

PuPURA

Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

Endbericht

Projektnr.: FFG 872019

HFA-Nr.: 49410

Gefördert durch die FFG

Autor:innen

Dr. Julia Bachinger

DI Johannes Tieben

Ing. Rupert Wolffhardt

Dr. Bernd Nusser

Projektmitarbeiter/innen

Johannes Amos, Johannes Reiter, Gregor Soukup

Beteiligte Firmen

Ampack AG, AllesDach Wagner GmbH, Büsscher & Hoffmann GmbH, Bauder Ges.m.b.H,
Dörken GmbH & Co. KG, Glorit Bausysteme GmbH, Holzbau Austria, Vinzenz Harrer GmbH,
Isocell GmbH, Monier Roofing Components GmbH, Siga Cover, Sika Österreich GmbH, Würth
Handelsgesellschaft m.b.H.

Wien, März 2022

INHALTSVERZEICHNIS

1	Begriffe und Abkürzungen	4
2	Problemstellung und Ziele	5
3	Prüfverfahren und Alterung	6
3.1	Stand des Wissens und Forschungsbedarf.....	6
3.2	Material und Methoden	9
3.2.1	Prüfverfahren	9
3.2.1.1	<i>Prüfkörper</i>	9
3.2.1.2	<i>Prüfstand</i>	12
3.2.1.3	<i>Prüfung</i>	14
3.2.1.4	<i>Auswertung</i>	15
3.2.1.5	<i>Dummy-Prüfung</i>	15
3.2.1.6	<i>Prüfungsdurchführung</i>	15
3.2.2	Alterung	16
3.2.2.1	<i>Kleinversuche Freiland</i>	16
3.2.2.1.1	<i>FT-IR-Spektroskopie-Monitoring</i>	19
3.2.2.2	<i>Künstliches Alterungsverfahren</i>	19
3.2.2.2.1	<i>Alterung durch UV-A-Belastung</i>	19
3.2.2.2.2	<i>Alterung durch klimatische Belastung</i>	20
3.2.2.2.3	<i>Messung der dynamischen Wassersäule</i>	21
3.3	Ergebnisse.....	21
3.3.1	Prüfverfahren	21
3.3.1.1	<i>Dummy-Prüfung</i>	21
3.3.1.2	<i>Unterdachelemente</i>	22
3.3.1.3	<i>Messung Kontaktwinkel</i>	23

3.3.2	Alterung	23
3.3.2.1	<i>Kleinversuche Freiland</i>	23
3.3.2.1.1	<i>FT-IR-Spektroskopie-Monitoring</i>	26
3.3.2.2	<i>Künstliches Alterungsverfahren</i>	30
3.3.2.2.1	<i>Messung der dynamischen Wassersäule</i>	30
3.4	Diskussion Prüfverfahren und Alterung	31
4	Bedingungen in der Hinterlüftungsebene	35
4.1	Stand des Wissens und Forschungsbedarf.....	35
4.2	Thermischer Auftrieb	37
4.2.1	Material und Methoden	37
4.2.1.1	<i>Sensoren und Messtechnik</i>	40
4.2.1.1.1	<i>Messsensorik und Messgenauigkeit</i>	40
4.2.1.1.2	<i>Messaufbau und Sensorpositionen</i>	40
4.2.1.2	<i>Vorversuche zur gleichmäßigen Erwärmung der Oberfläche</i>	46
4.2.1.2.1	<i>Infrarotstrahler:</i>	46
4.2.1.2.2	<i>Heizgewebe:</i>	47
4.2.1.2.3	<i>Heizmatten:</i>	47
4.2.2	Ergebnisse.....	49
4.2.2.1	<i>Einfluss Dachneigung</i>	50
4.2.2.2	<i>Einfluss Dacheindeckung</i>	51
4.2.2.3	<i>Einfluss Konterlattenhöhe</i>	52
4.2.2.4	<i>Einfluss Dachlattenabstand</i>	54
4.2.2.5	<i>Anwendung des mathematischen Modells nach Liersch auf die Laborversuche</i>	54
4.2.3	Diskussion	56
4.2.3.1	<i>Einfluss Dachneigung</i>	56
4.2.3.2	<i>Einfluss Dacheindeckung</i>	56
4.2.3.3	<i>Einfluss Konterlattenhöhe</i>	56
4.2.3.4	<i>Einfluss Lattenabstand</i>	57
4.2.3.5	<i>Anwendung des mathematischen Modells nach Liersch auf die Laborversuche</i>	57
4.2.3.6	<i>Erkenntnisse zu thermischen Vorgängen in der HLE</i>	59
4.3	Klima	60
4.3.1	Material und Methoden	60
4.3.1.1	<i>Einleitung</i>	60

4.3.1.2	<i>Standort, Lage und Orientierung</i>	62
4.3.1.3	<i>Dachaufbau, Konstruktionsdetails</i>	63
4.3.1.3.1	<i>Steildachaufbau</i>	63
4.3.1.3.2	<i>Flachdachaufbau</i>	65
4.3.1.4	<i>Sensoren und Messtechnik</i>	67
4.3.1.4.1	<i>Positionen</i>	67
4.3.1.4.2	<i>Messgenauigkeit</i>	71
4.3.1.5	<i>Datenauswertung und statistisches Klimaprognosemodell</i>	72
4.3.1.5.1	<i>Temperatur und Luftfeuchtigkeit</i>	72
4.3.1.5.2	<i>Strömungsgeschwindigkeit – Wind und thermischer Auftrieb</i>	72
4.3.1.5.3	<i>Klimaprognosemodell</i>	73
4.3.2	<i>Ergebnisse</i>	76
4.3.2.1	<i>Messdaten</i>	76
4.3.2.1.1	<i>Temperatur und Luftfeuchtigkeit</i>	76
4.3.2.1.2	<i>Oberflächentemperaturen der Dacheindeckung und Unterdachbahn</i>	89
4.3.2.1.3	<i>Kondensatbildungspotential</i>	95
4.3.2.1.4	<i>Strömungsgeschwindigkeit – Wind und thermischer Auftrieb</i>	98
4.3.2.2	<i>Klimaprognosemodell</i>	111
4.3.3	<i>Diskussion</i>	120
4.3.3.1	<i>Messdaten</i>	120
4.3.3.1.1	<i>Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der HLE</i>	120
4.3.3.1.2	<i>Oberflächentemperaturen der Dacheindeckung und Unterdachbahn</i>	122
4.3.3.1.3	<i>Kondensatbildungspotential</i>	122
4.3.3.1.4	<i>Strömungsgeschwindigkeit – Wind und Thermischer Auftrieb</i>	123
4.3.3.2	<i>Klimaprognosemodell</i>	128
5	Literatur	129
Anhang A	131
Anhang B	134

ZUSAMMENFASSUNG (EXECUTIVE SUMMARY)

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden auf Basis von mehreren Labor- und Freilandversuchen und Workshops ein neues Prüfverfahren für Unterdächer und eine Berechnungsmethodik zur Vorhersage der Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene (HLE) von Steildächern entwickelt.

Das bestehende Prüfverfahren für die Regensicherheit von Unterdächern gemäß [1] wurde hinsichtlich erhöhter Praxisnähe und Reproduzierbarkeit adaptiert, darüber hinaus wurde ein künstliches Alterungsverfahren, basierend auf jenem der EN 13859-1 [2] implementiert. Die neuen Auswertungskriterien erlauben eine qualitativ und quantitativ praxisrelevantere Beurteilung der Tauglichkeit. Der neu entwickelte Prüfstand hat sich in der Praxisanwendung als funktionell erwiesen, um das adaptierte Verfahren mit vertretbarem Aufwand in zuverlässiger Qualität abzuwickeln. Um die Reproduzierbarkeit des Verfahrens tiefergehend abbilden und validieren zu können, sind weitere Untersuchungen angezeigt.

Der Vergleich der degenerativen Auswirkungen auf die Unterdachsysteme zwischen Freilandbewitterung und künstlicher Alterung weist z.T. deutliche Abweichungen auf, die neben etwaigen Unterschieden in der individuellen Verarbeitungsqualität vermutlich auch klimatische Ursachen haben. Es besteht daher weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen starker klimatischer Schwankungen (v.a. während der Übergangszeit) mit Frost-Tau-Wechseln, um das auf [2] basierende Alterungsverfahren besser mit der Realität abzugleichen.

Zur Vorhersage der Klimabedingungen in der HLE von Steildächern wurden einerseits die Strömungsverhältnisse in der HLE untersucht und andererseits die Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen.

Zu den Strömungsverhältnissen durch thermischen Auftrieb (ohne Windeinfluss) konnten im Laborversuch neue Erkenntnisse gewonnen werden und bestehendes Know-how bestätigt werden:

- Bei stärkerer Dachneigung höhere Strömungsgeschwindigkeit
- Bei höheren Temperaturdifferenzen zwischen der Luft in der HLE und der Außenluft höhere Strömungsgeschwindigkeiten
- Kleine Luftundichtheiten der Dacheindeckung wirken sich nicht auf die Strömungsgeschwindigkeit in der HLE aus.
- Die Querschnittshöhe der HLE (= Konterlattenhöhe) wirkt sich auf die Strömungsgeschwindigkeit aus. Je höher die Konterlatte, desto höher die Strömungsgeschwindigkeit bei gleicher Temperaturdifferenz.
- Der Lattenabstand zeigt einen großen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit. Je mehr Lattungen, desto höher die Strömungswiderstände und geringer die Strömungsgeschwindigkeit. Es zeigt sich aber durch die Lattung auch ein strömungsabhängiger Widerstand.

- Das mathematische Modell zur Vorhersage des thermischen Auftriebs nach Liersch [3] stimmt mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen prinzipiell überein, jedoch zeigen die Strömungswiderstände für die Lattung in den Laborversuchen deutliche Abweichungen.

Im Freilandversuch konnten zu den Klimabedingungen und den Strömungsverhältnissen in der HLE folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Temperatur [°C] und Luftfeuchte [%, g/m³] zeigen sich stark abhängig von Dachausrichtung, Eindeckungsart (Material, Farbe, Strahlungsemissionseigenschaften) und Position in der Hinterlüftungsebene
- Die Firstöffnungsart/-querschnitt zeigt bei Einhaltung der Mindestöffnungsquerschnitte lt. [4] keinen erkennbaren Einfluss auf das Klima in der HLE
- die Luft- und Oberflächentemperaturen in der HLE bzw. der Unterdachbahnen unterhalb von südlich ausgerichteten, dunklen Dacheindeckungen können unter mitteleuropäischen Bedingungen Temperaturen von bis zu 70 °C erreichen
- Unterhalb von nördlich ausgerichteten Dachflächen ist die relative Luftfeuchtigkeit [%] in der HLE am höchsten
- Das größte Kondensatbildungspotential zeigte sich unterhalb von nördlich ausgerichteten, dunklen Dacheindeckungen. Das beobachtete Potential war jedoch in allen beobachteten Fällen als unbedenklich einzustufen
- Südlich ausgerichtete HLEs weisen im Tagesverlauf die höchste absolute Luftfeuchtigkeit [g/m³] auf. Speziell an sonnigen Tagen zeigt sich dieser Effekt vor allem bei dunklen Dacheindeckungen.
- Der nächtlichen Unterkühlung der Dachfläche kann durch die Verwendung unbeschichteter, metallischer Dacheindeckungsflächen entgegengewirkt werden (geringere Strahlungsemission)
- Temperaturfluktuationen und Luftfeuchtefluktuationen in der HLE im Tagesverlauf sind höher...
 - ...je dunkler die Dacheindeckung bzw. je höher der solare Absorptionsgrad
 - ...je geringer die Wärmespeicherfähigkeit und Stärke der Eindeckung
 - ...je direkter die Südausrichtung der Dachfläche bzw. je größer die effektive Sonneneinstrahlung in Normalrichtung zur Dachfläche
- Luftfeuchtefluktuationen in der HLE im Tagesverlauf sind zusätzlich höher...
 - ...je geringer die Porosität bzw. das Feuchtesorptionspotential der Eindeckung
- Der Beitrag des thermischen Auftriebs zur Luftbewegung in der HLE ist im Vergleich zum entsprechenden Beitrag der Windverhältnisse unter Realbedingungen um ein vielfaches geringer

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Freilandversuch wurde ein statistisches Vorhersagemodell der Klimabedingungen in der HLE von Steildächern erstellt, das einerseits in der Planung von Unterdächern zur Abklärung der zu erwartenden Klimabedingungen eingesetzt werden kann, aber andererseits auch

für hygrothermische Simulationen eine wertvolle Basis zur Berechnung von hinterlüfteten Steildächern bilden wird.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt erlauben es die Qualität von Unterdachsystemen realitätsnah und messbar beurteilen zu können. Außerdem ist es nun möglich die klimatische Belastung der Unterdeckbahnen während der Nutzungsphase je nach Dachausführung vorherzusagen. Hersteller von Unterdachsystemen können dadurch ggf. notwendige Modifikationen anstoßen und überprüfen bzw. Produkte auf Eignung für den jeweiligen Einsatzzweck überprüfen. Das neu entwickelte Prüfverfahren erlaubt es ebenfalls dem Kunden die Leistungsfähigkeit der Unterdachsysteme inklusive Alterungsbeständigkeit nachzuweisen, was schlussendlich vertrauensbildend wirkt.

1 Begriffe und Abkürzungen

Abkürzung / Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
HLE	Hinterlüftungsebene	-
T_{HLE}	Mittlere, gemessene Temperatur in der HLE	K
T_{vl}	gemessene Temperatur auf 2/3 Länge der HLE	K
d_{vl}	Absolute Luftfeuchtigkeit in der HLE	g/m ³
T_a / T_e	Umgebungslufttemperatur / Außenlufttemperatur	K
p_{sat}	Sättigungsdampfdruck	Pa
ζ_Q	Reibungsbeiwert für die Strömungswiderstände durch Einschnürungen der HLE (z.B. Lattungen)	-
V_{air}	Strömungsgeschwindigkeit in der HLE der Laborversuche (durch thermischen Auftrieb)	m/s
$V_{w, eff}$	Effektive Windgeschwindigkeit (berechnet aus der gemessenen Windgeschwindigkeit und Windrichtung)	m/s
$G_{e, eff}$	Globalstrahlung normal zur Dachfläche	W/m ²
G_e	Globalstrahlung	W/m ²
ω_e	Windrichtung	° (0° → Nord, 180° → Süd)
v_e	Windgeschwindigkeit	m/s
α_{vl}	Dachneigung	° (0° → horizontal, 90° → vertikal)
β_{vl}	Dachausrichtung	° (0° → Nord, 180° → Süd)
ϵ_s	Sonnenhöhe	°
γ_s	Azimut	°

2 Problemstellung und Ziele

Steildächer und häufig auch flachgeneigte Dächer werden mit diffusionsoffenen, regensicheren bzw. erhöht regensicheren Unterdächern ausgeführt. Aus bauphysikalischer Sicht wird ein diffusionsoffenes ($s_d \leq 0,3$ m) Unterdach gefordert. Die gleichzeitig notwendige Regensicherheit des Gesamtsystems Unterdach (Vordeckbahn, Verklebung, Manschetten, etc.) stellt bereits eine hohe Herausforderung an die Materialbeschaffenheit. Die Erfahrungen der letzten Jahre hat gezeigt, dass viele Unterdächer ihre planmäßige Lebensdauer von 30 Jahren nicht erreichen. Durch die Exposition der Dachfläche kommt es selbst in gemäßigten Zonen zu starken klimatischen Schwankungen auf der Dachfläche und dem darunterliegenden Bereich. Diese Bedingungen stellen eine große Herausforderung für die verwendeten Materialien dar und führen in zahlreichen Fällen zu einer vorzeitigen Alterung bis hin zum völligen Versagen. Nach solchen Auflösungserscheinungen von Unterdachbahnen oder -komponenten kommt es zu Wassereintritten in die darunterliegende Dämmung, was einen massiven Schaden und hohe Sanierungskosten zur Folge hat. Kundenunzufriedenheit und Reklamationen sind die Konsequenz daraus.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde 2003 von der Holzforschung Austria ein Prüfverfahren zum Nachweis der Regensicherheit und der Nageldichtheit von Unterdachsystemen entwickelt [1]. In weiterer Folge wurde das Verfahren in Zusammenarbeit mit der Bundesinnung der Dachdecker, Glaser und Spengler für Dächer mit der Anforderung "erhöhte Regensicherheit" modifiziert. Die Varianten dieses Prüfverfahrens sind heute im deutschsprachigen Raum gut etabliert und zum Teil in die Normung aufgenommen [5] bzw. haben normähnlichen Charakter (Produktdatenblatt für Unterdeckplatten aus Holz des ZVDH [6]). Ein Alterungsverhalten unter klimatischen Belastungen hatte jedoch keinen Eingang in das Prüfverfahren gefunden. Zusätzlich hat sich aufgrund der Erfahrungen der Vergangenheit gezeigt, dass das Prüfverfahren hinsichtlich Anforderungen an das System, Bewertung der Ergebnisse und Reproduzierbarkeit optimiert werden sollte.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts war es, die Leistungsfähigkeit von Unterdachsystemen realitätsnah und objektiv quantifizierbar im Labor beurteilen, sowie die klimatische Belastung der Unterdeckbahnen je nach Dachausführung vorhersagen zu können. Um dieses Ziel zu erreichen gliederte sich das Projekt in drei Teilprojekte:

Das Ziel des ersten Teilprojektes war es, das bestehende Prüfverfahren zur Regensicherheit hinsichtlich Realitätsnähe und Beurteilungskriterien weiterzuentwickeln.

Das Ziel des zweiten Teilprojektes ist es, bestehende Ansätze zur künstlichen Alterung von Unterdeckbahnen auf das gesamte Unterdachsystem anzuwenden und mit dem verbesserten Prüfverfahren aus dem ersten Teilprojekt zu kombinieren.

Das Ziel des dritten Teilprojektes ist es, die klimatischen Bedingungen auf der Unterdeckbahn in Abhängigkeit der verwendeten Eindeckung, der Dachneigung und der Orientierung hinreichend realitätsnahe vorhersagen zu können.

3 Prüfverfahren und Alterung

3.1 Stand des Wissens und Forschungsbedarf

In der ÖNORM B 4119 [4] werden Bedingungen genannt, unter welchen „regensichere“ bzw. „erhöht regensichere“ Unterdächer auszuführen sind und Anforderungen wie z.B. Regensicherheit, Schutz vor Flugschnee, Diffusionsfähigkeit, Schutz der Wärmedämmung vor Durchstömung mit Luft (Winddichtheit), Durchbruchsicherheit, etc. an diese vorgegeben. Ein geeignetes Nachweisverfahren hierfür, insbesondere für die gesamtheitliche Betrachtung von Unterdachsystemen (UDS), wird indes nicht definiert. Die HFA hat im Rahmen des Projektes „Regensichere Ausführung von Unterdachkonstruktionen“ [1] diese Lücke geschlossen, indem in Kooperation mit Projektpartnern aus Industrie und Verbänden erstmals ein Prüfverfahren für die Regensicherheit des Gesamtsystems Unterdach entwickelt worden ist. In weiterer Folge ist als Teil des Verfahrens die Nageldichtheitsprüfung (Konterlatten-Nagelung) als Normprüfverfahren in der neu geschaffenen ÖNORM B 3647 [5] festgelegt worden. Das Teilverfahren für Plattenwerkstoffe ist wenig später in das Regelwerk des deutschen Dachdeckerhandwerks des ZVDH [6] übernommen worden. Das gesamte Verfahrensprogramm (normativ und nicht normativ) ist heute im deutschsprachigen Raum sowohl bei Anbietern von Folien-, als auch von Plattensystemen gut etabliert. Schlussendlich ist das Verfahren auf Bestreben der Industrie 2008 in Zusammenarbeit mit der Bundesinnung der Dachdecker, Glaser und Spengler für die Anforderung „erhöhte Regensicherheit“ sowohl für Folien-, als auch für Plattensysteme gemäß interner HFA-Richtlinie [7] adaptiert worden und ist seitdem ebenso auf breiter Basis in der Branche anerkannt.

Durch das Verfahren werden übliche im Bereich des Unterdaches auftretende Details wie Durchdringungen, Stöße, Nagelungen oder Verletzungen praxisnah abgebildet. Neben den reinen Produkteigenschaften rückt somit auch die ebenso bedeutsame Materialkombination (Folie, Klebebänder, etc.) sowie die konkrete Verarbeitung an diesen Punkten in den Vordergrund, was dieses Verfahren einzigartig macht (so werden beispielsweise im Rahmen des Schlagregentests gemäß [8] Unterdachfolien mit unterschiedlichen Untergründen untersucht, der integrative Ansatz mit Systemkomponenten und Verarbeitung fehlt jedoch). Entfärbbares Papier unter der wasserführenden Ebene dient dazu, Wassereintritte sichtbar zu machen. Die Auswertung und Beurteilung erfolgt bei Normverfahren nach [5] mittels Größenmessung entfärbter Bereiche und bei den übrigen Teilverfahren in Anlehnung daran.

Einen Ansatz zur Beurteilung von Wassereintritten mittels hygrothermischer Simulation wird in [9] diskutiert. Im Rahmen der Arbeiten wurde die Nageldichtheit einer Unterdachbahn mit bzw. ohne Nageldichtungsmaßnahme untersucht. Hierbei wurden Probekörper zunächst in Anlehnung an DIN EN 12155 [10] vorbelastet und Wassereintritte mittels saugfähigem Papier unter der Konstruktion aufgenommen. Die durch Rückwägung des Papiers ermittelte Wassermenge wird in weiterer Folge in einer hygrothermischen Simulation als Feuchtequelle angesetzt und über einen Zeitraum von fünf Jahren simuliert.

In EN 13859-1 [2] ist ein Verfahren zur künstlichen Alterung von Unterdeckbahnen angeführt. Wiederholt auftretende Schäden an UDS aufgrund klimatischer Beanspruchungen werden durch das Verfahren jedoch nicht prognostiziert. Die Norm befindet sich u.a. daher gegenwärtig in Überarbeitung.

In [7] wird ein Vorbelastungsverfahren für Dächer mit der Anforderung der erhöhten Regensicherheit gemäß [4] angegeben. Es handelt sich hierbei um eine zyklische Belastung mit Strahlungswärme und anschließendem rapiden Abkühlen mittels Sprühwasser. Das Verfahren wurde entwickelt, um bei Blechdächern vor der Prüfung thermische Dilatationsbewegungen auszulösen, es handelt sich also um kein tatsächliches Alterungsverfahren.

Langner stellt in seiner Dissertation [11] (aus 2005) fest, dass es „...derzeit kein Verfahren gibt, mit dem praxisnah die Langzeitbeständigkeit von Unterspannbahnen geprüft werden kann“. Er verfolgt den Ansatz, natürliche und künstliche Alterung von Unterdachbahnen mittels einer mathematischen Langzeitfunktion zu beschreiben. Hierbei werden durch laufende Untersuchungen von natürlich und künstlich bewitterten Proben Alterungskennziffern für verschiedene Materialeigenschaften definiert. Schließlich wurde hieraus ein Alterungsfaktor abgeleitet, mit welchem die Langzeitalterung aus einer dreimonatigen Freilandbewitterung rechnerisch extrapolieren lässt. Die Arbeit kommt zu der Schlussfolgerung, dass die eingesetzten Verfahren zur künstlichen Alterung nach und in Anlehnung an die EN 13859-1 [2] im Vergleich zu Realversuchen zu widersprüchlichen Ergebnissen führen und somit ungeeignet sind (siehe Abb. 1).

Erkenntnisse nach der natürlichen Alterung durch Freibewitterung	Erkenntnisse nach der künstlichen Alterung durch Wärme- und/oder UV-Lagerung
<ul style="list-style-type: none"> • Es traten Alterungserscheinungen bei allen Produkten auf. • Der Materialabbau der Polymerfolien konnte durch Alterungskennziffern verfolgt werden. • Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen die Entwicklung einer Langzeitfunktion. • Die aus den Versuchen ermittelten Alterungsfaktoren korrelieren mit der Langzeitfunktion. • Auf Basis der Alterung in den ersten drei Monaten kann mit der Langzeitfunktion eine baupraktische Einstufung der Dauerhaftigkeit der Unterspannbahnen erfolgen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Wärmelagerung hatte keinen oder nur geringen Einfluss auf die Folien. • Die UV-Strahlung führte zu einem stark unterschiedlichen Verhalten der Bahnen. • Die künstliche Alterung nach Norm führte bei den meisten Produkten zu einer nur geringen Abnahme der Materialeigenschaften. • Die Abbauerscheinungen nach der UV-Strahlung sind von der Temperatur in der Prüfkammer abhängig. • Den künstlichen Alterungsversuchen konnten keine einheitlichen Alterungszeiträume zugeordnet werden. • Die künstlichen Alterungsversuche waren nicht geeignet, um das Langzeitverhalten der diffusionsoffenen Folien einzustufen.

Abb. 1: Vergleich der Untersuchungsergebnisse aus Realversuchen und künstlicher Alterung (aus [11])

Der Frage nach der Dauerhaftigkeit von Unterdeckbahnen unter Eindeckungen geht eine weitere Forschungsarbeit [12] nach. Die dort gewonnenen Erkenntnisse basieren auf einer Umfrage unter Sachverständigen, den Ergebnissen von Langzeitfreibewitterungen von Unterdachbahnen sowie auf Fällen eines Sachverständigenbüros. Zusätzlich sind die Erkenntnisse aus [11] mit eingeflossen. In [12]

konnte keine allgemein gültige Korrelation zwischen Freibewitterungsdauer vor der Eindeckung bzw. Einbausituation und Auftreten von Schadensfällen festgestellt werden, vielmehr scheinen manche Folien schlichtweg ungeeignet für den Einsatz als Unterdach zu sein. Sehr wohl konnte jedoch ein Einfluss der Temperatur auf die Schadenshäufigkeit gezeigt werden, da südliche Ausrichtungen deutlich stärker betroffen waren als nördliche. Dies steht vordergründig in Widerspruch zu den Erkenntnissen aus [11], wo Temperaturbelastungen einen lediglich geringen Einfluss auf die Folieneigenschaften hatten. Messdaten aus der Arbeit zeigen jedoch, dass die Temperatur unter freibewitterten Folien in sternklaren Nächten selbst im Juli unter den Gefrierpunkt sinken können und tagsüber von März bis Oktober Temperaturen von über 80° C möglich sind. Ein unmittelbarer Einfluss von UV-Strahlung auf die Schadenshäufigkeit konnte nicht gezeigt werden. Die meisten Schäden fanden sich im Bereich von Anschlüssen und Durchdringungen, wobei der Verfasser von [11] dies auf Probleme bei der Ausführung und nicht auf Materialfehler zurückführt. Dieser Umstand unterstreicht abermals die Wichtigkeit des integralen Ansatzes des derzeitigen HFA-Verfahrens [1]. Die Autoren von [12] empfehlen abschließend die Entwicklung neuer, nicht näher definierter, standardisierter Prüfungsgrundsätze unter Einsatz von ergänzenden Freilandbewitterungen, da Laborversuche allein nach Aussage der Autoren keine eindeutigen Hinweise auf die Gebrauchstauglichkeit zulassen.

Forschungsbedarf

Das Verfahren der HFA [1] weist durch die gewählte praxisnahe Methodik diverse Einflussparameter auf, die einer individuellen Streuung unterliegen, welche wiederum das Ergebnis beeinflussen und zu Problemen bei der Reproduzierbarkeit führen können. Zusätzlich beurteilt das bisherige Verfahren der HFA ebenso wie auch das gleichsam etablierte Schlagregenverfahren [8] Proben im Neuzustand, wodurch ein Nachweis der Tauglichkeit über die projektierte Lebensdauer ausbleibt.

Den Erkenntnissen in [12] folgernd besteht ein primärer Forschungsbedarf bei der Formulierung geeigneter künstlicher Klimabedingungen, um die Alterung der Folien standortsabhängig korrelierend mit einer tatsächlichen in-situ-Belastung darstellen zu können. Die tatsächlichen klimatischen Bedingungen am Unterdach und deren Zusammenspiel sind jedoch nicht ausreichend bekannt. In [11] werden abermals ausschließlich Unterdeckbahnen untersucht, es findet keine Systembetrachtung des UDS statt. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Untersuchung des Alterungsverhaltens nach Fertigstellung der Dachdeckung.

Die größte Herausforderung bei der Überarbeitung des bestehenden Prüfverfahrens bestand darin, bei der Ausgestaltung von Probekörpern und Prüfverfahren Laborbedingungen (möglichst exakte und reproduzierbare Rahmenbedingungen und quantitative Bestimmung von Wassereintritten) und die dem entgegenstehenden Praxisbedingungen (Verwendung entsprechender Materialien wie etwa sägeraues Bauholz, Zusammenbau des Unterdachsystems durch Fachkräfte des Auftraggebers und somit Miteinfließen der Verarbeitungsqualität) so zusammenzuführen, dass belastbare und zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können. Zusätzlich war ein Verfahren zur künstlichen Alterung zu implementieren, welches eine Langzeitnutzung in einem vertretbaren Zeitrahmen beschleunigt widerspiegelt.

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Prüfverfahren

3.2.1.1 Prüfkörper

Zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen wurden gegenüber dem bisherigen Verfahren erweiterte Prüfkörper entwickelt, welche die Überprüfung zusätzlicher neuralgischer Bereiche einer Dachkonstruktion erlauben. Das verwendete Bauholz wird vor dem Zusammenbau der Prüfkörper auf 18 M-% konditioniert. Diese Prüfkörper sind in Abb. 2 dargestellt, Tab. 1 zeigt einen Vergleich der überprüften Parameter des überarbeiteten Verfahrens sowie jenem gemäß [1].

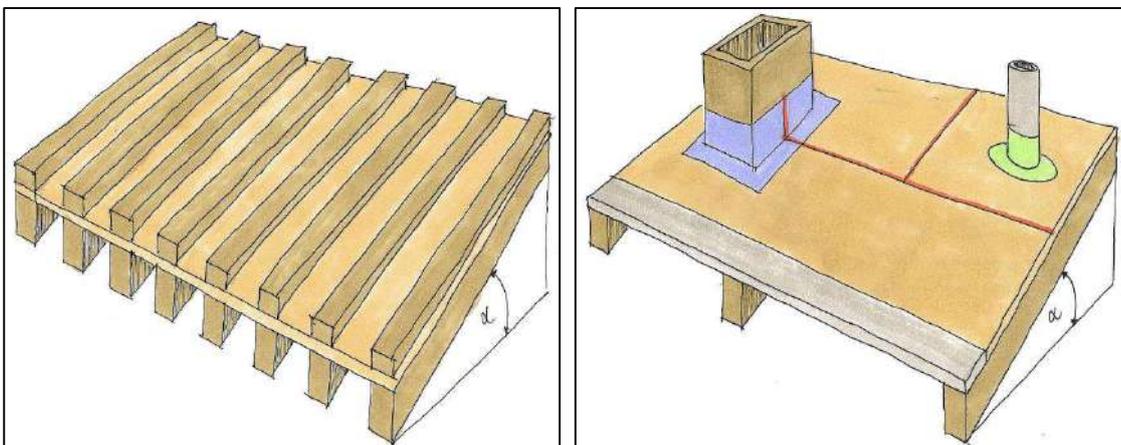


Abb. 2: Grafische Darstellung der überarbeiteten Prüfkörper. Prüfung Konterlattenbefestigung mit je 4 Konterlatten für Nagelung und Schraubung (links), Prüfung Durchdringungen mit T-Stoß und Traufblechanschluss (rechts).

Tab. 1: Vergleich der geprüften Parameter zwischen bisherigem (siehe [1]) und überarbeitetem Prüfverfahren

Parameter	Bisheriges Prüfverfahren (siehe [1], 2003)	Überarbeitetes Prüfverfahren
T-Stoß	✓	✓
Verletzung	✓	✗
Kamindurchdringung	✓	✓
Rohrdurchdringung	✓	✓
Folienstoß im Hochzug	✗	✓
Traufblech	✗	✓
Nageldichtung Konterlatten	(✓)	✓
Schraubendichtung Konterlatten	(✓)	✓

Anhand von Tab. 1 lässt sich ausmachen, dass die Prüfung einer Folienverletzung aufgegeben wurde, da sich gezeigt hat, dass sonstige Prüfparameter wie z.B. die Durchdringungen weitaus komplexer hinsichtlich ihrer Abdichtung sind und somit die zusätzliche Prüfung einer sehr einfach zu bewerkstelligen Abdichtung obsolet macht. Die Nagel- bzw. Schraubendichtungen beim bisherigen Verfahren sind in Klammern gesetzt, da jeweils nur eine Variante pro Prüfkörper geprüft werden kann.

Die Erfassung von eindringendem Wasser durch die Beregnung während der Prüfung (siehe 3.2.1.4) erfolgt auf zweierlei Weise:

a) Von Prüfkörper aufgenommenes Wasser

Um jene Wassermenge bestimmen zu können, die während der Prüfung aufgrund von Undichtigkeiten von der Unterkonstruktion aufgenommen wurde, werden aus dem verwendeten Bauholz und der Unterdachbahn Referenzproben angefertigt, die nicht beregnet werden und es somit erlauben, vom Gewicht der Probe nach der Prüfung die entsprechenden Differenzen in Abzug zu bringen, um daraus und aus dem Gewicht der Probe vor der Prüfung die korrekte Wassermenge zu bestimmen.

b) Abrinnendes Wasser

Jene Wassermenge, die nach Eindringen durch eine undichte Stelle des Unterdaches von der Unterkonstruktion abrinnt, wird durch definierten Prüfstellen (siehe Abb. 3) zugeordneten Gefäßen (siehe Abb. 4) aufgefangen und nach Abschluss der Prüfung gewogen.

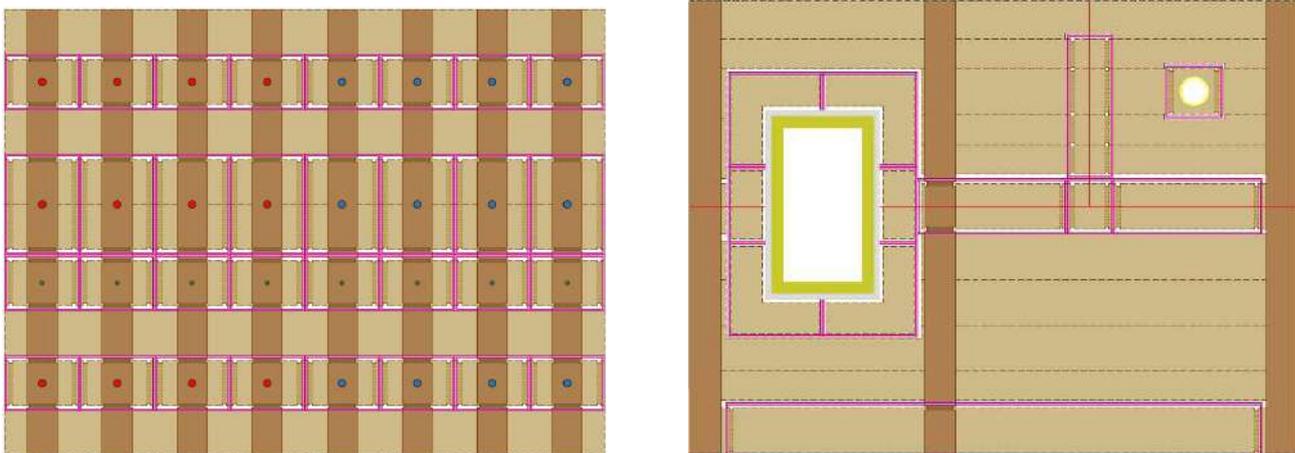


Abb. 3: Definierte Prüfstellen (pinke Umrandungen) für aus Leckagen abrinndendes Wasser. Links: Nagel- und Schraubendichtungs-Element; rechts: Duschdringungselement mit Kamin, Rohr, T-Stoß und Traufblech

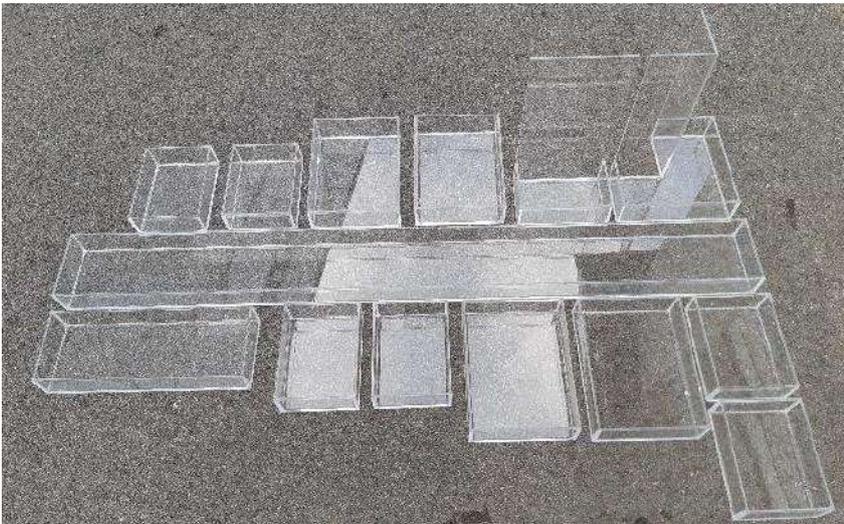


Abb. 4: Diverse Gefäße zum Auffangen von ab rinnendem Wasser unter den jeweiligen Prüfstellen

Eine Durchmischung einzelner Wassereintritte sowie die Migration des Wassers von einer Prüfstelle zu einer anderen wird hierbei durch ein System von Nuten in der Unterkonstruktion verhindert (siehe Abb. 5).

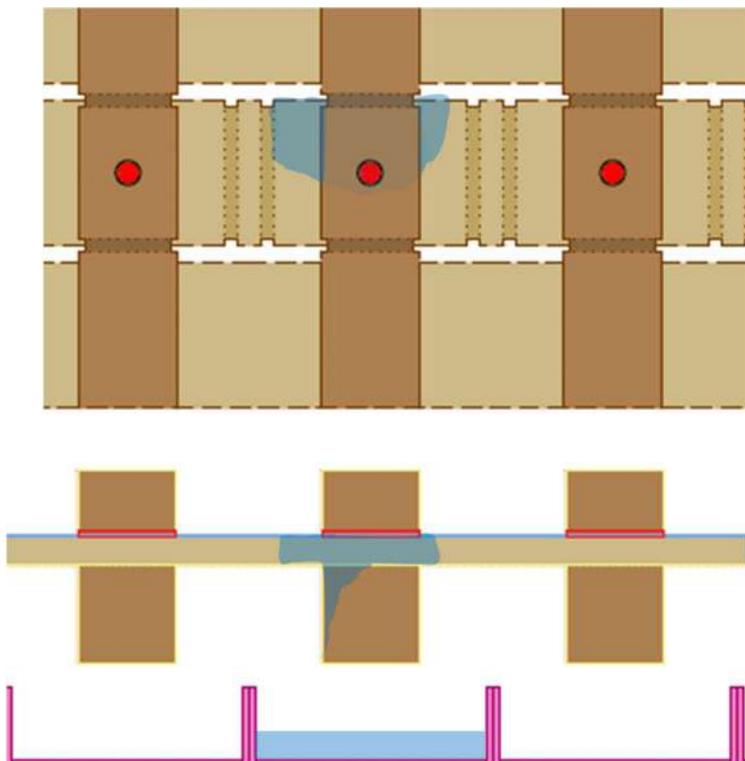


Abb. 5: Schematische Darstellung (von unten sowie im Querschnitt) einzelner Prüfstellen mit dazugehörigem Nutensystem zur Isolierung der einzelnen Stellen und den darunter positionierten Auffanggefäße

Eine Aufstellung der der untersuchten Unterdachsysteme Beschreibung der jeweiligen Unterdeckbahnen enthält Tab. 2.

Tab. 2: Beschreibung der untersuchten Unterdachsysteme

System	Bahn (Aufbau, Grammatur	Verklebung Stöße	Einbindung Rohr	Kamin	Nageldichtung
A	PP-Vlies Monolith. Membran PP-Vlies 230 g/m ²	SK-Streifen, Klebeband (vertikal)	Klebedichtmasse, Butylband, Klebeband	Klebedichtmasse, Klebeband	Schaumband geschlossen- zellig
B	PP-Vlies Monolith. Membran PP-Vlies 165 g/m ²	SK-Streifen, Klebeband (vertikal)	Klebedichtmasse, Manschette, Klebeband	Vliesbewehrte Flüssigabdichtung	Butylband
C	PP-Vlies Mikroporös. Membran PP-Vlies 165 g/m ²	SK-Streifen, Klebeband (vertikal)	Klebedichtmasse, Manschette, Klebeband	Vliesbewehrte Flüssigabdichtung	Butylband
D	Monolith. Beschichtung PES-Vlies 230 g/m ²	SK-Streifen, Klebeband (vertikal)	Manschette, Klebevlies	Klebeband	Keine Nageldichtung
E	Zweilagiges PE- Vlies, Flash-spun- bond-Verfahren 148 g/m ²	SK-Streifen, Klebeband (vertikal)	Butylband mit Primer	Butylband mit Primer	Schaumband geschlossen- zellig
F	PU-Beschichtung PES-Vlies PU-Beschichtung	chemisch verschweißt	Butylband	Butylband	Schaumband geschlossen- zellig
G	PP-Vlies Mikroporös. Membran PP-Vlies 170 g/m ²	SK-Streifen, Klebeband (vertikal)	Manschette, Klebevlies	Klebeband	Schaumband geschlossen- zellig
H	PP-Vlies Monolith. Membran PP-Vlies 193 g/m ² x	SK-Streifen, Klebeband (vertikal)	Klebeband	Klebeband	Schaumband geschlossen- zellig

3.2.1.2 Prüfstand

Der zur Prüfungsdurchführung entwickelte Prüfstand (siehe Abb. 6) ist derart konzipiert, dass nach Einbau des Prüfkörpers dieser zusammen mit einer umseitigen Beplankung eine wind- und spritzwassergeschützte Umhausung zur Aufnahme der Sammelgefäße schafft. Die im oberen Bereich positionierte Beregnungseinheit beherbergt Vollkegeldüsen zum gleichmäßigen Aufbringen von simulierter Beregnung. Um eine etwaige Wasserdurchgängigkeit der Folie in der Fläche bei Beregnung mit entsprechender kinetischer Energie (Aufprall großer Regentropfen) zu überprüfen, sind darüber

hinaus neun schwenkbare Vollstrahldüsen, die das Durchdringungselement überstreichen, montiert. Von vorne wird durch ein Gebläse eine Luftströmung aufgebracht, um Treibregen zu simulieren.

Der Rahmen für die Prüfstandaufnahme lässt sich in 5°-Schritten bis 20° Dachneigung verstellen, Zwischenstufen können mittels Unterlagen auf der Auflagefläche jederzeit hergestellt werden. Dachneigungen > 20° wurden keine Umhausungselemente vorgefertigt, da derartige Neigungen im Rahmen der Regensicherheitsprüfung unüblich sind. Allerdings stellt eine Prüfung für derlei Dachneigungen keine Probleme dar und kann jederzeit mittels provisorischen Einhausungsmaßnahmen durchgeführt werden. Für die Prüfung der erhöhten Regensicherheit kann die Dachneigung auf 0° reduziert werden. Dies erlaubt mittels Aufbordung am Prüfkörper die Ausbildung einer Wanne und somit die Prüfung mit stehendem Wasser.

Das Wasser zur Prüfung wird mittels Pumpe in einem Kreislauf geführt, wobei eine hierfür ausgelegte Filtereinheit für ein reibungsloses Funktionieren der diversen Beregnungsdüsen sorgt.

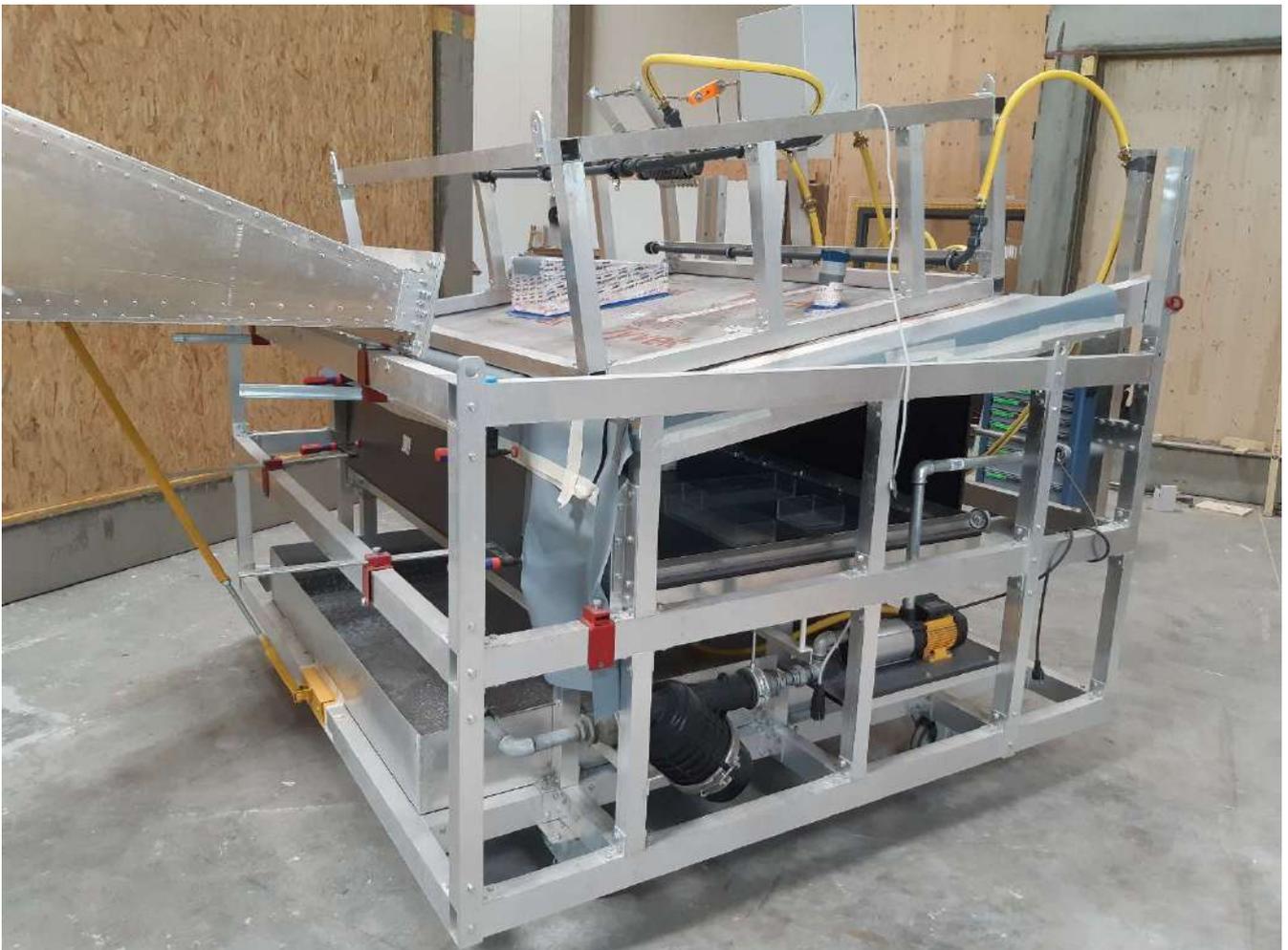


Abb. 6: Neu entwickelter Prüfstand zur Regendichtheitsprüfung mit eingebautem Probekörper und seitlicher Umhausung. Die Beplankung im Vordergrund ist abgenommen, um die Sammelgefäße in der Umhausung zu zeigen. Des Weiteren ist die auf den neigungsverstellbaren Prüfstandrahmen aufmontierte Beregnungseinrichtung zu sehen, sowie links der Luftauslass für das Gebläse und im unteren und hinteren Bereich des Prüfstandes das Wasserkreislaufsystem.

3.2.1.3 Prüfung

Das überarbeitete Prüfverfahren beinhaltet eine künstliche Alterung der Prüfkörper, um die Langzeittauglichkeit von Unterdachsystemen überprüfen zu können (Details hierzu siehe 3.2.2). Die Berechnungsmengen richten sich prinzipiell nach dem bisherigen Prüfverfahren [1], wobei beim neuen Verfahren die Gesamtdauer der Prüfung mit 30 Minuten bei gleichbleibender Berechnungsmenge und Windanströmung festgelegt wurde. Hieraus ergibt sich eine Berechnung der Fläche mit 4 l/m². Diese Wassermenge entspricht in etwa einem Starkregenereignis, welches gemäß Statistik des Deutschen Wetterdienstes 10 Minuten andauert und alle 100 Jahre wiederkehrt [13]. Hierbei wird in der Prüfung angenommen, dass der unterste Meter des Daches im Traufbereich betrachtet wird. Aus diesem Grund wird die Wassermenge, welche bei einer angenommenen Sparrenlänge von 4,14 m (Gebäudebreite 8,00m bei Dachneigung 15°) auf die oberhalb des betrachteten Bereiches liegende Dachfläche auftreffen würde, zusätzlich als von oben ab rinnendes Wasser aufgebracht. Zusätzlich zum bisherigen Verfahren wird ein vorgegebener, ungestörter Bereich des Durchdringungsprüfkörpers durch neun parallel ausgerichtete Vollstrahldüsen mit einer Frequenz von 10/min überstrichen. Diese Düsen sind bei einer Wassermenge von jeweils 1 l/min so bemessen, dass das Wasser die Oberfläche mit einer Geschwindigkeit von 8 m/s trifft. Dies entspricht in etwa der Aufprallgeschwindigkeit großer Regentropfen (Durchmesser 5 mm) [14] und dient dazu, die kinetischen Einwirkungen großer Regentropfen zu prüfen. Für die Prüfung ist enthärtetes Wasser zu verwenden, zur besseren Sichtbarmachung auch kleinerer Wassereintritte wurde zudem die Färbbarkeit des Wassers mit Uranin untersucht (siehe Abb. 7). Hierzu wurde eine Kontaktwinkelmessung des Wassers mit und ohne Färbung durchgeführt, um einen etwaigen, in jedem Fall unerwünschten Einfluss dieser Färbung auf die Benetzungseigenschaften feststellen zu können.



Abb. 7: Herkömmliches (links) und mit dem unter UV-Licht fluoreszierenden Uranin gefärbtes Wasser (rechts)

Die Windbelastung wurde ebenfalls aus [1] übernommen und mit 16 m/s am Austrittsort der Düse festgelegt. Diese Geschwindigkeit entspricht gemäß Messungen des Meteorologischen Institutes der Freien Universität Berlin in etwa der höchsten in Kombination mit Regen auftretenden Windgeschwindigkeit [14].

Vom Ablauf her werden die aus vorkonditioniertem Holz (18 M-%) gebauten Prüfkörper zunächst einem Prüfzyklus unterworfen, um die Regensicherheit im Neuzustand zu prüfen, wenn die einzelnen

Komponenten wie Unterdachbahn und Klebebänder vielleicht noch keine optimale Verbindung eingegangen sind. Im Falle eines positiven Ergebnisses kommen die Prüfkörper im Anschluss in die klimatische Vorbelastung.

In Anlehnung an das Verfahren der EN 13859-1 [2] erfolgt zunächst eine Beaufschlagung des Durchdringungselementes mit UVA-Strahlung, wobei innerhalb von 14 Tagen eine Strahlungs-dosis von 55 MJ/m² bei einer Umgebungstemperatur von 50 °C aufgebracht wird.

Nach der Bestrahlung werden die Elemente für 90 Tage bei 70 °C und 90 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach Ablauf dieser Vorbelastung kommt es zu einem zweiten Zyklus der Beregnungsprüfung.

3.2.1.4 Auswertung

Die Auswertung der Prüfung gliedert sich in die folgenden zwei Kriterien, wobei sowohl der Prüfzyklus vor, als auch jener nach der künstlichen Alterung positiv ausfallen muss. Die Beurteilungen beziehen sich dabei in Anlehnung an [15] auf die Auffeuchtung einer 10 mm dicken, kritischen Holzschicht.

a) Von Prüfkörper aufgenommenes Wasser:

Die durch das Holz der Unterkonstruktion eines Elements aufgenommene Wassermenge muss geringer als 200 g sein. Dies entspricht einer theoretischen Auffeuchtung von ca. 3 M% in den äußeren (kaltseitigen) 10 mm der gesamten Schalung (ca. 1,7 m²).

b) Abrinnendes Wasser

Die abgetropfte Wassermenge in den Sammelbehältern darf insgesamt 25 g nicht überschreiten. Dies entspricht einer theoretischen Auffeuchtung von ca. 3 M% in der äußeren 10 mm-Schicht einer üblichen Sparrenflanke zwischen zwei Konterlattennagelungen mit 80 cm Abstand (ca. 0,2 m²)

Unbeschadet der Kriterien a und b sind beim Durchdringungselement und bei den Konterlattennagelungen und -schraubungen jeweils maximal 2 abtropfende Wassereintrittsstellen zulässig.

3.2.1.5 Dummy-Prüfung

Erste Testläufe des oben beschriebenen Verfahrens wurden anhand eines Dummy-Prüfelementes mit definierten Leckagen an Rohr- und Kamindurchdringung, am Längs- und Querstoß der Unterdachbahn sowie an der Traufblecheinbindung durchgeführt. Hierbei wurde das Element zunächst für zwei Stunden beregnet, um einen möglichst stationären Zustand der Leckagen bezüglich Eindringen von Wasser, Auffeuchtung der oberen Holzschicht und Weiterverteilung bzw. Abrinnen nach unten herzustellen. Im Anschluss wurden drei Prüfzyklen durchgeführt und die eingedrungene Wassermenge an den jeweiligen Leckagen dokumentiert.

3.2.1.6 Prüfungsdurchführung

Mit den Unterdecksystemen der Projektpartner wurden entsprechend oben beschriebenen Verfahren Prüfkörper angefertigt und geprüft. System 8 hat an dieser Prüfung nicht teilgenommen.

3.2.2 Alterung

3.2.2.1 Kleinversuche Freiland

Die EN 13859-1 [2], welche als Basis für das Alterungsverfahren herangezogen wurde, sieht eine UV-A-Bestrahlung mit anschließender Klimabelastung vor. Hierbei sollen die Proben zunächst mit UV-A-Strahlung derart beaufschlagt werden, dass innerhalb von 14 Tagen eine Strahlendosis von 55 MJ/m² auf die Proben auftrifft. Aus diesem Grunde war es von Interesse zu klären, unter welchen jahreszeitlichen Randbedingungen diese akkumulierte Strahlendosis die schwerwiegendste Degeneration an Unterdachsystemen verursacht und welche Zeitspanne hierzu notwendig ist. Zur Beantwortung dieser Frage wurden mit den Systemkomponenten der Projektpartner Kleinproben in drei jahreszeitlich unterschiedlichen Chargen am Freilandprüfstand der HFA am Standort 2100 Stetten untersucht. Hierbei wurden jeweils ein Konterlatten- und ein kombiniertes T-Stoß/Durchdringungselement angefertigt (siehe Abb. 8 und Abb. 9). Die Konterlattenelemente mit den Abmessungen 1,0 m x 1,0 m wurden hierbei mit jeweils zwei Unterdachsystemen bestückt und darauf wiederum jeweils zwei Konterlatten mit einem Nagelbild aus Konterlatten- und Lattennägeln gemäß [5] aufgebracht. Auf den Konterlatten wurde ein Streifen der jeweiligen Unterdachbahn befestigt. Dieser war folglich denselben Witterungsbedingungen wie die Kleinprobe selbst ausgesetzt und diente dazu, laufend Proben für ein Infrarotspektroskopie-Monitoring zu gewinnen (siehe 3.2.2.1.1). Die kombinierten T-Stoß/ Durchdringungselemente mit den Abmessungen 1,0 m x 1,0 m wurden mit einem Folien-T-Stoß und jeweils einer Rohr- und einer Kamindurchdringung versehen, deren Einbindung in die Dachfläche mit den jeweiligen Systemkomponenten regensicher durchzuführen war.



Abb. 8: Konterlattenelement mit Unterdachsystem von zwei Herstellern (jeweils zwei Konterlatten mit Nagelbild gemäß [5]). Auf den jeweils äußeren Konterlatten ist ein Referenzstreifen der Unterdachbahn aufgebracht, um laufend Proben für die spektroskopische Untersuchung entnehmen zu können.



Abb. 9: Kombiniertes T-Stoß/Durchdringungselement eines Herstellers. Die Abdeckung des Kamins und des Rohrs dienen lediglich der Abdichtung der Durchdringungsquerschnittes gegen eindringendes Regenwasser und sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

Sämtliche Elemente wurden auf der Unterseite mit entfärbbarem Krepppapier versehen, wodurch Wassereintritte durch das Unterdach sichtbar gemacht werden konnten. Die Unterkonstruktion der Elemente wurde revisionierbar ausgeführt (siehe Abb. 10), wodurch ein kontinuierliches Monitoring der Wassereintritte ein- bis zweimal wöchentlich durchgeführt werden konnte. In niederschlagsfreien Perioden wurde das Monitoring ausgesetzt. Nach jedem Monitoringtermin wurde erforderlichenfalls neues Krepppapier unter den Elementen angebracht, um ggf. Änderungen hinsichtlich der Quantität empirisch feststellen zu können.



Abb. 10: Rohrdurchdringung von unten mit abgenommenem Revisionsrahmen zum Monitoring

Bevor die Elemente ins Freiland verbracht wurden, wurde eine Nullprüfung der Regensicherheit gemäß dem bisherigen Verfahren [1] durchgeführt, um etwaige Ausführungsmängel ausschließen zu können.

Die Elemente wurden anschließend mit der vom jeweiligen Hersteller freigegebenen Mindestdachneigung (in den vorliegenden Fällen 10° bzw. 15°) im Freiland nach Westen ausgerichtet, die UV-A-Strahlung, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit wurden während dieser Zeit durch die Wetterstation der HFA in zehnminütigem Intervall aufgezeichnet. Nach Erreichen der festgelegten Strahlungsdosis von 55 MJ/m² wurde die Exposition beendet und die Elemente einer abschließenden Untersuchung mit Dokumentation der Leckagen unterzogen. Ebenso wurde eine letzte spektroskopische Analyse vorgenommen.

Im Rahmen der Untersuchungen an den Freiland-Kleinproben wurden folgende Chargen ins Freiland verbracht:

- a) Winter: Ausbringung 21.12.2017
- b) Sommer: Ausbringung 26.07.2018
- c) Herbst: Ausbringung 24.10.2018

3.2.2.1.1 FT-IR-Spektroskopie-Monitoring

Die Alterung der Dachunterspannbahnen in der Freilandbewitterung wurde mittels FTIR-Spektrometer (Spektrum 100, Perkin Elmer) mit ATR-Einheit untersucht. Hierzu wurden zunächst wöchentlich vom Referenzstreifen der Unterdachbahnen (siehe Abb. 8) eine Probe von ca. 30 mm x 30 mm abgeschnitten. Im Anschluss wurden Spektren der jeweils bewitterten Seite der Dachunterspannbahnen für insgesamt 162 Wochen (~6 Monate) in Doppelbestimmung aufgenommen. Auf Basis dieser Spektren wurde für jede Dachunterspannbahn ein chemometrisches Kalibrationsmodell mittels PLS-R (Partial Least Square Regression) erstellt. Die Zeit in der Freilandbewitterung war bei diesen Modellen jeweils die abhängige Variable, während die Extinktion bei den verschiedenen Wellenzahlen jeweils die unabhängigen Variablen darstellten. Zum quantitativen Vergleich der Abwitterungsgeschwindigkeit von Freiland- und Schnellbewitterung wurden parallel Spektren der Dachunterspannbahnen in der Schnellbewitterung aufgenommen. Auf Basis der entwickelten Kalibrationsmodelle wurde schließlich für die Proben der Schnellbewitterung die fiktive Zeit in der Freilandbewitterung bestimmt.

3.2.2.2 Künstliches Alterungsverfahren

Um die Langzeitauglichkeit von Unterdachsystemen überprüfen zu können, wurde ein künstliches Alterungsverfahren entwickelt, welches sich an das in [2] anlehnt.

3.2.2.2.1 Alterung durch UV-A-Belastung

Entsprechend [2] werden die Proben zunächst bei 50 °C für zwei Wochen mit UV-A-Strahlung derart bestrahlt, sodass sich am Ende der Bestrahlung eine akkumulierte Strahlungssumme von 55 MJ/m² ergibt. Da die für diese Behandlung verfügbaren Bestrahlungsgeräte für Kleinproben ausgelegt sind, wurde ein entsprechendes Bestrahlungsgerät mit normgerechter Steuerung an der HFA gebaut (siehe Abb. 11).



Abb. 11: UV-A- Bestrahlungseinrichtung für Unterdachelemente

Hierbei wird das Durchdringungs-Element an den prüfungsrelevanten Bereichen direkt mit der entsprechend notwendigen Strahlungsdosis bestrahlt. Für das Konterlatten-Element ist eine Alterung durch UV-Strahlung nicht relevant, da die hier geprüften Nagel- bzw. Schraubendichtungen auch in der

Realität aufgrund ihrer Lage unter den Konterlatten keine UV-Strahlung erfahren. Dies gilt jedoch nicht für die Temperaturbedingung dieser Behandlung, weshalb das Konterlatten-Element während der UV-Bestrahlung in der Einhausung der Bestrahlungseinrichtung unterhalb des Durchdringungs-Elementes platziert wird.

3.2.2.2 *Alterung durch klimatische Belastung*

Die EN 13859-1 [2] schreibt nach der UV-Belastung eine 90-tägige Lagerung in einem Klima mit 70 °C und 90% rF vor. Hierbei soll die Luftbewegung maximal 0,2 m/s betragen, da stärkere Luftbewegungen negative Auswirkungen auf die Folien haben können. Allerdings sorgen reale Bedingungen in der Hinterlüftungsebene durchaus für Strömungen, die deutlich darüber liegen (siehe Kapitel 4). Aus diesem Grund sollte das adaptierte Verfahren für die Unterdachprüfung auch die hierdurch erhöhte Belastung abbilden. Aus diesem Grund wurde eine Klimakammer zur Aufnahme von maximal sechs Unterdach-Elementen gebaut (siehe Abb. 12), in der ein Gebläse für eine stetige Verwirbelung der Innenluft mit einer Strömungsgeschwindigkeit > 0,2 m/s an der Prüfkörperoberfläche sorgt. Hierdurch kann sich an der Folienoberfläche keine ruhende Luftschicht einstellen und es gelangt stets in ausreichender Menge frischer Sauerstoff an die Oberfläche, um den oxidativen Abbau der Kunststoffe in Gang zu halten.



Abb. 12: Innenansicht des von der HFA gebauten Klimakammer für maximal sechs Unterdach-Elemente zur klimatischen Alterung bei 70 °C und 90% rF. Im unteren Bereich sind Heiz- und Befeuchtungseinrichtungen zu sehen.

3.2.2.2.3 Messung der dynamischen Wassersäule

Als weiterer Indikator der Degeneration durch die natürliche und künstliche Alterung wurde jeweils eine gealterte (natürlich sowie künstlich) und eine nicht gealterte Probe hinsichtlich der dynamischen Wassersäule gemäß [2] geprüft. Diese Untersuchung wurde im Labor des Projektpartners Fa. Ewald Dörken AG durchgeführt, wobei durch den Prüfstand bedingt das obere Limit für diese Messung 20000 mm beträgt. Da diese Messung erst zu einem sehr späten Zeitpunkt der Projektlaufzeit als zusätzliche Untersuchung vorgeschlagen wurde, konnte nicht von allen Projektpartnern ein komplettes Probenet zur Verfügung gestellt werden.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Prüfverfahren

3.3.1.1 Dummy-Prüfung

Die Prüfung des Dummy-Elementes mit vorgegebenen Leckagen in den Bereichen T-Stoß, Kamin, Rohr und Traufblech brachte die in Abb. 13 gezeigten Ergebnisse, wobei die an den jeweilig bezeichneten Fehlstellen eingedrungene Wassermenge bei drei Prüfdurchgängen dargestellt ist.

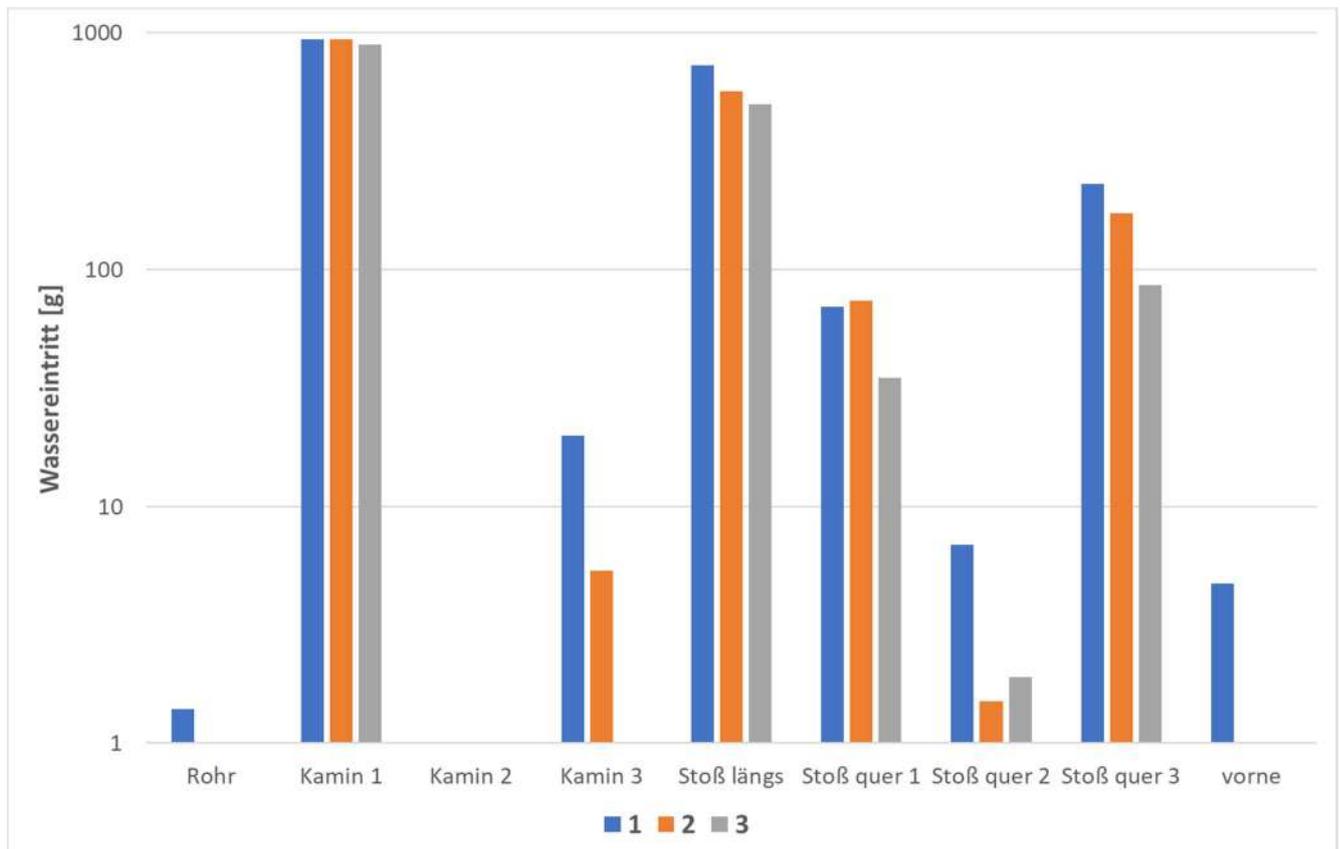


Abb. 13: Wassereintritte in die vorgegebenen Leckagen im Zuge der Dummy-Prüfungen in Gramm (logarithmische Darstellung)

3.3.1.2 Unterdachelemente

Bei der Prüfung der nicht bewitterten Unterdachelemente gemäß adaptiertem Verfahren (siehe 3.2.1) kam es zu keinen Wassereintritten.

Die Prüfung der bewitterten Unterdachelemente gemäß adaptiertem Verfahren (siehe 3.2.1) brachte die in

Tab. 3 angeführten Ergebnisse. In dieser Tabelle sind beiden Prüfkörpern (Nageldichtungs- und Durchdringungs-Element) der einzelnen Unterdachsystemen (UDS) die jeweils eingedrungenen Wassermengen mit Nennung der Leckagestelle zugeordnet. Aufgrund des großen Wassereintritts mit ab rinnendem Wasser bei zwei Probekörpern wurde auf die Ermittlung des von der Unterkonstruktion aufgenommenen Wassers verzichtet.

Tab. 3: Ergebnisse der Prüfung der künstlich gealterten Unterdachsysteme gemäß adaptiertem Prüfverfahren

UDS Nr.	Nageldichtheits-Element				Durchdringungs-Element			
	aufgenommen		abgeronnen		aufgenommen		abgeronnen	
	Beschr.	m [g]	Beschr.	m [g]	Beschr.	m [g]	Beschr.	m [g]
1	--	--	--	--	--	--	--	--
2	--	--	--	--	--	--	Manschette Rohr	9
3	--	--	--	--	--	--	--	--
4	--	--	--	--	nicht ermittelt (Schalung flächig nass)	--	Kamin links Mitte	929
							Kamin links unten	972
							T-Stoß oben	51
							T-Stoß Kreuzungsp.	629
							Rohr	3
5	--	--	--	--	nicht ermittelt (Schalung im Bereich T-Stoß flächig nass)	--	T-Stoß oben	185
6	--	--	--	--	--	--	--	--
7	--	--	--	--	--	--	Kamin rechts unten	1
8	nicht teilgenommen							

3.3.1.3 Messung Kontaktwinkel

Die Messung des Kontaktwinkels als Maß für die Polarität auf den Untergründen Glas und Kunststoff ergab, dass die Färbung des Wassers mit Uranin keinen signifikanten Einfluss auf die Polarität des Wassers hat (siehe Abb. 14).

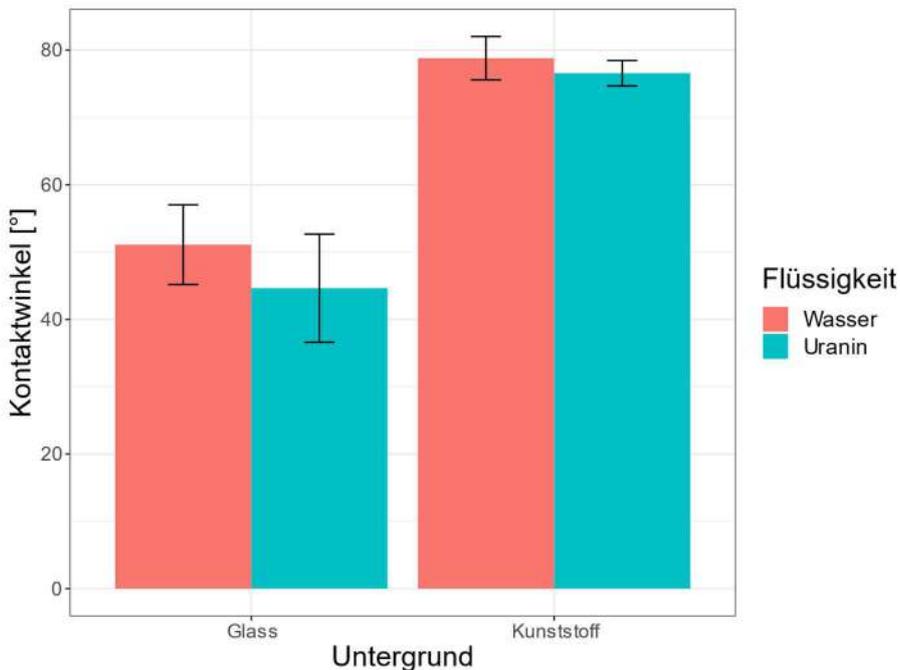


Abb. 14: Darstellung des Kontaktwinkels mit Standardabweichung von ungefärbtem und mit Uranin gefärbten Wasser auf den Untergründen Glas und Kunststoff

3.3.2 Alterung

3.3.2.1 Kleinversuche Freiland

Die Dauer der benötigten Freilandbewitterung bis zur Erreichung der akkumulierten Soll-Bestrahlung von 55 MJ/m² in Abhängigkeit von der jeweiligen Charge (Winter, Sommer, Herbst) kann aus Abb. 15 abgelesen werden. Das Diagramm enthält neben der akkumulierten Strahlungs-dosis auch die Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit in 10-Minuten-Schritten. Daraus ist ersichtlich, dass die erforderliche Bewitterungsdauer für die Wintercharge ca. 4,1 Monate, für die Sommercharge 1,4 und für die Herbstcharge 5,3 Monate betrug.

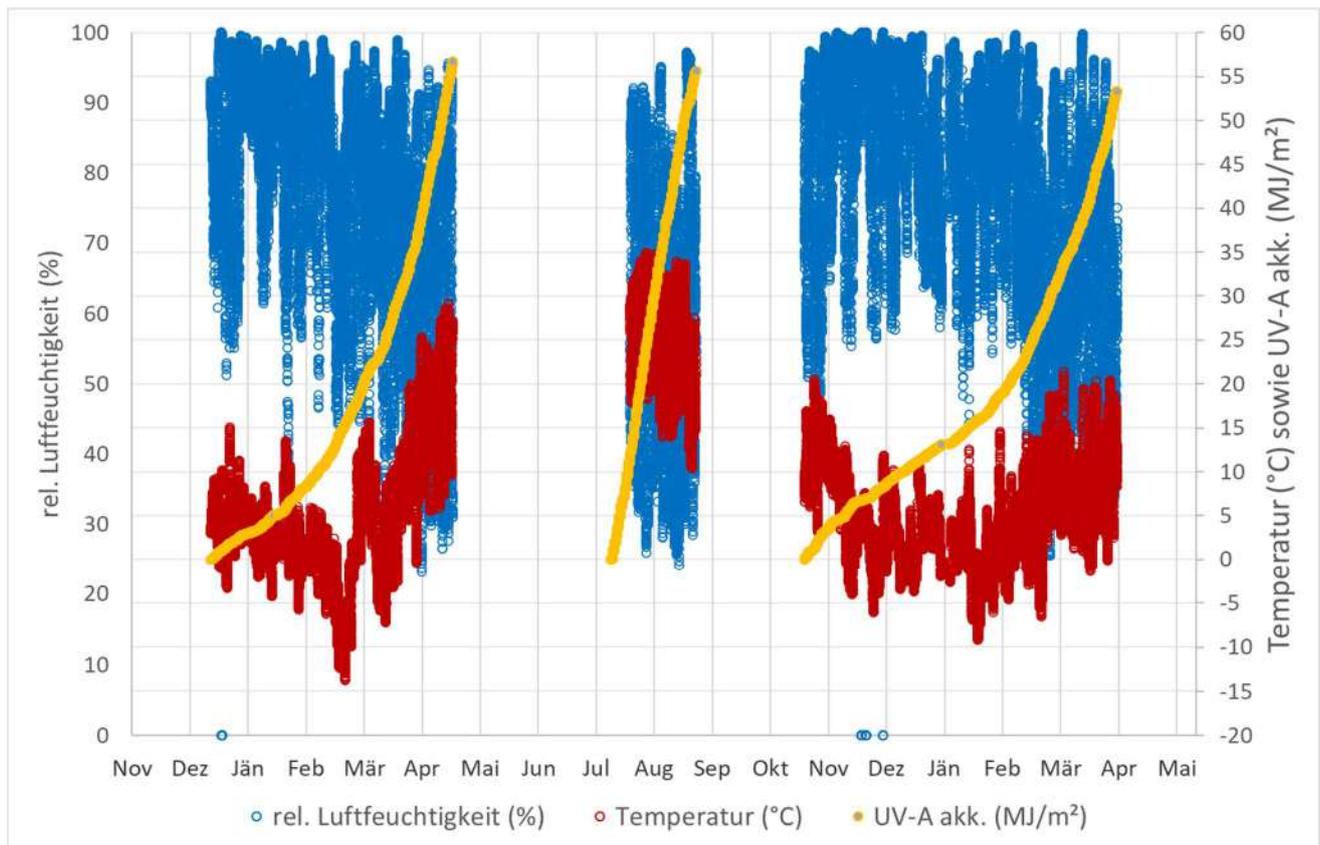


Abb. 15: Verlauf der akkumulierten UV-A-Strahlungsdosis, Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Charge der Freiland-Kleinproben. Von links nach rechts: Winter, Sommer, Herbst

Die Auswertung des Monitorings der einzelnen Chargen zeigen Abb. 16 bis Abb. 18. Darin sind die an den jeweiligen Monitoring-Terminen festgestellten Wassereintritte empirisch klassifiziert (leicht, moderat und stark) dargestellt. Hierbei sind auf der Ordinate die einzelnen UDS mit ihrer internen Nummer angeführt und auf der Abszisse der jeweilige Beobachtungszeitraum (Winter-, Sommer- und Herbstcharge). Auf der linken Seite der Abbildungen sind jeweils die Ergebnisse der Nageldichtheits-, auf der rechten Seite jene der Durchdringungs-Elemente gezeigt. Die dargestellten Punkte repräsentieren jeweils einen aufgetretenen Wassereintritt zu einem Monitoring-Termin, wobei geringfügige Wassereintritte gelb, moderate orange und starke rot dargestellt sind.

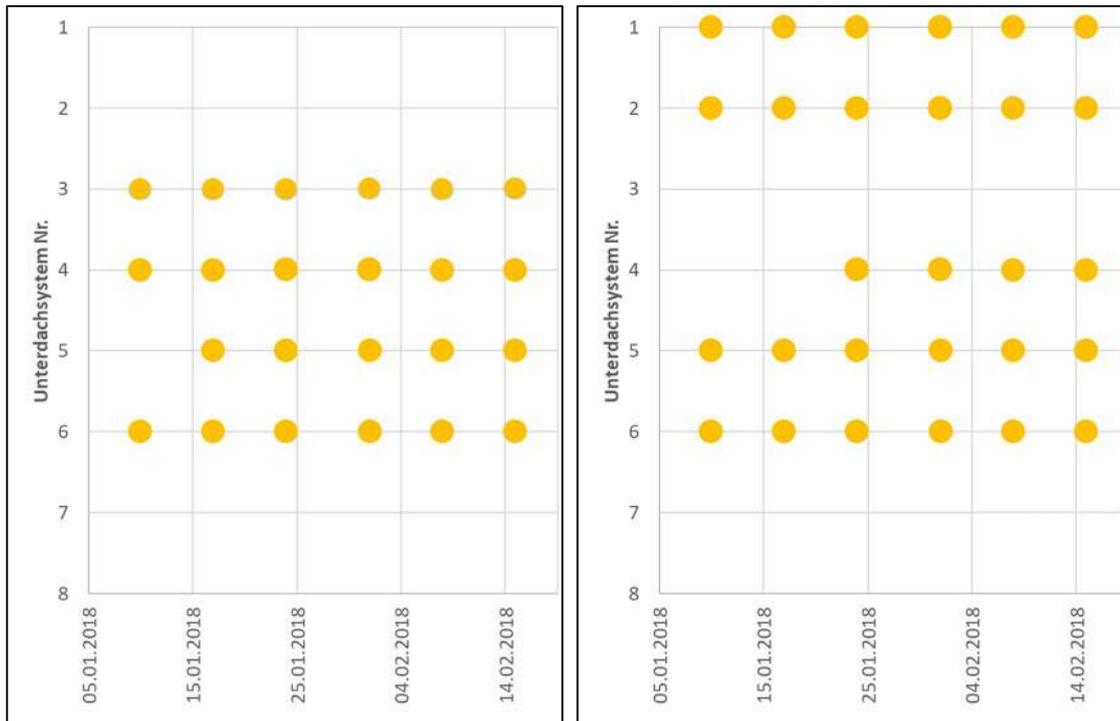


Abb. 16: Monitoring-Dokumentation von Wassereintritten bei den Freiland-Kleinproben der Wintercharge. Links: Nageldichtheits-Element, rechts: Durchdringungselement. Dargestellt sind leichte (gelb), moderate (orange) und starke (rot) Wassereintritte.

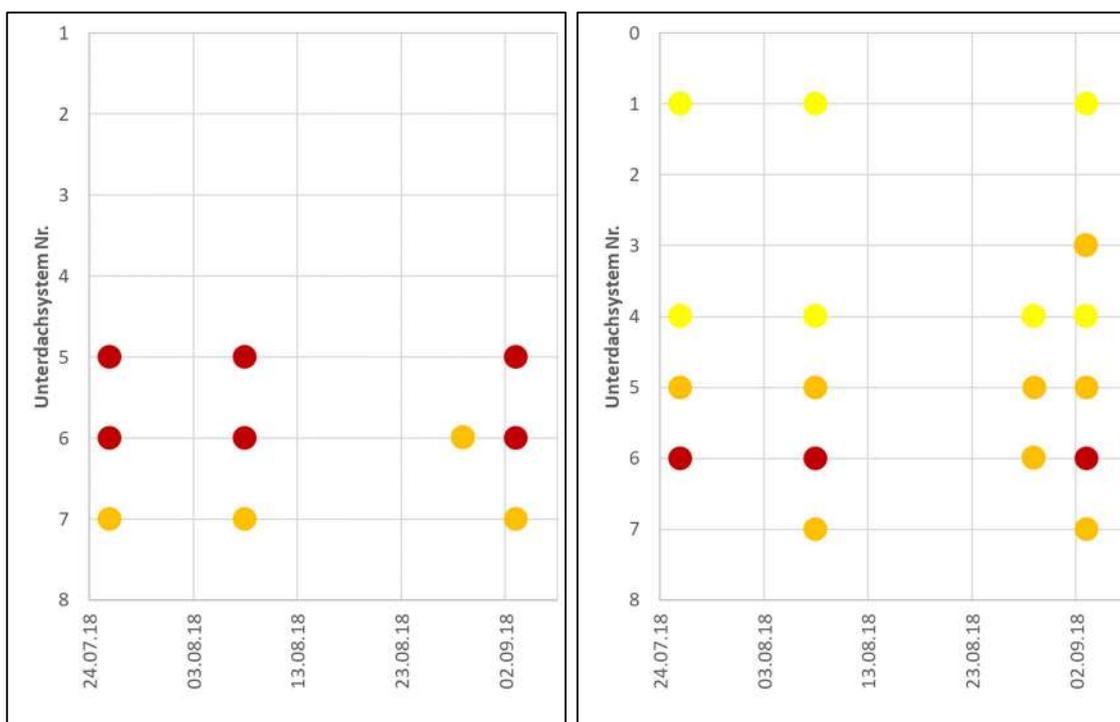


Abb. 17: Monitoring-Dokumentation von Wassereintritten bei den Freiland-Kleinproben der Sommercharge. Links: Nageldichtheits-Element, rechts: Durchdringungselement. Dargestellt sind leichte (gelb), moderate (orange) und starke (rot) Wassereintritte.

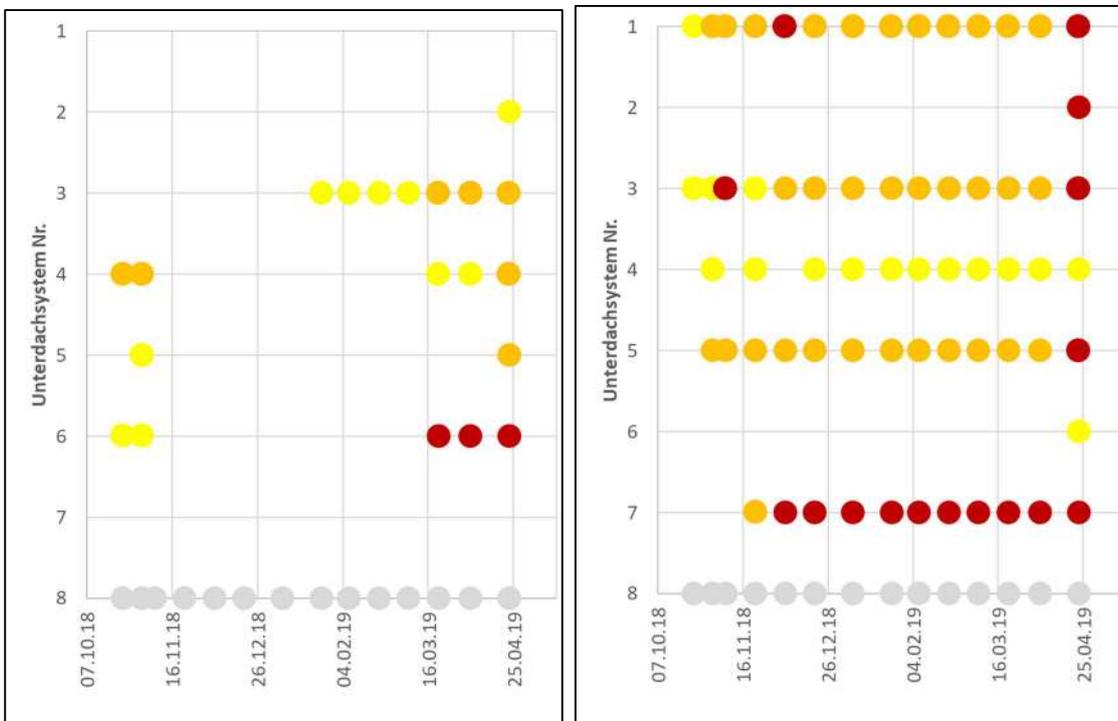


Abb. 18: Monitoring-Dokumentation von Wassereintritten bei den Freiland-Kleinproben der Herbstcharge. Links: Nageldichtheits-Element, rechts: Durchdringungselement. Dargestellt sind leichte (gelb), moderate (orange) und starke (rot) Wassereintritte. Grau: Unterdachsystem hat nicht teilgenommen.

3.3.2.1.1 FT-IR-Spektroskopie-Monitoring

Die gemittelten FTIR-Spektren nach der Zeit in der Freilandbewitterung sind in Abbildung Abb. 21 bis Abb. 25 dargestellt. System Nr. 8 hat an der Untersuchung nicht teilgenommen. Auf der Abszisse ist jeweils das gemessene Infrarotspektrum einer Bahn, wobei die Spektren einzelner Messtermine entlang der Ordinate überlagert sind, die auch die Zeitdauer der Alterung in Tagen anzeigt. Veränderungen der Spektren über die Zeit deuten hierbei auf mehr oder weniger degenerative Veränderungen der Polymerketten hin.

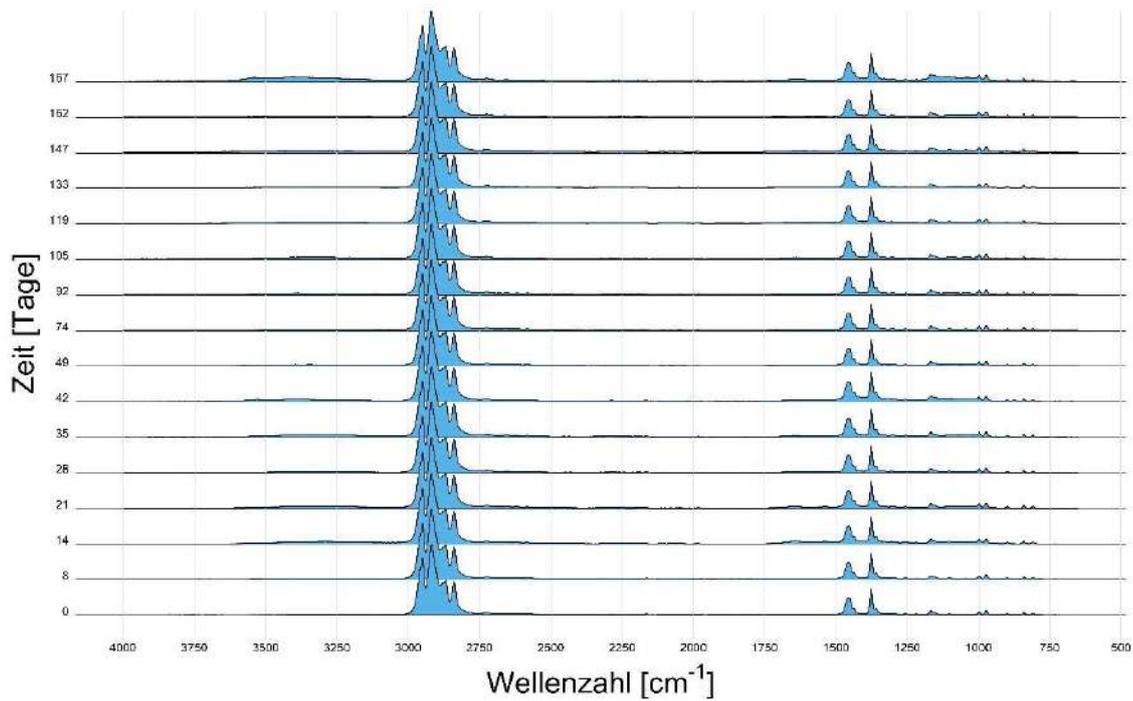


Abb. 19: Unterdachsystem 1, gemittelte FTIR-Spektren über die Zeit in der Freilandbewitterung

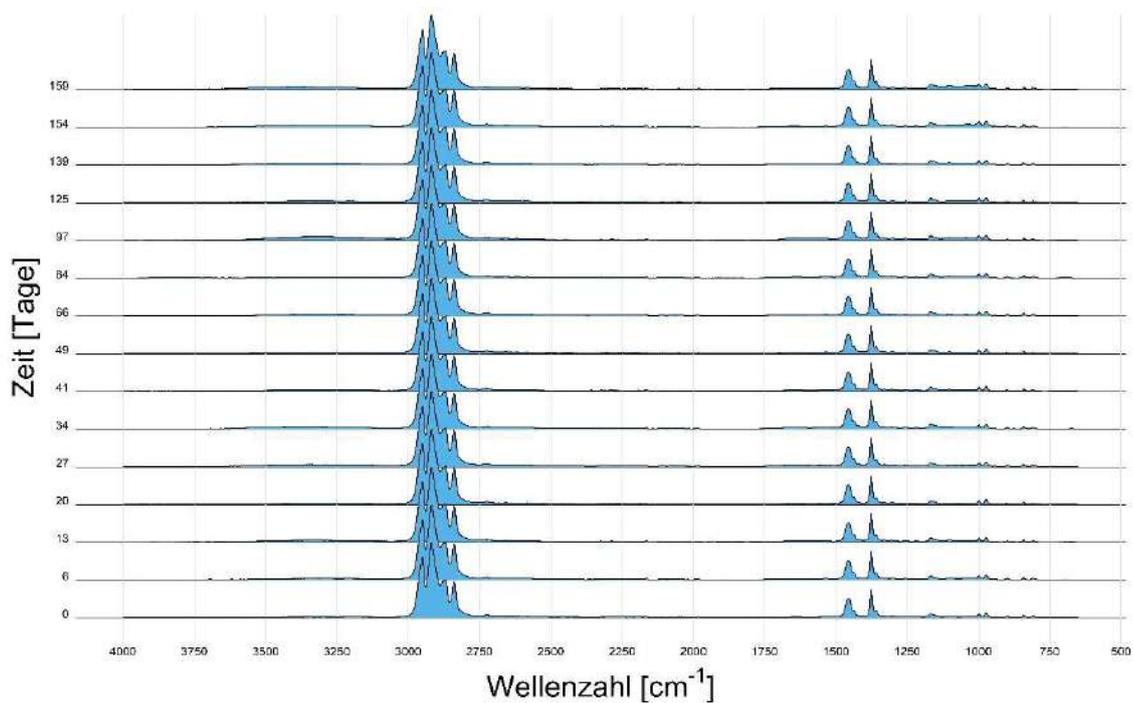


Abb. 20: Unterdachsystem 2, gemittelte FTIR-Spektren über die Zeit in der Freilandbewitterung

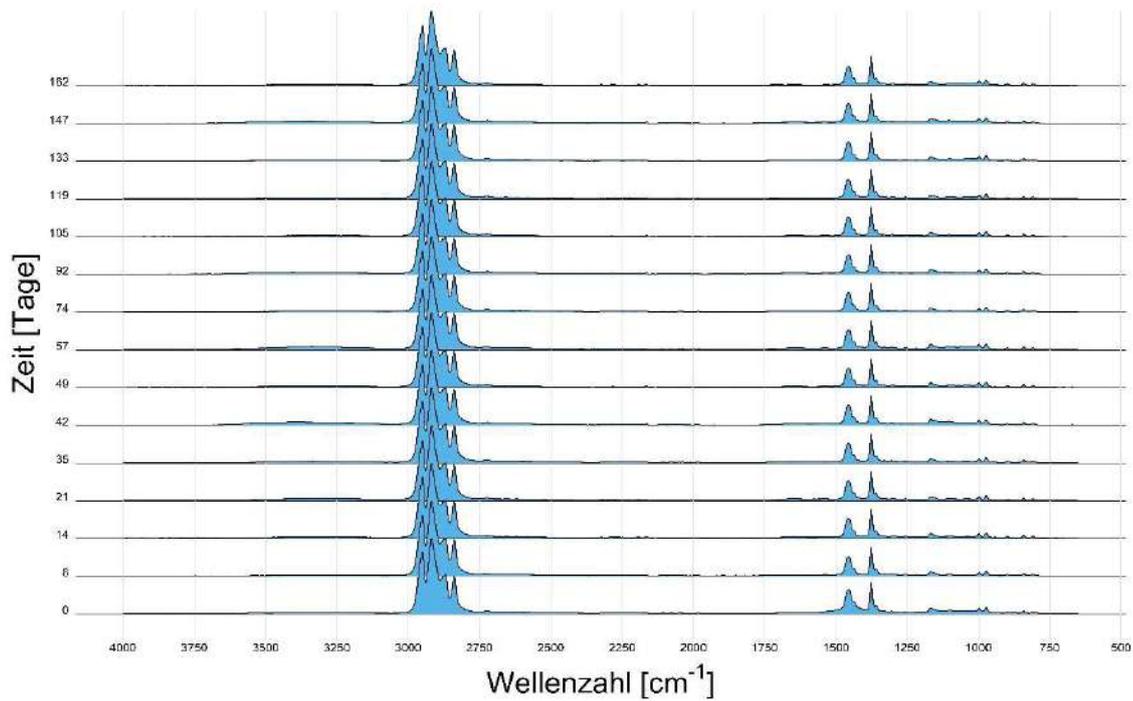


Abb. 21: Unterdachsystem 3, gemittelte FTIR-Spektren über die Zeit in der Freilandbewitterung

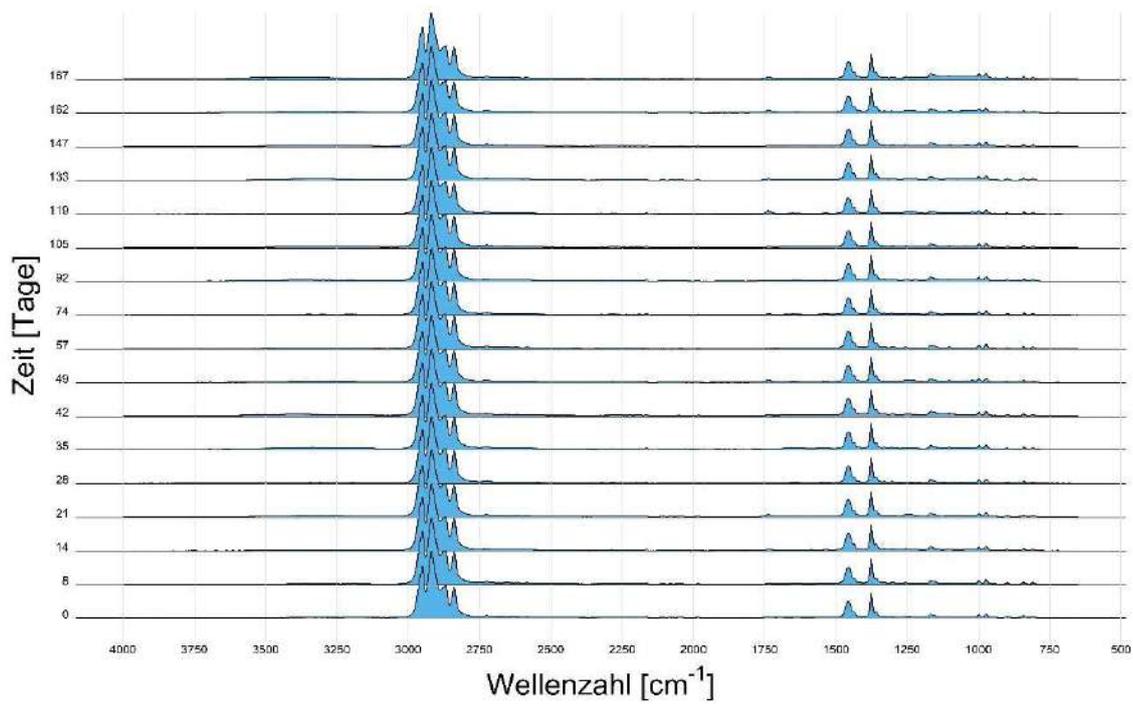


Abb. 22: Unterdachsystem 4, gemittelte FTIR-Spektren über die Zeit in der Freilandbewitterung

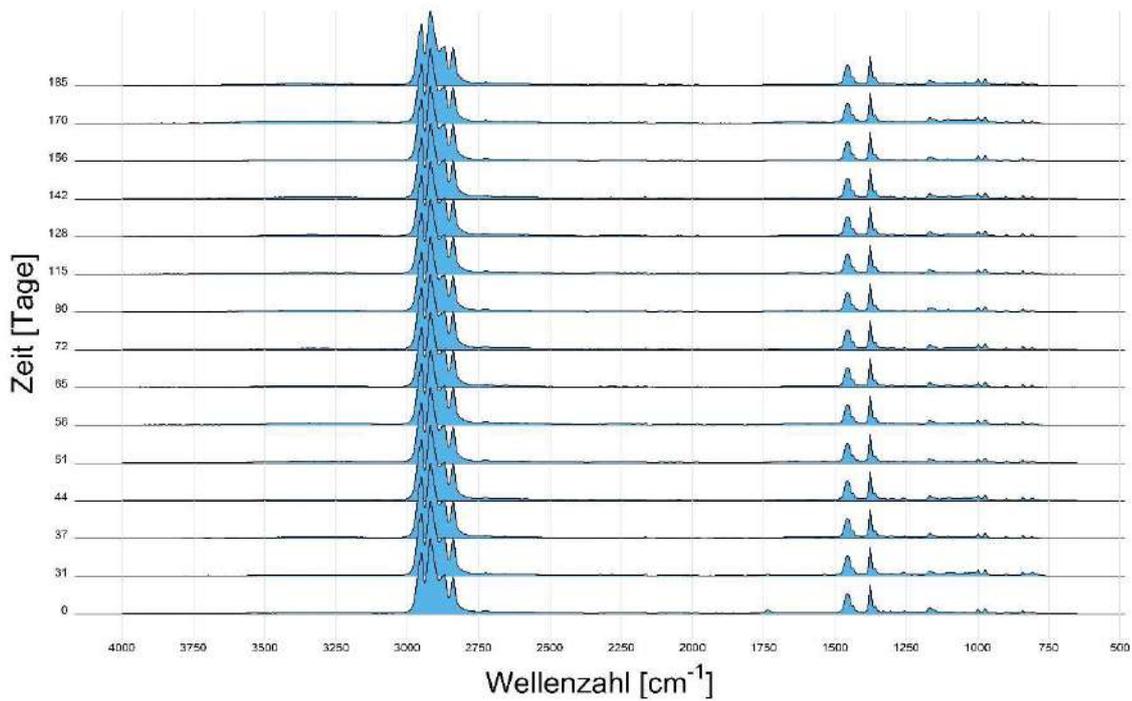


Abb. 23: Unterdachsystem 5, gemittelte FTIR-Spektren über die Zeit in der Freilandbewitterung

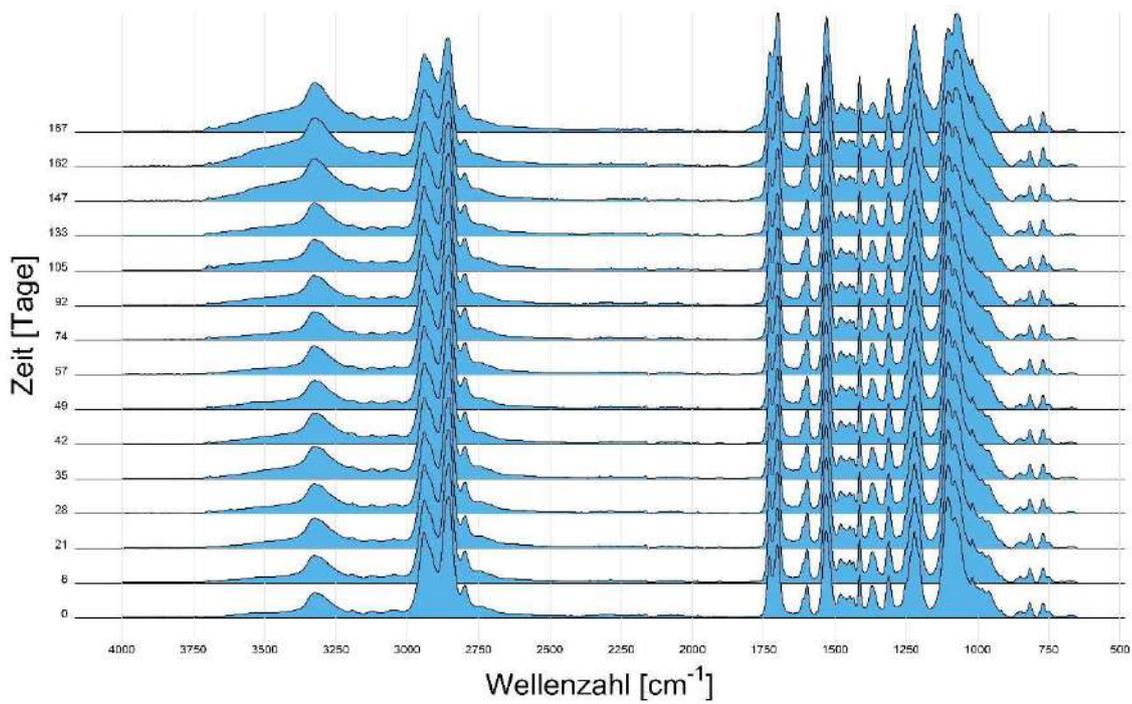


Abb. 24: Unterdachsystem 6, gemittelte FTIR-Spektren über die Zeit in der Freilandbewitterung

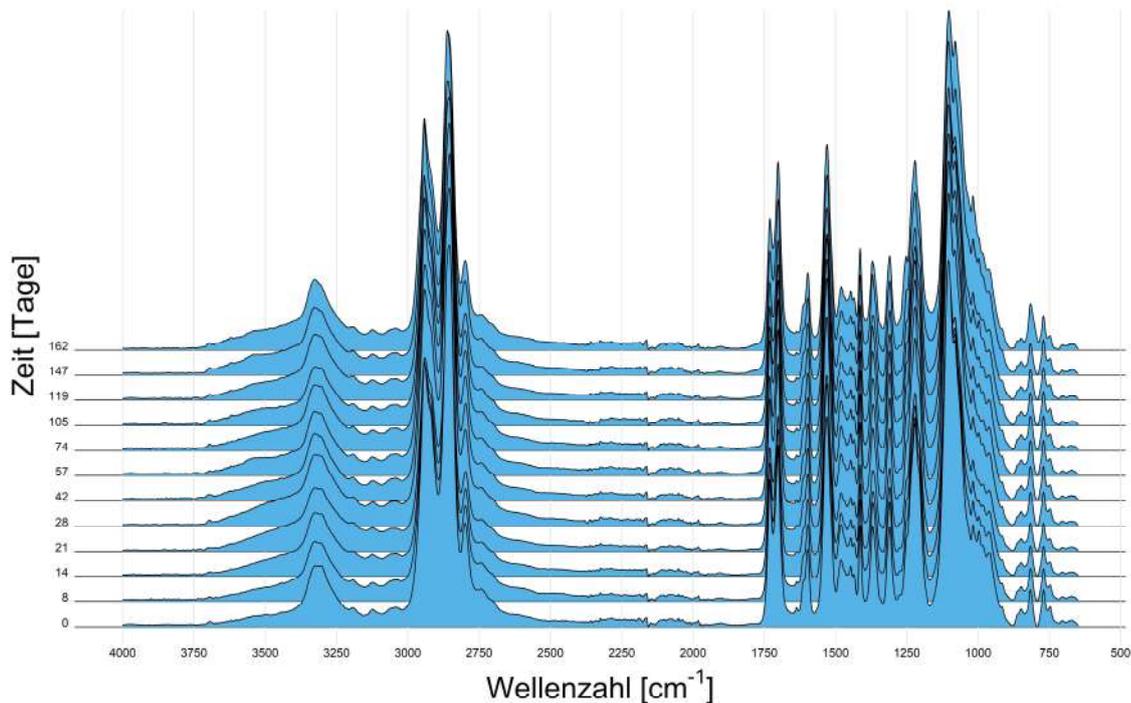


Abb. 25: Unterdachsystem 7, gemittelte FTIR-Spektren über die Zeit in der Freilandbewitterung

3.3.2.2 Künstliches Alterungsverfahren

Das in 3.2.2.2 beschriebene künstliche Alterungsverfahren wurde auf die Unterdachelemente (siehe 3.2.1.1) der Projektpartner angewendet.

3.3.2.2.1 Messung der dynamischen Wassersäule

Die Messung der dynamischen Wassersäule der einzelnen Systembahnen der Projektpartner gemäß [2] vor bzw. nach natürlicher bzw. künstlicher Alterung erbrachte, soweit Proben zur Verfügung gestellt werden konnten (siehe 3.2.2.2.3), die in Abb. 26 dargestellten Werte. System 8 hat an dieser Messung nicht teilgenommen. Aus technischen Gründen erfolgt bei einer Wassersäule von 20000 mm ein Abbruch der Prüfung. Die im Diagramm gezeigten Säulen repräsentieren die maximal erreichte Höhe der Wassersäule vor Durchtritt des dritten Tropfens Wasser durch die jeweilige Unterdachbahn, wobei die Untersuchung stets an drei Proben durchgeführt wurde. Über den internen Nummern der Unterdachsysteme sind die Proben der nicht gealterten, der in der Sommercharge natürlich gealterten und der künstlich gealterten Proben der jeweiligen Bahn gruppiert.

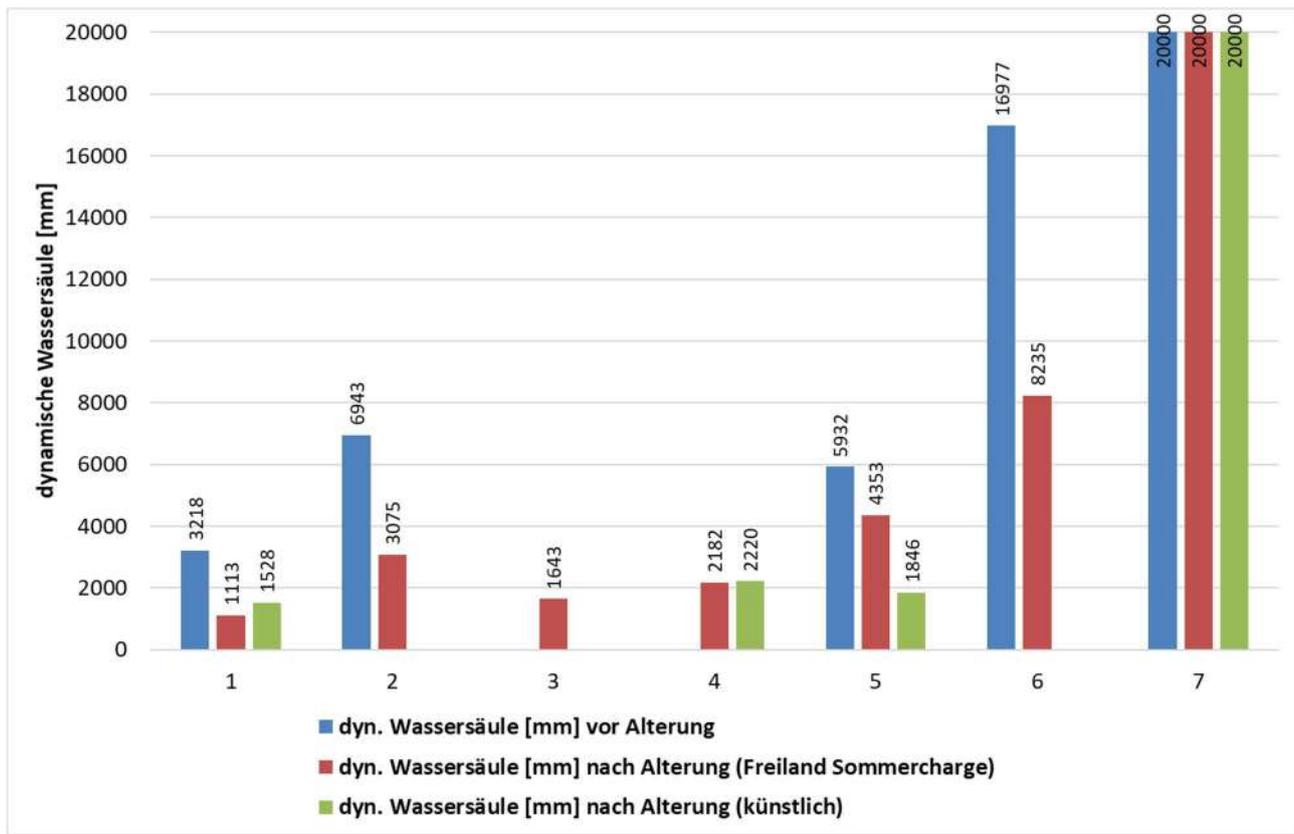


Abb. 26: Darstellung der gemessenen dynamischen Wassersäule gemäß EN 13859-1 der einzelnen Systembahnen 1 bis 7 vor und nach natürlicher bzw. künstlicher Alterung. System 8 hat der Untersuchung nicht teilgenommen.

3.4 Diskussion Prüfverfahren und Alterung

Die Untersuchungen im Rahmen des Arbeitspaketes „Prüfung“ haben gezeigt, dass das adaptierte Prüfverfahren grundsätzlich gut geeignet ist, Unterdachsysteme ganzheitlich und praxisnah hinsichtlich ihrer Regensicherheit zu prüfen. Das auf 18 M-% vorkonditionierte Bauholz ist hinsichtlich der Einbauholzfeuchtigkeit im vorliegenden Einsatzbereich als durchaus realistisch zu betrachten.

Der erste Prüfdurchgang vor der künstlichen Alterung wird deshalb als sinnvoll betrachtet, da die langjährige Erfahrung der HFA mit der Prüfung von Unterdachsystemen gezeigt hat, dass manche Systeme bzw. Systemkomponenten eine gewisse Zeit benötigen, bis sie eine perfekte Verbindung zum Untergrund eingehen. Gerade im neuen, ungedeckten Zustand jedoch ist die funktionierende Regensicherheit des Unterdaches von großer Bedeutung.

Die anschließende zweiwöchige Bestrahlung mit UV-A bei 50 °C führt zu einem starken Austrocknen des Holzes, im Zuge der Untersuchungen wurden 5 M-% und knapp darunter gemessen. Dies spiegelt zum Einen ebenso realistische Gegebenheiten wider, wenn Holz unter der Dacheindeckung über längere Perioden hohen Temperaturen ausgesetzt ist, zum Anderen stellt sich hierdurch ein Effekt ein, der auch im Realfall auftritt und häufig Probleme verursacht: Im Zuge der Austrocknung schwinden die

Konterlatten, wodurch der Nagel-Anpressdruck auf das Nageldichtband sinkt oder komplett entfällt und die Dichtheit beeinträchtigt wird. In der anschließenden Klimalagerung wird das Holz zwar wieder aufgefuechtet, wodurch es wiederum quillt, allerdings lediglich auf ca. 16 M-%. Diese Feuchteschwankungen führen in Summe zu realitätsnahen Quell- und Schwindbewegungen und stellen gleichzeitig eine zusätzliche Belastung neben jener durch UV-Strahlung und Klimalagerung dar.

Der Ansatz, die tatsächlich eintretende Wassermenge an einzelnen Probepunkten mittels Nuten getrennt zu erfassen, hat sich als praktikabel erwiesen. Im Zuge der durchgeführten Prüfungen konnte durch die vorgestellte Methode eine Migration von einem Prüfpunkt zu einem anderen ebenso verhindert werden wie Schwund an eingetretenem Wasser.

Die Einfärbung des Prüfwassers mit Uranin könnte eine brauchbare Methode sein, um selbst kleinste Leckagen aus informativen Gründen gut sichtbar zu machen, da das Mittel unter UV-Licht fluoresziert und die Untersuchungen des Kontaktwinkels gezeigt haben, dass dies physikalisch keine prüfungsrelevanten Auswirkungen hat. Im Zuge des vorliegenden Projektes wurde jedoch auf einen Einsatz bei den Prüfungen vorerst verzichtet.

Die Dummy-Prüfung hat jedoch gezeigt, dass es hinsichtlich der Reproduzierbarkeit noch weiteren Untersuchungsbedarf gibt, da einzelne Prüfpunkte hierbei erhöhte Abweichungen zwischen den einzelnen Prüfdurchgängen aufgezeigt haben (siehe Abb. 13). Beobachtungen während der Durchführungen haben gezeigt, dass die Unterdachbahn im Bereich der Leckage durch die beaufschlagte Belastung mit Sprühwasser und Wind immer wieder unterschiedliche Auswölbungen angenommen hat, was für die Abweichungen verantwortlich sein könnte.

Die Methode der Auswertung durch zwei unterschiedliche Kriterien berücksichtigt neben einer gerade noch akzeptablen Aufweuchtung der Holzkonstruktion auch die Gebrauchstauglichkeit der Dachkonstruktion. So wird einerseits eine mäßige Wasseraufnahme des Konstruktionsholzes durchaus toleriert, da diese aufgrund des diffusionsoffenen Aufbaus ohnehin wieder austrocknen kann. Abtropfendes Wasser wird hingegen restriktiver beurteilt, da hierdurch die Durchfeuchtung der Dachkonstruktion und auch der raumseitigen Beplankung droht. Durch die derart definierten Auswertekriterien kann davon ausgegangen werden, dass im Realfall die eingedrungene Wassermenge wieder schadensfrei austrocknen kann und die innere Beplankung bzw. die Gefachdämmung nicht durchfeuchtet wird. Hierzu ist noch zu ergänzen, dass die Auswertung nach dem Kriterium „Wasseraufnahme“ im Falle des Versagens nach dem Kriterium „abrinnesendes Wasser“ keine Relevanz hat und dass ein Versagen nach dem ersteren Kriterium wohl auch eher der Ausnahmefall bleiben wird, was aus oben dargelegten Gründen auch bewusst so gewollt ist. Deutlich wird dies anhand zweier Probekörper gezeigt, aufgrund derer Wassereintritten in zumindest einem der Fälle mit Sicherheit mit einem Wasserdurchtritt durch die innere Beplankung des Daches zu rechnen wäre.

Bis auf System 4 mit seinen multiplen, starken Wassereintritten und System 5 mit einem starken Eintritt zeigten sich die untersuchten Systeme sehr robust gegenüber der künstlichen Alterung, obwohl die Belastung die Materialien augenscheinlich stark beansprucht (siehe als Beispiel Abb. 27).



Abb. 27: Beispiel eines Unterdachsystems mit Flüssigabdichtung der Kamineinbindung und Traublecheindichtung bei der Herstellung (links) und nach der künstlichen Alterung (rechts)

Im direkten Vergleich mit der natürlichen Bewitterung der Freiland-Kleinproben lassen sich keine Parallelen ziehen (vgl. Abb. 16 bis Abb. 18). Unter jenen Bedingungen weisen auch andere Systeme qualitativ gleiche und z.T. stärkere Wassereintritte auf, wobei die Auswertung dieser Proben auf dem bisherigen Prüfverfahren basiert und somit einen weniger spezifisch quantitativen Charakter hat. Zusätzlich spielt auch die individuelle Verarbeitungsqualität eine Rolle, was die Vergleichbarkeit erschwert. Generell haben sich jedoch bei den Freilandproben bei mehr Proben bzw. Systemen Wassereintritte unterschiedlicher Ausprägung ereignet, insbesondere bei der Herbstcharge. Diese Charge war mit Abstand die längste Zeit und auch über die Wintermonate der Bewitterung ausgesetzt, was darauf hindeutet, dass die Dauer der Einwirkung mit Klimaschwankungen wie etwa Frost-Tau-Wechsel einen degenerativen Einfluss haben könnten. Dies wird durch den Umstand untermauert, dass die Sommercharge mit ihrer deutlich kürzeren, sommerlichen Belastung die vergleichsweise geringsten Wassereintritte hervorbrachte. Aus den genannten Gründen scheint es angezeigt, die Auswirkungen von starken Temperaturschwankungen, wie sie gerade in der Übergangszeit auftreten, weiter gehend zu untersuchen.

Die Messung des Alterungsverhaltens mittels FTIR-Spektroskopie macht deutlich, dass die Decklagen der Dachunterspannbahnen aus unterschiedlichen Basispolymeren bestehen und sich folglich auch hinsichtlich der Alterungsmechanismen unterscheiden. Auch bei laut Herstellerangaben gleichen Basispolymeren wurden zumeist kleine Unterschiede in den Ausgangsspektren festgestellt. Dies kann z.B. durch eine unterschiedliche Rezeptierung erklärt werden (siehe auch Abb. 21 bis Abb. 25). Aufgrund der Unterschiede sowohl in den Ausgangsspektren als auch in den Abwitterungsmechanismen wurde für den quantitativen Vergleich von Freiland- und Schnellbewitterung für jede Dachunterspannbahn ein eigenes chemometrisches Kalibrationsmodell erstellt. Die Ergebnisse zeigten dabei für das System 6 nach dem Ende der Schnellbewitterung eine äquivalente

Freilandbewitterungszeit von ~250 Tagen während das System 1 eine äquivalente Zeit von 300 Tagen zeigte. Beim System 3 war der Polymerabbau geringer und entsprach in etwa einer äquivalenten Freilandbewitterungszeit von 60 Tagen.

Es zeigt sich also, dass die Ergebnisse der künstlichen Alterung nicht analog zu jenen der natürlichen Bewitterung ausfallen. Eine allgemein gültige Vorhersage der äquivalenten Freilandbewitterungszeit in der Laborbewitterung lässt sich daher nicht machen, da diese Parameter von Produkt zu Produkt stark schwanken. Hierzu ist jedoch zu sagen, dass die Messung des Polymerabbaus in der Funktionsschicht der Folie ein indirektes Maß für die Funktionstauglichkeit einer Bahn darstellt und hierdurch gewisse Unschärfen bei der Beurteilung bestehen bleiben. Zudem beurteilt die Methode lediglich die Bahn und nicht das System.

Hinsichtlich Beurteilung betrachtet zwar auch die Untersuchung der dynamischen Wassersäule lediglich die Bahn und nicht das System, allerdings ist die Methode ansonsten direkt in die Praxis übersetzbar, was diesbezüglich einen Vorteil darstellt. Es zeigt sich bei jenen Produkten, von welchen Proben für beide Varianten der Alterung vorhanden waren, kein homogenes Bild (siehe Abb. 26), allerdings konnte gezeigt werden, dass die künstliche Alterung tendenziell zu einer Degeneration führt, die in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie die natürliche Alterung. Für detailliertere Aussagen sowie eine etwaige Verfahrensanpassung wäre jedoch eine deutlich größere Probenanzahl als sie im Rahmen des Projektes untersucht erforderlich. Die Qualität der Bahnen blieb in den vorliegenden Fällen in einem Bereich, der für die Funktion in der Fläche ausreicht, da ja die aufgetretenen Wassereintritte allesamt im Bereich von Ein- oder Anbindungen liegen, was wiederum die Bedeutung dieser Art von Systemprüfung für die praxismgerechte Prüfung von Unterdächern unterstreicht.

4 Bedingungen in der Hinterlüftungsebene

4.1 Stand des Wissens und Forschungsbedarf

In einer Arbeit zu Dachdeckung und -belüftung zeigt Künzel [16] den Schwankungsbereich der Temperatur an der Rückseite der Dachziegel von hinterlüfteten Steildächern (siehe Abb.28).

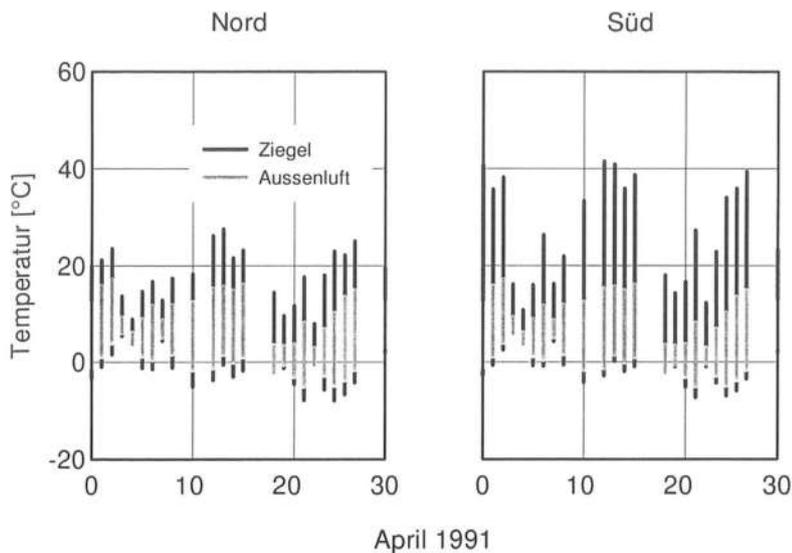


Abb.28: Tagesschwankungen der Außen- und der Ziegeltemperatur (gemessen auf der Rückseite) an südlich und nördlich ausgerichteten Dachflächen (Dachneigung jeweils 28°) während des Monats April [16]

Die Ergebnisse legen, ebenso wie in [12], eine hohe Schwankungsbreite der Temperaturen im Hinterlüftungsbereich und auf dem Unterdach nahe, welche in Abhängigkeit von Außentemperatur, Solarstrahlung, Dachneigung und -orientierung, Sparrenlänge, Deckungsfarbe und Hinterlüftungsquerschnitt bzw. Ausbildung der Zu- und Abluftöffnungen variieren kann, sind jedoch eine Momentaufnahme eines Standortes (Holzkirchen, D) in einem Jahr (1991) an zwei unterschiedlichen Dachflächen mit einer Dachneigung (28°). Darüber hinaus lassen sich die Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene nicht mit der gebotenen Zuverlässigkeit aus den Oberflächentemperaturen alleine ableiten. In einem Forschungsvorhaben der HFA zu flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen [17] wurden bei Messungen der Oberflächentemperatur von Flachdächern erhebliche Temperaturdifferenzen in Abhängigkeit von der Farbe der Dachbahnen festgestellt. Die Daten zeigen, dass sich die Oberflächentemperatur im Vergleich zur Außenlufttemperatur durch solare Bestrahlung um bis zu ca. 50 K erhöhen kann, was auch die Temperaturen in der Hinterlüftungsebene geneigter stark beeinflussen würde.

Experimentelle Untersuchungen der Holzforschung Austria zu den Luftströmungen in der Hinterlüftungsebene von flachgeneigten Dächern bis 7° [18] zeigen, dass es komplexe Zusammenhänge zwischen Luftströmungsgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene und der Dachausbildung (Dachoberflächenfarbe und somit -temperatur/Dachneigung/Zu- bzw. Abluftöffnung

und Höhe des Strömungskanals) gibt. Größere Dachneigungen, wie sie beim Einsatz von Unterdachsystemen häufig vorkommen wurden in der dortigen Arbeit nicht untersucht. Die Autoren in [18] kommen zu dem Schluss, dass für eine umfassende Berücksichtigung aller maßgebenden Einflussfaktoren Berechnungsmodelle heranzuziehen sind.

Bereits 1986 hat Liersch [3] ein eher komplexes Berechnungs- bzw. Abschätzungsmodell für den Wärmedurchgang durch belüftete Dachkonstruktionen hergeleitet. Hierzu ist unter anderem die mittlere Temperatur der Hinterlüftungsebene zu ermitteln. Dabei werden grundsätzlich die Zustände

- Winterliche Temperaturverhältnisse ohne Unterkühlung der Dachoberfläche
 - Winterliche Temperaturverhältnisse mit Unterkühlung der Dachoberfläche durch Abstrahlung
 - Winterliche Temperaturverhältnisse bei schneebedeckter Dachoberfläche
 - Sommerliche Temperaturverhältnisse mit Aufheizung der Dachoberfläche durch Sonneneinstrahlung
- unterschieden und diverse Einflussparameter strömungsmechanischer und thermischer Vorgänge im Belüftungsraum bzw. bei belüfteten Dachkonstruktionen in das Modell implementiert.

Einen vereinfachten Simulationsansatz verfolgt Kölsch in [19], indem die Dachdeckung und Hinterlüftungsebene in der Simulation nicht berücksichtigt werden, sondern die Temperaturen auf dem Unterdach über die Anpassung empirisch ermittelter Strahlungs- und Konvektionsparameter, sogenannter effektiver Übergangparameter, so verändert werden, dass sie gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Diese Parameter können in Folge im Simulationsprogramm WUFI® in Abhängigkeit von der Lage im Dach (Traufe, Mitte, First) implementiert werden.

Forschungsbedarf

Wie in Abschnitt 3.1 gezeigt wird, sind umfassende Untersuchungen zu den klimatischen Bedingungen in den Hinterlüftungsebenen von Dächern bisher nicht verfügbar. Bzgl. der Prognose solcher Klimaten kann z.B. die Arbeit von Liersch [3] oder der vereinfachte Simulationsansatz nach [19] herangezogen werden. Die für [3] benötigten Eingangsdaten sind jedoch für die alltägliche baupraktische Anwendung sehr umfangreich. Durch den Ansatz nach [19] wird der Dachaufbau an sich nicht abgebildet, was Restriktionen bzgl. der Bauteilaufbauten (z.B. bei der Länge und Höhe der Hinterlüftungsebene) mit sich bringen kann.

Aus diesen Gründen besteht der Bedarf, die hygrothermischen Vorgänge und Klimate in der Hinterlüftungsebene von verschiedenen Dachaufbauten messtechnisch detailliert zu erfassen, um Aussagen zu den klimatischen Belastungen von Unterdachsystemen treffen zu können. Außerdem sollen die Messdaten dazu dienen, für Planer und Anwender ein möglichst einfach handhabbares Prognosemodell abzuleiten.

4.2 Thermischer Auftrieb

4.2.1 Material und Methoden

Für die Laborversuche zum thermischen Auftrieb wurde ein Versuchsstand aufgebaut. Für die Versuche wurden die Parameter Dachneigung, Sparrenlänge, Hinterlüftungshöhe, Temperaturdifferenz (zwischen HLE und Umgebungstemperatur), Fugen in der Eindeckung und die Anzahl der Lattungen variiert.

Eine Übersicht zu den untersuchten Varianten in den Laborversuchen zum thermischen Auftrieb gibt Tab. 4.

Eine Berechnungs- bzw. Vorhersagemethode des thermischen Auftriebs in der HLE von geneigten Dächern wurde durch Klaus W. Liersch 1986 mittels eines mathematischen Modelles erstellt [3]. Dieses Berechnungsmodell wurde im Programm Matlab nachmodelliert und mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen abgeglichen. Der programmierte Code aus [20] ist in Anhang B nachzulesen.

Tab. 4: Übersicht zu den im Laborversuch untersuchten Parametern

Variante	ΔT	Sparrenlänge		Neigung				Eindeckung					Konterlattenhöhe	
		5 m	2,5 m	10°	20°	30°	40°	Ziegeleindeckung, mit Dachlattung		OSB Eindeckung (luftdicht mit Folie)			ca. 8 cm	ca. 5 cm
								Fugen offen *	Fugen abgeklebt *	mit Dachlattung, Achs- abstand 31 - 34,1 cm*	mit Dachlattung, Achs- abstand 68,2 cm	Ohne Dach- lattung		
V 5 40 Ziegel	x	x					x	x		x				x
V 5 40 Ziegel gesch	x	x					x		x	x				x
V 5 30 Ziegel	x	x				x		x		x				x
V 5 20 Ziegel	x	x			x			x		x				x
V 5 10 Ziegel	x	x		x				x		x				x
V 5 40 5+l OSB	x	x					x			x				x
V 5 40 5+l/2 OSB	x	x					x				x			x
V 5 30 5+l OSB	x	x				x				x				x
V 5 20 5+l OSB	x	x			x					x				x
V 5 20 5+l/2 OSB	x	x			x						x			x
V 5 10 5+l OSB	x	x		x						x				x
V 5 40 5 OSB	x	x					x						x	x
V 5 20 5 OSB	x	x			x								x	x
V 5 40 8+l OSB	x	x					x			x			x	
V 5 20 8+l OSB	x	x			x					x			x	
V 5 40 8 OSB	x	x					x						x	
V 5 20 8 OSB	x	x			x								x	

* Achsabstand Dachlattung 34,1 cm bei 5 m Dachlänge und 31,25 cm bei 2,5 m Dachlänge

ΔT : Differenz zwischen der mittleren Temperatur in der Hinterlüftungsebene und der Umgebungstemperatur

Fortsetzung Tab. 4: Übersicht zu den im Laborversuch untersuchten Parametern

Variante	ΔT	Sparrenlänge		Neigung				Eindeckung					Konterlattenhöhe	
		5 m	2,5 m	10°	20°	30°	40°	Ziegeleindeckung, mit Dachlattung		OSB Eindeckung (luftdicht mit Folie)			ca. 8 cm	ca. 5 cm
								Fugen offen *	Fugen abgeklebt *	mit Dachlattung, Achsabstand 31 - 34,1 cm*	mit Dachlattung, Achsabstand 68,2 cm	ohne Dachlattung		
V_25_40_Ziegel	x		x				x	x		x				x
V_25_30_Ziegel	x		x			x		x		x				x
V_25_20_Ziegel	x		x		x			x		x				x
V_25_10_Ziegel	x		x	x				x		x				x
V_25_40_5_OS	x		x				x						x	x

* Achsabstand Dachlattung 34,1 cm bei 5 m Dachlänge und 31,25 cm bei 2,5 m Dachlänge

ΔT : Differenz zwischen der mittleren Temperatur in der Hinterlüftungsebene und der Umgebungstemperatur

4.2.1.1 Sensoren und Messtechnik

4.2.1.1.1 Messsensorik und Messgenauigkeit

Zur Messung wurden im Laborversuch 72 Stück Temperaturfühler (NTC-Fühler), ein Kugel-Thermoanemometer und ein Laminar Master Flow – Gerät eingesetzt. Eine Übersicht zu den verwendeten Messgeräten gibt Tab. 5.

Das Laminar Master Flow – Gerät der Firma Tetrattec besteht aus mehreren Komponenten, die im Pneumatikplan in Abb. 29 dargestellt werden.

Tab. 5: Übersicht zur verwendeten Messtechnik inkl. Messgenauigkeit

	Beschreibung	Typ	Einheit	Messbereich	Messgenauigkeit (lt. Kalibrierschein)
Laminar Mater Flow (Fa. Tetrattec)	Laminar Flow Element im LMF PK477	LFE-EG-50MH10-02.00	l/min	0 bis 1100 l/min	1 % vom Messwert im Bereich von 100 bis 1000 l/min
	PDP für Differenzdruck und Absolutdruck	PDP01020A	mbar	0 bis 20 mbar	0,2 % vom Endwert
	PDP für Differenzdruck und Absolutdruck	PDP01020A	mbar	800 bis 2000 mbar	0,2 % vom Endwert
	Temperatursensor in LMF PK477	HUMTMP-MF-G12	°C	20 bis 30 °C	0,151°C (erweiterte Messunsicherheit)
	Feuchtesensor in LMF PK477A	HUMTMP-MF-G12	%	0 bis 100 %	3 %
	Differenzdrucksensor	PDP00001D-F	mbar	-1 bis 1 bar	0,5 % vom Endwert
	Temperatursensor im LMF PK477A	WIT-S-PTM8-SO-20100-GB03	°C	0 bis 50 °C	0,1 °C + 0,0017 x Wert °C
	NTC Temperatursensoren	ZA 9040-FS	°C	- 50°C bis 125 °C	0 bis 70 °C: ±0,2 K
	Kugelthermoanemometer	FVA 605 TA01	m/s	0,1 bis 1 m/s	1 % vom Endwert und 1,5 % vom Messwert

4.2.1.1.2 Messaufbau und Sensorpositionen

Der Messaufbau und das Messprinzip der Durchflussmessung wird im Pneumatikplan in Abb. 29 dargestellt. Zur Messung des Luftvolumenstroms wird am oberen Ende der HLE der Druck und die Temperatur gemessen. Der vor der Messung an dieser Stelle ermittelte Druck wird als Nulldruck für die Messung festgelegt.

Der Querschnitt der HLE wird nach der Messung des Druckes und der Temperatur durch einen luftdichten Trichter in den Querschnitt des Laminar Master Flow - Gerätes übergeleitet (siehe Abb. 31). Die Messstrecke durchläuft anschließend das Laminar Flow Element (LFE) und endet beim Seitenkanalverdichter. Über den Seitenkanalverdichter wird bei der Messung der Druck an der Messtelle

am oberen Ende der HLE auf den als Nulldruck ermittelten Wert geregelt und über das LFE durch Messung von Differenzdrücken der Luftvolumenstrom ermittelt.

Zur Erzeugung des thermischen Auftriebs in der HLE wird während der Messung eine Temperaturerhöhung in der HLE aufgebracht. Dazu wurde die Außenoberfläche der Eindeckung erwärmt. Die Temperaturen wurden in einem Raster an der Oberfläche der Eindeckung, an der Unterseite der Eindeckung, mittig in der HLE und an der Oberfläche der Unterdachbahn gemessen. Die Sensorpositionen werden in Abb. 30 dargestellt. Abbildungen der verbauten Messsensorik im Laborversuch zum thermischen Auftrieb sind in Abb. 31a und Abb. 31b zu sehen.

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

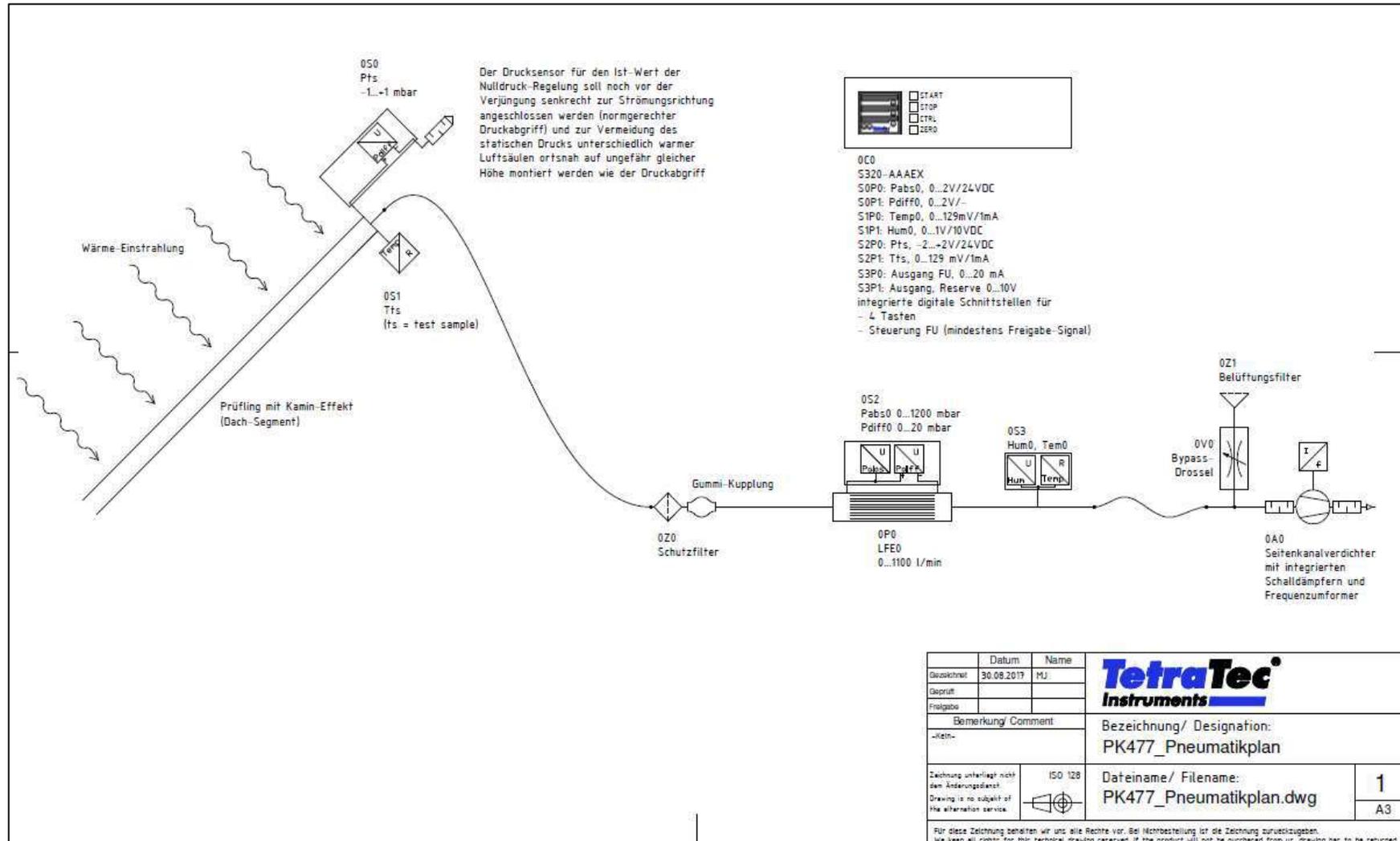


Abb. 29: Pneumatikplan zum Aufbau der Durchflussmessung mit dem Laminar Master Flow

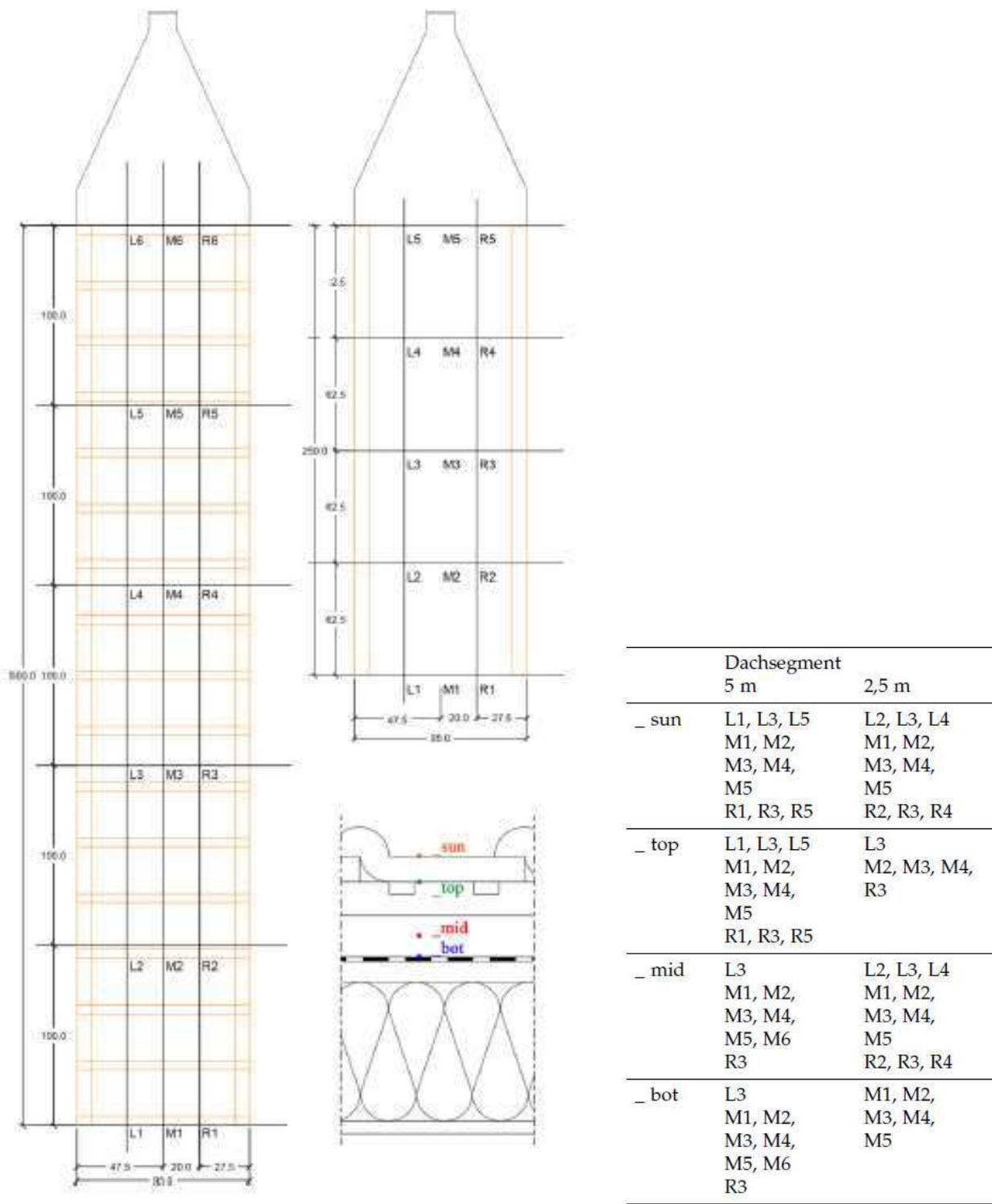


Abb. 30: Links: Lage der Temperatursensoren im Laborversuch bei 5 m Sparrenlänge und 2,5 m Sparrenlänge. Rechts und unten: Position der Temperatursensoren in der Hinterlüftungsebene und auf der Dacheindeckung.
Quelle: [20]

<p>Metalltrichter zur Verjüngung des Querschnittes der HLE auf den Querschnitt des Laminar Master Flow - Elementes</p>	<p>Abgriff der Temperatur und des Druckes am oberen Ende der HLE</p>
<p>Laminar Master Flow – Element mit Differenzdruckmessung</p>	<p>Temperatursensor in der mittigen Höhe der HLE</p>

Abb 31a: Fotos der verbauten Messensorik im Laborversuch zum thermischen Auftrieb

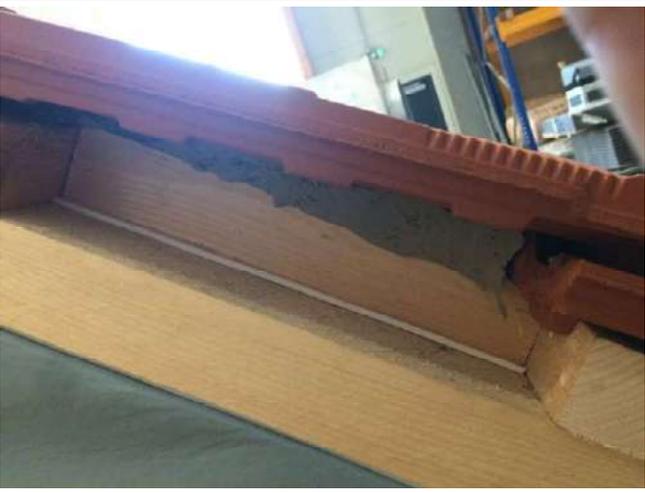
	
<p>Seitenkanalverdichter (mit Filter)</p>	<p>Kugelthermoanemometer in der HLE</p>
	
<p>Seitliche Abdichtung der Hinterlüftungsebene durch Kittfuge</p>	<p>Seitliche Abdichtung der Hinterlüftungsebene durch Kittfuge</p>

Abb. 31b: Fotos der verbauten Messsensorik im Laborversuch zum thermischen Auftrieb, Fortsetzung

4.2.1.2 Vorversuche zur gleichmäßigen Erwärmung der Oberfläche

In Vorversuchen wurde untersucht, wie eine gleichmäßige Temperaturverteilung auf der Eindeckung erreicht werden kann. Dabei wurden Versuche zur Erwärmung der Oberfläche mittels Infrarotstrahler, Heizmatten und Heizgewebe bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zur Umgebungsluft untersucht. Fotos zu den Vorversuchen zeigt Abb. 34a und Abb. 34b.

4.2.1.2.1 Infrarotstrahler:

Mit einem Infrarotstrahler Siccatherm IR 1 von Osram mit 250 W wurden erste Versuche zur Erwärmung der Dachhaut durchgeführt. Die Lampe wurde in einem Abstand von ca. 35 – 36 cm zur Dachziegeloberfläche angebracht. Auf der Oberfläche wurde in einem Abstand von 20 cm mit NTC Sensoren die Temperatur gemessen.

Die ermittelten Oberflächentemperaturen werden in Abb. 32 dargestellt. Es zeigt sich, dass durch den Infrarotstrahler einerseits eine sehr inhomogene Erwärmung der Oberfläche erfolgt und andererseits auch direkt unter der Lampe nur eine maximale Oberflächentemperatur von 50 °C erreicht werden kann, die unter der angestrebten Oberflächentemperatur von mind. 60 °C liegt. Für eine einigermaßen homogene Erwärmung der Dachoberfläche wäre ein sehr enges Raster notwendig (92 Lampen mit einer Gesamtleistung von 23.000 W).

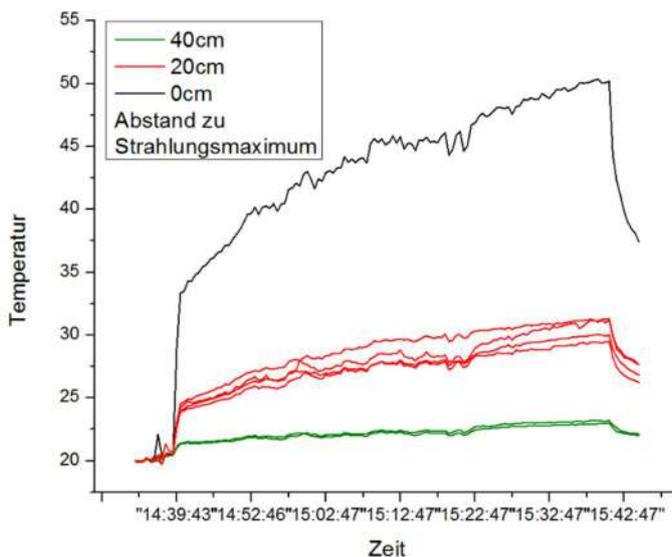


Abb. 32: Temperatur auf der Oberfläche der Dachziegel je nach Abstand vom Infrarotstrahler

In einem weiteren Versuch mit Infrarotstrahlern wurde untersucht, ob die Erwärmung durch das Anbringen eines Alu-Bitumenbandes auf der Ziegeloberfläche verbessert werden kann. Dabei sollte die Strahlungsabsorption des Bitumens an der Oberseite und die Weiterleitung der Wärme durch die Aluminiumschicht auf der Unterseite ausgenutzt werden. Der gewünschte Effekt stellte sich jedoch nicht ein (siehe Abb. 34).

Eine Erwärmung der Dachoberfläche über Infrarotlampen wurde daher als nicht zielführend eingestuft.

4.2.1.2.2 Heizgewebe:

Die Vorversuche wurden mit einem Probestück des Heizgewebes PHNT H1L13.2 der Firma Sefar durchgeführt. Die Versuche führten zu einer ausreichend hohen Temperatur.

Jedoch ist das Handling bzgl. der benötigten Leistung und Stromstärke für die gesamte Fläche des Versuches relativ aufwendig.

4.2.1.2.3 Heizmatten:

Die starren Heizmatten wurden auf die Dachziegeloberfläche des Versuchskörpers (Neigung 40°) aufgelegt und oberseitig mit Mineralwolldämmung gedämmt. Bei einem ersten Versuch zeigte sich, dass sich von unten nach oben eine starke Temperaturstaffelung einstellt. Abb. 33 links bildet die gemessenen Temperaturen der Messpunkte ab. Dabei ist eine Temperaturdifferenz von bis zu 33 K zwischen den unteren (R1, M1, L1) und den oberen Messpunkten (R3, M3, L3) erkennbar. Die signifikante Temperaturdifferenz wurde auf den Luftkanal zwischen Heizmatte und den tiefer liegenden Bereichen der Ziegeleindeckung zurückgeführt. Dort stellte sich durch thermischen Auftrieb eine Abfuhr der erwärmten Luft nach oben ein.

In einem zweiten Versuch wurden daher die Luftkanäle zwischen Heizmatte und Dachziegel in jeder 2. Ziegelreihe (im Abstand von ca. 60 cm) durch Kittfugen unterbrochen. Abb. 33 rechts zeigt die Temperaturverteilung unter der Heizmatte mit Kittfugen. Auch hier zeigt sich zwischen den unteren Messpunkten (R1, M1, L1) und den oberen Messpunkten (R3, M3, L3) eine deutliche Temperaturdifferenz. Im Bereich der unteren Messpunkte (R1, M1, L1) stehen die Ziegel über die HLE hinaus. Die tiefen Temperaturen in diesem Bereich werden daher darauf zurückgeführt. Zwischen M2 und M3 zeigen sich deutlich geringere Temperaturabweichungen.

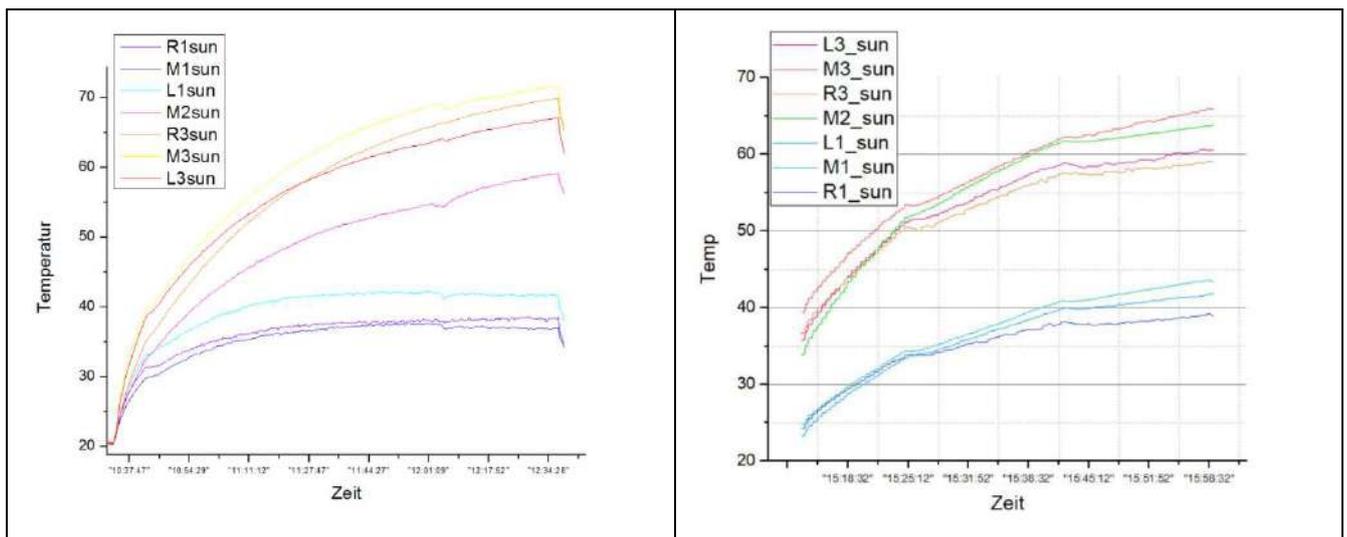


Abb. 33: Temperatur auf der Oberfläche der Dachziegel unter den Heizmatten:

links: ohne Kittfugen, rechts: mit Kittfugen.

(R1, M1, L1 = am unteren Ende der Heizmatte R= rechts, M = mittig, L = links; M2 = mittlere Höhe der Heizmatte mittig; R3, M3, L3 = am oberen Ende der Heizmatte R= rechts, M = mittig, L = links; Abstand M1 und M3 = 2 m).

Für die Laborversuche wurden aufgrund der Abklärungen in den Vorversuchen die starren Heizmatten mit einer Ausbildung von Kittfugen zur Unterbrechung des Lufthohlraumes verwendet (siehe Abb. 34a und Abb. 34b).

	
<p>Erwärmung Ziegeleindeckung mit Infrarotbestrahlung</p>	<p>Oberflächentemperaturen der Eindeckung mit Infrarotbestrahlung und Alu-Bitumenband auf der Ziegeleindeckung</p>
	
<p>Heizgewebe auf Ziegeleindeckung</p>	

Abb. 34a: Fotos zu den Vorversuchen zum Erreichen einer gleichmäßigen Oberflächentemperatur

	
<p>Unterbrechung des Lufthohlraumes zwischen starren Heizmatten und Ziegeleindeckung</p>	<p>Heizmatten auf der Ziegeloberfläche (und Einfeldung des Versuchselementes mit einem Vorhang zur Vermeidung von Verfälschungen der Messungen durch Zugluft)</p>

Abb. 34b: Fotos zu den Vorversuchen zum Erreichen einer gleichmäßigen Oberflächentemperatur, Fortsetzung

4.2.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Laborversuchen dargestellt. Eine Übersicht zu den durchgeführten Versuchen bietet Tab. 4.

In den Ergebnisgrafiken zu den Laborversuchen zum thermischen Auftrieb wird die gemessene Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Messungen untereinander wurde die Temperaturdifferenz ($\sqrt{T_{HLE} - T_a}$) auf die Umgebungstemperatur T_a bezogen. In manchen Grafiken wird jeweils die Höhe des Daches, die sich durch die Dachneigung jeweils entsprechend ändert, mit einbezogen.

$$\text{sqrt}(dT/T_a) = \sqrt{\frac{T_{HLE} - T_a}{T_a}} \quad (1)$$

$$\text{sqrt}(dT \cdot h/T_a) = \sqrt{\frac{(T_{HLE} - T_a) \times h}{T_a}} \quad (2)$$

T_{HLE} = mittlere Temperatur in der HLE in K

T_a = Umgebungstemperatur in K

h = Höhe des Daches = $l \times \sin \alpha$

Da die Umgebungstemperatur T_a nur an einer Stelle erfasst wurde und daher die Temperaturschichtung der stehenden Luft der Umgebungstemperatur T_a nicht berücksichtigt wurde, beginnen die Temperaturdifferenzen der Messungen nicht bei 0°K. Für einige Messungen wurde die Temperaturschichtung mitberücksichtigt, diese tragen in der Grafik den Zusatz „korrigiert“.

4.2.2.1 Einfluss Dachneigung

Der Einfluss der Dachneigung auf die Strömung in der HLE durch thermischen Auftrieb wurde an einem 5 m langen Dachelement und einem 2,5 m langen Dachelement bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen der Umgebungsluft und der Luft in der HLE untersucht. Die Ergebnisse aus der Messung werden in Abb. 35 und Abb. 36 dargestellt. Es zeigen sich höhere Strömungsgeschwindigkeiten bei höheren Temperaturdifferenzen und bei höheren Neigungen. Wird die Neigung mit einbezogen, so ergeben sich annähernd gleiche Strömungsgeschwindigkeiten bei gleichen Temperaturdifferenzen.

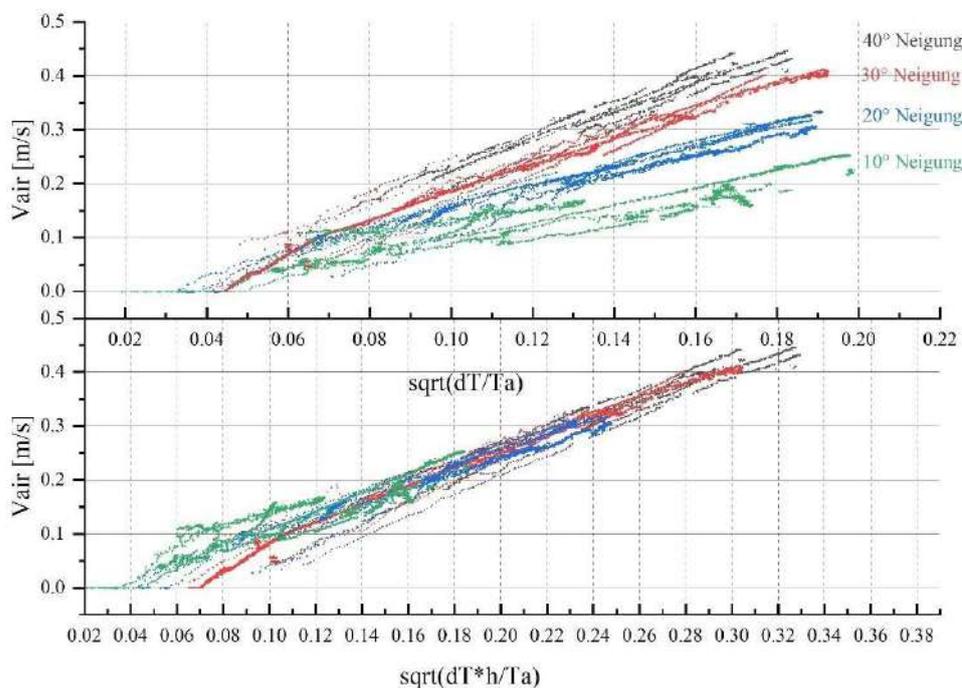


Abb. 35: Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines **5 m** langen Dachsegmentes bei unterschiedlichen Neigungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

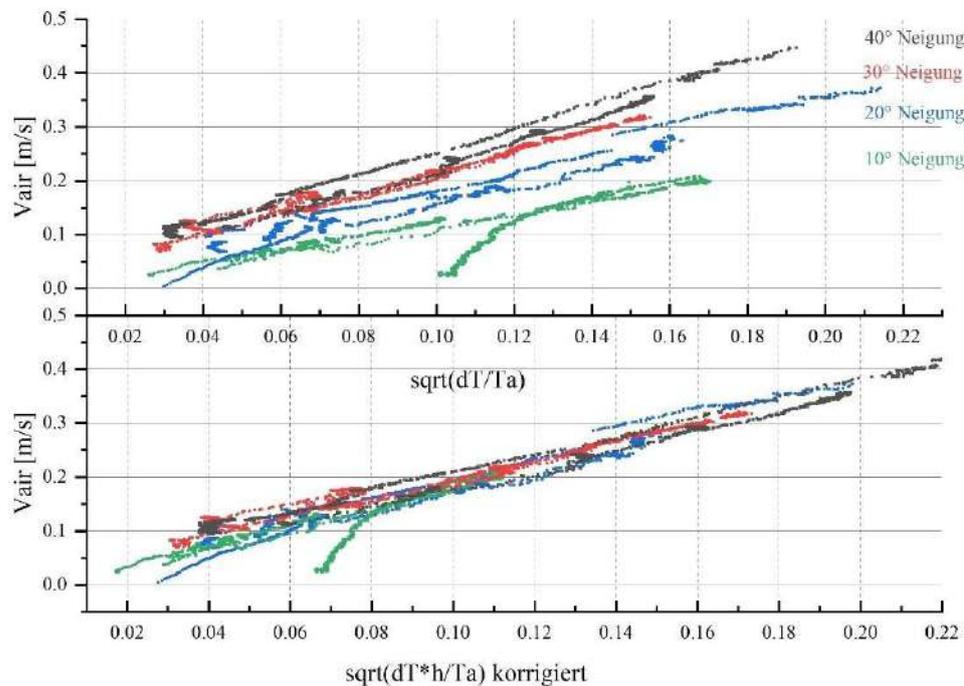


Abb. 36: Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines **2,5 m** langen Dachsegmentes bei unterschiedlichen Neigungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

4.2.2.2 Einfluss Dacheindeckung

Der Einfluss der Ausbildung der Dacheindeckung auf den thermischen Auftrieb wurde mittels einer normalen Eindeckung mit Dachziegeln (Tondach Sulm naturrot), einer Abklebung aller Ziegel untereinander (luftdichte Fugen) und einer Eindeckung mit einer OSB-Platte (mit luftdichter Folie). Die Messergebnisse für Dachziegel ohne und mit abgeklebten Fugen liegen annähernd gleich. Die Eindeckung mit OSB-Platte zeigt eine geringfügig geringere Strömungsgeschwindigkeit bei gleichen Temperaturdifferenzen.

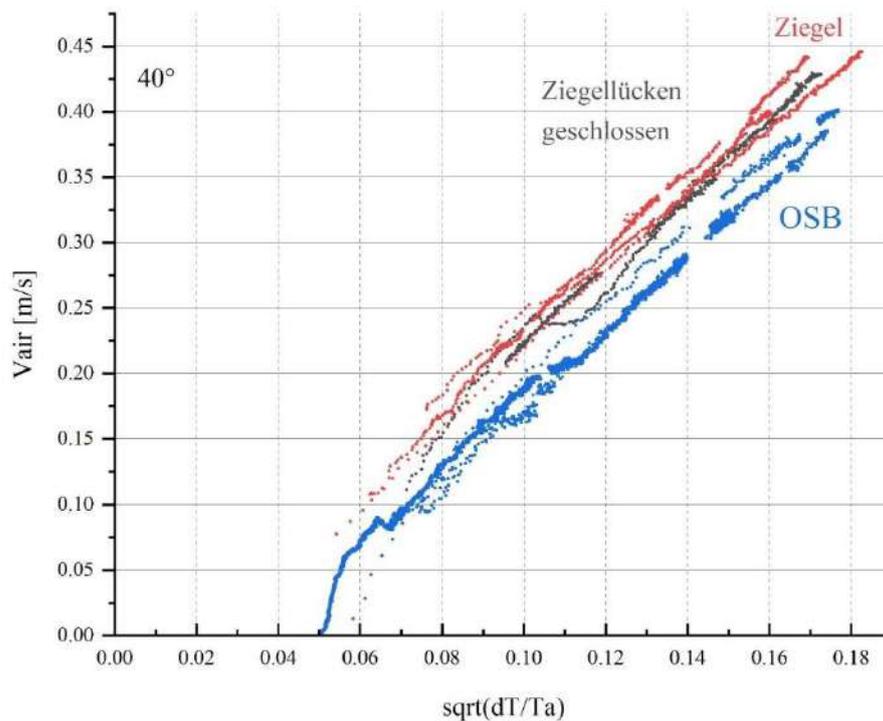


Abb. 37: Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines 5 m langen Dachsegmentes mit 40° Neigung bei unterschiedlichen Eindeckungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

4.2.2.3 Einfluss Konterlattenhöhe

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Konterlattenhöhe (= Höhe des Durchlüftungsraumes) werden in Abb. 38 für eine Dachneigung von 40° und in Abb. 39 für eine Dachneigung von 20° dargestellt. Es zeigt sich bei beiden Dachneigungen bei höheren Konterlatten eine höhere Strömungsgeschwindigkeit.

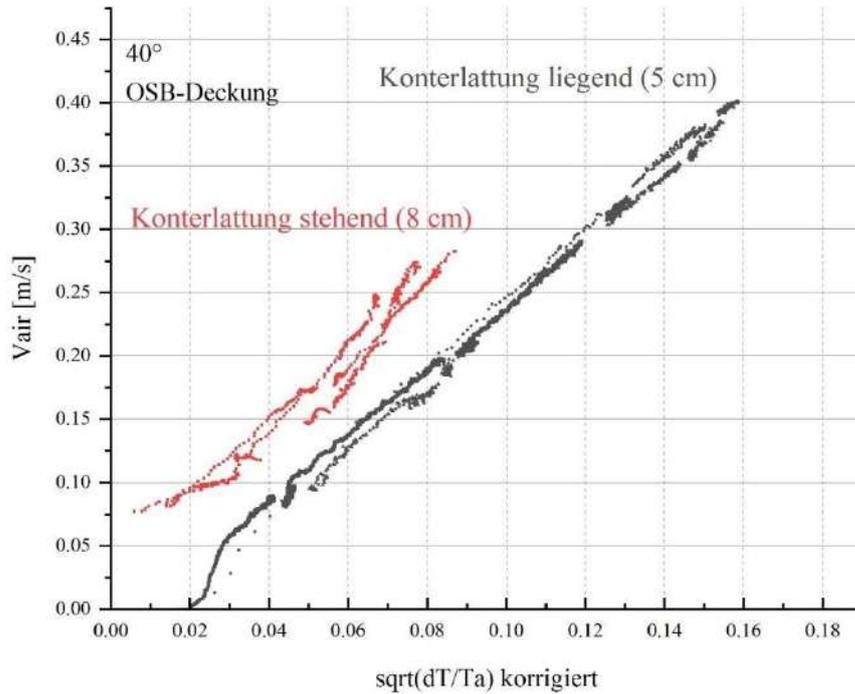


Abb. 38: Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines 5 m langen Dachsegmentes **mit 40° Dachneigung**, Eindeckung mit OSB-Platten ohne Dachlatten bei unterschiedlichen hohen Konterlattungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

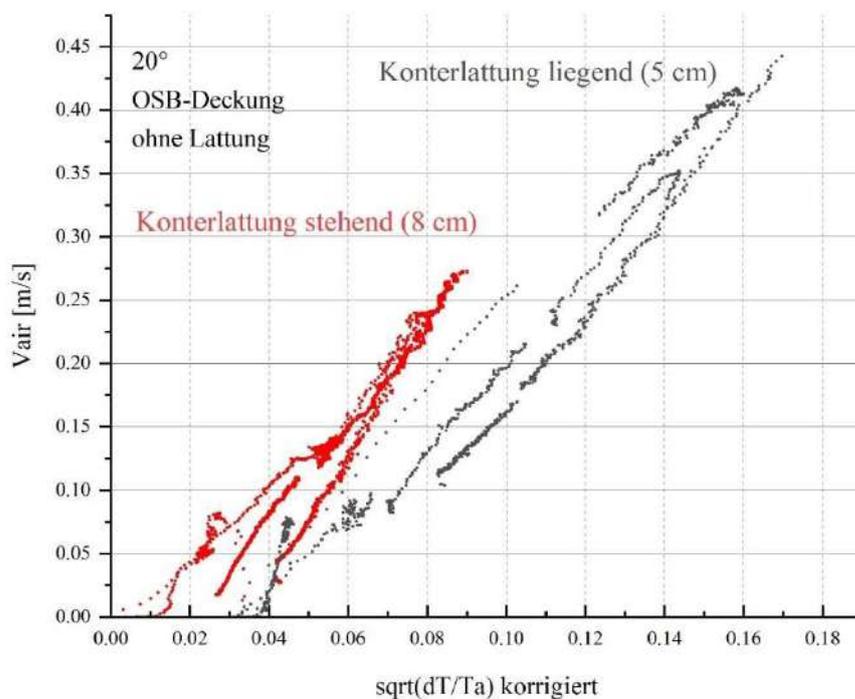


Abb. 39: Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines 5 m langen Dachsegmentes **mit 20° Dachneigung**, Eindeckung mit OSB-Platten ohne Dachlatten bei unterschiedlichen hohen Konterlattungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

4.2.2.4 Einfluss Dachlattenabstand

Der Einfluss der Dachlattung (nachfolgend „Lattung“) auf die Strömungsgeschwindigkeit in der HLE wurde an einem 5 m langen Dachelement mit 40° Dachneigung und OSB-Eindeckung untersucht. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Ausführungen der Lattung bzw. ohne Lattung werden in Abb. 40 dargestellt. Bei höheren Temperaturdifferenzen zeigt sich ein Einfluss der Ausführung der Lattung auf die Strömungsgeschwindigkeit. Je geringer der Lattenabstand, desto geringer auch die Strömungsgeschwindigkeit.

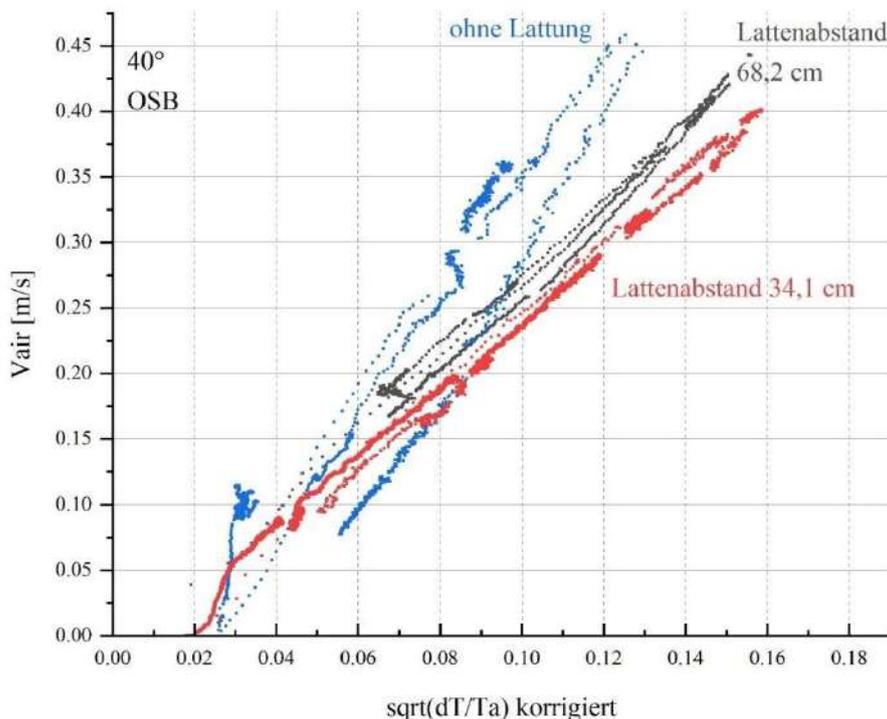


Abb. 40: Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines 5 m langen Dachsegmentes mit 40° Dachneigung, Eindeckung mit OSB-Platten mit **unterschiedlichen Ausführungen der Lattungen** und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

4.2.2.5 Anwendung des mathematischen Modells nach Liersch auf die Laborversuche

Das mathematische Modell zur Vorhersage des thermischen Auftriebs nach Liersch [3] wurde in MATLAB R2019a nachmodelliert und dann mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen abgeglichen. Das Berechnungsmodell in MATLAB wurde mittels einer Nachrechnung von Berechnungen von Liersch überprüft [20].

In Abb. 41 und Abb. 42 werden die berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten für ein 5 m langes Dachsegment und ein 2,5 m langes Dachsegment bei unterschiedlichen Neigungen und Temperaturdifferenzen dargestellt. Es zeigt sich in der Nachrechnung eine deutliche Überschätzung der Strömungsgeschwindigkeit für alle dargestellten Fälle.

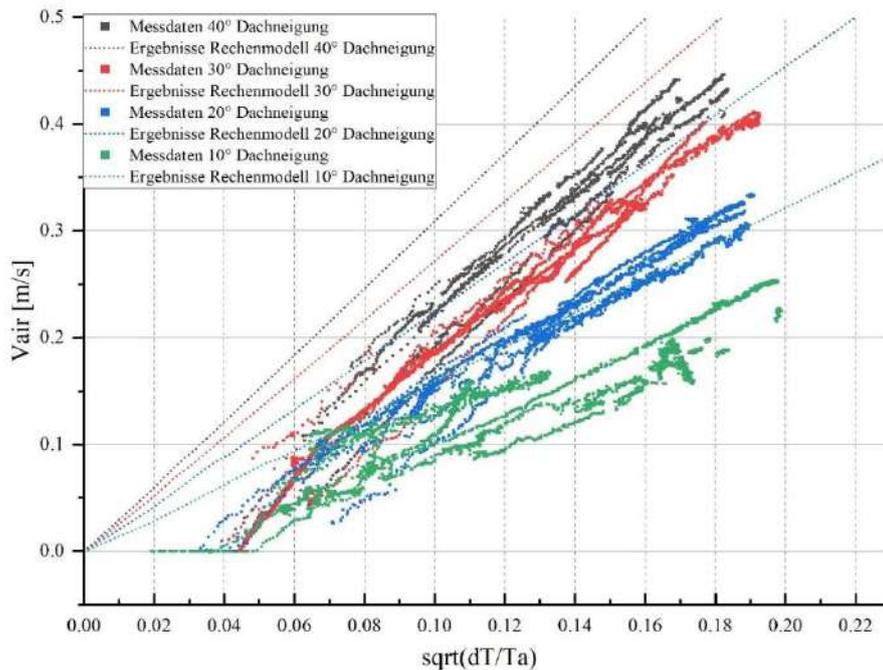


Abb. 41: Gemessene und berechnete Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines **5 m langen Dachsegmentes** bei unterschiedlichen Dachneigungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

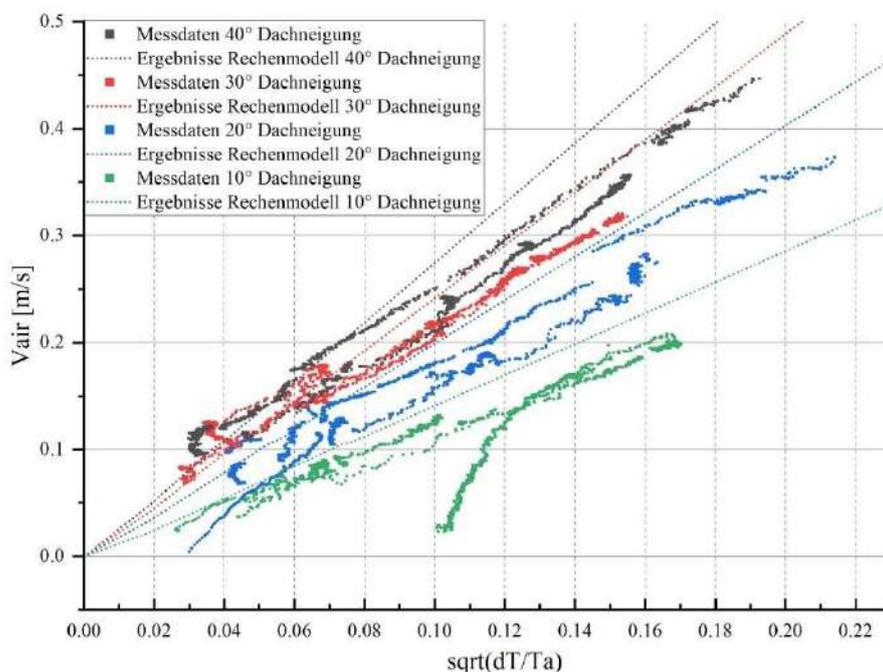


Abb. 42: Gemessene und berechnete Strömungsgeschwindigkeit in der HLE eines **2,5 m langen Dachsegmentes** bei unterschiedlichen Dachneigungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

4.2.3 Diskussion

Mithilfe der Laborversuche konnten einige Einflussfaktoren auf den thermischen Auftrieb herausgearbeitet werden und das Berechnungsmodell nach Liersch nachmodelliert und Verbesserungspotential aufgedeckt werden. Im Folgenden werden die Erkenntnisse zu den einzelnen Punkten diskutiert.

4.2.3.1 Einfluss Dachneigung

Die Ergebnisse aus den Messungen bei unterschiedlichen Dachneigungen werden in Abb. 35 und Abb. 36 dargestellt. Wie zu erwarten war, zeigen sich bei höheren Temperaturdifferenzen und höheren Neigungen höhere Strömungsgeschwindigkeiten. Der thermische Auftrieb ist im Wesentlichen von den Einflussgrößen der Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Temperatur in der HLE und der Umgebungslufttemperatur sowie von der Höhendifferenz zwischen Einlass und Auslass abhängig. Bei stärkeren Neigungen steigt die Höhendifferenz und somit die Strömungsgeschwindigkeit.

4.2.3.2 Einfluss Dacheindeckung

Zum Vergleich des Einflusses der Dacheindeckung auf die Strömungsgeschwindigkeit wurden Messungen an einem Dachelement mit abgeklebten Fugen der Dachziegeleindeckung, einem Dachelement mit normalen Fugen der Dachziegeleindeckung und einem Dachelement mit OSB-Platte (mit luftdichter Folie) auf Konterlattung und Lattung gegenübergestellt. Die Ergebnisse aus den Messungen werden in Abb. 37 dargestellt.

Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in den Dachelementen mit abgeklebten und normalen Ziegelfugen sind annähernd gleich. Die geringen Luftundichtheiten durch die Ziegelfugen zeigen also keinen direkten Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit in der HLE. Die Strömungswiderstände durch die kleinen Fugen heben bei den geringen Strömungsgeschwindigkeiten durch thermischen Auftrieb vermutlich die Ansaugwirkung von Luft durch die Fugen (durch die temperaturindizierte Druckdifferenz) auf.

Für die luftdichte Eindeckung mit einer OSB-Platte zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperaturdifferenzen. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen jedoch grundsätzlich etwas niedriger als bei Ziegeleindeckung. Dies ist auf das geringere Luftvolumen der HLE zurückzuführen. (Bei Ziegeleindeckung entsteht durch die doppelte Lage auf der Lattung jeweils unter der Lattung ein zusätzliches Luftvolumen.)

4.2.3.3 Einfluss Konterlattenhöhe

Der Einfluss der Konterlattenhöhe wurde durch Versuche mit liegenden (= 5 cm hoch) und stehenden (= 8 cm hoch) Konterlatten untersucht. Die Ergebnisse aus den Messungen werden in Abb. 38 für eine Dachneigung von 40° und in Abb. 39 für eine Dachneigung von 20° dargestellt. In beiden Fällen ergibt sich für höhere Konterlatten eine höhere Strömungsgeschwindigkeit. Aufgrund der maximalen Durchflussmenge des Messgerätes LFE mussten die Messungen für höheren Querschnitte der HLE (= stehende Konterlatten) früher abgebrochen werden. Bei höheren Temperaturdifferenzen konnte durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit der Volumenstrom nicht mehr gemessen werden.

Höhere Strömungsgeschwindigkeiten bei größeren Querschnitten der HLE können durch geringere Strömungswiderstände bezogen auf den Querschnitt erklärt werden.

4.2.3.4 Einfluss Lattenabstand

Jede Lattung bildet einen Strömungswiderstand in der HLE aus. Daher wurde der Einfluss der Lattung auf die Strömungsgeschwindigkeit untersucht. In Abb. 40 werden die Ergebnisse aus den Messungen dargestellt. Bei weniger Lattungen liegt die gemessene Strömungsgeschwindigkeit höher. Der Strömungswiderstand der Lattungen ist also sichtbar. Ein deutlicher Einfluss zeigt sich allerdings erst bei höheren Temperaturdifferenzen. Außerdem zeigt sich bei halbiertes Lattenanzahl (Lattenabstand 68,2 cm) keine versetzte Ergebniskurve, wie bei der Konterlattenhöhe, was auf grundsätzlich unterschiedliche Strömungswiderstände hindeuten würde. Es zeigt sich bei variiertes Lattung vielmehr ein strömungsabhängiger Widerstand. Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit fällt der Strömungswiderstand durch die Lattungen stärker aus.

4.2.3.5 Anwendung des mathematischen Modells nach Liersch auf die Laborversuche

Der Vergleich des mathematischen Modells nach Liersch mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen wird in Abb. 41 und Abb. 42 dargestellt. Es zeigt sich keine deutliche Übereinstimmung von Berechnung und Messung.

Abb. 43 zeigt die berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlich engen Lattungen bzw. ohne Lattung. Es ist erkennbar, dass die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten der Messung und Berechnung ohne Lattung gut zusammenstimmen, während die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten bei den Varianten mit Lattung deutlich von den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten abweichen.

Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Abweichung in der Berechnung durch die für die Lattung eingesetzten Strömungswiderstände ζQ bewirkt wird. Die Strömungswiderstände müssen höher liegen als von Liersch angenommen. In einem weiteren Schritt wurde daher versucht, die Strömungswiderstände ζQ für die Lattung so weit nach oben zu korrigieren, dass Messung und Berechnung gut übereinstimmen. In Abb. 44 werden für die Varianten mit unterschiedlichen Lattungen die Berechnungsergebnisse mit modifiziertem Strömungswiderstand ζQ und die Ergebnisse aus den Messungen dargestellt. Dabei lässt sich eine gute Übereinstimmung von Berechnung und Messung feststellen. Für unterschiedliche Abstände der Lattung wurde jedoch ein unterschiedlicher Faktor zur Erhöhung von ζQ eingesetzt. In Abb. 45 werden die berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten für ein 2,5 m langes Dachsegment mit unterschiedlichen Neigungen dargestellt. Dabei wurde für die Erhöhung der Strömungswiderstände ζQ durch die Lattungen der vorher ermittelte Faktor angesetzt. Mit den faktoriell erhöhten Werten für ζQ zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung von Berechnung und Messung.

Es konnte aufgezeigt werden, dass die von Liersch für die Einschnürungen durch Lattungen angegebenen Strömungswiderstände ζQ zu niedrig sind. Für die in der vorliegenden Studie untersuchten Lattenabstände von 31 – 34,1 cm und 68,2 cm konnten Faktoren ermittelt werden, mit denen die Strömungswiderstände ζQ für korrekte Berechnungsergebnisse zu erhöhen sind.

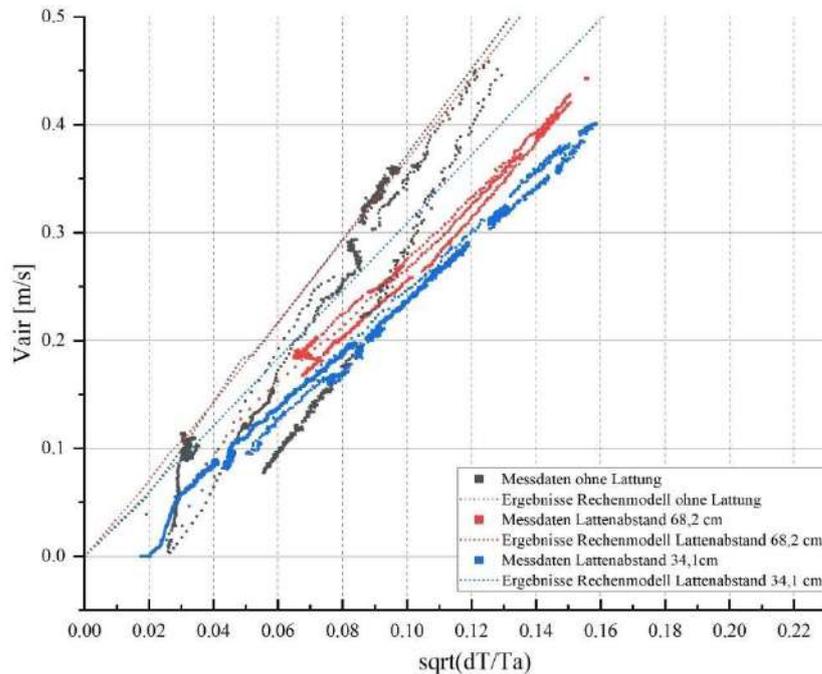


Abb. 43: Gemessene und berechnete Strömungsgeschwindigkeit in der HLE bei **unterschiedlichen Ausführungen der Lattung unter OSB-Eindeckung** eines 5 m langen Dachsegmentes bei 40° Neigung und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

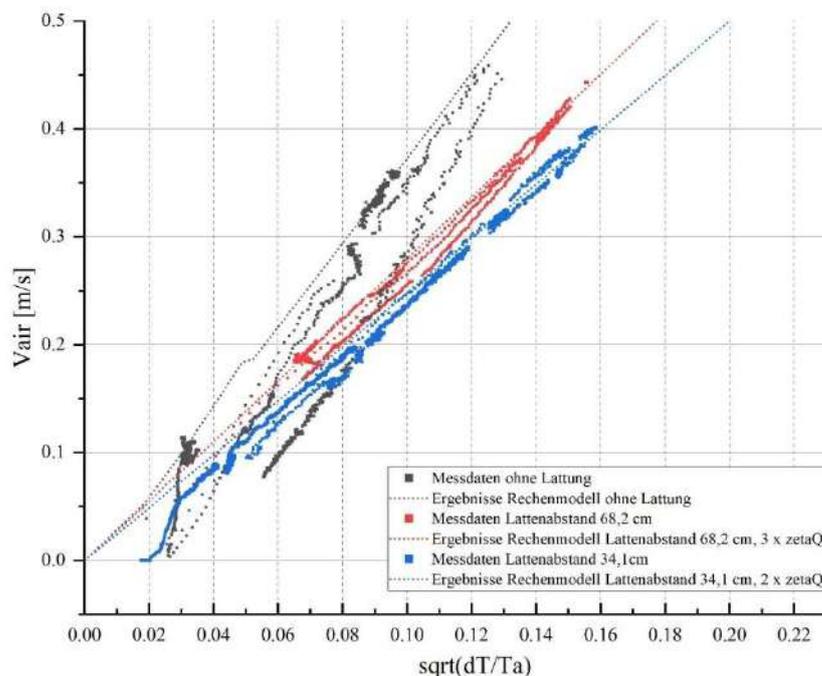


Abb. 44: Gemessene und berechnete Strömungsgeschwindigkeit **mit Anpassung der Strömungswiderstände ζQ** (Einschnürungen durch Lattungen) in der HLE bei **unterschiedlichen Ausführungen der Lattung unter OSB-Eindeckung** eines 5 m langen Dachsegmentes bei 40° Neigung und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

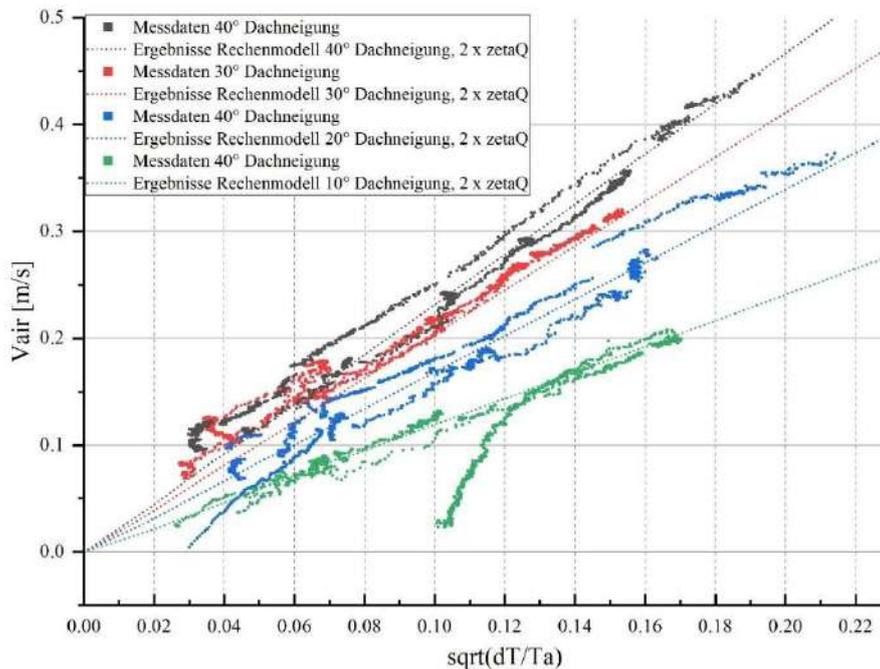


Abb. 45: Gemessene und berechnete Strömungsgeschwindigkeit mit Anpassung der Strömungswiderstände ζQ (Einschnürungen durch Lattungen) in der HLE eines 2,5 m langen Dachsegmentes bei unterschiedlichen Dachneigungen und unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen T_{HLE} und T_a

4.2.3.6 Erkenntnisse zu thermischen Vorgängen in der HLE

Über den Inhalt der vorliegenden Studie hinaus wurden von Amos auf Basis der oben angeführten Laborversuche die thermischen Vorgänge in der HLE untersucht. Die Erkenntnisse aus dieser Untersuchung können in Anhang B (entspricht [20]) nachgelesen werden.

4.3 Klima

4.3.1 Material und Methoden

4.3.1.1 Einleitung

Zur Untersuchung der klimatischen Verhältnisse innerhalb der (HLE) eines Steildaches stand für das Projekt das Forschungshaus der Holzforschung Austria in 2100 Stetten (AT) zur Verfügung. Dazu wurde zunächst die bestehende Dacheindeckung samt Lattungen und Unterdachbahn entfernt. Unterdachbahn und Lattung wurden erneuert. Die dabei entstandenen Hinterlüftungsbahnen zwischen den Konterlattungen wurden mit verschiedenen Dacheindeckungen eingedeckt (Abb. 46). Unterschiedliche Materialien, Farben und Firstöffnungsquerschnitte wurden verwendet. Zur Definition der Materialien und der Farben wurden Vorversuche durchgeführt (siehe Anhang A). Innerhalb der HLE wurden Temperatur- und Luftfeuchtesensoren an relevanten Positionen installiert. So wurden Lufttemperaturen, Temperaturen an der Dacheindeckung und Unterdachbahn sowie die relative Luftfeuchte in der HLE aufgezeichnet. Um Rückschlüsse darauf ziehen zu können, wie sich die Außenklimaverhältnisse auf die klimatischen Verhältnisse in der HLE auswirken, wurden außerdem gleichzeitig mit einer Wetterstation am gleichen Standort die wichtigsten Außenklimaparameter aufgezeichnet.



Abb. 46: Forschungshaus der Holzforschung Austria in AT-2100 Stetten mit unterschiedlichen Eindeckungen

Zusätzlich wurden Untersuchungen zur windinitiierten Strömungsgeschwindigkeit in den HLEs zweier flachgeneigter Versuchsdächer am Standort 2301 Groß-Enzersdorf (AT) durchgeführt (Abb. 47 und Abb. 48). In diesem Freilandversuch sollten die Vor- und Nachteile auf den Luftwechsel zweier

verschiedener Firstausführungen (mit und ohne Fensterunterbrechung) herausgestellt und der Einfluss einer in Hauptwindrichtung gelegenen Windbeschattung beurteilt werden. Dazu wurden die Strömungsgeschwindigkeit in der HLE mittels Thermoanemometer und zeitlich parallel die Windparameter (Geschwindigkeit und Richtung), die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit am Standort aufgezeichnet.



Abb. 47: Flachgeneigtes Versuchsdach 1 – freistehend



Abb. 48: Flachgeneigtes Versuchsdach 2 – aus Hauptwindrichtung windgeschützt

4.3.1.2 Standort, Lage und Orientierung

Das Forschungshaus der Holzforschung Austria befindet sich direkt am HFA-Standort, Gewerbegebiet 6, 2100 Stetten (48°21'57.6"N 16°21'33.0"E, 169 m ü. Adria). Die Außentemperatur liegt hier im Jahresmittel bei ca. 10,8 °C und die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit bei 70 % bis 75 % bei überwiegenden Nordwest- und Südostwinden. Das Gelände ist eher flach, weshalb häufig Windgeschwindigkeiten bis 16 m/s auftreten können. Die Globalstrahlung (direkt + diffus) liegt im Jahresdurchschnitt bei 136,5 W/m² mit einem durchschnittlichen täglichen Maximum von 350 W/m² im Juni und 63 W/m² im Dezember (Meteonorm 7). Die Dachflächen des Steildaches sind exakt nach Norden und Süden ausgerichtet. In den Morgenstunden kommt es zu einer leichten, vorübergehenden Beschattung der südlichen Dachfläche aufgrund eines nahestehenden Gebäudes im Osten des Forschungshauses. In alle anderen Richtungen ist das Gebäude freistehend.

Die zwei flachgeneigten Versuchsdächer befinden sich in der Gloritstraße 2, 2301 Groß-Enzersdorf (48°11'25.6"N 16°34'26.9"E, 150 m ü. Adria) Die klimatischen Bedingungen an diesem Standort sind mit den oben beschriebenen Klimabedingungen am Standort 2100 Stetten vergleichbar. Die Firste der beiden Versuchsdächer sind jeweils gegen die Hauptwindrichtung (N-W) gerichtet (Abb. 49), wobei Dach 2 im Windschatten einer ca. 10 m hohen Halle liegt.

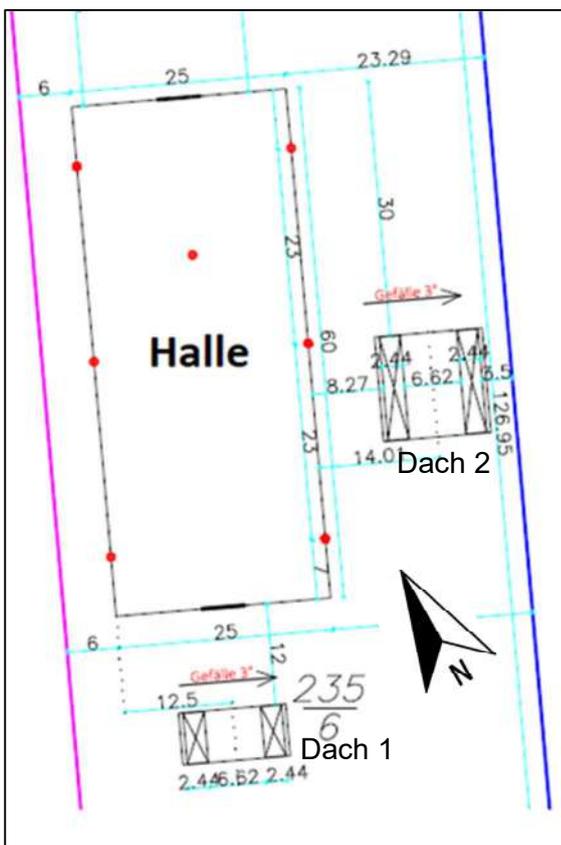


Abb. 49: Lageplan – windgeschütztes Dach (Dach 2) und freistehendes Dach (Dach 1)

4.3.1.3 Dachaufbau, Konstruktionsdetails

4.3.1.3.1 Steildachaufbau

Beim untersuchten Dach des Forschungshauses in 2100 Stetten handelt es sich um ein zwischensparren-gedämmtes Satteldach (Gefachhöhe 250 mm) mit einer Neigung von ca. 33° (Abb. 50 und Abb. 51). Die Konterlattenhöhe beträgt 5 cm bei einer Länge von 5,52 m und einem lichten Abstand von 60,7 cm. Traufseitig wurden Insektenschutzgitter montiert, wodurch sich der effektive Öffnungsquerschnitt um 50% reduziert.

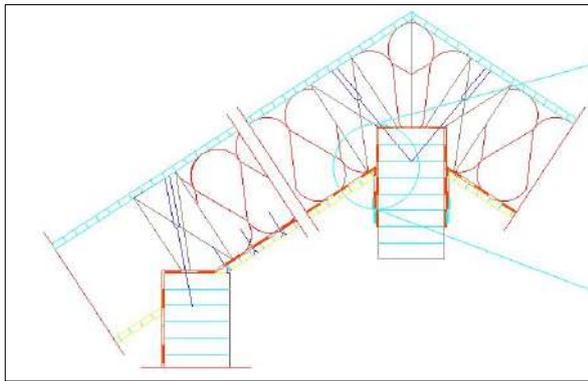


Abb. 50: Schnitt durch den Dachaufbau des Forschungshauses

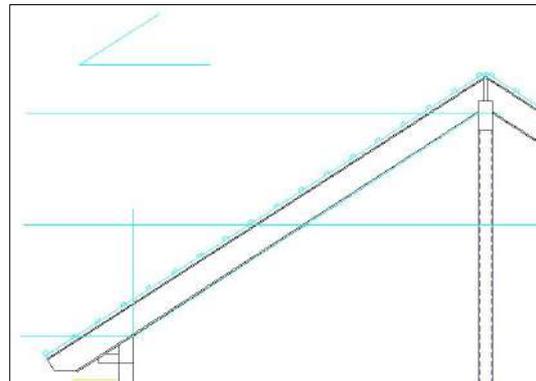


Abb. 51: Dachansicht mit sichtbarem Sparren, Lattung und Konterlattung

Die verschiedenen Dacheindeckung wurden firstachsensymmetrisch - also jeweils mit der gleichen Dacheindeckung auf der gegenüberliegenden Dachfläche - eingedeckt. Eine detaillierte Auflistung der verschiedenen Eindeckungen ist in Tab. 6 dargelegt. Ziegel-, Beton-, Faserzement- und Metalleindeckungen wurden in verschiedenen Farben untersucht. Durch die verschiedenen Firstausbildungen wurde der Entlüftungsquerschnitt der verschiedenen Hinterlüftungsbahnen variiert. Der traufseitige Öffnungsquerschnitt ist für alle HLEs gleich und entspricht mit 225 cm²/m den Anforderungen der ÖNORM B 4119 [4]. Bei den Bahnen Nr. 1 und 2 wurde außerdem zusätzlich eine Firsttrennung zwischen nordseitiger und südseitiger HLE montiert. Bei den Bahnen 6A bis 7B bzw. 12A bis 13B sind die HLEs jeweils durch eine Fensterkonstruktion unterbrochen. Die Bahnen 1 und 18 liegen am Ortgang. Die Auswertung wurde deshalb anhand der durchgehenden Bahnen 2-5, 8-11 und 14-17 durchgeführt.

Tab. 6: Verwendete Dacheindeckungen für den Freilandversuch mit Angaben zu Farbe, Traufen- und Firstdetails

Nr.	Dacheindeckung	Farbe	Traufe	First		
			Querschnitt in cm ² /m	Trennung Dachfläche N-S	Ausbildung	Querschnitt in cm ² /m
1 (Ortgang)	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	Trennung	Gratrolle	170
2	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	Trennung	Gratrolle	170
3	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	keine	Gratrolle	170
4	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	keine	Gratrolle + Lüfterstein	170 + 120
5	Ziegel (Sulm)	schwarz	225	keine	Gratrolle	170
6A	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	x	Anschluss an Fenster	135
6B	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	keine	Gratrolle	170
7A	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	x	geschlossen	
7B	Ziegel (Sulm)	naturrot	0	keine	Gratrolle	170
8	Ziegel (Sulm)	naturrot	225	keine	Gratrolle + Metalllüftungsband	170+210
9	Beton	ziegelrot	225	keine	Gratrolle	170
10	Faserzement	hellgrau	225	keine	First mit Firstentlüftungsband	ca. 200
11	Faserzement	schwarz	225	keine	First mit Firstentlüftungsband	ca. 200
12A	Metall (Aluminium)	naturblank	225	x	Anschluss an Fenster	225
12B	Metall (Aluminium)	naturblank	225	keine	Jet-Lüfter	ca. 250
13A	Metall (Aluminium)	naturblank	225	x	geschlossen	
13B	Metall (Aluminium)	naturblank	0	keine	Jet-Lüfter	ca. 250
14	Metall (Aluminium)	naturblank	225	keine	Jet-Lüfter	ca. 250
15	Metall (Aluminium)	schwarz	225	keine	Jet-Lüfter	ca. 250
16	Metall (Aluminium)	rotbraun	225	keine	Jet-Lüfter	ca. 250
17	Metall (Aluminium)	naturblank	225	keine	Jet-Lüfter + Lüfterstein	ca. 250
18 (Ortgang)	Metall (Aluminium)	naturblank	225	keine	Jet-Lüfter	ca. 250

4.3.1.3.2 Flachdachaufbau

Bei den beiden Versuchsdächern handelt es sich um flachgeneigte Dächer mit einem Gefälle von 3°. Die Dächer sind ungedämmt und ober- und unterseitig in direktem Kontakt mit der Außenluft. Die Konstruktionsdetails und verschiedenen Firstausführungen sind in Abb. 52 bis Abb. 55 dargestellt. Bei First A (Abb. 52) ist die Entlüftungsöffnung vertikal nach unten ausgerichtet. Bei First B (Abb. 53) handelt es sich um eine Labyrinthausführung. Die Entlüftungsöffnung ist um 180° gedreht. Die Öffnungen sind in beiden Fällen mit einem Vogelgitter ausgeführt. Der effektive Entlüftungsquerschnitt reduziert sich dementsprechend um 50 %.

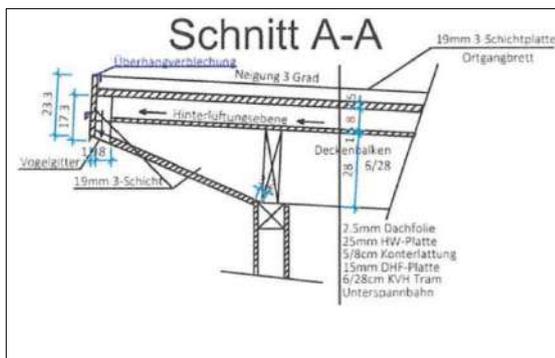


Abb. 52: Schichtaufbau des Daches und Firstdetail (First A)

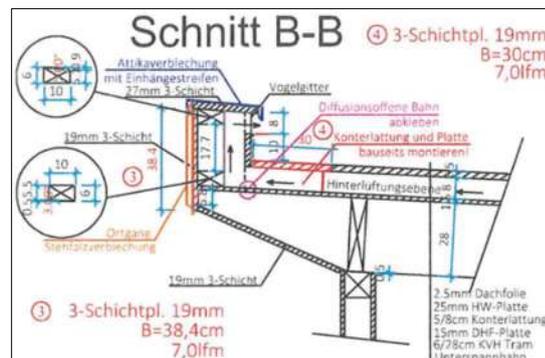


Abb. 53: Schichtaufbau des Daches und Firstdetail (First B)

An beiden Versuchsdächern sind beide Firstausführungen nebeneinander ausgeführt (Abb. 55). Die Höhe der Konterlattung und somit der Hinterlüftungsebene beträgt 8 cm. Der Abstand zwischen den Latten in den untersuchten Bahnen beträgt 62 cm bei einer Gesamtlänge des Daches von 12,5 m. Dach 1 hat eine Breite von 6 m und Dach 2 eine Breite von 12 m. An beiden Dächern existiert eine Fensterunterbrechung in den HLEs exakt auf mittlerer Sparrenlänge. Traufseitig ist ebenfalls ein Vogelgitter montiert, wodurch sich der Öffnungsquerschnitt der Traufe um 50 % reduziert (Abb. 54).

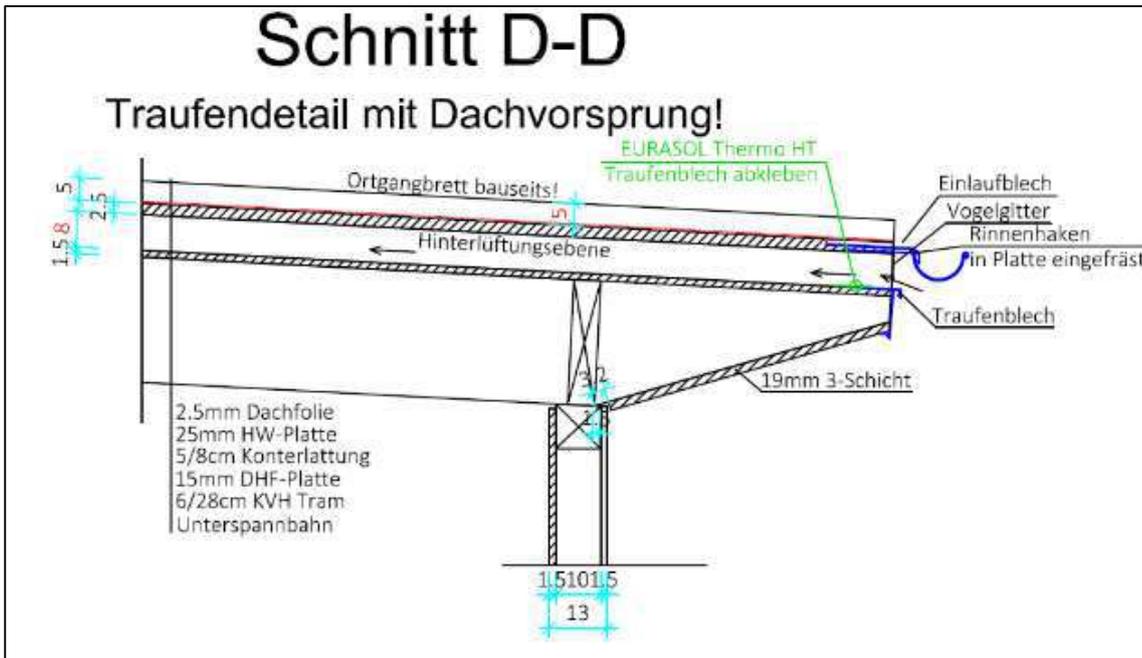


Abb. 54: Traufendetail der beiden Versuchsdächer

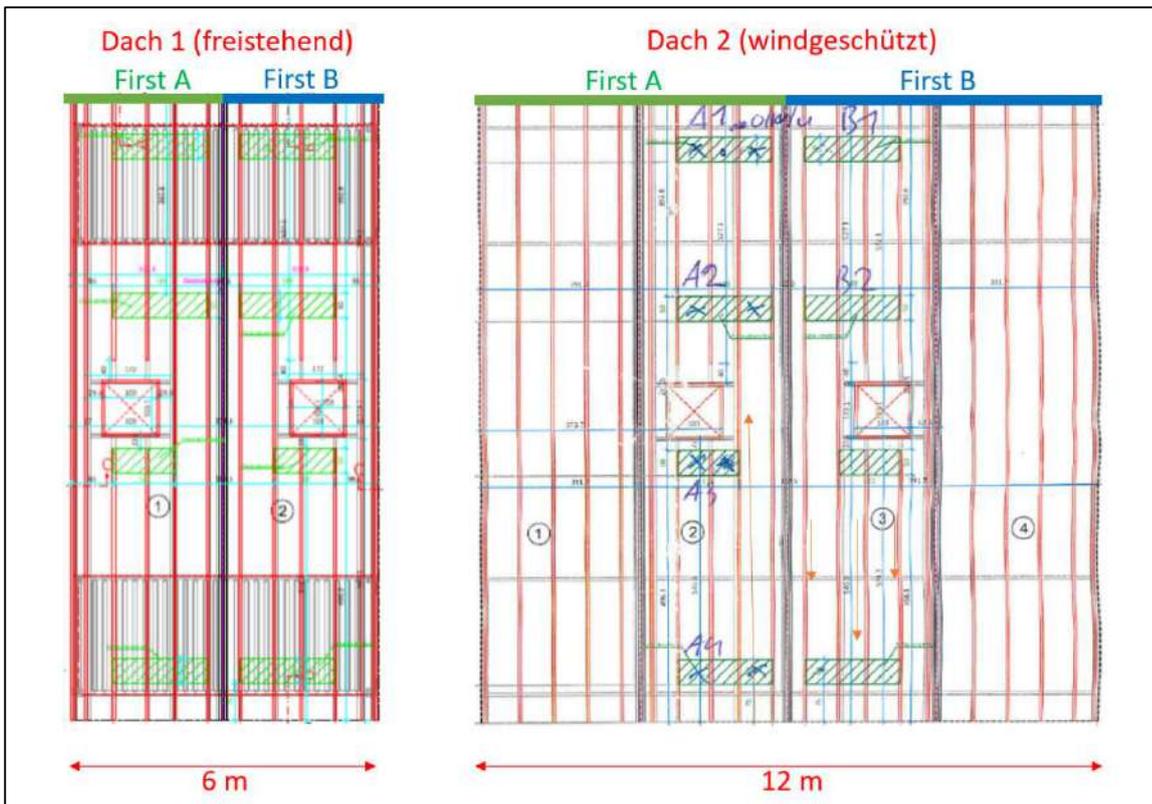


Abb. 55: Draufsicht mit Lage der Konterlattungen, der Fensterunterbrechungen und der Firstarten der Versuchsdächer 1 und 2

4.3.1.4 Sensoren und Messtechnik

4.3.1.4.1 Positionen

Steildachaufbau:

Die Aufzeichnung des Außenklimas in Stetten wurde mit dem Ahlborn FMA-510 Meteo Multigeber in Kombination mit dem FLA 613 GS Globalstrahlungssensor und FLA 613 UVA UV-Strahlungssensor durchgeführt. Zu den aufgezeichneten Parametern gehören Außenlufttemperatur, relative Luftfeuchte, barometrischer Druck, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und UV-Strahlung. Die oben genannte Messeinrichtung wurden auf einem in unmittelbarer Nähe des Forschungshauses befindlichen Flachdach montiert (Abb. 56). Die gemessenen Daten wurden mittels Datenlogger (Ahlborn ALMEMO 2890) ausgelesen und als 10-minütige Mittelwerte gespeichert. Der für die Auswertung betrachtete Aufzeichnungszeitraum beträgt ein volles Jahr (21.09.2018 – 20.09.2019).



Abb. 56: Wetterstation am Dach des Akustik Center Austria der HFA in Stetten

Zur selben Zeit wurden die entsprechenden Klimaparameter in der HLE am Forschungsdach als 10-minütige Mittelwerte aufgezeichnet. Insgesamt 48 NTC-Temperaturfühler (Ahlborn ZA 9040-FS) und 40 digitale Temperatur/Luftfeuchte Kombisensoren (Ahlborn FHAD 46) wurden in der HLE verbaut. Die Datenaufzeichnung erfolgte mittels Datenloggern (2x Ahlborn A5690). Die Positionen der Sensoren sind in Abb. 57 und Abb. 58 dargestellt. In allen durchgehenden Bahnen wurden die Kombisensoren auf 2/3 der Gesamtlänge zwischen Traufe und First positioniert. An der gleichen Position wurden in den Bahnen 3, 5, 9, 10, 11, 14, 15 und 16 jeweils die Oberflächentemperatur der Unterdachbahn sowie der Dacheindeckungsunterseite mittels NTC-Sensoren aufgezeichnet. Weitere NTC-Sensoren waren traufseitig (1/3 der Bahnlänge) und firstseitig (3/3 der Bahnlänge) positioniert. Mit diesen wurden die jeweiligen Lufttemperaturen der Bahnen 3, 9, 10 und 16 aufgezeichnet. Die Kombisensoren in den kurzen Bahnen mit Fensterunterbrechung (6, 7, 12 und 13) wurden ebenfalls auf 2/3 der Bahnlänge

positioniert (in der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt). Jeweils ein Sensor firstseitig (über dem Fenster) und traufseitig (unter dem Fenster). Die Sensoren am nordseitigen Dach wurden achsensymmetrisch zur Firstlinie positioniert. Die Positionen entsprechen also jenen am südseitigen Dach.

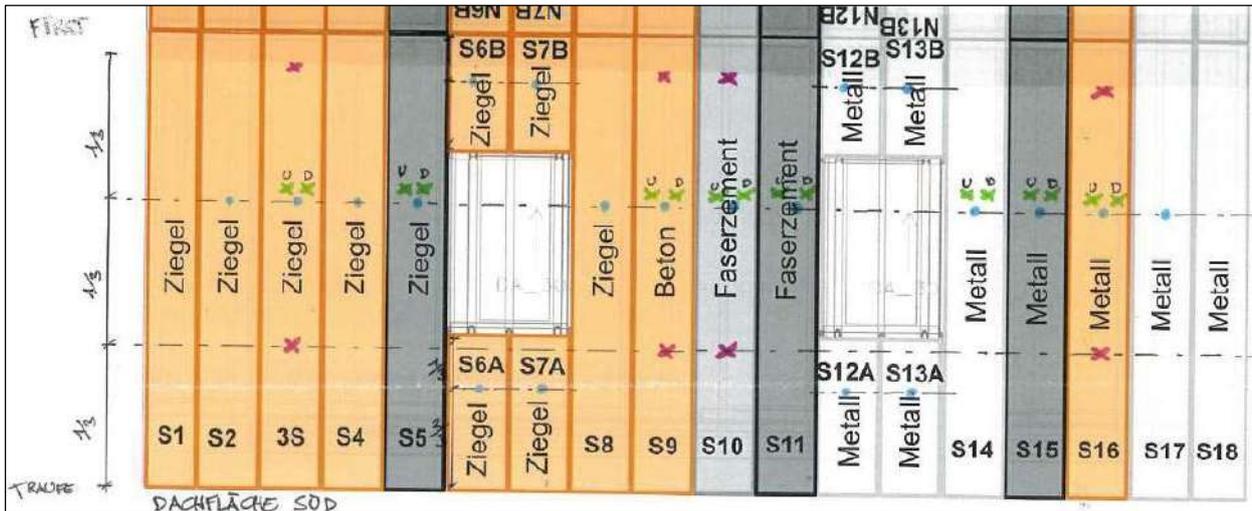


Abb. 57: Südliche Sensorpositionen unter den verschiedenen Dachbahnen (Nordseite wurde Spiegelgleich ausgeführt)

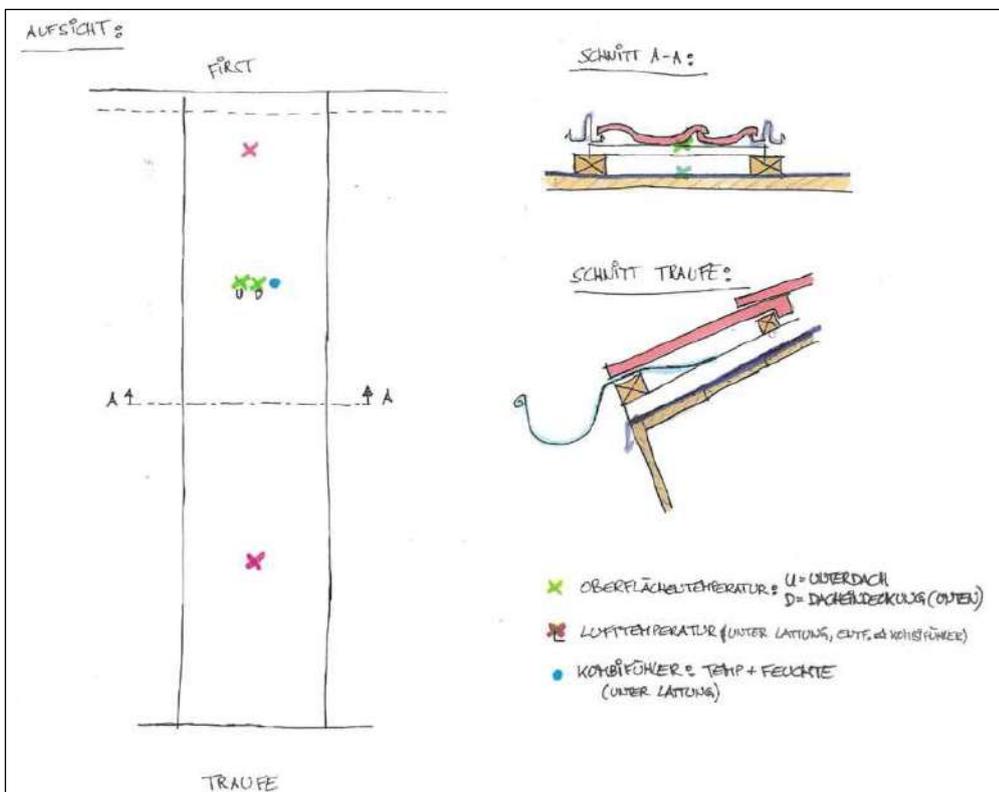


Abb. 58: Detailskizze Sensorpositionen in der HLE

In Abb. 59 bis Abb. 61 ist zu sehen, dass sämtliche Lufttemperatursensoren mit einem Strahlungsschutzring aus Aluminium ausgestattet wurden, um den Strahlungseinfluss der umgebenden Materialien auf die Messergebnisse auf ein Minimum zu reduzieren. Die Oberflächentemperatursensoren (vgl. Abb. 61) wurden ohne Strahlungsschutz montiert.



Abb. 59: NTC-Temperaturfühler mit Strahlungsschutzring aus Aluminium



Abb. 60: Temperatur/Luftfeuchte Kombifühler mit Strahlungsschutzring aus Aluminium



Abb. 61: NTC-Temperaturfühler an Ziegelunterseite

Zusätzlich zur Aufzeichnung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der HLE wurden mittels Thermoanemometern (Ahlborn FVAD 35 TH5) Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Bahnen durchgeführt. So sollten die Strömungsgeschwindigkeiten in der HLE aufgezeichnet werden, die durch thermischen Auftrieb und Windeinfluss initiiert werden. Auf diese Weise wurden die Luftströmungen der gegenüberliegenden Bahnen (N-S) mit identischer Dacheindeckung über einen Zeitraum von jeweils 24 Stunden aufgezeichnet.

Flachdachaufbau:

Die Aufzeichnung der Außentemperatur und -luftfeuchte in Groß-Enzersdorf erfolgte mittels Ahlborn FHAD 46-4AG T-/LF-Fühler. Dieser wurde firstseitig am Dach 1 montiert. Die Windrichtung wurde mit einem Ahlborn FVA614 Windrichtungsgeber aufgezeichnet. Die Windgeschwindigkeitsaufzeichnung erfolgte mittels Ahlborn FVA6152 Windgeschwindigkeitsgeber. Dieser war firstseitig am freistehenden Versuchsdach montiert. Die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit, sowie die Strömungsgeschwindigkeit in der HLE wurde an verschiedenen Positionen im Dach aufgezeichnet (Abb. 62). Sämtliche Lufttemperaturmesstellen wurden auch hier mit Strahlungsschutzring aus Aluminium ausgeführt (vgl. Abb. 59 und Abb. 60). Die Klimaparameter (T und rel. LF) wurden in etwa auf 2/3 der Firstlänge aufgezeichnet. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde mittels Thermoanemometer (Ahlborn FVAD 35 TH4) in firstnähe gemessen. Die Aufzeichnungen wurden am freistehenden, sowie am windgeschützten Dach durchgeführt. Für beide Firstarten wurde jeweils in einer unterbrochenen (1AF, 1BF, 2AF, 2BF) und einer durchgehenden Bahn (1AD, 1BD, 2AD, 2BD) aufgezeichnet.

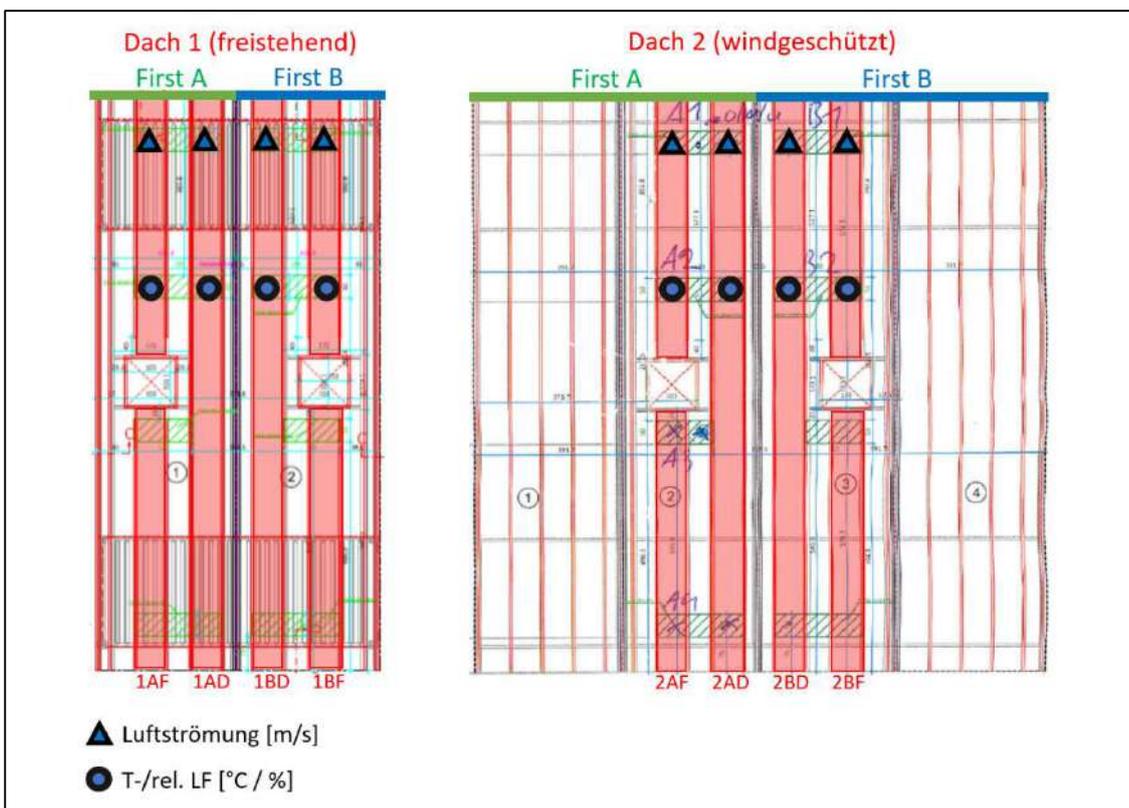


Abb. 62: Sensorpositionen und Variantenbezeichnungen der flachgeneigten Versuchsdächer 1 und 2

4.3.1.4.2 Messgenauigkeit

In Tab. 7 sind die Herstellerangaben den Messgenauigkeiten sämtlicher verwendeter Sensoren dargestellt.

Tab. 7: Messprinzipien und Messungenauigkeiten (Herstellerangaben) der verwendeten Sensorik

Messgröße	Messprinzip	Hersteller	Typ-Nr.	Messgenauigkeit (Herstellerangaben)
Temperatur	Digital (CMOSens®)	Ahlborn	FHAD 46	typ. $\pm 0,2$ K bei 5 ... 60 °C, max. $\pm 0,4$ K bei 5...60°C max. $\pm 0,7$ K bei -20...80°C
Luftfeuchte	Digital (CMOSens®)	Ahlborn	FHAD 46	$\pm 2,0$ % r.F. im Bereich 10 ... 90 % r.F. $\pm 4,0$ % r.F. im Bereich 5 ... 98 % r.F.
Temperatur	NTC-Fühler	Ahlborn	ZA 9040-FS	-20 bis < 0 °C: $\pm 0,4$ K 0 bis 70 °C: $\pm 0,2$ K >70 bis 100 °C: $\pm 0,6$ K
Temperatur	Widerstandsmessung (Pt100)	Ahlborn	FMA-510	$\pm 0,3$ K bei 20 °C
Luftfeuchte	Digital	Ahlborn	FMA-510	± 3 % RH bei 0 ... 90 % RH ± 5 % RH bei 90 ... 100 % RH
Windgeschwindigkeit/ Windrichtung		Ahlborn	FMA-510	$\pm 3^\circ$
				0 ... 35 m/s: $\pm 0,3$ m/s oder ± 3 % v. MW (es gilt der größere Wert) 36 ... 60 m/s: ± 5 % v. MW
Globalstrahlung	Pyranometer	Ahlborn	FLA-613-GS	< 10 % v. MW
UV-Strahlung	Pyranometer	Ahlborn	FLA-613-UVA	< 10 % v. MW
Luftströmung	Thermoanemometer	Ahlborn	FVAD 35 TH4	$\pm 0,04$ m/s +1% v. MW Temperatureinfluss: $\pm 0,5$ % v. MW/°C bei 0,3...2 m/s (Nenntemperatur: 22°C)
Luftströmung	Thermoanemometer	Ahlborn	FVAD 35 TH5	$\pm 0,2$ m/s +2% v. MW Temperatureinfluss: $\pm 0,3$ % v. MW/°C bei 0,3...20 m/s (Nenntemperatur: 22°C)
Luftfeuchte	Digital (CMOSens®)	Ahlborn	FHAD 46-4AG	$\pm 2,0$ % r.F. im Bereich 10 ... 90 % r.F. $\pm 4,0$ % r.F. im Bereich 5 ... 98 % r.F. bei Nenntemperatur
Temperatur	Digital (CMOSens®)	Ahlborn	FHAD 46-4AG	typ. $\pm 0,2$ K bei 5 ... 60 °C, max. $\pm 0,4$ K bei 5...60°C max. $\pm 0,7$ K bei -20...80°C
Windrichtung	opto-elektronisch	Ahlborn	FVA614	$\pm 5^\circ$
Windgeschwindigkeit	opto-elektronisch	Ahlborn	FVA6152	$\pm 0,5$ m/s ± 3 % v. MW

4.3.1.5 Datenauswertung und statistisches Klimaprognosemodell

4.3.1.5.1 *Temperatur und Luftfeuchtigkeit*

Ziel der Datenaufzeichnung am Forschungshaus war es zum einen, die Klimaverhältnisse in der HLE besser einschätzen zu können. Dazu wurden die Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte von Oberflächentemperaturen, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in der HLE im Jahresverlauf bei den verschiedenen Dacheindeckungen untersucht. Durch diese Werte wurde indiziert, wie groß die klimatische Belastung der Unterdachbahn im Laufe des Jahres in Abhängigkeit von der Art der Dacheindeckung ist. Um genauer zu verstehen zu welchen Zeitpunkten und unter welchen außerklimatischen Einflüssen Extremwerte auftreten, wurden Verlaufsdigramme erstellt, aus denen die Zusammenhänge zwischen Außenklima, Dacheindeckung und HLE-Klima hervorgehen. Anhand von Histogrammen wurde jener Zeitraum (in % der Aufzeichnungszeit) ermittelt, in dem die Luftfeuchtigkeit in der HLE bei den verschiedenen Dacheindeckungen ≥ 80 % betrug. Zusätzlich wurde berechnet, in welchen Zeiträumen der Taupunkt der Umgebungsluft der HLE jeweils an der Dacheindeckungsunterseite und an der Unterdachbahnoberfläche unterschritten wurde. Durch diese beiden Analysen konnten Rückschlüsse darauf gezogen werden, wie groß das Kondensatbildungspotential und damit die Gefahr von Feuchtigkeitsschäden an Dachkonstruktion und Unterdachbahn ist. Um die Temperaturbelastung genauer charakterisieren zu können wurden ebenfalls Histogramme ausgewertet, indem der Zeitraum (in % der Aufzeichnungszeit) ermittelt wurde, in dem die Temperatur unter den verschiedenen Dacheindeckungen 39 °C überschritt (≥ 40 °C).

4.3.1.5.2 *Strömungsgeschwindigkeit – Wind und thermischer Auftrieb*

In Ergänzung zu den Klimamessungen in der HLE der Forschungsdächer wurden punktuelle Messungen der Strömungsgeschwindigkeit mittels Thermoanemometer (Ahlborn FVAD 35 TH5) durchgeführt. Diese wurden von der Innenraumseite aus auf Position der halben Dachlänge in die HLE eingeführt. So sollte festgestellt werden, wie sich die Strömungsgeschwindigkeit unter den verschiedenen Dacheindeckungen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und dem thermischem Auftrieb (ΔT zwischen T_{HLE} und T_A) verhält und welchen Einfluss die entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten auf das Klima in der HLE haben. Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurde für die Auswertung zu einer Variablen zusammengefasst (Effektive Windgeschwindigkeit $\rightarrow v_{w, eff}$). Die Effektive Windgeschwindigkeit wurde nach Gleichung (B) berechnet und stellt jenen theoretischen Anteil der Windgeschwindigkeit dar, welcher normal zur Dachausrichtung auftritt. Dabei zeigen Luv-seitige Winde positive Werte und Lee-seitige Winde negative Werte für $v_{w, eff}$. Auf diese Art wurden die Strömungsgeschwindigkeiten unter den gegenüberliegenden, identischen Dacheindeckungen jeweils über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden aufgezeichnet. Die Messungen wurden von April bis Mai 2019 nacheinander durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anschließend miteinander verglichen (Nord-Süd-Vergleich).

Die bereits im vorigen Kapitel beschriebenen strömungstechnischen Untersuchungen an den beiden flachgeneigten Versuchsdächern in Groß-Enzersdorf sollten in Verbindung mit den gleichzeitig

aufgezeichneten Klimaparametern aufzeigen in welchem Fall (windgeschützt – freistehend, Fensterunterbrechung – keine Fensterunterbrechung) First A und in welchem Fall First B das bessere Durchlüftungspotential der HLE zeigt.

4.3.1.5.3 Klimaprognosemodell

Um einen Zusammenhang zwischen Umgebungsklimadaten und Klimadaten in der HLE herzustellen, mussten beide Messwerte exakt zu denselben Zeitpunkten vorliegen. Da es für beide Klimadatenaufzeichnungen einige Zeiträume mit leicht unterschiedlichen Zeitstempeln gab, wurden die entsprechenden Daten mittels linearer Interpolation angepasst, um die Werte vergleichbar zu machen. Die meisten gängigen hygrothermischen Simulationsprogramme verwenden stündliche Mittelwerte relevanter Klimaparameter als Eingangsdaten. Daher war es notwendig, die stündlichen Mittelwerte der interpolierten Messdaten für das Außenklima sowie für das Klima in der HLE zu berechnen. Um sicherzustellen, dass das Modell auf verschiedene Dachneigungen und -ausrichtungen projiziert werden kann, wurden die gemessenen Werte für Globalstrahlung (G_e), Windrichtung (ω_e) und Windgeschwindigkeit (v_e) angepasst. Dazu wurden die Neigung (α_{vl}) und Ausrichtung (β_{vl}) der untersuchten Dächer sowie die Sonnenhöhe (ϵ_s) und der Azimut (γ_s) der Sonne (Abb. 63) herangezogen. Die Korrektur erfolgte nach Gleichung (A) und (B). Die stündliche Sonnenhöhe und der Azimut wurden mit der Software Meteonorm 7 für den Standort $48,37^\circ$ N, $16,36^\circ$ O interpoliert.

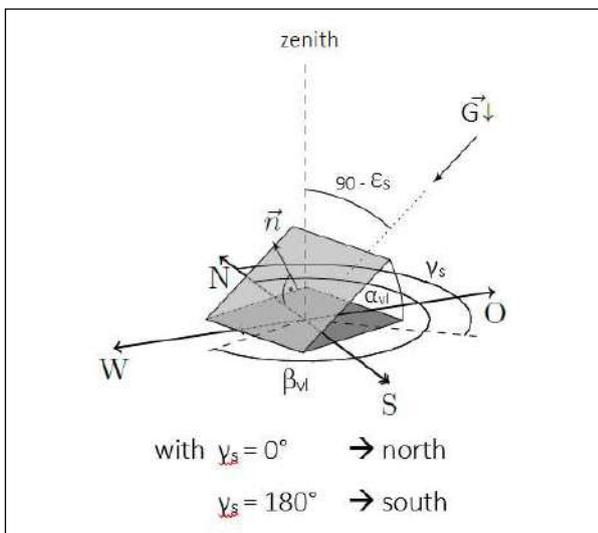


Abb. 63: Relevante Winkelverhältnisse zur Berechnung der effektiven Globalstrahlung ($G_{e,eff}$) senkrecht zur Dachfläche. ϵ_s = Sonnenhöhe, α_{vl} = Dachneigung, γ_s = Azimut, β_{vl} = Dachausrichtung.

$$G_{e,eff} = G_e / \sin(\epsilon_s) * [-\cos(90 - \epsilon_s) * \cos(\gamma_s) * \sin(\alpha_{vl}) * \cos(\beta_{vl}) + \sin(90 - \epsilon_s) * \sin(\gamma_s) * \sin(\alpha_{vl}) * \sin(\beta_{vl}) + \cos(90 - \epsilon_s) * \cos(\alpha_{vl})] \quad (A)$$

$$v_{e,eff} = v_e * \cos(\omega_e - \beta_{vl}) \quad (B)$$

$G_{e,eff}$ → Globalstrahlung normal zur Dachfläche
 $v_{e,eff}$ → Effektive Windgeschwindigkeit normal zur Traufe

Die absolute Luftfeuchtigkeit in g/m^3 wurde nach den Gleichungen C bis F berechnet.

$$d = p / (R_d * T) \quad (C)$$

$$p = \varphi * p_{sat} \quad (D)$$

$$p_{sat} = 610,5 * \exp[(17,269 * t) / (237,3 + t)] \text{ für } t \geq 0 \quad (E)$$

$$p_{sat} = 610,5 * \exp[(21,875 * t) / (265,5 + t)] \text{ für } t < 0 \quad (F)$$

d	→ Absolute Luftfeuchtigkeit [g/m^3]
p	→ Wasserdampfpartialdruck [Pa]
p_{sat}	→ Sättigungsdampfdruck [Pa]
R_d	→ Gaskonstante [461,51 (J/(kg*K))]
T	→ Absolute Temperatur [K]
t	→ Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Um ein Modell zur Abschätzung der Klimabedingungen in der HLE von Steildächern zu erstellen, wurde mit den interpolierten und stündlich gemittelten Klimadaten eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei sollte ein Modell entwickelt werden, welches durch die Verwendung leicht zugänglicher Außenklimadaten einfach anzuwenden ist. Zunächst wurden die signifikanten Einflussparameter bestimmt. Der prinzipielle Aufbau einer Regressionsgleichung ist in Gleichung (G) dargestellt.

$$y = A_1 * x_1 + A_2 * x_2 \dots A_n * x_n \quad (G)$$

$x_1, x_2 \dots x_n$ → Unabhängige Variablen (in diesem Fall verschiedene Außenklimaparameter)

$A_1, A_2 \dots A_n$ → Regressionskoeffizienten

y → Abhängige Variablen (Temperatur oder Luftfeuchte in der HLE)

Die Regression wurde anhand der Klimaaufzeichnungen zwischen dem 21.09.2018 und 20.09.2019 durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Regressionsansätze verfolgt. Im ersten Ansatz wurde nicht zwischen Tag- und Nachtdaten differenziert. So wurden drei Regressionsmodelle für die Temperatur und vier Modelle für Luftfeuchtigkeit in der HLE auf Ihre Anwendbarkeit als klimatisches Prognosemodell hin überprüft (siehe Gleichungen (H)-(N)).

$$T_{vl} = A_1 * T_a \quad (H)$$

$$T_{vl} = A_1 * T_a + A_2 * G_{e,eff} \quad (I)$$

$$T_{vl} = A_1 * T_a + A_2 * G_{e,eff} + A_3 * v_{e,eff,+} + A_4 * v_{e,eff,-} \quad (J)$$

$$d_{vl} = A_1 * d_e \quad (K)$$

$$d_{vl} = A_1 * d_e + A_2 * G_{e,eff} \quad (L)$$

$$d_{vl} = A_1 * d_e + A_2 * G_{e,eff} + A_3 * v_{e,eff,+} + A_4 * v_{e,eff,-} \quad (M)$$

$$d_{vl} = A_1 * d_e + A_2 * \sqrt{G_{e,eff}} \quad (N)$$

T_a → Außentemperatur [K]

d_e → Absolute Luftfeuchtigkeit außen [g/m^3]

T_{vl} → Temperatur in der HLE [K]

d_{vl} → Absolute Luftfeuchtigkeit in der HLE [g/m^3]

$v_{e,eff,+}$ → Effektive Windgeschwindigkeit normal zur Traufe (Luvseitig) [m/s]

$v_{e,eff,-}$ → Effektive Windgeschwindigkeit normal zur Traufe (Leeseitig) [m/s]

$A_1, A_2 \dots A_n$ → Regressionskoeffizienten

Im zweiten Ansatz wurde zwischen Tag- und Nachtdaten differenziert. Nachts fällt der Einfluss der Globalstrahlung auf das Klima in der HLE weg. Deshalb wurde bei den entsprechenden Regressionsmodellen der Faktor Globalstrahlung weggelassen und die Gleichungen (O)-(P) für die Untersuchung herangezogen.

$$T_{vl} = A_1 * T_a \quad (O)$$

$$T_{vl} = A_1 * T_a + A_2 * V_{e,eff,+} + A_3 * V_{e,eff,-} \quad (P)$$

$$d_{vl} = A_1 * d_e \quad (Q)$$

$$d_{vl} = A_1 * d_e + A_2 * V_{e,eff,+} + A_3 * V_{e,eff,-} \quad (R)$$

Ziel des zweiten Ansatzes war es, jene Kombination zwischen Tag- und Nachtmodellen zu identifizieren, die den Jahresverlauf der Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der HLE am genauesten beschreibt. Die Prognosemodelle für die Temperatur wurden anhand der aufgezeichneten Daten in der südlichen HLE erstellt und anschließend durch Projektion des ermittelten Modells auf die Messdaten der nördlichen HLE validiert. Dazu wurde der berechnete Temperaturverlauf mit dem gemessenen Verlauf verglichen und dessen Genauigkeit überprüft. Die Prognosemodelle für die Luftfeuchtigkeit wurden anhand der aufgezeichneten Daten in der nördlichen HLE erstellt und durch Projektion auf die Messdaten der südlichen HLE validiert.

4.3.2 Ergebnisse

4.3.2.1 Messdaten

4.3.2.1.1 Temperatur und Luftfeuchtigkeit

In Abb. 64 sind die im Zeitraum vom 21.09.2018 – 20.09.2019 gemessenen Maximal- und Minimaltemperaturen sowie die Durchschnittstemperaturen in der HLE dargestellt. Die Maximaltemperaturen erreichen bei der schwarzen Metalleindeckung die höchsten Werte. An zweiter Stelle folgen die schwarze Faserzementeindeckung und die rotbraune Metalleindeckung. Auf der Südseite sind die Maximalwerte deutlich höher als auf der Nordseite. An dritter Stelle folgen die schwarze Ziegeleindeckung sowie die graue Faserzementeindeckung. Die Unterschiede zwischen Nord- und Südseite sind hier jedoch schon weitaus geringer ausgeprägt. Die roten Ziegel- und Betoneindeckungen zeigen allesamt miteinander vergleichbare Maximalwerte, die tendenziell auf der Südseite etwas höher sind als auf der Nordseite. Ein klarer Unterschied zwischen den verschiedenen Firstausführungen geht in Bezug auf die Maximaltemperatur nicht hervor. Die tiefsten Maximaltemperaturen wurden bei den naturblanken Metalleindeckungen gemessen. Ein Unterschied zwischen Nord- und Südseite sowie zwischen den beiden Firstausbildungen ist nicht erkennbar.

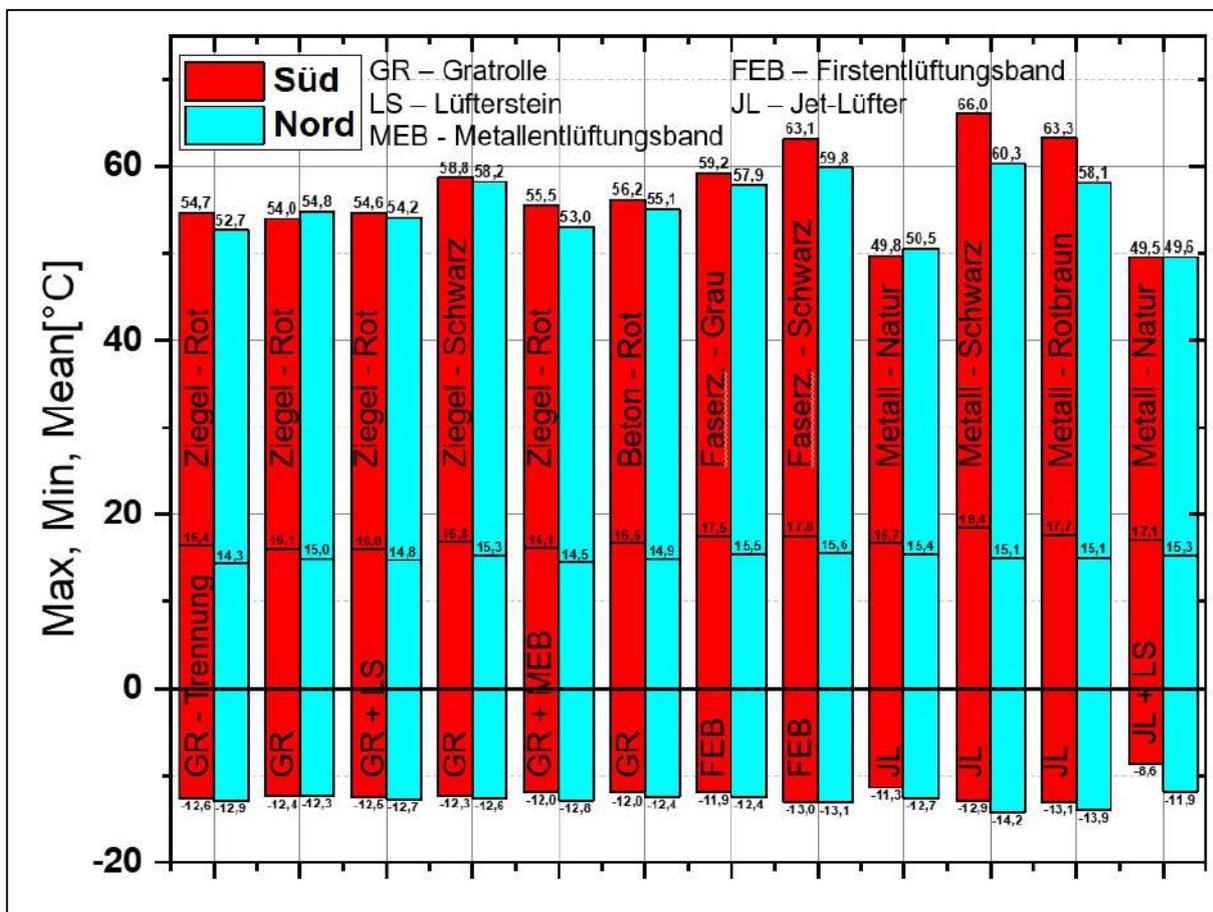


Abb. 64: Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte der gemessenen Lufttemperatur in der HLE unter den verschiedenen Dacheindeckungen auf 2/3 Sparrenlänge über den gesamten Messzeitraum

Die Durchschnittstemperatur liegt in allen Fällen nördlich tiefer als südlich. Die Differenzen zwischen den einzelnen Materialien und Farben zeigen sich deutlich geringer als bei den Maximalwerten. Ähnlich verhält es sich mit den Minimaltemperaturen, wobei die naturblanke Metalleindeckung mit Jet-Lüfter + Lüfterstein auf der Südseite (S17) einen weitaus höheren Minimalwert aufweist als die naturblanke Eindeckung ohne Lüfterstein (S14) sowie auch als alle anderen Dacheindeckungen. Eine genauere Analyse der Temperaturverläufe unterhalb von S17 im Vergleich zu S14 hat gezeigt, dass die nächtlichen Temperaturen von S17 nahezu ganzjährig etwa 1,0 K – 1,5 K höher liegen. Tagsüber zeigen sich die Temperaturen hingegen unter beiden Eindeckungen auf ähnlichem Niveau.

Abb. 65 zeigt das entsprechende Boxplot der Temperaturmessdaten. Die Grunderkenntnisse, die hieraus gezogen werden können, entsprechen den bereits oben in Bezug auf Abb. 64 beschriebenen. Jedoch lässt sich zusätzlich feststellen, dass es sich bei allen gemessenen Maximaltemperaturen um Ausreißer im Sinne des Boxplot-Diagramms handelt. Je dunkler die Dacheindeckung, desto höhere Werte nehmen die Ausreißer an und desto größer ist deren Spannweite. Bei den naturblanken Metalleindeckungen fällt außerdem auf, dass es sich bei den Maximalwerten der nordseitigen, naturblanken Metalleindeckungen ebenfalls um Ausreißer handelt, während die Maximalwerte südseitig keine Ausreißer darstellen und somit häufiger vorkommen.

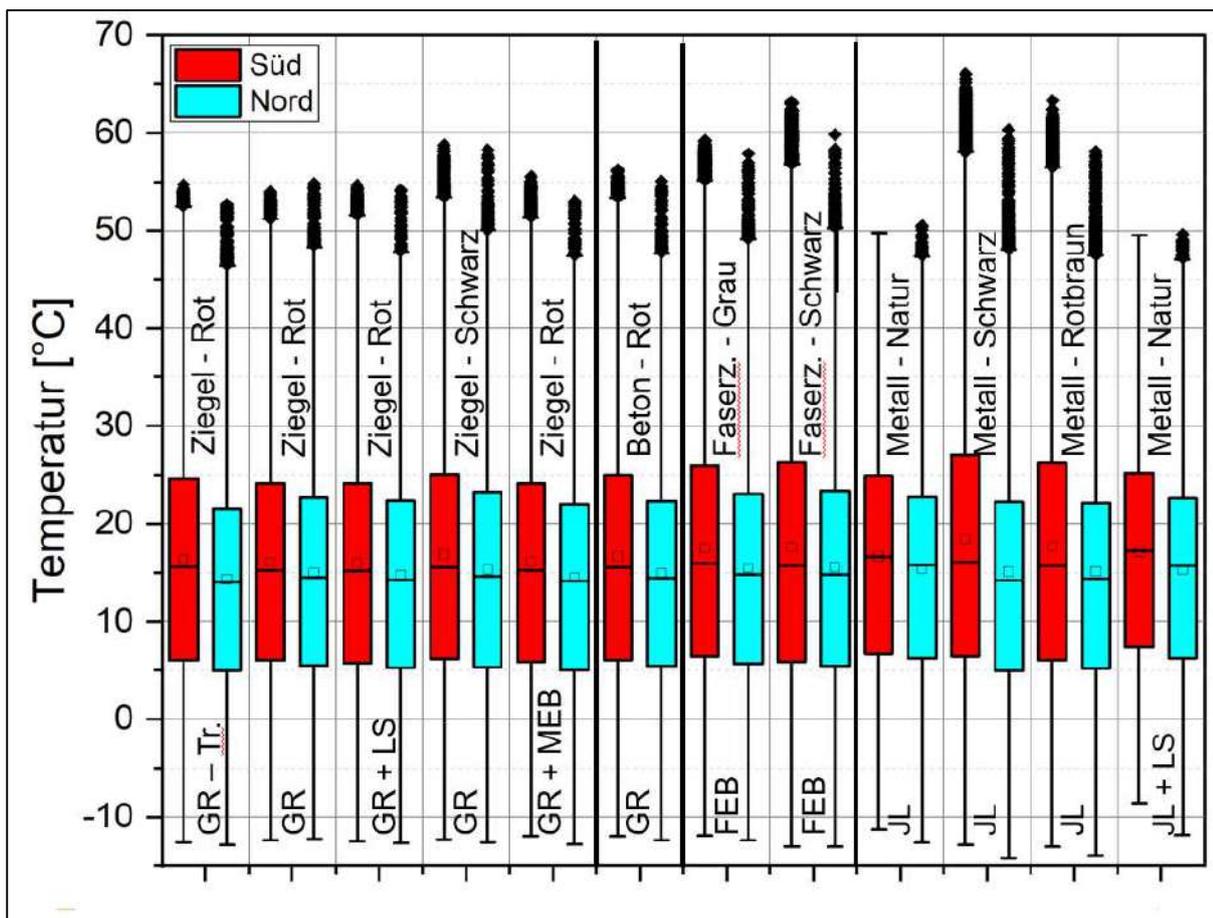


Abb. 65: Boxplot-Auswertung der gemessenen Lufttemperatur in der HLE unter den verschiedenen Dacheindeckungen auf 2/3 Sparrenlänge über den gesamten Messzeitraum

Die durchschnittliche Lufttemperatur in der HLE nimmt mit dem Abstand zur Traufe zu (Abb. 66). Im Sommer zeigt sich bei den roten Beton- und Ziegel Dacheindeckungen auf einem Abstand von $2/3$ Sparrenlänge südseitig eine um ca. 1 K höhere Durchschnittstemperatur als bei einem Abstand von $1/3$ Länge zur Traufe. Bei der grauen Faserzement- und rotbraunen Metalleindeckung zeigt sich hier eine um ca. 1,5 K höhere Durchschnittstemperatur. Ab $2/3$ Länge bis zum First ändern sich die Durchschnittstemperaturen im Sommer südseitig nur noch geringfügig (Metall Rotbraun) bis gar nicht. Im Winter nimmt sie in drei von 4 Fällen sogar wieder ab. Eine Ausnahme stellt die rotbraune Metalleindeckung dar, bei der die Durchschnittstemperatur auch im Winter zum First hin weiter ansteigt. Allgemein sind im Winter auf der Südseite geringere Unterschiede der Durchschnittstemperatur in Abhängigkeit vom Abstand zur Traufe erkennbar als im Sommer. Eine Ausnahme zeigt sich bei der grauen Faserzementeindeckung, bei der die Durchschnittstemperatur in der Länge um ca. 1°C schwankt. Auf der Nordseite ist im Sommer ebenfalls ein deutlicher Anstieg der Durchschnittstemperatur mit dem Abstand zum First erkennbar. Am größten ist dieser Effekt bei der rotbraunen Metalleindeckung, wo sie von ca. $23,5^\circ\text{C}$ bei $1/3$ der Firstlänge auf 26°C bei $3/3$ der Firstlänge ansteigt. Auffällig ist, dass der Anstieg im zweiten Drittel (zwischen $1/3$ und $2/3$ Länge) hier geringer zu sein scheint als im letzten Drittel (zwischen $2/3$ und $3/3$ Länge). Bei den anderen Dacheindeckungen ist ein ähnlicher Effekt erkennbar wie bereits auf der Südseite beobachtet. Die Durchschnittstemperatur steigt im letzten Drittel weitaus weniger stark als im zweiten Drittel der Bahnlänge. Wie auch auf der Südseite zeigt sich der Anstieg der Durchschnittstemperatur in Abhängigkeit vom Abstand zur Traufe im Winter deutlich geringer als im Sommer.

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

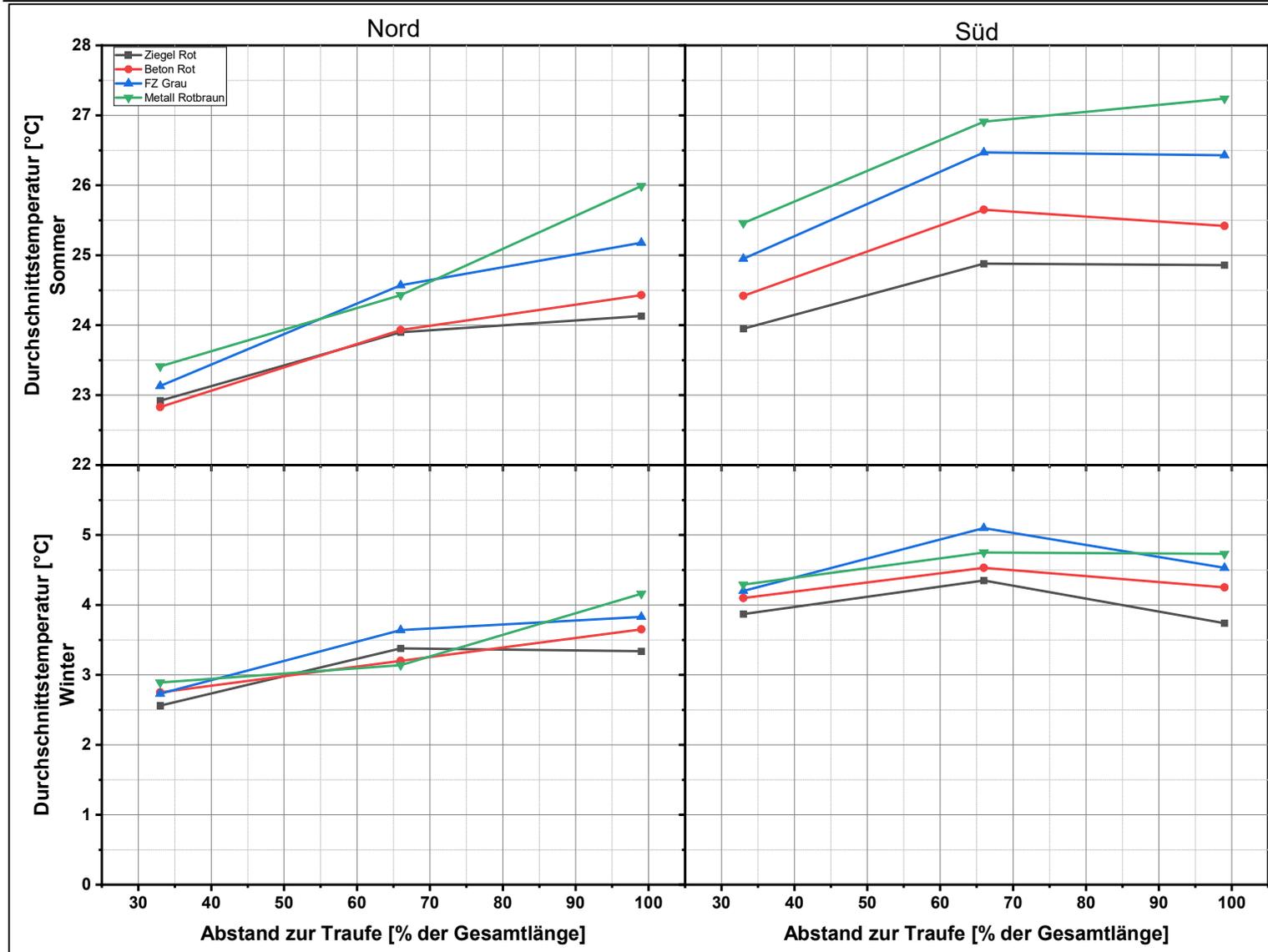


Abb. 66: Durchschnittliche Lufttemperaturen in der HLE unter den verschiedenen Dacheindeckungen in Abhängigkeit des Abstandes zur Traufe

Die Histogramme in Abb. 67 - Abb. 69 zeigen die relative Häufigkeit, mit der verschiedene Temperaturbereiche (Auflösung 1°C) im Jahresverlauf bzw. im Jahreszeitenverlauf unter verschiedenen Eindeckungen auftreten.

Bei allen hier dargestellten Eindeckungen zeigen sich nordseitig sowie südseitig im Winter und Herbst deutliche Peaks beim Temperaturbereich zwischen 0 °C und 1°C. Dies zeigt sich in der Ganzjahresverteilung (hellrote Balken) durch einen Häufigkeitsanteil dieses Temperaturbereichs von etwa 2,5 % bis 5 %, je nach Dachausrichtung und Eindeckungsart.

Im Herbst sind bei allen dargestellten roten Ziegeleindeckungen (Abb. 67) und der Betoneindeckung (Abb. 68) deutliche Peaks um 22 °C (nordseitig) und 30 °C (südseitig) erkennbar. Sowohl nordseitig als auch südseitig ist zudem zur Herbstzeit bei allen aufgeführten Ziegeleindeckungen ein Peak um ca. 9 °C erkennbar. Ähnlich verhält es sich auch bei den naturblanken Metalleindeckungen. Die herbstlichen Peaks bei den südlichen dunklen Metalleindeckungen (Abb. 69) zeigen sich hingegen leicht abweichend zu jenen der Beton- und Ziegeleindeckungen. Es zeigen sich hier keine Peaks um 30 °C, dafür aber deutliche Peaks bei Temperaturen um 40 °C (schwarz) und 38 °C (rotbraun).

Die Häufigkeitsverteilung der Temperaturen im Frühling zeigt sich bei allen Eindeckungen als eine Art Mischform der winterlichen und sommerlichen Häufigkeitsverteilung, wodurch sich ein sehr breites Verteilungsspektrum ergibt. Dieses zieht sich von sehr tiefen Temperaturen weit unter 0 °C bis hin zu sehr hohen Temperaturen über 60 °C (schwarze Metalleindeckung, südlich).

Zur Sommerzeit treten beidseitig und unter allen dargestellten Eindeckungen am häufigsten Temperaturen im Bereich um 20 °C auf, wo deutliche Peaks erkennbar sind. Diese sind jedoch im statistischen Sinne rechtsschief. Das heißt es treten gehäuft auch deutlich höhere Temperaturen auf, welche je nach Eindeckung verschiedene Maximalwerte erreichen:

Ziegel-Rot, Beton-Rot: bis ca. 55 °C (S) – bis ca. 55 °C (N)

Metall-Natur: bis ca. 50 °C (S) – bis ca. 50 °C (N)

Metall-Rotbraun: bis ca. 63 °C (S) – bis ca. 58 °C (N)

Metall-Schwarz: bis ca. 66 °C (S) – bis ca. 60 °C (N)

Im Hinblick auf den gesamten Aufzeichnungszeitraum zeigt sich, dass Temperaturen über 40 °C in allen Fällen vorkommen, jedoch häufiger auf der Südseite als auf der Nordseite und bei den dunklen Eindeckungen häufiger als bei den helleren bzw. spiegelnden.

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

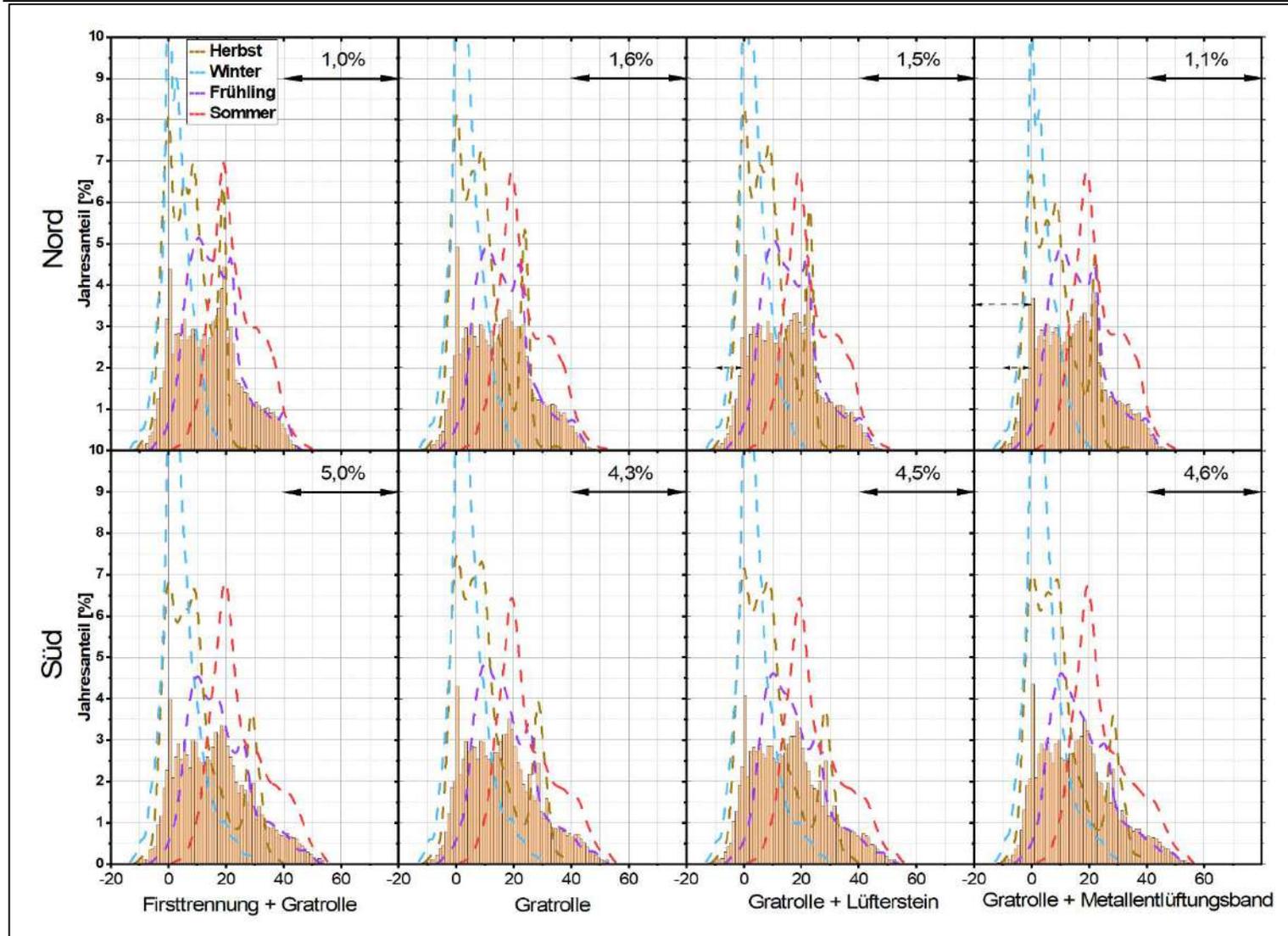


Abb. 67: Zeitliche Anteile des Lufttemperaturniveaus in der Hinterlüftungsebene unter den roten Ziegeleindeckungen (Vergleich der Firstausführungen) im Messzeitraum mit zusätzlicher jahreszeitlicher Differenzierung und Anteil der Messwerte ≥ 40 °C

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

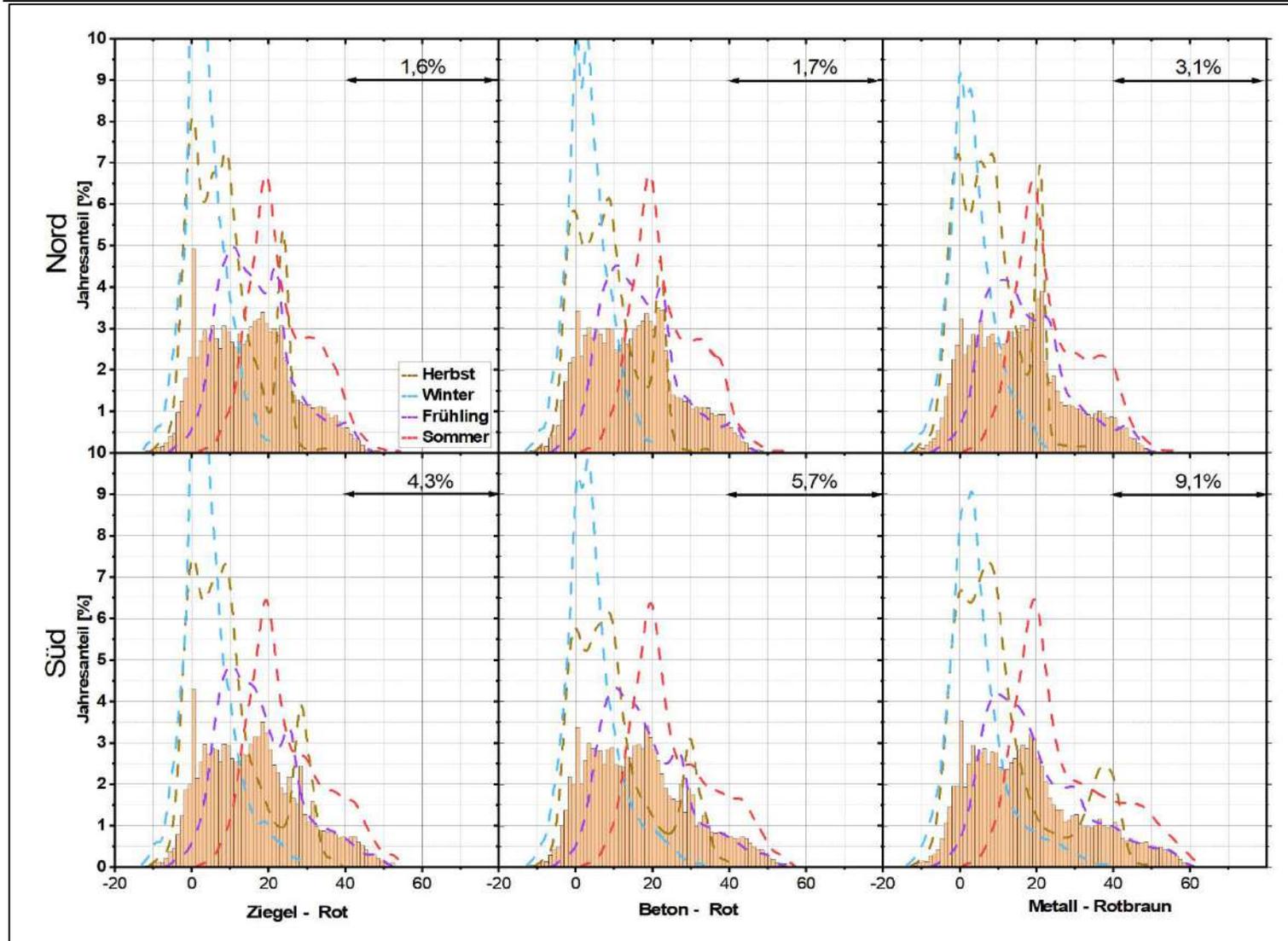


Abb. 68: Zeitliche Anteile des Lufttemperaturniveaus in der Hinterlüftungsebene unter den roten Dacheindeckungen (Materialvergleich) im Messzeitraum mit zusätzlicher jahreszeitlicher Differenzierung und Anteil der Messwerte ≥ 40 °C

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

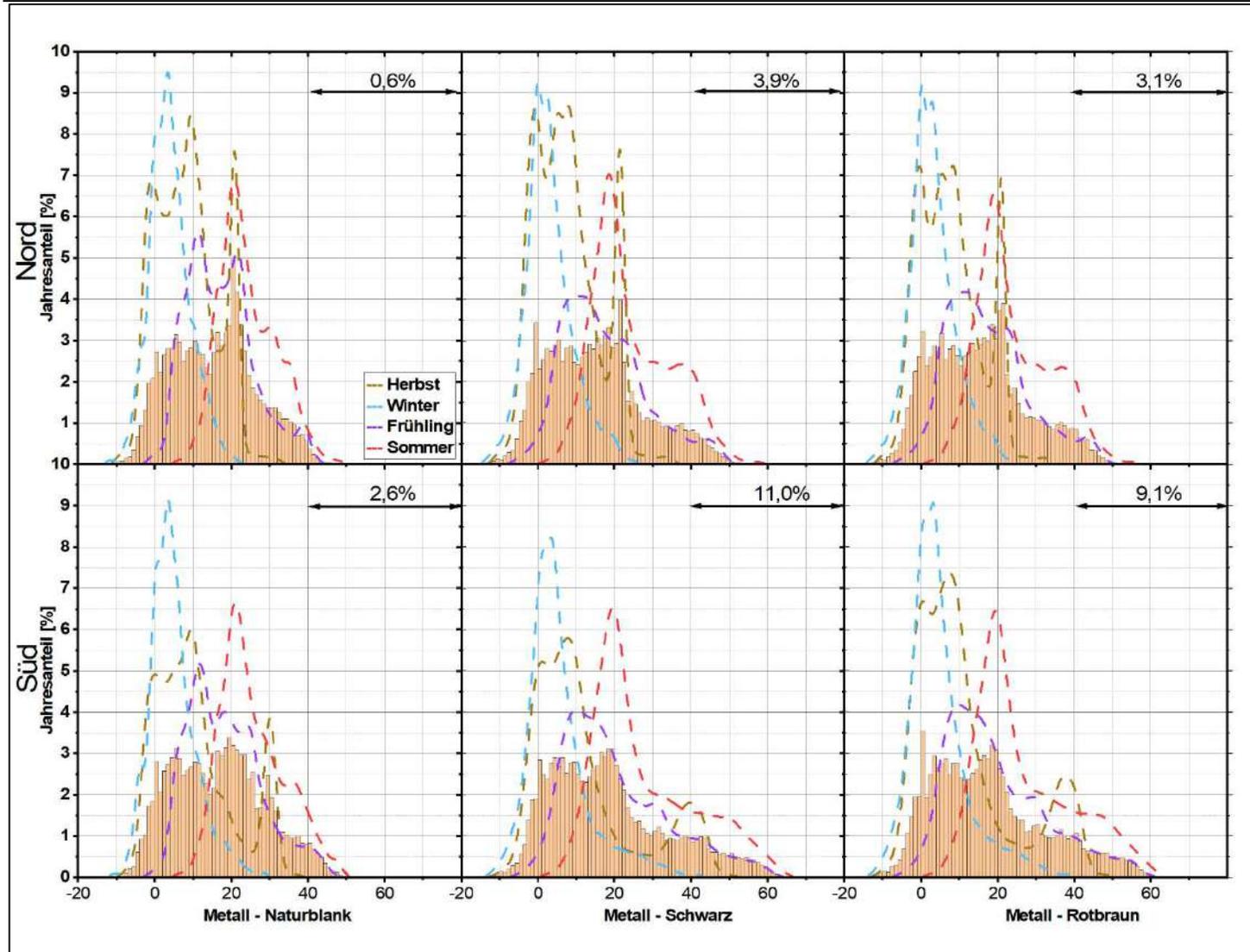


Abb. 69: Zeitliche Anteile des Lufttemperaturniveaus in der Hinterlüftungsebene unter den Metalleindeckungen (Farbvergleich) im Messzeitraum mit zusätzlicher jahreszeitlicher Differenzierung und Anteil der Messwerte ≥ 40 °C.

Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit (Abb. 70) ist unter allen Dacheindeckungen nordseitig höher als südseitig. Dabei weisen Beton- und Ziegeleindeckungen eine tendenziell höhere durchschnittliche Luftfeuchtigkeit auf als Metall- und Faserzementeindeckungen. Bei den Maximalwerten ist zu beachten, dass die Messgenauigkeit bei Werten > 90 % relative Luftfeuchtigkeit bedeutend abnimmt. Dennoch ist zu erkennen, dass nordseitig bei allen Eindeckungen die relative Luftfeuchtigkeit tendenziell höher liegt als südseitig.

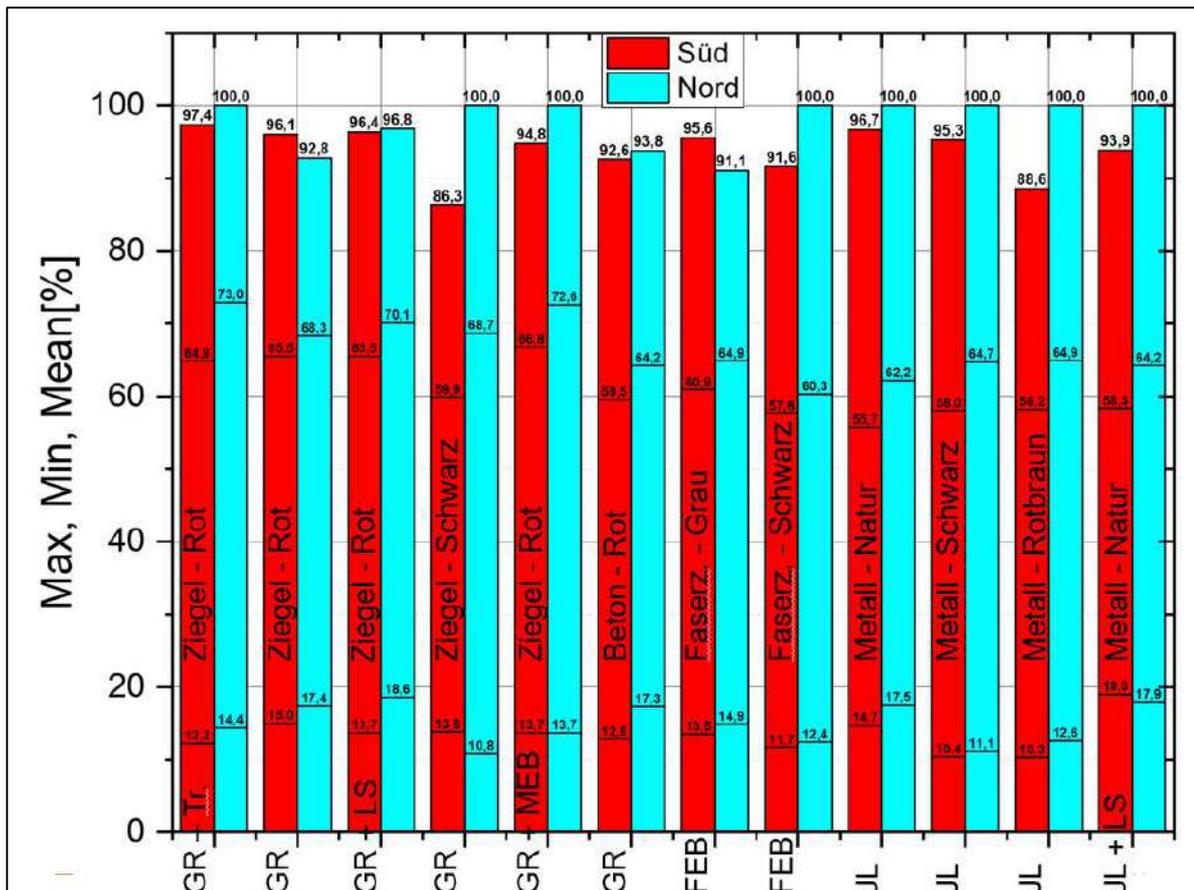


Abb. 70: Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte der gemessenen rel. Luftfeuchte in der HLE unter den verschiedenen Dacheindeckungen auf 2/3 Sparrenlänge über den gesamten Messzeitraum

Abb. 71 zeigt das Boxplot der absoluten Luftfeuchte in den HLEs der verschiedenen Eindeckungen. Die größten Unterschiede sind vor allem bei den Ausreißern zu erkennen. Bei den schwarzen Eindeckungen (Ziegel, Faserzement und Metall) zeigen diese eine deutlich höhere Spannweite nach oben und kommen häufiger vor als bei den roten Ziegel- und Betoneindeckungen sowie den naturblanken Metalleindeckungen. Auch bei den ebenfalls dunkleren Eindeckungen „Faserzement – Grau“ und „Metall – Rotbraun“ ist eine ähnliche Tendenz erkennbar. Bei den schwarzen Eindeckungen liegt außerdem eine deutliche Diskrepanz zwischen nördlicher und südlicher Seite vor, welche bei den helleren Eindeckungen weniger ausgeprägt ist. Nach unten hin liegen bei keiner der Dacheindeckungen Ausreißer vor. Alle Tiefstwerte sind in etwa auf dem gleichen Niveau und liegen bei ca. 3,5 g/m³.

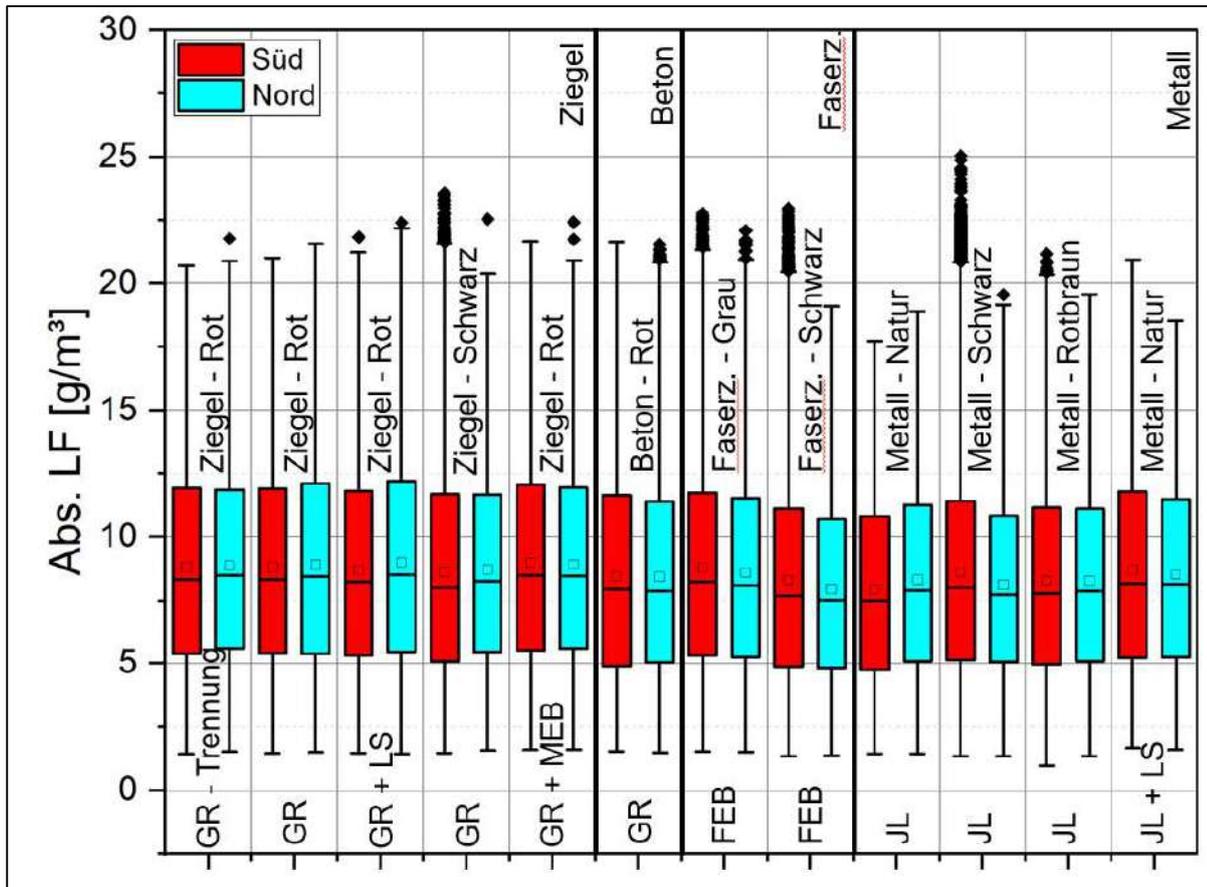


Abb. 71: Boxplotauswertung der gemessenen rel. Luftfeuchte in der HLE unter den verschiedenen Dacheindeckungen auf 2/3 Sparrenlänge über den gesamten Messzeitraum

Die Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit (Abb. 72) bei den roten Ziegeln mit verschiedenen Firstausführungen zeigt, dass erhöhte relative Luftfeuchtigkeit ($\geq 80\%$) vor allem im Winter und Herbst vorkommt. Im Sommer und Frühjahr zeigt sich in allen Fällen ein Peak zwischen 20 % und 40 % Luftfeuchtigkeit. Außerdem ist jeweils auch ein Peak zwischen 70 % und 90 % Luftfeuchtigkeit erkennbar, der jedoch weitaus niedriger ausfällt als im Herbst und Winter. Über das volle Jahr gesehen tritt in den nördlichen Bahnen deutlich häufiger eine erhöhte Luftfeuchtigkeit ($\geq 80\%$) auf als in den südlichen. Im Mittel liegt die relative Luftfeuchtigkeit über alle vier dargestellten Bahnen südlich bei 39,6 % der Zeit im Bereich über 80 % rel. LF und nördlich 44,4 % der Zeit. Ein großer Unterschied zwischen den einzelnen Firstausführungen ist nicht eindeutig erkennbar. Abb. 73 zeigt den Vergleich zwischen Eindeckungen aus unterschiedlichen Materialien mit vergleichbarer Farbgebung. Auch hier zeigen sich kritische Luftfeuchtigkeiten vermehrt auf der Nordseite und eher im Herbst/Winter als im Sommer/Frühling. Zusätzlich ist jedoch auch ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Materialien erkennbar. Bei der roten Betoneindeckung treten kritische Luftfeuchten sowohl südlich als auch nördlich im Vergleich zu den anderen Materialien seltener auf (S: 14,5 % des Messzeitraumes N: 25,6 % d. M.). Bei der rotbraunen Metalleindeckung liegen diese Werte bei 22,3 % (S) und 33,1 % (N) d. M. und bei der roten Ziegeleindeckung bei 38,5 % (S) und 42,3 % (N) d. M.

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

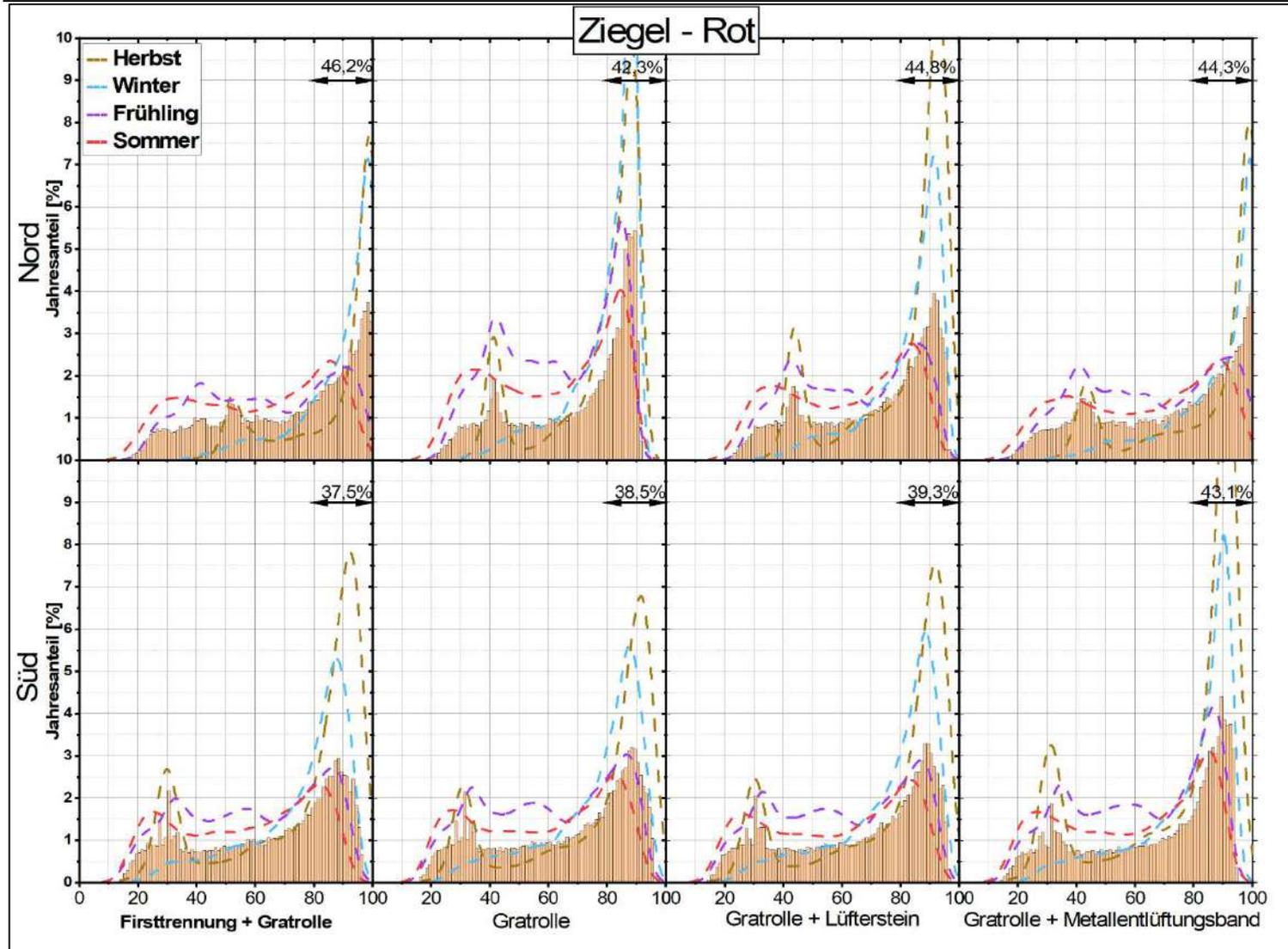


Abb. 72: Zeitliche Anteile des relativen Luftfeuchteniveaus in der Hinterlüftungsebene unter den roten Ziegeleindeckungen (Vergleich der Firstausführungen) im Messzeitraum mit zusätzlicher jahreszeitlicher Differenzierung und Anteil der Messwerte $\geq 80\%$ r.LF

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

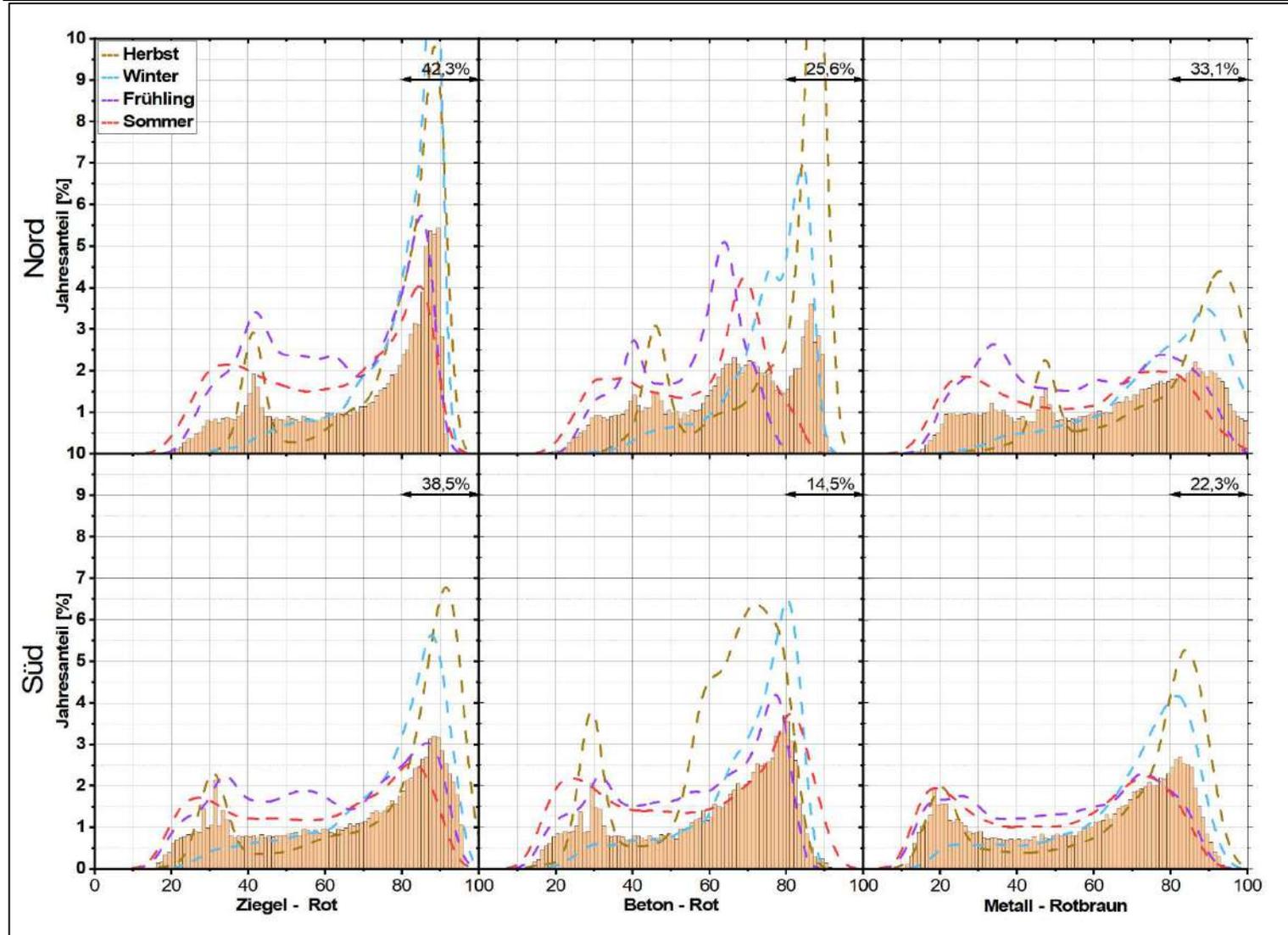


Abb. 73: Zeitliche Anteile des relativen Luftfeuchteniveaus in der Hinterlüftungsebene unter den roten Dacheindeckungen (Materialvergleich) im Messzeitraum mit zusätzlicher jahreszeitlicher Differenzierung und Anteil der Messwerte $\geq 80\%$ r.LF

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

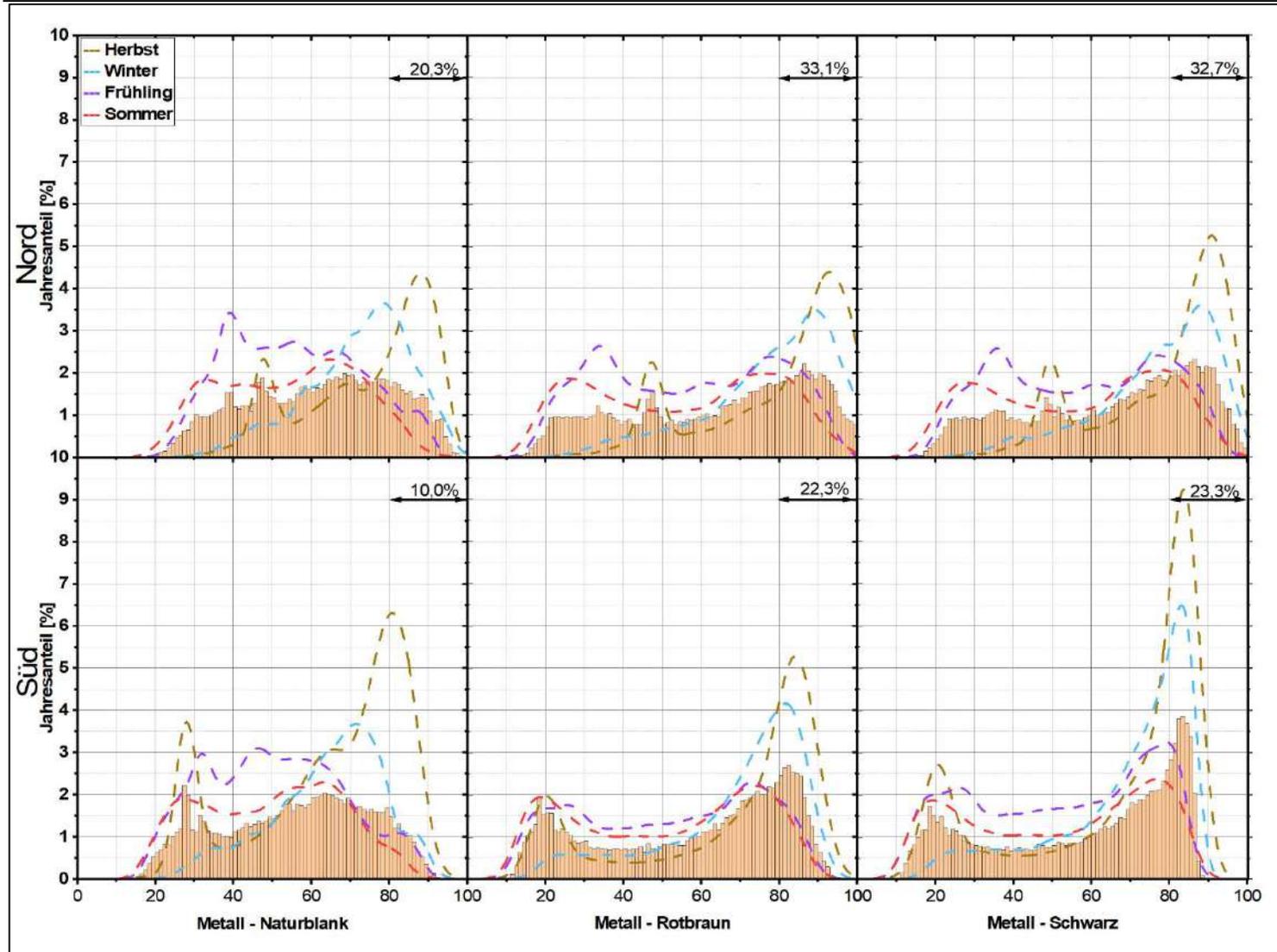


Abb. 74: Zeitliche Anteile des relativen Luftfeuchteniveaus in der Hinterlüftungsebene unter den Metalleindeckungen (Farbvergleich) im Messzeitraum mit zusätzlicher jahreszeitlicher Differenzierung und Anteil der Messwerte $\geq 80\%$ r.LF

Der Vergleich zwischen den verschiedenfarbigen Metalleindeckungen (Abb. 74) zeigt große Unterschiede zwischen der naturblanken und den farbigen Eindeckungen. Dabei treten relative Luftfechtigkeiten von $\geq 80\%$ bei Letzteren sowohl auf der Südseite als auch auf der Nordseite deutlich häufiger auf als bei Ersterer. Während bei der naturblanken Eindeckung die Luftfeuchtigkeit in 20,3 % (N) bzw. 10,0 % (S) der Aufzeichnungszeit über 80 % betrug, wurden diese in 33,1 % (N) und 22,3 % (S) der Aufzeichnung bei der rotbraunen Eindeckung überschritten. Bei der schwarzen Eindeckung wurden 80% Luftfeuchte in 23,3 % auf der Nordseite bzw. in 32,7 % der Aufzeichnungszeit auf der Südseite überschritten. Zwischen den beiden farbigen dunklen Eindeckungen ist demnach kein deutlicher Unterschied erkennbar. Auch die Verteilung über die Jahreszeiten zeigen nördlich und südlich jeweils sehr ähnliche Verläufe, während auch diese bei der naturblanken Eindeckung deutliche Unterschiede aufweist. Vor allem im Bereich zwischen 40 % und 80 % Luftfeuchte zeigt die naturblanke Eindeckung einen deutlich höheren Anteil mit einem zusätzlichen Peak zwischen 40 % und 50 % Luftfeuchte auf der Südseite im Frühjahr, der bei den anderen beiden Eindeckungen nicht zu erkennen ist. Die Peaks bei den Luftfeuchten von 70 % bis 100 %, die auch bei den dunklen Eindeckungen nördlich sowie südlich zu finden sind verschieben sich bei der naturblanken weiter nach links bzw. in Richtung geringerer Luftfeuchtigkeit.

4.3.2.1.2 *Oberflächentemperaturen der Dacheindeckung und Unterdachbahn*

In Abb. 75 sind die im Aufzeichnungszeitraum gemessenen Maximal- und Minimaltemperaturen sowie die berechneten Durchschnittstemperaturen an der Oberfläche der Unterdachbahn dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen auf der Südseite höher sind als auf der Nordseite. Auch die gemessenen Maximaltemperaturen zeigen südlich deutlich höhere Werte. Eine Ausnahme stellt die naturblanke Metalleindeckung dar, mit einem Maximalwert von 49,9 °C auf der Nordseite und 48,9 °C auf der Südseite. Die höchsten Temperaturen an der Unterdachbahn wurden unter den südlichen, schwarzen Dacheindeckungen gemessen (Faserzement Schwarz: 65,8° C; Metall Schwarz: 65,3 C°). Die nächst niedrigeren Maximaltemperaturen zeigten sich unter der rotbraunen Metalleindeckung (62,5 °C), der hellgrauen Faserzementeindeckung (60,8 °C) und der schwarzen Ziegeleindeckung (60,8 °). Unter der roten Betoneindeckung wurde mit 57,6 °C südlich eine leicht höhere Maximaltemperatur gemessen als bei der roten Ziegeleindeckung. Auch die Mittelwerte der Betoneindeckung sind leicht höher. Wie auch bei den Lufttemperaturen schwanken die gemessenen minimalen Oberflächentemperaturen der Unterdachbahn zwischen den verschiedenen Eindeckungen kaum und liegen im Bereich von -12°C bis -14°C. Eine Ausnahme ist bei der südlich ausgerichteten naturblanken Metalleindeckung zu sehen, wo der Tiefstwert bei -10,7° C liegt.

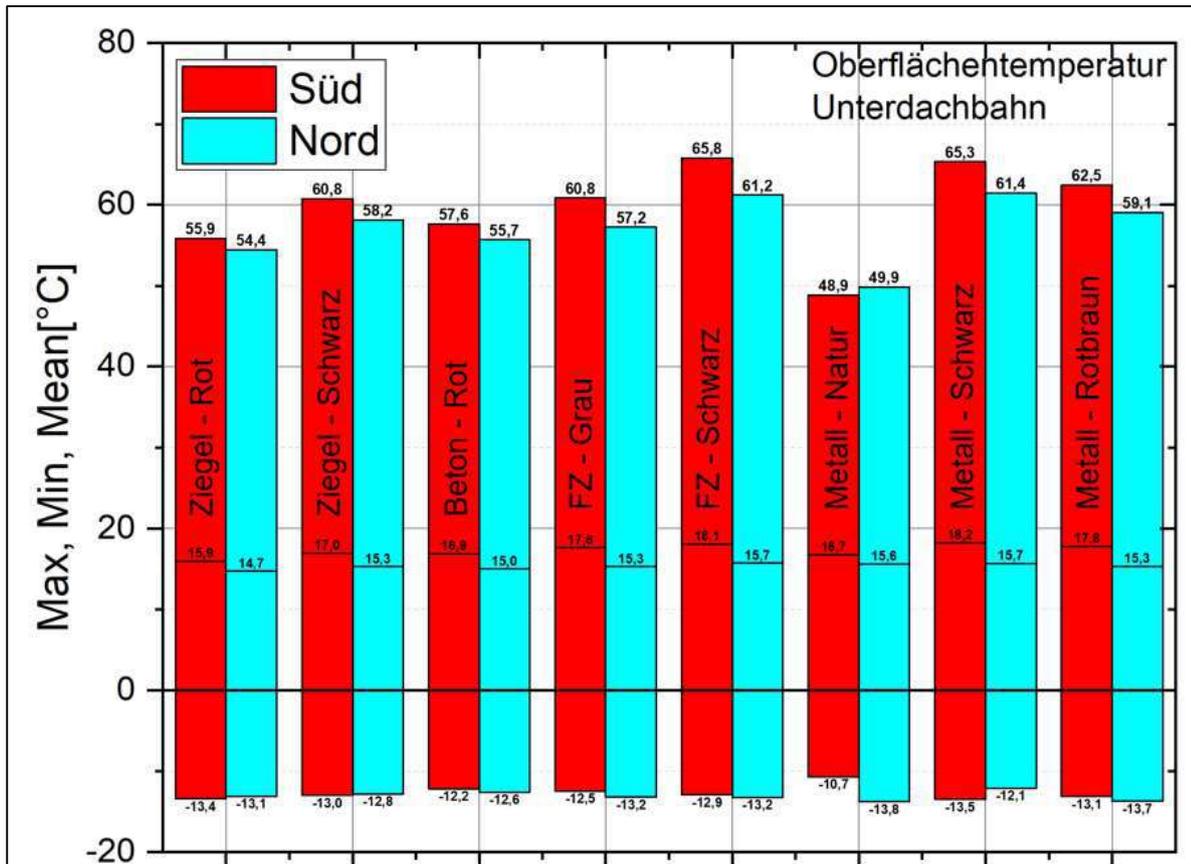


Abb. 75: Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte der gemessenen Oberflächentemperatur an der Unterdachbahn unter den verschiedenen Dacheindeckungen auf 2/3 Sparrenlänge über den gesamten Messzeitraum

Die Oberflächentemperaturen an den Dacheindeckungen (Abb. 76) zeigen einen ähnlichen Trend wie die der Unterdachbahn. Das Temperaturniveau der Maximal- und Mittelwerte liegt jedoch durchweg höher bzw. bei den Minimaltemperaturen niedriger. Die höchsten Maximal- und Durchschnittstemperaturen zeigen sich an der Oberfläche der südlichen, schwarzen Metalleindeckung (Max: 77,6 °C, Mean: 19,2 °C) gefolgt von der rotbraunen Metalleindeckung (Max: 73,7 °C, Mean: 18,8 °C). Bei beiden Eindeckungen ist die Differenz zwischen nördlich und südlich gemessenen Werten deutlich höher als bei den anderen Eindeckungen. Die nächst niedrigeren Maximal- und Durchschnittstemperaturen wurden an der schwarzen Ziegeleindeckung (Max: 68,0 °C, Mean: 17,3 °C) sowie an den grauen (Max: 66,3 °C, Mean: 17,8 °C) und schwarzen (Max: 66,0 °C, Mean: 17,8 °C) Faserzement-eindeckungen gemessen. Die tiefsten Werte finden sich bei der roten Ziegeleindeckung (Max: 58,8 °C, Mean: 16,2 °C) und der naturblanken Metalleindeckung (Max: 55,4 °C, Mean: 17,0 °C). Auch die Oberflächentemperaturen sind südseitig höher als nordseitig, wobei sich bei der naturblanken Metalleindeckung die nördlichen und südlichen Werte nur in sehr geringem Maße unterscheiden.

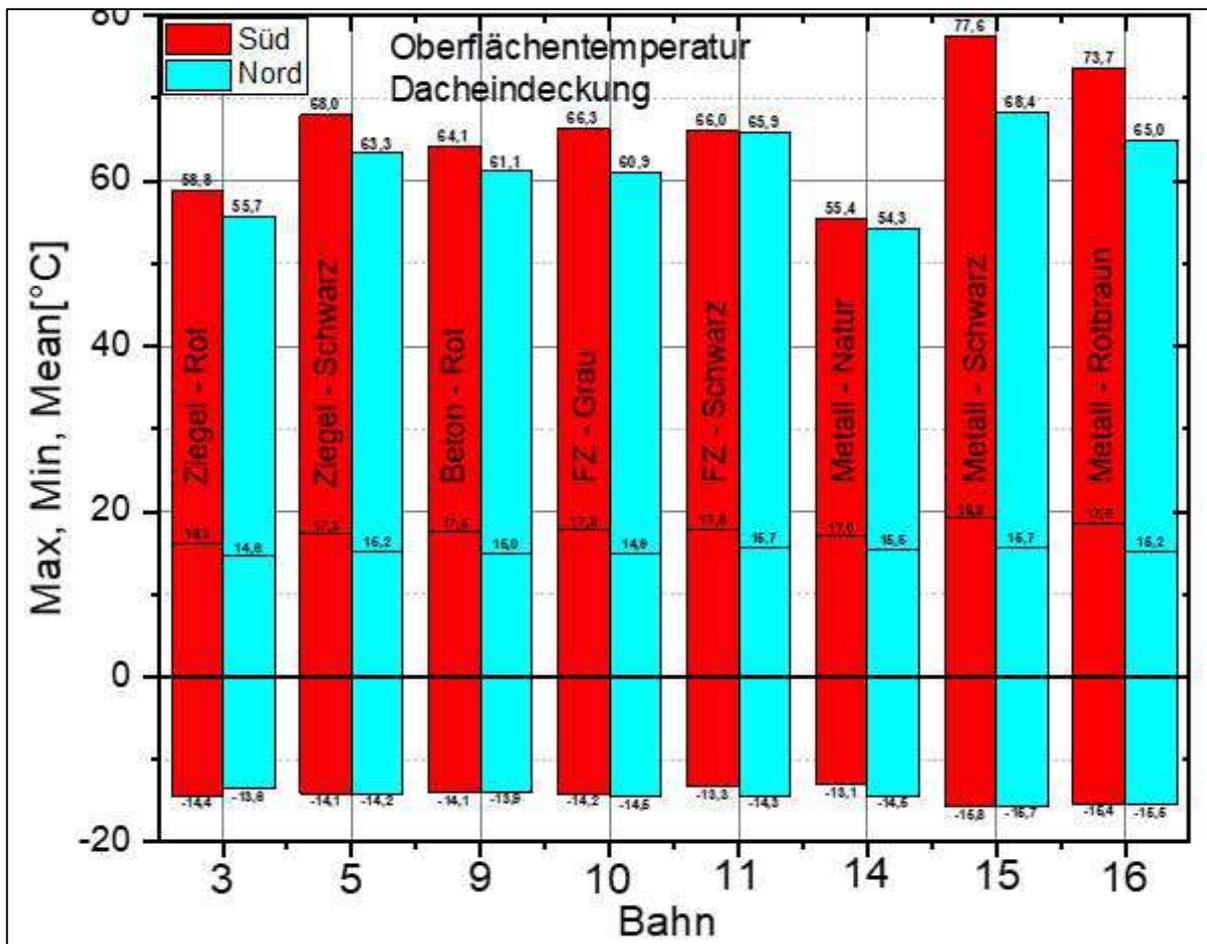


Abb. 76: Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte der gemessenen Oberflächentemperatur an der Unterseite der verschiedenen Dacheindeckungen auf 2/3 Sparrenlänge über den gesamten Messzeitraum

Abb. 77 und Abb. 78 zeigen die Klimaentwicklung in der Hinterlüftungsebene unter den verschiedenen Dacheindeckungen und die entsprechenden Außenklimaeinflüsse. Dargestellt sind drei wolkenlose Tage im späten Frühling 2019 mit hoher Globalstrahlungsintensität (Abb. 77) und 3 Tage im späten Winter mit erhöhtem Bewölkungsgrad und dementsprechend geringerer Globalstrahlungsintensität (Abb. 78). Die Temperaturen in der HLE steigen bei hoher Globalstrahlungsintensität deutlich höher an als bei geringerer Intensität und liegen tagsüber ausnahmslos über der Außenlufttemperatur. Die Differenz zwischen Außenlufttemperatur und Temperatur in der HLE ist an den Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung deutlich größer. Nachts korreliert die Temperatur in der HLE in etwa mit der Außentemperatur. Eine Ausnahme stellt die Temperatur unter der naturblanken Metalleindeckung dar, die sich in der Nacht deutlich weniger stark abkühlt, als alle anderen Eindeckungen und etwas über der Außentemperatur liegt. Durch Schwankungen in der Strahlungsintensität treten nahezu ohne Verzögerung entsprechend deutliche, korrelierende Schwankungen bei der Temperatur in der HLE auf. Am deutlichsten ist dieser unmittelbare Effekt in der zweiten Tageshälfte des 05.06.2019 und im Ganztagsverlauf des 19.03.2019 zu erkennen.

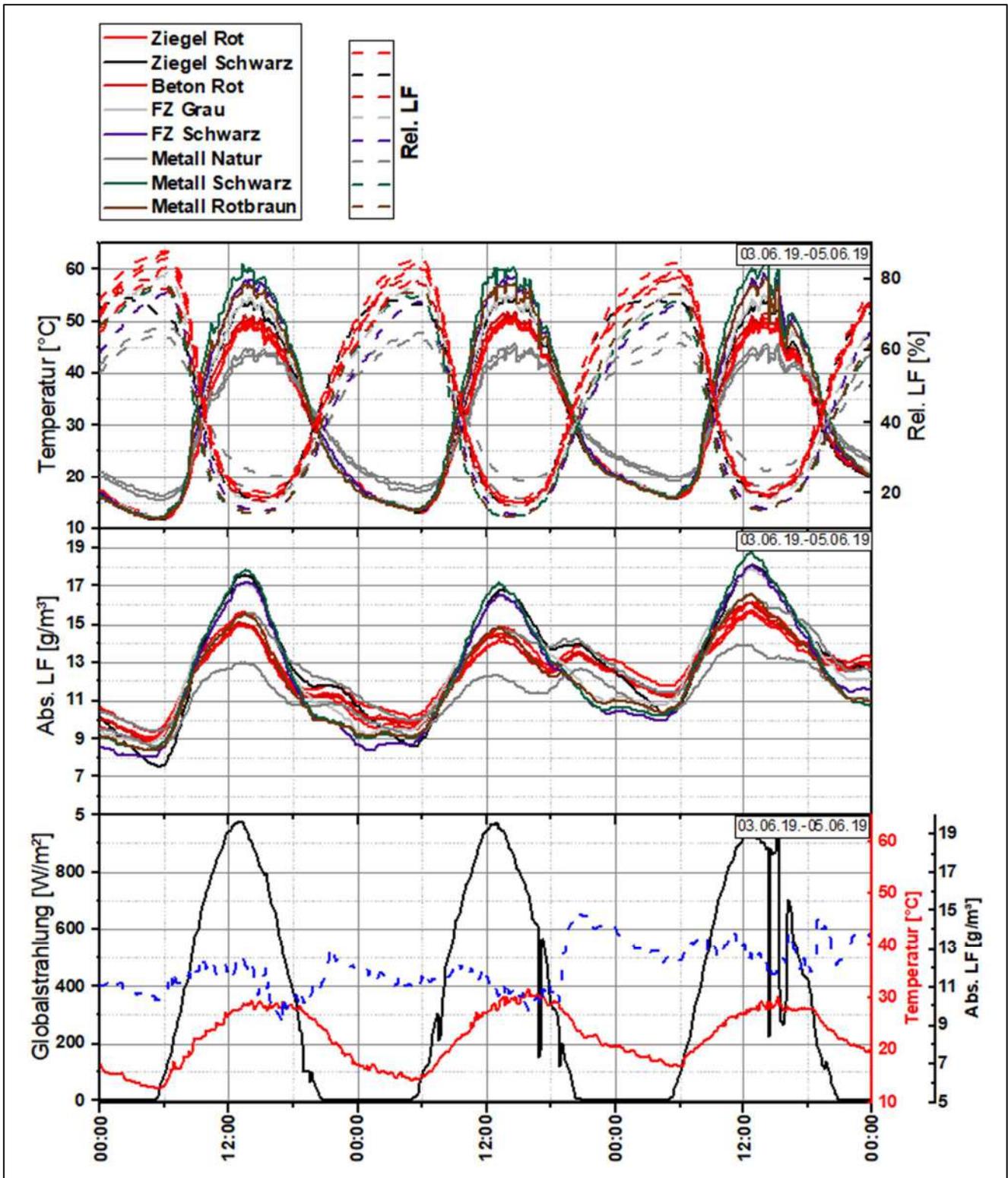


Abb. 77: Entwicklung der Klimabedingungen (T, rel. LF, abs. LF) in der Hinterlüftungsebene mit parallel dargestellten Außenklimabedingungen (T, abs. LF, Strahlung) im Zeitraum vom 03.06 bis 05.06.2019

Bei der Außenluft bewirken die Schwankungen der Strahlungsintensität keine direkten Schwankungen der Temperatur. Eine direkte Korrelation ist also nicht erkennbar. Dennoch ist zu erkennen, dass sich auch die Außenluft im Laufe des Tages bei hoher Globalstrahlung deutlich mehr erwärmt als bei geringer Globalstrahlung. Die relative Luftfeuchte in der HLE zeigt einen typischen zur Temperatur komplementären Tagesverlauf. An den wolkenlosen Tagen sinkt die relative Luftfeuchte in den HLEs tagsüber auf Werte zwischen 10 % und 30 %. Nachts steigen sie wiederum auf ca. 60 % bis 80 %. Während die relative Luftfeuchte im Laufe der wolkenlosen Tage abnimmt, steigt die absolute Luftfeuchte in den HLEs deutlich an und erreicht ihr Maximum etwa zu jenem Zeitpunkt, an dem die maximale Globalstrahlung bzw. maximale Tagestemperatur in der HLE auftritt. Am besonders bewölkten Tag (16.03.2019) steigt die Temperatur in der HLE deutlich weniger stark an und korreliert eher mit der Außentemperatur. Die relative Luftfeuchtigkeit sinkt an diesem Tag nicht so stark und bleibt je nach Dacheindeckung bei Werten zwischen 60 % und 90 %.

Die absolute Luftfeuchtigkeit in der HLE korreliert in etwa mit der absoluten Außenluftfeuchte. Am darauffolgenden Tag (17.03.2019) zeigt die Globalstrahlung wieder etwas höhere Werte und man kann erneut die bereits oben beschriebenen Effekte der Strahlungsintensität auf das Klima in der HLE beobachten. In Bezug auf die Unterschiede des HLE-Klimas unter den verschiedenen Dacheindeckungen sind ähnliche Tendenzen zu erkennen, wie bereits in Abb. 64 - Abb. 74 erläutert. Jedoch zeigt sich hier, dass die Unterschiede deutlich mehr zu tragen kommen, wenn die Strahlungsintensität hoch ist. Bei geringer Globalstrahlung sind die Differenzen der Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit in der HLE weniger stark ausgeprägt.

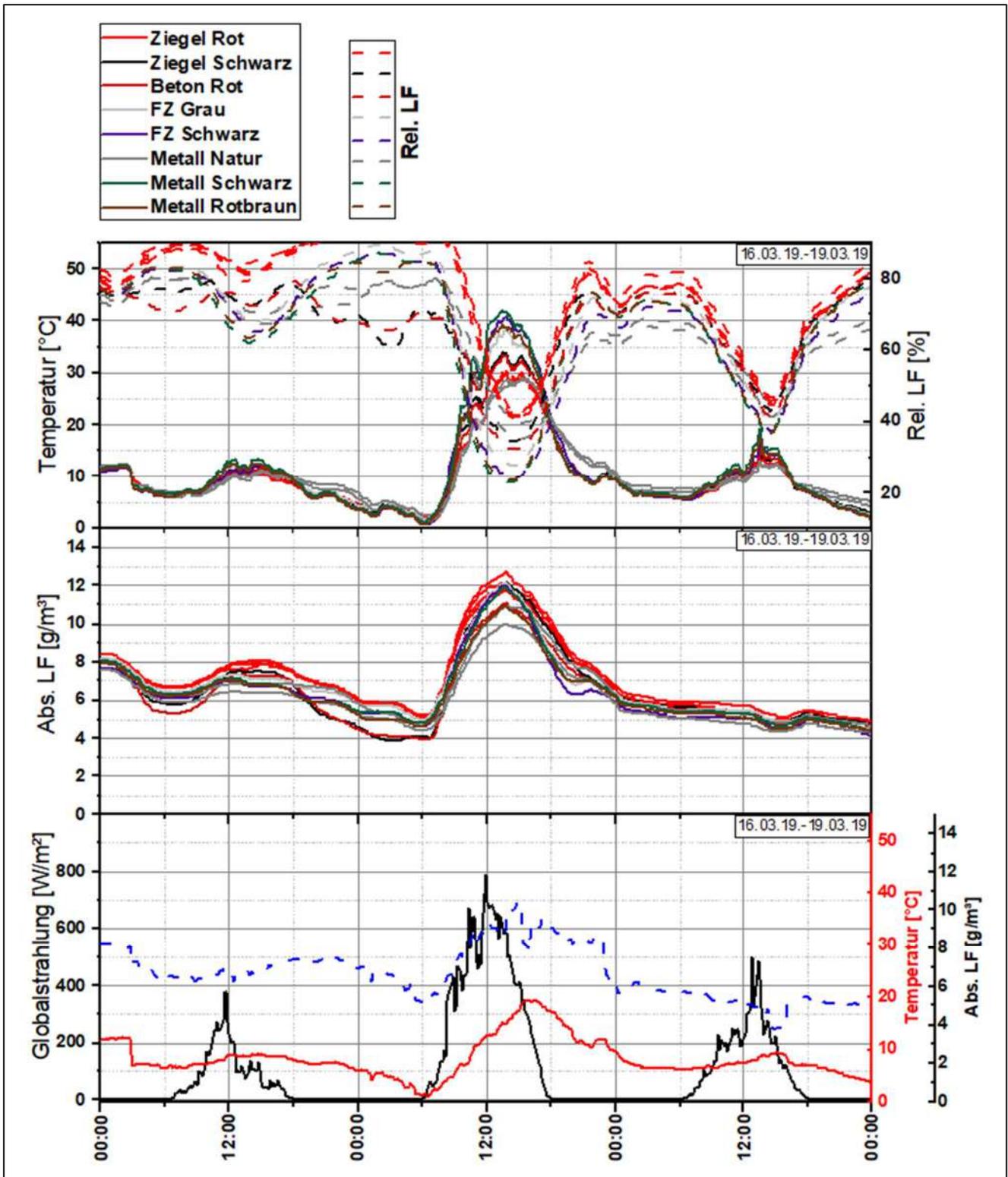


Abb. 78: Entwicklung der Klimabedingungen (T, rel. LF, abs. LF) in der Hinterlüftungsebene mit parallel dargestellten Außenklimabedingungen (T, abs. LF, Strahlung) im Zeitraum vom 16.03 bis 19.03.2019

4.3.2.1.3 Kondensatbildungspotential

Aus Abb. 79 lässt sich das Kondensatbildungspotential anhand der Kondensationszeit in Stunden und der kumulierten Kondensatmenge in g/m^3 auf 2/3 Länge der HLE an der Unterdachbahn unter den verschiedenen Dacheindeckungen ablesen. Die Kondensationszeit beschreibt jenen Zeitraum, in dem die Oberflächentemperatur der Unterdachbahn die Taupunkttemperatur der Umgebungsluft in der HLE im Aufzeichnungszeitraum unterschritten hat. Die kumulierte Kondensatmenge ist die Summe des in diesem Zeitraum angefallenen Kondensats in g pro m^3 Luft.

Allgemein zeigt sich eine längere Kondensationszeit und eine höhere kumulierte Kondensatmenge unter der nordseitigen Dachfläche. Außerdem lässt sich erkennen, dass Kondensationszeit und kumulierte Kondensatmenge in allen Fällen miteinander korrelieren. Dabei kommt es lediglich im Winter und Herbst zur Kondensation. Im Sommer und Frühjahr unterschreitet die Oberflächentemperatur der Unterdachbahn zu keinem Zeitpunkt die Taupunkttemperatur der Umgebungsluft in der HLE. Das mit Abstand größte Kondensatbildungspotential zeigt sich unter der nördlichen, schwarzen Ziegeleindeckung mit einer Kondensationszeit von ca. 315 Stunden und einer kumulierten Kondensatmenge von ca. $107 \text{ g}/\text{m}^3$. Auf der südlichen Unterdachbahn kommt es bei dieser Dacheindeckung zu keinem Zeitpunkt zur Kondensation. Das nächst niedrigere Kondensatbildungspotential zeigt sich bei der nördlichen, schwarzen Faserzementeindeckung. Die Kondensationszeit beträgt hier ca. 26 Stunden und die kumulierte Kondensatmenge ca. $24 \text{ g}/\text{m}^3$. Südlich ist unter dieser Dacheindeckung kein Kondensatbildungspotential auf der Unterdachbahn erkennbar. Die farbigen Metalleindeckungen weisen nördlich ein miteinander vergleichbares Kondensatbildungspotential auf. Dabei liegt die Kondensationszeit bei ca. 15 Stunden (Schwarz) bzw. 17 Stunden (Rotbraun) und die kumulierte Kondensatmenge bei ca. $9 \text{ g}/\text{m}^3$ (Schwarz) bzw. $10 \text{ g}/\text{m}^3$ (Rotbraun). Auf der Südseite weist von den farbigen Metallen nur die schwarze Metalleindeckung ein geringfügiges Kondensatbildungspotential auf (ca. 7 Std. – ca. $4 \text{ g}/\text{m}^3$). Die naturblanke Metalleindeckung zeigt nordseitig kaum (ca. 1 Std. – $0,7 \text{ g}/\text{m}^3$) und südseitig kein Kondensatbildungspotential. Die graue Faserzementeindeckung weist südlich und nördlich ein geringes Kondensatbildungspotential (Nord und Süd: ca. 10 Std. – $5 \text{ g}/\text{m}^3$) auf. Unter der roten Ziegeleindeckung zeigt sich nördlich (ca. 4 Std. – ca. $1 \text{ g}/\text{m}^3$) ein geringeres Kondensatbildungspotential als südlich (ca. 17 Std. – ca. $5 \text{ g}/\text{m}^3$). Unter der roten Betoneindeckung kommt es weder nördlich noch südlich zur Kondensation auf der Unterdachbahn.

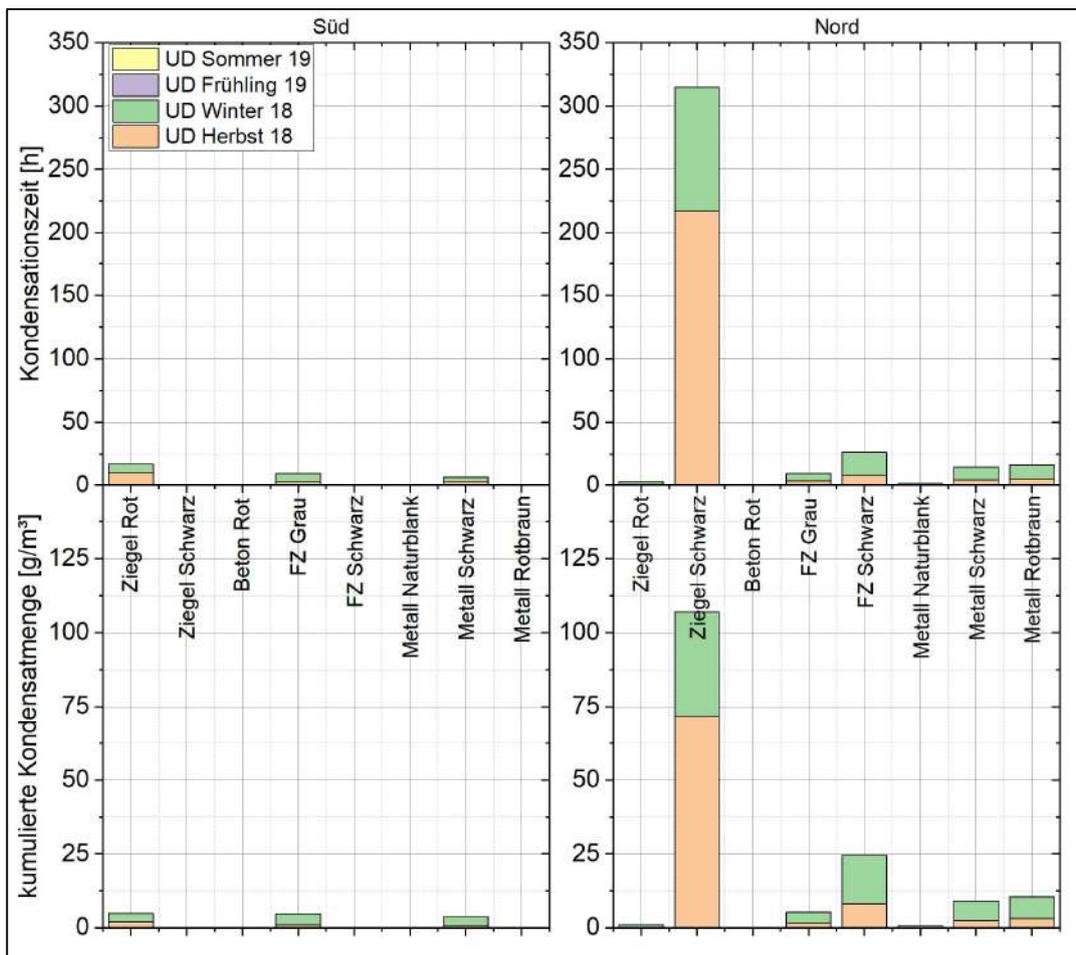


Abb. 79: Kondensatbildungspotential an der Unterdachbahn ausgedrückt durch die berechnete, kumulierte Kondensatmenge in g pro m³ Luft und der Kondensationszeit in h für die verschiedenen Dacheindeckungen mit Jahreszeitlicher Unterteilung.

Analog zu Abb. 79 lässt sich aus Abb. 80 das Kondensatbildungspotential an der Unterseite der verschiedenen Dacheindeckungen ablesen. Auch hier zeigt sich im Allgemeinen ein höheres Kondensatbildungspotential auf der Nordseite als auf der Südseite. Dabei kommt es wiederum vorwiegend im Herbst und Winter zur Kondensation. In einigen Fällen treten geringe Mengen an Kondensat aber auch im Frühling auf (Südseite: FZ Grau, Metall schwarz, Metall rotbraun; Nordseite: Ziegel schwarz, FZ grau, Metall naturblank, Metall rotbraun). Bei der schwarzen Ziegeleindeckung kommt es auch im Sommer zur Kondensatbildung. Wie auch bei der Unterdachbahn (Abb. 79) ist eine Korrelation zwischen Kondensationszeit und kumulierter Kondensatmenge erkennbar. Im Vergleich erscheint das Kondensatbildungspotential an der Dacheindeckungsunterseite allgemein deutlich höher als auf der darunter liegenden Unterdachbahn (unterschiedliche Skalierung von Abb. 79 und Abb. 80 beachten!).

Das größte Kondensatbildungspotential zeigt sich bei der nördlichen, schwarzen Ziegeleindeckung (ca. 1094 Std. – ca. 850 g/m³). Auf der gegenüberliegenden Südseite kommt es an der schwarzen Dacheindeckung zu keinem Zeitpunkt zur Kondensatbildung. Die farbigen Metalle zeigen nördlich ein miteinander vergleichbares Kondensatbildungspotential mit einer Kondensationszeit von ca. 292 Std.

(Schwarz) bzw. 295 Std. (Rotbraun) und einer kumulierten Kondensatmenge von ca. 221 g/m³ (Schwarz) bzw. 236 g/m³ (Rotbraun). Auf der Südseite zeigt sich hingegen bei der schwarzen Metalleindeckung ein höheres Kondensatbildungspotential (ca. 283 Std. – ca. 182 g/m³) als bei der rotbraunen (ca. 81 Std – ca. 29 g/m³) Eindeckung. Auf einem etwas geringeren Niveau als die farbigen Metalleindeckungen liegt das Kondensatbildungspotential der grauen Faserzementeindeckung. Diese zeigt südlich eine Kondensationszeit von ca. 254 Stunden und eine kumulierte Kondensatmenge von ca. 170 g/m³. Südlich ist das Kondensatbildungspotential mit ca. 211 Stunden und 111 g/m³ etwas geringer als nördlich. Die schwarze Faserzement- und naturblanke Metalleindeckung zeigen nördlich ein vergleichbares Kondensatbildungspotential (45 bzw. 49 Std. – 38 bzw. 25 g/m³). Auf der Südseite kommt es bei beiden zu keiner nennenswerten Kondensation. Die rote Ziegeleindeckung weist südseitig (ca. 100 Std. - ca. 39 g/m³) ein höheres Kondensatbildungspotential auf als nordseitig (ca. 10 Std. - ca. 6 g/m³). Die rote Betoneindeckung zeigt ein ähnlich geringes Kondensatbildungspotential auf der Nordseite wie auf der Südseite, wobei es südlich eher im Winter und nördlich eher im Herbst zur Kondensation kommen kann.

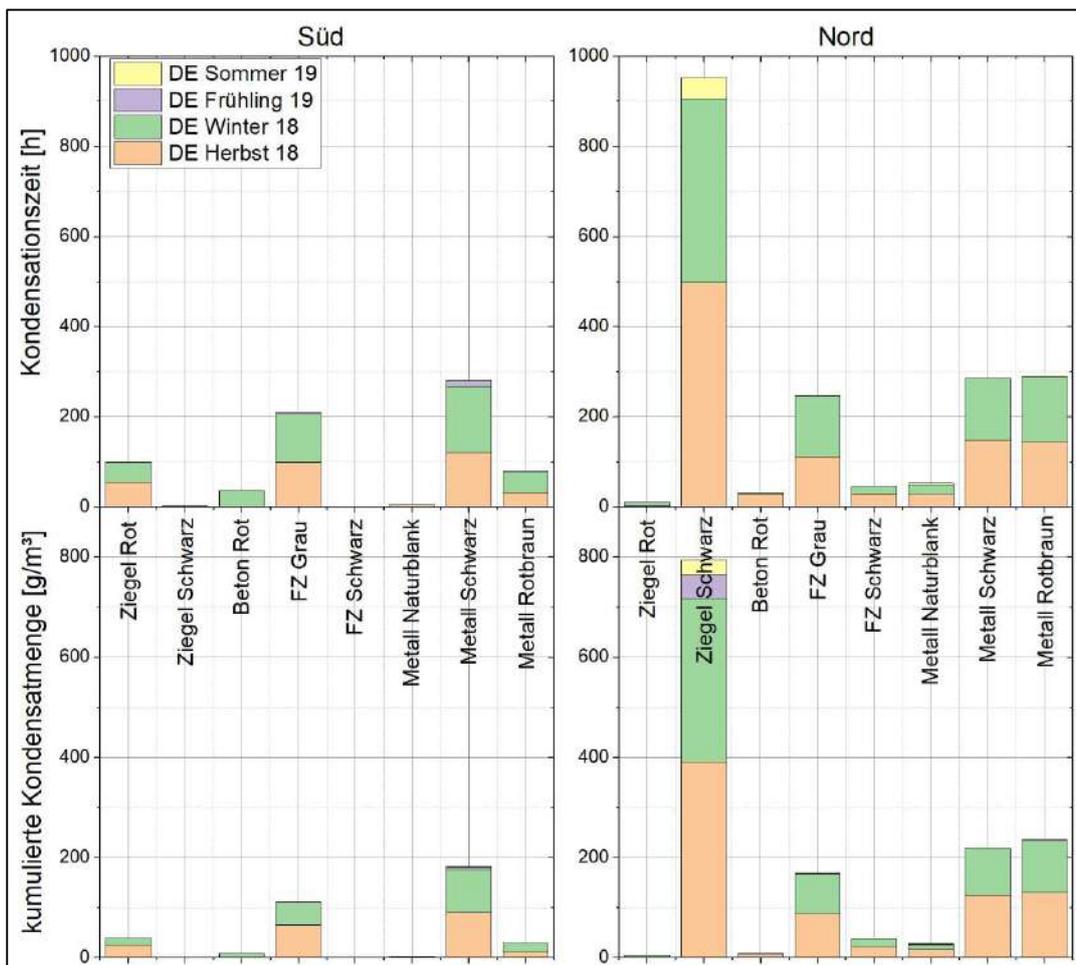


Abb. 80: Kondensatbildungspotential an der Dacheindeckungsunterseite ausgedrückt durch die berechnete, kumulierte Kondensatmenge in g pro m³ Luft und der Kondensationszeit in h für die verschiedenen Dacheindeckungen mit Jahreszeitlicher Unterteilung.

4.3.2.1.4 Strömungsgeschwindigkeit – Wind und thermischer Auftrieb

Satteldach (Forschungshaus Stetten):

In Abb. 81 - Abb. 83 sind die Ergebnisse der Strömungsgeschwindigkeitsmessung im Nord-Süd Vergleich für die roten Ziegel- und Betoneindeckungen, sowie für die schwarze Metalleindeckung dargestellt. Zu sehen ist jeweils der Verlauf der Globalstrahlung während des Messzeitraumes, die effektive Windgeschwindigkeit, die aufgezeichnete Strömungsgeschwindigkeit in der HLE, sowie die Klimadifferenzen zwischen HLE-Klima und Außenklima ΔT , Δh (Rel. LF) und Δd (Abs. LF).

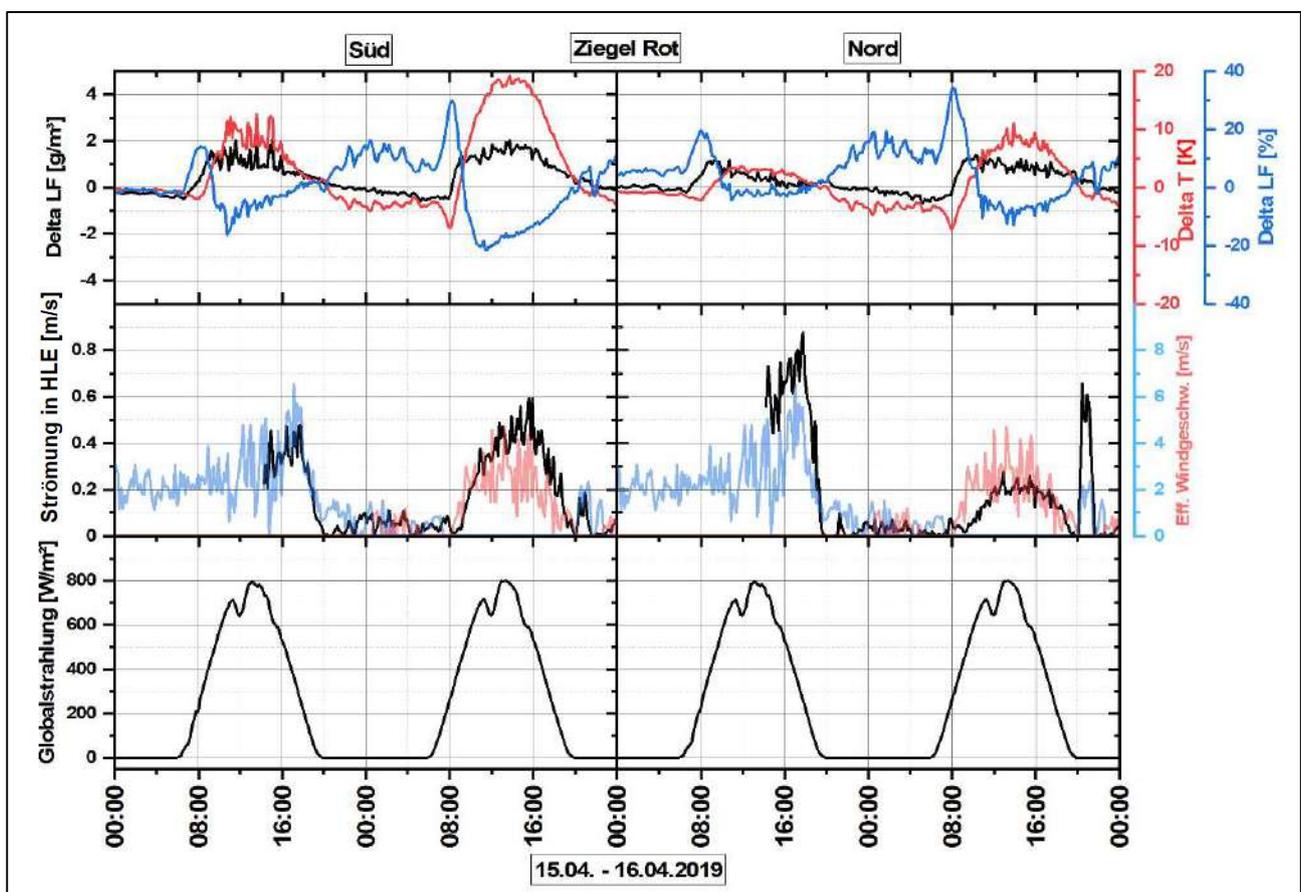


Abb. 81: Gemessene Strömungsgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene unter der roten Ziegeleindeckung (Bahn Nr. 3) im Zeitraum vom 15.04. bis 16.04.2019 mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und den klimatischen Differenzen (Delta) zwischen dem Klima in der Hinterlüftungsebene und dem Außenklima.

Bei der roten Ziegeleindeckung zeigt sich, dass nordseitige Winde in der südlichen HLE geringere Strömungsgeschwindigkeiten verursachen als in der nördlichen HLE. Analog dazu bewirken südseitige Winde eine geringere Strömungsgeschwindigkeit in der nördlichen HLE als in der südlichen HLE. Das gleiche Ergebnis zeigt sich auch in Abb. 82 für die rote Betoneindeckung. Bei letzterer zeigt sich außerdem am 18.04.2019 zwischen 13:00 Uhr und 16:00 Uhr sowohl südseitig als auch nordseitig eine relativ konstante Strömungsgeschwindigkeit zwischen 0,4 m/s und 0,6 m/s (Süd) bzw. zwischen 0,1 m/s

und 0,3 m/s (Nord). Die Windgeschwindigkeit in diesem Zeitraum nimmt hingegen deutlich ab und sinkt auf effektive Geschwindigkeiten von < 2 m/s. Die Temperaturdifferenzen in dieser Zeitspanne liegen südlich bei 15 K – 20 K und nördlich um die 10 ° C.

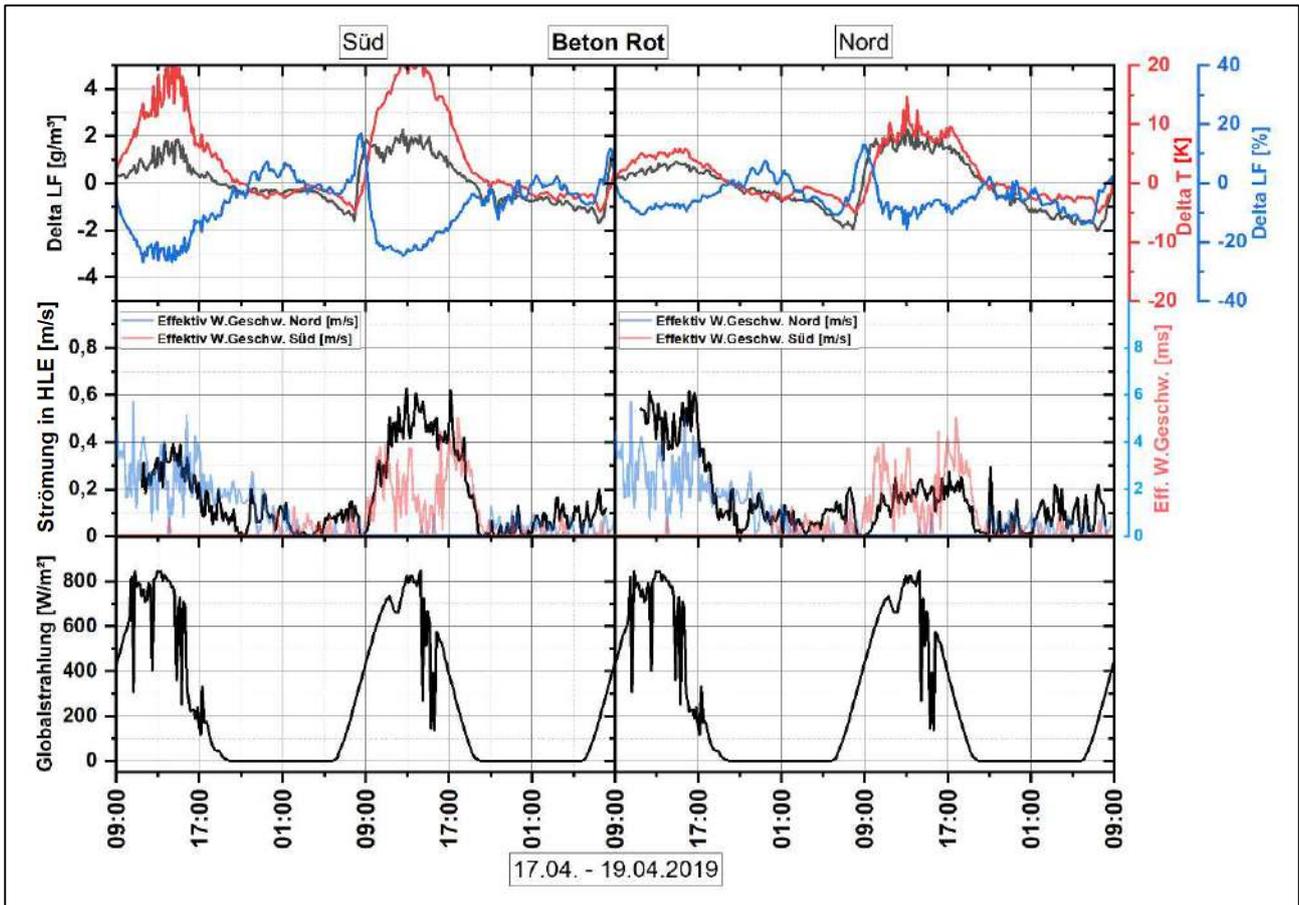


Abb. 82: Gemessene Strömungsgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene unter der roten Betoneindeckung (Bahn Nr. 9) im Zeitraum vom 17.04. bis 19.04.2019 mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und den klimatischen Differenzen (Delta) zwischen dem Klima in der Hinterlüftungsebene und dem Außenklima.

Bei der schwarzen Metalleindeckung (Abb. 83) reagiert die Strömungsgeschwindigkeit zwischen 00:00 Uhr und 14:00 Uhr in der nördlichen und südlichen HLE in einem ähnlichen Verhältnis auf die nordseitige effektive Windgeschwindigkeit. Von 14:00 bis 16:00 Uhr zeigt sich nordseitig ein Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit, die mit dem gleichzeitigen Anstieg der nördlichen effektiven Windgeschwindigkeit korreliert. Auf der Südseite steigt die Strömungsgeschwindigkeit zur selben Zeit nicht an. Ab 16:00 Uhr und 17:00 sinkt die Windgeschwindigkeit auf Werte zwischen 0 m/s und 0,5 m/s. Nordseitig sinkt die Strömungsgeschwindigkeit entsprechend auf < 0,1 m/s bei einem ΔT von ca. 14 K. Südseitig steigt die Strömungsgeschwindigkeit an und erreicht ein Maximum von ca. 0,3 m/s bei einem ΔT von ca. 27 K. Die Differenz der absoluten Luftfeuchtigkeit (Δd) steigt mit steigender Globalstrahlung und Temperatur in der HLE tagsüber in allen Fällen an. Dieser Effekt ist südlich etwas ausgeprägter als nördlich. Am besten ist diese Korrelation in Abb. 83 erkennbar, wo die Globalstrahlung einen sehr

fluktuierenden Verlauf einnimmt, der sich in ähnlicher Weise auch bei ΔT und Δd wiederfinden lässt. Auch hier ist der Effekt südlich deutlicher ausgeprägt als nördlich.

Bei den roten Beton- und Ziegeleindeckungen zeigt sich nördlich und südlich in der Nacht vom 15. auf den 16.04. (Ziegel) bzw. in den Nächten vom 17. auf den 18. und vom 18. auf den 19.04 (Beton) eine deutliche Unterkühlung der HLE. Die absolute Luftfeuchtigkeit in der HLE sinkt ebenfalls unter das Feuchteniveau der Außenluft. Bei der Ziegeleindeckung sinkt die absolute Luftfeuchtigkeit nicht so stark ab wie bei der Betoneindeckung. Unter der schwarzen Metalleindeckung bleibt die Temperatur in der Nacht auf den 16.05. südseitig etwas oberhalb der Außentemperatur. Nordseitig nimmt die Temperatur in der HLE zur gleichen Zeit ca. den Wert der Außentemperatur an. Die absolute Luftfeuchtigkeit liegt in dieser Nacht beidseitig etwas unterhalb der Außenfeuchte. Die Strömungsgeschwindigkeit schwankt zu dieser Zeit zwischen 0,1 m/s und 0,3 m/s. In der darauffolgenden Nacht sinkt die absolute Luftfeuchtigkeit beidseitig deutlich unter den Wert der Außenluftfeuchtigkeit. Die Temperatur auf der Südseite entspricht in etwa der Außentemperatur, die nordseitige Temperatur liegt etwas darunter. Die Windgeschwindigkeit und Luftströmung zeigen in dieser Nacht Werte gegen 0 m/s.

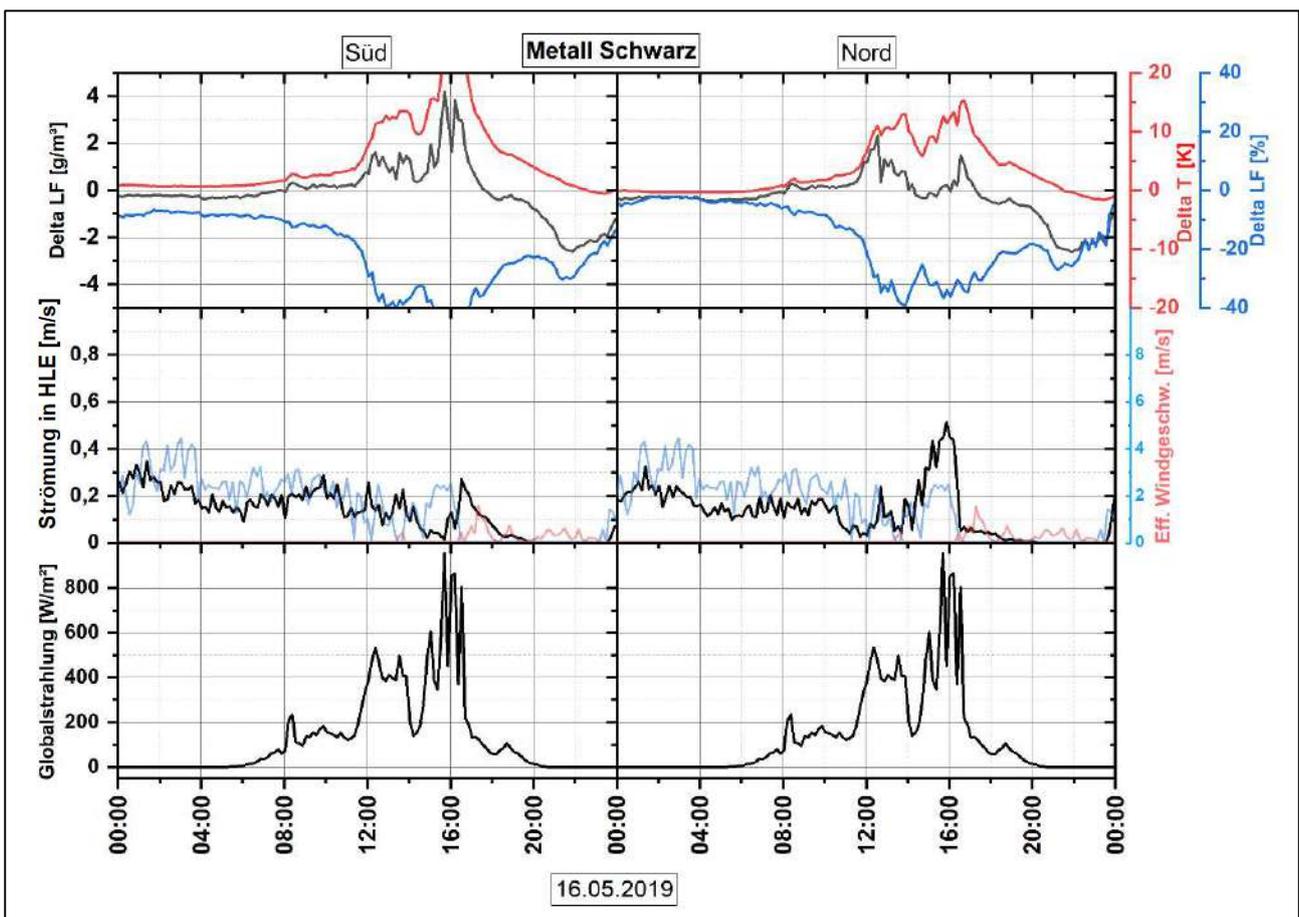


Abb. 83: Gemessene Strömungsgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene unter der schwarzen Metalleindeckung (Bahn Nr. 15) am 16.05.2019 mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und den klimatischen Differenzen (Delta) zwischen dem Klima in der Hinterlüftungsebene und dem Außenklima.

In Abb. 84 ist die gemessene Strömungsgeschwindigkeit in der HLE unter den verschiedenen roten Ziegeleindeckungen und der roten Betoneindeckung im Zeitraum vom 06.10. bis 07.10.2019 dargestellt. Außerdem sind die entsprechende effektive Windgeschwindigkeit, sowie die Klimadifferenzen zwischen HLE-Klima und Außenklima im selben Zeitraum zu sehen.

In der Nacht vom 06.10. auf den 07.10. liegt die Temperaturdifferenz zum Außenklima unter allen dargestellten Eindeckungen um 0° C. Die Temperatur entspricht also zu dieser Zeit in etwa der Außentemperatur. Die Windgeschwindigkeiten liegen zur selben Zeit bei < 2 m/s. Unterhalb von zwei der drei Ziegeleindeckungen, sowie unterhalb der Betoneindeckung bleibt die Strömungsgeschwindigkeit unterhalb von 0,1 m/s. Die Ziegelausführung mit zusätzlichem Lüfterstein zeigt jedoch höhere Strömungsgeschwindigkeiten bis 0,2 m/s. Die absolute Luftfeuchtigkeit liegt unter der Ziegeleindeckung mit Gratrollenausführung, sowie bei der mit zusätzlichem Lüfterstein in etwa auf Außenklimaniveau. Unter der Betoneindeckung zeigt sich ein absolutes Luftfeuchteniveau, welches etwas unter der Außenluftfeuchtigkeit liegt. Unter der Ziegeleindeckung mit zusätzlichem Metallentlüftungsband ist die absolute Luftfeuchtigkeit geringfügig höher als im Außenbereich. Unter allen dargestellten Dacheindeckungen liegt der Wert der absoluten Luftfeuchtigkeit tagsüber oberhalb des Wertes der Außenluft. Dabei zeigen die Ziegeleindeckungen keinen eindeutigen Unterschied zueinander. Die Betoneindeckung zeigt tagsüber ein geringeres absolutes Luftfeuchteniveau als die Ziegeleindeckungen.

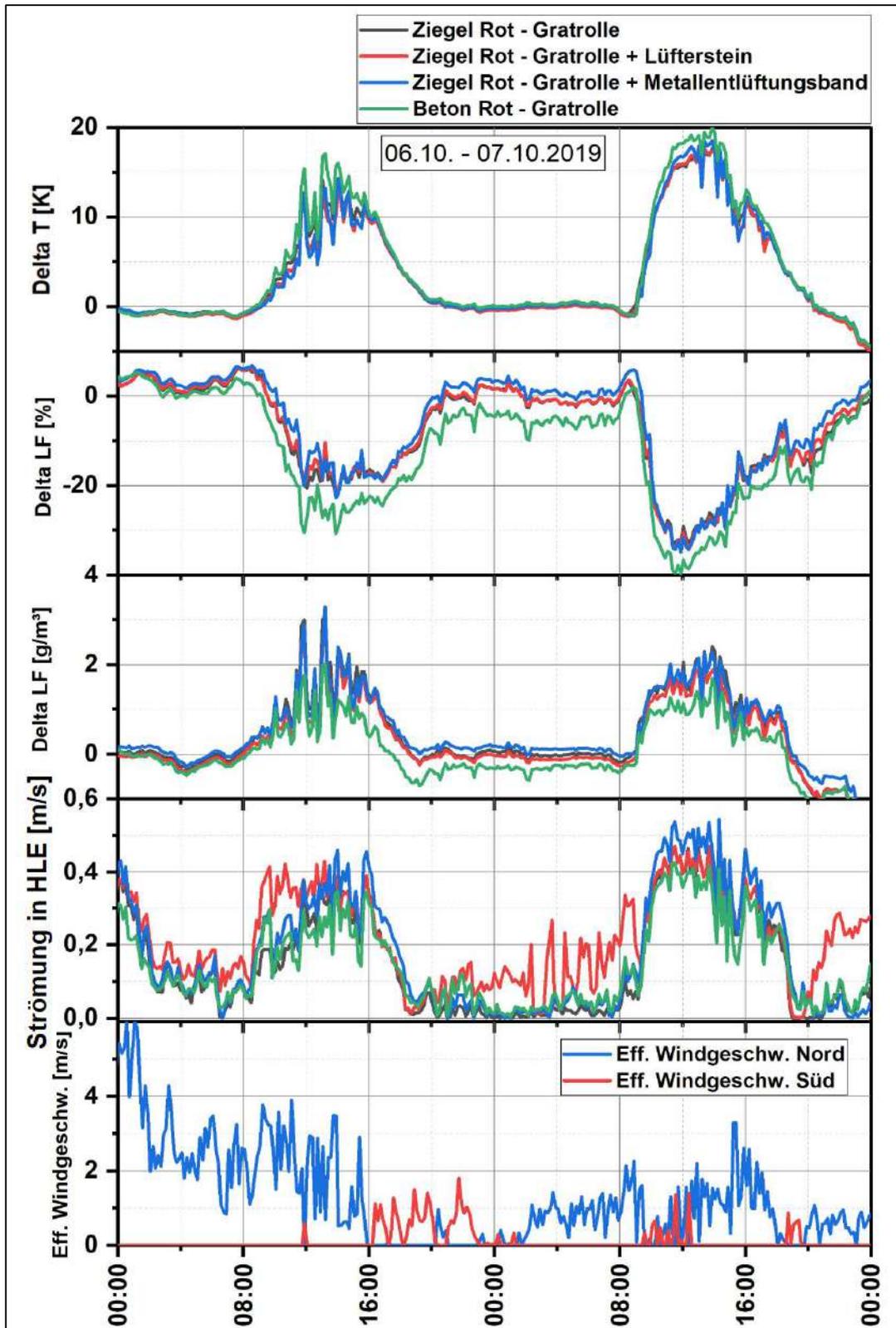


Abb. 84: Gemessene Strömungsgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene unter den roten Ziegeleindeckungen und der roten Betoneindeckung im Zeitraum vom 06.10.2019 bis 07.10.2019 mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit und den klimatischen Differenzen (Delta) zwischen dem Klima in der Hinterlüftungsebene und dem Außenklima.

Im Unterschied zur Messreihe, die in Abb. 81 bis Abb. 83 dargestellt ist, zeigt sich keine eindeutige Korrelation zwischen effektiver Windgeschwindigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit in der HLE. Jedoch zeigt sich eine Korrelation zur Temperaturdifferenz zwischen HLE- und Außentemperatur. Erstere liegt in Abhängigkeit von ΔT tagsüber am 06.10 je nach Eindeckung zwischen 0,2 m/s und 0,4 m/s und am 07.10. zwischen 0,2 m/s und 0,5 m/s. Dabei liegt die Geschwindigkeit unter der Betoneindeckung auf dem geringsten Niveau. Die Ziegelausführung mit Gratrolle liegt im Vergleich zu den anderen Eindeckungen in etwa auf mittlerem Niveau. Die Lüfterstein- und Metallentlüftungsband Ausführungen weisen das höchste Strömungsgeschwindigkeitsniveau auf, wobei zeitweise bei der Lüfterstein - Ausführung und zeitweise bei der Metallentlüftungsband - Ausführung die höheren Strömungsgeschwindigkeiten gemessen wurden. Des Weiteren zeigt sich eine Korrelation zwischen der absoluten Luftfeuchtigkeit in der HLE und der Temperatur in der HLE wie sie sich auch in den Abbildungen Abb. 77, Abb. 78, Abb. 81, Abb. 82 und Abb. 83 gezeigt hat.

Abb. 85 zeigt den Verlauf der gleichen Parameter wie Abb. 84 für die HLEs unter den verschiedenartigen Metalleindeckungen im Zeitraum vom 25.10.2019 bis 27.10.2019. Im Verlauf des 26.10. liegen die Windgeschwindigkeiten bei < 2 m/s. Zur gleichen Zeit liegen die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der HLE je nach Eindeckung zwischen 0,4 m/s und 0,5 m/s und korrelieren eindeutig mit der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und HLE-Temperatur, welche zu dieser Zeit bei den farbigen Metalleindeckungen etwa 20 K und für die naturblanken Eindeckungen etwa 10 °K über dem Außentemperaturniveau liegt. Damit liegt das Verhältnis zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz bei den farbigen Eindeckungen bei ca. 1:40 und bei den naturblanken Eindeckungen bei ca. 1:25. Am 25.10. ist wiederum eine Korrelation der Strömungsgeschwindigkeit mit der effektiven Windgeschwindigkeit erkennbar. Eine Korrelation mit der Temperaturdifferenz ist nicht eindeutig zu erkennen.

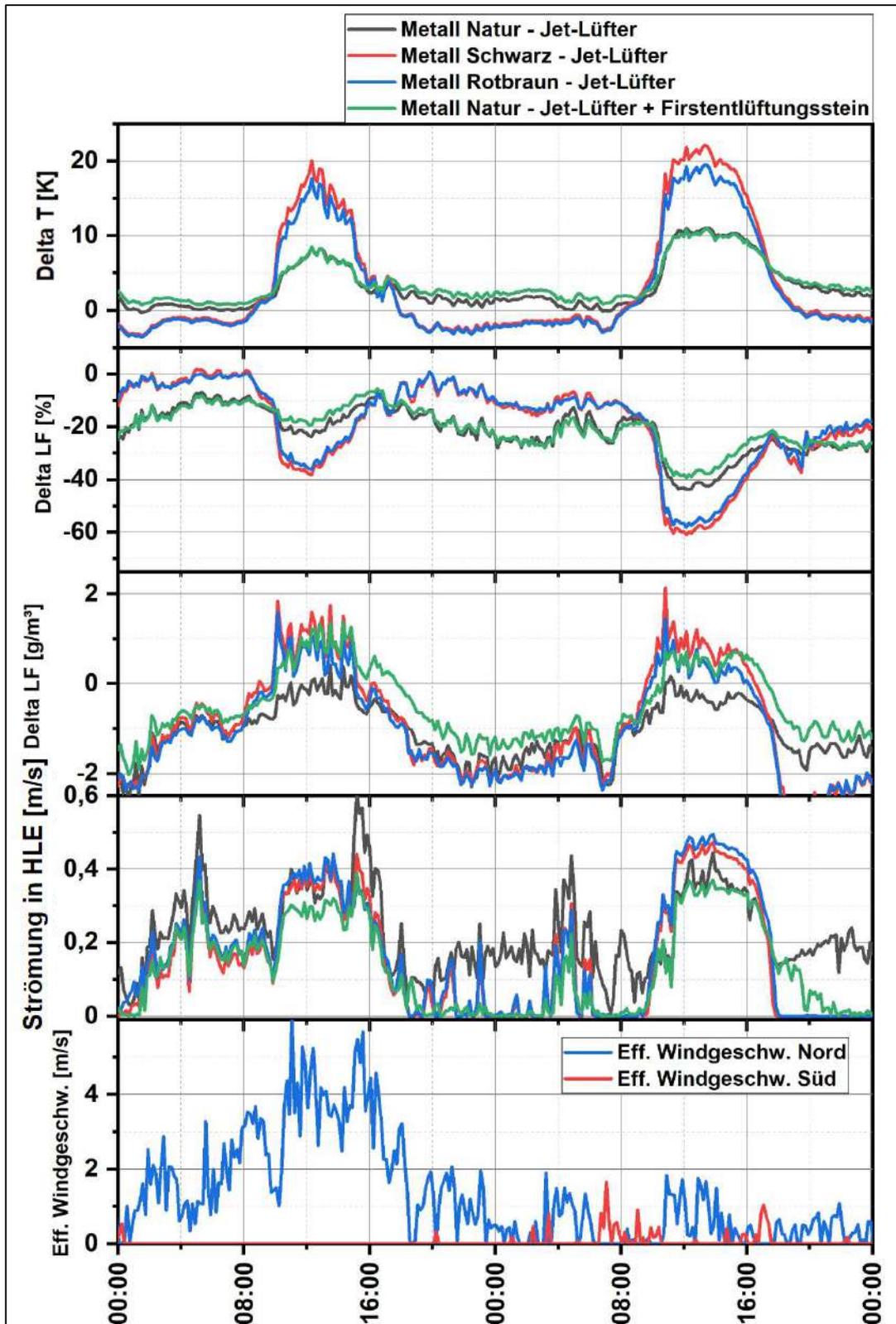


Abb. 85: Gemessene Strömungsgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene unter den verschiedenen Metalleindeckungen im Zeitraum vom 25.10.2019 bis 27.10.2019 mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit und den klimatischen Differenzen (Delta) zwischen dem Klima in der Hinterlüftungsebene und dem Außenklima.

Flachgeneigte Dächer (Versuchsdächer Groß-Enzersdorf):

In Abb. 86 sind die aufgezeichneten Strömungsgeschwindigkeiten mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit und die Differenzen zwischen Außenklima und Klima in den verschiedenen HLE-Bahnen des freistehenden Versuchsdaches (Dach 1) im Zeitraum zwischen dem 28.07. bis 02.08.2019 dargestellt. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im betrachteten Zeitraum zeigen sich in allen betrachteten Fällen grob proportional zur Windgeschwindigkeit. Diese liegen in einem Bereich zwischen 0 m/s (bei Windstille in allen betrachteten Fällen) und 1 m/s (bei der durchgehenden HLE-Bahn mit Firstausführung B und sogseitigem Wind am 31.07.2020). Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bei sogseitigem Wind in der durchgehenden Hinterlüftungsbahn mit Firstausführung B auftreten. Die geringsten Strömungsgeschwindigkeiten zeigen sich in der HLE-Bahn mit Fensterunterbrechung und Firstausführung A. In der durchgehenden Bahn mit Firstausführung A liegen bei druckseitigem Wind höhere Strömungsgeschwindigkeiten vor als in der durchgehenden Bahn mit Firstausführung B (28.07.2020). Bei den entsprechenden Bahnen mit Fensterunterbrechung ist dieser Unterschied nicht zu sehen. Bei beiden Firstausführungen zeigen sich geringe Strömungsgeschwindigkeiten. Sowohl in der durchgehenden als auch in der unterbrochenen Bahn mit Firstausführung B zeigen sich höhere Strömungsgeschwindigkeiten bei sogseitigem Wind als bei den entsprechenden Bahnen mit Firstausführung A.

Im Hinblick auf die Klimadifferenzen an den betrachteten Messtellen in den HLE-Bahnen zum gemessenen Außenklima ist ersichtlich, dass in den HLE Bahnen mit Firstausführung B etwas höhere Temperaturen im Tagesverlauf erreicht werden, als bei Firstausführung A. Dabei zeigen sich bei beiden Firstausführungen die Temperaturen in der unterbrochenen Bahn geringfügig höher als in der durchgehenden. Die Differenzen zwischen abs. Luftfeuchte außen und abs. Luftfeuchte in der durchgehenden und unterbrochenen HLE-Bahn mit Firstausführung A ist im hier betrachteten Zeitraum gering. Eine Ausnahme liegt in der Nacht vom 28.07. auf den 29.07.2019 vor. Die Differenz steigt in dieser Zeit auf ca. -4 g/m^3 (durchgehende Bahn) bzw. ca. -5 g/m^3 (unterbrochene Bahn). Auch im Tagesverlauf des 01.08.2019 steigt die Differenz in der durchgehenden Bahn auf ca. 3 g/m^3 an. Zur gleichen Zeit zeigen sich Unregelmäßigkeiten bei der unterbrochenen Bahn. Ein Anstieg der Differenz ist jedoch nicht erkennbar. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt nachts in etwa auf Außenklimaniveau. Im Tagesverlauf steigt die Differenz in etwa umgekehrt proportional zur Außentemperatur. Die Differenz der absoluten Luftfeuchtigkeit in den Bahnen mit Firstausführung B schwankt deutlich stärker als bei Firstausführung A. Sie nähert sich tagsüber im betrachteten Zeitraum in der durchgehenden HLE-Bahn der Umgebungsluftfeuchte an. In der unterbrochenen HLE-Bahn wird die Umgebungsluftfeuchte tagsüber deutlich überschritten. Nachts ist in beiden Fällen eine deutliche negative Differenz zur Umgebungsluftfeuchte erkennbar, welche für beide HLE-Bahnen auf einem ähnlichen Niveau ist. Die Entwicklung der Luftfeuchtedifferenz in der Nacht vom 28.07. auf den 29.07.2019 zeigt sich ähnlich wie bei den Bahnen mit Firstausführung A (siehe oben). Die Entwicklung der relativen Luftfeuchte im betrachteten Zeitraum bei den Bahnen mit Firstausführung B zeigt sich vergleichbar mit den Entwicklungen jener bei den entsprechenden Bahnen mit Firstausführung A (siehe oben).

In Abb. 87 sind die aufgezeichneten Strömungsgeschwindigkeiten mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit und die Differenzen zwischen Außenklima und Klima in den verschiedenen HLE-Bahnen des windgeschützten Versuchsdaches (Dach 2) im Zeitraum zwischen dem 07.05.2019 bis 10.05.2019 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Skalierung trotz Strömungsgeschwindigkeiten > 1 m/s in der durchgehenden HLE-Bahn mit Firstausführung A zwischen 0 m/s und 1 m/s belassen. Im abgeschnittenen Bereich betrug die Strömungsgeschwindigkeit ca. 1,5 m/s. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im betrachteten Zeitraum liegen zwischen 0 m/s (bei Windstille in allen betrachteten Fällen) und 1,5 m/s. Letztere wurde in der durchgehenden HLE-Bahn mit Firstausführung A und druckseitigem Wind am 08.05.2019 gemessen. Die niedrigsten Strömungsgeschwindigkeiten an diesem Tag wurde in der HLE-Bahn mit Fensterunterbrechung und Firstausführung B bei druckseitigem Wind gemessen. Bei druckseitigem Wind sind in den HLE-Bahnen mit Firstausführung A deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten erkennbar als bei jenen mit Firstausführung B. Bei sogseitigem Wind sind die entsprechenden Geschwindigkeiten bei der durchgehenden Bahn mit Firstausführung B geringfügig höher als jene mit Firstausführung A. Bei den unterbrochenen Bahnen ist in diesem Fall kein deutlicher Unterschied erkennbar.

Die Temperaturdifferenzen zur Außentemperatur in den betrachteten Bahnen sind tendenziell etwas größer als beim freistehenden Dach, zeigen aber die gleichen Tendenzen. Tagsüber steigt die Differenz je nach Fall auf bis zu +6 K über Außentemperatur. Nachts gleichen sich die Temperaturen der Außentemperatur an. Die absolute Luftfeuchte in der durchgehenden Bahn mit Firstausführung A liegt im betrachteten Zeitraum mit kleineren Schwankungen ca. 4 g/m^3 unter der Außenluftfeuchte. In der unterbrochenen Bahn mit Firstausführung A sind stärkere Schwankungen der abs. Luftfeuchtedifferenz erkennbar. Tagsüber liegt die abs. Luftfeuchte hier eher oberhalb und nachts eher unterhalb der Außenluftfeuchte. Die unterbrochene Bahn mit Firstausführung B zeigt die gleiche Tendenz, wobei die Absolutwerte der Differenz etwas größer sind. In der durchgehenden Bahn mit Firstausführung B ist erneut die gleiche Tendenz zu erkennen. Die Absolutwerte der Differenz zur Außenluftfeuchte sind jedoch im Vergleich deutlich geringer und liegen näher am Umgebungsluftfeuchteniveau. Die relative Luftfeuchte liegt nahezu im gesamten betrachteten Zeitraum unterhalb der relativen Luftfeuchte in der Umgebung. Eine umgekehrte Proportionalität zur Temperatur ist nur geringfügig erkennbar (z.B. am 08.05.2019 in allen Fällen mit Ausnahme von First A - durchgehend). Die Differenz schwankt sehr stark und zeigt sich zum Teil leicht proportional zur absoluten Luftfeuchte.

In Abb. 88 sind die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in den durchgehenden HLE-Bahnen beider Versuchsdächer sowie die effektive Windgeschwindigkeit im Zeitraum zwischen dem 28.07. und 02.08.2019 dargestellt. Im Prinzip zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Firste die gleichen qualitativen Unterschiede, die bereits oben in Bezug auf Abb. 86 und Abb. 87 beschrieben wurden. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im windgeschützten Dach deutlich geringer sind. Vor allem bei sogseitigen Winden (aus dieser Richtung ist Versuchsdach 2 windgeschützt), beträgt die Strömungsgeschwindigkeit in der HLE-Bahn mit Firstausführung B im freistehenden Dach ein Vielfaches von jener im windgeschützten Dach. Die Unterschiede bei druckseitigen Winden (aus dieser Richtung ist Versuchsdach 2 nicht windgeschützt) fallen deutlich geringer aus. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im freistehenden Dach sind hier etwas höher.

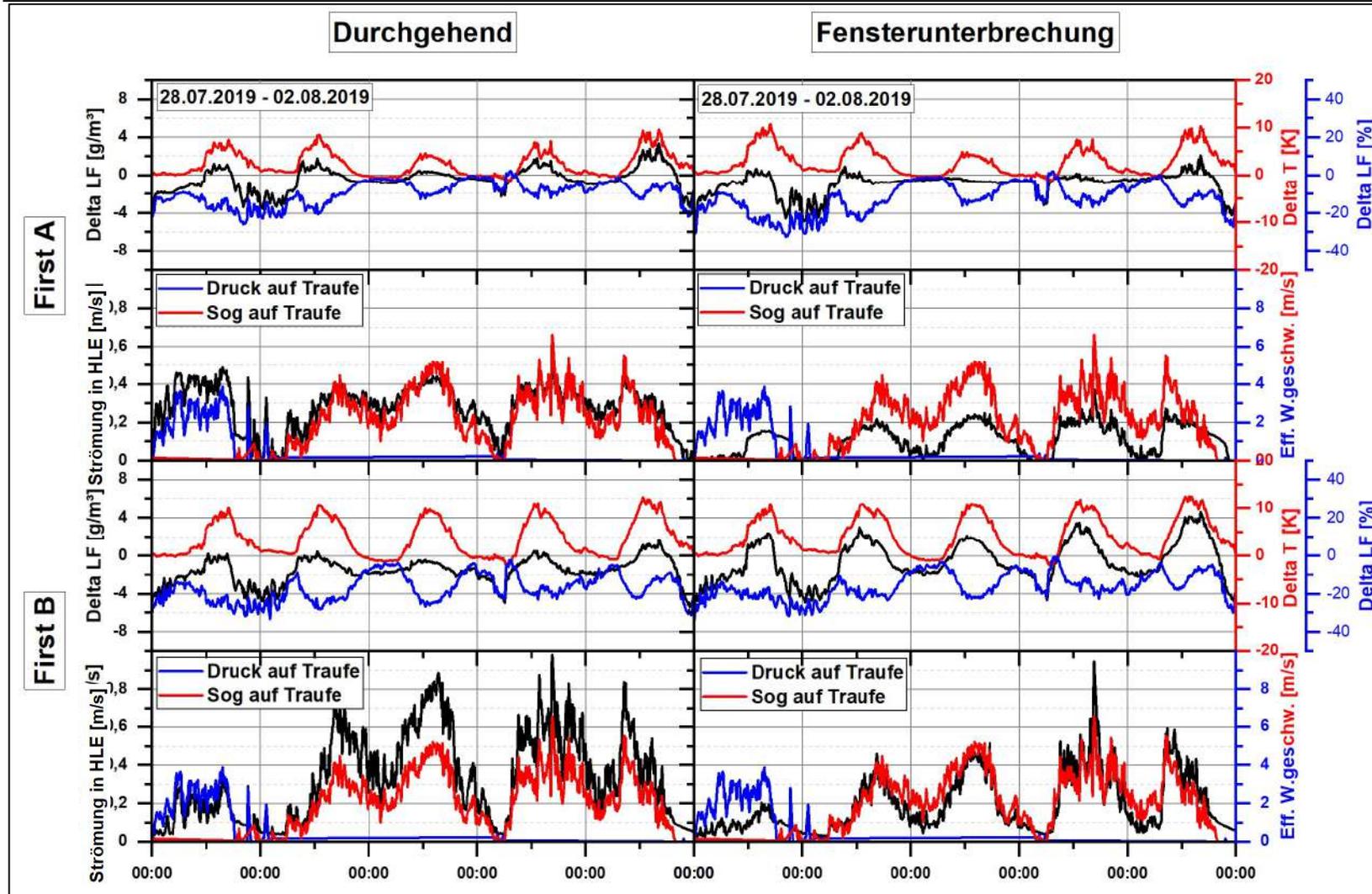


Abb. 86: Differenzen zum Außenklima (T, rel. LF, abs. LF) und Strömungsgeschwindigkeit in den HLE-Bahnen des freistehenden Forschungsdaches (Dach 1) mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit im Zeitraum vom 28.07.2019 bis 02.08.2019. Linienfarben entsprechen den Farben der jeweils zugehörigen Y-Achse.

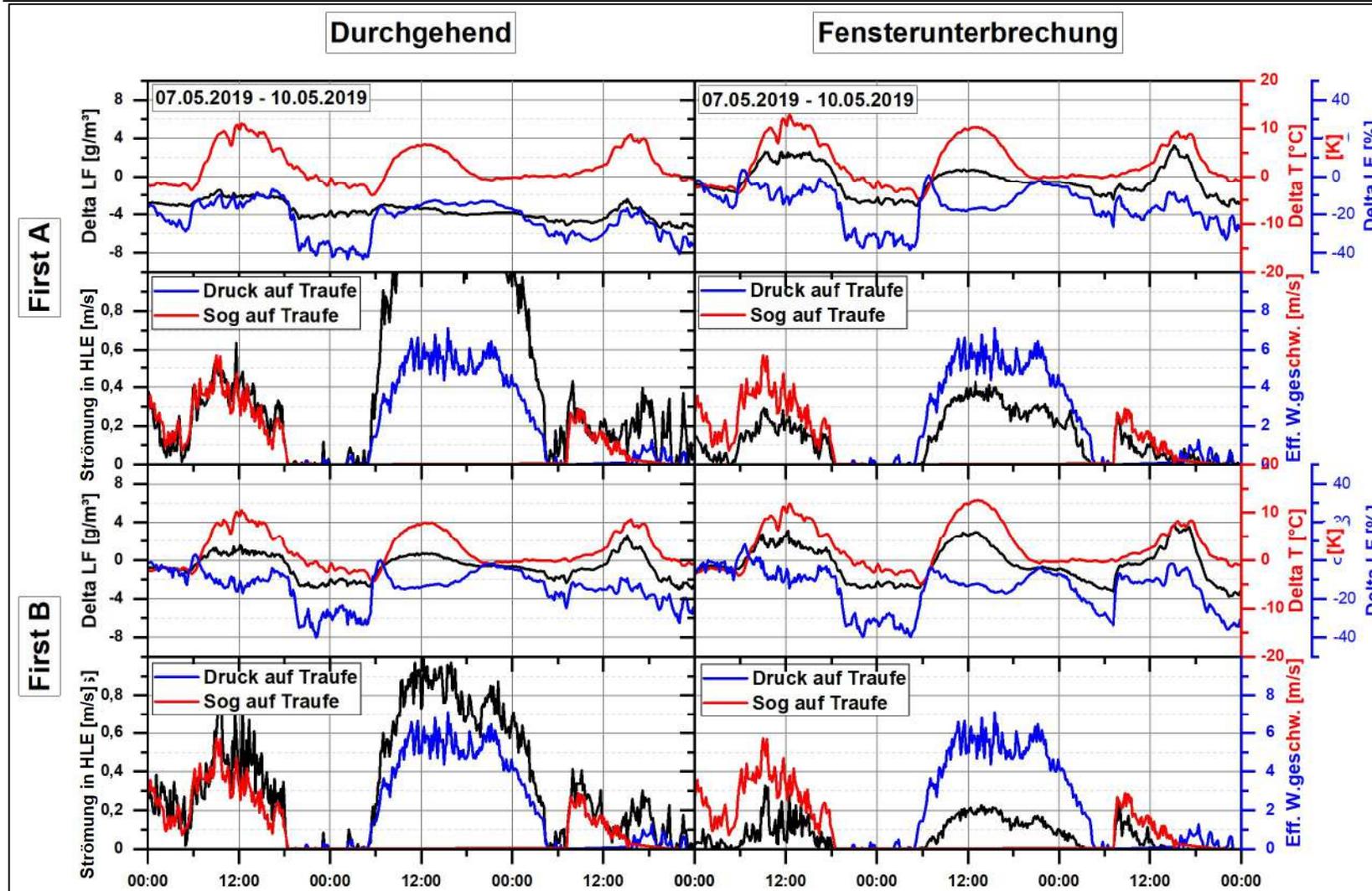


Abb. 87: Differenzen zum Außenklima (T, rel. LF, abs. LF) und Strömungsgeschwindigkeit in den HLE-Bahnen des windgeschützten Forschungsdaches (Dach 2) mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit im Zeitraum vom 07.05.2019 bis 10.05.2019. Linienfarben entsprechen den Farben der jeweils zugehörigen Y-Achse.

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

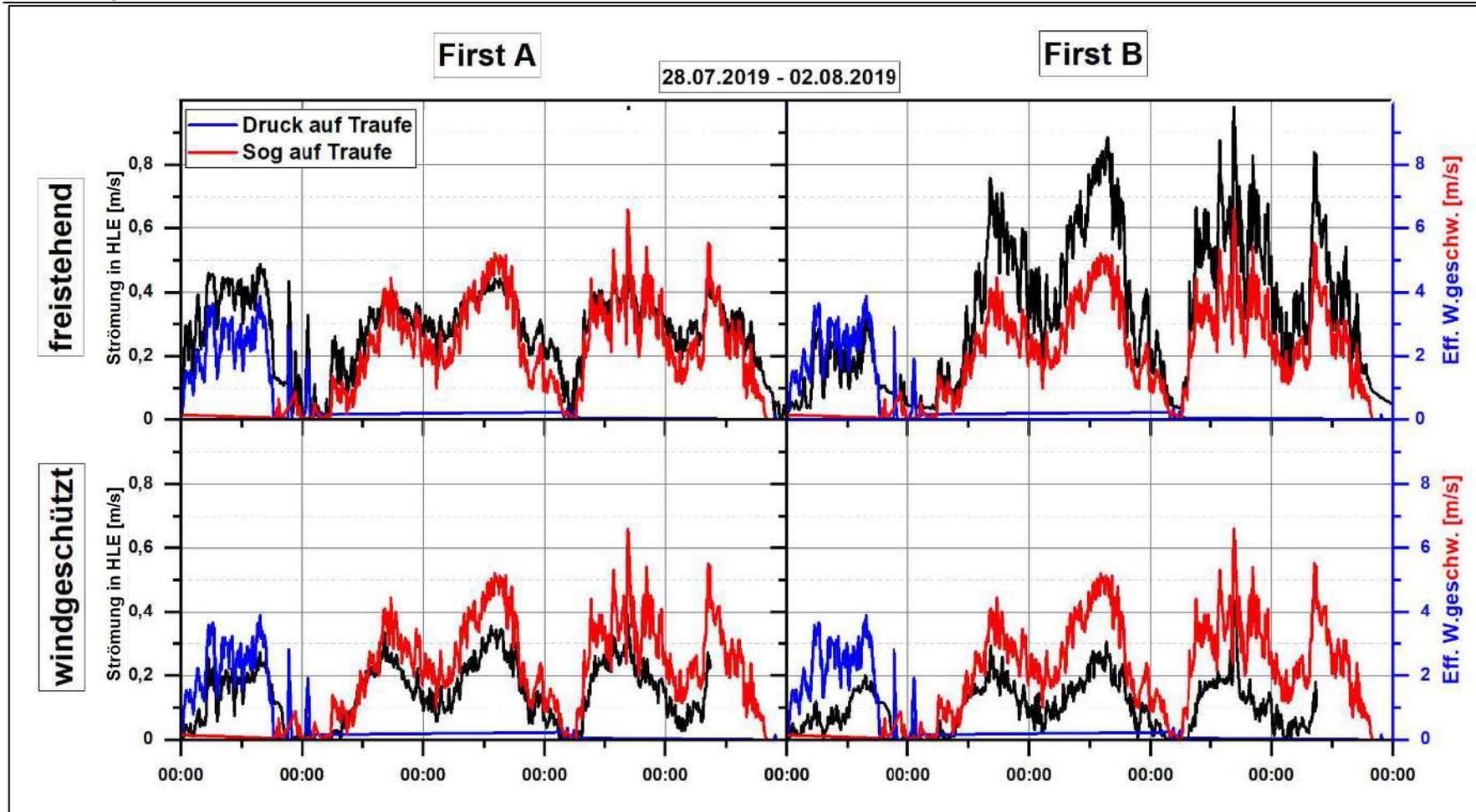


Abb. 88: Strömungsgeschwindigkeiten in den durchgehenden HLE-Bahnen mit unterschiedlicher Firstausführung für das freistehende Dach 1 (oben) und das windgeschützte Dach 2 (unten) mit hinterlegter effektiver Windgeschwindigkeit. Linienfarben entsprechen den Farben der jeweils zugehörigen Y-Achse.

4.3.2.2 Klimaprognosemodell

In Abb. 89 sind die gemessenen Temperaturwerte in der HLE im Vergleich zu den nach den Regressionsansätzen gem. Gleichungen (H), (I) und (J) berechneten Temperaturwerten für die südlich orientierte Dacheindeckung Nr. 4 dargestellt (Ziegel – Rot – Gratrolle + Lüfterstein). In Abhängigkeit vom jeweiligen Regressionsansatz fällt die Genauigkeit der berechneten Werte unterschiedlich aus. Wird nur die Außentemperatur (T_e) zur Modellierung der Temperatur herangezogen (Ansatz (H)) weichen die Werte des berechneten Temperaturverlaufs stark von den Messwerten ab. Sowohl Maximal-, als auch Minimaltemperaturen im Tagesverlauf werden nach diesem Ansatz stark unter- bzw. überschätzt. Wird zusätzlich zur Außentemperatur die normal zur Dachfläche auftretende Globalstrahlung ($G_{e,eff}$) im Regressionsmodell berücksichtigt (Ansatz (I)) zeigt sich eine relativ gute Beschreibung des Temperaturverlaufs in der HLE. Sowohl Maximal- als auch Minimaltemperaturen werden im Tagesverlauf hinreichend genau erfasst. Die zusätzliche Berücksichtigung der effektiven Windgeschwindigkeit ($v_{e,eff+}$, $v_{e,eff-}$) nach Regressionsansatz (J) hatte keine weitere Erhöhung der Genauigkeit zur Folge.

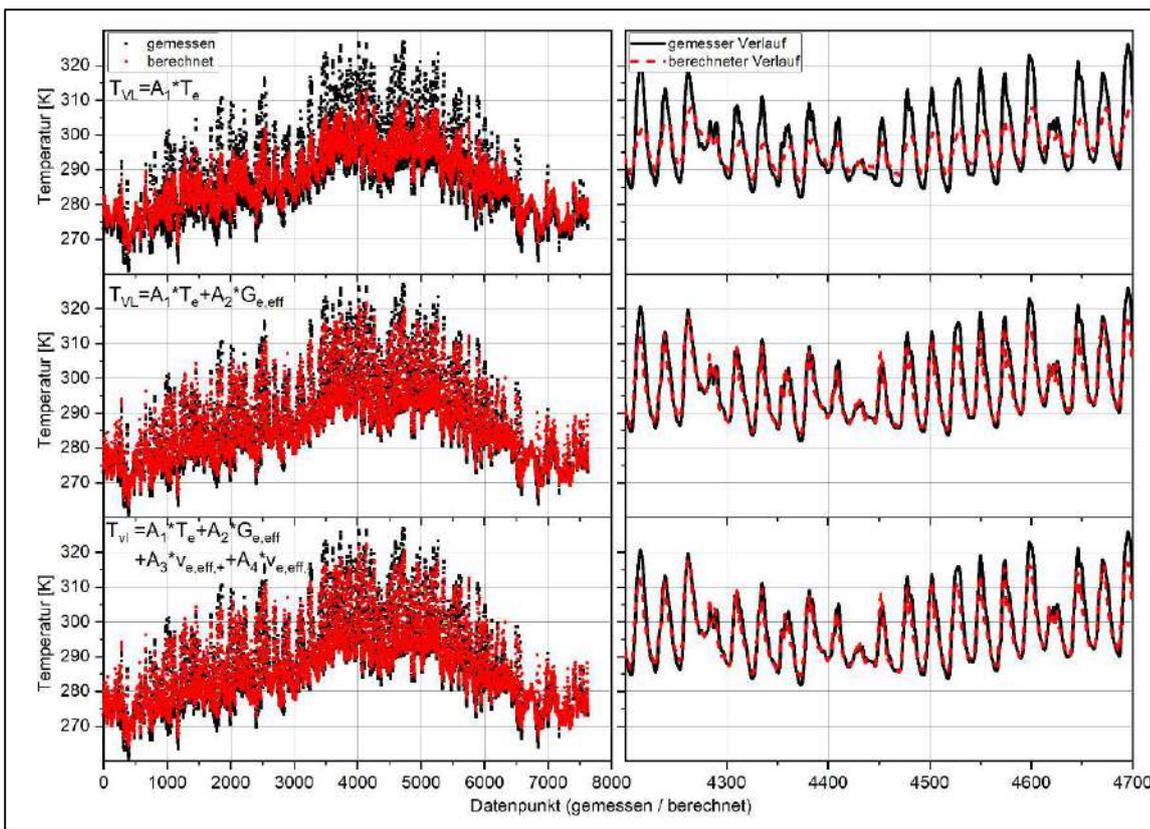


Abb. 89: Gemessener und nach den Regressionsansätzen (H), (I) und (J) berechneter Temperaturverlauf in der Hinterlüftungsebene unter Dacheindeckung Nr. 4

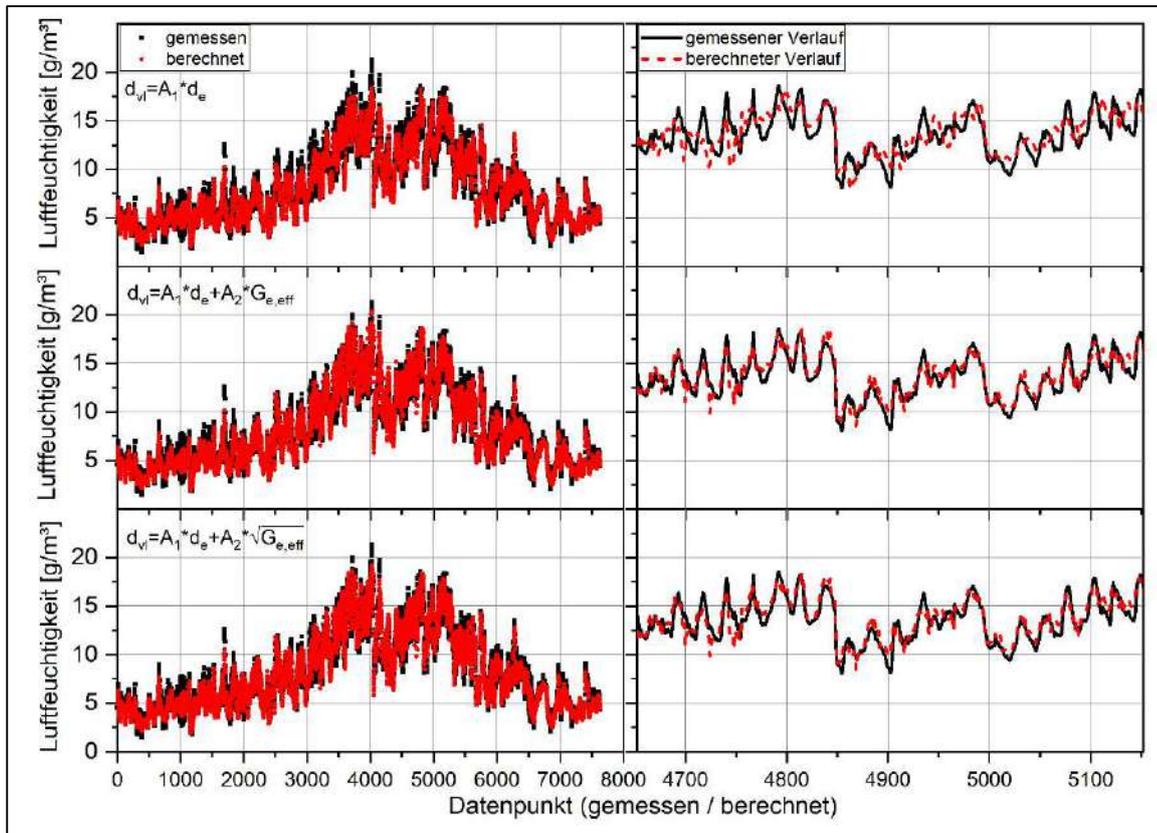


Abb. 90: Gemessener und nach den Regressionsansätzen (K), (L) und (N) berechneter Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit in der Hinterlüftungsebene unter Dacheindeckung Nr. 4

Abb. 90 zeigt die berechneten Luftfeuchtwerte (g/m^3) in der HLE nach den Regressionsansätzen (K), (L) und (N) im Vergleich zu den Messwerten für die südlich ausgerichtete Dacheindeckung Nr. 4. Es ist zu erkennen, dass Ansatz (K) keine hinreichend genaue Beschreibung der Luftfeuchtigkeit in der HLE zulässt. Die gleichzeitige Betrachtung der Außenluftfeuchte und der effektiven Globalstrahlung (Ansatz (L)) zeigt hingegen eine adäquate Beschreibung der Messwerte. Regressionsansatz (N) zeigt zunächst augenscheinlich keine Steigerung der Berechnungsgenauigkeit.

Der in Abb. 90 nicht dargestellte Regressionsansatz (M), in welchem die effektive Windgeschwindigkeit berücksichtigt wurde, zeigte wie auch bei der Temperaturberechnung keine Erhöhung der Genauigkeit im Vergleich zu Ansatz (L) und (N).

Das zugrundeliegende Modell zur Berechnung der Luftfeuchtigkeit wurde anhand der LF-Messwerte in der HLE unter der **nördlich** ausgerichteten Dacheindeckung Nr. 4 entwickelt. Bei der Anwendung dieses Modells zur Berechnung der Luftfeuchtigkeit in der **südlichen** HLE dieser Dacheindeckung zeigte sich nach Ansatz (L) zeitweise eine deutliche Überschätzung der Maximalwerte im Tagesverlauf (Abb. 91). Ansatz (N) zeigt in diesem Fall eine bessere Beschreibung der Luftfeuchtigkeit.

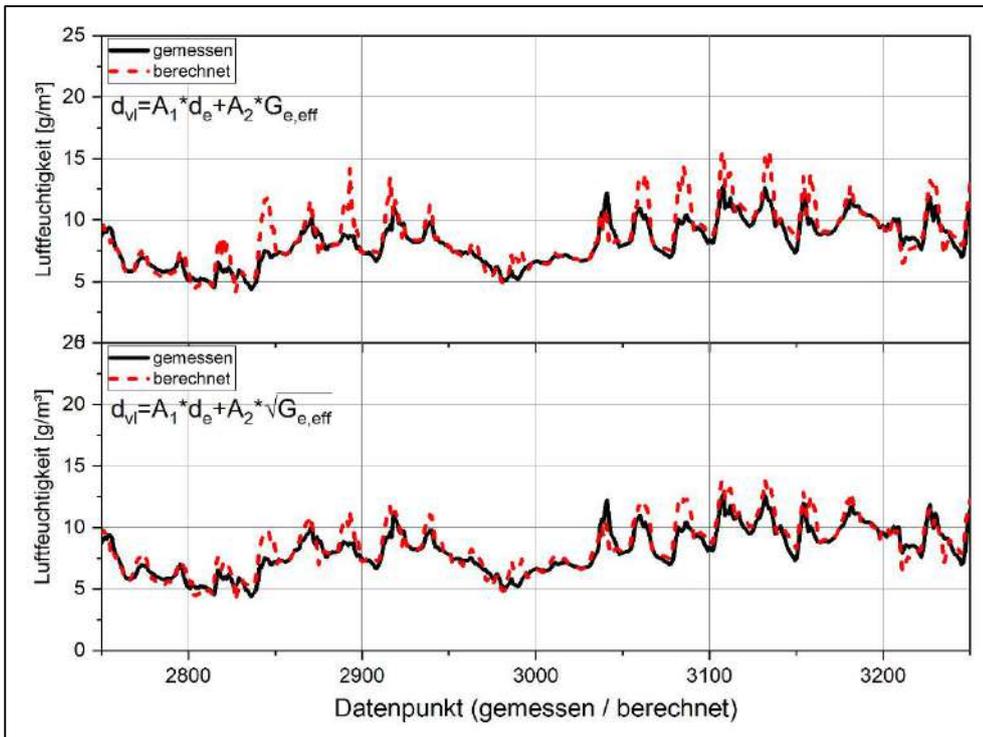


Abb. 91: Gemessener und nach den Regressionsansätzen (L) und (N) berechneter Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit in der südlichen Hinterlüftungsebene unter Dacheindeckung Nr. 4 über insgesamt 500 Datenpunkte (\approx ca. 21 Tage)

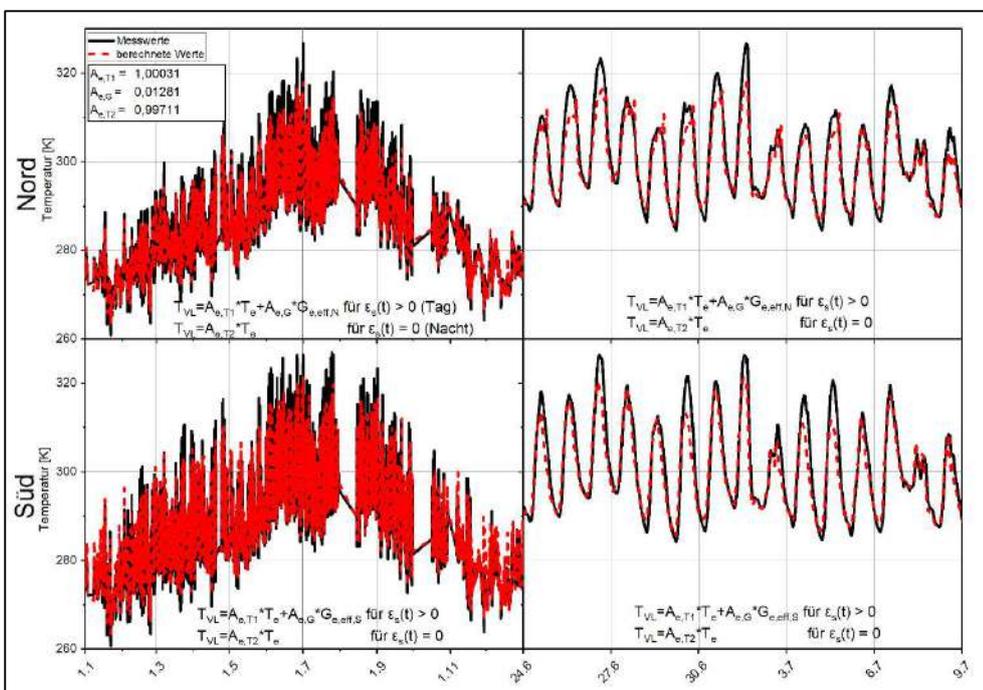


Abb. 92: Berechneter Temperaturverlauf auf Basis der Kombination zwischen Regressionsansatz (I) zur Berechnung der Temperaturwerte bei vorliegender Globalstrahlung (tagsüber, Globalstrahlung $\epsilon_s(t) > 0$) und Regressionsansatz (O) zur Berechnung der Temperaturwerte bei ausbleibender Globalstrahlung (nachts, $\epsilon_s(t) = 0$) – Vergleich mit vorliegenden Messdaten

Für die Modellierung der Temperatur (T_{vi}) zeigte eine Kombination des Ansatzes (I) für die Berechnung der Temperaturwerte tagsüber (Globalstrahlung $\epsilon_s(t) > 0$) und Ansatz (O) zur Berechnung der nächtlichen Temperaturwerte ($\epsilon_s(t) = 0$) die höchste Genauigkeit. In Abb. 92 sind die berechneten Temperaturwerte nach dieser Ansatzkombination im Vergleich zu den Messwerten für Dacheindeckung Nr. 4 dargestellt. Es zeigt sich eine adäquate Beschreibung der Messwerte im Jahresverlauf sowohl nord- als auch südseitig. In beiden Fällen kommt es jedoch vor allem zur Sommerzeit (Juni/Juli) zu einer Unterschätzung der Maximaltemperaturen im Tagesverlauf.

Bei der Modellierung der absoluten Luftfeuchtigkeit (d_{vi}) zeigte eine Kombination des Ansatzes (K) für die Berechnung der Luftfeuchtigkeit tagsüber ($\epsilon_s(t) > 0$) und Ansatz (Q) zur Berechnung der nächtlichen Luftfeuchtigkeit ($\epsilon_s(t) = 0$) die höchste Genauigkeit. In Abb. 93 ist die berechnete Luftfeuchtigkeit (g/m^3) nach dieser Ansatzkombination im Vergleich zu den entsprechenden Messwerten für Dacheindeckung Nr. 4 dargestellt. Es zeigt sich sowohl nord- als auch südseitig ein realitätsnaher Jahresverlauf der Luftfeuchtigkeit in der HLE, wobei jedoch vor allem nordseitig ganzjährig Unterschätzungen der Maximalwerte im Tagesverlauf zu erkennen sind. Dabei folgt das gleitende 3-Tages-Mittel (Abb. 94) der berechneten Werte nordseitig relativ genau dem gleitenden Mittel der Messwerte. Südseitig liegt das gleitende Mittel der berechneten Werte ganzjährig etwas über jenem der Messwerte.

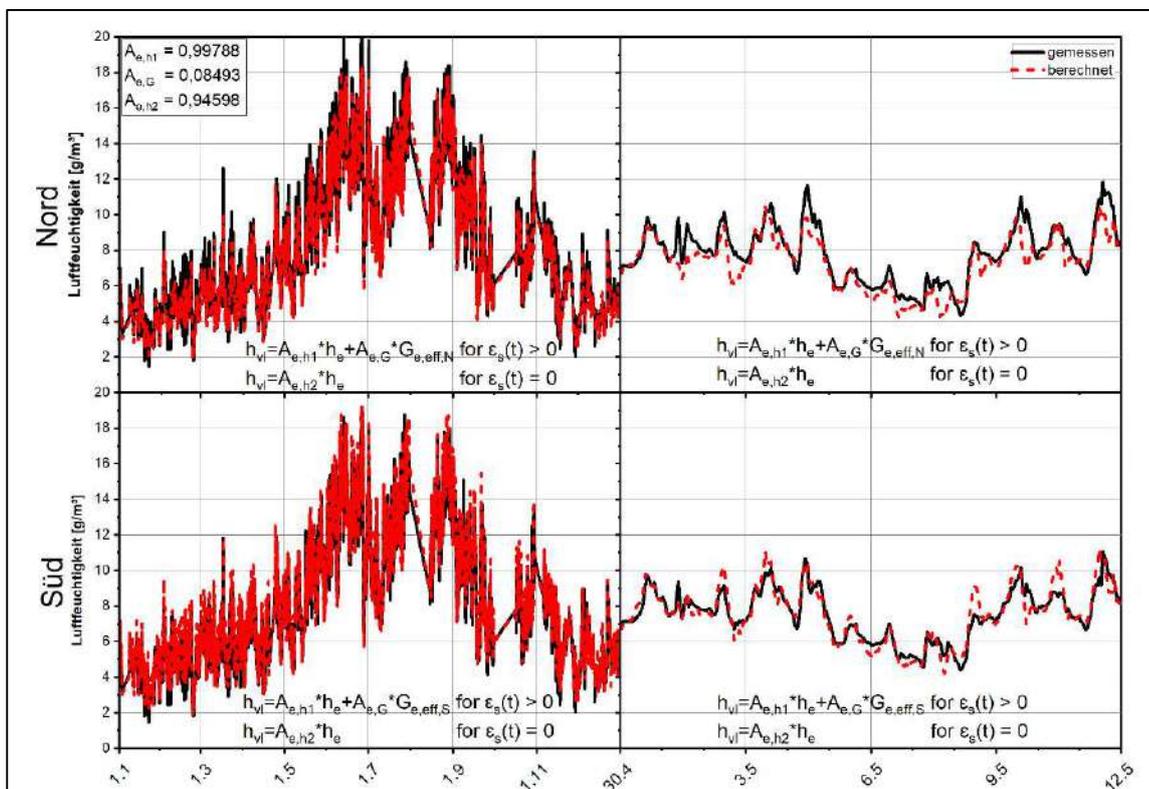


Abb. 93: Berechnete Luftfeuchteentwicklung auf Basis der Kombination zwischen Regressionsansatz (K) zur Berechnung der Luftfeuchtigkeit bei vorliegender Globalstrahlung (tagsüber, Globalstrahlung $\epsilon_s(t) > 0$) und Regressionsansatz (Q) zur Berechnung der Luftfeuchtigkeit bei ausbleibender Globalstrahlung (nachts, $\epsilon_s(t) = 0$) – Vergleich mit vorliegenden Messdaten

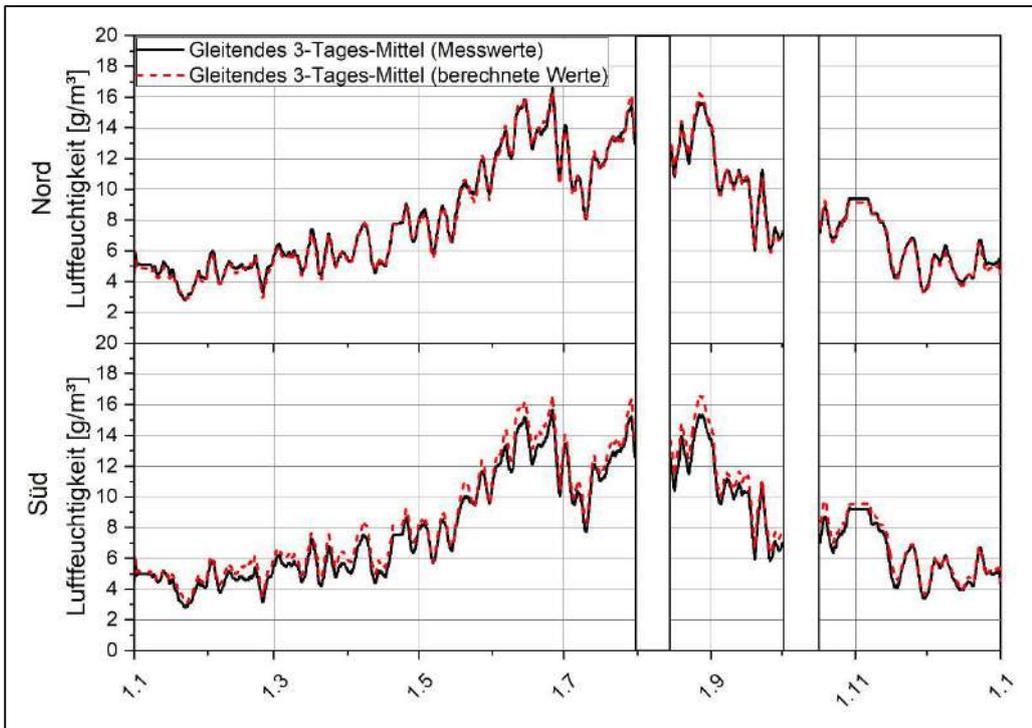


Abb. 94: Jahresverlauf der Luftfeuchtigkeit im gleitenden 3-Tages-Mittel – Vergleich zwischen Messwerten und modellierten Werten

Abb. 96 zeigt das Ergebnis der oben beschriebenen Berechnungskombinationen als Klima in der HLE von Dacheindeckung Nr. 4 südseitig und nordseitig (Temperatur t_{vi} [°C] = T_{vi} [K] – 273,15) und zugehörige rel. Luftfeuchtigkeit φ_{vi} [%]) im Frühling (15.04. – 15.06.) und Herbst (15.10. – 15.12.). Die absolute Luftfeuchtigkeit [g/m³] wurde dafür nach den Gleichungen (C)-(F) unter Annahme der berechneten Temperaturen in der HLE auf die relative Luftfeuchtigkeit [%] umgerechnet. Aus Abb. 96 geht hervor, dass t_{vi} und φ_{vi} durch das zugrunde liegende Modell sowohl im Frühling als auch im frühen Herbst nördlich und südlich hinreichend genau beschrieben werden. Ab dem 15. November treten höhere Fehleinschätzungen der südlichen Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf. Nördlich betreffen diese Fehleinschätzungen lediglich die relative Luftfeuchtigkeit. Die Temperatur wird weiterhin hinreichend genau erfasst. Das gleitende 3-Tagesmittel der berechneten Klimaparameter im Vergleich zu jenen der Messwerte zeigt sowohl nördlich als auch südlich eine gute Übereinstimmung im Jahresverlauf (Abb. 95). Lediglich im Juni zeigt sich im gleitenden Durchschnitt in beiden Fällen eine kurzfristige Unterschätzung der Temperaturmesswerte.

Die oben beschriebenen Ergebnisse zur Modellentwicklung wurden beispielhaft anhand von Dacheindeckung Nr. 4 beschrieben. Die Modelle für alle anderen betrachteten Dacheindeckung wurden auf die gleiche Weise entwickelt. Die dabei festgestellte Genauigkeit/Ungenauigkeit dieser Modelle entsprach in etwa jener für Dacheindeckung Nr. 4. Aufgrund der guten Ergebnisse in Bezug auf die Genauigkeit wurde alle Temperaturberechnungsmodelle auf Basis von Regressionsansatz (I) für tagsüber (Globalstrahlung $\varepsilon_s(t) > 0$) auftretende Temperaturwerte in der HLE in Kombination mit Regressionsansatz (O) für nachts (Globalstrahlung $\varepsilon_s(t) = 0$) auftretende Temperaturwerte in der HLE entwickelt. Die entsprechenden Regressionskoeffizienten und Abweichungen zu den Messwerten für die verschiedenen Dacheindeckungen sind in Tab. 8 aufgelistet. Die durchschnittliche Abweichung der berechneten Klimaparameter von den gemessenen liegt je nach Dacheindeckung zwischen ca. $\pm 1,4$ K und ± 3 K bzw. $\pm 0,4$ g/m³ und 0,9 g/m³.

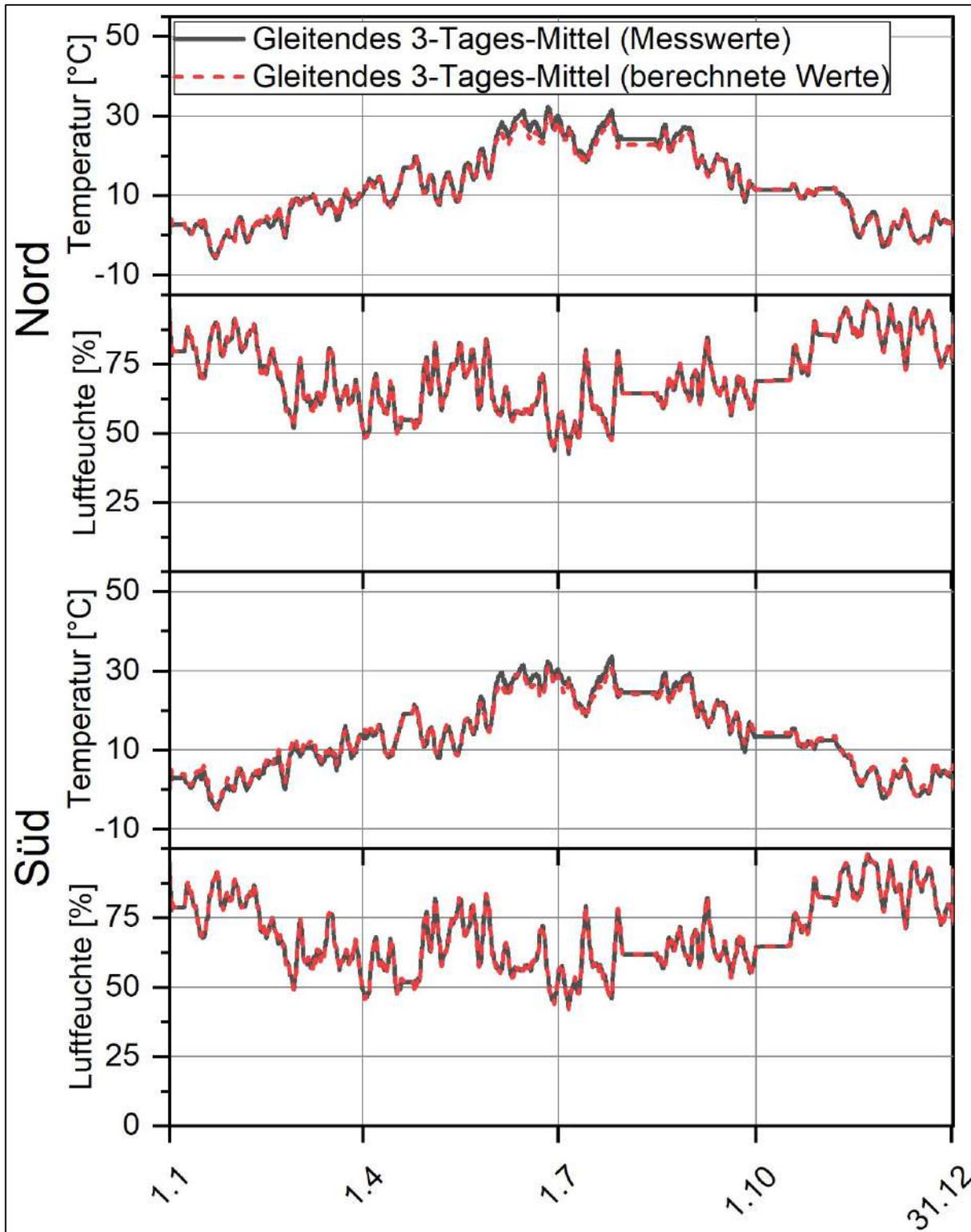


Abb. 95: Jahresverlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur in der Hinterlüftungsebene im 3-Tages-Mittel - Vergleich zwischen Messwerten und modellierten Werten.

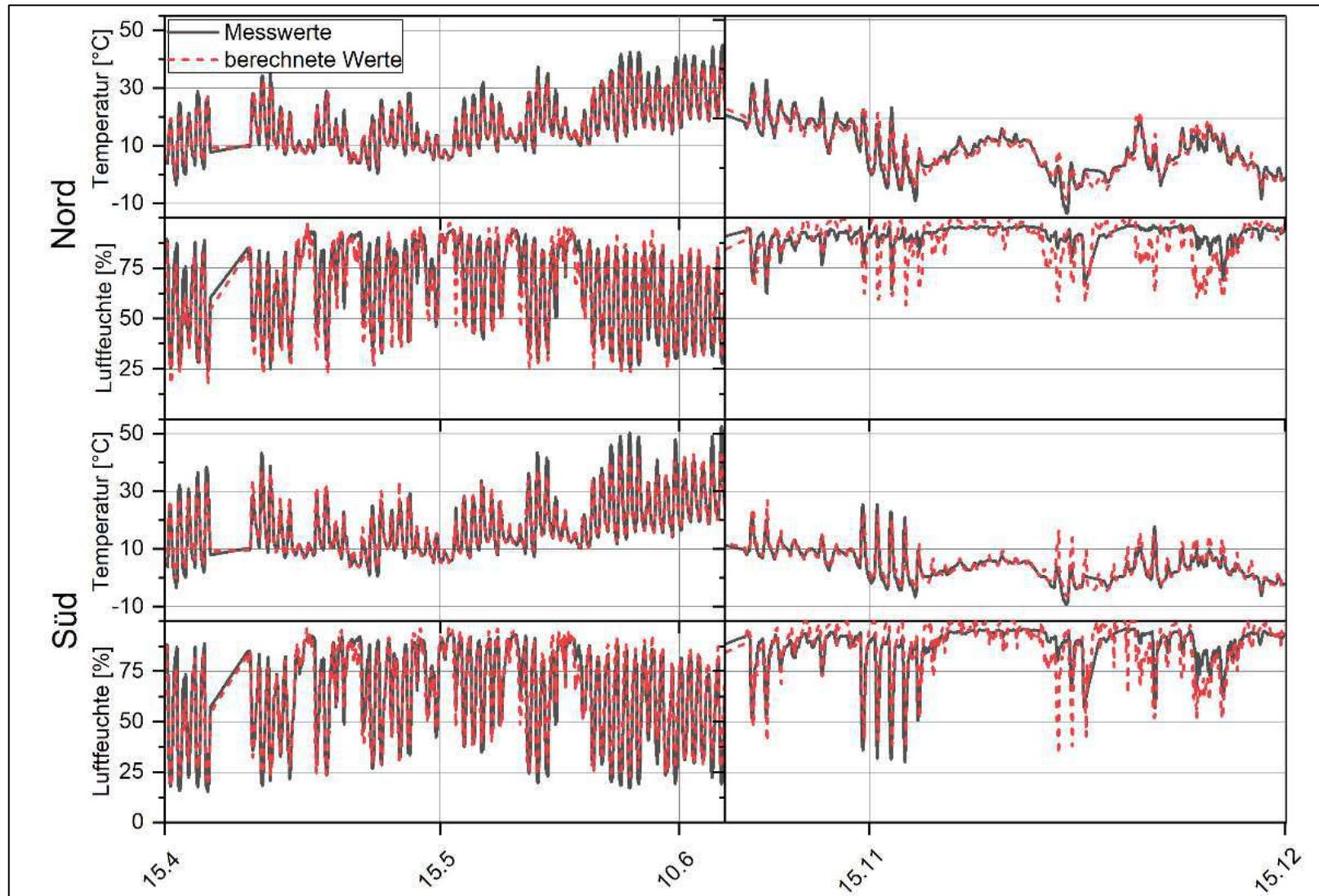


Abb. 96: Endergebnis der HLE-Klimaberechnung. Berechnete Entwicklung der Temperatur [t_{vi} (° C)] und der relativen Luftfeuchtigkeit [φ_{vi} (%)] im Vergleich zur gemessenen Entwicklung im Frühjahr (links) und Herbst (rechts) für die nördliche und südliche Hinterlüftungsebene.

PuPURA - Planungssicherheit und Prognostizierbarkeit von Unterdecksystemen bzgl. Regendichtheit und Alterungseinflüssen

Tab. 8: Regressionskoeffizienten der verschiedenen Dacheindeckungen zur Beurteilung von Temperatur [K] und absoluter Luftfeuchtigkeit [g / m³] innerhalb der Hinterlüftungsebene. Durchschnittliche Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten und Standardabweichung der durchschnittlichen Abweichung für alle Modelle (N = Nord, S = Süd)

Nr.	Dacheindeckung	Koeffizienten Temperatur [K]			Abweichungen $\sqrt{(T_{vl,m} - T_{vl,c})^2}$ [K]			
		Tag		Nacht	Mittlere Abweichung (±)		Std.Abw. (der mittleren Abweichung) (±)	
		$A_{e,T1}$	$A_{e,GT}$	$A_{e,T2}$	N	S	N	S
2	Ziegel - Rot - Trennung N-S, Gratrolle	1,0012	0,0135	0,9979	1,46	1,96	1,30	2,01
3	Ziegel - Rot - Gratrolle	1,0007	0,0126	0,9978	1,62	2,22	1,34	1,98
4	Ziegel - Rot - Gratrolle + Lüfterstein	1,0003	0,0128	0,9971	1,48	1,86	1,44	1,94
5	Ziegel - Schwarz - Gratrolle	1,0010	0,0160	0,9979	1,63	2,01	1,69	2,19
8	Ziegel - Rot - Gratrolle + Metallentlüftungsband	1,0007	0,0129	0,9980	1,41	1,87	1,31	1,99
9	Beton - Rot - Gratrolle	1,0014	0,0149	0,9979	1,42	1,93	1,37	2,00
10	Faserzement - Grau - Firstentlüftungsband	1,0027	0,0175	0,9987	1,71	2,19	1,65	2,28
11	Faserzement - Schwarz - Firstentlüftungsband	1,0117	0,0145	0,9967	2,17	2,96	1,78	2,69
14	Metall - Naturblank - Jet-Lüfter	1,0052	0,0092	1,0024	1,25	1,67	1,04	1,52
15	Metall - Schwarz - Jet-Lüfter	1,0022	0,0234	0,9978	1,96	2,44	1,75	2,61
16	Metall - Braun - Jet-Lüfter	1,0010	0,0212	0,9968	1,71	2,34	1,61	2,47
17	Metall - Naturblank - Jet-Lüfter + Lüfterstein	1,0077	0,0080	1,0058	1,53	1,61	0,96	1,39
	Berechnungsmodell	$T_{vl} = A_{e,T1} * T_e + A_{e,GT} * G_{e,eff} (Tag)$			$T_{vl,m} \rightarrow$ Temperaturmesswerte [K]			
		$T_{vl} = A_{e,T2} * T_e (Nacht)$			$T_{vl,c} \rightarrow$ Berechnete Temperatur [K]			
Nr.	Dacheindeckung	Koeffizienten Luftfeuchte [g/m ³]			Abweichungen $\sqrt{(d_{vl,m} - d_{vl,c})^2}$ [g/m ³]			
		Tag		Nacht	Mittlere Abweichung (±)		Std.Abw. (der mittleren Abweichung) (±)	
		$A_{e,d1}$	$A_{e,Gd}$	$A_{e,d2}$	N	S	N	S
2	Ziegel - Rot - Trennung N-S, Gratrolle	1,0182	0,0291	0,9693	0,54	0,50	0,50	0,53
3	Ziegel - Rot - Gratrolle	0,9898	0,0849	0,9460	0,60	0,51	0,56	0,47
4	Ziegel - Rot - Gratrolle + Lüfterstein	0,9979	0,0882	0,9475	0,57	0,53	0,60	0,46
5	Ziegel - Schwarz - Gratrolle	1,0108	0,0142	0,9696	0,38	0,92	0,32	0,99
8	Ziegel - Rot - Gratrolle + Metallentlüftungsband	1,0344	0,0268	0,9868	0,44	0,45	0,41	0,48
9	Beton - Rot - Gratrolle	0,9156	0,1062	0,8582	0,83	0,76	0,78	0,62
10	Faserzement - Grau - Firstentlüftungsband	0,9590	0,0936	0,8931	0,61	0,58	0,59	0,61
11	Faserzement - Schwarz - Firstentlüftungsband	0,8965	0,0780	0,8277	0,55	0,63	0,51	0,76
14	Metall - Naturblank - Jet-Lüfter	0,9392	0,0535	0,9058	0,39	0,49	0,41	0,38
15	Metall - Schwarz - Jet-Lüfter	0,9154	0,0597	0,8636	0,54	0,69	0,46	0,89
16	Metall - Braun - Jet-Lüfter	0,9299	0,0687	0,8775	0,53	0,52	0,47	0,53
17	Metall - Naturblank - Jet-Lüfter + Lüfterstein	0,9739	0,0385	1,0100	0,44	0,64	0,44	0,63
	Berechnungsmodell	$d_{vl} = A_{e,d1} * d_e + A_{e,Gd} * \sqrt{G_{e,eff} (Tag)}$			$d_{vl,m} \rightarrow$ Luftfeuchtemesswerte [g/m ³]			
		$d_{vl} = A_{e,d2} * d_e (Nacht)$			$d_{vl,c} \rightarrow$ Berechnete Luftfeuchte [g/m ³]			

4.3.3 Diskussion

4.3.3.1 Messdaten

4.3.3.1.1 Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der HLE

Die in Kapitel 4.3.2 dargelegten Ergebnisse der Klimamessungen in der HLE zeigen eine Abhängigkeit des Klimas in der HLE von folgenden Faktoren:

Einfluss Ausrichtung:

Erwartungsgemäß zeigen sich unter den sonnenexponierten, südseitigen Dacheindeckungen deutlich höhere Maximaltemperaturen als unter den nordseitigen Eindeckungen. Auch im Jahresdurchschnitt nehmen die Temperaturen auf der Südseite etwas höhere Werte an als auf der Nordseite. Die gemessenen Minimaltemperaturen wird hingegen kaum von der Dachausrichtung beeinflusst. Die Ursache für die etwas stärker ausgeprägte Differenz der naturblanken Metalleindeckung mit Jet-Lüfter und Lüfterstein zwischen Nord- und Südseite konnte nicht abschließend geklärt werden.

Im Hinblick auf die Feuchteentwicklung in der HLE konnte beobachtet werden, dass die relative Luftfeuchtigkeit auf der Nordseite im Maximum und im Mittel deutlich höher ist als auf der Südseite. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt primär auf die geringeren Temperaturen auf der Nordseite zurückzuführen ist. Der Grund für diese Annahme zeigt sich bei der Umrechnung der relativen Luftfeuchte auf ihre Absolutwerte. Diese liegen im nord- und südseitigen Vergleich jeweils auf einem ähnlichen Niveau. Die Maximalwerte sind unter den südlichen Dacheindeckungen zum Teil sogar deutlich höher als unter den nördlichen Eindeckungen. Es hat sich gezeigt, dass jene Maximalwerte an Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung auftreten. Dies lässt den Schluss zu, dass die beobachtete, erhöhte absolute Luftfeuchtigkeit auf der Südseite auf Trocknungsvorgänge in den umliegenden Materialien (Ziegel, Sparren etc.) zurückzuführen sind.

Einfluss Oberfläche und Material:

Die Temperatur in der HLE zeigt eine starke Abhängigkeit vom Material und der Farbe der zugrundeliegenden Dacheindeckungen. Je dunkler die Farbe der Dacheindeckung ist, desto höher liegt der jeweilige solare Absorptionskoeffizient der Materialoberfläche. Diese absorbiert einen größeren Teil der Einstrahlung, wodurch die Oberflächentemperatur zunimmt. In Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten, der Dicke und der spezifischen Wärmekapazität der Eindeckung wird die entstandene Wärme in den Bereich der HLE eingeleitet. Dunkle Eindeckungen mit hohem solarem Absorptionspotential zeigen deshalb bei den Messungen im Vergleich zu den helleren Eindeckungen deutlich höhere Durchschnitts- und Maximaltemperaturen. Die dunklen Metalleindeckungen sind vergleichsweise dünn und besitzen ein hohes Absorptionspotential bei gleichzeitig hoher Wärmeleitfähigkeit. Sie heizen sich deshalb in Folge solarer Einstrahlung sehr schnell auf und leiten die entstandene Wärme in kürzester Zeit in den darunterliegenden Hinterlüftungsbereich ein. Durch die für Metalle typische, geringe Wärmekapazität/Wärmespeicherung kühlt das Material beim Wegfall der Sonneneinstrahlung im Anschluss wieder sehr schnell ab. Die Temperaturen in der HLE unter den

dunklen Metalleindeckungen zeigen im Tagesverlauf deshalb Fluktuationen, die im Vergleich zu den Ziegel- und Betoneindeckungen deutlich stärker ausfallen. Auch der Verlauf des nächtlichen Temperaturabfalls zeigt sich bei den dunklen Metallen sehr abrupt. Bei den Faserzementeindeckungen verhält es sich ähnlich wie bei den Metalleindeckungen. Die beobachteten Maximaltemperaturen im Tagesverlauf fallen jedoch etwas geringer aus. Dies ist vermutlich auf die etwas höhere Wärmekapazität und die geringere Wärmeleitfähigkeit von Faserzement-Materialien zurückzuführen. Die Temperaturen unter den Ziegel- und Betoneindeckungen sind auf einem ähnlichen Niveau. Die gemessenen Mittel- und Maximalwerte liegen dabei niedriger als bei den farbigen Metall- und Faserzementeindeckungen. Die Temperaturschwankungen im Tagesverlauf fallen ebenfalls deutlich geringer aus. Ziegel und Beton besitzen eine Porenstruktur, in der Luft und Wasser eingelagert ist. Die spezifische Wärmekapazität dieser Dacheindeckungen ist höher als bei den Metalleindeckungen. Zum Aufheizen des Materials ist in weiterer Folge mehr Strahlungsenergie notwendig. Aufgrund der größeren Dicke in Kombination mit einer im Vergleich zu Metall deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit benötigt die durch Strahlung erzeugte Oberflächenwärme deutlich länger, um durch das Material hindurch in die HLE eingeleitet zu werden. Die geringsten Maximaltemperaturen zeigen sich unter den naturblanken Metalleindeckungen. Poliertes Aluminium hat naturgemäß einen äußerst geringen Strahlungsabsorptionsgrad. Die Oberfläche reflektiert einen Großteil der einfallenden Strahlung und heizt sich dementsprechend nur wenig auf. Gleichzeitig zeigt sich eine stark verringerte nächtliche Abkühlung im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Eindeckungen, die wiederum auf den geringeren Emissionsgrad von poliertem Aluminium zurückzuführen ist.

Auch die Entwicklung der Luftfeuchtigkeit in der HLE zeigt sich abhängig von Material und Farbe der verwendeten Dacheindeckung. Die zugrundeliegenden Ergebnisse zeigen, dass relative Luftfeuchten von über 80 % im vorliegenden Messzeitraum bei den roten Dacheindeckungen am häufigsten bei den Ziegeleindeckungen beobachtet werden konnten. Unter der Betoneindeckungen mit vergleichbarer Oberflächenfarbe war dieser Zeitraum deutlich kürzer. Beide verfügen über eine Porenstruktur, die es diesen Materialien in ähnlicher Weise ermöglicht, Feuchtigkeit aus der Luft zu absorbieren bzw. an die Luft abzugeben. Porenbeton hat im Vergleich zu gebranntem Ton jedoch eine höhere Sorptionsfähigkeit. Bei 23 °C und 80% Luftfeuchtigkeit liegt die Ausgleichsfeuchte von Porenbeton bei etwa 0,045 kg/kg und bei gebranntem Ton bei nur 0,01 kg/kg [21]. Die Betonziegel wirken also verstärkt feuchtepuffernd. Der entsprechende Zeitraum für die Metalleindeckungen (vergleichbare Farbe/rotbraun) liegt von der Dauer her zwischen Beton und Ziegel. Hier dürfte der Grund dafür bei den hohen Temperaturen unter den farbigen Metalleindeckungen liegen, welche tagsüber eine verstärkte Rücktrocknung und eine damit einhergehende Feuchteaufnahme aus der umgebenden Holzkonstruktion ermöglichen. Bei Abkühlung bleibt diese Feuchtigkeit zunächst in der Luft vorhanden und bewirkt erhöhte relative Luftfeuchten bei den tieferen Temperaturen. Die kürzeste Periode mit rel. LF > 80% zeigt sich bei den naturblanken Metallen. Durch das geringe solare Absorptionspotential von Aluminium bleiben die Temperaturen innerhalb der HLE auf einem vergleichsweise geringen Niveau. Das Trocknungspotential der Baustoffe in der HLE und somit die Abgabe von Feuchtigkeit aus der Dachkonstruktion an die Luft ist hier also sehr gering. Die absolute und relative Luftfeuchtigkeit bleibt auf einem tieferen Niveau.

Einfluss Firstausbildung/Firstöffnungsquerschnitt:

Die zugrundeliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei Einhaltung eines Mindestöffnungsquerschnitts (in diesem Fall je nach Eindeckungsart 170 cm²/m, 200 cm²/m und 250 cm²/m) die Art der Firstausbildung bzw. eine weitere Vergrößerung des Firstöffnungsquerschnitts keinen deutlich erkennbaren Einfluss auf das Klima in der HLE hat. Der Effekt der Dachausrichtung und der gewählten Dacheindeckung überwiegt weitgehend.

Einfluss Länge der Hinterlüftungsebene:

Neben den oben genannten Faktoren zeigt sich eine Abhängigkeit der gemessenen jahreszeitlichen Durchschnittstemperatur vom Abstand der Messposition zur Traufe bzw. Zuluftöffnung. Die geringsten mittleren Temperaturen zeigen sich sowohl im Sommer als auch im Winter im Bereich nahe der Zuluftöffnung. Die durch Strahlung erwärmte Dacheindeckung gibt die Wärme an die darunter durchströmende Luft ab, wodurch diese sich während der Durchströmung erwärmt. Bei sommerlichen Verhältnissen ist die Temperaturdifferenz zwischen der einströmenden Luft und der Unterseite der Dacheindeckung in Traufennähe verhältnismäßig größer als in den firstnahen Bereichen, wo sich die Lufttemperatur während der Durchströmung der HLE in Richtung First immer weiter an die Eindeckungstemperatur angenähert hat. Die relative Erwärmung der Luft nimmt dementsprechend Richtung First immer weiter ab. Dadurch lässt sich die beobachtete Abnahme der relativen Lufterwärmung ab ca. 2/3 Sparrenlänge erklären. Unter winterlichen Verhältnissen konnte beobachtet werden, dass die durchschnittliche Temperatur in der südlichen HLE ab 2/3 Sparrenlänge in einigen Fällen wieder abnahm. Für diesen Effekt sind vermutlich konvektive Durchmischungsvorgänge der erwärmten Luft in der HLE mit der deutlich kühleren Umgebungsluft verantwortlich.

4.3.3.1.2 Oberflächentemperaturen der Dacheindeckung und Unterdachbahn

Die zugrundeliegenden Messergebnisse der Oberflächentemperaturen an den Dacheindeckungen und der Unterdachbahn spiegeln qualitativ die Erkenntnisse wider, die bereits in Bezug auf die Lufttemperaturen in der HLE gemacht worden sind und zeigen die gleiche Abhängigkeit von den Faktoren Ausrichtung, Material und Oberflächenfarbe/-beschaffenheit.

4.3.3.1.3 Kondensatbildungspotential

Die Ergebnisse zum berechneten Kondensatbildungspotential an der Unterdachbahn lassen darauf schließen, dass die Gefahr für Feuchteschäden an der Unterdachbahn aufgrund von Kondenswasser auf der nördlich ausgerichteten Dachseite deutlich höher ist als auf der gegenüberliegenden Seite. Vor allem bei den dunkleren Dacheindeckungen lässt sich ein erhöhtes Kondensatbildungspotential erkennen. Dabei ist die Gefahr unterhalb der schwarzen Ziegeleindeckung am größten. Wie bereits oben beschrieben, heizt sich die Luft in der HLE südseitig in Folge hoher Solarstrahlung stark auf. Durch eine dunkle Oberflächenfarbe wird dieser Prozess weiter verstärkt. Die daraus resultierenden Trocknungseffekte am umliegenden Material der HLE erhöhen die absolute Luftfeuchtigkeit im Bereich der südlichen HLE. Gerade im Winter kommt es dadurch zu großen Temperatur- und Feuchtegradienten

zwischen nördlicher und südlicher HLE. Infolge der Luftströmung wird die feuchte, warme Luft von der Südseite in die kalte Nordseite eingeleitet, wo die geringe Oberflächentemperatur der dortigen Unterdachbahn ein Auskondensieren der warmen, feuchten Luft begünstigt. Dieser Effekt wird auch in [22] beschrieben. Im Artikel wird außerdem angemerkt, dass das anfallende Kondensat an der Oberseite der Unterdachbahn rücktrocknen kann, ohne dabei einen Schaden zu verursachen. Problematisch sei es jedoch, wenn die feuchte, warme Luft an die Unterseite der Unterdachbahn gelangt (z.B. durch Unterlüftung der Unterdachbahn, Überlappungen der Dachbahn). Dadurch bestehe die Gefahr einer schadhafte Auffeuchtung der Sparren. Das gleiche gilt bei schadhafte Unterdachsystemen, bei denen entweder die feuchte, warme Luft durch die Schadhafte an die Unterseite der Unterdachbahn gelangen kann oder das an der Oberseite anfallende Kondensat als Wasser unter die Unterdachbahn rinnt. Je nach Durchfeuchtungsmenge kann es zu einer schadhafte Auffeuchtung der Sparren kommen.

Beim Kondensatbildungspotential an der Unterseite der Dacheindeckungen verhält es sich verhältnismäßig ähnlich wie bei der Unterdachbahn, wobei jedoch die Absolutwerte der Kondensatmenge und Kondensationszeit höher liegen. Das Kondensatbildungspotential ist auf der Nordseite deutlich höher als auf der Südseite und vor allem bei den dunkleren Eindeckungen erhöht. Anders als auf der Unterdachbahn kommt es an der Unterseite der Dacheindeckungen nordseitig zum Teil auch im Frühjahr und Sommer zu Kondensatausfall. Auf der Nordseite ist das Kondensatbildungspotential an der Dacheindeckung im Vergleich zu den Beobachtungen an der Unterdachbahn deutlich größer. Eine nähere zeitliche Betrachtung der Phasen, in denen die Temperatur an der Dacheindeckung unterhalb des Taupunktes der Luft in der HLE lag, hat gezeigt, dass die Kondensationsphasen vor allem nachts und am frühen Morgen stattfanden. Es ist deshalb davon auszugehen, dass das erhöhte Kondensatbildungspotential vor allem durch die nächtliche Unterkühlung der Dachfläche hervorgerufen wird. Die in der vorliegenden Untersuchung festgestellten Kondensationsmengen können bei normgerechtem Lüftungquerschnitt der HLE und einem funktionierenden Unterdachsystem problemlos rücktrocknen.

4.3.3.1.4 *Strömungsgeschwindigkeit – Wind und Thermischer Auftrieb*

Satteldach (Forschungshaus Stetten):

Die zugrundeliegenden Ergebnisse zu den Untersuchungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Freilandversuch haben gezeigt, dass der Beitrag des thermischen Auftriebs zur Luftbewegung in der HLE im Verhältnis zum entsprechenden Beitrag der Windverhältnisse vermutlich um ein Vielfaches geringer ausfällt. Bei Betrachtung der effektiven Windgeschwindigkeit (= Windgeschwindigkeit rechnerisch normiert auf senkrechtem Geschwindigkeitsanteil zum First/Traufe) ergibt sich eine deutliche Korrelation mit der Strömungsgeschwindigkeit in der HLE. Je nach Wind-Angriffsrichtung (Luv- oder Leeseitig) ergibt sich bei Sogwirkung des Windes eine Strömungsgeschwindigkeit in der HLE von etwa 1/10 und bei Druckwirkung des Windes von etwa 1/6 der effektiven Windgeschwindigkeit. Der Unterschied zwischen Sog- und Druckwirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit wird u.a. durch den thermischen Auftrieb bedingt. Dieser unterstützt bei druckseitigen (Luv) Winden die Luftbewegung

Richtung First und wirkt dieser bei sogseitigen Winden (Lee) entgegen. Es ist anzumerken, dass die verschiedenen Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit sich im Freilandversuch stark überlagern und sich zum Teil gegenseitig beeinflussen. Eine eindeutige Identifizierung von thermisch initiiert und windinitiiert Luftbewegung in der HLE ist deshalb nicht möglich. Dennoch ist die Korrelation zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit deutlich zu erkennen. An Tagen mit durchgehend geringen Windgeschwindigkeiten $< 2 \text{ m/s}$ lässt sich auch eine gute Korrelation der Strömungsgeschwindigkeit in der HLE mit der Temperaturdifferenz zwischen HLE- und Außentemperatur feststellen. Allerdings lassen die hier zugrundeliegenden Untersuchungen vermuten, dass die Strömungsgeschwindigkeit durch thermischen Auftrieb nicht direkt proportional zur Temperaturdifferenz ist, sondern mit steigender Temperaturdifferenz immer weniger stark zunimmt. Zwischen 10° C und 20° C Temperaturdifferenz konnte im Freilandversuch an einem windberuhigten Tag lediglich ein Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit von ca. $0,4 \text{ m/s}$ auf ca. $0,5 \text{ m/s}$ beobachtet werden. An einem Tag mit ähnlichen klimatischen Verhältnissen in der HLE aber deutlich höherer Windgeschwindigkeiten im Außenbereich zeigte sich, dass die windinitiierte Luftbewegung in der HLE die Effekte des thermischen Auftriebs stark überlagert. Der Effekt des thermischen Auftriebs scheint bei etwas höherem Windaufkommen bereits vernachlässigbar gering zu sein.

Betrachtet man die Entwicklung der absoluten Luftfeuchtigkeit in der HLE im Hinblick auf eine mögliche Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit in der HLE, so zeigt sich zunächst, dass diese tagsüber trotz stattfindendem Luftaustausch zunimmt (Trocknungsfeuchte). Es lässt sich vermuten, dass diese bei Ausbleiben des Luftaustausches noch stärker zunehmen würde. Eindeutig lässt sich dies anhand der vorliegenden Ergebnisse jedoch nicht sagen. Jedenfalls ist zu hinterfragen, welcher Effekt zielführender ist. Zum einen bewirkt der thermische Auftrieb einen Luftaustausch und damit einhergehend eine Feuchteabfuhr aus der HLE. Je stärker sich die Luft in der HLE erwärmt, desto größer ist dieser Effekt (steigende Temperaturdifferenz). Zum anderen zeigen die Ergebnisse, dass erhöhte Temperaturen zu einem deutlich erhöhten absoluten Feuchtegehalt der Luft (in g/m^3) führt. Während der abendlichen Abkühlung kommt es dadurch vermehrt zu relativen Luftfeuchtigkeiten zwischen 80% und 100% . Die starken Tagesschwankungen der relativen Luftfeuchte (z.T. zwischen 15% und 90% rel.LF) verursachen zudem große Dimensionsschwankungen der Lattungen, welche sich auf Dauer negativ auf die Dichtheit des Unterdachsystems auswirken könnten. Es liegt also eine Überlagerung zwischen positivem und negativem Effekt vor. Die hier vorliegenden Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass bei der Konstruktionsplanung eher auf Ausführungsvarianten gesetzt werden sollte, die das Aufheizen der HLE auf ein Minimum reduzieren, da dadurch der tägliche Anstieg der absoluten Luftfeuchtigkeit durch Trocknungseffekte ebenfalls minimiert werden kann. Eine ausreichende windinduzierte Strömung in der Hinterlüftungsebene muss dabei sichergestellt sein.

Flachgeneigte Dächer (Versuchsdächer Groß-Enzersdorf):

Bei der Firstausführung B wurden die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten in jenen Zeiträumen gemessen, in denen sogseitiger Wind vorlag. Abb. 97 zeigt einen Erklärungsansatz, der die vorliegenden Windverhältnisse und die dadurch initiierte Strömung in der HLE beschreibt. Bei den hier vorliegenden Windverhältnissen weht der Wind über die Labyrinthöffnung der HLE. Die Öffnung der HLE ist nach hinten – also Richtung Traufe – gerichtet. Auf die Öffnung wirkt in diesem Fall eine Sogwirkung, die die Strömung in der HLE begünstigt und zu den weiter oben beschriebenen Beobachtungen führt. Bei Windverhältnissen in diese Richtung bewirkt diese Firstausführung deutlich höhere Luftströmungen in der HLE als bei Firstausführung A. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Sogwirkung an der Traufe, welche theoretisch der hier beschriebenen Strömungsrichtung entgegen wirken würde, verhältnismäßig gering sein muss.

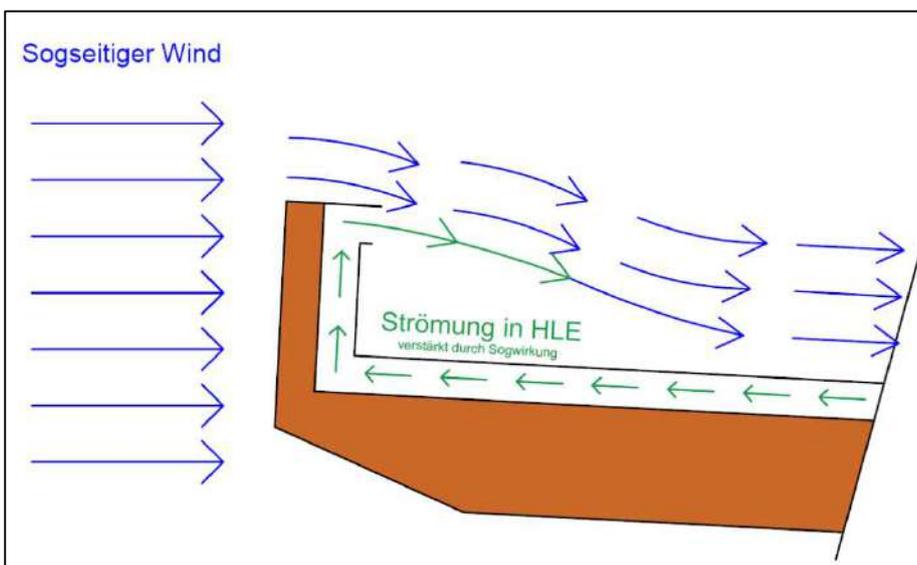


Abb. 97: Strömungsverhältnisse bei sogseitigem Wind (First B)

Bei druckseitigem Wind wurden bei Firstausführung B deutlich geringere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen als bei der Firstausführung A. In Abb. 98 ist ein Erklärungsansatz für diese Beobachtung dargestellt. Demnach wird die Luftströmung in der HLE in diesem Fall durch den traufseitigen Winddruck initiiert. Gleichzeitig wirkt dieser Druck der Strömung an der Firstöffnung entgegen. Die Luftbewegung wird dadurch stark abgeschwächt.

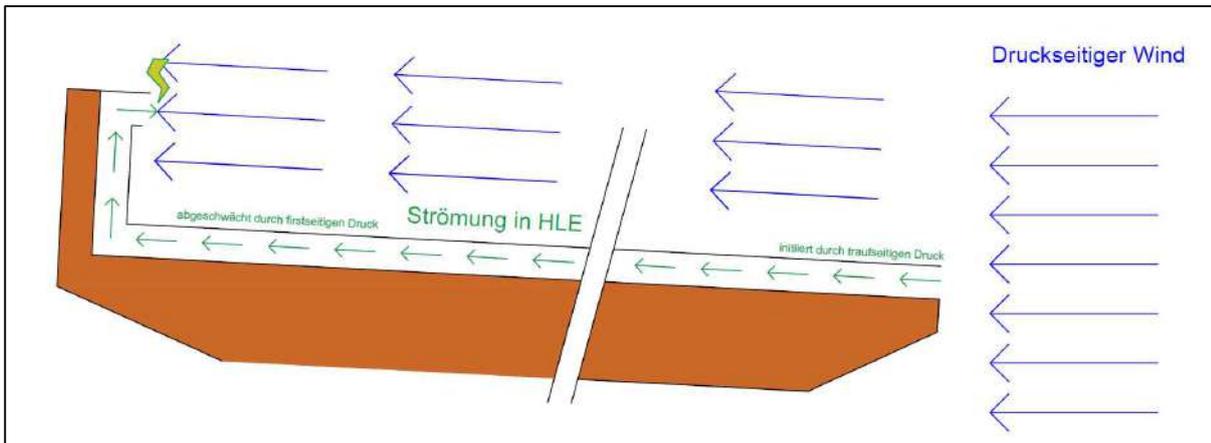


Abb. 98: Strömungsverhältnisse bei druckseitigem Wind (First B)

Firstausführung A zeigte die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bei traufseitig, druckseitigen Windverhältnissen. Diese betragen bis zu 1/5 der gemessenen Windgeschwindigkeit bei 0° Angriffswinkel. Dieses Verhältnis zwischen Windgeschwindigkeit (bei 0° Anströmungswinkel) und Strömungsgeschwindigkeit wurde auch in [23] in einer vergleichbaren Messreihe festgestellt. In Abb. 99 ist diese Situation dargestellt. Der traufseitige Winddruck initiiert in diesem Fall die Luftströmung in der HLE. Da die Öffnung am First nicht nach hinten gerichtet ist, wirkt hier – anders als bei Firstausführung B – der Strömung kein Winddruck entgegen. Da die Firstöffnung nach unten gerichtet ist, ist hier von keiner großen Sogwirkung auszugehen.

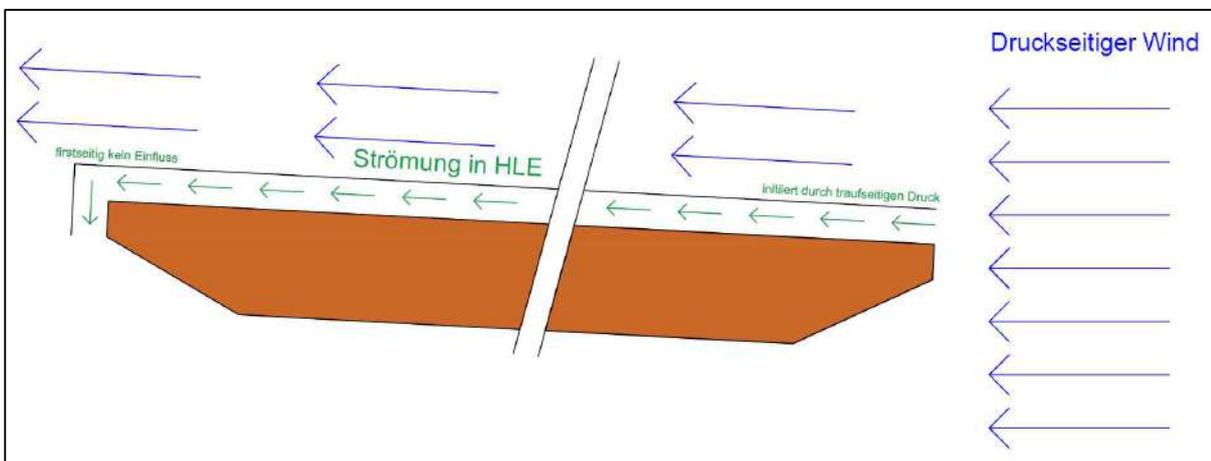


Abb. 99: Strömungsverhältnisse bei druckseitigem Wind (First A)

Bei Firstausführung A betrug die Strömungsgeschwindigkeit in der HLE bei sogseitigem Wind in etwa 1/10 der effektiven Windgeschwindigkeit (in m/s). Abb. 100 zeigt die Strömungsverhältnisse bei vorliegendem traufseitig, sogseitigem Wind auf First A. Beim Auftreffen auf die Fassade des Versuchsdaches wird der Wind in alle Richtungen abgelenkt. Dadurch erzeugen vertikal nach oben abgelenkte Strömungen einen Druck auf die firstseitige Öffnung der HLE. Die Luftbewegung in der HLE

wird so initiiert. Die über das Dach ziehende Strömung erzeugt traufseitig zusätzlich eine Sogwirkung auf die hier liegende HLE Öffnung, wodurch die Strömung weiter verstärkt wird.

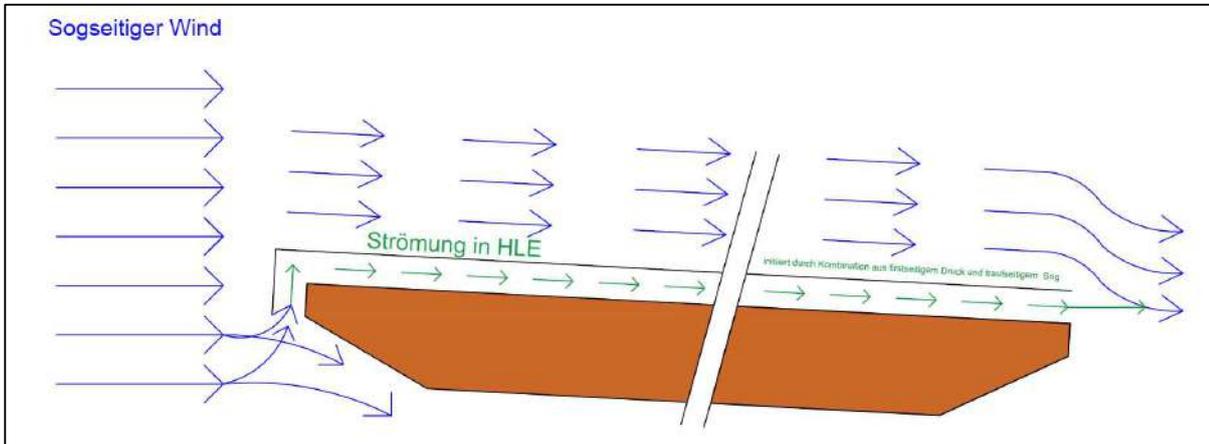


Abb. 100: Strömungsverhältnisse bei sogseitigem Wind (First A)

Die Ergebnisse zu den klimatischen Verhältnissen an den zugrundeliegenden Messstellen in den HLE zeigen auf, dass auch bei Luftströmungsgeschwindigkeiten bis 1,5 m/s die Temperatur in der Hinterlüftungsebene tagsüber auf einem deutlich höheren Niveau ist, als im Außenbereich. Im direkten, zeitgleichen Vergleich zeigen sich für die Temperaturentwicklung keine größeren Unterschiede zwischen weniger belüfteten Bahnen mit Fensterunterbrechung und stärker belüfteten Bahnen ohne Fensterunterbrechung. Dies lässt den Schluss zu, dass ab einer bestimmten Mindestbelüftung der Luftaustausch groß genug ist, um einem verhältnismäßig starken aufheizen der HLE entgegenzuwirken.

Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten in der HLE liegen die Werte der absoluten Luftfeuchtigkeit nahe bei jenen des Außenklimas. Durch die nachströmende Luft wird die Absorption bzw. Desorption der umliegenden feuchtehaltigen Materialien kompensiert (im Folgenden: Feuchtigkeitskompensation). Fällt der Luftaustausch weg, wird – je nach klimatischen Verhältnissen in der HLE – entweder Feuchtigkeit aus der Luft von den umliegenden Materialien absorbiert, wodurch die absolute Luftfeuchtigkeit sinkt, oder desorbiert (an die Luft abgegeben), wodurch die absolute Luftfeuchte im Hinterlüftungsbereich steigt. Die HLE-Bahnen mit First A zeigen eine gute Feuchtigkeitskompensation bereits bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Bahnen mit Firstausführung B weisen starke Schwankungen der Feuchtedifferenz zum Außenklima auf. Das lässt den Schluss zu, dass die Luft trotz gemessener Luftströmung in der HLE offenbar nicht über die gesamte Länge der HLE effektiv bewegt und ausgetauscht wird (z.B. durch Luftleckagen vor der zugrundeliegenden Messstelle). Erst bei besonders hohen Strömungsgeschwindigkeiten nähert sich die Luftfeuchtigkeit in der HLE der Außenluftfeuchte an. Unter Betrachtung der hier vorliegenden Gesamtergebnisse kann man davon ausgehen, dass die konstante negative Feuchtedifferenz (-4 g/m^3) bei den Messungen in der durchgehenden HLE-Bahn mit Firstausführung A am windgeschützten Dach auf einen Sensordrift zurückzuführen ist.

4.3.3.2 Klimaprognosemodell

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein empirisches statistisches Modell zur Abschätzung der klimatischen Bedingungen innerhalb der HLE von Satteldächern entwickelt. Die Daten für die Modellentwicklung umfassten Messdaten eines Jahres. Die Ergebnisse zeigen, dass Außentemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und globale Strahlung als Eingangsparameter ausreichen, um eine realistische Klimaentwicklung innerhalb der HLE zu berechnen. Das auf Basis des Modells berechnete Klima beschrieb das gemessene Klima nahezu das ganze Jahr über hinreichend genau. Die Werte von Globalstrahlung, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit sind für zahlreiche Klimastationen leicht zugänglich und die zugrundeliegenden Gleichungen einfach anzuwenden. Die praktische Anwendbarkeit des entwickelten Modells kann dadurch höher sein als das eher komplexe Modell nach [3]. Im Gegensatz zu [19] konzentriert sich dieses Modell auf das Klima (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit) innerhalb der HLE. [19] berechnet die Oberflächentemperatur der Dachunterlage über Anpassung der Strahlungsparameter im Simulationsprogramm direkt. Die Klimabedingungen innerhalb der Lüftungsschicht bleiben unbekannt. Das hier entwickelte Modell ermöglicht auch die Berücksichtigung zusätzlicher Dacheindeckungen. Während sich das Modell nach [19] auf Ziegel- und Betonbeläge fokussiert, lassen sich anhand des hier entwickelten Modells auch die klimatischen Bedingungen unter Metall- und Faserzementeindeckungen verschiedener Farben abschätzen. Erste Validierungsversuche des Modells durch Übertragung auf andere Bauwerke zeigen bereits vielversprechende Ergebnisse. In weiterer Folge sind die entwickelten Modelle jedoch noch anhand verschiedener Gebäude zu validieren, die sich in Standort, Dachausrichtungen, Hinterlüftungsquerschnitt und Dachgefälle von dem hier untersuchten Objekt unterscheiden. Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit des Modells ist eine funktionierende Feuchteabfuhr aus der HLE (d. H. keine Schnee- oder Schmutzbarrieren an Öffnungen, Mindestquerschnitte sind eingehalten etc.). Im Sommer werden die berechnete Temperatur und Luftfeuchtigkeit über einen längeren Zeitraum leicht unterschätzt. Bei Anwendung des Modells zur hygrothermischen Simulation wird dementsprechend auch die Rücktrocknung der Dachkonstruktionen im Sommer unterschätzt. Dies gibt eine zusätzliche Bemessungssicherheit bei der Beurteilung der hygrothermischen Funktionssicherheit des betrachteten Daches. Aufgrund der notwendigen Dateninterpolation in dieser Arbeit hat die Implementierung von Windparametern in das Modell die Genauigkeit der Berechnungen nicht erhöht. Frühere Arbeiten ([24], [25]) fanden einen Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung auf das Klima in HLEs. Eventuell sind einige Ungenauigkeiten der vorliegenden Modelle durch den fehlenden Windeinfluss zu erklären. Um das Modell mit entsprechenden Windparametern erweitern zu können, sind weitere Freilandversuche mit hoher zeitlicher Klimadatenauflösung notwendig, da Windgeschwindigkeit und -richtung zeitlich stark fluktuierende Parameter sind. Bei der hygrothermischen Simulation wird normalerweise mit stündlichen Mittelwerten des Außenklimas gerechnet, von daher bleibt zu evaluieren, welchen praktischen Nutzen eine fein aufgelöste Messung mit sich bringt [26].

5 Literatur

- [1] *Teibinger, M.; Schober, P.; Wolffhardt, R. et al.*: Regensichere Ausführung von Unterdachkonstruktionen. Endbericht. Holzforschung Austria, Wien Ausgabe März 2003.
- [2] ÖNORM EN 13859-1: Abdichtungsbahnen - Definitionen und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen - Teil 1: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen. Ausgabe Dezember 2014.
- [3] *Liersch, K.W.*: Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen Band 3 – Dächer. Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutz. Bauverl., Wiesbaden, 1986.
- [4] ÖNORM B 4119: Planung und Ausführung von Unterdächern und Unterspannungen. Ausgabe 2018.
- [5] 3647: Prüfung der Nageldichtheit von Unterdeckbahnen. ÖNORM B, Ausgabe 2005.
- [6] Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks - Fachverband Dach- Wand- und Abdichtungstechnik - e.V.: Deutsches Dachdeckerhandwerk – Regelwerk – Produktdatenblatt für Unterspannbahnen, 2010.
- [7] Holzforschung Austria: Regensicherheitsprüfung – Prüfkörper und Ablauf, Informationsblatt, 2012.
- [8] TU Berlin - Fachgebiet Bauphysik und Baukonstruktionen: Schlagregentest Unterspann- und Unterdeckbahnen, 2008.
- [9] *Kölsch, P.; Wagner, R.*: Auf die Probe gestellt – Steildach. In: DDH - Das Dachdecker Handwerk 136 (2015), Heft 10, S. 16-21.
- [10] 12155: Vorhangfassaden – Schlagregendichtheit – Laborprüfung unter Aufbringung von statischem Druck. DIN, Ausgabe 2010.
- [11] *Langner, N.*: Kurzzeitversuche zur baupraktischen Einstufung des Langzeitverhaltens diffusionsoffener Polymerfolien für Dachkonstruktionen. Cottbus, Technischen Universität Cottbus, Dissertation, 2005.
- [12] *Oswald, R.; Sous, S.; Zöller, M.*: Dauerhaftigkeit von diffusionsoffenen Unterspann- und Unterdeckbahnen unter Eindeckungen. Aachener Institut für Bauschadensforschung und Angewandte Bauphysik, Stuttgart.
- [13] Deutscher Wetterdienst GF Hydrometeorologie: Starkregenstatistik für Mittenwald. Deutscher Wetterdienst GF Hydrometeorologie, Offenbach Ausgabe 2001.
- [14] *Cziesielski, E.; Maerker, B.*: Methode zur Erzeugung eines Schlagregens für die Bauteilprüfung. Institut für Baukonstruktionen und Festigkeit, Berlin Ausgabe Juni 1981.
- [15] 6-8: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation. WTA-MERKBLATT, Ausgabe 2016.
- [16] *Künzel, H.*: Dachdeckung und Dachbelüftung – Untersuchungsergebnisse und Folgerungen für die Praxis. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 1996.
- [17] *Teibinger, M.; Nusser, B.*: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen, Wien Ausgabe 2010.

- [18] *Nusser, B.; Teibinger, M.*: Experimental investigations about the air flow in the ventilation layer of low pitched roofs. *In: CESBP – 2 nd CENTRAL EUROPEAN SYMPOSIUM ON BUILDING PHYSICS*, Vienna, 2013, S. 1-8.
- [19] *Kölsch, P.*: Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2015, <https://wufi.de/de/literatur/>.
- [20] Johannes Amos: Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene von Dächern – Abgleich von Labormessdaten mit Berechnungsergebnissen. Rosenheim, Technische Hochschule Rosenheim, Bachelor Thesis, 2020.
- [21] *Zürcher, C.; Frank, T. (Hrsg.)*: Bau und Energie – Leitfaden für Planung und Praxis. Verl. der Fachvereine, Zürich, 1993.
- [22] *Künzel, H.; Großkinsky, T.*: Nicht belüftet, voll gedämmt – Die beste Lösung für das Satteldach. Wissenschaftlich gesicherte Untersuchungen lassen an der bisherigen Belüftungsphilosophie zweifeln. *In: bauen mit holz* (1990), Heft 6, S. 442-448.
- [23] *Leitner, S.; Aichinger, G.; Fürpaß, B. et al.*: Das hinterlüftete Flachdach. Strömungsverhalten: Versuch, Messung und Simulation, Linz Ausgabe 2018.
- [24] *Gullbrekken, L.; Kvande, T.; Time, B.*: Ventilated wooden roofs: Influence of local weather conditions - measurements. *In: Energy Procedia* · October 2017, S. 777-782.
- [25] *Bunkholt, N.S.; Gullbrekken, L.; Kvande, T.*: Influence of local weather conditions on ventilation of a pitched wooden roof. *In: Journal of Civil Engineering and Architecture* (2020), Heft 14, S. 37-45.
- [26] *Tieben, J.; Bachinger, J.; Nusser, B.*: Development of a statistical model to assess the climate conditions in the ventilation layer of double pitched roofs. *In: : 12th Nordic Symposium on Building Physics*, Tallinn, 2020.

Anhang A

Vorversuche zur Oberflächentemperatur unterschiedlicher Dacheindeckungen (Material und Farbe)



Abbildung B1: Oberflächentemperaturmessungen im Freiland an verschiedenfarbigen Dacheindeckungen aus unterschiedlichen Materialien



Abbildung B3: Oberflächentemperaturmessung mit angeklebtem NTC-Fühler

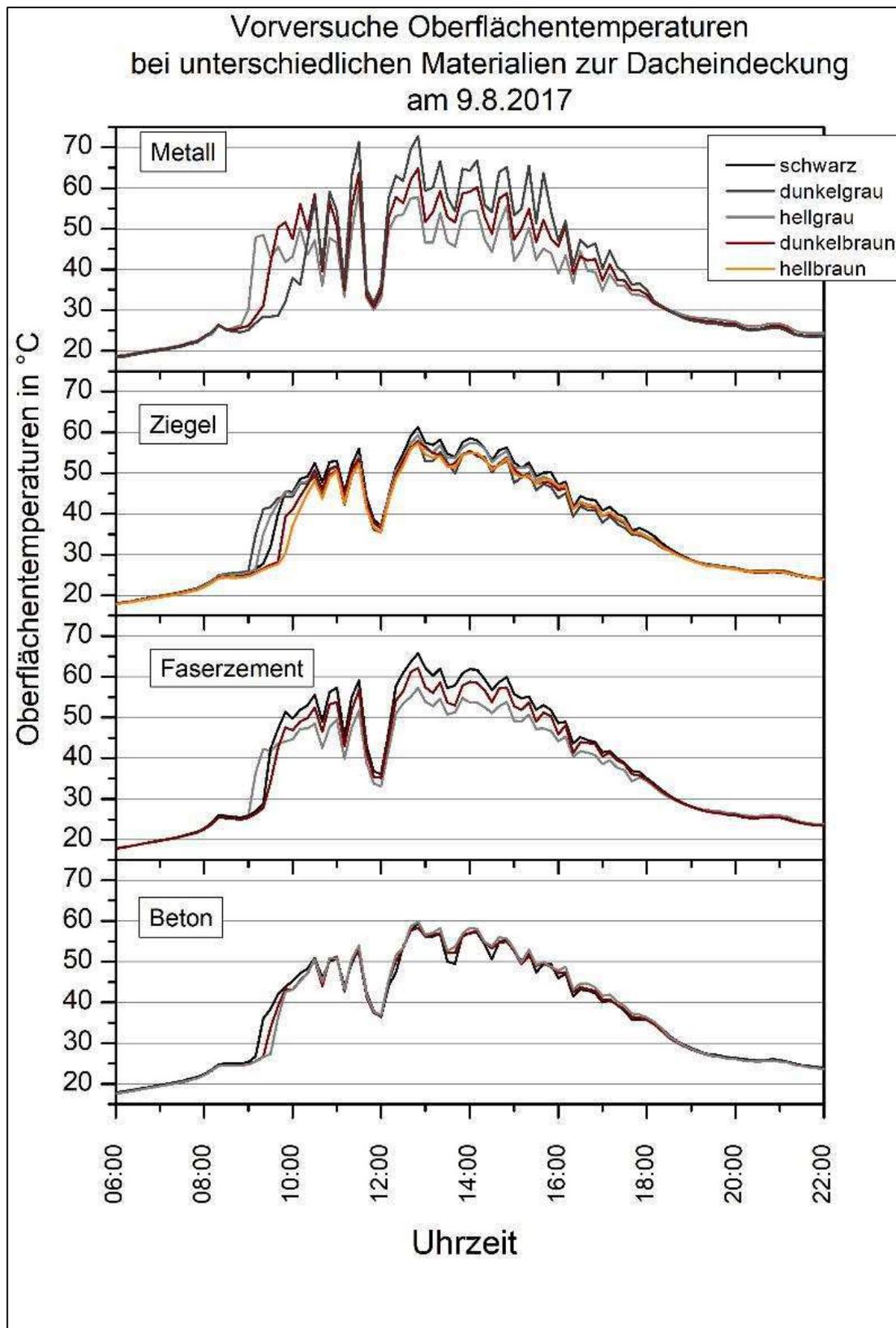


Abbildung B3: Tagesverlauf der Oberflächentemperatur an einem sonnigen Tag. Vergleich verschiedener Farben beim gleichen Material.

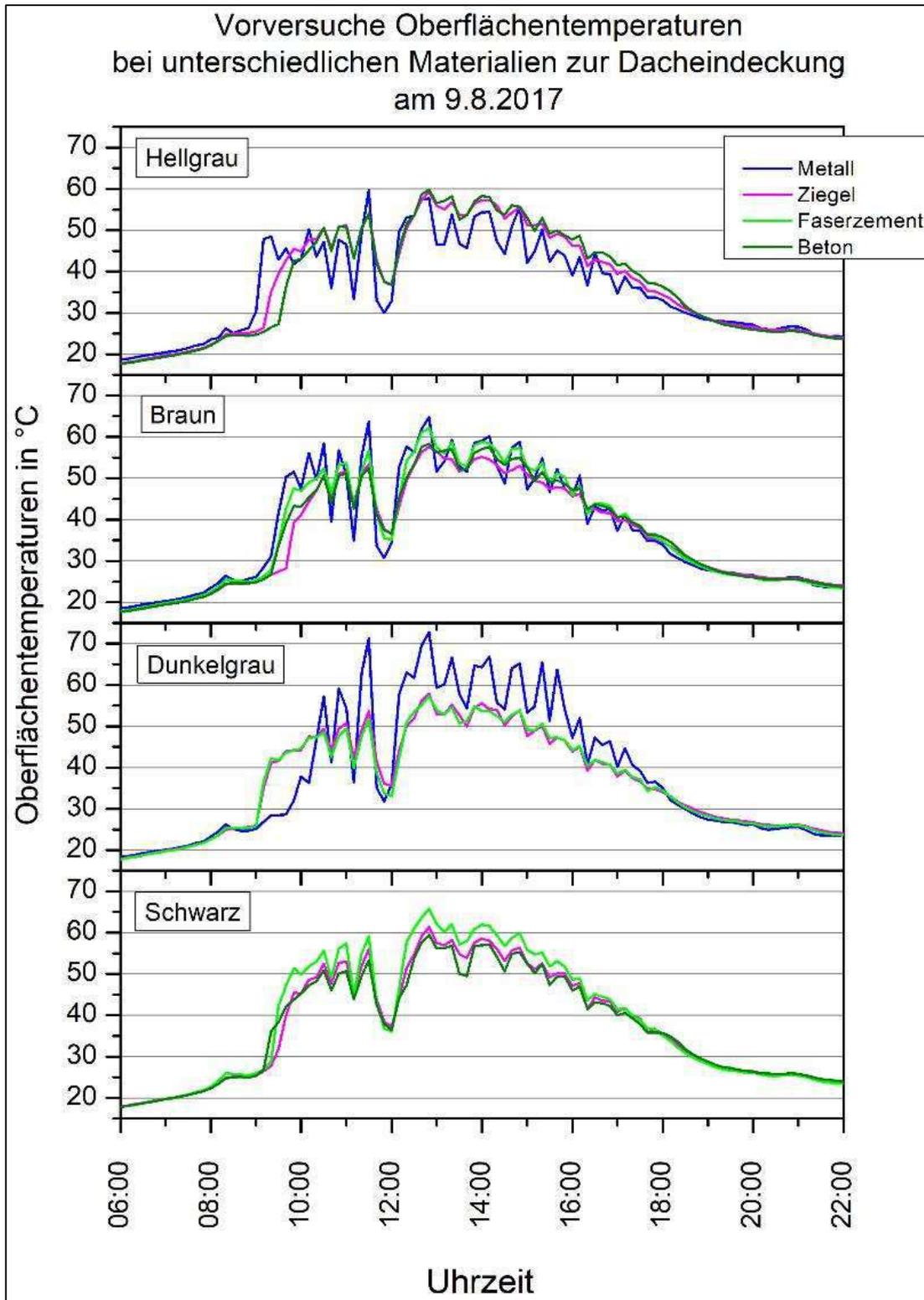


Abbildung B4: Tagesverlauf der Oberflächentemperatur an einem sonnigen Tag. Vergleich verschiedener Materialien bei vergleichbarer Farbe.

Anhang B

Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene von Dächern – Abgleich von Labormessdaten mit Berechnungsergebnissen, Bachelorarbeit, Johannes Amos



Fakultät für Holz, Energie & Bau

Studiengang Holzbau und Ausbau

Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene
von Dächern –
Abgleich von Labormessdaten mit
Berechnungsergebnissen

Bachelor Thesis

von

Johannes Amos

Datum der Abgabe: 23.03.2020

Erstprüfer: Prof. Dr. Claudia Schäfle

Zweitprüfer: Prof. Dr. Gerhard Friedsam

ERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Rosenheim, den 23. März 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of the initials 'J. A.' followed by a stylized flourish.

Johannes Amos

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem thermischen Auftrieb im Belüftungsraum unbelüfteter Steildächer mit belüfteter Dachdeckung.

Hierfür errichtete die Holzforschung Austria zwei Versuchsaufbauten eines Dachsegments in verschiedenen Längen, welche in diesem Bezug untersucht wurden. In den Dachaufbauten wurde an mehreren Stellen die Temperatur und am Dachauslass die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt.

Die so gewonnenen Daten werden ausgewertet und die verschiedenen Konfigurationen miteinander verglichen.

So kann geklärt werden, wie stark sich die Einflüsse Dachdeckung, Dachneigung, Belüftungsquerschnitt und Einschnürungen auf die Strömungsgeschwindigkeit auswirken.

Ebenfalls findet ein Abgleich der Daten mit den strömungsmechanischen Vorhersagen von K. Liersch statt. Für diesen Zweck wurde ein Rechenmodell in Matlab erstellt, welches durch Eingabe der relevanten geometrischen- und Temperaturparameter die Strömungsgeschwindigkeit im Belüftungsraum vorhersagt.

Auch werden die thermischen Vorgänge im Dach untersucht. Es zeigt sich jedoch, dass der Versuchsaufbau nicht geeignet ist, die Vorhersagen des von Prof. Dr. G. Friedsam erstellten Modells zu validieren. Daher sind nur qualitative Aussagen über die thermischen Vorgänge möglich.

This thesis studies thermal buoyancy in the ventilation layer of pitched roofs.

Two experimental roof models were built at the Holzforschung Austria, to examine the airflow in the ventilation layer. Therefore temperature at multiple positions and flow rate of the air at the ridge of the roof were measured.

The data of the experimental study is analyzed and different modifications of the roof are compared.

This shall give an insight on how strong the parameter like roofing, inclination and profile influence the airflow.

The data is compared to the fluid mechanical predictions of K. Liersch. Therefore a calculation model is created in Matlab. This model predicts the flow rate of the air by entering the relevant temperature and geometric parameter.

Furthermore the temperature conditions are investigated. It shows, that the experimental roof model is not capable of validating the predictions of a theoretical model created by Prof. Dr. G. Friedsam.

It is only possible to make qualitative predicates about the temperature conditions.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	9
Begriffe	10
1 Einführung	12
1.1 Problemstellung	12
1.2 Zielsetzung	13
1.3 Abgrenzung	13
2 Methodik	15
3 Physikalische Grundlagen nach K. Liersch	17
3.1 Strömungsmechanik	17
3.2 Reibungsbeiwerte	19
3.3 Thermische Vorgänge	21
4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene	25
4.1 Versuchsaufbau	25
4.2 Messtechnik	28
4.3 Messmethodik und Auswertung	32
4.4 Erkenntnisse zur Dachdeckung	33
4.5 Erkenntnisse zur Dachneigung	34
4.6 Erkenntnisse zum Belüftungsquerschnitt	36
4.7 Erkenntnisse zur Anzahl der Einschnürungen	37
4.8 Erkenntnisse zu den thermischen Vorgängen	38
4.9 Bestimmung des Gesamtwiderstands des Dachsegments	42
5 Abgleich der Messdaten mit theoretischen Modellen	47
5.1 Erstellen eines Rechenmodells nach K. Liersch in Matlab	47
5.2 Abgleich des Rechenmodells mit den Ergebnissen von K. Liersch .	51
5.3 Abgleich der Messdaten mit dem Rechenmodell nach Kapitel 5.1 .	54

5.4	Abgleich der Messdaten mit einem Rechenmodell auf Grundlage des Kapitels 3.3	57
5.5	Bestimmung der Ortsabhängigkeit der mittleren Temperatur im Belüftungsraum	61
6	Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse	63
7	Ausblick	65
	Tabellenverzeichnis	65
	Abbildungsverzeichnis	66
	Literatur	71

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	$\frac{m}{s}$	Schallgeschwindigkeit
d_g	m	hydraulisch gleichwertiger Durchmesser
g	$\frac{m}{s^2}$	Gewichtskraft
λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit
M	<i>dimensionslos</i>	Mach-Zahl
p	Pa	Druck
Re	<i>dimensionslos</i>	Reynoldszahl
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
v	$\frac{m}{s}$	Strömungsgeschwindigkeit
v_l	$\frac{m}{s}$	Strömungsgeschwindigkeit in der Hinterlüftungsebene
\dot{V}	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom
η	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität
ζ	<i>dimensionslos</i>	Reibungswert
T	K	Temperatur
Λ	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Wärmedurchgangskoeffizient
h	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Wärmeübergangskoeffizient
c_p	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Spezifische Wärmekapazität Luft

Begriffe

belüftete Luftschicht	Nach DIN 4108-3 Seite 10 [5]: „Luftschicht in einer Konstruktion, die mit der Außenluft über Zu- und Abluftöffnungen in Verbindung steht“
unbelüftete Luftschicht	Nach DIN 4108-3 Seite 10 [5]: „Luftschicht in einer Konstruktion ohne oder mit einer nur dem Druckausgleich dienenden Verbindung zur Umgebungsluft“
belüftetes Dach	Nach DIN 4108-3 Seite 11 [5]: „Dachkonstruktion, bei der direkt oberhalb der Wärmedämmung eine Luftschicht angeordnet ist, die mit der Außenluft in Verbindung steht“
unbelüftetes Dach	Nach DIN 4108-3 Seite 11 [5]: „Dachkonstruktion, bei der direkt oberhalb der Wärmedämmung keine Luftschicht angeordnet ist <i>Anmerkung 1 zum Begriff: Zu nicht belüfteten Dächern gehören auch solche, die außenseitig im weiteren Dachaufbau zusätzliche belüftete Luftschichten haben.</i> “
Dachdeckung	Nach DIN 4108-3 Seite 11 [5]: „oberer Abschluss einer geeigneten Dachkonstruktion aus überlappenden oder verfalzten Deckwerkstoffen“

belüftete Dachdeckung	Nach DIN 4108-3 Seite 11 [5]: „Dachdeckung auf linienförmiger Unterlage, z.B. Lattung und Konterlattung“
unbelüftete Dachdeckung	Nach DIN 4108-3 Seite 11 [5]: „Dachdeckung auf flächiger Unterlage, z.B. Schalung“
Dachabdichtung	Nach DIN 4108-3 Seite 11 [5]: „flächige, wasserdichte Schicht in der Dachkonstruktion“
Unterdach	Zweite wasserführende Schicht unter der Dachdeckung
Unterdachbahn	Als zweite wasserführende Schicht auf Schalung, Holzwerkstoffplatten oder druckfesten Wärmedämmplatten aufgebracht flächiges Bauteil. Ist im Folgenden - falls nicht ausdrücklich anders erwähnt- als diffusionsoffen ($s_d \leq 0,5$) anzusehen
Unterspannbahn	Bei belüfteten Dächern als zweite wasserführende Schicht frei über Sparren gespanntes, flächiges Bauteil
Warmdach	Unbelüftetes Dach mit direkt auf die Dämmschicht aufgebracht unbelüfteter Dachdeckung
Kaltdach	Belüftetes oder unbelüftetes Dach mit belüfteter Dachdeckung

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Geneigte Dächer in Holzbauweise werden in der Regel mit belüfteter Dachdeckung ausgeführt. Um selbst bei Schlagregen, Flugschnee, stehendem Wasser durch Eisrückstau sowie während der Bauzeit den Feuchteintrag auf die Dämmung und die tragende Konstruktion zu verhindern, wird ein regensicheres Unterdach als zweite wasserführende Ebene eingebaut. Dieses ist gleichzeitig diffusionsoffen, um Einbaufeuchten und Feuchteinträge über eine belüftete Luftschicht aus der Konstruktion rücktrocknen zu lassen. Die belüftete Luftschicht dient auch dem Wärme- und Feuchteschutz der Dachdeckung und verlängert somit deren Lebensdauer.

Nach DIN 4108-3 [5] spricht man hier von unbelüfteten Dächern mit einer belüfteten Dachdeckung.

Die Erfahrung der letzten Jahre hat jedoch gezeigt, dass viele Unterdächer ihre planmäßige Lebensdauer von 30 Jahren bei weitem nicht erreichen. R. Oswald beschäftigt sich in [22] mit der Dauerhaftigkeit von diffusionsoffenen Unterspann- und Unterdeckbahnen. Hierbei wird festgestellt, dass die Dauerhaftigkeit der Dachbahnen neben der verwendeten Unterspann-/ oder Unterdeckbahn und mechanischer sowie tierischer Einwirkung stark von der Exposition des Daches abhängt. So treten auf der Südseite von Dächern deutlich häufiger Schäden als auf der Nordseite auf, was auf erhöhte Temperaturen auf der Südseite zurückzuführen ist.

Dies lässt schließen, dass die auf das Dach einwirkenden Witterungsbedingungen durch ihr komplexes Zusammenspiel extreme klimatische Zustände in der Hinterlüftungsebene verursachen. Diese stellen eine Herausforderung für die verwendeten Materialien dar und führen in zahlreichen Fällen zu einer vorzeitigen Alterung bis hin zum völligen Versagen der Unterdachbahnen. Durch diese Schäden kommt es zu Wassereintritten in die darunterliegenden Schichten, was einen massiven Feuchteschaden und hohe Sanierungskosten zur Folge haben kann (siehe z.B. [10]).

Um die Zusammenhänge der klimatischen Bedingungen in der Hinterlüftungsebene und deren Auswirkung auf die angrenzenden Bauteile näher zu betrachten, hat die Holzforschung Austria - Österreichische Gesellschaft für Holzforschung 2017 das Forschungsprojekt

Planungssicherheit und Schadensfreiheit sowie Nachweis und Prognostizierbarkeit der Tauglichkeit von Unterdachsystemen (UDS) über ihre Lebensdauer (PuPURA)

ins Leben gerufen.

Ein wichtiger klimatischer Faktor ist der Luftaustausch zwischen Hinterlüftungsebene und Außenluft aufgrund thermischen Auftriebs. Dieser resultiert aus Dichteunterschieden zwischen der Luft in der Hinterlüftungsebene und der Außenluft. Diese Dichteunterschiede kommen durch unterschiedliche Lufttemperaturen zustande und erzeugen eine Druckdifferenz, welche zur Bewegung der Luftmasse in der Hinterlüftungsebene führt.

1.2 Zielsetzung

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem thermischen Auftrieb im Belüftungsraum von unbelüfteten Kaltdächern mit belüfteter Dachdeckung. Ziel ist es den Luftaustausch zwischen der Luft in der Hinterlüftungsebene und der Außenluft experimentell zu analysieren und mit bestehenden Rechenmodellen abzugleichen.

Als theoretische Grundlage bietet die Arbeit von K.Liersch [16] eine gute Ausgangsbasis. Die in der Praxis wenig beachteten bauphysikalischen Grundlagen sollen aufgegriffen und ihre Tauglichkeit zur Vorhersage der Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene überprüft werden. Hierfür wird eine experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene unter Einbeziehung verschiedener Eingangsparameter mit den Berechnungsgrundlagen von K.Liersch verglichen. Anschließend soll ein Berechnungsprogramm nach den Berechnungsgrundlagen von K. Liersch [16] erstellt werden, welches stationäre Zustände ausgeben kann.

1.3 Abgrenzung

In der Arbeit werden die Zusammenhänge zwischen dem Volumenstrom der Luft in der Hinterlüftungsebene und dem thermischen Auftrieb, in Abhängigkeit des

1 Einführung

Bauteilaufbaus, untersucht. Einflüsse wie Exposition, Wind, Bewitterung, Feuchtettransport und Einflüsse auf die Unterdachbahn werden separat untersucht und hier nicht behandelt. Auch die Einflüsse von Lüfterziegel, Firstziegel, Gratziegel, gesperrtem First, Knicke und Insektenschutzgitter werden nicht berücksichtigt. Lediglich der thermische Auftrieb im geraden, offenen Dach wird betrachtet.

2 Methodik

Die Untersuchung der Luftbewegung findet an einem Laborversuch statt. Der Versuchsaufbau und die Messtechnik werden in 4.1 näher beschrieben. Es sollen folgende Variationen auf ihren Einfluss auf den am First resultierenden Volumenstrom analysiert werden:

Temperaturdifferenz

Die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der Luft im Belüftungsraum ist durch die so entstehenden Druckunterschiede ausschlaggebend für den thermischen Auftrieb in der Belüftungsebene. Am realen Dach entsteht diese durch solare Einstrahlung auf die Dachhaut. Im Versuch imitieren Heizmaten die Sonneneinstrahlung auf der Dachhaut. Die Leistung wird durch einen Wechselspannungssteller geregelt.

Höhe zwischen First und Traufe

Durch unterschiedliche Dachneigungen und Dachlängen entstehen unterschiedliche Höhenunterschiede zwischen First und Traufe. Dieser Höhenunterschied ist der wichtigste geometrische Parameter für den thermischen Auftrieb. Im Versuch werden die Auswirkungen der Länge sowie der Dachneigung ermittelt, indem der Versuchsaufbau in vier verschiedenen Neigungen (10° / 20° / 30° / 40°) bei sonst gleichem Aufbau gemessen und diese miteinander verglichen werden. Zudem werden die zwei verschieden langen Versuchsaufbauten (2,5m / 5m) bei gleichem Dachaufbau miteinander verglichen.

Dachdeckung

Dachdeckungen weisen durch ihre Oberfläche unterschiedliche Reibungsbeiwerte auf. Ihre Geometrie führt zu komplexen Belüftungsquerschnitten. Bei schuppenartig verlegten Deckungen entstehen zwischen den einzelnen Elementen luftdurchlässige Fugen. K.Liersch geht in [16] von einer ausreichenden Luftdichtigkeit der Deckung aus und betrachtet die Strömung in der Hinterlüftungsebene als Strömung in einer Rohrleitung.

Im Versuch wird der Unterschied zwischen einem in der Praxis häufig ver-

wendeten Verschiebeziegel und einer flach auf dem Belüftungskanal liegenden OSB-Platte verglichen.

Querschnitt und Querschnittsänderungen

Der Querschnitt hat einen großen Einfluss auf die Luftbewegung. Er ist maßgeblich für das Luftvolumen im Belüftungsraum. Einschnürungen wie Lattungen führen zu Turbulenzen der Luftströmung. Zur Analyse des Einflusses des Querschnitts wird der Belüftungsquerschnitt variiert. Der Versuchsaufbau wird ohne und mit Lattung sowie mit unterschiedlichen Lattungsabständen gemessen.

Die Sichtung und graphische Auswertung der Messdaten erfolgt durch das Datenanalyse- und Grafikprogramm Origin 2019b.

Auf den Grundlagen von K. Liersch wird ein ein Rechenmodell in Matlab erstellt und die gewonnenen Messdaten werden damit abgeglichen.

3 Physikalische Grundlagen nach K. Liersch

3.1 Strömungsmechanik

K. Liersch beschreibt in [16] die Luftbewegung aufgrund thermischen Auftriebs in der Hinterlüftungsebene vereinfacht als Strömung in einer Rohrleitung. Hierzu trifft er die Annahme, dass die Dachdeckung ausreichend luftdicht ist. Zudem betrachtet er stationäre Strömungsverläufe. Das Kontinuitätsprinzip soll gelten.

Die Strömung im Belüftungsraum gilt als inkompressibel. Dies lässt sich durch die Mach-Zahl veranschaulichen. Die Mach-Zahl ist eine Kenngröße die den Kompressibilitätseinfluss strömender Medien beschreibt. Sie ist definiert als das Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit v und Schallgeschwindigkeit a des Mediums. [2]

$$M = \frac{v}{a} \quad (3.1)$$

Diese wird unterteilt in

$$\begin{array}{ll} M < 0,3 & \text{Inkompressible Strömung} \\ 0,3 \leq M < 1 & \text{Kompressible Strömung} \end{array}$$

Für die Schallgeschwindigkeit $a = 343 \frac{m}{s}$ für trockene Luft bei 20°C ergibt sich die Grenzgeschwindigkeit zwischen kompressibler und inkompressibler Strömung zu $v = a \cdot M = 102,9 \frac{m}{s}$.

Strömungen werden in laminare und turbulente Strömungen unterteilt. In einer laminaren Strömung betrachtet man Strömungspartikel, die in einzelnen Stromfäden parallel zueinander fließen. Führen die Strömungspartikel auch Querbewegungen aus, ist die Strömung turbulent.

Der britische Physiker Osborne Reynolds hat diesen Zusammenhang betrachtet und erkannt, dass das Strömungsprofil in kreisrunden Rohren ab einer gewissen Strömungsgeschwindigkeit von laminar zu turbulent umschlägt. Zur Entscheidung, ob eine Strömung turbulent oder laminar vorliegt, wurde die Reynoldszahl eingeführt. Diese berechnet sich aus der Strömungsgeschwindigkeit v_l , dem hydraulisch gleichwertigen Durchmesser d_g und der kinematischen Viskosität ν :

$$Re = \frac{v_l \cdot d_g}{\nu} \quad (3.2)$$

Für runde Querschnitte beträgt die kritische Reynoldszahl $Re_{krit} = 2300$.

Der hydraulisch gleichwertige Durchmesser ist ein Anpassungswert für nicht kreisrunde Querschnitte. Für rechteckige Rohrquerschnitte errechnet er sich aus Breite b und Höhe h des Rechteckrohres:

$$d_g = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h} \quad (3.3)$$

Der thermische Auftrieb in der Belüftungsebene entsteht durch die unterschiedliche Dichte der Außenluft und der erwärmten Luft in der Belüftungsebene. Die Luft in der Belüftungsebene ist wärmer als die Außenluft und hat somit eine geringere Dichte. Durch diesen Dichteunterschied kommt es zu einer Druckdifferenz, die zur Bewegung der Luftschicht führt.

Eine stehende Luftschicht erfährt die Druckänderung dP in Abhängigkeit der Höhe H , der Dichte ρ und der Gewichtskraft g :

$$dp = -\rho \cdot g \cdot H \quad (3.4)$$

Setzt man die erwärmte Luftschicht im Belüftungsraum mit der kühleren Außenluft gleich, ergibt sich folgender Zusammenhang über den Differenzdruck:

$$\Delta p = \rho_a \cdot g \cdot H - \int_0^H \rho_l(z) \cdot g \, dz \quad (3.5)$$

ρ_a ist hierbei die Dichte der Außenluft und ρ_l die Dichte der Luftschicht im Belüftungsraum, welche sich in Abhängigkeit des Temperaturverlaufes über die Höhe in Koordinatenrichtung z ändert.

An dieser Stelle trifft K. Liersch ([16], Seite 24) einige Vereinfachungen um die Gleichung zu lösen:

1. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Dichte der Luft im Belüftungsraum ist isobar. Das Verhältnis der Dichte ρ zur Temperatur T bleibt konstant. $\frac{\rho}{T} = \text{konstant}$

2. Der Temperaturverlauf ändert sich am Belüftungseingang sprunghaft auf die mittlere Temperatur im Belüftungsraum, welche über die gesamte Belüftungsraumlänge konstant bleibt.
3. Die unterschiedliche Feuchte der Luft wird nicht berücksichtigt.

Durch die isobare Zustandsänderung kann, mit der Normdichte bei 0° von $\rho_0 = 1293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und der Temperatur T_0 von 273 K, folgender Zusammenhang zwischen Temperatur und Luftdichte geschlossen werden:

$$\rho_a \cdot T_a = \rho_l \cdot T_l = \rho_0 \cdot T_0 = 353 \frac{\text{K} \cdot \text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.6)$$

Mit den vereinfachten Annahmen lässt sich die Gleichung 3.5 umformen zu:

$$\Delta p = (T_l - T_a) \cdot \frac{353}{T_a \cdot T_l} \cdot g \cdot H \quad (3.7)$$

Für stationäre und reibungsfreie Strömungen gilt die Bernoulli-Gleichung:

$$\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 + p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 + p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 = \text{konst} \quad (3.8)$$

Betrachtet man den Sonderfall, dass die Strömung am Dachauslass vollständig abgebremst wird, d.h. die Geschwindigkeit $v_2 = 0$ erreicht, lässt sich der dort entstehende Staudruck folgendermaßen ermitteln:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} \quad (3.9)$$

Setzt man Gl. 3.7 mit Gl. 3.9 gleich und verwendet für $\rho_l = \frac{353}{T_l}$ erhält man für die reibungsfreie Strömung in der Belüftungsebene:

$$v_l = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot (T_l - T_a)}{T_a}} \quad (3.10)$$

3.2 Reibungsbeiwerte

Wird die Reibung im Belüftungsraum berücksichtigt, formt sich die Gleichung 3.10 um zu:

$$v_l = \sqrt{\frac{\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot (T_l - T_a)}{T_a}}{1 + \sum \zeta}} \quad (3.11)$$

Für die Bestimmung des Reibungsbeiwerts ζ muss zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden werden.

Der Reibungsbeiwert durch die begrenzende Rohrwandung errechnet sich für laminare Strömung nach [2] Seite 174 zu:

$$\zeta_R = \varphi \cdot \frac{64}{Re} \quad (3.12)$$

Hierbei ist φ ein Beiwert für nicht kreisrunde Rohre. Für Rechteckquerschnitte gilt der Beiwert:

$$\varphi = 0,878 + 0,0566 \cdot \epsilon + 0,758 \cdot \epsilon^2 - 0,193 \cdot \epsilon^3 \quad (3.13)$$

mit $\epsilon = \frac{b-h}{b+h}$

Bei turbulenter Strömung ändert sich dieser Zusammenhang, da zusätzlich die Rauigkeit k_R der Rohroberfläche berücksichtigt werden muss. Für turbulente Strömung lautet die Reibungsgleichung:

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta_R}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\zeta_R}} + \frac{k_R}{3,715 \cdot d_g} \right) \quad (3.14)$$

Die Formel ist von Prantl u. Colebrook für Rohre im Übergangsbereich zwischen hydraulisch glatt und hydraulisch rau und gilt im Bereich von $65 < Re \cdot \frac{k_R}{d_g} < 1300$ ([2] S. 164). Sie ist ausschließlich iterativ zu lösen. Typische Rauigkeiten für Holz sind $0,2$ bis $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ [16].

Auch gilt es die Widerstandsbeiwerte durch Formänderungen zu beachten. Diese können nach [16] über das Querschnittsverhältnis am Einzelwiderstand errechnet werden. So errechnen sich die Einzelwiderstände zu:

$$\zeta_{E,A,Q} = A \cdot \epsilon_{E,A,Q}^{-2} + B \cdot \epsilon_{E,A,Q}^{-1} + C \quad (3.15)$$

ϵ ist hierbei ein Formfaktor, der sich durch das Verhältnis der Querschnittänderung bildet.

Einlassparameter	$\epsilon_E = \frac{A_I}{A_E}$
Auslassparameter	$\epsilon_A = \frac{A_I}{A_A}$
Verengungsparameter	$\epsilon_Q = \frac{A_I}{A_Q}$

Dabei ist A_I der freie, ungestörte Querschnitt und $A_{E,A,Q}$ der reduzierte Querschnitt. Die Koeffizienten für Lufteinlass, Luftauslass und Verengung sind aus

Versuchsergebnissen zusammengetragen.

Da die Belüftungsstromgeschwindigkeit für den ungestörten Bereich berechnet werden soll und sich die Berechnung der Einzelwiderstände auf die Luftgeschwindigkeit des betrachteten Querschnitts bezieht, müssen die Einzelwiderstände noch mit dem Formfaktor ε korrigiert werden. Somit wird der geringere Querschnitt am Einzelwiderstand berücksichtigt.

Koeffizient	A	B	C
Einlass	1,320	-3,437	2,516
Auslass	-1,092	-0,453	2,546
Verengung	1,416	-3,978	2,558

Der Gesamtwiderstand errechnet sich zu:

$$\sum \zeta = \zeta_R \cdot \frac{l}{d_g} + \frac{\zeta_E}{\varepsilon_E} + \frac{\zeta_Q}{\varepsilon_Q} + \frac{\zeta_A}{\varepsilon_A} \quad (3.16)$$

3.3 Thermische Vorgänge

Die thermischen Vorgänge im Dach lassen sich über eine Energiebilanzierung der einzelnen Wärmeströme darstellen. Hierbei wird angenommen, dass die Oberflächentemperatur der Eindeckung T_D und die Innenraumtemperatur T_i konstant sind. Zusätzlich müssen die Wärmeübergangskoeffizienten h_{ce} und h_{ci} durch Konvektion in der Hinterlüftungsebene bekannt sein. Die hier dargestellte Wärmestrombilanz gilt für Dächer, bei denen die Dachdeckung durch Wärmestrahlung erwärmt wird.

K. Liersch hat hierfür in [15] bereits entsprechende Bilanzen aufgestellt (siehe Abb. 3.1). Die für die Bilanzierung notwendigen Parameter lassen sich der Tabelle 3.1 entnehmen.

Größen	Formelzeichen	Kommentar
Temperatur auf der Außenoberfläche der Dacheindeckung	T_D	ist als konstant anzusehen
Temperatur auf der Innenoberfläche der Dacheindeckung	T_{le}	angrenzend an die Luftschicht im Belüftungsraum
Temperatur auf der Innenoberfläche des Dachaufbaus	T_{li}	angrenzend an die Luftschicht im Belüftungsraum
Raumtemperatur	T_i	
Lufttemperatur	T_l	
Thermischer Leitwert der Eindeckung	$\Lambda_e \cdot l \cdot \Delta x$	mit $\Lambda = \frac{1}{R}$ l ist hier die Breite des Belüftungsraums
Thermischer Leitwert des Dachaufbaus	$\Lambda_i \cdot l \cdot \Delta x$	mit $\Lambda = \frac{1}{R}$
Wärmeübergang je K durch Strahlung	$h_r \cdot l \cdot \Delta x$	$h_r = 4 \cdot 0,84 \cdot \sigma \cdot T_m^3$ mit $T_m = (T_{li} + T_{le})/2$. Absorptionsparameter: $\epsilon_1 = 0,93$ und $\epsilon_2 = 0,90$
Wärmeübergang je K durch Konvektion zwischen Eindeckung und Luft	$h_{ce} \cdot l \cdot \Delta x$	
Wärmeübergang je K durch Konvektion zwischen Dachaufbau und Luft	$h_{ci} \cdot l \cdot \Delta x$	
Volumenstrom der Luft im Belüftungsraum	\dot{V}_l	

Tabelle 3.1: Parameter für die Energiebilanzierung

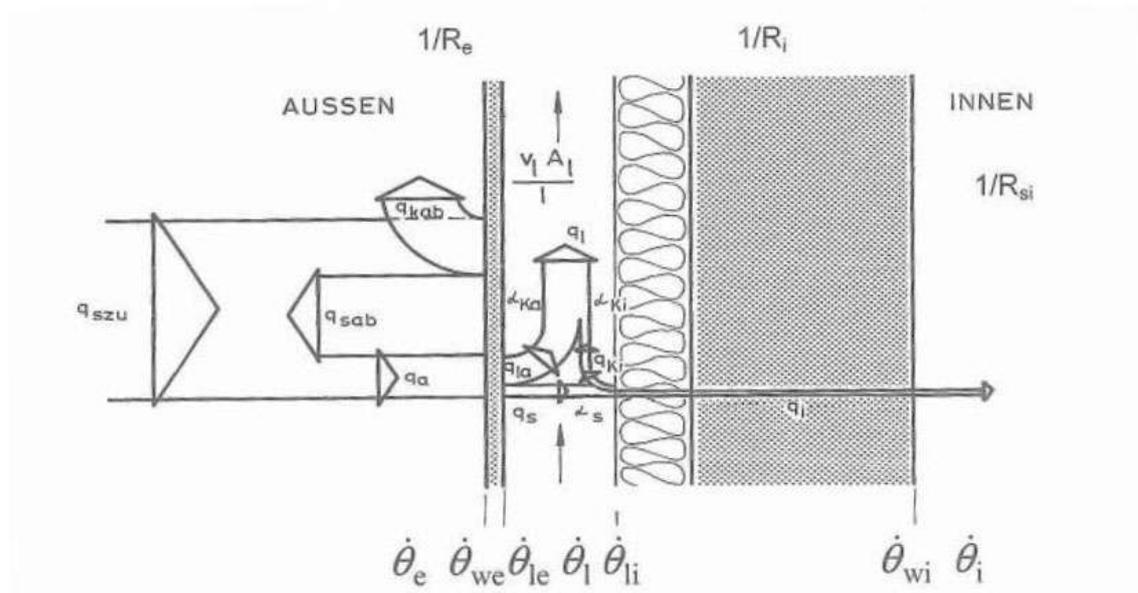


Abbildung 3.1: Thermische Vorgänge im unbelüfteten Dach mit belüfteter Dachdeckung nach K. Liersch [15] für sommerliche Dächer

Für die Dachdeckung gilt, dass der Transmissionswärmestrom, welcher durch die Dachdeckung hindurch geht, gleich dem Wärmeverlust durch Strahlung der Eindeckung zuzüglich dem Wärmeübergang zwischen Ziegel und Luft ist.

Die Energiebilanz für die Dachdeckung ergibt sich zu:

$$\Lambda_e \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_D - T_{le}) = h_r \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_{le} - T_{li}) + h_{ce} \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_{le} - T_l) \quad (3.17)$$

Für den Dachaufbau gilt, dass der Transmissionswärmestrom, welcher durch den Dachaufbau hindurch geht, gleich dem Wärmeverlust durch Strahlung des Dachaufbaus zuzüglich dem Wärmeübergang zwischen Dachaufbauoberfläche und Luft ist.

Die Energiebilanz für den Dachaufbau ergibt sich zu:

$$\Lambda_i \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_{li} - T_i) = h_r \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_{le} - T_{li}) + h_{ci} \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_l - T_{li}) \quad (3.18)$$

Betrachtet man ein Luftpaket der dicke Δx im Belüftungsraum, so erfährt dieses eine Erwärmung durch die konvektiven Vorgänge zwischen Luft und Eindeckung sowie zwischen Luft und Dachaufbau. Diese Erwärmung des Luftpakets lässt sich durch $c_p \cdot \rho_l \cdot \dot{V}_l \cdot (T_l(x + \Delta x) - T_l(x))$ darstellen. Somit lässt sich die Energiebilanz der Luftschicht im Belüftungsraum folgendermaßen darstellen:

$$h_{ce} \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_{le} - T_l) - h_{ci} \cdot l \cdot \Delta x \cdot (T_l - T_{li}) = c_p \cdot \rho_l \cdot \dot{V}_l \cdot (T_l(x + \Delta x) - T_l(x)) \quad (3.19)$$

Betrachtet man nun die Energiebilanzen für die Dacheindeckung und den Dachaufbau am Ort $x + \Delta x$ mit $\dot{V}_l = v \cdot b \cdot l$ lassen sich die Energiebilanzen 3.19, 3.18 und 3.17 folgendermaßen umformen:

$$(\Lambda_e + h_r + h_{ce}) \cdot T_{le}(x + \Delta x) - h_{ce} \cdot T_l(x + \Delta x) - h_r \cdot T_{li}(x + \Delta x) = \Lambda_e \cdot T_D$$

$$-h_r \cdot T_{le}(x + \Delta x) - h_{ci} \cdot T_l(x + \Delta x) + (\Lambda_i + h_r + h_{ci}) \cdot T_{li}(x + \Delta x) = \Lambda_i \cdot T_i$$

$$-h_{ce} \cdot T_{le}(x + \Delta x) + (h_{ce} + h_{ci} + c_p \cdot \rho_l \cdot v \cdot \frac{b}{\Delta x}) \cdot T_l(x + \Delta x) - h_{ci} \cdot T_{li}(x + \Delta x) = c_p \cdot \rho_l \cdot v \cdot \frac{b}{\Delta x} \cdot T_l(x)$$

Werden diese in Matrixschreibweise umgewandelt erhält man:

$$\begin{pmatrix} \Lambda_e + h_r + h_{ce} & -h_{ce} & -h_r \\ -h_r & -h_{ci} & \Lambda_i + h_r + h_{ci} \\ -h_{ce} & h_{ce} + h_{ci} + c_p \cdot \rho_l \cdot v \cdot \frac{b}{\Delta x} & -h_{ci} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{le}(x + \Delta x) \\ T_l(x + \Delta x) \\ T_{li}(x + \Delta x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_e \cdot T_D \\ \Lambda_i \cdot T_i \\ c_p \cdot \rho_l \cdot v \cdot \frac{b}{\Delta x} \cdot T_l(x) \end{pmatrix}$$

Diese Matrix lässt sich mit dem Gauß-Algorithmus nach $T_{le}(x + \Delta x)$, $T_l(x + \Delta x)$ und $T_{li}(x + \Delta x)$ lösen.

Die so gewonnenen Temperaturwerte an der Position $x + \Delta x$ bilden die Startwerte für die Bestimmung der Temperatur an der Position $x + 2 \cdot \Delta x$. So lässt sich das Temperaturprofil der Luft, der Innenoberfläche des Dachaufbaus und der Innenoberfläche der Deckung iterativ erstellen.

Das Rechenverfahren wurde von Prof. Dr. G. Friedsam erstellt.

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene

4.1 Versuchsaufbau

Für den Laborversuch wurden zwei Dachsegmente im Akustik Center Austria errichtet. Dachsegment 1 misst 5 m Dachlänge und Dachsegment 2 misst 2,5 m Dachlänge. Abb. 4.1 zeigt das 5 m Dachsegment. Die Sparren der Versuchsaufbauten messen 10 cm x 18 cm (B x H) und die Konterlattung 8 cm x 5 cm (B x H). Die Lattung misst 6 cm x 4 cm (B x H). Die Sparren sind unterseitig mit einer 15 mm starken OSB-Platte und oberseitig mit 2,5 cm starken Schalungsbrettern beplankt. Der Sparrenzwischenraum ist mit einem Trennwand-Klemmfilz mit $\lambda = 0,039 \frac{W}{m \cdot K}$ vollständig ausgedämmt. Die Breite des Dachsegments beträgt 95 cm. Die Breite des Belüftungskanals beträgt 79 cm. Der Achsabstand der Lattung beträgt 34,1 cm bei 5 m Dachlänge und 31,25 cm bei 2,5 m Dachlänge. Die verschiedenen Varianten der Außenschale sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Tabelle 4.2 zeigt die gemessenen Konfigurationen.

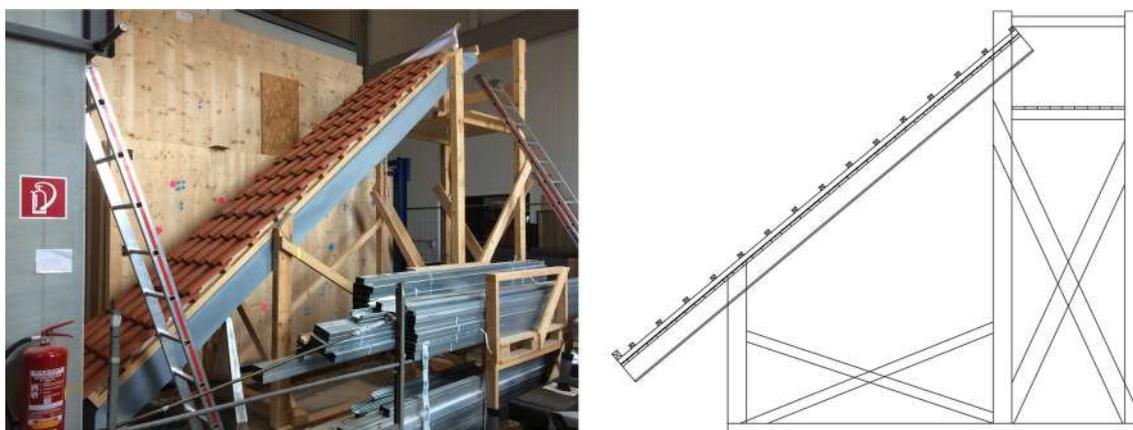


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau mit 5 m Länge und 40° Neigung

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene

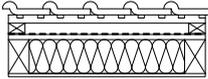
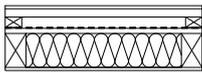
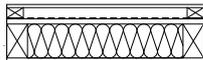
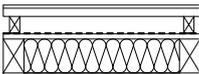
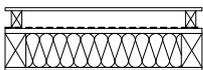
Varianten	Aufbau	Varianten	Aufbau
Außenschale 1 (AS1): Ziegeldeckung 	Verschiebeziegel Tondach Sulm Lattung 4/6 Konterlattung 5/8 Unterdachbahn Schalung 12/2.5 Dämmung Sparren 10/18 OSB 15 mm	Außenschale 2 (AS2): OSB 	OSB 15 mm Lattung 4/6 Konterlattung 5/8 Unterdachbahn Schalung 12/2.5 Dämmung Sparren 10/18 OSB 15 mm
Außenschale 3 (AS3): OSB ohne Lattung 	OSB 15 mm Konterlattung 5/8 Unterdachbahn Schalung 12/2.5 Dämmung Sparren 10/18 OSB 15 mm	Außenschale 4 (AS4): OSB mit stehender Konterlattung 	OSB 15 mm Lattung 4/6 Konterlattung 8/5 Unterdachbahn Schalung 12/2.5 Dämmung Sparren 10/18 OSB 15 mm
Außenschale 5 (AS5): OSB mit stehender Konterlattung ohne Lattung 	OSB 15 mm Konterlattung 8/5 Unterdachbahn Schalung 12/2.5 Dämmung Sparren 10/18 OSB 15 mm		

Tabelle 4.1: Varianten

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene

Variante Außenschale	Dachlänge	Dachneigung	Sonstige Änderung
Außenschale 1	5 m Dachlänge	40° Dachneigung	
Außenschale 1	5 m Dachlänge	40° Dachneigung	Ziegelfugen abgeklebt
Außenschale 1	5 m Dachlänge	30° Dachneigung	
Außenschale 1	5 m Dachlänge	20° Dachneigung	
Außenschale 1	5 m Dachlänge	10° Dachneigung	
Außenschale 2	5 m Dachlänge	40° Dachneigung	
Außenschale 2	5 m Dachlänge	40° Dachneigung	Achsabstand Lattung 68,2
Außenschale 2	5 m Dachlänge	30° Dachneigung	
Außenschale 2	5 m Dachlänge	20° Dachneigung	
Außenschale 2	5 m Dachlänge	20° Dachneigung	Achsabstand Lattung 68,2
Außenschale 2	5 m Dachlänge	10° Dachneigung	
Außenschale 3	5 m Dachlänge	40° Dachneigung	
Außenschale 3	5 m Dachlänge	20° Dachneigung	
Außenschale 4	5 m Dachlänge	40° Dachneigung	
Außenschale 4	5 m Dachlänge	20° Dachneigung	
Außenschale 5	5 m Dachlänge	40° Dachneigung	
Außenschale 5	5 m Dachlänge	20° Dachneigung	
Außenschale 1	2,5 m Dachlänge	40° Dachneigung	
Außenschale 1	2,5 m Dachlänge	30° Dachneigung	
Außenschale 1	2,5 m Dachlänge	20° Dachneigung	
Außenschale 1	2,5 m Dachlänge	10° Dachneigung	
Außenschale 3	2,5 m Dachlänge	40° Dachneigung	

Tabelle 4.2: Gemessene Konfigurationen

4.2 Messtechnik

Zur Analyse des thermischen Auftriebs werden die Temperaturen des Daches und der Umgebungsluft sowie der Volumenstrom der Luft, der durch das Dach strömt, aufgezeichnet. Zusätzlich misst ein in der Mitte des Versuchsaufbaus installiertes Anemometer die lokale Strömungsgeschwindigkeit.

Zur Temperaturmessung kommen NTC-Fühler der Firma Ahlborn mit einer Auflösung von 0,01 K und einer Messungenauigkeit von $\pm 0,1$ K im Temperaturbereich von 0 bis + 70 °C zum Einsatz.

Das Anemometer ist vom Typ FV A605-TA10 der Firma Ahlborn. Die Auflösung beträgt 0,001 m/s in einem Messbereich von 0,01 bis 1 m/s und einer Ungenauigkeit von $\pm 1,5$ % des Messwertes. Der Anströmwinkel beträgt $\pm 180^\circ$.

Die Daten der Temperaturfühler und des Anemometers erfasst ein Datenlogger vom Typ ALMEMO 5690-1CPUTG3. Dieser ist über einen Ethernetadapter ans Netzwerk angebunden und wird über die Software WinControl von Akrobit konfiguriert. Mit dieser werden auch die Messdaten ausgelesen.

Die Benennung der Temperatursensoren bezieht sich auf die Position in Dachebene und Querschnitt. Temperatursensor M1_sun ist beispielsweise an Position M1 auf der Oberseite der Dachdeckung angebracht. Die möglichen Positionen der Sensoren sind in Abbildung 4.2, linke Seite, ersichtlich. Die Lage der tatsächlich verbauten Sensoren findet sich in der Tabelle, auf der rechten Seite der Abbildung 4.2.

Die Außenlufttemperatur wird in der Höhenordinate der Positionen 1-6 beim großen Dach und 1-5 beim kleinen Dach neben dem Versuchsaufbau gemessen und die Sensoren mit Ta_1 - Ta_6 bzw Ta_1 - Ta_5 benannt. Das Anemometer ist in Feldmitte des Dachsegments installiert.

Den Volumenstrom misst ein LMF (Laminar Master Flow) des Typs PK477A von TetraTec, spezialisiert für die HFA.

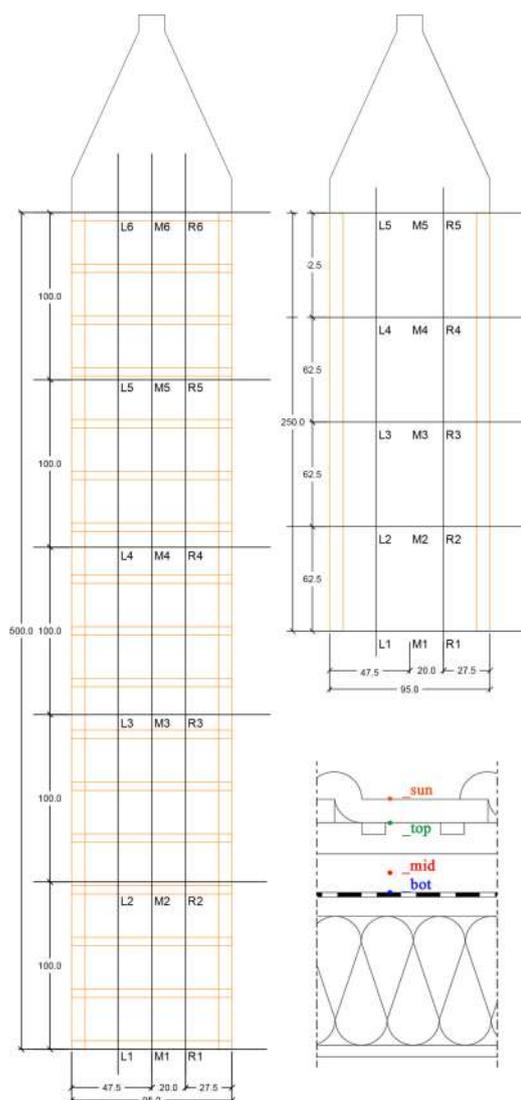
Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau der Messstrecke. Abbildung 4.4 zeigt die Messstrecke am 2,5 m Dach.

Der Differenzdruckmesser Pts am Belüftungskanalausgang ist vom Typ PDP00001D-F. Die Messmethode ist kapazitiv. Der Messbereich liegt bei 0 bis 1 mbar Differenzdruck. Die Messgenauigkeit liegt bei $\pm 0,5$ % des Messwerts.

Als Temperatursensor Tts am Belüftungskanalausgang ist ein PT100-Fühler des Typs WIT-S-PTM8-SO-20100-GB03 verbaut. Die Messungenauigkeit beträgt $\pm 0,1$ °C + $0,0017 \cdot T_{mess}$ im Temperaturbereich von -30 bis +80 °C.

Ein Cellulosefilter reinigt die Luft von Staubkörner $\geq 5 \mu m$ um das LFE vor

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene



	Dachsegment	
	5 m	2,5 m
_ sun	L1, L3, L5 M1, M2, M3, M4, M5 R1, R3, R5	L2, L3, L4 M1, M2, M3, M4, M5 R2, R3, R4
_ top	L1, L3, L5 M1, M2, M3, M4, M5 R1, R3, R5	L3 M2, M3, M4, R3
_ mid	L3 M1, M2, M3, M4, M5, M6 R3	L2, L3, L4 M1, M2, M3, M4, M5 R2, R3, R4
_ bot	L3 M1, M2, M3, M4, M5, M6 R3	M1, M2, M3, M4, M5

Abbildung 4.2: Links: Lageplan der Temperatursensoren;
Rechts: Positionen der verbauten Temperatursensoren

Verschmutzung zu schützen.

Das LFE (Laminar Flow Element) vom Typ LFE-EA-50MH10-02.00 mit Edelstahlmatrix hat einen Messbereich von 0 - 1000 L/min. Die Messgenauigkeit beträgt 1 % vom Messwert im Bereich von 100 bis 1000 L/min.

Der Differenz- und Absolutdrucksensor vom Typ PDP01020A misst den Differenzdruck über dem LFE. Die Messmethode ist piezoresistiv. Der Messbereich liegt bei 0 - 20 mbar und die Messunsicherheit bei 0,3 % des Messwerts.

Der kombinierte Feuchte- und Temperatursensor Hum0/Temp0 ist vom Typ HUMTMP-MF-G12. Der kapazitive Feuchtesensor hat einen Messbereich von 0 bis 100 % r.F. Die Messgenauigkeit beträgt ± 2 % r.F. im Bereich von 20 - 85 %. Als Temperatursensor ist ein Pt100 Platinelement mit einem Messbereich von

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene

-10 bis +60 °C verbaut. Die Messungenauigkeit beträgt $0,1 \text{ °C} + 0,0017 \cdot T_{mess}$ im Temperaturbereich von -10 bis +60 °C.

Der Seitenkanalverdichter vom Typ SKV-2BH1 300-7A221 verfügt über einen IE2-Motor und einen aufgebauten Frequenzumrichter. Die Bemessungsleistung beträgt 0,95 kW und der maximale Ansaugvolumenstrom 100 m³/h (1666 L/min). Verarbeitung der Messdaten, Berechnung des Volumenstroms und Steuerung des Seitenkanalverdichters erfolgt durch den Controller S320.

Die erwärmte Luft strömt durch den Versuchsaufbau in den Trichter (siehe Bild 4.4). Senkrecht zum Trichter wird der Druck P_t und die Temperatur T_t gemessen. Der dort ermittelte Druck dient der Kompensation des durch die Messstrecke hervorgerufenen Druckabfalls, indem dieser durch den Seitenkanalverdichter auf Atmosphärendruck geregelt wird. Die Regelung ist eine PI-Regelung und erfolgt durch den Controller S320.

Durch die Kapillaren entsteht eine sogenannte Kapillarstörung, die sich laminar ausbildet. Diese kann nach den Gesetzen von Hagen-Poiseuille beschrieben werden. Hier ist bei laminarer Strömung durch Kapillaren der Druckabfall Δp proportional zum aktuellen Volumenstrom \dot{V} und der dynamischen Viskosität η [26].

$$\Delta p \sim \dot{V} \cdot \eta \quad (4.1)$$

Die Druckdifferenz über den Kapillaren wird mit dem Differenzdruckmesser P_{diff} gemessen. $Temp_0$ und Hum_0 dient der Berechnung der dynamischen Viskosität η .

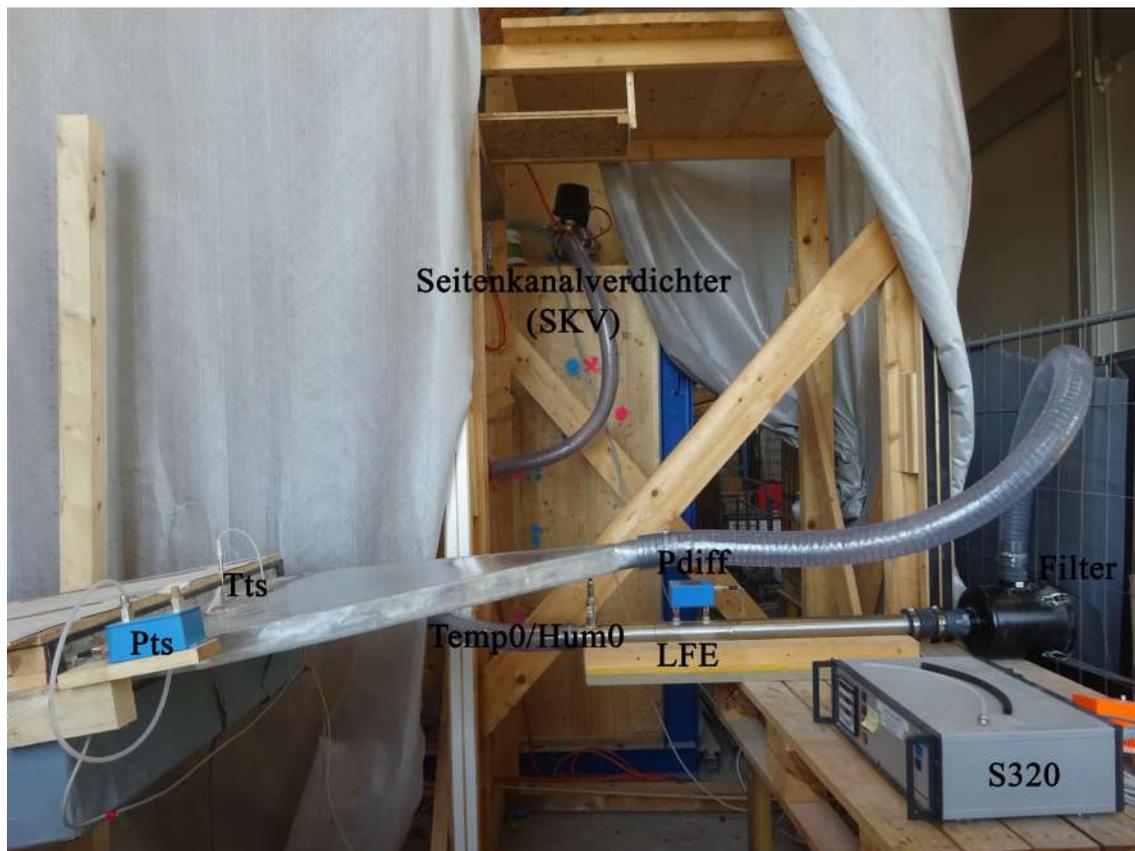


Abbildung 4.4: LMF PK477A angeschlossen an 2,5 m Dach mit Bezeichnung der Messtechnik

4.3 Messmethodik und Auswertung

Ein Messdurchgang dauert etwa einen Arbeitstag. Vor jedem Messdurchgang muss eine Nullung der Sensoren Pts und Pdiff durchgeführt werden. Hierbei werden die Ausgänge der Sensoren miteinander verbunden, um einen Einfluss von Zugluft zu vermeiden. Im Anschluss beginnt das Erwärmen des Dachsegments. Das Dach wird über Heizmatten mit einer maximalen Flächenleistung von $625 \frac{W}{m^2}$ bei 230 V erwärmt. Die Leistung wird über einen Hochleistungswechselspannungssteller NS3005 geregelt. Während der Erwärmung werden die Sensoren Pts und Pdiff stündlich genullt, da durch große Druckunterschiede ein Sensordrift möglich ist. Die Offsetwerte der Drucksensoren werden in ein Messprotokoll eingepflegt. Durch die Nullung entstandene Einbrüche der Strömungsgeschwindigkeit werden grafisch aus den Messdaten entfernt. Die Aufzeichnung der Messdaten des LMF erfolgt durch ein selbst geschriebenes Pythonskript, das die Messwerte abfragt und in eine Textdatei ausgibt. Die Aufzeichnung der Temperaturdaten und des Anemometers erfolgt über das Programm WinControl

der Firma Akrobit. Darüber werden auch die Temperaturdaten während der Messung angezeigt. Das Verhalten des LMF wird mit dem Programm S320 der Firma TetraTec überwacht.

Um die Daten trotz schwankender Hallentemperatur zu vergleichen, werden sie linearisiert. Nach K. Liersch lässt sich der Zusammenhang der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperatur nach Gl.4.2 darstellen.

$$v_l \sim \sqrt{\Delta T / T_a} \quad (4.2)$$

Um die Daten bei der Auswertung vergleichen zu können, wird die Abszisse in der abstrakten Skala $\sqrt{\Delta T / T_a}$ angegeben. Dies führt zu einem linearen Zusammenhang der Strömungsgeschwindigkeit und der abstrakten Abszisse. Die Strömungsgeschwindigkeit ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt am Dachende. Diese errechnet sich aus dem Volumenstrom nach $v_l = \dot{V} / A$, wobei A der Querschnitt bei der Druckabnahmestelle Pts ist.

4.4 Erkenntnisse zur Dachdeckung

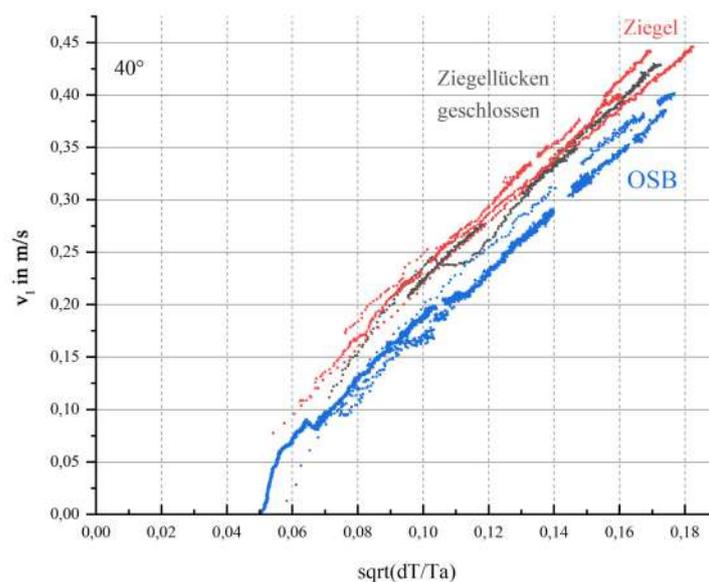


Abbildung 4.5: Vergleich der Messungen von Außenschale 1 mit offenen und abgeklebten Fugen und Außenschale 2. Die Dachneigung beträgt 40°

In Abbildung 4.5 werden die Messdaten des 5 m Dachs mit Ziegeldeckung, Ziegeldeckung mit abgeklebten Stößen und OSB-Deckung verglichen. Es lässt sich erkennen, dass die Deckung keinen signifikanten Einfluss auf den Volumenstrom im Dach hat. Besonders deutlich ist das bei offener und geschlossener Ziegeldeckung zu erkennen. Der leichte Versatz bei der Messung mit der OSB-Deckung lässt sich auf den reduzierten Belüftungsquerschnitt zurückführen, da bei der Ziegeldeckung ein etwas größerer Belüftungsquerschnitt vorhanden ist, als bei der flach auf der Lattung liegenden OSB.

Die Messdaten decken sich gut mit den Annahmen von K.Liersch. Dieser schreibt in [16] S. 15:

„Die Luftbewegung unterhalb der Dachdeckung wird im folgenden als Strömung in einer Rohrleitung aufgefasst. Hierfür wird die Dachdeckung als ausreichend Luftdicht angesehen.“

Es fällt auf, dass die Geraden nicht durch den Ursprung verlaufen. Die Temperatur für die Außenluft wurde bei dieser Messung nur an einer Stelle erfasst. Das berücksichtigt nicht die Temperaturschichtung der stehenden Luft über die Höhe. In Messungen mit dem Abszissenzusatz "korrigiert" wurde die Höhenabhängigkeit der Außenlufttemperatur berücksichtigt.

4.5 Erkenntnisse zur Dachneigung

Nach Gleichung 3.11 sind sowohl die Temperaturdifferenz zwischen Belüftungsebene und Außenluft mit $\sqrt{\frac{T_i - T_a}{T_a}}$ als auch die Höhendifferenz mit \sqrt{H} des Dachaufbaus entscheidend für den thermischen Auftrieb. Die Höhe des Daches errechnet sich über die Dachneigung und die Länge des Daches zu $H = \sin(\alpha) \cdot l$. Somit treten in Dächern mit größerer Neigung bei gleicher Temperaturdifferenz höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf. Das kann im Laborversuch bestätigt werden (siehe Abb. 4.6 und 4.7 jeweils oberer Graph). Hier sieht man eindeutig, dass bei gleicher Dachlänge und Dachkonfiguration bei steigender Neigung höhere Strömungsgeschwindigkeiten am Dachauslass erreicht werden.

Rechnet man nun in der Abszisse die Höhe nach Gl. 3.11 mit ein, sollte sich eine Gerade aus der Geradenschaar bilden. Dies lässt sich im unteren Graphen in Abb. 4.6 und 4.7 erkennen. Auch sieht man hier, dass bei niedrigen Dachneigungen die Messgenauigkeit sinkt, da die Druckunterschiede sehr gering sind und die

Messungen anfälliger für Fehler durch äußere Einflüsse werden.

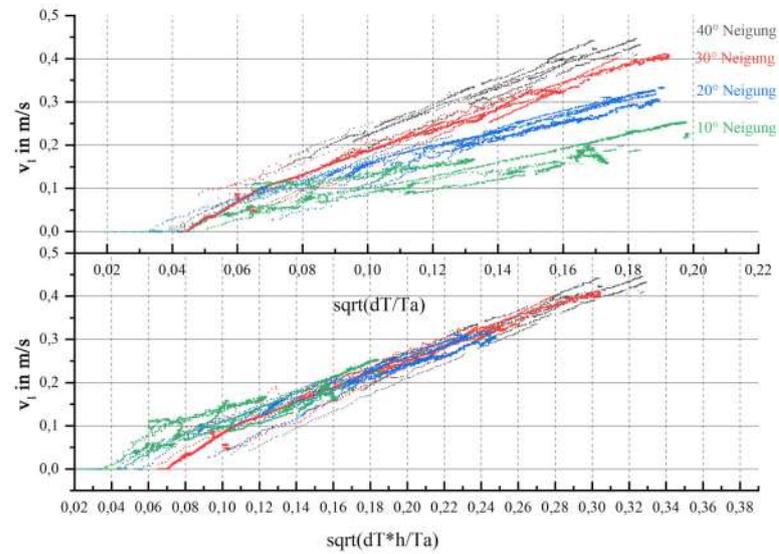


Abbildung 4.6: Vergleich der verschiedenen Neigungen bei einem Dachaufbau mit Außenschale 1 bei 10°, 20°, 30° und 40° Dachneigung am 5 m Dach

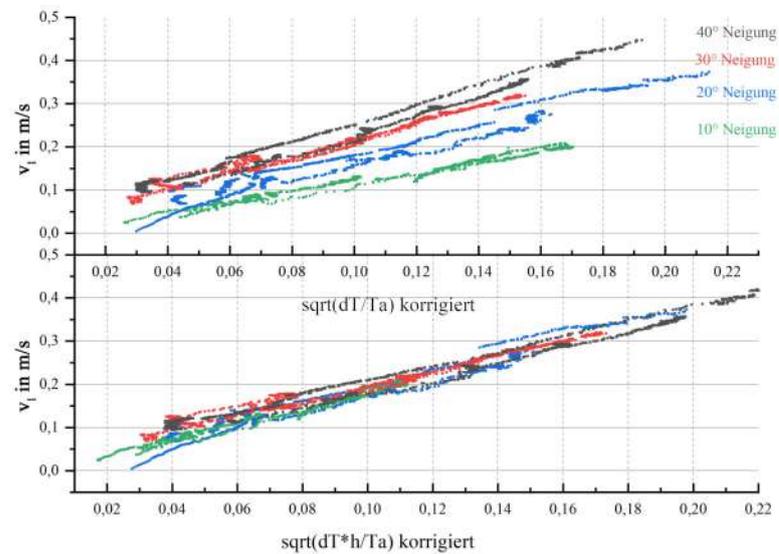


Abbildung 4.7: Vergleich der verschiedenen Neigungen bei einem Dachaufbau mit Außenschale 2 bei 10°, 20°, 30° und 40° Dachneigung am 2,5 m Dach

4.6 Erkenntnisse zum Belüftungsquerschnitt

Vergleicht man die Messdaten von Dächern bei gleicher Neigung und Konfiguration mit unterschiedlichen Höhen der Konterlattung, zeigt sich, dass die Strömungsgeschwindigkeit bei gleicher Temperaturdifferenz und größerem Belüftungsquerschnitt höher ist (siehe Abb. 4.8 und 4.9). Dieses Verhalten kann anhand der Widerstandsbeiwerte durch Formänderungen erklärt werden. Durch die Erweiterung des Belüftungsquerschnitts A_l bei gleichem Einzelwiderstand erhöht sich der Formfaktor ε und die Einzelwiderstände nach Gleichung 3.15 verringern sich.

Da sich die Strömungsgeschwindigkeit nach $v_l = \dot{V} / A$ errechnet, können bei stehender Konterlattung ($h = 8 \text{ cm}$) nicht die gleichen Temperaturdifferenzen wie bei liegender Konterlattung ($h = 5 \text{ cm}$) gemessen werden. Der maximal messbare Volumenstrom des LMF beträgt 1000 L/min . Dieser wird bei größeren Belüftungsquerschnitten bereits bei kleineren Temperaturdifferenzen erreicht.

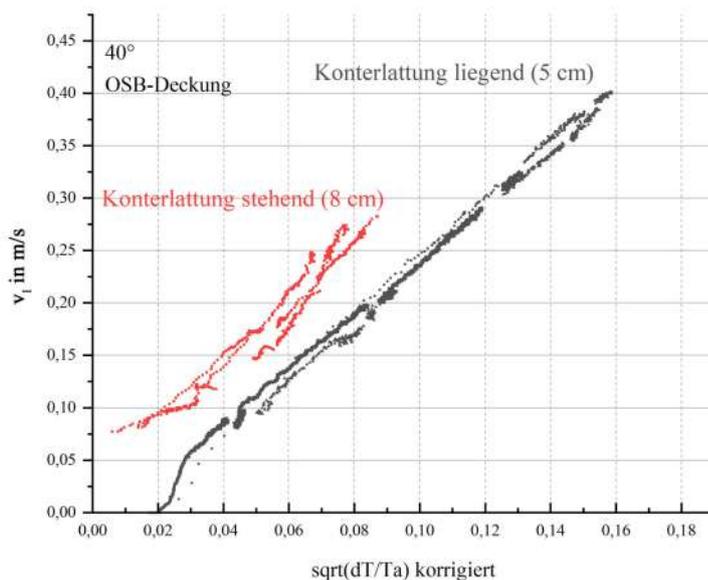


Abbildung 4.8: Vergleich unterschiedlicher Höhen der Konterlattung bei einem Dachaufbau mit Außenschale 2 und 4 bei 40° Dachneigung am 5 m Dach

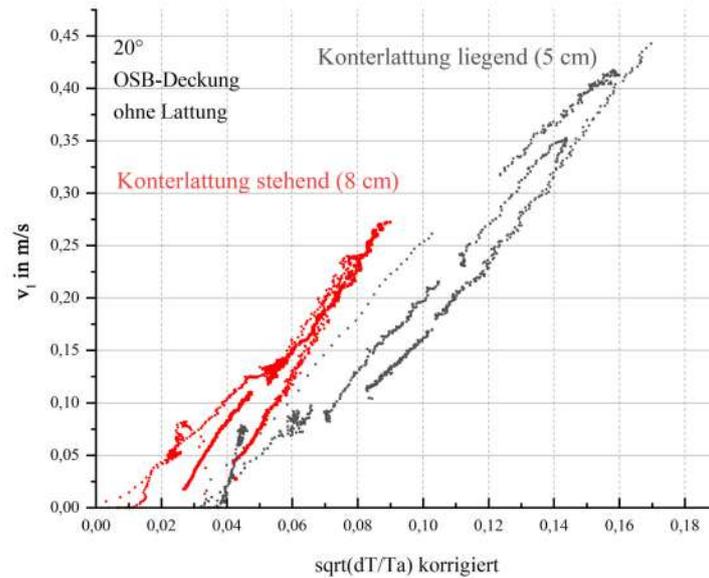


Abbildung 4.9: Vergleich unterschiedlicher Höhen der Konterlattung ohne Lattung bei einem Dachaufbau mit Außenschale 3 und 5 bei 20° Dachneigung am 5 m Dach

4.7 Erkenntnisse zur Anzahl der Einschnürungen

Abbildung 4.10 zeigt den Unterschied bei veränderter Anzahl der Lattung in einem sonst gleich konfigurierten Dach. Die roten Messpunkte stammen von einem Dach mit Außenschale 2, 40° Neigung, 5 m Länge und 34,1 cm Lattenabstand. Die grauen Messpunkte zeigen das selbe Dach mit 68,2 cm Lattenabstand. Neben Einlass- und Auslasswiderstand sind bei den roten Messpunkten 15 Querschnittsverengungen im Dachverlauf und bei den grauen Messpunkten nur 7 Querschnittsverengungen. Der gemessene Unterschied ist recht gering und weicht stark von den berechneten Werten ab. Die Einzelwiderstände der Einschnürung werden zu $\sum \zeta_Q = n_Q \cdot \zeta_{Q,n}$ berechnet. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Additivität der Einzelwiderstände nicht gegeben ist. Diese gilt nur bei ausreichendem Abstand zwischen den Einzelwiderständen. Ist dieser nicht groß genug, bildet sich die Strömung nicht vollständig aus und die Einzelwiderstände können nicht zu einem Gesamtwiderstand addiert werden.

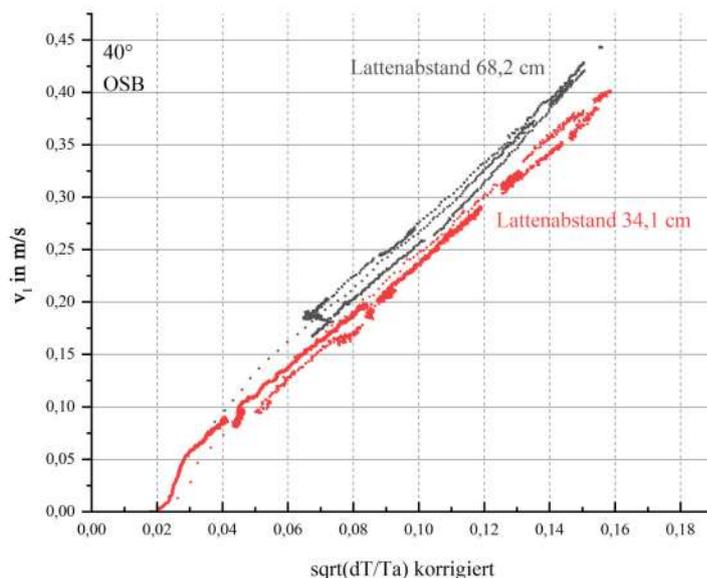


Abbildung 4.10: Vergleich der Messungen mit Lattenabstand von 68,2 cm und Lattenabstand von 34,1 cm bei Außenschale 2, 40° Dachneigung und 5 m Länge

4.8 Erkenntnisse zu den thermischen Vorgängen

Abbildung 4.11 zeigt die gemessenen Lufttemperaturen im Belüftungsraum für unterschiedliche Dachaufbauten sowie Dachneigungen. Die roten Messpunkte zeigen die Temperaturkurven bei 40 °C, die schwarzen bei 30 °C gemessener Dachoberflächentemperatur. Die Dachlänge beträgt stets 5 m.

Bei gleichen Oberflächentemperaturen und Dachaufbauten sowie unterschiedlichen Neigungen weisen die Temperaturen im Belüftungsraum einen ähnlichen Verlauf auf (Abb. 4.11 (a) und (b)).

Verringert man jedoch die Höhe des Belüftungskanals von 8 cm auf 5 cm (Abb. 4.11 (d)), erwärmt sich die Luft im Belüftungsraum deutlich stärker, bei gleicher Oberflächentemperatur. Der Grund hierfür ist das geringere Luftvolumen, welches erwärmt werden muss.

Beim Vergleich zwischen einem Dachaufbau mit 5 cm Konterlattung und 4 cm Lattung bei 40° Dachneigung (Abb. 4.11 (d)) und selbigem Aufbau ohne Lattung (Abb. 4.11 (c)) erhält man nahezu identische Temperaturprofile trotz des deutlich höheren Luftvolumens bei Abb. 4.11 (d). Dies ergibt sich durch die Störung der Luftbewegung aufgrund der einschnürenden Lattung. Somit wird weniger Luft

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene

aus dem Aufbau abtransportiert und der abgeführte konvektive Wärmestrom verringert sich, wodurch sich die Temperatur im Belüftungsraum erhöht.

Abbildung 4.12 zeigt die zu Abb. 4.11 gehörigen Temperaturkurven über die Höhe des Belüftungsraumes bei 40 °C Dachoberflächentemperatur. Gezeigt werden die Messstellen bei 1 m (M2), 2 m (M3), 3 m (M4) und 4 m (M5) Entfernung zum Belüftungseinlass. Die Messpunkte zeigen die Temperaturen von _ bot, _ mid, _ top und _ sun. Hier lässt sich erkennen, dass bei niedrigeren Belüftungsraumhöhen die Temperatur auf der Unterdachbahn höher ist. Auch bei schlechter belüfteten Dächern mit Lattung ist die Temperatur auf der Unterdachbahn höher.

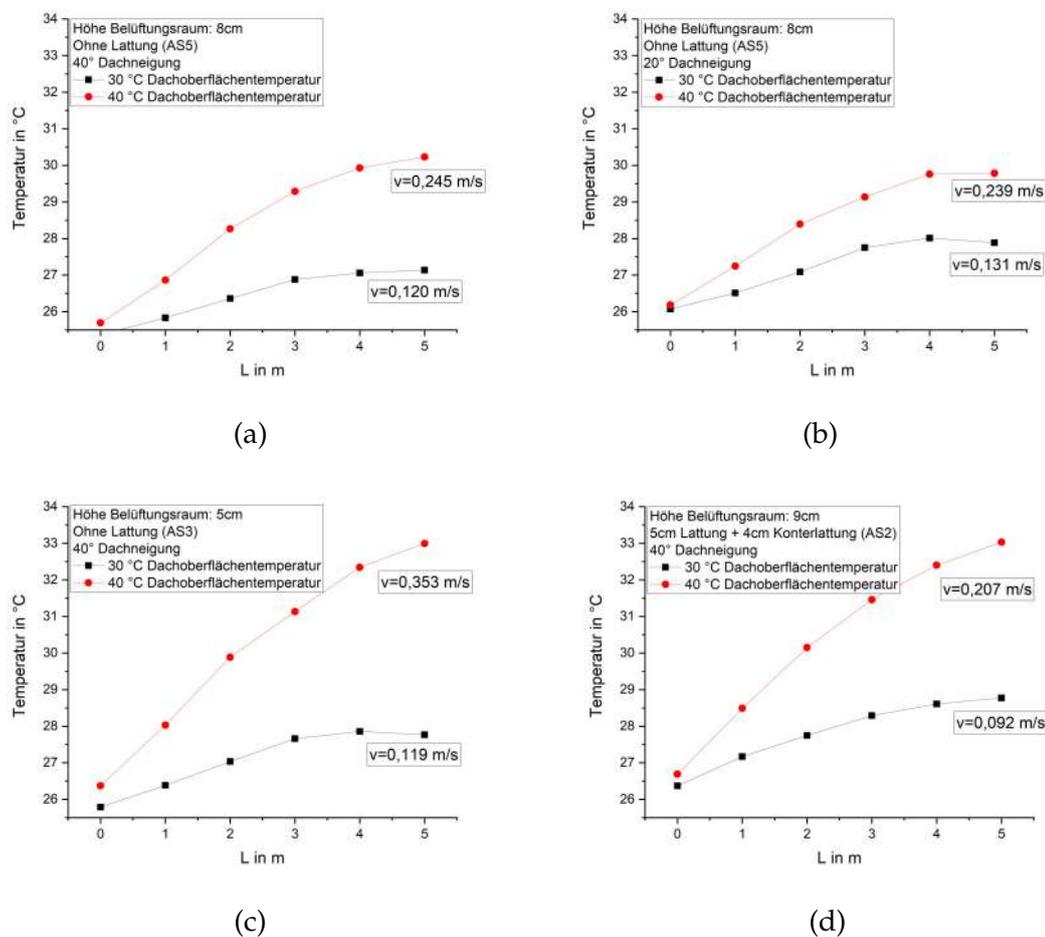


Abbildung 4.11: Temperaturverlauf über die Dachlänge im Belüftungsraum in Abhängigkeit von Dachaufbau und Dachneigung mit gemessener Strömungsgeschwindigkeit

Die Temperaturverläufe über die Dachlänge aus Abbildung 4.11 weisen alle eine abflachende Kurve auf. Legt man einen Funktionsfit auf die Kurven mit der Funktion $y = A_1 \cdot e^{(-\frac{x}{\tau})} + y_0$, ergeben sich Bestimmtheitsmaße R^2 von über

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene

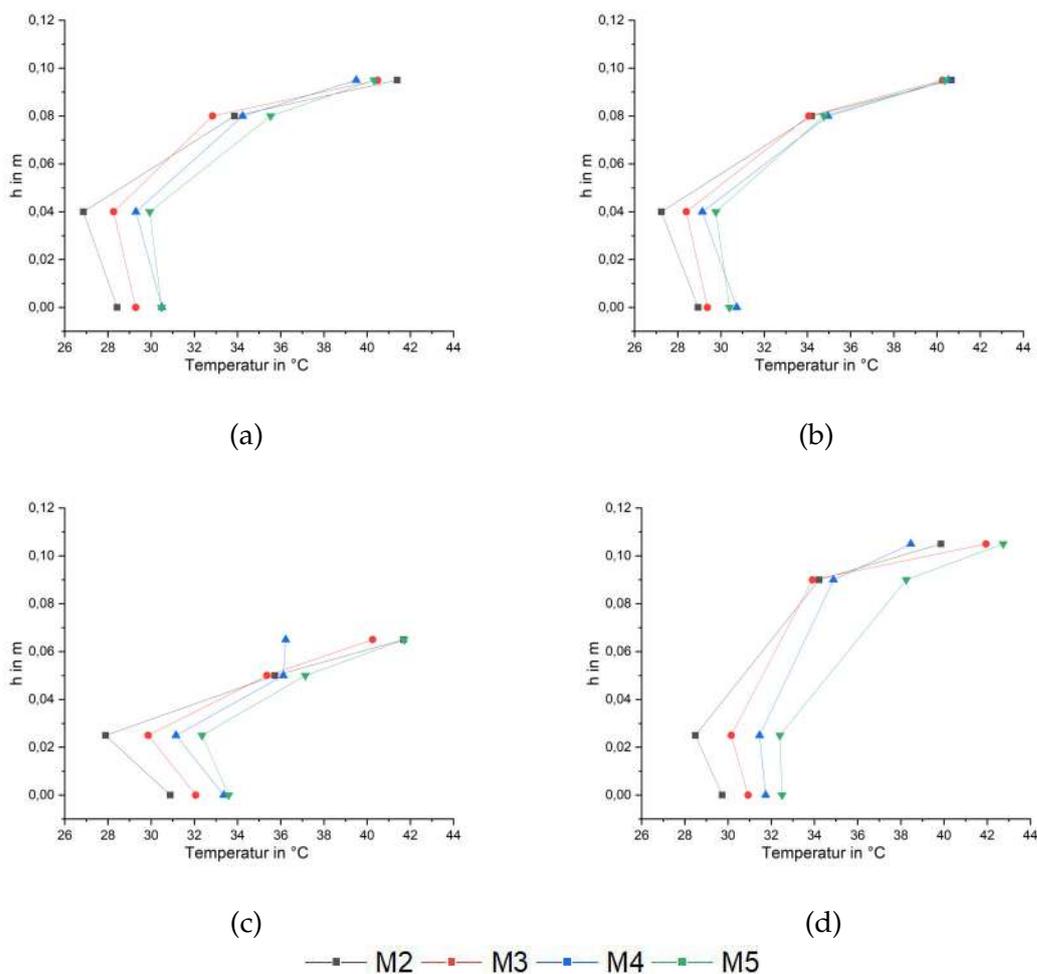


Abbildung 4.12: Temperaturverlauf über die Höhe des Belüftungsraums bei 40 °C Dachoberflächentemperatur; Konfigurationen: (a) 40° Neigung, AS5 (b) 20° Neigung, AS5 (c) 40° Neigung, AS3 (d) 40° Neigung, AS2

0,995. y_0 stellt hier den Wert dar, gegen den die Funktion konvergiert. A_1 ist die Differenz zwischen dem Startwert der Temperatur und y_0 . x ist die Entfernung zum Lufteinlass und t_1 die charakteristische Länge, bei der die Temperatur im Belüftungsraum um 63 % gestiegen ist.

Abbildung 4.13 (a) - (c) zeigt den Fit der e-Funktion an die Temperaturdaten der Luft. Das Dach hat die Konfiguration Außenschale 3 bei einer Neigung von 40° und 5 m Länge. Die gemessene Dachoberflächentemperatur beträgt 40 °C. Die Temperaturen an den einzelnen Messtellen bleiben über einen längeren Zeitraum konstant. Daher kann von einem stationären Zustand ausgegangen werden. Aus den gewonnenen Temperaturkurven lässt sich der Dichteverlauf im Dach

4 Experimentelle Analyse der Luftbewegung in der Hinterlüftungsebene

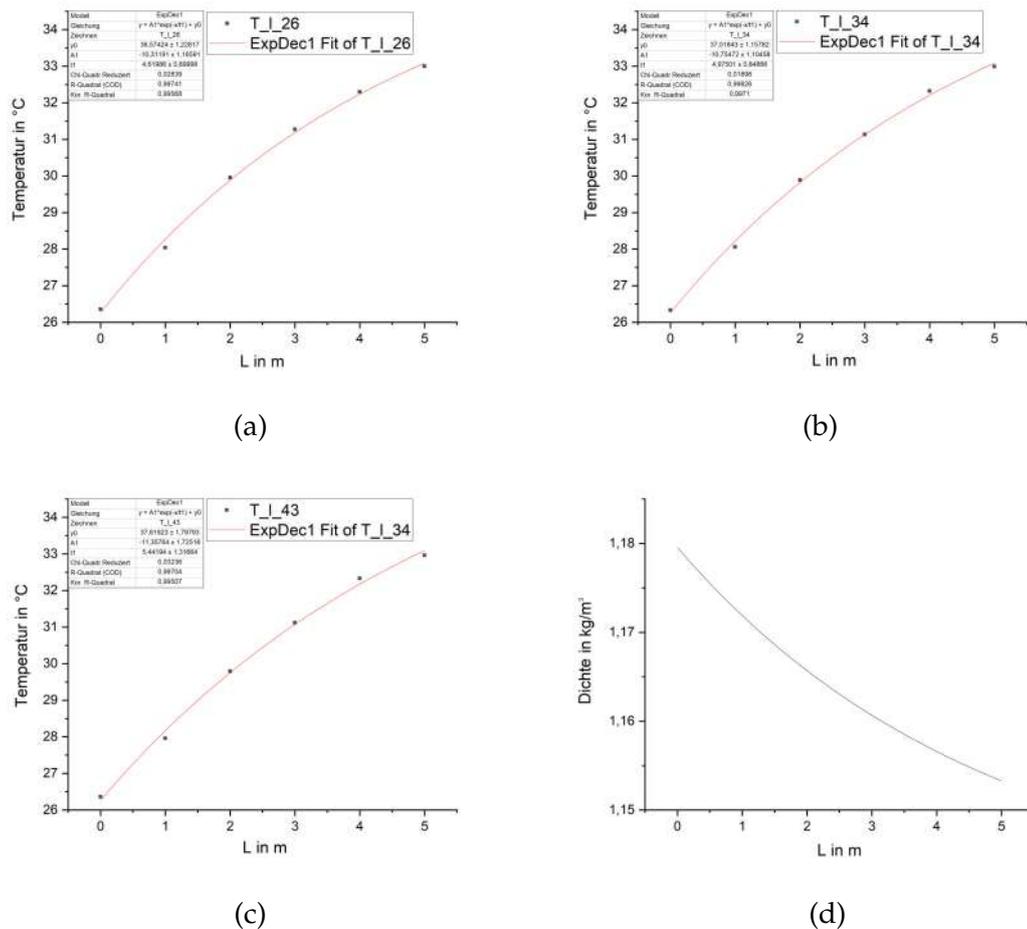


Abbildung 4.13: (a)-(c): Fit der Funktion $y = A_1 \cdot e^{-\frac{x}{H_1}} + y_0$ an die Daten der Lufttemperatur im Belüftungsraum zu verschiedenen Zeitpunkten. (a) zu $t = 0$ min; (b) zu $t = 4$ min; (c) zu $t = 8,5$ min; (d): Dichteverlauf der Luft im Belüftungsraum

erstellen. Unter Annahme isobarer Zustände errechnet sich die Dichte zu $\rho_1 = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_1}$. Hierbei ist $\rho_0 = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und $T_0 = 273\text{K}$.

Die Dichte der Luft im Belüftungsraum nimmt bei steigender Temperatur ab (siehe Abb. 4.13 (c)). Mit dem exakten Verlauf der Dichte lässt sich Gleichung 3.5 nach Δp lösen.

Wird mit dem so errechneten Δp die Stömungsgeschwindigkeit ermittelt, lässt sich erkennen, ob die gemessene Temperaturkurve mit der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit übereinstimmt.

$T_{l,mittel}$ gibt die mittlere Temperatur im Belüftungsraum an. Diese errechnet sich über $T_{l,mittel} = \frac{\int_0^H T_l(z) dz}{H}$.

Konfiguration	$T_{l,mittel}$	$\Delta p_{errechnet}$	$v_{errechnet}$	$v_{gemessen}$
5 m, 40°, AS3	30,23 °C	0,63 Pa	0,672 m/s	0,360 m/s
5 m, 40°, AS1	26,78 °C	1,78 Pa	0,532 m/s	0,441 m/s
2,5 m, 40°, AS3	27,30 °C	0,45 Pa	0,507 m/s	0,394 m/s
2,5 m, 40°, AS2	27,03 °C	0,47 Pa	0,372 m/s	0,293 m/s
2,5 m, 20°, AS2	31,63 °C	0,76 Pa	0,482 m/s	0,278 m/s

Tabelle 4.3: Berechnete und gemessene Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Dachkonfigurationen

Die aus den Temperaturdaten ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten ergeben durchgehend höhere Werte als die tatsächlich gemessenen (siehe Tabelle 4.3).

Das bedeutet, dass die errechneten Druckdifferenzen zu hoch sind.

Daraus folgt, dass das tatsächliche mittlere Temperaturprofil etwas niedrigere Temperaturen aufweisen muss als sie im Versuchsaufbau ermittelt wurden.

Die Frage, was eine gute mittlere Temperatur im Belüftungsraum ist, kann hier nicht beantwortet werden. Dafür wären die tatsächlichen Werte für den treibenden Druckunterschied zwischen ausströmender Luft am First und Außenluft notwendig. Diese konnten am Versuchsaufbau nicht gemessen werden.

4.9 Bestimmung des Gesamtwiderstands des Dachsegments

Der Gesamtwiderstand des Daches lässt sich über die Gleichung

$$\zeta_{ges} = \frac{2 \cdot g \cdot h \cdot dT}{T_a \cdot v^2} - 1 \quad (4.3)$$

mit

$$\begin{aligned} g &= 9,81 && \text{in } \frac{m}{s^2} \\ h &= \sin(\alpha) \cdot l && \text{in } m \\ dT &= T_i - T_a && \text{in } K \\ T_a &&& \text{in } K \\ v &&& \text{in } \frac{m}{s} \end{aligned}$$

zurückrechnen.

Dies wurde in OriginPro 2019b für die Konfigurationen $l = 5$ m und Außenschale 1 (Abb. 4.14), 2 (Abb. 4.15) und 3 (Abb. 4.16) sowie $l = 2,5$ m und Außenschale 2 (Abb. 4.17) und 3 (Abb. 4.18) durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei steigender Strömungsgeschwindigkeit der Gesamtwiderstand des Daches abnimmt. Auch sieht man, dass sich die Widerstandswerte von Außenschale 1 und 2 kaum unterscheiden. Bei Außenschale 3 ist durch die fehlende Lattung ein geringerer Gesamtwiderstand als bei Außenschale 1 und 2 gegeben. Das kurze Dach mit 2,5 m und Außenschale 2 weist einen geringeren Widerstand als die Ausführung mit 5 m Länge und Außenschale 2 auf. Dieses Ergebnis stimmt mit der Gleichung 3.16 überein. Der Reibungsbeiwert durch die begrenzende Rohrwandung ist direkt von der Dachlänge abhängig und wird bei steigender Dachlänge größer.

In den jeweiligen Graphen sind auch die Ergebnisse der ζ_{ges} - Werte aus dem Matlab Modell eingetragen (siehe Kapitel 5.1). Die Prognose des Gesamtwiderstands für das 2,5 m Dach stimmt in weiten Teilen mit den Messdaten überein. Beim 5 m Versuchsaufbau zeigt sich jedoch eine größere Differenz zwischen Prognose und Messdaten. Ein Grund hierfür könnte die einfache Addition der Zeta-Werte sein. Diese ist offenbar nur zulässig, wenn zwischen den Einzelwiderständen so viel Abstand gegeben ist, dass sich die Strömung wieder vollständig ausbilden kann. Ist der Abstand zwischen den Einzelbauteilen kleiner, stellt sich in der Regel ein höherer Widerstand ein als bei Addition der Einzelwiderstände. Da die Anzahl der Latten bei größeren Dächern zunimmt, wächst der Fehler bei zunehmender Dachlänge. Zudem scheint der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung nicht bei einer Reynoldszahl von $Re_{krit} = 2300$ stattzufinden.

Berechnet wurden die Bewegungswiderstände für eine Wandrauhigkeit von $k_R = 1mm$.

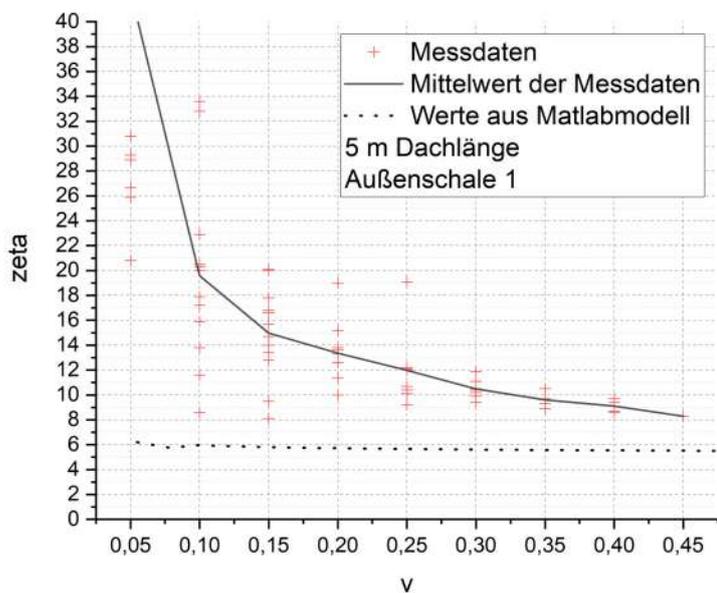


Abbildung 4.14: Mittelwert Zeta, 5m, Außenschale 1

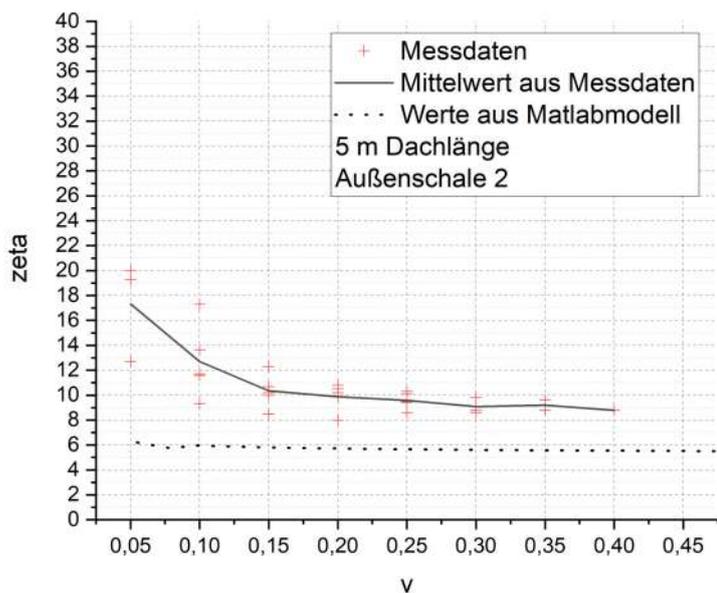


Abbildung 4.15: Mittelwert Zeta, 5m, Außenschale 2

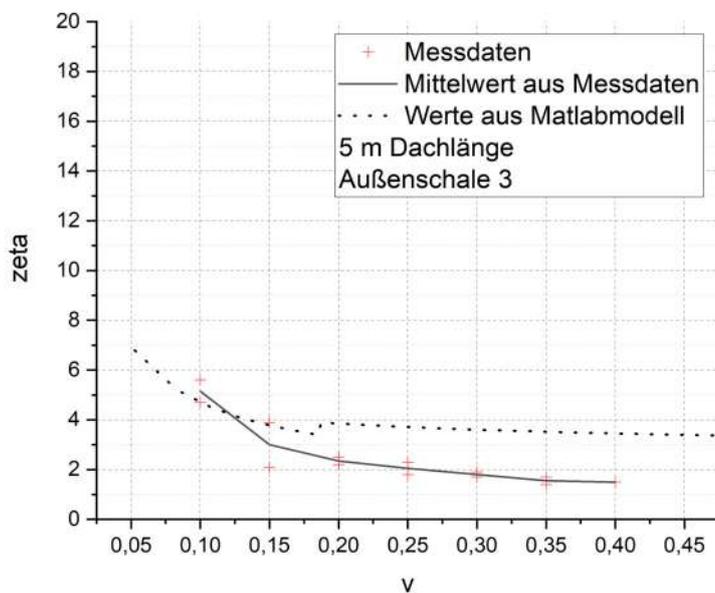


Abbildung 4.16: Mittelwert Zeta, 5m, Außenschale 3

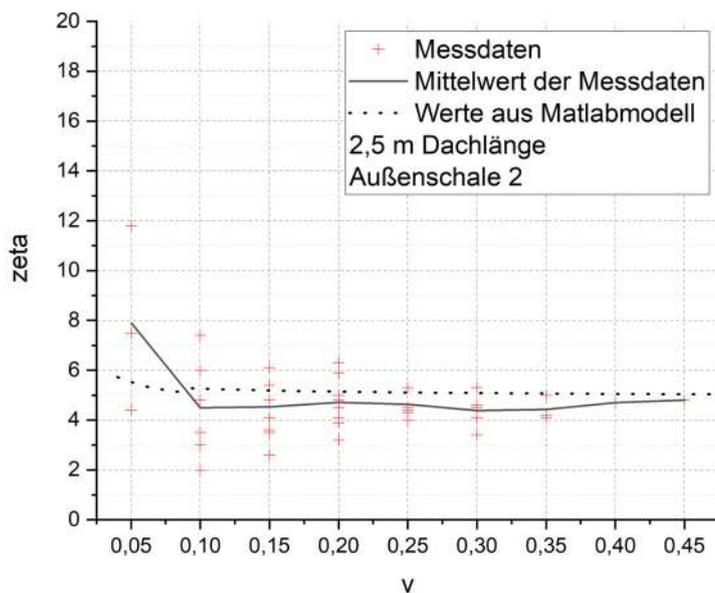


Abbildung 4.17: Mittelwert Zeta, 2,5m, Außenschale 2

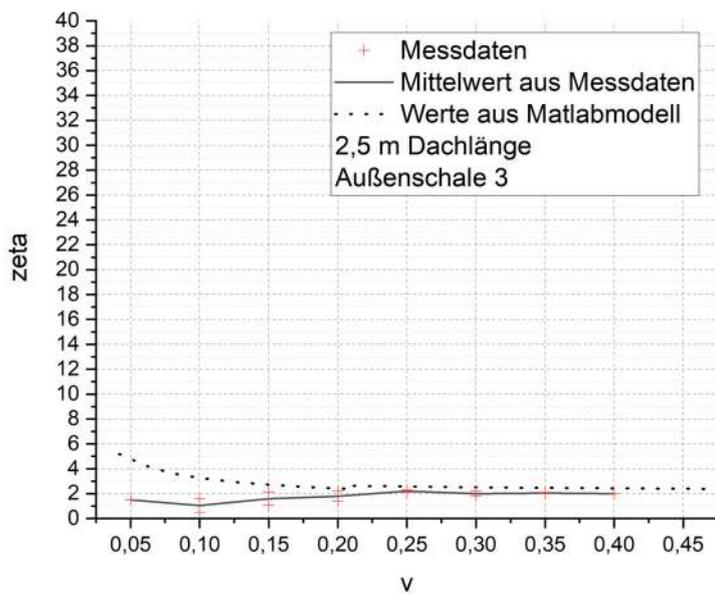


Abbildung 4.18: Mittelwert Zeta, 2,5m, Außenschale 3

5 Abgleich der Messdaten mit theoretischen Modellen

5.1 Erstellen eines Rechenmodells nach K. Liersch in Matlab

Das Rechenmodell basiert auf den Berechnungsgrundlagen von K. Liersch. Zur Programmierung wurde MATLAB R2019a verwendet.

```
%% Berechnung der Stroemungsgeschwindigkeit in der
    Belueftungsebene von Daechern
% nach K. Liersch Belueftete Dach- und Wandkonstruktionen
    ; Band 3 - Daecher
% erstellt von Johannes Amos
% Stand: 22.03.2020

%% Reset aller Variablen
clearvars

%% Import der Temperaturdaten aus Datei
% Ti_ = importdata('data_Ti.txt'); %
    Innenlufttemperatur DLE [K]
% Ti = transpose(Ti_);
% Ta_ = importdata('data-Ta.txt'); %
    Aussenlufttemperatur [K]
% Ta = transpose(Ta_);

%% Fester Bereich der Temperaturdaten
Ti = (293:0.1:313); % Innenlufttemperatur DLE [K]
Ta = transpose(293 * ones(length(Ti), 1)); %
    Aussenlufttemperatur [K]
```

5 Abgleich der Messdaten mit theoretischen Modellen

```
%% Parameter
alpha = 40;           % Dachneigung [Grad]
l = 5;                % Laenge Dachkonstruktion [m]
b = 0.785;           % Breite Belueftungsraum [m]
hkla = 0.05;         % Hoehe Konterlattung [m]
hla = 0.04;          % Hoehe Lattung [m]
g = 9.81;            % Erdbeschleunigung [m/s^2]
nQ = 15;             % Anzahl der
    Querschnittsverengungen (Lattung ohne First und
    Trauflattung)

%% Errechnete Parameter
H = sind(alpha)*l;   % Hoehe Dachkonstruktion [m]
h = hkla + hla;     % Hoehe Belueftungsraum [m]
dg = (2*h)/(h/b+1); % Hydraulisch gleichwertiger
    Durchmesser fuer "rechteckigen" Belueftungsraum [m]
dT = Ti - Ta;       % Differenztemperatur innen -
    aussen

%% Widerstand durch Querschnittsaenderungen (Liersch S.
    35ff.)
%% Querschnitte
Al = h*b;           % Belueftungsquerschnitt [m
    ^2]
Ae = Al - b*hla;    % Einlassquerschnitt [m^2]
Aa = Al - b*hla;    % Auslassquerschnitt [m^2]
Aq = Al - b*hla;    % Verjuengungsquerschnitt [m
    ^2]

%% Formstueckparameter
% Einlass
epsilonE = Al/Ae;   % Einlassparameter
% Auslass
epsilonA = Al/Aa;   % Auslassparameter
% Verengung
epsilonQ = Al/Aq;   % Verengungsparameter
```

```

%% Koeffizienten
% Einlass
XE = 1.32;
YE = -3.437;
ZE = 2.516;
% Auslass
XA = -1.092;
YA = -0.453;
ZA = 2.546;
% Querschnittsverengung
XQ = 1.416;
YQ = -3.978;
ZQ = 2.558;

%% Einlasswiderstand
zetaE = (XE*(epsilonE^(-2)) + YE*(epsilonE^(-1)) + ZE)/(
    epsilonE)^2; % Korrektur mit epsilonE^2 (Liersch Seite
    45)

%% Auslasswiderstand
zetaA = (XA*(epsilonA^(-2)) + YA*(epsilonA^(-1)) + ZA)/(
    epsilonA)^2; % Korrektur mit epsilonA^2 (Liersch Seite
    45)

%% Verengungswiderstand
zetaQ_1 = XQ*(epsilonQ^(-2)) + YQ*(epsilonQ^(-1)) + ZQ;
zetaQ = 2*((nQ*zetaQ_1)/(epsilonQ)^2); % Korrektur mit
    epsilonQ^2 (Liersch Seite 45)

%% vl rohrreibungsfrei
sumzetaEAQ = zetaQ+zetaA+zetaE; %Summe der
    Widerstaende
vlreibungsfrei = sqrt((((2*g*H).*dT))./Ta); %
    Stroemungsgeschwindigkeit reibungsfrei

vlreibungsfreidata = transpose(vlreibungsfrei);

```

5 Abgleich der Messdaten mit theoretischen Modellen

```
% fuer plot sqrt(dT/Ta)
sqrtdTta = sqrt(dT./Ta);

%% Reynoldszahl nach vair, kin. Visc, Dichte
% v0 = transpose(13.28*10^(-6) * ones(length(Ti), 1));
    % Kinematische Zaehigkeit bei T0 nach Liersch S. 21
    Tabelle 3.1-2
% T0 = transpose(273 * ones(length(Ti), 1));
% vkin = v0.*((Ti./T0).^(-1.76)); % Kinematische
    Zaehigkeit bei T nach Liersch S. 22 Gl. 3.1-35
% Re = vlreibungsfrei.*dg./vkin; %Reynoldszahl zur
    Bestimmung der Rohrreibung

%% Reynoldszahl vereinfacht nach Liersch S.21 3.1-31
Alcm = (h/0.01)*(b/0.01); %Al in cm
Re = 15.*vlreibungsfrei.*Alcm;

%% Rohrreibung
% Formbeiwert Rechteck (Bohl/Elmendorf S. 174)
epsilon_re = (b-h)/(b+h);
phire = 0.878 + 0.0566*epsilon_re + 0.758*epsilon_re
    ^2-0.193*epsilon_re^3;
kR = 0.001; % Materialrauhigkeit Holz in [m]

for i=1:length(Re)
    if Re(i) < 2300
        % laminar
        zetaR(i,1) = phire.*(64./Re(i));
    else
        % turbulent
        fun = @(x)(-2*log10(2.51/(Re(i).*sqrt(x))+kR
            /(3.715*dg))-1/sqrt(x)); % x=zetaR
        zetaR(i,1)=fsolve(fun,1);
    end
end

%% Summe Zeta
```

```
sumzeta = transpose((zetaR.*1)/dg + sumzetaEAQ);

%% Stroemungsgeschwindigkeit
vair = sqrt(((2*g*H).*dT)./Ta)./(1+sumzeta));

%% Ausgabedaten fuer Origin
vairdata = transpose(vair);
sqrtdTTadata = transpose(sqrtdTTa);
sumzetadata = transpose(sumzeta);
```

5.2 Abgleich des Rechenmodells mit den Ergebnissen von K. Liersch

K. Liersch nahm 1978 Untersuchungen zur bauphysikalischen Beurteilung an einem Steildach vor und verglich diese Daten mit seinem theoretischen Modell (siehe Abb. 5.2). Hierbei wurde ein Wohnhaus in Berlin-Mariendorf untersucht. Das Satteldach hatte eine Dachneigung von 48° und eine Dacheindeckung aus Asbestzement, die direkt auf einer Nut- und Federschalung aufgebracht war. Die Schalung wurde mit einer 4/6 cm Konterlattung auf die Sparren aufgenagelt und als Unterdach verwendete man Asbestzementzelluloseplatten. Der Abstand zwischen Schalung und Asbestzementzelluloseplatte betrug 4 cm. Die geometrischen Daten des Daches lassen sich aus Abbildung 5.1 ablesen.

Die Temperaturdaten wurden durch Thermoelemente erfasst und die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit wurde mit einer Indikatorgasmethode erfasst.

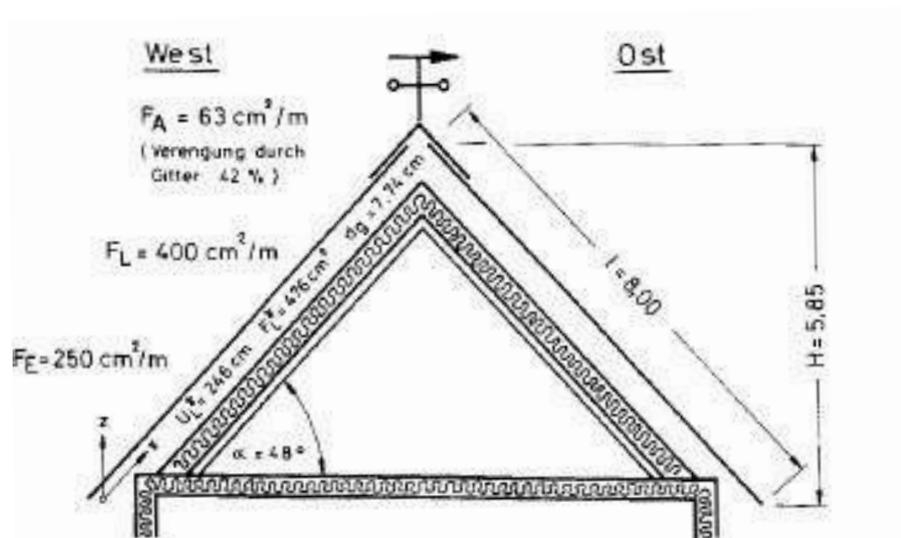


Bild 2. Querschnitt des untersuchten Daches; Hauptabmessungen und strömungstechnische Parameter.

Abbildung 5.1: Geometrische Daten des Versuchsdaches nach K. Liersch in Gesundheits-Ingenieur 101, 1980 [17]

Um abzugleichen, dass das Matlab-Modell auf die gleichen Ergebnisse kommt wie K. Liersch mit seiner Berechnungsmethode, eignet sich ein Abgleich seiner Ergebnisse nach 5.2 mit dem erstellten Matlab-Modell. Hierfür werden folgende Parameter im Matlab-Modell eingetragen:

$T_i = (295:0.1:315);$	in K
$T_a = \text{transpose}(295 * \text{ones}(\text{length}(T_i), 1));$	in K
$\alpha = 48;$	in $^\circ$
$l = 8;$	in m
$hkla = 0.04;$	in m
$hla = 0.00;$	in m
$H = 5.85;$	in m
$dg = 0.0774;$	in m
$nQ = 0;$	ohne Einheit
$A_l = 0.04;$	in m^2
$A_e = 0.025;$	in m^2
$A_a = 0.0063;$	in m^2

Die graphische Ausgabe der Messdaten erfolgt über den Befehl `plot(sqrtdT,vair)`.

Hierbei wird auf der Abszisse die Wurzel der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Belüftungstemperatur und Außentemperatur aufgetragen. Das Ergebnis ist dennoch abhängig von der Aussentemperatur. Da K. Liersch hier keine konkreten Angaben trifft, jedoch von sommerlichen Verhältnissen spricht, wird eine Temperatur von 295 K angenommen. Auf der Ordinate wird die im Belüftungsquerschnitt mittlere Belüftungsgeschwindigkeit aufgetragen.

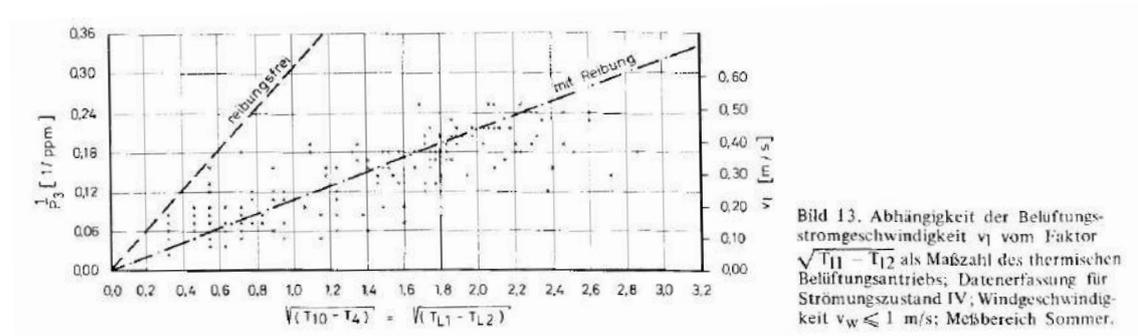


Abbildung 5.2: Messdaten und Berechnung von K. Liersch in Gesundheits-Ingenieur 101, 1980 [18]

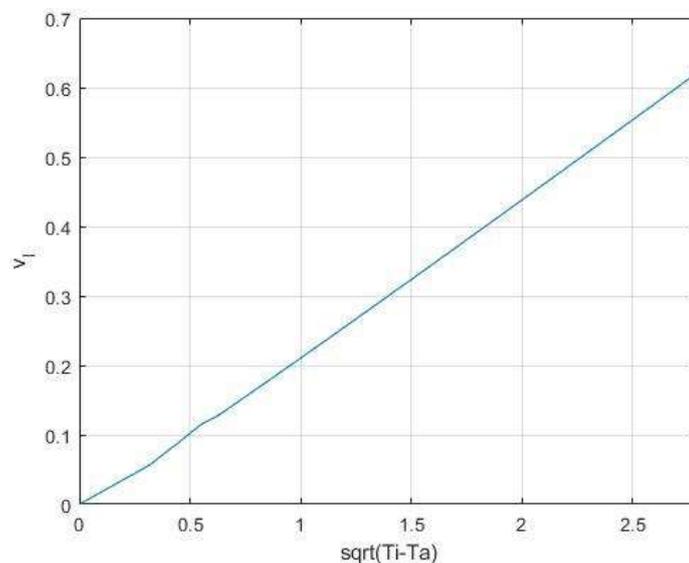


Abbildung 5.3: Ergebnisse der Berechnung in MATLAB mit Reibung

Vergleicht man Abb. 5.2 mit Abb. 5.3 lässt sich sehen, dass die Daten gut übereinstimmen. Kleine Differenzen können durch fehlende Angaben der Außenlufttemperatur, sowie einem anderen Ansatz für den Beiwert des Rohrquerschnitts in Gleichung 3.13 erklärt werden, für welchen Liersch 1,5 ansetzt.

5.3 Abgleich der Messdaten mit dem Rechenmodell nach Kapitel 5.1

Abbildung 5.4 zeigt den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz von Belüftungsraum zu Außenraum und der Strömungsgeschwindigkeit im Belüftungsraum des Dachsegments. Die Abszisse ist hierbei abstrakt als Wurzel der Temperaturdifferenz geteilt durch die Außentemperatur aufgetragen. Hierdurch ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Das Dach hat die Länge 5 m und Außenschale 2. Die grauen Messpunkte zeigen die Messergebnisse bei einer Dachneigung von 40°, die roten Messpunkte bei 30°, die blauen Messpunkte bei 20° und die grünen Messpunkte bei 10°.

Die gepunkteten Linien zeigen das Ergebnis der Berechnung des Matlabprogramms nach Kapitel 5.1. Hier ist zu erkennen, dass die Vorhersage nach K. Liersch höhere Strömungsgeschwindigkeiten prognostiziert, als tatsächlich gemessen werden.

Ähnlich verhält es sich am 2,5 m Dach mit Außenschale 2 und bei den Neigungen 10°, 20°, 30° und 40° (vgl. Abb. 5.5). Hier ist ebenso zu erkennen, dass die Prognose die tatsächlich gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten überschreitet. Wie bereits in Kapitel 4.9 beschrieben, hängt das mit der fehlerhaften Berechnung der Widerstände durch Querschnittsänderungen zusammen.

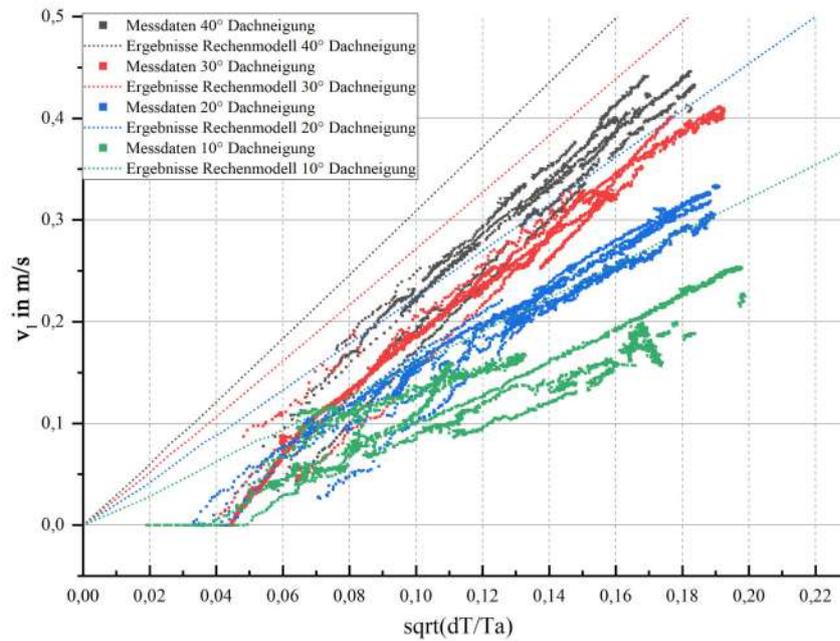


Abbildung 5.4: Abgleich des Rechenmodells mit der Konfiguration 5 m, Außen- schale 2 und Neigungen 10°, 20°, 30° und 40°

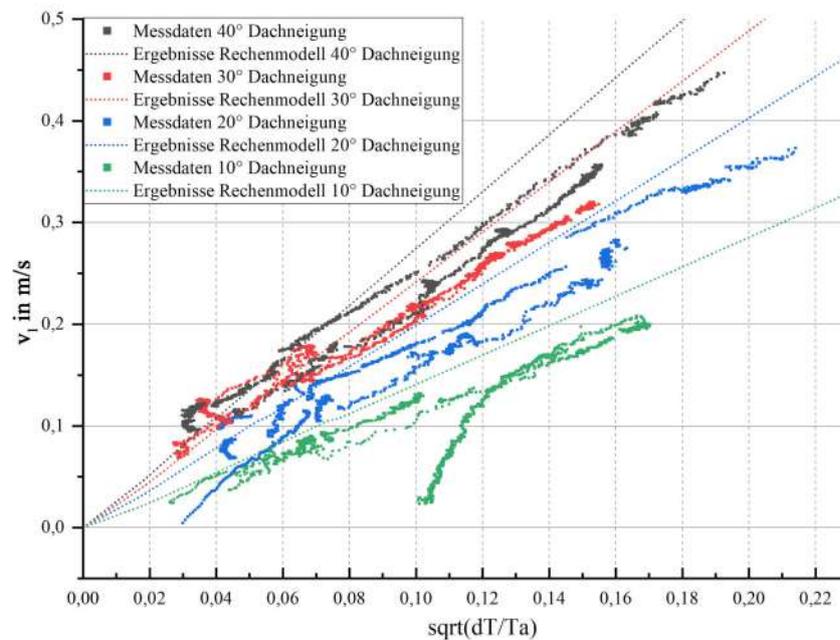
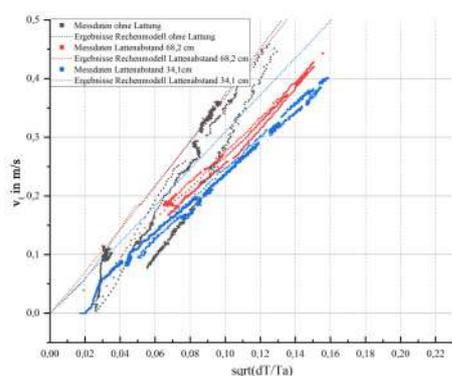


Abbildung 5.5: Abgleich des Rechenmodells mit der Konfiguration 2,5 m, Außen- schale 2 und Neigungen 10°, 20°, 30° und 40°

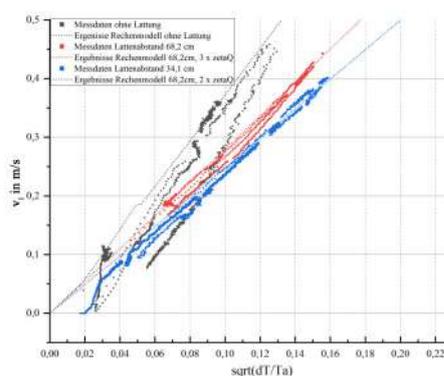
5 Abgleich der Messdaten mit theoretischen Modellen

In Abb. 5.6 zeigt sich, dass sich die Messdaten den Prognosen annähern, wenn man den Parameter ζ_Q anpasst. In Abbildung (a) wurden die Widerstände addiert, in Abbildung (b) wurde bei 64,2 cm Lattenabstand ein Korrekturfaktor von $3 \cdot \zeta_Q$ und bei 32,1 cm Lattenabstand ein Korrekturfaktor von $2 \cdot \zeta_Q$ eingesetzt. Wendet man den Korrekturfaktor von $2 \cdot \zeta_Q$ aus Abb. 5.6 auf die Ergebnisse aus Abb. 5.5 an, lässt sich erkennen, dass die errechneten Werte besser mit den Messergebnissen übereinstimmen (Abb. 5.7). Auch scheint es, als wäre der Korrekturfaktor bei gleichem Dachaufbau, gleichem Lattenabstand und unterschiedlichen Dachlängen konstant. Bei reduzierter Lattenanzahl vergrößert sich der Fehler.

Es zeigt sich, dass der größte Fehler der Bemessung durch die fehlerhafte Bestimmung des Widerstands zustande kommt. Die Widerstände, welche durch Querschnittsänderungen zustande kommen, können am Dach nicht einfach aufsummiert werden.



(a) tatsächliche Anzahl der Latten



(b) 2-faches ζ_Q bei 34,1 cm Lattenabstand
3-faches ζ_Q bei 68,2 cm Lattenabstand

Abbildung 5.6: Abgleich des Rechenmodells mit der Konfiguration 5 m, Außenschale 2 mit 68,2 cm bzw 34,1 cm Lattenabstand und Außenschale 3 sowie 40° Neigung

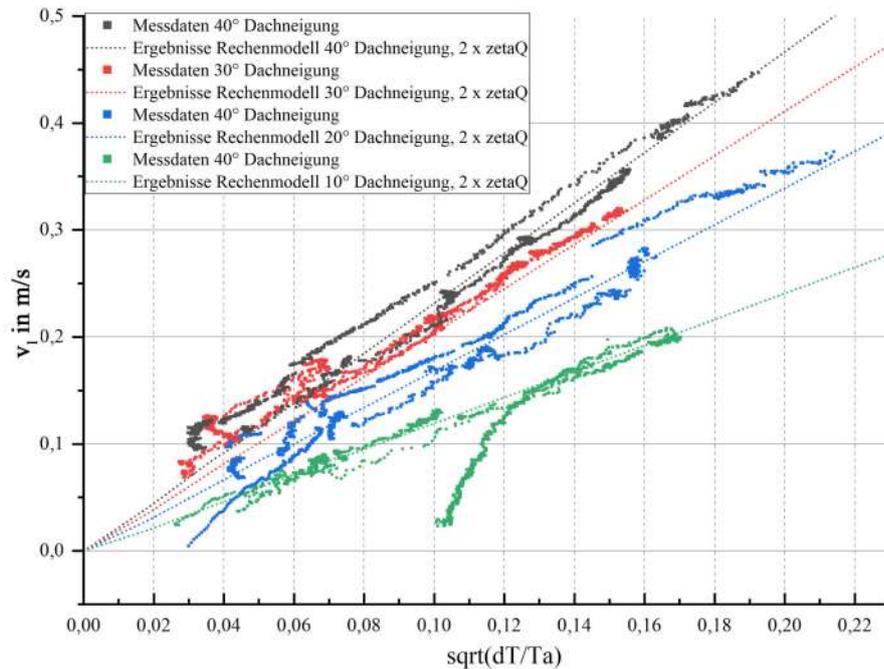


Abbildung 5.7: Abgleich des Rechenmodells mit dem 2-fachen des Widerstands durch Querschnittänderungen ζ_Q mit der Konfiguration 2,5 m, Außenschale 2 und Neigungen 10° , 20° , 30° und 40°

5.4 Abgleich der Messdaten mit einem Rechenmodell auf Grundlage des Kapitels 3.3

Prof. Dr. G. Friedsam hat eine Excel-Berechnungsprogramm für das Temperaturprofil in der Belüftungsebene entwickelt. Das Programm verwendet die in Kapitel 3.3 beschriebene Berechnungsmethode. Die nötigen Eingangsparameter werden in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Parameter	Formelzeichen	Einheit
Dachneigung	α	Grad
Außentemperatur Luft	T_a	°C
Temperatur Dachoberfläche	T_D	°C
Innentemperatur Dachein- deckung	T_{le}	°C
Temperatur Unterspannbahn	T_{li}	°C
Innentemperatur Raum	T_i	°C
Luftdruck	p	hPa
Wärmekapazität der Luft	c_p	J/(kg · K)
Dichte der Luft bei 20 °C	ρ_N	kg/m ³
Strömungsgeschwindigkeit der Luft	v	m/s
Wärmedurchgangskoeffizient Dachdeckung	Λ_e	W/(m ² · K)
Wärmedurchgangskoeffizient Dachaufbau	Λ_i	W/(m ² · K)
Emissionsgrad Dachdeckung	ϵ	/
Emissionsgrad Unterspannbahn	ϵ	/
Höhe der Luftschicht	b	m
Schrittweite	Δx	m
Wärmeübergangskoeffizient Dachdeckung zu Luft	h_{ce}	W/(m ² · K)
Wärmeübergangskoeffizient Un- terspannbahn zu Luft	h_{ci}	W/(m ² · K)
Wärmeübergangskoeffizient Strahlung	h_r	W/(m ² · K)

Tabelle 5.1: Eingangparameter

Es zeigt sich, dass der Versuchsaufbau nicht dazu geeignet ist, alle benötigten Parameter zuverlässig zu erheben.

Zur Bemessung des Temperaturprofils werden die Parameter h_{ce} und h_{ci} aus dem Versuchsaufbau ermittelt.

Diese Parameter können über die Energiebilanz der Wärmeströme in der Luftschicht in Belüftungsraum nach Gleichung 3.19 rückgerechnet werden.

Für die Berechnung lassen sich Gleichungspaare nach 5.1 aufstellen.

$$\begin{aligned} c_1 &= a_1 \cdot h_{ce} + b_1 \cdot h_{ci} \\ c_2 &= a_2 \cdot h_{ce} + b_2 \cdot h_{ci} \end{aligned} \quad (5.1)$$

mit

$$\begin{aligned} c_1 &= c_p \cdot \rho_l \cdot \dot{V}_l \cdot (T_l(x + \Delta x) - T_l(x)) \\ a_1 &= (T_{le}(x) - T_l(x)) \cdot \Delta x \cdot l \\ b_1 &= (T_{li}(x) - T_l(x)) \cdot \Delta x \cdot l \\ c_2 &= c_p \cdot \rho_l \cdot \dot{V}_l \cdot (T_l(x + 2 \cdot \Delta x) - T_l(x + \Delta x)) \\ a_2 &= (T_{le}(x + \Delta x) - T_l(x + \Delta x)) \cdot \Delta x \cdot l \\ b_2 &= (T_{li}(x + \Delta x) - T_l(x + \Delta x)) \cdot \Delta x \cdot l \end{aligned}$$

wobei Δx eine feste Schrittweite sein muss und l die Breite des Belüftungsraums. Zur Ermittlung dieser Werte muss die zugeführte Wärme auf der Dachoberfläche konstant sein. Abbildung 5.8 zeigt ein Temperaturprofil für die Temperaturen der Unterdachbahn (T_{bot}), der Luft im Belüftungsraum (T_{mid}), der Innenoberfläche der Deckung (T_{top}) und der Oberfläche der Deckung (T_{sun}).

Hier zeigt sich, dass die Heizleistung der Heizmatten nicht durchgehend homogen ist und daher die Oberflächentemperaturen auf der OSB-Eindeckung schwanken. Dadurch kommt es an der Unterseite der Eindeckung ebenfalls zu Temperaturschwankungen (siehe Abb. 5.9 und 5.8).

Besonders deutlich zeigt sich das am Temperaturprofil über die Belüftungsraumhöhe. Abbildung 5.9 zeigt das Temperaturprofil über die Belüftungshöhe von Graph 5.8 (b) an den Stellen M2, M3, M4 und M5. Um h_{ce} und h_{ci} errechnen zu können dürften sich die einzelnen Temperaturkurven nicht überschneiden. Ein solcher Zustand konnte jedoch bei keiner Messung gefunden werden. Die Überschneidungen zeigen sich auch bei Abbildung 4.12.

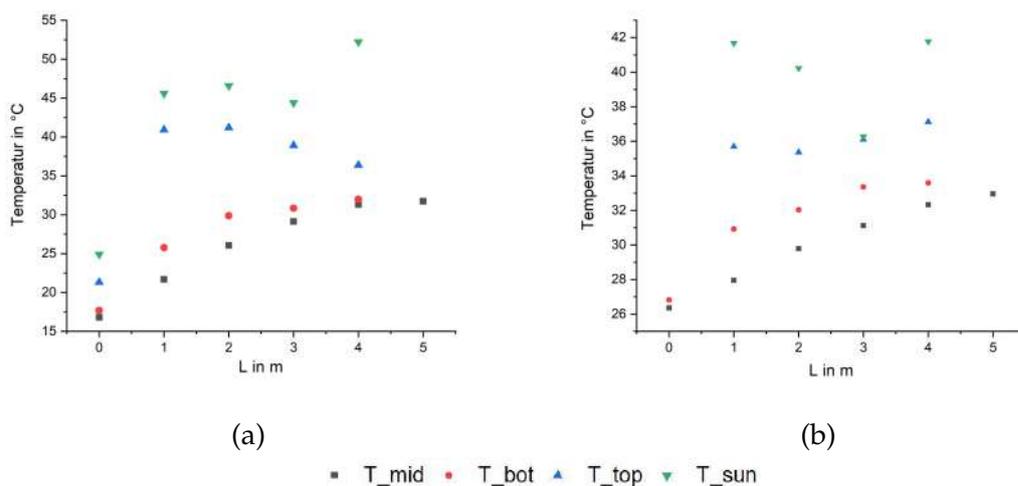


Abbildung 5.8: Temperaturprofil: Unterdachbahn (T_{bot}); Luft im Belüftungsraum (T_{mid}); Innenoberfläche der Deckung (T_{top}); Oberfläche der Deckung (T_{sun});
Dachaufbau: (a) 5 m, 40°, AS2 (b) 5 m, 40°, AS3

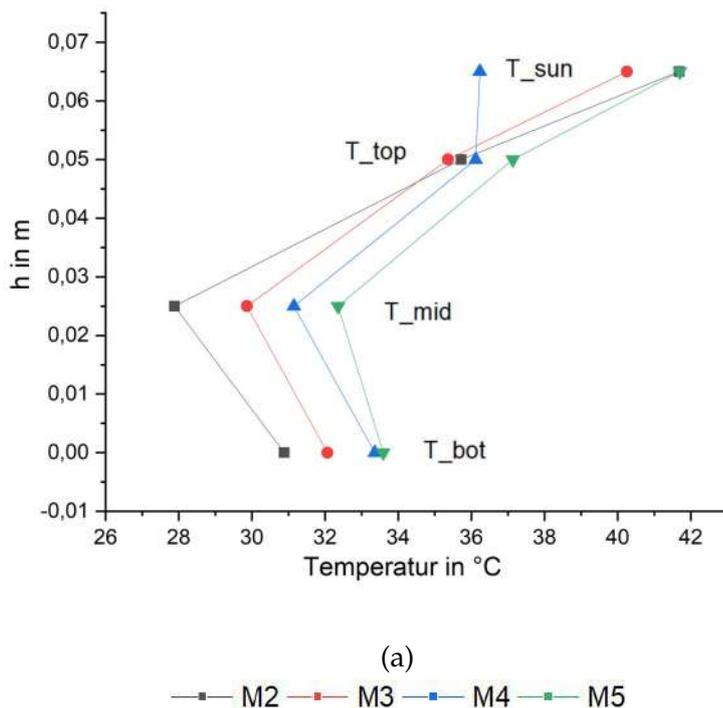


Abbildung 5.9: Temperaturprofil über die Höhe des Belüftungsraums; Konfiguration: 5 m, 40°, AS3

Da die Temperatur auf der Dachoberfläche nicht konstant ist, lassen sich die Parameter h_{ce} und h_{ci} nicht zurückrechnen.

Auch gibt es weitere Schwierigkeiten um diese Theorie mit den gewonnenen Messdaten zu überprüfen:

Der Versuchsaufbau stand in einer großen Halle. Die Hallentemperaturen konnten dort nicht strikt konstant gehalten werden. Zudem sind die Messwerte auf der Dachoberfläche ohne Strahlenschutz gemessen worden, da sie lediglich der Regelung dienten. Daher sind die tatsächlichen Oberflächentemperaturen der Dachoberfläche unbekannt. Ebenso liegen keine Messungen zum Luftdruck in der Halle vor.

Durch die fehlenden bzw. fehlerhaften Parameter lässt sich das Modell mit den erhobenen Daten nicht überprüfen.

5.5 Bestimmung der Ortsabhängigkeit der mittleren Temperatur im Belüftungsraum

Für die Bemessung der Strömungsgeschwindigkeit im Belüftungsraum nach Kapitel 3.1 ist die mittlere Temperatur im Belüftungsraum notwendig. Hier soll überprüft werden, ob ein Zusammenhang hergestellt werden kann, zwischen der Entfernung vom Belüftungseingang und einem Punkt, an dem die mittlere Temperatur im Belüftungsraum auf dem Temperaturprofil erreicht wird. Die Distanz zwischen Belüftungseingang und diesem Punkt soll Länge L_m genannt werden.

Um die mittlere Temperatur zu bestimmen, wird bei mehreren Messungen ein Funktionsfit über das Temperaturprofil im Belüftungsraum gelegt. Mit Hilfe der Temperaturfunktion wird die mittlere Temperatur $T_{l,mittel}$ über $T_{l,mittel} = \frac{\int_0^L T_l(z) dz}{L}$ bestimmt. L ist die Länge des Dachsegments. Anschließend wird abgelesen, in welcher Entfernung zum Belüftungsraumeingang diese Temperatur auftritt.

Lässt sich ein solcher Ort berechnen, kann das künftige Messungen vereinfachen. Beim 5 m Dachsegment liegt der Mittelwert bei $L_{m;5} = 2,16m \pm 0,12m$. Das entspricht einer Entfernung zum Belüftungseingang von $43,17\% \pm 2\%$ der Dachlänge.

Beim 2,5 m Dachsegment liegt der Mittelwert bei $L_{m;2,5} = 1,13m \pm 0,054m$. Das entspricht einer Entfernung zum Belüftungseingang von $45,23\% \pm 2\%$ der Dachlänge.

Konfiguration	$T_{l,mittel}$	L_m	% der Dachlänge
5 m, 10°, AS2	33,63 °C	1,91 m	38,2 %
5 m, 20°, AS2	31,52 °C	2,24 m	44,8 %
5 m, 30°, AS2	32,18 °C	2,19 m	43,8 %
5 m, 40°, AS2	22,77 °C	2,09 m	41,8 %
5 m, 40°, AS2	20,93 °C	2,14 m	42,8 %
5 m, 40°, AS2	32,31 °C	2,29 m	45,8 %
5 m, 40°, AS3	27,54 °C	2,13 m	42,6 %
5 m, 40°, AS3	30,23 °C	2,29 m	45,8 %
5 m, 40°, AS1	26,78 °C	2,15 m	43,0 %
2,5 m, 10°, AS2	26,60 °C	1,05 m	42,0 %
2,5 m, 20°, AS2	25,36 °C	1,07 m	42,8 %
2,5 m, 20°, AS2	31,63 °C	1,14 m	45,6 %
2,5 m, 30°, AS2	25,79 °C	1,12 m	44,8 %
2,5 m, 40°, AS2	27,03 °C	1,20 m	48,0 %
2,5 m, 40°, AS3	22,86 °C	1,16 m	46,4 %
2,5 m, 40°, AS3	27,30 °C	1,18 m	47,2 %

Tabelle 5.2: Werte für die Mittlere Temperatur, die Länge L_m und der Abstand zum Belüftungseingang in %

6 Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse

Es zeigt sich, dass übliche Ziegeleindeckung als ausreichend luftdicht angesehen werden kann. Somit kann die Strömung im Belüftungsraum als Rohrströmung aufgefasst werden.

Die Dachneigung hat einen sehr großen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit im Belüftungsraum. Diese geht mit \sqrt{H} ein. Da die Steigung der Funktion einer Quadratwurzel in positive Achsrichtung sinkt, ist der Einfluss bei geringen Neigungen sehr groß und flacht für große Neigungen ab. So ist bei gleicher Temperaturdifferenz eine größere Differenz der Strömungsgeschwindigkeit zwischen z.B. 20° und 30° festzustellen als zwischen 30° und 40°. Hier liegen die Kurven näher beieinander.

Auch zeigt sich, dass die Höhe des Belüftungsraumes einen großen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit hat. Bei höheren Belüftungsräumen ist diese größer als bei niedrigeren, was zu einem deutlich größeren Volumenstrom führt. So ist ein Dach mit einem höheren Belüftungsraum besser belüftet und es bilden sich niedrigere Temperaturen aus. Bei vergleichbaren Dachoberflächentemperaturen bilden Dächer mit Lattung ein ähnliches Temperaturprofil aus wie Dächer mit gleichem Aufbau ohne Lattung.

Einschnürungen im Belüftungsraum, aufgrund der notwendigen Lattung zur Befestigung der Ziegeleindeckung, haben einen mindernden Einfluss auf die Belüftung. So ist, bei gleichen Differenztemperaturen, ein Belüftungsraum mit 5 cm Konterlattung und 4 cm Lattung schlechter belüftet als ein Kanal mit 5 cm Konterlattung ohne Lattung. Eine Verdopplung des Abstands zwischen der Lattung verbessert die Belüftung nur geringfügig. Das lässt sich gut an dem Widerstandswert ζ_{ges} erkennen. Dieser beträgt bei Dächern mit Lattung ein vielfaches mehr, als bei Dächern ohne Lattung.

Die nach K. Liersch ermittelte Strömungsgeschwindigkeit erzielt verlässliche Daten für Dächer ohne Lattung. Bei vorhandener Lattung ergibt sich ein Fehler, welcher durch die Addition der Einzelwiderstände der Lattung zustande kommt.

Diese lassen sich nicht einfach aufsummieren, da sich die Strömung im Belüftungsraum nicht vollständig ausbilden kann. Das führt zu stärkeren Turbulenzen und höheren Widerständen. Zudem zeigt sich, dass der Fehler bei größeren Lattenabständen nicht zwingend kleiner wird. So ist bei einem Lattenabstand von 34,1 cm der Fehler bei Faktor 2, bei einem Lattenabstand von 68,2 bei Faktor 3.

Der Versuchsaufbau lässt sich leider nicht mit dem Modell zu den thermischen Vorgängen im Belüftungsraum von Prof. Dr. G. Friedsam abgleichen.

7 Ausblick

Mit dem durchgeführten Laborversuch konnte gezeigt werden, dass die strömungsmechanischen Vorhersagen von K. Liersch für ungestörte Rohrströmungen im Rechteckkanal eine hohe Genauigkeit erzielen. Sobald der Volumenstrom durch Einschnürungen gestört ist, kann die Genauigkeit nicht mehr gewährleistet werden. Bei den Versuchen wurde nur ein gerades, offenes Dach untersucht. In einem realen Dach muss die Luft jedoch über einen Auslass am First ausströmen. Diese sind häufig mit Insektenschutzgittern versehen. Auch der Lufteinlass an der Traufe ist in der Regel mit einem Insektenschutzgitter versehen. Bei Dächern gibt es zudem Knicke, bedingt durch Dachgauben oder die allgemeine Dachgeometrie, welche ebenso keinen Einzug in den Versuchsaufbau fanden. Die Auswirkungen eines gesperrten Firsts sind ebenfalls mit Blick auf ihre Beeinflussung der Belüftung zu untersuchen.

Der vorliegende Versuch betrachtet nur sommerliche Verhältnisse mit direkter Sonneneinstrahlung für eine Dachhälfte. Die Auswirkungen anderer klimatischer Bedingungen, wie winterliche Temperaturverhältnisse, winterliche Temperaturverhältnisse mit Unterkühlung der Dachoberfläche und schneebedeckte Oberflächen, sind ebenso ungeklärt und sollten in Zukunft untersucht werden.

Für eine abschließende Klärung der Frage, wie gut die strömungsmechanischen Vorhersagen von K. Liersch auf die Vorgänge in einem realen Dach sind, müssen diese weiteren Parameter ebenfalls untersucht werden.

Um die thermischen Vorgänge im Belüftungsraum besser beleuchten zu können, müsste ein Versuchsaufbau errichtet werden, der auf diese Thematik ausgerichtet ist. Die Erwärmung der Dachoberfläche mittels großflächiger Heizmatten, wie sie im vorliegenden Versuch geschehen ist, hat hierfür eine unzureichende Genauigkeit. Das Temperaturprofil im Belüftungsraum müsste zudem genauer erfasst werden. Auch gilt es zu klären, wie eine exakte mittlere Temperatur im Belüftungsraum bestimmt werden kann. Hierfür wäre beispielsweise eine Druckmessung am Ausgang des Belüftungskanals notwendig, um das gemessene Temperaturprofil mit den theoretischen Werten abzugleichen.

Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter für die Energiebilanzierung	22
4.1	Varianten	26
4.2	Gemessene Konfigurationen	27
4.3	Berechnete und gemessene Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Dachkonfigurationen	42
5.1	Eingangsparameter	58
5.2	Werte für die Mittlere Temperatur, die Länge L_m und der Abstand zum Belüftungseingang in %	62

Abbildungsverzeichnis

3.1	Thermische Vorgänge im unbelüfteten Dach mit belüfteter Dachdeckung nach K. Liersch [15] für sommerliche Dächer	23
4.1	Versuchsaufbau mit 5 m Länge und 40° Neigung	25
4.2	Links: Lageplan der Temperatursensoren; Rechts: Positionen der verbauten Temperatursensoren	29
4.3	Schematischer Plan LMF PK477A	31
4.4	LMF PK477A angeschlossen an 2,5 m Dach mit Bezeichnung der Messtechnik	32
4.5	Vergleich der Messungen von Außenschale 1 mit offenen und abgeklebten Fugen und Außenschale 2. Die Dachneigung beträgt 40°	33
4.6	Vergleich der verschiedenen Neigungen bei einem Dachaufbau mit Außenschale 1 bei 10°, 20°, 30° und 40° Dachneigung am 5 m Dach	35
4.7	Vergleich der verschiedenen Neigungen bei einem Dachaufbau mit Außenschale 2 bei 10°, 20°, 30° und 40° Dachneigung am 2,5 m Dach	35
4.8	Vergleich unterschiedlicher Höhen der Konterlattung bei einem Dachaufbau mit Außenschale 2 und 4 bei 40° Dachneigung am 5 m Dach	36
4.9	Vergleich unterschiedlicher Höhen der Konterlattung ohne Lattung bei einem Dachaufbau mit Außenschale 3 und 5 bei 20° Dachneigung am 5 m Dach	37
4.10	Vergleich der Messungen mit Lattenabstand von 68,2 cm und Lattenabstand von 34,1 cm bei Außenschale 2, 40° Dachneigung und 5 m Länge	38
4.11	Temperaturverlauf über die Dachlänge im Belüftungsraum in Abhängigkeit von Dachaufbau und Dachneigung mit gemessener Strömungsgeschwindigkeit	39
4.12	Temperaturverlauf über die Höhe des Belüftungsraums bei 40 °C Dachoberflächentemperatur; Konfigurationen: (a) 40° Neigung, AS5 (b) 20° Neigung, AS5 (c) 40° Neigung, AS3 (d) 40° Neigung, AS2	40

4.13 (a)-(c): Fit der Funktion $y = A_1 \cdot e^{(-\frac{x}{\tau})} + y_0$ an die Daten der Lufttemperatur im Belüftungsraum zu verschiedenen Zeitpunkten. (a) zu $t = 0$ min; (b) zu $t = 4$ min; (c) zu $t = 8,5$ min; (d): Dichteverlauf der Luft im Belüftungsraum	41
4.14 Mittelwert Zeta, 5m, Außenschale 1	44
4.15 Mittelwert Zeta, 5m, Außenschale 2	44
4.16 Mittelwert Zeta, 5m, Außenschale 3	45
4.17 Mittelwert Zeta, 2,5m, Außenschale 2	45
4.18 Mittelwert Zeta, 2,5m, Außenschale 3	46
5.1 Geometrische Daten des Versuchsdaches nach K. Liersch in Gesundheits-Ingenieur 101, 1980 [17]	52
5.2 Messdaten und Berechnung von K. Liersch in Gesundheits-Ingenieur 101, 1980 [18]	53
5.3 Ergebnisse der Berechnung in MATLAB mit Reibung	53
5.4 Abgleich des Rechenmodells mit der Konfiguration 5 m, Außenschale 2 und Neigungen 10° , 20° , 30° und 40°	55
5.5 Abgleich des Rechenmodells mit der Konfiguration 2,5 m, Außenschale 2 und Neigungen 10° , 20° , 30° und 40°	55
5.6 Abgleich des Rechenmodells mit der Konfiguration 5 m, Außenschale 2 mit 68,2 cm bzw 34,1 cm Lattenabstand und Außenschale 3 sowie 40° Neigung	56
5.7 Abgleich des Rechenmodells mit dem 2-fachen des Widerstands durch Querschnittänderungen ζ_Q mit der Konfiguration 2,5 m, Außenschale 2 und Neigungen 10° , 20° , 30° und 40°	57
5.8 Temperaturprofil: Unterdachbahn (T_{bot}); Luft im Belüftungsraum (T_{mid}); Innenoberfläche der Deckung (T_{top}); Oberfläche der Deckung (T_{sun}); Dachaufbau: (a) 5 m, 40° , AS2 (b) 5 m, 40° , AS3	60
5.9 Temperaturprofil über die Höhe des Belüftungsraums; Konfiguration: 5 m, 40° , AS3	60

Literatur

- [1] P. Bloom. *Venting of Attics and Pitched, Insulated Roofs*. Hrsg. von Norwegian Building Research Institute. Oslo, 2001.
- [2] W. Bohl und W. Elmendorf. *Technische Strömungslehre*. 13. Aufl. Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, 2005.
- [3] R. Borsch-Laaks. „Belüftet oder lieber doch nicht? Tauwasserschutz bei flach geneigten Dächern in Holzbauweise“. In: *Quadriga Sonderdruck Flachdach* (2004).
- [4] Adrien Brun, Etienne Wurtz und Daniel Quenard. *Experimental and numerical comparison of heat transfer in a naturally ventilated roof cavity*. Hrsg. von SimBuild - Fourth National Conference of IBPSA-USA. 2010.
- [5] DIN 4108-3: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. 2018.
- [6] DIN 68800-2: *Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. 2012.
- [7] K. Gertis. „Belüftete Baukonstruktionen - Probleme der Wärme- und Feuchteabfuhr in Luftspalten“. In: *IBP Mitteilung 7* (1973).
- [8] K. Gertis. „Dampfsperre auch beim belüfteten Dach?“ In: *IBP Mitteilung 16* (1976).
- [9] A. Gustavsen. *Numerical Studies of Heat and Air flow in Ventilated Insulated Slanting Roofs*. Hrsg. von Building Physics. 2008.
- [10] Kassensturz. *Undichte Dachfolien, SRF Fernsehbeitrag*. 2015. URL: <https://www.srf.ch/play/tv/kassensturz/video/undichte-dachfolien-sika-laesst-kunden-im-regen-stehen?id=43bace4c-d7e9-4ae2-90fe-5a50b69470e8> (besucht am 16.09.2019).
- [11] B. Knust. *Bestimmung des thermisch induzierten Luftvolumenstroms in der Hinterlüftungsebene von flachgeneigten Dächern*. Hrsg. von TU-Wien. Wien, 2019.

- [12] P. Kölsch. *Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparmetern*. Hrsg. von Fraunhofer Institut für Bauphysik. Holzkirchen, 2017. URL: https://wufi.de/literatur/Koelsch-Leitfaden_Belueftete_Dachkonstruktionen_de.pdf.
- [13] H. Künzel. *Dachdeckung und Dachbelüftung*. 1. Aufl. Fraunhofer IRB Verlag, 1996.
- [14] H. Künzel und Th. Großkinsky. „Nicht belüftet, voll gedämmt: Die beste Lösung für das Satteldach. Wissenschaftlich gesicherte Untersuchungsergebnisse lassen an der bisherigen Belüftungsphilosophie zweifeln“. In: *bauen mit holz* 6 (1990).
- [15] K. Liersch. *Bauphysik kompakt: Wärme, Feuchte, Schall*. 3. Aufl. Bauwerk, 2007. ISBN: 9783899321814.
- [16] K. Liersch. *Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen. Band 3 - Dächer. Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes*. 1. Aufl. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1986.
- [17] K. Liersch. „Strömungsmechanische Untersuchung am belüfteten Steildach, Teil 1“. In: *Gesundheits-Ingenieur* 101 Heft 1/2 (1980), S. 13–20.
- [18] K. Liersch. „Strömungsmechanische Untersuchung am belüfteten Steildach, Teil 2“. In: *Gesundheits-Ingenieur* 101 Heft 5 (1980), S. 141–148.
- [19] K. Liersch. „Untersuchungen der Wärmeübertragungsvorgänge an einem belüfteten Steildach, Teil 1“. In: *Gesundheits-Ingenieur* 104 Heft 1 (1983), S. 22–36.
- [20] K. Liersch. „Untersuchungen der Wärmeübertragungsvorgänge an einem belüfteten Steildach, Teil 2“. In: *Gesundheits-Ingenieur* 104 Heft 3 (1983), S. 116–124.
- [21] B. Nusser und Teibinger M. *Experimental investigations about the air flow in the ventilation layer of low pitched roofs*. Hrsg. von Holzforschung Austria. Wien, 2013.
- [22] R. Oswald, S. Sous und M. Zöller. *Dauerhaftigkeit von diffusionsoffenen Unterspann- und Unterdeckbahnen unter Eindeckungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014.
- [23] Sunwoo Lee u. a. *An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof*. Hrsg. von Building and Environment. Seoul, 2009.
- [24] L. Susanti u. a. *A laboratory experiment on natural ventilation through a roof cavity for reduction of solar heat gain*. Hrsg. von Energy and Buildings. 2008.

-
- [25] L. Susanti u. a. *Numerical simulation of natural ventilation of a factory roof cavity*. Hrsg. von Energy and Buildings. 2010.
- [26] TetraTec Instruments GmbH. *Grundlagen zur Kalibrierung von Volumen- und Massenstrommessern mit Luft und Gasen*. 2014.
- [27] Giacomo Villi, Wilmer Pasut und Michele de Carli. *CFD modelling and thermal performance analysis of a wooden ventilated roof structure*. Hrsg. von Tsinghua University Press and Springer Verlag. 2009.
- [28] H. Wagner. „Luftdichtigkeit und Feuchteschutz: beim Steildach mit Dämmung zwischen den Sparren“. In: *Deutsche Bauzeitschrift* 37 (1989), S. 1639–1646.
- [29] A. Zoughaib und N. Chami. *Modelling the solar factor of roof systems: study of the role of radiant barriers and traditional insulation*. Istanbul: Istanbul Technical University, 2009. ISBN: 978-975-561-350-5.