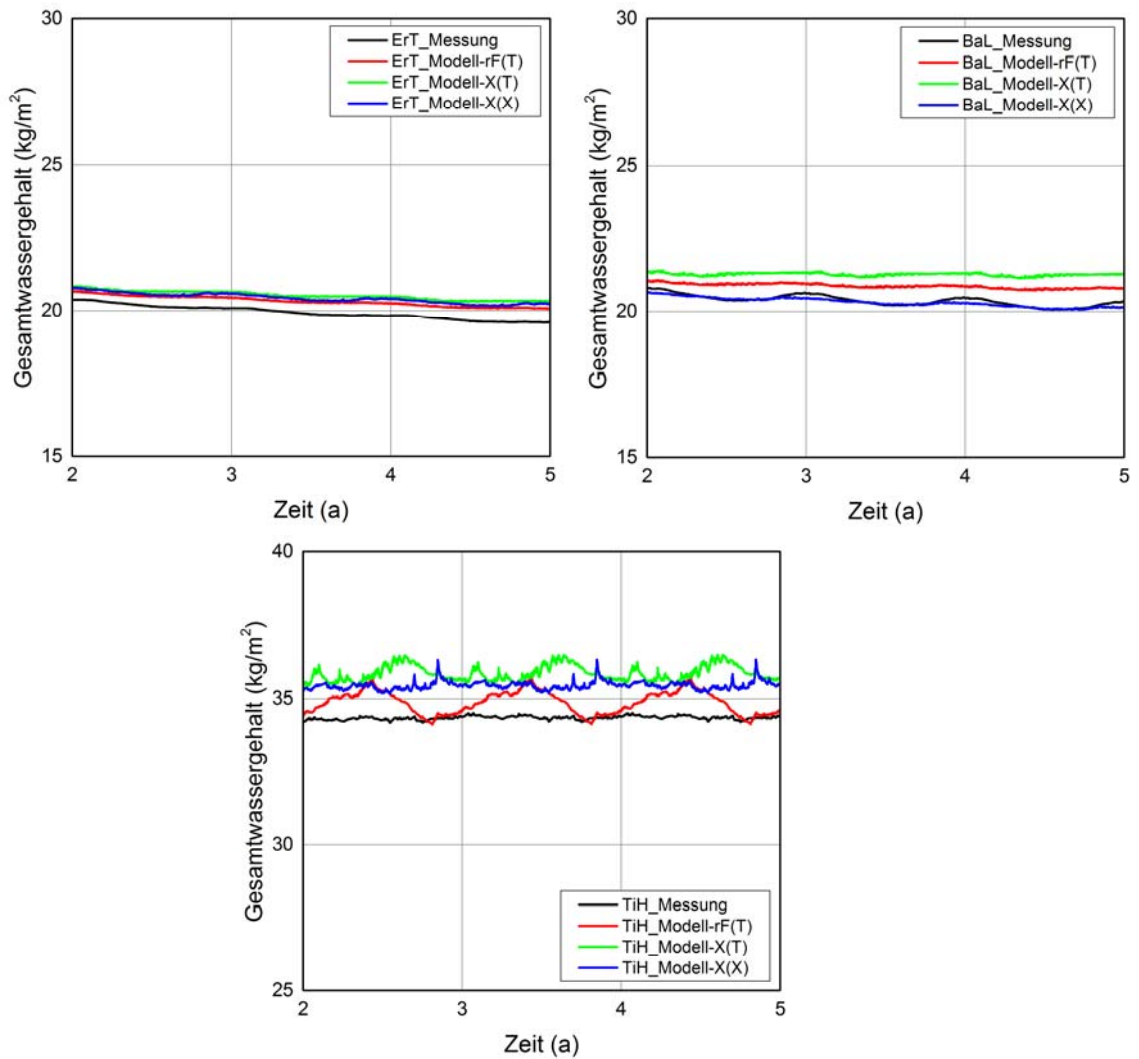


Bild 154:
Validierungsergebnisse bzgl. des Gesamtwassergehalts jeweils typischer Kellerwände für die drei unterschiedlichen Gruppen: oben links *Keller ErT* (Gruppe A), oben rechts *Keller BaL* (Gruppe B) und *Keller TiH* (Gruppe C).

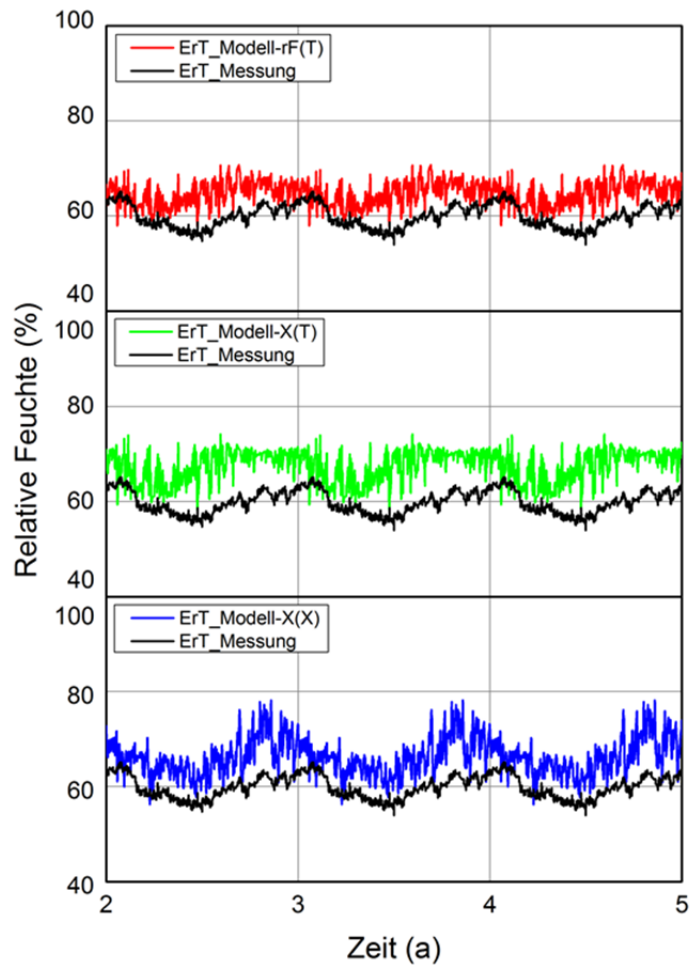


Bild 155:

Validierungsergebnisse bzgl. der relativen Feuchten an der Innenoberfläche mit den verschiedenen Ansätzen für Gruppe A (*Keller ErT*). Von oben nach unten: rel. Feuchte in Abhängigkeit der Außentemperatur ($rF(T)$); abs. Feuchte in Abhängigkeit der Außentemperatur ($X(T)$); abs. Feuchte in Abhängigkeit der Außenfeuchte ($X(X)$).

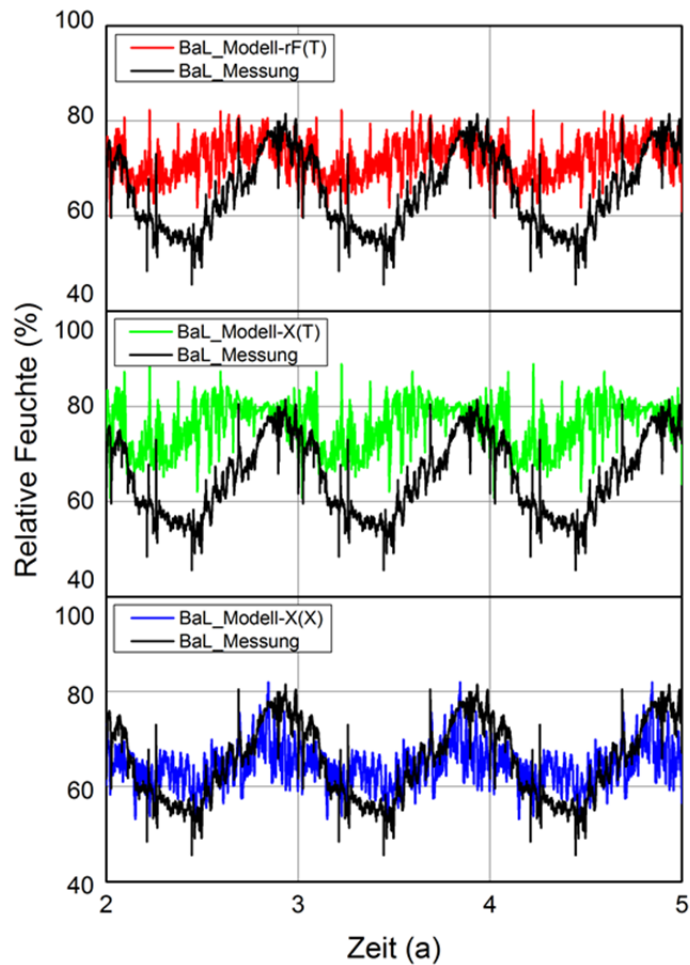


Bild 156:

Validierungsergebnisse bzgl. der relativen Feuchten an der Innenoberfläche mit den verschiedenen Ansätzen für Gruppe B (*Keller BaL*). Von oben nach unten: rel. Feuchte in Abhängigkeit der Außentemperatur ($rF(T)$); abs. Feuchte in Abhängigkeit der Außentemperatur ($X(T)$); abs. Feuchte in Abhängigkeit der Außenfeuchte ($X(X)$).

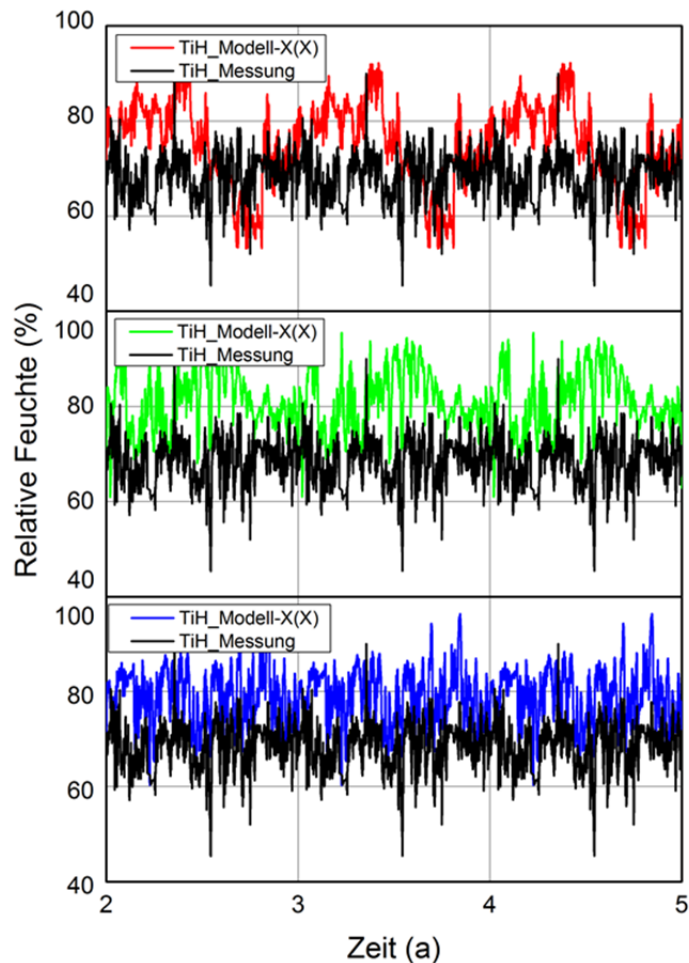


Bild 157:
Validierungsergebnisse bzgl. der relativen Feuchten an der Innenoberfläche mit den verschiedenen Ansätzen für Gruppe C (*Keller TiH*). Von oben nach unten: rel. Feuchte in Abhängigkeit der Außentemperatur ($rF(T)$); abs. Feuchte in Abhängigkeit der Außentemperatur ($X(T)$); abs. Feuchte in Abhängigkeit der Außenfeuchte ($X(X)$).

4.2.3 Zusammenfassung

Das Kellerraummodell wurde auf Basis von Messwerten von Temperatur und relativer Feuchte in 15 Kellerräumen über einen Zeitraum von knapp zwei Jahren entwickelt. Zur Auswertung wurden die Kellerräume in verschiedene Dämmstandard-Klassen (U-Werte) eingeteilt. Das Kellerraummodell leitet aus stündlich gemessenen Werten von Temperatur und Feuchte im Außenklima das gleitende 24-Stunden-Mittel der Raumklimabedingungen im Keller ab.

Das Temperaturmodell ermittelt die Nebenraumtemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Dabei bleibt die Temperatur unter 0 °C sowie über 15 °C Außenlufttemperatur konstant – allerdings auf unterschiedlichem Niveau je nach Dämmstandard des Kellers. Im Bereich dazwischen wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Außenluft- und der Kellerraumtemperatur beobachtet. Dabei wird deutlich, dass eine bessere Dämmung zu einem ins-

gesamt höheren Temperaturniveau und geringeren Schwankungen zwischen Sommer und Winter führt. Dies spiegelt sich in der Ableitungskurve mit Werten von 16 °C im Winter und 20 °C im Sommer wieder. Die schlechter gedämmten Keller bewegen sich zwischen 12 °C im Winter und 18 °C im Sommer. Bei fehlender Dämmung ist im Sommer aufgrund der noch größeren Tag-Nacht-Schwankung keine weitere Temperaturreduktion zu beobachten. Im Winter dagegen liegen die Tiefsttemperaturen bei dieser Gruppe bei nur noch 10 °C.

Bei der Kellerraumfeuchte kann eine lineare Beziehung zwischen der absoluten Feuchte im Außenklima und im Keller hergestellt werden. Dabei zeigen sich bei den gut gedämmten und luftdichteren Kellern ein geringerer Einfluss der Außenluftfeuchte und eine kleiner jahreszeitlich bedingte Schwankung als bei den schlechter gedämmten und weniger luftdichten Kellern.

Eine Validierung des Kellerraumklimamodells erfolgte anhand des zeitlichen Verlaufs der Messwerte. Die Ergebnisse zeigen eine gute, meist leicht auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung von Modell und Messung. Dabei bleiben die Temperaturen im Modell tendenziell etwas niedriger als bei der Messung. Die absoluten Feuchten werden mit dem Modell besonders gut abgebildet bzw. liegen bei Abweichungen leicht höher als bei den Messdaten. Etwas größer fallen die Differenzen teilweise bei der relativen Feuchte aus, da diese aus den beiden anderen abgeleiteten Größen errechnet wird. Hier liegen die Werte ebenfalls meist höher, in Einzelfällen aber auch mal bis zu 10 % niedriger als die gemessenen Werte. Diese Abweichungen traten vor allem dann auf, wenn in den Messdaten eher untypisch niedrige Temperaturen auftraten.

Insgesamt gibt das Kellerraumklimamodell die gemessenen Verhältnisse in den Räumen gut wieder und kann somit sowohl für die Bemessung von Bauteilen als auch für die Beurteilung der Oberflächenfeuchten im Kellerraum bezüglich Schimmel und Korrosion herangezogen werden. Bestehen bezüglich der Eingruppierung der Kellerräume Unsicherheiten, sollte im Zweifel die nächstkritischere Kellerraumklasse mitbewertet werden.

4.3 Anliegertiefgaragen

Tiefgaragen bilden in der Reihe der Gebäudeklassen eher einen Randbereich, das Hauptaugenmerk liegt hier oft nur auf Seiten der Stabilität und Funktionalität des Gebäudes. Auch aus diesem Grund ist über die klimatischen Verhältnisse in Tiefgaragen bisher nur wenig bekannt. Gewerke, die ihre Bauteilbemessungen auf das Innenklima einer Tiefgarage beziehen müssen, nähern sich in der Regel mit den Außenklimaverhältnissen an das Innenraumklima an. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich das Klima in Tiefgaragen deutlich vom Außenklima unterscheidet. Ein Hinweis dafür ist zum Beispiel, dass der im Winter in den südlichen Regionen Deutschlands durch einfahrende Fahrzeuge eingebrachte Schnee in der Tiefgarage i.d.R. deutlich schneller schmilzt als im Freien.

Auf Basis von Temperatur- und Feuchtemessungen in zwei Münchner Tiefgaragen aus den Jahren 2007-2009 sollen zunächst Modelle entwickelt werden, welche das Tiefgaragenklima vereinfacht nachbilden können. Aufgrund der bisher eher dünnen Datenbasis brauchen die Modelle etwas mehr Sicherheiten als bei einer breiteren Datenbasis, aber sie stellen eine deutliche Verbesserung gegenüber der Verwendung des Außenklimas dar. Die Modelle beschränken sich zunächst auf Anliegertiefgaragen, in denen häufig Fragestellungen zur Dimensionierung von Wand- und Deckendämmung gegen bewohnten Raum bzw. von Rohrleitungs-dämmungen auftreten. Mit diesen Modellen soll es möglich werden, bei der Planung von Dämmmaßnahmen in Tiefgaragen auf realistischere Innenklimaverhältnisse zurückgreifen zu können. Dies ist gerade für die Auslegung der erforderlichen Dämmdicken hilfreich, da dies bisher meist auf Grundlage von Schätzwerten oder Außenklimaverhältnissen geschah, was teilweise zur unnötigen Überdimensionierung der Dämmung geführt hat.

4.3.1 Raumklimamessungen in Anliegertiefgaragen

Grundlage für die Entwicklung eines Tiefgaragenmodells sind Temperatur- und Feuchtemessungen in zwei Münchner Tiefgaragen, welche vom IBP von April 2007 bis September 2009 durchgeführt wurden. Der Messzeitraum umfasst also sowohl zwei Winter- als auch zwei Sommerperioden, was eine ausreichend genaue Analyse der gemessenen Daten ermöglicht. Bei den Tiefgaragen handelt es sich um zwei Anliegertiefgaragen (naturbelüftet und mechanisch belüftet) mit nahezu derselben Stellplatzanzahl.

Durchgeführte Messungen

Bei Tiefgarage 1 handelt es sich um eine natürlich belüftete Garage. Die Einfahrt zur Tiefgarage ist in das Wohnhaus integriert und nach Osten ausgerichtet. Der Bereich vor der Einfahrt ist mit einer Blechkonstruktion überdacht und seitlich windgeschützt verglast. Der größte Teil der Tiefgarage ist nicht vom Wohnhaus überbaut, sondern befindet sich unter einem Innenhof. In der Garage wurden drei Messdatenlogger installiert. Der erste befindet sich in der Mitte der Rampe (Bild 403). Bild 404 zeigt einen weiteren Logger unter der Decke in der Tiefgarage selbst und ein dritter misst Temperatur und relative Feuchte in einem Nebenraum, der zum Treppenhaus führt (Bild 405).

Die Tiefgarage 2 wird künstlich belüftet. Die oberirdische, eingehauste Einfahrt befindet sich separat neben dem Wohnhaus und ist nach Süd-Westen ausgerichtet. Das Betondach ist nur gering gedämmt und hat eine dunkelrote Dachbekiesung, die Seitenwände sind teilweise geschlossen, teilweise offen und vergittert. Diese Tiefgarage ist vom Wohnhaus überbaut. In dieser Garage wurden insgesamt vier Messdatenlogger angebracht. Der erste wurde etwa 1 m hinter dem Einfahrtstor auf einem Stromverteilerkasten aufgelegt (Bild 406). Der zweite ist in der Mitte der Rampe wenige Meter von der Einfahrt entfernt (Bild 407). Die beiden übrigen Datenlogger wurden ebenfalls in Deckennähe unten in der Tiefgarage platziert. Bild 408 zeigt den Messfühler, der an einem

Kabelkanal nahe der Außenwand der Garage befestigt ist. Der letzte Logger wurde auf der Dämmung der Trennwand zum Haus angebracht (Bild 409).

Die Positionen direkt unter der Decke wurden jeweils aus Sorge vor Beschädigung oder Diebstahl der Datenlogger ausgewählt, obwohl die Temperaturen hier ggf. geringfügig höher und damit günstiger liegen als in Fußbodennähe.

Ergebnisse

Die von den Messdatenloggern aufgezeichneten Temperaturen wurden ausgelesen und die Verläufe graphisch dargestellt und mit dem Außenklima verglichen. Dieses wurde in München-Neuhausen gemessen, etwa 5 km bzw. 20 km von den betrachteten Tiefgaragen entfernt.

Die Temperaturverläufe der drei Messfühler von Tiefgarage 1 sowie der Verlauf der Außenlufttemperatur sind in Bild 158 dargestellt. An der Position in der Mitte der Einfahrtsrampe liegen die Temperaturen tagsüber häufig nahe an den Maximalwerten der Außenluft, die nächtliche Temperaturabsenkung fällt dagegen geringer aus. Die Temperaturen liegen zwischen -5 °C und 30 °C . In der Tiefgarage selbst schwanken die Temperaturen nur noch zwischen -1 °C und 26 °C . Die Temperaturen im Nebenraum sind im Winter im Durchschnitt noch mal um etwa 1 K höher als in der Tiefgarage, im Sommer dagegen etwas niedriger. Bild 159 zeigt den Temperaturverlauf einer heißen Sommerwoche und Bild 160 den einer kalten Woche im Winter. Es wird deutlich, dass die Höchsttemperaturen der Außenluft im Sommer auch an der Rampe fast erreicht werden. Die anderen Positionen folgen ebenfalls dem Verlauf der Außenlufttemperatur, wenn auch die Temperaturmaxima gedämpft sind. Im Winter hingegen liegen die Temperaturen an allen Positionen mehrere Kelvin über denen der Außenlufttemperatur. Sie zeigen jeweils einen recht gleichmäßigen Verlauf, der nur bei längeren Kälteperioden einen weiteren Abfall aufweist.

Tiefgarage 1 (natürlich belüftet)

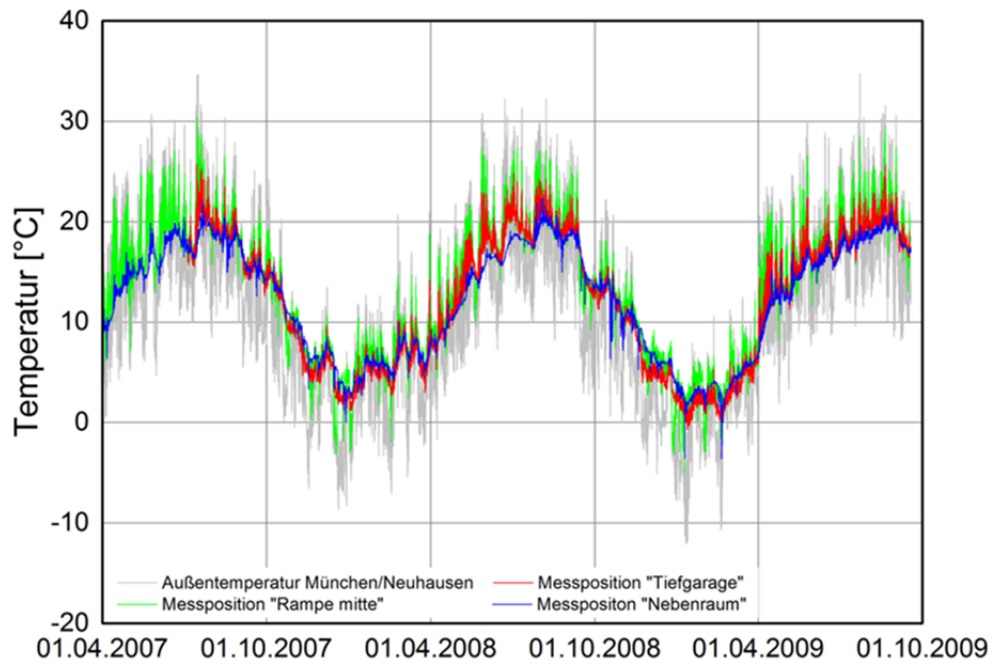


Bild 158:
Schematische Darstellung der Temperaturverläufe der in der Tiefgarage 1 installierten Messfühler über den Messzeitraum im Vergleich zur Außenlufttemperatur.

Tiefgarage 1 (natürlich belüftet)

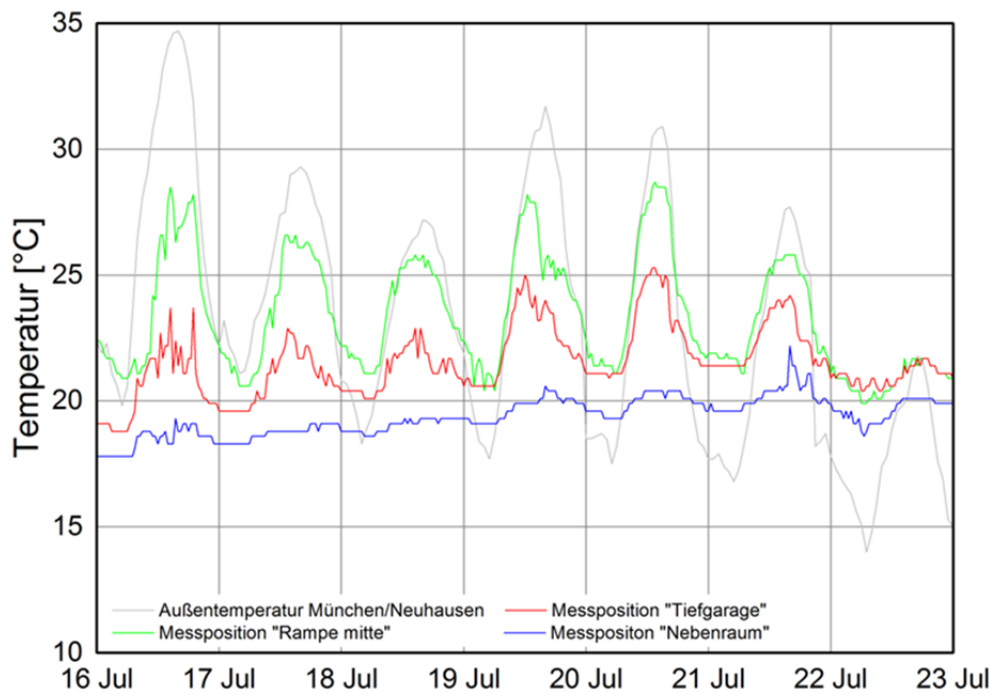


Bild 159:
Schematische Darstellung der Temperaturverläufe der in der Tiefgarage 1 installierten Messfühler über eine Sommerwoche im Juli 2007 im Vergleich zur Außenlufttemperatur.

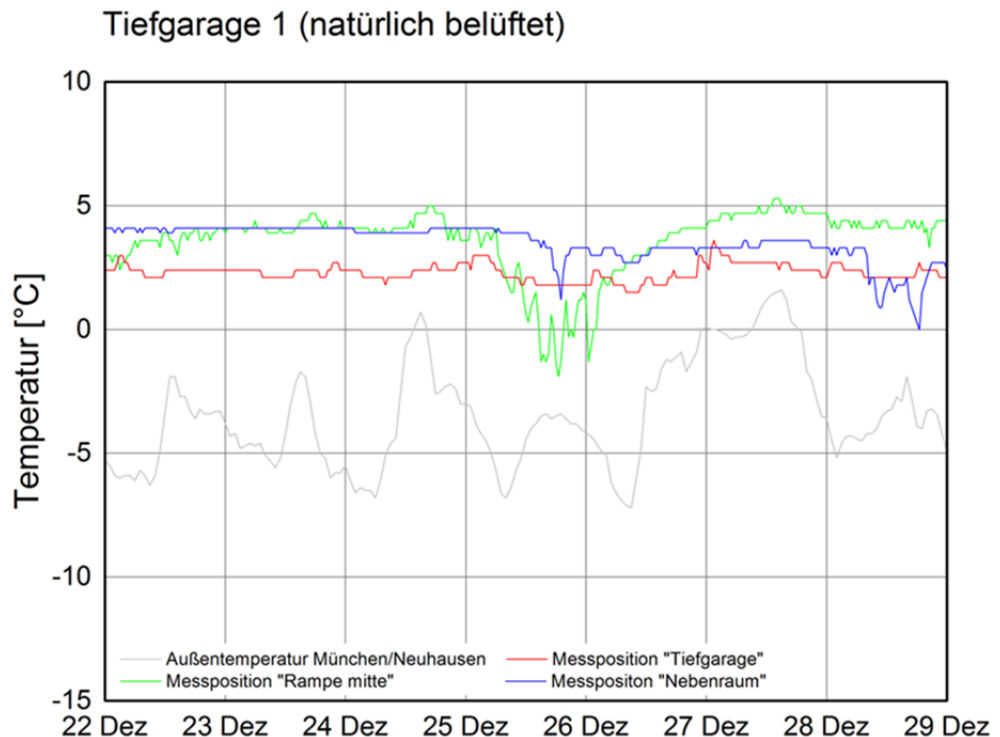


Bild 160:
Schematische Darstellung der Temperaturverläufe der in der Tiefgarage 1 installierten Messfühler über eine Winterwoche im Dezember 2007 im Vergleich zur Außenlufttemperatur.

Die Temperaturen in der Tiefgarage sind aufgrund der großen thermischen Masse der massiven Betonbauteile und des umgebenden Erdreichs gegenüber dem Außenklima deutlich gedämpft. Dies bedeutet, dass die Temperaturänderungen des Außenklimas nur verzögert und in geringerem Ausmaß abgebildet werden. Im Sommer liegen die Temperaturen niedriger, im Winter höher als im Außenklima. Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts treten nur vereinzelt auf. Bei dem untersuchten Nebenraum ist der Effekt noch stärker ausgeprägt, da das Luftvolumen im Vergleich zu den Umschließungsflächen nochmals geringer ausfällt. In der Mitte der Rampe werden bei der Temperatur die Tagesmaxima der Außenluft fast erreicht. Da der Einfahrtsbereich windgeschützt ist und sich vormittags infolge der Sonnenstrahlung stärker aufheizen kann, erscheint dies plausibel. Nachts dagegen liegen die Temperaturen im Rampenbereich mehrere Grad über denen der Außenluft. Die Speichermasse der Umschließungsflächen und die aus dem thermisch noch stärker gedämpften eigentlichen Tiefgaragenbereich aufsteigende Wärme verhindert hier ein weiteres Abkühlen. Im Winter liegen die Temperaturen ebenfalls immer über denen der

Außenluft, im Vergleich zur Tiefgarage selbst werden jedoch etwas tiefere Minimalwerte auch knapp unterhalb des Gefrierpunkts erreicht.

In der künstlich belüfteten Tiefgarage 2 wurden vier Messfühler angebracht. Bild 161 zeigt deren Temperaturverläufe sowie den Verlauf der Außenlufttemperatur. Im oberen Rampenbereich werden die maximalen Temperaturen der Außenluft erreicht und sogar überschritten. Nachts dagegen wird es nicht so kalt wie außen. Die Temperaturspanne liegt im Bereich von -5 °C bis 33 °C . Die Temperaturen in der Mitte der Rampe sind etwas gedämpfter. Der Maximalwert liegt bei 29 °C und der Minimalwert bei -4 °C . Die beiden übrigen Messfühler wurden in der Tiefgarage selbst angebracht. Der Messfühler, der an einer Trennwand zum beheizten Wohnhaus montiert wurde, erreicht maximal 25 °C und minimal 0 °C . An der Außenwand stellen sich Temperaturen zwischen 0 °C und 24 °C ein. Bild 162 zeigt den Temperaturverlauf in einer heißen Woche im Sommer und Bild 163 in einer kalten Winterwoche. Es zeigt sich, dass die Temperaturen im Sommer in der Tiefgarage tagsüber unter der Außentemperatur und nachts bis zu 5 K darüber liegen. An der Rampe oben werden die Tagesmaxima erreicht und teilweise überschritten. Im Winter liegen die Temperaturen aller Positionen 1 bis 10 K über der Außenlufttemperatur.

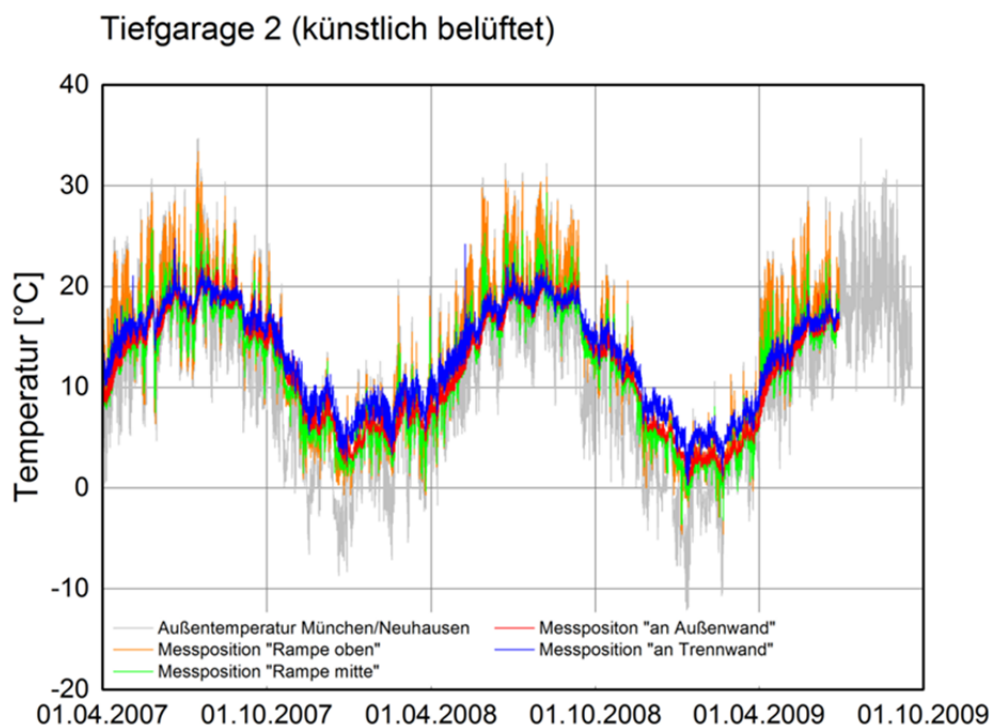


Bild 161:
Schematische Darstellung der Temperaturverläufe der in der Tiefgarage 2 installierten Messfühler über den Messzeitraum im Vergleich zur Außenlufttemperatur.

Tiefgarage 2 (künstlich belüftet)

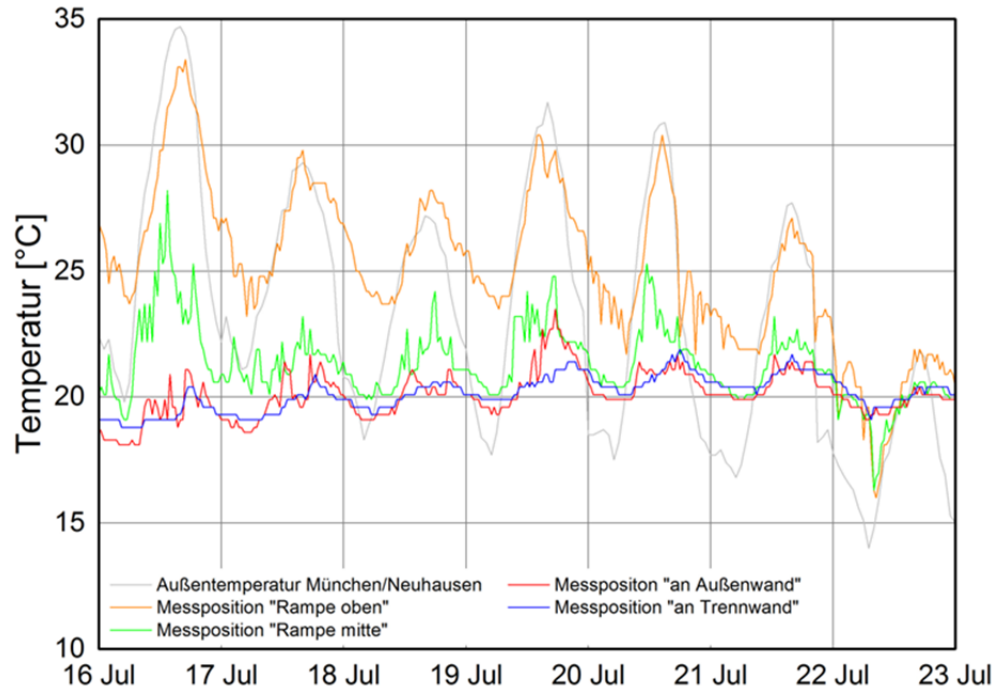


Bild 162:
Schematische Darstellung der Temperaturverläufe der in der Tiefgarage 2 installierten Messfühler über eine Sommerwoche im Juli 2007 im Vergleich zur Außenlufttemperatur.

Tiefgarage 2 (künstlich belüftet)

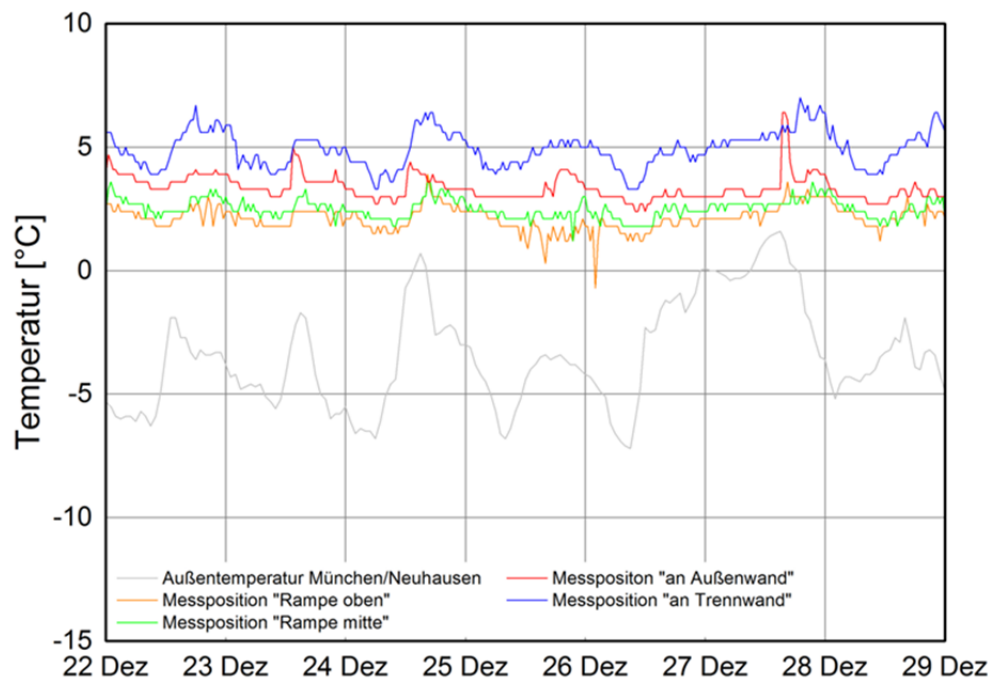


Bild 163:

Schematische Darstellung der Temperaturverläufe der in der Tiefgarage 2 installierten Messfühler über eine Winterwoche im Dezember 2007 im Vergleich zur Außenlufttemperatur.

Die hohen Temperaturen im oberen Rampenbereich, die die Außenlufttemperaturen im Sommer sogar noch etwas überschreiten und im Winter mehr als 10 K über den Minimalwerten der Außenluft bleiben, sind in Anbetracht der recht offenen Bauweise und der geringen Entfernung von nur etwa 1 m zur Einfahrt etwas überraschend. Die hohen Temperaturen im Sommer wären zwar durch Strahlungsgewinne über die nur schwach gedämmte Betondecke mit roter Bekiesung erklärbar, die höheren Werte auch in den Winternächten könnten jedoch darauf hinweisen, dass evtl. die Abwärme aus dem Verteilerkasten oder sonstige Wärmequellen die Messwerte etwas verfälschen. Die Temperaturen in der Mitte der Rampe sind im Sommer etwas gedämpfter und bleiben bereits deutlich unter den Temperaturmaxima der Außenluft am Tag. Auch die nächtliche Abkühlung fällt geringer aus. Nochmals träger und gedämpfter erscheinen die Temperaturverläufe der beiden Messpositionen in der Tiefgarage selbst. Wie bereits in der ersten Garage ist auch hier festzustellen, dass die große thermische Speichermasse, die die Tiefgarage umgibt, für eine Temperaturdämpfung mit nur geringen täglichen Schwankungen sorgt. Die Temperaturen an der Außenwand sind vor allem im Winter etwa 1 bis 2 K niedriger als die an der Trennwand zum beheizten Wohnhaus. Im Sommer sind die Unterschiede nur noch gering, wobei die Temperaturen an der Außenwand dem Verlauf der Außenlufttemperatur stärker folgen.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass das Klima in den beiden gemessenen Tiefgaragen zwar prinzipiell dem Außenklima folgt, aufgrund der großen Speicherfähigkeit von Erdreich und Betonbauteilen jedoch eine Dämpfung der täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen stattfindet. Allgemein liegen die Temperaturen infolge des Einflusses des Erdreichs bzw. der häufig benachbarten beheizten Bebauung je nach Position im Jahresmittel 2 bis 5 K höher als in der Außenluft. Während im Sommer teilweise ähnlich hohe Werte wie im Außenklima erreicht werden, sind die Minimalwerte im Winter zum Teil über 15 K höher als zeitgleich in der Außenluft. An keiner der gemessenen Positionen wurden Temperaturen unterhalb von -1 °C erreicht. Die Einfahrtsbereiche waren dabei jeweils etwas kühler als der Garagenbereich selbst, so dass es sinnvoll sein kann, diese gesondert zu betrachten.

Die mittleren Werte sind in der naturbelüfteten, nicht überbauten und in der künstlich belüfteten, überbauten Tiefgarage recht ähnlich und erfordern kaum eine unterschiedliche Behandlung.

4.3.2 Rechnerische Identifikation der Einflussfaktoren auf das Raumklima in Tiefgaragen

Die durchgeführten Messungen in den zwei Münchner Anliegartiefgaragen haben ergeben, dass in Tiefgaragen sowohl die täglichen als auch die jährlichen Temperaturschwankungen gegenüber der Außenlufttemperatur gedämpft sind, und dabei Amplituden im Bereich von 3 bis 5 K auftreten, während in der Außenluft bis zu 20 K erreicht werden. Die genauen Faktoren, die diese Dämpfung der Temperaturschwankungen in einer Tiefgarage verursachen, können aus den beiden vorliegenden Messungen jedoch nicht direkt abgeleitet werden.

In der im Rahmen des Projekts angefertigten Bachelor-Arbeit „Grundlagen zur Modellbildung für das Raumklima in Tiefgaragen“ [9] wurde mit Hilfe der Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus versucht, das in der Tiefgarage gemessene Klima abzubilden. Dazu werden Gebäudegeometrie, Bauteilaufbauten, Außenklimabedingungen, Erdreichtemperaturen, Belüftung sowie die inneren Lasten berücksichtigt. Wird dadurch eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den gemessenen Klimaverhältnissen erreicht, ist es in einem weiteren Schritt möglich, durch Veränderung einzelner Parameter deren Einfluss auf das Tiefgaragenklima abzuschätzen.

Für die Gebäudesimulation werden die folgenden Größen als maßgebliche Einflussfaktoren für das Raumklima in Tiefgaragen näher untersucht:

- Anteil der Tiefgaragendecke gegen Wohnraum
- Anteil der Umschließungsflächen gegen Erdreich
- Belüftung
- Interne Wärmequellen

Eine Dämmung unter der Tiefgaragendecke wird eingesetzt, wenn sich über der Tiefgarage ein beheizter Raum befindet. Um für diesen Fall zu starke Wärmebrücken zu vermeiden, werden diese Bereiche nach außen hin gedämmt. Die Wärmedämmung hat aber nicht nur den Effekt, dass die Wärmetransmission vom beheizten zum unbeheizten Raum so gering wie möglich gehalten wird, sie bewirkt parallel dazu, dass an diesem Bauteil keine thermische Masse für die Pufferung des Tiefgaragenklimas zur Verfügung steht. Die Berechnungen wurden mit verschiedenen prozentualen Dämmflächenanteilen der Tiefgaragendecke durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich zwischen einer Tiefgaragendecke, die komplett mit Wohnraum überbaut und gedämmt ist, und einer nicht gedämmten Decke gegen Erdreich eine Temperaturdifferenz bei den minimalen Tiefgaragentemperaturen von nur 0,5 K einstellen. Deshalb kann der Einfluss des Flächenanteils der Tiefgaragendecke gegen Wohnraum i.d.R. vernachlässigt werden.

Die Wände einer Tiefgarage befinden sich in der Regel komplett oder zu einem gewissen Teil unter der Erdoberfläche. Dabei spielen die Bedingungen im umgebenden Erdreich eine wichtige Rolle für das raumklimatische Verhalten einer

Tiefgarage. Die Temperaturschwankungen des Außenklimas werden von den Bodenschichten nur verlangsamt und in geringerem Ausmaß an die angrenzenden Tiefgaragenwände weitergegeben. Die Berechnungen wurden für unterschiedliche Tiefenlagen der Tiefgarage durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass sich die Amplitude der Temperaturschwankungen verkleinert, je tiefer die Tiefgarage in das Erdreich eingebettet ist. Somit werden weniger ausgeprägte Spitzentemperaturen erreicht. Zusätzlich kommt es zu einer Phasenverschiebung der Minimal- und Maximalwerte. Aufgrund dieser Erkenntnis sollte der Anteil der erdberührenden Bauteile der Tiefgarage bei den Berechnungen berücksichtigt werden.

Für die Belüftung von Tiefgaragen muss ein Mindestwert eingehalten werden, um die Gesundheit der Personen, die die Tiefgarage nutzen, nicht aufgrund der Abgase der Fahrzeuge zu gefährden. In natürlich belüfteten Tiefgaragen werden meist höhere Luftwechselraten erreicht als in mechanisch belüfteten, da bei einer natürlichen Belüftung ein ständiger Luftaustausch stattfindet, während dieser bei einer mechanischen Belüftung gesteuert werden kann. Die Berechnungen zeigen, dass die Temperaturschwankungen zunehmen, je höher die Luftwechselzahl ist. Bei steigender Belüftung nähert sich das Tiefgaragenklima also dem Außenklima an. Wird der mittlere Jahrestemperaturverlauf betrachtet, zeichnet sich eine Verschiebung nach unten ab. Da die Belüftung einen großen Einfluss auf das sich einstellende Tiefgaragenklima hat, kann dieser Parameter bei den Betrachtungen nicht vernachlässigt werden.

Einfahrende Fahrzeuge bringen ein gewisses Maß an Wärme durch erhitzte Bauteile des Fahrzeugs mit in die Tiefgarage und tragen deshalb einen Anteil zur Aufheizung der Tiefgarage bei. Das bedeutet, dass bei einer hohen Frequentierung die Temperaturen in der Tiefgarage steigen, und im Gegensatz dazu bei geringer Frequentierung fallen. Aus diesem Grund ist die Nutzung und somit die Frequentierung der Tiefgarage ein wichtiger Parameter, der mit zu berücksichtigen ist. Hier sollte allerdings noch beachtet werden, dass eine höhere Frequentierung in der Praxis wahrscheinlich auch eine höhere Lüftung zur Folge hat, was die Erwärmung im Sommer verstärkt, im Winter aber teilweise kompensiert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die drei Faktoren Einbindung der Tiefgarage in das Erdreich, Art und Intensität der Belüftung sowie die Art der Nutzung durchaus einen deutlichen Einfluss auf das sich einstellende Tiefgaragenklima zu haben scheinen [9]. Eine genaue Quantifizierung dieser Einflussfaktoren müsste allerdings durch umfassendere Messungen in Garagen mit entsprechend unterschiedlichen Expositionen erfolgen. Auf der Grundlage von zwei Tiefgaragen, die die gleiche Nutzung haben und ähnlich groß sind, ist dies nicht in hinreichender Genauigkeit möglich. Auf der anderen Seite war zu beobachten, dass die beiden Anliegertiefgaragen, trotz deutlich unterschiedlicher Flächenanteile der an Erdreich bzw. beheizten Wohnraum angrenzenden Umschließungsflächen sowie einmal natürlicher und einmal mechanischer Belüftung, trotzdem ein recht ähnliches Klima aufweisen.

Deshalb wird im Folgenden ein empirischer Modellansatz auf Basis der vorliegenden Messdaten für Anliegertiefgaragen mit vergleichbaren Randbedingungen erstellt, bei der keine weiteren Eingabeparameter erforderlich sind. Dieser Ansatz sollte in der Praxis bereits einen überwiegenden Teil der betroffenen Garagen abdecken.

4.3.3 Empirischer Modellansatz für Anliegertiefgaragen auf Basis von Messdaten

Ziel ist ein vom Außenklima abgeleiteter Ansatz für das Tiefgaragenklima, der vor allem die Temperaturverhältnisse in Tiefgaragen von Wohngebäuden für die Bemessung von Bauteilen und Rohrleitungsdämmungen ermöglicht. Aufgrund der nur kleinen verfügbaren Messdatenbasis, sollte der Ansatz etwas weiter auf der sicheren Seite liegen.

Da die stündlichen Messwerte vergleichsweise stark schwanken und für eine Bauteilbemessung keine große Bedeutung haben, werden im Folgenden über 6 Stunden gemittelten Messwerte verwendet. Für Wohnraumklimamodelle mit etwas geringeren Schwankungen werden häufig 24-Stunden-Mittelwerte herangezogen.

Modellansatz für mittlere Temperaturverhältnisse

In Bild 164 ist für jede Messposition in der Tiefgarage 1 (TG1) die gemessene Temperatur über die zum gleichen Zeitpunkt aufgetretene Außenlufttemperatur aufgetragen. Die dazugehörigen Regressionsgeraden sind in blau dargestellt. Bild 165 zeigt dieselben Zusammenhänge für die vier Messpositionen in der Tiefgarage 2 (TG2). Es wird deutlich, dass nur im Bereich der Rampen der Gefrierpunkt unterschritten wird – bei den Messpositionen direkt in der Tiefgarage bleiben die Temperaturen ganzjährig über 0 °C. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, zwischen einem Ansatz für die Tiefgaragen selbst, und einem für den Rampenbereich zu unterscheiden.

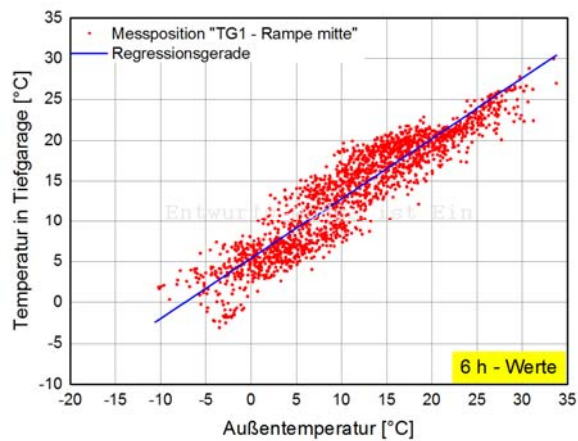
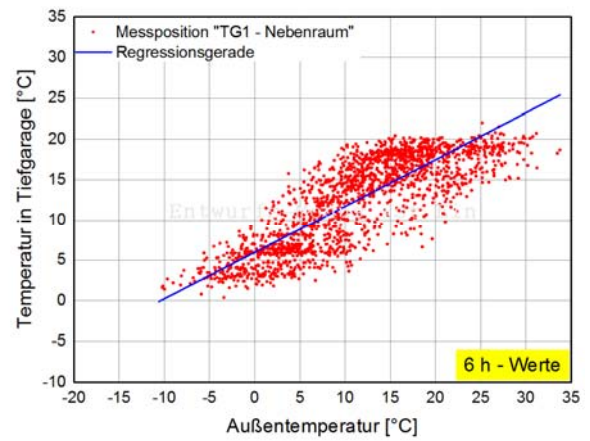
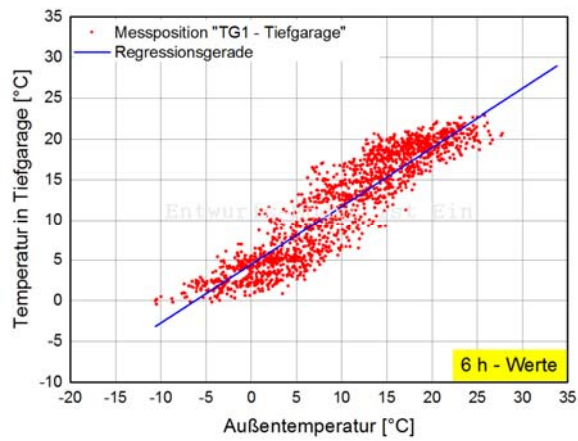


Bild 164:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1. Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

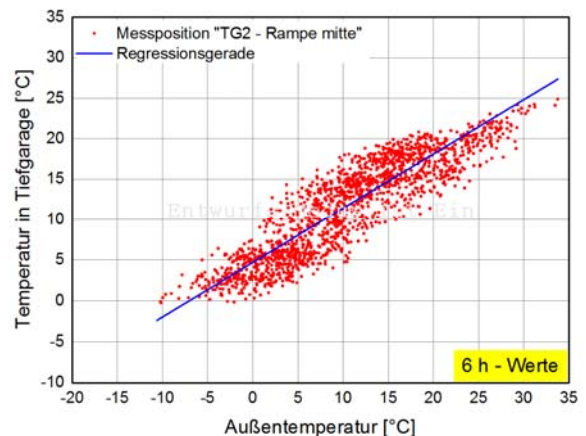
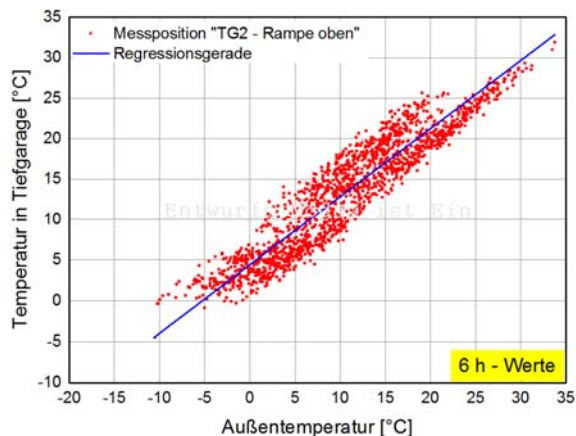
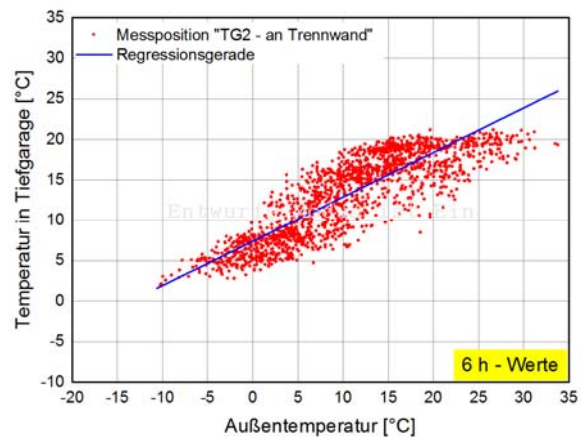
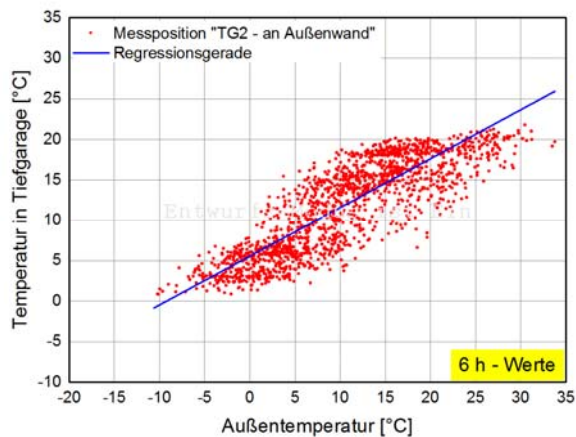


Bild 165:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2. Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

Bild 166 zeigt daher die Messwerte aller Messpositionen in der Tiefgarage selbst. Die Modellkurve repräsentiert das untere Mittelfeld der Messpunktewolke, so dass die in der Tiefgarage gemessenen Temperaturen gut abgebildet werden können. Bei Außentemperaturen unter -5 °C bleibt die Temperatur in der Tiefgarage konstant bei 0 °C . Im Bereich der Rampe wird die Modellkurve weiter nach unten verschoben – bei Außentemperaturen unter -10 °C bleibt die Temperatur im Rampenbereich bei -5 °C (siehe Bild 167). In Bild 168 und Bild 169 ist zusätzlich einmal jede Messposition mit der dazugehörigen Regressionsgeraden und der Modellkurve dargestellt. Die Temperaturen im Nebenraum sind aufgrund der fehlenden Lüftung und dem größerem Anteil der Umschließungsflächen im Verhältnis zum Raumvolumen noch gedämpfter als die in der Tiefgarage selbst. Diese Messposition wird dabei weniger gewichtet, da sie außerhalb der eigentlichen Tiefgarage liegt.

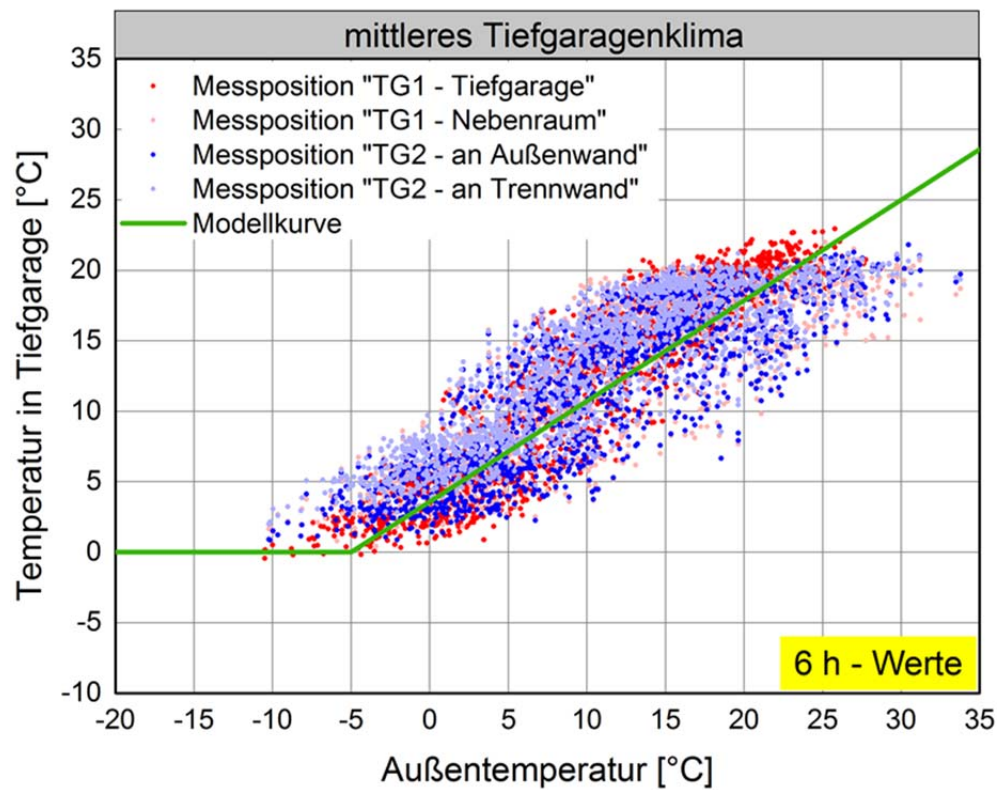


Bild 166:
 Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperaturen aller Messpositionen, die sich direkt in der Tiefgarage befinden. Die grüne Kurve zeigt die verwendete Modellkurve für ein mittleres Tiefgaragenklima.

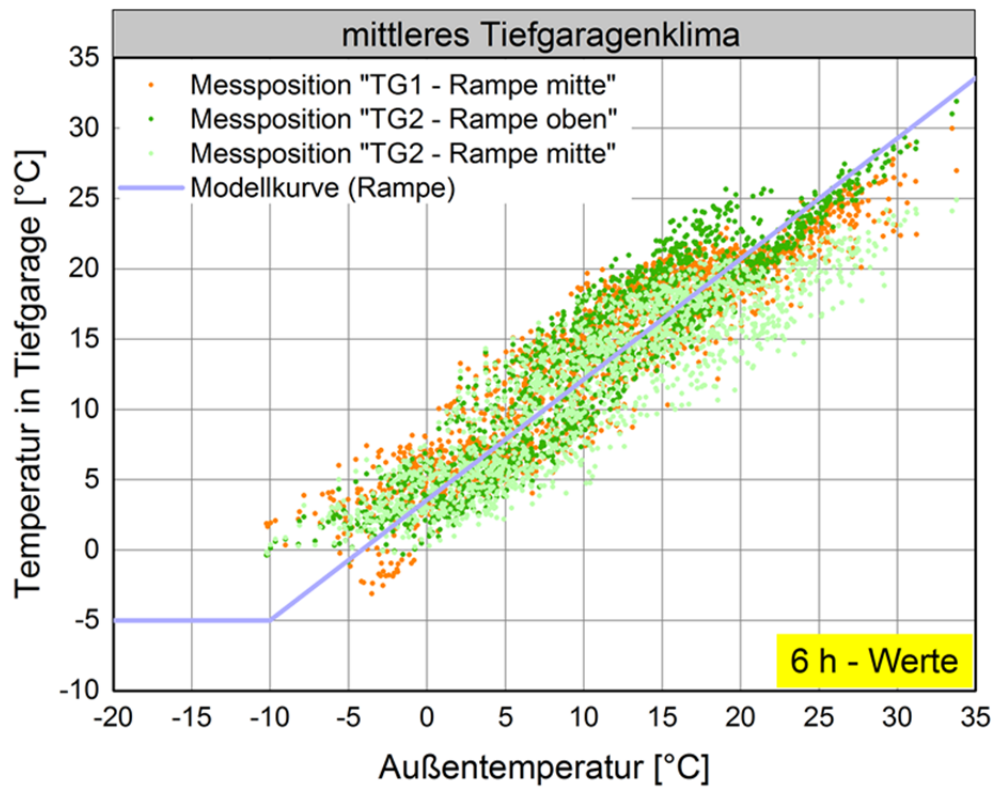


Bild 167:
Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperaturen aller Messpositionen im Rampenbereich. Die hellblaue Kurve zeigt die verwendete Modellkurve für ein mittleres Tiefgaragenklima.

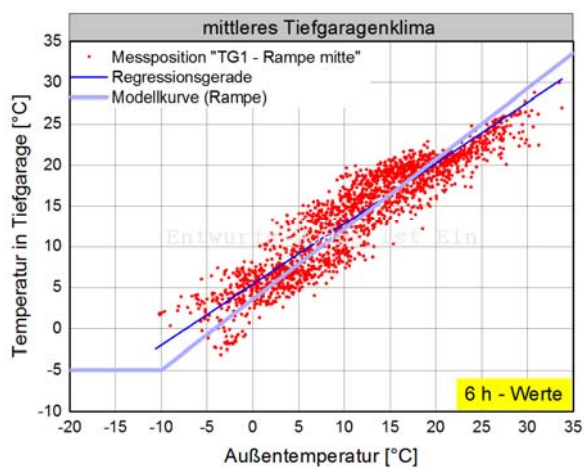
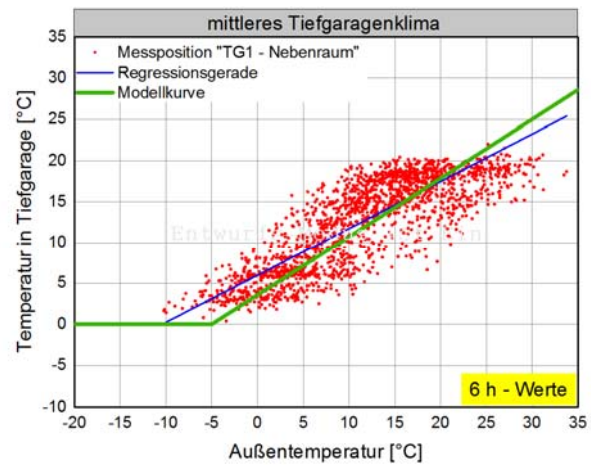
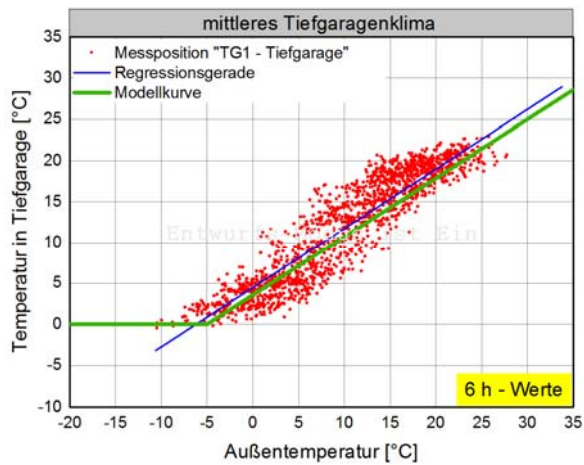


Bild 168:
 Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 im Vergleich zu den Modellkurven. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die dunkelblaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

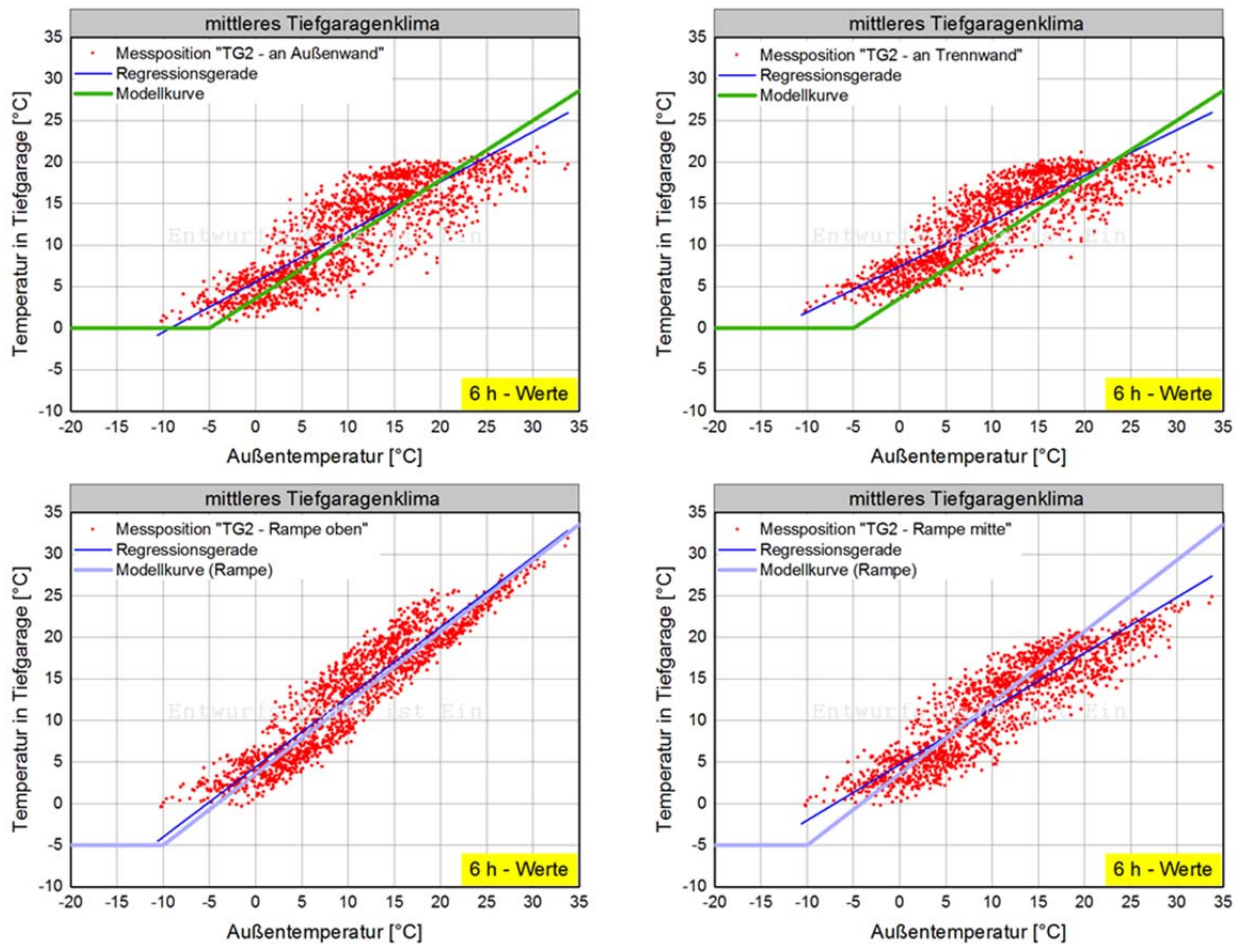


Bild 169:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 im Vergleich zu den Modellkurven. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die dunkelblaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

Zur Validierung des Modellansatzes wird die an den Messpositionen gemessene stündliche Temperatur mit der über die Modellkurve und die Außenlufttemperatur separat für Tiefgarage und Rampenbereich abgeleiteten Temperatur verglichen. Bild 170 zeigt den Vergleich für die Tiefgarage 1 und Bild 171 für Tiefgarage 2. Dabei stellen die hellen Kurven die stündlichen Werte und die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel dar. Die von der Außentemperatur abgeleitete Tiefgaragentemperatur (blau) liegt dabei im Monatsmittel maximal 2 K unter und 1 K über den gemessenen Temperaturen (rot). Mit diesem Modellansatz können die Tiefgaragentemperaturen mit einer guten Übereinstimmung nachgerechnet werden.

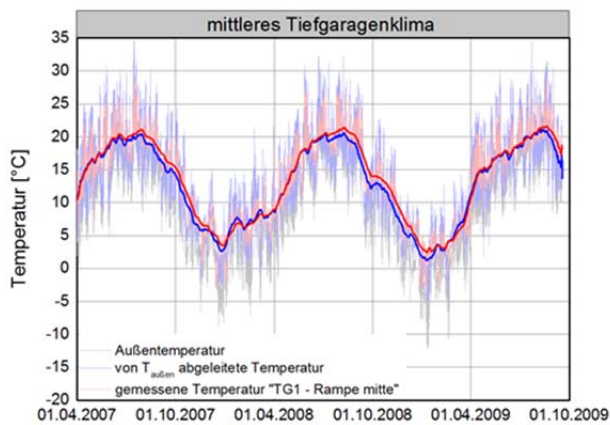
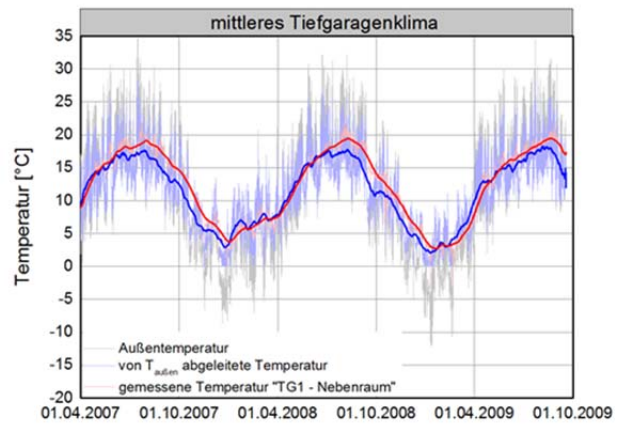
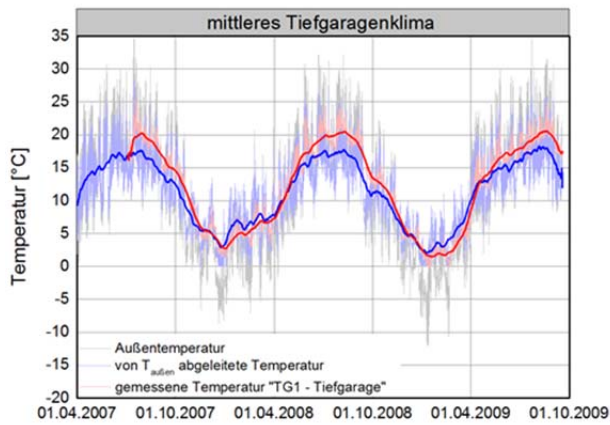


Bild 170:

Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

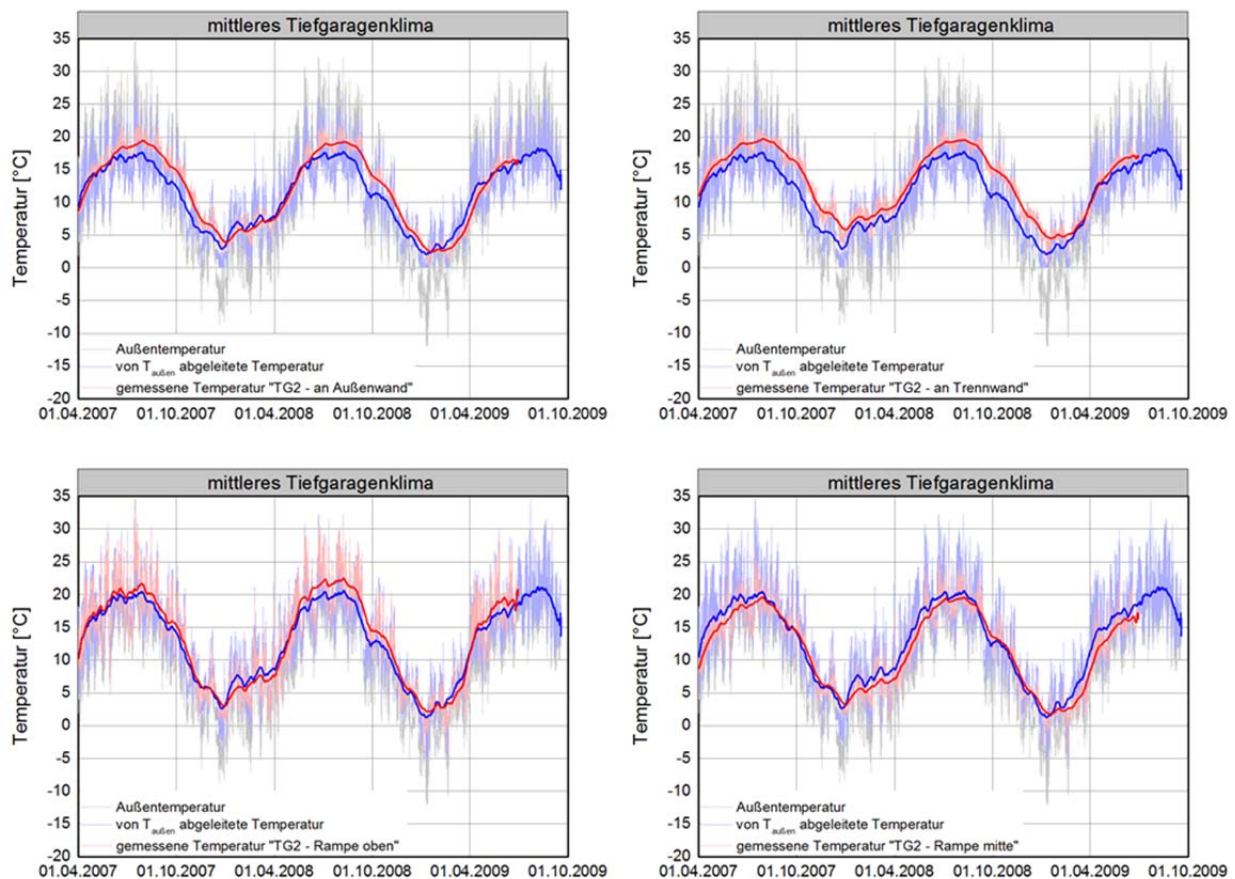


Bild 171:

Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

Modellansatz für „kalte“ Temperaturverhältnisse

Zusätzlich zum mittleren Ansatz für die Tiefgaragentemperaturen wird auch ein am unteren Rand der gemessenen Bandbreite liegender Ansatz erstellt. Dies hat zwei Gründe. Erstens ist die Datenbasis mit 2 Tiefgaragen eher dünn und es kann nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass die Bedingungen hier bereits repräsentativ sind; daher sollte die Sicherheit des Modellansatzes etwas höher sein, als bei einer breiteren Datenbasis. Zum zweiten stellt sich häufig die Frage nach der Bemessung der Dämmstärken von Rohrleitungs-dämmungen. Hier sind nicht die mittleren sondern die minimalen Temperaturen maßgeblich. Deshalb wird noch ein zweiter Modellansatz entwickelt, der die gemessenen Temperaturen vor allem im Winter deutlicher auf der sicheren Seite liegend abdeckt. Die zugehörigen Modellkurven sind in Bild 172 und Bild 179 dargestellt. Bei Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt bleibt die Temperatur in der Tiefgarage konstant bei 0 °C. Im Rampenbereich bleibt die

Temperatur bei -5 °C wenn die Außentemperaturen unter -5 °C fällt. In Bild 174 und Bild 181 ist zusätzlich einmal jede Messposition mit der dazugehörigen Regressionsgeraden und der Modellkurve dargestellt.

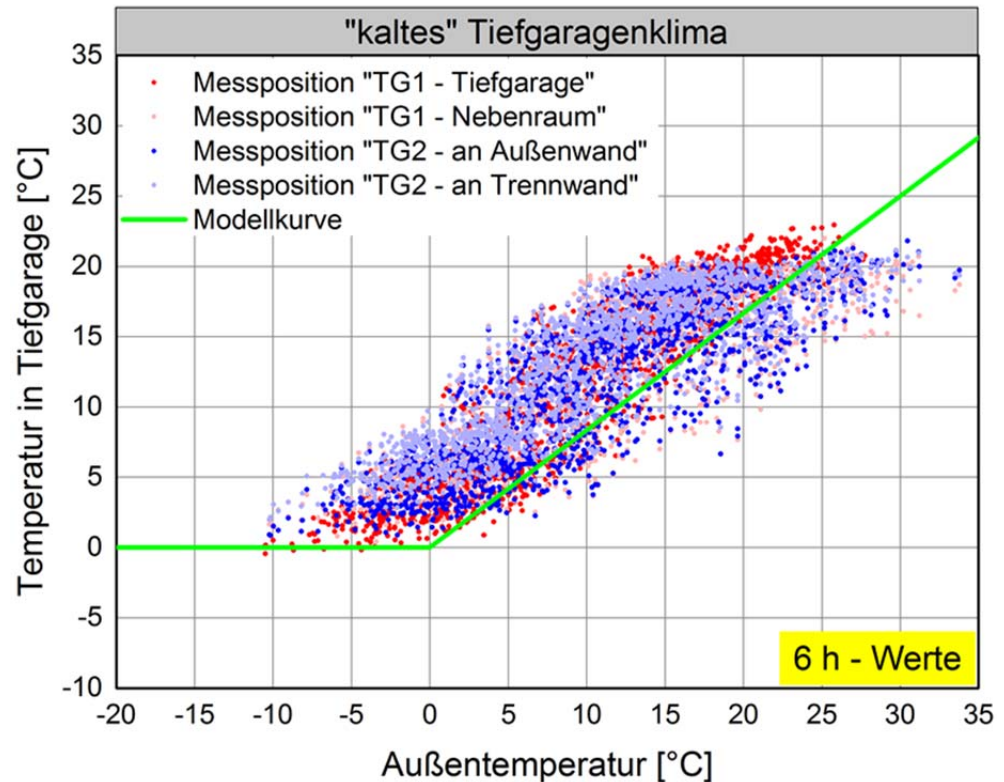


Bild 172:
Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperaturen aller Messpositionen, die sich direkt in der Tiefgarage befinden. Die grüne Kurve zeigt die verwendete Modellkurve für ein „kaltes“ Tiefgaragenklima.

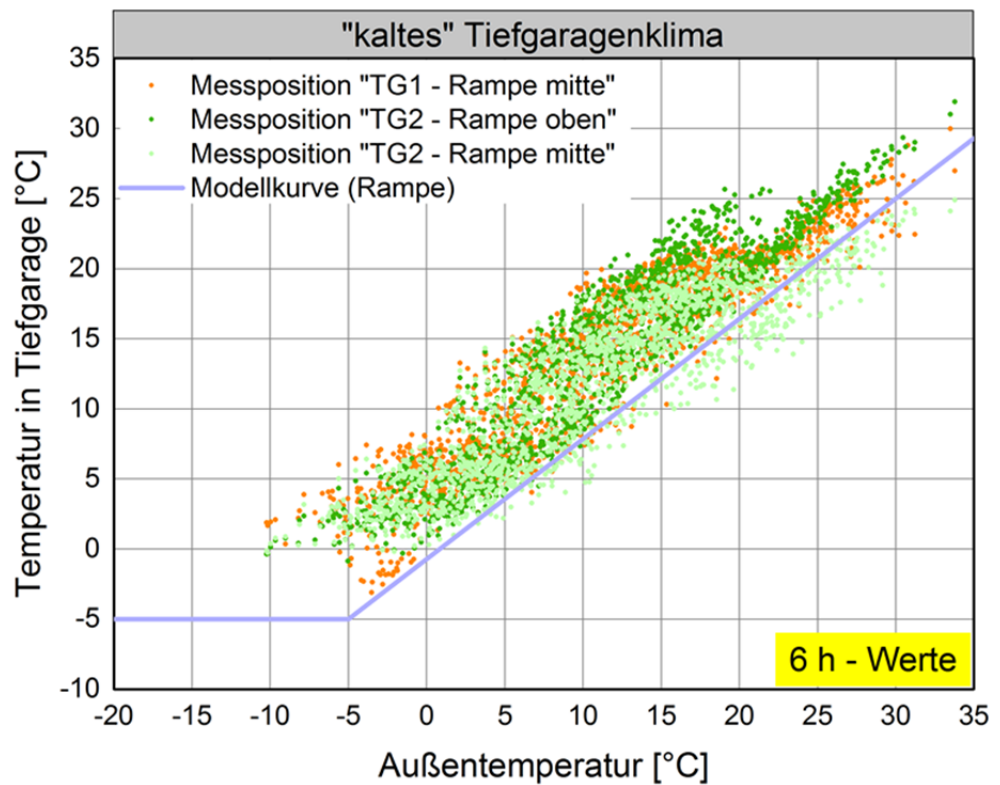


Bild 173:
Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperaturen aller Messpositionen im Rampenbereich. Die hellblaue Kurve zeigt die verwendete Modellkurve für ein „kaltes“ Tiefgaragenklima.

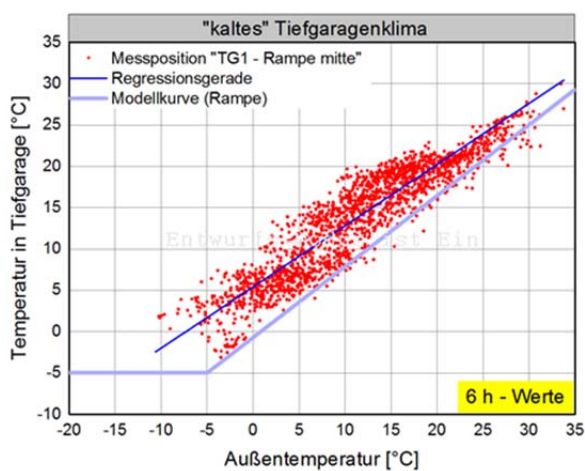
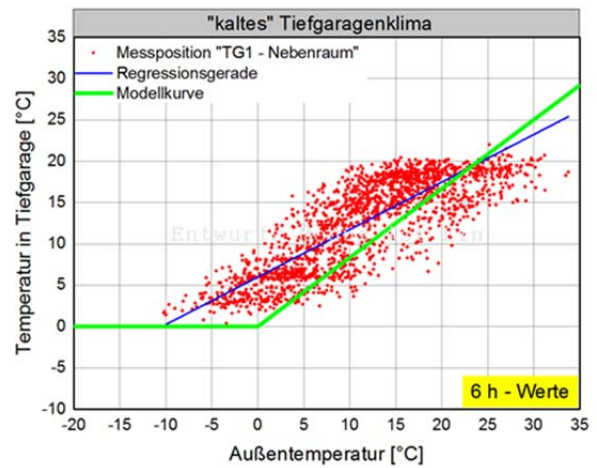
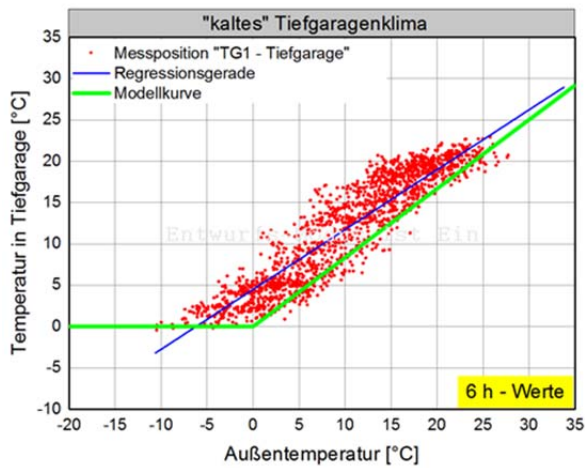


Bild 174:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 im Vergleich zu den Modellkurven. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die dunkelblaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

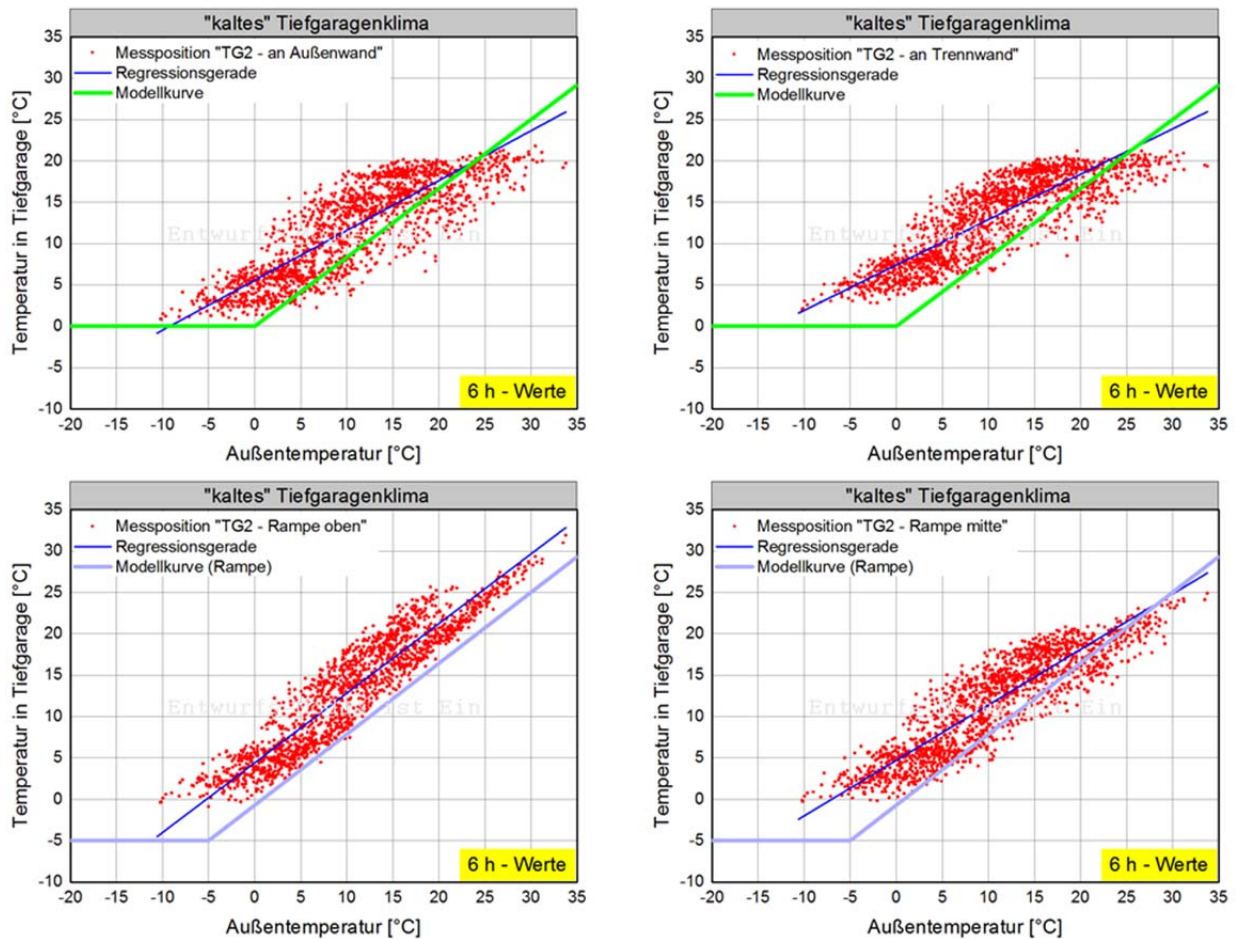


Bild 175:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 im Vergleich zu den Modellkurven. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die dunkelblaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

Zur Validierung dieses Modellansatzes wird ebenfalls die an den Messpositionen gemessene stündliche Temperatur mit der über die Modellkurve und die Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperatur verglichen. Bild 176 zeigt den Vergleich für die Tiefgarage 1 und Bild 183 für Tiefgarage 2. Die von der Außentemperatur abgeleitete Tiefgaragentemperatur (blau) nach dem Modellansatz für „kaltes“ Tiefgaragenklima liegt dabei im Monatsmittel um etwa 2 bis 5 K unter den gemessenen Temperaturen (rot) und somit weiter auf der sicheren Seite als mit dem Modellansatz für ein mittleres Tiefgaragenklima.

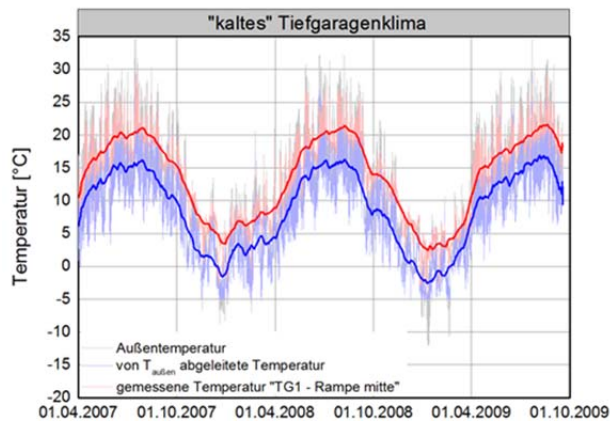
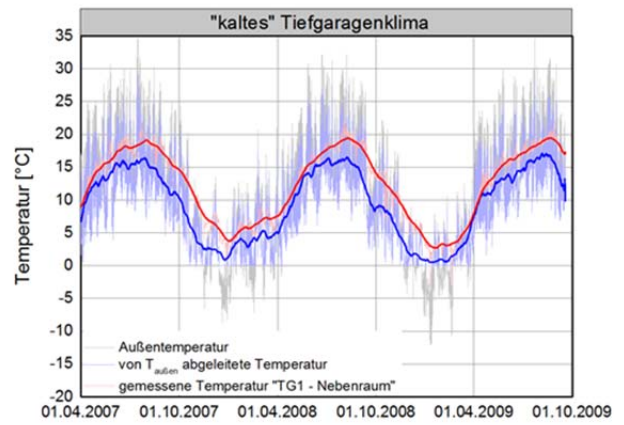
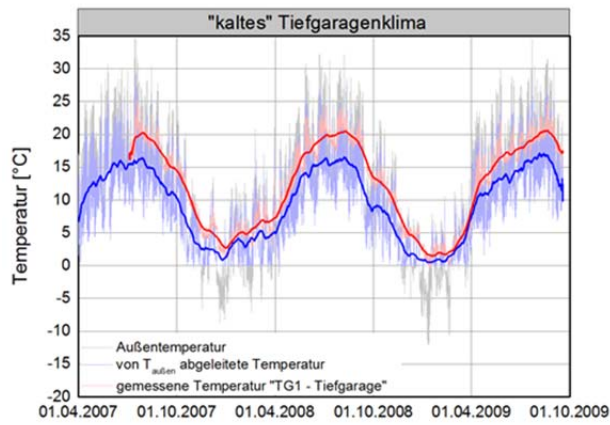


Bild 176:

Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

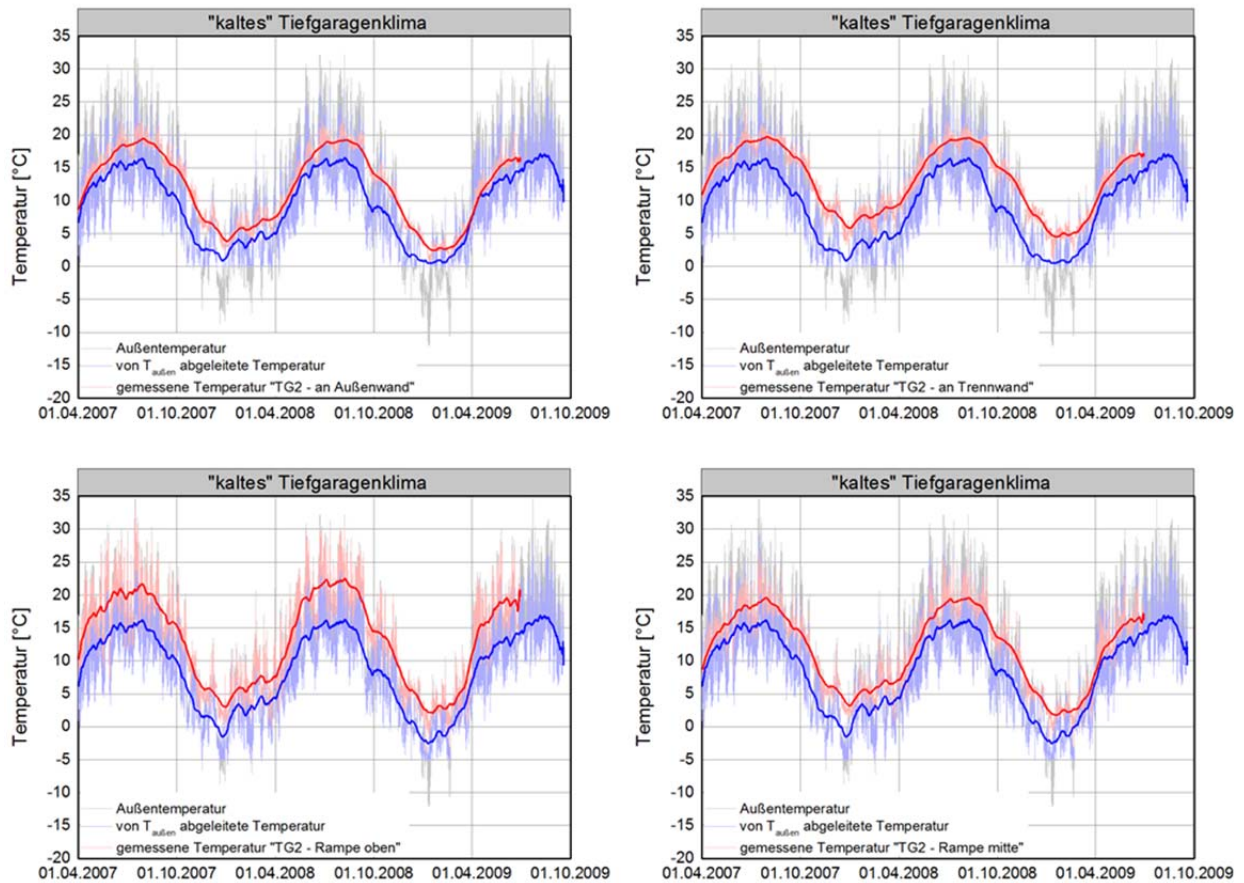


Bild 177:

Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

Modellansatz für die Feuchteverhältnisse

Auch für die Feuchteverhältnisse wird ein Modellansatz in Abhängigkeit vom Außenklima erstellt. Dazu wird zunächst die in der Tiefgarage gemessene relative Feuchte - wie bei üblichen Normansätzen für das Wohnraumklima - direkt über die Außenlufttemperatur aufgetragen. Dies ist für die einzelnen Messpositionen in Bild 178 und Bild 179 dargestellt. Aufgrund der großen Streuung der Messpunkte ist hier aber kein ausreichender Zusammenhang zwischen den beiden Größen feststellbar.

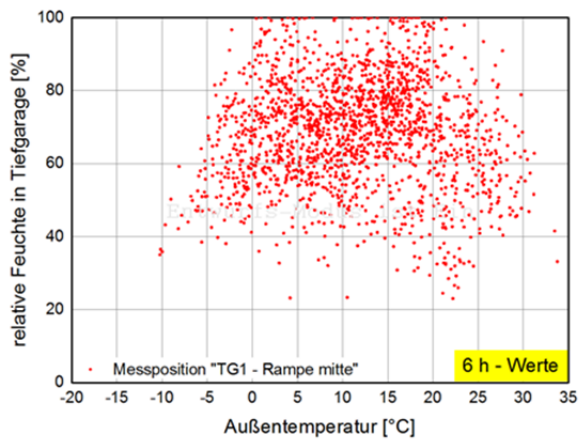
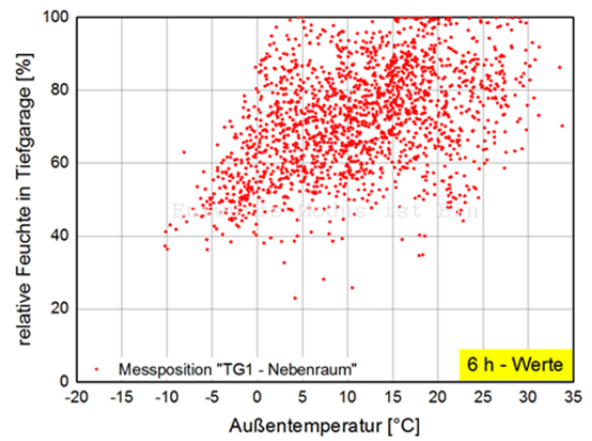
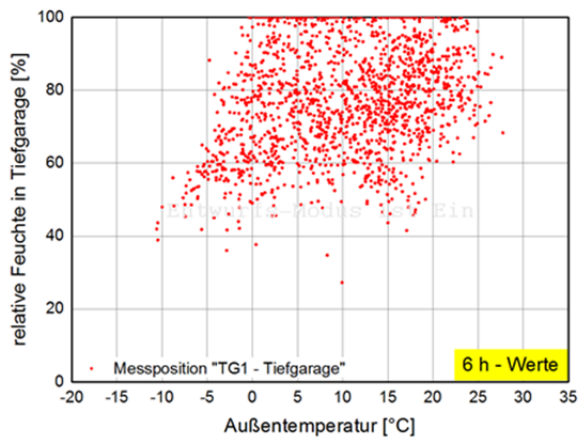


Bild 178:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen relativen Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

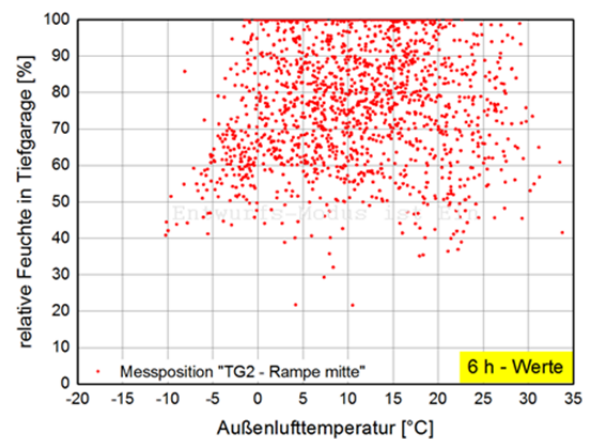
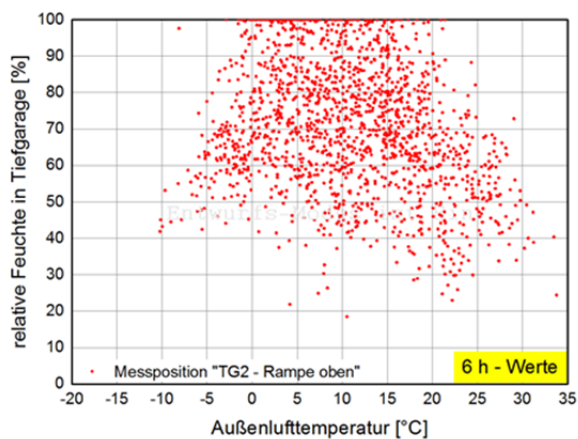
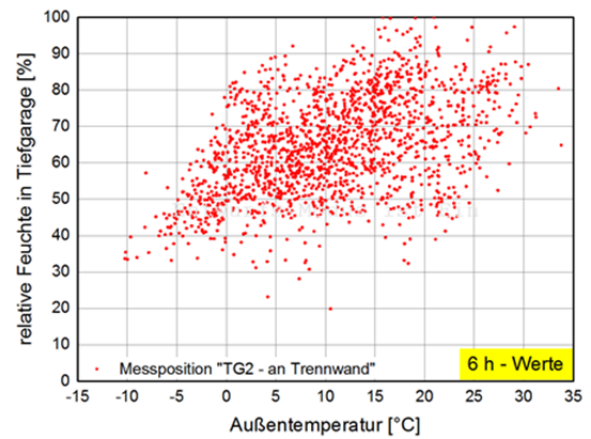
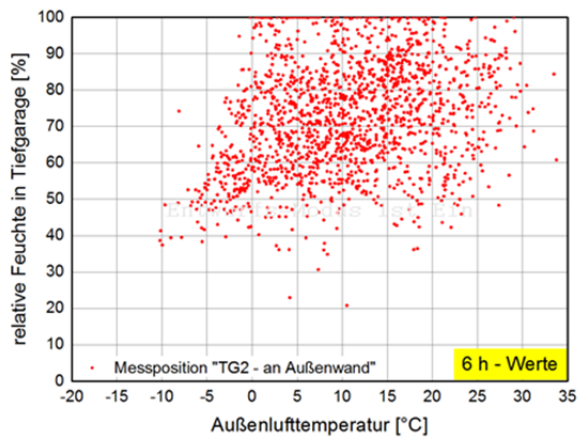


Bild 179:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen relativen Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

Daher wird in einem weiteren Schritt die absolute Feuchte in der Tiefgarage, welche aus der gemessenen Temperatur und relativen Feuchte berechnet werden kann, über die Außenlufttemperatur aufgetragen (Bild 180 und Bild 181). Hier ist der Zusammenhang erwartungsgemäß schon deutlich besser, allerdings ist die Streuung immer noch ziemlich groß.

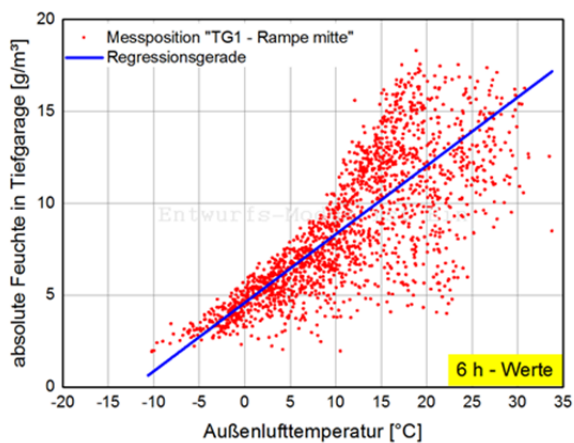
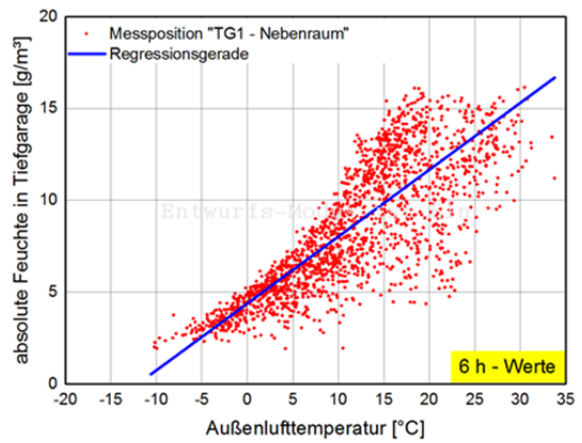
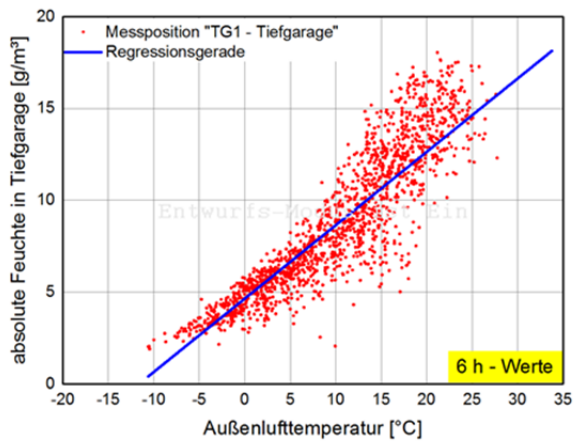


Bild 180:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen absoluten Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte). Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

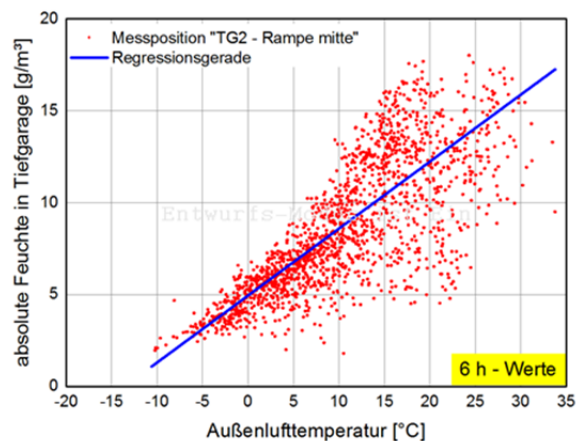
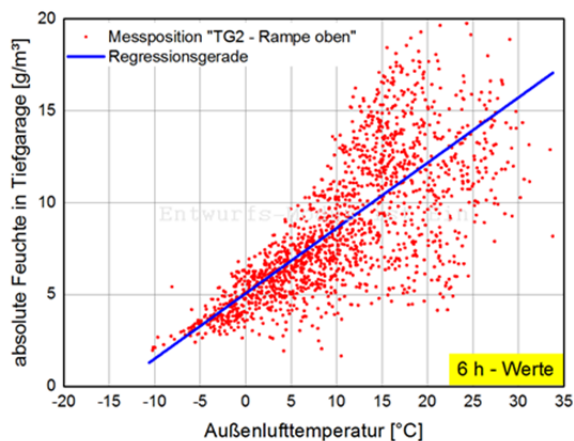
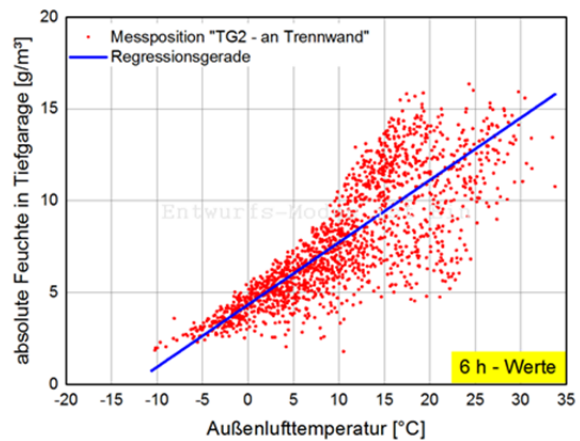
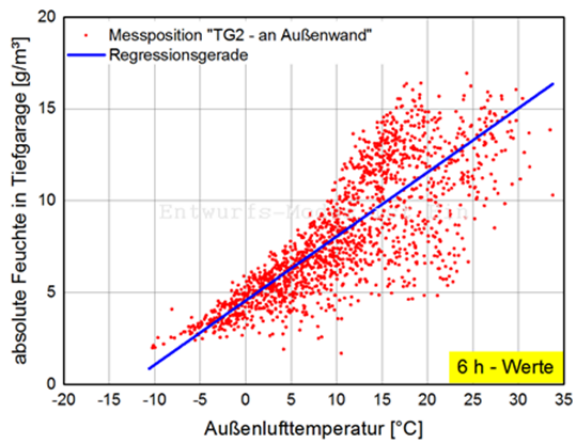


Bild 181:

Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen absoluten Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte). Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

Da bei der hygrothermischen Bemessung der Bauteile die Diffusion der Feuchte in das Bauteil vom Wasserdampfpartialdruckgefälle, also der Kombination aus Temperatur und relativer Luftfeuchte, abhängt, wird als Nächstes der Zusammenhang zwischen dem Wasserdampfpartialdruck in der Tiefgarage und der Außenlufttemperatur dargestellt. Diese exponentielle Abhängigkeit ist in Bild 182 und Bild 183 für die einzelnen Messpositionen dargestellt. Der Zusammenhang ist vor allem zur kalten Jahreszeit sehr deutlich. In Bild 184 sind die exponentiellen Regressionskurven der einzelnen Messpositionen in einem Bild zusammengefasst. Die Regressionskurve der Messposition „TG1 – Tiefgarage“ liegt etwas über den restlichen Regressionskurven und stellt gewissermaßen einen leichten Ausreißer dar. Die Regressionskurve der Messposition „TG2 – an Außenwand“ liegt dagegen recht gut im Mittelfeld der verschiedenen Kurven und wird daher als Modellkurve verwendet. Die Modellkurve wird in Bild 185 und Bild 186 zusätzlich auch nochmal im Vergleich zu den gemessenen Werten in den beiden Garagen dargestellt. Die Übereinstimmung mit den Messdaten ist dabei wiederum gut.

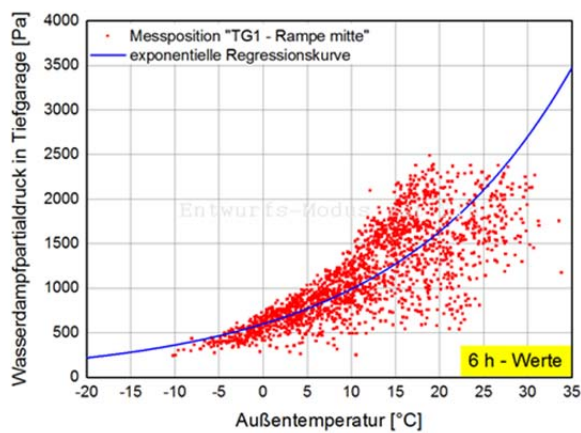
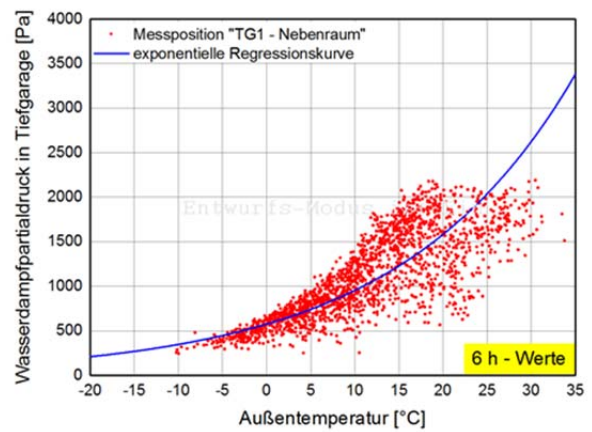
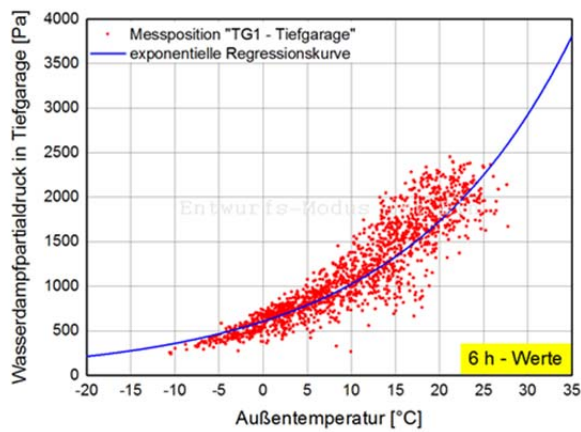


Bild 182:

Darstellung des über die Außenlufttemperatur aufgetragenen Wasserdampfpartialdrucks für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte). Die blaue Kurve zeigt jeweils die exponentielle Regressionskurve. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

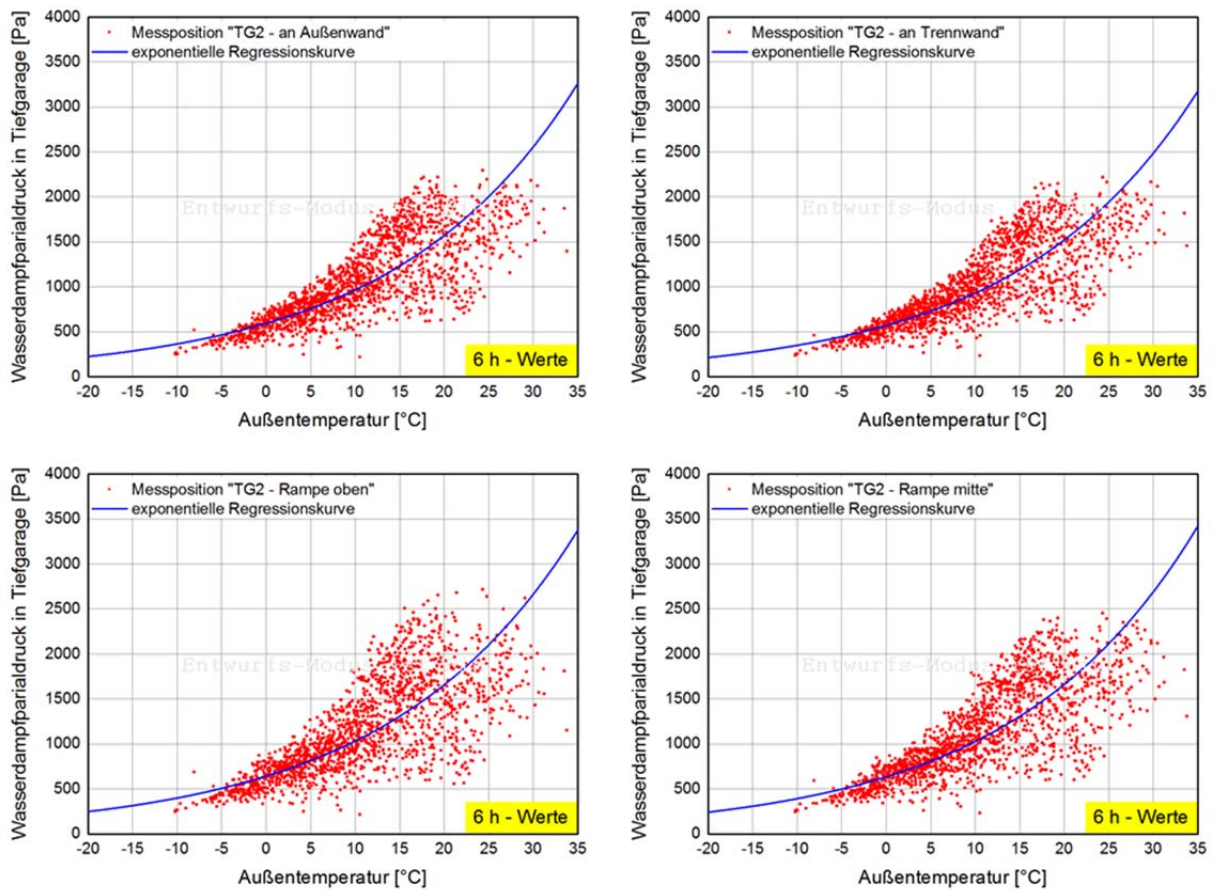


Bild 183:
 Darstellung des über die Außenlufttemperatur aufgetragenen Wasser-dampf-
 partialdrucks für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 (be-rechnet
 aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte). Die blaue Kurve zeigt je-
 weils die exponentielle Regressionskurve. Verwendung von 6-Stunden-Mittel-
 werten.

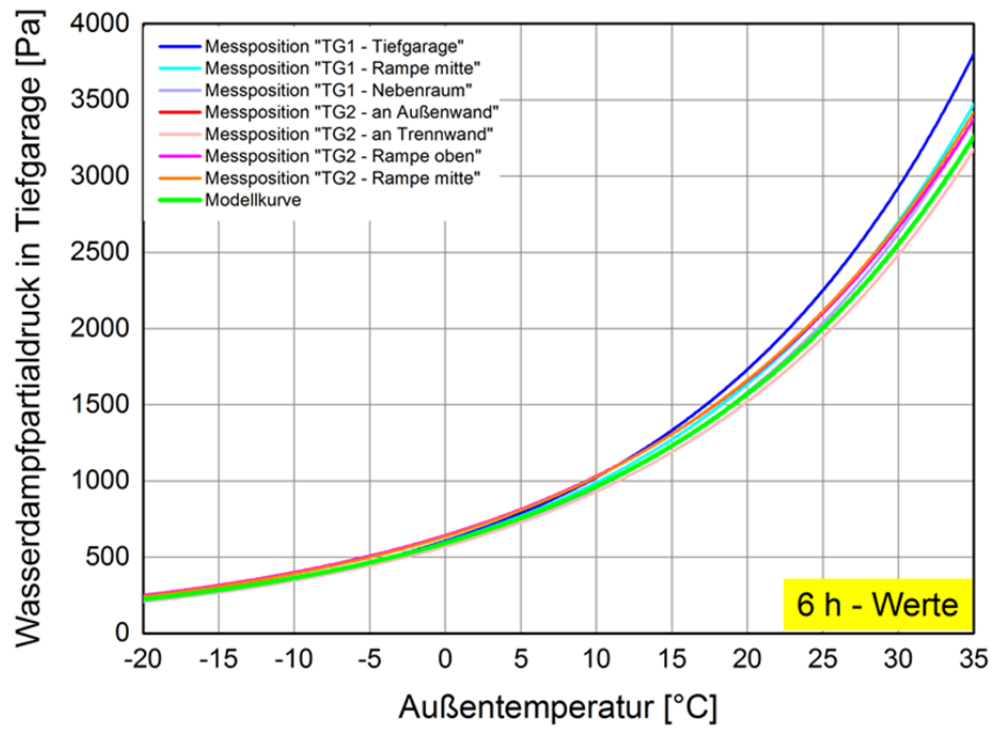


Bild 184:
Darstellung der exponentiellen Regressionskurven aller Messpositionen in den Tiefgaragen 1 und 2 sowie der verwendeten Modellkurve.

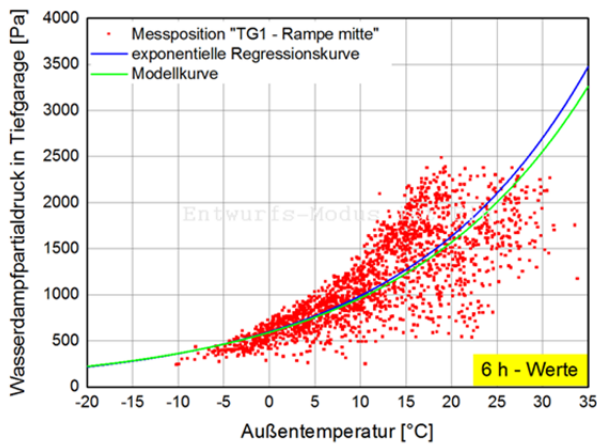
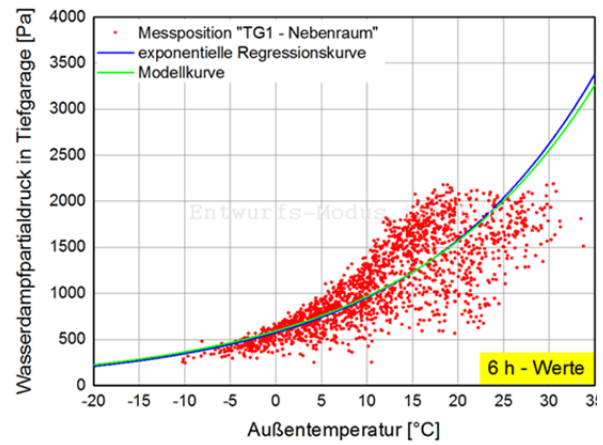
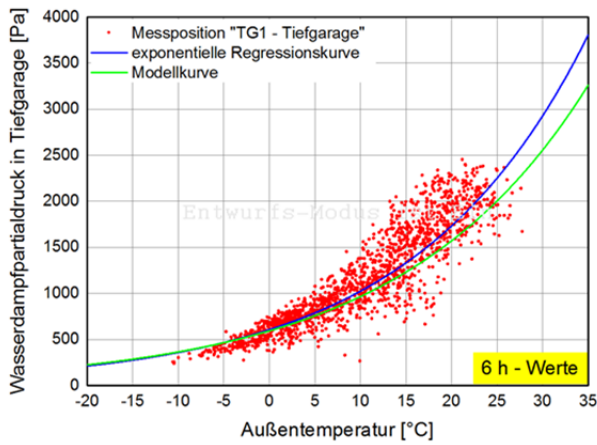


Bild 185:

Darstellung des über die Außenlufttemperatur aufgetragenen Wasserdampfpartialdrucks für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte) im Vergleich zur Modellkurve. Die blaue Kurve zeigt jeweils die exponentielle Regressionskurve. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

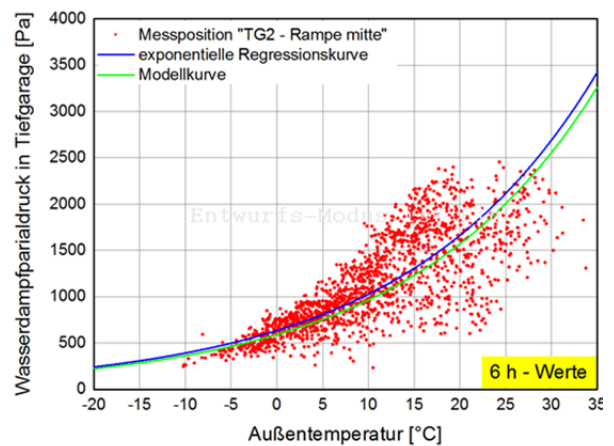
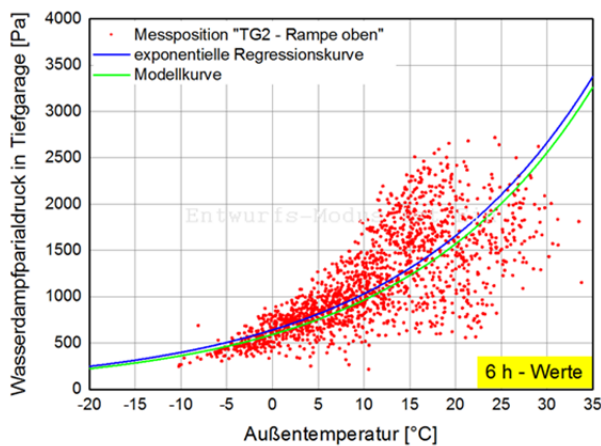
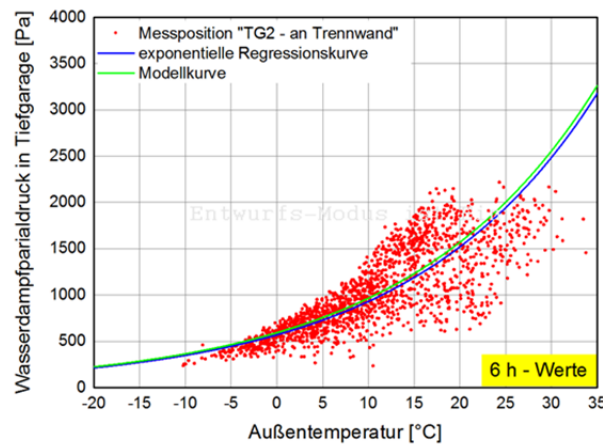
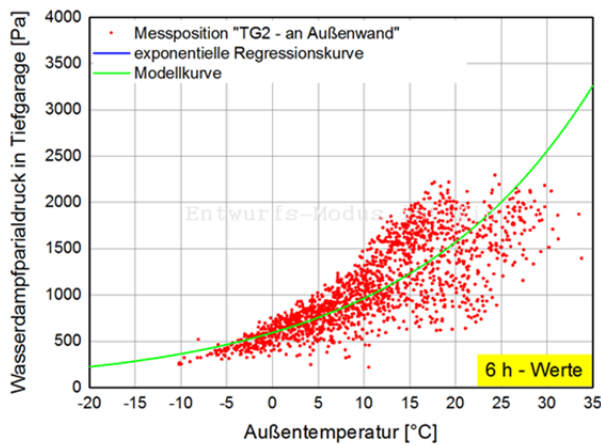


Bild 186:

Darstellung des über die Außenlufttemperatur aufgetragenen Wasserdampfpartialdrucks für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte) im Vergleich zur Modellkurve. Die blaue Kurve zeigt jeweils die exponentielle Regressionskurve. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

Zur Überprüfung der Eignung des Ansatzes wird mit Hilfe der aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Tiefgaragentemperatur und dem über die Modellkurve ermittelten Wasserdampfpartialdruck die relative Feuchte in der Tiefgarage berechnet und mit der gemessenen relativen Feuchte verglichen. Bild 187 und Bild 188 zeigen die berechneten relativen Feuchten im Vergleich zu den gemessenen stündlichen Werten für das mittlere Tiefgaragenklima und Bild 189 und Bild 190 für das „kalte“ Tiefgaragenklima.

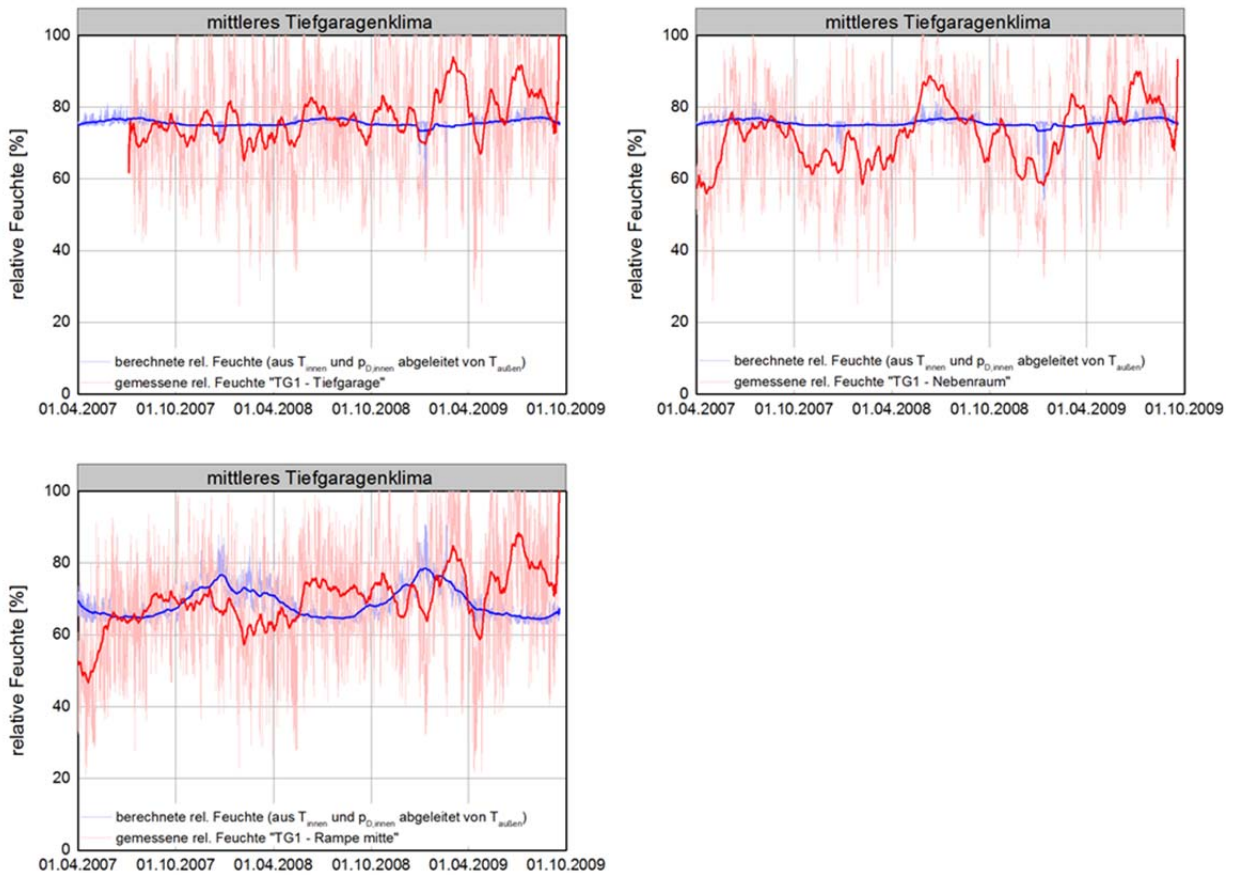


Bild 187:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über den Wasserdampfpartialdruck berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

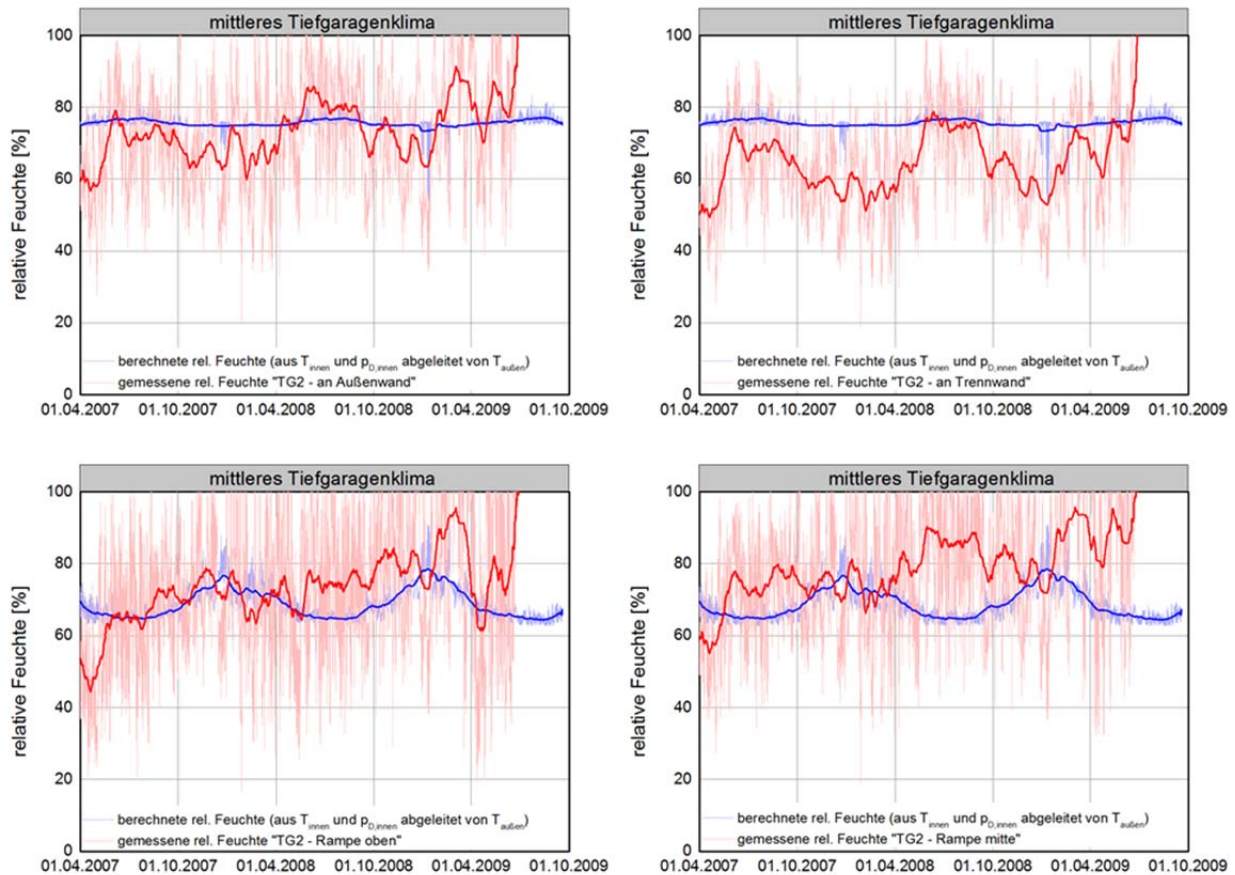


Bild 188:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über den Wasserdampfpartialdruck berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

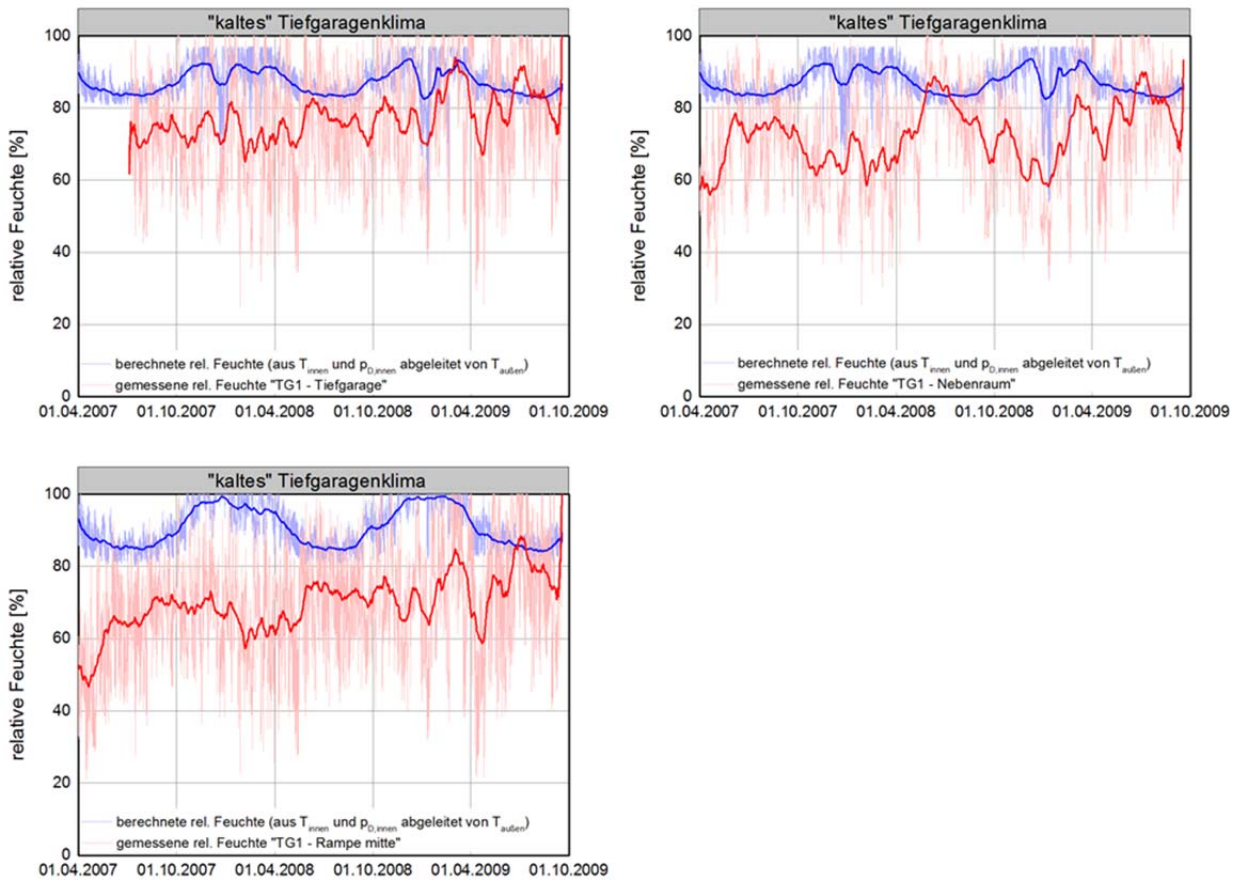


Bild 189:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über den Wasserdampfpartialdruck berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

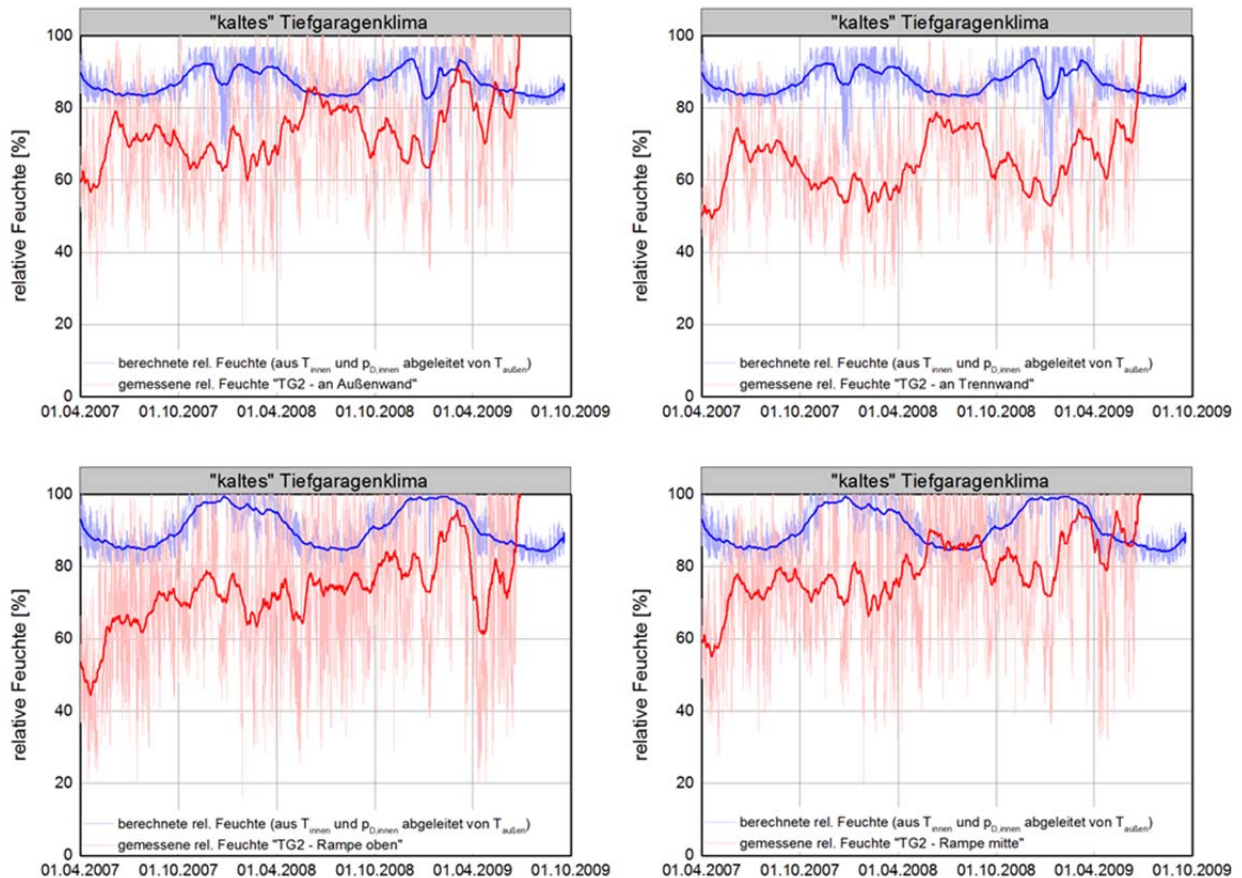


Bild 190:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über den Wasserdampfpartialdruck berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

Aus diesem Vergleich geht hervor, dass die berechnete relative Feuchte in der Tiefgarage selbst, im Fall des mittleren Temperaturansatzes fast konstant verläuft und die gemessene relative Feuchte zwar im Mittel gut abbildet, die zeitliche Veränderung aber kaum widerspiegelt. Im Rampenbereich liegt die berechnete relative Feuchte eher etwas niedriger als die gemessene relative Feuchte. Wird die relative Feuchte mit dem Modellansatz für das „kalte“ Tiefgaragenklima berechnet, liegt diese erwartungsgemäß deutlich höher als die gemessene relative Feuchte, da bei gleichem Wasserdampfpartialdruck eine geringere Temperatur zu einer höheren relativen Feuchte führt. Zudem läuft die berechnete relative Feuchte teilweise gegenläufig zu der gemessenen Feuchte, so dass auch dieser Modellansatz nicht besonders gut geeignet zu sein scheint.

Deshalb wird in einem weiteren Vergleich der Zusammenhang der absoluten Feuchte außen und der absoluten Feuchte innen betrachtet. Dieser Ansatz hat auch schon bei den Kellerräumen in Kapitel 4.2 die besten Ergebnisse erzielt. In

Bild 191 und Bild 192 sind für jede Messposition die absolute Feuchte in der Tiefgarage über die absolute Feuchte der Außenluft aufgetragen und die jeweiligen Regressionsgeraden der Messpunkte dargestellt. Es zeigt sich ein guter Zusammenhang zwischen den beiden Parametern.

Als Modellkurve wird eine neue Gerade gewählt, die etwa in der Mitte der Regressionsgeraden liegt (siehe Bild 193). In Bild 194 und Bild 195 sind zusätzlich die einzelnen Messpositionen mit Regressionsgeraden und Modellkurve dargestellt.

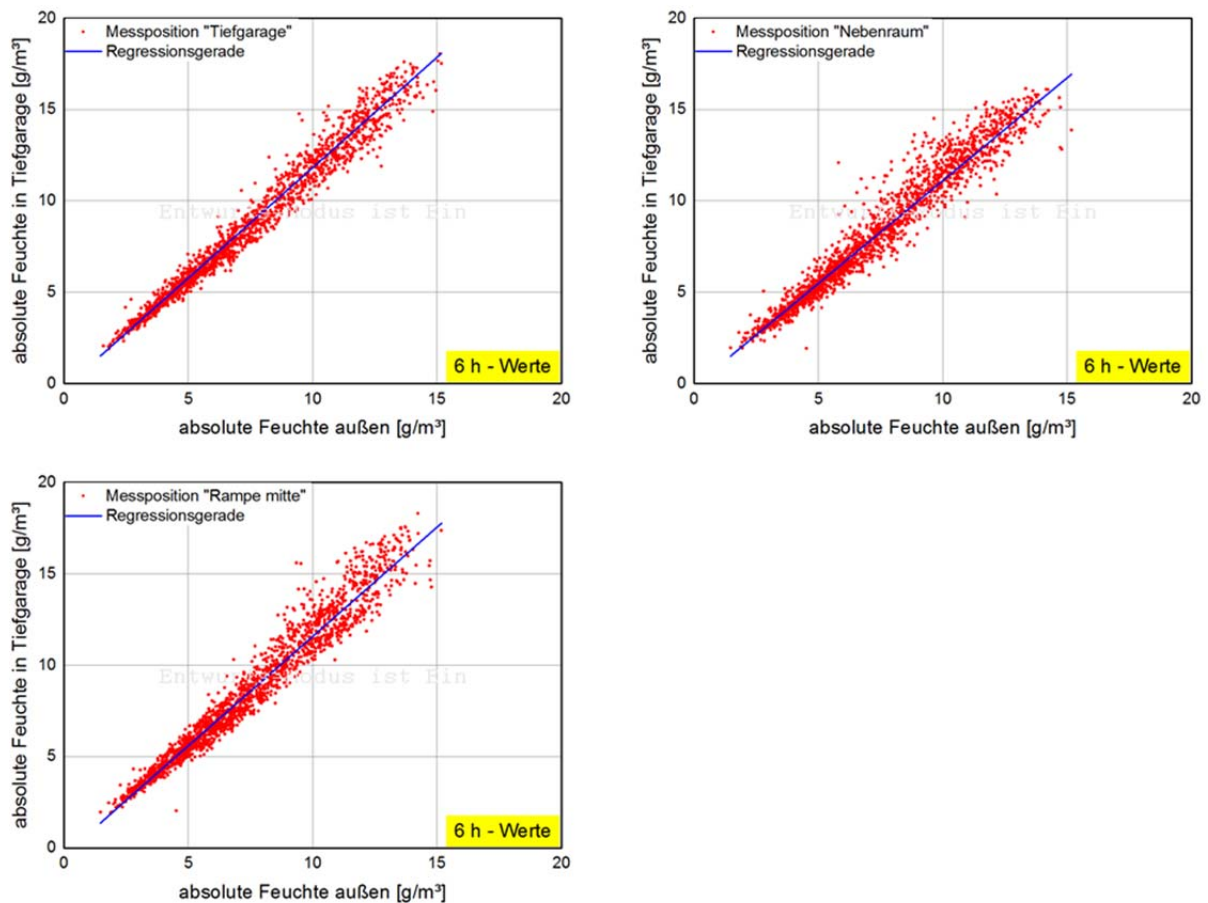


Bild 191:
Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte). Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

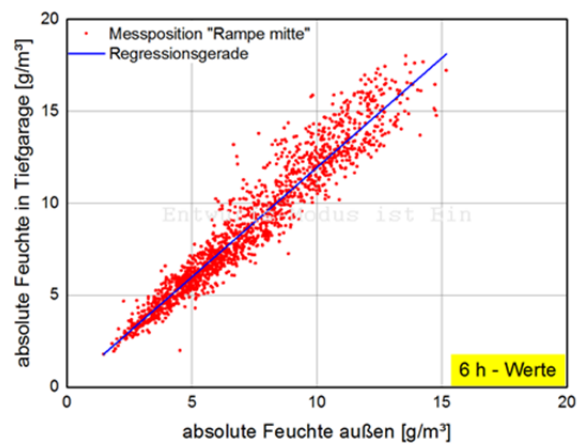
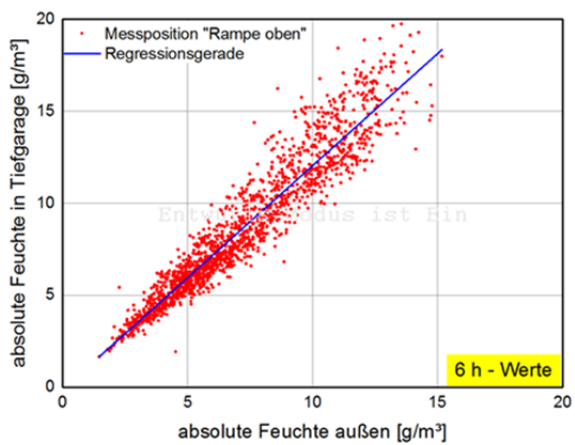
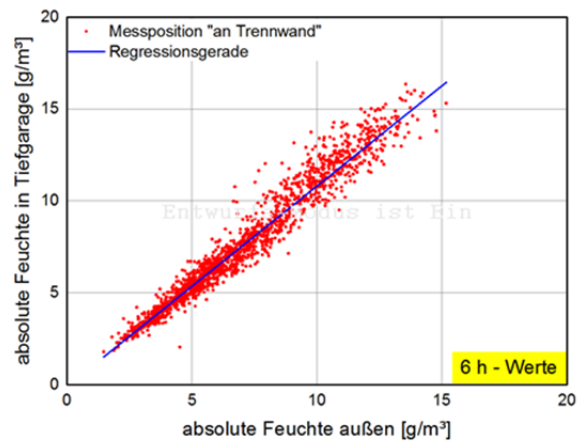
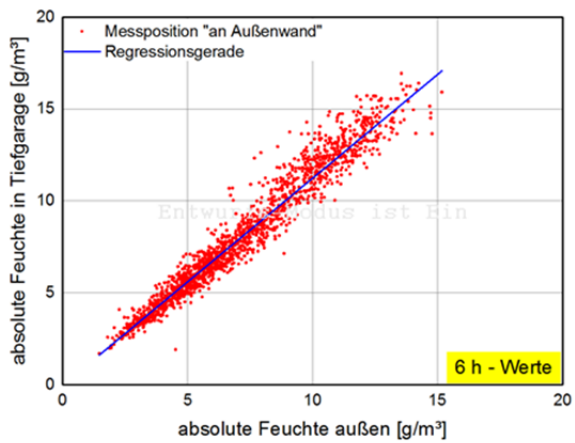


Bild 192:

Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte). Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

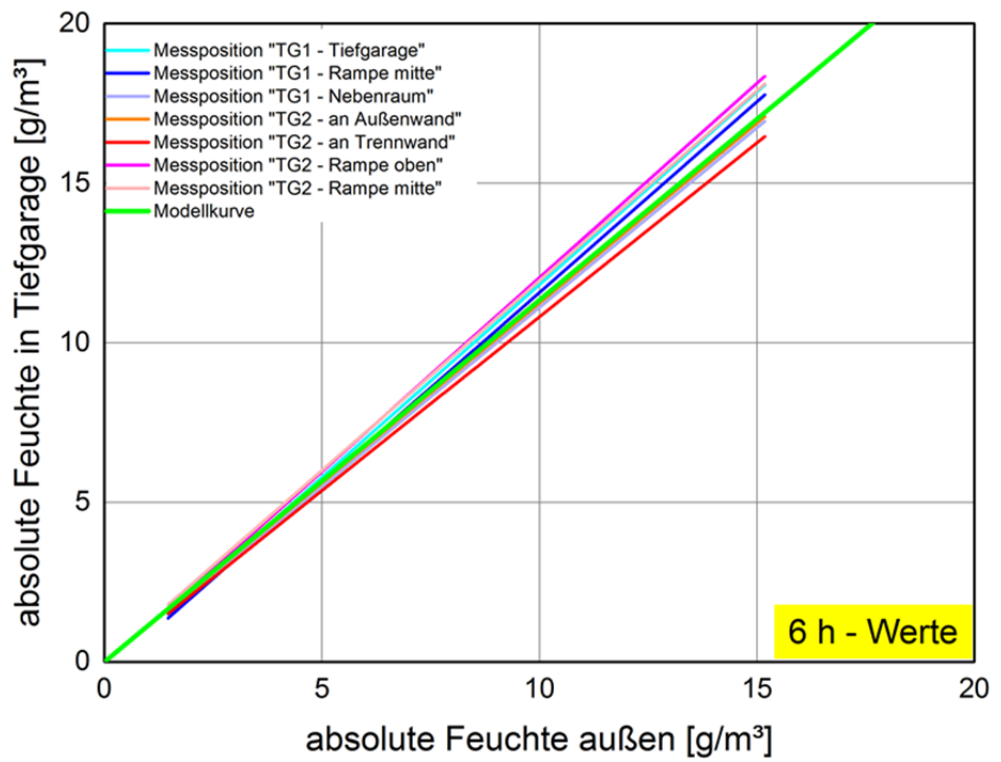


Bild 193:
Darstellung der Regressionsgeraden aller Messpositionen in den Tiefgaragen 1 und 2 sowie der verwendeten Modellkurve.

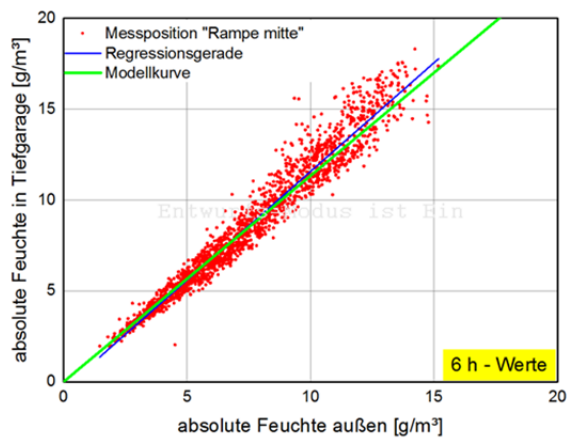
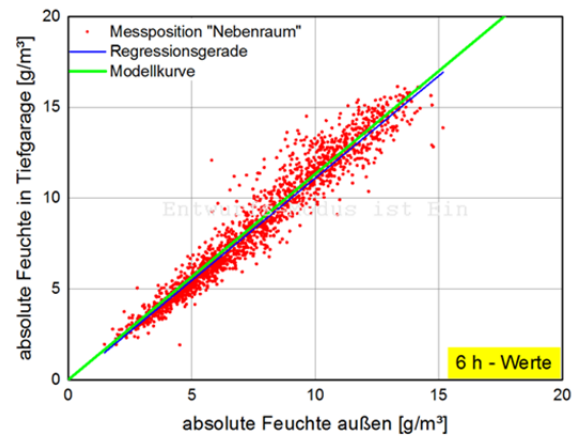
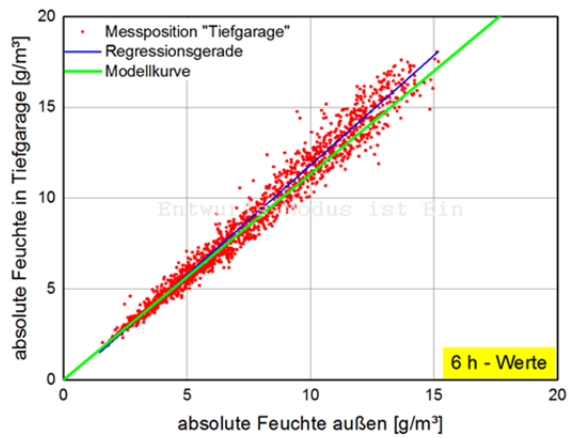


Bild 194:

Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte) im Vergleich zur Modellkurve. Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

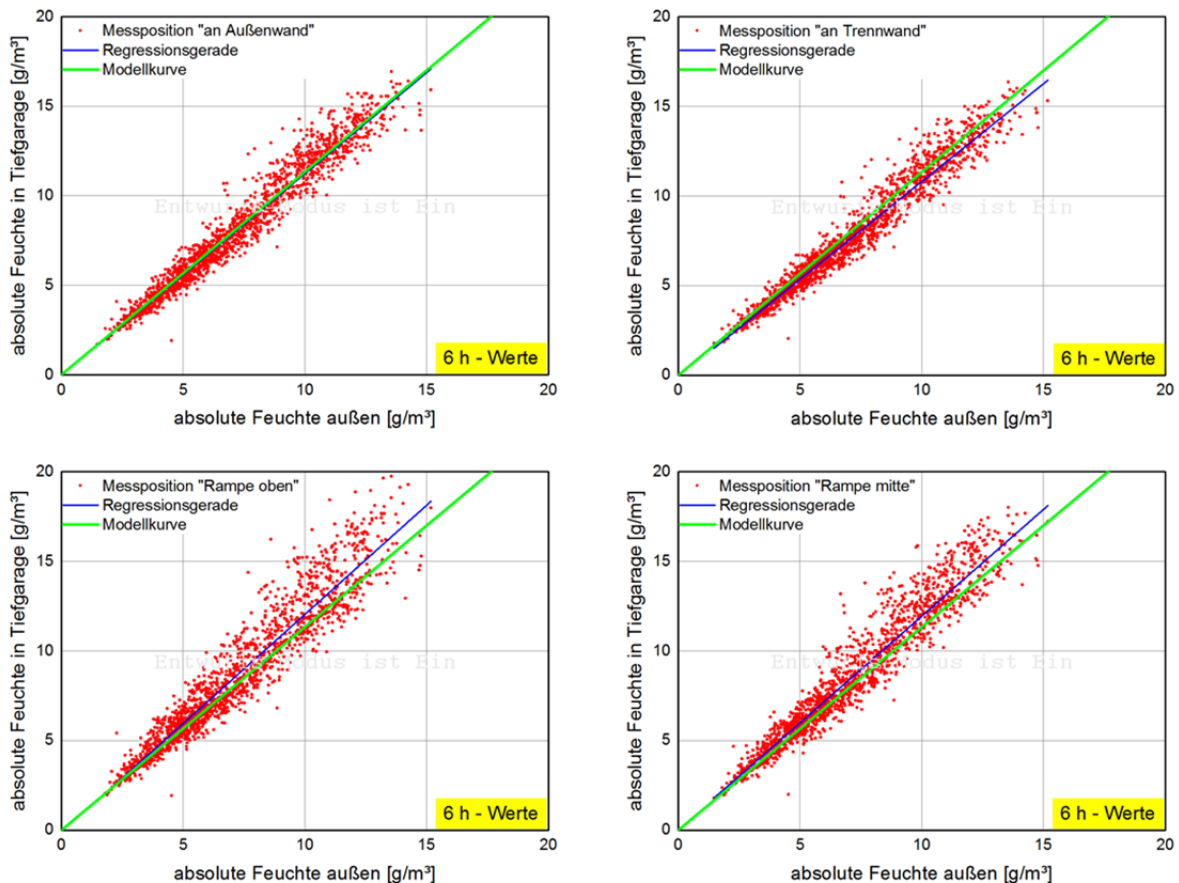


Bild 195:

Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte) im Vergleich zur Modellkurve. Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

Zur Überprüfung dieses Modellansatzes wird die absolute Feuchte der Außenluft aus Temperatur und relativer Feuchte berechnet. Über die Modellkurve ergibt sich die absolute Feuchte in der Tiefgarage, die wiederum mit der aus der Außenluft abgeleiteten Tiefgaragentemperatur in die relative Feuchte umgerechnet werden kann. Bild 196 und Bild 197 zeigen den Vergleich der berechneten relativen Feuchte für das mittlere Tiefgaragenklima mit der an den einzelnen Messpositionen gemessenen relativen Feuchte. Bild 198 und Bild 199 stellen den Vergleich für das „kalte“ Tiefgaragenklima dar. Dabei stehen die hellen Kurven für die stündlichen Werte, und die dunklen Kurven für das gleitende Monatsmittel.

Mit dem mittleren Tiefgaragenklima ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten relativen Feuchten in der Tiefgarage, wobei hier die berechnete relative Feuchte teilweise auch etwas niedriger bleibt als die gemessene und somit eine Bemessung v.a. bezüglich kurzfristiger Effekte nicht auf der sicheren Seite liegt. Aus diesem Grund ist auf dem aktuellen Kenntnisstand im Zweifel die Verwendung des Modellansatzes für ein

„kaltes“ Tiefgaragenklima zu empfehlen, auch wenn hier die berechnete relative Feuchte kurzzeitig bis zu 30 % höher liegt als die gemessene relative Feuchte. Im Mittel ergibt sich für die berechnete relative Feuchte („kaltes“ Tiefgaragenklima) ein Mittelwert von 86 % für die Tiefgarage und 89 % für die Rampe während die Mittelwerte der gemessenen relative Feuchte nur bei 65 % bzw. 79% liegen.

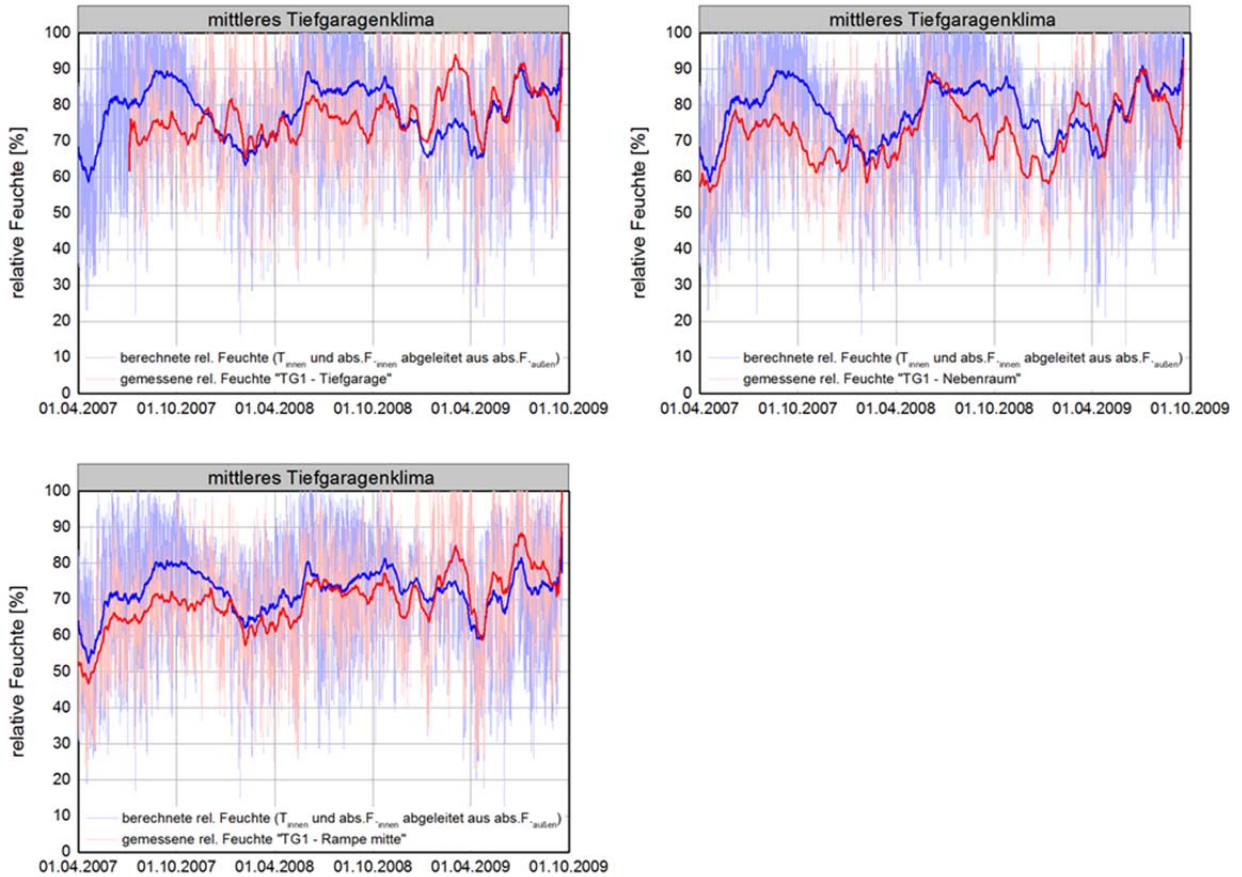


Bild 196:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

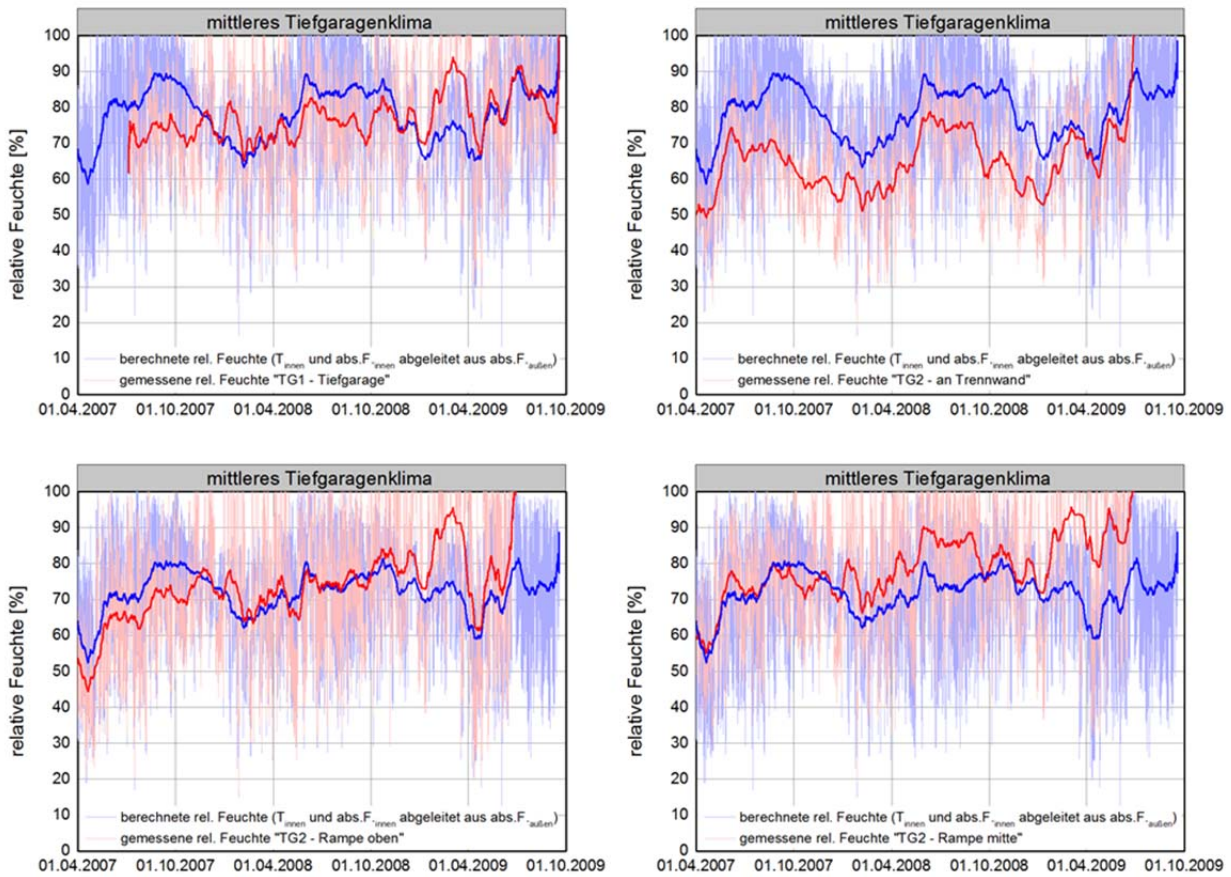


Bild 197:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für mittleres Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

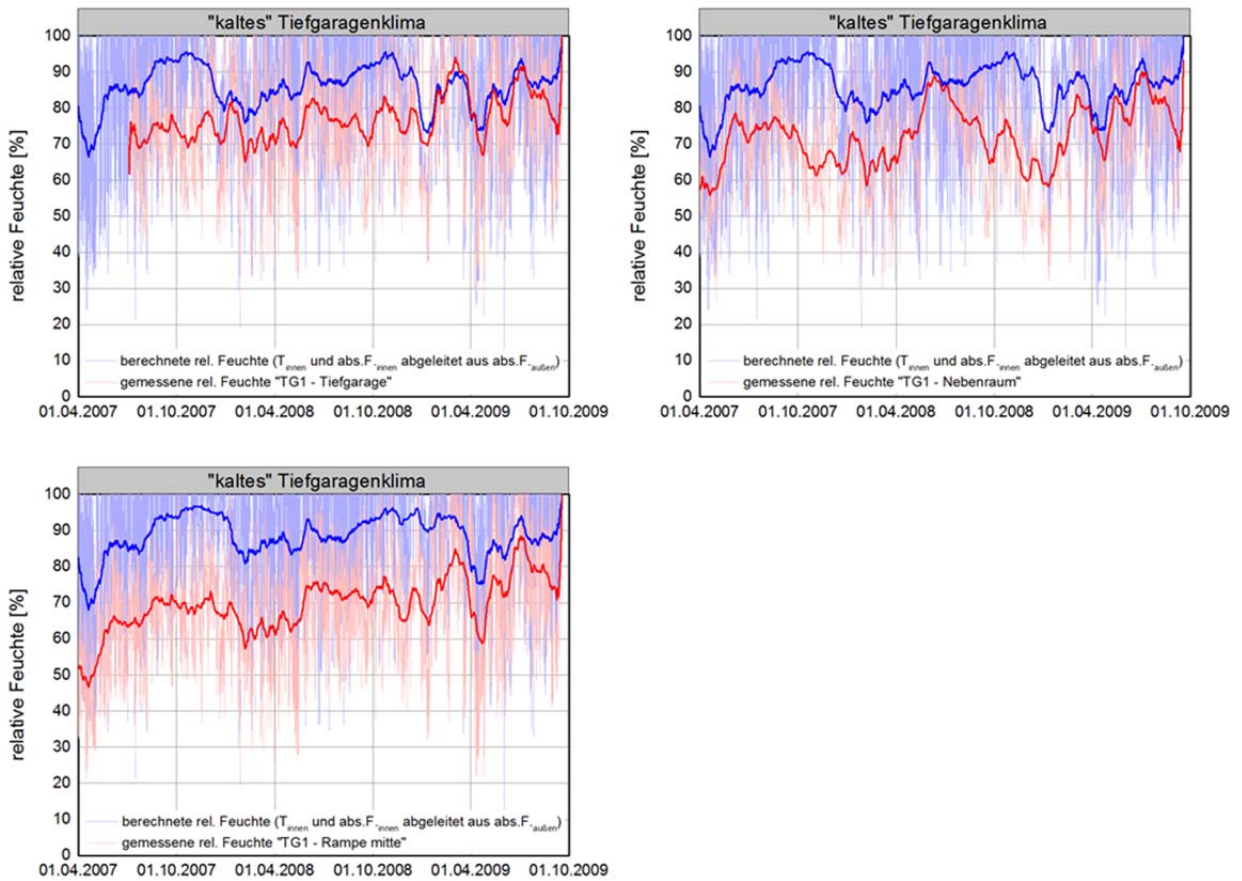


Bild 198:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 1 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, im unteren Bild entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

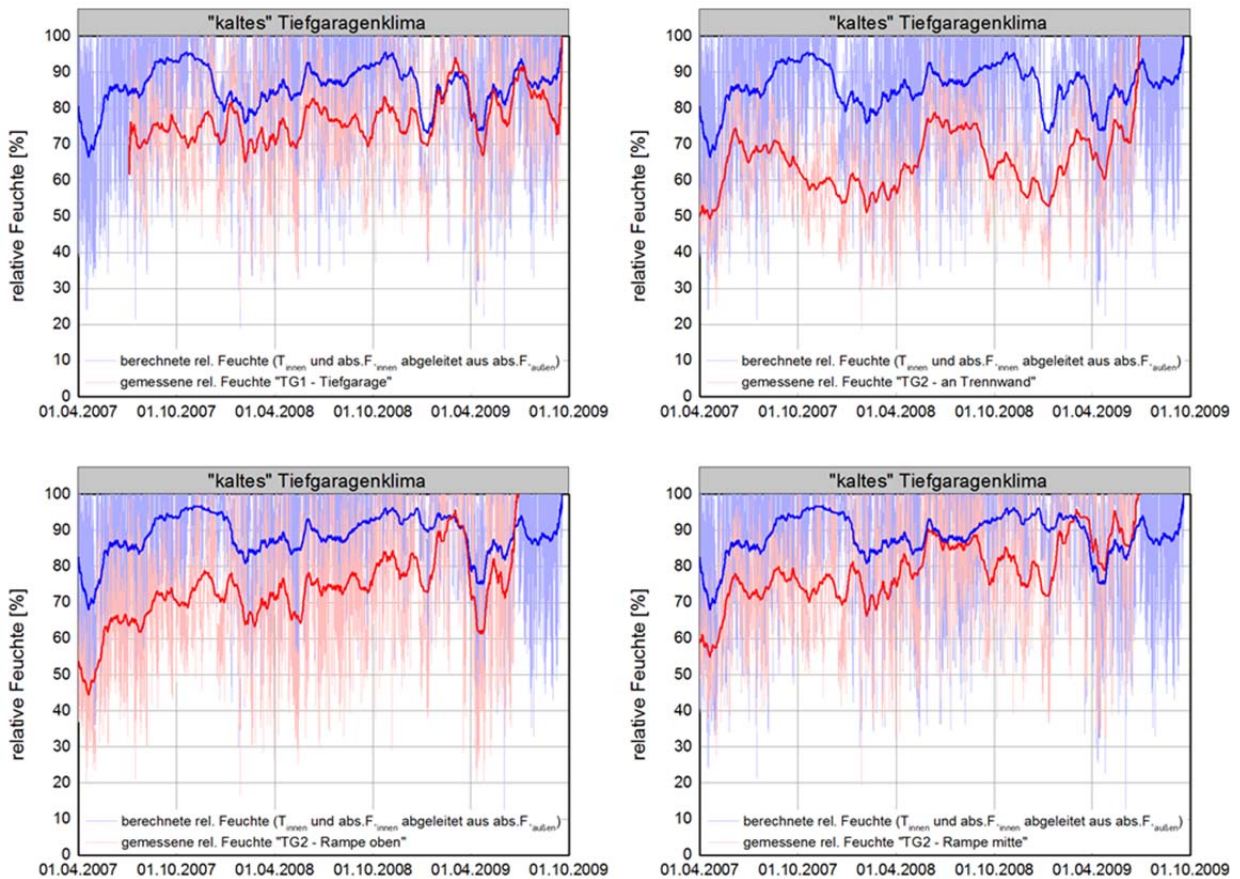


Bild 199:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Messpositionen in der Tiefgarage 2 über den Messzeitraum. In den oberen Bildern wird die Ableitung für „kaltes“ Tiefgaragenklima herangezogen, in den unteren Bildern entsprechend die für den Rampenbereich. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

Überprüfung des Modells anhand einer weiteren Tiefgarage

Zu Ende der Projektlaufzeit ergab sich die Möglichkeit, das Modell an einer weiteren, natürlich belüfteten Tiefgarage (ebenfalls in München) zu validieren. Über den Zeitraum vom 1. Dezember 2013 bis 15. April 2014 wurden Temperatur und relative Feuchte in der Tiefgarage aufgezeichnet. Es handelt es sich wiederum um eine Anliegertiefgarage mit wenigen Stellplätzen.

In Bild 200 sind die in der Tiefgarage (TG3) gemessenen Temperaturen über die Außenlufttemperatur aufgetragen. Sowohl die Modellkurve für das „kalte“, als auch die für das mittlere Tiefgaragenklima deckt die Messwerte weit auf der sicheren Seite liegend ab. Dies wird auch beim in Bild 201 und Bild 202 dargestellten Vergleich der gemessenen mit den abgeleiteten Temperaturen deutlich. Die aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Tiefgaragentemperaturen liegen um bis zu 11 K unter der gemessenen Temperatur.

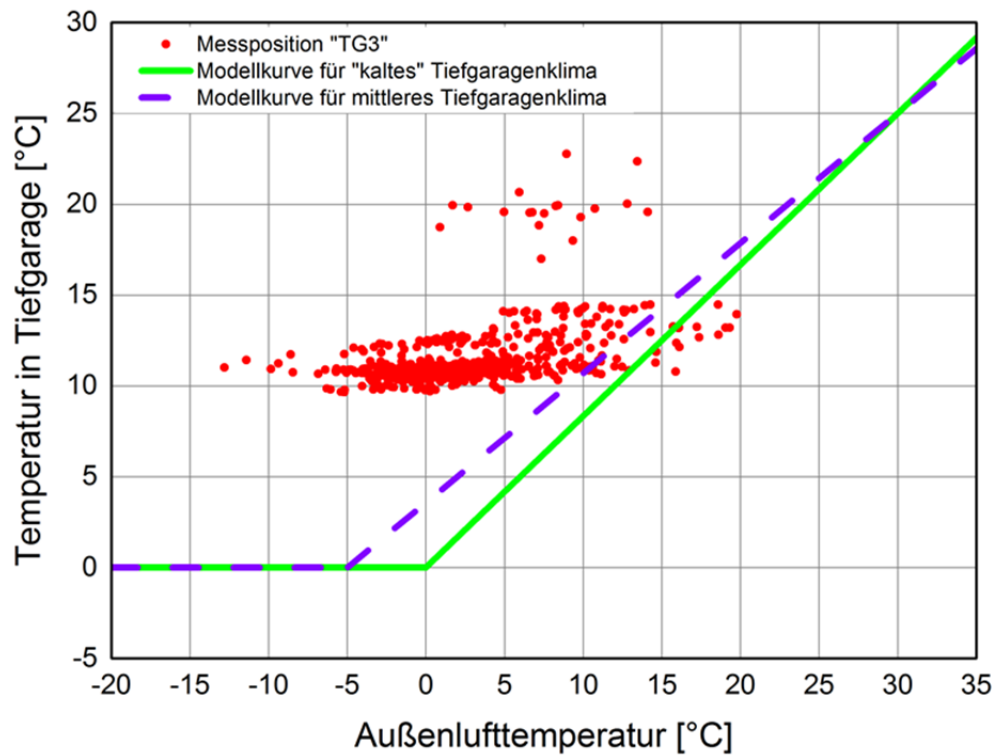


Bild 200:
 Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur für die Messposition in der Tiefgarage 3 im Vergleich zu den beiden Modellkurven. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

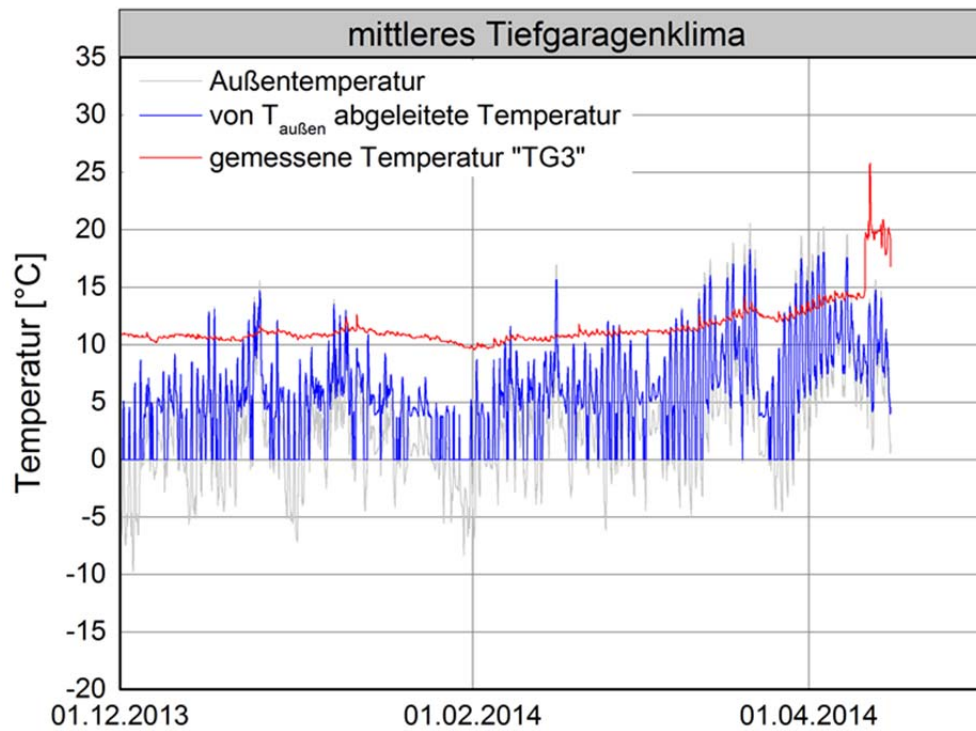


Bild 201:
Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die Messposition in der Tiefgarage 3 über den Messzeitraum.

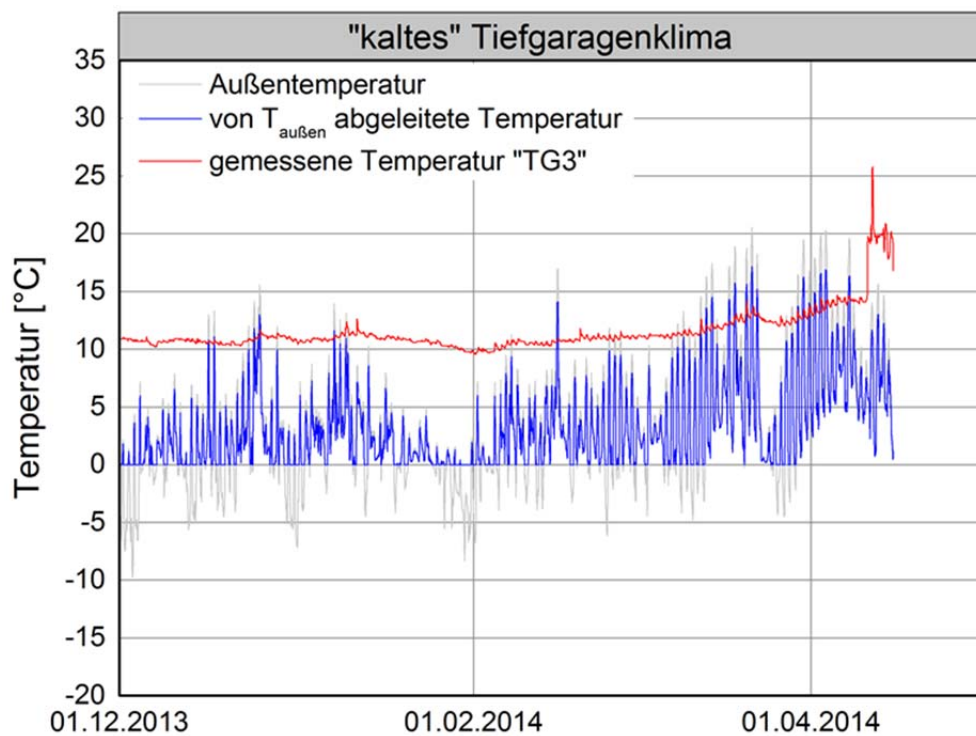


Bild 202:

Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die Messposition in der Tiefgarage 3 über den Messzeitraum.

In Bild 203 ist die absolute Feuchte in der Tiefgarage über die absolute Feuchte der Außenluft dargestellt, die Modellkurve stimmt hier sehr gut mit den Messwerten überein. Ein Vergleich der gemessenen relativen Feuchte mit der abgeleiteten relativen Feuchte (mittleres und „kaltes“ Tiefgaragenklima) zeigt allerdings, dass die aus den Modellkurven berechneten Feuchten sehr viel höher liegen als die gemessenen (vgl. Bild 204 und Bild 215). Grund hierfür ist, wie zuvor bereits erläutert, die sehr niedrig abgebildete Tiefgaragentemperatur, die bei gleicher absoluter Feuchte eine höhere relative Feuchte zur Folge hat.

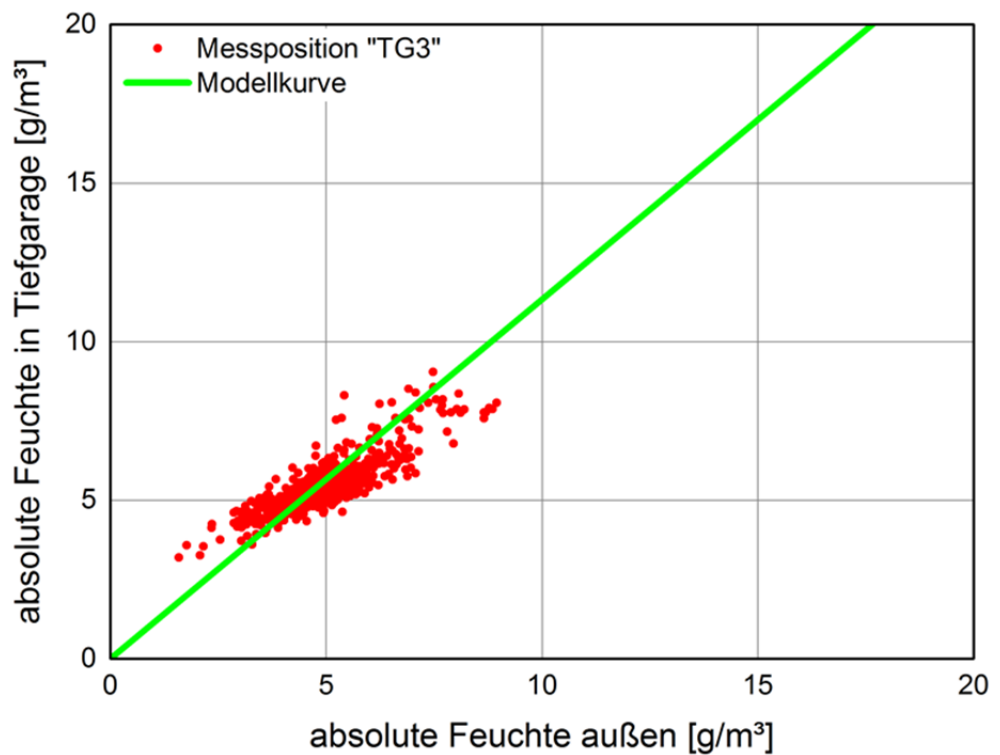


Bild 203:

Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragene absolute Feuchte für die Messposition in der Tiefgarage 3 (berechnet aus gemessener Temperatur und relativer Feuchte) im Vergleich zur Modellkurve. Verwendung von 6-Stunden-Mittelwerten.

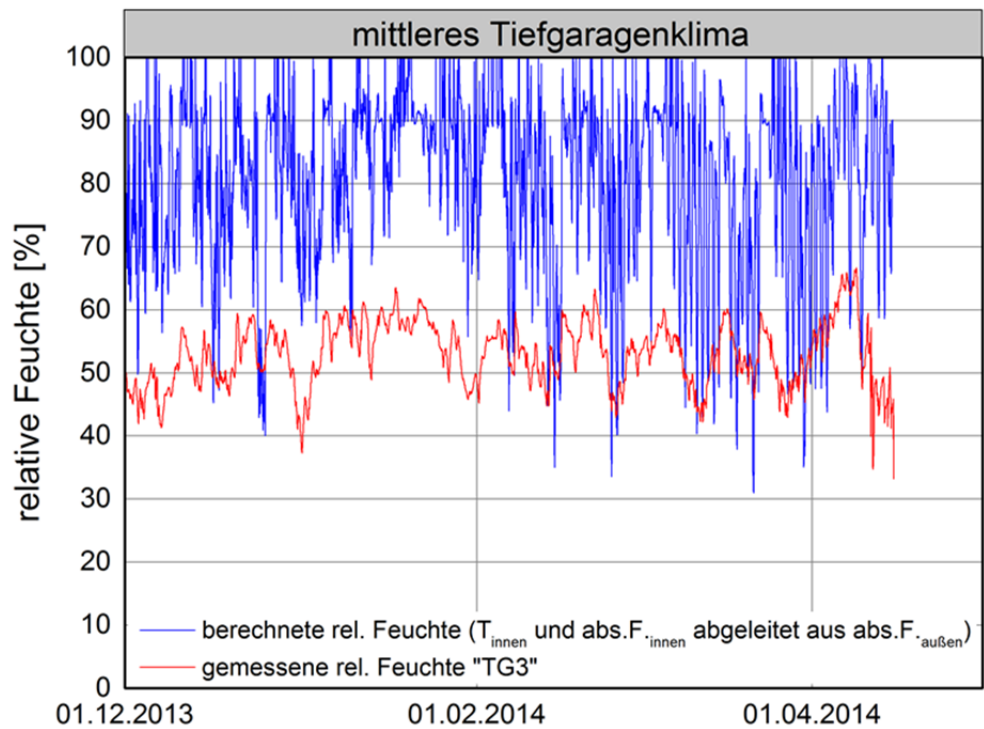


Bild 204:
Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die Messposition in der Tiefgarage3 über den Messzeitraum.

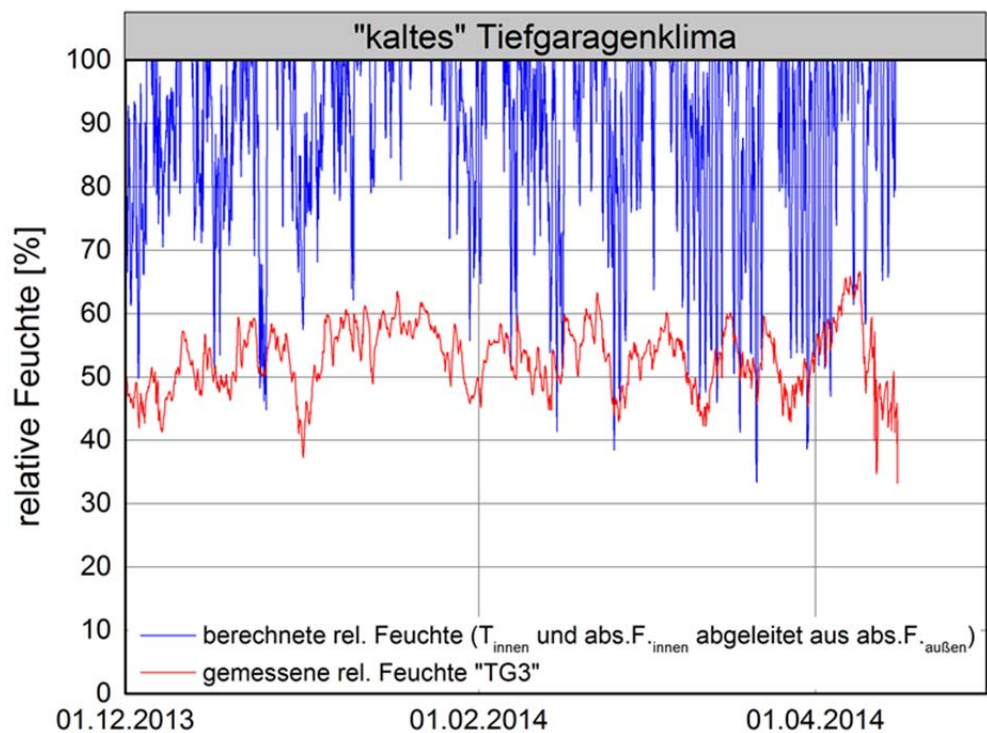


Bild 205:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchte (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die Messposition in der Tiefgarage3 über den Messzeitraum.

Die zusätzlichen Tiefgaragenmesswerte verdeutlichen, dass mit dem entwickelten Modell das Tiefgaragenklima in stark belüfteten Tiefgaragen zwar gut abgebildet werden kann, dass aber Garagen mit geringerer Belüftung und Frequentierung auch deutlich wärmer bleiben können. Die Modelle bleiben in solchen Fällen bezüglich der Temperatur und bezüglich der relativen Feuchte zwangsläufig etwas weiter auf der sicheren Seite.

4.3.4 Zusammenfassung, Anwendungsbereiche und Grenzen des Modells

Die Messdatenbasis für das Raumklimamodell in Tiefgaragen ist mit mehreren Messpositionen in zwei verschiedenen Anliegertiefgaragen und einem nachträglich zur Verfügung gestellten Messverlauf in einer weiteren Garage nicht sehr groß. Daher wurde entschieden v.a. bezüglich der gemessenen Temperaturen nicht nur auf die mittleren Bereiche der gemessenen Verhältnisse zurückzugreifen, sondern mit einem weiteren Ansatz für „kaltes“ Tiefgaragenklima an deren unterem Rand zu bleiben. Dies ist auch für die Bemessung von Rohrleitungsdämmungen wichtig, bei denen eher von einer „Worst-Case“-Situation ausgegangen werden sollte.

Für die Feuchteverhältnisse wurde eine Ableitung der absoluten Feuchte in der Garage von der absoluten Feuchte im Außenklima gewählt. Dies stellt unabhängig vom gewählten Temperaturmodell sicher, dass der Wasserdampfpartialdruck im Tiefgaragenraum möglichst korrekt wiedergegeben wird. Mit dem Ansatz für ein mittleres Tiefgaragenklima ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten. Beim Ansatz für das „kalte“ Tiefgaragenklima hingegen liegt die aus dem Partialdruck und der tendenziell zu niedrig abgebildeten Temperatur berechnete relative Feuchte im Kellerraum bis zu 30 % über den jeweils gemessenen relativen Feuchten.

Für die feuchtetechnische Bemessung von Bauteilen und Rohrleitungsdämmungen ist jedoch weniger die relative Feuchte, sondern vielmehr der Dampfdruck die maßgebliche Größe. Die relative Feuchte spielt lediglich eine Rolle zur Beurteilung der garagenseitigen Oberflächenbedingungen bezüglich Tauwasser oder Schimmel. Der Ansatz für das „kalte“ Tiefgaragenklima erlaubt somit aufgrund der niedrigeren Temperaturen eine Dimensionierung von Dämmmaßnahmen auf der sicheren Seite und trotzdem eine recht realistische Beurteilung des hygrothermischen Verhaltens der betrachteten Bauteile. Die Luftfeuchte auf der Garagenseite wird bei diesem Ansatz mit zu hohen Werten abgebildet, weshalb eine Beurteilung von Oberflächenfeuchte und Schimmelrisiko nicht sinnvoll möglich ist. Im Zweifel bleibt diese Größe bei der Simulation mit dem Modellansatz sehr weit auf der sicheren Seite, was allerdings auf der kalten Seite des Bauteils, abgesehen von den zuvor genannten Einschränkungen, meist ohne negative Folgen bleibt. Es besteht natürlich auch die Möglichkeit, für Fra-

gestellungen zur erforderlichen Dämmdicke auf das kalte und für die hygrothermische Bemessung der Bauteile auf das mittlere Temperaturniveau zurückzugreifen.

Der Modellansatz kann für Anliegertiefgaragen mit ähnlichen Randbedingungen wie eingangs erwähnt verwendet werden. Inwieweit er auch für größere z.B. gewerbliche Tiefgaragen Anwendung finden kann, wurde bisher nicht überprüft. Sowohl eine Erweiterung auf diese Bereiche als auch eine Reduktion der bisher verwendeten größeren Sicherheiten sollte mit weiteren Messdaten möglich sein.

In seiner aktuellen Form stellt der Modellansatz, wie auch die zuvor beschriebenen Modelle für Dachraum und Keller, auf jeden Fall eine deutliche Verbesserung gegenüber der bisher im Zweifel üblichen Verwendung des Außenklimas da und trägt somit dazu bei, eine starke Überdimensionierung von Dämmmaßnahmen zu vermeiden.

4.4 Kriechkeller

Kriechkeller kommen vor allem im Holzbau als Alternative zur Stahlbetonbodenplatte zum Einsatz. Dabei wird die Holzbodenplatte auf umlaufende, in den Boden einbindende Streifenfundamente aufgelegt. Der dadurch entstehende Zwischenraum kann unterschiedlich stark belüftet und mit verschiedenen Bodenabdeckungen ausgeführt werden.

Um diese Art von Konstruktionen hygrothermisch beurteilen zu können, ist es notwendig, die Klimaverhältnisse in diesen Zwischenräumen abschätzen zu können. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung der klimatischen Verhältnisse in Kriechkellern unter gedämmten Holzbodenplatten zur Vermeidung von Bauschäden bei nicht unterkellerten Gebäuden und zur Kostenreduzierung“ von der MFPA Leipzig und der TU München [11] wurden die hygrothermischen Verhältnisse in Kriechkellern und deren Auswirkungen auf Holzbodenplatten in Abhängigkeit von Außenklima, Boden- und Lüftungsverhältnissen, Konstruktionsart der Bodenplatte und Kriechkellerhöhe untersucht.

Im Zuge dieses Forschungsvorhabens wurden unter anderem die Temperaturen und relativen Feuchten in verschiedenen Kriechkellern gemessen. Auf Grundlage dieser Messdaten wird im Folgenden ein Modellansatz entwickelt, mit dem die Klimaverhältnisse in Kriechkellern vom Außenklima abgeleitet werden können.

Modellkriechkeller

Zur Untersuchung der Verhältnisse in Kriechkellern wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens [11] auf dem Gelände der MFPA Leipzig GmbH ein Modellkriechkeller mit verschiedenen Ausführungsvarianten errichtet. Der Kriechkeller bestand aus sechs einzelnen Kammern von je 2,5 m x 2,5 m und einer Höhe von 0,55 m. Im Bereich A kam eine zementgebundene Spanplatte als kriech-

kellerseitige Bekleidung zur Anwendung, im Bereich B eine Holzweichfaserplatte. Die Bereiche A und B wurden jeweils in drei Kammern unterteilt, welche sich in der Art der Bodenabdeckung unterscheiden: der Kammerbereich 1 wurde mit Erdreich aufgefüllt, die Abdeckung von Kammerbereich 2 bestand aus einer Polyethylen-Folie ($s_d = 100 \text{ m}$) und 60 mm Grobkiesauflage und die von Kammerbereich 3 aus einer Polyethylen-Folie ($s_d = 90 \text{ m}$) und 60 mm extrudierten Polystyrol (siehe Bild 206). Die Belüftungssituation der einzelnen Kammern wurde variiert.

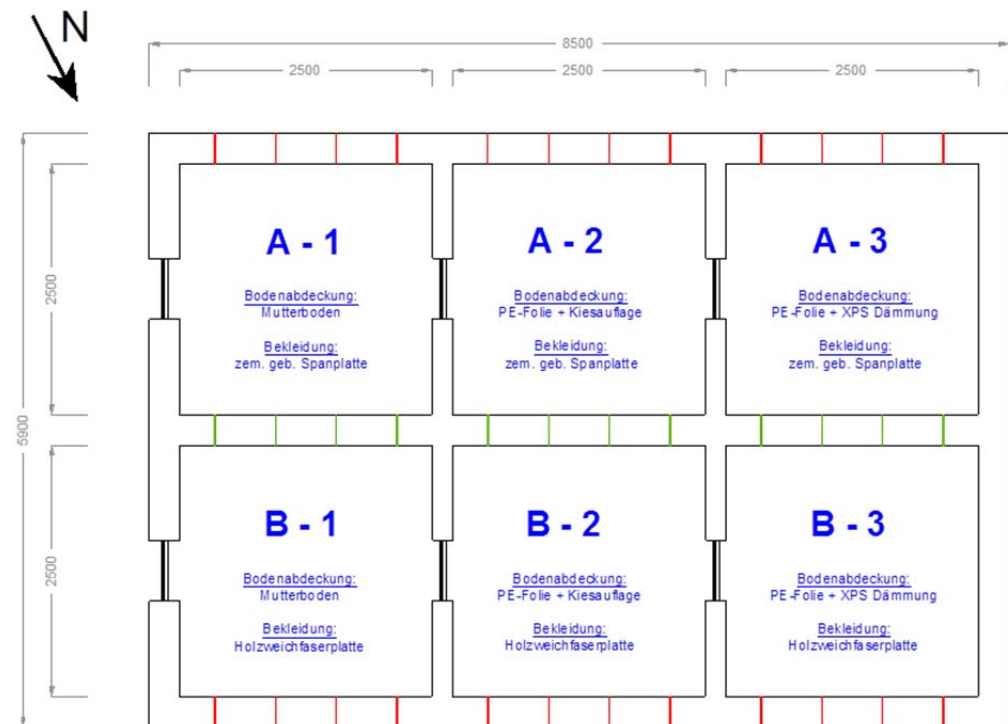


Bild 206:
Konstruktiver Aufbau der Kammerbereiche des Modellkriechkellers auf dem Gelände der MFPA Leipzig GmbH [11].

Über den Messzeitraum von Februar 2007 bis April 2008 wurden das Umgebungsklima und das Raumklima sowie Temperatur und relative Feuchte im Kriechkeller aufgezeichnet. Zudem wurden die Holzfeuchten von Tragkonstruktion, Schwelle und kriechkellerseitigen Beplankung bestimmt und der Schimmelbefall überprüft. Bereits nach wenigen Monaten konnte im Kammerbereich 1, in dem der Boden nicht abgedeckt wurde, Schimmelbefall festgestellt werden. Eine Erhöhung der Belüftung zur Reduktion der relativen Feuchte in diesem Kammerbereich brachte keine Besserung, woraufhin im September 2007 der Kammerbereich 1 nachträglich mit einer Bodenabdeckung auf PE-Folie ($s_d = 100 \text{ m}$) versehen wurde. Nach wenigen Wochen stellten sich annähernd glei-

che Klimabedingungen ein, wie in den von Anfang an abgedeckten Bereichen 2 und 3.

Objektuntersuchungen

Zusätzlich zu den Versuchen im Modellkriechkeller in Leipzig wurden Untersuchungen an bestehenden Objekten mit Kriechkellern durchgeführt [11]. Im Folgenden werden die Eckdaten der vier messtechnisch begutachteten Objekte stichpunktartig dargestellt:

Objekt I:

- Standort: Horstdorf bei Oranienbaum
- Messzeitraum: 20.07.2006 – 25.04.2008
- Einfamilienhaus, KfW 60 Standard, Baujahr 2003
- Belüftungsverhältnis: ca. 5,6 cm² je m² Grundfläche
- Kriechkellerhöhe: 50 cm
- Bodenabdeckung: PE-Folie ($s_d \geq 100$ m) und 100 mm Grobkiesauflage

Objekt II:

- Standort: Leipzig
- Messzeitraum: 01.12.2005 – 09.05.2008
- Einfamilienhaus, Passivhausstandard, Baujahr 2005
- Belüftungsverhältnis: ca. 5,5 cm² je m² Grundfläche
- Kriechkellerhöhe: 21 cm
- Bodenabdeckung: PE-Folie ($s_d \geq 150$ m) und 60 mm Mineralwolle dämmung

Objekt III:

- Standort: Tündern bei Hameln
- Messzeitraum: 20.07.2006 – 30.04.2008
- Einfamilienhaus, Skelettbauweise, Baujahr 2003
- Belüftungsverhältnis: ca. 5-7 cm² je m² Grundfläche (keine planmäßigen Lüftungsöffnungen – nur umlaufende Spalten durch Unebenheiten)
- Kriechkellerhöhe: 15 cm
- Bodenabdeckung: PE-Folie ($s_d \geq 100$ m) und 50 mm Grobkiesauflage

Objekt IV:

- Standort: Schlier bei Ravensburg
- Messzeitraum 1: 06.06.2005 – 06.02.2006
Messzeitraum 2: 18.07.2006 – 07.06.2007
- Einfamilienhaus, 3-Liter-Standard, Baujahr 2003
- Belüftungsverhältnis: ca. 14 cm² je m² Grundfläche
- Kriechkellerhöhe: 45-60 cm
- Bodenabdeckung: PE-Folie ($s_d \geq 100$ m)

Modellansatz

Wie bereits im Forschungsbericht [82] beschrieben, zeigen die Messergebnisse eine gute Korrelation zwischen Außen- und Kriechkellerklima. Dieser Zusammenhang wird für die Entwicklung des Modellansatzes genutzt, bei dem das Klima im Kriechkeller aus dem Außenklima abgeleitet wird. Da die Außenklimadaten oft nur als Tagesmittelwerte vorliegen, werden im Folgenden für alle Messpositionen die Tagesmittelwerte verwendet.

Für die sechs Kammern des Modellkriechkellers ist in Bild 207 die Kriechkellertemperatur über die Außenlufttemperatur aufgetragen. In der Kammer A-1 kam es bereits nach wenigen Tagen zu einem Messausfall des Temperaturfühlers, so dass diese Kammer nicht weiter betrachtet wird. Bei den restlichen fünf Kammern lässt sich ein guter Zusammenhang zwischen der Temperatur im Kriechkeller und der Außenlufttemperatur erkennen. Die jeweils durch die Messpunkte gelegten Regressionsgeraden zeigen alle eine sehr ähnliche Steigung. In Bild 208 ist für die vier bestehenden Objekte (wobei bei Objekt VI für jeden Messzeitraum ein Diagramm erstellt wurde) die Kriechkellertemperatur über die Außenlufttemperatur dargestellt. Auch hier zeigen die jeweiligen Regressionsgeraden eine ähnliche Steigung. Lediglich Objekt III fällt etwas aus dem Rahmen, hier bleibt der Kriechkeller im Winter etwas wärmer, im Sommer dagegen etwas kälter als bei den restlichen Objekten. Dies ist wahrscheinlich auf die vorgefundenen Belüftungsverhältnisse (keine planmäßigen Öffnungen) bei sehr geringer Kriechkellerhöhe zurückzuführen. Die Regressionsgeraden aller Messpositionen sind in Bild 209 dargestellt. Da im Kriechkeller entsprechend den Messdaten generell kein Frost zu erwarten ist, muss der Modellansatz nicht auf der sicheren Seite liegen, sondern kann die mittleren Verhältnisse abbilden. Mit Ausnahme der Regressionsgeraden von Objekt III, deckt die eingezeichnete Modellkurve die Steigung aller Einzel-Geraden ausreichend gut ab. Somit stellt sich nach dem Modellansatz bei einer Außentemperatur von 0 °C im Kriechkeller eine Temperatur von 7,5 °C ein, bei 20 °C Außenlufttemperatur herrschen im Kriechkeller 17,5 °C.

Zur Validierung werden nun die gemessenen Temperaturen mit den aus dem Außenklima abgeleiteten Temperaturen verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass die beste Übereinstimmung zwischen dem Modellansatz und den Messdaten bei einem gleitenden 3-Tagesmittel (72h) erreicht wird. Dies liegt an der thermischen Trägheit des Kriechkellerbereichs bei dem sich Temperatur- und Feuchteschwankungen im Außenklima nur verzögert auswirken – auch beim Dachboden führte dieser Mittelungszeitraum zur besten Übereinstimmung.

Bild 210 zeigt den Vergleich für die verschiedenen Bereiche des Modellkriechkellers in Leipzig, Bild 211 für die verschiedenen Bestandskriechkeller. Mit dem gewählten Modellansatz können alle Kriechkellertemperaturen sehr gut abgebildet werden. Lediglich bei Objekt III zeigen die abgeleiteten Temperaturen eine größere Schwankungsbreite als die gemessenen Temperaturen. Dies kann allerdings akzeptiert werden, da die sich beim Modellansatz in den Wintermo-

naten einstellenden niedrigeren Temperaturen für den angestrebten Anwendungsbereich auf der sicheren Seite liegen.

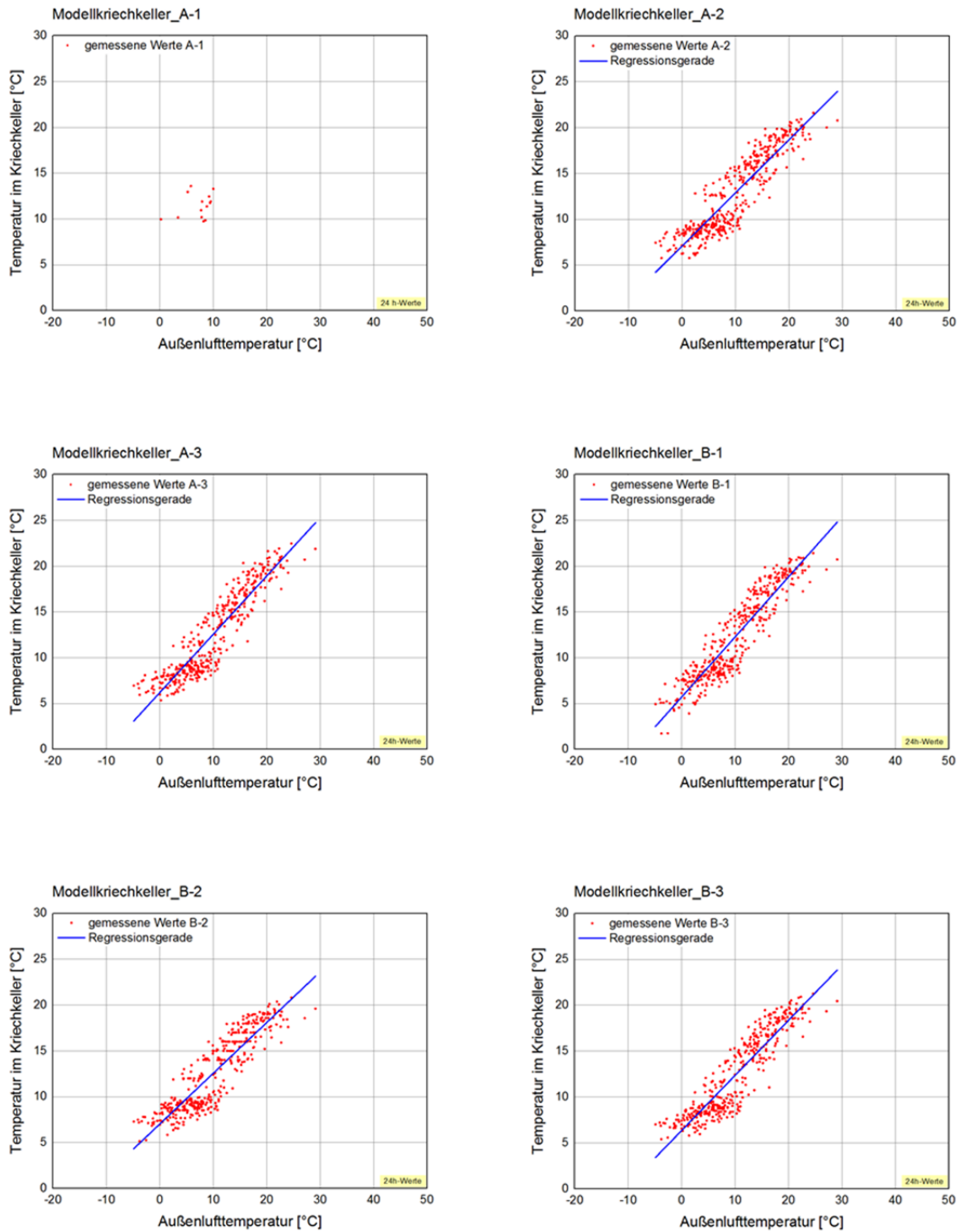


Bild 207:
Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen

Temperatur in den einzelnen Kammern des Modellkriechkellers. Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von Tagesmittelwerten.

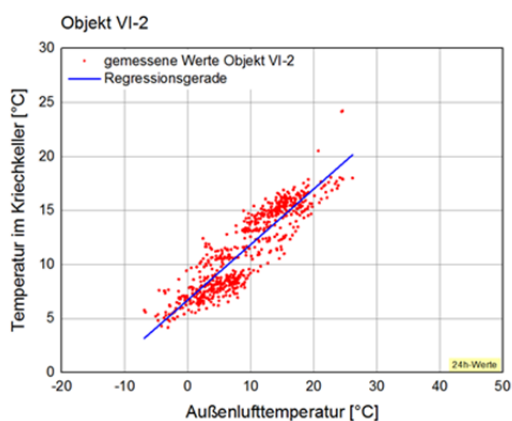
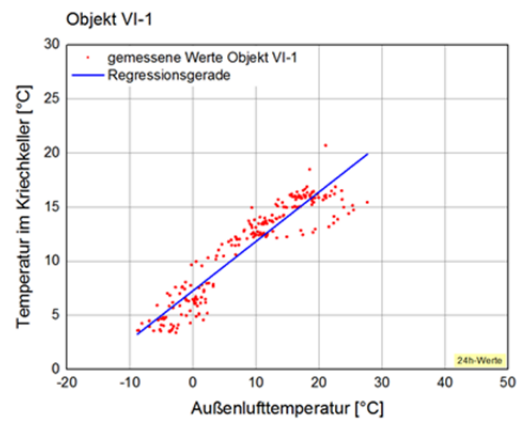
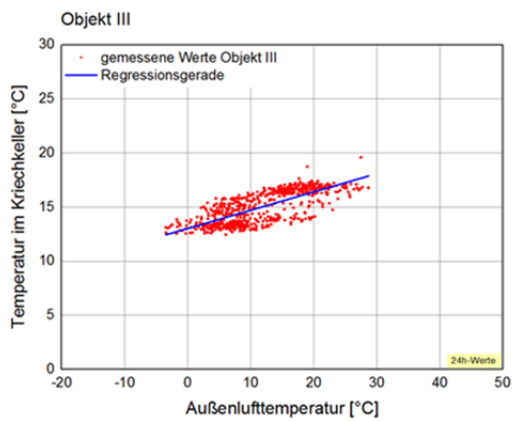
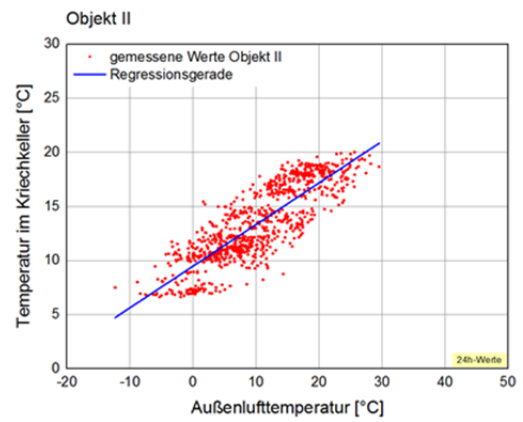
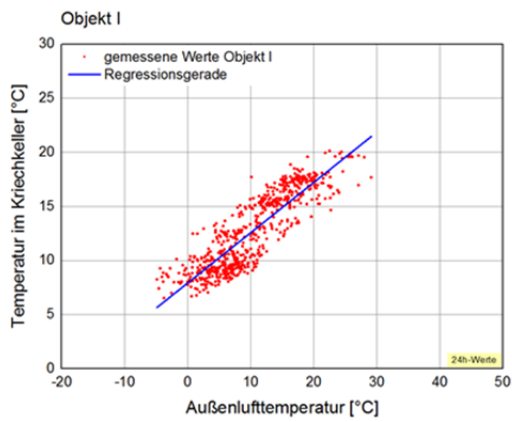


Bild 208:
Darstellung der über die Außenlufttemperatur aufgetragenen gemessenen Temperatur in den Kriechkellern der verschiedenen bestehenden Objekten. Die

blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von Tagesmittelwerten.

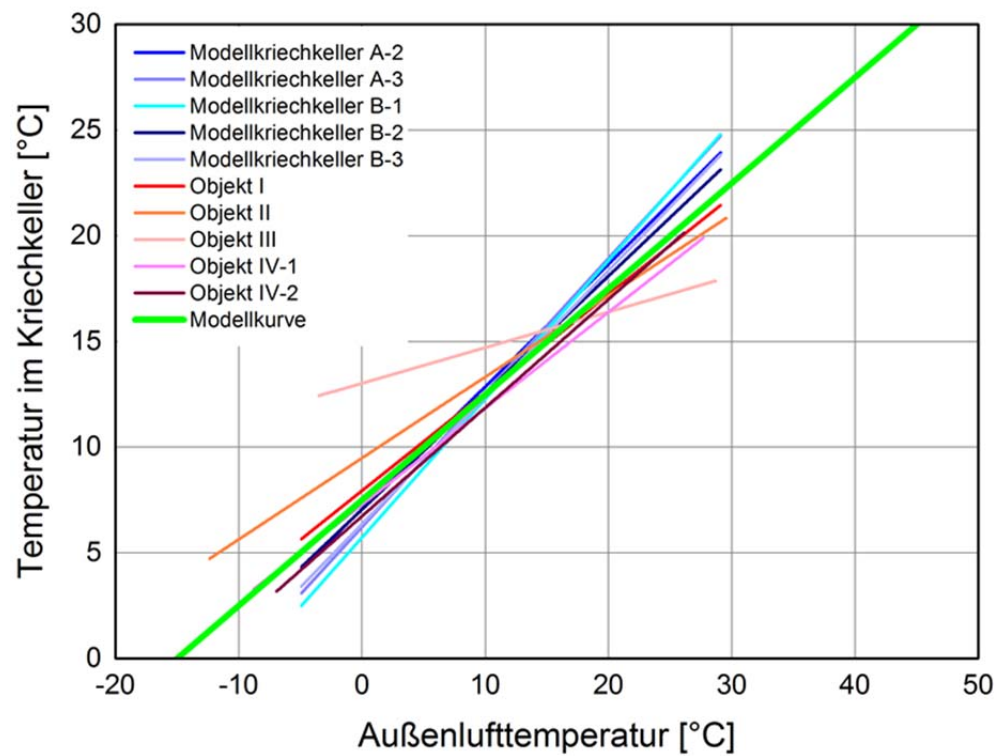


Bild 209: Darstellung der Regressionsgeraden aller Kriechkellermessungen (Modellkriechkeller und bestehende Objekte). Die grüne Kurve zeigt die verwendete Modellkurve.

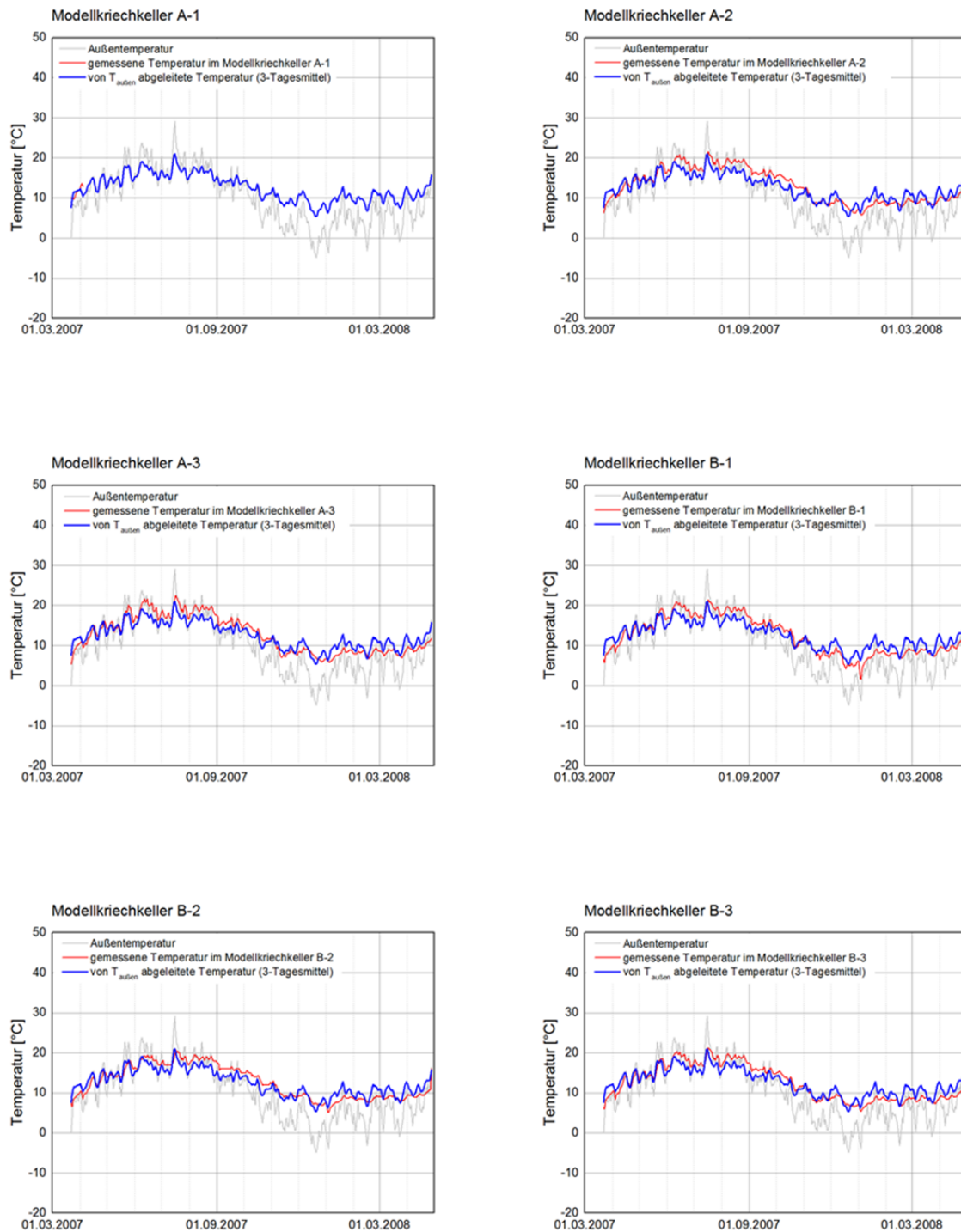


Bild 210:
Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die einzelnen Kammern des Modellkriechkellers über den Messzeitraum.

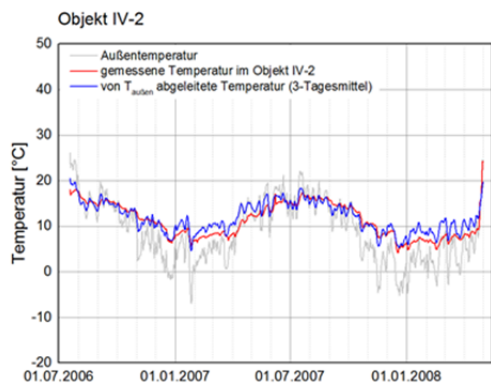
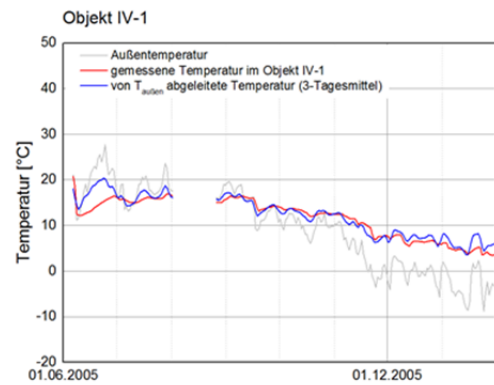
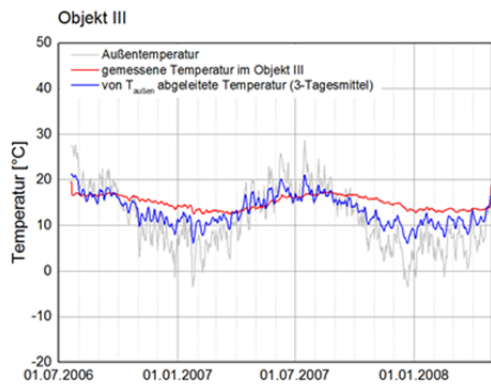
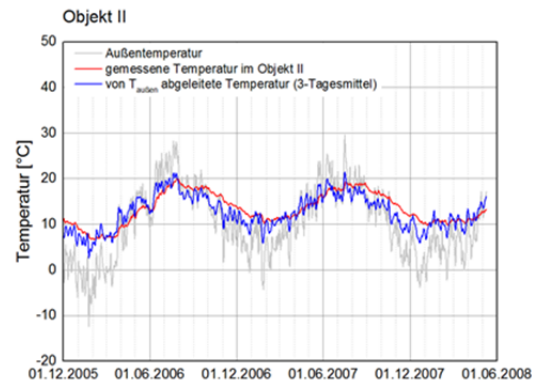
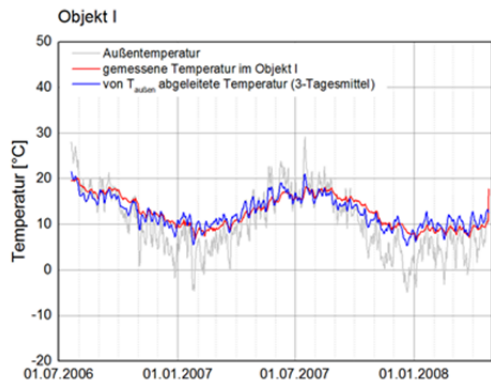


Bild 211:

Darstellung der stündlich gemessenen Temperaturen (rot) im Vergleich zu den aus der Außenlufttemperatur abgeleiteten Temperaturen (blau) für die Kriechkeller der verschiedenen bestehenden Objekte über den jeweiligen Messzeitraum.

Als Modellansatz zur Berechnung der Feuchte hat sich bei Räumen, die aufgrund einer permanenten Belüftung oder einer nur geringen Luftdichtheit in gutem Kontakt mit der Außenluft stehen, der Zusammenhang zwischen der absoluten Feuchte im Nebenraum und der absoluten Feuchte im Außenklima

gut bewährt. Er wird daher auch hier herangezogen. Bild 212 zeigt diesen Zusammenhang für die einzelnen Kammern des Modellkriechkellers. Für die Kammer A-1 liegen aufgrund des Messausfalls des Temperaturfühlers nur wenige Messwerte vor. Durch die Messpunkte der anderen Kammern werden jeweils Regressionsgeraden gelegt. Diese zeigen mit Ausnahme von Kammer B-1 alle eine ähnliche Steigung.

In Kammer B-1 ist sowohl die Streuung der Messpunkte als auch die Steigung der Regressionsgerade höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Kammer bei Messbeginn der Boden nicht abgedeckt war und sich daraufhin entsprechend höhere relative Feuchten einstellten. Nach sechs Monaten wurde der Boden nachträglich abgedeckt, woraufhin sich ähnliche Klimaverhältnisse einstellten wie in den von Anfang an abgedeckten Kammern. Aus diesem Grund werden die Messdaten der Kammer B-1 unterteilt in zwei Phasen: Phase 1 ohne Bodenabdeckung bis 19. September 2007 und Phase 2 mit Bodenabdeckung ab 20. September 2007. Bild 213 und Bild 214 zeigen deshalb für die Kammer B-1 die Messwerte getrennt nach Phase 1 und Phase 2 mit der jeweiligen Regressionsgeraden.

Für den Modellansatz „Kriechkeller mit Bodenabdeckung“ werden die Messwerte der ersten Phase mit hohen relativen Feuchten ausgeklammert. Für die verschiedenen, bestehenden Objekte ist in Bild 215 die absolute Feuchte im Kriechkeller über die absolute Feuchte außen aufgetragen. Auch hier zeigt sich ein guter Zusammenhang und die Regressionsgeraden weisen eine ähnliche Steigung auf. Die Regressionsgeraden aller Messpositionen (Ausnahme: Kammer B-1 Phase 2) sind in Bild 216 dargestellt. Hier wird für den Modellansatz wiederum eine mittlere Kurve (hellgrün) gewählt, die die Steigung aller Regressionsgeraden im Mittel gut abdeckt.

Die Messwerte der Kammer B-1 aus Phase 1 ohne Bodenabdeckung werden für den zweiten Modellansatz „Kriechkeller ohne Bodenabdeckung“ herangezogen. Auch wenn dieser Modellansatz nur auf einer Messung beruht, erscheint es sinnvoll, in einer Simulation prüfen zu können, ob bei Verwendung von feuchteempfindlichen Materialien eine Abdeckung des Bodens notwendig ist. Bei einem Betonkriechkeller ist es dagegen durchaus möglich, dass die hohen relativen Feuchten, die ohne Bodenabdeckung entstehen, keinen Schaden an der Konstruktion verursachen. Die Regressionsgerade durch die Messwerte aus Kammer B-1 ohne Bodenabdeckung stellt gleichzeitig die Modellkurve dar (Bild 217) und liegt deutlich höher als die Modellkurve für Kriechkeller mit Bodenabdeckung.

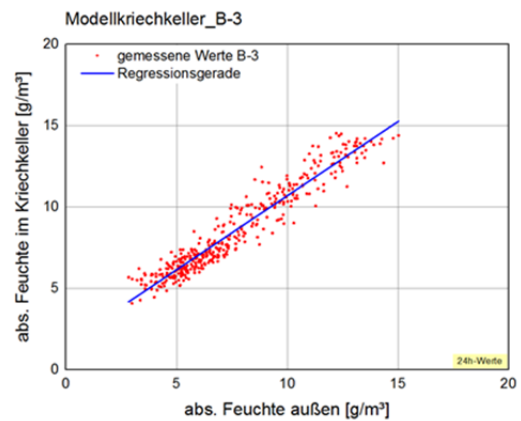
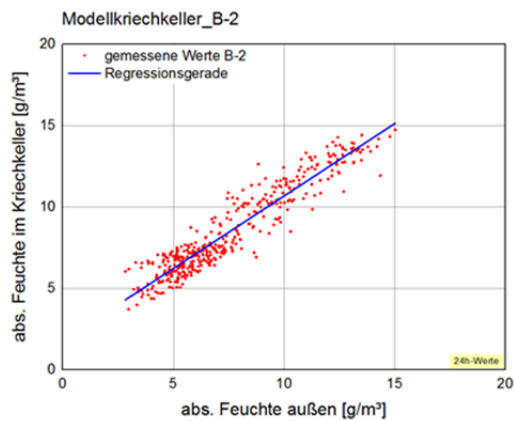
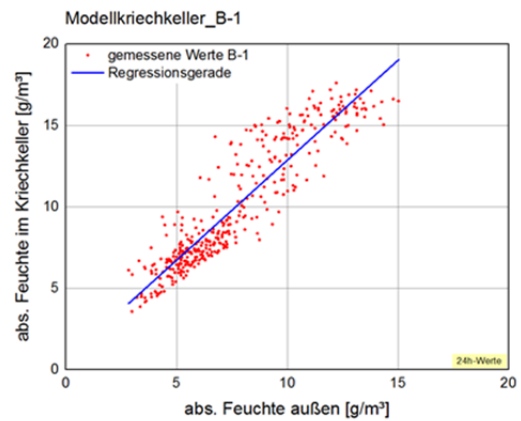
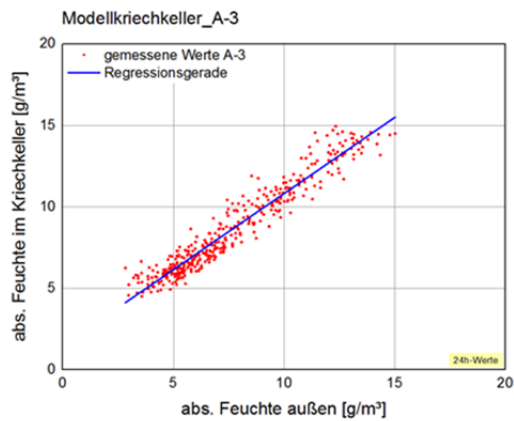
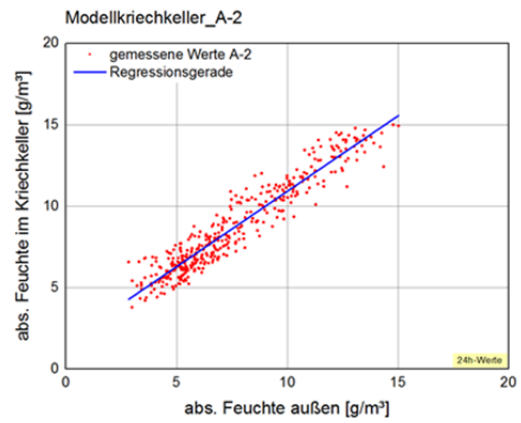


Bild 212:
 Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte in den einzelnen Kammern des Modellkriechkellers. Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von Tagesmittelwerten.

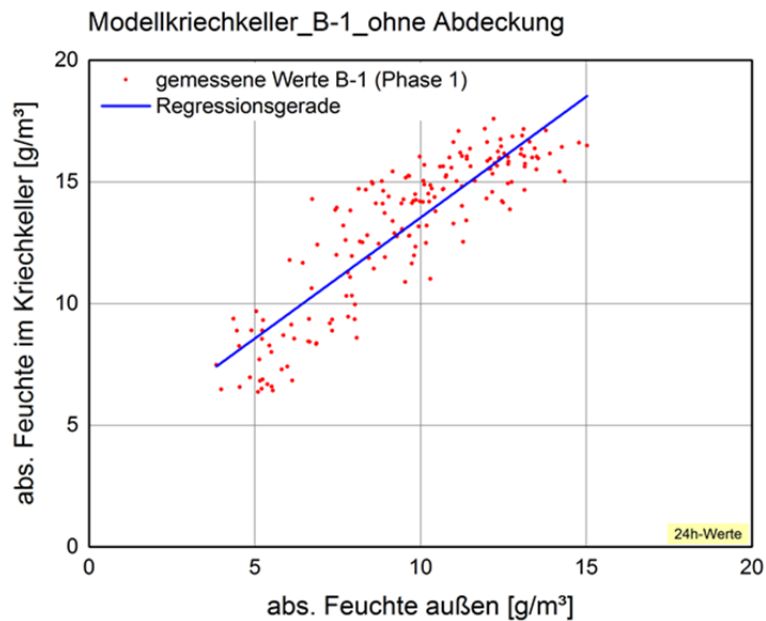


Bild 213:

Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte in der Kammer B-1 des Modellkriechkellers. Dargestellt sind hier die Messwerte bis 19. September 2007 (Phase 1) - während dieser Zeit war der Boden des Kriechkellers nicht abgedeckt. Die blaue Kurve zeigt die Regressionsgerade. Verwendung von Tagesmittelwerten.

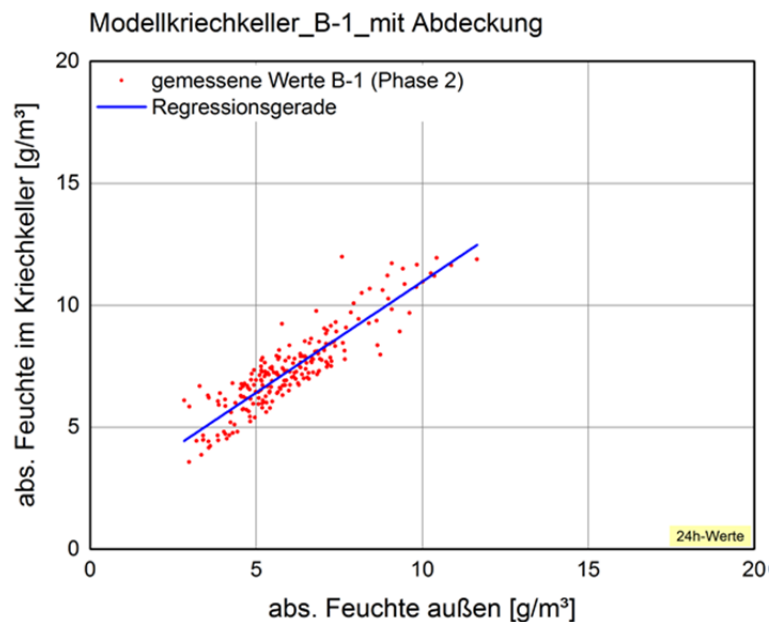


Bild 214:

Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte in der Kammer B-1 des Modellkriechkellers. Dargestellt sind hier die Messwerte ab 20. September 2007, nachdem der Boden nachträglich mit einer

PE-Folie abgedeckt wurde. Die blaue Kurve zeigt die Regressionsgerade. Verwendung von Tagesmittelwerten.

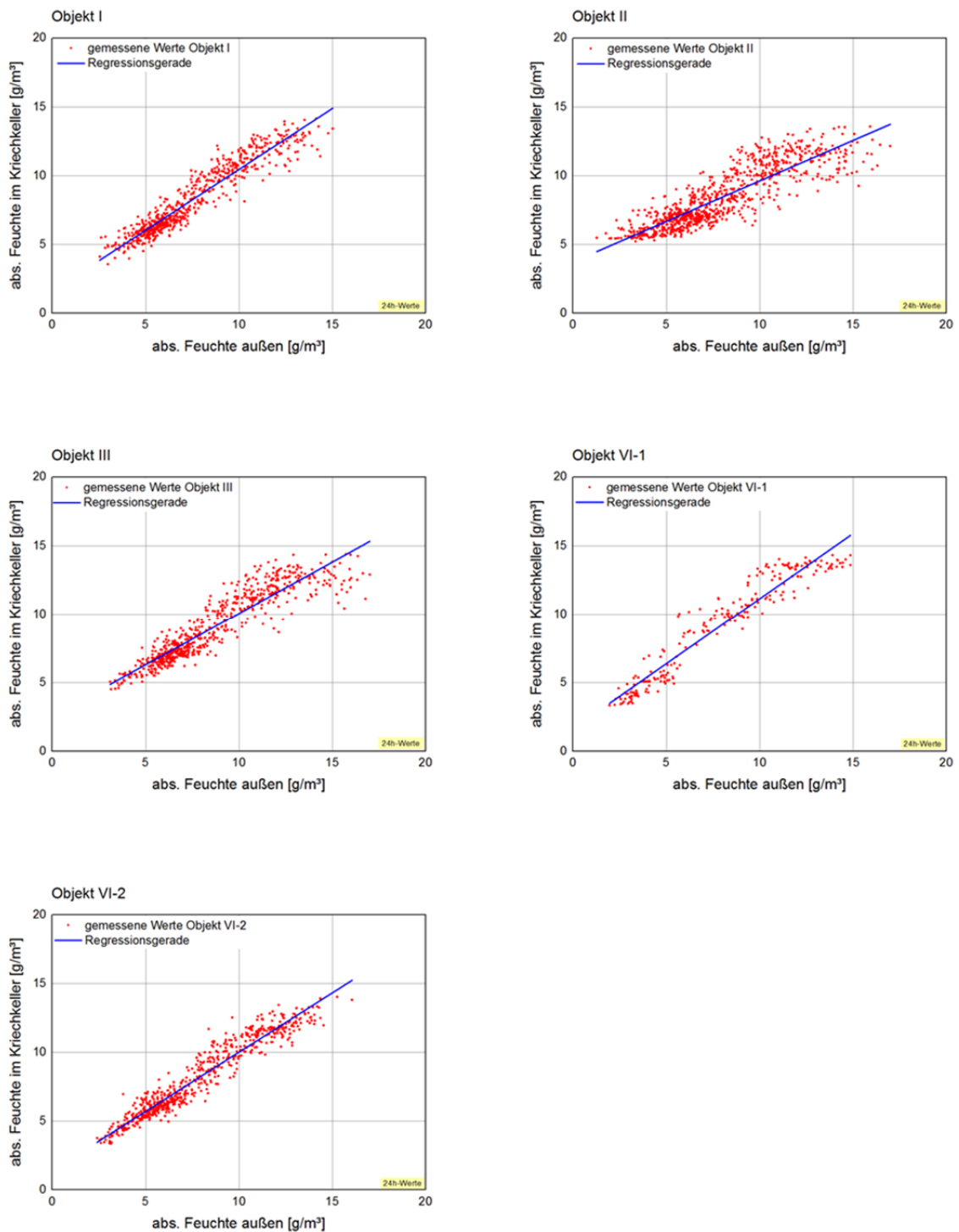


Bild 215:
Darstellung der über die absolute Feuchte außen aufgetragenen absoluten Feuchte in den Kriechkellern der verschiedenen bestehenden Objekte. Die blaue Kurve zeigt jeweils die Regressionsgerade. Verwendung von Tagesmittelwerten.

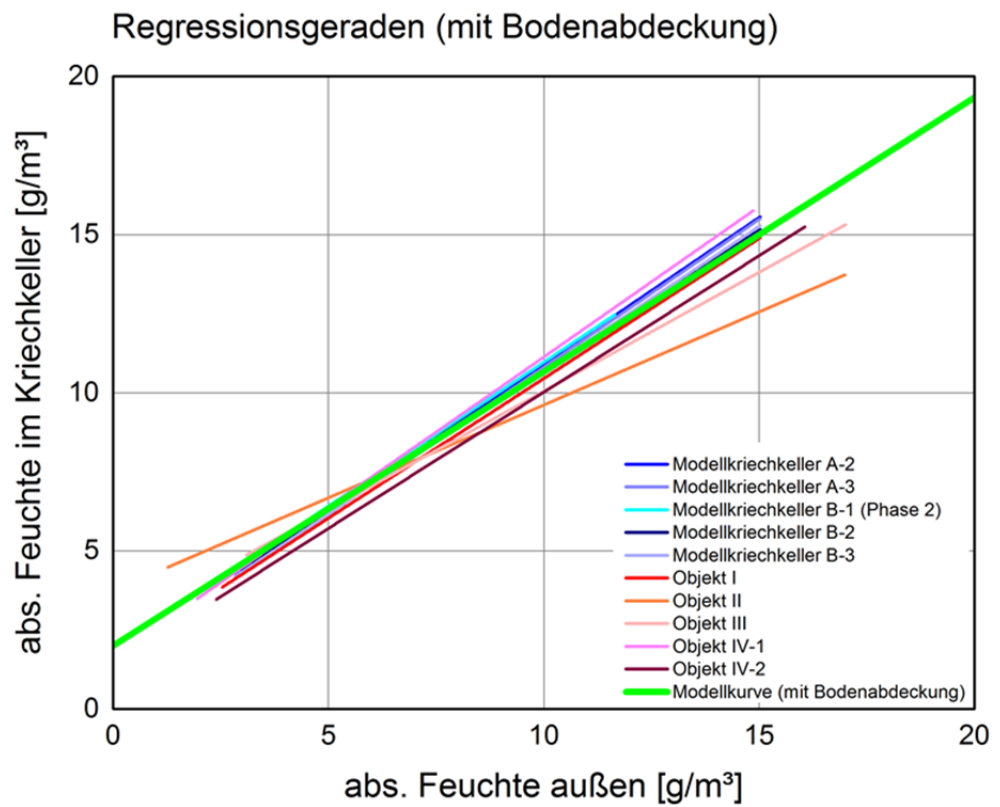


Bild 216:
Darstellung der Regressionsgeraden aller Kriechkellermessungen (Ausnahme: Keller B-1 Phase 1). Die grüne Kurve zeigt die verwendete Modellkurve für Kriechkeller mit Bodenabdeckung.

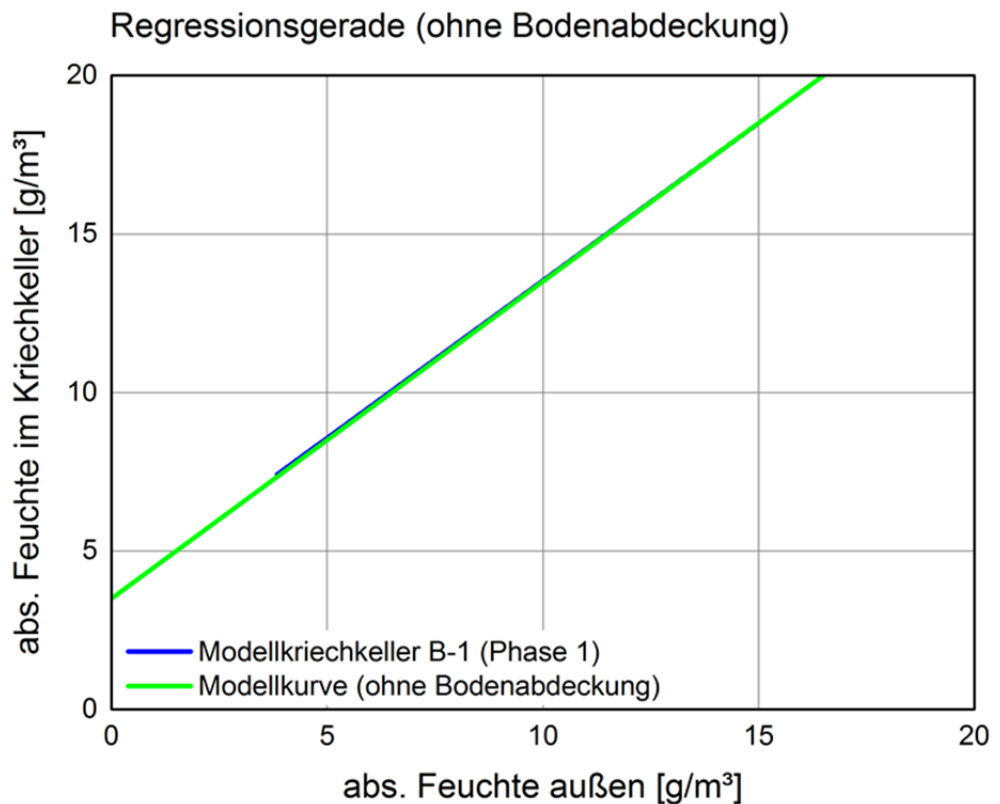


Bild 217:
Darstellung der Regressionsgeraden der Kriechkellermessungen von Keller B-1 Phase 1. Die grüne Kurve zeigt die verwendete Modellkurve für Kriechkeller ohne Bodenabdeckung.

Zur Validierung der beiden Modellansätze werden die gemessenen relativen Feuchten im Kriechkeller mit den über die Modellansätze berechneten relativen Feuchten verglichen. Dabei wird der Modellansatz für Kriechkeller ohne Bodenabdeckung lediglich zur Berechnung der ersten 6 Monate von Kammer A-1 und Kammer B-1 verwendet. Auch bei der relativen Feuchte ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem Modellansatz und den Messdaten bei einem gleitenden 3-Tagesmittel (72h). Für den Modellkriechkeller ist der Vergleich in Bild 218 dargestellt. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten relativen Feuchten. Bei den Modellkriechkellern, die zunächst ohne Bodenabdeckung waren, ergeben sich bei der Messung über den Betrachtungszeitraum im Mittel 85 % relative Feuchte und bei Verwendung des Modellansatzes 83 %. Bei allen anderen Modellkriechkellern liegt die mittlere relative Feuchte bei Anwendung des Modells bei 76 % im Vergleich zu 75 % in der Messung.

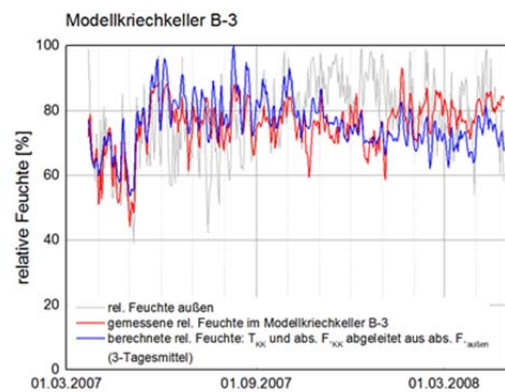
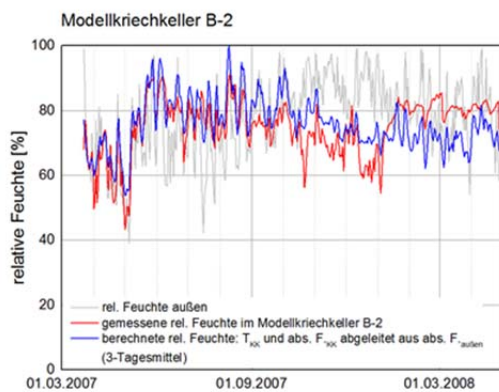
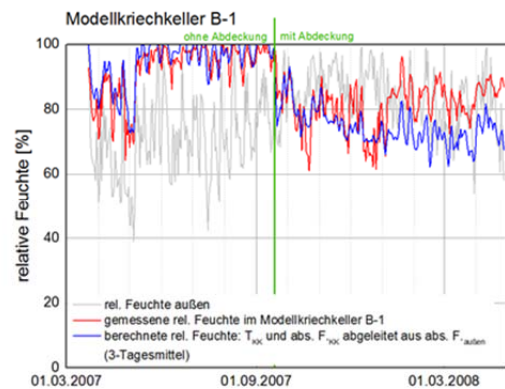
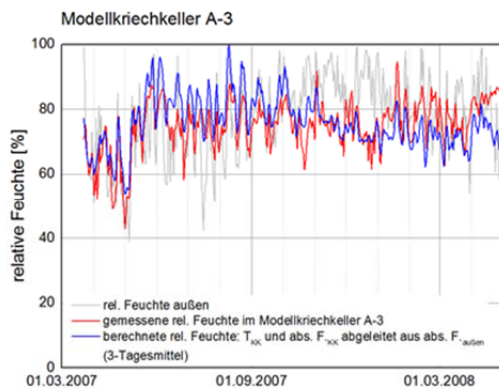
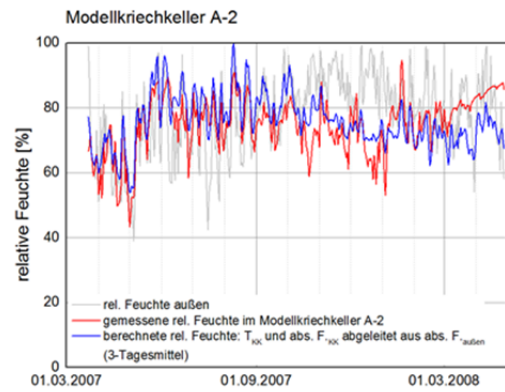
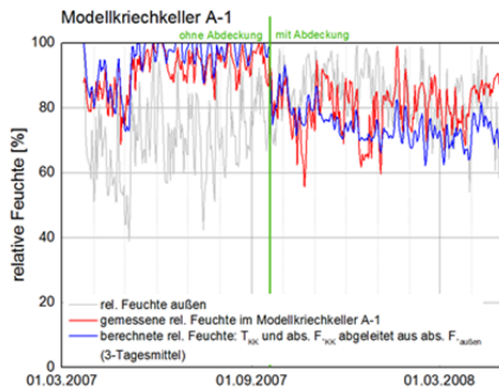


Bild 218:

Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchten (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die einzelnen Kammern des Modellkriechkellers über den Messzeitraum.

Auch bei den verschiedenen bestehenden Objekten (Bild 219) ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten relativen Feuchten. Bei Objekt III ergeben sich aufgrund der niedrigeren Modelltemperaturen auch höhere berechnete relative Feuchten von im Mittel 80 % im Ver-

gleich zu 70 % relative Feuchte in der Messung. Bei den anderen Objekten unterscheidet sich die mittlerer relative Feuchte um 3 bis 6 %, wobei sich bei Anwendung des Modells die leicht höheren Feuchten ergeben.

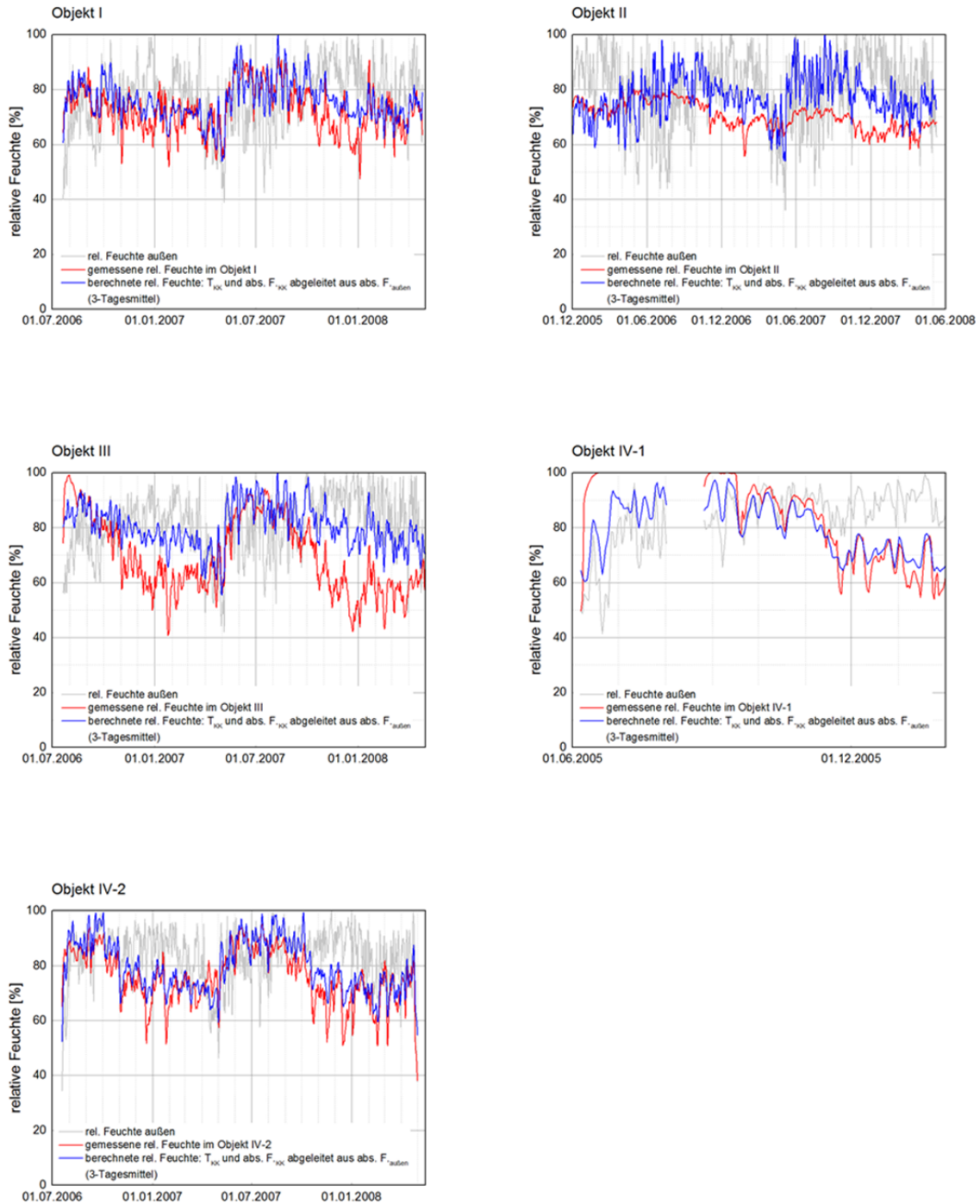


Bild 219:
Darstellung der stündlich gemessenen relativen Feuchten (rot) im Vergleich zu der über die absolute Feuchte berechneten relativen Feuchte (blau) für die Kriechkeller der verschiedenen bestehenden Objekte über den Messzeitraum.

Zusammenfassung

Basierend auf dem im Forschungsvorhaben der MFPA Leipzig und TUM [11] durchgeführten Messungen von Temperatur und relativer Feuchte in Kriechkellern, wurde ein Modell entwickelt, welches in Abhängigkeit von Außenlufttemperatur und –feuchte, die sich im Kriechkeller einstellenden Klimaverhältnisse ableitet. Die Messergebnisse zeigen eine gute Korrelation zwischen Außen- und Kriechkellerklima, so dass sowohl eine lineare Beziehung zwischen Außen- und Kriechkellertemperatur als auch zwischen der absoluten Feuchte außen und im Kriechkeller beobachtet werden konnte. Bezüglich der sich einstellenden Feuchte wurde zwischen Kriechkeller mit und ohne Bodenabdeckung unterschieden.

Eine Validierung des Temperaturmodells bzw. der beiden Feuchtemodelle erfolgte anhand der Messwerte aus [11]. Die Ergebnisse zeigen allgemein eine gute Übereinstimmung von Messung und Modell sowohl bei den Versuchsfeldern als bei den verschiedenen Praxisobjekten.

Voraussetzung zur Anwendung des entwickelten Modellansatzes sind ausreichend große Belüftungsquerschnitte von 10-20 cm²/m² Grundfläche, welcher auf Grundlage der Forschungsergebnisse aus [11] für die praktische Anwendung empfohlen werden.

4.5 Treppenhäuser

Da Treppenhäuser selten direkt geheizt werden, stellen diese im Sinne der Definition innerhalb dieses Projekts ebenfalls einen Nebenraum dar, der in einer Simulation nicht mit normalen Wohnraumbedingungen bemessen werden sollte. Auch hier wird ein Ansatz entwickelt, welcher eine hygrothermische Beurteilung von Dämmmaßnahmen von oder zu Treppenhäusern ermöglicht. Da Extrembedingungen wie Forst etc. nicht zu erwarten sind und aufgrund der geringen Feuchtelasten im Treppenhaus auch keine oberflächennahen Feuchteprobleme wie Schimmel o.ä. zu erwarten sind, sind bei diesem Modellansatz vor allem repräsentative, mittlere Klimaverhältnisse maßgeblich. Unterschieden werden dabei zum Außenklima ungedämmte und gedämmte Treppenhäuser.

Im Forschungsprojekt „Bilanzierung und Belüftung von Treppenhäusern in Geschosswohnbauten bei der Bestandsanierung“ [10] wurden unter anderem unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Temperatur im Treppenhaus miteinander verglichen. Zum einen wurde der „Berechnungsansatz zur Bestimmung der Temperatur unbeheizter Räume als Nachbarzonen beheizter Bereiche“ nach [2] herangezogen, um für verschiedene Dämmstandards jeweils die Mitteltemperatur im Treppenhaus zu berechnen. Im Vergleich dazu wurde mit dem dynamischen Finite-Differenzen-Programm [Heat2D] ebenfalls die mittlere Treppenhaustemperatur bestimmt. Dazu wurde durch die Auswertung von Plänen von Treppenhäusern unterschiedlicher Mehrfamilienhäuser aus verschiedenen Baualterklassen ein typisches Treppenhaus identifiziert. Dieses diente als Grundlage für die Entwicklung eines vereinfachten Treppenhausmodells und

wurde für die Bestimmung der Treppenhaustemperaturen verwendet. Es zeigte sich, dass die Abweichung zwischen der vereinfachten Berechnung und der zweidimensionalen Wärmestromberechnung sehr gering sind. Daraufhin wurde in einem weiteren Schritt untersucht, welche Treppenhaustemperaturen sich im Jahresverlauf einstellen. Bei der dynamischen Simulation wurde eine Raumtemperatur von konstant 20 °C im beheizten Bereich angenommen. Das Außenklima verläuft sinusförmig mit einer Mitteltemperatur von 9,2 °C und einer Amplitude von 11 °C. Als Ergebnis werden die sinusförmigen Verläufe der Treppenhaustemperatur für 3 verschiedene Messstellen dargestellt – jeweils für ein gedämmtes und ein ungedämmtes Treppenhaus.

Basierend auf den Ergebnissen aus [10] wird hier entsprechend der oben genannten Zielsetzung der Temperaturverlauf für die Messstelle in der Mitte des Treppenhauses ausgewählt (vgl. Bild 220). Dabei liegt der Mittelwert für die Temperaturen im ungedämmten Treppenhaus bei 14,8 °C mit einem Maximalwert von 18,8 °C am 15. August. Im gedämmten Treppenhaus ergibt sich ein Mittelwert von 18 °C, der Maximalwert von 19 °C wird am 31. August erreicht. Die niedrigen Maximalwerte sind darauf zurückzuführen, dass bei den in [10] durchgeführten Simulationen eine konstante Raumtemperatur von 20 °C für die beheizten Bereiche angenommen wurde. Diese Annahme ist hier durchaus vertretbar, da für die hygrothermische Bauteilbemessung im Treppenhaus vor allem der Winterfall ausschlaggebend ist – bei sommerlichen Verhältnissen sind keine kritischen Bedingungen zu erwarten.

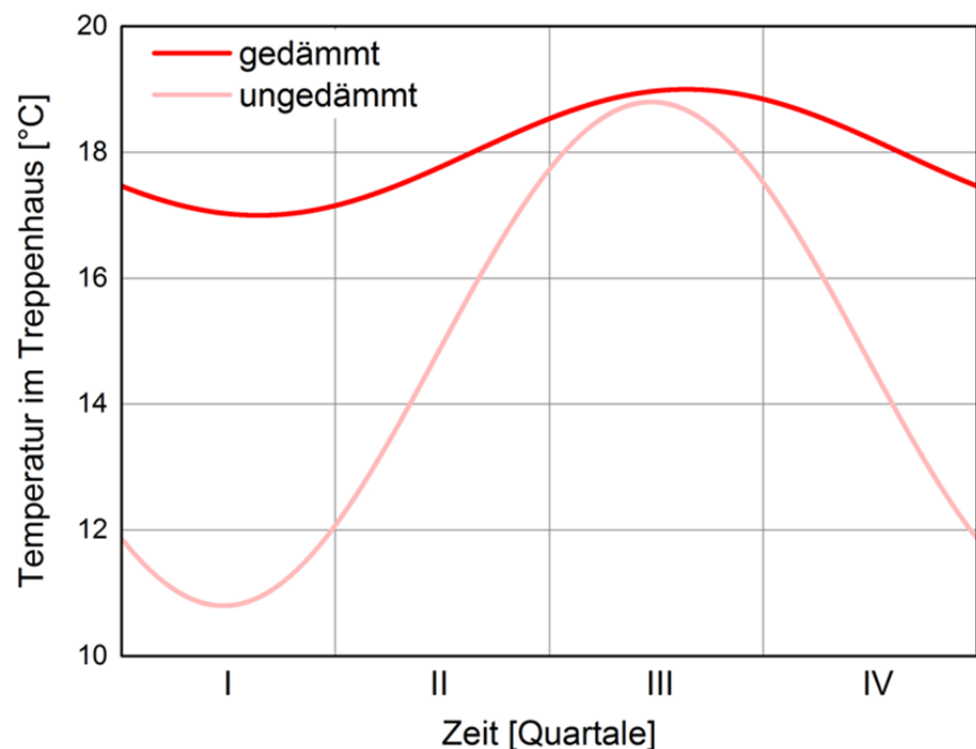


Bild 220:
Schematische Darstellung der sinusförmigen Temperaturverläufe für ein gedämmtes und ein ungedämmtes Treppenhaus über ein Jahr.

Da in [83] keine Angaben zur relativen Feuchte im Treppenhaus gemacht wurden, werden diese in Anlehnung an die Raumklimabedingungen für Wohnraum mit niedriger Feuchtelast nach [5] ebenfalls als Sinuskurve erstellt. Da im Treppenhaus außer gelegentlichem Eintrag von Schnee oder Regen durch von draußen kommende Personen kaum Feuchteproduktion stattfindet und das Raumvolumen sehr groß ist, sollte dies Annahme auf jeden Fall auf der sicheren Seite liegen. Für die Übertragung wird zunächst der Wasserdampfpartialdruck bei WTA-Wohnraumklima mit niedriger Feuchtelast berechnet. Die absolute Feuchte wird dann für das Treppenhaus übernommen und die relativen Feuchten für die dort herrschenden Temperaturen ermittelt. Es wird dabei angenommen, dass das Maximum der relativen Feuchte wie beim WTA-Modell für den Wohnraum Mitte August vorliegt. Beim Treppenhaus fällt dies dann mit dem von [10] ermittelten Zeitpunkt für das Temperaturmaximum zusammen.

Somit ergibt sich für ein ungedämmtes Treppenhaus eine mittlere relative Feuchte von 64 % mit einer Amplitude von 8 % und für ein gedämmtes Treppenhaus ein Mittelwert von 54 % und eine Amplitude von 16 %. Bild 221 stellt den sinusförmigen Verlauf der relativen Feuchte über ein Jahr dar.

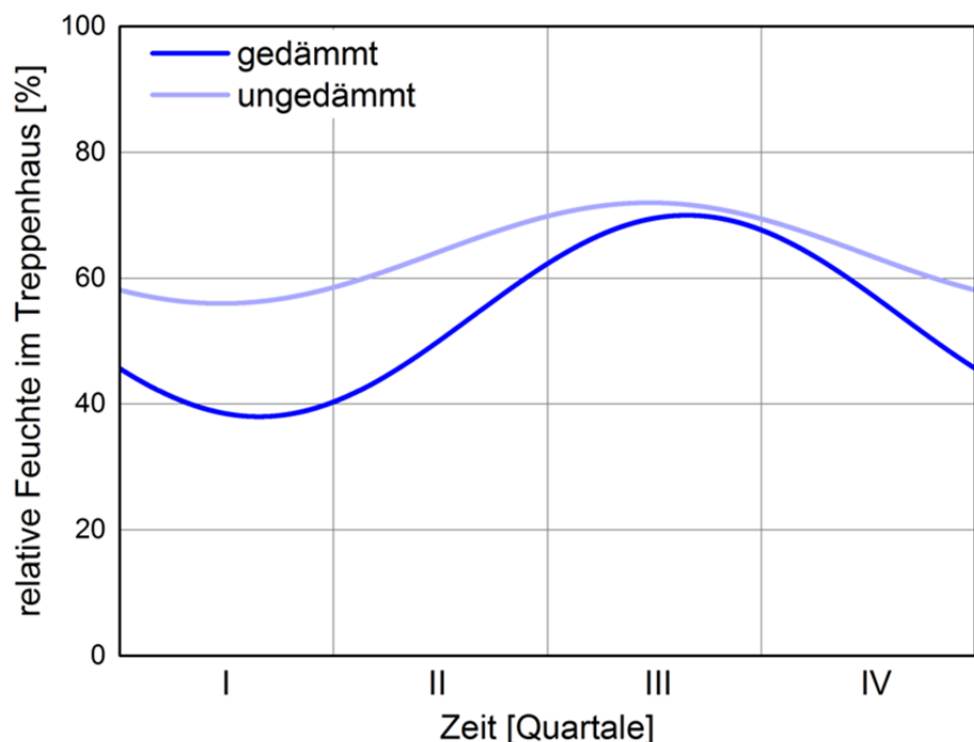


Bild 221:
Schematische Darstellung der relativen Feuchte für ein gedämmtes und ein ungedämmtes Treppenhaus über ein Jahr.

5 Oberflächenübergang

Im folgenden Kapitel wird für verschiedene bauliche Situationen und Positionen der Außen- und Innenoberfläche von Bauteilen effektive Übergangparameter ermittelt, die für die Simulation von Bauteilen herangezogen werden können. Die ersten Abschnitte beschäftigen sich mit der Übertragung des Außenklimas über Deckschichten oder Hinterlüftungen auf die eigentliche Oberfläche der Konstruktion. Im Anschluss werden kritische Positionen der Innenoberfläche betrachtet.

5.1 Hinterlüftete Steildächer

5.1.1 Einführung und Beschreibung der betrachteten Konstruktionen

Steildachkonstruktionen mit einer Eindeckung aus Dachsteinen oder Dachziegeln werden seit jeher als be- bzw. hinterlüftete Konstruktionen ausgeführt. Schon alleine durch die Lattung, ergibt sich eine Luftschicht. Die Hinterlüftungsschicht bestehend aus Lattung und Konterlattung hat jedoch mehrere Funktionen. Als erstes ermöglicht die Konterlattung den freien Ablauf von Regenwasser auf dem Unterdach, der zweiten wasserführenden Schicht. Zweitens dient die Belüftungsebene dem sommerlichen Wärmeschutz, da warme Luft aus dem Zwischenraum abgeführt wird. Als dritter Punkt ist der Abtransport von Feuchtigkeit in Folge von Diffusion und Konvektion aus dem Innenraum bzw. Tauwasser aufgrund Unterkühlung der Eindeckung zu nennen.

Die Hinterlüftung einer Eindeckung hat sich durch die Vielzahl ihrer Funktionen und unproblematischen Funktionsweise als bewährte Maßnahme etabliert. Nicht ganz einfach ist die Nachbildung der Hinterlüftungsschicht im Zuge der Bemessung z.B. mit Hilfe einer hygrothermischen Simulation. Prinzipiell gibt es bisher drei Möglichkeiten der Berechnung. Zum einen die Berechnungsvariante ohne die explizite Berücksichtigung der Luftschicht und ohne Strahlungseinflüsse. Bei dieser Variante wird die Außenlufttemperatur an der Dachoberfläche zum Ansatz gebracht, was zu sehr niedrigen Oberflächentemperaturen und hohen Feuchtegehalten in der Dachkonstruktion führt. Diese Art der Berechnung kann als kritischster Fall angesehen werden. Zum anderen kann die Berechnung mit einer Eindeckung und einer Luftschicht durchgeführt werden. Hierzu werden die Strahlungsparameter der Eindeckung verwendet und die Luftschicht zwischen Eindeckung und Unterdach mit berechnet. Um den Luftaustausch mit der Umgebung zu simulieren, wird bei dieser Variante eine Luftwechselquelle in die Belüftungsschicht integriert und Außenluft „beigemischt“. Diese Berechnungsvariante liegt meistens näher an der Realität, hat aber den Nachteil, dass der Luftwechsel in der Belüftungsschicht bekannt sein muss. Falsche Angaben führen hier unter Umständen zu unrealistischen Ergebnissen. Eine weitere Methode stellt die Berechnung mit den Strahlungsparametern direkt auf dem Unterdach dar. Hierbei wird die Belüftungsschicht ebenfalls nicht explizit berücksichtigt. Diese Methode führt jedoch zu starker nächtlicher Unterkühlung und zu hohen Oberflächentemperaturen unter solarem Strahlungseinfluss.

Eine genaue thermische Berechnung einer hinterlüfteten Dachkonstruktion erfordert die Berücksichtigung sämtlicher beeinflussenden Wärmeübertragungsvorgänge wie sie in Bild 222 oben dargestellt sind. Da in diese Berechnung sehr viele Parameter einfließen, die nicht immer bekannt sind und bei der Simulation die Eindeckung und die Belüftungsschicht nicht explizit berücksichtigen zu müssen, werden im Folgenden die Temperaturen auf dem Unterdach vereinfacht über die Anpassung der empirisch ermittelten Strahlungs- und Konvektionsparameter so verändert, dass sie gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen (vgl. Bild 222 unten).

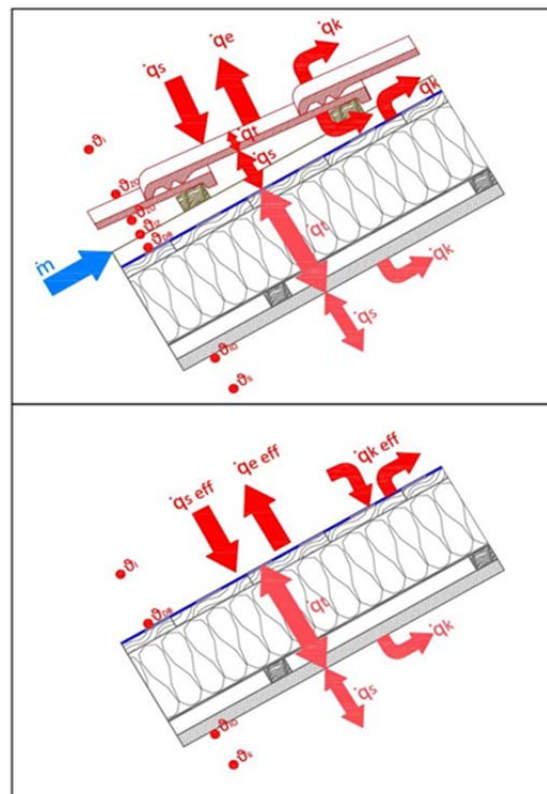


Bild 222:
Darstellung der Wärmeübertragungsvorgänge an einer hinterlüfteten Steildachkonstruktion mit Eindeckung und allen Wärmeübertragungsvorgängen (oben) sowie mit effektiven Strahlungs- und Konvektions-Parametern (unten).

5.1.2 Freilanduntersuchungen

Um diesen Zusammenhang künftig auch in der hygrothermischen Bauteilsimulation berücksichtigen zu können, wurden auf dem Freilandversuchsgelände des IBP mehrere unterschiedliche Dachkonstruktionen untersucht, um die zuvor genannten Übergangparameter für die hygrothermische Simulation zu ermitteln. An Steildächern mit verschiedenen Eindeckungen und verschiedenen Belüftungsarten wurden hierzu Temperaturmessungen durchgeführt. Hierbei wurde jeweils die Oberflächentemperatur der Eindeckung, die Temperatur an der Un-

terseite der Eindeckung, die Temperatur im Luftzwischenraum sowie die Oberflächen-temperatur auf dem Unterdach erfasst. Die Messungen erfolgten an mehreren Positionen im Dachverlauf (von der Traufe zum First) über einen Zeitraum von ca. einem Jahr. An der nahegelegenen Instituts-Wetterstation wurden die Außenlufttemperatur, die relative Feuchte, Global- und Diffusstrahlung, atmosphärische Gegenstrahlung sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit erfasst. Weiterhin wurden im institutseigenen Labor die Strahlungsparameter verschiedener Eindeckungen ermittelt.

Die Untersuchungen an den Dachkonstruktionen zeigen, dass sich die höchsten Oberflächentemperaturen auf der Oberseite der Eindeckung einstellen. Bild 223 stellt den Temperaturverlauf auf der Eindeckungsoberseite, dem Unterdach und die Außenlufttemperatur an zwei Sommertagen im Jahr 2013 dar. Die Oberflächentemperaturen des Unterdachs liegen am Tag bei solarer Einstrahlung wesentlich über der Temperatur der Außenluft. Von der nächtlichen Unterkühlung aufgrund langwelliger Abstrahlung ist hauptsächlich die Eindeckung betroffen. Die Temperatur des Unterdachs bleibt in diesem Fall sehr nahe an der Außenlufttemperatur.

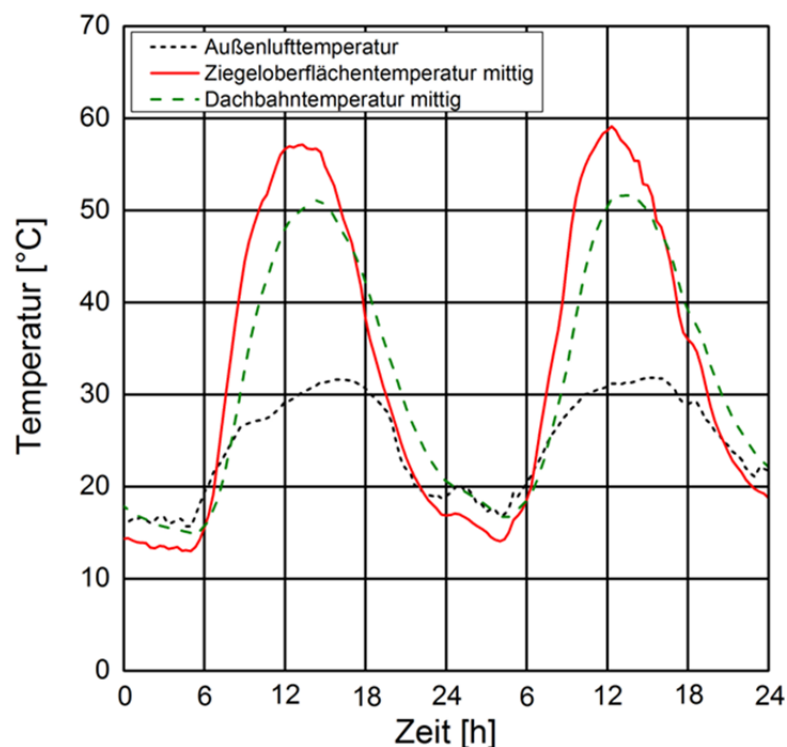


Bild 223:

Darstellung der Oberflächentemperatur auf der Eindeckung und auf dem Unterdach mittig zwischen Traufe und First an einem „normal“ belüfteten nach Süden orientierten Dach sowie der Außenlufttemperatur an zwei Sommertagen im Jahr 2013.

Bild 224 zeigt die Dachbahntemperatur mittig zwischen Traufe und First und die dazugehörige Außenlufttemperatur einer nach Süden orientierten, normal belüfteten Dachhälfte für das Jahr 2013. Zusätzlich ist das gleitende Monatsmittel der beiden Temperaturverläufe dargestellt. In Bild 225 sind die gleichen Verläufe für ein nach Norden orientiertes stark belüftetes Dach dargestellt. Im Vergleich zu dem nach Süden orientierten Dach (vgl. Bild 224) ist zu erkennen, dass die Temperaturspitzen im Tagesverlauf auf dem Unterdach geringer ausgeprägt sind.

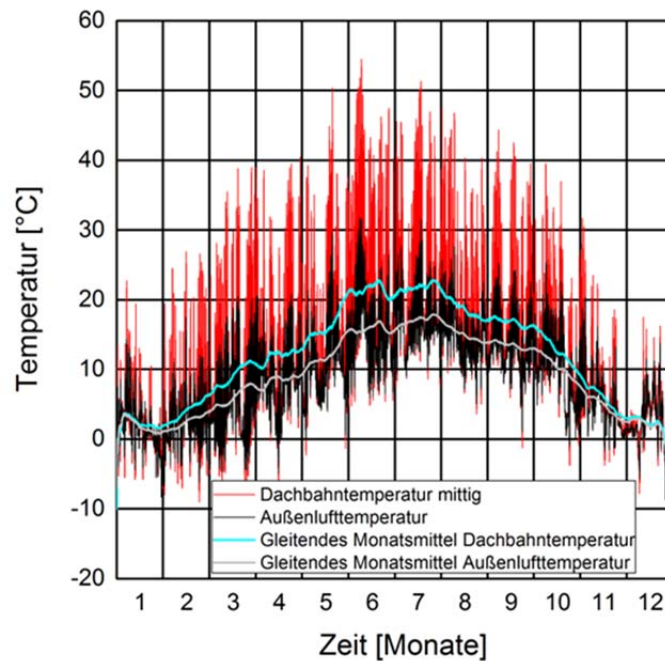


Bild 224:
Oberflächentemperatur mittig auf dem Unterdach (rot) und Außenlufttemperatur (schwarz) sowie die dazugehörigen gleitenden Monatsmittel einer normal belüfteten und nach Süden orientierten Dachhälfte im Jahr 2013.

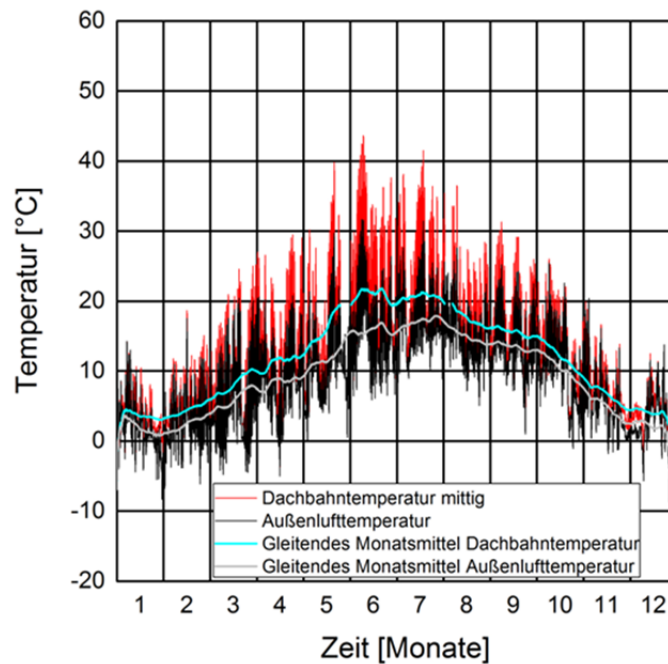


Bild 225:
Oberflächentemperatur mittig auf dem Unterdach (rot) und Außenlufttemperatur (schwarz) sowie die dazugehörigen gleitenden Monatsmittel einer stark belüfteten und nach Norden orientierten Dachhälfte im Jahr 2013.

Es ist jedoch auch ersichtlich, dass das gleitende Monatsmittel der Temperatur auf dem Unterdach in beiden Fällen über der Außenlufttemperatur liegt, lediglich während eines kurzen Zeitraums im Winter nähern sich die Temperaturen einander an. Dies lässt den Schluss zu, dass die eingangs erwähnte Berechnungsmethode, welche lediglich die Außenlufttemperatur zum Ansatz bringt, zu niedrige Temperaturen prognostiziert. Die Untersuchungen haben weiterhin ergeben, dass die Lufttemperatur im Belüftungsraum sowie die Oberflächentemperatur des Unterdachs bei solarer Einstrahlung von der Traufe zum First zunimmt.

Bild 226 zeigt die Temperaturverläufe auf dem Unterdach, in Nähe der Traufe, mittig zwischen Traufe und First sowie in Firstnähe im Vergleich zur Außenlufttemperatur. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperatur des Unterdachs bereits in Nähe der Traufe (Abstand ca. 30cm) bei solarer Einstrahlung deutlich über der Außenlufttemperatur liegt. Die Temperatur des Unterdachs steigt bis zur Dachmitte weiterhin deutlich an, erhöht sich dann aber nur noch moderat bis zur Messposition unterhalb des Firstes (Abstand ebenfalls ca. 30cm). Anhand der unterschiedlichen Oberflächentemperaturen ist erkennbar, dass für verschiedene Positionen unterschiedliche Berechnungsansätze angewandt werden müssen. Weiterhin nähern sich die Temperaturen an den drei Positionen während des Abkühlvorgangs und in Zeiten ohne solare Einstrahlung stark an. Diese Beobachtung rechtfertigt die Verwendung von strahlungsabhängigen effektiven Übergangsparametern.

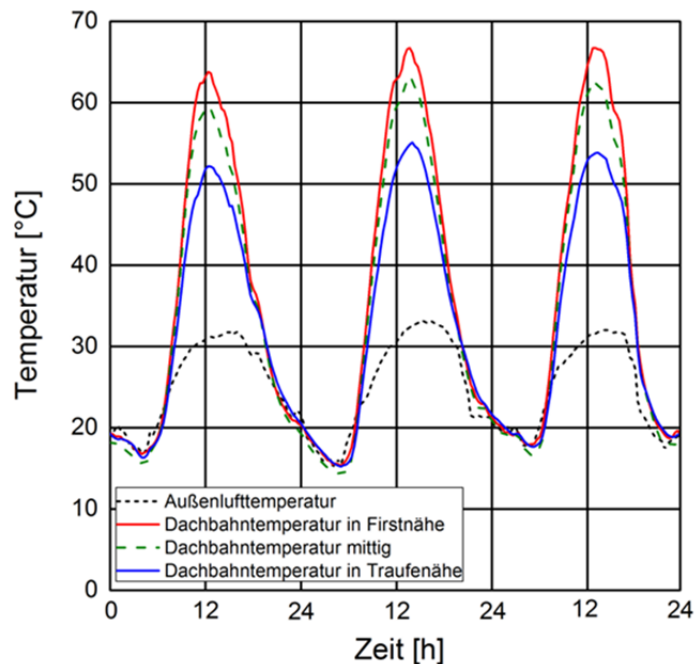


Bild 226:

Oberflächentemperaturen auf dem Unterdach in der Nähe der Traufe (blau), mittig zwischen Traufe und First (grün) und in Nähe des Firstes (rot) sowie die Außenlufttemperatur (schwarz) einer nach Süden orientierten schwach belüfteten Dachhälfte an drei Sommertagen im Jahr 2013.

Die Temperatur erhöht sich nicht linear von der Traufe zum First, sondern steigt im unteren Bereich des Daches stärker an. Da sich mit der Dachbreite die Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Luftzwischenraum bzw. dem Unterdach und der Eindeckung verringert, ergibt sich für beide Fälle ein logarithmischer Temperaturverlauf von der Traufe zum First. Das sich einstellende Temperaturprofil ist von der Art der Belüftung des Daches abhängig. Hier ist festzustellen, dass die Art der Belüftung im Wesentlichen von den Öffnungen an Traufe und First abhängig ist. Diese Öffnungen sind der Lufteinlass und Luftauslass der Belüftungsschicht und stellen für den Luftstrom einen Strömungswiderstand dar. Je größer dieser Strömungswiderstand ist, desto geringer ist der Luftwechsel zwischen Unterdach und Eindeckung.

Es muss hierzu angemerkt werden, dass bei unveränderter Luftgeschwindigkeit der Luftwechsel in der Belüftungsschicht nicht von der Höhe des Belüftungsquerschnitts sondern lediglich von der Dachbreite, also vom Abstand von der Traufe zum First und dem Strömungswiderstand der Belüftungsöffnungen abhängig ist. Es gilt der einfache theoretische Ansatz:

$$LW = \frac{\dot{V}}{V} = \frac{\omega_{ls} \cdot A \cdot 3600 \left[\frac{S}{h} \right]}{A \cdot b} = \frac{\omega_{ls} \cdot 3600 \left[\frac{S}{h} \right]}{b} \left[\frac{1}{h} \right]$$

mit:

\dot{V} = Volumenstrom [m^3/s]

V = Volumen [m^3]

ω_{ls} = Luftgeschwindigkeit [m/s]

A = Koeffizient

b = Koeffizient

Eine Vergrößerung des Belüftungsquerschnitts durch Erhöhung der Lattenstärke hat somit bei gleichbleibender Luftgeschwindigkeit keinen größeren Luftwechsel zur Folge, da das Volumen der Hinterlüftungsschicht und das ausgetauschte Luftvolumen in gleichem Maße zunehmen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Strömungswiderstand dadurch gemindert wird und sich deshalb die Strömungsgeschwindigkeit erhöht, was wiederum einen größeren Luftwechsel zur Folge hat.

Bild 227 zeigt exemplarisch für verschiedene Belüftungsvarianten den Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Zwischenraum bzw. dem Unterdach zur Außenlufttemperatur. Es ist ersichtlich, dass sich bei einer starken Belüftung, also bei großen Lüftungsöffnungen an Traufe und First, ohne zusätzliche Strömungswiderstände ein wesentlich flacheres Temperaturprofil und eine geringere Temperaturdifferenz zur Außenluft einstellt, als dies im Vergleich zu einer schwach belüfteten Konstruktion der Fall ist. Die Messungen haben ergeben, dass neben der Position im Verlauf von Traufe zu First ebenfalls die Art der Belüftung bei der vereinfachten Berechnung Berücksichtigung finden muss. Die Auswertung der Messergebnisse hat im Wesentlichen drei verschiedene Belüftungsvarianten erkennen lassen: stark, normal und schwach belüftet. Die Belüftungsvarianten sind, wie beschrieben, vor allem von den Öffnungen an Traufe und First abhängig. Ist nur eine der beiden Öffnung verschlossen stellt dies bereits eine starke Behinderung der Belüftung dar. Eine grobe Einteilung der verschiedenen Traufe und Firstausbildungen ist in Tabelle 33 gegeben.

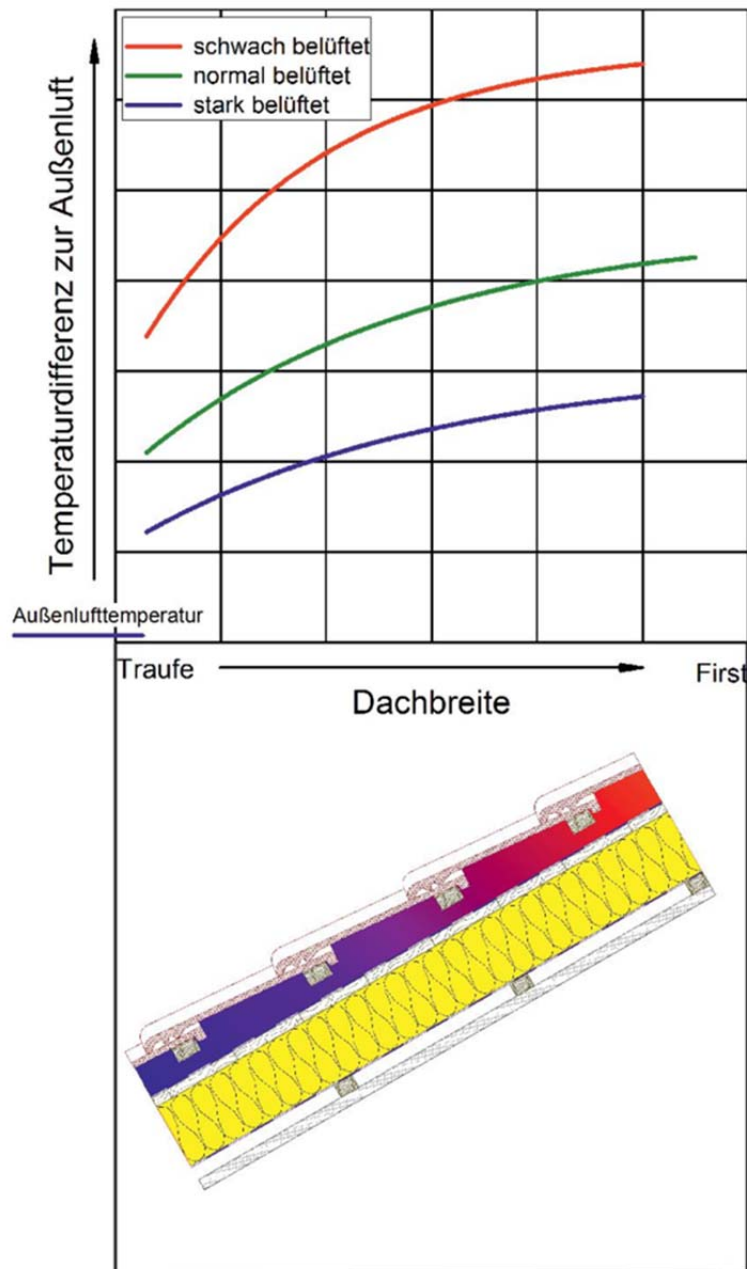


Bild 227:
Temperaturdifferenz zwischen der Luft in der Belüftungsschicht bzw. der auf dem Unterdach zur Außenlufttemperatur bei verschiedenen Belüftungsvarianten.

Die verschiedenen Belüftungsvarianten werden durch die Anpassung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei der Simulation berücksichtigt. Für unterschiedliche Belüftungen sind diese nachfolgend in Tabelle 33 zusammengefasst.

Tabelle 33:
Merkmale verschiedener Belüftungsvarianten¹⁾.

Stark belüftet	Traufe völlig geöffnet ohne Gitter o.Ä.	First offen mit geringem Strömungswiderstand z.B. vollkeramische Firstausbildung ohne Gratrolle.	
Normal belüftet	Trauföffnung mit Insektenschutzgitter oder Traufkamm, Öffnungsquerschnitte im Allgemeinen nach ZVDH [84] bzw. [35]. ²⁾	First mit Gratrolle verschlossen, Öffnungsquerschnitte im Allgemeinen nach ZVDH [84] bzw. DIN 4108-3 [35] ³⁾	
Schwach belüftet	Geringer Öffnungsquerschnitt an der Traufe z.B. durch sehr feines Vogel- bzw. Insektenschutzgitter.	Geringer Öffnungsquerschnitt am First z.B. Vermörtelte Firststeine oder Ziegel (Mörtelfirst).	Keine Konterlattung vorhanden.

¹⁾ Die Tabelle stellt lediglich Orientierungswerte ohne Anspruch auf Vollständigkeit dar. Die Auswahl der Belüftungsart ist von den örtlichen Gegebenheiten abhängig und unterliegt der Einschätzung des Planers. **Ist an einer Öffnung ein Merkmal einer geringeren Belüftung gegeben so ist generell die geringere Belüftungsstufe zu wählen.**

²⁾ Der freie Lüftungsquerschnitt an den Traufen bzw. an Traufe und Pultdachabschluss muss mindestens 2 ‰ der zugehörigen geneigten Dachfläche betragen, mindestens jedoch 200 cm²/m [35].

³⁾ An Firsten und Graten sind Mindestlüftungsquerschnitte von 0,5 ‰ der zugehörigen geneigten Dachfläche erforderlich, mindestens jedoch 50 cm²/m [35].

5.1.3 Ermittlung der Übergangparameter

Im Zuge der Untersuchungen wurden auch die Absorptions- und Emissionsgrade mehrerer Dachziegel und Dachsteine untersucht. Die Messung des Absorptionsgrades erfolgte mit einem Gitterspektrometer über den Gesamtsolarbereich von 280 - 2.500nm in Anlehnung an [85]. Der Emissionsgrad wurde nach [86] mit einem Emissiometer im Spektralbereich von 2,5 – 40 µm gemessen. Die Messungen zeigen, dass der Emissionsgrad der Dachziegel aus gebranntem Ton vor allem von der Oberflächenbeschichtung abhängig ist. Bei den Betondachsteinen konnten keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden: Hier liegen die Werte zwischen 0,9 und 0,91. Die Ergebnisse der Emissionsmessung sind in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34:
Emissionsgrad von Dachziegel und Dachsteinen.

Dachziegel hochglanz-glasiert	0,82
Dachziegel matt	0,84
Dachsteine allgemein	0,90 – 0,91

Die Messung des Absorptionsgrades hat keine signifikanten Unterschiede zwischen Dachziegeln und -steinen gezeigt. Der Absorptionsgrad ist hauptsächlich von der Farbgebung und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig und liegt bei den untersuchten Proben in einem Bereich zwischen 0,72 und 0,94. Ausgewählte Ergebnisse der Absorptionsmessung sind in Tabelle 35 zusammengestellt.

Tabelle 35:
Absorptionsgrad von Dachziegel und Dachsteinen.

Rot Hochglanz glasiert	0,72
Ziegelrot (engobiert)	0,74
Hellrot seidenmatt	0,75
Hellrot matt (stark verwittert)	0,76
Naturrot matt (auch verwittert)	0,77
Rot matt (stark verwittert)	0,78
Hellgrau	0,85
Schwarz (verwittert)	0,94

5.1.4 Modellentwicklung zur vereinfachten Betrachtung in der Simulation

Die Ermittlung der effektiven Übergangparameter wurden mit Hilfe des hygrothermischen Simulationsprogramms WUFI® [87] durchgeführt.

Auf Grundlage der erfassten Klimadaten und der gemessenen Oberflächentemperaturen an den drei Positionen der verschiedenen belüfteten Konstruktionen werden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die Konstruktionen werden hierfür in der Simulation jeweils um eine Weichholzschalung mit einer Stärke von 2cm ergänzt und auf der Außenseite wird ein s_d -Wert von 1500 m angesetzt, was die Austrocknung stark vermindert. Auf der Raumseite wird mit einem s_d -Wert von 5 m eine moderat dampfbremsende Variante gewählt. Zuerst

werden die gemessenen Oberflächentemperaturen aus den Freilandversuchen für die Simulation verwendet um einen Referenzfeuchteverlauf in der Holzschalung zu erhalten. Im zweiten Schritt werden die aufgezeichneten Klimadaten verwendet und die effektiven Übergangsparameter für die drei Positionen in der Art angepasst, dass die Schalungsfeuchte dem Referenzfeuchteverlauf entspricht. Die Oberflächentemperaturen aus der Simulation werden mit den gemessenen Temperaturen verglichen. Beispielhaft sind die gemessenen und berechneten Oberflächentemperaturen sowie der Feuchteverlauf in der Holzschalung für einen Berechnungszeitraum von 5 Jahren für eine normal belüftete Konstruktion mittig zwischen Traufe und First in Bild 228 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Berechnung des Feuchteverlaufs mit effektiven Übergangsparametern mit dem Feuchteverlauf, der anhand der gemessenen Temperaturen berechnet wurde, eine gute Übereinstimmung zeigt. Auch die anderen Verläufe, die in dieser kurzen Zusammenfassung nicht dargestellt sind, ergeben eine ähnlich gute Übereinstimmung. Die berechneten Oberflächentemperaturen erreichen im Sommer jedoch nicht ganz die Temperaturspitzen die gemessen wurden, was eine etwas geringere Rücktrocknung der Konstruktion zur Folge hat. Somit besitzt die Simulation mit effektiven Übergangsparametern im Vergleich zur Realität eine kleine Sicherheitsreserve bezüglich des Austrocknungsverhaltens.

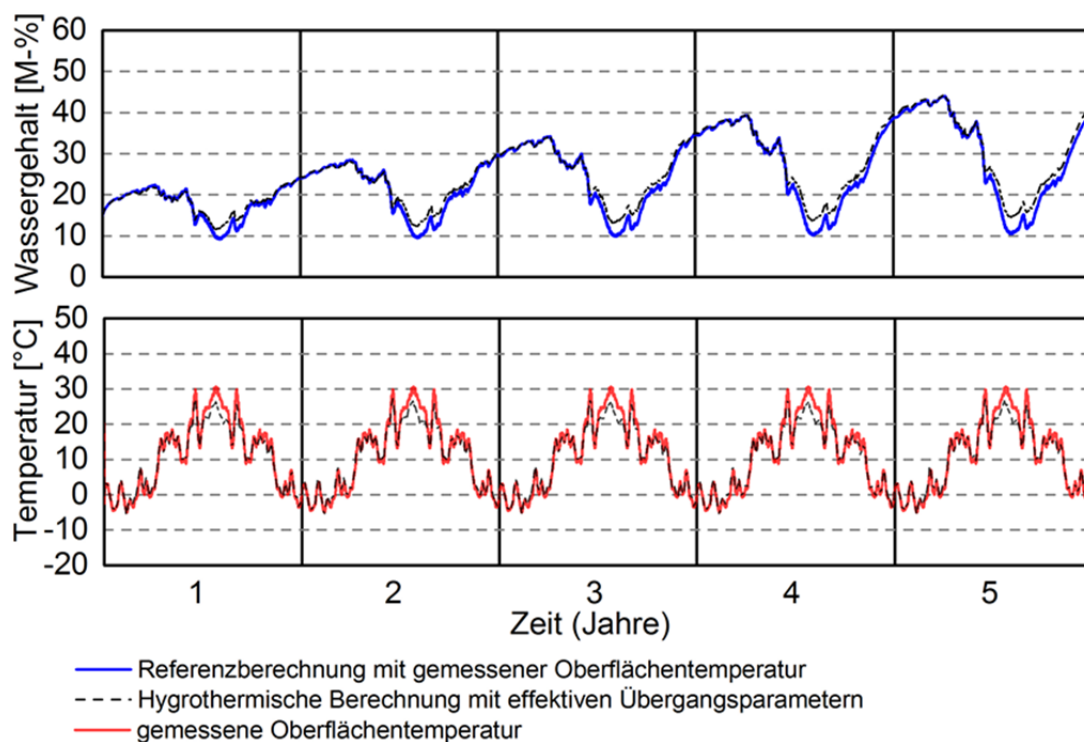


Bild 228:
Gemessener und mit effektiven Übergangsparametern berechneter Temperaturverlauf sowie jeweils zugehöriger Wassergehalt in der Holzschalung an der

mittleren Position einer normal belüfteten Eindeckung über den Zeitraum von 5 Jahren.

Um das Temperaturverhalten auf dem Unterdach für alle verschiedenen Belüftungsvarianten und Positionen vereinfacht abbilden zu können, wurden hierfür jeweils effektive Übergangparameter in der beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Dadurch ist es möglich das Temperaturverhalten des Unterdachs ohne direkte Berücksichtigung der Eindeckung und der Belüftungsschicht zu simulieren.

In den effektiven Übergangparametern ist der Strahlungsaustausch zwischen der Eindeckung und dem Unterdach sowie der konvektive Wärmeübergang an allen beteiligten Bauteiloberflächen berücksichtigt. Die Parameter sind zum einen ein effektiver konvektiver Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{k,e}$ der in Abhängigkeit der Belüftungsstärke den konvektiven Wärmeübergang am Unterdach beschreibt und zum anderen ein effektiver Absorptionsgrad a_e der an Hand der realen Eindeckung die Wärmeübertragung auf das Unterdach simuliert. Hierzu wird der reale Absorptionsgrad der Eindeckung mit einem Minderungsfaktor für die untere und mittlere Stelle multipliziert. Der Emissionsgrad der Eindeckung wird entsprechend der realen Eindeckung auf das Unterdach angesetzt. Die ermittelten effektiven Übergangparameter sind in Tabelle 36 zusammengestellt. Bei der Simulation mit den angegebenen effektiven Übergangparametern ist zu beachten, dass diese nur in Verbindung mit der expliziten Strahlungsbilanz angewendet werden können und somit Strahlungsdaten des jeweiligen Standorts benötigt werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der angegebene effektive konvektive Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{k,e}$ keine langwellige Strahlungsanteile besitzt.

Tabelle 36:
Effektive Übergangparameter zur hygrothermischen Simulation von hinterlüfteten Steildächern in Abhängigkeit der Belüftungsart und der Position im Dachverlauf.

	Kälteste Stelle	Mittlere Stelle ¹⁾	Wärmste Stelle ¹⁾
Stark belüftet	$\alpha_{k,e} = 30 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
	$a_e = a \cdot 0,70$	$a_e = a \cdot 0,90$	$a_e = a$
Normal belüftet	$\alpha_{k,e} = 19 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
	$a_e = a \cdot 0,70$	$a_e = a \cdot 0,90$	$a_e = a$
Schwach belüftet	$\alpha_{k,e} = 13,5 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
	$a_e = a \cdot 0,75$	$a_e = a \cdot 0,90$	$a_e = a$

¹⁾ Die angegebenen Faktoren zur Berechnung der effektiven Übergangsparameter gelten für Dachbreiten (Abstand Traufe-First) von normalen Einfamilienhäusern. Bei größeren Dachlängen können sich an der mittleren und der wärmsten Stelle ggf. höhere Temperaturen auf dem Unterdach einstellen.

5.1.5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist belüftete Steildachkonstruktionen ohne die explizite Berücksichtigung der Belüftungsschicht in der hygrothermischen Simulation nachzubilden. Hierzu wurden effektive Übergangsparameter eingeführt die direkt auf der Oberfläche des Unterdachs angesetzt werden. Auf dem Unterdach bildet sich im Verlauf von der Traufe zum First ein logarithmisches Temperaturprofil aus, welches hauptsächlich von der Stärke der Belüftung abhängig ist. Die ermittelten effektiven Übergangsparameter werden für verschiedenen Dachpositionen und für unterschiedliche Belüftungsvarianten angegeben und die praktische Eingabe in das hygrothermische Simulationsprogramm vorgestellt. Es wurde bei der Ermittlung der Parameter hoher Wert darauf gelegt, dass die Feuchtegehalte der parameterbasierten Simulation möglichst gut mit denen übereinstimmen, die anhand der Messwerte berechnet wurden. Jede Situation bedarf jedoch einer individuellen Einschätzung um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Die vorgestellten effektiven Übergangsparameter stellen eine praktikable und einfach anzuwendende Möglichkeit dar, die Temperaturen auf dem Unterdach einer hinterlüfteten Steildachkonstruktion genauer als bisher abbilden zu können.

5.2 Effektive Auswirkungen von Deckschichten auf Flachdächern

Deckschichten auf Flachdächern können mitunter einen deutlichen Einfluss auf die Übertragung der Klimabedingungen auf die eigentliche Dachkonstruktion haben. Sie wirken teilweise verschattend, teilweise als Wärmespeicher. Entsprechend ihrer Farbgebung verändern sie die kurzweilige Strahlungsabsorption und agieren, wenn sie Feuchte aufnehmen, zusätzlich als Latentwärmespeicher, der z.B. bei Eisbildung im Winter Abkühlung und Erwärmung verzögert oder bei Verdunstung im Sommer das Dach kühlt.

Im Folgenden werden zwei einfache Ansätze vorgestellt, die es erlauben, den Einfluss der häufig vorkommenden Kies- und Gründächer auf der sicheren Seite liegend bei einer Simulation von Dachkonstruktionen mit zu erfassen.

5.2.1 Berücksichtigung einer Kiesschicht

Für die Anpassung der Materialeigenschaften einer typischen Kiesschicht wurde zunächst auf stündliche Temperaturmessungen unter einem Kiesdach auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen in den Jahren 1995 und 1996 zurückgegriffen. Die verschiedenen Materialeigenschaften der Kiesschicht wie Wärmekapazität, Wärmeleitung, Feuchtespeicherung etc. werden basierend

auf realistischen Annahmen iterativ so angepasst, dass die simulierten Temperaturen unter dem Kies den gemessenen möglichst gut entsprechen. Dabei werden die Werte so angepasst, dass die maximalen Temperaturen im Sommer nicht überschritten, die minimal gemessenen Temperaturen im Winter - insbesondere in Zeiten mit Schneedecke - dagegen unterschritten werden dürfen. Dies ist erforderlich, da eine Schneedecke in der Regel über die Klimadaten nicht erfasst und infolgedessen in der Simulation auch nicht abgebildet werden kann. Zudem stellt das Vorgehen sicher, dass z.B. in kalten Wintern ohne Schnee die Simulation nicht auf der zu günstigen Seite von der Realität abweicht.

Die Wärmeübergangskoeffizienten werden an der Außenoberfläche mit $19 \text{ W/m}^2\text{K}$ und an der Innenoberfläche mit $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt. Diese Werte haben sich aus zahlreichen Vergleichen zwischen Berechnung und Freilandversuch als zuverlässig erwiesen, während die z.B. in [35] vorgeschlagenen $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die Verhältnisse in Deutschland in der Regel zu hoch liegen. Die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl a wurde in einem für mittelgrauen Kies realistischen Bereich von 0,3 bis 0,6 und die langwellige Strahlungsemission im Bereich von 0,9 bis 0,98 variiert. Die langwellige Abstrahlung spielt bei Flachdächern aufgrund des praktisch ausschließlichen Strahlungsaustauschs mit der Atmosphäre eine wesentliche Rolle. Da allerdings für den damaligen Untersuchungszeitraum keine gemessenen atmosphärischen Gegenstrahlungsdaten zur Verfügung stehen, wird ein in WUFI® integriertes Modell zu deren Abschätzung auf Basis des mittleren Bewölkungsgrads verwendet. Der anhand der deutschen Testreferenzjahre des DWD vom IBP als allgemeine Empfehlung für Deutschland ermittelte mittlere Bewölkungsgrad von 0,66 erweist sich für Holzkirchen dabei als etwas zu hoch. Bessere Ergebnisse werden mit einem Wert von 0,5 erzielt. Bezüglich Strahlungsabsorption und -emission wird die beste Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung mit $a = 0,5$ und $\varepsilon = 0,93$ erreicht.

Eine weitere Modifizierung der zunächst nur indirekt über ihre thermischen Auswirkungen berücksichtigten Feuchteigenschaften - insbesondere der freien Wassersättigung - erfolgt anschließend im Rahmen von Versuchsnachberechnungen an in den Jahren 1997 bis 2007 am Standort Gräfelfing (bei München) gemessenen, bekiesten Umkehrdächern mit zweilagig verlegter Dämmung. Hier liegen Daten zu den in den Dämmplatten gemessenen Feuchtegehalten vor, die in direktem Zusammenhang mit der sich unter der Kiesschicht einstellenden Feuchte stehen. Insbesondere für die Feuchteverhältnisse in der oberen Dämmplatte ist die Feuchte, die durch den Kies an die Oberfläche der Platte gelangt, maßgeblich. Diese Feuchtemenge hängt wiederum von der Feuchtespeicherfähigkeit der Kiesschicht ab, welche in der Literatur mit 1,5 – 3,0 M.-% angegeben wird. Da Kies keinen Kapillartransport aufweist, kann die Wasseraufnahme bei Regen nicht mit den Flüssigtransportkoeffizienten berücksichtigt werden – dies würde anstelle eines Abflusses des Wassers nach unten und einer hauptsächlichlichen Trocknung von oben zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Feuchte über die ganze Dicke der Kiesschicht führen. Deshalb wird die Wasseraufnahme durch eine Feuchtequelle im Kies gewährleistet. Als Menge hat sich dabei 90 % des Niederschlags bewährt, wobei die Menge begrenzt wird

auf die o.g. freie Sättigung des Kieses. Somit ist die Kiesschicht bei ausreichend starkem Regen gesättigt, bei längeren Trockenperioden kann sie jedoch wieder vollständig austrocknen. Die Nachrechnung der Feuchteverhältnisse in den Dämmplatten hat ergeben, dass die Verwendung der höheren freien Wassersättigung zu einer besseren Übereinstimmung führt. Im Folgenden wird deshalb die freie Wassersättigung von 3 M.-% angesetzt. Der Vergleich zwischen den gemessenen Temperaturen unter der Kiesschicht und den Berechnungsergebnissen ist in Bild 229 dargestellt. Tabelle 37 zeigt eine Zusammenstellung der ermittelten Materialkennwerte und Randbedingungen.

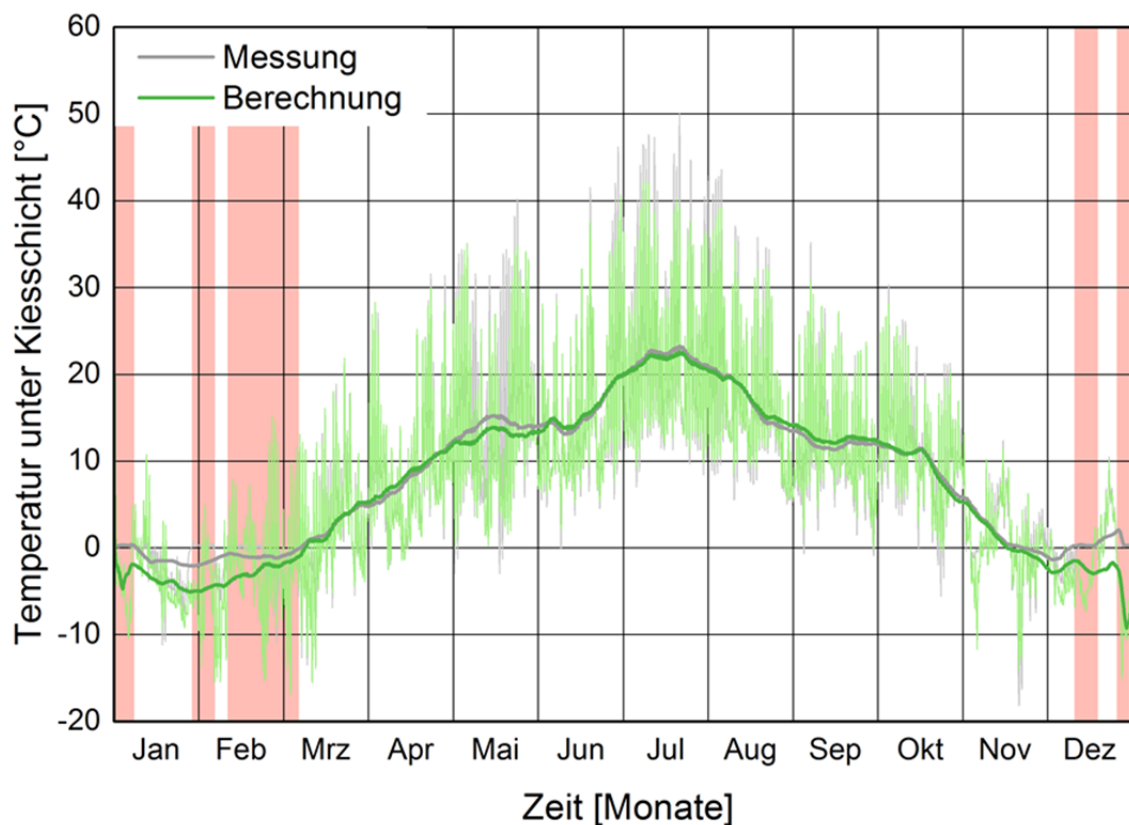


Bild 229:

Vergleich der gemessenen (grau) und berechneten (grün) Temperaturen unter der Kiesschicht über den Messzeitraum von einem Jahr (1995/1996) mit dem ersten Kiesdatensatz. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel dar. Die roten Balken markieren die Zeiträume, in denen das Kiesdach mit Schnee bedeckt war.

Tabelle 37:
Zusammenstellung der im ersten Anlauf ermittelten Materialkennwerte und Randbedingungen für eine Kiesschicht.

Kiesdach	
Materialdaten	
Rohdichte	1400 kg/m ³
Porosität	0,7
Wärmekapazität trocken	1000 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit trocken	0,7 W/mK
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	1,0
Feuchtespeicherfunktion (linear)	0 % r.F. 0 kg/m ³
	100 % r.F. 50 kg/m ³
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen	-
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilen	-
Randbedingungen	
Feuchtequelle	über ganze Schichtdicke
	90 % des Schlagregens
	begrenzt auf freie Wassersättigung
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	0,5
Langwellige Strahlungsemissionszahl	0,93
Explizite Strahlungsbilanz	verwendet

Da der Datensatz mit der linearen Feuchtespeicherfunktion keinen stetigen Verlauf vom trockenen Zustand bis zur maximalen Sättigung aufweist, sondern einen deutlichen Knick in der Steigung bei der freien Sättigung zeigt, verhält sich dieser numerisch eher instabil. Zur Verbesserung wird der lineare Verlauf bis zur freien Sättigung in eine Exponentialfunktion nach [87] abgeändert, die einen Stützpunkt bei 80 % relativer Feuchte mit 5 kg/m³ und bei freier Wassersättigung mit 50 kg/m³ aufweist. Weiterhin wird die zunächst zu hoch angesetzte Porosität auf einen Wert von 0,3 verringert – dieser Wert ist in der Literatur als typische nutzbare Porosität von Kiesschüttungen angegeben. Diese Maßnahmen führen bereits zu einer deutlichen Verbesserung. Weitere Analysen zeigen, dass sich auch der parallele Eintrag von Niederschlag auf die Oberfläche und über die Quelle negativ auf die Lösung der Gleichungen auswirkt. Aus diesem Grund wird die Feuchtequelle über die gesamte Schichtdicke mit Ausnahme des äußersten Gitterelements angesetzt und die Quellstärke auf 40 % des auftreffenden Niederschlags reduziert. Die übrigen Parameter haben sich nicht geändert. Die Änderungen erlauben immer noch eine gute Abbildung der realen Feuchteverhältnisse, bei nun insgesamt deutlich verbesserter numerischer Stabilität des Datensatzes. In Bild 230 ist der Vergleich zwischen Messung und Berechnung mit dem numerisch optimierten Datensatz dargestellt. In Tabelle 38 sind die finalen Materialdaten und Randbedingungen zusammengestellt.

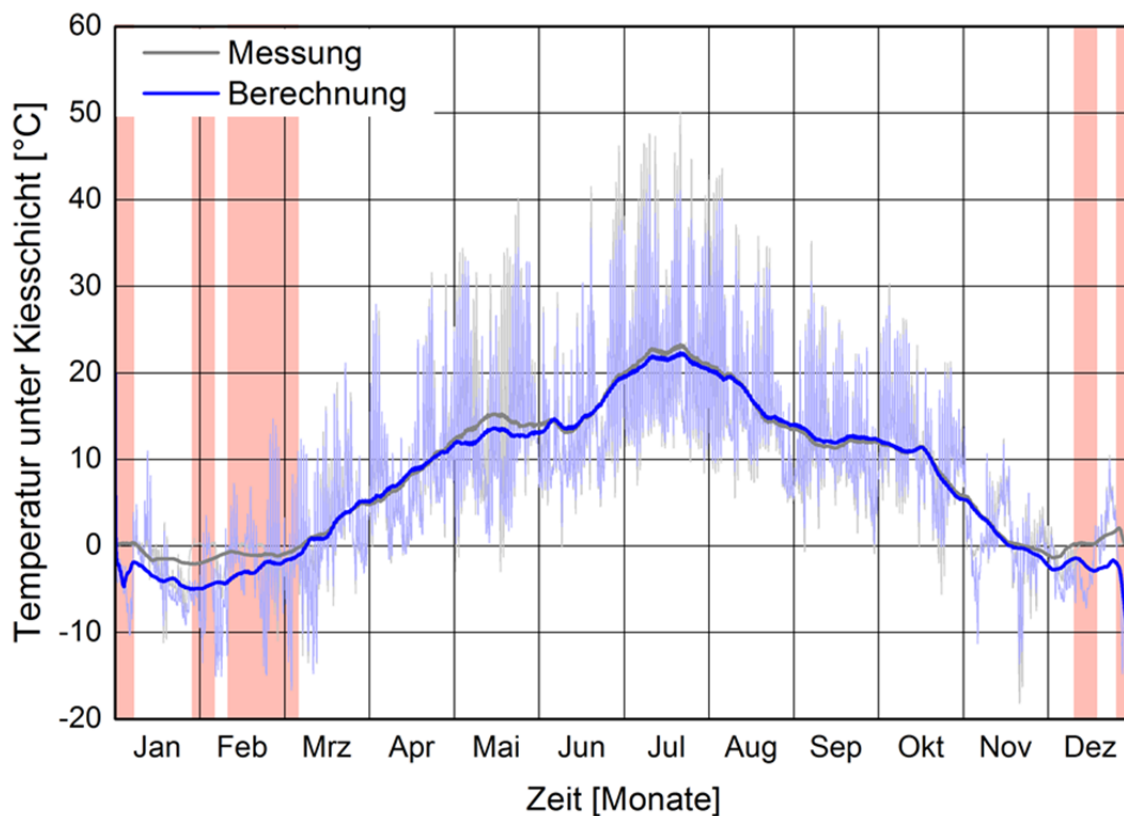


Bild 230:

Vergleich der gemessenen (grau) und berechneten (blau) Temperaturen unter der Kiesschicht über den Messzeitraum von einem Jahr (1995/1996) mit dem endgültigen Kiesdatensatz. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel dar. Die roten Balken markieren die Zeiträume, in denen das Kiesdach mit Schnee bedeckt war.

Tabelle 38:

Zusammenstellung der endgültigen Materialkennwerte und Randbedingungen für eine Kiesschicht. Die im Vergleich zum ersten Ansatz geänderten Parameter sind fett gedruckt.

Kiesdach	
Materialdaten	
Rohdichte	1400 kg/m ³
Porosität	0,3
Wärmekapazität trocken	1000 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit trocken	0,7 W/mK
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	1,0
Feuchtespeicherfunktion (approximiert)	0 % r.F. 0 kg/m³
	80% r.F. 5 kg/m³
	100 % r.F. 50 kg/m³

Flüssigtransportkoeffizient, Saugen	-
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilen	-
Randbedingungen	
Feuchtequelle	über ganze Schichtdicke mit Ausnahme des äußersten Elements
	40 % des Schlagregens
	begrenzt auf freie Wassersättigung
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	0,5
Langwellige Strahlungsemissionszahl	0,93
Explizite Strahlungsbilanz	verwendet

5.2.2 Vereinfachte Berücksichtigung einer Dachbegrünung

Eine detaillierte Berechnung von Dachbegrünungen mit der vollständigen Feuchtebilanz ist sehr aufwändig und erfordert detaillierte Eingabedaten zu den Materialparametern der einzelnen Schichten, der Art der Drainage sowie der Bepflanzung. Diese Daten stehen in vielen Fällen nicht in ausreichender Genauigkeit zur Verfügung. Trotzdem ist es häufig erforderlich, zu überprüfen, ob der gewählte Dachaufbau grundsätzlich für eine Begrünung geeignet ist oder ob diese ggf. zum Versagen der Konstruktion führt. Um diese Bewertung auf einfache Weise durchführen zu können, wird ein vereinfachter Ansatz vorgeschlagen, um die hygrothermischen Verhältnisse in einer Flachdachkonstruktion mit Begrünung auch ohne die Eingabe von Gründachmaterialdaten und Übergangrandbedingungen bewerten zu können.

Auf Basis der Auswertung von zahlreichen Berechnungen mit unterschiedlich gedämmten Konstruktionen und verschiedenen Gründachaufbauten wird für deutsche Klimaverhältnisse ein „Worst-Case“-Szenario erstellt, das in Form einer Klimadatei mit den sich unter der Begrünung einstellenden Bedingungen sehr einfach bei Simulationen angesetzt werden kann.

Für die Erstellung des Begrünungsklimas wurde als kritisch repräsentatives Beispiel eine Leichtbaukonstruktion mit 40 cm Mineralwollendämmung und ein Dachbegrünungsaufbau aus Festkörperdrainage und 10 Substrat am Standort Hof ausgewählt. Bezüglich der Dämmstärke liegt diese Variante am oberen Rand dessen, was bei einer Leichtbaukonstruktion mit Begrünung noch als sinnvoll angesehen werden kann. Die Begrünung selbst ist mit einer Gesamtaufbaudicke ebenfalls am oberen Rand typischer extensiver Dachbegrünungen. Diese Kombination führt aufgrund des geringen Wärmeeintrags von beiden Seiten zu kritisch niedrigen Temperaturverhältnissen im Bereich der Dachabdichtung. Diese berechneten Temperaturen werden zusammen mit einer relativen Feuchte von konstant 100 % (entspricht einem durchfeuchteten Substrat) in die Bemessungsklimadatei aufgenommen.

Bild 231 und Bild 232 zeigen exemplarisch zwei unterschiedliche Konstruktionen mit einem U-Wert von ca. 0,085 W/m²K. In beiden Fällen können die

Feuchteverhältnisse in der Konstruktion mit dem vereinfachten Ansatz sehr gut abgebildet werden. Bei geringeren Dämmdicken zeigte sich, dass die Sicherheit mit dem verwendeten Ansatz gegenüber einer genaueren Simulation weiter ansteigt. Bei einem noch besseren U-Wert liegt der Ansatz aber dann nicht mehr auf der sicheren Seite – allerdings sind solche Konstruktionen mit Begrü- nung auch nicht zu empfehlen, weil die geringe Erwärmung der Oberfläche bei zu dicken Dämmschichten keine Trocknung mehr nach innen zulässt (Bild 233).

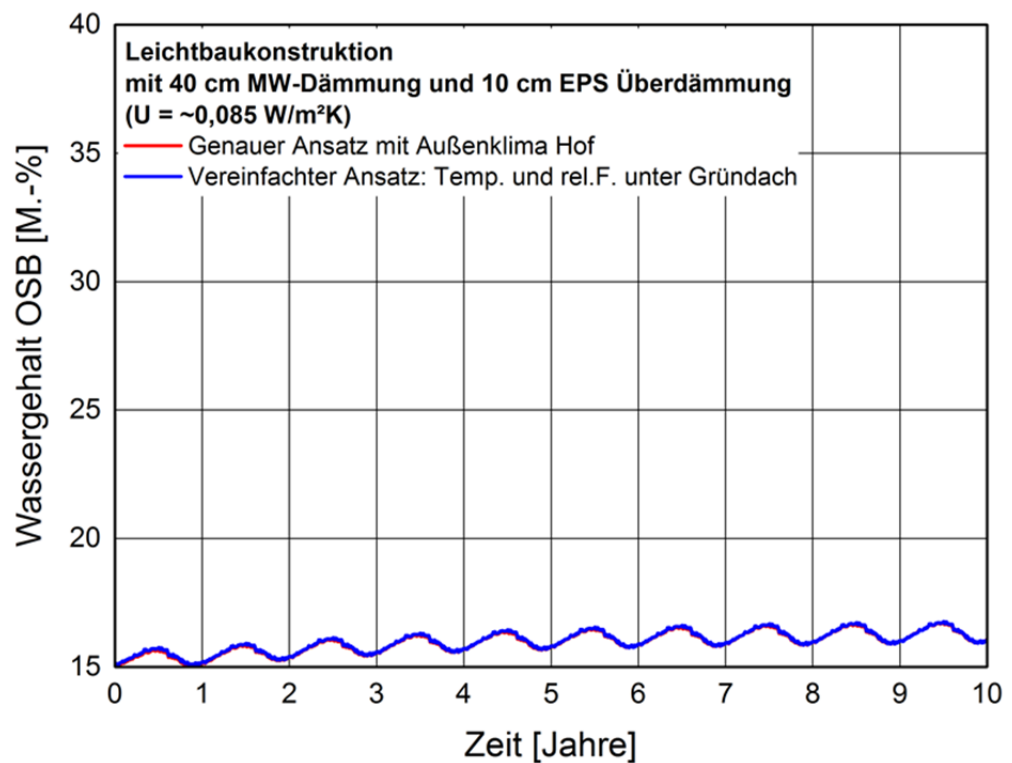


Bild 231: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion über den Berechnungszeitraum von 10 Jahren für einen Dachaufbau mit 40 cm Mineralwollendämmung und 10 cm EPS Überdämmung in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsansatz.

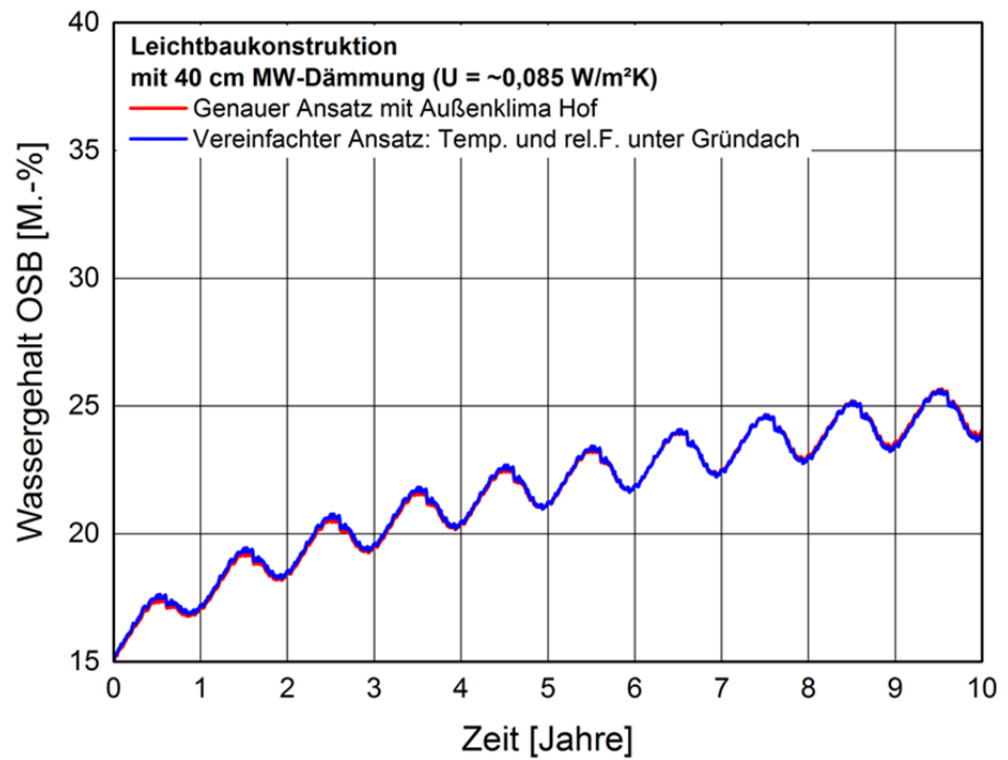


Bild 232:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion über den Berechnungszeitraum von 10 Jahren für einen Dachaufbau mit 40 cm Mineralwolle-Dämmung in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsansatz.

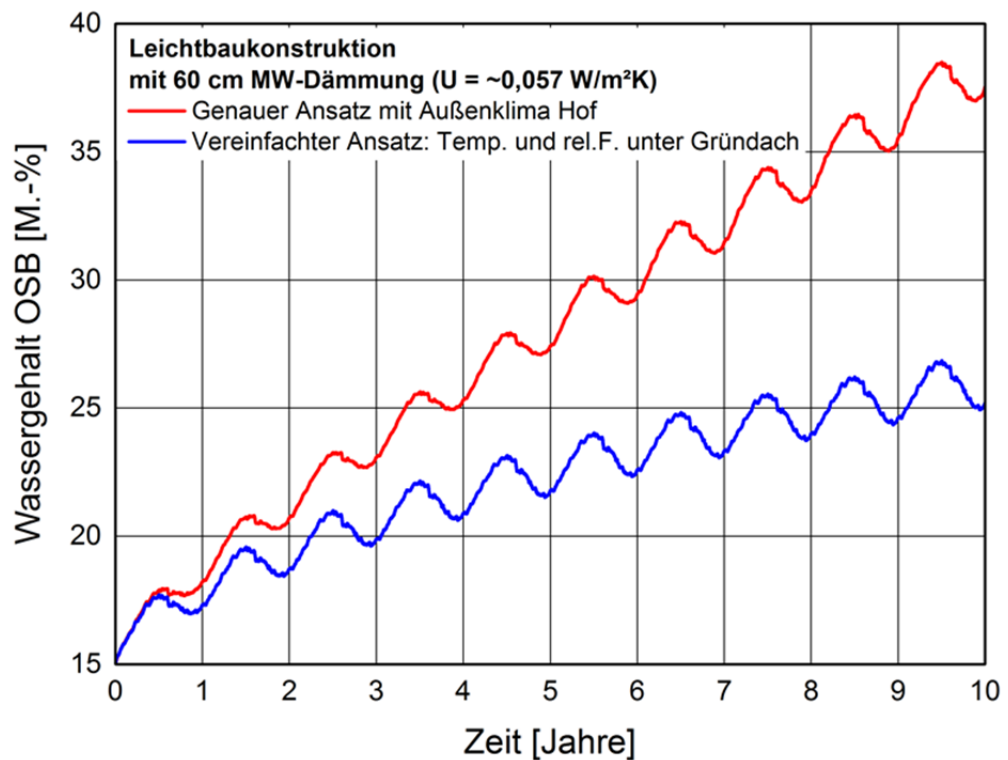


Bild 233:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion über den Berechnungszeitraum von 10 Jahren für einen Dachaufbau mit 60 cm Mineralwollendämmung in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsansatz.

Da die Bandbreite der erzielten Ergebnisse in der Studie sehr groß war, ist allerdings noch eine weitere Einschränkung erforderlich: die Anwendbarkeit des Ansatzes beschränkt sich auf Dachkonstruktionen, die ohne die Begrünung einen U-Wert von größer $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweisen. Bei noch stärker gedämmten Bauteilen liegt der vereinfachte Ansatz nicht ausreichend auf der sicheren Seite.

Der vereinfachte Ansatz kann also für Standorte in Deutschland bis in eine Höhe von etwa 700 m ü. NN und für Dämmniveaus bis zu einem U-Wert von $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$ verwendet werden. Bei noch niedrigeren U-Werten ist eine detaillierte Betrachtung des Aufbaus erforderlich.

5.3 Bestimmung der Variation von Oberflächenübergangskoeffizienten auf Fassaden

Hygrothermische Simulationen werden üblicherweise für den Regelquerschnitt des untersuchten Bauteils durchgeführt. In der Nähe materialbedingter oder geometrischer Wärmebrücken auftretende Abweichungen vom Verhalten im Regelquerschnitt sind hinreichend bekannt und können routinemäßig berücksichtigt werden. Darüber hinaus stellt sich jedoch die Frage, ob auch in hinreichender Entfernung von Wärmebrücken stets mit homogenen Außenoberflächenbedingungen zu rechnen ist und wie repräsentativ ein "Regelquerschnitt" für die gesamte Außenoberfläche des untersuchten Bauteils sein kann, auch

wenn Wärmebrückeneinflüsse ausgeschlossen sind. Eine Einflussgröße, die eine systematische Variation innerhalb einer Fassadenfläche aufweist, ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient.

Aufgrund der ständigen Durchmischung der Atmosphäre stellt sich in der Umgebungsluft eine räumlich gleichmäßige Temperaturverteilung ein. In der Nähe einer Bauteiloberfläche jedoch wird die Durchmischung der Außenluft behindert. Es bildet sich eine dünne, einige Millimeter dicke stagnierende Luftschicht, die an der Oberfläche haftet und von dem durch die Oberfläche tretenden Wärmestrom mittels Wärmeleitung überwunden werden muss. (Der Strahlungsaustausch mit der Umgebung wird hier nicht betrachtet.) Diese Grenzschicht stellt für den Wärmestrom einen Widerstand dar, der die Oberflächentemperatur des Bauteils beeinflusst. Die Temperatur geht innerhalb der Grenzschicht von der Oberflächentemperatur in die Außenlufttemperatur über.

Der Einfluss der Grenzschicht auf den Wärmetransport wird durch den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben. Der Wärmeübergangskoeffizient ist der Kehrwert des Wärmewiderstandes der Grenzschicht. Die Temperaturdifferenz von Außenluft und Oberfläche, multipliziert mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, ergibt den durch die Grenzschicht und damit auch durch die Oberfläche fließenden konvektiven Wärmestrom. Bei zunehmender Windgeschwindigkeit kann sich nur eine dünnere Grenzschicht ausbilden, die einen stärkeren Wärmestrom zulässt. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient nimmt daher mit der Windgeschwindigkeit zu. Typische Werte sind etwa $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s und ca. $14 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei 6 m/s [88].

Theoretische Untersuchungen der Luftströmung an einer längs angeströmten Platte zeigen, dass sich von der angeströmten Kante ausgehend eine Grenzschicht ausbildet, deren Dicke entlang der Plattenlänge zunimmt. Mit zunehmender Entfernung von der Kante hat der Wärmestrom daher eine zunehmend dickere Grenzschicht zu überwinden und der lokale konvektive Wärmeübergangskoeffizient nimmt ab. Es liegen also über die Platte verteilt verschieden große lokale Wärmeübergangskoeffizienten vor.

Gemäß der Potentialtheorie für umströmte scharfe Kanten ist generell ein Ansteigen des Koeffizienten zu den Kanten hin zu erwarten, unabhängig davon, ob es sich um Anström- oder Abströmkanten handelt. Wie Windkanalversuche an einem umströmten Prismenmodell mit quadratischem Grundriss zeigen, stellt sich in der Tat auf allen vier Seiten typischerweise eine etwa parabelförmige Verteilung der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten entlang der Seitenfläche ein [89]. Dies gilt bemerkenswerterweise, obwohl Strömungsablösung an den Kanten Verwirbelungen erzeugt und zu komplizierten Strömungsverhältnissen führt, die sich auf den im Windschatten gelegenen Seiten grundsätzlich von den einfacheren Verhältnissen auf der Anströmseite unterscheiden. Die Details in der Variation des Koeffizienten entlang einer Seitenfläche und die genaue Lage des Minimums hängen von der Winkellage der betrachteten Seite im Verhältnis zur Anströmrichtung ab.

Einen Sonderfall bilden Anströmungen unter Winkeln zwischen 45° und etwa 75° , bei denen wegen kantennaher begrenzter Strömungsablösung auf der Messfläche der Aufbau einer Grenzschicht erst in einiger Entfernung von der Kante beginnt und die am Anfang einer Grenzschichtbildung liegenden hohen Übergangskoeffizienten nicht an der Kante, sondern innerhalb der Messfläche liegen. Da dieser Fall nur in einem sehr eingeschränkten Bereich von Anströmungswinkeln auftritt, wird er im Folgenden nicht weiter betrachtet.

In den meisten Fällen variiert der in den Windkanalversuchen ermittelte Übergangskoeffizient entlang einer Seitenfläche um einen Faktor der Größenordnung zwei. Lediglich Flächen, die um 180° von der windangeströmten Seite abgewandt sind, weisen eine deutlich geringere Variation auf.

In diesen Windkanalversuchen sind die Auswirkungen der endlichen Höhe eines Gebäudes nicht berücksichtigt (die beschriebenen Ergebnisse entsprechen daher etwa den Verhältnissen auf mittlerer Höhe eines Hochhauses). Rechnerische Simulationen der Umströmung eines würfelförmigen Gebäudes [88] erlauben auch Aussagen über die vertikale Verteilung der Wärmeübergangskoeffizienten, also des Einflusses von Boden und Dachkante. Bei einer Windgeschwindigkeit von 0.5 m/s nimmt der konvektive Wärmeübergangskoeffizient auf der angeströmten Seite näherungsweise linear von unten nach oben zu. Entlang der Mittellinie der Fassade steigt er dabei etwa um den Faktor 1.5 an. Die seitliche Variation ist in dieser Situation geringer als in den Windkanalversuchen. Der Koeffizient variiert von der Seitenmitte bis in Kantennähe nur um etwa den Faktor 1.15. Auf der windabgewandten Seite ist die prozentuale vertikale Variation etwa vergleichbar, die seitliche Variation ist gering.

Eine hygrothermische Simulation kann den für jeden Zeitschritt benötigten aktuellen Zahlenwert des konvektiven Übergangskoeffizienten aufgrund der schwankenden Windgeschwindigkeiten und meist nicht genau bekannten Umströmungsverhältnisse nur mit merklichen Unsicherheiten aus der gemessenen Windgeschwindigkeit ermitteln. Eine Abschätzung lässt erwarten, dass diese Unsicherheiten vergleichbar sind mit den ausgeprägteren Fällen der beschriebenen systematischen Variation innerhalb der Fassadenfläche. Die lokalen Variationen können also nicht grundsätzlich gegenüber den anderen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Übergangskoeffizienten vernachlässigt werden.

Der Umstand, dass die Variationsmuster des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für fast alle Anströmrichtungen ähnlich aussehen, eröffnet die Möglichkeit, mittels Thermographie nach diesen Mustern zu suchen, ohne jeweils die aktuelle örtliche (durch umgebende Bebauung beeinflusste) Windrichtung und -geschwindigkeit kennen zu müssen. Es ist dann möglich, über die beschriebenen einfachen Gebäudegeometrien hinaus die Verteilung des Übergangskoeffizienten auch über die Fassaden realer, komplexerer Gebäudeformen zu kartieren.

Ohne Sonneneinstrahlung beträgt der stationäre Wärmestrom durch eine gedämmte Fassade einige Watt pro Quadratmeter. Bei einem typischen konvekti-

ven Wärmeübergangskoeffizienten von $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (entspricht geringer Windgeschwindigkeit) ergibt sich zwischen Oberfläche und Außenluft eine Temperaturdifferenz der Größenordnung ein Grad. Erhöht sich der Übergangskoeffizient nahe der Fassadenkante um den erwähnten Faktor 1.15, so verringert sich diese Temperaturdifferenz um denselben Faktor 1.15, also um ein bis zwei Zehntelgrad. Diese Änderung ist klein, kann aber von einer Thermokamera aufgelöst werden. Die erwartete Änderung des Übergangskoeffizienten mit der Höhe ist größer, zudem ist der Einfluss des Koeffizienten auf die Oberflächentemperatur bei geringer gedämmten Wänden ebenfalls größer.

Die resultierende Temperaturverteilung ist nur auf Fassaden erkennbar, auf denen sie nicht durch anderweitige Inhomogenitäten wie z.B. des Wandaufbaus, des Emissionsgrades oder des Strahlungsaustauschs mit nahegelegenen Gebäuden usw. überdeckt wird. Gebäudeecken stellen geometrische Wärmebrücken dar, in deren Nähe in der Regel ohnehin eine von der Fassadenmitte abweichende Temperatur zu erwarten ist. Der Einfluss einer solchen Wärmebrücke erstreckt sich aber nur bis in etwa eine Wandstärke Abstand von der Ecke [91] und kann daher von der koeffizientenabhängigen Temperaturänderung unterschieden werden.

Im Rahmen des Projektes wurden erste orientierende Thermographie-Aufnahmen verschiedener Gebäude erstellt. Sie sollten Aufschluss darüber geben, in welchem Umfang hinreichend homogene Fassaden anzutreffen sind, ob und wie deutlich die erwarteten Effekte zutage treten und wie praktikabel die Thermographie-Methode für diesen Zweck ist.

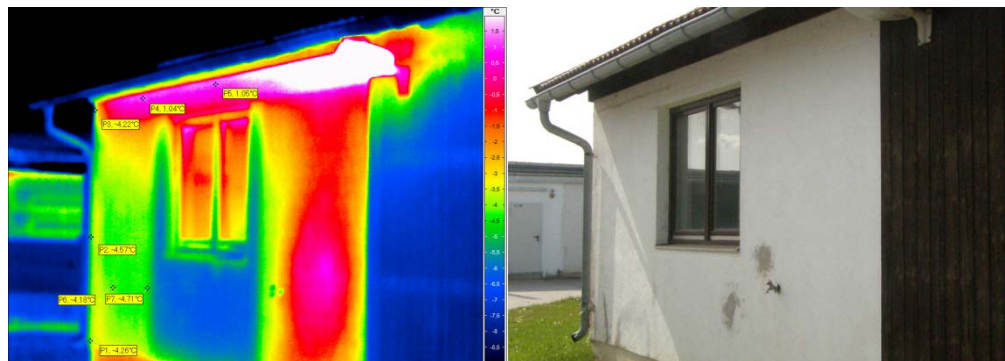


Bild 234:
Thermographie (links) und Fotografie (rechts) der Südwest-Ecke des Gebäudes "Kalkhaus".

Bild 234 zeigt, dass die Forderung nach hinreichender thermischer Homogenität oft nicht erfüllt ist, auch wenn die Fassade optisch homogen erscheint. An diesem Gebäude wurden offenbar Umbauten vorgenommen, so dass die Wand im Bereich des Fensters abweichende thermische Eigenschaften hat und eine Auswertung der Oberflächentemperaturen in diesem Fall nicht zielführend ist.

Die folgenden Thermographie-Aufnahmen wurden im Februar 2014 eine Stunde vor Sonnenaufgang erstellt. Die Außenlufttemperatur betrug -2.4°C , die relative Außenluftfeuchte 100 %, die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe 1 m/s, die Windrichtung war etwa West. Die Vergleichsphotographien wurden im Mai 2016 aufgenommen.

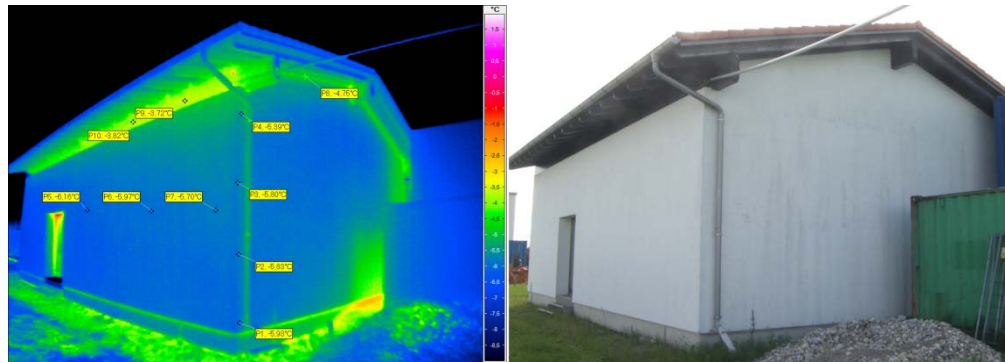


Bild 235:
Thermographie (links) und Fotografie (rechts) der Nordwest-Ecke des Gebäudes "Schulhaus".

Die Temperaturverteilung auf der rechts im Bild gelegenen Westfassade ist durch davorstehende Container zu stark gestört, um auswertbar zu sein.

Die links im Bild gelegene Nordfassade des Gebäudes ist während der Nacht auf etwa -6°C abgekühlt und liegt damit deutlich unter der Lufttemperatur. Eine Verringerung des Temperaturunterschieds infolge eines erhöhten konvektiven Übergangskoeffizienten entspricht daher einer Erhöhung der Oberflächentemperatur. Die Kamera zeigt, dass die Temperatur von der Fassadenmitte bis zur NW-Ecke gleichmäßig um etwa ein halbes Kelvin zunimmt. Dies läge im Bereich der Erwartung. Es fällt jedoch auf, dass die Temperatur nur nach rechts zunimmt, während sie zur linken Ecke hin abfällt, so dass nicht die erwartete symmetrische Verteilung vorliegt.

Die Oberflächentemperatur steigt auch in vertikaler Richtung an, hier ist jedoch offenbar die vor nächtlicher Wärmeabstrahlung schützende Wirkung des Dachüberstands maßgeblich.

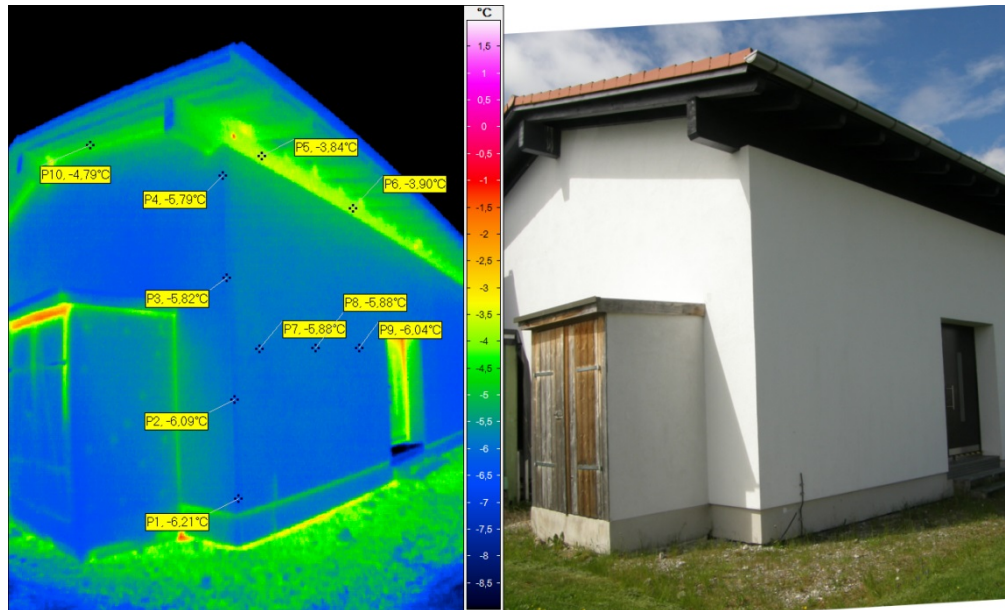


Bild 236:
Thermographie (links) und Photographie (rechts) der Nordost-Ecke des Gebäudes "Schulhaus".

Bild 236 zeigt dieselbe Nordfassade, jedoch aus Richtung der im letzten Bild "kalten" NO-Ecke. Nun ist es diese Ecke, die wärmer erscheint als die Fassadenmitte, während die Fassade nach Westen (rechts) hin kontinuierlich kühler erscheint.

Der Vergleich der beiden Thermographien zeigt einander widersprechende Temperaturverteilungen auf derselben Fassade. Sofern die geringere Temperatur des jeweils fernereren Fassadenbereichs nicht durch eine Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades vorgetäuscht wird (in flacherem Winkel zur Sendefläche wird weniger Wärmestrahlung abgegeben), könnten Randverluste ("Vignettierung") im optischen System der Kamera die am Rand des Bildfeldes gelegenen Bildteile kühler erscheinen lassen. Hier zeigen sich möglicherweise grundsätzliche Probleme beim Versuch, geringe Temperaturdifferenzen auf Flächen zu thermographieren, die einen großen Winkel im Gesichtsfeld einnehmen.

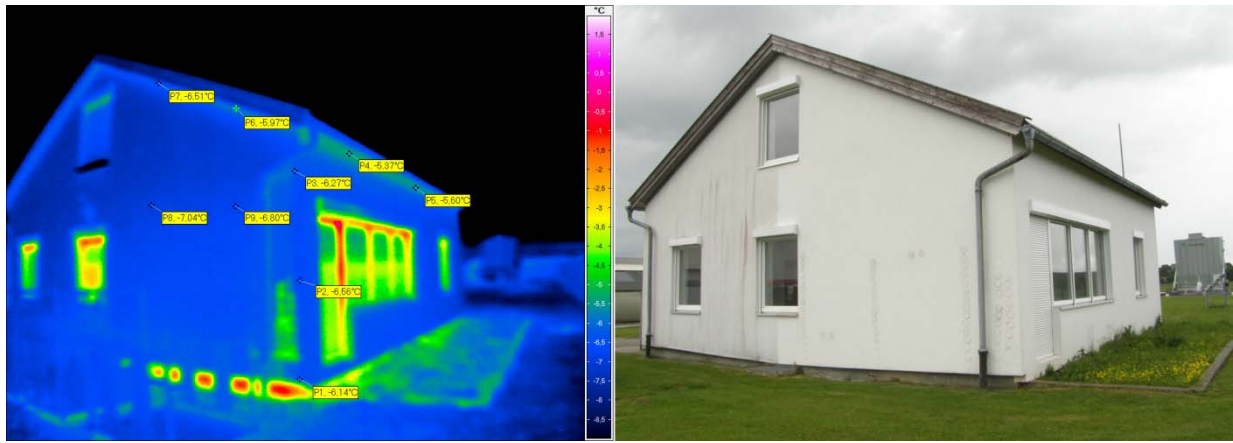


Bild 237:
Thermographie (links) und Fotografie (rechts) der Südwest-Ecke des Gebäudes "Zwillingshaus".

Auf dieser Thermographie (Bild 237 links) ist, ähnlich wie bei der Nordfassade des Schulhauses, ein Temperaturverlauf erkennbar, wie er der Erwartung entspricht. Jedoch ist auch hier der beobachtete Verlauf entlang der Fassade nicht symmetrisch. Die beobachterferne Ecke erscheint wiederum kälter als die beobachternaher Ecke, was möglicherweise ebenfalls auf den bereits beschriebenen Randverlust im optischen System der Thermokamera zurückzuführen ist.

Die Thermographien der weiteren auf dem Freigelände untersuchten Gebäude zeigen zu starke Inhomogenitäten der Fassadenflächen (vgl. Bild 234) und werden daher nicht dargestellt.

5.3.1 Zusammenfassung

Die Grenzschichttheorie lässt erwarten, dass der konvektive Wärmeübergangskoeffizient auf einer Fassadenfläche nicht konstant ist,

sondern zu den Gebäudeecken hin ansteigt. Der Literatur entnommene Ergebnisse von Windkanalversuchen und Strömungssimulationen erlauben, die Stärke dieser Variation innerhalb einer Fassadenfläche abzuschätzen. In den ausgeprägteren Fällen liegt die Variation in derselben Größenordnung wie die Unsicherheit, die aufgrund der nicht genau bekannten individuellen Umströmungsverhältnisse bei der Ermittlung des Koeffizienten aus der Windgeschwindigkeit vorliegt. Die systematische Variation kann daher in der Regel unbeachtet bleiben, kann aber bei höheren Genauigkeitsansprüchen, bei systematischen Parameterstudien oder bei detaillierten Vergleichen zwischen Messung und Rechnung eventuell von Bedeutung sein.

Zur Abschätzung der Relevanz und Übertragbarkeit der theoretischen Abschätzungen für hygrothermische Simulationen von Praxisfällen mit komplexeren Gebäudegeometrien wurden orientierende Beobachtungen mit einer Thermokamera durchgeführt. Die aus der Variation des Übergangskoeffizienten re-

sultierende Temperaturvariation sollte gering sein, aber von einer Thermokamera aufgelöst werden können.

Die Temperaturvariation darf nicht durch anderweitig verursachte Temperaturschwankungen verdeckt werden, wie sie durch inhomogenen Wandaufbau verursacht werden. Wie die Aufnahmen zeigen, sind vor allem außenge-dämmte Fassaden aufgrund ihres einheitlichen Aufbaus für die Untersuchung geeignet.

Die Beobachtung einer nächtlich unterkühlten Fassade am Gebäude "Schulhaus" zeigt ansatzweise den erwarteten Effekt. Inkonsistente Ergebnisse bei Betrachtung dieser Fassade aus verschiedenen Blickrichtungen lassen jedoch vermuten, dass die Temperaturmessung nicht völlig gleichmäßig über das gesamte Gesichtsfeld der Kamera erfolgt (Randverluste, "Vignettierung"). Trotz der vergleichsweise hohen Auflösung der verwendeten Thermokamera ist ihre Homogenität über das gesamte Gesichtsfeld vermutlich nicht ausreichend, um die geringe Variation über eine größere Fläche sicher abzubilden. Diese instrumentenbedingte Beschränkung wäre für weiterführende Untersuchungen näher zu bestimmen.

Trotz der festgestellten instrumentellen Einschränkungen sind in der Praxis keine Variationen des Übergangskoeffizienten ermittelbar, die über die theoretische Erwartung hinausgehen und in eine regulären hygrothermischen Simulation gesondert berücksichtigt werden müssen. Damit können auch für die randnahen Bereiche und Ecken der Fassaden mit ausreichender Genauigkeit dieselben Wärmeübergangskoeffizienten herangezogen werden wie für den Regelquerschnitt. Im Unterschied zur Raumseite mit Differenzen von 8 K und mehr (Wärmebrückenbemessung) wurden auf der Außenoberfläche zwischen Regelquerschnitt und kritischem Eckbereich maximale, umströmungsbedingte Temperaturdifferenzen von knapp 1 K ermittelt. Zwar gibt es geschützte Positionen, die auf der günstigen Seite weiter abweichen – diese sind aber für die Bemessung nicht relevant. Eine der raumseitigen Bemessung von Wärmebrücken vergleichbare Betrachtung kritischer Positionen erscheint auf der Außenseite daher nicht erforderlich zu sein.

5.4 Identifikation von Positionen mit kritischer Windexposition

Ist die Bauteiloberfläche nach Beregnung feucht, senkt die Verdunstungskühlung die Oberflächentemperatur ab. Wird nur ein vernachlässigbarer Wärmestrom aus dem Bauteil an dessen Oberfläche geliefert (wie es bei gut gedämmten Bauteilen der Fall ist), so muss im stationären Zustand die zur Verdunstung aufzuwendende Latentwärme durch den konvektiven Wärmestrom aus der Umgebungsluft ersetzt werden. Der zugeführte konvektive Wärmestrom hängt vom konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ab. Der abgeführte Latentwärmestrom andererseits ist proportional zum abgeführten Dampfstrom und hängt damit vom Dampfübergangskoeffizienten ab. Dieser ist wiederum proportional zum konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, so dass sich, wenn im stationären Gleichgewicht beide Wärmeströme betragsmä-

Big gleichgesetzt werden, der Wärmeübergangskoeffizient auf beiden Seiten der Gleichung herauskürzt.

Die abgesenkte Oberflächentemperatur ist daher unabhängig vom Wärmeübergangskoeffizienten. Es ist deshalb nicht möglich, aus der beobachteten Verdunstungskühlung auf den jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten oder gar auf dessen Windgeschwindigkeits-Abhängigkeit zu schließen. Dennoch nimmt - wie die alltägliche Erfahrung zeigt - der Betrag der Kühlung im Allgemeinen mit der Windgeschwindigkeit zu. Der Grad der Temperaturabsenkung ist, wie die Bilanzgleichung zeigt, von der Differenz der Dampfdrücke an der Oberfläche und in der Umgebungsluft abhängig. Bei der psychrometrischen Luftfeuchtemessung wird dieser Zusammenhang genutzt: Aus der Temperaturabsenkung wird auf den Dampfdruck der Umgebungsluft geschlossen. Bei einer psychrometrischen Messung muss jedoch verhindert werden, dass die in die Umgebungsluft verdunstende Feuchtigkeit deren Dampfdruck verfälscht. Daher ist dafür zu sorgen, dass durch ausreichende Ventilation der Verdunstungsfläche die verdunstete Feuchtigkeit umgehend abgeführt wird. Bei Psychrometern wird dazu im Allgemeinen eine Ventilationsgeschwindigkeit ab 2 m/s als ausreichend angesehen. Dann wird die von der Ventilationsgeschwindigkeit unabhängige Kühlgrenztemperatur erreicht. Bei geringeren Ventilationsgeschwindigkeiten hingegen ist die Kühltemperatur von der Windgeschwindigkeit abhängig. Dieser in der Psychrometrie unerwünschte Effekt lässt sich daher prinzipiell zur Beobachtung der anliegenden Windgeschwindigkeit nutzen: Bei nicht zu hohen Windgeschwindigkeiten ist die beobachtete Kühltemperatur einer befeuchteten Oberfläche ein Maß für die anliegende Windgeschwindigkeit. Bei zu hohen Windgeschwindigkeiten hingegen ist die Kühlgrenztemperatur erreicht und es kann zwar das Vorliegen von Wind festgestellt, aber nicht nach Windgeschwindigkeiten differenziert werden.

Bei größeren Verdunstungsflächen, wie z.B. Fassaden, wird im Vergleich zur punktförmigen Verdunstungsfläche des Psychrometers eine größere Anströmgeschwindigkeit benötigt werden, um die Kühlgrenztemperatur und damit die Grenze der Beobachtungsmethode zu erreichen. Es erscheint daher möglich, dass bei üblichen Windgeschwindigkeiten von wenigen Metern pro Sekunde die beobachtete Verdunstungskühlung einer berechneten Fassade dazu benutzt werden kann, der Windströmung besonders ausgesetzte Stellen des Gebäudes zu identifizieren. Die einfach anzuwendende Methode könnte eine gesamte Fassade mit einer einzigen Thermographie-Aufnahme untersuchen. Quantitative Aussagen über lokale Windgeschwindigkeiten sind wegen des nicht wohldefinierten Zusammenhangs zwischen Windgeschwindigkeit und Feuchteabfuhr allerdings nicht zu erwarten. Bei einer relativen Feuchte der Umgebungsluft von 80 % (nach Regen) liegt die Kühlgrenztemperatur etwa zwei Kelvin unter der Umgebungslufttemperatur. Die zu beobachtenden Temperaturvariationen sind in diesem Fall im Bereich zwischen Null und zwei Kelvin zu erwarten. Bei 90 % beträgt der Kühleffekt etwa ein Kelvin, bei 95 % etwa ein halbes Kelvin.

Die folgenden Thermographie-Aufnahmen wurden im Juli 2015 zweieinhalb Stunden nach Sonnenaufgang in einer Regenpause erstellt. Die Außenlufttemperatur betrug 18°C, die relative Außenluftfeuchte 95 %, die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe 3 m/s, die Windrichtung war Südwest. Die Vergleichsphotographien wurden im Mai 2016 aufgenommen.

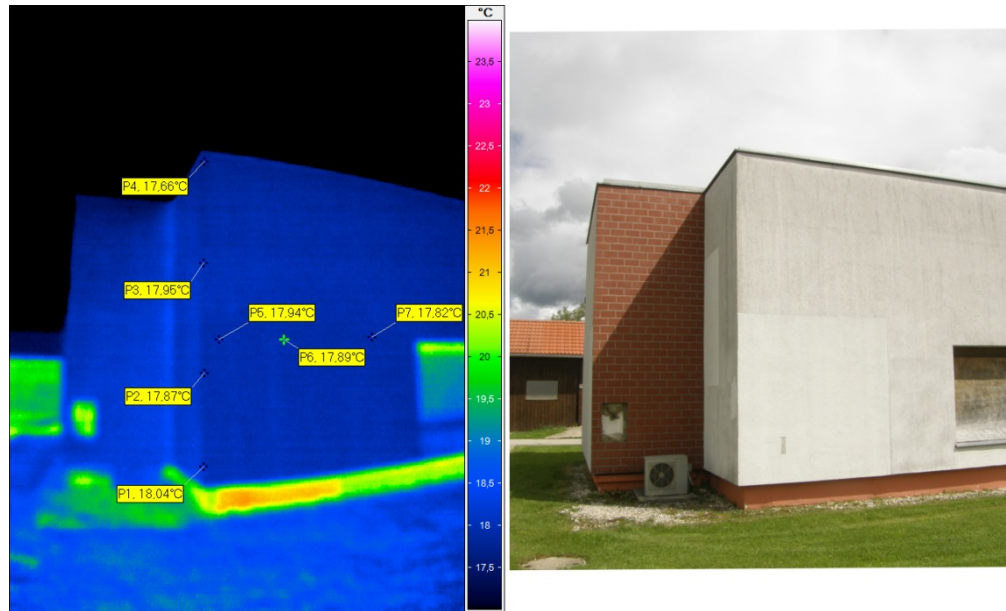


Bild 238:
Thermographie (links) und Fotografie (rechts) der Südwest-Ecke des Gebäudes "Ziegelhalle".

Die SW-Ecke dieses Gebäudes war dem Schlagregen direkt ausgesetzt. Die gut 5 m hohe Südfassade trägt eine Außendämmung, bietet also eine thermisch homogene Oberfläche. Es ist keine signifikante großflächige Variation der Oberflächentemperatur entlang der Breite oder der Höhe der Fassade zu erkennen.

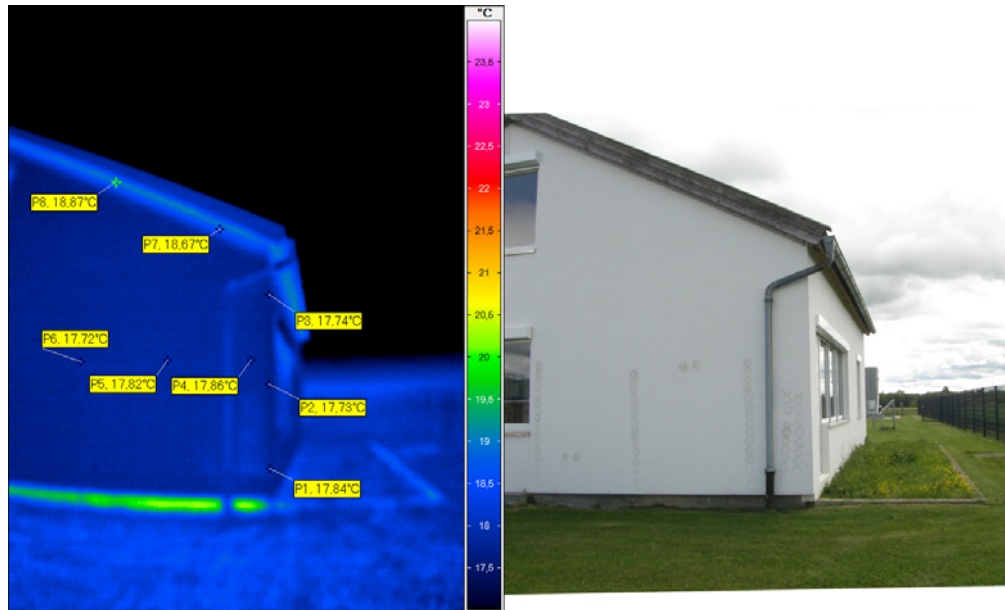


Bild 239:
Thermographie (links) und Fotografie (rechts) der Südwest-Ecke des Gebäudes "Zwillingshaus Süd".

Die SW-Ecke dieses Gebäudes war dem Schlagregen direkt ausgesetzt. Die hier betrachtete Westfassade trägt eine Außendämmung. Es ist keine signifikante großflächige Variation der Oberflächentemperatur entlang der Breite oder der Höhe des Gebäudes zu erkennen. Ein etwas wärmerer Fleck im unteren Bereich zwischen Regenfallrohr und Ecke ist offenbar auf Inhomogenitäten infolge früherer Probennahmen aus der Dämmung zurückzuführen.

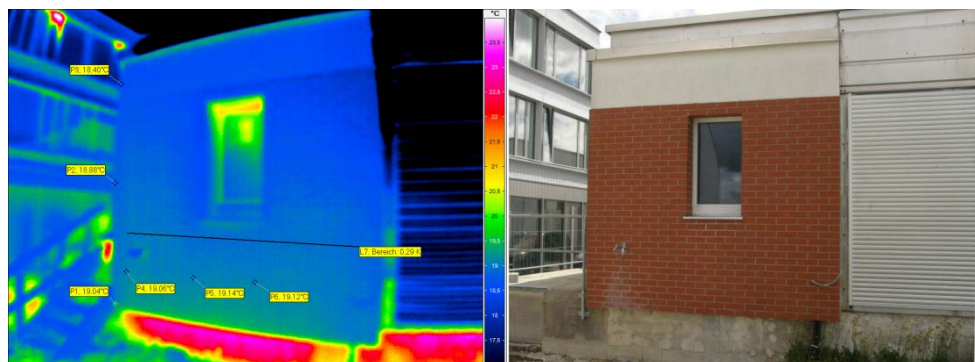


Bild 240:
Thermographie (links) und Fotografie (rechts) der Nordwest-Ecke des Gebäudes "Versuchshalle".

Die hier betrachtete Westfassade war dem Schlagregen direkt ausgesetzt. Die mit Ziegelriemchen verkleidete Außendämmung bietet - von den Fugen abgesehen - eine thermisch homogene Oberfläche von 3.2 m Breite und 2.6 m Höhe. Der Farbverlauf der Thermographie zeigt deutlich, dass der untere Teil der

Riemchenfassade ein knappes Kelvin wärmer ist als der obere Teil. Dies entspräche qualitativ der Erwartung, dass in Bodennähe eine reduzierte Windgeschwindigkeit herrscht.

Im oberen Teil der Riemchenfassade ist nicht, wie zu erwarten wäre, die links gelegene Gebäudeecke der exponierteste und damit kühlste Bereich. Besonders kühl ist der Bereich in der Nähe der rechten Kante des Fassadenteils. Dies könnte damit zusammenhängen, dass an dieser Stelle der zu Versuchszwecken angebrachte Außendämmungsabschnitt endet und die Riemchenfassade über eine 17 cm tiefe Kante in die ungedämmte Fassade übergeht. Der aus Südwest kommende und entlang der betrachteten Westfassade nach Norden umgeleitete Wind streicht von rechts her über diese vorstehende Kante und wird möglicherweise verwirbelt, so dass die Kühlwirkung in diesem kantennahen Bereich besonders stark ist. Falls diese hier nur an einem Einzelfall gewonnene Interpretation korrekt ist, wäre damit ein bisher nicht vermuteter der Windwirkung besonders exponierter Fassadenbereich identifiziert.

5.4.1 Zusammenfassung

Mit einer Thermokamera sollte es auch möglich sein, aufgrund der Verdunstungskühlung regennasser Fassaden besonders windexponierte Stellen ohne großen Aufwand zu kartieren. Die zu diesem Zweck angefertigten Thermographien lassen jedoch zum größten Teil keinen entsprechenden Temperatureffekt erkennen, obwohl trotz der hohen relativen Feuchte der Außenluft eine thermographisch beobachtbare Verdunstungskühlung in der Größenordnung von etwa einem halben Kelvin zu erwarten wäre.

Möglicherweise war bei der an der Wetterstation gemessenen Windgeschwindigkeit von 3 m/s auch die Ventilationsgeschwindigkeit an der Fassade hoch genug, um überall die Kühlgrenztemperatur zu erreichen. Infolgedessen traten auch keine beobachtbaren Temperaturvariationen mehr auf. Eine Wiederholung der Beobachtungen unter variierten Klimabedingungen war bisher aufgrund der Seltenheit der erforderlichen meteorologischen Situation nicht möglich – und erscheint daher auch für die konkrete Anwendung weniger praktikabel als erhofft.

5.5 Zweidimensionalen Wärmebrücken an Wandecken in der ein- und zweidimensionalen hygrothermische Simulation

5.5.1 Problemstellung und Ziel

Hygrothermische Simulationsprogramme können unter anderem dazu verwendet werden das Schimmelrisiko an der Innenoberfläche von Bauteilen zu beurteilen. Abweichend von den meisten Wärmebrückenberechnungsprogrammen, die das stationäre Verhalten einer Wärmebrücke und die Oberflächentemperaturen unter fest definierten Randbedingungen betrachten, leistet die hygrothermische Simulation dies unter instationären Bedingungen und mit Berücksichtigung der Feuchtespeicher- und Feuchtetransporteigenschaften der einge-

setzten Materialien. Eine realitätsnahe Betrachtung unter realen Klimabedingungen ist somit möglich. Die Simulationsergebnisse können im Zusammenspiel mit Schimmelpilzwachstumsmodellen dazu verwendet werden das Schimmelrisiko zu quantifizieren.

Besonders schimmelgefährdet sind vor allem diejenigen Bereiche, bei denen es auf Grund stofflicher oder geometrischer Wärmebrücken zu niedrigeren Innenoberflächentemperaturen als im Regelquerschnitt kommt. Die Bereiche bei denen häufig Schimmelpilzwachstum beobachtet wird, sind zwei- und dreidimensionale Außenecken sowie Fensterleibungen. Hierbei kann eine falsche Sanierungsstrategie die Schimmelproblematik sogar verschärfen. Wird zum Beispiel eine reine Fenstererneuerung ohne zusätzliche Dämmmaßnahmen durchgeführt, kann dies durch die erhöhte Luftdichtheit der neuen Fenster, bei gleichbleibendem Lüftungsverhalten der Bewohner zu erhöhten relativen Luftfeuchten im Innenraum führen. In Kombination mit gleichbleibenden Oberflächentemperaturen an den kritischen Positionen erhöhen sich also die Oberflächenfeuchten an den kritischen Positionen bis hin zur Tauwasserbildung. In solchen Fällen ist es sinnvoll und hilfreich das bestehende Risiko vorher zu prognostizieren oder bei bereits eingetretenen Schäden die Ursachen sowie eine mögliche Sanierung durch eine Simulation zu identifizieren.

Die hier vorgestellten Untersuchungen behandeln die Oberflächenübergangparameter für die hygrothermische Simulation von zweidimensionalen Außenwandecken bzw. sog. Außenkanten. Die Innenoberflächentemperatur einer solchen Außenkante wird durch die geometrische Wärmebrücke an sich sowie durch den reduzierten Wärmeübergang auf der Raumseite beeinflusst.

Durch das in der Kante reduzierte Sichtfeld ergibt sich gegenüber dem Regelquerschnitt ein anderer Strahlungsaustausch mit den Umfassungsflächen. In Verbindung mit der geometrischen Wärmebrücke verändert sich die Temperaturdifferenz zwischen Innenoberfläche und Raumluft, was wiederum die Luftströmung in der Ecke und damit auch den konvektiven Wärme- und Feuchteübergang beeinflusst. Auf Grund der variablen Raumgeometrie und fehlender Informationen zu den übrigen Umschließungsflächentemperaturen wird baupraktisch der innenseitige Wärmeübergangskoeffizient meist pauschal aus einem konvektiven und einem strahlungsbedingten Anteil als effektiver Wert zusammengefasst. Bei Annäherung an den Eckbereich ist aus den o.g. Gründen von einer Reduktion des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten auszugehen – für den Einsatz in Simulationsverfahren stehen bisher aber kaum belastbare Werte für diesen Bereich zur Verfügung. Ziel dieser Untersuchung ist es daher, effektive Wärmeübergangskoeffizienten für die hygrothermische Simulation zu ermitteln, um die Temperaturen und somit das Schimmel-Risiko in zweidimensionalen Ecken genauer als bisher prognostizieren zu können. Für die hygrothermische Simulation stehen derzeit meist ein- und zweidimensionale Berechnungsprogramme zur Verfügung – dreidimensionale Modelle werden nur vereinzelt im wissenschaftlichen Bereich, aber nicht in der Baupraxis eingesetzt. Da bei eindimensionalen Simulationen der Eingabe- und Rechenaufwand im Vergleich zu den zweidimensionalen Berechnungen wesentlich geringer ist,

werden diese in der Praxis weitaus häufiger eingesetzt. Aus diesem Grund sollen soweit möglich die für die zweidimensionale Simulation ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten auch in Form effektiver Parameter für die Anwendung in eindimensionalen Simulationen übertragen und verfügbar gestellt werden.

5.5.2 Literaturrecherche

Eine Literaturrecherche soll zu Beginn der Untersuchungen den aktuellen Kenntnisstand klären. Die Erkenntnisse dienen als Basis für die Freilandversuche und die im Anschluss durchgeführten hygrothermischen Simulationen an verschiedenen Wandaufbauten.

Literaturquellen, die den Wärme- und Feuchteübergang an Raumaufbauecken und -kanten näher beschreiben, sind vor allem Erhorn et al. 1988 [88] sowie Erhorn und Szerman 1992 [89] sowie die darin genannten Primärliteraturquellen. Die beiden genannten Quellen basieren nicht ausschließlich auf theoretischen Betrachtungen, sondern beinhalten ebenso die Ergebnisse von Laborversuchen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen kurz zusammengefasst: Messergebnisse an einem Versuchsraum ergeben eine deutliche Lufttemperaturschichtung über die Raumhöhe, die in Bild 241 dargestellt ist. Bei einer eingestellten Soll-Raumlufttemperatur von 21 °C stellte sich in Bodennähe eine Temperatur von ca. 17,6 °C und in Deckennähe des ca. 2,3 m hohen Raumes ein Wert von 22,4 °C ein, es ergibt sich ein Temperaturunterschied von 4,8 K.

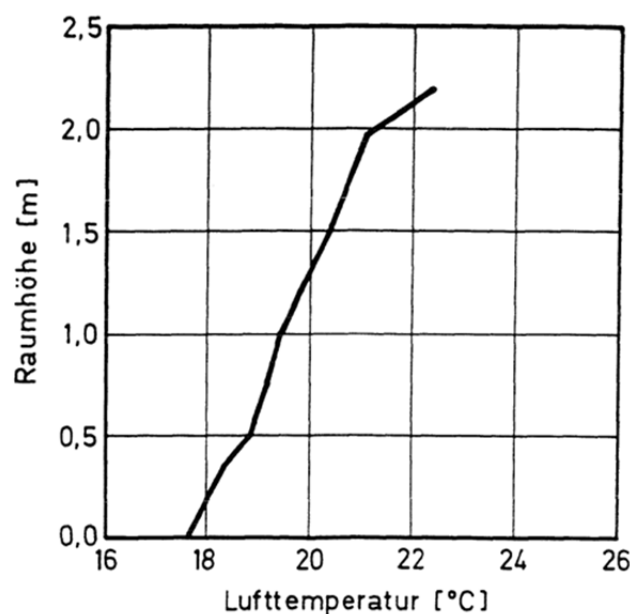


Bild 241: Lufttemperaturverteilung in Versuchsraummitte in Abhängigkeit der Raumhöhe aus [88].

Auf Grund dieser Temperaturschichtung können die ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten entweder auf die Temperatur in der jeweiligen Raumhöhe oder auf die mittlere Raumlufthtemperatur bezogen werden. Der Autor macht hier zweckmäßigerweise Angaben zu beiden Varianten: Einmal auf die Lufttemperatur in der Messebene auf halber Raumhöhe und einmal in verschiedenen Höhen jeweils auf die mittlere Raumlufthtemperatur bezogen. Die Untersuchungsergebnisse des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten an einer Außen-ecke sind in Bild 242 dargestellt.

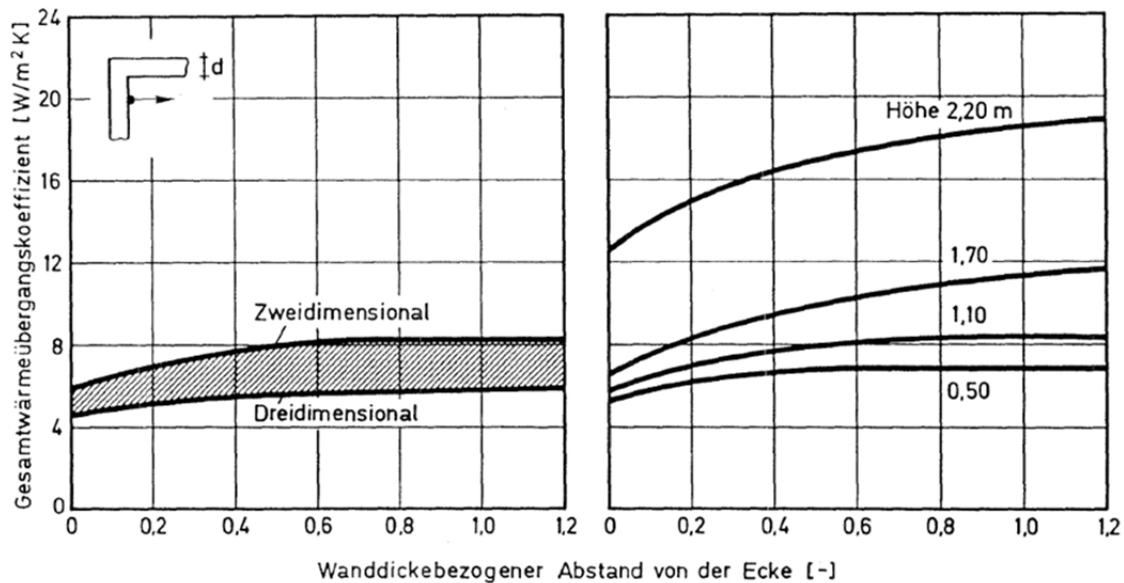


Bild 242:
Gesamtwärmeübergangskoeffizienten an einer monolithischen Außenwand-ecke in Abhängigkeit von dem auf die Wanddicke bezogenen Eckenabstand. Einmal sind die Werte bezogen auf die mittlere Raumlufthtemperatur in der Messebene auf halber Raumhöhe (links) und das andere Mal auf die mittlere Raumlufthtemperatur dargestellt für verschiedenen Höhen (rechts) aus [88].

Bild 242 zeigt, dass der Gesamtwärmeübergangskoeffizient von der Raumecke ausgehend in Richtung ungestörten Regelquerschnitt der Wand zunimmt. Direkt im Eckbereich ist mit den geringsten Wärmeübergangskoeffizienten zu rechnen. Der Autor gibt die Einflussbreite mit ca. der einfachen Wandstärke an. Weiterhin ist die Problematik eines Bezuges auf die mittlere Raumlufthtemperatur ersichtlich. Wird diese als Berechnungsgrundlage herangezogen, ergeben sich auf Grund der realen Raumlufthtemperaturschichtung höhenabhängige Wärmeübergangskoeffizienten.

Auf Basis der Literaturangaben wird der Gesamtwärmeübergangskoeffizient im Eckbereich, bezogen auf die mittlere Raumlufthtemperatur, in Abhängigkeit der Höhe in Bild 243 als Exponentialfunktion dargestellt:

$$\alpha_{i,e} = 5,53 + 0,0239 * e^{(2,574 * h)} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$\alpha_{i,e}$ = Gesamtwärmeübergangskoeffizient im Eckbereich $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

h = Raumhöhe [m]

Bild 243 zeigt, dass sich der Wärmeübergangskoeffizient im Eckbereich von ca. 5,6 W/(m²K) in der unteren Raumhälfte auf Grund der ausgeprägten Temperaturschichtung über die Raumhöhe auf knapp 13 W/(m²K) im Deckenbereich erhöht.

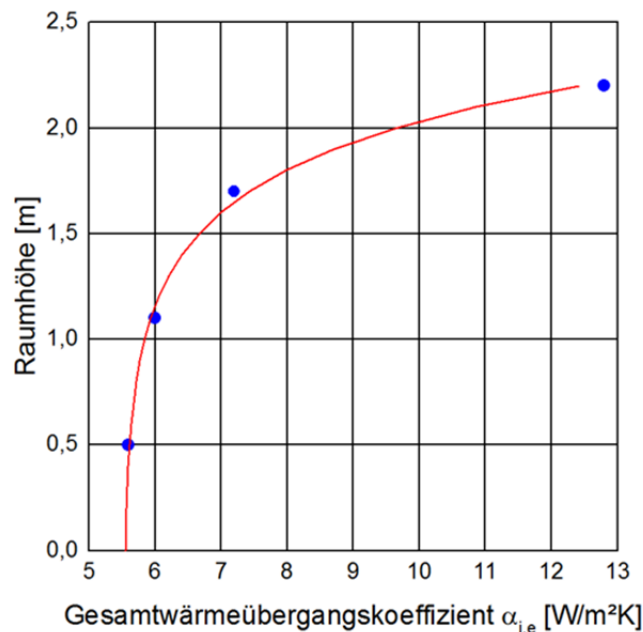


Bild 243:
Gesamtwärmeübergangskoeffizient im Eckbereich einer monolithischen Außenwand in Abhängigkeit von der Raumhöhe, bezogen auf die mittlere Raumlufttemperatur. Literaturangaben sind als blaue Punkte, die selbst ermittelte Funktion als rote Linie dargestellt.

Bei den Untersuchungen wurde zusätzlich die Aufteilung des konvektiven- und strahlungsbedingten Anteils des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten in der Ecke untersucht. Die Ergebnisse sind für den konvektiven Anteil in Bild 244 und für den strahlungsbedingten Anteil in Bild 246 dargestellt.

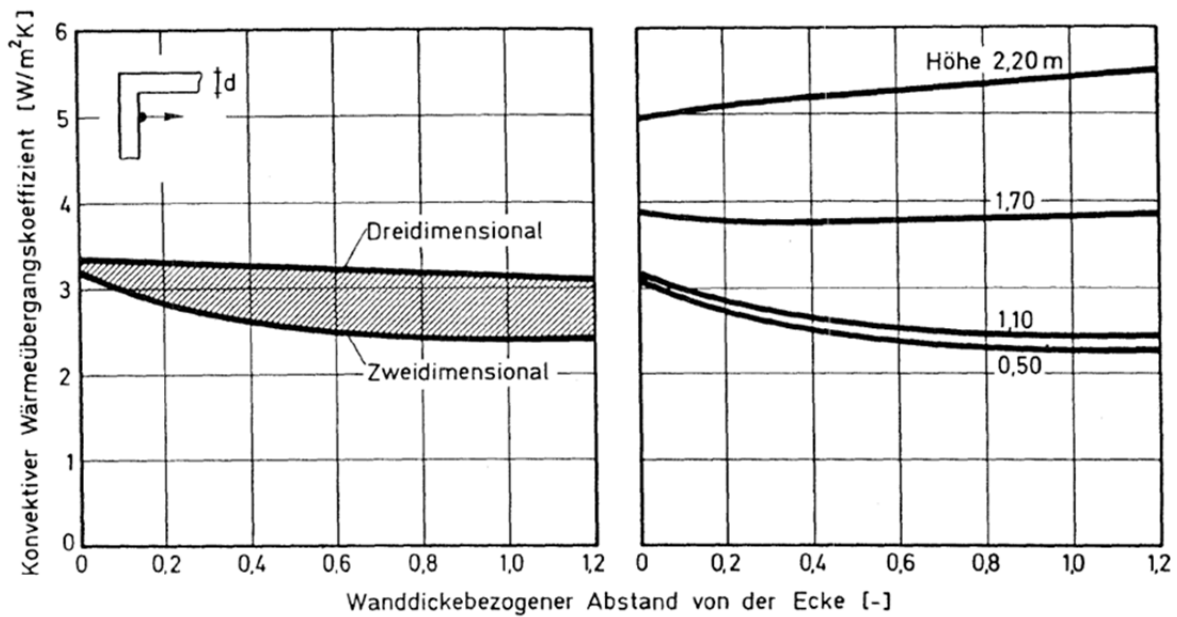


Bild 244:

Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten an einer monolithischen Außenwanddecke in Abhängigkeit vom auf die Wanddicke bezogenen Eckenabstand. Bezugsgröße ist einmal die mittlere Raumlufttemperatur in der Messebene auf halber Raumhöhe (links) und einmal die mittlere Raumlufttemperatur in verschiedenen Höhen (rechts) aus [88].

Die Darstellung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in Bild 244 zeigt eine Zunahme in Richtung der Raumecke. Durch die geometrische Wärmebrücke im Eckbereich ergeben sich gegenüber dem Regelquerschnitt geringere Oberflächentemperaturen und somit größere Temperaturdifferenzen zur Raumluft. Diese wiederum führen zu einem größeren konvektiven Wärmestrom und zu einer erhöhten Luftgeschwindigkeit im Eckbereich, was den konvektiven Wärmeübergang zusätzlich erhöht.

In Bild 245 zeigen die Autoren von [88] und [89] die Messergebnisse der vertikalen Luftgeschwindigkeit im Regelquerschnitt und im Eckbereich über die Raumhöhe aufgetragen. Die erwähnte unterschiedliche Radiatorenordnung wird nicht näher beschrieben. Ersichtlich ist jedoch, dass zumindest unterhalb der Höhe von ca. 1,7 m die Strömungsgeschwindigkeit im Eckbereich im Vergleich zu der im Regelquerschnitt erhöht ist. In Bodennähe wird die Luft umgelenkt und abgebremst, wodurch sich hier an beiden Positionen geringere Luftgeschwindigkeiten ergeben. Ebenfalls geringere Luftgeschwindigkeiten werden in beiden Fällen im Deckenbereich festgestellt. Eine Erklärung hierfür ist nicht gegeben. Es liegt jedoch nahe, dass erst die Beschleunigung längs der Wand bzw. Ecke zu den erhöhten Luftgeschwindigkeiten führt. Im Deckenbereich wird dadurch Luft aus allen Richtungen „nachgesaugt“, was die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten in vertikaler Richtung zur Ecke hin erklären könnte.

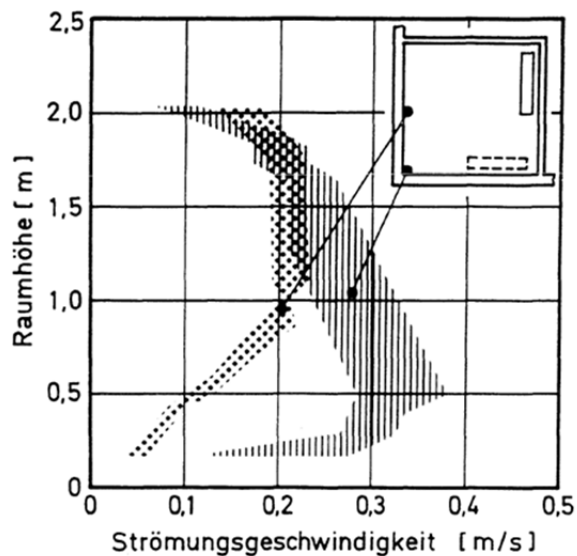


Bild 245: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten in der ungestörten Mitte der Außenwand und der Außenwanddecke in verschiedenen Raumhöhen bei unterschiedlichen Radiatoranordnungen aus [88].

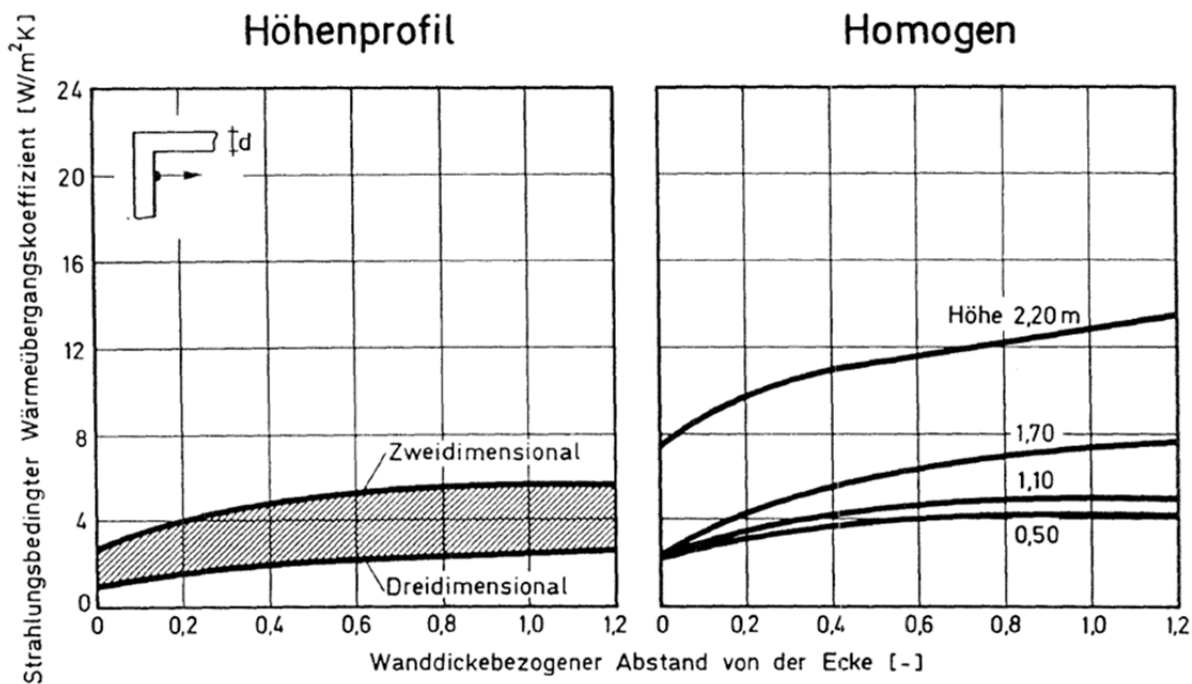


Bild 246: Strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizienten an einer monolithischen Außenwanddecke in Abhängigkeit vom wanddickenbezogenen Eckenabstand, bezogen auf die mittlere Raumlufttemperatur in der Messebene auf halber Raumhöhe (links) und bezogen auf die mittlere Raumlufttemperatur dargestellt für verschiedenen Höhen (rechts) aus [88].

Bei der Darstellung des strahlungsbedingten Wärmeübergangskoeffizienten in Bild 246, rechts fällt auf, dass dieser direkt im Eckbereich (Abstand =0) für die Höhen 0,5 sowie 1,1 und 1,7 m anscheinend konstant ca. 2,3 W/(m²K) beträgt jedoch im weiteren Höhenverlauf stark ansteigt. Bei der Höhe von 2,2 m beträgt er dann bereits ca. 7,4 W/(m²K). Da sich die Sichtfaktoren der Strahlungspartner eines Punktes direkt in der Ecke, beim vertikalen Verschieben nur geringfügig in Bezug auf die Decke und den Boden ändern, muss die Begründung hierfür in der Temperaturdifferenz der Strahlungspartner oder in der Berechnungsmethodik bzw. den zu Grunde liegenden Daten gesucht werden.

Auf Basis der vom Autor zur Verfügung gestellten Angaben lässt sich für verschiedene Punkte im Eckbereich mittels hygrothermischer Simulation die Oberflächentemperatur in der Ecke berechnen. Die Oberflächentemperaturverteilung ist in Bild 247 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Oberflächentemperatur im Eckbereich nicht linear mit der Höhe zunimmt. Im oberen Bereich stellen sich wesentlich höhere Oberflächentemperaturen ein als im unteren und mittleren Bereich der zweidimensionalen Ecke.

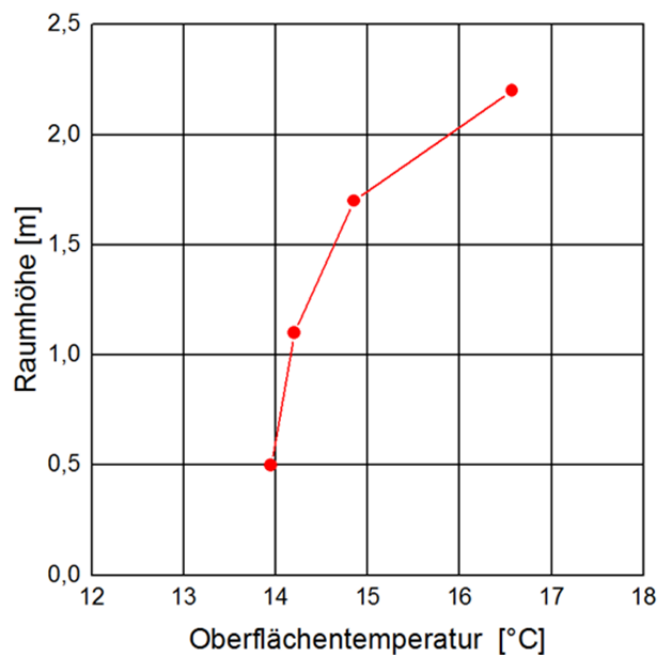


Bild 247:

Aus den genannten Versuchsbedingungen berechnete Oberflächentemperatur im Eckbereich in Abhängigkeit der Raumhöhe.

In Verbindung mit dem gegebenen Lufttemperaturprofil über die Raumhöhe wird die reale Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft in der jeweiligen Höhe und der Oberfläche ermittelt. Bild 248 zeigt diese Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der Raumhöhe. Obwohl im oberen Bereich der Ecke wesentlich höhere Oberflächentemperaturen vorliegen, ist die Temperaturdifferenz zur

Raumluft in diesem Bereich im Vergleich zu den unteren Punkten mit geringeren Oberflächentemperaturen um nochmal mehr als 1 K höher.

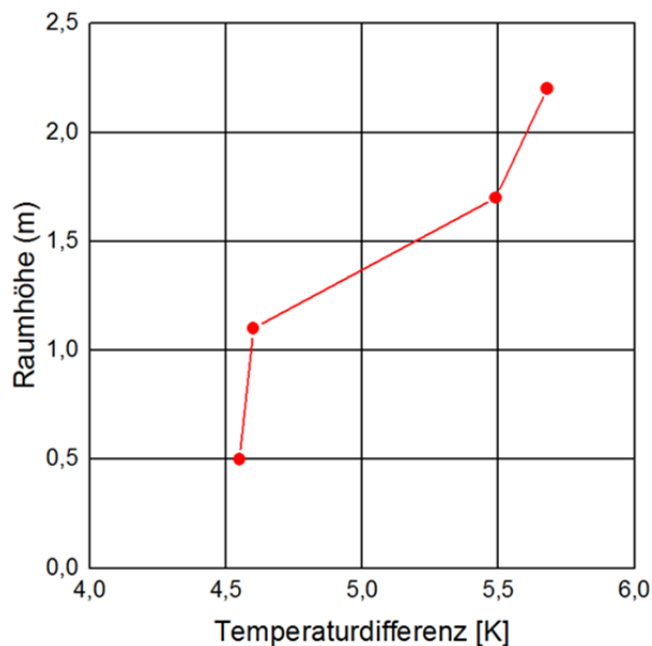


Bild 248:
Temperaturdifferenz zwischen der (höhenabhängigen) Raumlufttemperatur und der berechneten Oberflächentemperatur im Eckbereich in Abhängigkeit von der Raumhöhe.

Die in Bild 246 dargestellten strahlungsbedingten Wärmeübergangskoeffizienten (rechts) beziehen sich nicht auf die in Bild 248 dargestellte Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Lufttemperatur in gleicher Höhe sondern auf die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der mittleren Raumlufttemperatur, die vom Autor mit 21°C angegeben wird. Dadurch ergibt sich eine gegenläufige Abhängigkeit: Die Temperaturdifferenz sinkt mit der Raumhöhe und es resultieren bei der Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten mit einer konstanten Transmissionswärmestromdichte mit der Raumhöhe steigende Werte.

Mit der Kenntnis der Oberflächentemperatur im Eckbereich, der realen Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Raumlufttemperatur in verschiedenen Höhen der Ecke und der sich im Eckbereich einstellenden Transmissionswärmestromdichte kann der lokale Gesamtwärmeübergangskoeffizient in der Ecke berechnet werden. Die Transmissionswärmestromdichte im Eckbereich wird dabei mit Kenntnis des Wandaufbaus und den Versuchsrandbedingungen mit Hilfe von zweidimensionalen hygrothermischen Simulationen ermittelt. Bild 249 (mitte) zeigt den resultierenden lokalen Wärmeübergangskoeffizient über die Raumhöhe aufgetragen.

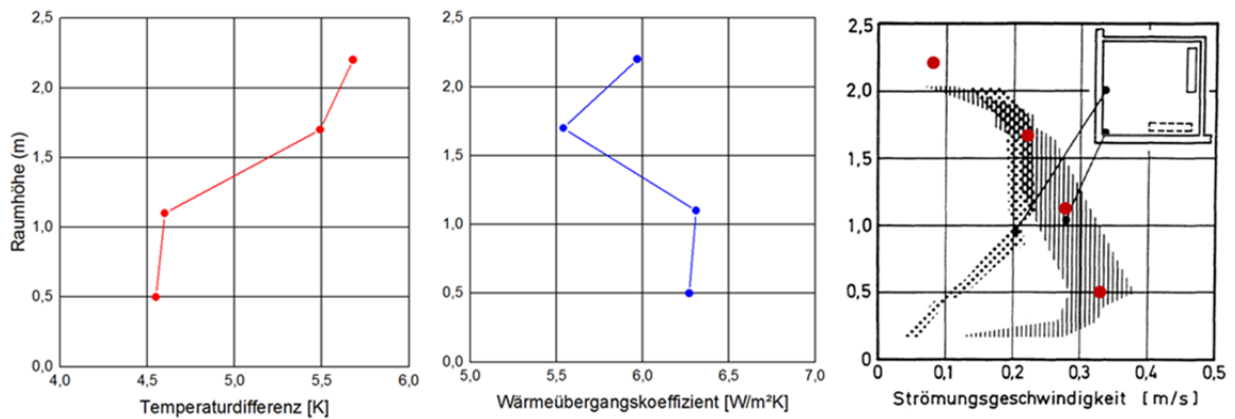


Bild 249:

Temperaturdifferenz zwischen der höhenabhängigen Raumlufthtemperatur und der berechneten Oberflächentemperatur im Eckbereich in Abhängigkeit von der Raumhöhe (links), lokaler Gesamtwärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit der Raumhöhe (Mitte) und vertikale Strömungsgeschwindigkeit (rechts) aus [88] mit den verwendeten Mittelwerten (rote Punkte).

Isoliert betrachtet scheint der lokale Wärmeübergangskoeffizient ein eher zufälliges Verhalten aufzuweisen. Betrachtet man jedoch die lokale, höhenabhängige Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Raumlufthtemperatur Bild 249 (links) und die gegebene vertikale Luftgeschwindigkeitsverteilung in der Raumecke Bild 249 (rechts) lassen sich Zusammenhänge ableiten. Den folgenden Betrachtungen liegen die Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit im Eckbereich zu Grunde (als rote Punkte in Bild 249 (rechts) dargestellt). In der Höhe von 2,2 m herrscht eine vergleichsweise große Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche in der Ecke und der lokalen Raumlufthtemperatur, jedoch liegt eine niedrige Strömungsgeschwindigkeit vor. Es ergibt sich ein Wärmeübergangskoeffizient von knapp 6 W/m²K. In 1,7 m Höhe verringert sich die Temperaturdifferenz leicht, die Strömungsgeschwindigkeit hingegen steigt um ca. 0,13 m/s deutlich an, der Wärmeübergangskoeffizient verringert sich hierdurch augenscheinlich um ca. 0,5 W/m²K. Im weiteren Verlauf auf der Höhe von 1,1 m verringert sich die Temperaturdifferenz um ca. 0,9 K stark während sich die Strömungsgeschwindigkeit moderat um ca. 0,055 m/s erhöht. Der resultierende Wärmeübergangskoeffizient ergibt sich zu ca. 6,3 W/m²K. Bis zur Raumhöhe von 0,5 m verringert sich die Temperaturdifferenz wiederum nur leicht um ca. 0,05 K und die Strömungsgeschwindigkeit erhöht sich nochmal um ca. 0,06 m/s. Diese Veränderung verringert den Wärmeübergangskoeffizienten allerdings nur gering.

Generell lässt sich der Zusammenhang zwischen lokalem Gesamtwärmeübergangskoeffizienten, der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der lokalen Raumlufthtemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit im Eckbereich mit folgender Gleichung abbilden:

$$\alpha_{i,e} = 12,953 - 1,176 * \Delta\vartheta - 4,287 * \omega \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$\alpha_{i,e} = \text{Gesamtwärmeübergangskoeffizient im Eckbereich} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$\Delta\vartheta = \text{lokale Temperaturdifferenz [K]}$

$$\omega = \text{lokale Strömungsgeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right]$$

In der Realität ist weder die lokale Strömungsgeschwindigkeit noch die lokale Temperaturdifferenz im Eckbereich bekannt, weshalb die theoretischen Betrachtungen für die praktische Anwendung wenig Relevanz besitzen. Zudem wird auch eine mögliche Raumlufthottemperaturschichtung im Raum nicht bekannt sein und sich im unteren und oberen Eckbereich der Einfluss der dreidimensionalen Wärmebrücke auf die ermittelten Werte auswirken. Da in der ein- und zweidimensionalen hygrothermische Simulation in der Regel mit einer über die Raumhöhe konstant angenommenen, der mittleren Raumlufthottemperatur entsprechenden Temperatur gerechnet wird, erscheint es zweckmäßig sich für alle weiteren Betrachtungen und Simulationsansätze auf die Angaben in mittlerer Raumhöhe zu beziehen.

Die Autoren von Autoren von [88] und [89] geben hierzu folgende Gleichung an:

$$\alpha_{g,x} = \alpha_g * \left[1 - \left(1 - \frac{\alpha_{g,e}}{\alpha_g} \right) + e^{\left(-3 * \frac{x}{s} \right)} \right]$$

$$\alpha_{g,x} = \text{Gesamtwärmeübergangskoeffizient im Abstand } x \text{ von der Ecke} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$\alpha_{g,e} = \text{Gesamtwärmeübergangskoeffizient in der Ecke} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$\alpha_g = \text{Gesamtwärmeübergangskoeffizient im ungestörten Bereich} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$x = \text{Abstand von der Ecke [m]}$

$s = \text{Einflussbreite } \sim \text{Wanddicke [m]}$

Weiterin wird festgestellt, dass sich der Wärmeübergangskoeffizient im Eckbereich mit dem Dämmniveau verändert. In [89] wird für den damaligen Mindestwärmeschutz (nach WärmeschutzV 1982 [90] max. 0,6 W/m²K für eine Außenwand im Neubau) ein Wert von 5,6 W/(m² K) angegeben und für einen „guten Wärmeschutz“ Ende der 1980er Jahre ein Wert von 5,0 W/(m² K). Somit ist der Gesamtwärmeübergangskoeffizient im Abstand x von der Ecke vom Dämmniveau, von der Wandstärke und vom Gesamtwärmeübergangskoeffizient im ungestörten Regelquerschnitt der Wand abhängig.

5.5.3 Freilandversuche

Die dargestellten Untersuchungen und Ergebnisse basieren auf einer zur dieser Thematik im Rahmen des Projekts angefertigten Studienarbeit [91].

Versuchsaufbau und Randbedingungen

Im Zuge der Untersuchungen wurden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) ergänzende Freilanduntersuchungen durchgeführt. Die Versuche fanden an einer nach Südosten orientierten Außenwanddecke eines beheizten Raumes mit einem Südfenster von April bis September 2013 statt. Die lichte Raumhöhe des Versuchsraums beträgt 2,46 m. Für die Untersuchungen wurden sowohl in der Raumecke als auch im Regelquerschnitt der nach Süden orientierten Wand Temperaturfühler in verschiedenen Höhen installiert.

In der Ecke wurden Fühler in den Höhen 0; 0,6; 1,3; 2,0 und 2,46 m befestigt. Im Regelquerschnitt wurden mit einem horizontalen Abstand von 0,55 m von der Ecke entfernt Fühler in der Höhe 0,6 und 2,0 m installiert. Zusätzlich wurde die Außenoberflächentemperatur im Regelquerschnitt auf 0,6 m Höhe erfasst. Die Raumlufttemperatur in Raummitte wurde nicht strahlungsgeschirmt in 1,7 m Höhe und strahlungsgeschirmt in 0, 0,6 und 2,0 m Höhe gemessen. Das Außenklima wird mit der institutseigenen Wetterstation aufgezeichnet. Bild 250 zeigt den Versuchsraum mit den an der Wand angebrachten Temperaturfühlern:



Bild 250:
Versuchsraum mit Oberflächentemperaturfühlern aus [91].

Die Wand besteht aus einem 0,49 m dicken Ziegelmauerwerk mit einem Innenputz von 1,5 cm und einem Außenputz von 2 cm Dicke. Der untere Wandabschnitt ist nicht gedämmt. Ab einer Höhe von 1,9 m ist auf der Außenseite der Südwand eine 12 cm dicke Außendämmung aufgebracht. Der Aufbau sowie die verwendeten Materialien der Bestandswand sind nur ungenau bekannt. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) im Regelquerschnitt wird mit Hilfe der gemessenen Oberflächentemperaturen und hygrothermischer Simulation mittels Parametervariation bestimmt. Folgende U-Werte konnten für den Wandaufbau im Regelquerschnitt ermittelt werden:

- nicht gedämmter Bereich: 0,46 W/(m²K)
- gedämmter Bereich: 0,19 W/(m²K)

Ergebnisse

Bild 251 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf der Raumlufttemperatursensoren in verschiedenen Höhen für einen Messzeitraum von 9 Tagen im August und September 2013. Es zeigt sich deutlich, dass der nicht vor Strahlung geschützte Temperaturfühler in 1,7 m Höhe höhere Temperaturspitzen aufweist als der strahlungsgeschirmte Fühler in 2 m Höhe. Weiterhin ist ersichtlich, dass unter Strahlungseinfluss am Tag die Temperaturdifferenz zwischen den einzelnen Fühlern wesentlich größer ist als nachts. Durch die Messungen wird das Ergebnis der Literaturstudie bestätigt, dass sich über die Raumhöhe eine deutliche Lufttemperaturschichtung ausbildet. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Literaturstudie, die auf Messungen unter stationären Randbedingungen basiert, kann aber ebenfalls gezeigt werden, dass das Temperaturprofil in der Realität ein dynamisches Verhalten aufweist. Es besteht also über den Tagesverlauf keine konstante Temperaturschichtung über die Raumhöhe, sondern es findet immer auch eine Beeinflussung von äußeren Einflüssen wie z.B. Strahlung statt.

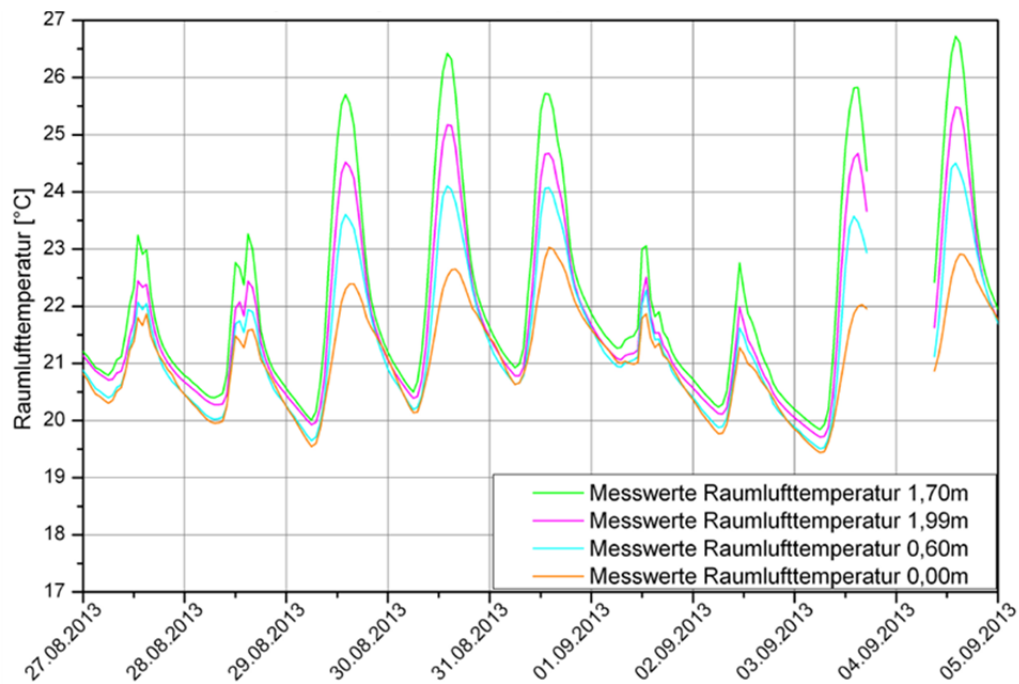


Bild 251:
Raumlufttemperaturverlauf in verschiedenen Höhen.

Zur Überprüfung und Visualisierung der Temperaturverteilung wurden zusätzlich Thermografieaufnahmen im Versuchsraum gemacht. Zur besseren Darstellung der Lufttemperaturverteilung wurden Kartonstreifen in Raummitte und im Eckbereich aufgestellt. Durch die geringe thermische Speichermasse und den fehlenden Kontakt zu anderen Bauteilen nehmen diese Streifen näherungsweise die Lufttemperatur an. Bild 252 zeigt den Karton im Eckbereich des Versuchsraums aus [91].



Bild 252:
Für die Thermografieaufnahme aufgestellter Karton in der Raumecke aus [91].

Die Thermografieaufnahme in Bild 253 zeigt den Karton in Raummitte sowie im Eckbereich. Die Auswertung ergab, dass sich zwischen dem unteren Drittel und dem oberen Drittel im Eckbereich eine Temperaturdifferenz zwischen 0,5 und 1 K einstellt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich zwischen Raummitte und Eckbereich auch ein horizontaler Temperaturunterschied einstellt. Dieser Unterschied beträgt in der Momentaufnahme der Thermografie ca. 0,2 bis 0,4 K.

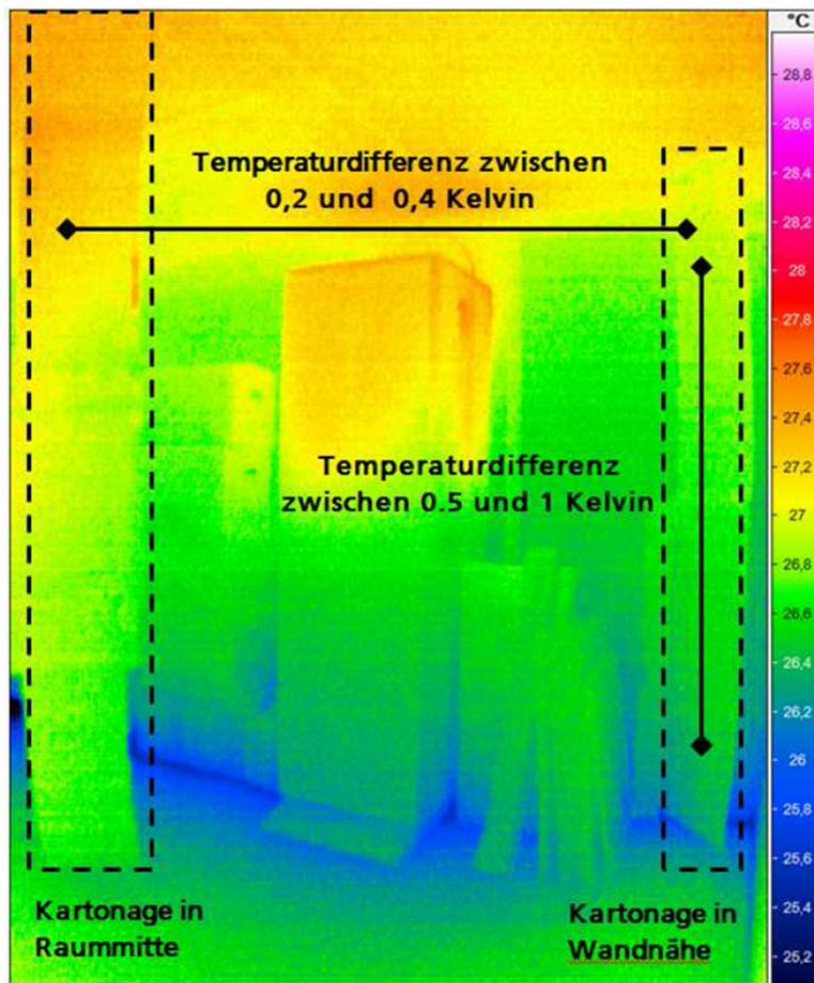


Bild 253:
Thermografieaufnahme mit Kartonagen in Raummitte sowie in der Ecke aus [91].

Im nächsten Schritt erfolgt die Ermittlung bzw. Überprüfung des inneren Gesamtwärmeübergangskoeffizienten an den beiden Messpunkten im Regelquerschnitt der Südwand. Die verwendete Raumlufttemperatur wurde anhand der Temperaturschichtung für den dargestellten Messzeitraum korrigiert. Mit der Raumlufttemperatur und der gemessenen Außenoberflächentemperatur wird mit Hilfe der eindimensionalen hygrothermischen Simulation die jeweilige Innenoberflächentemperatur ermittelt. Anschließend wird der innere Wärmeübergangskoeffizient iterativ so lange variiert bis sich nur noch eine minimale Abweichung zwischen Simulation und Messung ergibt. Für beide Fälle konnte der in der DIN 4108-3 [35] vorgeschlagene Wert von $7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ im Wesentlichen bestätigt werden.

Bild 254 zeigt den gemessenen und berechneten Temperaturverlauf für den unteren und Bild 255 für den oberen Temperaturfühler. In beiden Bildern ist zusätzlich die zur Berechnung verwendete Lufttemperatur eingezeichnet.

Die Abweichungen zwischen den Minimal- und Maximalwerten zwischen Messung und Simulation sind zum einen auf Unterschiede bei der realen Lufttemperaturverteilung und zum anderen auf eine möglicherweise etwas höhere Wärmekapazität des realen Mauerwerks im Vergleich zur Berechnungsannahme zurückzuführen. Nachdem auch der Tagesgang der Luftschichtung nicht berücksichtigt werden kann, wird die gute mittlere Übereinstimmung als ausreichend angesehen.

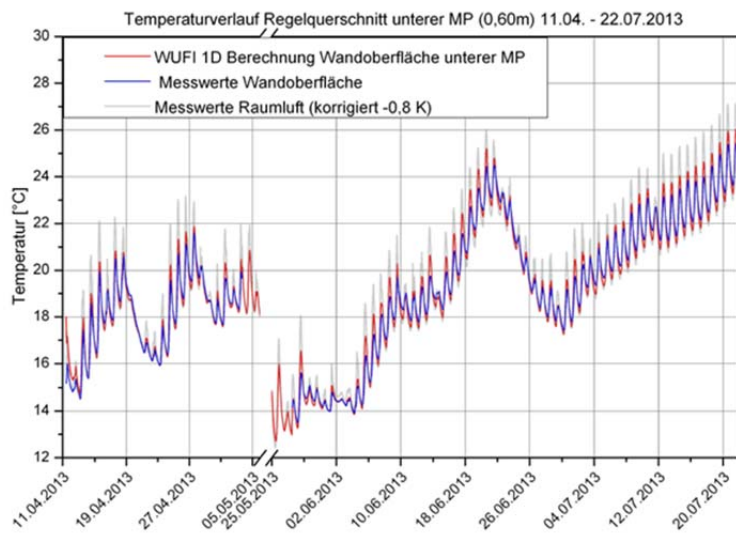


Bild 254: Gemessene und berechnete Wandoberflächentemperatur in 0,6 m Höhe (Regelquerschnitt der Südwand) im Vergleich zur Lufttemperatur in Raummitte aus [91].

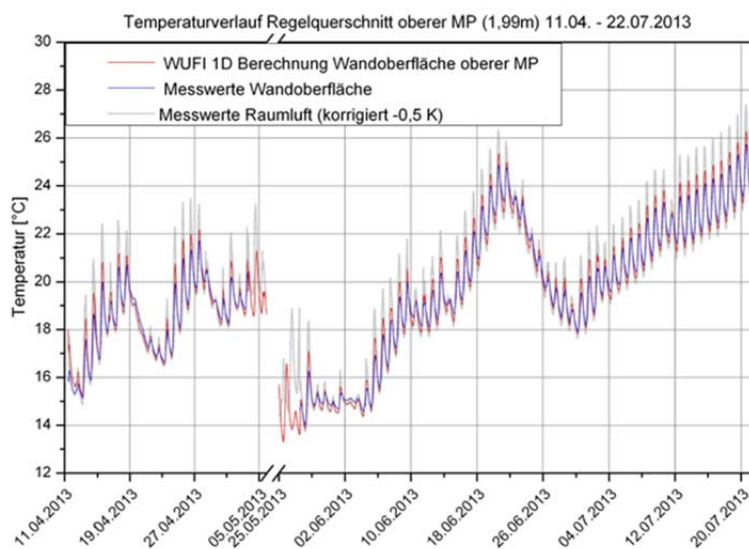


Bild 255:

Gemessene und berechnete Wandoberflächentemperatur in 2 m Höhe (Regelquerschnitt der Südwand) im Vergleich zur Lufttemperatur aus [91].

Als letzte Stufe der Untersuchungen werden mit Hilfe der gemessenen Temperaturen und zweidimensionaler hygrothermischer Simulationen die Wärmeübergangskoeffizienten direkt im Eckbereich bestimmt. Die Berechnungen werden mit den Oberflächentemperaturen in der Ecke in fünf Positionen über die Höhe durchgeführt. Das aufgezeichnete Außenklima wird unter Berücksichtigung der kurz- und langwelligen Strahlungsbilanz zur Simulation verwendet. Tabelle 39 zeigt die im Freilandversuch ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten sowie die resultierende absolute Temperaturabweichung zwischen den Messwerten und der Simulation. Dabei befinden sich die Messpunkte am Boden (0 m Höhe) und an der Decke (2,46 m Höhe) jeweils im Bereich von dreidimensionalen Wärmebrücken. Im Bodenbereich wird die geringste Temperaturabweichung zwischen gemessener und berechneter Oberflächentemperatur mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von 2,5 W/(m² K) erreicht. Im Deckenbereich konnte ein Wärmeübergangskoeffizient von 3,0 W/(m² K) ermittelt werden. Da im oberen Bereich jedoch nur auf der Südseite der Außenwand eine Dämmung aufgebracht ist, was eine in der Praxis unübliche Situation darstellt, kann dieser Wert nur als Vergleichswert mit begrenzter Aussagekraft dienen. Die Überdämmung von lediglich 0,5 m Höhe ab der äußeren Fensteroberkante ist zudem nicht repräsentativ für eine gedämmte Außenwand. Es treten Querleitungen der Wärme auf, die in der zweidimensionalen Simulation nicht berücksichtigt werden können. Dies gilt ebenfalls für den Messpunkt in 1,9 m Höhe, bei dem gerade 10 cm tiefer die Außendämmung beginnt. Als repräsentative Wärmeübergangskoeffizienten im zweidimensionalen Eckbereich können somit lediglich die Werte bei 0,6 und 1,3 m Höhe angesehen werden. Die geringste Temperaturabweichung zwischen Messung und Berechnung ergibt sich bei einer Höhe von 1,3 m. Auf dieser Höhe liegt die Lufttemperatur auch am nächsten an der mittleren Raumlufthtemperatur, wie sie normalerweise für eine Simulation zur Verfügung steht.

Tabelle 39:

Im Freilandversuch ermittelte innere Wärmeübergangskoeffizienten in verschiedenen Höhen im Eckbereichen einer Massivwand.

Messpunkt	Eckbereich	2D Simulation		Abweichung zur Messung [K]
		Wärmeübergangswiderstand außen [W/(m ² K)]	Ermittelter Wärmeübergangswiderstand innen [W/(m ² K)]	
0 m	3D	17	2,5	0,35
0,6 m	2D	17	5	0,24
1,3 m	2D	17	5	0,2
1,99 m	2D	17	5	0,22
2,46 m	3D	17	3	0,35

Für den Messpunkt auf 1,3 m Höhe im Eckbereich ist beispielhaft für einen Zeitraum von sechs Tagen der gemessene und berechnete Temperaturverlauf in Bild 256 im Vergleich zur Raumlufftemperatur dargestellt. Die Abweichung zwischen Messung und Berechnung ist separat in Bild 257 (rechte Achse) ebenfalls zusammen mit der Raumlufftemperatur dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die zweidimensional berechneten Oberflächentemperaturen die gleichen Spitzenwerte wie die Messwerte aufweisen, jedoch deutlicher von den gemessenen Minimalwerten abweichen. Dieses Verhalten deutet erneut darauf hin, dass die reale Wärmespeicherkapazität des Wandaufbaus nicht mit der des in der Simulation verwendeten Datensatzes übereinstimmt. Eine andere Erklärung könnte sein, dass sich durch Umkehr der Wärmestromrichtung in Richtung Raumseite zu Zeiten in denen die Lufttemperatur unter der Oberflächentemperatur liegt, der Wärmeübergangskoeffizient ändert. Wie die Ergebnisse der Literaturstudie gezeigt haben, stellen sich im Eckbereich bei einem konstanten Wärmestrom von innen nach außen im Vergleich zum Regelquerschnitt leicht erhöhte Luftgeschwindigkeiten ein. Diese sind jedoch infolge der kühleren Bauteiloberfläche stets nach unten gerichtet. Im vorliegenden Fall könnte sich deshalb die Strömungsrichtung umkehren, was eventuell zu einem abweichenden Verhalten führt.

Aus Bild 257 ist weiterhin erkennbar, dass sich die Abweichung zwischen Messung und Simulation mit steigender Raumlufftemperatur verringert. Der ermittelte Wärmeübergangskoeffizient zur zweidimensionalen Simulation ergibt unter diesen Bedingungen eine besser Übereinstimmung mit der Messung. Wie bereits die Auswertung der Literatur zeigt, scheint eine Abhängigkeit zwischen der Temperaturdifferenz (Oberfläche-Luft) und dem sich einstellenden Wärmeübergangskoeffizienten zu bestehen.

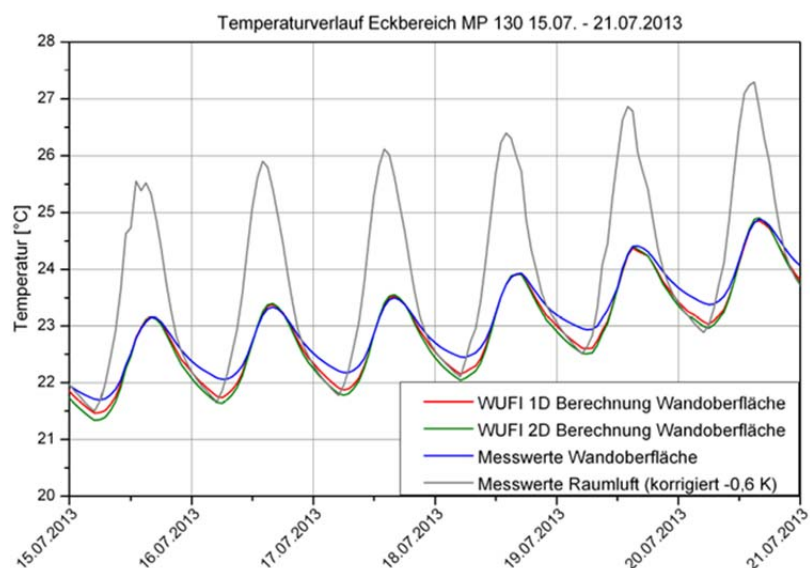


Bild 256:
Gemessene und berechnete Oberflächentemperatur in der Raumecke in 1,3 m Höhe im Vergleich zur Lufttemperatur aus [91].

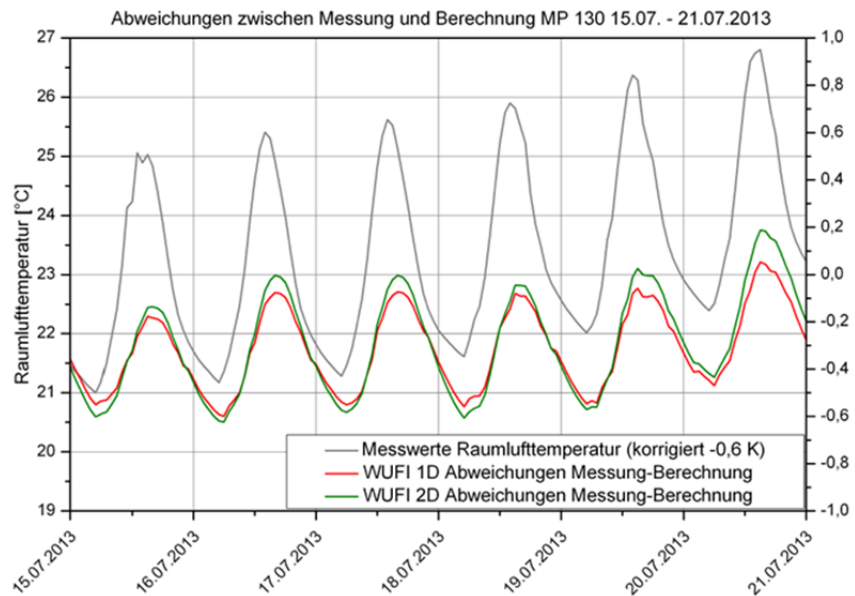


Bild 257:
Abweichung zwischen gemessener und berechneter Oberflächentemperatur in der Raumecke in 1,3 m Höhe im Vergleich zur Lufttemperatur aus [91].

5.5.4 Abbildung von zweidimensionalen Wärmebrücken in einer eindimensionalen hygrothermischen Simulation

Im Folgenden werden die bisherigen Untersuchungsergebnisse in zweidimensionalen hygrothermischen Simulationen von verschiedenen Wandkonstruktionen angewandt und diese dann auf eindimensionale Simulationen übertragen.

5.5.5 Durchgeführte Simulationen

Es werden verschiedenen Standard-Wandaufbauten zweidimensional hygrothermisch berechnet und das Temperaturverhalten im kritischen Eckbereich ausgewertet (Bild 258). Dieselben Wandaufbauten werden im Regelquerschnitt eindimensional simuliert (Bild 258). Hierbei wird der innere Wärmeübergangskoeffizient iterativ solange variiert bis sich an der Innenoberfläche nur noch eine minimale, leicht kritische Temperaturabweichung im Vergleich zur zweidimensionalen Simulation ergibt.

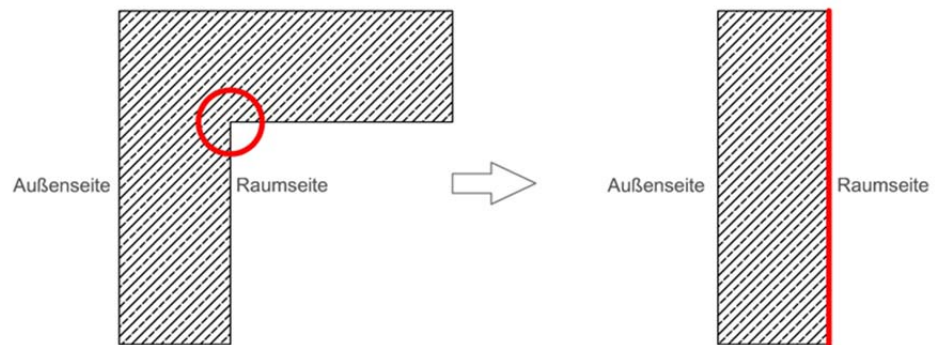


Bild 258:
Schematische Darstellung der Übertragung der zweidimensionalen Raumecke (links) auf den Eindimensionalen Regelquerschnitt (rechts).

Alle Simulationen werden mit den Simulationsprogrammen WUFI Pro und WUFI 2D durchgeführt [87] [1]. Als Außenklima wird das in WUFI hinterlegte und in Bild 259 dargestellte Feuchtereferenzjahr (FRY) des für Deutschland kritisch repräsentativen Standorts Holzkirchen verwendet. Das zur Simulation verwendete Innenklima wird nach EN 15026 vom Außenklima abgeleitet und repräsentiert eine normale Wohnraumnutzung. Die Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte des Innenklimas sind in Bild 260 dargestellt.

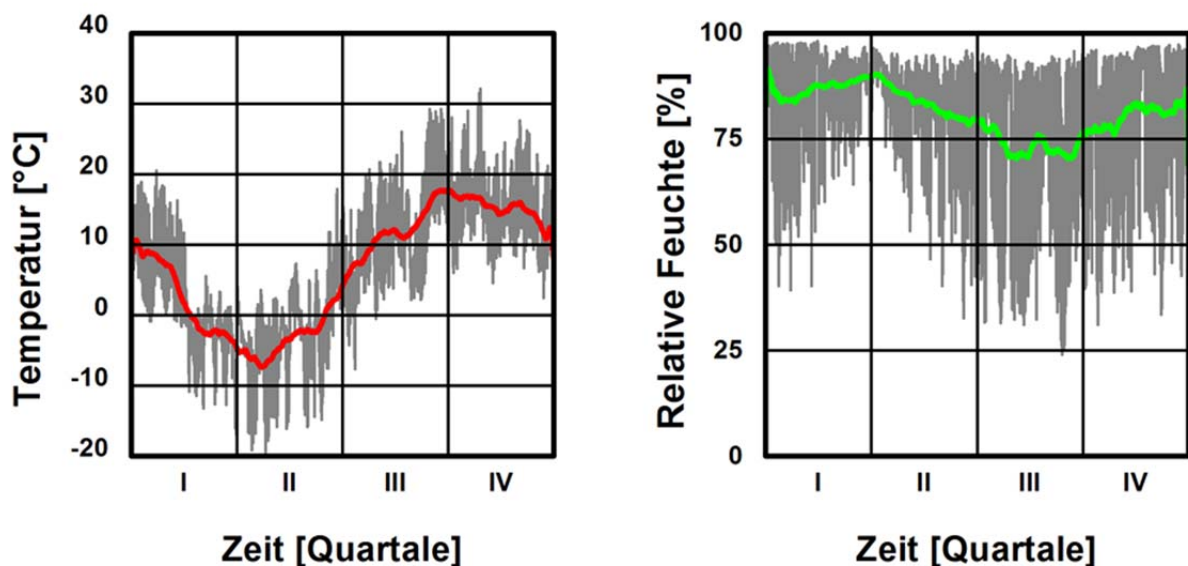


Bild 259:
Temperatur und relative Feuchte des Außenklimas am Standort Holzkirchen. Der graue Verlauf stellt jeweils die Stundenwerte dar, der farbige das gleitende Monatsmittel. Beginn entspricht Berechnungsbeginn: Oktober.

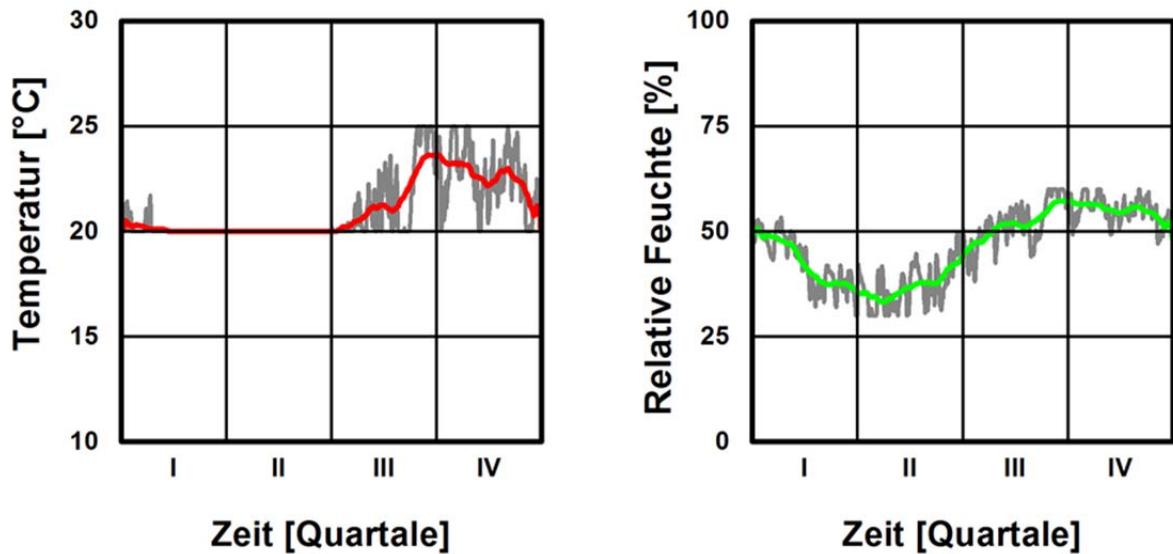


Bild 260:

Verlauf der Temperatur und relative Feuchte im Innenraum nach DIN EN 15026 für normale Belegung, abgeleitet aus dem Außenklima vom Standort Holzkirchen. Der graue Verlauf stellt jeweils die Stundenwerte dar, der farbige das gleitende Monatsmittel. Beginn entspricht Berechnungsbeginn: Oktober.

Sowohl bei der ein- als auch bei der zweidimensionalen Simulation wird zur Berechnung der Außenoberflächentemperatur die explizite Strahlungsbilanz verwendet. Dabei entspricht die Außenoberfläche aller untersuchten Konstruktionen einem weißen Außenputz mit einem kurzwelligen Absorptionsgrad von $a=0,4$ und einem langwelligen Emissionsgrad von $\gamma = 0.9$.

Die beiden Wandflächen, die die Außenwanddecke bilden, sind in der zweidimensionalen Simulation nach Nord-West und nach Nord-Ost orientiert. Die Aubenecke selbst zeigt somit direkt nach Norden, was auf Grund der geringsten solaren Einstrahlung den kritischen Fall mit den geringsten Oberflächentemperaturen darstellt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist in der eindimensionalen Simulation die Außenoberfläche des Regelquerschnitts entsprechend ebenfalls nach Norden orientiert.

Auf Grundlage der Literaturrecherche und der durchgeführten Freilandversuche konnten in Abhängigkeit des Wandaufbaus die Eingabeparameter für die zweidimensionale Simulation ermittelt werden. Dies erfolgte mit einem stärkeren Bezug auf die im Labor unter konstanten Bedingungen ermittelten Ergebnisse, da die durchgeführten Freilandversuche mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Die folgenden Tabellen (Tabelle 40 bis Tabelle 42) zeigen die inneren Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit des Abstandes von der Raumecke. Bild 261 veranschaulicht unabhängig vom Wandaufbau zusätzlich die Positionen des Wärmeübergangskoeffizienten.

Tabelle 40:
Außenecken von nicht gedämmten Massivwänden.

Nr.	Abstand von der Innenecke [m]	Innerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]	Äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]
1	0-0,05	6,0	17
2	0,05-0,1	7,0	17
3	0,1-0,2	7,5	17
4	0,2-x	8	17

Tabelle 41:
Außenecken von gedämmten Massivwänden.

Nr.	Abstand von der Innenecke [m]	Innerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]	Äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]
1	0-0,05	5,3	17
2	0,05-0,1	6,0	17
3	0,1-0,2	6,5	17
4	0,2-x	8	17

Tabelle 42:
Außenecken von Leichtbau / Holzbauwänden.

Nr.	Abstand von der Innenecke [m]	Innerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]	Äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]
1	0-0,05	5,5	17
2	0,05-0,1	6,5	17
3	0,1-0,2	7,0	17
4	0,2-x	8	17

Für die untersuchten Wandkonstruktionen werden in der zweidimensionalen hygrothermischen Simulation die Wärmeübergangswiderstände nach Tabelle 40 bis Tabelle 42 an der Innenoberfläche angesetzt (vgl. Bild 261)

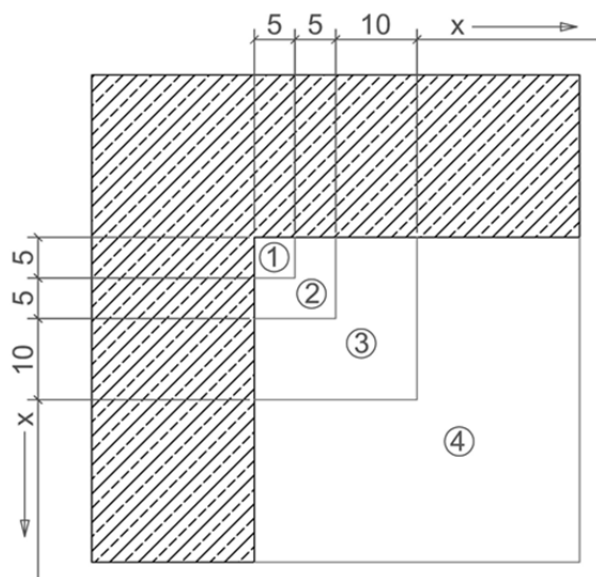


Bild 261:
Anordnung der verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten für die Simulation der Außenecke in WUFI® 2D (Maße in cm).

Die hygrothermischen Simulation werden an sechs verschiedenen gedämmten und nicht gedämmten massiven Wandaufbauten sowie an zwei Leichtbaukonstruktionen durchgeführt. Dabei wird jeweils der nicht gedämmte Aufbau simuliert und danach mit einer Außendämmung versehen. Die Dämmstärke der äußeren Dämmung ist jeweils so gewählt, dass der resultierende Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) im Regelquerschnitt in etwa den aktuellen EnEV Anforderungen für zu sanierende Bestandsbauten entspricht.

Eine Übersicht der Wandaufbauten der nicht gedämmten Massivwände ist in Tabelle 43 die der gedämmten Wände in Tabelle 44 und die der Leichtbauwände in Tabelle 45 aufgeführt.

Tabelle 43:
Wandaufbauten der nicht gedämmten Massivwände.

Wandaufbau / Mauerwerk	Wandstärke [m]	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²K)]	Rohdichte des Mauerwerks[kg/m³]
Bimsbeton	0,265	0,686	664
Hochlochziegel	0,265	0,515	600
Hochlochziegel	0,385	0,359	600
Kalksandstein	0,265	2,135	1900
Vollziegel	0,265	1,663	1900
Beton	0,265	2,61	2220

Tabelle 44:
Wandaufbauten der gedämmten Massivwände.

Wandaufbau / Mauerwerk	Wandstärke [m]	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m ² K)]	Rohdichte des Mauerwerks [kg/m ³]	Dämmschichtstärke [m]	Wärmeleitfähigkeit Dämmmaterial [W/(mK)]
Bimsbeton	0,39	0,278	664	0,085	0,04
Hochlochziegel	0,33	0,28	600	0,065	0,04
Hochlochziegel	0,42	0,281	600	0,031	0,04
Kalksandstein	0,39	0,288	1900	0,12	0,04
Vollziegel	0,39	0,278	1900	0,12	0,04
Beton	0,385	0,296	2220	0,12	0,04

Der detaillierte Aufbau der Leichtbaukonstruktionen ist Bild 416 und Bild 417 im Anhang zu entnehmen. Im Anhang sind in Bild 410 bis Bild 417 die Regelquerschnitte der gedämmten Wandkonstruktionen für die eindimensionale Simulation dargestellt. Da der Aufbau ohne Dämmung jeweils den nicht gedämmten Wandkonstruktionen entspricht, wird auf eine separate Darstellung dieser Varianten verzichtet.

Tabelle 45:
Wandstärke und Wärmedurchgangskoeffizient der Leichtbauwände.

Wandaufbau	Wandstärke [m]	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m ² K)]
Leichtbau 1	0,187	0,278
Leichtbau 2	0,187	0,206

5.5.6 Ergebnisse nicht gedämmte Massivwände

Durch iterative Anpassung des inneren Wärmeübergangskoeffizienten bei der eindimensionalen Simulation war es möglich, die Oberflächentemperaturen im Eckbereich der zweidimensionalen hygrothermischen Simulation auch eindimensional mit guter Übereinstimmung abzubilden. Dabei wurde die Anpassung in der Art vorgenommen, dass sich bei der eindimensionalen Berechnung mit effektiven Wärmeübergangskoeffizienten möglichst ähnliche, aber leicht kritischere Temperaturen einstellen sollten. Die Jahresmittelwerte der Temperaturabweichung zwischen zweidimensionaler und eindimensionaler Simulation liegen in einem Bereich zwischen -0,05 und -0,1 K.

In Tabelle 46 sind die ermittelten inneren Wärmeübergangskoeffizienten von nicht gedämmten Außenwänden zur vereinfachten Abbildung der kritischen Temperaturverhältnisse in der Außenecke für vereinfachte, eindimensionale hygrothermische Simulationen angegeben.

Tabelle 46:
Wärmeübergangskoeffizienten für die vereinfachte eindimensionale Simulation von Außenecken nicht gedämmter Massivwände.

Wandaufbau / Mauerwerk	Wandstärke [m]	Innerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m²K)]	Äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m²K)]
Bimsbeton	0,265	2,5	17
Hochlochziegel	0,265	2,4	17
Hochlochziegel	0,385	2,1	17
Kalksandstein	0,265	3,1	17
Vollziegel	0,265	3,0	17
Beton	0,265	3,3	17

Die Untersuchungen zeigen, dass bei nicht gedämmten Massivwänden eine starke Abhängigkeit zwischen dem Wärmedurchgangskoeffizienten im Regelquerschnitt der Wand und dem Wärmeübergangskoeffizient im Eckbereich besteht.

Näherungsweise kann daher der in der eindimensionalen Simulation anzusetzende Wärmeübergangskoeffizient zur Abbildung des Eckbereichs von nicht gedämmten Massivwänden nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\alpha_{Ecke,1D} = 2,0 + 0,5 * U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$\alpha_{Ecke,1D}$ = Effektiver Wärmeübergangskoeffizient im Eckbereich der 1D Simulation $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

U = Wärmedurchgangskoeffizient $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der anzusetzende Wärmedurchgangskoeffizient U auf Basis des Regelquerschnitts der Wand mit den in der Simulation verwendeten Wärmeübergangskoeffizienten von innen 8 W/(m² K) und außen 17 W/(m² K) und nicht nach DIN EN ISO 6946 [92] berechnet wird.

5.5.7 Ergebnisse gedämmte Massivwände

In Tabelle 47 sind die ermittelten inneren Wärmeübergangskoeffizienten für die gedämmten Außenwände für die vereinfachte eindimensionale hygrothermische Simulation angegeben.

Tabelle 47:
Wärmeübergangskoeffizienten für die vereinfachte eindimensionale Simulation von Außenecken gedämmter Massivwände.

Wandaufbau /	Wandstärke	Innerer Wärmeübergangskoeffizient	Äußerer Wärmeübergangskoeffizient
--------------	------------	-----------------------------------	-----------------------------------

Mauerwerk	[m]	koeffizient [W/(m²K)]	koeffizient [W/(m²K)]
Bimsbeton	0,39	1,8	17
Hochlochziegel	0,33	1,9	17
Hochlochziegel	0,42	1,8	17
Kalksandstein	0,39	2,4	17
Vollziegel	0,39	2,1	17
Beton	0,385	2,7	17

Bei gedämmten Massivwänden ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen dem Wärmeübergangskoeffizient und der innenliegenden wirksamen Speichermasse des Wandaufbaus und dem Wärmedurchgangskoeffizienten der Wand.

Näherungsweise kann daher der in der eindimensionalen Simulation anzusetzende Wärmeübergangskoeffizient zur Abbildung des Eckbereichs von gedämmten Massivwänden nach folgender Zahlenwertgleichung abgeschätzt werden:

$$\alpha_{Ecke,1D} = \left(\frac{d * \rho}{1000} \right) + 29,3 * U - 6,5 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$\alpha_{Ecke,1D}$ = Effektiver Wärmeübergangskoeffizient im Eckbereich der 1D Simulation $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

d = Stärke des massiven Wandbauteils [m]

ρ = Rohdichte des massiven Wandbauteils $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

U = Wärmedurchgangskoeffizient $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

Der Wärmedurchgangskoeffizient wird wie zuvor mit den Wärmeübergangskoeffizienten aus der Simulation ermittelt.

Die Faktoren der Näherungsgleichung zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten sind wie folgt definiert:

Die Stärke d sowie die Rohdichte Δ des massiven Wandbauteils entsprechen dem des Mauerwerks ohne Putzschichten. Als Beispiel ist bei einem Vollziegelmauerwerk von 24 cm (Vgl. Tabelle 44) die Wandstärke $d=0,24$ m und die Rohdichte $\Delta=1900$ kg anzusetzen.

5.5.8 Ergebnisse Leichtbauwände

In Tabelle 48 sind die ermittelten innenseitigen Wärmeübergangskoeffizienten an Leichtbau-Außenwänden zur vereinfachten Abbildung in eindimensionalen hygrothermischen Simulationen angegeben. Eventuell entstehende stoffliche

Wärmebrücken auf Grund von Tragkonstruktionen im Eckbereich bleiben dabei unberücksichtigt.

Tabelle 48:

Wärmeübergangskoeffizienten für die vereinfachte eindimensionale Simulation der Außenecken von Leichtbauwänden.

Wandaufbau	Wandstärke [m]	Innerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]	Äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]
Leichtbau 1	0,187	2,1	17
Leichtbau 2	0,187	2,1	17

Bei beiden untersuchten Leichtbaukonstruktionen mit gleicher Wandstärke aber unterschiedlichem Wärmedurchgangskoeffizienten konnte durch einen reduzierten inneren Wärmeübergangskoeffizienten von 2,1 W/(m²K) an der Innenseite der eindimensionalen Simulation vergleichbare Temperaturen wie in der Ecke der zweidimensionalen Simulation erzielt werden.

Bild 262 zeigt beispielhaft die berechneten Oberflächentemperaturen in der Ecke auf der Innenseite für die nicht gedämmte Hochlochziegelwand mit 36 cm Dicke und Bild 263 die Ergebnisse für die gedämmte Hochlochziegelwand. Die Grafiken zeigen die ein- und zweidimensional ermittelten Temperaturen sowie die Abweichung für einen Zeitraum von sechs Monaten im Vergleich. Zusätzlich ist die Abweichung zwischen ein- und zweidimensionaler Simulation dargestellt. Für den betrachteten Zeitraum ergibt sich für die nicht gedämmte Wand eine mittlere Abweichung von -0,1 K, für die gedämmte Konstruktion eine von -0,08 K. Bild 264 zeigt die berechneten Temperaturen für den Leichtbauwand-aufbau 1. Die mittlere Abweichung in diesem Fall beträgt -0,1 K.

Die Temperaturen der eindimensionalen Simulationen sind in allen untersuchten Fällen leicht kritischer als die der zweidimensionalen Simulation, wodurch sich eine gewisse Sicherheitsreserve bzgl. der Bewertung der Temperaturen sowie eventuell des Schimmelpilzwachstums bei der eindimensionalen Simulation ergibt.

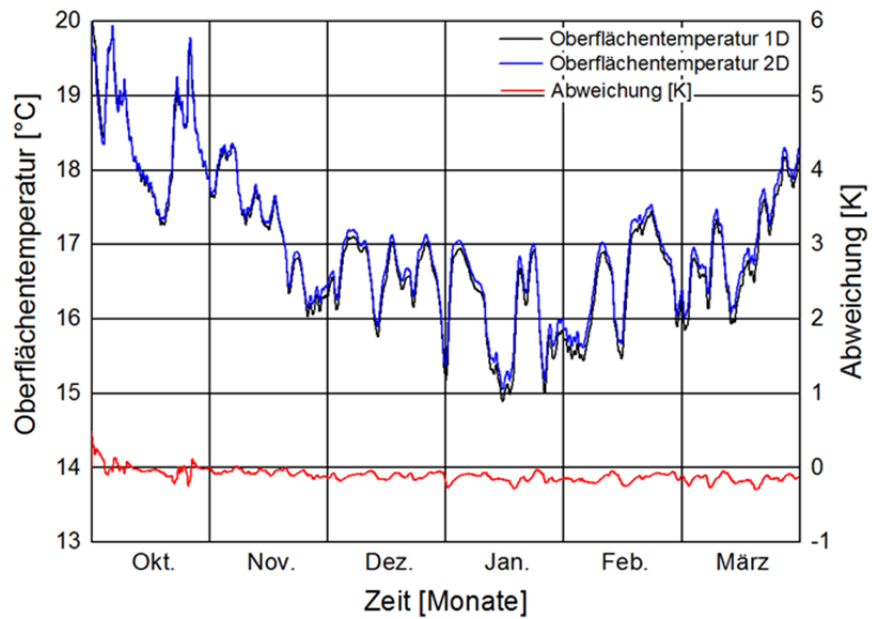


Bild 262:
 Innenoberflächentemperatur im Eckbereich bei der zweidimensionalen Simulation (blau) und bei der mit den ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten vereinfachten eindimensionalen Simulation (schwarz) sowie die Abweichung zwischen 1D und 2D (rot) für eine nicht gedämmte Hochlochziegelwand mit einer Dicke von 36 cm.

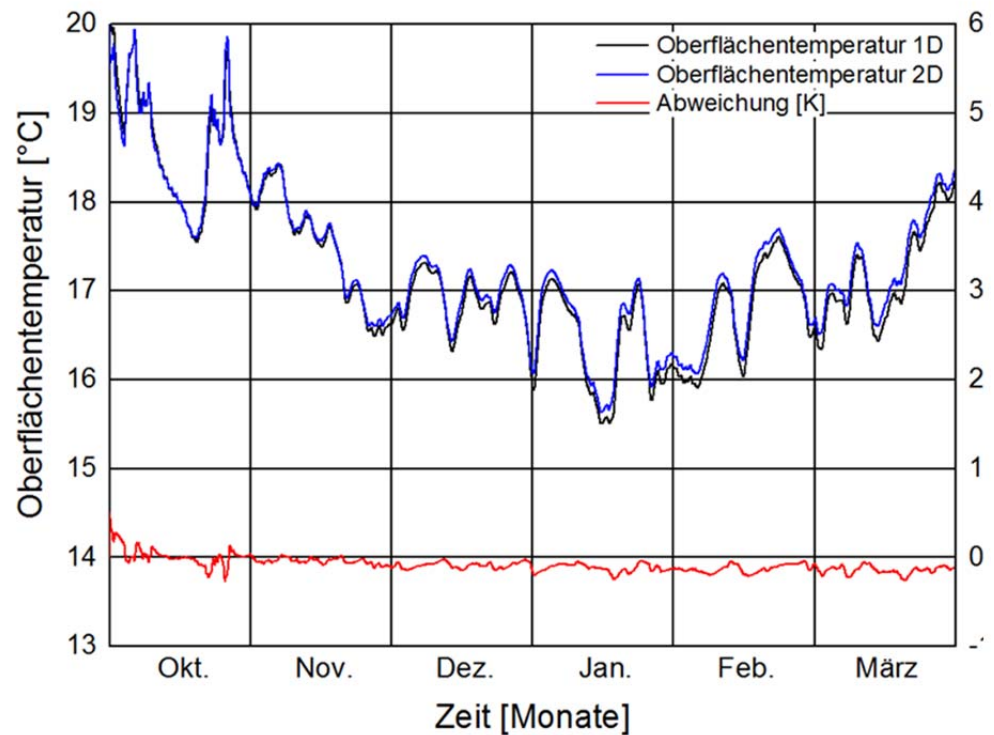


Bild 263:
 Innenoberflächentemperatur im Eckbereich bei der zweidimensionalen Simulation (blau) und bei der mit den ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten vereinfachten eindimensionalen Simulation (schwarz) sowie die Abweichung zwischen 1D und 2D (rot) für eine nicht gedämmte Hochlochziegelwand mit einer Ziegelstärke von 36 cm.

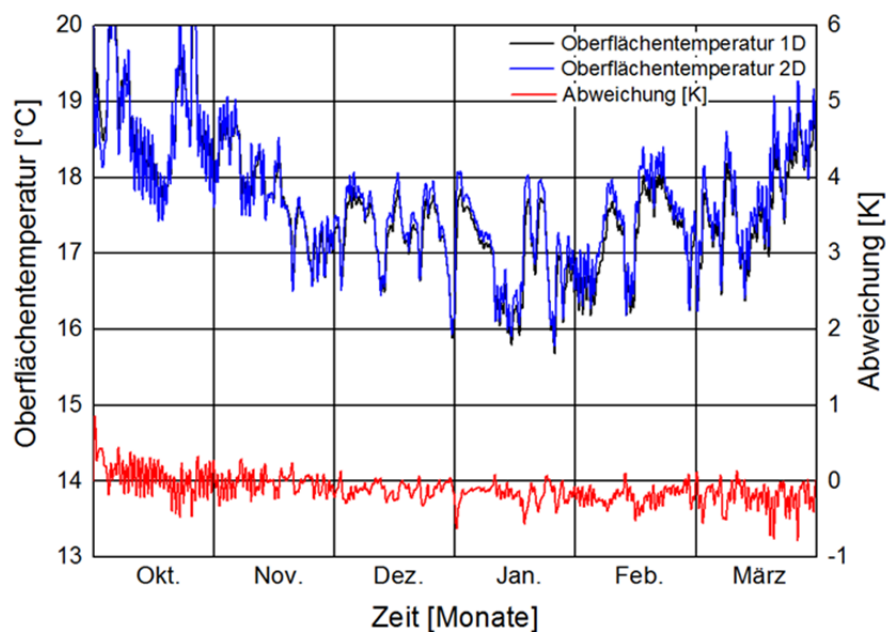


Bild 264:
 Innenoberflächentemperatur im Eckbereich bei der zweidimensionalen Simulation (blau) und bei der mit den ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten vereinfachten eindimensionalen Simulation (schwarz) sowie die Abweichung zwischen 1D und 2D (rot) für die Leichtbauwand 1.

5.5.9 Zusammenfassung und Anwendungsbereich

Die dargestellten Ergebnisse zur Übertragung der Temperaturverhältnisse aus der zweidimensionalen Simulation einer Raumecke auf den eindimensionalen Regelquerschnitt dienen vor allem der vereinfachten Betrachtung der Ecksituation zur Abschätzung des Risikopotentials. Besteht auf Grund der vereinfachten Betrachtung der Verdacht auf Schadensanfälligkeit sollte die entsprechende Konstruktion mit Hilfe einer zweidimensionalen Simulation detailliert betrachtet werden.

Die Untersuchungen betrachten lediglich die Übertragung der Temperaturverhältnisse auf den eindimensionalen Regelquerschnitt. Nach [88] und [89] erhöht sich, analog zum konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in der Raumecke auch der Feuchteübergangskoeffizient. Dies kann entsprechend berücksichtigt werden, die Unterschiede bleiben aber aufgrund der absolut sehr kleinen Werte nur gering. In üblichen Wärmebrückenberechnungen werden generell gar kein

Feuchteübergangswiderstände und damit zwangsläufig auch keine Abweichungen berücksichtigt.

Sowohl die Literaturrecherche als auch die durchgeführten Freilandversuche haben gezeigt, dass sich in Räumen ohne bzw. mit geringer Luftbewegung ein Lufttemperaturprofil über die Raumhöhe ausbildet. Unter realen, instationären Bedingungen weist das Lufttemperaturprofil aber ebenfalls ein dynamisches Verhalten über den Tagesverlauf auf und sollte daher nicht als s konstanter Verlauf über die Höhe angesetzt werden. Aus den Freilandversuchen geht auch hervor, dass die Lufttemperatur nicht nur von oben nach unten sondern auch von der Raummitte in Richtung der Ecken abfällt. Es besteht somit nicht nur eine vertikale sondern auch eine horizontale Lufttemperaturverteilung, die in wenig genutzten Räumen mit geringerer Luftumwälzung stärker ausgeprägt ist. Aus der Literaturrecherche kann abgeleitet werden, dass sich im Falle eines konstant nach außen gerichteten Wärmestroms im Eckbereich im Vergleich zum Regelquerschnitt erhöhte, ebenfalls höhenabhängige Luftgeschwindigkeiten einstellen. Infolgedessen ist auch der konvektive Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten im Eckbereich gegenüber dem Regelquerschnitt erhöht. Der größere, strahlungsbedingte Anteil ist im Eckbereich dagegen vermindert. Insgesamt ergibt sich dabei ein verringerter Gesamtwärmeübergangskoeffizient in der Ecke. Da bei der hygrothermischen Simulation in der Regel jedoch mit der Innenlufttemperatur in Raummitte gerechnet wird, wurden die hier durchgeführten Betrachtungen auf die mittlere Raumlufttemperatur bezogen.

Nach [88] und [89] ist der Gesamtwärmeübergangskoeffizient in verschiedenen Abständen von der Ecke vom Dämmniveau, der Wandstärke und dem Gesamtwärmeübergangskoeffizient im ungestörten Regelquerschnitt der Wand abhängig. Die innenseitigen Wärmeübergangskoeffizienten für die zweidimensionale Simulation im Eckbereich wurden entsprechend dieser Abhängigkeiten ermittelt und in der Simulation verwendet. Die Ergebnisse für die verschiedenen Wandaufbauten sind in Abhängigkeit des Abstandes von der Ecke in den Tabellen Tabelle 40, Tabelle 41 und Tabelle 42 angegeben. Dazu wurden Werte ermittelt, mit denen der kritischste Punkt direkt in der Ecke vereinfacht eindimensional abgebildet werden können. Hierzu wurden je sechs gedämmte und nicht gedämmte Wandkonstruktionen sowie zwei Leichtbaukonstruktionen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Wärmeübergangskoeffizient zur Abbildung des Eckbereichs in der eindimensionalen Simulation bei nicht gedämmten Massivwänden direkt vom Wärmedurchgangskoeffizient abhängig ist. Bei gedämmten Wänden wurde neben dem Wärmedurchgangskoeffizient eine Abhängigkeit von der Materialdichte und Stärke des Massivbauteils festgestellt. Bei den untersuchten Leichtbauwänden wurde in beiden Fällen ein Wert von $2,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ermittelt. Bei allen untersuchten Konstruktionen führt die eindimensionale Simulation des Eckbereichs mit den ermittelten innenseitigen Wärmeübergangskoeffizienten zu geringfügig niedrigeren Innenoberflächentemperaturen.

Damit ist eine vereinfachte und auf der sicheren Seite liegende Ermittlung der Verhältnisse in der Ecke auch mit einer eindimensionalen Simulation möglich.

Werden kritische Grenzwerte überschritten, kann die Konstruktion entweder direkt verbessert oder anhand einer zweidimensionalen Berechnung noch genauer bewertet werden.

5.6 Effektive Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen

5.6.1 Beurteilungsmöglichkeiten von Tauwasser- und Schimmelpilzrisiko im Laibungsbereich

Trotz guter Wärmedämmung der Außenwände, hochdämmenden Fenstern und Überdämmen der Fensterrahmen verbleiben im Bereich von Fensterlaibungen immer gewisse Wärmebrücken. Durch diese Wärmebrücken ergeben sich geringere Oberflächentemperaturen im Vergleich zum Regelquerschnitt der Wand. Das bedeutet, dass bei niedrigen Außenlufttemperaturen im Winter die Fensterlaibungen auf der Raumseite kälter sind, als die Innenwände. Aufgrund der niedrigen Oberflächentemperaturen erhöht sich in diesem Bereich die relative Luftfeuchte. Ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % an der Bauteiloberfläche besteht gemäß [93] eine erhöhte Schimmelgefahr. In kritischen Fällen kann sogar der Taupunkt der Raumluft unterschritten werden und Oberflächenkondensat entstehen.

Um die verringerten Oberflächentemperaturen und somit das Risiko von Schimmelpilzbildung an Fensterlaibungen prognostizieren zu können, wird ein reduzierter innerer Wärmeübergang für thermische oder hygrothermische Berechnungen zum Ansatz gebracht, der die in der Laibung geometriebedingte geringere Luftbewegung und den geringeren Strahlungsaustausch mit den Rauminnenoberflächen berücksichtigt. Nach DIN 4108-Bbl 2 ist in Fensterlaibungen ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ anzusetzen. Dieser vereinfachte pauschale Wert für den Wärmeübergang in Fensterlaibungen ist ohne weitere Differenzierung allgemein gültig [93].

Wärmebrücken können mit Wärmebrückenberechnungen thermisch berechnet werden. Diese Berechnungen decken aber in der Regel nur stationäre Randbedingungen ab und vernachlässigen Feuchtetransport und Feuchtespeicherung in den Materialien wodurch u.U. schneller kritische Verhältnisse erreicht werden. Die Feuchteverhältnisse können mit Hilfe hygrothermischer Simulation (gekoppelter Wärme- und Feuchtetransport) genauer ermittelt werden. Dazu stehen aufgrund der ungleich aufwändigeren Berechnung bisher jedoch lediglich zweidimensionale (z.B. WUFI® 2D), aber noch keine dreidimensionalen Programme zur Verfügung. Um eine instationäre hygrothermische Betrachtung trotzdem zu ermöglichen, ist es notwendig das dreidimensionale Problem aus geometrischer, ggf. stofflicher und durch den reduzierten Wärmeübergang verstärkter Wärmebrücke auf einen zweidimensionalen Ansatz zu reduzieren. Es sollen daher effektive Wärmeübergangskoeffizienten für die Innenoberfläche der Fensterlaibung ermittelt werden, die es erlauben, die dreidimensionalen Verhältnisse vereinfacht in einer zweidimensionalen hygrothermischen Simulation abzubilden.

Dafür werden auf dem Freilandversuchsgelände des IBP mehrere Versuchs- und Büroräume im Fensterlaibungsbereich mit Temperatursensoren ausgestattet. Zusätzliche punktuelle Messungen der Oberflächentemperaturen an den verschiedenen Innenoberflächen der Räume sollen Aufschluss darüber geben, wie sich die konvektiven- und die strahlungsbedingten Anteile der Wärmeübergangskoeffizienten typischerweise aufteilen. Diese Fragestellung ist vor allem für Gebäudesimulationen relevant bei denen die Bauteiloberflächentemperaturen aller Außen- und Innenbauteile berechnet werden und demzufolge auch der Strahlungsaustausch zwischen den einzelnen Innenoberflächen berücksichtigt werden muss. Für die Bauteilsimulation sind dagegen pauschale effektive Übergangsparameter ausreichend, da die Strahlungstemperaturen der übrigen Umschließungsflächen gar nicht zur Verfügung stehen.

Ziel ist es also, vereinfachte effektive Wärmeübergangskoeffizienten empirisch zu ermitteln, die je nach Orientierung, Bauart, Baumaterial und Alter des Gebäudes in Fensterlaibungen gelten und bei zweidimensionalen Simulation verwendet werden können, um die dreidimensionale Realität vereinfacht zu berücksichtigen. Falls dies gelingt, können mit diesen Parametern die Oberflächenfeuchte und das Schimmelrisiko künftig deutlich genauer prognostiziert und bewertet werden als mit rein thermischen Wärmebrückenberechnungen.

5.6.2 Durchgeführte Untersuchungen

Basis der empirischen Wärmeübergangskoeffizienten im Laibungsbereich sind Messdaten in verschiedenen Laibungssituationen und vergleichende hygrothermische Simulationen zur Ermittlung der erforderlichen effektiven Übergangsparameter.

Voruntersuchungen

Zunächst wird ein einzelner Versuchsraum auf dem Freilandversuchsgelände des IBP mit Temperatursensoren im Regelquerschnitt innen und außen, in der Fensterlaibung und mit einem Lufttemperatursensor in Raummitte ausgestattet. Neben jedem Oberflächentemperatursensor wird zusätzlich ein (nicht strahlungsgeschirmter) Lufttemperatursensor im Abstand von ca. 1 cm in der Fensterlaibung angebracht. Die ersten Berechnungen und Auswertungen erfolgten auf Basis dieser Messdaten.

Da beim untersuchten Wandaufbau die Parameter der eingesetzten Materialien nicht detailliert bekannt sind, erfolgt zunächst im Regelquerschnitt des Wandaufbaus anhand von eindimensionalen Berechnungen eine Überprüfung bzw. Kalibrierung der unsicheren Eingabeparameter. Entsprechend den intern noch verfügbaren Versuchsplänen werden die Materialschichten mit den angegebenen Dicken verwendet und vergleichbare Materialdatensätze für die Simulation zugewiesen. Die Oberflächenübergangskoeffizienten werden im Regelquerschnitt als bekannt vorausgesetzt, so dass bei Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Verhältnissen nur bei den Materialparametern eine Variation bzw. Optimierung im für die Materialien sinnvollen Bereich durchgeführt wird, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung erzielt werden kann.

Mit den dann „korrekten“ Materialparametern können dann zweidimensionale hygrothermische Simulationen des Leibungsbereichs durchgeführt werden, bei denen nur noch die inneren Oberflächenübergangsparameter als Unbekannte übrig bleiben. Dieser kann dann iterativ solange angepasst werden, bis die berechneten mittleren Temperaturen mit den an gleicher Position gemessenen übereinstimmen.

Nach DIN 4108-2 und DIN EN ISO 6946 werden die Wärmeübergangskoeffizienten im Regelquerschnitt bei horizontaler Wärmestromrichtung an der Innenseite normalerweise mit $\alpha_i = 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und an der Außenseite mit $\alpha_a = 25,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen. Dabei geht die Norm beim Wert für den Wärmeübergangskoeffizienten an der Außenseite von einer höheren mittleren Windgeschwindigkeit aus, als in Deutschland im Mittel aber auch auf dem Freilandversuchsgelände des IBP vorherrscht. Dieser Ansatz beinhaltet durch eine stärkere Gewichtung des Außenklimas zusätzliche Sicherheiten bei der Bemessung z.B. mit dem Glaserverfahren. Für die hier durchgeführten Berechnungen, die möglichst realistische Ergebnisse erzielen sollen, wird daher ein empirisch ermittelter und im Vergleich zu den Freilandversuchen bewährter Wert von $\alpha_a = 17,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt.

Bei der Simulation mit WUFI® 2D werden anstelle einer linearen Reduktion der Übergangskoeffizienten in Richtung Leibungsrückseite vereinfacht drei Werte über die Tiefe der Fensterlaibung ermittelt, bei denen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Oberflächentemperaturen erreicht wird. Diese Werte liegen bei $5,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an der Außenkante zum Fensterrahmen, α_i $6,5 - 8,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ in der Mitte und $10,6 - 11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an der raumseitigen Innenkante der Fensterlaibung. Die detaillierte Vorgehensweise sowie die Ergebnisse sind in der im Rahmen dieses Projekts entstandenen Bachelorarbeit „Voruntersuchungen zur Ermittlung detaillierter Wärmeübergangskoeffizienten für Fensterlaibungen“ [94] enthalten.

Diese Ergebnisse für die Wärmeübergangskoeffizienten sind dabei auf die direkt in der Fensterlaibung gemessenen Lufttemperaturen bezogen, die i.d.R. bereits niedriger liegen als in Raummitte. Dementsprechend fallen diese Werte im Vergleich zur DIN 4108-Bbl 2 höher aus. In der praktischen Anwendung sind die Lufttemperaturen direkt in der Fensterlaibung jedoch unbekannt und bereits niedriger als die normale Innenraumtemperatur. Diese Daten stehen dem Nutzer somit für eine hygrothermische Simulation nicht zur Verfügung, weshalb Wärmeübergangskoeffizienten benötigt werden, die sich auf die mittlere Raumlufttemperatur beziehen. Deswegen werden die Berechnungen mit der gemessenen Raumlufttemperatur in Raummitte wiederholt. Die bereits beschriebenen und als korrekt angenommenen Wärmeübergangskoeffizienten im Regelquerschnitt an der Innen- und Außenoberfläche werden unverändert übernommen. Es wird der Oberflächentempersensor ausgewählt, der am kritischsten Punkt (am nächsten an der Außenseite der Fensterlaibung) liegt und für diesen der Wärmeübergangskoeffizient in der Fensterlaibung ermittelt. Bei einem effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in der Fensterlaibung von $\alpha_i = 4,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ wird die geringste Temperaturabweichung zwischen Simula-

tion und Messung erzielt. Der so ermittelte Wert liegt nahe an dem in DIN 4108-Bbl 2 angegebenen Wert von $\alpha = 4,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und scheint diesen zu bestätigen.

Versuchsaufbauten der Versuchsräume

Zur Überprüfung unterschiedlicher Dämmsituationen und Bauweisen werden weitere Untersuchungen durchgeführt. Dazu werden fünf Versuchsräume mit Temperatursensoren versehen. Tabelle 49 enthält die Informationen zu den Wandaufbauten und Randbedingungen der fünf Versuchsräume. Bei der Auswahl wurde v.a. auf unterschiedliche Bauweisen und U-Werte geachtet, es befanden sich aber auch verschiedene Heizungssysteme in den Räumen. Die Messwerte an einer weiteren Leichtbauwand waren aufgrund des inhomogenen Wandaufbaus um die Fenster und einer unzureichenden Dokumentation leider nicht auswertbar und sind daher nicht mit aufgeführt.

Tabelle 49:
Zusammenfassung der Eigenschaften der verschiedenen Versuchsräume.

	Versuchshalle Nebenraum	Büro	Werkstatt	Versuchshalle Ziegel	Versuchshalle Holz
Baujahr	1960-1970	1990-2000	2009	2014	2014
„Mauerwerk“	Ziegel	Ziegel	Ziegel	Ziegel	Holz
Dämmung	Mineralfaser	EPS	EPS	Hanf	Holzfaser, Steinwolle (Ge- fachdämmung)
Wandstärke	39,6 cm	37,5 cm	44 cm	39,7 cm	28,5 cm
U-Wert der Wand	$0,495 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$	$0,331 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$	$0,226 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$	$0,332 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$	$0,167 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$
Heizungssystem	Mobiler Elektro radiator	Heizkörper unter der Fensterlai- bung	Fußboden- heizung	Lüftungsan- lage	Lüftungsanlage
Orientierung des Fensters	Westen	Norden	Osten	Westen	Westen
Verglasung	2-fach	2-fach	2-fach	2-fach	3-fach
Fensterrahmen	Holz	Holz	Kunststoff	Kunststoff	Kunststoff
Laibungstiefe ohne Kabelkanal	17 cm	13 cm	18 cm	9,5 cm	5 cm

Anbringung des Oberflächentempersensors	Fensterlaibungsseite	Fensterlaibungsseite	Fensterlaibungsseite	Untere Fensterlaibung	Untere Fensterlaibung
---	----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------

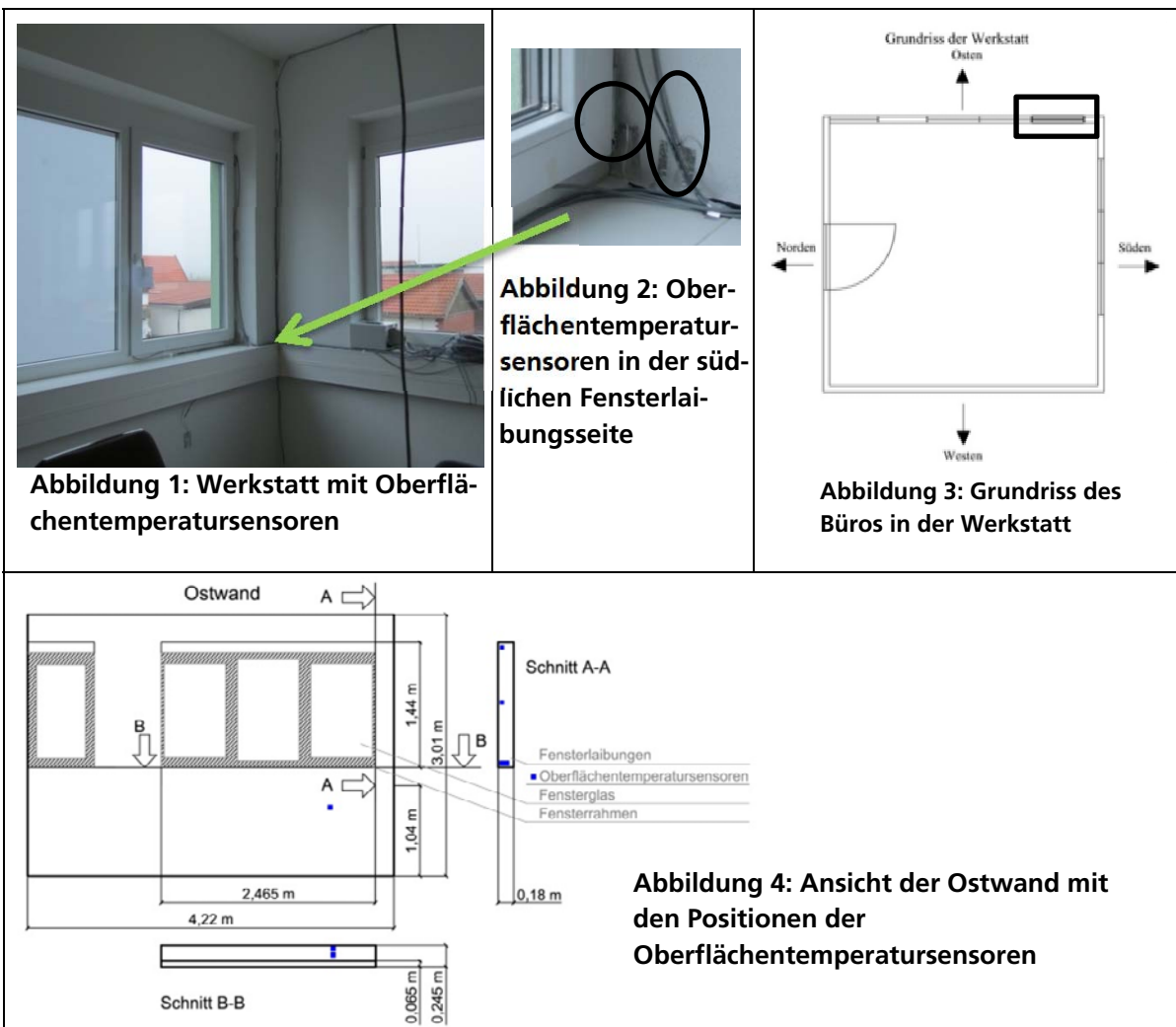
Die Lufttemperaturesensoren werden jeweils in der Raummitte und die Oberflächentempersensoren in den Fensterlaibungen und im Regelquerschnitt innen und außen angebracht. Befindet sich auf der unteren Fensterlaibung ein Fensterbrett so wird der Oberflächentempersensor unten an der seitlichen Fensterlaibung angebracht, da die Materialien und Materialeigenschaften unter dem Fensterbrett meist nicht genau bekannt sind. Befindet sich kein Fensterbrett in der Fensterlaibung, so werden die Oberflächentempersensoren in der unteren Laibungskante zum Fenster angebracht. Ausgehend von den Ergebnissen des ersten Versuchsraumes werden die Berechnungen für die weiteren Fensterlaibungen ebenfalls auf die Raumlufttemperatur in Raummitte bezogen. Um weitere Fehlerquellen oder Einflussparameter auszuschließen, werden zusätzlich bei allen Varianten die Außenoberflächentemperaturen gemessen und in den Berechnungen direkt, anstelle von Außenklima mit Wärmeübergangswiderstand und Strahlungsabsorption, verwendet. Somit müssen auch keine weiteren Annahmen bzgl. Strahlungsreflexion oder Verschattung getroffen werden.

Für den Wärmeübergangskoeffizienten an der Innenseite wird in der Regel der bereits angegebene Wert von $\alpha_i = 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt. In Einzelfällen bei deutlich verstärktem oder reduziertem Konvektionseinfluss wird dieser allerdings weiter angepasst. Für die Untersuchung des konvektiven- und strahlungsbedingten Anteils der Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen werden zusätzlich zwei Versuchsräume mit Markierungen an den Wänden, der Decke und dem Fenster versehen, um bei händischen Messungen der Oberflächentemperaturen immer auf dieselben Positionen zurückgreifen zu können. Der Versuchsraum „Werkstatt“ wird im Folgenden etwas detaillierter beschrieben.

Die Positionierung der Sensoren und Markierungen wird exemplarisch am Versuchsraum „Werkstatt“ gezeigt. Dabei ist in Abbildung 1 ein Büro in der Werkstatt des IBP (Bj. 2009) zu sehen. Das Büro besitzt jeweils eine nach Osten und Süden orientierte Fensterfront. In der unteren Fensterlaibung befindet sich ein Fensterbrett aus einer Spanplatte und wandseitig unter der Fensterlaibung zusätzlich ein Kabelkanal. Die Wand besteht aus 24 cm dicken Ziegelsteinen und einer 18 cm dicken EPS Dämmung. Die Befestigung der Oberflächentempersensoren erfolgt an der Ostwand, damit die Messwerte durch direkte Sonneneinstrahlung möglichst wenig verfälscht werden. An der Ostwand werden im Regelquerschnitt innen und außen sowie in den Fensterlaibungen Oberflächentempersensoren angebracht. Der für die Auswertung herangezogene Innenoberflächentempersensor befindet sich an der Außenseite der südlichen Fensterlaibung der Ostwand (vergleiche Abbildung 2, Kreis) an dieser Position ist außer ggf. frühmorgens in den Sommermonaten mit keiner direkten Strahlung zu rechnen. Der abgeschirmte Lufttemperaturesensor befindet sich in einem Meter Höhe über dem Fußboden in Raummitte. In Abbildung 3 ist der

Grundriss dargestellt. Das Fenster mit den Sensoren ist mit einem Rechteck markiert. Die Positionen der Oberflächentempersensoren an der Ostwand sind mit dunkelblauen Rechtecken in Abbildung 4 gekennzeichnet.

Zusätzlich ist dieser Versuchsraum mit Markierungen für die händische Oberflächentemperaturmessungen (zur Ermittlung des konvektiven und strahlungsbedingten Anteils der Wärmeübergangskoeffizienten) versehen. Die Markierungen bestehen aus Papier-Klebspunkten am Fenster, den Fensterlaibungen, der Decke, der Westwand und der Nordwand. Der für die Aufteilung des konvektiven und strahlungsbedingten Anteils der Wärmeübergangskoeffizienten ausgewertete Oberflächentempersensor befindet sich mittig in der Fensterlaibung (Abbildung 2, Ellipse). Im Folgenden wird das Büro in der Werkstatt einfach als „Werkstatt“ bezeichnet. .



Wenn die ersten Messdaten vorliegen, werden zunächst wie bei der Voruntersuchung die nicht in allen Fällen detailliert bekannten Materialdaten sowie in begründeten Fällen (Lüftung etc.) die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in den Regelquerschnitten überprüft. Dies erfolgt anhand einer eindimensiona-

len hygrothermischen Simulationen der jeweiligen Bauteile im Regelquerschnitt und den Vergleich der ermittelten Innenoberflächentemperaturen mit den Messdaten. Von den Versuchswänden Werkstatt, Büro und Versuchshalle Ziegelwand existieren Planungsunterlagen, aus denen die Materialtypen und einzelne Materialeigenschaften wie Rohdichte oder Wärmeleitfähigkeit entnommen werden können. Bei den anderen beiden Wänden sind zwar die verwendeten Materialien bekannt, Informationen zu den Materialeigenschaften liegen aber nicht vor. Hier wird die Wärmeleitfähigkeit mit Hilfe der Bestandsdokumentation „Energetische Bewertung von Bestandsgebäuden“ der Deutschen Energie Agentur abgeschätzt ([95] Seit 21). Für den effektiven Wärmeübergangskoeffizienten im Regelquerschnitt innen wird wiederum der Wert von $7,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verwendet. An den Außenoberflächen werden die Messwerte der Oberflächentempersensoren ohne zusätzlichen Übergangswiderstand angesetzt.

Beim Vergleich der berechneten Oberflächentemperaturen mit den Messdaten sollen die Differenzen möglichst gering bleiben –als Kriterium für eine gute Übereinstimmung wird eine Abweichung des Mittelwertes von $\pm 0,5 \text{ K}$ gewählt. Ist die Abweichung höher, erfolgt eine weitere Überprüfung und Anpassung der Materialeigenschaften. Sind die Materialeigenschaften bekannt, aber es befindet sich z.B. eine Lüftungsanlage im Raum (Versuchshalle Ziegel und Holz), so werden die Wärmeübergangskoeffizienten im Regelquerschnitt entsprechend der größeren Luftbewegung erhöht. Im Büro musste der Oberflächentempersensor im Regelquerschnitt hinter einem Schrank angebracht werden – in diesem Fall ist von einem geringeren konvektiven Wärmeübergang auszugehen und der Wärmeübergangskoeffizient wird entsprechend reduziert. In einem anderen Fall befindet sich neben dem Versuchsraum ein Heizungsraum – hier ist die angrenzende Wand wärmer, wodurch sich der strahlungsbedingte Anteil des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten erhöht.

Für die Berechnung mit WUFI® 2D werden die Materialeigenschaften bzw. der Wärmeübergangskoeffizient im Regelquerschnitt von der Variante verwendet, die die geringste Abweichung zwischen den gemessenen und den berechneten Oberflächentemperaturen aufweist. Die Auswertungszeiträume für die verschiedenen Bauteile unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Messperioden und der Beschränkung auf Phasen ohne Messausfälle.

Die Ergebnisse der Überprüfung der Materialeigenschaften und des innenseitigen Wärmeübergangskoeffizienten sind exemplarisch für die Werkstatt dargestellt. Der ausgewertete Messzeitraum der Werkstatt ist vom 11.11.2014 bis 07.09.2015. Aufgrund der Ostorientierung des Fensters und der zusätzlichen südlichen Fensterfront, wodurch es morgens und mittags zur Sonneneinstrahlung im Bereich der relevanten Leibung kommt, werden die Messwerte von 8:00 bis 14:00 Uhr jeweils nicht berücksichtigt. Die Materialeigenschaften sind aufgrund des geringen Alters des Bauteils weitgehend bekannt. Daher werden nur die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung und die Wärmekapazität des Ziegels variiert. Nach jeder Änderung der Materialeigenschaften werden die Oberflächentemperaturen im Regelquerschnitt neu berechnet und mit den gemesse-

nen Oberflächentemperaturen verglichen. Für den inneren Wärmeübergangskoeffizienten im Regelquerschnitt wird, aufgrund der „normalen Bedingungen“ ein Wert von $\alpha_i = 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verwendet. „Normale Bedingungen“ bedeutet in diesem Fall, dass sich in dem Raum keine Lüftungsanlage befindet und somit keine erzwungene Konvektion stattfindet. Die Werkstatt wird zudem nicht mit einem Heizkörper unter der Fensterlaibung, sondern mit einer Fußbodenheizung, beheizt. In Bild 265 ist der Temperaturverlauf der gemessenen (blau) und mit WUFI® Pro berechneten (rot) Oberflächentemperaturen zu sehen. Die Temperaturdifferenz zwischen gemessenen und berechneten Oberflächentemperaturen ist unten im Bild in grau dargestellt.

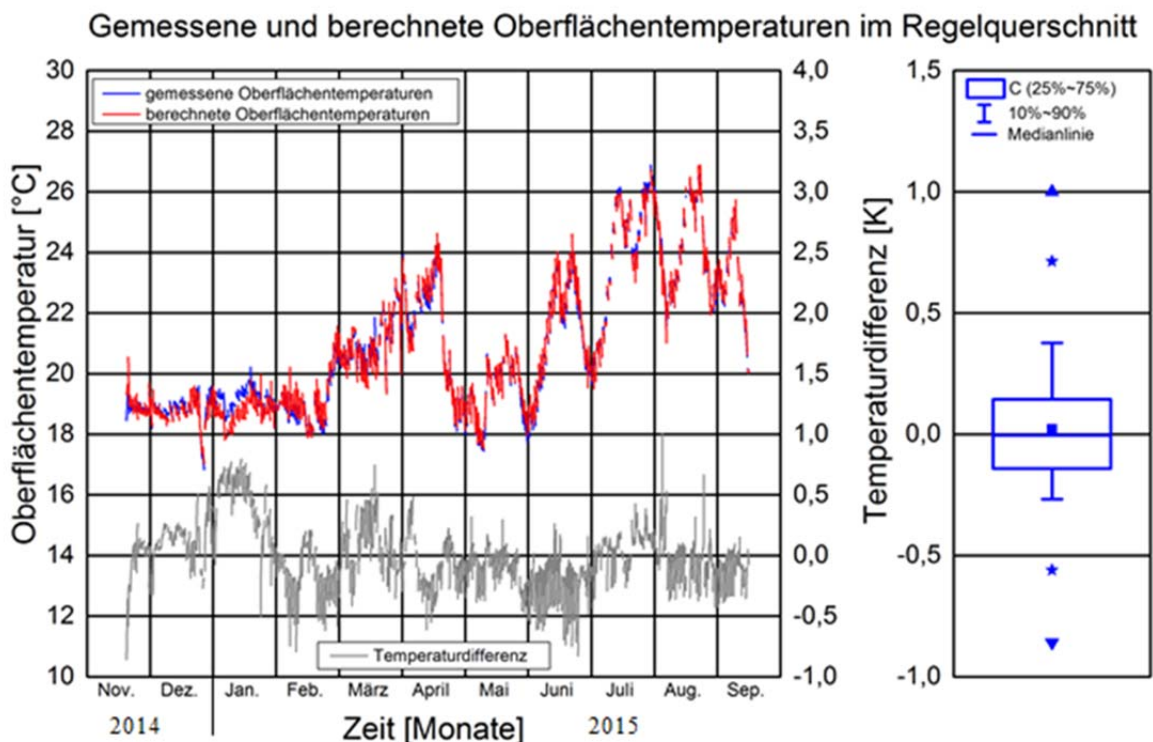


Bild 265:

Temperaturverlauf der gemessenen und berechneten Oberflächentemperaturen im Regelquerschnitt mit deren Temperaturdifferenzen der Werkstatt.

Der Boxplot gibt an, dass sich 50 % der Temperaturdifferenzen zwischen 0,15 K und -0,15 K befinden. Die mittlere Temperaturdifferenz beträgt 0,02 K, die maximale 1,00 K und die minimale -0,86 K. Das bedeutet, dass mit den angesetzten Randbedingungen und Materialeigenschaften insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen erzielt werden kann.

In einem weiteren Raum kann ebenfalls allein mit der Anpassung der Materialeigenschaften eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden. In zwei Versuchsräumen (Versuchshalle Ziegel und Holz) ist zusätzlich eine

Anpassung des innenseitigen Wärmeübergangskoeffizient im Regelquerschnitt auf $\alpha_i = 8,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erforderlich. Dieser erhöhte Wert kommt im einen Fall durch einen benachbarten Heizungsraum mit entsprechend wärmerer Zwischenwand und im anderen Fall durch Lüftungsanlage mit erhöhter Luftgeschwindigkeit zustande. In letzten Versuchsraum (Büro) konnte der innenseitige Oberflächentempersensor im Regelquerschnitt nur hinter einem Schrank angebracht werden. Hier ergibt sich erst nach einer Reduktion des Wärmeübergangskoeffizienten auf $\alpha_i = 6,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Eine detaillierte Beschreibung der der Nachberechnungen ist in [96] enthalten.

Konvektiver- und strahlungsbedingter Anteil der Wärmeübergangskoeffizienten

Anhand der punktuellen Messdaten bezüglich der verschiedenen Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen von zwei Räumen wird der konvektive und strahlungsbedingte Anteil der Wärmeübergangskoeffizienten in den Fensterlaibungen genauer untersucht. Die Nettowärmestromdichte des Strahlungsaustauschs hängt neben den Sichtfaktoren (also den prozentuellen Anteilen der verschiedenen im Strahlungsaustausch stehenden Flächen), der Stefan-Boltzmann-Konstante und den langwelligen Emissionsgraden vor allem von der Temperaturdifferenz zwischen den jeweiligen Strahlungspartnern ab.

Die erforderlichen Parameter werden detailliert für die zwei Versuchsräume Werkstatt und Versuchshalle Ziegel ermittelt. Dabei besteht die Versuchshalle Ziegel aus einem 24 cm dicken, hochdämmenden Ziegel und einer 12 cm dicken Hanfdämmung. Die Werkstatt dagegen besteht aus 24 cm Hochlochziegel und einer 16 cm dicken EPS Dämmung. Zunächst werden die Sichtfaktoren F_{d1-2} zwischen dem Oberflächentempersensor in der Fensterlaibung und den verschiedenen, mit ihm im Strahlungsaustausch stehenden Flächen berechnet. Der Sichtfaktor gibt an, wie hoch der Strahlungsanteil ist, der von der einen Fläche ausgeht und auf der anderen Fläche auftrifft. Zur Berechnung der Sichtfaktoren werden die Flächenverhältnisse aller Strahlungspartner benötigt. Da die Oberflächentempersensoren eine sehr geringe Fläche besitzen, werden diese als differentielle Fläche angesehen.

Die Temperaturen der verschiedenen Oberflächen werden nicht permanent aufgezeichnet sondern lediglich punktuell mittels eines Kontakttemperaturmessgeräts an den markierten Positionen gemessen. Alle Temperaturen innerhalb eines Raums werden gleichzeitig, aber im Abstand von einigen Tagen so erfasst, dass die kurzwelligen Strahlungsgewinne möglichst ohne Einfluss bleiben. Also je nach Orientierung z.B. morgens und abends oder mittags und abends. Es handelt es sich hierbei jeweils um Momentaufnahmen, die im Sommer und Herbst 2015 durchgeführt wurden. Mit Hilfe der ermittelten Sichtfaktoren, der Oberflächentemperaturen der Strahlungspartner und der Messwerte des Oberflächentempersensors können die Nettowärmestromdichten durch Strahlung q_S für die beiden Versuchsräume näherungsweise berechnet werden.

Für die konvektive Wärmestromdichte q_K wird zunächst die Gesamt-Wärmestromdichte durch die Fensterlaibung q_{FL} berechnet, da diese die Summe

aus der konvektiven- und strahlungsbedingten Wärmestromdichte repräsentiert. Die Nettowärmestromdichte durch die Fensterlaibung ist abhängig von den Bauteiloberflächentemperaturen und dem Wärmedurchlasskoeffizienten Λ für die Fensterlaibung. Dieser wird mit einem Wärmebrückenberechnungsprogramm ermittelt. Mit den berechneten Wärmedurchlasskoeffizienten Λ und den Oberflächentemperaturen der Fensterlaibung innen sowie der Oberflächentemperaturen des Regelquerschnitts außen kann dann die Wärmeleitung durch die Fensterlaibungen berechnet werden. Der Wärmestromdichte durch Konvektion q_K berechnet sich dann aus der Differenz zwischen der Gesamt-Wärmestromdichte durch die Fensterlaibung q_{FL} und der zuvor ermittelten Wärmestromdichte durch Strahlung q_S . Aus den verschiedenen Wärmestromdichten können die Wärmeübergangskoeffizienten berechnet werden. Beim Bezug auf die Lufttemperatur ist das Verhältnis zwischen den Wärmestromdichten und den Wärmeübergangskoeffizienten gleich. Die genaue Beschreibung der Berechnungen zuzüglich der verwendeten Formeln und Ergebnistabellen können in der im Rahmen dieses Projekts entstandenen Bachelorarbeit „Bestimmung effektiver Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen“ eingesehen werden [96].

Ermittlung effektiver Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen

Die Ermittlung der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt im Sinne eines Worst-Case-Szenario an der kritischsten bzw. kältesten Stelle in den verschiedenen Fensterlaibungen, da auch diese Position bei der Bewertung durch die Simulation funktionsfähig sein soll. Die kritischsten Stellen befinden sich entsprechend den Messungen meist unten an der Außenseite der Laibung. Dies sind auch die Positionen an denen in der Praxis immer wieder Schimmelpilzwachstum auftritt. Die Temperaturmessungen ergaben hier ebenfalls jeweils die geringsten Oberflächentemperaturen wodurch die Praxisbeobachtung bestätigt werden kann.

Für den Vergleich mit den Messungen werden die Wandaufbauten in WUFI® 2D nachberechnet. Dabei werden die Materialdaten und Randbedingungen verwendet, wie sie zuvor im Regelquerschnitt anhand von eindimensionalen Simulationen ermittelt wurden. An der Außenoberfläche werden die Messwerte der Oberflächentemperatursensoren verwendet. Für die Fensterlaibung wird zunächst der in der DIN 4108-Bbl 2 vorgeschlagene Wärmeübergangskoeffizient von $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt. Die Wärmeleitfähigkeit des Fensterrahmens wird anhand des Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens U_f berechnet und vereinfacht als Material mit homogener Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt. Die berechneten Oberflächentemperaturen werden dann mit den gemessenen Oberflächentemperaturen verglichen. Als Grenzkriterium für eine gute Übereinstimmung wird wieder die Abweichung des Mittelwertes um $\pm 0,5 \text{ K}$ verwendet. Die berechneten Temperaturen sollten dabei im Zweifel niedriger bleiben als die gemessenen, um im Sinne der Bemessung eine gewisse Sicherheitsreserve aufzuweisen. Falls die Temperaturdifferenz zu groß ist, wird der effektive Wärmeübergangskoeffizient an der Fensterlaibung so lange variiert, bis die Differenz innerhalb der o.g. Grenze liegt. Bei der Auswertung werden nur die Messzeiträume berücksichtigt, in denen die Temperaturmessungen nicht durch

die Solarstrahlung beeinflusst werden. Diese sind je nach Orientierung des Fensters unterschiedlich. Ist das Fenster z.B. nach Westen orientiert werden die Uhrzeiten von 12:00 bis 19:00 Uhr nicht berücksichtigt.

5.6.3 Ergebnisse

Konvektiver- und strahlungsbedingter Anteil von effektiven Wärmeübergangskoeffizienten

Die Ergebnisse der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in der Fensterlaibung sowie deren Strahlungs- und Konvektionsanteil sind für die beiden Versuchsräume an drei Tagen im Herbst in Tabelle 50 dargestellt. Die Messzeiträume und das Datum an dem gemessen wurde sind für angegeben.

Tabelle 50:

Ergebnisse der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten beider Versuchsräume für den Herbst.

Datum	20.10.15	21.10.15	22.10.15
Werkstatt			
Uhrzeit	7:40 – 8:06	7:35 – 8:00	7:28 – 7:55
$\alpha_{eff,FL,i} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	6,98 (100 %)	5,01 (100 %)	2,87 (100 %)
$\alpha_{K,FL,i} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	6,49 (92,94 %)	3,72 (74,22 %)	0,85 (29,73 %)
$\alpha_{S,FL,i} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	0,49 (7,06 %)	1,29 (25,78 %)	2,02 (70,27 %)
Versuchshalle Ziegel			
Uhrzeit	8:17 – 8:48	8:04 – 8:37	8:00 – 8:29
$\alpha_{eff,FL,i} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	-	4,58 (100 %)	5,39 (100 %)
$\alpha_{K,FL,i} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	-	1,95 (42,56 %)	2,43 (45,01 %)
$\alpha_{S,FL,i} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	-	2,63 (57,44 %)	2,96 (54,99 %)

Die Ergebnisse der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in der Fensterlaibung der Werkstatt liegen an den drei aufeinanderfolgenden Tagen bei 6,98 W/(m²K), 5,01W/(m²K) bzw. 2,87 W/(m²K). Da sich die Bedingungen an diesen Tagen eigentlich nur wenig unterscheiden, sind die Abweichungen vermutlich auf instationäre Effekte – also v.a. Wärmespeicherung in den Bauteilen zurückzuführen. Auch der Konvektions- und Strahlungsanteil fallen sehr unterschiedlich aus. Aufgrund der an den anderen Oberflächen gemessenen, sehr ähnlichen Temperaturen ergibt sich am 20.10.15 ein rechnerischer Konvektionsanteil von ca. 93 % und nur ca. 7 % für den strahlungsbedingten An-

teil. An den zwei darauf folgenden Tagen sinkt der konvektive Wärmeübergangskoeffizient, während der strahlungsbedingte Anteil steigt. Der 20.10.15 war bewölkt während es an den folgenden Tagen immer sonniger wurde. Die stärker werdende Einstrahlung in die Werkstatt könnte ein Grund dafür sein, dass der strahlungsbedingte Wärmeübergangskoeffizient innerhalb der drei Tage ansteigt. Die prozentualen Anteile für den zweiten Tag liegen bei 74 % Konvektion und 26 % Strahlung. Am dritten Tag ist diese Aufteilung dann in etwa umgekehrt. Im Mittel über die drei Tage liegt die rechnerisch ermittelte Aufteilung Verteilung somit bei etwa 65 % Konvektion zu 35 % Strahlung. In der Versuchshalle mit der Ziegelwand ergeben sich etwas andere Werte. Am 20. Oktober fanden dort noch keine Messungen statt. Der effektive Wärmeübergangskoeffizient lag am 21. Oktober bei 4,58 und am 22. Oktober bei 5,39 W/(m²K). Die rechnerische Aufteilung in die beiden Komponenten ergibt am ersten Tag einen Strahlungsanteil von 2,63 W/(m²K), was einem Anteil von 57 % entspricht und am zweiten Tag 2,96 W/(m²K) bzw. 55 %. Die konvektiven Anteile liegen bei 2,43 W/(m²K) oder 43 % am ersten und 2,43 W/(m²K) bzw. 45 % am zweiten Tag.

In der Werkstatt weichen somit sowohl die Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten als auch deren prozentuale Verteilung auf Strahlung und Konvektion deutlich von den Angaben in der Norm ab. Am ersten Tag liegt der Übergangskoeffizient fast doppelt so hoch, am dritten dann deutlich niedriger als 4 W/(m²K). Die Gründe für die Differenzen sind zumindest nicht offensichtlich. Am ehestens ist aber davon auszugehen, dass bei den instationären Randbedingungen die Wärmespeicherung und thermische Trägheit die Ergebnisse doch deutlicher beeinflusst als erwartet. Dagegen liegt der Gesamt-Wärmeübergang an der Ziegelwand in der Versuchshalle recht nahe am von der Norm angegebenen Wert. Die Aufteilung in Strahlung und Konvektion ist annähernd hälftig, wobei der leicht höhere Konvektionsanteil auf die in der Halle vorhandene Lüftungsanlage zurückgeführt werden kann.

Eine pauschale Aufteilung des effektiven Wärmeübergangs in Konvektions- und Strahlungsanteil ist auf Basis nur kurzer Messzeiten auch an Tagen mit vergleichsweise günstigen Klimarandbedingungen nicht sinnvoll möglich. Allenfalls eine langfristige Messung über ein ganzes Jahr würde eine mittlere und dann ggf. repräsentative Aufteilung ermöglichen. Die Messdaten werden für raumklimatische Betrachtungen zwar noch weiter ausgewertet, da für die hygrothermische Bauteilsimulation die Aufteilung jedoch nicht erforderlich ist, wird im Folgenden nur noch der effektive Gesamt-Wärmeübergangskoeffizient betrachtet.

Ermittlung effektiver Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen

Die Ergebnisse für die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen werden exemplarisch für die Werkstatt etwas ausführlicher dargestellt. Die anderen Ergebnisse sind dann tabellarisch aufgelistet. Die Temperaturverhältnisse in der Fensterlaibung der Werkstatt werden zweidimensional mit einer hygrothermischen Simulation nachberechnet. Der effektive Wärmeübergangskoeffizient wird dabei zunächst mit dem in der Norm angegebenen Wert von

4,0 W/(m²K) angesetzt. Der Vergleich der berechneten (rot) mit der gemessenen Oberflächentemperatur (blau) ist in Bild 266 dargestellt. Unten im Bild ist die Differenzkurve in grau dargestellt. Die beiden Kurven stimmen bereits sehr gut überein – die statistische Auswertung rechts im Bild zeigt eine mittlere Abweichung von nur 0,019 K, wobei sich 50% der Werte zwischen 0,3 K und -0,2 K befinden. Da mit diesem Wert bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden kann, ist keine weitere Anpassung des Übergangskoeffizienten erforderlich.

Da der Raum keine Lüftungsanlage und auch keinen Heizkörper unter dem Fenster sondern eine Fußbodenheizung aufweist, scheinen die Bedingungen recht nahe an den in der Norm angenommen zu liegen.

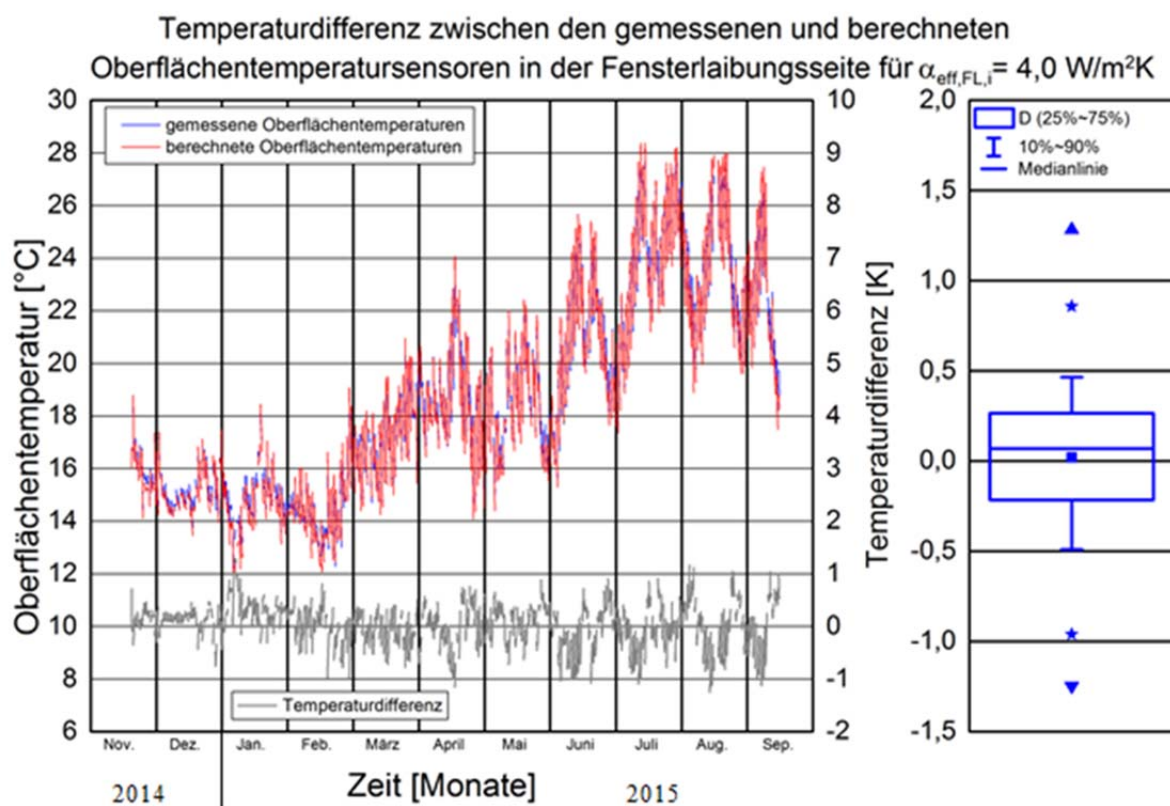


Bild 266:
Temperaturverlauf der gemessenen und berechneten Oberflächentemperaturen in der Fensterlaibungsseite mit deren Temperaturdifferenzen der Werkstatt.

In Tabelle 51 werden die wesentlichen Eigenschaften verschiedenen Versuchsräume und –wände sowie die Ergebnisse der ermittelten effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in den Fensterlaibungen zusammengefasst.

Tabelle 51:
Zusammenfassung der Eigenschaften der verschiedenen Versuchsräume und

Angabe der ermittelten effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in den Fensterlaibungen.

	Versuchshalle Nebenraum	Büro	Werkstatt	Versuchshalle Ziegel	Versuchshalle Holz
Baujahr	1960-1970	1990-2000	2009	2014	2014
„Mauerwerk“	Ziegel	Ziegel	Ziegel	Ziegel	Holz
Dämmung	Mineralfaser	EPS	EPS	Hanf	Holzfaser, Steinwolle (Gefachdämmung)
Wandstärke	39,6 cm	37,5 cm	44 cm	39,7 cm	28,5 cm
U-Wert der Wand	$0,495 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$0,331 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$0,226 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$0,332 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$0,167 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Heizungssystem	Mobiler Elektroradiator	Heizkörper unter der Fensterlaibung	Fußboden- heizung	Lüftungsan- lage	Lüftungsanlage
Orientierung des Fensters	Westen	Norden	Osten	Westen	Westen
Verglasung	2-fach	2-fach	2-fach	2-fach	3-fach
Fensterrahmen	Holz	Holz	Kunststoff	Kunststoff	Kunststoff
Laibungstiefe ohne Kabelkanal	17 cm	13 cm	18 cm	9,5 cm	5 cm
Anbringung des Oberflächentem- peratursensors	Fensterlaibungsseite	Fensterlai- bungsseite	Fensterlai- bungsseite	Untere Fens- terlaibung	Untere Fenster- laibung
$\alpha_{eff,RQ,i}$	$7,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$6,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$7,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$8,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$8,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\alpha_{eff,FL,i}$	Südl.	Nörtl.	$4,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$4,0 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$4,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
	$4,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$4,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$			

Die ermittelten Übergangskoeffizienten liegen im Bereich zwischen $3,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei der gut gedämmten Leichtbauwand und $4,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei den

eher mäßig gedämmten, massiven Ziegelwänden. Der Mittelwert der sechs Laibungen liegt mit $4,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sehr nahe an den von der Norm vorgeschlagenen $4,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Der eigentlich angestrebte Vergleich zwischen Leicht- und Massivbauteilen mit unterschiedlichem U-Wert ist nur teilweise möglich, da die Nachberechnung an weiteren nicht aufgeführten Leichtbauwänden aufgrund der nicht ausreichend bekannten Wandaufbauten nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich war.

Der Vergleich zwischen dem Büroraum aus den 90er Jahren und der 2014 errichteten Ziegelwand zeigt, dass sich bei gleicher Bauweise (gedämmtes Ziegelmauerwerk) und gleichem U-Wert der Wand auch ein nahezu gleicher Wärmeübergangskoeffizient an der kritischen Position in der Laibung mit $4,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ einstellt. Da im einen Raum ein Heizkörper unter dem Fenster angeordnet ist und im andern Raum eine Raumlufanlage die Luftumwälzt, könnte die verstärkte Konvektion zu den leicht höheren Werten im Vergleich zur Norm führen.

Im Nebenraum der Versuchshalle befindet sich ebenfalls eine Ziegelwand allerdings mit geringerer Dämmdicke und einen um den Faktor 1,5 höheren U-Wert. Die Orientierung der Wand und des Fensters ist gleich wie bei der zuvor beschriebenen Ziegelwand in der gleichen Halle. An diesem Fenster wurden beide Laibungen mit Süd- und Nordorientierung betrachtet. Die aus der Nachberechnung resultierenden U-Werte liegen mit $4,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an der südlichen und $4,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an der nördlichen Laibung sehr nahe beieinander und damit etwas höher als bei der besser gedämmten Wand.

Die Leichtbauwand in der Versuchshalle weist mit $0,167 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ den niedrigsten U-Wert der untersuchten Wände auf und das Fenster ist 3-fach verglast. Trotzdem bleibt die Wandstärke und in der Folge auch die Laibungstiefe geringer als bei den massiven Bauteilen. Bei dieser Laibung bleibt der effektive Wärmeübergangskoeffizient mit $3,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ am niedrigsten. Im Regelquerschnitt der Wand wurde aufgrund der Lüftungsanlage mit etwa $8,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ein gegenüber dem Standardwert von $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ leicht erhöhter Wärmeübergangskoeffizient ermittelt. In der Folge wurde auch in der Laibung ein eher höherer Wärmeübergangskoeffizient erwartet. Da der Laibungsbereich die Luftbewegung allerdings etwas abschirmt, scheint sich die Luftbewegung dort bezüglich des konvektiven Wärmeübergangs nur abgeschwächt auszuwirken.

5.6.4 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Aufteilung des konvektiven und strahlungsbedingten Anteils am effektiven Wärmeübergangskoeffizienten zeigen, dass die Werte innerhalb kurzer Zeiträume stark schwanken und von instationären Effekten wie Strahlung, Wärmespeicherung und thermischer Trägheit beeinflusst werden. Eine genauere Überprüfung der beiden Anteile wäre nur im Mittel und anhand von langfristigen Messdaten von mindestens einem Jahr sinnvoll. Da die Aufteilung für die hygrothermische Bauteilsimulation mangels

Informationen zur Oberflächentemperatur der Strahlungspartner nur von untergeordneter Bedeutung ist, wird diese Überprüfung hier nicht weiter verfolgt.

Für die Wärmeübergangskoeffizienten im Regelquerschnitt wurden Werte zwischen 6,5 und 8,5 W/(m²K) ermittelt. Der niedrigste Wert ergab sich hinter einem mit ca. 14 cm Abstand vor der Wand stehenden Schrank. Die höchsten Werte wurden eher unabhängig vom Dämmniveau in der mit einer Lüftungsanlage ausgestatteten Versuchshalle ermittelt. Bei den anderen beiden Räumen mit gedämmten Ziegelwänden werden trotz der Unterschiede bei der Beheizung und einem Faktor von über 2 beim U-Wert jeweils mit dem Normwert von 7,7 W/(m²K) gute Übereinstimmungen mit den Messwerten erzielt.

Bezüglich der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in der Laibung zeigt der Vergleich der verschiedenen Massivwände, dass die Faktoren Orientierung und Baumaterial der Bauteile vermutlich nur eine untergeordnete Rolle spielen. Bei ähnlichen U-Werten der Wände und vergleichbarer Bauweise ergeben sich hier auch ähnliche Wärmeübergangskoeffizienten in der Fensterlaibung.

Die Zusammenhänge könne in etwa wie folgt beschrieben werden: bei schlechter gedämmten Massivbauteilen stellt sich aufgrund der niedrigeren Temperaturen im Laibungsbereich ein gegenüber der Normangabe leicht höherer effektiver Wärmeübergangskoeffizient von etwa 4,5 W/(m²K) ein. Die Betrachtung nach Norm würde hier also auf der sicheren Seite liegen. Bei den besser gedämmten Massivwänden liegen die ermittelten Werte mit 4,0 bis 4,2 W/(m²K) bereits sehr nahe am Normwert, so dass auch hier die normale Betrachtung ausreicht. Bei der Leichtbauwand mit dem sehr niedrigen U-Wert der Wand und einem hochdämmenden Fenster mit Dreifachverglasung wird dagegen, trotz der Luftumwälzung durch die Lüftungsanlage und dem im Regelquerschnitt erhöhten Wärmeübergang von 8,5 W/(m²K) in der Laibung nur ein effektiver Wärmeübergangskoeffizient von 3,7 W/(m²K) ermittelt. Um hier bei einer Bemessung auf der sicheren Seite zu liegen, sollte bei Räumen mit normaler Beheizung und ohne Lüftungsanlage eher ein Wert von 3,5 W/(m²K) verwendet werden. Die Ergebnisse der Berechnung beziehen sich durch die Auswahl der Messpunkte immer auf die kritischste Position an der unteren Außenkante der Laibung. Im übrigen Laibungsbereich sind die Verhältnisse etwas günstiger.

5.6.5 Zusammenfassung

Um die vereinfachten Normvorgaben für den effektiven Wärmeübergang in Fensterlaibungen zu überprüfen und ggf. zu modifizieren wurden entsprechende Messungen an Bauteilen mit unterschiedlicher Bauweise und verschiedenen Dämmstandards durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Übergangskoeffizienten vor allem vom U-Wert des Bauteils, aber auch von einer evtl. Lüftungsanlage oder Konvektionsheizung in Fensternähe beeinflusst werden. Dabei wirkt sich ein besserer U-Wert aufgrund der geringeren Temperaturdifferenzen zur Raumluft und der infolgedessen reduzierten Konvektion mindernd auf den Wärmeübergang aus während

Belüftung oder Heizkörper unter dem Fenster den effektiven Wärmeübergang leicht erhöhen.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der in der Norm vorgeschlagene Wert von $4,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei Massivbauwänden mit U-Werten $> 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf der sicheren Seite liegt und bei aktuellem Dämmstandard noch ausreichend ist. Bei Leichtbauteilen mit deutlich besserem Dämmstandard (hier mit einem U-Wert von $0,167 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und gut dämmenden Fenstern bleibt der effektive Wärmeübergang aber geringer. Um hier bei einer Bemessung ebenfalls noch auf der sicheren Seite zu liegen, wird für Bauteile mit U-Werten $< 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vorgeschlagen, nur einen effektiven Übergangskoeffizienten von $3,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ anzusetzen.

6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Projektes sind die Basis für eine genauere und zuverlässigere Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in Bauteilen und Gebäuden. Dies ermöglicht eine sicherere Planung der Feuchtebilanz von wärmegeprägten Bauteilen, wobei erhöhte Feuchten oder Feuchteakkumulationen, die die Dämmwirkung beeinträchtigen oder zu Feuchteschäden oder mikrobiellem Bewuchs führen, bereits in der Planungsphase ausgeschlossen werden können.

Weiterhin stellen sie eine wichtige Grundlage für eine hygrothermische Optimierung und Entwicklung von Bau- und Dämmstoffen, Putze, Beschichtungen und Anstriche dar, die den Anforderungen an hoch gedämmten Bauteilen durch geeignete Materialeigenschaften gerecht werden. Eine höhere Effizienz von Dämmungen und die weitere Reduzierung von Problemen und damit verbundenen Folgesanierungen tragen dazu bei, die Akzeptanz energetischer Sanierungsmaßnahmen weiter zu steigern. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können Bau- und Betriebskosten (Energieeinsparung) weiter gesenkt werden, ohne dass dies zu Lasten der Zuverlässigkeit und Schadensfreiheit von Gebäuden geht.

Der drängende Bedarf für hygrothermische Referenzjahre mit Regen für die Bauteil- und Gebäudesimulationen wurde immer wieder deutlich: vor allem bei der Planung von Innendämmungen oder Dachbegrünungen werden regelmäßig geeignete Klimadaten angefragt, die bisher nicht zur Verfügung standen. Die im Rahmen des Projekts entwickelten hygrothermischen Referenzjahre werden nach Abschluss dieses Berichts auf der Homepage des IBP veröffentlicht und stehen damit den Baupraktikern zur Verfügung. Ebenso ist eine Aufnahme der Datensätze in die Datenbanken der WUFI-Software vorgesehen.

Vor allem für die Sanierung von Gebäuden, bei der eher an die Grenzen des bauphysikalisch möglichen gegangen werden muss als beim Neubau, ist eine möglichst genaue Berücksichtigung der lokalen Klimaverhältnisse essentiell für eine schadensfreie und kostengünstige Planung. Ein Programm zur Adaption der hygrothermischen Referenzjahre auf die lokalen Verhältnisse inklusive Berücksichtigung der lokalen Wind- und Regenverhältnisse wird erstellt und steht

künftig ebenfalls frei zum Download zur Verfügung. Damit ist die Anwendung der Modelle für Wissenschaft und Baupraxis einfach möglich. Vor allem für Bauteile, die sensitiv auf die lokal unterschiedlichen Belastungen reagieren können künftig einfacher und zuverlässiger bemessen werden.

Ein Vergleich der erforderlichen Maßnahmen bei der Sanierung von Decken unter Dachräumen zeigt, dass bei Ansatz realistischer Raumklimabedingungen eine deutlich einfachere und kostengünstigere Sanierung möglich wird als bei Ansatz von Außenklimadaten, die häufig vereinfachend herangezogen wurden. Die Modelle werden sukzessive in die WUFI Simulationssoftware integriert und soweit möglich auch als separate Modelle zur Verfügung gestellt. Die Keller-Raumlimamodelle wurden bereits im Rahmen des Feuchteschutzkongresses in Hamm im Juni 2016 präsentiert. Weitere Veröffentlichungen und Präsentationen zu den einzelnen Modellen sind geplant.

Simulationen gewinnen im Rahmen der Entwicklung, integralen Planung und Optimierung von Bauteilen von Gebäuden immer größere Bedeutung. Die bisher noch unvollständige Datengrundlage bezüglich der äußeren und inneren Klimarandbedingungen sowie deren Übertragung auf das Bauteil nicht nur im Regelquerschnitt sondern auch an kritischen Positionen wurde im Rahmen dieses Projekts deutlich erweitert und steht für alle Bereiche der Bauteil- und Gebäudesimulation zur Verfügung.

7 Abschlussarbeiten

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Klima- und Oberflächenübergangsbedingungen für die hygrothermische Bauteilsimulation“ wurden die in Tabelle 52 aufgeführten Abschlussarbeiten am Fraunhofer Institut für Bauphysik durchgeführt und betreut.

Tabelle 52:
Im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführte Abschlussarbeiten.

Ref.	Autor	Titel	Hochschule
[29]	Melanie Fischer	Entwicklung eines hygrothermischen Referenzjahres am Beispiel des Standortes Bremerhaven (Bachelorarbeit, 2013)	Hochschule München
[15]	Michael Neumayer	Anpassung von Klimadatenreihen für bauphysikalische instationäre Berechnungen aufgrund des Heat-Island-Effects, Höhenlagenkorrektur und anderer Einflüsse (Bachelorarbeit, 2014)	Technische Universität München
[20]	Maximilian Bubitsch	Sensitivitätsanalyse mit dem Wassergehalt kritischer Konstruktionen (Bachelorarbeit, 2014)	Hochschule Rosenheim

[75]	Christian Schießl	Entwicklung eines vereinfachten Modells zur Bestimmung der Klimarandbedingungen unbeheizter Gebäudезonen für die hygrothermische Bauteilsimulation (Masterarbeit, 2012)	Universität Stuttgart
[81]	Christoph Dieng	Grundlagen zur Modellbildung für das Raumklima in Tiefgaragen (Bachelorarbeit, 2013)	Hochschule München
[2]	Irina Breit	Einfluss von Klimadaten verschiedener Quellen auf die hygrothermische Beurteilung von Bauteilen (Bachelorarbeit, 2013)	Hochschule München
[100]	Phillip Kölsch	Einfluss von be- bzw. hinterlüfteten Dächern auf das Oberflächenklima der Unterkonstruktion (Masterarbeit, 2013)	Hochschule Augsburg

8 Literaturverzeichnis

- [1] WTA-Merkblatt 6-2-01/D, : Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse., 2002.
- [2] Breit, Irina: Einfluss von Klimadaten verschiedener Quellen auf die hygrothermische Beurteilung von Bauteilen. Holzkirchen: HS München, 2013.
- [3] Deutscher Wetterdienst: Deutscher Wetterdienst. URL <http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101420>. Stand 2016
- [4] DIN EN 15026:2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen- Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- [5] Perez, R; Ineichen, P; Maxwell, E; et al.; Dynamic global to direct irradiance conversion models. RP-644
- [6] Schmidt, Thomas. (2013) Online Hilfe zu WUFI Pro 5.2.
- [7] Künzel, Hartwig; Krus, Martin; Sedlbauer, Klaus: Algen auf Außenwänden Bauphysik als Ursache ? Bauphysik als Lösung !. Wismar: Dahlberg Kolloquium, 2001.
- [8] Blümel, ; Hollan, Eberhard; Kähler, Malte; et al.: Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Berlin: FU Berlin, 1986.
- [9] Christoffer, Jürgen; Deutschländer, Thomas; Webs, Monika: Testreferenzjahre. Offenbach am Main: DWD, 2004.
- [10] Künzel, Hartwig: Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen. Holzkirchen, 1994.
- [11] DWD: www.dwd.de. URL <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101422>. Stand 2015
- [12] Liljequist, Gösta; Cihak, Konrad: Allgemeine Meteorologie.: Vieweg, 1994.
- [13] Pilger, H.: Klimaatlas Steiermark. Kapitel 4: Niederschlag., 2010.
- [14] Oke, T.R.: City size and the urban heat island. In: Atmospheric Environment (1973).
- [15] Neumayer, Michael: Anpassung von Klimadaten für bauphysikalische instationäre Berechnungen auf grund des Heat-Island-Effects, Höhenlagenkorrektur und anderer Einflüsse.: BA TUM, 2014.

- [16] DWD: www.dwd.de. URL <http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101420>. Stand 2016
- [17] Saltelli, A.; Tarantola, S.; Campolongo, F.; et al.: Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models.: Wiley & Sons, 2004.
- [18] Morris, Max: Factorial sampling plans for preliminary computational experiments., 1991.
- [19] Cukier, R.; Fortuin, C.; Shuler, K.; et al.: Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients., 1973.
- [20] Bubitsch, Maximilian: Bachelorarbeit: Sensitivitätsanalyse mit dem Wassergehalt kritischer Konstruktionen.: HS Rosenheim, 2014.
- [21] Willems, Wolfgang; Schild, Kai; Dinter, Simone; et al.: Formeln und Tabellen Bauphysik., 2010.
- [22] Hasenrath, S.: Der Tagesgang von Temperatur und Luftfeuchtigkeit in San Salvador., 1963.
- [23] Tschierschke, K: Statistische Analyse und Interpretation langjähriger Niederschlags- und Temperaturdaten von Klimastationen im Tschadseegebiet. In: Berichte des Sonderforschungsberichts (1998), vol. 10, Heft 268, pp. 11-140.
- [24] Ouzzane, Mohamed; Eslami-Nejad, Parham; Et.al., : New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature., 2014.
- [25] Pfafferot, Jens; Gerber, Andreas; Herkel, Sebastian: Erdwärmetauscher zur Luftkonditionierung. In: Gesundheits Ingenieur (1998).
- [26] Hoffmann, Ludwig: Möglichkeiten der Klimaklassifikation mit Hilfe der zweimaligen Anwendung der Faktorenanalyse.: DWD, 1980.
- [27] Remund, Jan; Müller, Stefan; Kunz, Stefan; et al.: Meteororm Version 7 Handbook Part I: Software. Bern: Meteotest, 2014.
- [28] Wilcox, S.; Marion, W.: User Manual for TMY3 Data Sets.: U.S. Department of Energy, 2008.
- [29] Fischer, Melanie: Bachelorarbeit : Entwicklung eines hygrothermischen Referenzjahres am Beispiel Bremerhaven. München: HS München, 2013.
- [30] DIN-EN-ISO-15927-4, : Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden Berechnung und Darstellung von Klimadaten Teil4: Stündliche Daten zur Abschätzung des Jahresenergiebedarfs für Heiz- und Kühlsysteme.: Beuth, 2005.

- [31] DWD: www.dwd.de. URL <http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101640&lv3=101778>. Stand 2016
- [32] Fahrmeier, Ludwig; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; et al.: Statistik.: Springer, 2007.
- [33] Cornick, Steve; Djebbar, Reda; Dalglish, Alan: Selecting moisture reference years using a Moisture Index approach., 2003.
- [34] DIN 68800: 2012-Holzschutz Teil2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen.
- [35] DIN-4108-3:2014-11, : Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: klima- bedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- [36] Team, R: R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2012.
- [37] Tukey, John: Exploratory data analysis., 1977.
- [38] Gutfleisch, Ralf: <http://www.staedtestatistik.de>. URL http://www.staedtestatistik.de/fileadmin/vdst/ag-methodik/Leitfaeden/2008_AGMethodik_LeitfadenClusteranalyse_Teil2.pdf. Stand 04.11.2015
- [39] Stasius, Michael. (2009) Culsteranalyse Arten und Anwendungen. https://www.matse.itc.rwth-aachen.de/dienste/public/show_document.php?id=7276.
- [40] WTA 6-5, : Merkblatt: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren.: WTA, 2014.
- [41] Sedlbauer, Klaus: Dissertation: Vorhersage der Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Stuttgart, 2001.
- [42] Viitanen, H.; Rischkoff, A.C.: Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala: Swedish University of Agricultural Science, Department of Forest Products, 1991.
- [43] VDI-4710:Blatt 2, : Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung Gradta- ge. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [44] Levermore, GJ; Parkinson, JB: Analyses and algorithms for new Test Reference Years and Design Summer Years for the UK., 2006.
- [45] Kalamees, Targo; Jylha, Kirsti; Tietäväinen, Hanna; et al.: Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. In: Energy and Buildings (2015).

- [46] Remund, Jan; Müller, Stefan; Kunz, Stefan; et al.: Meteor Norm Version 7 Handbook part II: Theory.: Meteotest, 2014.
- [47] Ohmura, A.; Gilgen, H.; Wild, M.: Global Energy Balance Archive (GEBA) Report 1: Introduction. In: Zürcher Geographischen Schriften (1989), vol. 34.
- [48] WMO: Manual on the WMO Information System., 2015.
- [49] WMO: Climatological Normals (CLINO) for the Period 1961 - 1990., 1996.
- [50] Bertsch, Jonas; Fontana, Fabio; Foppa, Nando; et al.; Swiss GCOS Data in International Data Centers
- [51] Troen, Ib; Petersen, Erik.: Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1989
- [52] Christoffer, J.; Deutschländer, T.; Webs, M.: Handbuch zu den Testreferenzjahren 2011., 2011.
- [53] W. Weisheit, : Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Teubner (Stuttgart): Teubner Studienbücher der Geographie, 1995.
- [54] Möller, Fritz: Einführung in die Meteorologie. Mannheim, Wien, Zürich: BI-Wissenschaftsverlag, 1973.
- [55] Schirmer, Hans; Buschner, Werner; Cappel, Albert; et al.: Wie funktioniert das? Wetter und Klima. Mannheim, Wien, Zürich, 1989.
- [56] Wiedersich, Berthold: Taschenatlas Wetter. 2. Auflage. Gortha: Klett-Pethes, 2003.
- [57] 2008-A Description of the Advanced Research WRF Version 3.
- [58] Skamarock, William; Klemp, Joseph; Dudhia, Jimy; et al.; National Center for Atmospheric Research: A Description of the Advanced Research WRF Version 3
- [59] UCAR, : WRF Users Page. URL <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/downloads.html>. Stand
- [60] Xin, Qui; Yang, Fuquan; Corbett-Hains, Hamish; et al.; Procedure to Adjust Observed Climatic Data for Regional or Mesoscale Climatic Variations
- [61] Wakazuki, Yasutaka; Kimura, Fujio; Sato, Tomonori; et al.; Summary of Studies on Mesoscale Atmospheric Modeling
- [62] Ishizaki, Yasuhiro; Takayabu, Izuru; Nakaegawa, Toshiyuki; Validation of precipitation over Japan during 1985-2004 simulated by three regional climate models and two multi-model ensemble means

- [63] Meteorological Research Institute Japan: Non-Hygrostatic Regional Climate Model: Entwickelt beim Meteorological Research Institute in Japan. URL Non-Hygrostatic Regional Climate Model: Entwickelt beim Meteorological Research Institute in Japan http://www.mri-jma.go.jp/index_en.html . Stand 2015
- [64] Institute for Earth Science and Disaster Prevention: NIEL Regional Atmospheric Modeling System. URL <http://www.bosai.go.jp/e/>. Stand 2015
- [65] Vaisala: Test Report WXT 520 PTU Module Humidity measurement test., 2014.
- [66] Deutscher Wetterdienst: Aspirations-Psychrometer-Tafeln. Braunschweig: Vieweg, 1976.
- [67] OpenStreetMap: OpenStreetMap. URL <http://www.openstreetmap.de/>. Stand 2014
- [68] DWD, : www.dwd.de. URL http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimada-ten/german/temp__8110__fest__html,templateId=raw,property=publicationFile.html/temp_8110_fest_html.html. Stand 2015
- [69] DWD: Windgeschwindigkeitskarte zum Download. URL <http://beta.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/windkarten.html>. Stand 2015
- [70] DWD, : Niederschlagskarte zum Download. URL http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=P28800190621308654463391&switchLang=de&seCh=1. Stand 2015
- [71] Künzel, Hartwig: Regendaten für die Berechnung des Feuchetransports. Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- [72] MeteoGroup: URL <http://www.meteogroup.com/de/de/home.html>. Stand 2016
- [73] WTA Merkblatt 6-1-01/D: Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Stand 2002
- [74] DIN-EN-ISO 13788:2012: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren.
- [75] Schießl, C.: Entwicklung eines vereinfachten Modells zur Bestimmung der Klimarandbedingungen unbeheizter Gebäudezonen für die hygrothermische Bauteilsimulation Master-Thesis. Universität Stuttgart, 2012.
- [76] DIN-V-18599-2:2007-02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2:Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen. Berlin: Beuth Verlag, 2007.

- [77] Zirkelbach, Daniel; Künzel, H.M.; Schafaczek, B.; et al.: Dampfkonvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen.: EUZ, 2009.
- [78] DIN-4108-2:2003: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth Verlag.
- [79] DIN-EN-ISO 10211:2007-04: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen.
- [80] EN-ISO 14683:2007-04: Wärmebrücken im Hochbau - Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient - Vereinfachte Verfahren und Anhaltswerte. Berlin: Beuth Verlag.
- [81] Dieng, Christoph: Bachelorarbeit: Grundlagen zur Modellbildung für das Raumklima in Tiefgaragen. München: HS München, 2013.
- [82] Winter, Stefan; Bauer, Peter; Werther, Norman: Untersuchung der klimatischen Verhältnisse in Kriechkellern unter gedämmten Holzbodenplatten zur Vermeidung von Bauschäden bei nicht unterkellerten Gebäuden und zur Kostenreduzierung. Leipzig, 2008.
- [83] Großklo, Marc; Knissel, Jens: Bilanzierung und Belüftung von Treppenhäusern in Geschosswohnbauten bei der Bestandsanierung. Darmstadt: IWU, 2011.
- [84] ZVDH, Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks: Deutsches Dachdeckerhandwerk: Regeln für Dachdeckungen, Fachregeln für Dachdeckungen mit Dachziegeln und Dachsteinen. Köln: Müller, 2012.
- [85] DIN-EN-410:2011-04, : Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen. Berlin: Beuth Verlag.
- [86] DIN-EN-16012:2012-04, : Wärmedämmstoffe für Gebäude - reflektierende Wärmedämmprodukte - Bestimmung der Nennwerte der wärmetechnischen Eigenschaften. Berlin: Beuth Verlag.
- [87] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten., 1994.
- [88] Schaub, H.; Werner, H.: Wärmeübergangskoeffizient unter natürlichen Klimabedingungen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- [89] Gerhart, K.; Westdeutscher Verlag: Modellversuche über die örtliche Druck- und Wärmeübergangsverteilung an einem quadratischen Prisma im Hinblick auf die Umströmung von Gebäuden. 2006
- [90] Defraeye, Th.,: Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling. In: Energy Conversion and Management (2011), Issue 52, pp. 512-522.

- [91] Erhorn, Szerman: Überprüfung der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten in Außenwandecken von Wohnbauten. In: GI Gesundheits Ingenieur (1992), Heft 133, pp. 177-232.
- [92] Erhorn, Szerman,; Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten in Außenwandecken von Wohnbauten
- [93] 1982-Februar: II. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV).
- [94] Haug, ; Technische Universität München, Fraunhofer IBP, Holzkirchen: Ermittlung geeigneter Wärmeübergangskoeffizienten zur Abbildung von zwei- und dreidimensionalen Ecken einer monolithischen Außenwand in WUFI Pro
- [95] 2008-April: DIN EN ISO 6946: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient -Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007).
- [96] 2006-DIN 4108-Bbl 2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele.
- [97] Mayerlen, ; Technische Universität München: Voruntersuchungen zur Ermittlung detaillierter Wärmeübergangskoeffizienten für Fensterlaibungen
- [98] (dena), Deutsche; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Energetische Bewertung von Bestandsgebäuden, Arbeitshilfe für die Ausstellung von Energiepässen
- [99] Flucke, Yasmin; Hochschule München, Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik: Bestimmung effektiver Wärmeübergangskoeffizienten in Fensterlaibungen
- [100] Wetterdienst, Deutscher: www.dwd.de. URL http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Windenergie/Windkarten__entgeltfrei/Windkarten__10m/Bayern__Sued__10m,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Bayern_Sued_10m.pdf. Stand 2013

Anhang

A.1 Abkürzungsverzeichnis

α	kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CDF	kummulative Verteilungsfunktion (cumulative distribution function)
DIS	Diffusstrahlung
DWD	Deutscher Wetterdienst
FRY	Feuchtereferenzjahr
HRY	hygrisches Referenzjahr
HREL	relative Luftfeuchtigkeit
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
ILAH	atmosphärische Gegenstrahlung
ISGH	Globalstrahlung abgeleitet aus dem Englischen <u>i</u> rradiance <u>s</u> olar <u>g</u> lobal <u>h</u> orizontal
MBE	Mean Bias Error (mittlerer Fehler)
NHRCM	Non-Hydrostatic Regional Climate Model
NN	Normalnull
OSB	oriented strand board
PPART	Wasserdampfpartialdruck [hPa]
RMSE	Root Mean Square Error (mittlerer quadratischer Gesamtfehler)
TA	Außenlufttemperatur [°C]
TRY	Testreferenzjahre
WASP	Wind Atlas Analysis and Application Programm
WDVS	Wärmedämmverbundsystem

WRF	Weather Research and Forecasting Model
WS	Windgeschwindigkeit
X	absolute Feuchte

A.2 Tabellen und Bilder

Tabelle 53:
Aufbau Blechdach.

Blechdach (außen nach innen)			
Nr.	Bezeichnung	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1	Weichholz	0,02	0,09
2	Mineralwolle	0,14	0,035
3	Dampfbremse (sd=20m)	0,001	2,3
4	Gipskartonplatte	0,0125	0,2

Tabelle 54:
Aufbau helles Flachdach.

Flachdach hell (außen nach innen)			
Nr.	Bezeichnung	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1	OSB	0,02	0,13
2	Mineralwolle	0,28	0,04
3	PA - Folie	0,001	2,9
4	bautechnisches MDF	0,016	0,1

Tabelle 55:
Aufbau Gründach.

Gründach (außen nach innen)			
Nr.	Bezeichnung	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1	Substrat	0,06	0,9
2	Dampfbremse (sd=100m)	0,001	2,3
3	OSB	0,02	0,13
4	Mineralfaser	0,28	0,04
5	PA-Folie	0,001	2,9
6	bautechnisches MDF	0,016	0,1

Tabelle 56:
Aufbau Nordwand.

Nordwand (außen nach innen)			
Nr.	Bezeichnung	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1	Kalksandstein	0,15	1,0

Tabelle 57:
Aufbau Westwand.

Westwand (außen nach innen)			
------------------------------------	--	--	--

Nr.	Bezeichnung	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1	Kalkzementputz	0,015	0,8
2	Vollziegelmauerwerk	0,3	0,6
3	EPS Dämmung	0,08	0,04
4	Gipsputz	0,01	0,2

Tabelle 58:
Vergleich des Schlagregenaufkommens der Meteomedia Daten für die Gruppe 1.

	Chemnitz	Plauen	Oschatz
Hauptschlagregenrichtung	W	NW	W
Schlagregenmenge (West) [mm/a]	ca. 500	ca. 180	ca. 380

Tabelle 59:
Vergleich des Schlagregenaufkommens der Meteomedia Daten für die Gruppe 3.

	Hamburg	Bremerhaven	Warnemünde
Hauptschlagregenrichtung	WSW	WSW	W
Schlagregenmenge (West) [mm/a]	ca.610	ca.350	ca.200
Normalregenmenge [mm/a]	562	940	317

Tabelle 60:
Vergleich der Gradtage (bezogen auf eine Heizgrenztemperatur von 15 °C) zwischen den TRY aus [43] und den HRY auf Basis der Meteomedia Klimadaten.

Station	Heizgradtage TRY [Kd]	Station	Heizgradtage HRY [Kd]	Abweichung (Meteomedia gegen TRY) [%]

Rostock	2508	Warnemünde	2257	-10
Hamburg	2421	Hamburg	2356	-2,7
Potsdam	2547	Potsdam	2312	-9,2
Braunlage	3302	Braunlage	3115	-5,7
Chemnitz	2683	Chemnitz	2862	+6,7
Fichtelberg	4385	Fichtelberg	4163	-5,1
Mannheim	2078	Mannheim	1894	-8,9
Passau	2718	Fürstenzell	2715	-0,1
Kassel	2380	Kassel	2318	-2,6
Stötten	3022	Stötten	2918	-3,4
Garmisch Partenkirchen	3062	Lindenberg	3044	-0,6
Mittelwert				-3,8

Tabelle 61:

Vergleich der Gradtage (bezogen auf eine Heizgrenztemperatur von 19.4 °C) zwischen den TRY aus [43] und den erstellten mittleren Jahren auf Basis der Meteomedia Klimadaten. Die Verwendung von 19.4°C als Heizgrenztemperatur stellt laut [43] eine Näherung für die in der Vergangenheit veröffentlichten Gradtage dar. Diese basierten auf einer fixen Innenraumtemperatur von 20°C.

Station	Heizgradtage TRY [Kd]	Station	Heizgradtage HRY [Kd]	Abweichung (Meteomedia gegen TRY) [%]

Rostock	3994	Warnemünde	3618	-9,4
Hamburg	3904	Hamburg	3747	-4,0
Potsdam	3932	Potsdam	3594	-8,6
Braunlage	4905	Braunlage	4614	-5,9
Chemnitz	4184	Chemnitz	4275	+2,2
Fichtelberg	5991	Fichtelberg	5746	-4,1
Mannheim	3336	Mannheim	3138	-5,9
Passau	4165	Fürstenzell	4031	-3,2
Kassel	3806	Kassel	3680	-3,3
Stötten	4587	Stötten	4311	-6,0
Garmisch Partenkirchen	4620	Lindenberg	4507	-2,4
Mittelwert				-4,6

Tabelle 62:
Betrachtete Messstandorte und deren Kategorisierung, Die Stationen mit * sind die Referenzstandorten von jeweiligen HRY-Zonen.

HRY-Zone	Standort	Abkürzung in Bilder	Meeres- höhe [m]	Lokalbedingung				
				Stadt	Neutral	Berg	Tal	Gewässer
1	Penkun	Pen	29		√			Im Sumpf
	Warnemuende*	War*	4					Am Meer
2	Amrum	Amr	15					Auf Insel
	Bad Fallingbostel	Bad	37		√			
	Braunschweig	Bra	81	√	√			
	Bremerhaven	Bre	7					Am Meer
	Hamburg-Veddel	Ham	7	√				Um Kanäle
	Hamburg-Flughafen*	Ham2*	11		√			
	Hannover-Flughafen	Han	55		√			
	Norderney	Nor	11					Auf Insel
Oschatz	Osc	150		√				
3	Barleben	Bar	40		√			
	Berlin-Mitte	Ber	37	√				
	Fleesensee	Fle	50					Am See
	Potsdam*	Pot*	81			Hang		Am See

	Waren	War	70					Am See
4	Bad Lauterberg	Bad2	307			Luvseite		
	Bad Marienberg	Bad3	547			Luvseite		
	Bad Suderode	Bad4	234			Leeseite		
	Braunlage*	Bra2*	607			Luvseite		
	Wernigerode	Wer	234			Leeseite		
	Wieda	Wie	340			Luvseite		
	Neuenbuerg	Neu	453			Luvseite		
5	Dortmund-Uni	Dor	108	√	√			
	Duesseldorf-Flughafen	Due	36		√			
	Kassel*	Kas*	231	√	√			
	Koeln-Niehl	Koe	46	√	√			
	Muenster/Osnabrueck	Mue	48		√			
6	Chemnitz*	Che*	418		√			
	Katzhuetten	Kat	405			Leeseite		
	Loessnitz/Sachsen	Loe	410			Luvseite		
	Marienberg	Mar	639			Luvseite		
	Plauen	Pla	386		√	Luvseite		
	Schmucke	Sch	937			Gipfel		
7	Fichtelberg*	Fic*	1213			Gipfel		
	Neuhuetten/Spessart	Neu2	453			Luvseite		
8	Baden-Baden	Bad5	166			Luvseite	√	
	Buehl/Baden	Bue	130		√			
	Buehlerhoehe	Bue2	770			Luvseite	√	
	Karlsruhe	Kar	116	√				
	Mannheim*	Man*	96		√			
	Woerth am Rhein	Woe	100		√			
9	Andechs	And	770					Am See
	Argenbuehl	Arg	684			Luvseite		
	Arnstein	Arn	318		√			
	Augsburg	Aug	461		√			
	Bad Kissingen	Bad6	166				√	
	Bamberg	Bam	239		√			
	Benediktbeuern	Ben	617			Luvseite		
	Chieming	Chi	551					Am See
	Coburg	Cob	285				√	
	Eschenfelden	Esc	474				√	
	Fuerstentzell*	Fue*	476		√			
	Gelbelsee	Gel	536		√			

	Harburg	Har	503		√			
	Kisslegg	Kis	662		√			
	Konstanz	Kon	442					Am See
	Leutkirch-Herlazhofen	Leu	671			Leeseite		
	Lindau-Bad Schachen	Lin2	400					Am See
	Meersburg	Mee	399					Am See
	Muehldorf am Inn	Mue2	405		√			
	Muenchen-Neuhausen	Mue3	515	√				
	Nuernberg	Nue	314		√			
	Regensburg	Reg	365				√	
	Weingarten	Wei	440		√			
	Weissenburg	Wei2	422		√			
	Wertheim	Wer	140				√	
	Wuerzburg	Wue2	268		√			
10	Stoetten*	Sto*	733			Gipfel		
11	Garmisch-Partenkirchen	Gar	719				√	
	Lindenberg*	Lin*	818			Gipfel		
	Nebelhorn	Neb	2070			Hang		
	Oberstaufen	Obe	800			√		
	Oberstdorf-Birgsau	Obe2	953				√	

Garmisch/Hohenpeissenberg

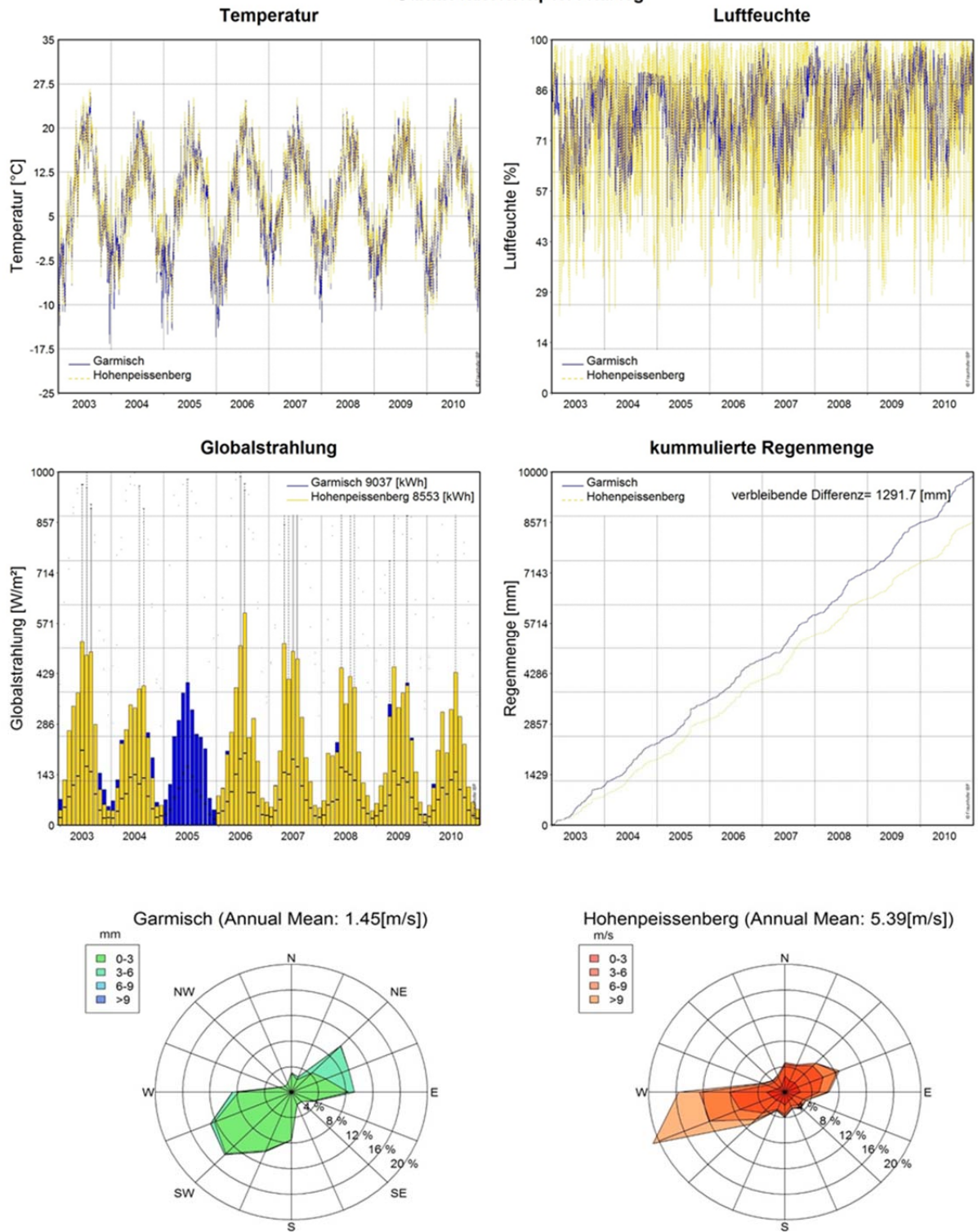


Bild 267: Vergleich der wichtigsten Klimaparameter für die beiden Standorte Hohenpeissenberg und Garmisch Partenkirchen.

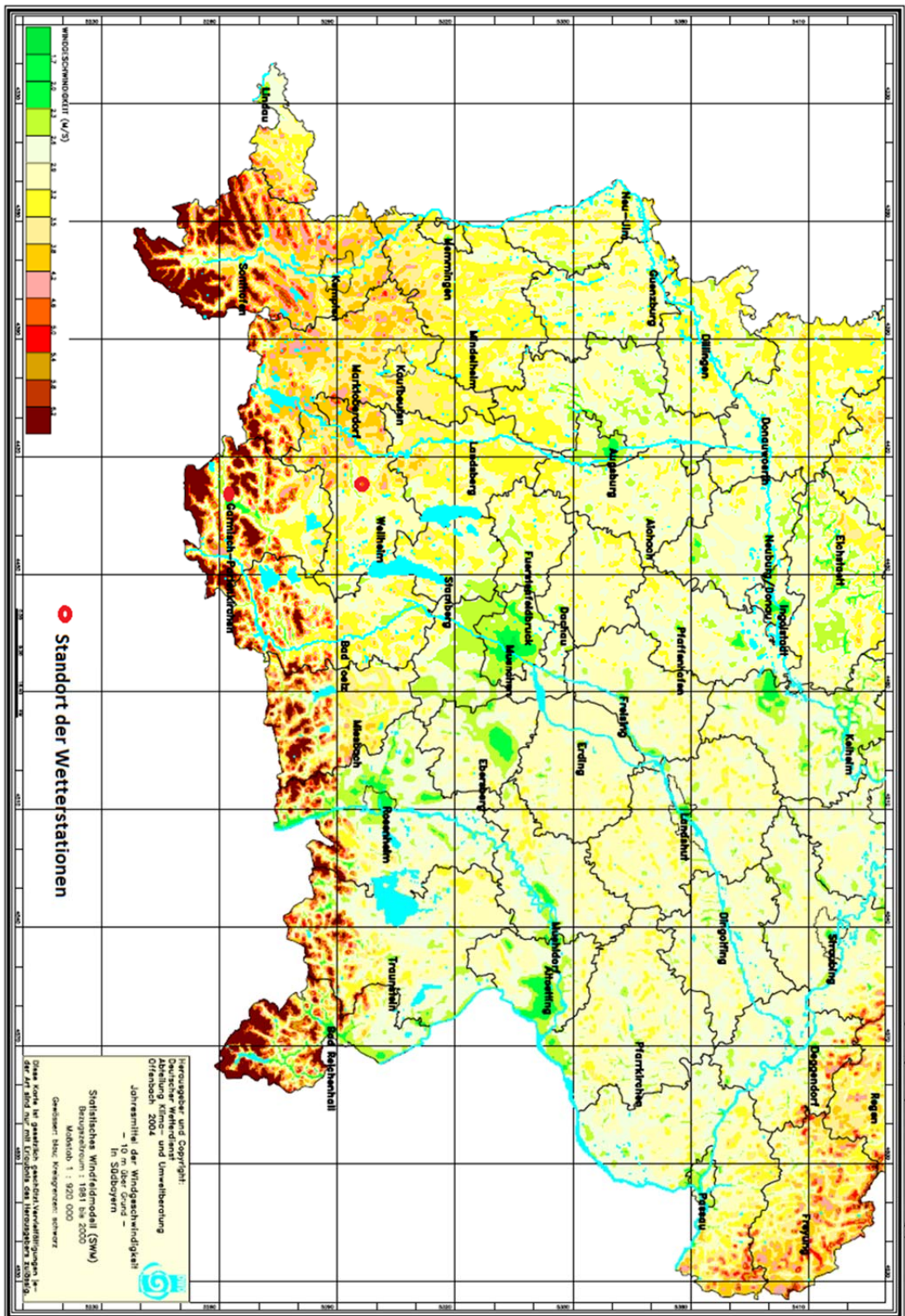


Bild 268:
Langjährige Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in 10m Höhe für Süd - Bayern aus [88].

Bremen/Bremerhaven

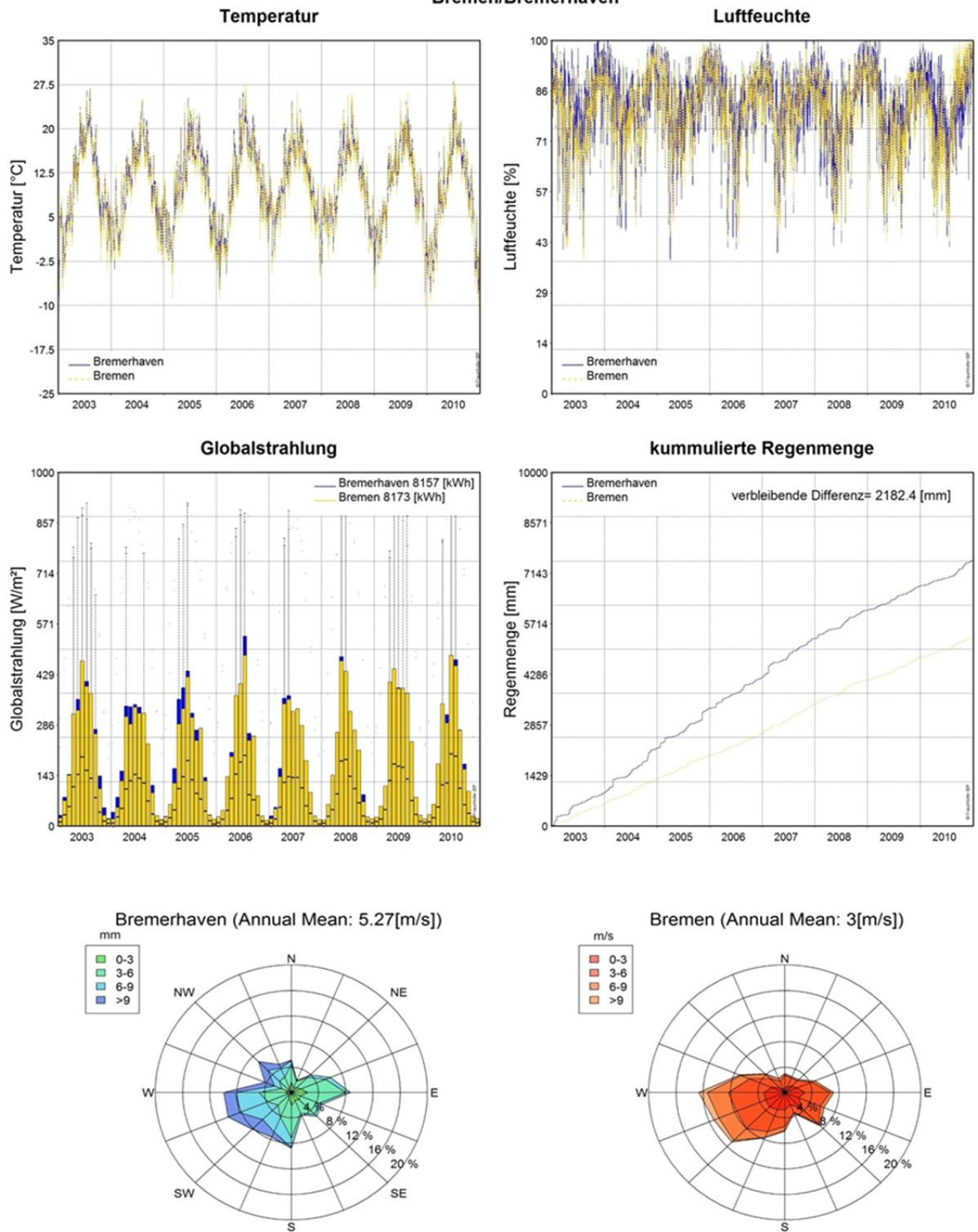


Bild 269: Vergleich der wichtigsten Klimaparameter für die beiden Standorte Bremen und Bremerhaven.

Dresden/Oschatz

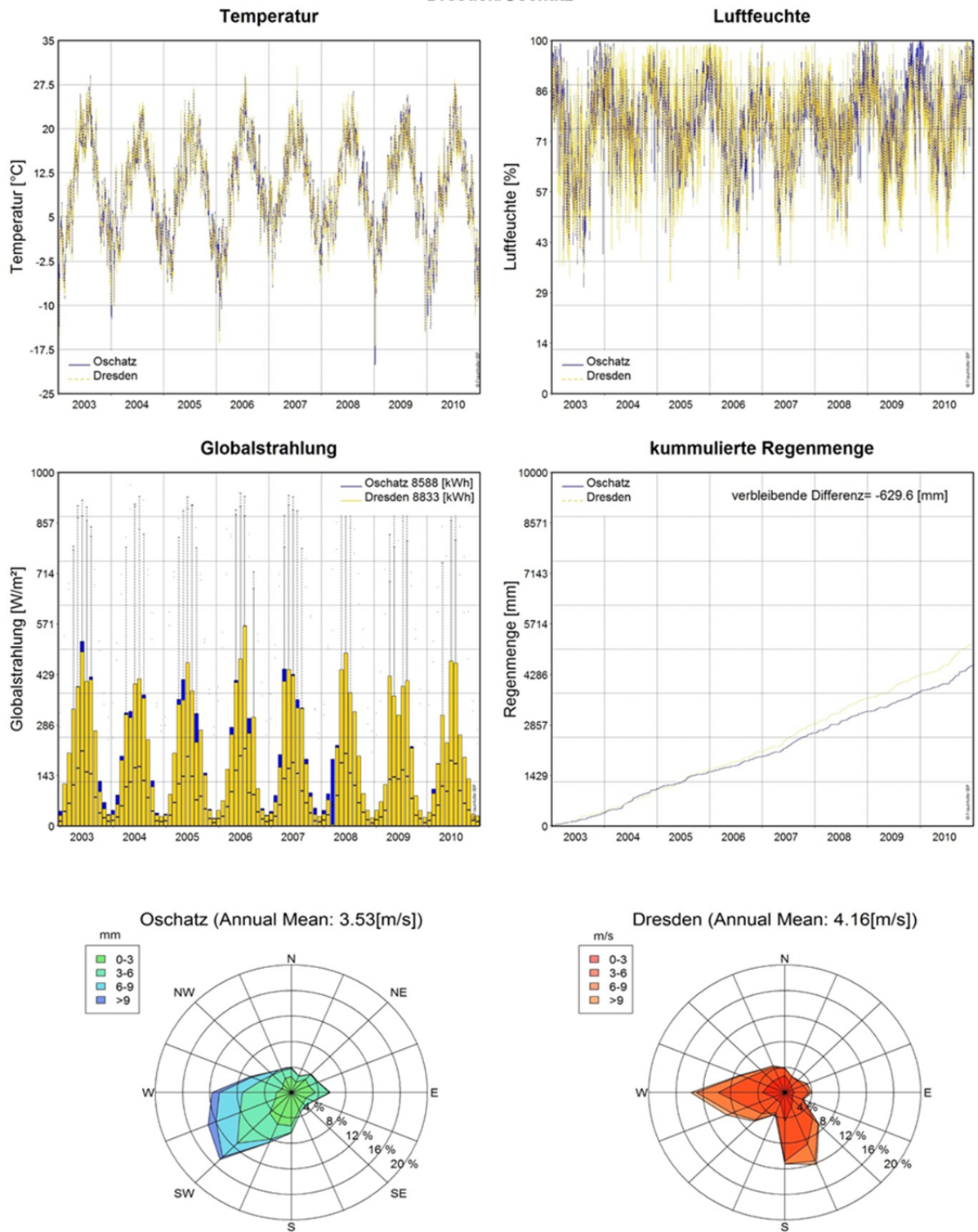


Bild 270:
Vergleich der wichtigsten Klimaparameter für die beiden Standorte Dresden und Oschatz.

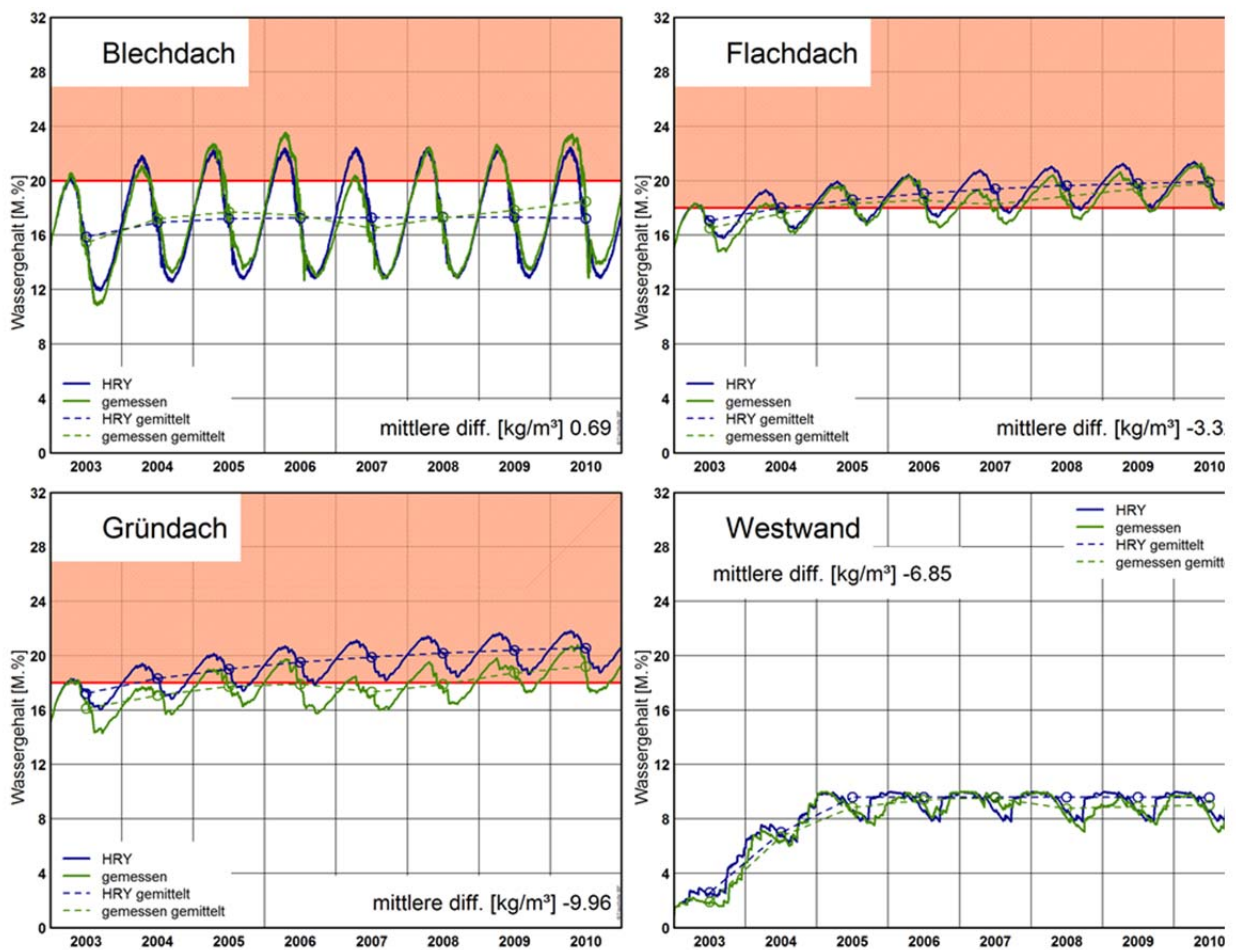


Bild 271:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Braunlage. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRY) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

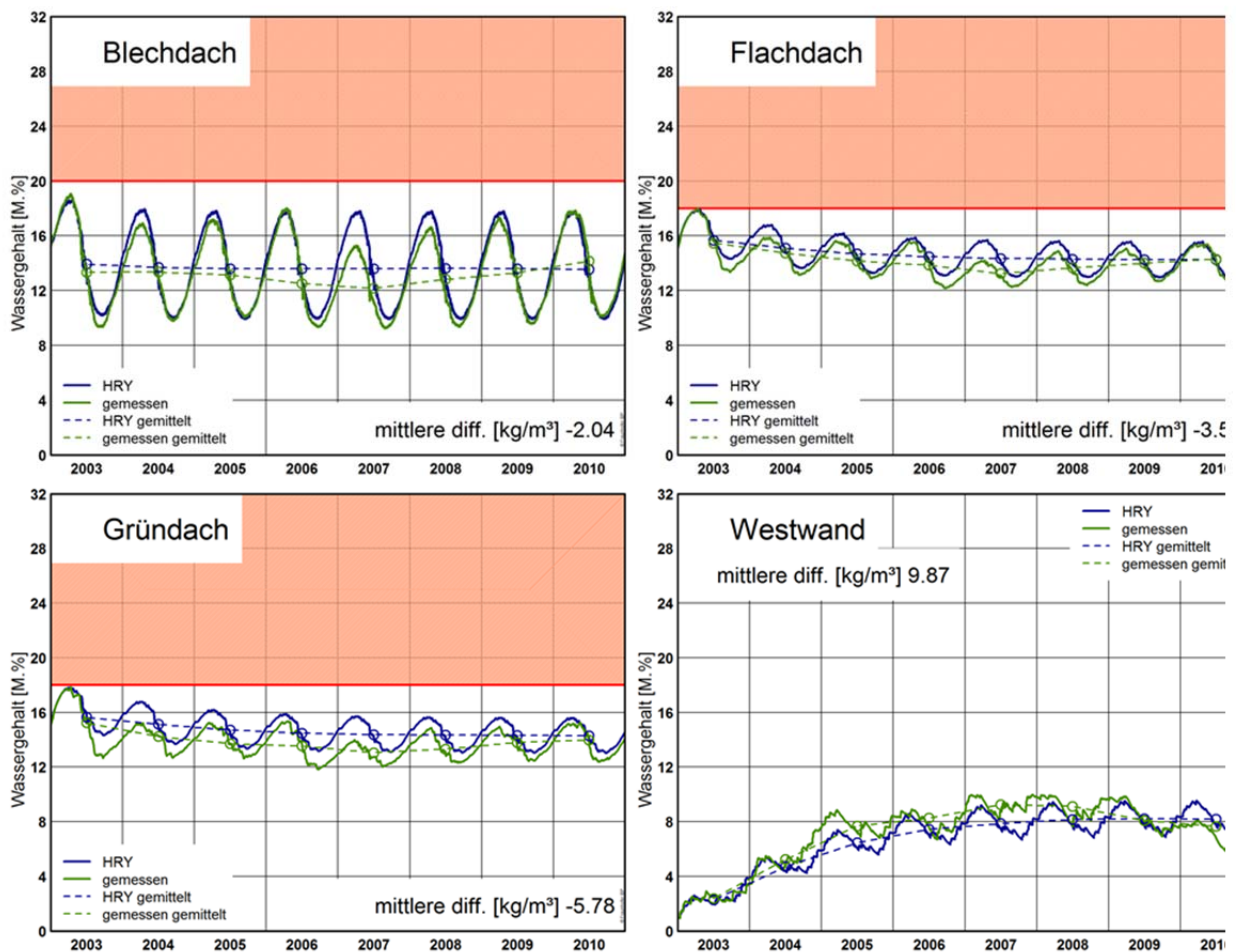


Bild 272:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Bremerhaven. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRY) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

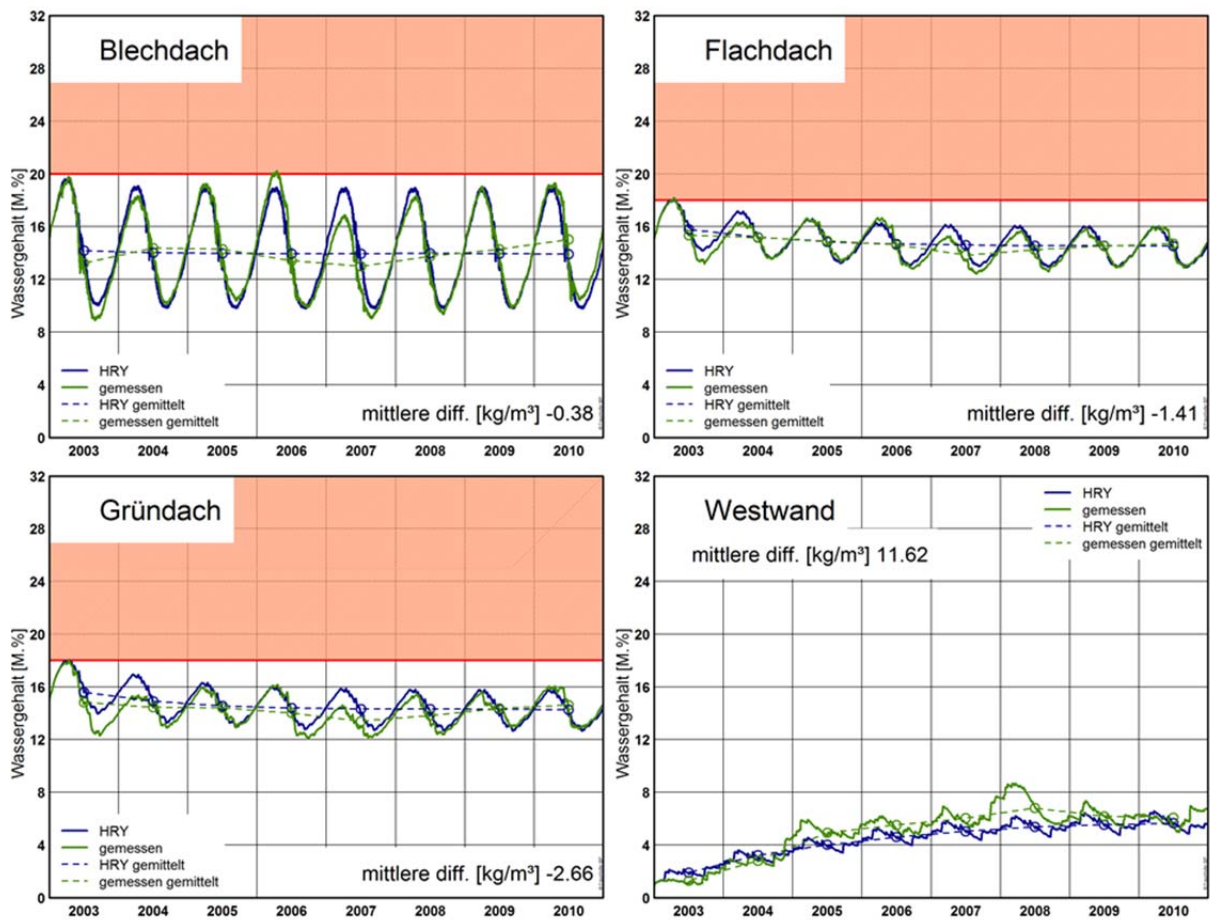


Bild 273:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Chemnitz. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRY) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

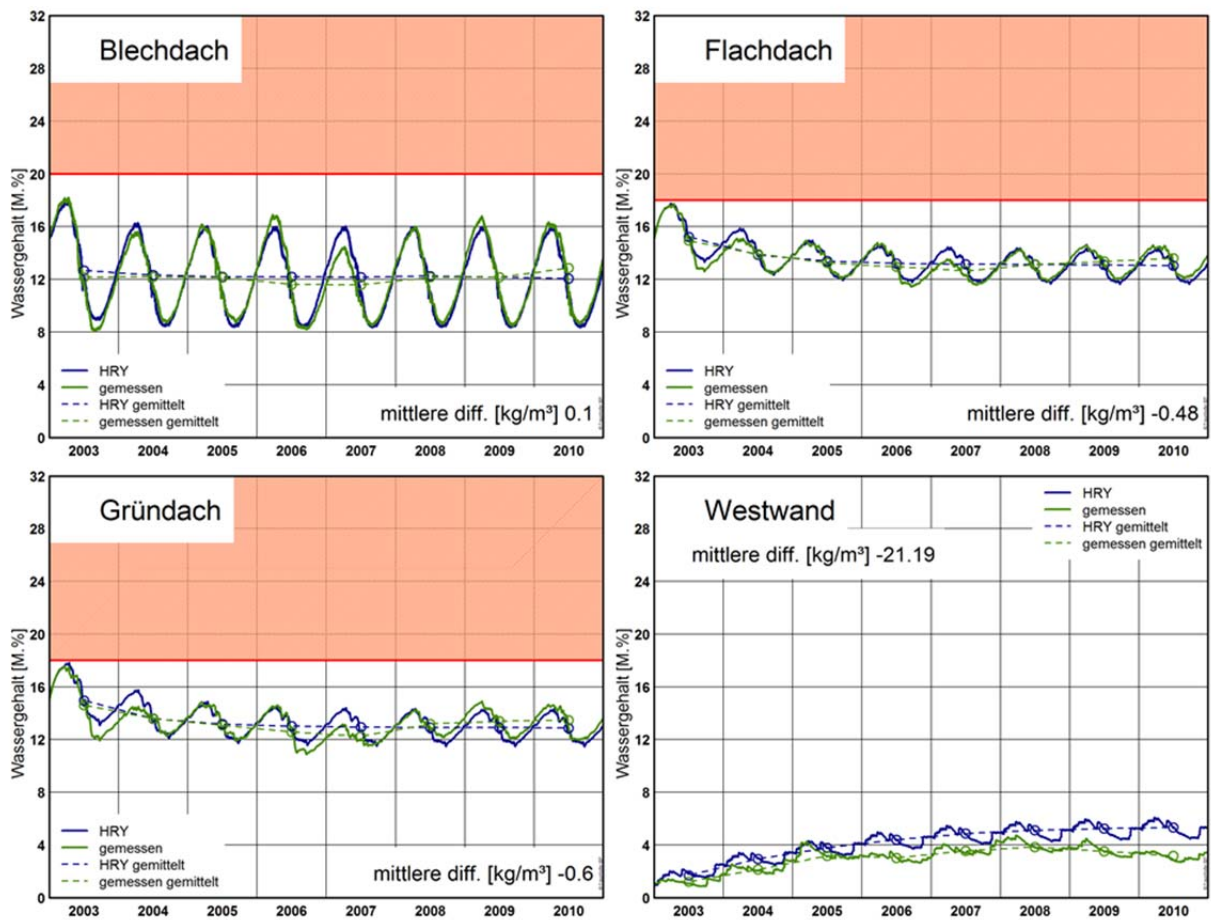


Bild 274:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Düsselndorf. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRJ) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

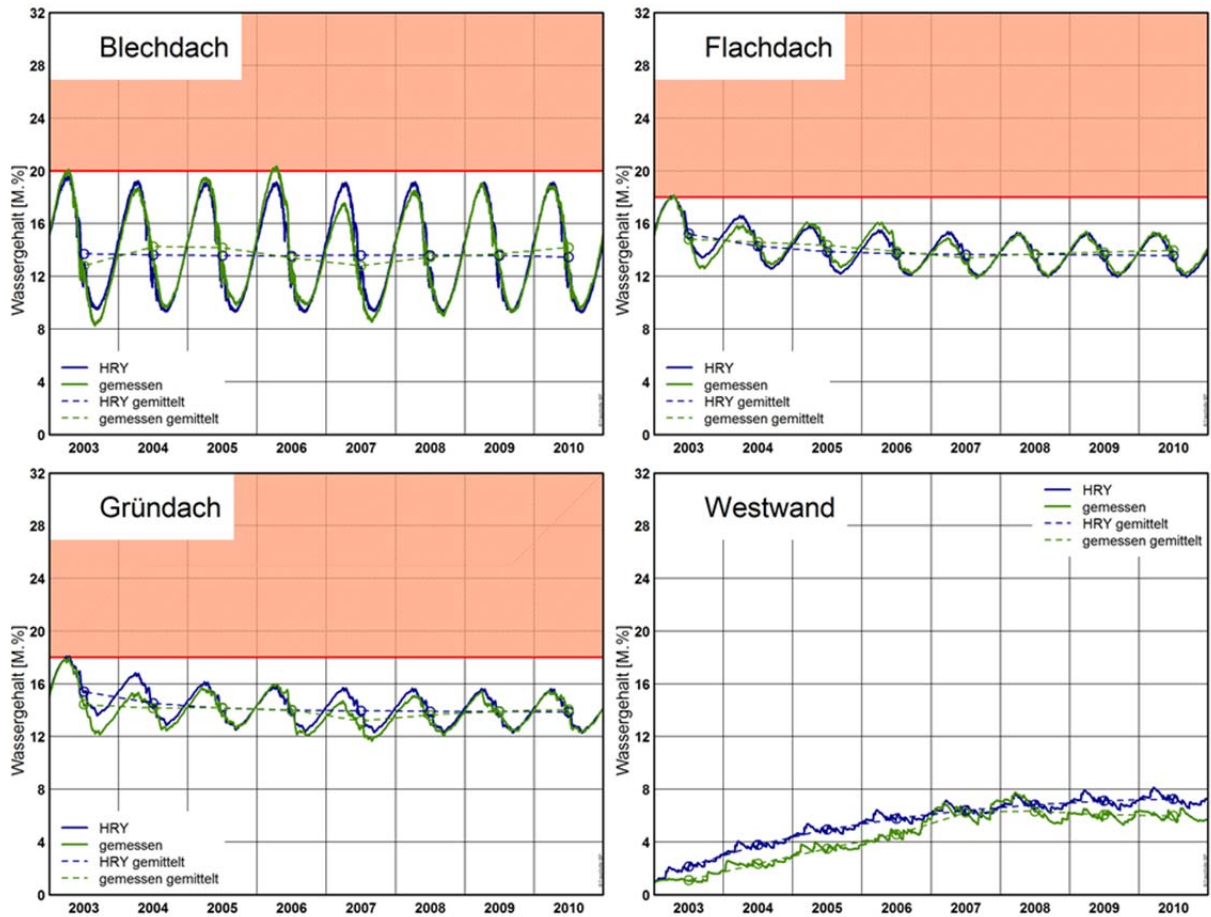


Bild 275:
 Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Fürstentzell. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRJ) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

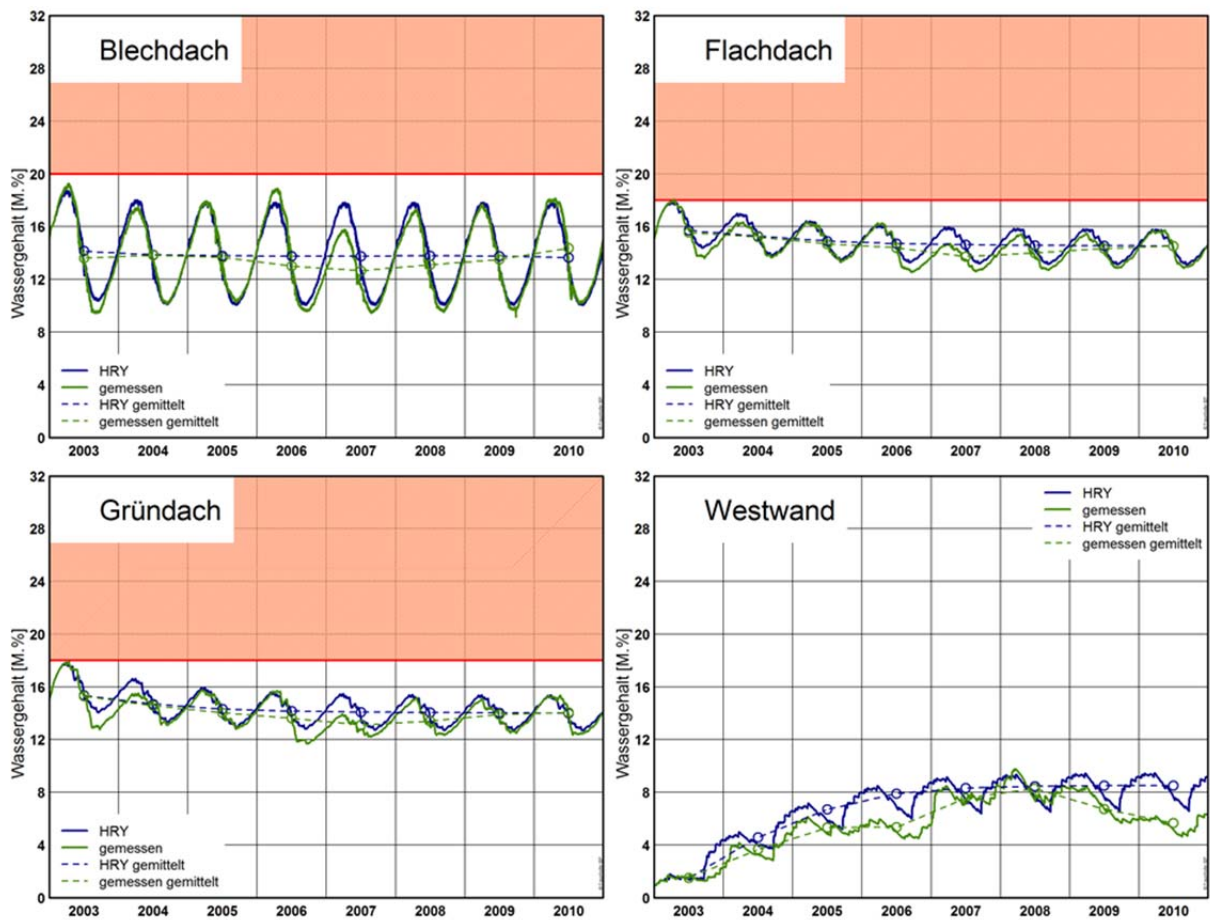


Bild 276:
 Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Hamburg. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRY) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

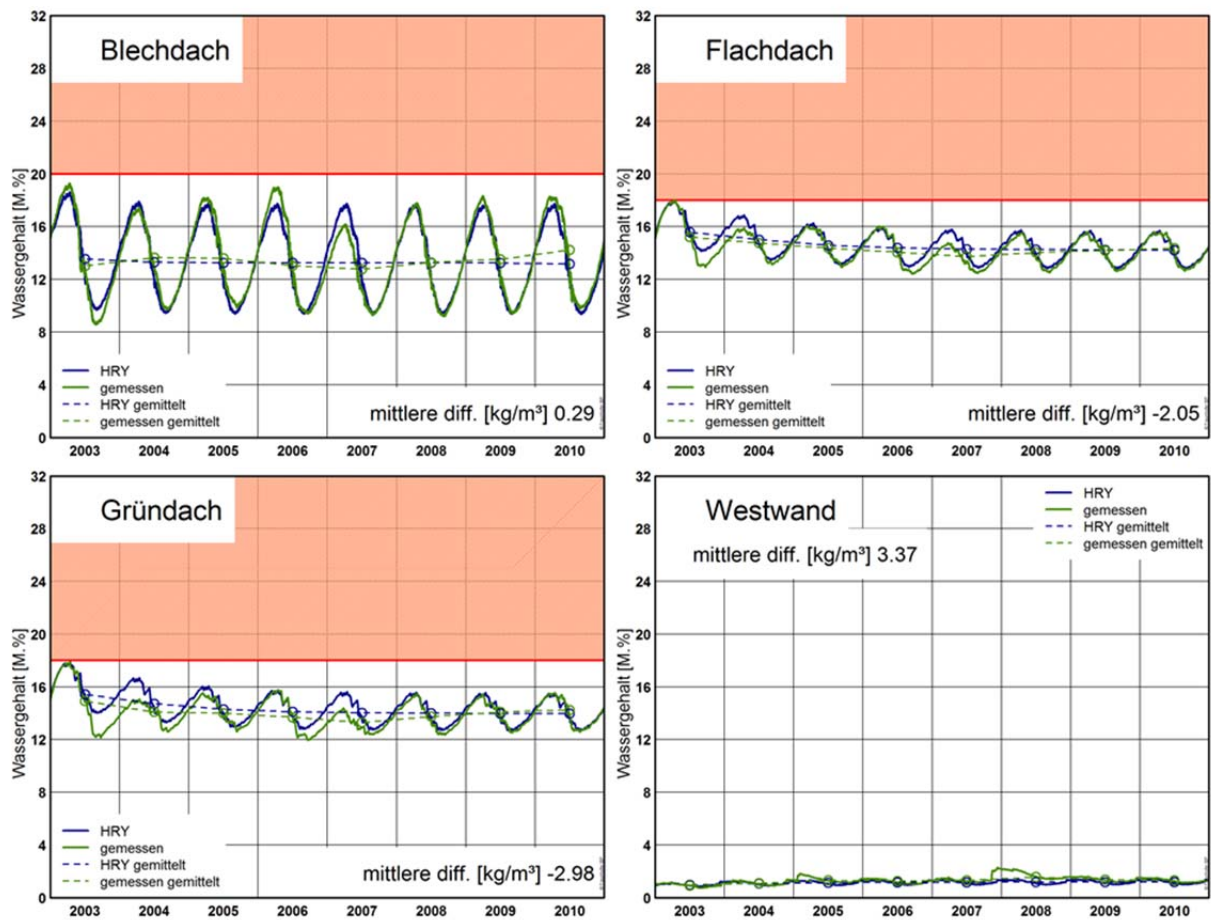


Bild 277:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Kassel. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRJ) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

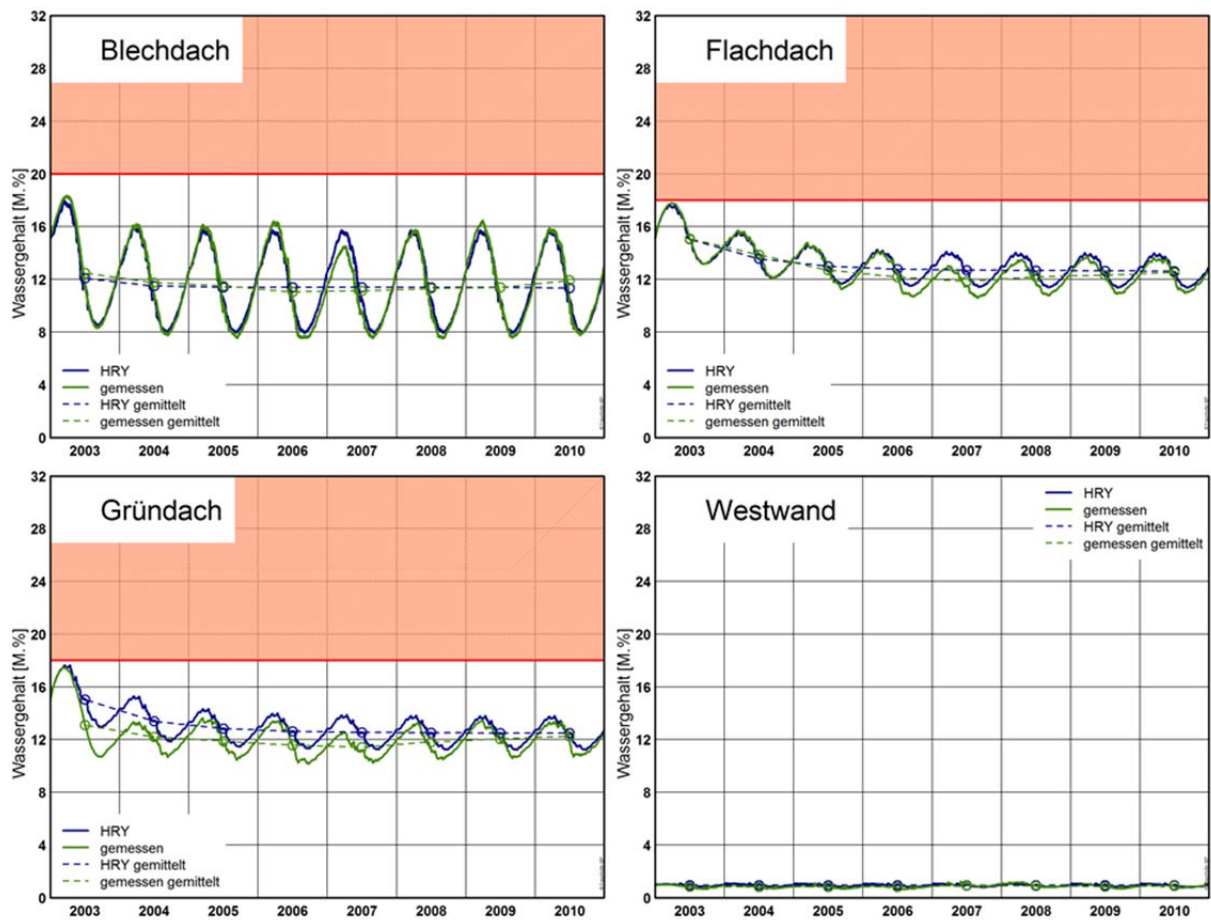


Bild 278:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Mannheim. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRJ) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

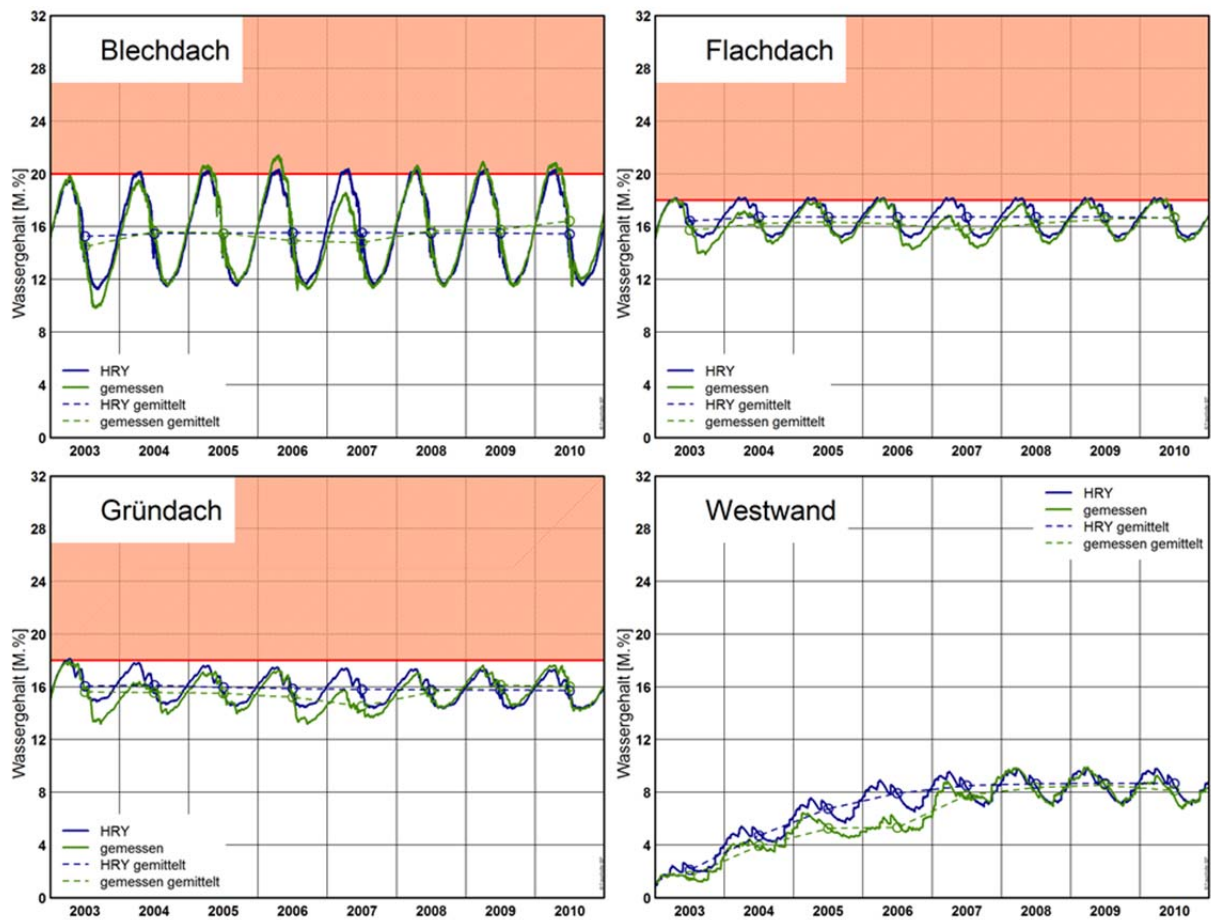


Bild 279:
 Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Bad Marienberg. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRJ) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

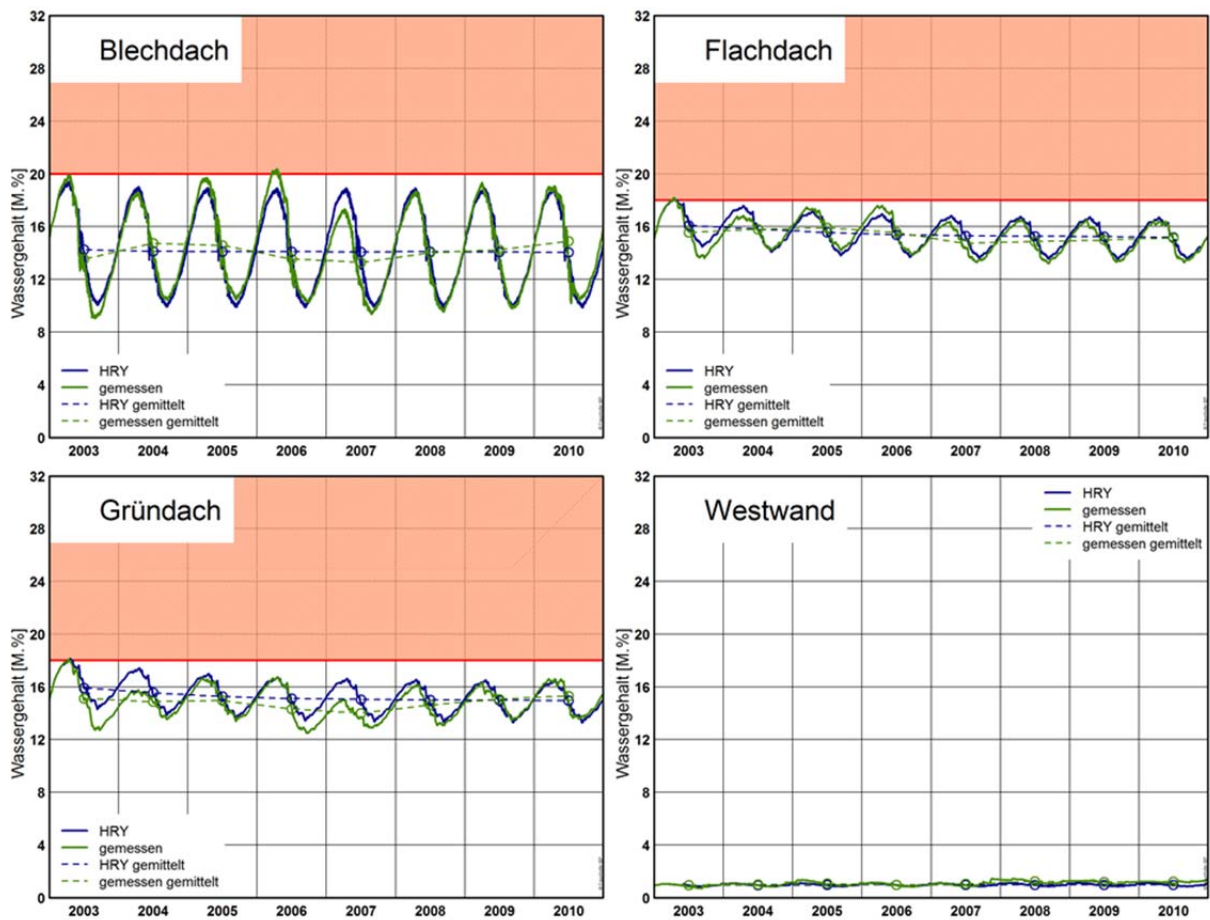


Bild 280:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Plauen. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRY) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

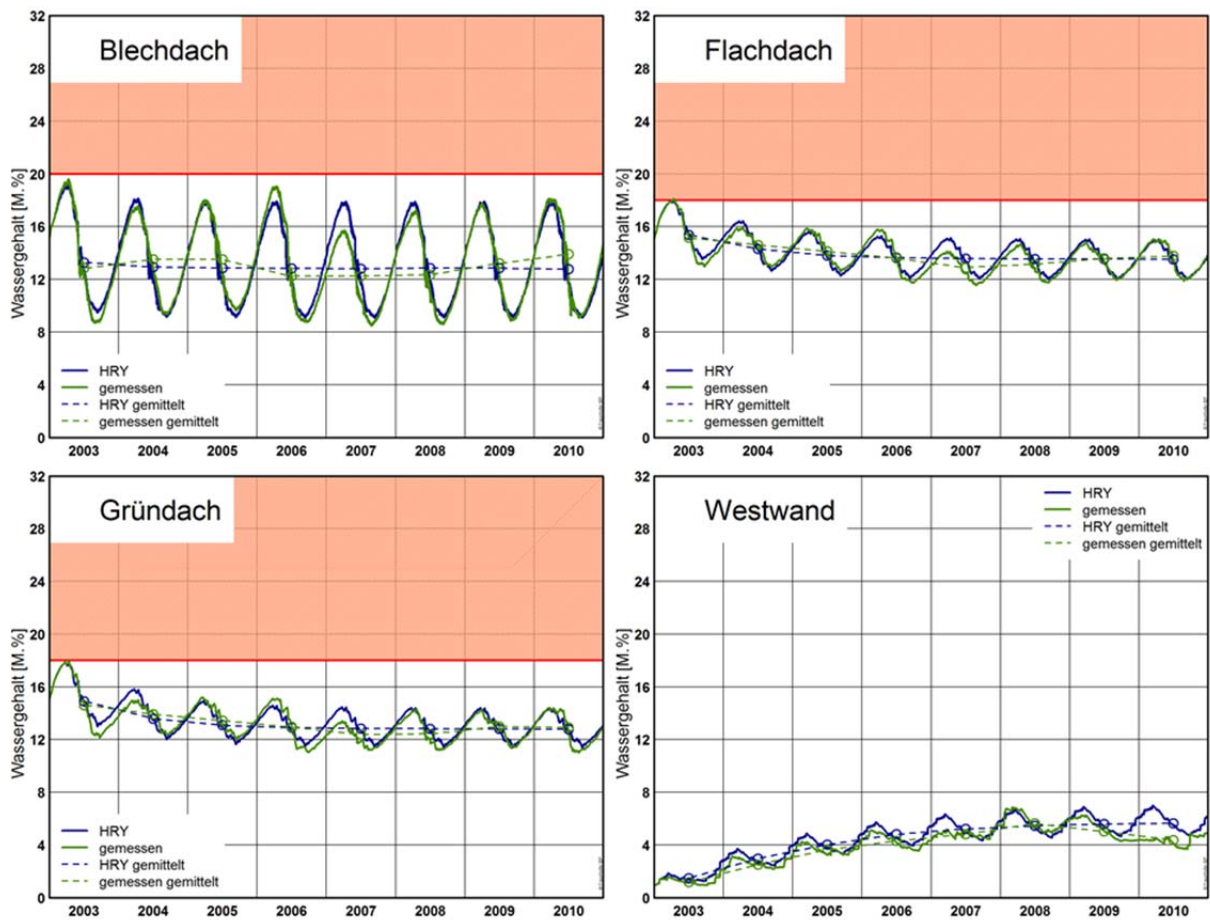


Bild 281:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Potsdam. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRJ) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

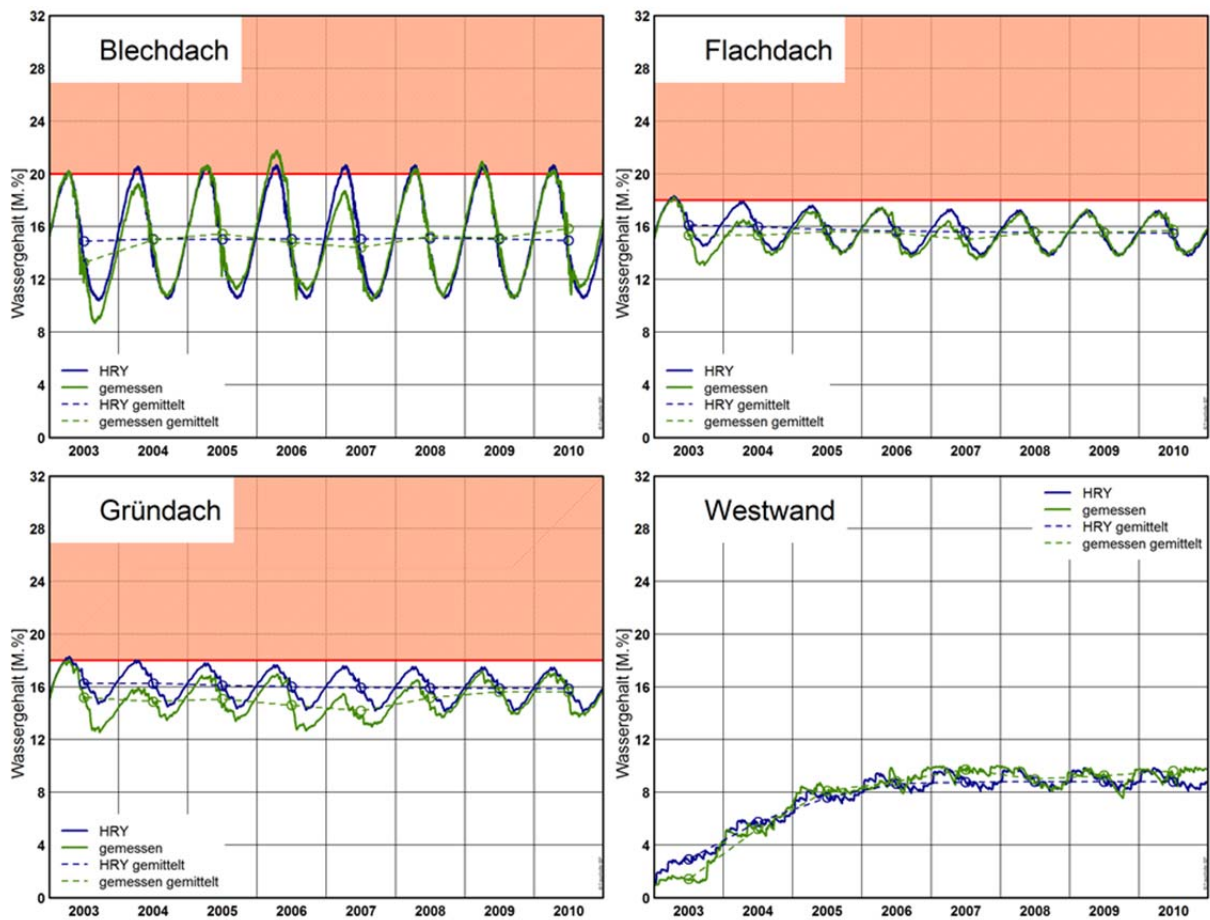


Bild 282:
 Vergleich der Wassergehalte der kritischen Konstruktionen am Standort Stötten. Das Ergebnis auf Basis des neu erstellten Referenzjahres (HRY) ist in blau dargestellt das auf Basis der Messdaten simulierte in grün. Die Mittelwertkurven stellen den jährlichen Mittelwert dar, dazwischen wurde linear interpoliert.

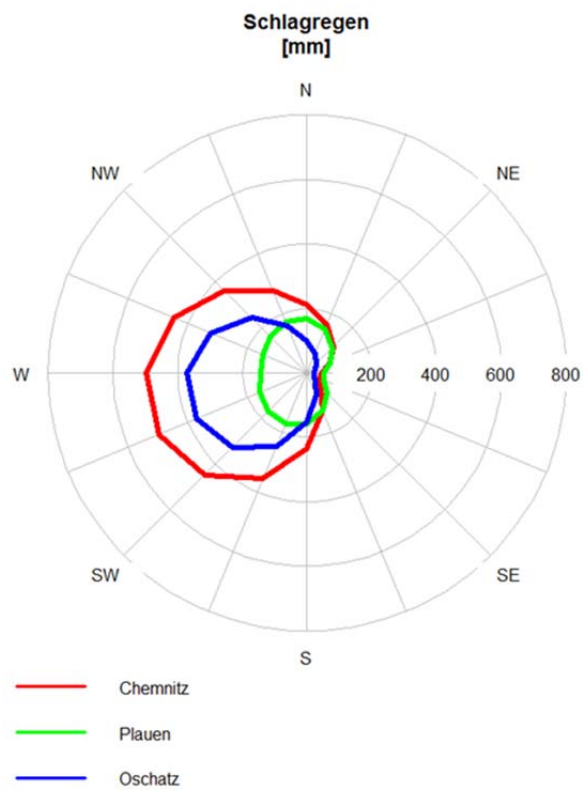


Bild 283:
Vergleich der Schlagregenverteilungen in Chemnitz, Plauen und Oschatz.

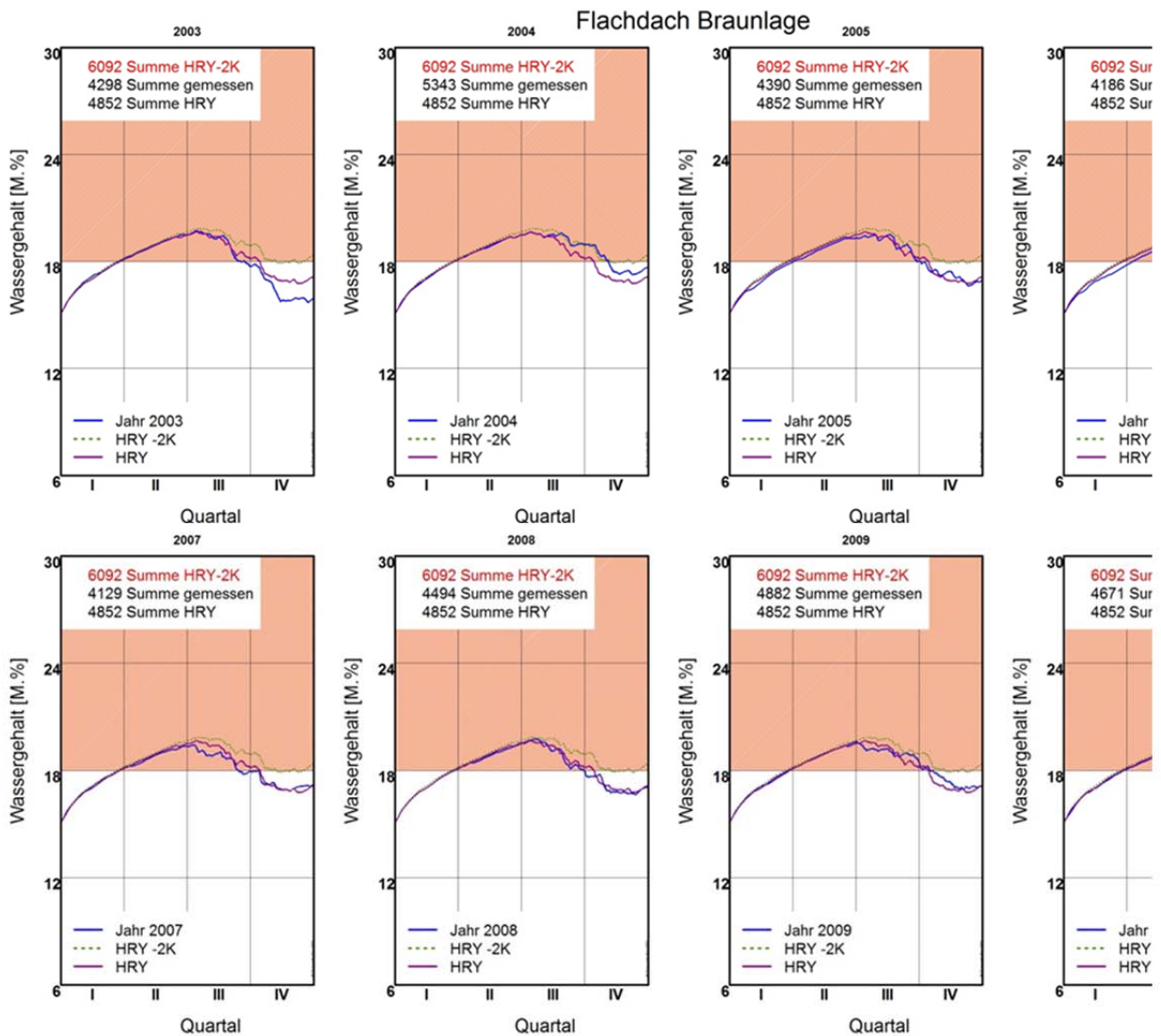


Bild 284:
 Vergleich der berechneten Wassergehalte des Flachdaches am Standort Braunlage für die Jahre 2003 bis 2010. Die violette Kurve entspricht der Berechnung mit dem neuen HRY, die grüne Kurve mit dem um 2 K abgesenkten HRY und in blau ist der berechnete Wassergehalt bei Verwendung des jeweils real gemessenen Jahres dargestellt. Zusätzlich sind jeweils noch die Überschreitungsdauern des kritischen Grenzwassergehaltes von 18 M.-% in Stunden angegeben.

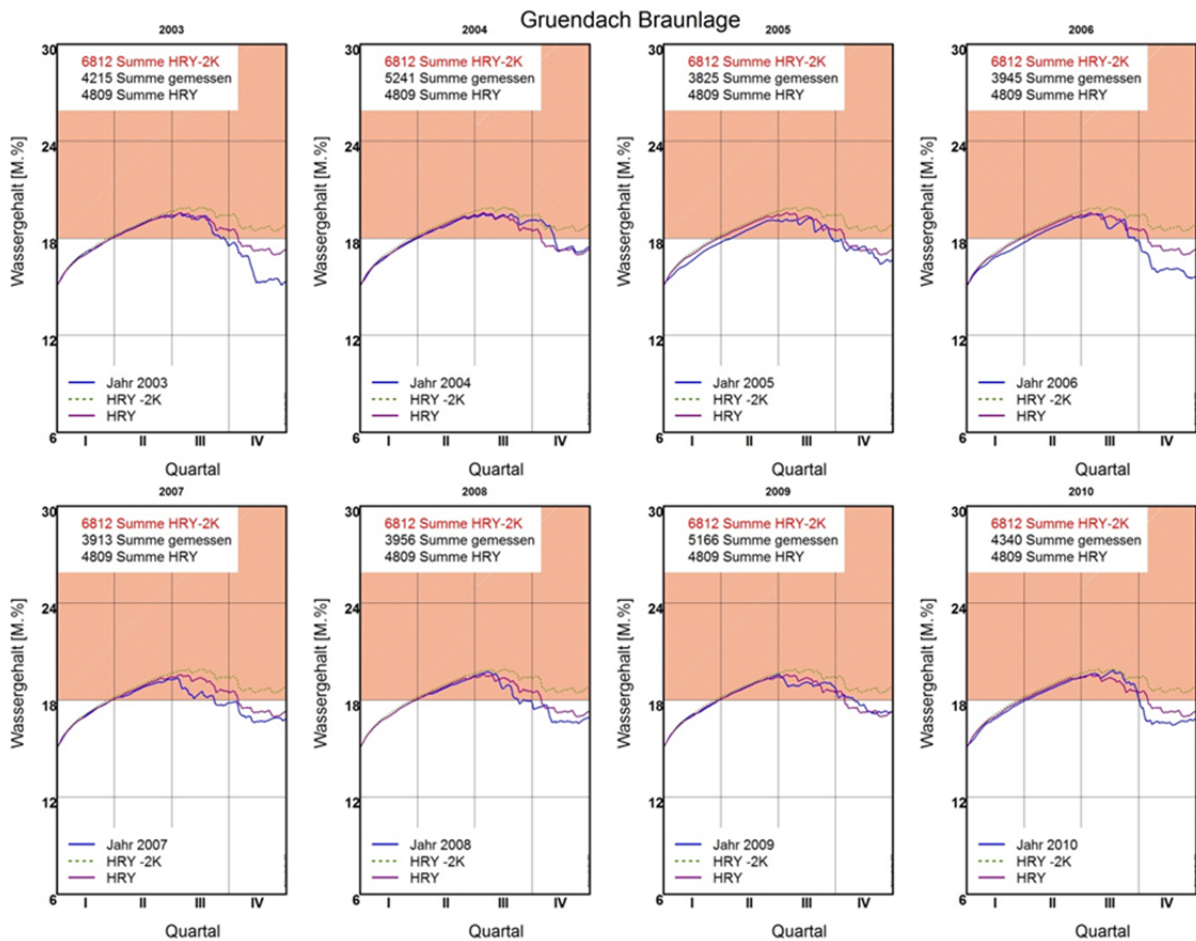


Bild 285:

Vergleich der berechneten Wassergehalte des Gründaches am Standort Braunlage für die Jahre 2003 bis 2010. Die violette Kurve entspricht der Berechnung mit dem neuen HRY, die grüne Kurve mit dem um 2 K abgesenkten HRY und in blau ist der berechnete Wassergehalt bei Verwendung des jeweils real gemessenen Jahres dargestellt. Zusätzlich sind jeweils noch die Überschreitungsdauern des kritischen Grenzwassergehaltes von 18 M.-% in Stunden angegeben.

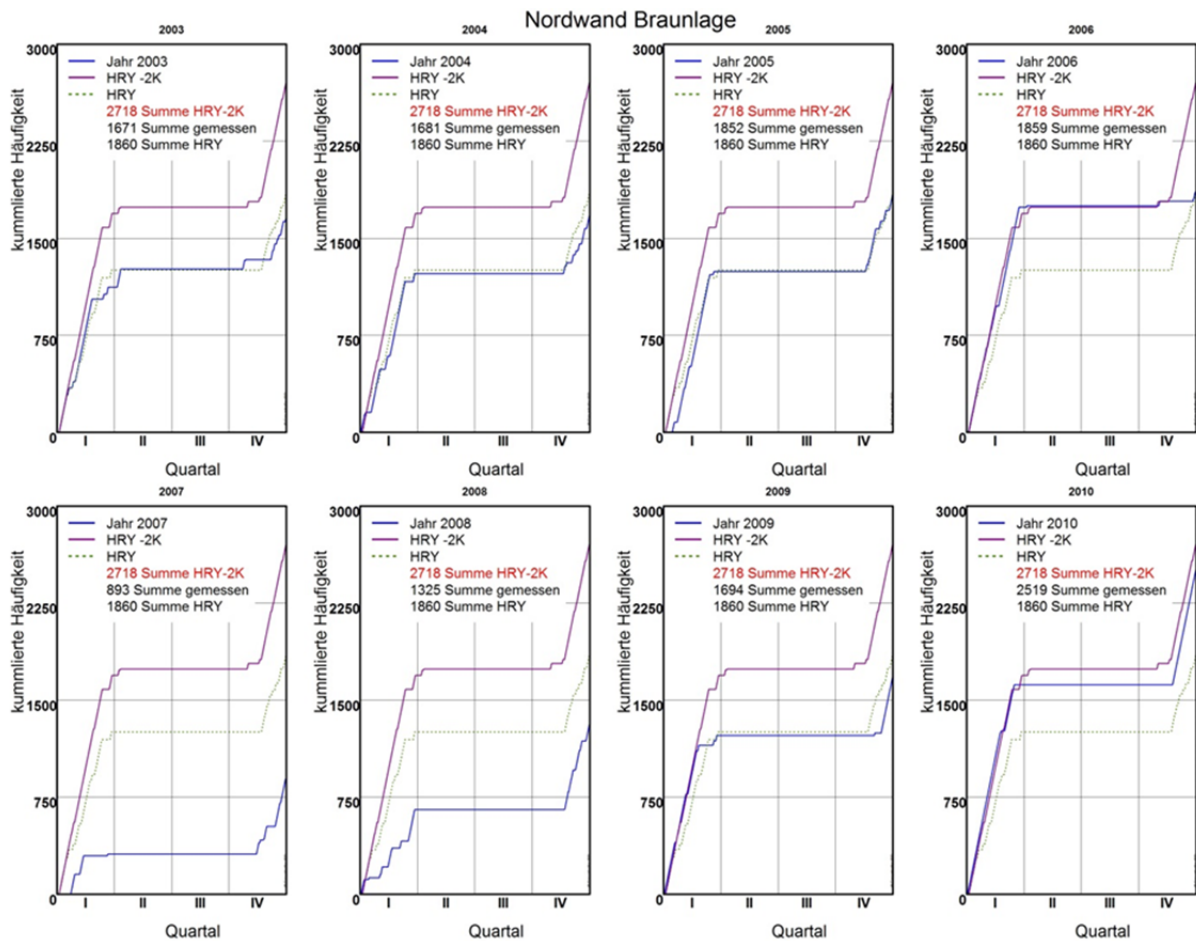


Bild 286:
 Vergleich der kumulierten Überschreitungshäufigkeit der kritischen Oberflächenfeuchte von 80% nach der DIN 4108 [35] für die Nordwand am Standort Braunlage für die Jahre 2003 bis 2010. Die violette Kurve entspricht der Berechnung mit dem neuen HRY, die grüne Kurve mit dem um 2 K abgesenkten HRY und in blau ist die Überschreitungshäufigkeit bei Verwendung des jeweils real gemessenen Jahres dargestellt.

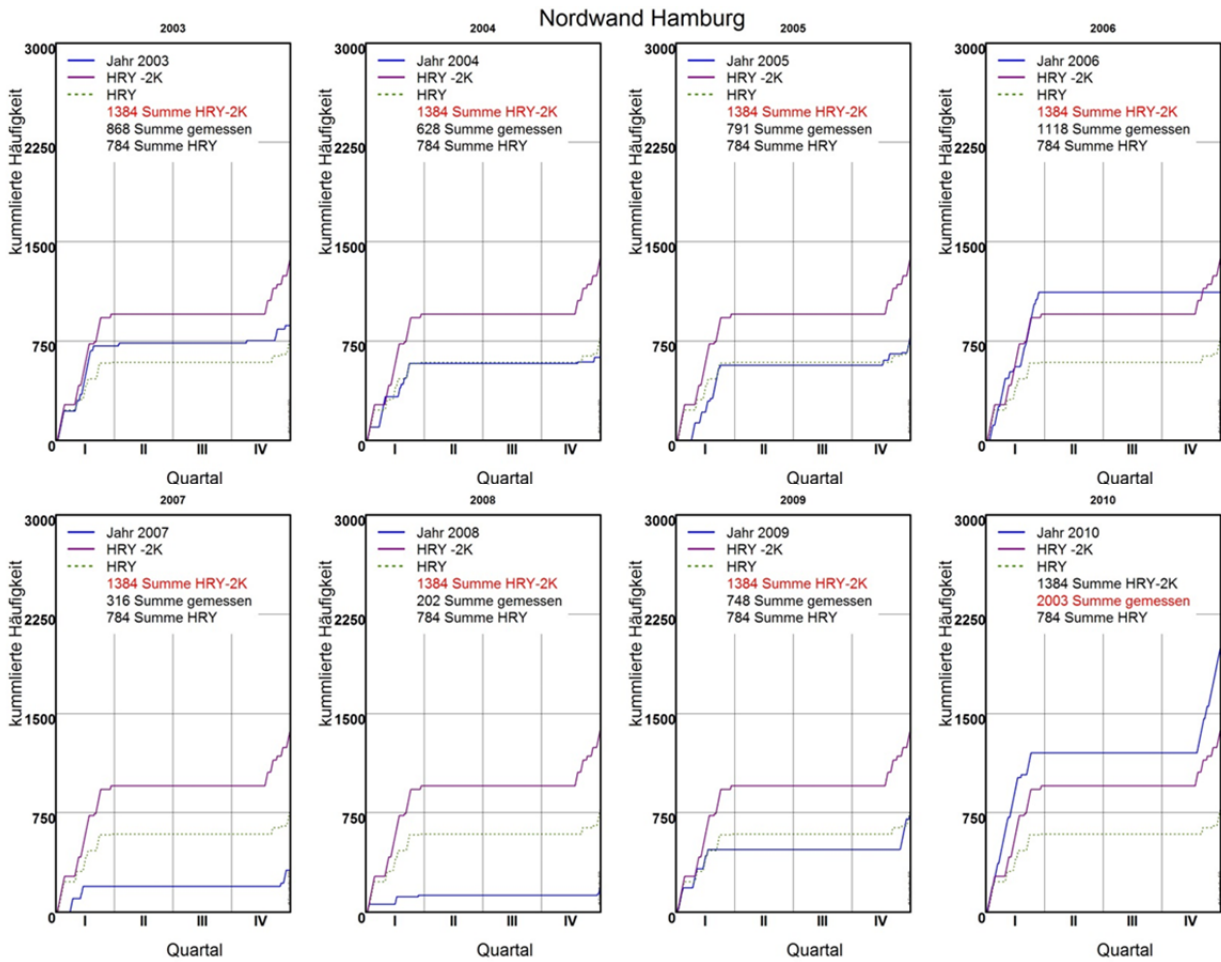


Bild 287:
 Vergleich der Überschreitungsdauer, der kritischen Oberflächenfeuchte von 80% r.F., für die nördlich orientierte Außenwand am Standort Hamburg. Der grüne Graph entspricht dem neuen HRY, lila Graph dem um 2K abgesenkten HRY und in blau ist der Wassergehalt bei Verwendung des real gemessenen Jahres dargestellt. Zusätzlich ist, in der linken oberen Ecke, der jeweilige Endwert der einzelnen Varianten angegeben.

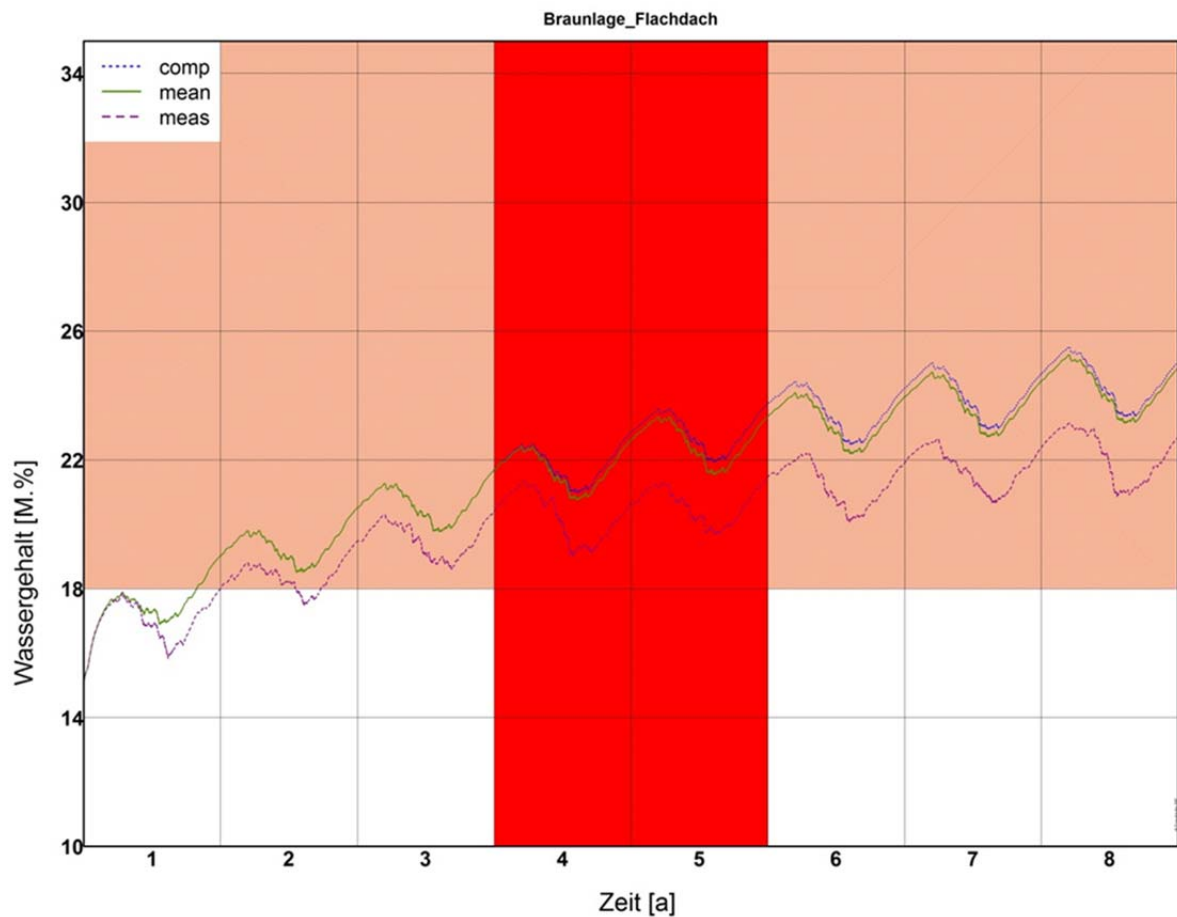


Bild 288:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Schicht des Flachdaches am Standort Braunlage. Die grüne Kurve stellt dabei den Verlauf bei Verwendung der mittleren Jahre dar, die lila Kurve den Verlauf bei Verwendung der Messdaten und der blaue Verlauf entsteht bei Verwendung der Kombination aus mittleren und extremen Jahren. Der hellrote Bereich stellt den kritischen Wassergehalt nach [34] dar. Der rote Bereich in der Mitte markiert die beiden extremen Jahre des kombinierten Datensatzes.

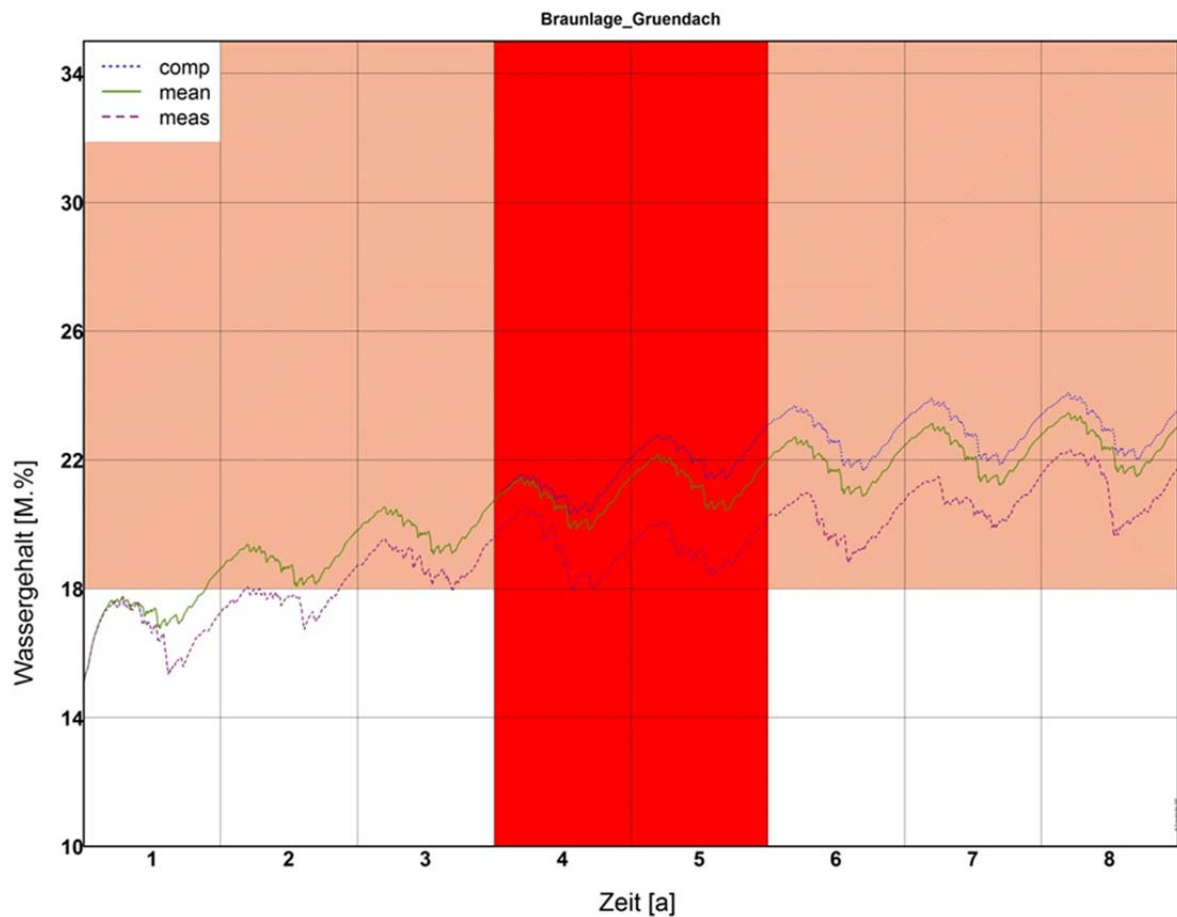


Bild 289:

Vergleich der Wassergehalte der kritischen Schicht des Gründaches am Standort Braunlage. Die grüne Kurve stellt dabei den Verlauf bei Verwendung der mittleren Jahre dar, die lila Kurve den Verlauf bei Verwendung der Messdaten und der blaue Verlauf entsteht bei Verwendung der Kombination aus mittleren und extremen Jahren. Der hellrote Bereich stellt den kritischen Wassergehalt nach [34] dar. Der rote Bereich in der Mitte markiert die beiden extremen Jahre des kombinierten Datensatzes.

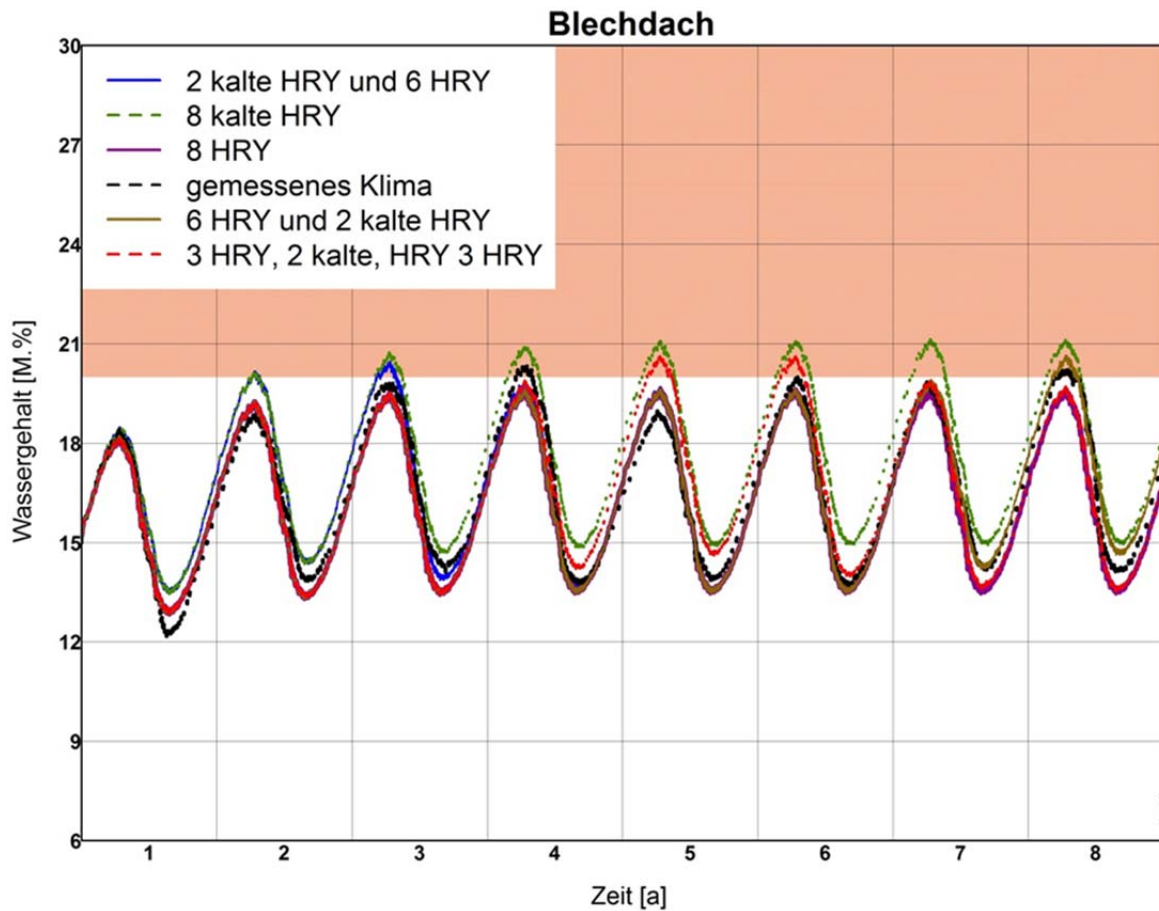


Bild 290:
 Wassergehalt in der kritischen Schicht des Blechdaches am Standort Braunlage auf Basis verschiedener Klimadatensätze. Die verschiedenen Varianten sind dabei verschiedene Abfolgen von HRY bzw. der um 2K abgesenkten HRY hier als „kalte“ HRY bezeichnet. In schwarz ist der Wassergehaltsverlauf bei Verwendung der Messdaten dargestellt. Der rote Bereich stellt den kritischen Grenzwassergehalt nach [34] dar.

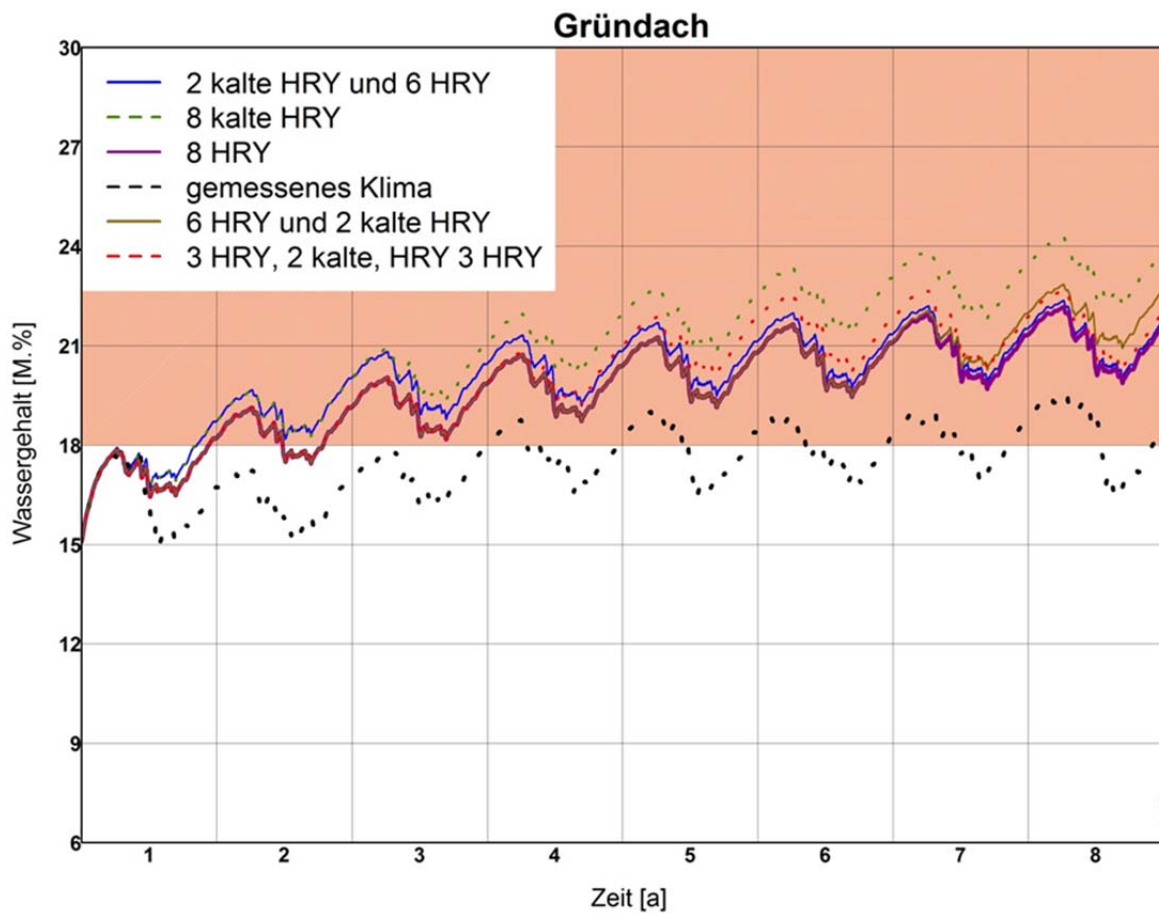


Bild 291:

Wassergehalt in der kritischen Schicht des Gründaches am Standort Lindenberg auf Basis verschiedener Klimadatensätze. Die verschiedenen Varianten sind dabei verschiedene Abfolgen von HRY bzw. der um 2K abgesenkten HRY hier als „kalte“ HRY bezeichnet. In schwarz ist der Wassergehaltsverlauf bei Verwendung der Messdaten dargestellt. Der rote Bereich stellt den kritischen Grenzwassergehalt nach [34] dar.

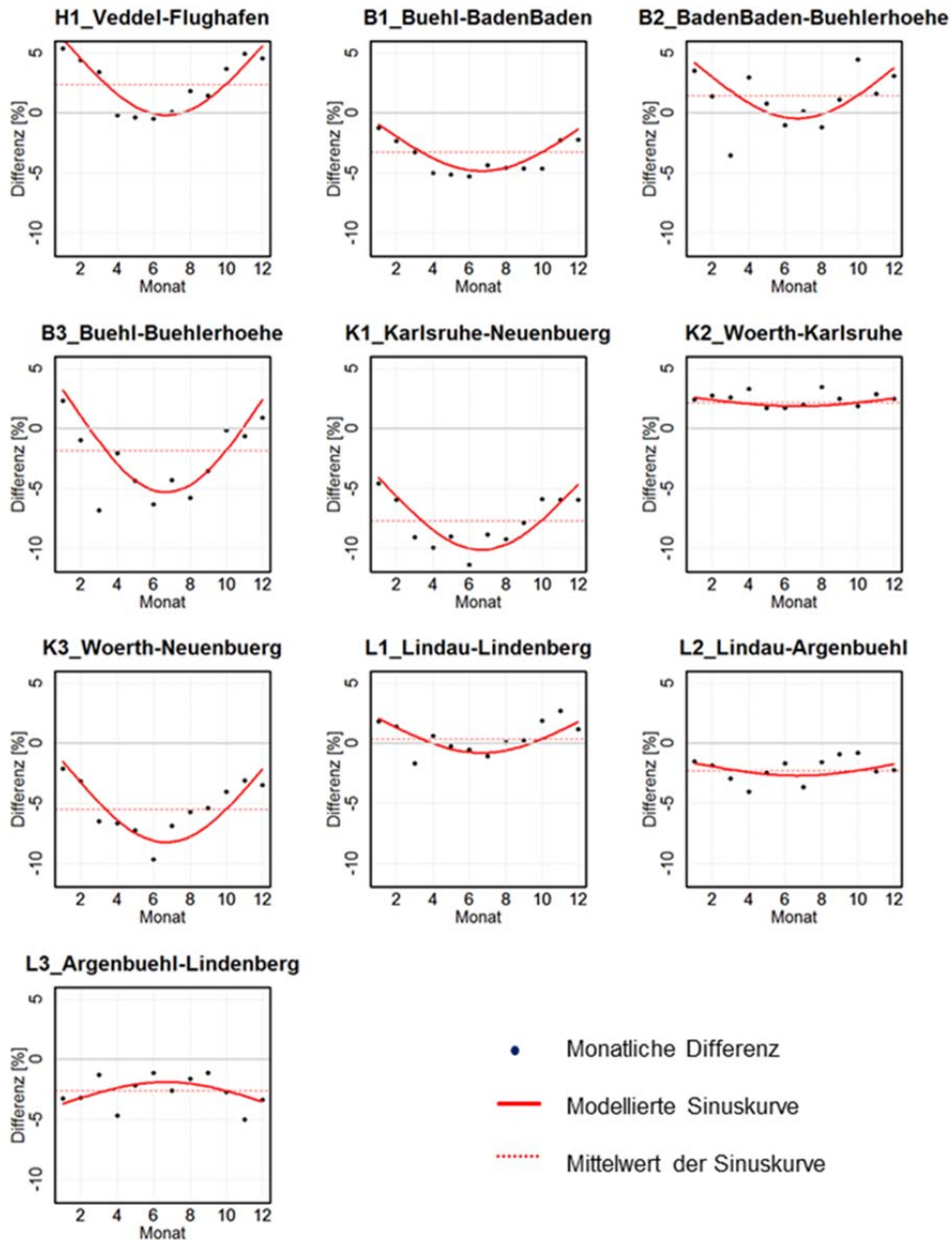


Bild 292:
 Absolute Differenz der Monatsmittelwerte der relativen Feuchte zwischen den untersuchten Standortpaaren (schwarze Punkte). Auf Basis dieser Punkte wird für jedes Standortpaar eine vereinfachte Sinuskurve für den Jahresverlauf der Abweichung modelliert (rote Kurve).

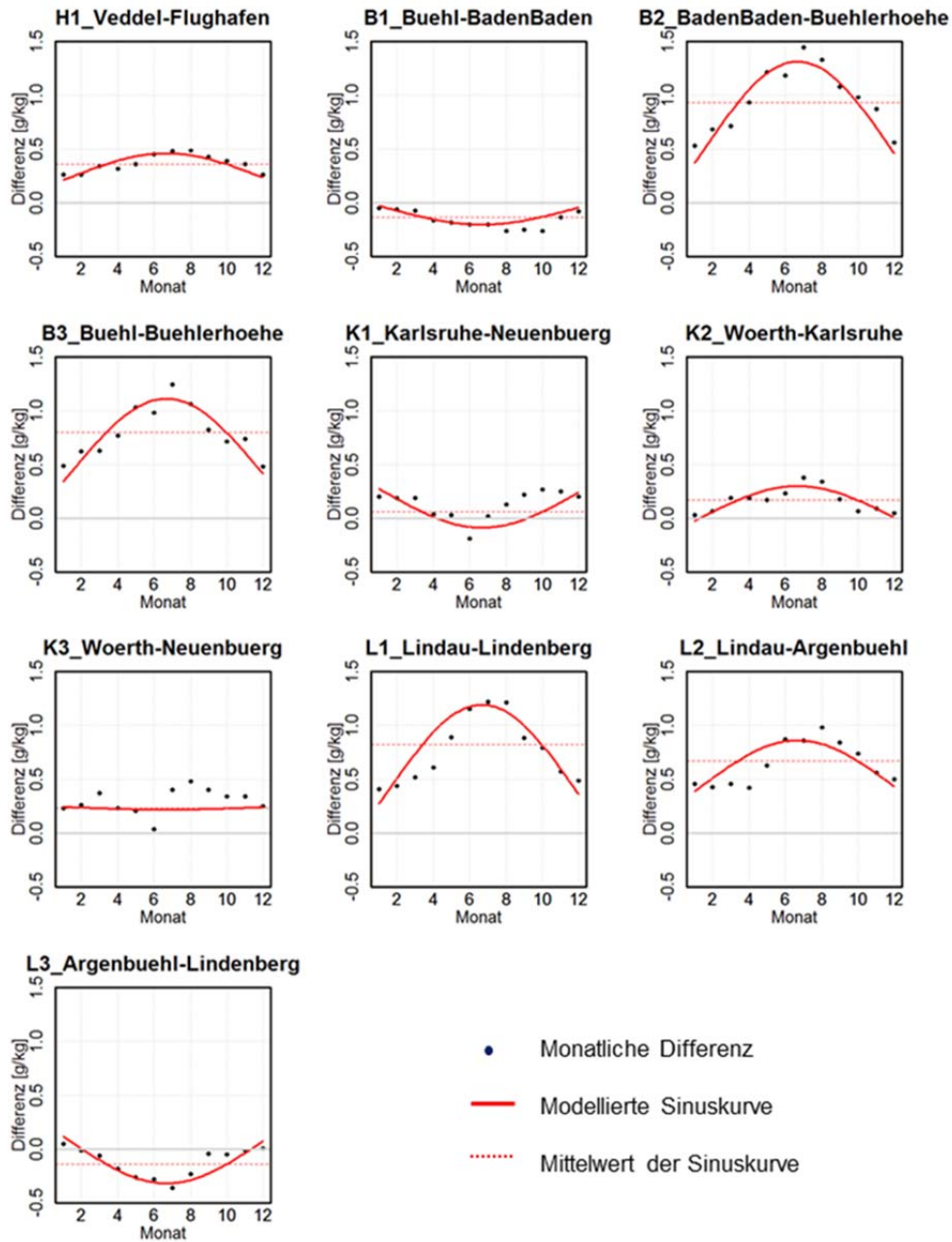


Bild 293:

Absolute Differenz der Monatsmittelwerte der absoluten Feuchte zwischen den untersuchten Standortpaaren (schwarze Punkte). Auf Basis dieser Punkte wird für jedes Standortpaar eine vereinfachte Sinuskurve für den Jahresverlauf der Abweichung modelliert (rote Kurve).

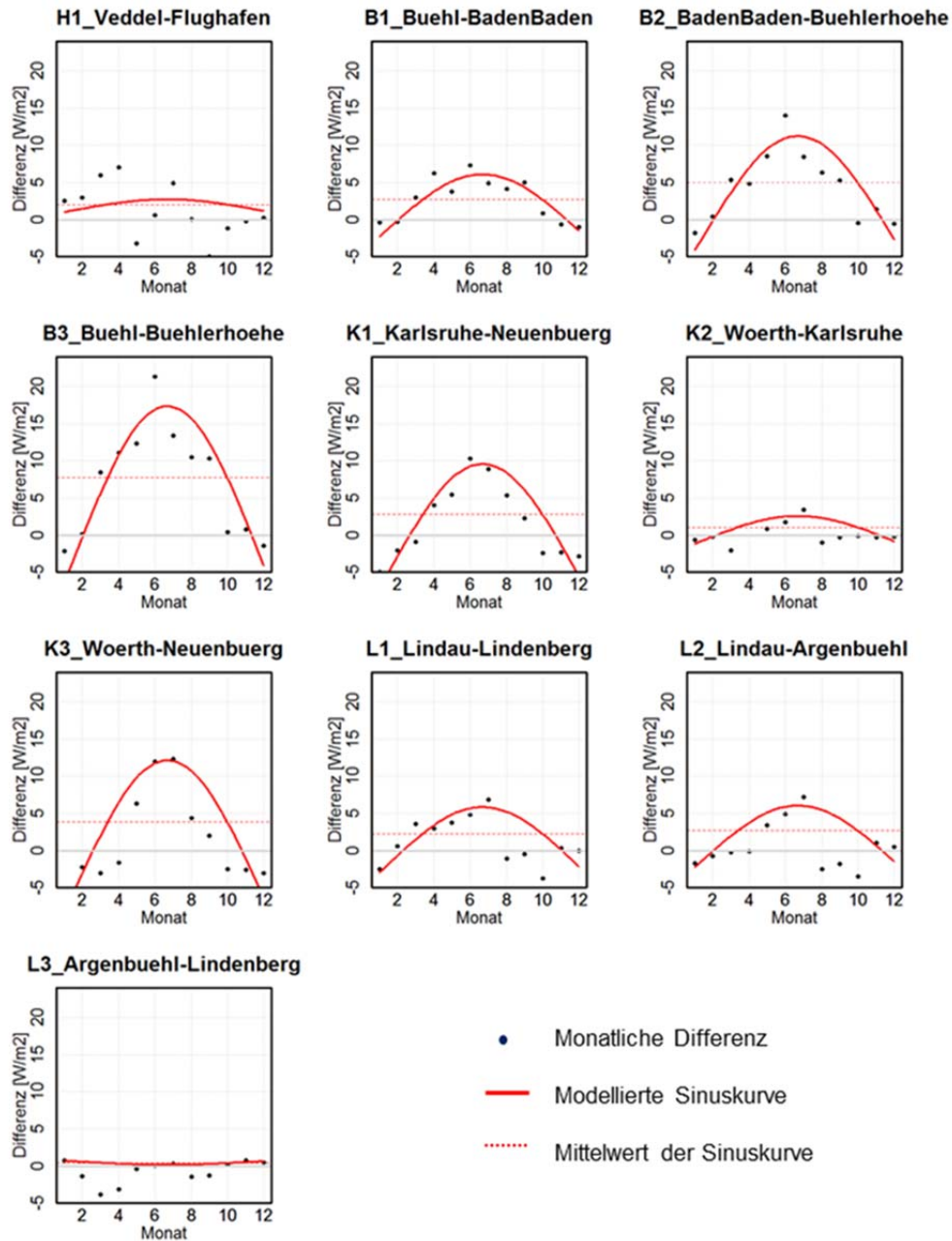


Bild 294:
 Absolute Differenz der Monatsmittelwerte der Globalstrahlung zwischen den untersuchten Standortpaaren (schwarze Punkte). Auf Basis dieser Punkte wird für jedes Standortpaar eine vereinfachte Sinuskurve für den Jahresverlauf der Abweichung modelliert (rote Kurve).

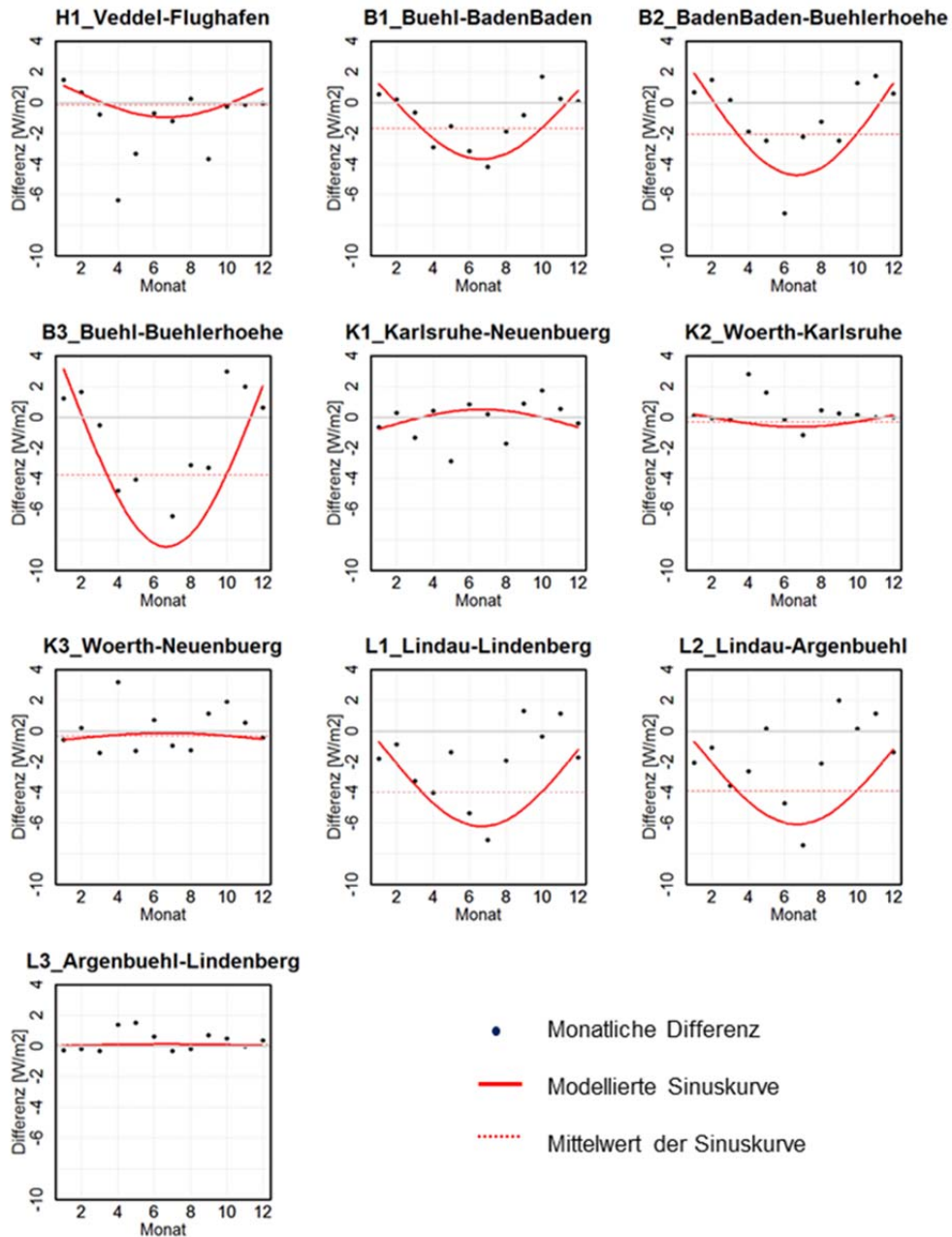


Bild 295:
 Absolute Differenz der Monatsmittelwerte der Diffusstrahlung zwischen den untersuchten Standortpaaren (schwarze Punkte). Auf Basis dieser Punkte wird für jedes Standortpaar eine vereinfachte Sinuskurve für den Jahresverlauf der Abweichung modelliert (rote Kurve).

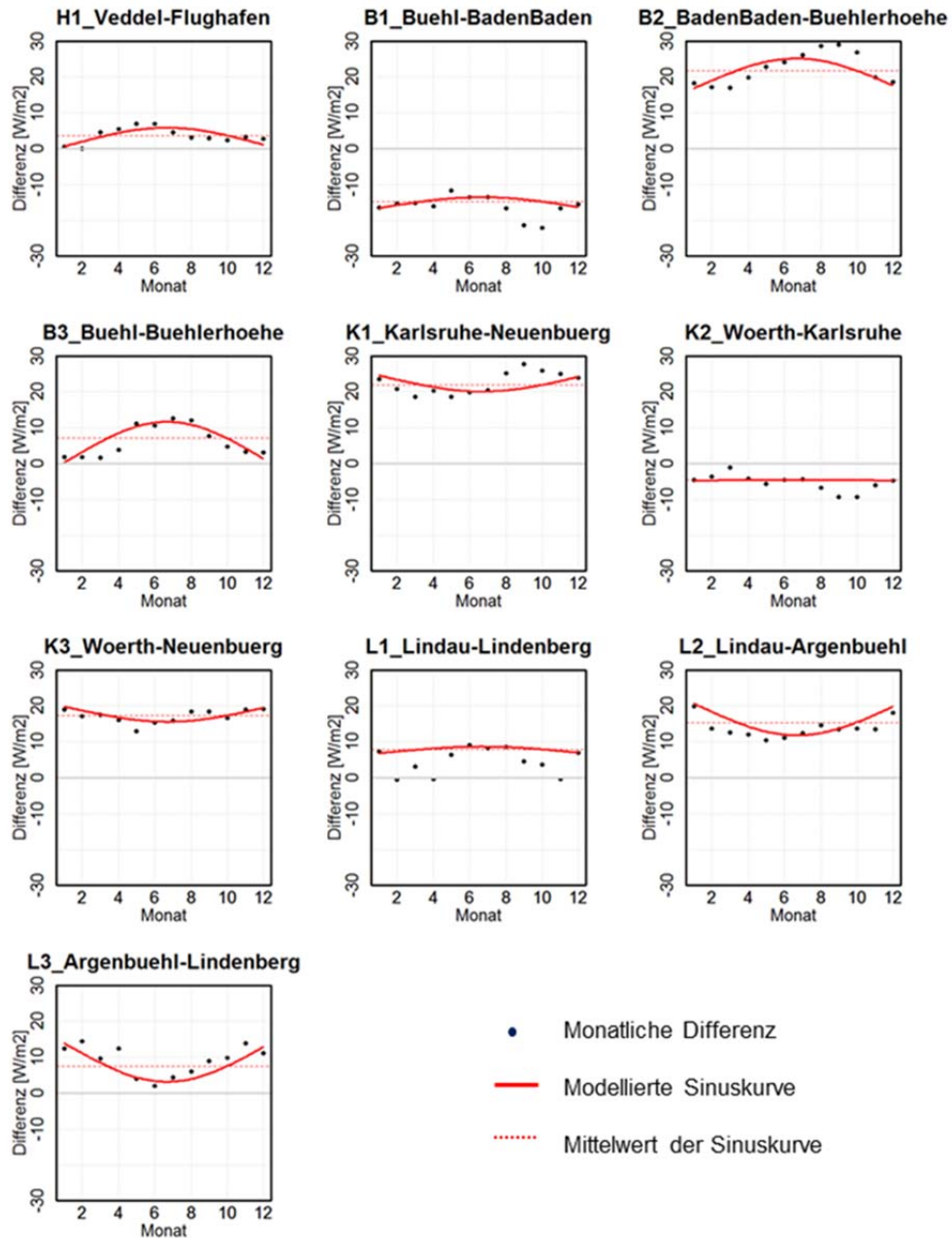


Bild 296:
 Absolute Differenz der Monatsmittelwerte der atmosphärischen Gegenstrahlung zwischen den untersuchten Standortpaaren (schwarze Punkte). Auf Basis dieser Punkte wird für jedes Standortpaar eine vereinfachte Sinuskurve für den Jahresverlauf der Abweichung modelliert (rote Kurve).

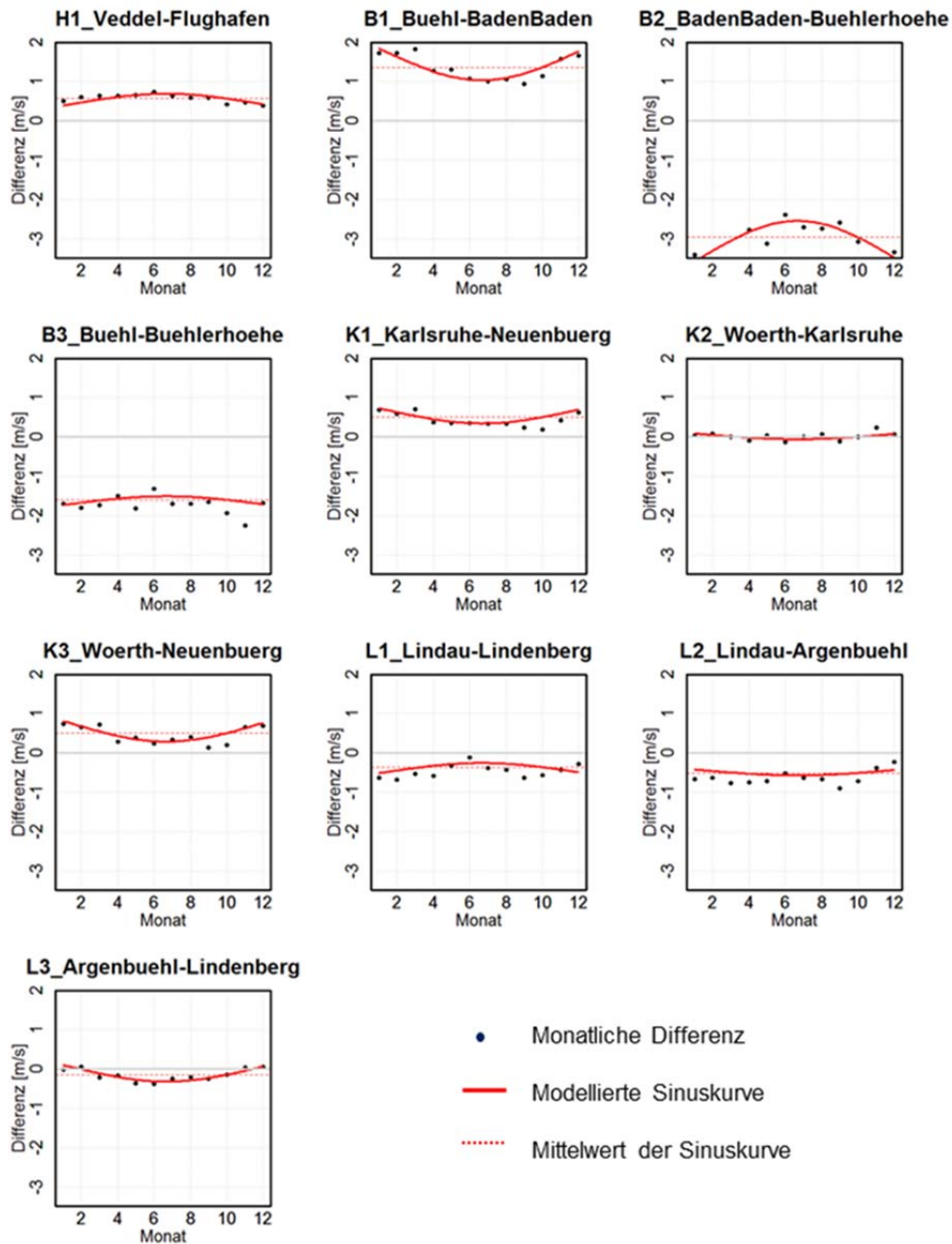


Bild 297:
 Absolute Differenz der Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit zwischen den untersuchten Standortpaaren (schwarze Punkte). Auf Basis dieser Punkte wird für jedes Standortpaar eine vereinfachte Sinuskurve für den Jahresverlauf der Abweichung modelliert (rote Kurve).

Temperatur (Höhenkorrigiert)

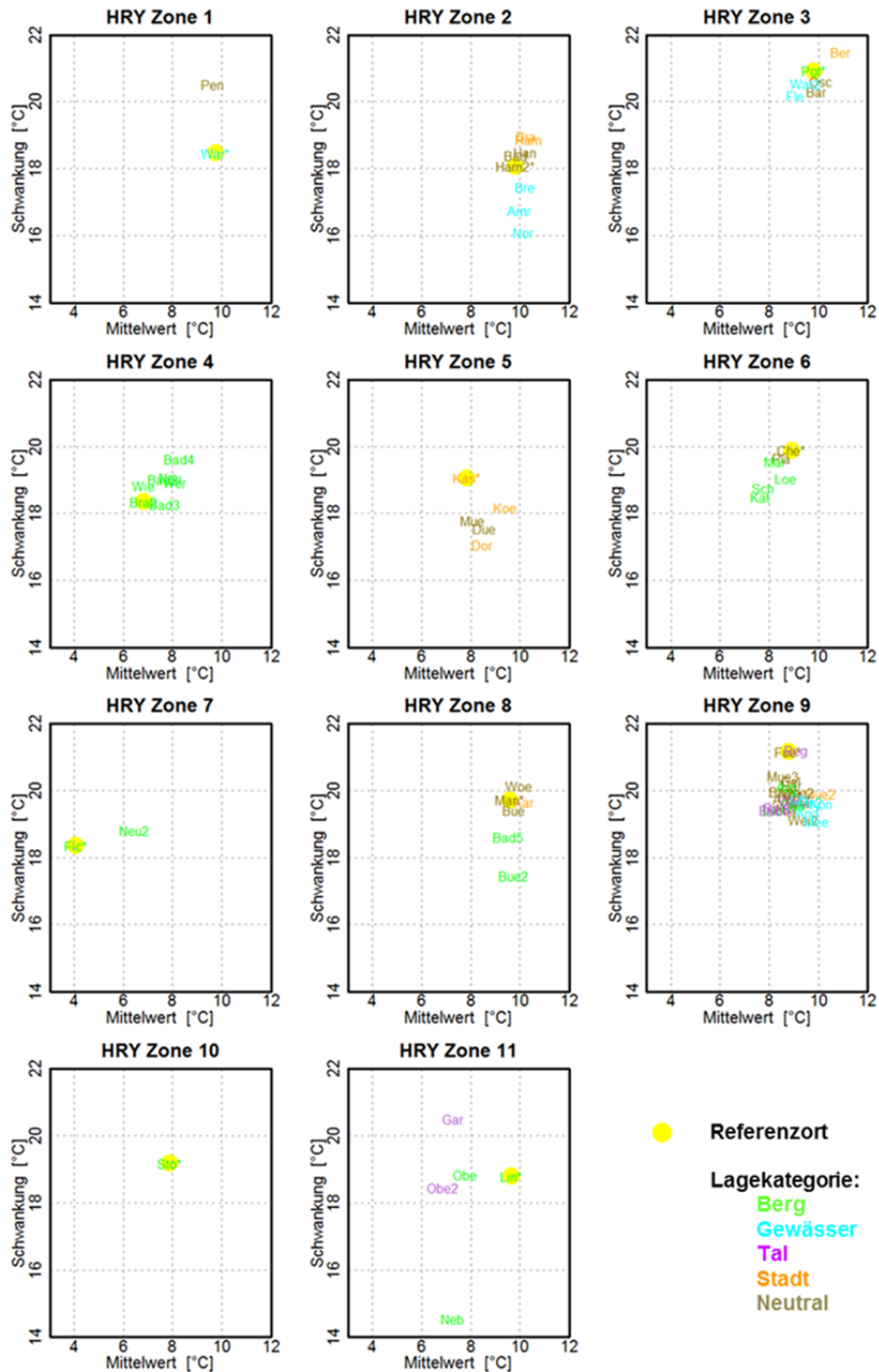


Bild 298:

Mittelwert (X-Achse) und Schwankungsbreite (Y-Achse) der Temperatur auf Basis der Monatsmittelwerte der Fünf-Jahres-Klimadatensätze der 74 Standorte. Die Mittelwerte wurden mit dem Höhenkorrekturfaktor von $-0,0041 \text{ K/m}$ auf die Höhe des Referenzstandorts der jeweiligen HRY-Zone umgerechnet. Die Lokalkategorien der Standorte sind farblich gekennzeichnet. Die Abkürzung der Standortnamen sind in Tabelle 62 enthalten.

Absolute Feuchte (Höhenkorrigiert)

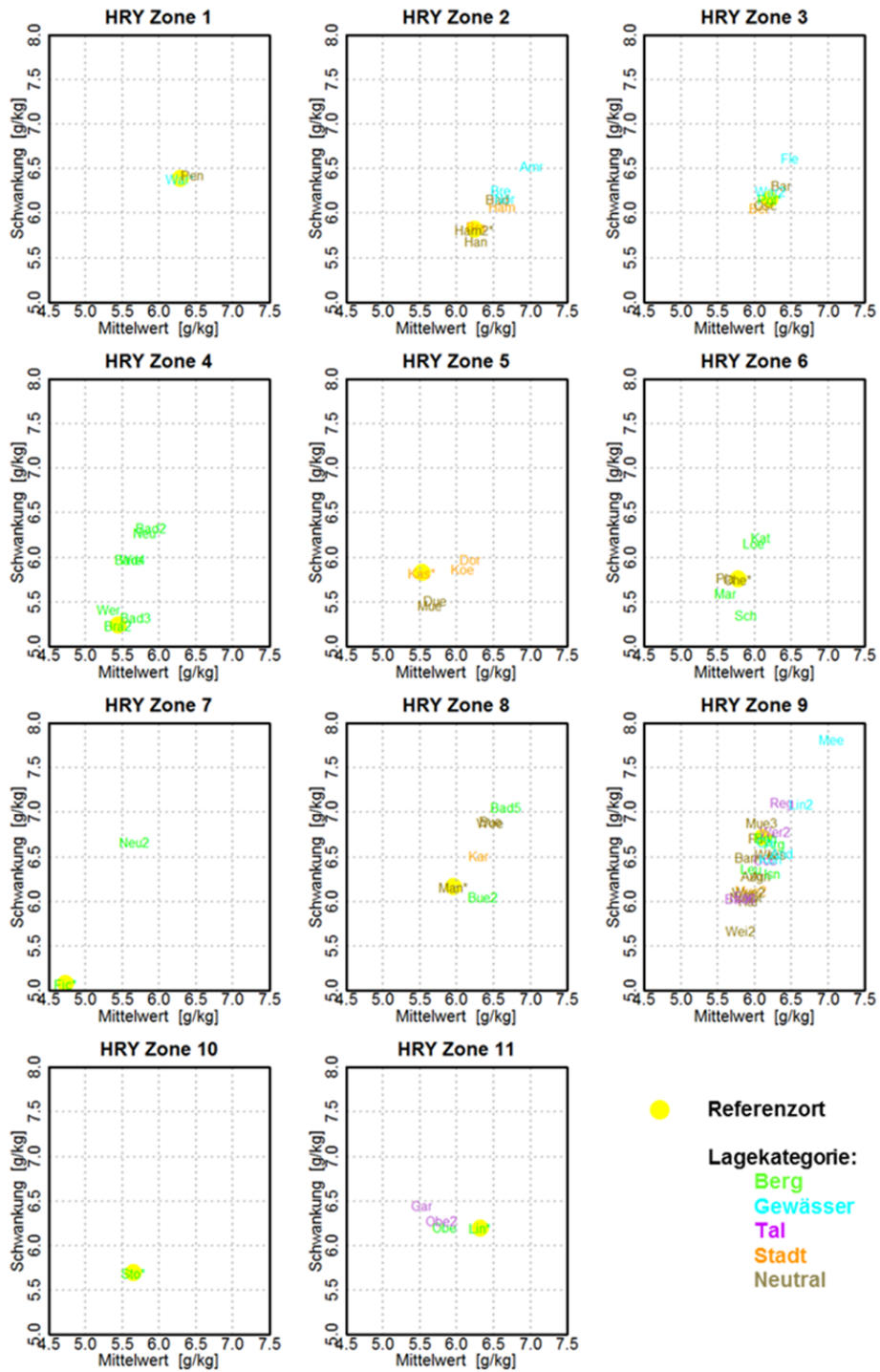


Bild 299:

Mittelwert (X-Achse) und Schwankungsbreite (Y-Achse) der absoluten Feuchte auf Basis der Monatsmittelwerte der Fünf-Jahres-Klimatensätze der 74 Standorte. Die Mittelwerte wurden mit dem Höhenkorrekturfaktor von $-0,0012 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{m})$ auf die Höhe des Referenzstandorts der jeweiligen HRY-Zone umge-

rechnet. Die Lokalkategorien der Standorte sind farblich gekennzeichnet. Die Abkürzung der Standortnamen sind in Tabelle 62 enthalten.

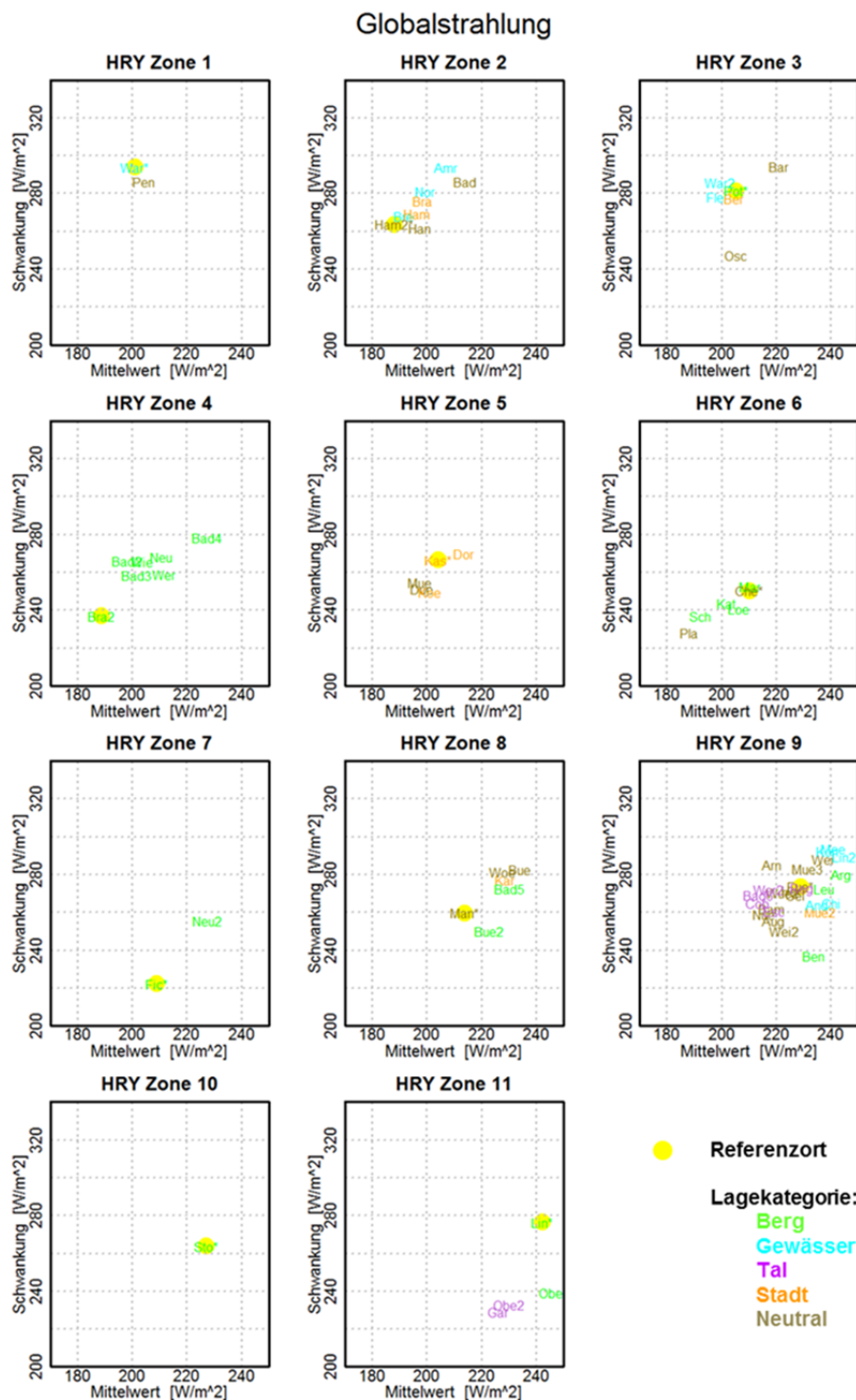


Bild 300: Mittelwert (X-Achse) und Schwankungsbreite (Y-Achse) der Globalstrahlung

auf Basis der Monatsmittelwerte der Fünf-Jahres-Klimadatensätze der 74 Standorte. Die Lokalkategorien der Standorte sind farblich gekennzeichnet. Die Abkürzung der Standortnamen sind in Tabelle 62 enthalten.

Diffusstrahlung

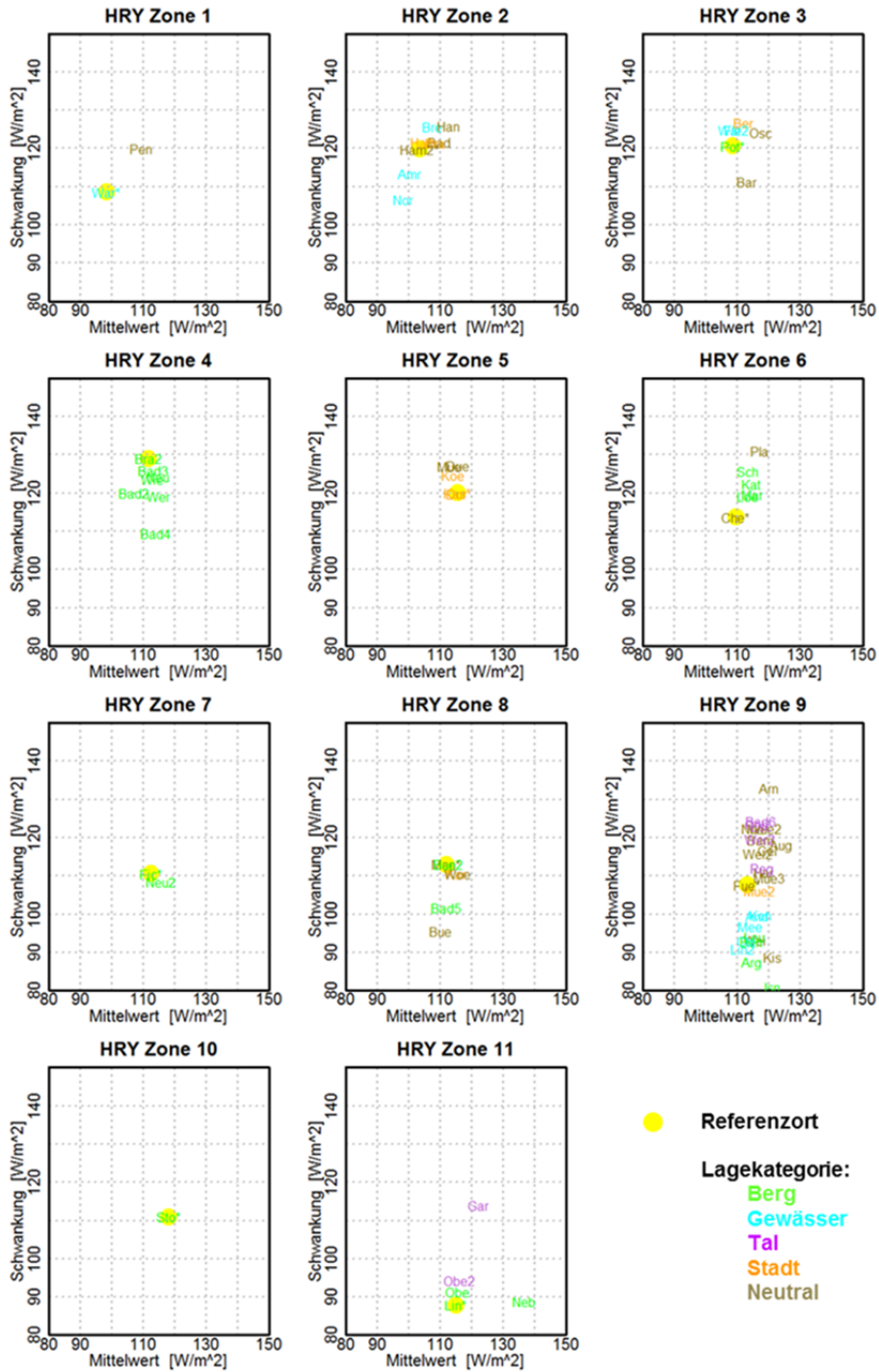


Bild 301:

Mittelwert (X-Achse) und Schwankungsbreite (Y-Achse) der Diffusstrahlung auf Basis der Monatsmittelwerte der Fünf-Jahres-Klimadatenätze der 74 Standorte. Die Lokalkategorien der Standorte sind farblich gekennzeichnet. Die Abkürzung der Standortnamen sind in Tabelle 62 enthalten.

Gegenstrahlung (Hoehenkorrigiert)

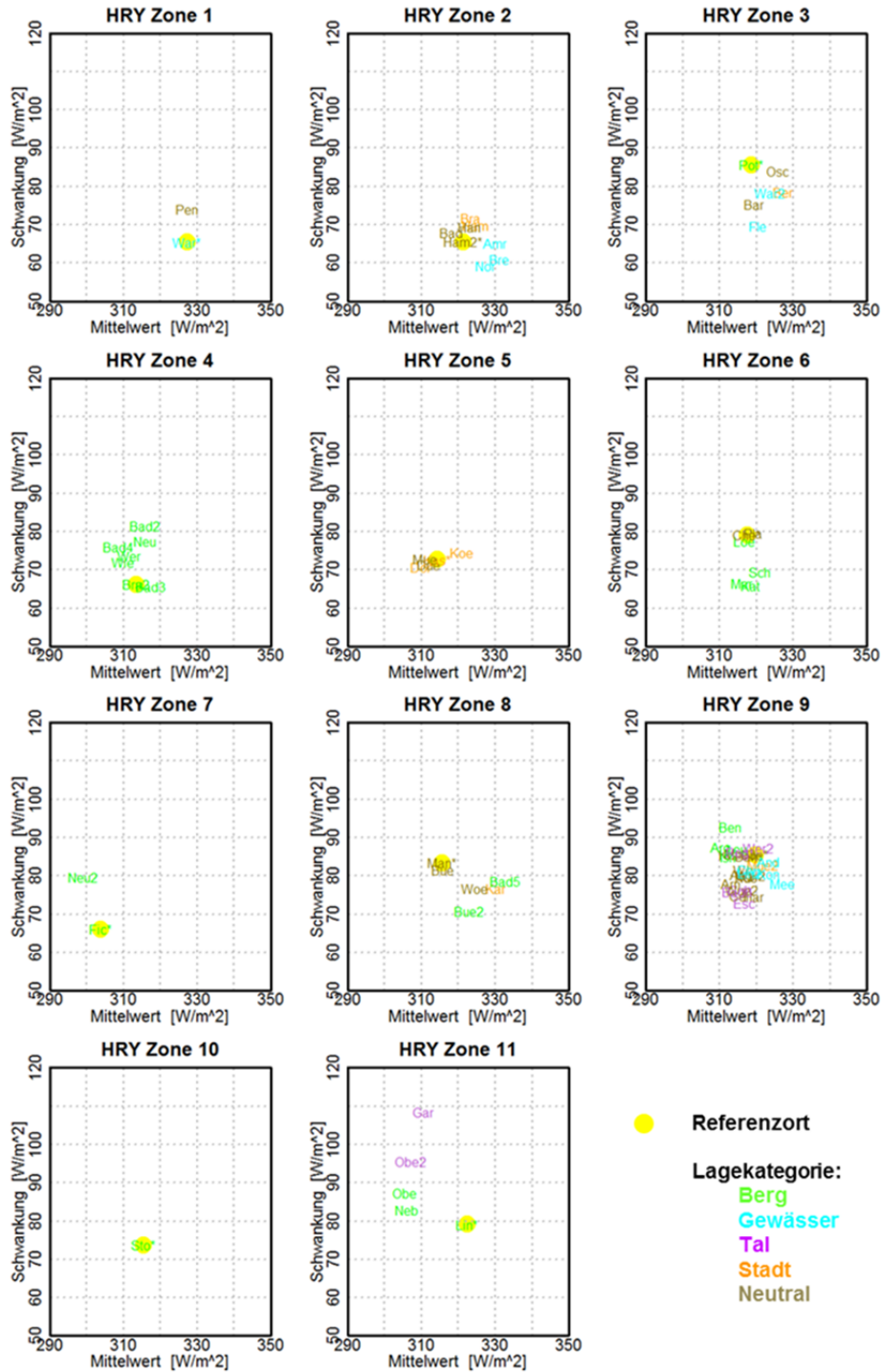


Bild 302:

Mittelwert (X-Achse) und Schwankungsbreite (Y-Achse) der atmosphärischen Gegenstrahlung auf Basis der Monatsmittelwerte der Fünf-Jahres-Klimadaten-sätze der 74 Standorte. Die Mittelwerte wurden mit dem Höhenkorrekturfaktor von $-0,021 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{m)}$ auf die Höhe des Referenzstandorts der jeweiligen HRY-Zone umgerechnet. Die Lokalkategorien der Standorte sind farblich gekennzeichnet. Die Abkürzung der Standortnamen sind in Tabelle 62 enthalten.

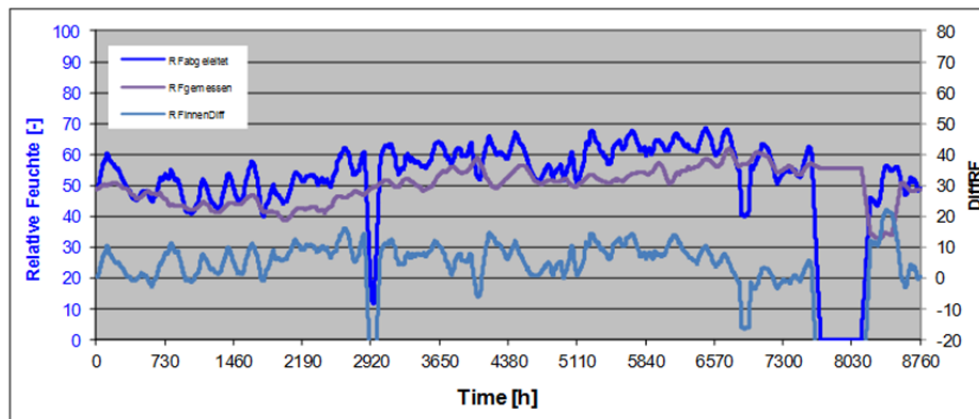
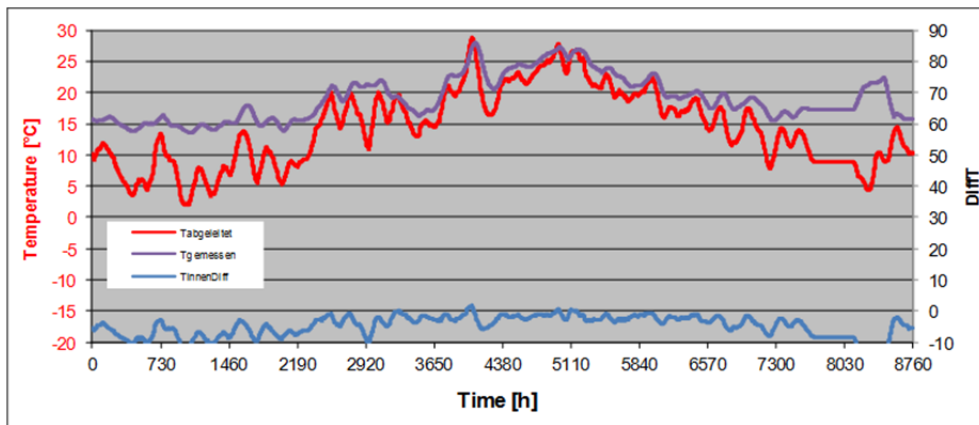


Bild 303:
Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchteverläufe bzgl. Dienstwohnung IBP, Klasse A1.

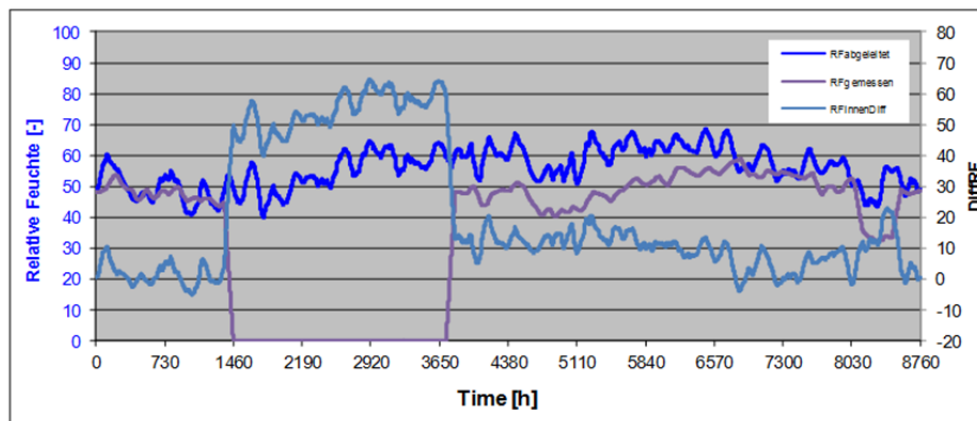
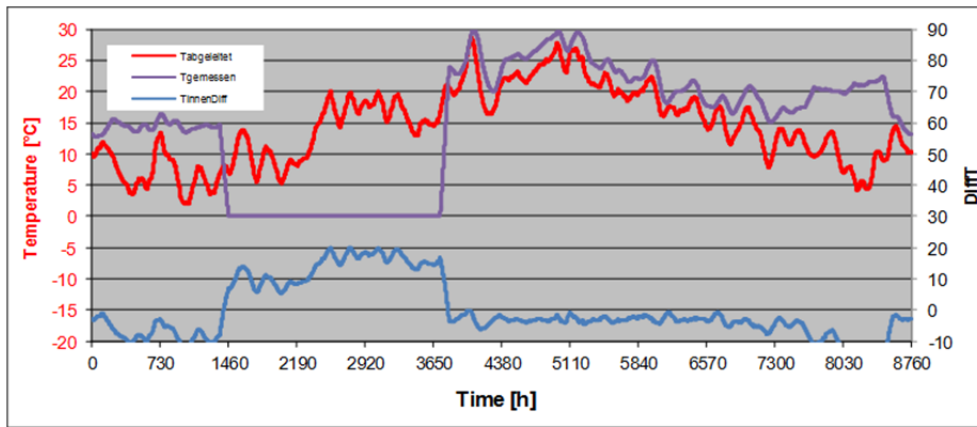


Bild 304:
 Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuch-
 teverläufe bzgl. Institutsdach IBP, Klasse A1.

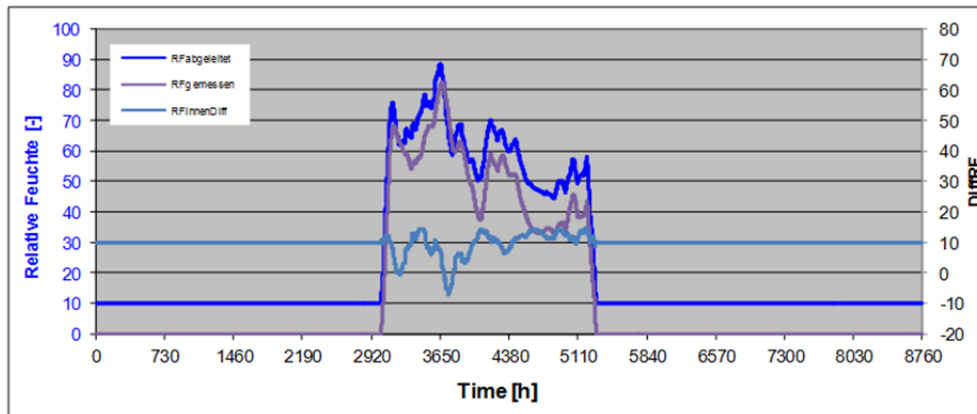
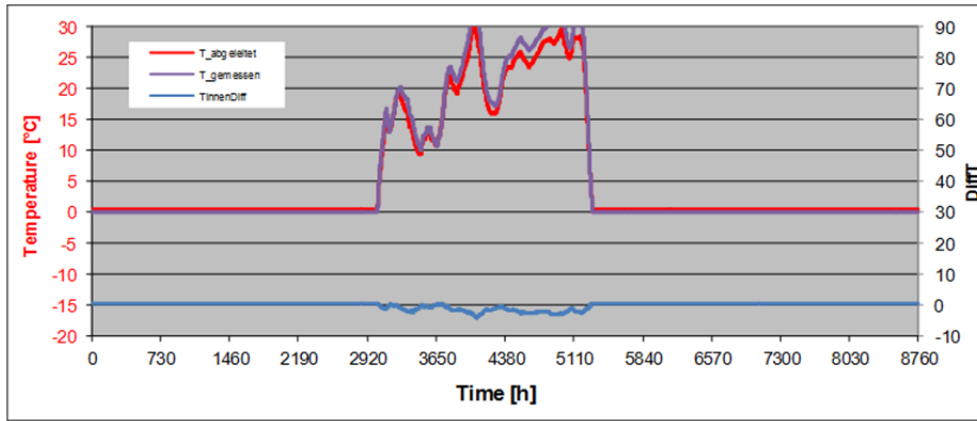


Bild 305:
 Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchteverläufe bzgl. Dachau, Klasse B2.

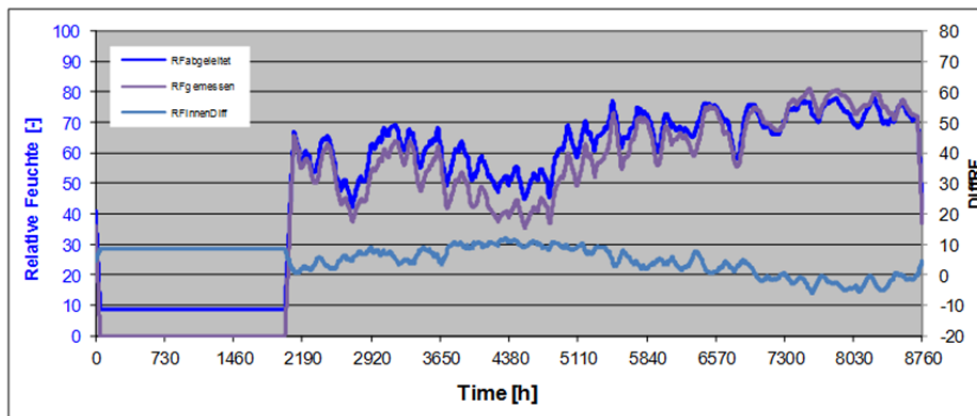
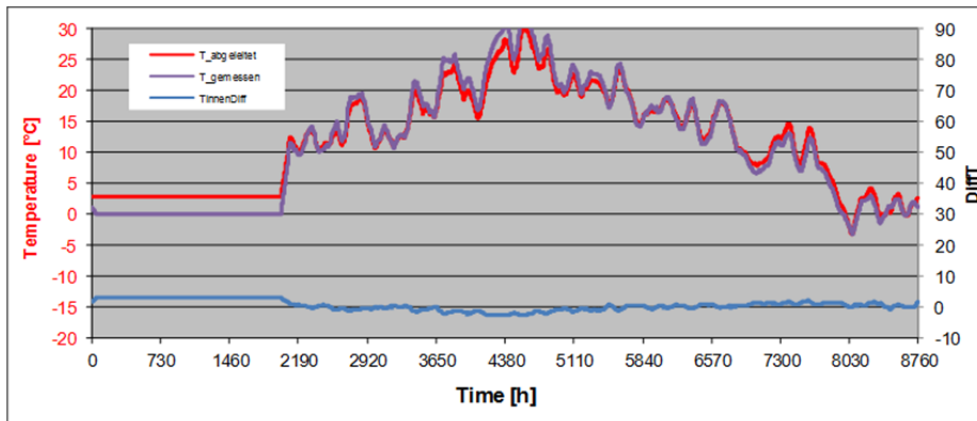


Bild 306:
Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchteverläufe bzgl. Kassel 1, Klasse B1.

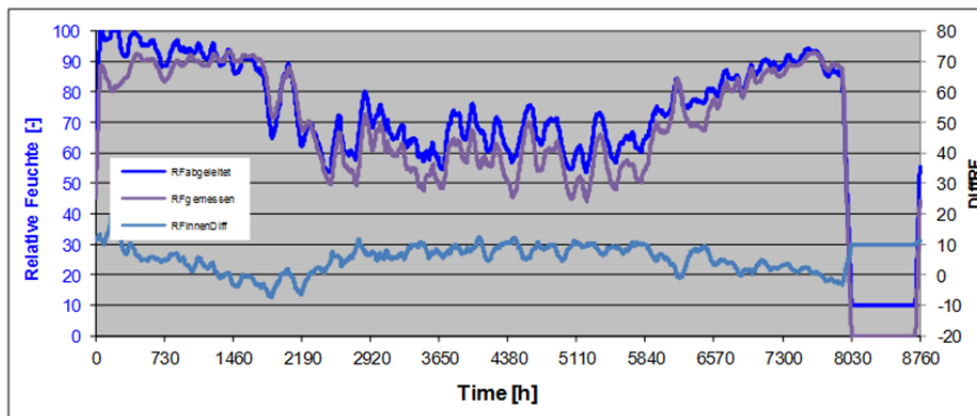
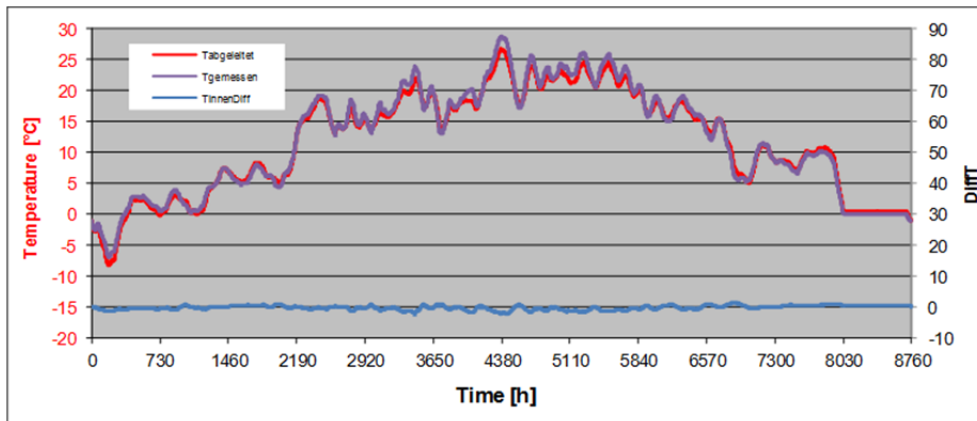


Bild 307:
Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchteverläufe bzgl. Kassel 2, Klasse B2.

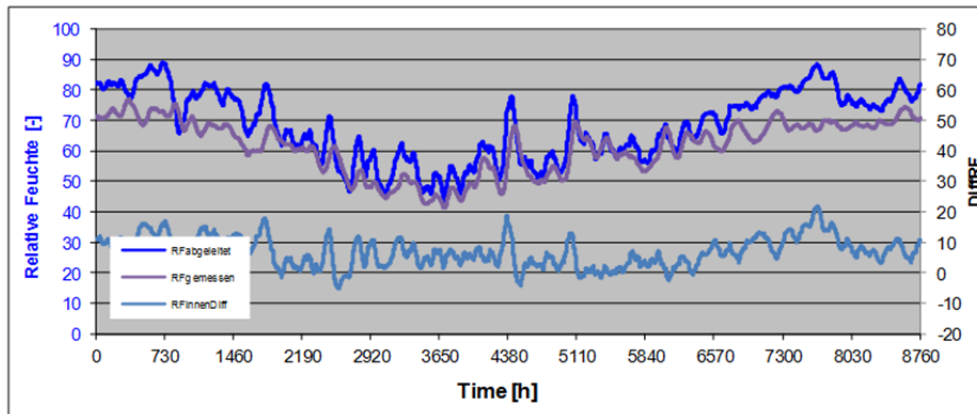
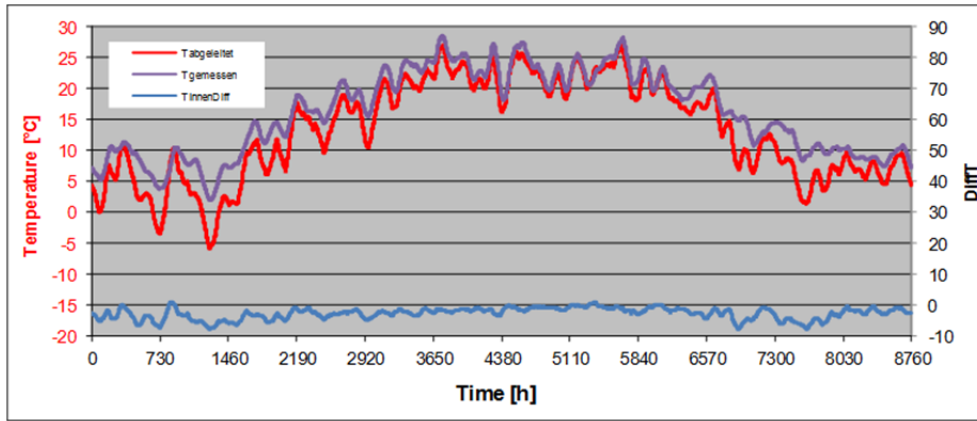


Bild 308:
Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchteverläufe bzgl. Oschatz 2011, Klasse B1.

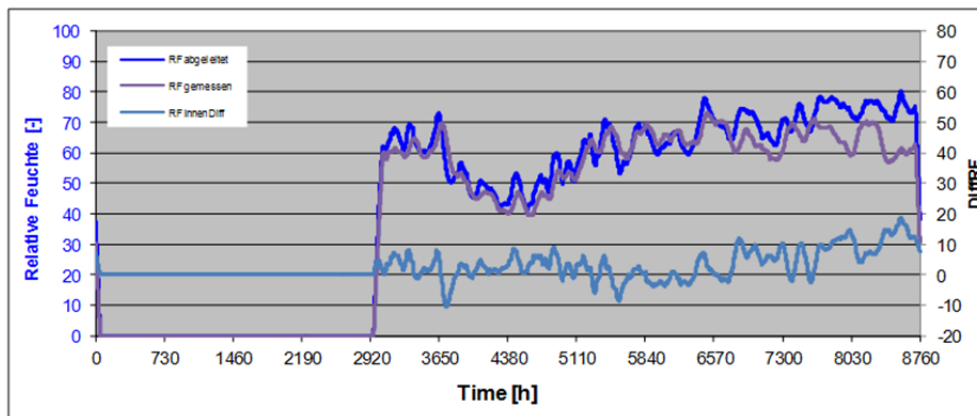
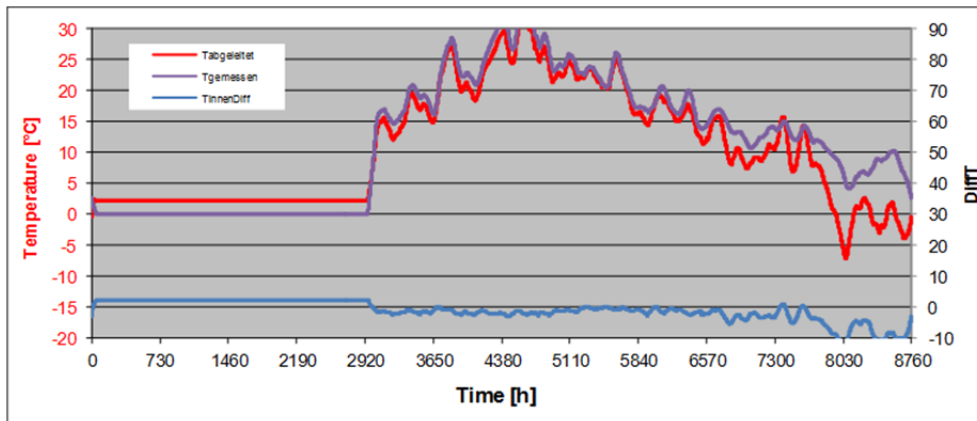


Bild 309:
Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchteverläufe bzgl. Oschatz 2010, Klasse B1.

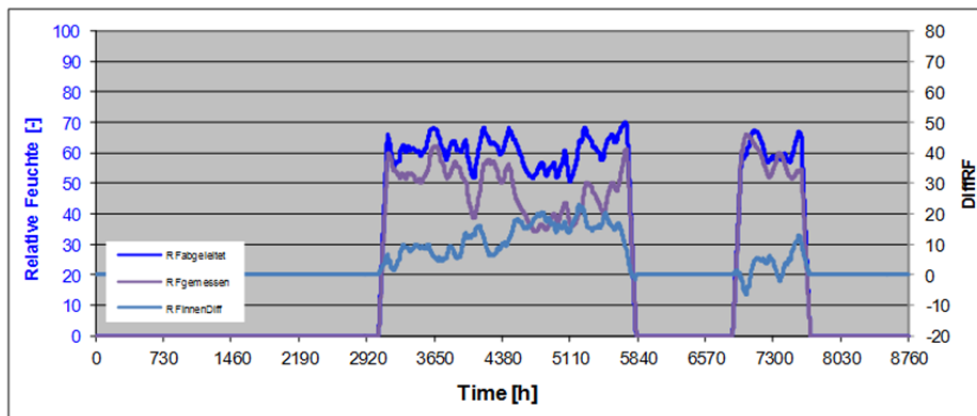
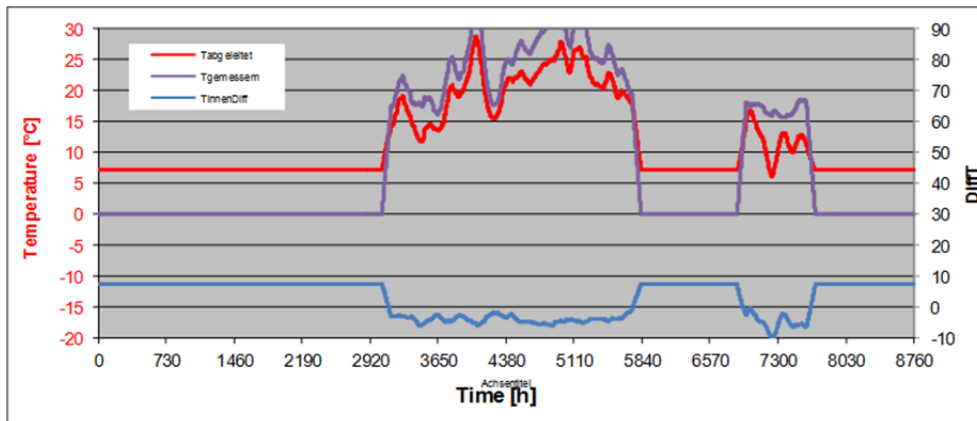


Bild 310:
 Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuch-
 teverläufe bzgl. Hohenbrunn, Klasse A2.

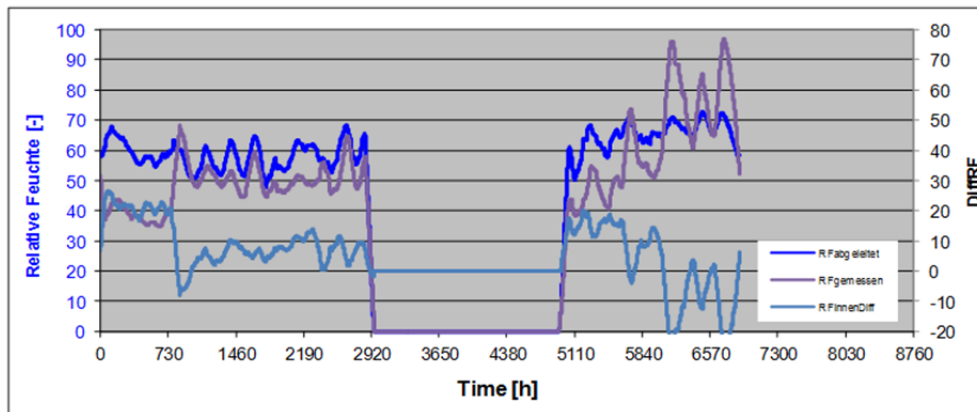
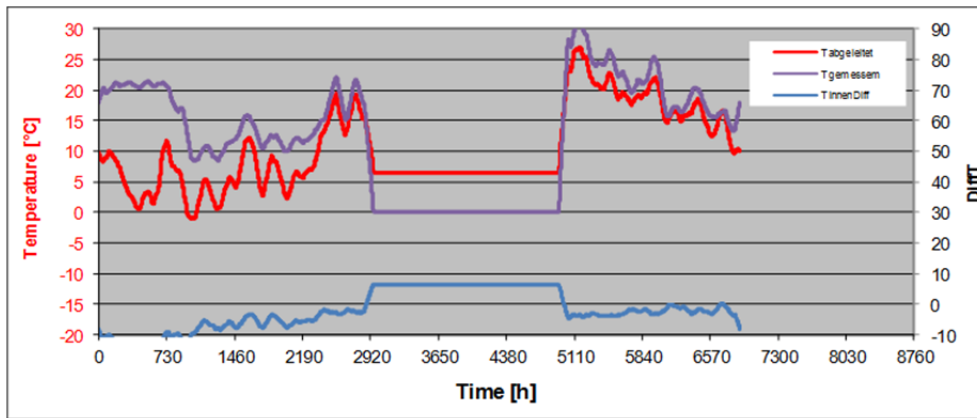


Bild 311:
Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchteverläufe bzgl. Planegg, Klasse A2.

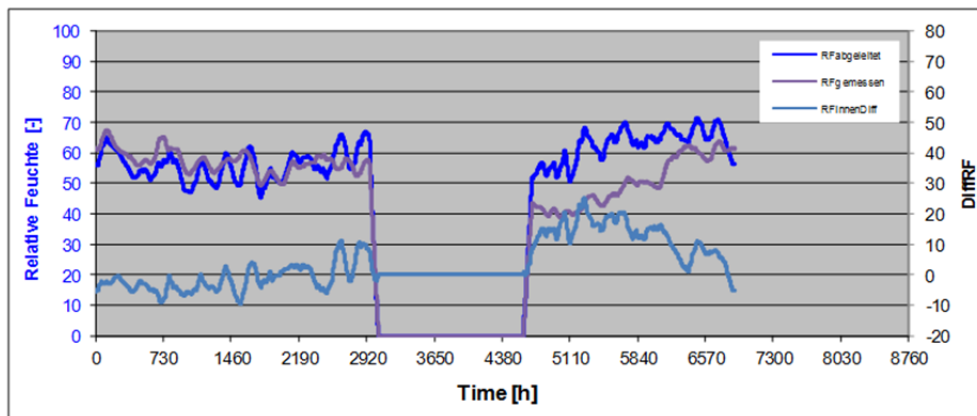
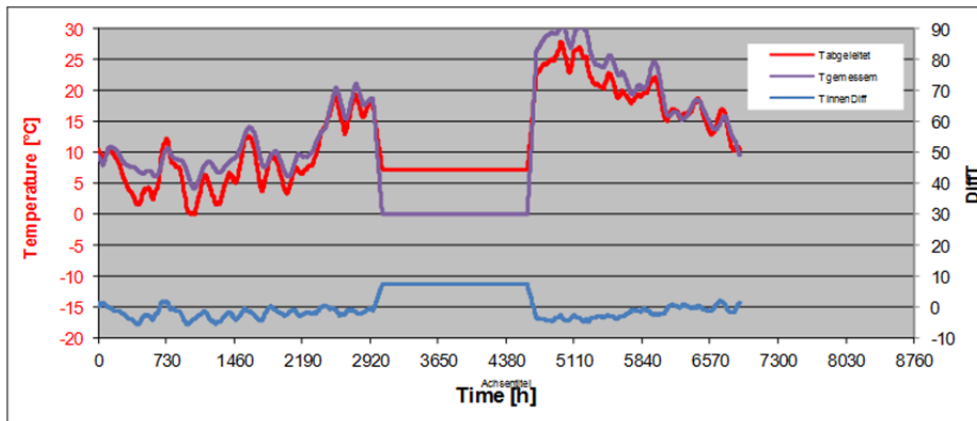


Bild 312:
Dachraummodell – Darstellung der Ergebnisse für die Temperatur- und Feuchterläufe bzgl. Vaterstetten, Klasse A2.

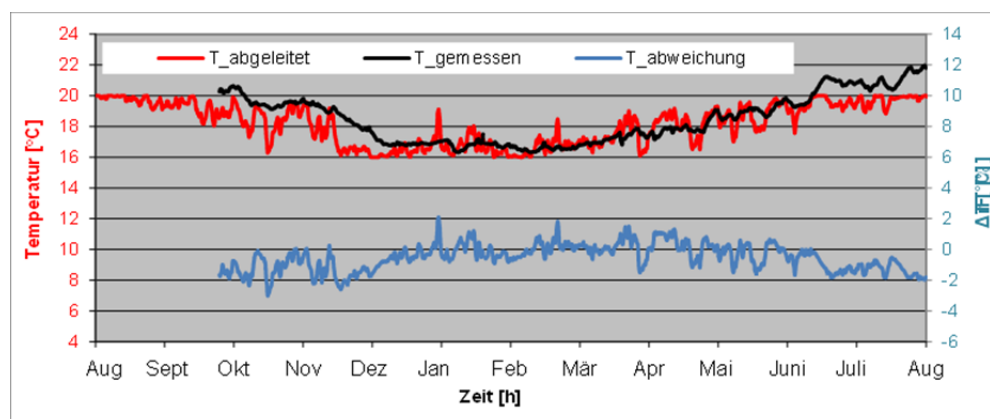


Bild 313:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

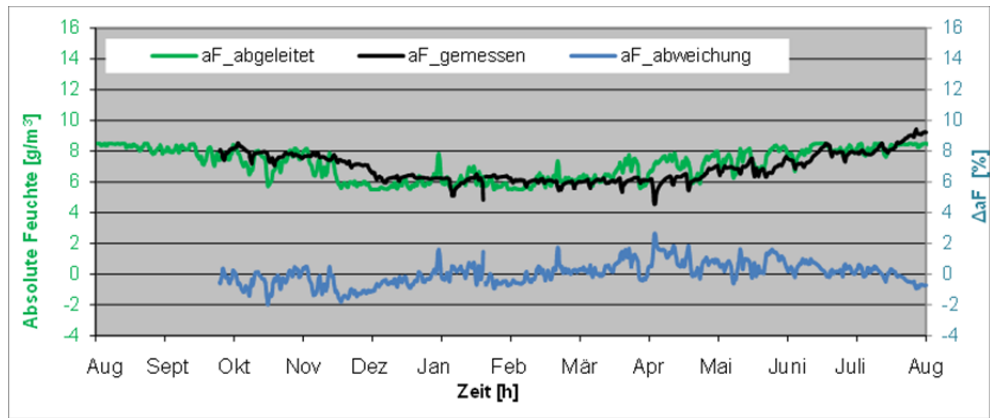


Bild 314:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

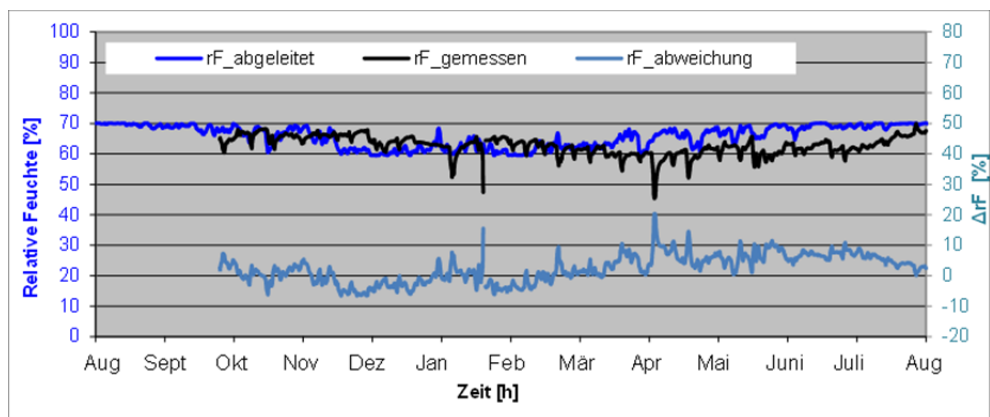


Bild 315:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

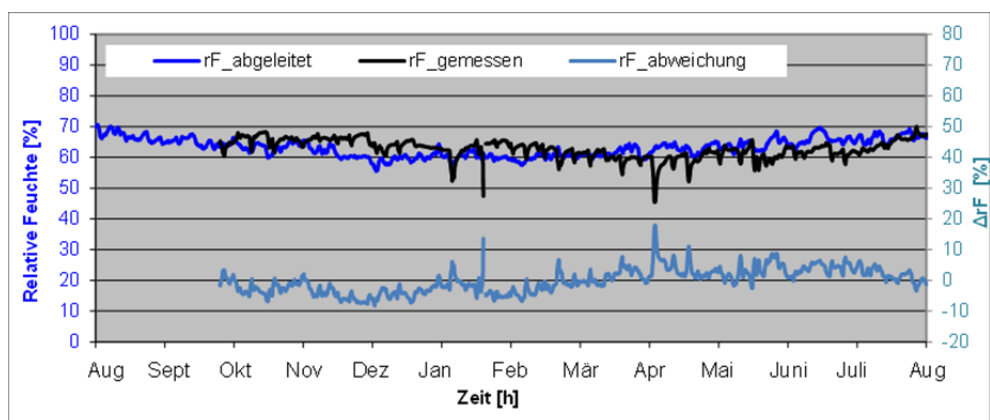


Bild 316:

Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

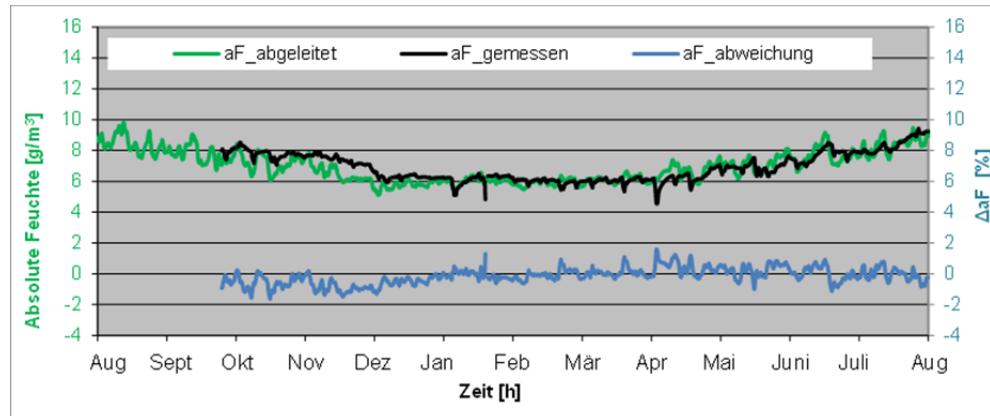


Bild 317:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

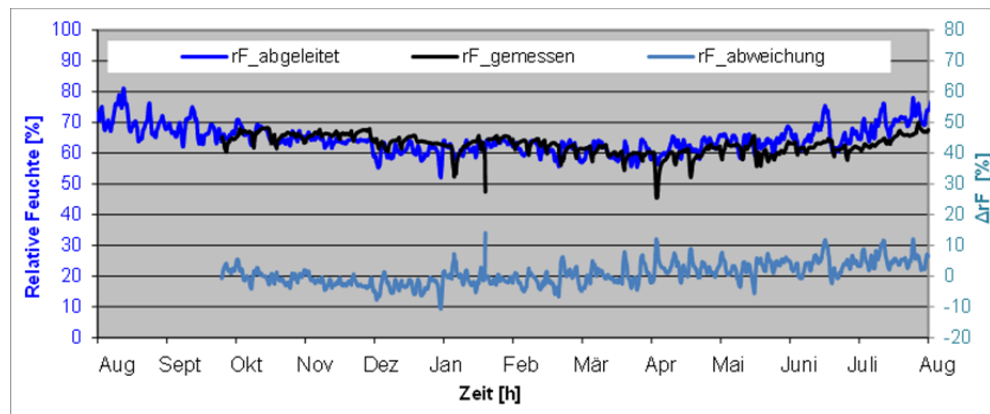


Bild 318:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller MiB (Gruppe A).

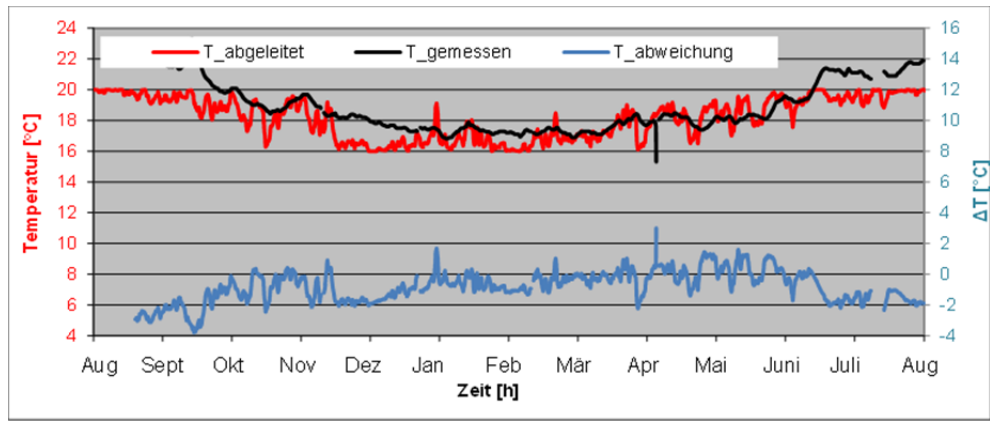


Bild 319:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller ErT (Gruppe A).

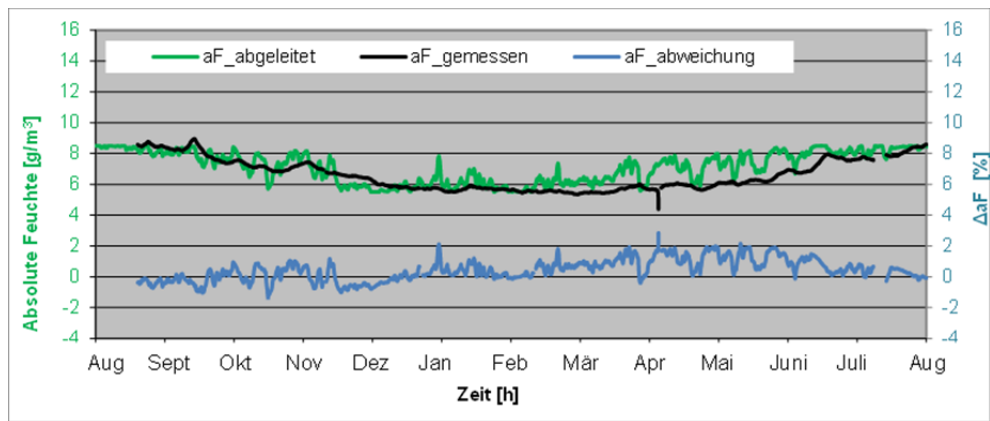


Bild 320:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ErT (Gruppe A).

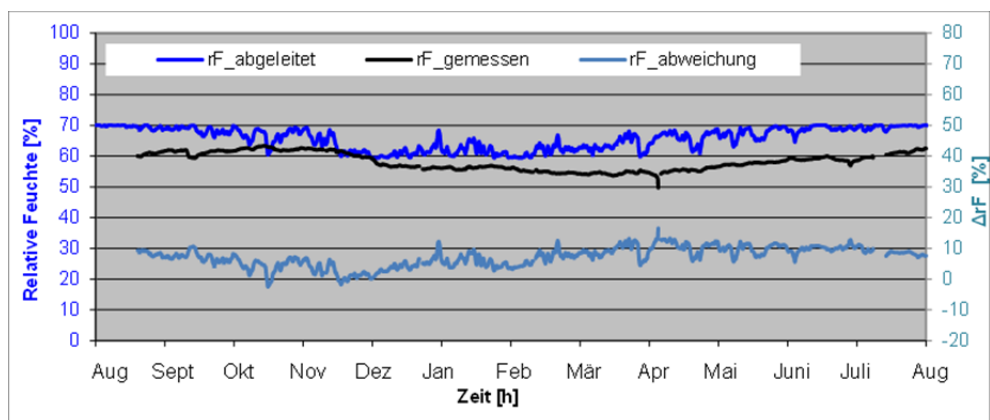


Bild 321:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ErT (Gruppe A).

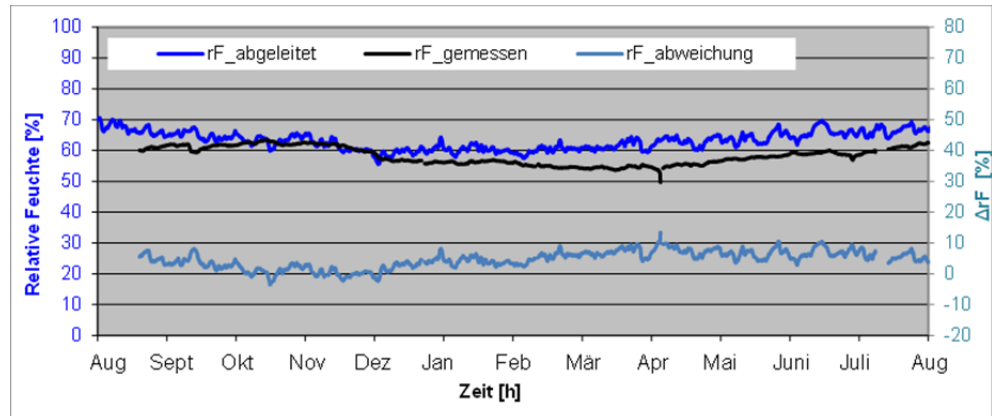


Bild 322:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ErT (Gruppe A).

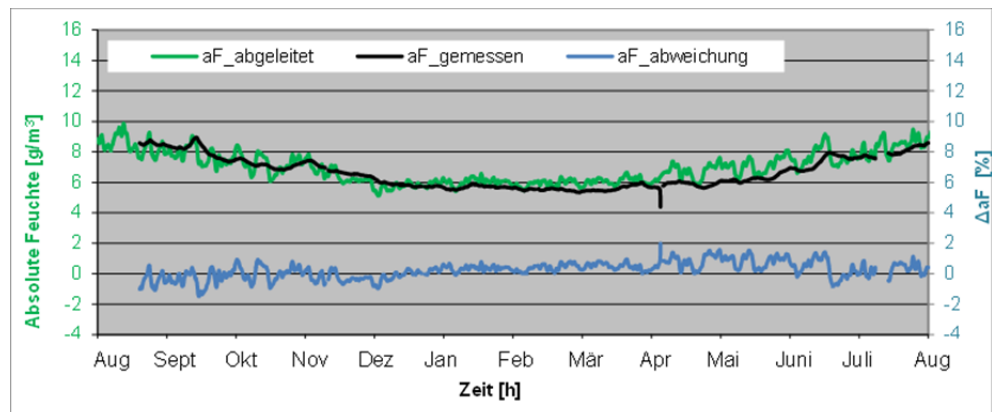


Bild 323:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ErT (Gruppe A).

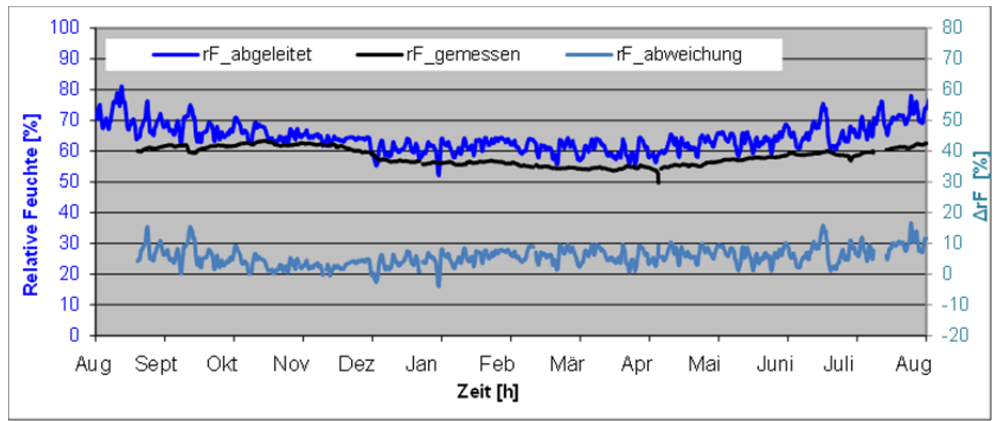


Bild 324:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ErT (Gruppe A).

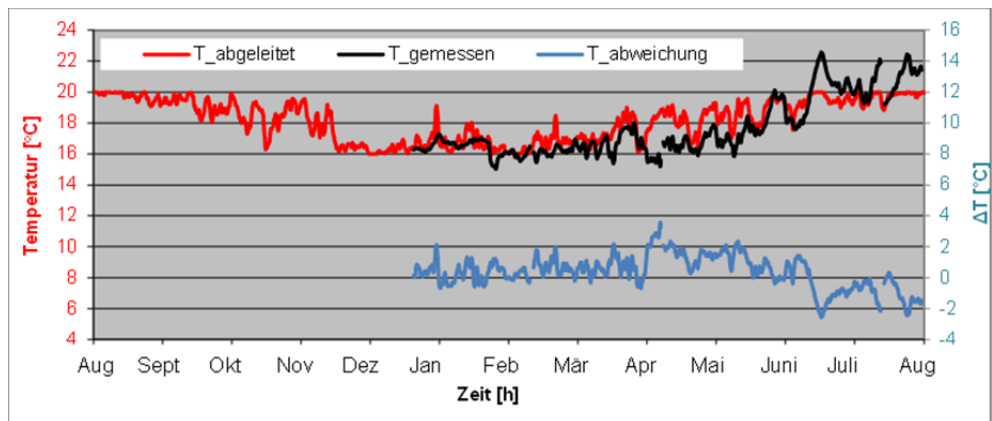


Bild 325:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller EIM (Gruppe A).

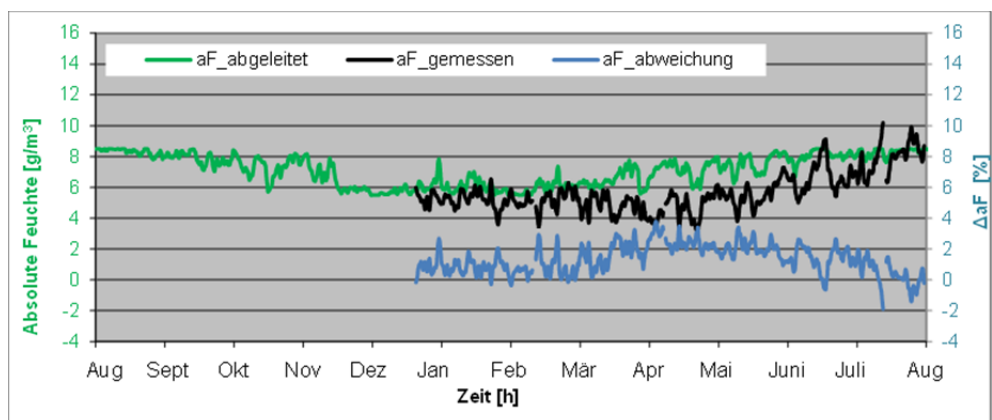


Bild 326:

Validierung für das Feuchtemodell $X(T)$ – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. *Keller EIM* (Gruppe A).

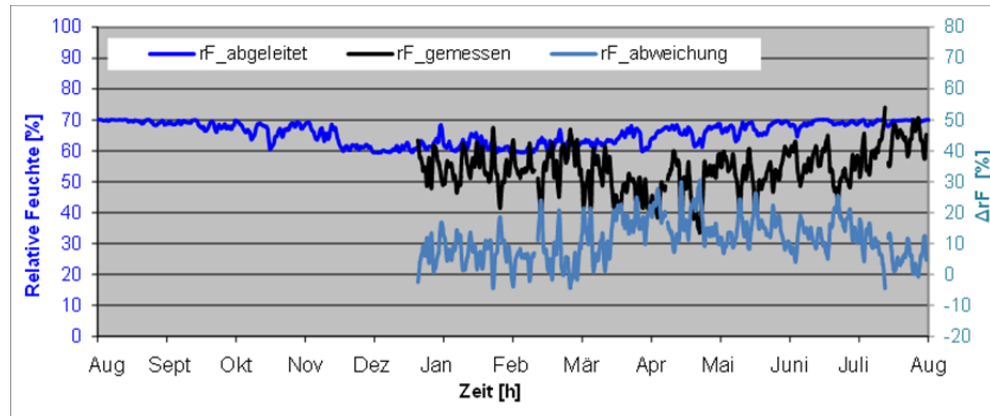


Bild 327:

Validierung für das Feuchtemodell $X(T)$ – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller EIM* (Gruppe A).

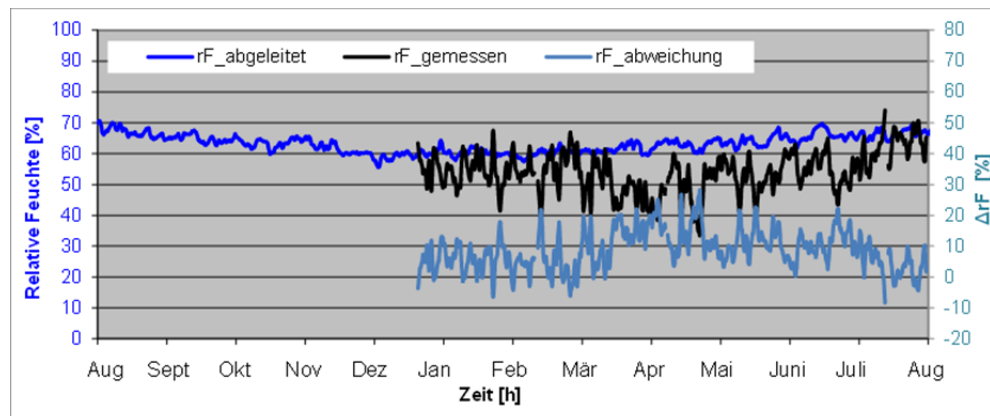


Bild 328:

Validierung für das Feuchtemodell $r.F.(T)$ – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller EIM* (Gruppe A).

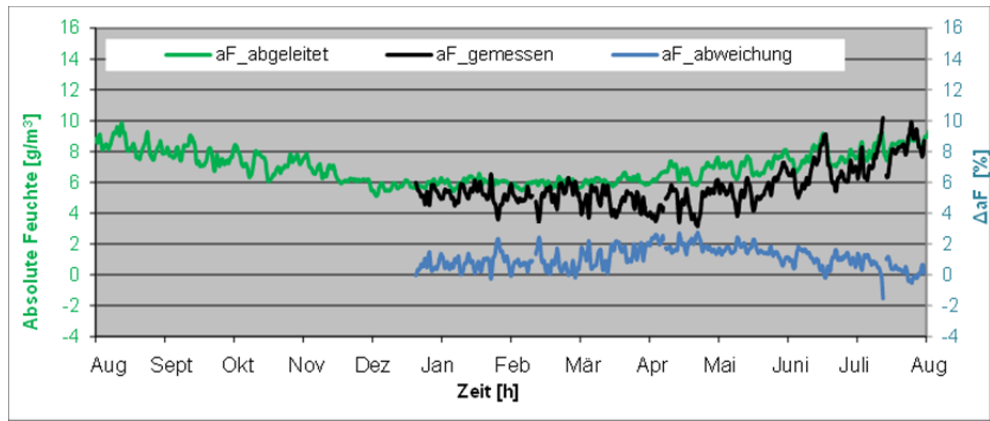


Bild 329:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller EIM (Gruppe A).

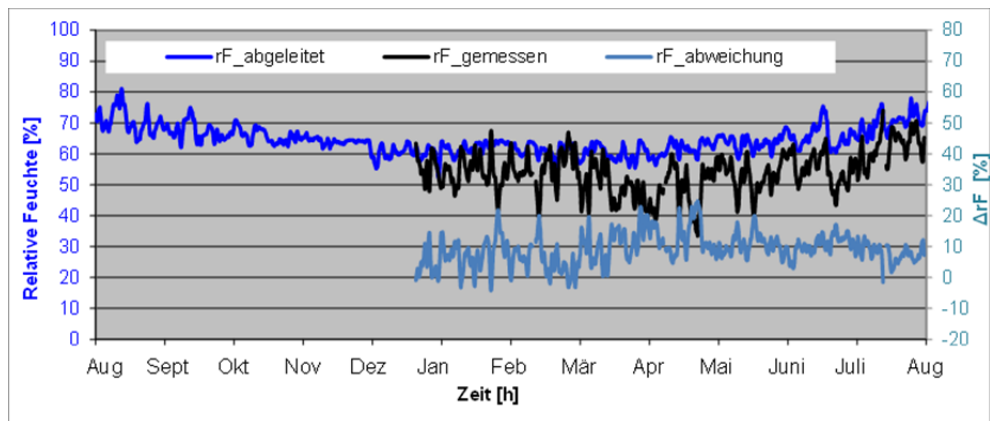


Bild 330:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller EIM (Gruppe A).

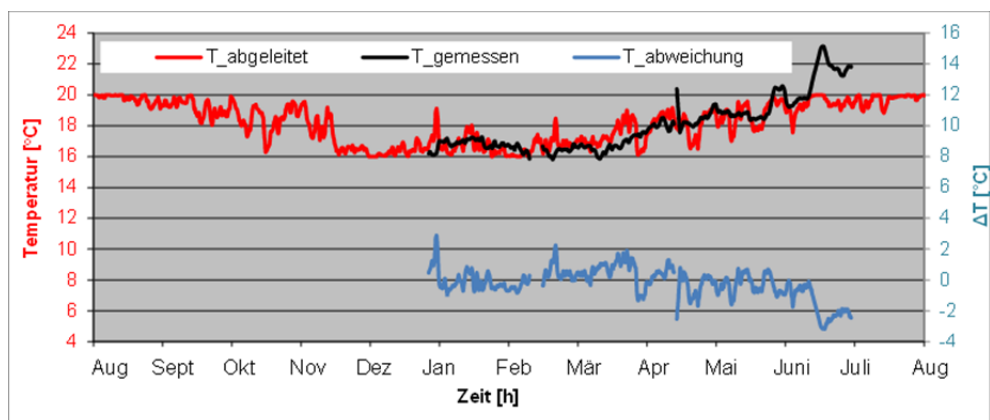


Bild 331:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. *Keller TeG* (Gruppe A).

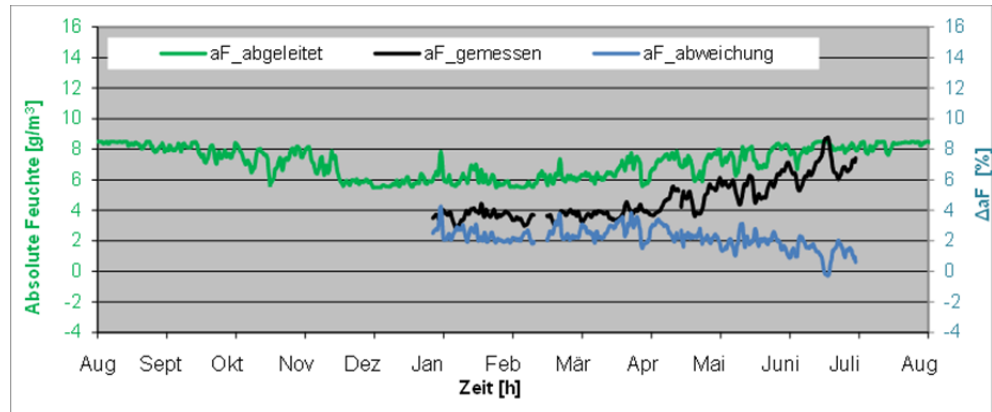


Bild 332:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. *Keller TeG* (Gruppe A).

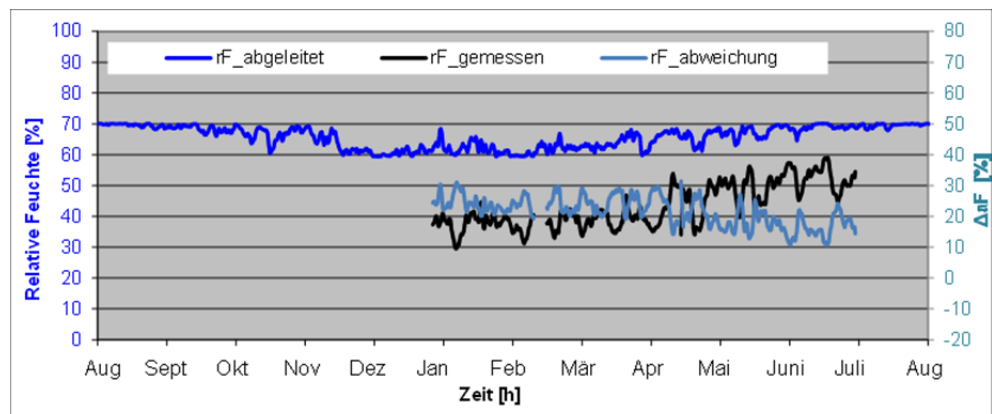


Bild 333:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller TeG* (Gruppe A).

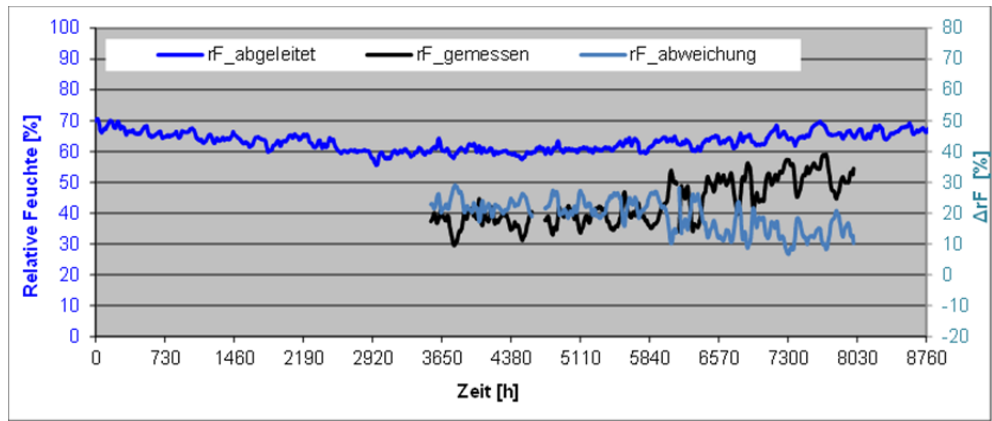


Bild 334:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller TeG (Gruppe A).

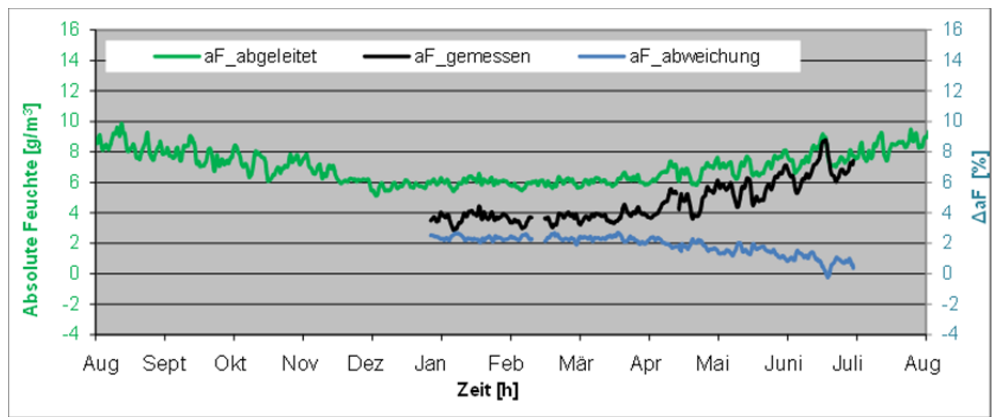


Bild 335:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller TeG (Gruppe A).

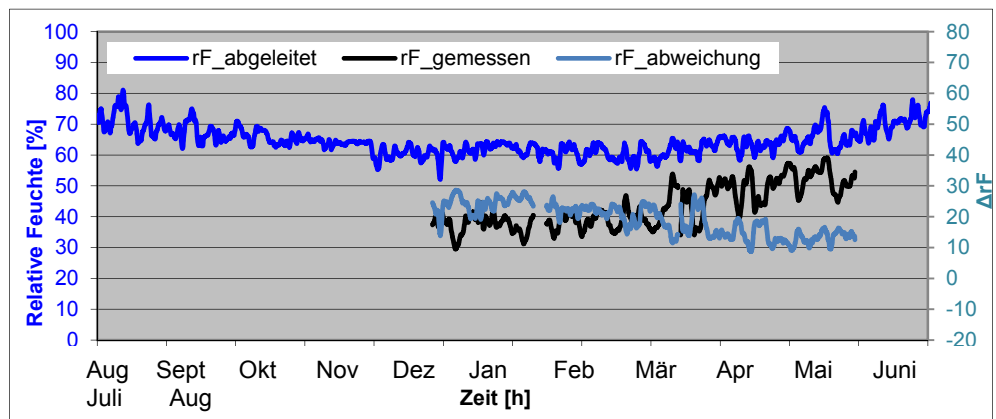


Bild 336:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller TeG (Gruppe A).

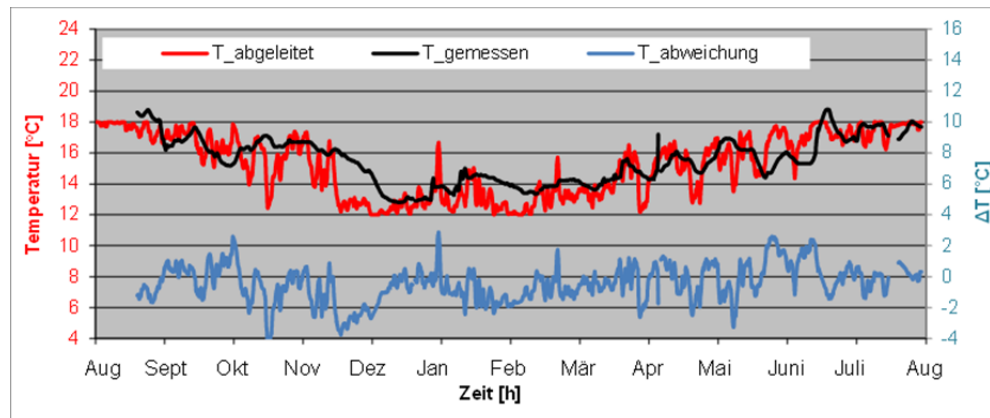


Bild 337:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

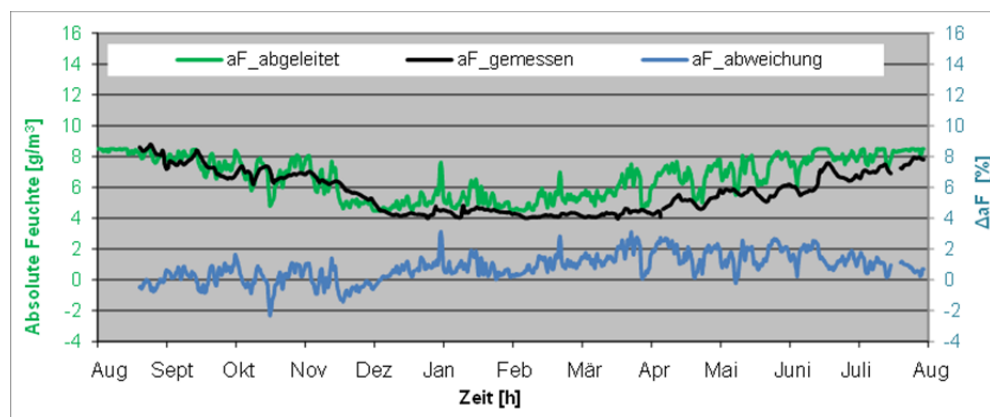


Bild 338:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

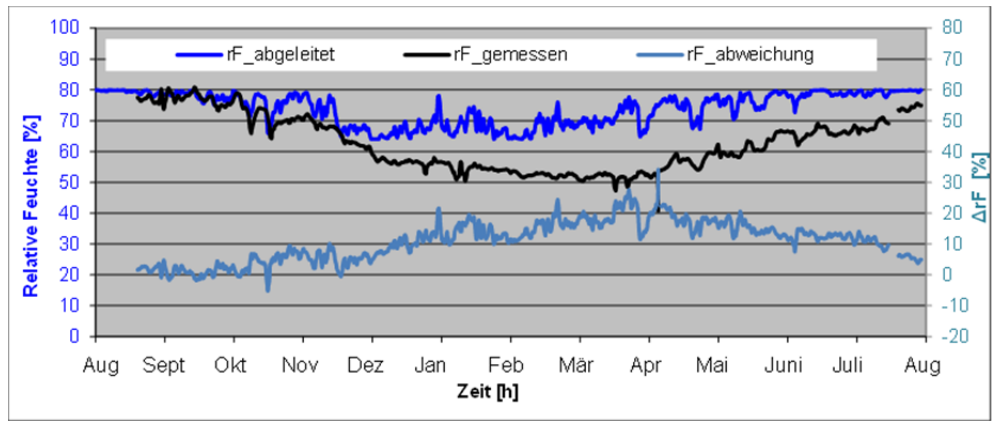


Bild 339:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

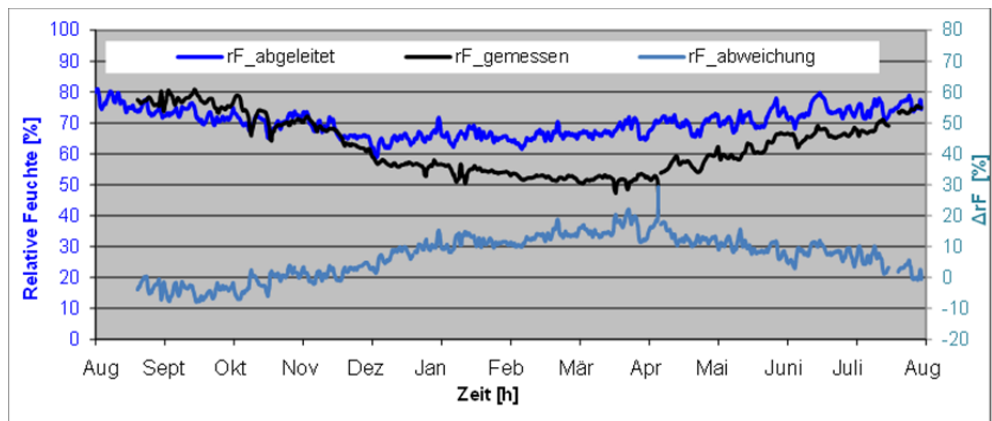


Bild 340:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

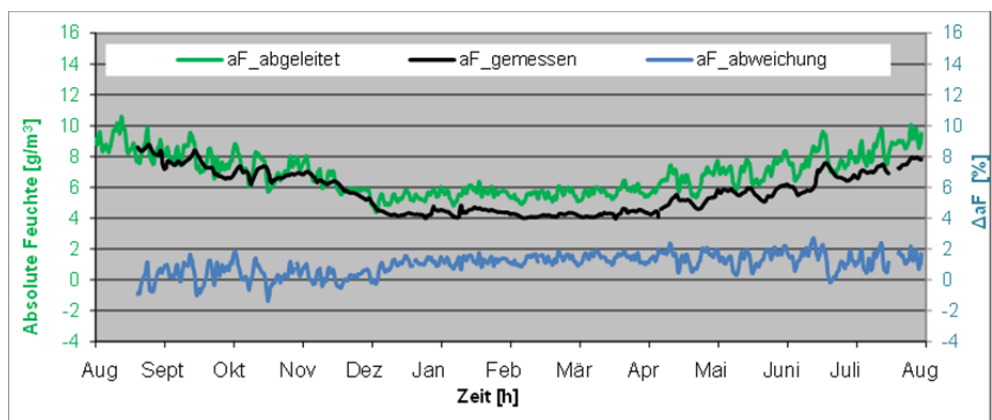


Bild 341:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

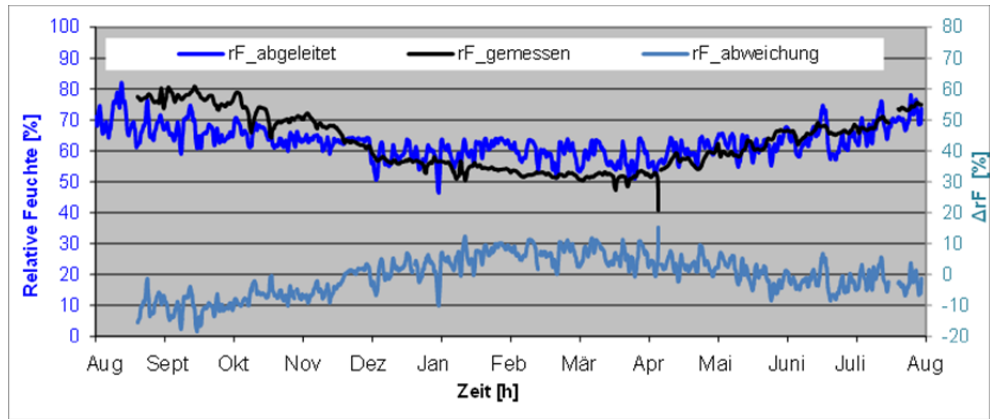


Bild 342:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller BaL (Gruppe B).

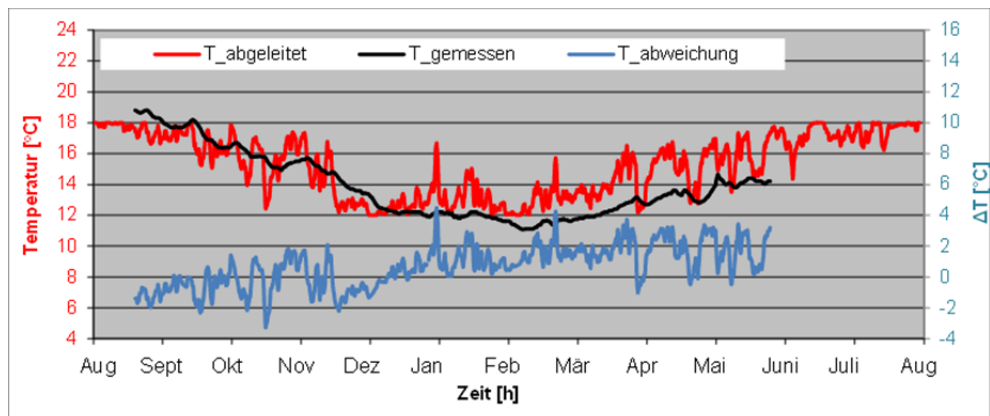


Bild 343:

Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller BeS (Gruppe B).

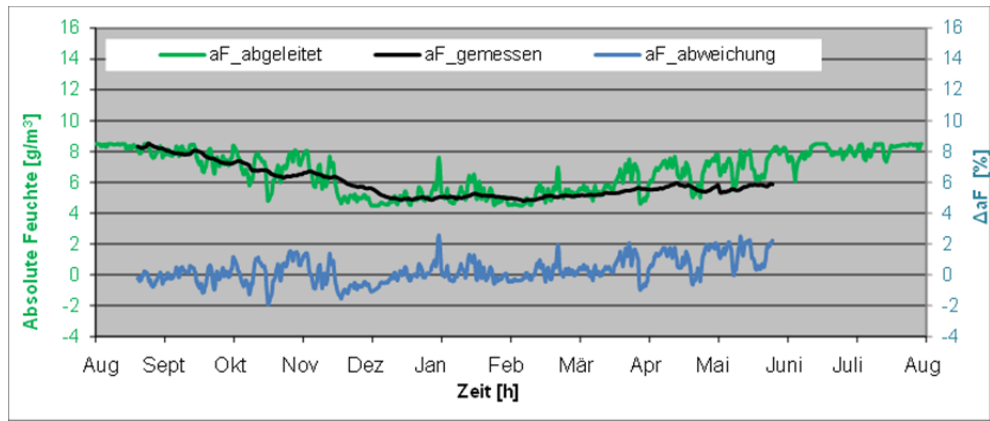


Bild 344:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller BeS (Gruppe B).

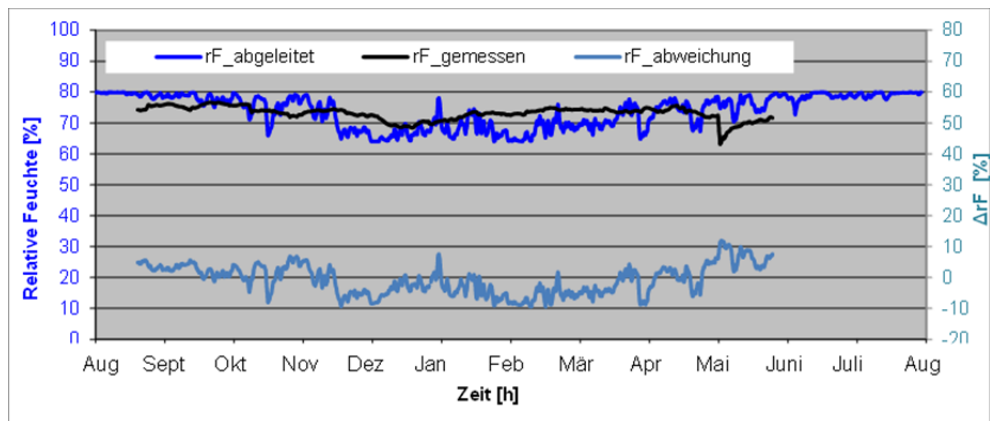


Bild 345:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller BeS (Gruppe B).

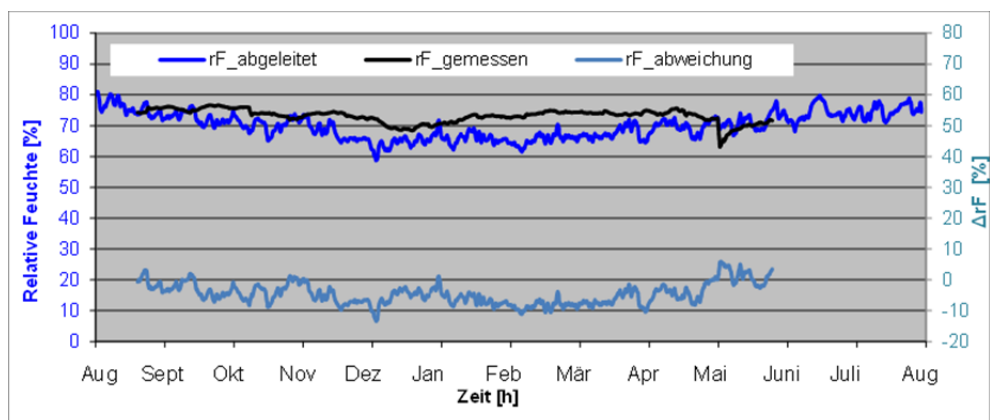


Bild 346:

Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller BeS (Gruppe B).

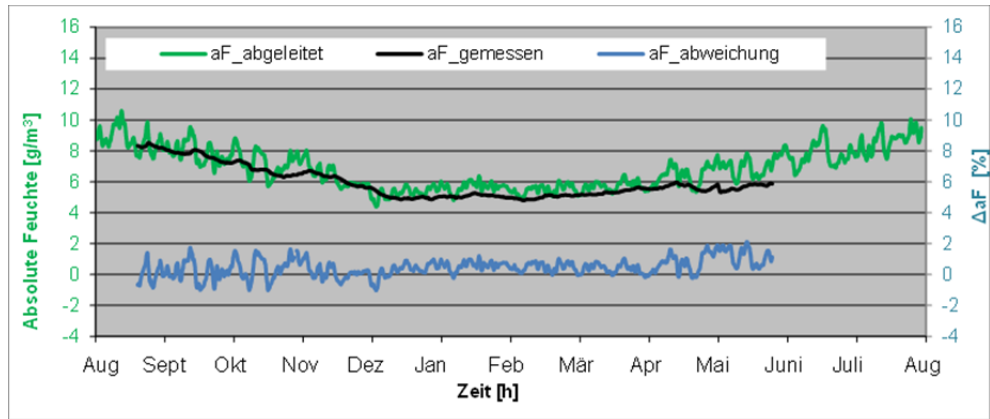


Bild 347:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller BeS (Gruppe B).

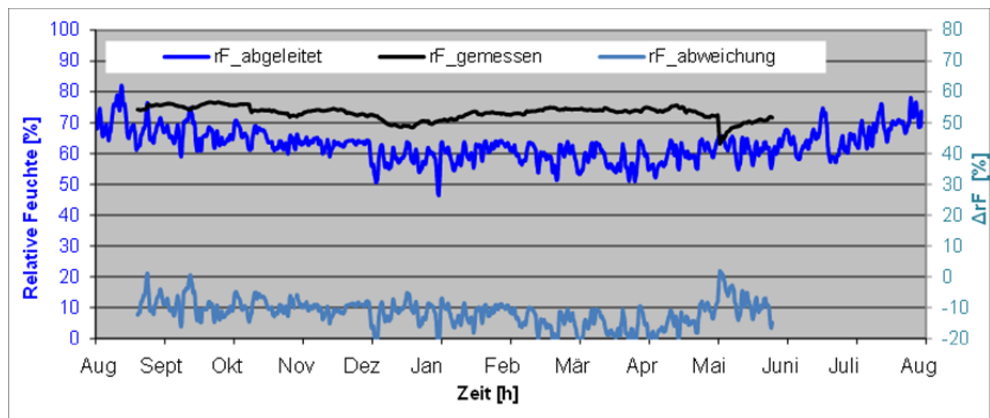


Bild 348:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller BeS (Gruppe B).

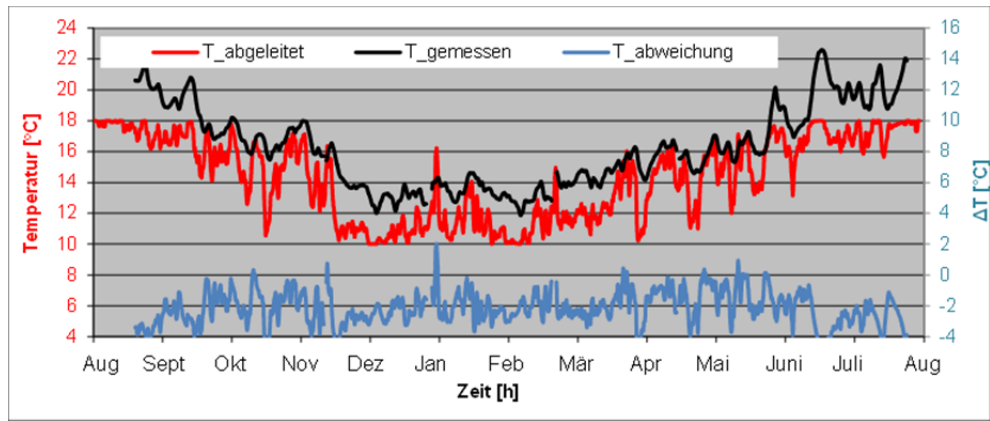


Bild 349:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller KiA (Gruppe C).

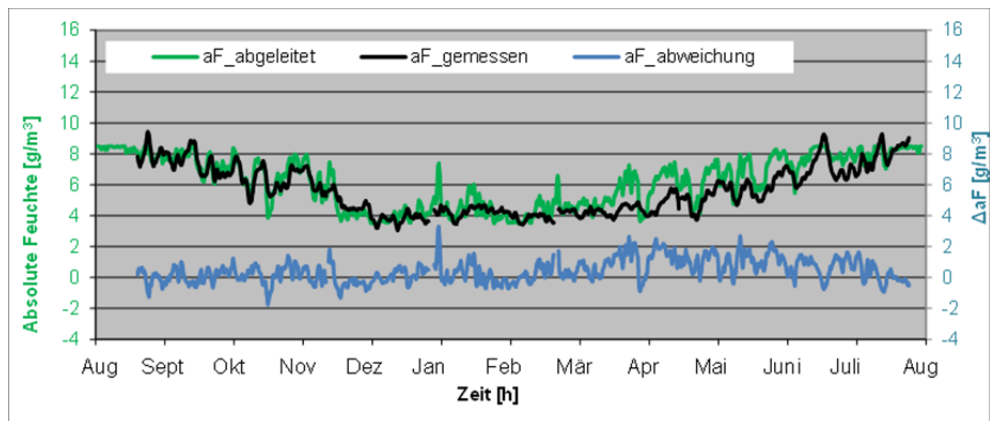


Bild 350:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller KiA (Gruppe C).

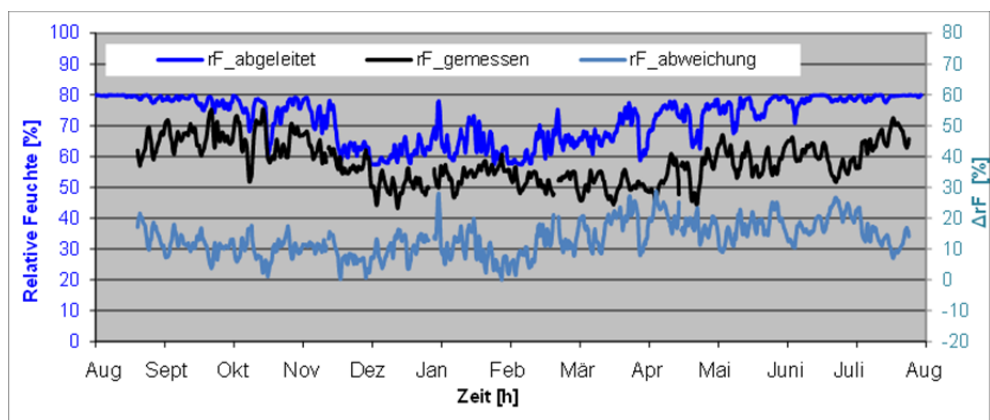


Bild 351:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller KiA (Gruppe C).

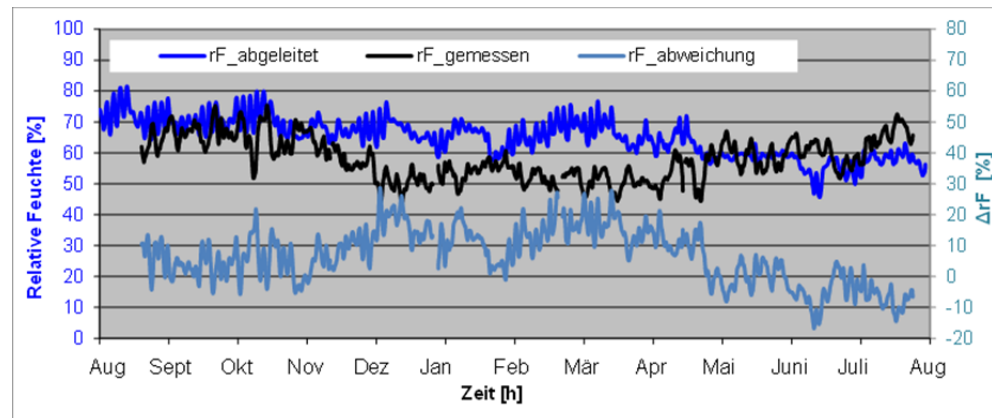


Bild 352:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller KiA (Gruppe C).

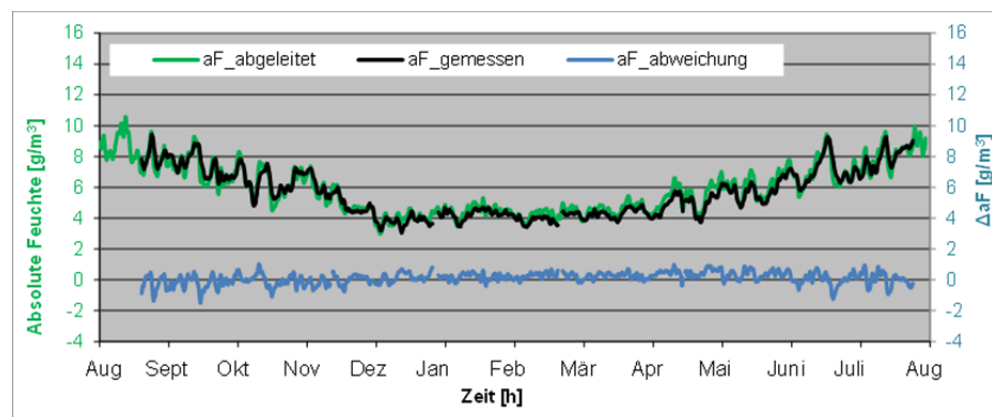


Bild 353:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller KiA (Gruppe C).

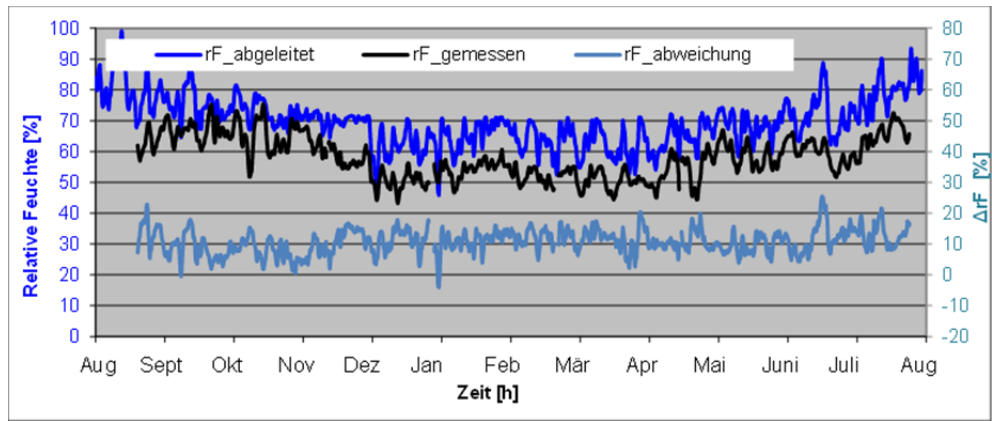


Bild 354:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller KiA (Gruppe C).

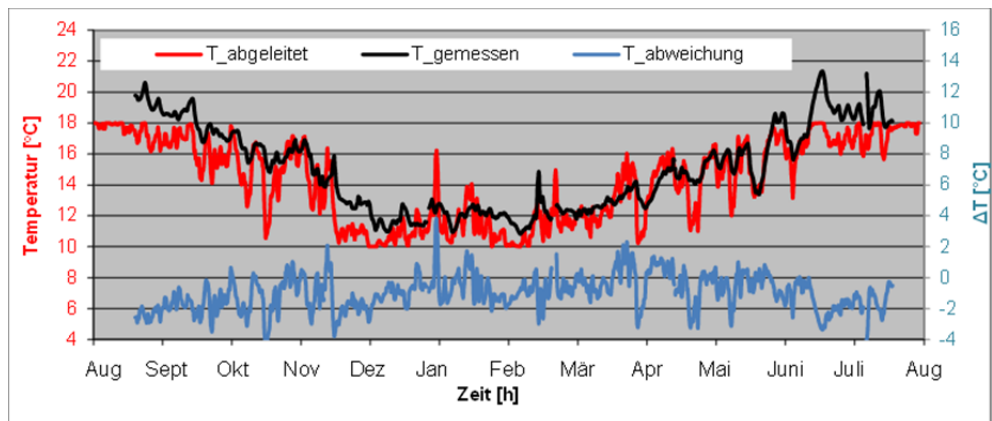


Bild 355:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

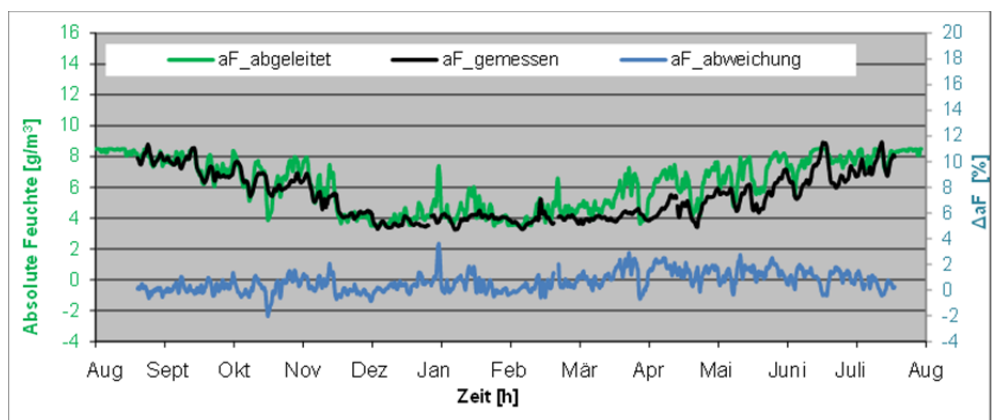


Bild 356:

Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

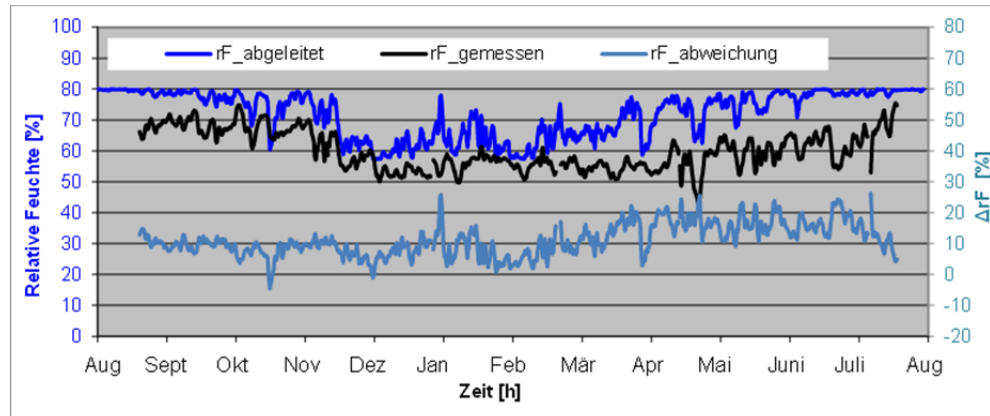


Bild 357:

Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

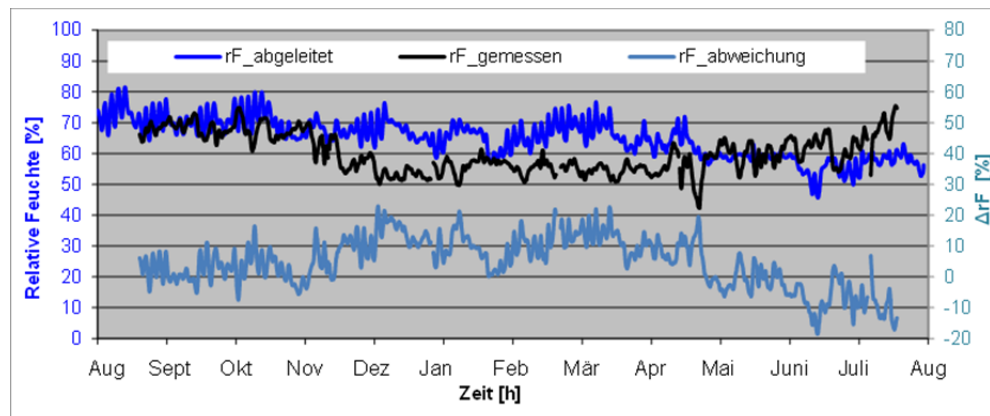


Bild 358:

Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

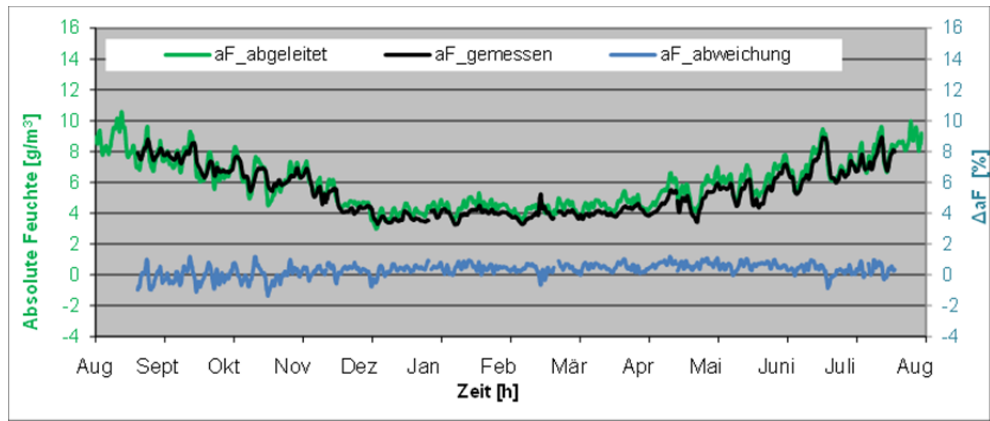


Bild 359:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

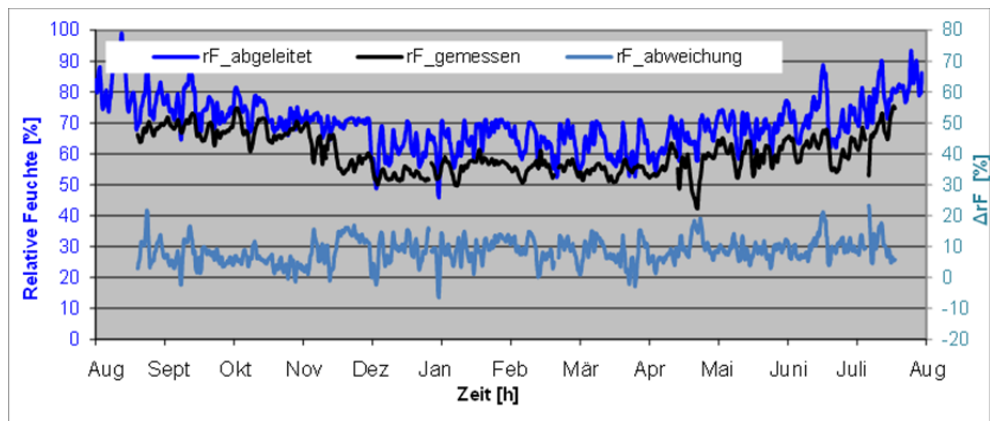


Bild 360:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller TiH (Gruppe C).

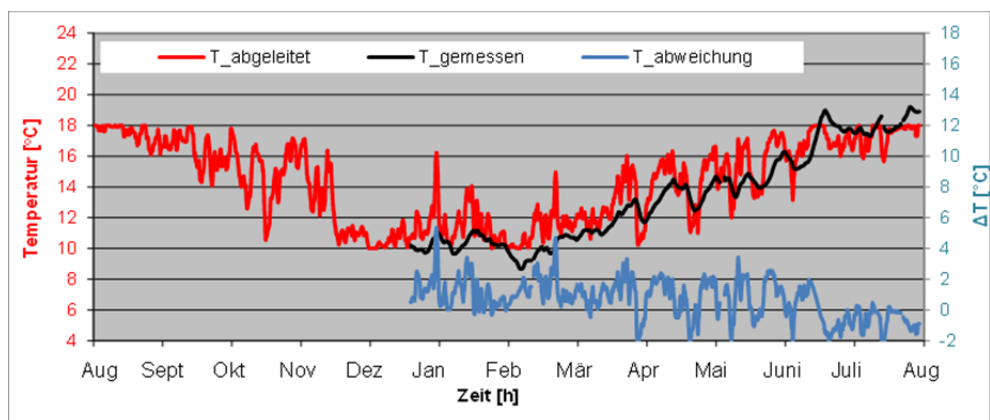


Bild 361:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. *Keller PhK* (Gruppe C).

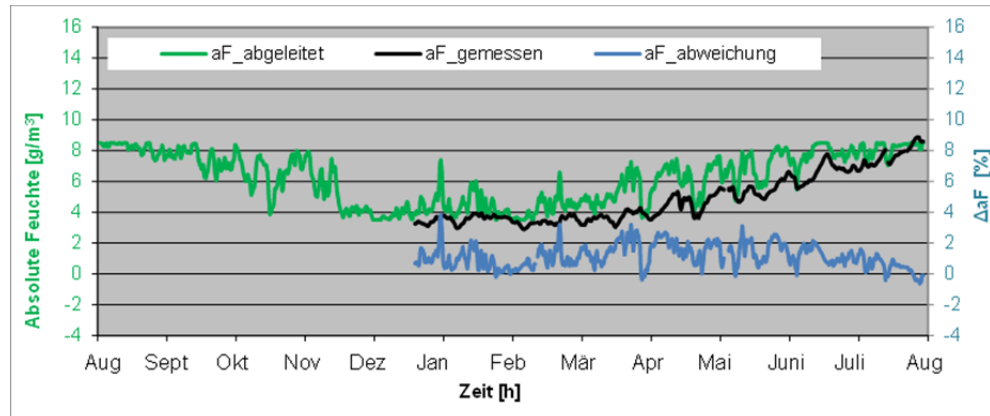


Bild 362:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. *Keller PhK* (Gruppe C).

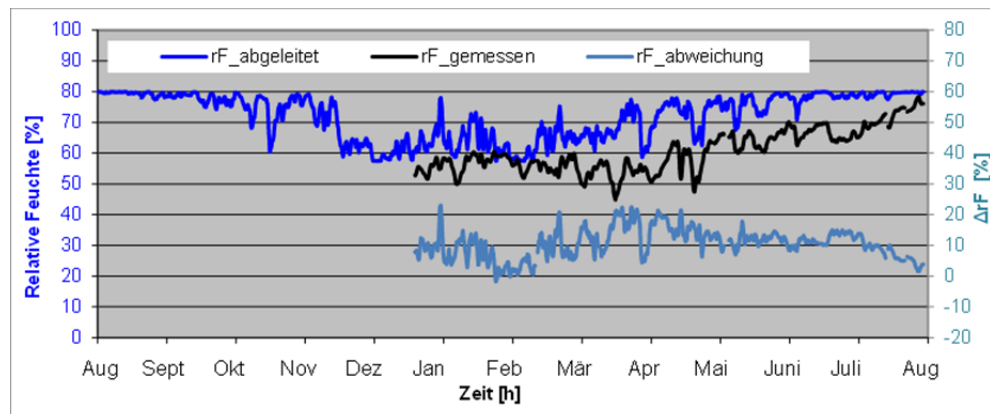


Bild 363:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller PhK* (Gruppe C).

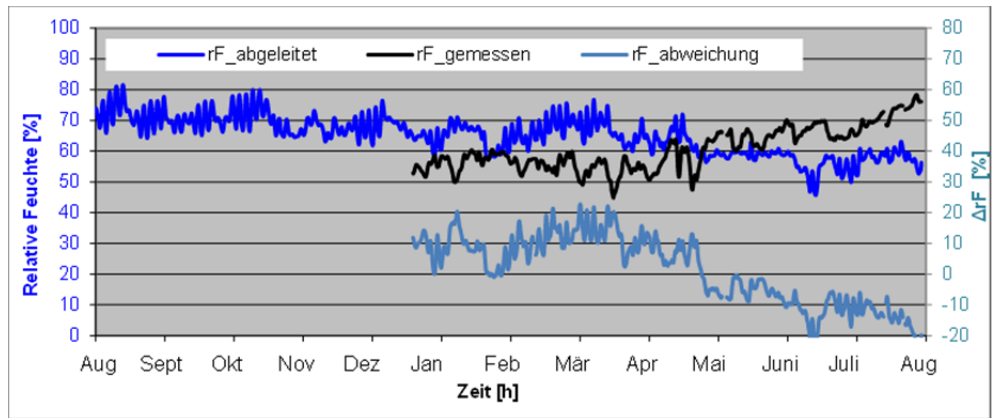


Bild 364:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller PhK (Gruppe C).

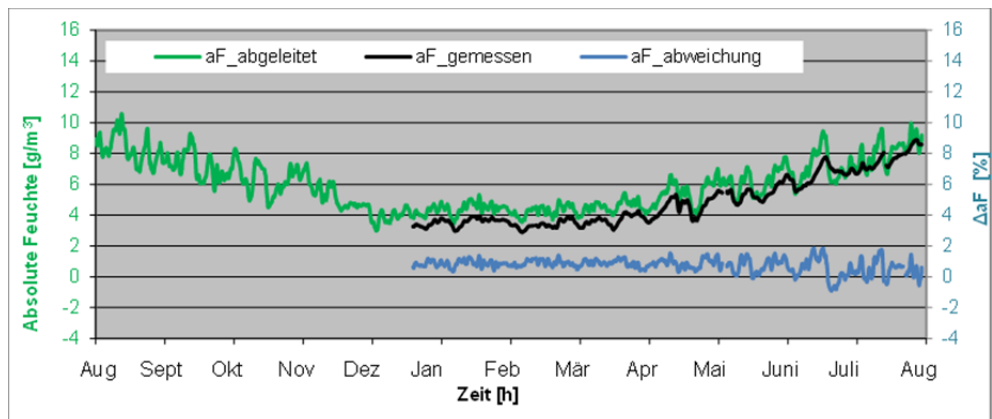


Bild 365:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller PhK (Gruppe C).

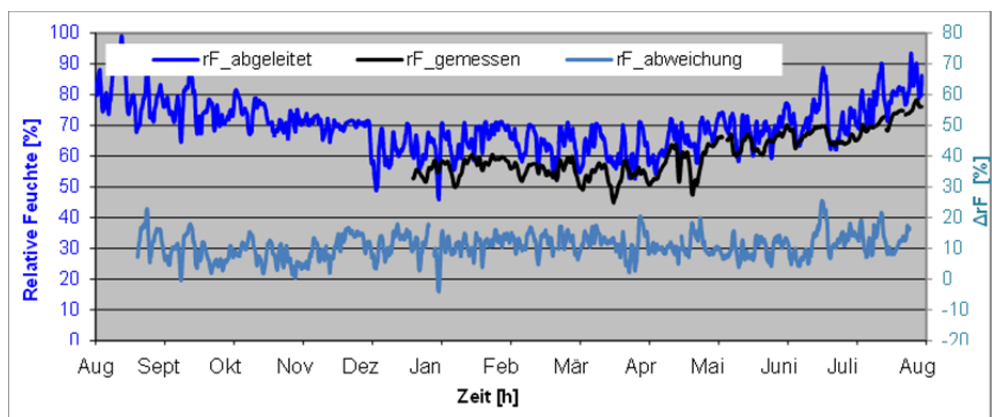


Bild 366:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller PhK (Gruppe C).

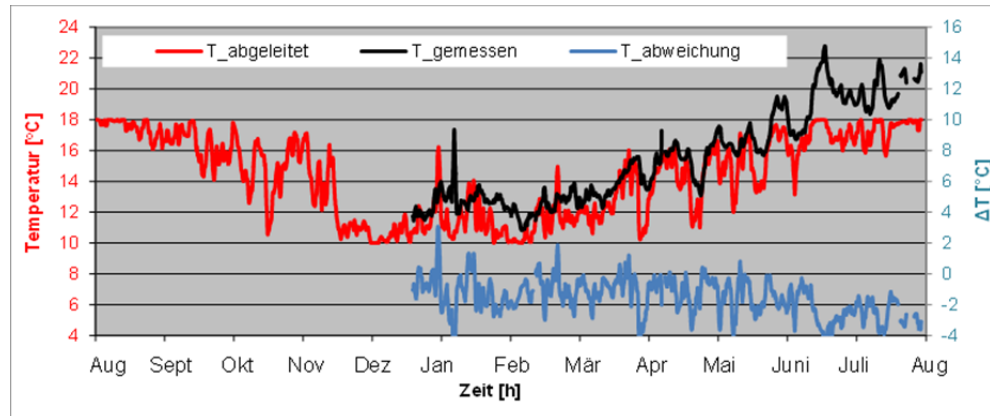


Bild 367:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller ToS (Gruppe C).

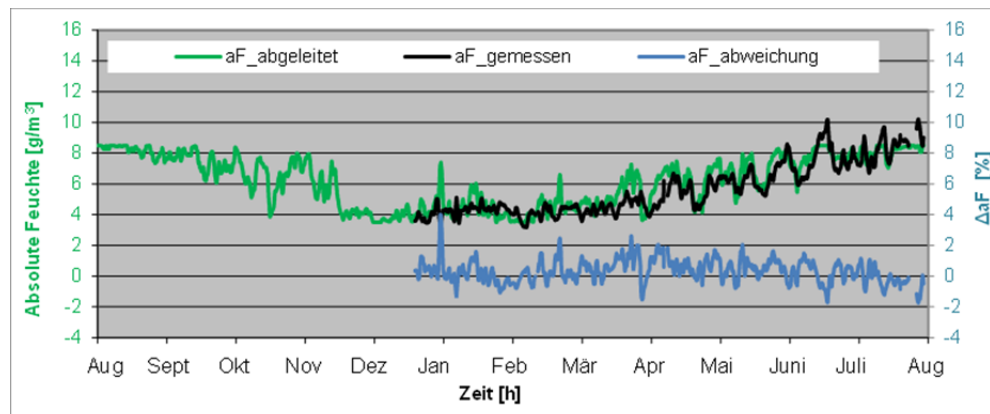


Bild 368:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ToS (Gruppe C).

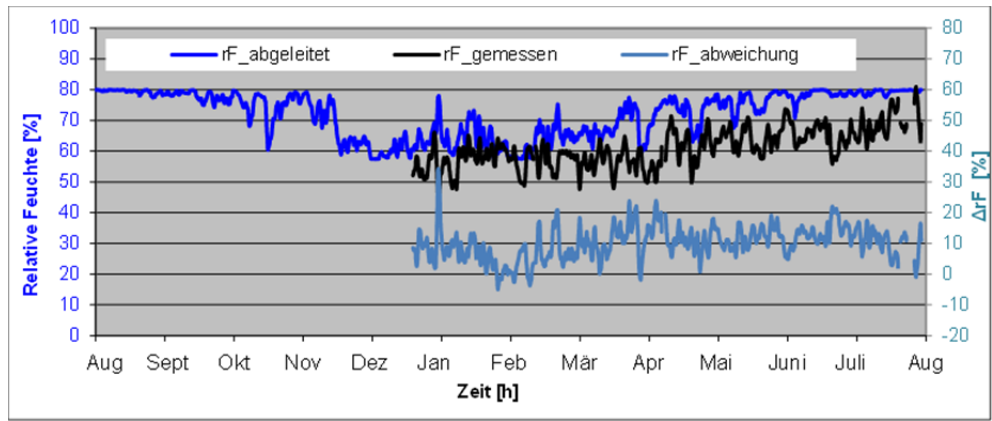


Bild 369:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ToS (Gruppe C).

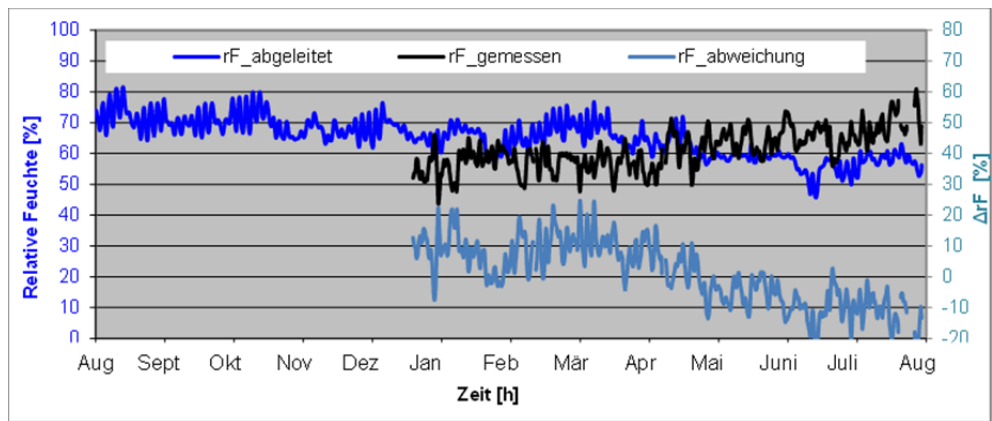


Bild 370:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ToS (Gruppe C).

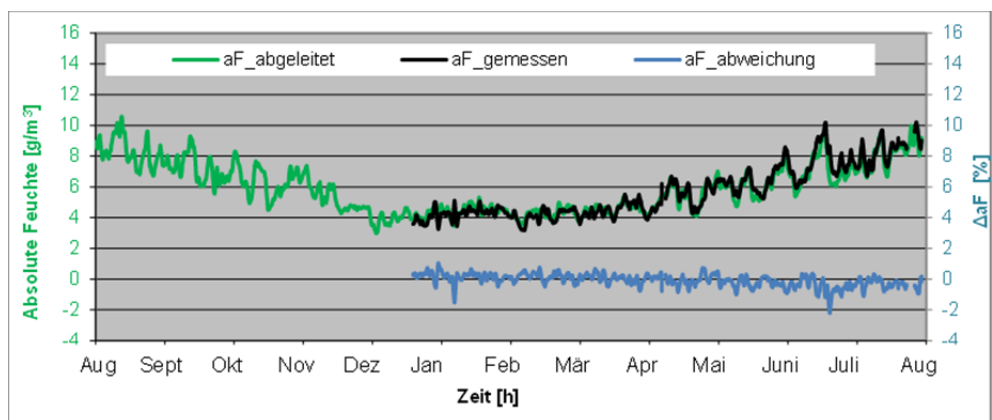


Bild 371:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ToS (Gruppe C).

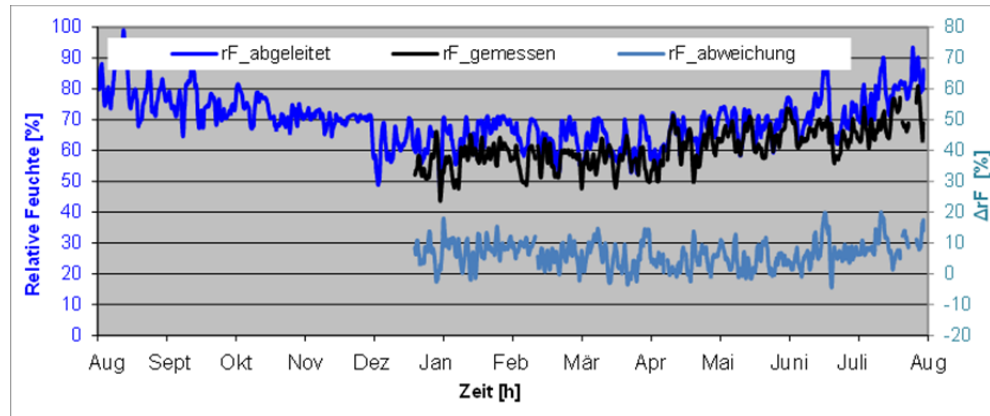


Bild 372:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ToS (Gruppe C).

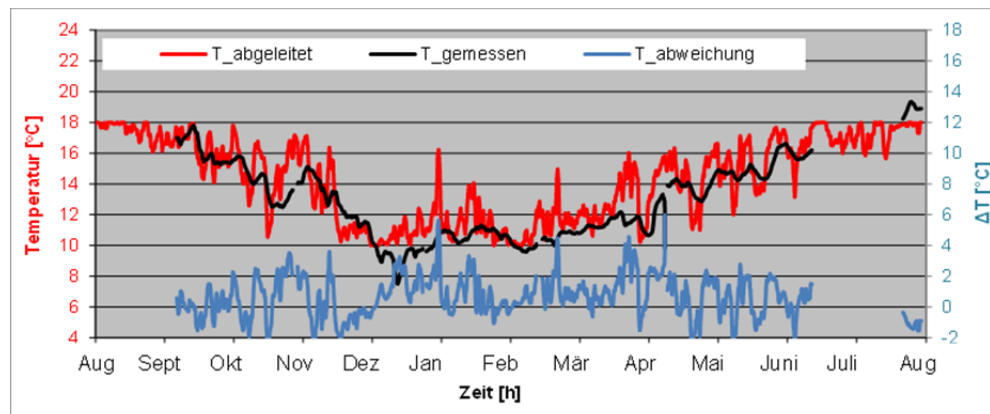


Bild 373:

Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller ChB_West (Gruppe C).

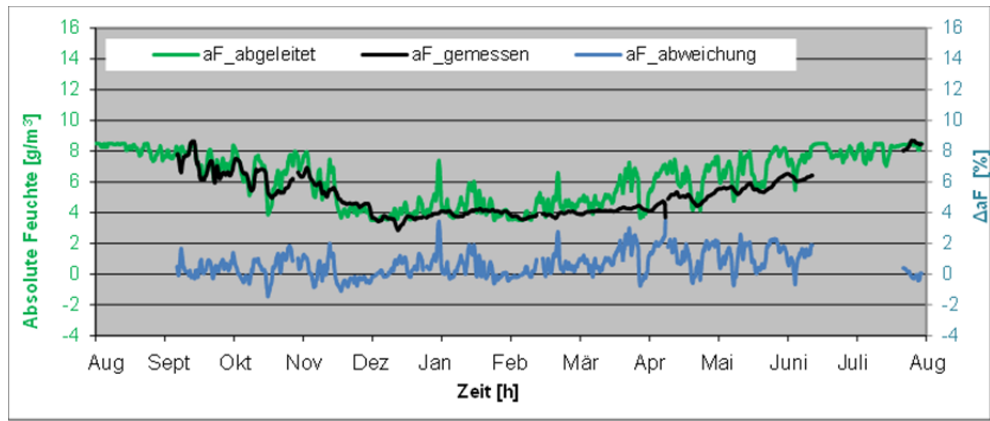


Bild 374:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ChB_West (Gruppe C).

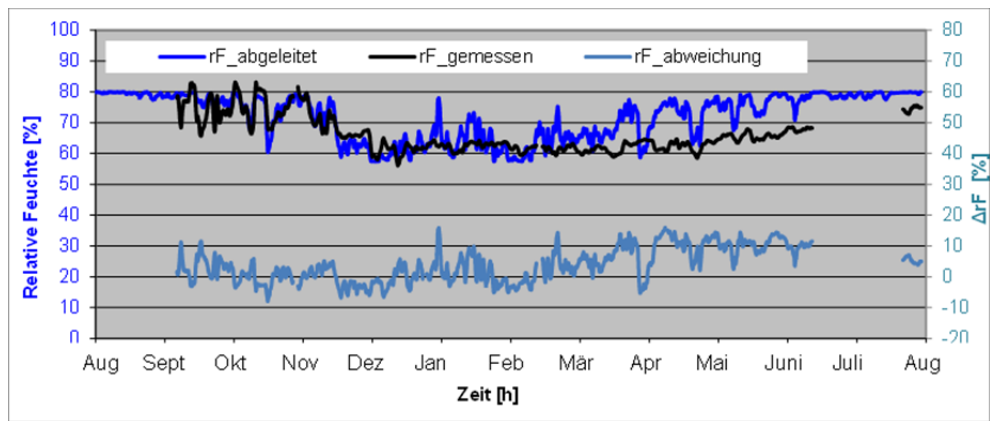


Bild 375:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChB_West (Gruppe C).

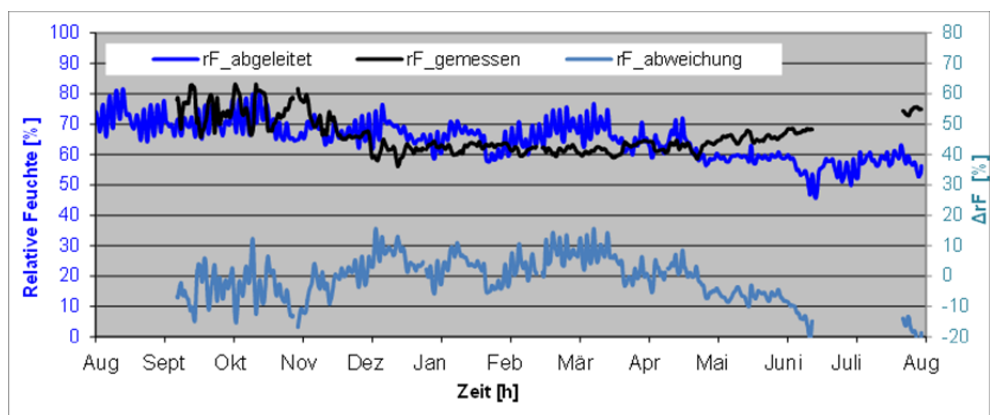


Bild 376:

Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChB_West (Gruppe C).

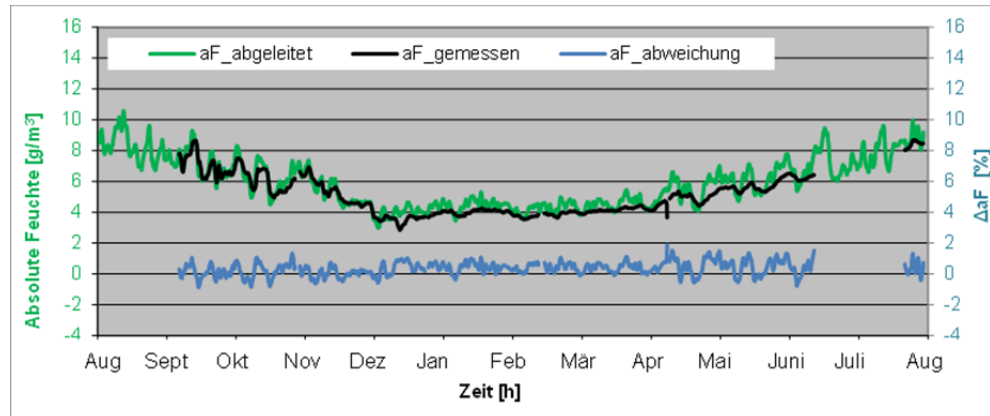


Bild 377:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ChB_West (Gruppe C).

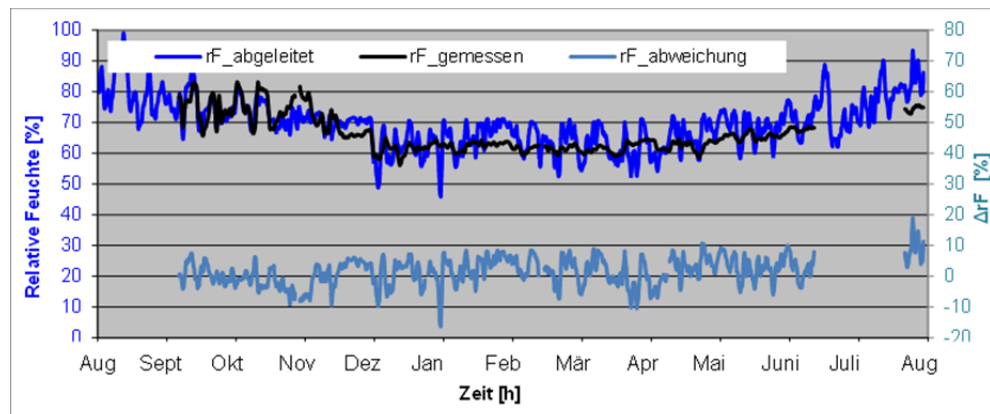


Bild 378:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChB_West (Gruppe C).

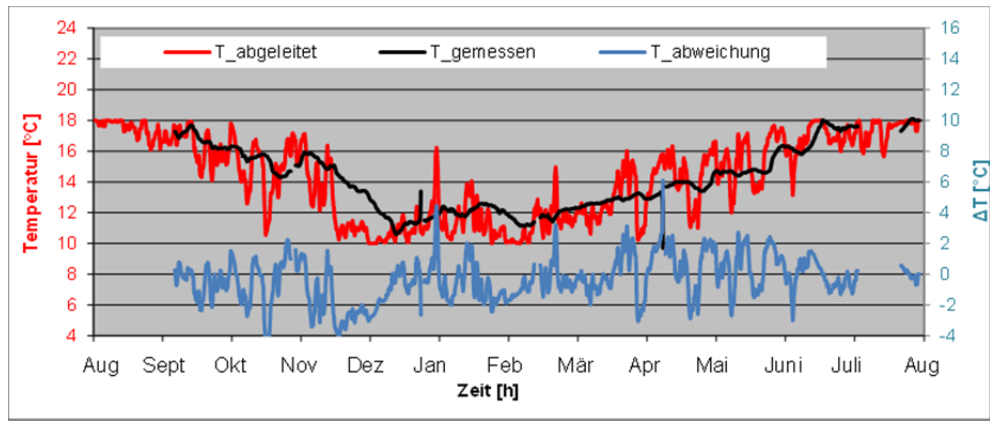


Bild 379:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller ChB_Ost (Gruppe C).

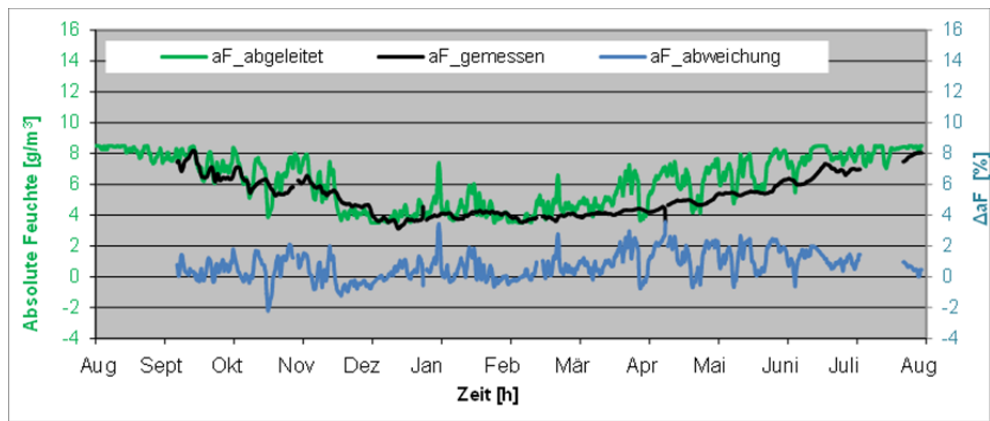


Bild 380:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ChB_Ost (Gruppe C).

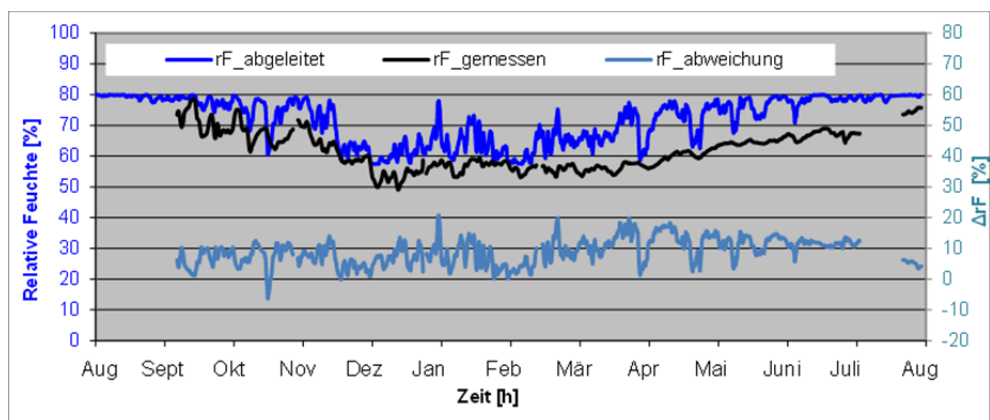


Bild 381:

Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChB_Ost (Gruppe C).

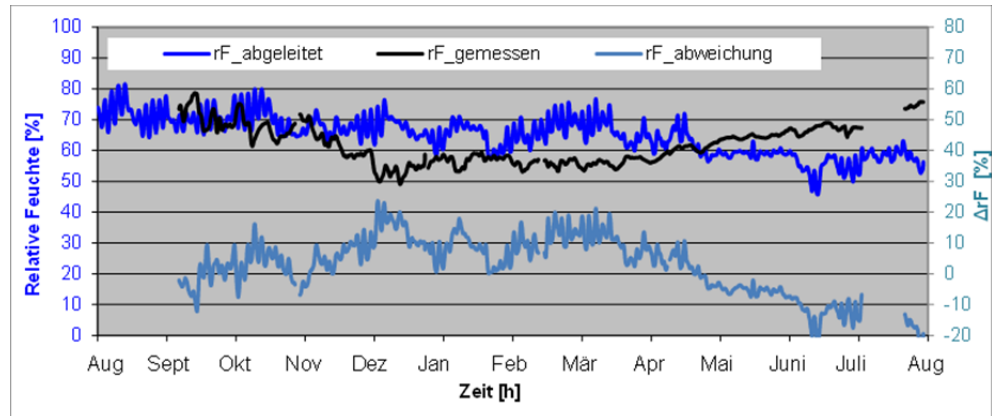


Bild 382:

Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChB_Ost (Gruppe C).

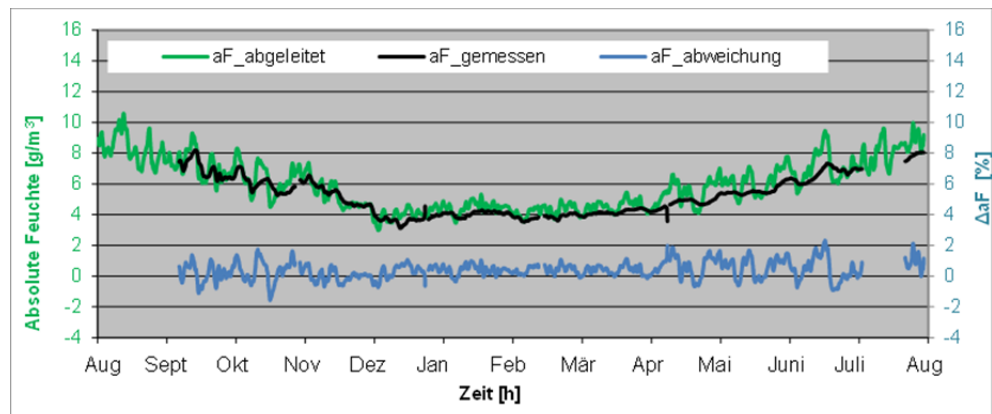


Bild 383:

Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ChB_Ost (Gruppe C).

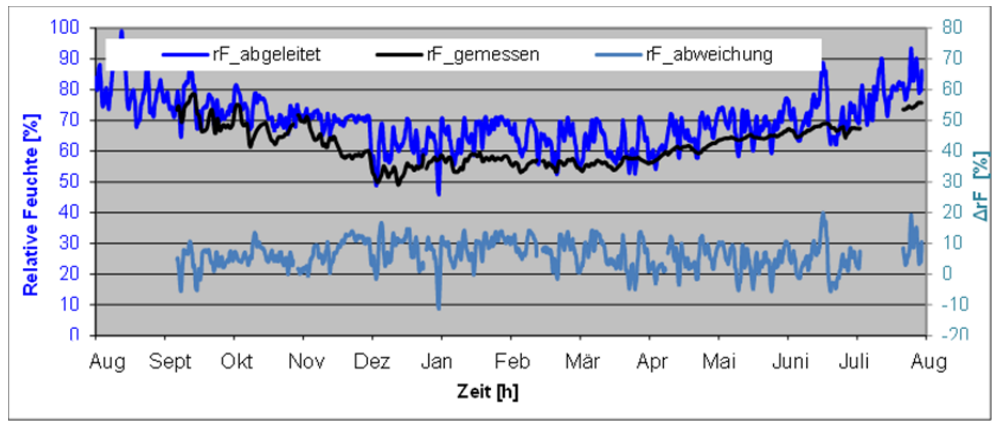


Bild 384:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChB_Ost (Gruppe C).

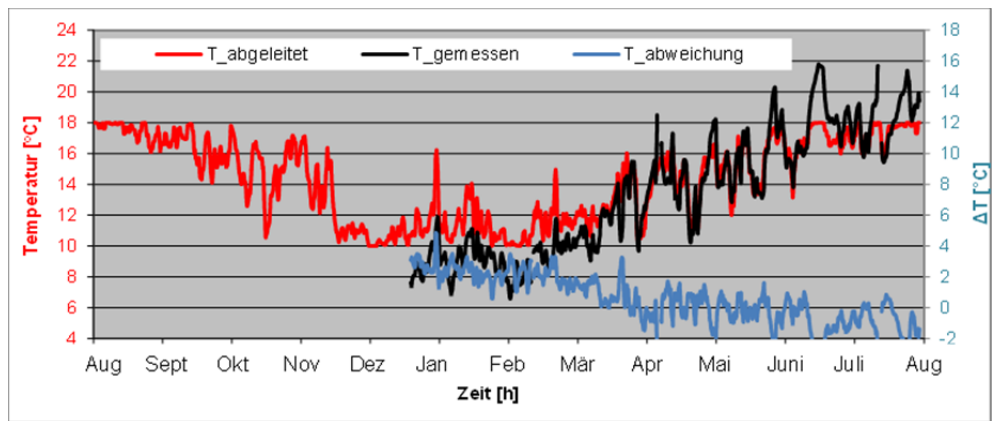


Bild 385:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller ThN (Gruppe C).

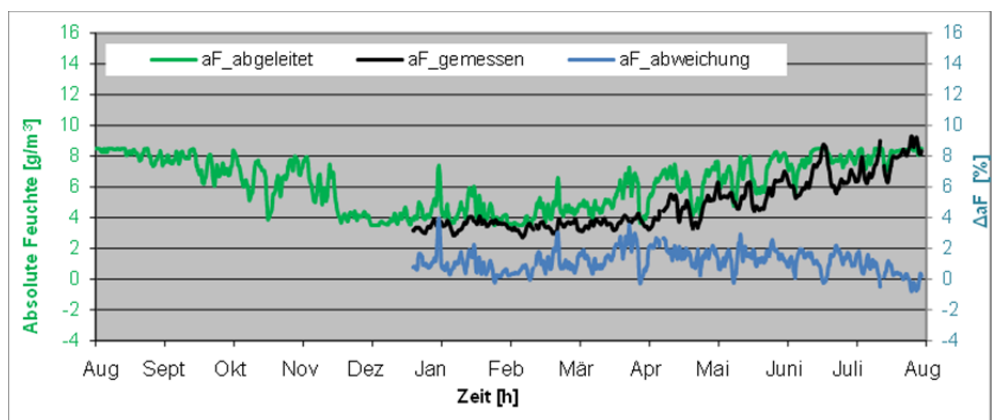


Bild 386:

Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ThN (Gruppe C).

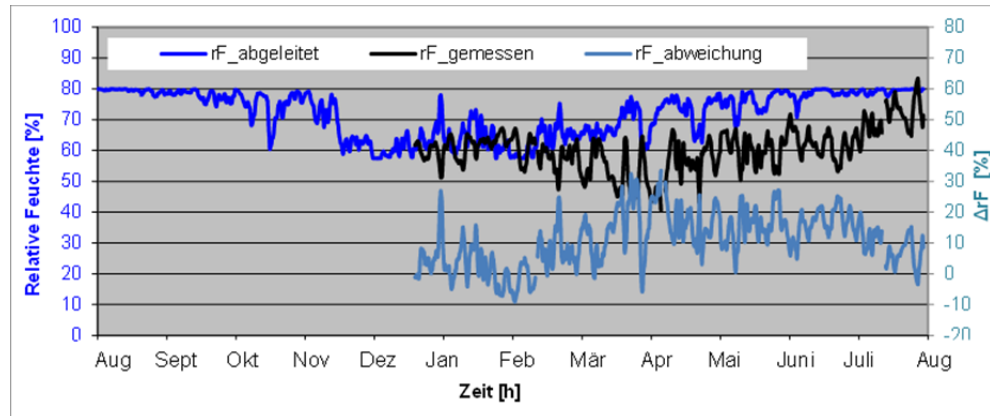


Bild 387:

Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ThN (Gruppe C).

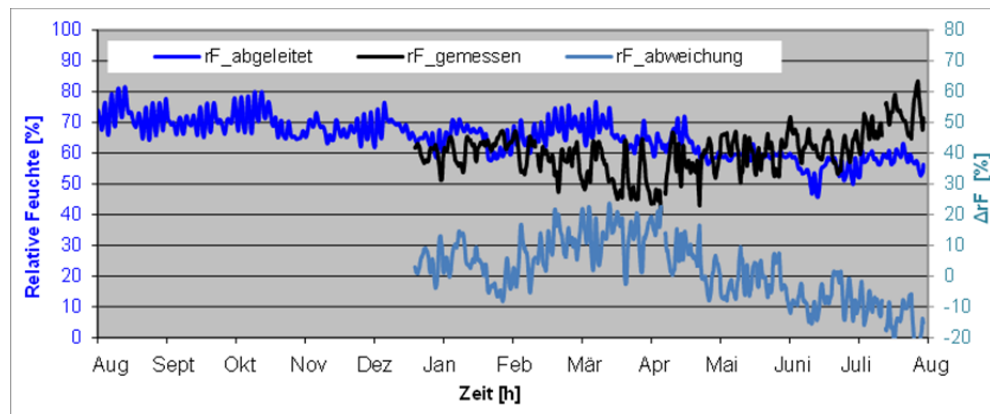


Bild 388:

Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ThN (Gruppe C).

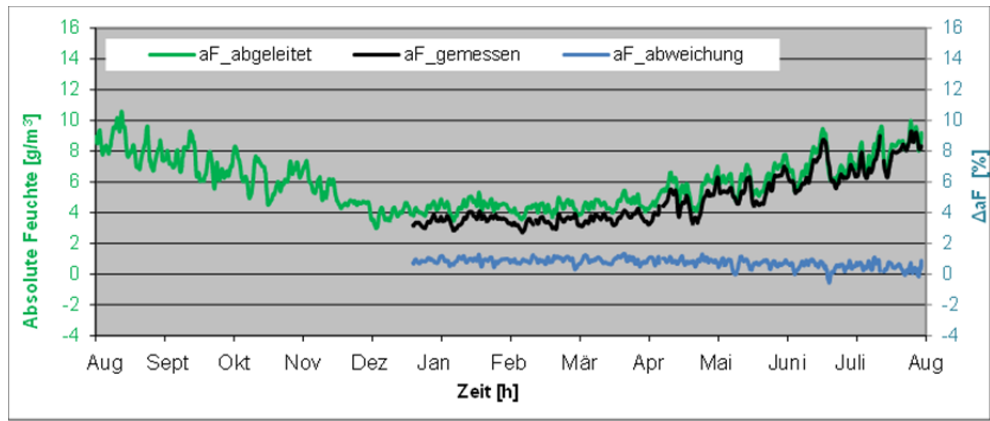


Bild 389:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ThN (Gruppe C).

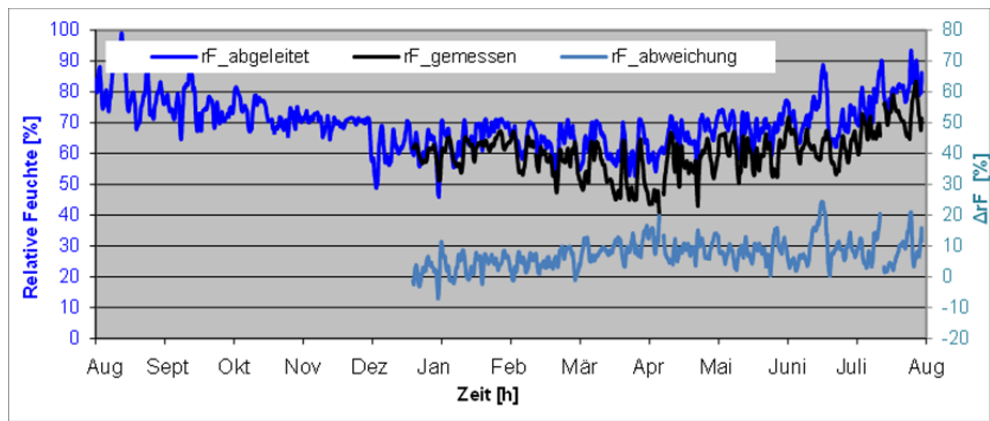


Bild 390:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ThN (Gruppe C).

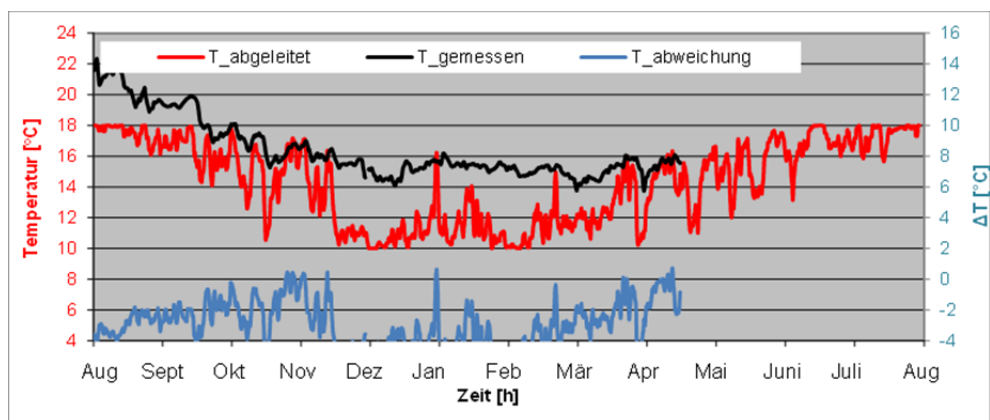


Bild 391:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. *Keller ChS* (Gruppe C).

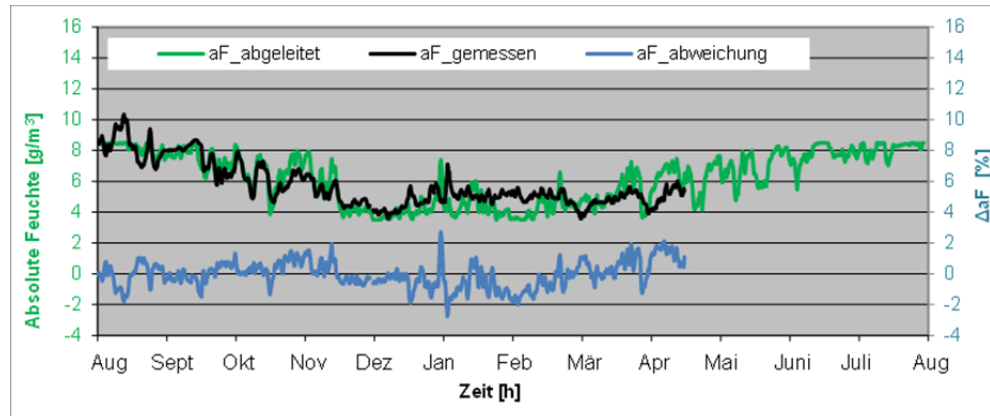


Bild 392:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. *Keller ChS* (Gruppe C).

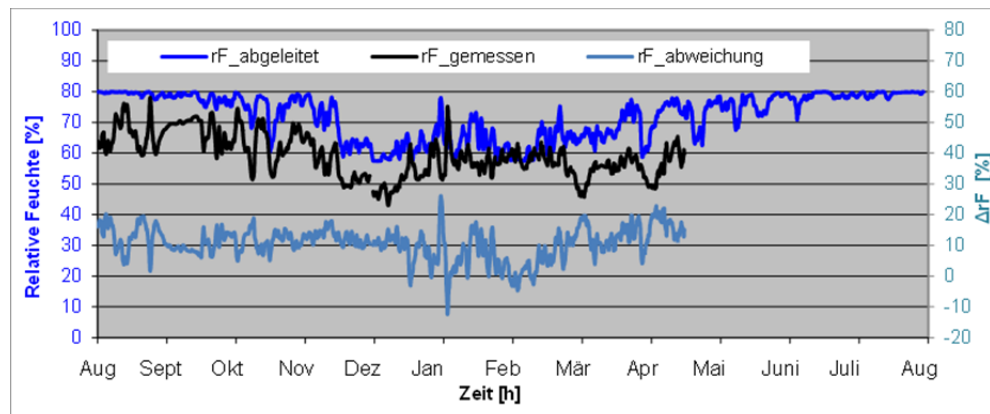


Bild 393:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. *Keller ChS* (Gruppe C).

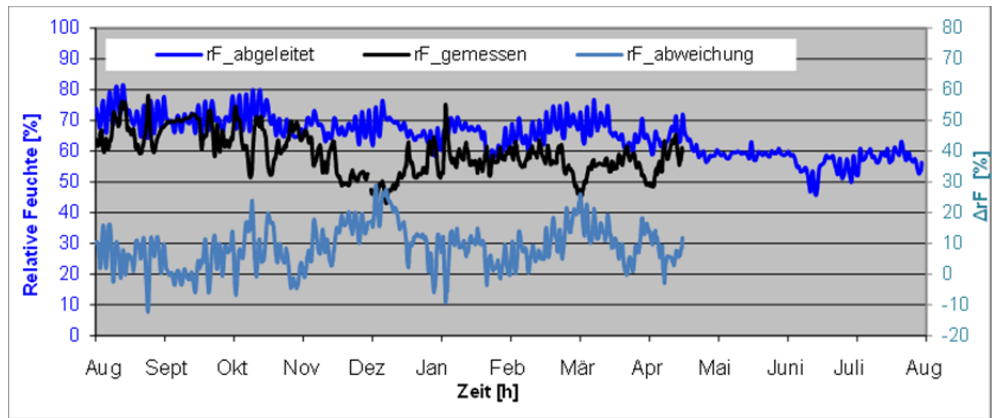


Bild 394:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChS (Gruppe C).

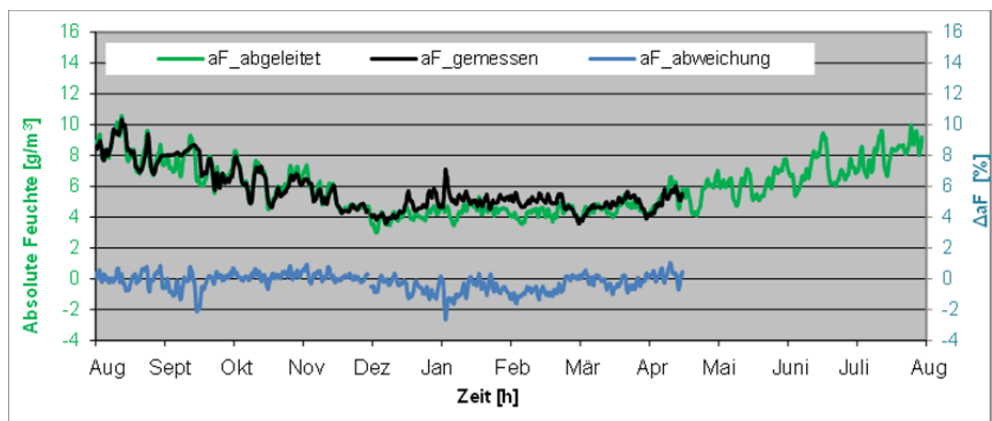


Bild 395:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ChS (Gruppe C).

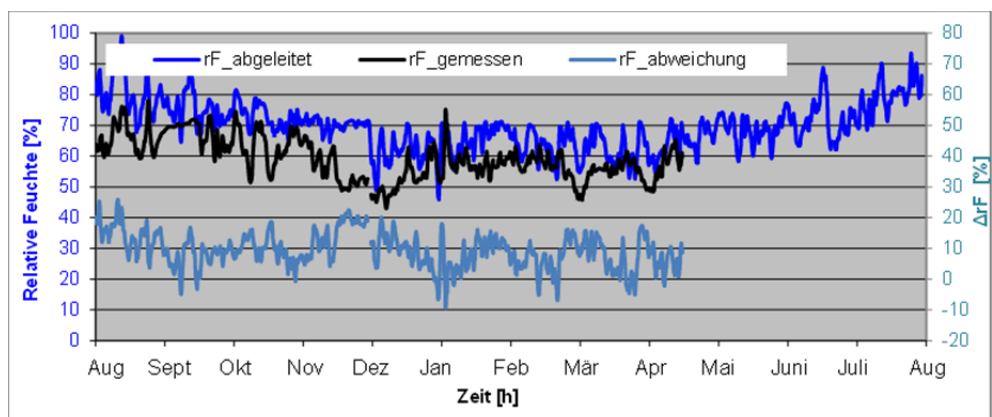


Bild 396:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChS (Gruppe C).

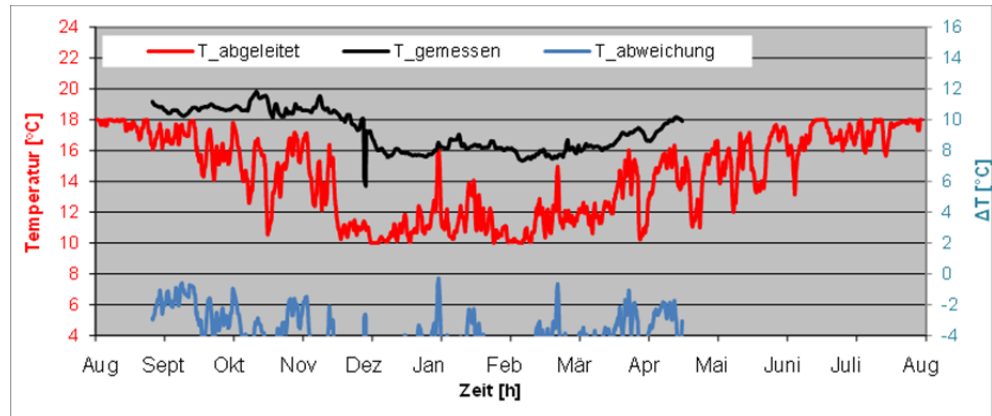


Bild 397:
Validierung für das Temperaturmodell – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten bzgl. Keller ChS_Bis (Gruppe C).

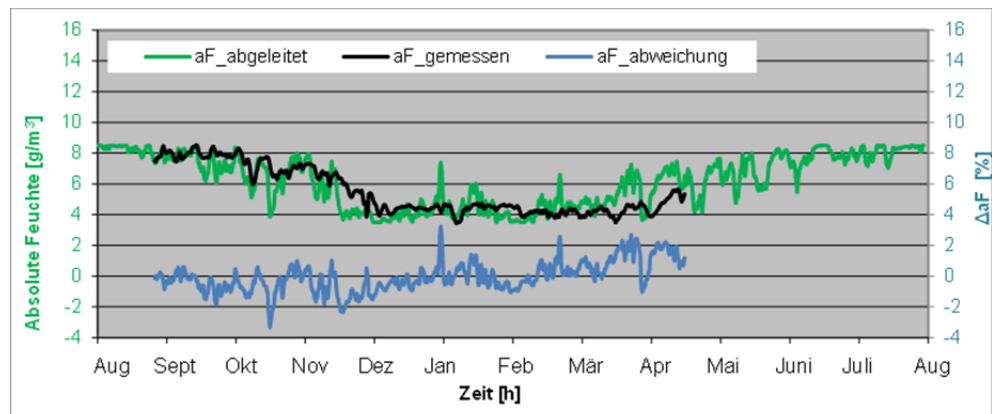


Bild 398:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ChS_Bis (Gruppe C).

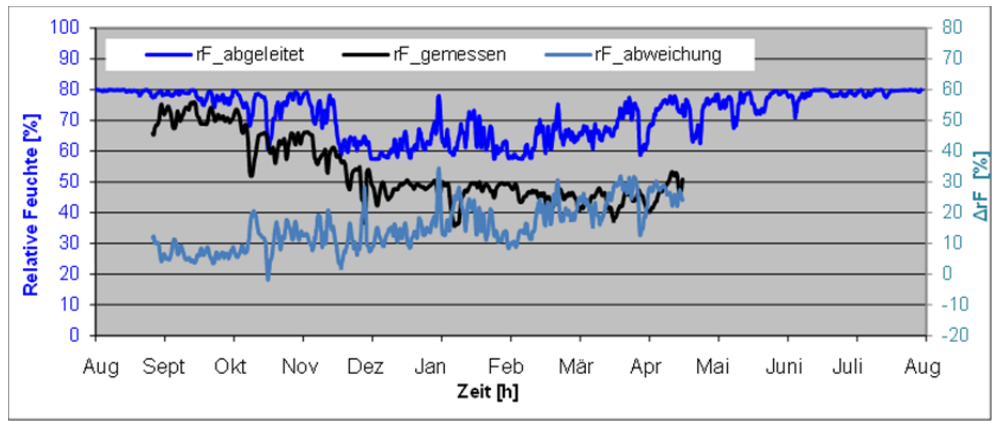


Bild 399:
Validierung für das Feuchtemodell X(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChS_Bis (Gruppe C).

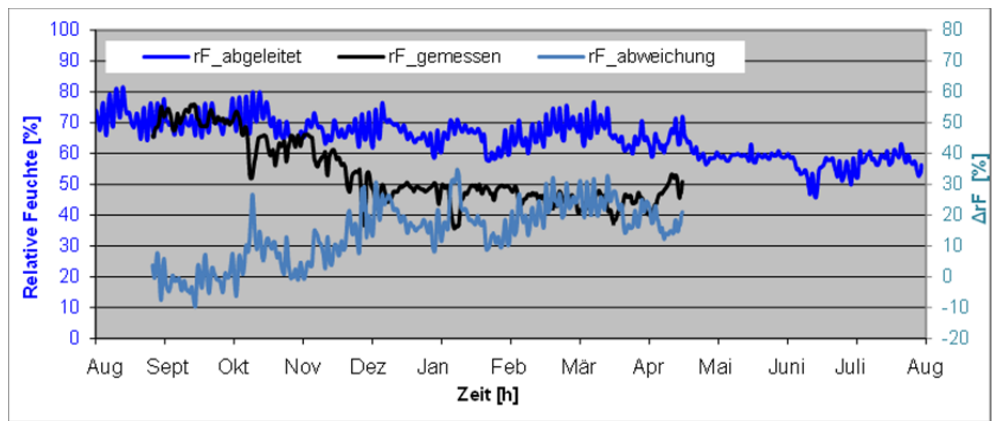


Bild 400:
Validierung für das Feuchtemodell r.F.(T) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChS_Bis (Gruppe C).

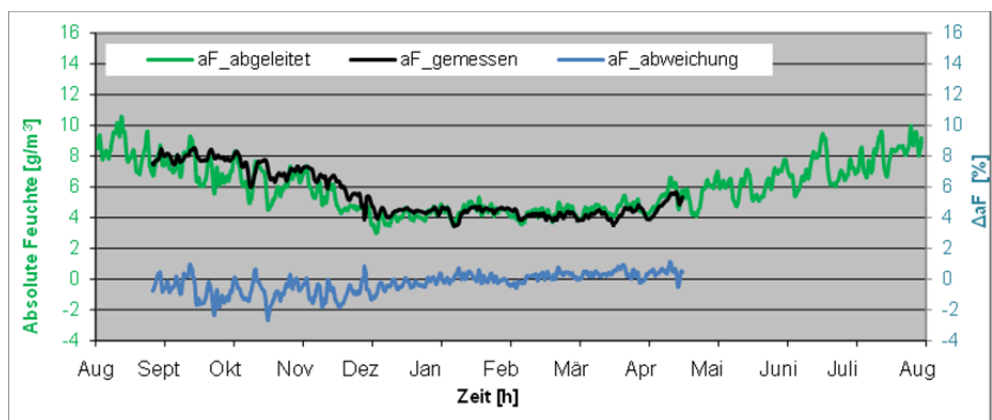


Bild 401:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der abs. Feuchte bzgl. Keller ChS_Bis (Gruppe C).

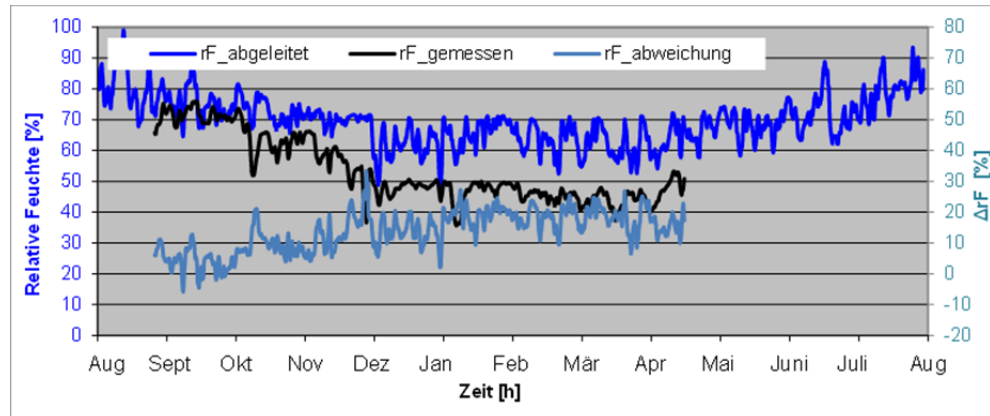


Bild 402:
Validierung für das Feuchtemodell X(X) – Vergleich zwischen gemessenen und abgeleiteten Werten der rel. Feuchte bzgl. Keller ChS_Bis (Gruppe C).



Bild 403:
Darstellung des Messfühlers, der sich in der Mitte der Rampe in der Tiefgarage 1 befindet.



Bild 404:
Darstellung des Messfühlers, der sich direkt in der Tiefgarage 1 befindet.

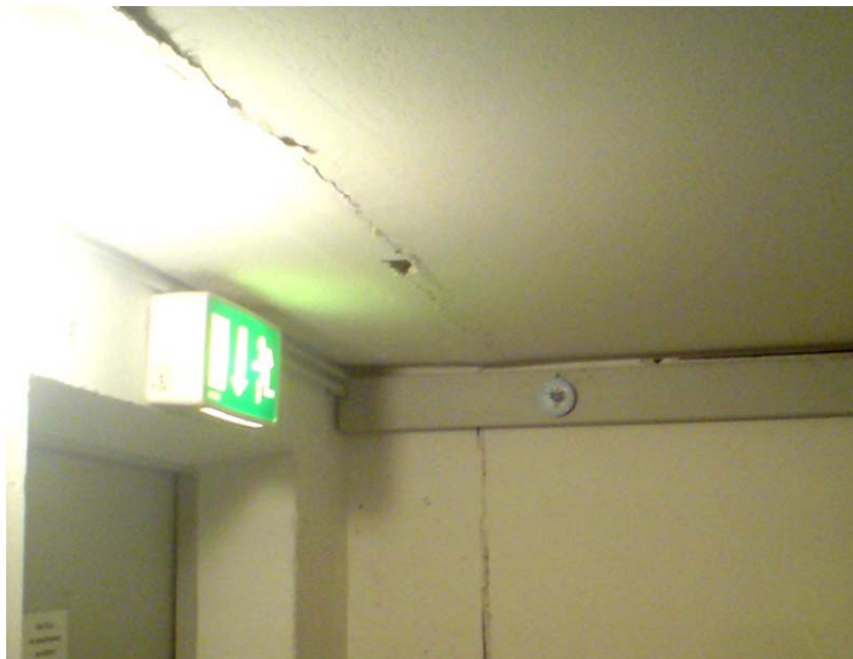


Bild 405:
Darstellung des Messfühlers, der sich in einem Nebenraum der Tiefgarage 1 befindet.

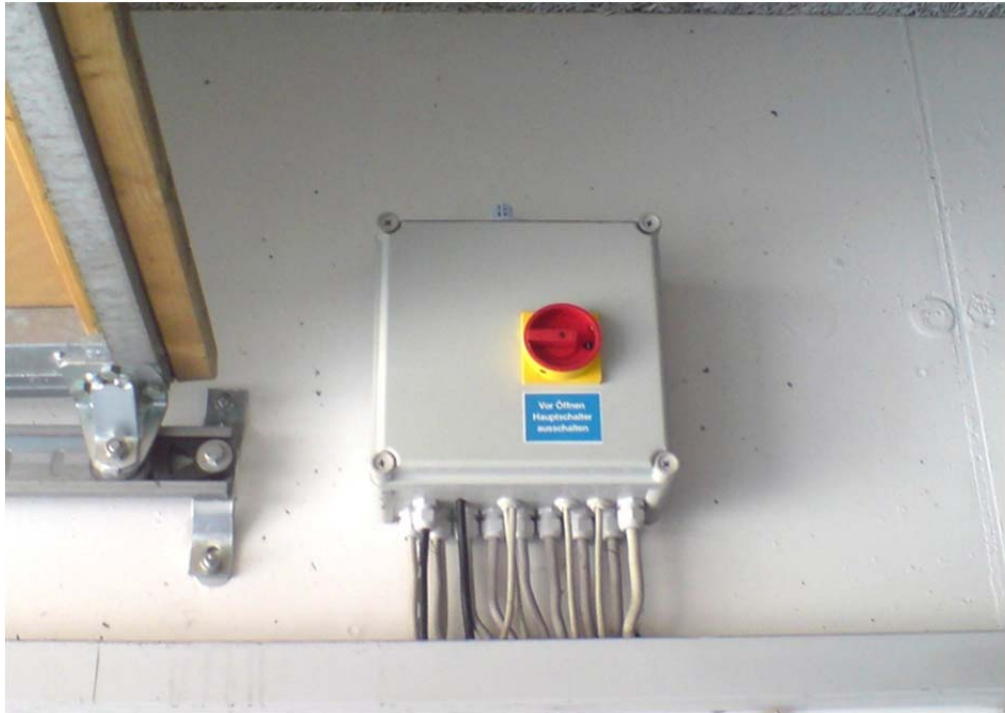


Bild 406:
Darstellung des Messfühlers, der sich oben an der Rampe in der Tiefgarage 2 befindet.



Bild 407:
Darstellung des Messfühlers, der sich in der Mitte der Rampe in der Tiefgarage 2 befindet.

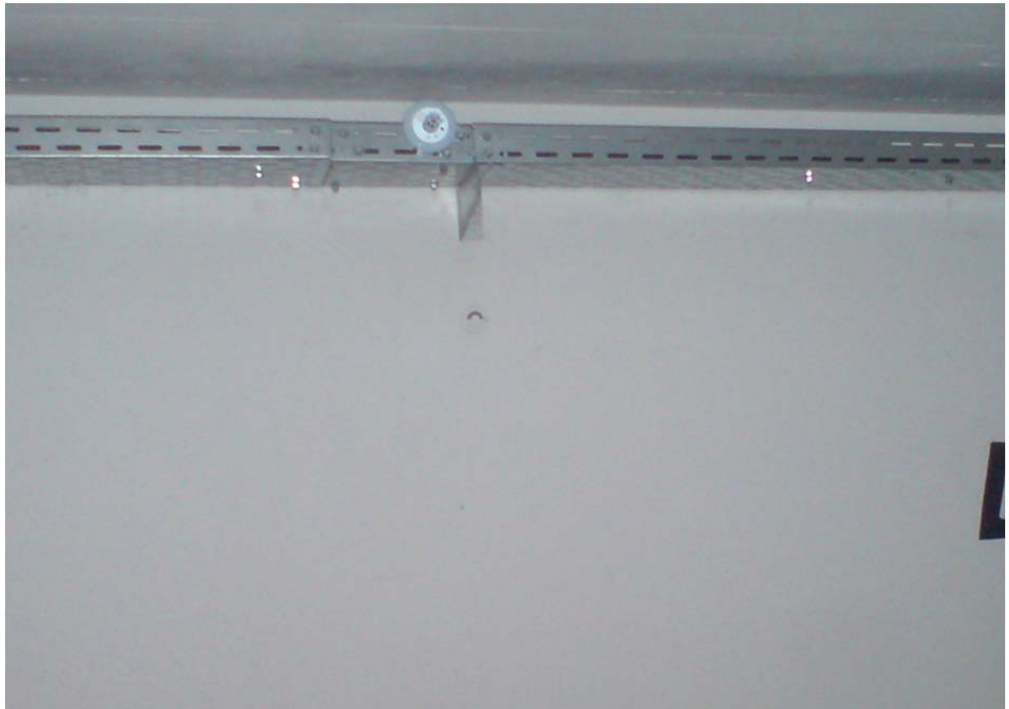
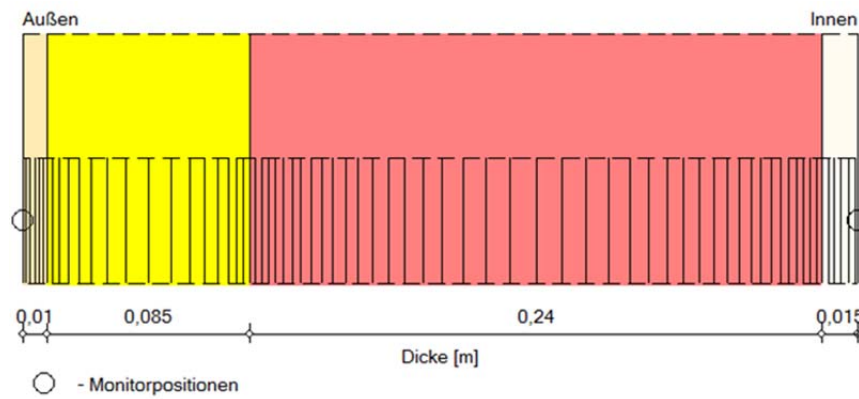


Bild 408:
Darstellung des Messfühlers, der sich an einer Außenwand in der Tiefgarage 2 befindet.



Bild 409:
Darstellung des Messfühlers, der sich an einer Trennwand zum Haus in der Tiefgarage 2 befindet.

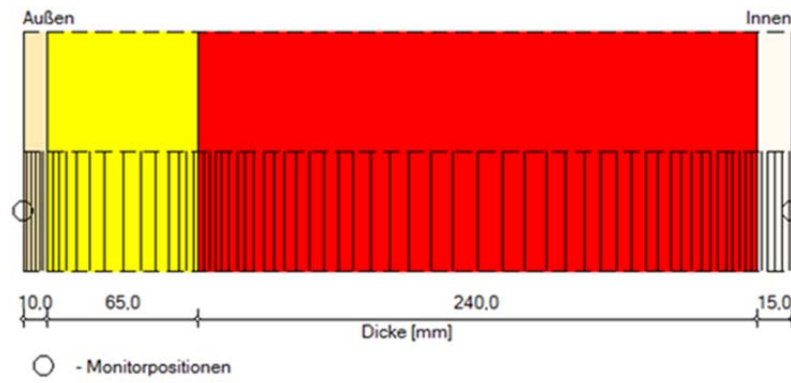


Materialien:

	- Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m ² h ^{0,5})	0,01 m
	- EPS (Wärmeleit.: 0.04 W/mK - Dichte: 15 kg/m ³)	0,085 m
	- Bimsbeton	0,24 m
	- Innenputz (Gips)	0,015 m

Gesamtdicke: 0,35 m
Wärmedurchlasswiderstand: 3,41 m²K/W
U-Wert: 0,278 W/m²K

Bild 410:
Für die Simulation in WUFI[®] modellierter Aufbau der gedämmten Bimsbetonwand.

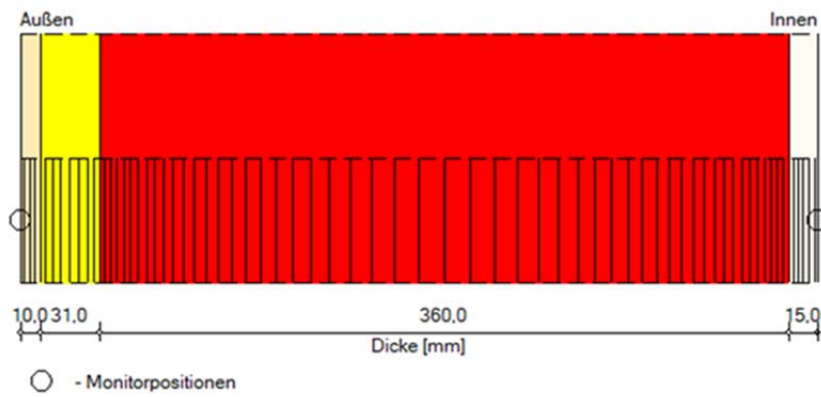


Materialien :

-  - Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m²h^{0,5})
-  - EPS (Wärmeleit: 0,04 W/mK - Dichte: 15 kg/m³)
-  - Hochdämmender Ziegel (Dichte=600)
-  - Innenputz (Gips)

Gesamtdicke: 0,33 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 3,4 m²K/W
 U-Wert: 0,28 W/m²K

Bild 411:
 Für die Simulation in WUFI[®] modellierter Aufbau der gedämmten Hochlochziegelwand mit 24 cm Ziegel.

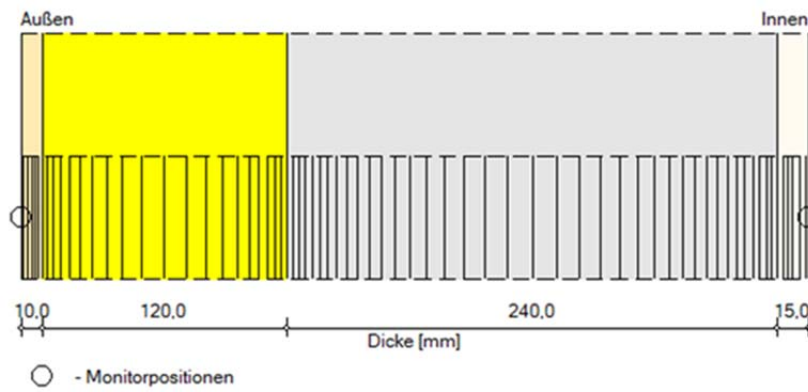


Materialien :

-  - Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m²h^{0,5})
-  - EPS (Wärmeleit.: 0.04 W/mK - Dichte: 15 kg/m³)
-  - Hochdämmender Ziegel (Dichte=600)
-  - Innenputz (Gips)

Gesamtdicke: 0,42 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 3,39 m²K/W
 U-Wert: 0,281 W/m²K

Bild 412:
 Für die Simulation in WUFI® modellierter Aufbau der gedämmten Hochlochziegelwand mit 36 cm Ziegel.

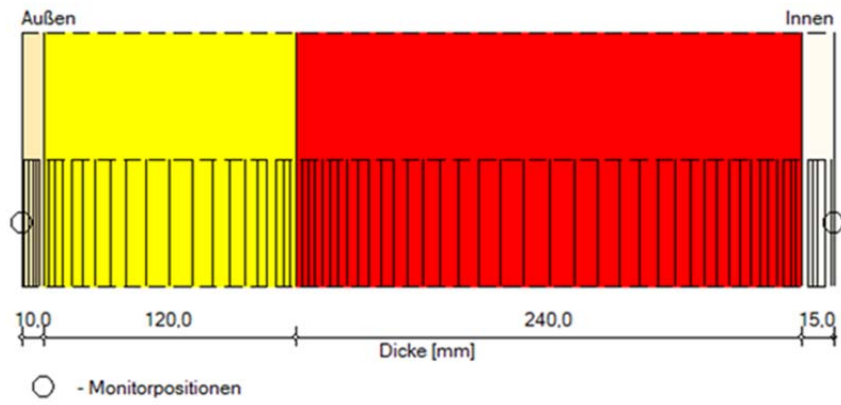


Materialien :

-  - Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m²h^{0,5})
-  - EPS (Wärmeleit: 0,04 W/mK - Dichte: 15 kg/m³)
-  - Kalksandstein (Dichte: 1900 kg/m³)
-  - Innenputz (Gips)

Gesamtdicke: 0,39 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 3,3 m²/KW
 U-Wert: 0,288 W/m²K

Bild 413:
 Für die Simulation in WUFI[®] modellierter Aufbau der gedämmten Kalksand-
 steinwand mit 24 cm.

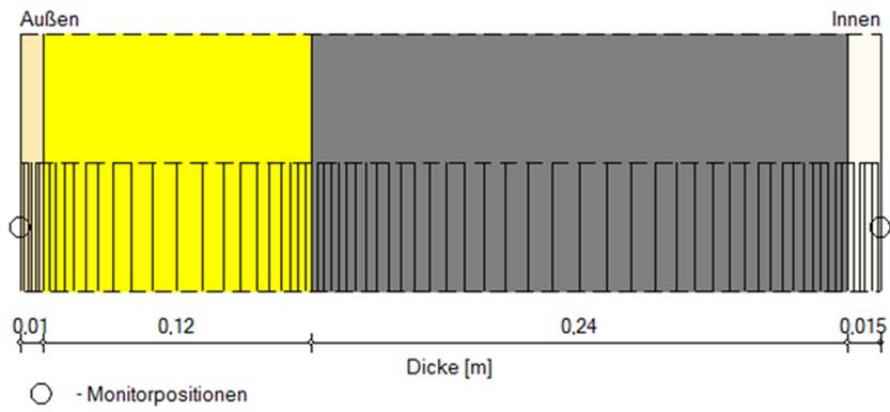


Materialien :

- Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m²h^{0,5})
- EPS (Wärmeleit: 0,04 W/mK - Dichte: 15 kg/m³)
- Vollziegelmauerwerk
- Innenputz (Gips)

Gesamtdicke: 0,39 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 3,43 m²K/W
 U-Wert: 0,278 W/m²K

Bild 414:
 Für die Simulation in WUFI[®] modellierter Aufbau der gedämmten Vollziegelwand mit 24 cm Ziegel.

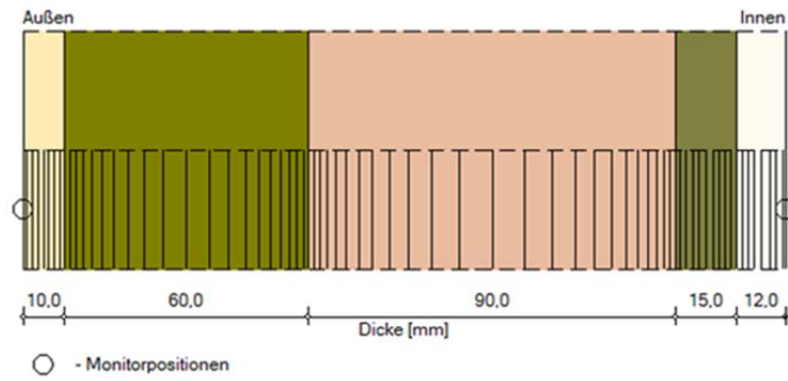


Materialien:

	- Mineralischer Außenputz (w-Wert 0,1 kg/m ² h ^{0,5})	0,01 m
	- EPS (Wärmeleit: 0,04 W/mK - Dichte: 15 kg/m ³)	0,12 m
	- Beton C35/45	0,24 m
	- Innenputz (Gips)	0,015 m

Gesamtdicke: 0,385 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 3,2 m²K/W
 U-Wert 0,276 W/m²K

Bild 415:
 Für die Simulation in WUFI[®] modellierter Aufbau der gedämmten Betonwand mit 24 cm.

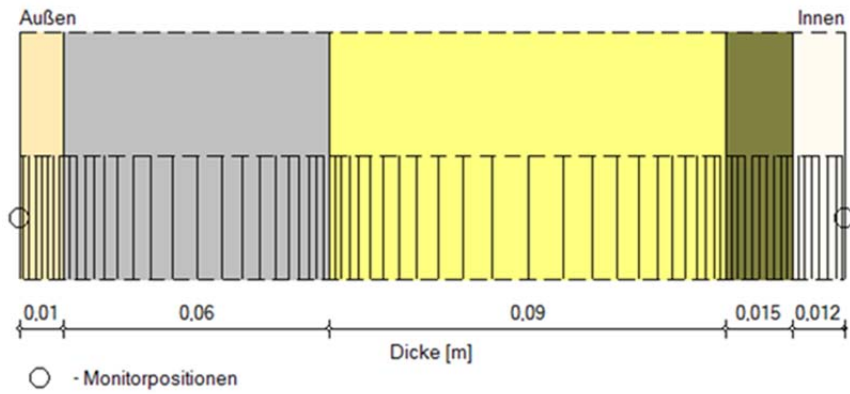


Materialien :

- Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m²h^{0,5})
- *Holzfaserdämmplatte (WLG 040) (entriegelt)
- *Holzfaserdämmplatte (WLG 040) (entriegelt)
- OSB-Platte (Dichte: 615 kg/m³)
- Gipskartonplatte

Gesamtdicke: 0,19 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 3,42 m²K/W
 U-Wert: 0,278 W/m²K

Bild 416:
 Für die Simulation in WUFI[®] modellierter Aufbau der Leichtbauwand 1.



Materialien:

	- Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m ² h ^{0,5})	0,01 m
	- ROXUL FacadeRock	0,06 m
	- ISOVER ULTIMATE Klemmfalz - 035	0,09 m
	- OSB-Platte (Dichte: 615 kg/m ³)	0,015 m
	- Gipskartonplatte	0,012 m

Gesamtdicke: 0,187 m
 Wärmedurchlasswiderstand: 4,31 m²K/W
 U-Wert 0,206 W/m²K

Bild 417:
 Für die Simulation in WUFI® modellierter Aufbau der Leichtbauwand 2.