

Langzeit-Monitoring von Wandaufbauten in Holz-Massivbauweise im Wohnbau „_massive_living“ in Graz

M-4-02/2015



Simon Günther
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Simon Günther, B.Eng.

Langzeit-Monitoring von Wandaufbauten in Holz- Massivbauweise im Wohnbau „_massive_living“ in Graz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer
Institut für Holzbau und Holztechnologie
DI Andreas Ringhofer
Institut für Holzbau und Holztechnologie
DI Bernhard Wallner
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, April 2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Bei Univ.-Prof. DI Dr. techn. Gerhard Schickhofer möchte ich mich bedanken, dass er mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit zu verfassen. Seine Vorlesungen waren für mich stets eine neue Inspiration und haben mein Interesse für den Baustoff Holz gestärkt.

Ich bedanke mich besonders bei DI Andreas Ringhofer für die Betreuung und Unterstützung beim Erstellen dieser Arbeit. Seine Beurteilungen und Lösungsvorschläge waren sehr wichtig für die erfolgreiche Bearbeitung dieser Arbeit.

DI Bernhard Wallner möchte ich für die durchgehende Motivierung danken und dafür, dass er mir bei der Laboruntersuchung mit Ratschlägen und tatkräftiger Unterstützung zur Seite stand.

Ich bedanke mich bei DI Severin Zimmer von der holz.bau forschungs gmbh für die Einführung in die Modellierungssoftware und die fachlichen Gespräche.

Zudem gilt mein Dank der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, die mir für die bauphysikalische Untersuchung ihre meteorologischen Daten zur Verfügung gestellt haben.

Der größte Dank gilt meiner Familie.

Ich möchte mich bei meinen Eltern Margret und Wilfried für die Unterstützung, das Interesse und vor allem für die mir entgegengebrachte Geduld bedanken. Danke, dass ihr es mir ermöglicht meine Interessen zu verfolgen und mir stets ein vertrauensvoller und ehrlicher Rückhalt seid.

Bei meinen Geschwistern Lena, Andreas und Martin bedanke ich mich, dass ihr mit eurer unterschiedlichen Art oftmals eine Inspiration für Neues seid.

Ich bedanke mich noch bei meinen Studienkollegen, die mir die österreichische Kultur und Lebensform näher brachten und mit denen ich eine lustige Zeit hatte.

Kurzfassung

Bei der Holz-Massivbauweise mit Brettsperrholz stehen insbesondere die Außenwände als Bestandteile der Gebäudehülle unter einer dauerhaften klimatischen Belastung. Temperatur, Wasserdampfgehalt der Luft, Niederschlag, Sonnenstrahlung und Wind bilden hierbei die wichtigsten Einwirkungen. Für die Dauerhaftigkeit und Standsicherheit tragender Holzbauteile gilt es, die klimatische Belastung in gewissen Grenzen zu halten. Holzbauteile, die in einer dauerhaften und geschlossenen Hülle gegen das Außenklima geschützt sind, werden gemäß ÖNORM B 1995-1-1, 2014 in Nutzungsklasse 1 geführt, solange sie die hierin geforderten Grenzwerte einhalten. Ein installiertes Messsystem an der Forschungswohnung „massive_living“ in Graz bietet die Möglichkeit, an einem Fichten- und einem Birken-Brettsperrholz-Wandaufbau das Kriterium der Temperatur und der relativen Luftfeuchte während der Nutzung zu überprüfen. Die vorliegende Arbeit wertet für einen Zeitraum von zwei Jahren mehr als 1,4 Mio. Messwerte aus, stellt den Zusammenhang zur Holzfeuchte im Brettsperrholz her und versucht die Ergebnisse, anhand eines stationären und eines instationären Modells, zu verifizieren. Anhand des Monitorings können das unterschiedliche thermische und hygroskopische Verhalten der beiden Holzarten gezeigt und die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit des Wandaufbaues im Sinne der zuvor getätigten Definition grundsätzlich bestätigt werden. Der Vergleich zu den Modellierungen ergibt zum Teil signifikante Unterschiede, trägt aber dennoch zu einem genaueren Verständnis der thermodynamischen Prozesse in den untersuchten Brettsperrholz-Wandaufbauten bei.

Abstract

Especially the exterior walls as components of the building envelope in solid timber constructions with Cross-Laminated-Timber (CLT) are under permanent climatic stress caused by changes regarding the temperature, water vapor content of the air, rainfall, solar radiation and wind. It is important for the durability and stability of load-bearing timber structures to keep the climatic load within certain limits. According to ÖNORM B 1995-1-1, 2014 wooden components, which are protected in a durable and closed shell against the outer air, are classified in service class 1 as long as they fulfil the herein required limits. An installed measuring system on research apartment "massive_living" in Graz enables the possibility to verify the classification in terms of temperature and relative humidity for a spruce- and birch-CLT-wall assembly during use. The present study analyzes more than 1.4 million measurement values for a period of two years, creates the connection to the moisture content in CLT panels and tries to verify the results by using a stationary and a non-stationary model. Based on the monitoring results, the different thermal and hygroscopic behavior of the two types of wood can be shown and the durability of the wall structure according to the previously given definition can be basically confirmed. In some cases the comparison of the modeling results show significant differences, but contributes to a better understanding of the thermodynamic processes in the studied cross-laminated wall structures.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 ZIEL DER ARBEIT	1
1-2 GLIEDERUNG	2
KAPITEL 2: AKTUELLE FORSCHUNG	3
2-1 PUBLIKATION I	3
2-2 PUBLIKATION II	7
2-3 PUBLIKATION III	11
2-4 ZUSAMMENFASSUNG	14
KAPITEL 3: LITERATURRECHERCHE	17
3-1 EINLEITUNG	17
3-2 HOLZ – AUFBAU	17
3-2.1 Allgemein	17
3-2.2 Makroebene	18
3-2.3 Mikroebene	20
3-3 ROHDICHTE	25
3-3.1 Kenngrößen	25
3-3.2 Einfluss auf die Eigenschaften von Holz	27
3-4 THERMISCHE EIGENSCHAFTEN	27
3-4.1 Wärmeleitfähigkeit	27
3-4.2 Spezifische Wärmekapazität	28
3-5 VERHALTEN GEGENÜBER FEUCHTE	29
3-5.1 Holzfeuchte	29
3-5.2 Sorption	30
3-6 VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER HOLZFEUCHTE	32
3-6.1 Darrmethode	32
3-6.2 Destillationsverfahren	33
3-6.3 Widerstandsmessverfahren	33
3-6.4 Dielektronisches Messverfahren	33
3-6.5 Mikrowellen-Verfahren	34
3-6.6 Radiometrisches Verfahren	34
3-6.7 Spektrometrisches Verfahren	34
3-6.8 Chemisches Verfahren	34
3-6.9 Hygroskopisches Verfahren	35
3-6.10 Bewertung	35
3-7 BAUPHYSIKALISCHE BEGRIFFE UND GLEICHUNGEN	36
3-7.1 Wärmeleitung	36
3-7.2 Eindimensionale stationäre Wärmeleitung	36
3-7.3 Eindimensionale instationäre Wärmeleitung	38

3-7.4	Luftfeuchte.....	38
3-7.5	Wasserdampfdiffusion.....	40
3-7.6	stationärer Wasserdampfdurchgang.....	40
3-7.7	Feuchtebilanzgleichung.....	41
KAPITEL 4: MESSUMGEBUNG UND MESSSYSTEM.....		43
4-1	EINLEITUNG.....	43
4-2	FORSCHUNGSWOHNUNG IN BSP.....	43
4-2.1	Brettsperrholz.....	43
4-2.2	Fichte.....	47
4-2.3	Birke.....	49
4-2.4	Vergleich von Fichte und Birke.....	50
4-2.5	Nutzungsklasse.....	51
4-2.6	Situierung.....	52
4-2.7	Wandaufbau.....	54
4-3	LANGZEITMESSSYSTEM.....	55
4-3.1	Anordnung.....	55
4-3.2	Funktionsweise.....	56
KAPITEL 5: AUFBEREITUNG DER MESSDATEN.....		57
5-1	EINLEITUNG.....	57
5-2	ALLE MESSSTELLEN.....	58
5-2.1	Fichte.....	59
5-2.2	Birke.....	60
5-3	AUßENKLIMA.....	61
5-3.1	Lufttemperatur.....	61
5-3.2	relative Luftfeuchte.....	62
5-4	MESSSTELLEN AUßEN.....	62
5-4.1	Fichte.....	63
5-4.2	Birke.....	64
5-5	MESSSTELLEN BSP.....	65
5-5.1	Fichte.....	66
5-5.2	Birke.....	67
5-6	MESSSTELLEN INNEN.....	69
5-6.1	Fichte.....	69
5-6.2	Birke.....	70
5-7	VERGLEICH FICHTE UND BIRKE.....	72
5-7.1	Wärmedämmung außen.....	73
5-7.2	Wärmedämmung innen.....	74
5-7.3	BSP 5. Lage.....	74
5-7.4	BSP 3. Lage.....	75
5-7.5	BSP 1. Lage.....	75
5-7.6	Vorsatzschale.....	76

5-8	UMHÜLLENDE VON TEMPERATUR UND RELATIVER LUFTFEUCHTE....	77
5-8.1	Fichte.....	77
5-8.2	Birke	78
5-9	ZUSAMMENFASSUNG DES BAUPHYSIKALISCHEN VERHALTENS.....	79
KAPITEL 6: LABOR		81
6-1	EINLEITUNG	81
6-2	MESSUMGEBUNG UND MESSMETHODE	81
6-3	KALIBRIERUNG.....	83
6-4	HOLZFEUCHTE	84
6-4.1	Fichte.....	85
6-4.2	Birke	86
6-4.3	Vergleich Fichte und Birke.....	87
6-4.4	Bewertung	88
KAPITEL 7: STATIONÄRE MODELLIERUNG.....		91
7-1	EINLEITUNG	91
7-2	MATERIALKENNGRÖßEN	91
7-3	ALLE MESSSTELLEN.....	93
7-3.1	Fichte.....	94
7-3.2	Birke	95
KAPITEL 8: INSTATIONÄRE MODELLIERUNG		97
8-1	EINLEITUNG	97
8-1.1	Delphin	97
8-2	ALLE MESSSTELLEN.....	99
8-2.1	Fichte.....	100
8-2.2	Birke	101
8-3	HOLZFEUCHTE	102
8-3.1	Fichte.....	103
8-3.2	Birke	104
KAPITEL 9: VERGLEICHSFÜHRUNG.....		105
9-1	EINLEITUNG	105
9-2	MESSSTELLE WÄRMEDÄMMUNG AUßEN	105
9-2.1	Fichte.....	106
9-2.2	Birke	107
9-3	MESSSTELLE WÄRMEDÄMMUNG INNEN.....	108
9-3.1	Fichte.....	108
9-3.2	Birke	109
9-4	MESSSTELLE BSP 5. LAGE	110
9-4.1	Fichte.....	111

9-4.2	Birke	112
9-5	MESSSTELLE BSP 3. LAGE	113
9-5.1	Fichte.....	114
9-5.2	Birke	116
9-6	MESSSTELLE BSP 1. LAGE	117
9-6.1	Fichte.....	117
9-6.2	Birke	118
9-7	MESSSTELLE VORSATZSCHALE	119
9-7.1	Fichte.....	120
9-7.2	Birke	121
9-8	HOLZFEUCHTE	122
9-8.1	Fichte.....	123
9-8.2	Birke	123
KAPITEL 10: SCHLUSSBETRACHTUNG		125
10-1	RESÜMEE UND AUSBLICK	125
KAPITEL 11: QUELLENVERZEICHNIS.....		129
11-1	LITERATUR	129
11-2	NORMEN	130
11-3	INTERNET	130
11-4	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	131
11-5	TABELLENVERZEICHNIS.....	136
ANHANG A KALIBRIERUNG BIRKE.....		I
ANHANG B STATIONÄRE MODELLIERUNG		II
ANHANG C INSTATIONÄRE MODELLIERUNG		IX

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 ZIEL DER ARBEIT

Holz-Massivbauten aus Brettsperrholz unterliegen genau wie andere Bauwerke den klimatischen Einwirkungen der Natur wie zum Beispiel Temperatur der Außenluft, Niederschlag, Wasserdampfgehalt der Außenluft, Sonnenstrahlung und Wind. Vom Bauwerksinneren heraus werden die Bauteile der Gebäudehülle durch die Temperatur der Innenluft und den Wasserdampfgehalt der Innenluft, der durch die Feuchtigkeitsabgabe der Bewohner und der alltäglichen Nutzung entsteht, belastet. Da diese Einflussgrößen in einem ständigen Wechsel zueinander stehen, kommt es in diesen Bauteilen stets zu einer Anpassung an die sie umgebenden Bedingungen.

Um ein genaueres Verständnis der thermodynamischen Prozesse für derart beanspruchte Bauteile zu erlangen, sind Messungen an diesen vor Ort sinnvoll. Der Forschungsbericht „Dauermessungen der Luftfeuchtigkeit und Bauteiltemperatur in Wandaufbauten aus Fichten- und Birken-Brettsperrholz“, welcher die holz.bau forschungs gmbh im November 2012 veröffentlichte (siehe Ringhofer, et al., 2012), beschäftigt sich mit einer solchen „in-situ“ Messung und legt die Grundlage für die hier dokumentierten Untersuchungen. Wie der Name schon sagt, beschreibt dieser Bericht die Untersuchung zweier Außenwandaufbauten in Fichten- und Birken-Brettsperrholz in einer Forschungswohnung in Graz während der Nutzung. Es werden relative Luftfeuchte und Temperatur im zeitlichen Abstand von 20 Minuten in den beiden Brettsperrholzquerschnitten gemessen und aufgezeichnet. Der Forschungsbericht stellt die Verläufe der beiden gemessenen Parameter für einen ersten Zeitraum vom 31.08.2012 bis 21.11.2012 dar und zieht erste Schlüsse zum bauphysikalischen Verhalten der beiden Außenwandaufbauten. Um jedoch das gesamte Spektrum der Änderungen von relativer Luftfeuchte und Temperatur abzubilden, bedarf es einer längeren Erhebung dieser Messdaten.

Das erklärte Ziel der Arbeit ist es daher, für einen Zeitraum von zwei Jahren die Messdaten von relativer Luftfeuchte und Temperatur am Fichten- bzw. Birken-Brettsperrholzquerschnitt aufzubereiten und grundsätzliche Schlüsse zum bauphysikalischen Verhalten der untersuchten Wandaufbauten zu ziehen. Anschließend wird versucht, die Verläufe mit üblichen Rechenverfahren zu verifizieren. Hierzu wird ein stationäres Modell gemäß ÖNORM B 8110-2, 2003 gewählt, die instationäre Berechnung erfolgt mit Hilfe der Software Delphin des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden.

1-2 GLIEDERUNG

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in neun Hauptkapitel, deren Inhalt nun kurz thematisiert wird.

In Kapitel 2 „Aktuelle Forschung“ werden drei Forschungsarbeiten vorgestellt, die sich ebenfalls mit dem Thema Langzeitmessungen an Holzbauobjekten vor Ort beschäftigen. Die Forschungsarbeiten beleuchten dabei verschiedene Aspekte des Monitorings, wobei die thermischen und hygrischen Eigenschaften der Holzbauteile stets im Mittelpunkt stehen.

Kapitel 3 „Literaturrecherche“ hat das Ziel, dem Leser ein grundlegendes Verständnis für den Werkstoff Holz zu vermitteln. Hierin wird der generelle Aufbau von Holz beschrieben, wie die strukturellen Unterschiede zwischen Nadel- und Laubholz definiert sind und welchen besonderen Einfluss die Rohdichte als Materialkenngröße auf die Eigenschaften des Holzes hat. Das zentrale Thema der Literaturrecherche ist dann die Darstellung des Wissensstandes bezüglich der thermischen und hygrischen Eigenschaften von Holz, welche für die spätere Beurteilung der Mess- und Simulationswerte von besonderer Bedeutung sind. Der letzte Abschnitt des Kapitels bilden grundlegende bauphysikalische Begriffe und Gleichungen, die in die Forschung mit einfließen.

In Kapitel 4 „Messumgebung und Messsystem“ wird zunächst die Forschungsumgebung beschrieben und nochmals ein genauerer Blick auf die verwendeten Materialien und Holzmerkmale geworfen, welche vor Ort zu finden sind. Anschließend wird das Langzeitmesssystem beschrieben, wie es vor Ort funktioniert und eingebaut ist.

Kapitel 5 „Aufarbeitung der Messdaten“ beinhaltet die Verarbeitung der gesammelten Daten von Temperatur und relativer Luftfeuchte vor Ort und zieht gleichzeitig die wichtigsten Schlüsse zum beobachteten bauphysikalischen Verhalten innerhalb der Forschungsumgebung. Dieses Kapitel ist Ausgangspunkt für alle weiteren Untersuchungen und hat einen zentralen Stellenwert im Hinblick auf das Ziel der Arbeit.

Weitere Untersuchungen ergeben sich im Fall des Forschungsprojektes aus einer parallel geführten Laboruntersuchung. In Kapitel 6 „Labor“ wird der Zusammenhang zwischen gemessener Temperatur, gemessener relativer Luftfeuchte und der sich daraus ergebenden Holzfeuchte hergestellt.

Kapitel 7 „stationäre Modellierung“ führt die Ergebnisse einer ersten Simulation an, welche ein erster Versuch zur Reproduktion der Messdaten aus Kapitel 5 darstellt.

Eine zweite Annäherung an die Ergebnisse aus der Langzeituntersuchung wird in Kapitel 8 „instationäre Modellierung“ auf Basis einer Bauphysiksoftware unternommen, deren Ergebnisse dann wiedergegeben werden.

In Kapitel 9 „Vergleichsführung“ werden die Ergebnisse aus Kapitel 5, Kapitel 7 und Kapitel 8 gegenübergestellt und diskutiert.

Kapitel 10 „Fazit“ bildet die abschließenden Schlüsse zur Forschungsarbeit.

KAPITEL 2: AKTUELLE FORSCHUNG

2-1 PUBLIKATION I

Langzeitüberwachung von Holztragwerken

aus (Fellmoser, 2012)

Peter Fellmoser beschreibt in seinem Bericht ein Monitoring-Konzept für die Holzkonstruktion eines Hallenschwimmbades. Unter dem Begriff Monitoring wird in Fellmoser, 2012 generell die Erfassung oder Überwachung von Vorgängen mit Hilfe von technischen Mitteln verstanden, wobei die Wiederholung der Messungen über einen bestimmten Zeitraum im Vordergrund steht. Im Bauwesen werden vor allem Kenngrößen wie Verformungen, Schwingungen, Risse, Temperatur, Feuchte etc. messtechnisch erfasst. Ein solches Monitoring dient zunächst der Überwachung von Bauwerken, gleichzeitig dient es jedoch auch dem besseren Verständnis der beobachteten Vorgänge und kann so auch neue Erkenntnisse zu Bauteileigenschaften und –verhalten liefern. Neben der Überwachung zur Gewährleistung der Sicherheit des Bauwerks kann aufgrund der gewonnen Erkenntnisse so auch beim Erreichen kritischer Zustände auf erforderliche Korrekturen aufmerksam gemacht werden. Demnach dient ein Monitoring auch der Schadensprävention und der Reduzierung der Unterhaltungs- und Sanierungskosten.

Ein Monitoring-Konzept besteht generell aus

- visuellen Inspektionen;
- Erfassung von Kennwerten (Risse, Temperatur, Feuchte, Verformung, etc.);
- regelmäßigen Kontrollen des Systems.

Für die Erfassung der jeweiligen Kennwerte stehen dem Anwender, aufgrund der enormen technischen Fortschritte der letzten Jahre, geeignete Überwachungssysteme zur Verfügung, welche mit modernen Sensornetzwerken und automatischer Datenverarbeitung arbeiten. Dadurch ist auch der Einsatz einer Vielzahl von Messsensoren zur Datenerfassung möglich.

Generell ist Holz aufgrund der Resistenz gegenüber chlorhaltiger Atmosphäre, ein geeigneter Baustoff für Schwimmhallen. Aufgrund eines mangelhaft ausgeführten diffusionsdichten Abschlusses der Gebäudehülle kommt es im vorliegenden Fall jedoch zur Bildung von Kondenswasser im Bereich der Dachüberstände. Die Holzkonstruktion wurde dort mehrmals durchfeuchtet, da Undichtigkeiten im Bereich der Fassaden- bzw. Dachanschlüsse zu finden waren. Hier entweicht feuchte und warme Luft nach außen, da das Lüftungssystem einen leichten Überdruck im Innenbereich des Schwimmbades entstehen lässt und somit ein Druckgefälle entsteht. An der kalten Außenseite kühlt die Luft ab und es kommt zur Kondensatbildung.



Abbildung 2.1: Ansicht Schwimmhalle, aus (Fellmoser, 2012)

Vor allem in den Wintermonaten, wenn das Temperaturgefälle besonders groß ist und da kalte Luft nicht so viel Wasserdampf aufnehmen kann wie warme Luft, kommt es an den auskragenden Torsionsträgern der Dachkonstruktion zu dunklen verfärbten Stellen und Spuren von ablaufendem Wasser (Wasserflecken). Auch die Stahlbauteile der Anschlüsse werden in Mitleidenschaft gezogen und es kommt zu Korrosionsschäden. Diese Schäden führten zu einer Sanierung der kritischen Stellen, jedoch entschied sich der Betreiber zu einer Überwachung der hölzernen Tragkonstruktion, sodass die Einhaltung der zugrunde gelegten Nutzungsklasse sichergestellt werden kann.



Abbildung 2.2: Wasserflecken, aus (Fellmoser, 2012)

Das Monitoring startete im Juli 2010 und beinhaltet als Sicherheitskonzept folgende Punkte:

- kontinuierliche Überwachung der klimatischen Verhältnisse und der Holzfeuchte an ausgewählten Punkten der hölzernen Dachkonstruktion durch elektronische Datenerfassung mittels eines drahtlosen Sensornetzwerkes;
- jährliche Überwachung durch visuelle Überprüfung der wesentlichen Bauteile vor Ort
- regelmäßige Kontrolle des Überwachungssystems.

Da Holz als hygroskopischer Werkstoff sich dem jeweiligen Umgebungsklima anpasst (siehe Kapitel 3-5 der hier vorliegenden Arbeit), kommt es zu einer Änderung der Holzfeuchte innerhalb des Querschnitts. Ein großes Holzfeuchtegefälle führt zu Rissbildung im Bauteil. Außerdem hat die Holzfeuchte Einfluss auf die Volumenzunahme bzw. -abnahme, sowie die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes. Sobald die Werte der Holzfeuchte kritische Werte erreichen, kommt es zu einer Warnung durch das Messsystem. Dadurch werden frühzeitig Gefahrenpotenziale aufgedeckt. Damit nicht nur die bereits geschädigten Stellen untersucht werden, sondern auch eine flächendeckende Untersuchung gewährleistet ist, werden acht Messstellen eingerichtet (siehe Abbildung 2.3). Die Datenerfassung erfolgt elektronisch, wobei an den acht Messstellen jeweils ein Messsensor zu finden ist, der die aufgezeichneten Daten per Funk an den Datenlogger weitergibt. Der Datenlogger übermittelt die erhaltenen Daten per Internet zu einer Online-Datenbank, auf welche mehrere Personen gleichzeitig zugreifen können. Falls keine Internetverbindung vorhanden ist, besteht die Möglichkeit, die Daten via Funkverbindung mittels Handy zu transferieren oder sie können manuell ausgelesen werden.

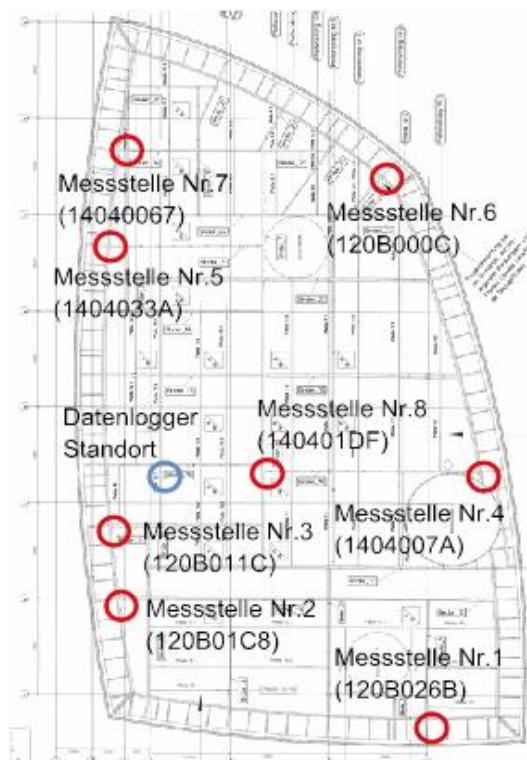


Abbildung 2.3: Lage der Messstellen und des Datenloggers, aus (Fellmoser, 2012)

Die Messsensoren der Messstellen Nr. 1 bis Nr. 7 befinden sich im auskragenden Dachrand außerhalb der Glasfassade an den Seitenflächen der Brettschichtholzträger. Die Messstelle Nr. 8 ist die einzig innenliegende Messstelle. Es werden je Messstelle Temperatur und relative Luftfeuchte der das Holz umgebenden Luft gemessen sowie die Holzfeuchte in 30 mm Tiefe des Brettschichtholzträgers. Die Messsensoren zur Bestimmung der Holzfeuchte funktionieren gemäß dem Widerstandsmessverfahren (vgl. Kapitel 3-6.3 der vorliegenden Arbeit), das die elektrische Leitfähigkeit des Holzes misst. Das Messintervall ist auf eine Stunde festgelegt. Neben dem Messintervall lassen sich auch Grenzwerte für die gemessenen Daten festlegen, damit wie bereits erwähnt, das Monitoring-System bei Über- oder Unterschreitung autorisierte Stellen automatisch per E-Mail informieren kann. Der Grenzwert für die Holzfeuchte wird hier bei 20 % festgelegt, da dieser Wert der oberen Ausgleichsfeuchte von Holzbaustoffen in Nutzungsklasse 2 entspricht (vgl. Kapitel 4-2.4 der vorliegenden Arbeit). Wenn dieser Grenzwert eingehalten wird kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Pilzbefall in der Holzkonstruktion kommt.

Anschließend sind exemplarisch einige Werte grafisch dargestellt. Abbildung 2.4 zeigt zunächst die Darstellung der gemessenen Werte an einer Messstelle, in diesem Fall Messstelle 4. Man erkennt den Verlauf der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der Holzfeuchte für den Zeitraum vom 16.09. bis 23.09.2010. Der Holzfeuchtegehalt liegt zwischen 12,0 und 13,4 %.

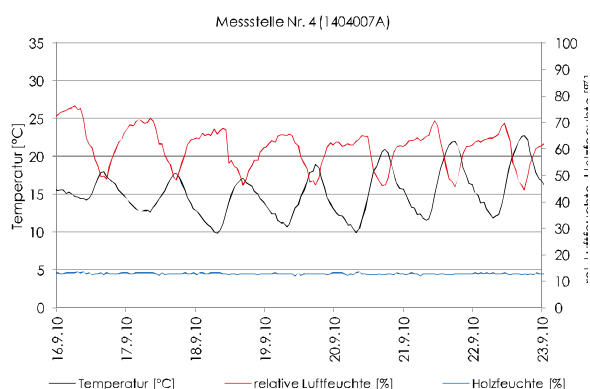


Abbildung 2.4: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Holzfeuchte Messstelle Nr. 4, aus (Fellmoser, 2012)

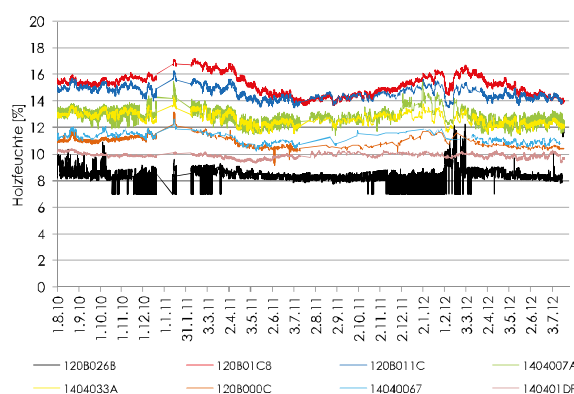


Abbildung 2.5: Holzfeuchte an den acht Messstellen, aus (Fellmoser, 2012)

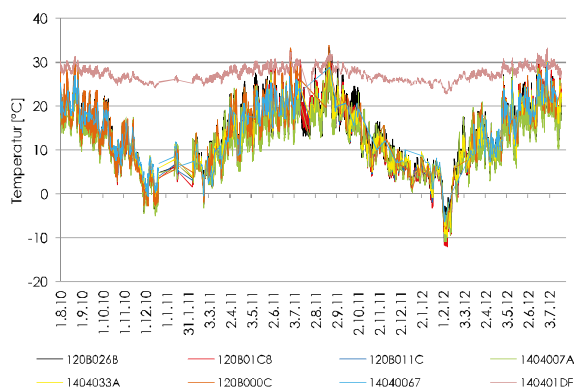


Abbildung 2.6: Lufttemperatur an den acht Messstellen, aus (Fellmoser, 2012)

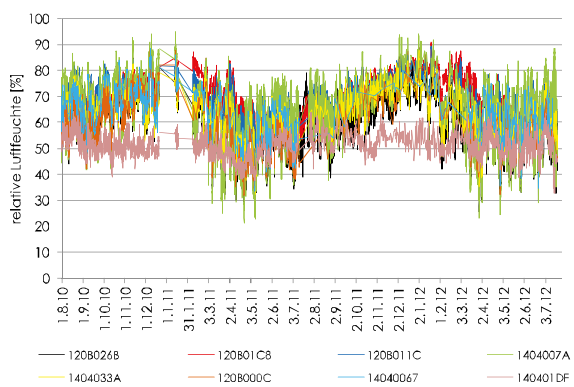


Abbildung 2.7: relative Luftfeuchte an den acht Messstellen, aus (Fellmoser, 2012)

Die Abbildung 2.5 bis Abbildung 2.7 zeigen die Ganglinien der Holzfeuchte, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte an allen acht Messstellen für den Überwachungszeitraum von Juli 2010 bis Juli 2012. Die Auswertungen der Daten für die außen gelegenen Messstellen (Messstelle Nr.1 bis Nr. 7) ergeben eine Holzfeuchte, die im Bereich von 7,9 % und 17,2 % liegt. Für den Innenbereich (Messstelle Nr. 8) liegt die Holzfeuchte zwischen 9,3 % und 10,4 %. Demnach wird der zu Beginn des Monitorings eingestellte obere Grenzwert der Holzfeuchte von 20 % während der zwei Jahre nie überschritten. Die maximal gemessene Holzfeuchte von 17,2 %, welche bei langanhaltend hoher relativen Luftfeuchte und Lufttemperaturen von 0 °C bis 5 °C erreicht wurde, stellt somit keine Gefahr bezüglich der Standsicherheit des Holzbauteiles dar. Anhand des Monitorings und der zusätzlichen visuellen Überprüfung der Holzkonstruktion konnte für den Überwachungszeitraum keine zusätzliche Durchfeuchtung der Holzkonstruktion mit Anfall von Kondenswasser infolge mangelhafter Abdichtung festgestellt werden.

Die Daten der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte lassen sich in Zusammenhang mit der Rissbildung in den Brettschichtholzträgern bringen. Es wird beobachtet, dass bei Wechselklimabeanspruchung Risse in den äußeren Lamellen aufgrund feuchteinduzierten Spannungen entstehen.

Zusätzlich bietet das Monitoring-Konzept dem Betreiber der Schwimmhalle den Vorteil, dass mit relativ geringem Aufwand ein Überwachungsinstrument zur Verfügung gestellt wird, das eine Schädigung zeitnah aufdeckt und somit notwendige Sanierungsmaßnahmen gezielt planbar werden. Dadurch werden Unterhaltungs- und Sanierungskosten reduziert.

2-2 PUBLIKATION II

Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen

aus (Gamper, et al., 2013)

Die zweite Publikation beschäftigt sich mit der Untersuchung von Brettschichtholzbauteilen in Hallenbauwerken mit unterschiedlicher Nutzung aus Nadelholz mit einer Mindestbreite von 140 mm. Die Autoren machen darauf aufmerksam, dass es sich bei den Schäden an weitgespannten Holztragwerken meist um Risse in den Klebefugen und Lamellen von Brettschichtholzbauteilen handelt. Dieses Schadensbild ist in fast 50 % der Fälle auf eine sehr niedrige oder hohe Holzfeuchte bzw. auf starke Schwankungen derselben zurückzuführen. Solche Schwankungen der Holzfeuchte resultieren in den meisten Fällen aus den klimatischen Bedingungen im Gebäude und deren saisonalen Schwankungen, worauf das Holz dann durch Schwind- bzw. Quellerscheinungen reagiert. Dadurch kommt es zu inneren Spannungen im Querschnitt, die dann durch Risse abgebaut werden, da Holz nur eine sehr geringe Querkraftfestigkeit aufweist. Zudem kommt es bei Änderungen des Feuchtegehalts von Holz auch zu Änderungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, werden – wie allgemein bekannt - normativ drei Nutzungsklassen definiert, in welche die Bauteile entsprechend ihres Umgebungsklimas während ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer eingeordnet werden.

Zunächst werden die 21 zu untersuchenden Objekte entsprechend ihrer Nutzung eingeteilt. Für die Gebäude „Schwimmhalle“, „Sporthalle“ und „Produktions- und Verkaufshalle“ gilt, dass sie eine geschlossene Gebäudehülle besitzen und während der Nutzung beheizt sind. Die Gebäude der Nutzung „Reithalle“, „Landwirtschaftliche Halle“ und „Lagerhalle“ hingegen sind unbeheizt und teilweise offen. „Eissporthallen“ weisen eine geschlossene Gebäudehülle auf, können aber sowohl klimatisiert als auch nicht klimatisiert ausgeführt worden sein.

Tabelle 2.1: gewählte Nutzungen und Anzahl der Objekte, aus (Gamper, et al., 2013)

	Nutzung	Anzahl
A	Schwimmhalle	3
B	Eissporthalle	4
C	Reithalle	3
D	Sporthalle	3
E	Produktion und Verkauf	2
F	Landwirtschaftliche Halle	3
G	Lagerhalle	3

Die Messungen vor Ort werden mit Hilfe des Widerstandsmessverfahren durchgeführt, da mit dieser bewährten Methode eine zerstörungsfreie Messung der Holzfeuchtegradienten über den Holzquerschnitt möglich ist. Grundlage dieses Messverfahrens ist die Messung des elektrischen Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit von Holz (vgl. Kapitel 3-6.3 der vorliegenden Arbeit). Das Messverfahren wird im Labor zudem noch verifiziert, indem Vergleichsmessungen an Probekörpern mit dem gewählten Messgerät und zwei Referenz-Messgeräten durchgeführt werden. Es wird eine maximale Abweichung von $\Delta u = 1,3 \%$ bei sehr trockenen Probekörpern registriert und ansonsten wird eine sehr gute Übereinstimmung untereinander festgestellt. Generell ist mit einer üblichen Abweichungstoleranz bei Holzfeuchtemessgeräten im Bereich von $\pm 1,0 \%$ zu rechnen.

Um die Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt vor Ort zu ermitteln, werden je Messstelle vier Paare teflonisierte Einschlagelektroden unterschiedlicher Länge an den Brettschichtholzträgern angebracht. Dadurch wird eine Feuchtemessung in genau definierten Schichten im Bauteil ermöglicht. Die relative Lage der Messpunkte im BSH-Querschnitt ist in Abbildung 2.11 zu erkennen. Über eine zusätzliche Sensoreinheit werden relative Luftfeuchte und Temperatur aufgezeichnet.

Im Zeitraum vom 1. Oktober 2010 bis zum 30. September 2011 werden so an den 21 zu untersuchenden Objekten über 2,2 Mio. Messdaten gesammelt und anschließend ausgewertet. Zum einen ergeben sich Verläufe der relativen Luftfeuchte und Temperatur über die Zeit (siehe Abbildung 2.8), zum anderen lassen sich auch die Messwerte der Holzfeuchte auf diese Art und Weise darstellen (siehe Abbildung 2.10). An jenen Verläufen lässt sich mit zunehmender Messtiefe im Holzquerschnitt sowohl eine gedämpfte als auch eine zeitlich verzögerte Anpassung der Holzfeuchte an die Umgebungsbedingungen erkennen.

Eine weitere Art und Weise, die Messdaten bildlich darzustellen ist deren grafische Auswertung über den Holz-Querschnitt. Hier können die Umhüllenden der minimalen und maximalen Holzfeuchten als auch jene der Holzfeuchtegradienten dargestellt werden (siehe Abbildung 2.9 und Abbildung 2.11). Man erkennt hier deutlich, dass die jeweilige Amplitude der Holzfeuchte bzw. der Holzfeuchtegradienten mit zunehmender Tiefe sinkt. Dies hängt mit der dämpfenden Wirkung zusammen, die das Holz mit zunehmender Dicke auf den Feuchtetransport hat.

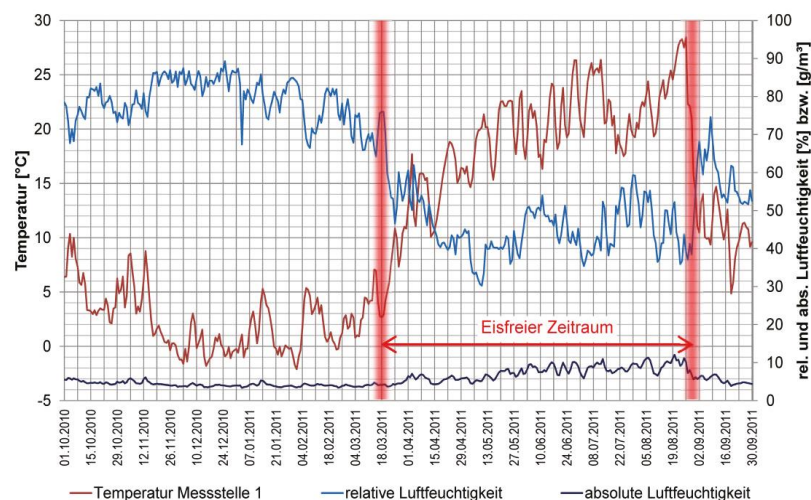


Abbildung 2.8: Temperatur, relative und absolute Luftfeuchte, Eishalle B2, aus (Gamper, et al., 2013)

Für einen schnellen und prägnanten Überblick werden die Ergebnisse in Tabelle 2.2 für alle Objekte nach deren Nutzungsart zusammengefasst. Sie beinhaltet die Mittelwerte und die maximalen Amplituden der Parameter Holzfeuchte, Temperatur und relative Luftfeuchte für den Messzeitraum. Es zeigt sich eine große Bandbreite der klimatischen Bedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte) in Gebäuden mit Holztragwerken in Abhängigkeit der jeweiligen Nutzung. Dies bewirkt ein Spektrum der mittleren Holzfeuchte im Querschnitt von 4,37 % bis maximal 17,12 %.

In gedämmten und klimatisierten Gebäuden fällt der Effekt des jahreszeitlich schwankenden Außenklimas nicht so stark ins Gewicht. In Gebäuden der Gruppe A, D und E herrschen meist trockene und konstante Umgebungsbedingungen. Vor allem in den ersten Jahren nach der Erstellung des Gebäudes stellen die Autoren heraus, dass beim Gebrauch der Heizungsanlage darauf zu achten ist, dass die relative Luftfeuchte nicht zu schnell und zu stark abgesenkt wird. Eine Dämpfung könne durch eine künstliche Luftbefeuchtung oder eine Oberflächenbehandlung der Holzquerschnitte mit einem Feuchteschutzmittel realisiert werden. Generell ist sicherzustellen, dass die Holzfeuchte bei Herstellung, Transport und Einbau schon der späteren Ausgleichsfeuchte entspricht.

Die Gebäude der Gruppe C, F und G sind unbeheizt und ungedämmt und fallen aufgrund ihrer Nutzung durch stark schwankende Umgebungsbedingungen auf. Hier zeichnet sich der erhöhte Einfluss des Außenklimas auf das Innenraumklima ab. Eine bauliche Maßnahme wäre die Aufbringung einer Dachdämmung, um die starken Innenklimaschwankungen zu dämpfen. Lokal, wie zum Beispiel im Bereich von Oberlichtern oder Lüftungsauslässen ist über eine Verwendung von außen auf die Holzbauteile angebrachte, austauschbare Holzwerkstoffplatten nachzudenken.

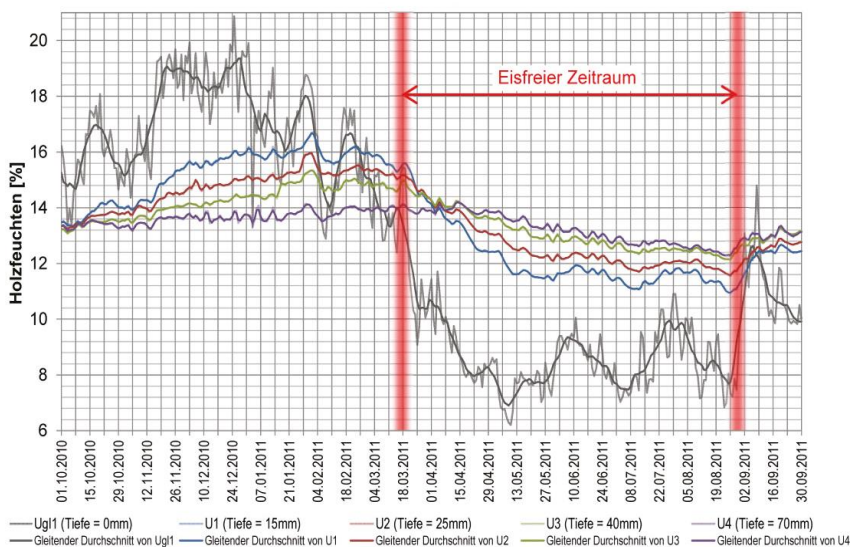


Abbildung 2.10: Holzfeuchten im Querschnitt, Eishalle B2, aus (Gamper, et al., 2013)

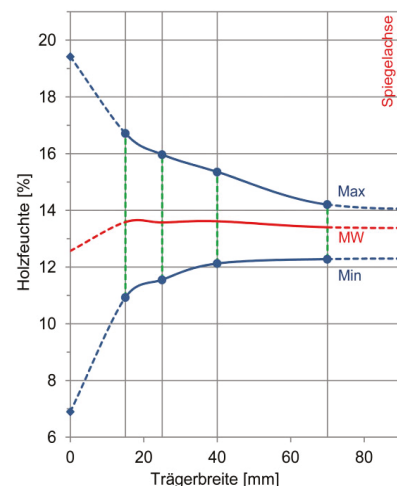


Abbildung 2.9: Umhüllende der Holzfeuchte, Eishalle B2, aus (Gamper, et al., 2013)

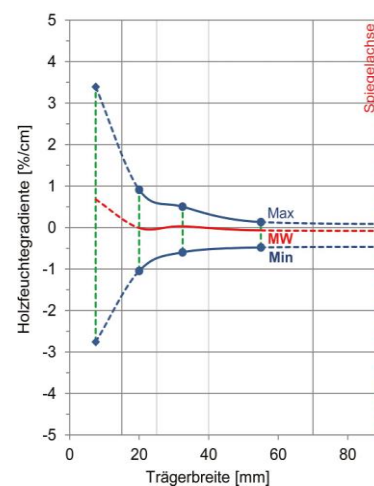


Abbildung 2.11: Umhüllende der Holzfeuchtegradienten, Eishalle B2, aus (Gamper, et al., 2013)

Für die Eissporthallen (Gruppe B) zeigt sich, dass die größten Schwankungen der klimatischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Eisherstellung nach der Sommerpause entstehen. Dieser zeitlich begrenzte Effekt könnte durch eine Klimatisierung gedämpft werden.

Tabelle 2.2: Messergebnisse, aus (Gamper, et al., 2013)

Objekt	Holzfeuchte Messtelle1		Holzfeuchte Messtelle2		Temperatur		Rel. Luftfeuchte	
	MW [%HF]	Max A [°C]	MW [%HF]	Max A [°C]	MW [°C]	Max A [°C]	MW [%r.F.]	Max A [%r.F.]
A1	8,75	1,44	9,26	1,23	29,68	6,67	48,26	6,75
A2	16,09	1,68	14,96	2,62	28,72	6,04	88,60	19,40
A3	8,67	1,83	7,70	1,89	30,48	19,50	45,55	28,95
B1	15,08	6,44	13,91	4,23	9,42	26,15	68,98	43,96
B2	13,54	5,80	15,25	6,56	9,86	29,90	62,20	59,06
B3	10,82	5,06	9,58	4,00	19,91	14,13	40,21	57,00
B4	13,32	1,93	14,91	2,83	9,16	18,82	68,31	44,67
C1	17,12	3,31	16,39	3,43	13,28	22,51	79,71	52,63
C2	15,50	5,14	15,84	3,91	10,53	28,63	77,79	48,57
C3	14,43	5,84	15,48	4,52	9,76	30,48	77,85	52,29
D1	4,37	2,15	5,95	1,22	27,38	26,68	27,66	29,65
D2	7,98	2,02	8,10	2,06	20,58	16,72	42,77	42,01
D3	10,20	3,02	10,01	2,66	20,84	7,90	51,21	33,95
E1	7,70	1,85	7,77	1,55	18,35	17,50	40,86	38,59
E2	4,80	1,86	4,69	2,19	27,09	21,32	25,78	49,93
F1	16,52	3,69	15,77	3,07	11,59	21,58	74,67	45,60
F2	14,88	5,72	15,12	3,70	14,24	22,39	68,35	48,05
F3	14,48	4,83	15,25	4,52	12,60	28,17	69,22	54,08
G1	10,53	8,68	13,94	6,30	10,12	32,64	74,32	62,49
G2	13,27	6,12	12,69	3,61	9,67	32,46	67,13	54,01
G3	11,55	3,57	12,07	2,87	13,36	25,60	61,35	44,04

2-3 PUBLIKATION III

Long term in-situ measurements of displacement, temperature and relative humidity in a multi-storey residential clt-building

aus (Serrano, et al., 2014)

Die Arbeit von Erik Serrano, Bertil Enquist und Johan Vessby beschäftigt sich mit der Langzeituntersuchung von zwei, in Brettsperrholz errichteten, achtgeschossigen Gebäuden in Växjö, Schweden. Die zu untersuchenden Gebäude wurden im Herbst 2006 im Rahmen des Projekts "Limnologen" errichtet und durch eine Kollaboration zwischen der Linnaeus Universität, dem Bauträger Midroc Property Development und dem Brettsperrholzhersteller Martinsons Byggsystem AB kam es 2007 zu dem Forschungsprojekt. Zum einen beinhaltet das Forschungsprojekt die Untersuchung der vertikalen Verformung von Gebäude 2 (siehe Abbildung 2.12) und zum anderen werden in Gebäude 4 an sechs verschiedenen Stellen sowohl Temperatur als auch relative Luftfeuchte im Querschnitt der Außenwand aufgezeichnet. Ziel der Forschung ist es, ein genaueres Verständnis für das statische und klimatische Verhalten von Gebäuden in Brettsperrholz zu erlangen.



Abbildung 2.12: Limnologen, aus (Serrano, et al., 2014)

Die Untersuchung der vertikalen Verformung wird hier nun nicht mehr weiter beschrieben, da sie für das Ziel der vorliegenden Arbeit nicht relevant ist. Es sei nur erwähnt, dass es nach der Errichtung der Gebäude zunächst zu einer Anpassung des Holzes an den eingebauten Zustand kommt und danach schwankt die vertikale Verformung im Bereich von ± 2 mm. Diese Schwankung ist auf das klimatische Verhalten des Holzes in den Außenwand-BSP-Elementen zurückzuführen und geht mit der Schwankung der relativen Luftfeuchte in der Außenwand einher.

Generell bestehen die Gebäude aus einem, in Beton errichteten, Keller- und Erdgeschoss, worauf dann die vorgefertigten Brettsperrholzelemente der Firma Martinsons Byggsystem AB montiert sind, welche dann noch weitere sieben Geschosse bilden. Sowohl die lastabtragenden Wände als auch die Geschossdecken bestehen aus Brettsperrholzelementen. Der Wandaufbau besteht aus einer 20 mm starken zementartigen Verkleidung, 180 mm Mineralwolle außen, 85 mm BSP, 45 mm Mineralwolle innen und einer 15 mm starken Gipskartonplatte. Es ist keine Dampfsperre vorhanden. In dem Wandaufbau sind sechs Messgeräte initiiert, bestehend aus Temperatursensor und Feuchtesensor. Dieser Aufbau befindet sich an sechs verschiedenen Orten im Gebäude.

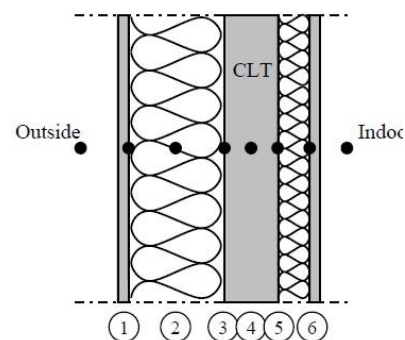


Abbildung 2.13: Wandaufbau und Messpunkte, aus (Serrano, et al., 2014)

Im Zeitraum von Juni 2008 bis November 2013 werden am beschriebenen Wandaufbau relative Luftfeuchte und Temperatur in den sechs Messpunkten aufgezeichnet. Abbildung 2.14 und Abbildung 2.15 zeigen die Verläufe über den besagten Zeitraum in den Messpunkten 3,4 und 5, welche den Messwert an der Außenseite, im Zentrum und an der Innenseite des Brettsperrholzelementes wiedergeben. Die Kurven repräsentieren 168-Stunden-Mittelwerte.

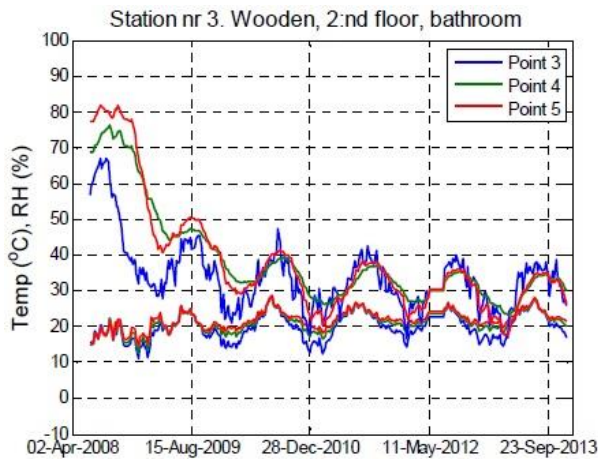


Abbildung 2.14: Temperatur und relative Luftfeuchte Station 3, aus (Serrano, et al., 2014)

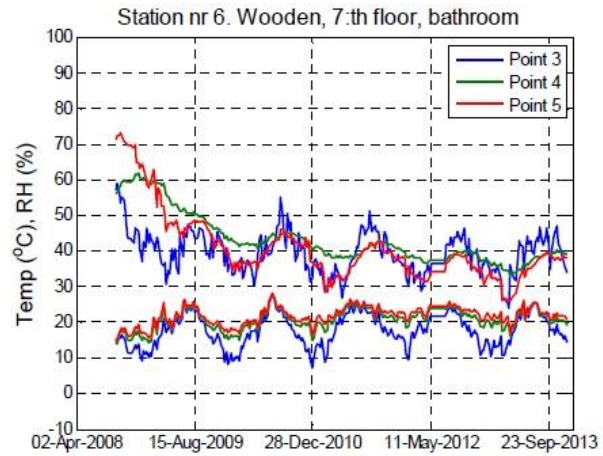


Abbildung 2.15: Temperatur und relative Luftfeuchte Station 6, aus (Serrano, et al., 2014)

Es ist deutlich zu erkennen, dass das Holz in der Bauphase einer größeren Feuchtigkeit ausgesetzt war als im späteren Verlauf. Demnach fällt die relative Luftfeuchte nach einer Austrocknungsphase zunächst stark ab und stellt sich dann wellenartig auf einem Niveau ein.

Eine andere Art, die Resultate zu vergleichen ist ein Vergleich der Messdaten am selben Punkt innerhalb der Wand für die unterschiedlichen Messstationen im Gebäude. Die folgenden drei Abbildungen (Abbildung 2.16 bis Abbildung 2.18) zeigen den jeweiligen Verlauf und es ist deutlich zu erkennen, dass im Zentrum des Brettsperrholzes die Schwankungen der relativen Luftfeuchte und der Temperatur über das Jahr gesehen am geringsten sind. Hier wird das Puffervermögen des Holzes sichtbar.

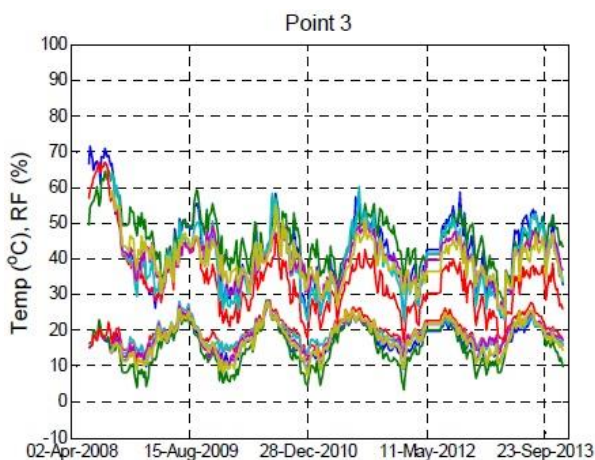


Abbildung 2.16: Temperatur und relative Luftfeuchte Punkt 3 gemäß Abbildung 2.13, aus (Serrano, et al., 2014)

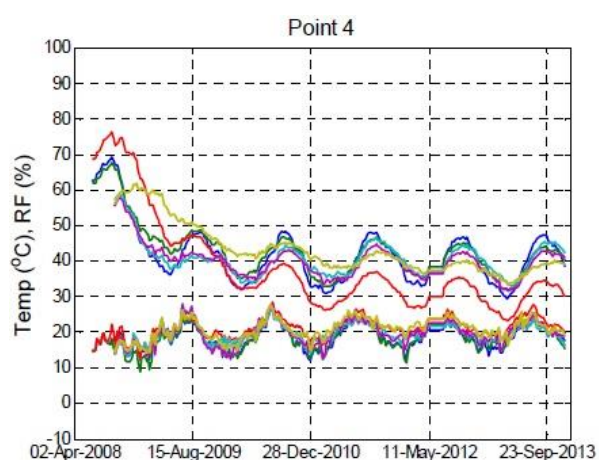


Abbildung 2.17: Temperatur und relative Luftfeuchte Punkt 4 gemäß Abbildung 2.13, aus (Serrano, et al., 2014)

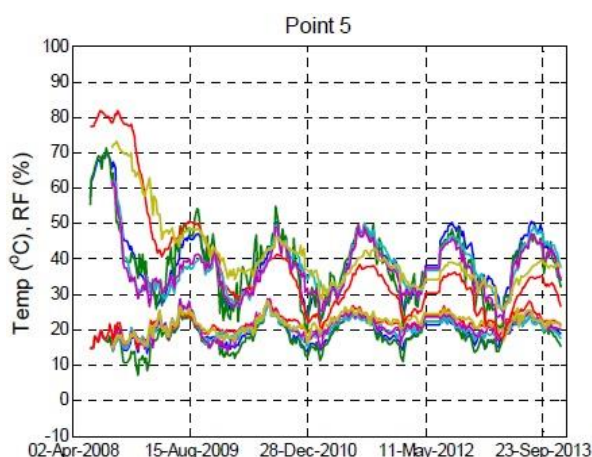


Abbildung 2.18: Temperatur und relative Luftfeuchte Punkt 5 gemäß Abbildung 2.13, aus (Serrano, et al., 2014)

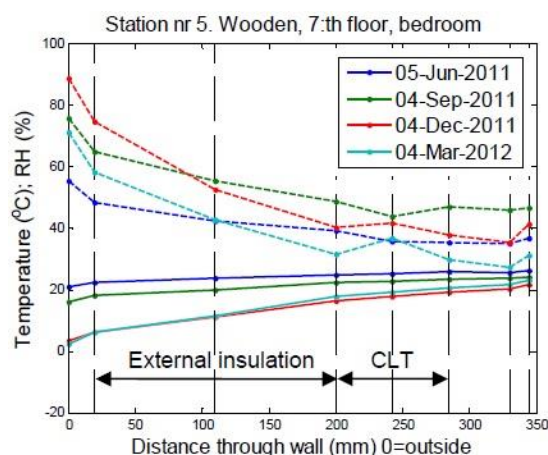


Abbildung 2.19: Temperatur und relative Luftfeuchte Wand Station 5, aus (Serrano, et al., 2014)

In Abbildung 2.19 ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte und der Temperatur für vier verschiedene Tage im Jahr am Querschnitt selbst dargestellt. Hier lässt sich erkennen, dass die größten Differenzen der relativen Luftfeuchte in der Verkleidungsebene und innerhalb der Dämmebene vorkommen. Hinsichtlich der Temperatur sind die größten Schwankungen ebenfalls in den äußeren Ebenen (Verkleidung und äußere Wärmedämmung) zu beobachten.

Als Ergebnis der hier wiedergegebenen Untersuchung stellen die Autoren heraus, dass die benutzte Messtechnik für die Aufzeichnung von vertikaler Verschiebung, relative Luftfeuchte und Temperatur bestens funktioniert. Es wird der Schluss gezogen, dass der größte Einflussfaktor auf die vertikale Verformung der Brettsperrholzkonstruktion die klimatischen Veränderungen sind. Da das Holz auf hygrische Veränderungen mit Quellen und Schwinden reagiert, kommt es zu vertikalen Verschiebungen entlang der Außenwände. Was die Aufzeichnungen und die Bewertung von relativer Luftfeuchte und Temperatur über den Querschnitt der Außenwand anbelangt, so wird auf die schwedische Normung hingewiesen, die besagt, dass eine generelle Grenze der relativen Luftfeuchte von 75 %, für Bauteile innerhalb der thermischen Isolierung während der Nutzung, einzuhalten ist. Dass dieser Grenzwert eingehalten ist, kann zum Beispiel anhand der Abbildung 2.14 nachgewiesen werden. Nach der Anpassung des Holzes an sein Umgebungsklima werden Höchstwerte von 50 % im Brettsperrholz erreicht und es bedarf keiner zusätzlichen Untersuchungen des Materials in Bezug auf den Feuchtwiderstand. Obwohl der Wandaufbau keine Dampfsperre aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass es zu keiner Schimmelbildung oder einer Zersetzung des Holzes aufgrund hoher relativer Luftfeuchte im Gebrauch kommen wird.

2-4 ZUSAMMENFASSUNG

Die angeführten Publikationen setzen unterschiedliche Schwerpunkte, was die jeweilige Herangehensweise an die einzelnen Untersuchungen angeht aber auch die anschließende Ausarbeitung der Ergebnisse wird unter anderen Gesichtspunkten beurteilt. Es lässt sich jedoch allgemein sagen, dass der Wunsch nach einem besseren Verständnis der bauphysikalischen Vorgänge für die jeweiligen Gebäude durchgehend vorhanden ist.

In Publikation I wird von Peter Fellmoser stark der praktische Nutzen einer Langzeitmessung betont. Er stellt heraus, dass ein Monitoring als ein Überwachungsinstrument von Ingenieurbauwerken sinnvoll eingesetzt werden kann, wodurch dann eine Gebrauchstauglichkeit, eine Dauerhaftigkeit und eine Standsicherheit der Bauwerke gewährleistet werden kann. Als technisches Mittel eingesetzt, können aufgrund der gesammelten Informationen Schlüsse gezogen werden, die dann eventuell einen Eingriff und eine Korrektur des vorhandenen Zustandes nach sich ziehen, sodass eine Schädigung womöglich erst gar nicht entsteht oder zumindest frühzeitig erkannt wird. Aufgrund der Automatisierung und der stets bereitstehenden Messungsergebnisse wird ein Langzeitmesssystem als flexibles und rentables Instrument eingestuft. Im konkreten Fall, den die Arbeit beschreibt, ist bereits eine Schädigung festgestellt worden, woraufhin das Monitoring initiiert wurde. Daher richtet sich auch das Ergebnis eher auf die Frage aus, ob weitere Schäden während des Beobachtungszeitraumes festgestellt wurden und ob der Sicherheitsaspekt weiterhin erfüllt ist. (Fellmoser, 2012)

Die Autoren der zweiten Publikation stellen ebenfalls heraus, dass eine Schädigung an weitgespannten Holztragwerken zumeist aus den klimatischen Schwankungen innerhalb der Gebäudehülle resultieren. Das überwiegend festgestellte Schadensbild sind Rissbildungen in Klebefugen und Lamellen der untersuchten Brettschichtholzträger. Vor diesem Hintergrund werfen sie jedoch den Fokus auf das weite Nutzungsspektrum verschiedener Holzbauwerke und bilden die Bandbreite der daraus entstehenden Holzfeuchte ab. Aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsobjekte kann je nach Nutzung eine gewisse Bandbreite der sich einstellenden Holzfeuchte angegeben werden, wodurch die Holzfeuchte schon vor dem Einbau angepasst werden kann. (Gamper, et al., 2013)

Publikation III kommt den Forschungen dieser Masterarbeit, was die Messumgebung und die verwendete Messtechnik angeht, sehr nahe. Erik Serrano und Ko-Autoren legen in ihrer Arbeit ein Messsystem dar, das die Temperatur und die relative Luftfeuchte in einem Außenwandquerschnitt misst. Zudem besteht das tragende Element der Außenwand auch aus einer Brettsperrholzscheibe. Die Untersuchung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte ist parallel an ein Monitoring der vertikalen Verformung gekoppelt, wodurch der Zusammenhang zwischen der mechanischen Eigenschaft des Holzwerkstoffes und dem Feuchtegehalt, welcher zu einer Quellung bzw. einem Schwinden des Holzes führt, hergestellt ist. Was die reine Untersuchung der klimatischen Entwicklung innerhalb des Wandquerschnittes angeht, so werden die Ergebnisse rein vor dem Hintergrund begutachtet, ob der Wandaufbau „funktioniert“. Es wird hierbei untersucht, ob ein Risiko bzgl. Schäden aufgrund erhöhter relativer Luftfeuchte in der BSP-Konstruktion besteht (Serrano, et al., 2014). In Bezug auf die vorliegende Masterarbeit, werden bei Erik Serrano und Ko-Autoren jedoch keine Angaben zur Holzfeuchte gemacht. Die Holzfeuchte ist zum einen wichtiger Bestandteil in den, in der ÖNORM B 1995-1-1, 2014 festgelegten Nutzungsklassen (vgl. Kapitel 4-2.5 der vorliegenden Arbeit), welche die

Gültigkeit der baustatischen und bauphysikalischen Annahmen sicherstellen. Und zum anderen dient eine gemessene Holzfeuchte der richtigen Wahl der Einbaufeuchte in den Holzbauteilen.

Tabelle 2.3: Zusammenfassung der aktuellen Forschungspublikationen

	Publikation I	Publikation II	Publikation III
Messprogramm	Monitoring an 8 BSH-Dachträgern in einem Hallenschwimmbad	Langzeitmessung an 21 BSH-Holzbauteilen in unterschiedlich genutzten Bauobjekten	Langzeitmessung an BSP-Wandelementen an sechs unterschiedlichen Orten desselben Gebäudes in Växjö, Schweden
Ziel der Messung	Überwachung der klimatischen Verhältnisse am Dachträger Überwachung der Holzfeuchte Gewährleistung der Sicherheit des Bauwerkes	Erfassung der unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse je nach Nutzung Messung der Holzfeuchte über den gesamten BSH-Querschnitt	Entwicklung der Messtechnik und der Datenspeicherung Erkenntnisse zum strukturellen und klimatischen Verhalten des Gebäudesystems in BSP gewinnen
eingesetzte Technik Sensoren, Anzahl, Messverfahren	Sensoren zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchte an der BSH-Oberfläche Sensoren zur Messung der Holzfeuchte in 30 mm Tiefe des BSH gemäß dem Widerstandsmessverfahren	Sensoren zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchte an der BSH-Oberfläche Sensoren zur Messung der Holzfeuchte in 15, 25, 40 und 70 mm Tiefe des BSH gemäß dem Widerstandsmessverfahren	Sensor zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchte an sechs Stellen innerhalb der Wandquerschnittes
Messdauer	Juli 2010 bis Juli 2012	Oktober 2010 bis September 2011	Juni 2008 bis November 2013
Wesentliche Erkenntnisse	Rissbildung im BSH aufgrund klimatischer Wechselbeanspruchung Holzfeuchte im Bereich von 7,9 % und 17,2 % Bereitstellung eines effektiven Überwachungsinstrument für den Hallenschwimmbadbetreiber	Effekt des jahreszeitlich schwankenden Außenklimas in gedämmten und klimatisierten Gebäuden geringer als in unbeheizten und ungedämmten Gebäuden, was eine wesentliche Auswirkung auf die Holzfeuchte hat	geeignete Messtechnik für die Aufzeichnung von Temperatur und relativer Luftfeuchte größter Einflussfaktor auf die vertikale Verformung sind klimatische Veränderungen kein Risiko bzgl. Schäden aufgrund erhöhtem Feuchtegehalt in der BSP-Konstruktion

KAPITEL 3: LITERATURRECHERCHE

3-1 EINLEITUNG

Aufgrund der Forschungsintention und der zu untersuchenden Wandaufbauten in Holz-Massivbauweise mit Fichten- und Birken-Brettsperrholz bedarf es einer genauen Kenntnis des Grundmaterials Holz. Daher wird in diesem Kapitel der grundlegende Aufbau von Nadel- und Laubholz beschrieben. Es wird darauf eingegangen, welches grundlegende thermische Verhalten in Holz zu beobachten ist, und wie das Verhalten gegenüber Feuchte ist. Für anschließende Untersuchungen und Simulationen bedarf es der Kenntnis einiger Verfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte und verschiedener bauphysikalischer Begriffe und Gleichungen, die hier allgemein wiedergegeben werden.

3-2 HOLZ – AUFBAU

3-2.1 ALLGEMEIN

„Holz ist eine komplexe biologische Struktur, eine Verbund vieler zusammenwirkender Chemikalien und Zelltypen, der dem Bedarf einer lebenden Pflanze dient“ (Forest Products Laboratory, 2010). Es ist das Baumaterial des Baumes und dient dem Transport, der Speicherung und der Festigung. Es ist weiterhin definiert als „das sekundäre Dauergewebe von Stämmen, Ästen und Wurzeln der Bäume und Sträucher, das durch eine als Kambium bezeichnete, ringförmige Bildungsschicht erzeugt wird. Unter stetiger Vergrößerung seines Umfangs scheidet das Kambium nach innen Holzzellen (Xylem) und nach außen Rindenzellen (Phloem) ab. Dabei bleibt der Rindenzuwachs gegenüber dem Holzzuwachs stark zurück“ (Grosser, 1977).

Gemäß (Schickhofer, 2006) können bezüglich des Aufbaus von Holz fünf Strukturebenen unterschieden werden:

- die Stammebene,
- die Makroebene,
- die Mikroebene,
- die Nanoebene und
- die molekulare Ebene

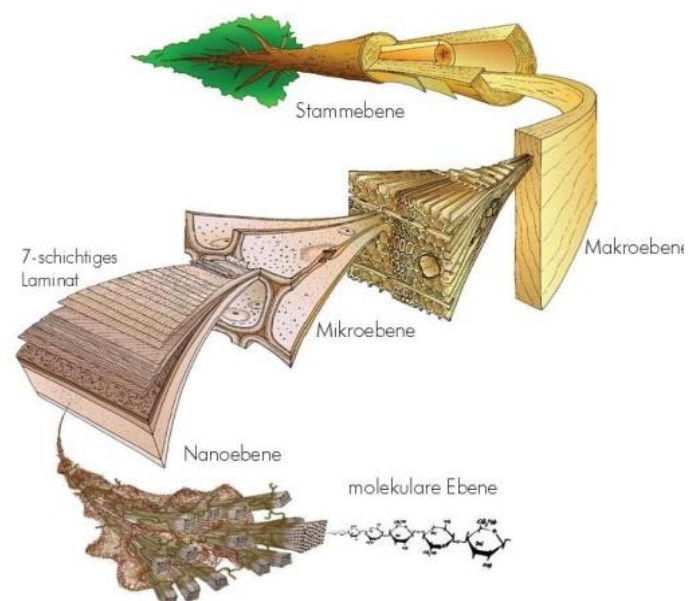


Abbildung 3.1: Strukturebenen des Holzes, aus (Schickhofer, 2006)

Bezüglich der Wasserleitung und des Feuchtetransportes sind sowohl die Makroebene als auch die Mikroebene von besonderer Bedeutung, da Wasser zunächst chemisch gebunden wird, danach jedoch (bei einem Feuchtegehalt > 6 %) wird es durch Adsorption und Kapillarkondensation im Holz eingelagert. Daher sind anschließend Makro- und Mikroebene mit ihren Eigenschaften genauer beschrieben.

3-2.2 MAKROEBENE

Bei der Betrachtung des Holzes mit bloßem Auge oder durch die Vergrößerung einer Lupe lassen sich bereits Aufbau, Anordnung, Form und Größe der verschiedenen Gewebe erkennen (Grosser, 1977). Wie bereits erwähnt, stellt das Holz verschiedene Zellen zur Verfügung, welche als Verband der mechanischen Festigung, der Wasserleitung und der Stoffspeicherung dienen. Zudem sind auch wasserleitende Gefäßzellen im Querschnitt als Poren, in den Längsschnitten als Porenritzen zu erkennen, da sie schon größere Durchmesser erreichen.

In Abbildung 3.2 sind zunächst die einzelnen Schichten eines Laub- oder Nadelbaumstammes zu erkennen. Am äußeren Rand bilden Borke (br) und Bast (b) die schützende Rinde. Das Kambium (k), welches makroskopisch nicht zu sehen ist liegt zwischen der Rinde und dem gewachsenen Holz. Vom Kambium erfolgt das Dickenwachstum des Baumes. Der den Hauptteil bildende Holzteil ist innerhalb eines Jahrringes (jr) in Frühholz (f) und Spätholz (s) gegliedert. Im Inneren des Stammes liegt dann noch das Mark (m).

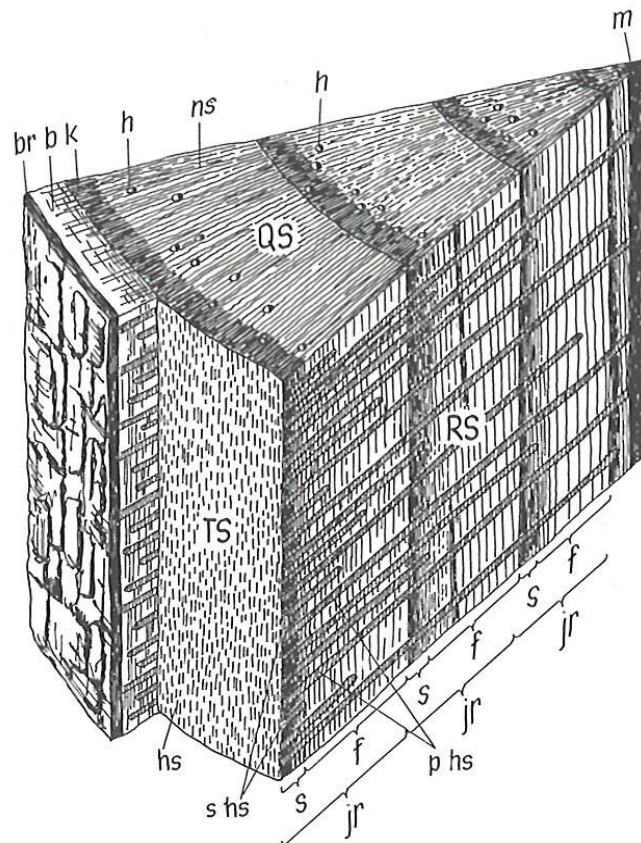


Abbildung 3.2: Makrostruktur, aus (Niemz, 1993)

- QS** **Querschnittsfläche**
- RS** **Radialschnittfläche**
- TS** **Tangentialschnittfläche**

Harzkanäle (h) verlaufen entlang der Stammrichtung und variieren je nach Holzart in Größe, Anzahl und Verteilung. Dasselbe gilt auch für die Holzstrahlen, die jedoch in radialer Richtung angeordnet sind. Diese sind nochmals untergliedert in sogenannte primäre Holzstrahlen (phs), welche bis hin zum Markstrang führen. Alle später vom Kambium angelegten Holzstrahlen stehen nicht mit dem Mark in Verbindung und werden als sekundäre Markstrahlen (shs) bezeichnet.

Mark

Bei dem Mark handelt es sich um ein Speichergewebe (Parenchym), das im Zentrum des Stammes einen runden oder eckigen Querschnitt aufweist. Der Querschnitt misst meist nur wenige mm. Dem jungen Spross dient das Mark zur Wasserleitung und stirbt dann bei den meisten Holzarten ab. Bei den restlichen Holzarten kann das Mark auch noch bis zu 10 Jahren weiter leben und speichert währenddessen Stärke und Fette. (Grosser, 1977)

Jahrringe und Zuwachszonen

In der Querschnittsfläche eines Baumes sind besonders die Jahrringe bzw. die Zuwachszone des Holzes auffällig. Diese Zone entsteht, wenn das Wachstum durch eine Ruhepause unterbrochen wird. In der gemäßigten Klimazone entspricht diese Ruhepause der Winterruhe von August, spätestens September an bis April oder Mai. In der Wachstumsphase bildet sich vom Kambium aus zunächst lockeres Holzgewebe, das sogenannte Frühholz, welches vor allem der Wasserleitung dient. Es ist daher dünnwandig und weitlumig. Das dickwandige und eher englumige Spätholz, das sich darauffolgend bildet, dient mehr der Festigung des Holzes. Es weist zudem eine höhere Dichte gegenüber dem Frühholz auf und ist farblich dunkler.

Die Breite der Zuwachszone hängt von vielerlei Ursachen ab. Zum Beispiel spielen die Länge der Vegetationsperiode, ihre Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf, die Güte des Bodens und der Lichtgenuss der Baumkrone eine große Rolle. Es gilt, dass warme und feuchte Jahre einen größeren Holzzuwachs liefern als trockene und kühlere Jahre. Extremere Ereignisse wie Frost, Trockenheitsperioden oder Insektenfraß führen zu sehr schmalen Jahresringen oder auch zur Ausbildung doppelter Jahresringen. Die Zuwachszone kann zwischen einem Bruchteil eines Millimeters und einigen Zentimetern breit werden. (Kollmann, 1951)

Für die laubabwerfenden Bäume subtropischer und tropischer Gebiete gilt, dass beim Wechsel der Trocken- und Regenzeiten sich Zuwachszonen bilden, die jedoch nicht den Jahrringen entsprechen. Fast oder überhaupt keine Zuwachszonen weisen Hölzer aus immergrünen Tropenwäldern auf, da sie aufgrund der Vegetation kein unterbrochenes Wachstum besitzen. (Grosser, 1977)

Holzstrahlen

Bei allen Nadel- und Laubhölzern sind Holzstrahlen zu finden. Es handelt sich dabei um helle, feine, nur selten über 1 mm breite Linien deren Größe und Häufigkeit aber von Holzart zu Holzart stark variieren können. Makroskopisch sind nur die größeren Holzstrahlen zu erkennen, wie zum Beispiel die Strahlen der Eiche oder Rotbuche. Sie verlaufen radial vom Außenrand des Stammes hin zum Markstrang im Inneren des Baumes. Als primäre Holzstrahlen werden solche Strahlen bezeichnet, die vom Kambium weg bis zum Mark durchgehend sind. Alle später angelegten Holzstrahlen sind sekundärer Natur (siehe Abbildung 3.2).

Holzstrahlen dienen zum einen der Festigung in radialer Richtung, aber vor allem sorgen sie für den radialen Transport und der Speicherung von Wasser und Stoffen, die der Baum bildet. (Schickhofer, 2006)

Harzkanäle

In der Querschnittsfläche sind Harzkanäle meist im Spätholz einiger Nadelhölzer (z. B. Kiefer, Fichte, Lärche, Douglasie; einige tropische Laubhölzer, z.B. Meranti) als helle oder dunkle Punkte makroskopisch zu erkennen. Sie haben besonders Einfluss auf die Be- und Verarbeitbarkeit sowie auf die Verwendbarkeit des Holzes. (Schickhofer, 2006)

3-2.3 MIKROEBENE

„Die Zellwand besteht größtenteils aus Cellulose und Hemicellulose, wobei die Wasserstoffgruppen dieser chemischen Verbindung der Zellwand ihre hygroskopische Eigenschaft gibt. Lignin, die Kittsubstanz der Zellen, ist verglichen dazu eher wassermeidend (hydrophob). Das bedeutet, dass die Zellwand von Holz eine große Affinität für Wasser hat, jedoch ist die Fähigkeit der Zellwand Wasser aufzunehmen teilweise beschränkt durch das vorhandene Lignin. Der Feuchtegehalt im Holz hat eine starke Auswirkung auf die Holzeigenschaften und beeinflusst den industriellen Gebrauch von Holz in Holzwerkstoffen.“ (Forest Products Laboratory, 2010)

Um dieses hygroskopische Verhalten zu verstehen, bedarf es einer genaueren Betrachtung der Aufbauten von sowohl Nadelholz als auch Laubholz und deren Zellarten.

Zellarten

Das vom Kambium weg gewachsene Holz besteht aus Millionen von Zellen unterschiedlicher Art, Größe, Form, Anzahl und Verteilung. Gleichartige Zellen bilden größere Verbände, sogenannte Gewebe. Entsprechend den drei Hauptfunktionen des Holzes lassen sich die Gewebe in Festigungs-, Leit- und Speichergewebe einteilen. Zusätzlich sind noch Exkretgewebe und Sondergewebe als Nebengewebe vorhanden. (Schickhofer, 2006)

Tabelle 3.1: Holzgewebe und ihre darin vorkommenden Holzzellen für Nadel- und Laubholz, aus (Schickhofer, 2006)

Gewebetyp	Nadelholz	Laubholz
Leitgewebe	Frühholztracheiden (dünnwandig)	Gefäße (=Tracheen)
Speichergewebe	Parenchymzellen	Parenchymzellen
Festigungsgewebe	Spätholztracheiden (dickwandig)	(Holz-)Fasern (Libriformfasern, tw. Dasertracheiden)
Exkretgewebe	Epithelzellen	Epithelzellen
Sondergewebe am Beispiel Reaktionsholz	Druckholztracheiden	Zugholzfasern

Die Holzgewebe verlaufen zum größten Teil parallel zur Stammachse und bilden somit die Faserrichtung des Holzes. Rechtwinklig dazu verlaufen Zellverbände wie z.B. die Holzstrahlen (siehe Abbildung 3.2) die die radiale Leitung und Speicherung von organischen Stoffen und Wasser aus der Rinde sicherstellen. Sie sind zumeist parenchymatisch, dienen aber auch der Festigung in radialer Richtung. (Schickhofer, 2006)

Tüpfel

Um den Wasser- und Nährstofftransport zwischen benachbarten Zellen zu gewährleisten, sind an den Zellwänden sogenannte Tüpfel zu finden. Es handelt sich dabei um Öffnungen in der Zellwand, die membranartig funktionieren. (Schickhofer, 2006)

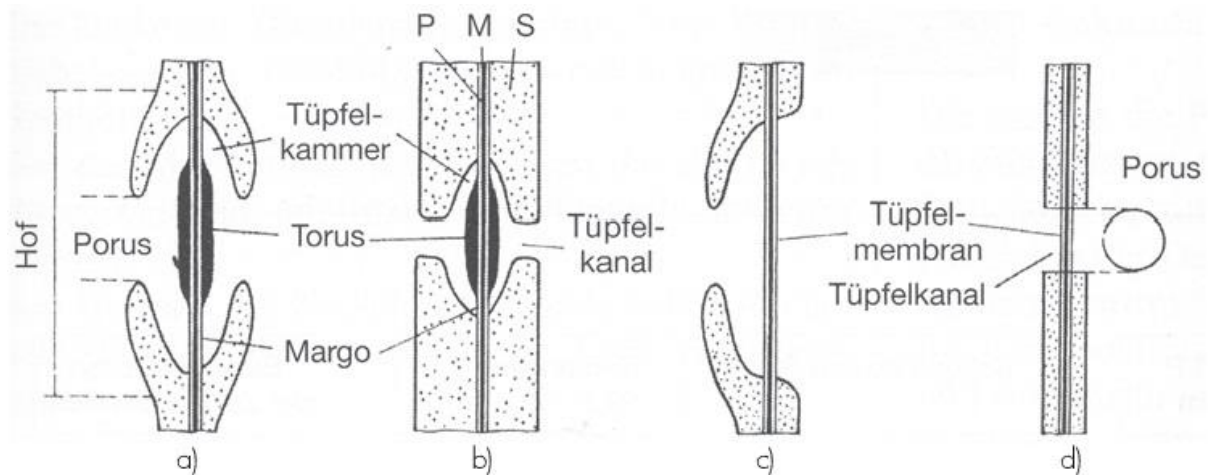


Abbildung 3.3: Schema Tüpfel, aus (Schickhofer, 2006)

- a) **Frühholztüpfel**
- b) **Spätholztüpfel**
- c) **halbbehöfter Tüpfel**
- d) **einfacher Tüpfel**

In der Regel sind die Tüpfel behöft. In Abbildung 3.3 a) und b) ist zu erkennen, dass sich die Sekundärlamelle (S) auf beiden Seiten aufwölbt, wobei sie über dem Torus eine durchbrochene Kuppel bildet durch die das Wasser in den Hof des Tüpfels gelangen kann. In benachbarten Zellen passen solche Hoftüpfel genau aufeinander in welchem der Torus die Öffnung der Kuppel, den Porus, gerade abzudecken vermag. Der Hof misst im Durchmesser bis zu 0,027 mm, wohingegen der Porus bis zu 0,007 mm erreicht. (Kollmann, 1951)

Aufbau der Nadelhölzer

Das Holz der Nadelbäume charakterisiert sich durch einen einfachen und regelmäßigen Aufbau. Nadelbäume sind gleichzeitig, entwicklungsgeschichtlich gesehen, älter als Laubbäume. Dadurch, dass sich das Gewebe nur aus zwei Zellarten, nämlich den Tracheiden und den Parenchymzellen zusammensetzt, sind die Mikromerkmale, die über Familie, Gattung und Art bestimmen, äußerst klein. (Grosser, 1977)

In Abbildung 3.4 sind die Längstracheiden, die mit 90 bis 95 % den größten Raum einnehmen, klar zu erkennen. Holzstrahlen und Harzgänge sind radial dazu angeordnet. Zusammen mit dem Längsparenchym bilden sie den restlichen Raumanteil von 5 bis 10 %.

Tabelle 3.2 beinhaltet eine Zusammenstellung von Anordnung, Form und Funktion der Nadelholzzellen.

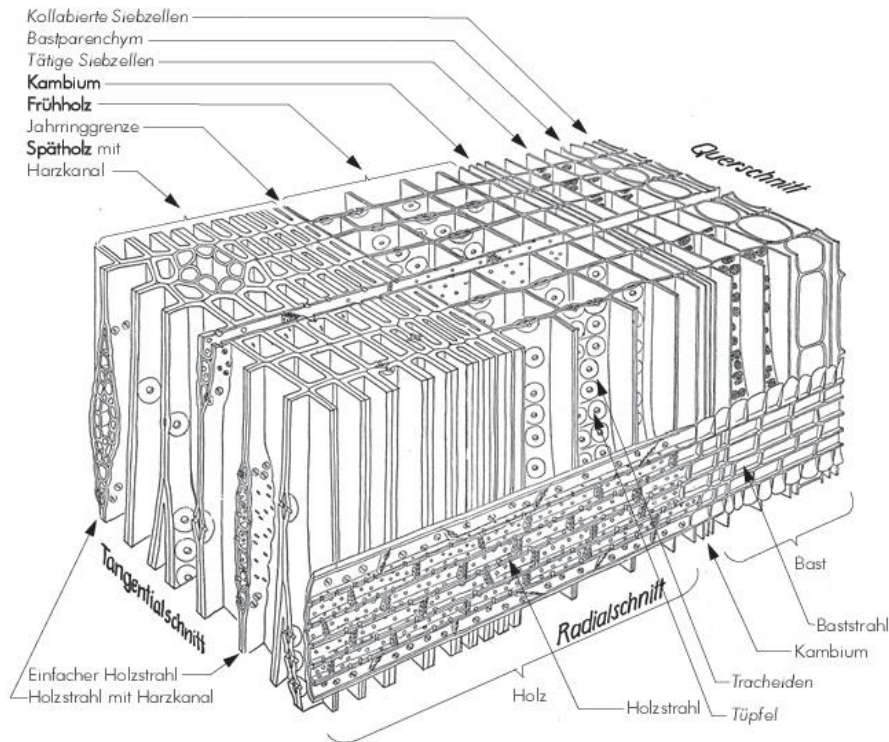


Abbildung 3.4: Schema Nadelholz, aus (Schickhofer, 2006)

Tabelle 3.2: Anordnung und Funktion der Nadelholzzellen, aus (Schickhofer, 2006)

Anord-nung	Zelltyp	Beschreibung	Funktion
axial	Frühholz-tracheiden	unmittelbar nach der Vegetationsruhe gebildet, dünnwandig und weitlemig	Wasserleitung
	Spätholz-tracheiden	unmittelbar vor der Vegetationsruhe gebildet, dickwandig und englumig	Festigung
	Längs-parenchym	Tritt spärlich oder überhaupt nicht auf; dünnwandig, strangartig zusammengesetzte Zellen mit dunklen Inhaltsstoffen	Nährstoff-speicherung
	Epithelzellen der Harzkanäle	parenchymatische Zellen, die die längs (überwiegend im Spätholz) verlaufenden Harzkanäle auskleiden	Harz-aus-scheidung
radial (Holz-strahl)	Holzstrahl-tracheiden	verlaufen radial am Rand oder zwischen den parenchymatischen Holzstrahlen	Wasserleitung
	Holzstrahl-parenchym	durchziehen den Holzkörper als schmale radiale Bändchen	Nährstoff-speicherung
	Epithelzellen der Harzkanäle	parenchymatische Zellen, die die quer verlaufenden Harzkanäle auskleiden	Harz-aus-scheidung

Aufbau der Laubhölzer

Wie beim Aufbau der Nadelhölzer bereits erwähnt, sind die Laubbäume entwicklungsgeschichtlich jünger und zeigen gegenüber dem Nadelholzaufbau eine erheblich größere Vielfalt. Einerseits ist ein komplizierterer Holzaufbau vorhanden, jedoch sind die Funktionen der einzelnen Zelltypen klar voneinander getrennt. Dies bedingt jedoch, dass im Vergleich zum Nadelholz, wo die Tracheiden eine Doppelfunktion übernehmen, mehr Zell- und Gewebearten zur Verfügung gestellt werden müssen. (Grosser, 1977)

In Abbildung 3.5 fallen insbesondere die dem Wassertransport dienenden Gefäße auf. In Hölzern mit Jahrringen sind die weitesten Gefäße stets im Frühholz zu finden. Man unterscheidet zwischen zerstreutporigen Hölzern, zu denen auch die Birke zählt, bei denen die Abnahme des Durchmessers der Gefäße stetig zum Spätholz hin erfolgt und ringporigen Hölzern, welche durch eine abrupte Verkleinerung der Gefäße charakterisiert werden.

Die Hauptmasse des Laubholzkörpers bilden die Libriformfasern (Hartfasern), welche der Festigung des Holzes dienen. Dieselbe Funktion übernehmen auch die Fasertracheiden, die zwischen den Libriformfasern liegen.

Das Holzparenchym, welches für die Speicherung organischer Stoffe angelegt ist, ist in axialer Richtung meist um die Gefäße gesammelt. In radialer Richtung ist es um die Holzstrahlen herum zu finden.

Holzstrahlen im Laubholz unterscheiden sich gegenüber Holzstrahlen im Nadelholz darin, dass sie sowohl einreihig als auch mehrere Zellen breit auftreten können. Dadurch schaffen sie jedoch Ebenen verminderter Festigkeit, was zu einer sehr niedrigen tangentialen Zugfestigkeit führt, die sich in Trockenrissen zeigen kann. (Kollmann, 1951)

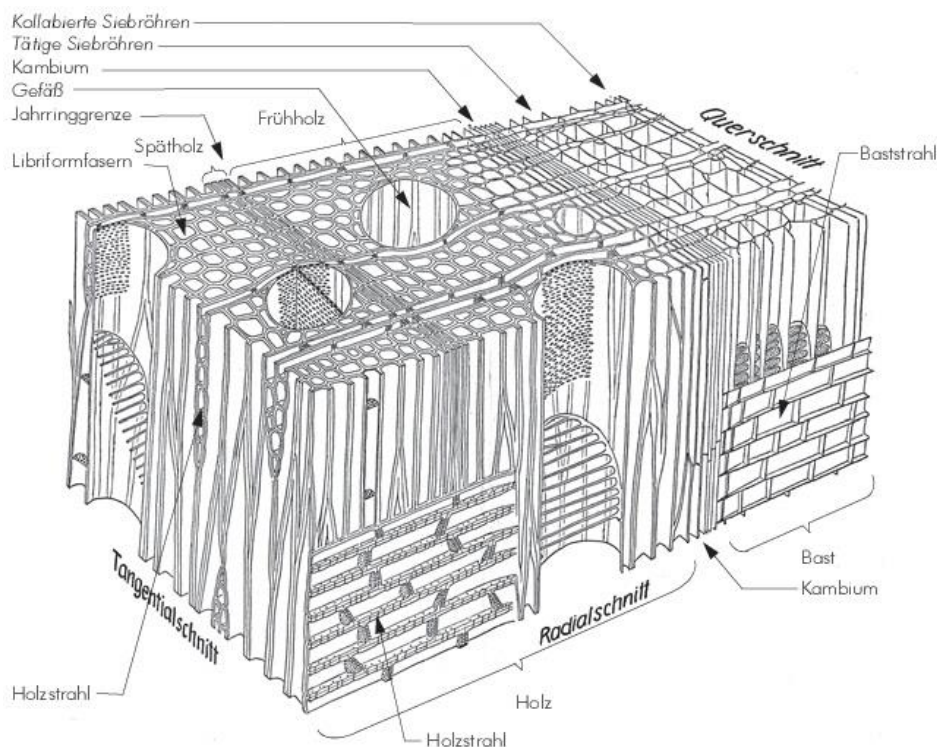


Abbildung 3.5: Schema Laubholz, aus (Schickhofer, 2006)

Tabelle 3.3: Anordnung und Funktion der Laubholzzellen, aus (Schickhofer, 2006)

Anordnung	Zelltyp	Beschreibung	Anteil rund	Funktion
axial	Gefäße (Tracheen)	röhrenförmige Vereinigung axial verlaufender Gefäßglieder. Gefäße sind weitlumige, an den Enden perforierte, tote, verholzte Zellen; im Frühholz tonnenförmig, im Spätholz faserförmig	10 % - 20 %	Wasserleitung
	Gefäßtracheiden (vasculare Tracheiden, unvollständige Gefäßglieder)	ähneln in Form und Größe den schmalen Gefäßgliedern, aber allseitig geschlossen (keine Enddurchbrechungen), begleiten die Gefäße		Wasserleitung
	vasi-zentrische Tracheiden	kurz, in unmittelbarer Nähe eines Gefäßes, verschiedentlich auch im Fasergrundgewebe (z.B. Eiche, Edelkastanie)		Wasserleitung
	Fasertracheiden (Fasern mit Hoftüpfeln)	langgestreckte, mehr oder weniger dickwandige, meist englumige Zellen		Festigung
	Libriformfasern (Holz-)Fasern	langgestreckte, mehr oder weniger dickwandige, meist englumige Zellen	50 % - 60 %	Festigung
	Längsparenchym (Axial-, Strang-, und vertikales Parenchym)	2 Zellformen: <ul style="list-style-type: none"> • fusiforme Zellen: querwandlos, faserförmig, oft stockwerkartig angeordnet • Parenchymstränge aus fusiformen Parenchymzellen Anordnung des Längsparenchyms wichtiges Bestimmungsmerkmal	europ. bis 10 % nicht europ. 10 % - 20 %	Speicherung
	Epithelzellen der Harzkanäle	parenchymatische Zellen, die die quer verlaufenden Harzkanäle auskleiden		Harzausscheidung
radial (Holzstrahl)	Holzstrahlparenchym	Radial ausgerichtet, bandartig aufgehäufte Holzstrahlzellen; Zusammensetzung, Anordnung und Größe der Holzstrahlen sind wichtiges Bestimmungsmerkmal	10 % - 20 %	Speicherung
	Epithelzellen der Harzkanäle	parenchymatische Zellen, die die quer verlaufenden Harzkanäle auskleiden		Harzausscheidung

3-3 ROHDICHTE

Die baugewerbliche Güte des Holzes lässt sich anhand der Rohdichte beurteilen. Eigenschaften wie Festigkeit, Härte, Abnutzungswiderstand und Heizwert je Raumeinheit hängen von der Rohdichte ab, solange alle anderen Einflussquellen wie der Faserverlauf, die Ästigkeit und die Holzfeuchte konstant bleiben. (Kollmann, 1951)

Es werden verschiedene Dichtearten definiert.

3-3.1 KENNGRÖSSEN

Allgemein ist die Dichte das Verhältnis von Masse zu Volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

ρ	– Dichte	[kg/m ³]
m	– Masse	[kg]
V	– Volumen	[m ³]

Rohdichte ρ_u

Die Rohdichte ergibt sich für einen bestimmten Feuchtegehalt aus dem Verhältnis zwischen Masse des Holzes einschließlich des in den Poren enthaltenen Wassers und dem äußeren Volumen des Holzes einschließlich aller Hohlräume.

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (3.2)$$

ρ_u	– Rohdichte bei der Holzfeuchte u	[kg/m ³]
m_u	– Masse des Holzes mit der Holzfeuchte u	[kg]
V_u	– Volumen der Holzes mit der Holzfeuchte u	[m ³]

Da es sich bei Holz um ein kapillarporöses und quellfähiges Material handelt, das mit Wasser, Wasserdampf, Luft oder einer Tränkflüssigkeit gefüllt sein kann, ändert sich in Abhängigkeit vom Anteil dieser Stoffe sowohl die Masse als auch das Volumen des Holzes. Somit handelt es sich bei der Rohdichte um eine Größe, die von dem Feuchtegehalt des Holzes abhängig ist. (Niemz, 1993)

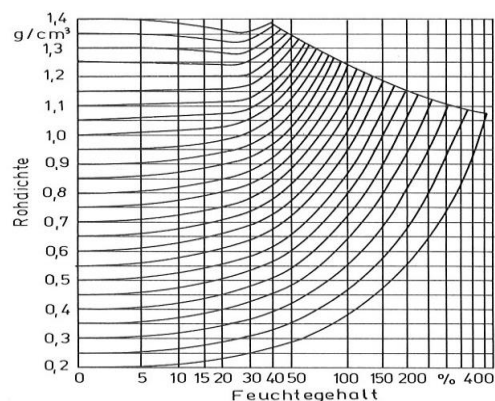


Abbildung 3.6: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte, aus (Niemz, 1993)

Darrdichte ρ_0

Die Darrdichte ist das Verhältnis aus der Masse und dem Volumen des darrtrockenen Holzes.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (3.3)$$

ρ_0	– Rohdichte des darrtrockenen Holzes	[kg/m ³]
m_0	– Masse des darrtrockenen Holzes	[kg]
V_0	– Volumen des darrtrockenen Holzes	[m ³]

Normal-Rohdichte ρ_N

Für wissenschaftliche Untersuchungen wird das definierte Normalklima herangezogen. Bei Normalklima, sprich die Temperatur liegt bei 20 °C, die relative Luftfeuchte bei 65 % und die Holzfeuchte bei etwa 12 %, ergibt sich das folgende Verhältnis aus Masse und Volumen.

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \quad (3.4)$$

ρ_N	– Rohdichte des Holzes bei Normalklima	[kg/m ³]
m_N	– Masse des Holzes bei Normalklima	[kg]
V_N	– Volumen des Holzes bei Normalklima	[m ³]

Reindichte ρ_r

Die Reindichte ist das Verhältnis aus der Masse des darrtrockenen Holzes und dem Volumen der Zellwand ohne Poren. Sie beschreibt die Dichte der reinen Zellwandsubstanz.

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_r} \quad (3.5)$$

ρ_r	– Reindichte des Holzes	[kg/m ³]
m_r	– Masse des darrtrockenen Holzes	[kg]
V_r	– Volumen Zellwand ohne Poren	[m ³]

Für alle Holzarten stellt sich die Reindichte bei etwa 1500 kg/m³ ein.

3-3.2 EINFLUSS AUF DIE EIGENSCHAFTEN VON HOLZ

Nahezu alle Eigenschaften des Holzes werden von der Dichte beeinflusst. Sie ist eine sehr dominierende Einflussgröße. Zum einen wird sie vielfach als Weiserwert für die Festigkeit benutzt, da die Festigkeit mit zunehmender Rohdichte ansteigt. Zum anderen hat sie aber auch erheblichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Holzes wie der Wärmeleitzahl und der maximal aufnehmbaren Feuchte. (Niemz, 1993)

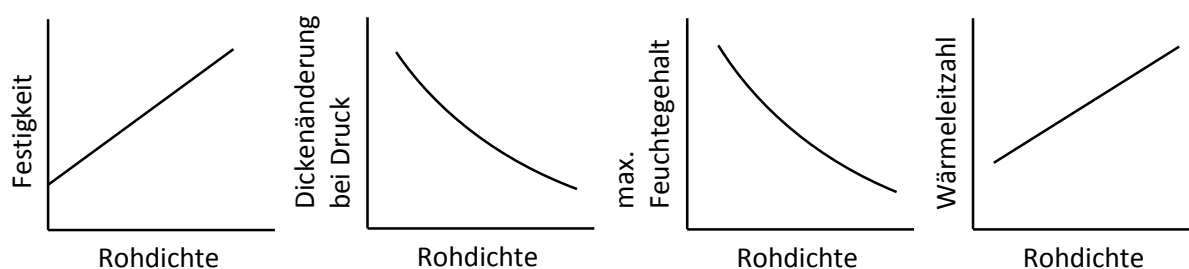


Abbildung 3.7: Einfluss der Rohdichte auf Holz, aus (Niemz, 1993)

3-4 THERMISCHE EIGENSCHAFTEN

3-4.1 WÄRMELEITFÄHIGKEIT

„Eigenschaft eines Stoffes, die angibt, welche Wärmemenge (in J) im Beharrungszustand in der Zeiteinheit 1 s durch die Flächeneinheit 1 m² durch eine Schicht in der Dicke der Längeneinheit 1 m bei einer Temperaturdifferenz von 1 K zwischen den normal zum Wärmestrom liegenden Oberflächen übertragen wird (J/smK = W/mK)“ (Kautsch, 2011).

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist zunächst abhängig von der Stoffdichte. Dichte Stoffe weisen eine hohe Wärmeleitfähigkeit auf, wohingegen poröse Stoffe eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Bei Vollholz besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 3.8) wobei auch zu erwähnen ist, dass die Holzstruktur und die Größe und die Art der Poren auch berücksichtigt werden müssen. (Niemz, 1993)

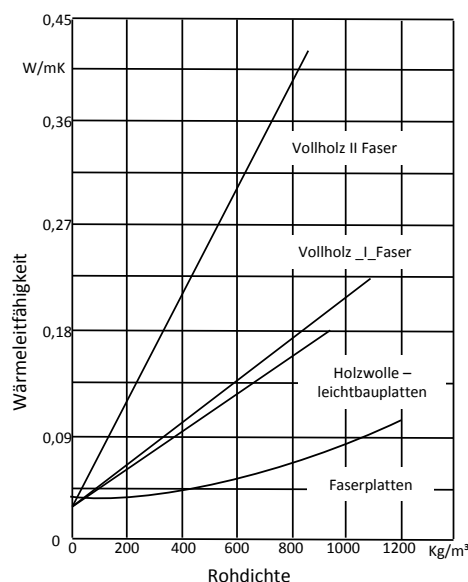


Abbildung 3.8: Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit, aus (Niemz, 1993)

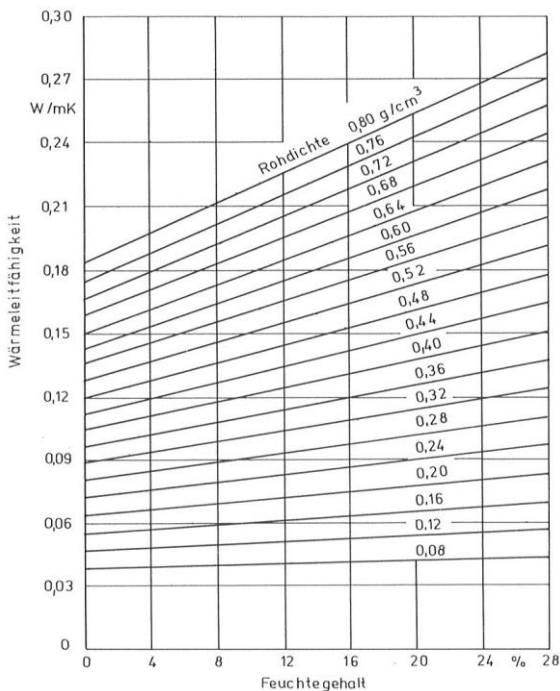


Abbildung 3.9: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit, aus (Niemz, 1993)

Wärmeleitfähigkeit zu. Dies fällt vor allem bei Hölzern mit hohem Porenanteil ins Gewicht. (Niemz, 1993)

3-4.2 SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄT

Bei der spezifischen Wärmekapazität c handelt es sich um eine Materialeigenschaft, die die Wärmemenge beschreibt, welche erforderlich ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Sie wird in kJ/kgK angegeben.

Holz hat gegenüber Eisen eine viermal so hohe spezifische Wärmekapazität und es zeigt sich eine Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität in Bezug auf den Feuchtegehalt (siehe Abbildung 3.10). Der Einfluß der Rohdichte ist vernachlässigbar klein. (Niemz, 1993)

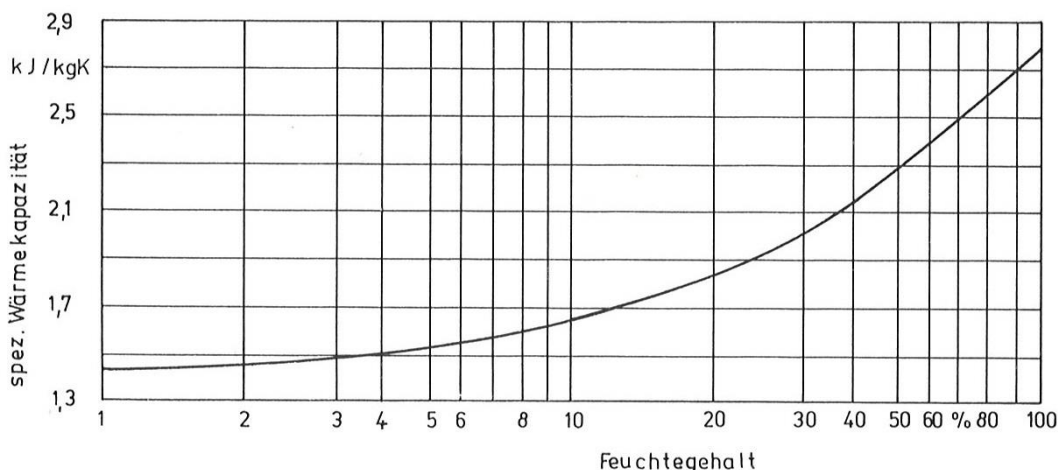


Abbildung 3.10: Einfluss des Feuchtegehalts auf die spezifische Wärmekapazität, aus (Niemz, 1993)

Abbildung 3.8 verdeutlicht auch den Einfluss der Faserrichtung auf die Wärmeleitfähigkeit. In Faserrichtung hat die Wärmeleitfähigkeit einen etwa doppelt so hohen Wert wie quer zur Faser. Was den Unterschied zwischen radialer und tangentialer Richtung angeht, so ist der Wert in radialer Richtung etwa 10 % höher, da die Holzstrahlen die Wärmeleitung begünstigen. (Schickhofer, 2006)

Eine weitere Einflussgröße ist der Feuchtegehalt im Holz. Mit zunehmendem Feuchteanteil im Holz nimmt die Wärmeleitfähigkeit zu, weil Wasser eine höhere Wärmeleitfähigkeit als darrtrockenes Holz besitzt. (Niemz, 1993)

Abbildung 3.9 beschreibt auch hier einen linearen Zusammenhang.

Als letzte Einflussgröße sei noch die Temperatur erwähnt. Wenn die Temperatur zunimmt, nimmt auch der Wert der

3-5 VERHALTEN GEGENÜBER FEUCHTE

3-5.1 HOLZFEUCHTE

Bei Holz handelt es sich um einen kapillarporösen Stoff. Je nach Rohdichte des Holzes beträgt der Porenanteil im Durchschnitt 50 bis 60 %. Dadurch entsteht ein Hohlraumsystem mit einer sehr großen inneren Oberfläche. Wie alle porösen Stoffe absorbiert ein solches System Wasser aus der Luft und transportiert es durch kapillare Transportprozesse weiter durch das Makrosystem. Dabei muss es sich nicht nur um flüssiges Wasser handeln, es können auch andere Flüssigkeiten wie Holzschutzmittel oder Klebstoffe aufgenommen werden. (Niemz, 1993)

Je nach Wasseranteil in der Holzsubstanz werden folgende drei Grenzzustände unterschieden:

- darrtrocken: die Holzfeuchte beträgt 0 % und es ist keinerlei Wasser im Holz vorhanden
- Fasersättigung (Fasersättigungsbereich): die gesamten Zellwänden (Mikrosystem) sind mit Wasser gesättigt, nicht jedoch die Zellhohlräume
- Wassersättigung: sowohl das Mikrosystem als auch das Makrosystem des Holzes ist maximal mit Wasser gefüllt

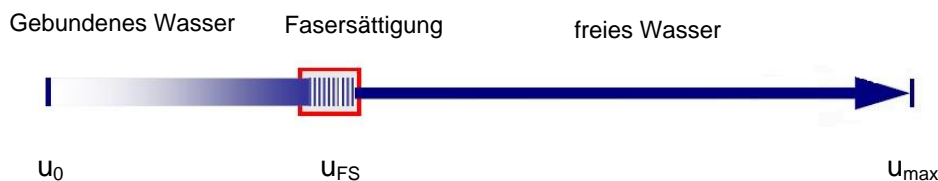


Abbildung 3.11: Grenzzustände der Wasseranteile in der Holzsubstanz, aus (Ressel, 2006)

Praktisch alle physikalischen, mechanischen und technologischen Eigenschaften des Holzes werden von der Holzfeuchte beeinflusst. In der Baupraxis spielt vor allem die Maßhaltigkeit eine große Rolle. So ist darauf zu achten, dass der Feuchtegehalt in der Verarbeitung des Holzes schon dem in der späteren Verwendung entspricht. Die Dauerhaftigkeit des Holzes kann mit Hilfe der Holzfeuchte schon so gesteuert werden, dass durch eine geringe Holzfeuchte ein sicherer Holzschutz gewährleistet wird, da für pflanzliche und tierische Holzschädlinge ein bestimmter Feuchtegehalt lebensnotwendig ist. (Schickhofer, 2006)

Die Holzfeuchte u ist definiert als Verhältnis von Wasseranteil zu darrtrockener Masse des Holzes.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} * 100 \quad (3.6)$$

u	– Holzfeuchtegehalt	[%]
m_u	– Masse des feuchten Holzes	[kg]
m_0	– Masse des darrtrockenen Holzes	[kg]

Sie kann laut Definition 100 % überschreiten, wie z. B. im Falle von Nadelplintholz, wo die Holzfeuchte bis zu 150 % betragen kann.

3-5.2 SORPTION

Wie in Kapitel 3-5.1 bereits kurz angesprochen, handelt es sich bei Holz um einen hygroskopischen Stoff. Das bedeutet, dass Holz in der Lage ist Wasser, in Form von Wasserdampf, aus der Luft aufzunehmen bzw. abzugeben. Dieser Prozess ist bedingt durch die verschiedenen Luftzustände, welche durch Temperatur ϑ und relative Luftfeuchte φ charakterisiert werden. Dabei kommt es zu einem Bestreben des Holzes nach einem Gleichgewichtszustand gegenüber seinem Umgebungsklima. Das Erreichen dieses Gleichgewichtes wird als Sorptionsgleichgewicht bezeichnet, wobei Wasserdampfaufnahme als Adsorption und Wasserdampfabgabe als Desorption definiert sind. (siehe Abbildung 3.12)

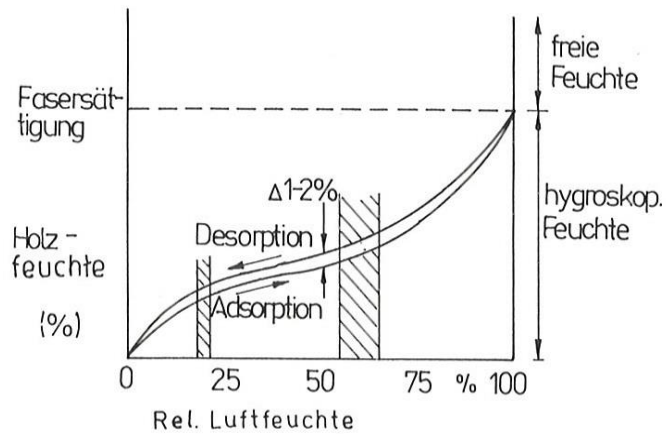


Abbildung 3.12: Hysterese-Effekt zwischen Adsorption und Desorption, aus (Niemz, 1993)

Hierbei ist ein deutlicher Hysterese-Effekt in der Abbildung zu erkennen, da die Holzfeuchtegleichgewichte bei Adsorption und Desorption unterschiedlich sind. (Schickhofer, 2006)

Im hygroskopischen Bereich kommt es bei der Anlagerung von Wassermolekülen an die innere Oberfläche zur Überlagerung folgender drei Vorgänge:

- Chemisorption: $0 \% \leq u \leq 6 \%$ $0 \% \leq \varphi \leq 20 \%$
- Adsorption: $6 \% \leq u \leq 15 \%$ $20 \% \leq \varphi \leq 60 \%$
- Kapillarkondensation $15 \% \leq u$ bis Fasersättigungsbereich $60 \% \leq \varphi \leq 100\%$

Der Verlauf von Chemisorption, Adsorption und Kapillarkondensation ist in Abbildung 3.13 schematisch dargestellt.

Chemisorption

Bei der Chemisorption handelt es sich um die erste Phase der Sorption. Hierbei werden die Wassermoleküle über Wasserstoffbrücken zwischen benachbarte Celluloseketten eingelagert. Die Einlagerung findet an den freien Hydroxylgruppen statt, welche vor allem in den amorphen Bereichen der Mizellen zu finden sind. Es kommt zur Ausbildung einer monomolekularen Schicht, welche noch nicht dazu beiträgt, dass das Holz aufquillt und es zu einer Zunahme des Holzvolumens führt. Dementsprechend kommt es auch zu keiner Verschiebung der kristallinen Bereiche. (Niemz, 1993)

Adsorption

In den Poren des Mikrosystems kommt es bei einer Zunahme der Holzfeuchte zu einer weiteren Anlagerung von Wasser. Dies geschieht aufgrund molekularer Anziehungskräfte der Wasserstoffmoleküle, welche durch elektrostatische Kräfte (van der Waal'schen Kräfte) dann aneinander gebunden werden. Es entsteht eine polymolekulare Wasserschicht, die sich zunächst erst punktuell entwickelt und dann zunehmend die Oberfläche der Zellwand einnimmt.

Das entstandene Sorbat zeigt dann Flüssigkeitscharakter mit Oberflächenspannung und Fließfähigkeit. (Niemz, 1993)

Kapillarkondensation

Der Sättigungsdruck über Kapillaren mit einem Radius $5 \cdot 10^{-10} \text{ m} < r < 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ist geringer als jener über ebenen Flüssigkeitsoberflächen, da sie eine gekrümmte Oberfläche ausbilden. Demnach kondensiert ein Teil des Wasserdampfes in den Kapillaren frühzeitig und es bildet sich Oberflächenflüssigkeit am Zellwandsystem. Es lagert sich in den intermizellaren und interfibrillaren Hohlräumen ein. Durch die Wasseraufnahme kommt es zu einer Zunahme des Holzvolumens. Dabei rücken die Fibrillen, so weit wie das aufgrund der relativ festen Bindung möglich ist, auseinander und das Holz quillt. Wenn die Zellwand sich nicht mehr weiter ausdehnen kann, ist die Feuchteaufnahme des Mikrosystems erschöpft und die Holzfeuchte erreicht den Fasersättigungsbereich. Danach kann Wasser nur noch als freies Wasser in die makroskopischen Hohlräume des Holzes eingelagert werden. Während der Wasseraufnahme setzt Holz zudem Sorptionswärme frei. (Niemz, 1993)

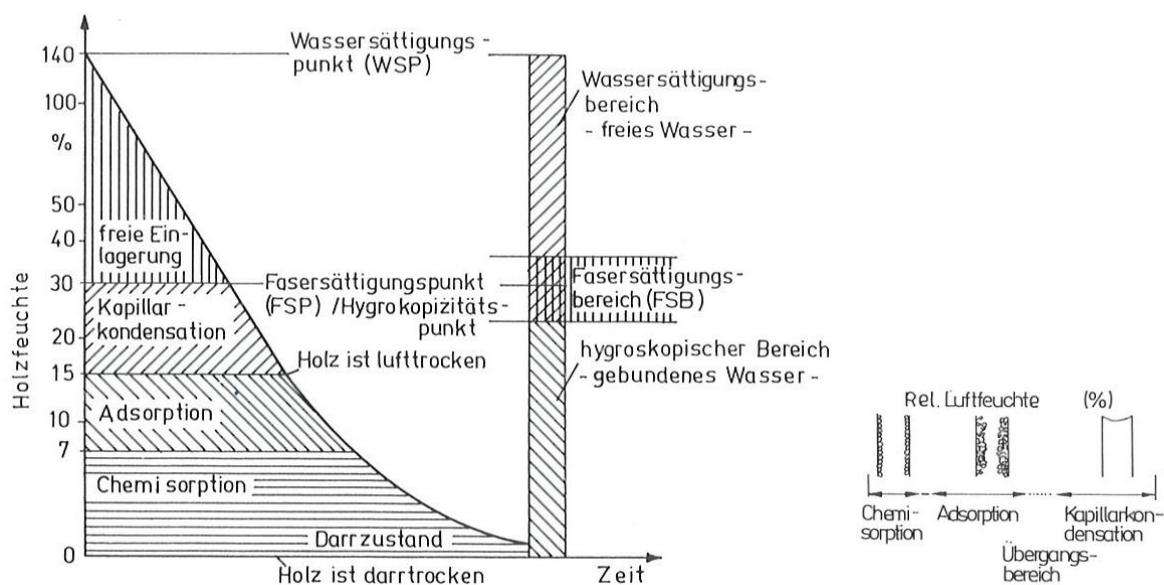


Abbildung 3.13: Bindungsformen des Wassers im Holz, aus (Niemz, 1993)

Sorptionsisothermen

Die gegenseitige Abhängigkeit von Sorptionsgleichgewichtsfeuchte, relativer Luftfeuchte und Temperatur lassen sich anhand Sorptionsisothermen darstellen. Da die Gleichgewichtsfeuchte vom chemischen und strukturellen Aufbau des Holzes abhängig ist, ergeben sich unterschiedliche Sorptionsisothermen für unterschiedliche Holzarten. Abbildung 3.14 zeigt die hygroskopischen Isotherme für Fichtenholz. Es ist deutlich zu erkennen, dass der sich im Gleichgewichtszustand einstellende Feuchtegehalt mit zunehmender Temperatur sinkt. (Niemz, 1993)

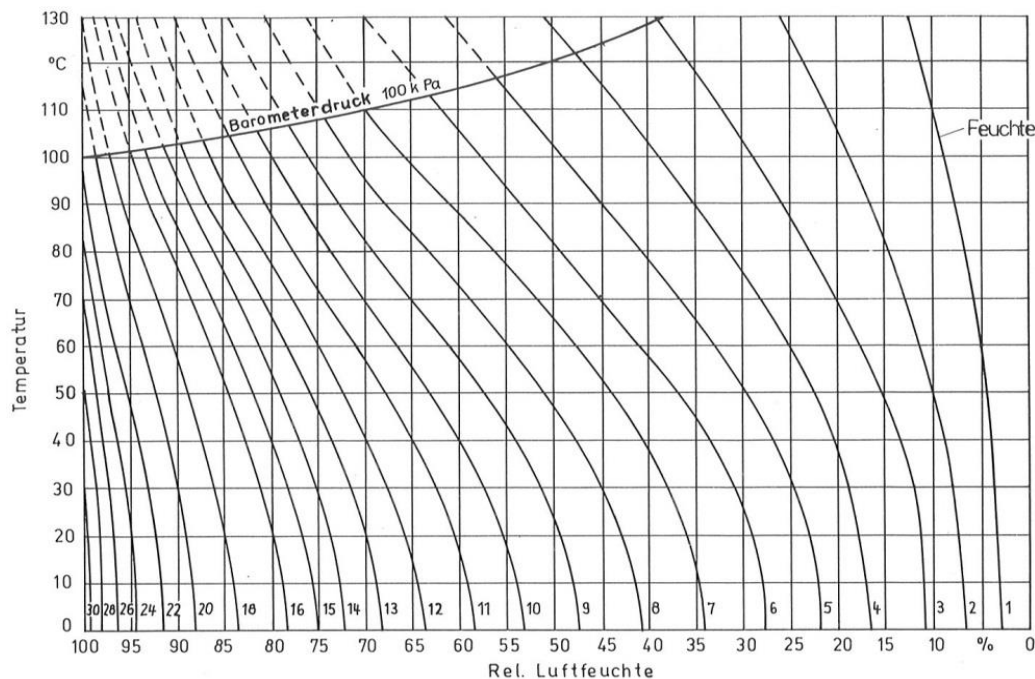


Abbildung 3.14: hygroscopische Isothermen für Fichtenholz, aus (Niemz, 1993)

3-6 VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER HOLZFEUCHTE

3-6.1 DARRMETHODE

Bei der Darrmethode handelt es sich um ein sehr exaktes Messverfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte. Es wird vor allem für wissenschaftliche Untersuchungen und als Vergleichsmethode zur Kalibrierung von Messgeräten verwendet.

Das Verfahren schreibt zunächst vor, die Masse m_u des feuchten Prüfkörpers durch Wiegen zu bestimmen. Anschließend wird der Prüfkörper bei $103\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ in einem gut belüfteten Trockenschrank gedarrt. Wenn die Massenkonzanz erreicht ist, wird der Probekörper streng genommen in einem mit Kieselgel gefüllten Exikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei Hölzern mit einem hohen Harzgehalt empfiehlt es sich, die Trocknung in einem Vakuumtrockenschrank bei 50 °C durchzuführen. Sobald der Prüfkörper auf Raumtemperatur abgekühlt ist, wird die Darrmasse m_0 durch Wiegen bestimmt und es kann die Holzfeuchte u nach Gleichung (3.6) berechnet werden.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0}$$

Grundlage für das Messverfahren ist die ÖNORM EN 13183-1, 2004 wobei das Verfahren auch für Prüfkörper angewendet wird, die die Bestimmung der Feuchteverteilung über den Querschnitt eines Stammes oder eines Brettes ermöglichen. Hierbei wird der Probekörper als Bohrkern z.B. mit einem Zuwachsbohrer aus dem Stamm oder dem Brett gezogen. (Niemz, 1993)

Das Messverfahren bedarf einer gewissen Zeit und hat zudem noch den Nachteil, dass ein Probekörper genommen werden muss. Dadurch eignet es sich nicht zur Bestimmung der Holzfeuchte an bestehenden Holzkonstruktionen.

3-6.2 DESTILLATIONSVERFAHREN

Das Destillationsverfahren wird bei Hölzern angewandt, die Terpene, ätherische Öle, Fette und bestimmte Imprägniermittel enthalten. Bei Verwendung der Darmmethode würden sich diese Inhaltsstoffe aufgrund der hohen Trocknungstemperaturen verflüchtigen und es würde zu fehlerhaften Werten der Holzfeuchte kommen. Der auftretende Fehler kann bis zu 10 % betragen.

Das Prinzip beruht auf dem thermischen Trennverfahren der Destillation. Das zu untersuchende Holz wird zunächst zerspant und in einen Kolben mit Xylol, Toluol oder einem anderen Lösungsmittel gegeben. Das Gemisch wird anschließend erhitzt, sodass nur der Wasserdampf aufsteigt, welcher dann in einem Kühlrohr wieder kondensiert. Das Wasser sammelt sich dann in einem geeichten Steigrohr und die Wassermenge kann dann dort abgelesen werden. Über die folgende Gleichung lässt sich die Holzfeuchte berechnen. (Niemz, 1993)

$$u = \frac{m_w}{m_u - m_w} \quad (3.7)$$

Auch bei diesem Messverfahren handelt es sich nicht um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren und eignet sich daher ebenfalls nicht zur Bestimmung der Holzfeuchte an bestehenden Holzkonstruktionen.

3-6.3 WIDERSTANDSMESSVERFAHREN

Beim Widerstandsmessverfahren wird der elektrische Widerstand bzw. die Leitfähigkeit des Holzes gemessen. Der elektrische Widerstand ist abhängig von dem Feuchtegehalt im Holz. Er steigt mit abnehmendem Feuchtegehalt und sinkt wenn der Feuchtegehalt wieder zunimmt. Des Weiteren wird er von der Schnittrichtung, der Holzart und der Temperatur des Holzes beeinflusst.

Zur Messung des elektrischen Widerstandes werden Elektroden am Prüfkörper angebracht. Die Elektroden sind in unterschiedlich gestalteten Formen erhältlich und ermöglichen dadurch die Holzfeuchtemessung an Schnittholz, Furnier und Spänen. Zum Auslesen der gemessenen Widerstände werden kleine tragbare Feuchtemessgeräte in Taschenrechnergröße angeboten, welche Kennlinien für verschiedene Holzarten und Temperaturkompensation hinterlegt haben und somit auf die vorhandene Holzfeuchte schließen.

Das Widerstandsmessverfahren wird häufig verwendet, da es eine schnelle und zerstörungsfreie Methode der Holzfeuchtebestimmung ist. Es wird vielfach zur Online-Kontrolle in der Industrie eingesetzt und eignet sich auch für Messungen an weniger zugänglichen Stellen vor Ort. (Niemz, 1993)

3-6.4 DIELEKTRONISCHES MESSVERFAHREN

Beim dielektronischen Messverfahren wird der Einfluss des Feuchtegehalts auf die sogenannte Dielektrizitätskonstante ausgenutzt. Jene Konstante hat den Wert 2 bis 3 bei darrtrockenem Holz und den Wert 80 bei Wasser. Beim Messen der dielektrischen Leitfähigkeit liegen die Messfrequenzen im kHz- bzw. MHz-Bereich. Die Messfrequenzen und die Dichte des Holzes beeinflussen das Ergebnis der Messung und müssen bei der Auswertung mitberücksichtigt werden.

Das Verfahren zählt auch zu den zerstörungsfreien Messverfahren und wird insbesondere zur Spanfeuchtemessung genutzt. (Niemz, 1993)

3-6.5 MIKROWELLEN-VERFAHREN

Das Mikrowellen-Verfahren nutzt genau wie das dielektrische Messverfahren den Einfluss der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstante von Holz und Wasser aus. Bei der Einwirkung von Mikrowellen auf das feuchte Holz kommt es bei Wassermolekülen zu einer weitaus stärkeren Absorption der Energie als bei Holz. Über den vorhandenen Dämpfungsfaktor und den Reflexionsfaktor wird somit auf die Holzfeuchte geschlossen. Das Ergebnis ist von der Temperatur und der Dichte des Holzes abhängig.

Wie beim dielektronischen Messverfahren bedarf es auch hier keiner Entnahme eines Probekörpers. Das Verfahren wird jedoch eher für die Feuchtemessung an Schnittholz genutzt. (Niemz, 1993)

3-6.6 RADIOMETRISCHES VERFAHREN

Das radiometrische Verfahren geht von der Erscheinung aus, dass Neutronen beim Aufprall auf Atome stark abgebremst werden. Es wird dabei beobachtet, dass die H-Atome des Wassers die Neutronen deutlich stärker abbremsen als die anderen im Holz enthaltenen Elemente. Wenn das Bremsvermögen der H-Atome mit dem Wert 1 gleichgesetzt wird, kann die Anzahl der H-Atome gemessen werden und somit die Holzfeuchte bestimmt werden. Hierbei hat die Dichte des Holzes einen maßgeblichen Einfluss auf das Messergebnis. (Niemz, 1993)

Das Verfahren zählt zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren.

3-6.7 SPEKTROMETRISCHES VERFAHREN

Wasser absorbiert Licht mit einer Wellenlänge von 1930 nm und 1450 nm. Eine Bestrahlung feuchten Holzes mit Licht jener Wellenlängen führt demnach zu einer mehr oder weniger starken Reflexion des Lichtes. Somit ist der reflektierte Teil des Lichtes ein Maß für die Holzfeuchte. Das Verfahren wird über eine Bestrahlung mit einer Vergleichswellenlänge kalibriert und somit wird eine Unabhängigkeit des Messergebnisses von der Oberflächenstruktur und der Gerätealterung hergestellt. Dadurch, dass die Strahlung nur 0,1 mm in die Oberfläche eindringt, eignet sich das Verfahren eher für die Feuchtemessung von Schüttgütern. (Niemz, 1993)

Das spektrometrische Verfahren zählt auch zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren.

3-6.8 CHEMISCHES VERFAHREN

Beim chemischen Verfahren wird ein Indikatorpapier, das mit einer bestimmten Chemikalie (z.B. Kobaltchlorid) getränkt ist, in ein Bohrloch im Prüfkörper gegeben. Das Indikatorpapier ändert je nach Holzfeuchtegehalt seine Farbe. Dieser Farbumschlag tritt nach etwa 15 Minuten auf. Anhand einer Farbskala kann so auf den vorhandenen Feuchtegehalt geschlossen werden.

Durch die Bohrung entsteht ein dauerhafter Schaden am Prüfkörper und es wird darauf hingewiesen, dass das Verfahren nur für einen Temperaturbereich von 15 °C bis 25 °C und einem Feuchtebereich von 6 % bis 20 % geeignet ist. (Niemz, 1993)

3-6.9 HYGROSKOPISCHES VERFAHREN

Das hygroskopische Verfahren nutzt die hygroskopische Eigenschaft des Holzes aus. Wie in Kapitel 3-5.2 bereits beschrieben, strebt das Holz einen Gleichgewichtszustand gegenüber seinem Umgebungsklima an.

Um die Holzfeuchte zu bestimmen, wird zunächst ein Loch in das zu untersuchende Holz gebohrt und gegen die Außenluft verschlossen. Dadurch kommt es im Bohrloch zu einem Ausgleich zwischen der Luftfeuchte und der Holzfeuchtigkeit der umliegenden Holzschichten. Die im Bohrloch vorhandene relative Luftfeuchte kann anschließend mittels Psychrometer gemessen werden und unter Zunahme der Bohrlochtemperatur kann das hygroskopische Gleichgewicht gebildet werden. Die Holzfeuchte lässt sich anhand der hygroskopischen Isotherme (siehe Kapitel 3-5.2) ablesen. (Kollmann, 1951)

Das hygroskopische Verfahren zählt nicht zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren und bei der Untersuchung eines bestimmten Umgebungsklimas bedarf es einer gewissen Zeit für den Feuchteausgleich im Probekörper.

3-6.10 BEWERTUNG

Im Hinblick auf eine Langzeituntersuchung vor Ort sind nur drei der beschriebenen Verfahren von Bedeutung. Die wohl am häufigsten angewendete Form der Holzfeuchtebestimmung ist die Messung mit einem tragbaren Feuchtemessgerät, welches auf dem Widerstandsprinzip basiert. Bei der Installierung eines dauerhaft angebrachten Messgerätes können aufgrund unterschiedlich langer Elektroden verschiedene Messtiefen eingerichtet werden, sodass ein Holzfeuchteprofil am Querschnitt erstellt werden kann (siehe auch Kapitel 2-2). Die schnelle und einfache Bedienung erleichtert den Umgang bei der Einrichtung des Messsystems.

Das eher für die Feuchtemessung an Schnittholz verwendete Mikrowellen-Verfahren lässt sich ebenfalls an Holzbautragwerken vor Ort installieren. Das Holzgefüge wird hierbei nicht beeinträchtigt, wobei die Mikrowellen nur rund 50 mm tief in den Holzquerschnitt eindringen. Zudem wird nur eine mittlere Holzfeuchte bestimmt, was zum Teil zu wenig Aussagekraft für den Anwender hat. (Schickhofer, 2006)

Das nicht zerstörungsfreie und indirekte „hygroskopische Verfahren“ zur Bestimmung der Holzfeuchte bedarf eines etwas größeren Aufwandes bei der Inbetriebnahme des Messsystems, da die Messtechnik im Querschnitt luftdicht eingebracht werden muss. Dennoch eignet es sich für eine Langzeituntersuchung vor Ort und wird auch in der vorliegenden Arbeit als Messmethode verwendet (siehe Kapitel 4-3).

3-7 BAUPHYSIKALISCHE BEGRIFFE UND GLEICHUNGEN

3-7.1 WÄRMELEITUNG

Der Begriff Wärmeleitung beschreibt den Transport von Wärmeenergie in einem Festkörper aufgrund atomarer und molekularer Wechselwirkung, welche durch eine Temperaturdifferenz verursacht wird. Es handelt sich dabei lediglich um einen Transport von Energie, welcher in einem festen und ruhenden Medium stattfindet. Bei der Wärmeleitung handelt es sich um eine spezifische Stoffeigenschaft, da sie allein von der Natur des Mediums abhängig ist.

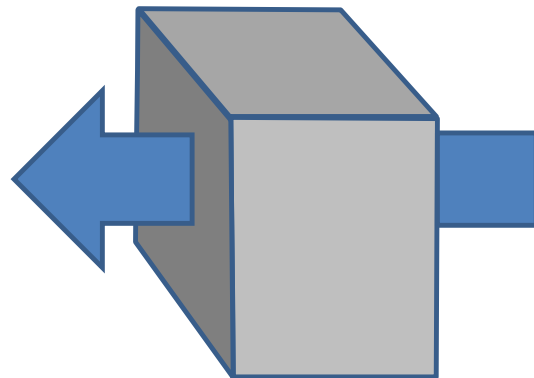


Abbildung 3.15: Schema Wärmeleitung, aus (Kautsch, 2011)

Zur mathematischen Beschreibung der Wärmeleitung bedarf es der Festlegung von:

- Temperaturfeld $T = T(x,y,z,t)$ [K] und
- Wärmestromdichte $q = q(x,y,z,t)$ [W/m²]

x,y,z Raumkoordinaten

t : Zeit

Der proportionale Zusammenhang zwischen Temperaturfeld und Wärmestromdichte wurde 1822 von Fourier formuliert. Den Proportionalitätsfaktor bildet die Wärmeleitfähigkeit λ , die in Kapitel 3-4.1 näher beschrieben ist. (Kautsch, 2011)

3-7.2 EINDIMENSIONALE STATIONÄRE WÄRMELEITUNG

Die eindimensionale, stationäre Wärmeleitung beinhaltet zwei grundlegende Festlegungen. Zum einen sind die Abmessungen des durchströmten Mediums im Vergleich zu seiner Dicke viel größer, sodass von einem Wärmestrom in Dickenrichtung auszugehen ist. Zum anderen sind von zeitlich konstanten Bedingungen im Temperaturfeld auszugehen, was zu einem konstanten Temperaturgefälle im Medium führt. (Kautsch, 2011)

Die Wärmestromdichte ergibt sich für den eindimensionalen, stationären Fall nach Fourier dann zu:

$$q_x = \lambda_x \left(-\frac{dT}{dx} \right) \quad (3.8)$$

q_x – Wärmestromdichte [W/m²]

λ_x – Wärmeleitfähigkeit in x-Richtung [W/mK]

$-\frac{dT}{dx}$ – Temperaturgefälle in x-Richtung [K/m]

Für die Wärmebilanz in einem mehrschichtigen Bauteil gilt der Ansatz, dass in jeder beliebigen Schicht genauso viel Wärme zuströmt wie wegströmt, sodass sich wieder ein zeitlich konstanter Wärmestrom über den Querschnitt einstellt. Der proportionale Zusammenhang zwischen Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz kann nun über den Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Schichten hergestellt werden (Kautsch, 2011). Es gilt:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (3.9)$$

R_i	– Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Schicht	[m ² K/W]
λ_i	– Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schicht	[W/mK]
d_i	– Dicke der einzelnen Schicht	[m]

Der Temperaturverlauf in dem mehrschichtigen Bauteil lässt sich anhand der Formeln gemäß ÖNORM B 8110-2, 2003 berechnen.

Bauteiloberflächentemperatur außen:

$$\theta_{s,e} = \theta_e + R_{s,e} * U * (\theta_i - \theta_e) \quad (3.10)$$

Bauteiloberflächentemperatur innen:

$$\theta_{s,i} = \theta_i - R_{s,i} * U * (\theta_i - \theta_e) \quad (3.11)$$

Temperaturen der Grenzflächen der im Wärmestrom hintereinander liegenden Bauteilschichten:

$$\theta_m = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) * U * \left(R_{s,i} + \sum_{j=1}^m R_{t,j} \right) \quad (3.12)$$

θ_m	– Temperatur der Grenzflächen	[°C]
θ_e	– Außentemperatur der Luft	[°C]
θ_i	– Innentemperatur der Luft	[°C]
$R_{s,e}$	– Wärmeübergangswiderstand außen	[m ² K/W]
$R_{s,i}$	– Wärmeübergangswiderstand innen	[m ² K/W]
$R_{t,j}$	– Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Schicht	[m ² K/W]
U	– U-Wert des mehrschichtigen Bauteils	[W/m ² K]

Der U-Wert wird als spezifischer Wärmedurchgangswert bezeichnet und ist als Kehrwert des Gesamtwärmedurchgangswiderstandes definiert. Er gibt an, wie viel Energie pro m² Bauteilfläche bei 1 K Temperaturdifferenz durch das Bauteil fließt. (Häupl, 2008)

$$U = 1 / (R_{s,i} + \sum_{j=1}^m R_{t,j} + R_{s,e}) \quad (3.13)$$

3-7.3 EINDIMENSIONALE INSTATIONÄRE WÄRMELEITUNG

Die eindimensionale, instationäre Wärmeleitung beschreibt genau wie der stationäre Ansatz den Durchgang des Wärmestroms durch ein Medium in genau eine Richtung. Hinzu kommt hier die Berücksichtigung, dass die Temperaturverteilung nicht zeitlich unveränderlich ist. Dadurch muss in der Wärmeleitungsgleichung sowohl die Erwärmung als auch die Abkühlung berücksichtigt werden. Auf der Materialseite ist nicht nur die Wärmeleitfähigkeit λ , sondern auch die spezifische Wärmekapazität c (siehe Kapitel 3-4.2) und die Dichte ρ (siehe Kapitel 3-3) zu berücksichtigen (Kautsch, 2011). Die Wärmeleitungsgleichung ergibt sich allgemein zu:

$$\text{div}(\lambda * \text{grad}T) = c * \rho * \frac{dT}{dt} \quad (3.14)$$

Auf eindimensionaler Ebene lässt sich die Gleichung dann als partielle Differenzialgleichung 2. Ordnung folgendermaßen ausdrücken:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{c * \rho} * \frac{d^2T}{dx^2}$$

Eine gedämpfte Sinusschwingung bildet die Lösung der Differenzialgleichung:

$$T(x,t) = T_m + (T_{\max} - T_m) * e^{-x * \sqrt{\frac{\pi}{a * T}}} * \cos\left(\frac{2\pi}{T} * t - x * \sqrt{\frac{\pi}{a * T}}\right) \quad (3.15)$$

T	–	Phasenlänge	
T_m	–	mittlere Temperatur	[K]
T_{\max}	–	maximale Temperatur	[K]
T_{\max}	–	maximale Temperatur	[K]
$a = \frac{\lambda}{c * \rho}$	–	Temperaturleitzahl	[m ² /s]

3-7.4 LUFTFEUCHTE

In der Luft ist stets eine gewisse Menge an Wasser in Form von Wasserdampf zu finden, welche als Luftfeuchte bezeichnet wird. Bei Wasserdampf handelt es sich um den gasförmigen Aggregatzustand des Wassers. In der Atmosphäre beträgt der unsichtbare, enthaltene

Wasserdampf etwa 0 bis 4 Vol-%, ein verhältnismäßig geringer Anteil, der jedoch bauphysikalisch von großer Bedeutung ist.

Die Dampfmenge, welche in einem m³ Luft enthalten sein kann, ist beschränkt und hängt im Wesentlichen von der Temperatur ab. Je wärmer die Luft ist, desto größer ist die aufnehmbare Wasserdampfmenge. Die Wasserdampfmenge übt einen bestimmten Dampfdruck als Teildruck des atmosphärischen Gesamtdruckes auf die Luft aus und kann daher anhand der allgemeinen Zustandsgleichung idealer Gase beschrieben und berechnet werden. (Kautsch, 2011)

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad \text{bzw.} \quad \frac{m}{V} = \rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (3.16)$$

p	– Gasdruck	[Pa]
V	– Volumen	[m ³]
m	– Masse des Gases	[kg]
R	– Gaskonstante	[J/kgK]
T	– Temperatur	[K]
ρ	– Dichte des Gases	[kg/m ³]

Ausgehend von der oben beschriebenen Beziehung kann die absolute Luftfeuchte mit dem Verhältnis zwischen der Masse der in der feuchten Luft enthaltenen Feuchtigkeit und der Masse der trockenen Luft angegeben werden. (Kautsch, 2011)

$$m_{D,V} = \frac{m_D}{V} = \frac{p_D}{R_D \cdot T} = \frac{p_D}{461,4 \cdot T} \quad (3.17)$$

Wie bereits erwähnt, ist die aufnehmbare Wasserdampfmenge beschränkt und temperaturabhängig. Wenn die Luftfeuchte den Grenzwert der maximal aufnehmbaren Wasserdampfmenge erreicht, spricht man vom sogenannten Sättigungszustand der Luft. Wenn dieser Zustand erreicht ist und noch weiterhin Wasserdampfmoleküle dem Gemisch zugeführt werden, kommt es zur Nebelbildung und zur Kondensation des Wasserdampfes. (Kautsch, 2011)

Der Sättigungsdampfdruck kann entsprechend der ÖNORM B 8110-2, 2003 folgendermaßen berechnet werden:

$$p_s = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

$$p_s = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad \theta < 0^\circ\text{C} \quad (3.19)$$

Die relative Luftfeuchte beschreibt das Verhältnis zwischen der vorhandenen Feuchtigkeitsmenge in der Luft und der Sättigungsmenge. Dies lässt sich durch den Teildruck des Wasserdampfes p_D und dem Sättigungsdruck des Wasserdampfes p_s prozentual ausdrücken. (Kautsch, 2011)

$$\varphi = \frac{p_D}{p_s} \quad (3.20)$$

3-7.5 WASSERDAMPFDIFFUSION

Die Wasserdampfdiffusion stellt den Wasserdampftransport durch Bau- und Dämmstoffe dar. Es handelt sich dabei um die Eigenbewegung des Wasserdampfes durch ein festes Medium aufgrund eines Konzentrationsgefälles des Wasserdampfgehaltes auf der einen Seite zum Wasserdampfgehalt auf der anderen Seite. Dieses Dampfdruckgefälle stellt sich bei einer Temperaturdifferenz oder einer Differenz der relativen Luftfeuchte ein. Das Gasgemisch versucht den Konzentrationsunterschied auszugleichen und es kommt zu einem Massenstrom des Wasserdampfes durch das Medium hindurch. Dieser Massenstrom lässt sich mit Hilfe des Fick'schen Gesetzes allgemein beschreiben. (Häupl, 2008)

$$g_D = \delta * \frac{dp_D}{dx} \quad (3.21)$$

g_D	–	Wasserdampfstromdichte	[kg/m ² s]
δ	–	Wasserdampfleitfähigkeit	[kg/mhPa]
$\frac{dp_D}{dx}$	–	Wasserdampfgefälle	[Pa/m]

Wie sich ein Stoff gegenüber der Wasserdampfdiffusion verhält, drückt der μ -Wert des jeweiligen Baustoffes aus. Dieser Diffusionswiderstandsfaktor gibt an, um wieviel mal dichter der Stoff gegen diffundierende Wassermoleküle ist als eine ruhende, gleich dicke Luftschicht. Für die jeweilige Bauteilschicht lässt sich mit dem μ -Wert die diffusionsäquivalente Luftschicht s_d ermitteln. (Kautsch, 2011)

$$s_d = \mu * d \quad (3.22)$$

s_d	–	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke	[m]
μ	–	Diffusionswiderstandszahl	[-]
d	–	Dicke der Bauteilschicht	[m]

3-7.6 STATIONÄRER WASSERDAMPFDURCHGANG

Unter der Annahme, dass zeitlich konstante Bedingungen im Wasserdampfdruck herrschen, wird der Wasserdampfdurchgang am Bauteil durch eine konstante Wasserstromdichte beschrieben. Dadurch entsteht ein konstantes Wasserdampfprofil im Querschnitt. (Häupl, 2008)

$$g_D = \frac{\delta_L}{\mu} * \frac{(p_{D,i} - p_{D,e})}{d} = \frac{(p_{D,i} - p_{D,e})}{\frac{\mu * d}{\delta_L}} \quad (3.23)$$

g_D	–	Wasserdampfstromdichte	[kg/m ² s]
$p_{D,i}$	–	Dampfdruck innen	[Pa]
$p_{D,e}$	–	Dampfdruck außen	[Pa]
$r_D = \frac{\mu * d}{\delta_L}$	–	Wasserdampfwiderstand	[m/s]

Der Verlauf des vorhandenen Wasserdampfdruckes in einem mehrschichtigen Bauteil mit m Schichten lässt sich anhand folgender Formeln berechnen. (Häupl, 2008)

$$p_m = p_i - \frac{g_D}{\delta_0} \sum_{j=1}^m s_{d,j} \quad (3.24)$$

p_m	– Wasserdampfteildruck in der m -ten Schicht (von innen)	[Pa]
p_i	– Wasserdampfteildruck innen	Pa]
$s_{d,j}$	– wasserdampfäquivalente Luftschicht der j -ten Bauteilschicht	[m]
δ_0	– Mittelwert der Wasserdampfleitfähigkeit	[kg/mhPa]

Die Wasserdampfleitfähigkeit wird in der ÖNORM EN ISO 13788 zu $\delta_0 = 0,720 \text{ mg/mhPa}$ angegeben, was einem Wert von $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg/msPa}$ entspricht.

3-7.7 FEUCHTEBILANZGLEICHUNG

Wie in Kapitel 3-4.1 bereits beschrieben, herrscht ein Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt im Holz und der Wärmeleitfähigkeit des Holzes. Mit zunehmendem Feuchteanteil im Holz nimmt die Wärmeleitfähigkeit zu, weil Wasser eine höhere Wärmeleitfähigkeit als darrtrockenes Holz besitzt. Auf dieser Grundlage bedarf es einer gekoppelten Betrachtung des Wärme- und Feuchtetransportes. Es wird hierzu folgende Bilanzgleichung angeführt: (Häupl, 2008)

$$\frac{\Delta}{\Delta t} [\rho_w \cdot w + \rho_v (w_s - w)] - \rho_{s0} = \text{Speicherterm} \quad (3.25)$$

$$\frac{\Delta}{\Delta x} \left[\left[K_w(p_c, T) + \delta \cdot e^{-\frac{p_c}{\rho_w \cdot R_v \cdot T}} \cdot \left(\frac{p_s}{\rho_w \cdot R_v \cdot T} \right) \right] \frac{\Delta p_c}{\Delta x} \right] + \frac{\Delta}{\Delta x} \left[\left[\delta \cdot e^{-\frac{p_c}{\rho_w \cdot R_v \cdot T}} \cdot \left(\frac{\Delta p_s}{\Delta T} + \frac{p_s \cdot p_c}{\rho_w \cdot R_v \cdot T^2} \right) \right] \frac{\Delta T}{\Delta x} \right] = \text{Transportterm}$$

Hierbei beschreibt der Speicherterm die im Porenraum gespeicherte Feuchte, die in der Porenluft als Wasserdampf gespeicherte Feuchte und zuletzt alle weiteren Feuchtequellen. Der Transportterm beinhaltet die Kapillarwasserleitung, den Wasserdampftransport, welcher durch den Dampfdruckgradienten verursacht wird und den Wasserdampftransport, welcher durch den Temperaturgradienten verursacht wird.

Dieses nichtlineare, partielle Differentialgleichungssystem für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport lässt sich nur numerisch lösen. Programme wie DELPHIN des Institutes für Bauklimatik an der TU Dresden sind in der Lage, diese Bilanzgleichung an einzelnen Volumenelementen zu lösen, indem das Bauteil feinmaschig aufgeteilt wird. Das Programm bedarf zudem der Materialfunktionen der Wärmeleitfähigkeit, der Kapillarwasserleitfähigkeit, der Wasserdampfleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Feuchtespeicherfähigkeit der jeweiligen Materialien.

KAPITEL 4: MESSUMGEBUNG UND MESSSYSTEM

4-1 EINLEITUNG

Das anschließende Kapitel stellt die Forschungsumgebung und deren Komponenten dar. Zu Beginn bedarf es jedoch einer genaueren Betrachtung der verwendeten Baumaterialien. Im speziellen wird hier das Holz-Massivbauprodukt Brettsperrholz hinsichtlich seiner Herstellung und Verwendung näher beschrieben. Anschließend werden die unterschiedlichen Merkmale von Fichten- und Birkenholz herausgearbeitet, da diese Unterschiede ein verschiedenartiges bauphysikalisches Verhalten erwarten lassen. Zur Beurteilung des bauphysikalischen Verhaltens dienen festgelegte Grenzwerte bzgl. Temperatur, relative Luftfeuchte und der sich daraus ergebenden Ausgleichsfeuchte, welche in sogenannten Nutzungsklassen kategorisiert sind und hier angeführt werden. Was die Forschungsumgebung angeht, so wird das Untersuchungsobjekt und das Messsystem vorgestellt und näher beschrieben.

4-2 FORSCHUNGSWOHNUNG IN BSP

4-2.1 BRETTSPERRHOLZ

Gemäß ÖNORM B 1995-1-1, 2014 ist Brettsperrholz (Abkürzung BSP) ein mehrschichtiges Holzbauprodukt aus Brettlamellen oder Holzwerkstoffen, welches aus mindestens drei rechtwinklig zueinander orientierten, verklebten Lagen aufgebaut ist. Dabei kann eine Lage aus maximal drei Schichten mit gleicher Orientierung bestehen.

Dadurch, dass die einzelnen Brettlagen flächig miteinander verklebt sind, entsteht ein quasi starrer Verbund zwischen den Brettlagen. Die Bretter in einer Lage können an ihren Schmalseiten verklebt, knirsch aneinandergelegt oder mit einer Fuge dazwischen hergestellt werden. Die flächige Verklebung unterschiedlich orientierter Einzelschichten bewirkt auch einen Sperreffekt in dem gesamten Holzbauprodukt, der vor allem das stark ausgeprägte Quell- und Schwindverhalten quer zur Faser im Holz reduziert.

Brettsperrholz entwickelte sich als Holz-Massivbauweise im deutschsprachigen Alpenraum – Österreich, Schweiz und Deutschland – Ende der 80er-, Anfang der 90er-Jahre des 20. Jahrhunderts. In dieser Zeit gab es aufgrund der üblichen Nutzung von Holz große Mengen an schlecht zu vermarkteter Seitenware, welche nach einer Restverwertbarkeit bedurfte. Brettsperrholz konnte aufgrund des Produktkonzepts diesen Bedarf als Zusatzprodukt stillen und führte zu einer höheren Wertschöpfung aus dem Rohstoff Holz und gleichzeitig konnte ein großformatiges und flächenhaftes Holzbauprodukt der Bauindustrie zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach dem vielfältig einsetzbaren und massiven Holzbauprodukt kam es sehr bald dazu, dass nicht nur auf Seitenware sondern auch auf Grundmaterial aus der Brettschichtholzindustrie zurückgegriffen wurde.

Sowohl die Abmessungen von Brettsperrholz als auch die Abmessungen von den Brettern als Ausgangsprodukt sind momentan nicht einheitlich geregelt. Brettsperrholz besteht üblicherweise aus drei bis fünf Brettlagen, wird bei Bedarf aber auch sieben- oder neun-schichtig hergestellt. Eher ungewöhnlich ist eine maximal mögliche Anzahl von bis zu 25 Brettlagen. Die Bretter haben meist eine Dicke von 25 bis 40 mm, können jedoch maximale Werte von 10 bis 45 mm annehmen. Die Brettbreite liegt zwischen 80 und 240 mm, wobei auch Breiten von 40

bis 300 mm möglich sind. Für die Brettsperrholzelemente ergeben sich üblichen Abmessungen von 3 x 13 m, wobei die Breite bis zu 4,8 m und die Länge bis zu 24 m betragen kann.

Herstellung

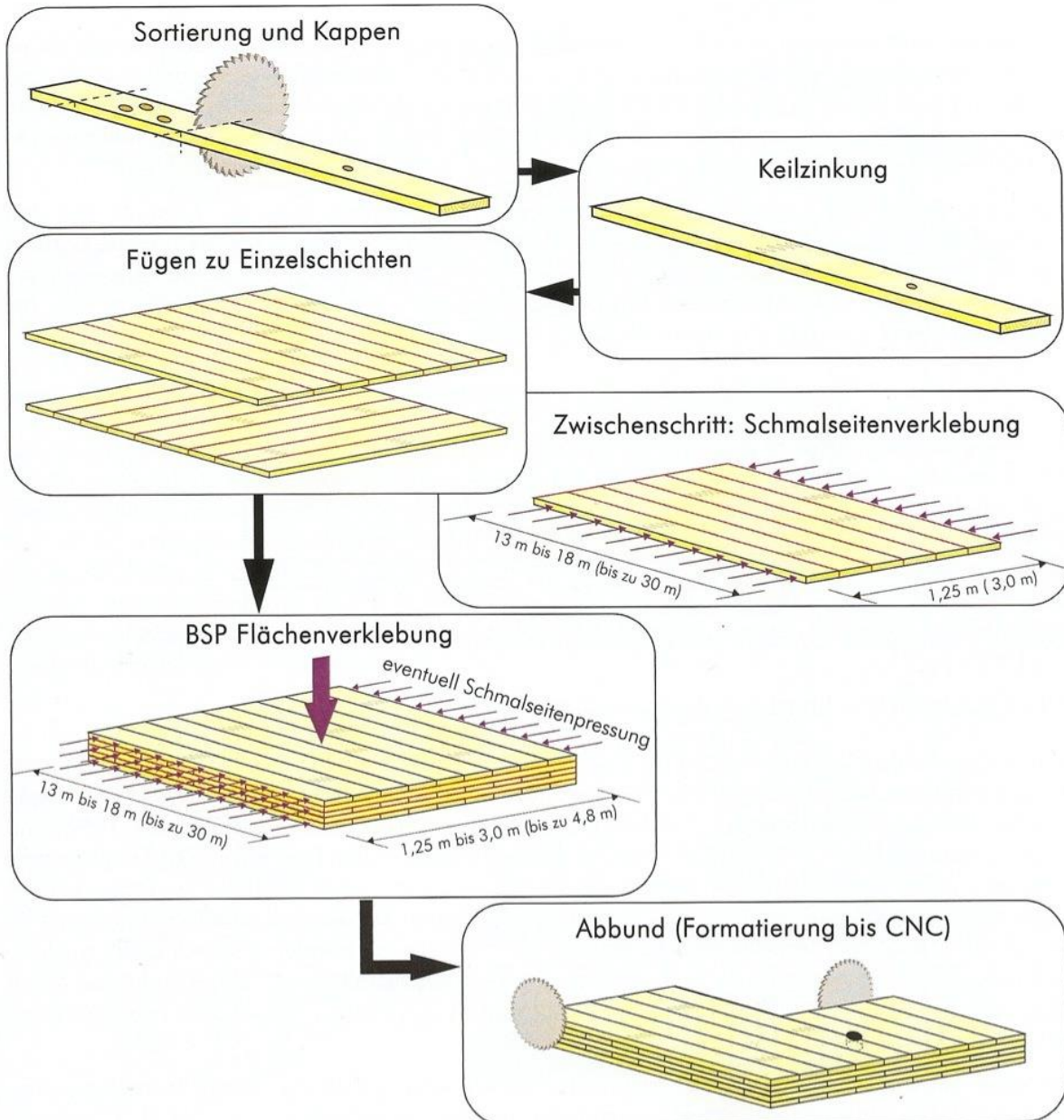


Abbildung 4.1: Herstellung von Brettsperrholz, aus (Schickhofer, et al., 2010)

Die Herstellung von Brettsperrholz wird in mehrere voneinander unabhängige Produktionsschritte gegliedert. Zunächst bedarf es einer Sortierung des Brettmaterials. Die Sortierung wird vorwiegend maschinell oder visuell mit Hilfe apparativer Unterstützung durchgeführt. Bei der Produktion wird meist Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 eingesetzt, wobei in den Querlagen auch Holz der Festigkeitsklasse C16/C18 zu finden sein kann. Laubholz oder Nadelhölzer mit höheren Festigkeitsklassen sind momentan nicht weit verbreitet.

Anschließend wird das sortierte Brettmaterial mittels Keilzinkenverbindung zu einer Endlosbrettlamelle weiterverarbeitet. Kleine Brettsperrholzelemente können auch aus

ungezinkten Brettern entstehen, es ist aber üblich, dass die Endlosbrettlammelle auf die gewünschte Brettlänge gekappt wird, da es das wirtschaftlichere Verfahren ist. Zu diesem Zeitpunkt können lokale Fehlstellen noch ausgekappt werden und damit kann das gesamte Brett noch auf eine höhere Sortierklasse angehoben werden. Bei der Herstellung der Endloslammelle hat die Dickenhobelung einen besonderen Stellenwert. Es entstehen bei unterschiedlichen Brettdicken später auch unterschiedlich dicke Klebefugen zwischen den einzelnen Brettschichten. Dickere Klebefugen führen zu einer niedrigeren Klebefugengüte und somit zu einer niedrigeren Klebefugenfestigkeit.

Der anschließende Arbeitsschritt ist die Herstellung der jeweiligen Einzelschichten, aus denen sich das Brettsperrholzbauteil zusammensetzt. Der Unterschied zwischen den einzelnen Brettsperrholzprodukten, die auf dem Markt angeboten werden, ist der Umgang mit den Fugen zwischen den einzelnen Brettern. Hier wurden zunächst Fugen bis zu 10 mm toleriert, da sie keinen Einfluss auf das Tragverhalten haben. Im Hinblick auf das bauphysikalische Verhalten, die ästhetische Erscheinung und das Anbringen von stiftförmigen Verbindungsmitteln wirken sich solche Fugen jedoch negativ aus. Vor diesem Hintergrund kam es einerseits zur Herstellung der Einschichtplatte mit einer definierten Schmalseitenverklebung. Dadurch wird die Fugenbreite zwischen den Brettlamellen auf maximal 2 mm reduziert und das gesamte BSP-Element kann als vollkommen dicht im Sinne von rissfreiem Vollholz angesehen werden. Andererseits kann eine Reduktion der Fugenbreite auch über eine Schmalseitenpressung während des Flächenpressvorganges des gesamten BSP-Elementes erzielt werden. Hier dringt der Klebstoff, der flächendeckend zwischen den Einzelschichten aufgebracht wird, in die Fuge ein und es kommt zu einer unplanmäßigen und unvollständigen Schmalseitenverklebung.

Die Regeln der Flächenverklebung gründen sich zumeist auf den Regelungen und Forschungsergebnissen der Brettschichtholzproduktion. Für den jeweiligen Klebstoff werden Angaben zu Klebstoffauftragsmenge, Pressdruck, Holzfeuchte, Verarbeitungstemperatur, Aushärtezeit, u.v.m. direkt vom Hersteller gemacht. Der Klebstoff wird im Lamellendurchlaufverfahren oder im Vollflächenauftragsverfahren aufgebracht. Nachdem der Klebstoff aufgetragen ist wird zumeist die gesamte Fläche mit einem Flächenpressdruck von 0,6 N/mm² bis 0,8 N/mm² in der Regel hydraulisch gepresst. Dadurch entsteht eine schubbeanspruchbare quasi starre Klebefuge zwischen den Einzelschichten, die dem BSP-Element sein Systemtragverhalten ermöglicht. Da für die Pressung des gesamten BSP-Elementes, aufgrund der großen Abmessungen, ein enormer maschinenbaulicher Aufwand betrieben werden muss, kann alternativ auf eine abschnittsweise erfolgende Pressung zurückgegriffen werden. Hierbei muss die Aushärtung des Klebstoffes jedoch durch höhere Temperaturen mittels hochfrequenter Strahlung beschleunigt werden. Alternativ kann die Flächenverklebung bei einem Pressdruck von 0,1 N/mm² mittels Vakuumtechnik erfolgen. Hierbei steigen jedoch die Anforderungen an die Einzelschichten in Bezug auf die Ebenheit. Alternativ lässt sich das Verfahren auch anwenden, wenn die Eigensteifigkeit durch Entlastungsnuten reduziert wird. Als Sonderverfahren wird noch die Klammerpressverklebung für die Produktion von Einschichtplatten mit besonders ebenen Oberflächen angeführt.

Das fertige BSP-Element wird als Standartware an den Rändern besäumt. Ausgetretener Klebstoff kann anschließend noch durch eine Flächenhobelung oder durch einen Schliff entfernt werden. Ein CNC-gesteuerter Abbund ermöglicht eine generelle Änderung der Geometrie der Platte, Fenster- und Türöffnungen, aber auch andere Fräsungen können realisiert werden. (Schickhofer, et al., 2010)

Einsatzgebiete von BSP

Brettsper Holz bietet aufgrund der großflächigen Abmessungen einen großen Einsatzbereich. Dem konstruktiven Ingenieurholzbau stellt es ein nachhaltig nutzbares Bauprodukt zur Verfügung, welches die Beschränkungen der stabförmigen Holzbauprodukte überwindet. Dadurch ergeben sich viele neuartigen Möglichkeiten in Bezug auf die architektonische Gestaltung und der Abtragung von Einwirkungen. Die ebenflächige Form von BSP-Produkten ergeben als baupraktische Einsatzformen:

- Platten - quer zu ihrer Mittelfläche beanspruchte Bauteile,
- Scheiben - in ihrer Ebene beanspruchte Bauteile und
- faltwerke - aus ebenen Flächen aufgebaute räumliche Strukturen, die sowohl Platten- als auch Scheibentragwirkung aufweisen

Das Produkt Brettsper Holz bringt auch wirtschaftliche und qualitative Vorteile mit sich. Als industriell, unter Einsatz modernster Technik, hergestelltes Holzbauprodukt unterliegt es sehr hohen Qualitätssicherungsmaßnahmen. Zudem können wandgroße Bauteile mit einem hohen Vorfertigungsgrad hergestellt werden, was zu kurzen Montagezeiten auf der Baustelle führt. Mit üblichen Hebewerkzeugen (siehe Abbildung 4.2 und Abbildung 4.4) werden die einzelnen Elemente passgenau und in kürzester Zeit zu Gebäuden bzw. größeren Strukturen zusammengefügt. (Schickhofer, et al., 2010)

Das Einsatzspektrum umfasst den Einfamilien-Wohnungsbau bis hin zu größeren Mehrgeschossgebäuden, die bereits zehn Geschosse erreichen. Aufgrund der wirtschaftlichen und ökologischen Bauweise wird Brettsper Holz in sozialen Einrichtungen wie Kindergärten sinnvoll eingesetzt, stellt aber genauso wirtschaftlichen Bürogebäuden ein angenehmes Arbeitsklima zur Verfügung. Das Produkt erobert aber auch eher außergewöhnliche Einsatzbereiche – so ist BSP bereits in Brücken, Swimmingpools und Windrädern zu finden. Da solche Bauwerke vermehrt den klimatischen Einwirkungen ausgesetzt sind, gilt es hierbei besonders auf einen angemessenen Holzschutz zu achten.



**Abbildung 4.2: Hartberg (AUT),
Bilder von holz.bau
forschungs gmbh, Graz**

**Abbildung 4.3: London (UK),
Bilder von KLH**

**Abbildung 4.4: Feldbach
(AUT), Bilder von holz.bau
forschungs gmbh, Graz**

Besonders auf der Grundlage von Kapitel 3-2.3, wo der Aufbau der Nadelhölzer und der Aufbau der Laubhölzer allgemein beschrieben ist, wird nun spezifisch auf die Holzcharakteristik und das Holzbild der beiden Holzarten Fichte und Birke näher eingegangen. Zudem sind die sich daraus ergebenden Kennwerte für die beiden Holzarten tabellarisch dargestellt und werden hinsichtlich des zu erwartenden bauphysikalischen Verhaltens ausgewertet.

4-2.2 FICHTE

Allgemeines

Die Fichte (*Picea abies* Karst.) ist ein 30 bis 55 m hoher Nadelbaum dessen Stammdurchmesser maximal 1,5 m erreicht. Der Stamm zeichnet sich durch einen zylindrischen und äußerst geradschäftigen Verlauf aus und kann bis zu 20 m lang sein. Da die Fichte hierzulande ein sehr großes Spektrum der Verwendung aufzeigt wird sie meist nur 80 bis 100 Jahre alt, kann aber sehr wohl ein Alter von 600 Jahren erreichen. Generell ist sie in Mittel-, Südost-, und Nordosteuropa beheimatet, wird aber auch in Westrusland angetroffen. (Schickhofer, 2006)



Abbildung 4.5: Beispiel Fichte, aus (Fellner, et al., 2006)

Verwendung

Fichtenholz ist die bedeutendste Nutzholzart in Österreich und besitzt im Bauwesen durch seine vielseitige Einsetzbarkeit einen sehr hohen Stellenwert. Als Konstruktionsvollholz kommt das Holz beispielsweise in Decken, Dachstühlen und im Rahmenbau zum Einsatz, wird aber auch in Form verleimter Bretter zu Brettschichtholz, Brettspertholz oder Massivholzplatten verarbeitet. Zusätzlich werden Baustellengegenstände wie Schalungen und Gerüstplanken aus dem gut zu bearbeitenden Holz hergestellt. Im Innenausbau wie auch außen als Fassadenverkleidung ist die Fichte anzutreffen. (Fellner, et al., 2006)

Holzcharakteristik und Holzbild

Das makroskopische Holzbild ist dadurch gekennzeichnet, dass sich das Splint- und Kernholz farblich nicht unterscheiden. Die Farbe des Holzes ist gelblichweiß mit einem seidigen Glanz. Deutlich zu erkennen sind die Jahringgrenzen im Querschnitt des Holzes, wobei das Spätholz mit einer rötlichgelben Farbe und Harzkanälen auffällt. Im Tangentialschnitt des Holzes sind markante Fladern charakteristisch sowie auffällige Streifen im Radialschnitt.



Abbildung 4.6: mikroskopischer Querschnitt Fichte, aus (Forest Products Laboratory, 2010)

Wie in Kapitel 3-2.3 bereits beschrieben, bilden Tracheiden- und Parenchymzellen das Grundgerüst für die Nadelhölzer.

Bei der Betrachtung der Tracheiden im Querschnitt auf mikroskopischer Ebene sind die dickeren Zellwände mit kleinerem radialen Durchmesser des Spätholzes deutlich von den größeren Zellen des Frühholzes zu erkennen, wobei durchaus ein Übergangsbereich existiert. Zudem sind im Leitgewebe auch die Jahrringe deutlich zu sehen. Was den radialen

Wassertransport angeht, so sind auf den Radialwänden der Frühholztracheiden meist einreihig angeordnete Hoftüpfel zu finden. (Grosser, 1977)

Ein Speichergewebe (Parenchym) ist entweder gar nicht oder nur geringfügig vorhanden.

Tabelle 4.1: Kennwerte Fichte, aus (Fellner, et al., 2006), (ÖNORM EN ISO 10456, 2010)

Rohdichte	
Mittelwerte ρ_{12}	440 kg/m ³
Grenzwerte ρ_{12}	330-680 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	
λ	0,12 W/mK
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	
μ	50 [-]
Spezifische Wärmekapazität	
c_p	1600 [J/kgK]
Schwind- und Quellmaße	
Gesamtschwindmaß	
axial $\beta_{l,max}$	0,3 %
radial $\beta_{r,max}$	3,6 %
tangential $\beta_{t,max}$	7,8 %
Differentielle Quellung	
radial q_r	0,19 %/%
tangential q_t	0,33 %/%

4-2.3 BIRKE

Allgemeines

Die Birke (*Betula pendula* Roth.) erreicht eine Höhe von bis zu 25 m. Ihre Kronenform ist unregelmäßig und ihre Zweige sind sehr biegsam. Charakteristisch und schon von weitem auffallend ist die weiße Rinde der jungen Bäume. Mit zunehmendem Alter geht die Rinde im unteren Stammbereich in eine schwarze, rissige Borke über. Sie erreicht ein Höchstalter von 120 Jahren und ist in ganz Mitteleuropa beheimatet. In Österreich ist sie bis in 1500 m Höhe zu finden und deckt einen Anteil von 0,5 % am Ertragswald ab. Sie wurde als Holzart lange ungeschätzt, kommt aber immer mehr ins Bewusstsein der Holzindustrie zurück.



Abbildung 4.7: Beispiel Birke, aus (Fellner, et al., 2006)

Verwendung

Das Holz der Birke ist schwer und mittelhart aber gleichzeitig zäh und elastisch. Dadurch lässt es sich gut be- und verarbeiten. Als tragendes Bauholz wird es noch sehr selten im mitteleuropäischen Raum verwendet. Als Span- und Faserplatten wird es in Österreich zum Teil verwendet. Aufgrund des welligen Faserverlaufes eignet sich das Holz für Edelfurniere und wird im nordosteuropäischen Raum vielfach zu Sperrholz verarbeitet. Im Möbelbau wird das Holz in verschiedene Farbtöne eingefärbt, wird aber auch in natura als heller Parkettfußbodenbelag geschätzt. Zudem ist es als Kaminfeuerholz aufgrund geringen Funkenflugs sehr beliebt.. (Fellner, et al., 2006)

Holzcharakteristik und Holzbild

Bei der Birke handelt es sich um einen Splintholzbaum, dessen Kern keine besondere Färbung aufweist. Das Holz glänzt leicht seidig in den Farben gelblichweiß, rötlichweiß bis hellbräunlich. Die Jahrringgrenzen lassen sich durch schwache, schmale Spätholzstreifen erkennen. Im Querschnitt sieht man auf der makroskopischen Ebene die feinen bis mittelgroßen Gefäße (Tracheen) als zerstreute, helle Punkte, die den Eindruck erwecken als wäre das Holz mit Mehl bestäubt. Im Tangentialschnitt hingegen sind die Tracheen als Nadelrisse zu erkennen und bedingen einen oftmals welligen Verlauf der Holzfasern.



Abbildung 4.8: mikroskopischer Querschnitt Birke, aus (Forest Products Laboratory, 2010)

Bei der Betrachtung der Gefäße auf mikroskopischer Ebene ist zusätzlich zu erwähnen, dass sie sehr gleichmäßig über den Jahrring verteilt sind, jedoch mit einer Anzahl von 30 bis 50 Gefäße/mm² tragen sie dazu bei, dass das Holz der Birke ziemlich weich eingestuft wird. Sie haben eine rundlich bis eckige Form, sind klein und besitzen einen mittleren Durchmesser von 90 µm. Die Hoftüpfel sind mit einem Durchmesser von 3 µm ebenfalls als klein zu bewerten und gehen von Gefäß zu Gefäß.

Als Grundgewebe zur Festigung des Holzes weist die Birke mittelwandige, aus Librifasern aufgebaute Holzfasern auf, die nur sehr wenig Tüpfel für den Wasseraustausch bereitstellen.

Radial dazu ausgerichtet sind zwischen den Holzfasern Parenchymzellen als Speichergewebe verteilt. (Grosser, 1977)

Tabelle 4.2: Kennwerte Birke, aus (Fellner, et al., 2006), (DIN 68364, 2003), (ÖNORM EN ISO 10456, 2010)

Rohdichte	
Mittelwerte ρ_{12}	660 kg/m ³
Grenzwerte ρ_{12}	510-830 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	
λ	0,17 W/mK
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	
μ	170 [-]
Spezifische Wärmekapazität	
c_p	1600 [J/kgK]
Schwind- und Quellmaße	
Gesamtschwindmaß	
axial $\beta_{l,max}$	0,6 %
radial $\beta_{r,max}$	5,3 %
tangential $\beta_{t,max}$	7,8-8,2 %
Differenzielle Quellung	
radial q_r	0,27 %/%
tangential q_t	0,36 %/%

4-2.4 VERGLEICH VON FICHTE UND BIRKE

Die Kennwerte in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 machen den Unterschied zwischen Fichten- und Birkenholz deutlich. Zunächst hat Fichte mit einer mittleren Rohdichte von 440 kg/m³ im Vergleich zur Birke nur zwei Drittel der Masse pro Kubikmeter. Wie aus Kapitel 3-3.2 ersichtlich ist, hat dieser Dichteunterschied Auswirkungen auf wichtige Eigenschaften wie der Festigkeit, der Dickenänderung bei Druck, der Wärmeleitfähigkeit und dem maximalen Feuchtegehalt. In Bezug auf das klimatische Verhalten weist Birke eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf, was aufgrund des dichteren Materials begründet ist. Dadurch ist auch weniger isolierende Luft im Birkenholz, sodass der dämmende Effekt im Fichtenholz größer sein wird. Was den maximalen

Feuchtegehalt angeht, so wird in (Niemz, 1993) festgestellt, dass der Fasersättigungsbereich der Birke mit 28,9 % niedriger als derjenige der Fichte ist, die 34,8 % Feuchte erreicht. Ein solches Verhalten ist aufgrund Abbildung 3.7 zu erwarten gewesen. Die größere Ausgleichsfeuchte im Fichtenholz bei gleichen klimatischen Randbedingungen wird auch dadurch verdeutlicht, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 50 geringer als derer im Birkenholz ist, welche mehr als dreimal so hoch ist. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Birke das günstigere Quell- und Schwindverhalten aufweist. Die beiden Holzarten verhalten sich nahezu identisch, obwohl das Quell- und Schwindverhalten ebenfalls von der Rohdichte abhängig ist. Zudem ist es aber auch noch vom Spätholzanteil, dem anatomischen Aufbau und dem Ligninanteil abhängig. Die Birke weist nur in radialer Richtung ein etwas ungünstigeres Verhalten auf.

4-2.5 NUTZUNGSKLASSE

Wie in Kapitel 3-5 bereits beschrieben, ist Holz ein kapillarporöser Stoff mit einem bestimmten Verhalten gegenüber Feuchte. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft kommt es zu einer Anpassung der Holzfeuchte an die umgebende Temperatur und der vorhandenen relativen Luftfeuchte. Mit der Holzfeuchte ändern sich jedoch auch die mechanischen Eigenschaften des Holzes. Zur Berücksichtigung dieses hygroskopischen Einflusses werden Holzbauteile in Nutzungsklassen eingeteilt. Die Nutzungsklassen sind im Eurocode 5-1-1 (siehe ÖNORM B 1995-1-1, 2014) festgelegt.

Nutzungsklasse 1

Nutzungsklasse 1 klassifiziert alle Bauteile, die in einer dauerhaften und geschlossenen Hülle gegen das Außenklima geschützt sind. Die umgebende Luft überschreitet den Wert der Temperatur von 20 °C und den Wert der relativen Luftfeuchte von 65 % nur in wenigen Wochen im Jahr. Dies ist vor allem bei allseitig geschlossenen und beheizten Gebäuden gegeben.

Für die Holzfeuchte ergibt sich daraus ein Ausgleichsfeuchtebereich von 5 bis 15 %, wobei die meisten Nadelhölzer einen Feuchtegehalt von 12 % meist nicht überschreiten. Durch die zeitlich länger dauernden Feuchtetransportvorgänge im Holz steigt die Holzfeuchte bei kurzzeitig erhöhter relativer Luftfeuchte nur wenig an.

Nutzungsklasse 2

Nutzungsklasse 2 klassifiziert alle Bauteile in offenen aber überdeckten Gebäuden, deren Bauteile vor unmittelbarer Bewitterung geschützt sind. Sie ist durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen gekennzeichnet, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft von 85 % für die meiste Zeit im Jahr entspricht.

Der Holzfeuchtegehalt der meisten Nadelhölzer überschreitet den Wert von 20 % meist nicht.

Nutzungsklasse 3

Nutzungsklasse 3 klassifiziert alle Bauteile, die der Witterung frei ausgesetzt sind. Sie erfasst alle Klimabedingungen, die zu höheren Feuchtegehalten in den Bauteilen als in Nutzungsklasse 1 und 2 führen.

4-2.6 SITUIERUNG

Das Langzeitmesssystem ist in einer Forschungswohnung in Graz eingebaut, welche im Zeitraum vom Sommer 2011 bis Herbst 2012 errichtet wurde. Sie ist Teil eines Bauprojektes mit dem Namen „_massive_living“, das 22 Wohneinheiten in zwei dreigeschossigen Baukörpern unterbringt. Die zwei Baukörper sind nahezu identisch und charakterisieren sich durch eine sogenannte Mischbauweise. Dabei sind die Tiefgarage, die 22 Stellplätze, Kellerabstell- und Trockenräume beinhaltet, sowie die Erschließungskerne der beiden Baukörper in Stahlbeton hergestellt. Die um die Kerne herum angeordneten Wohneinheiten sind in Holz-Massivbauweise aus Fichten-Brettsperrholz errichtet worden.

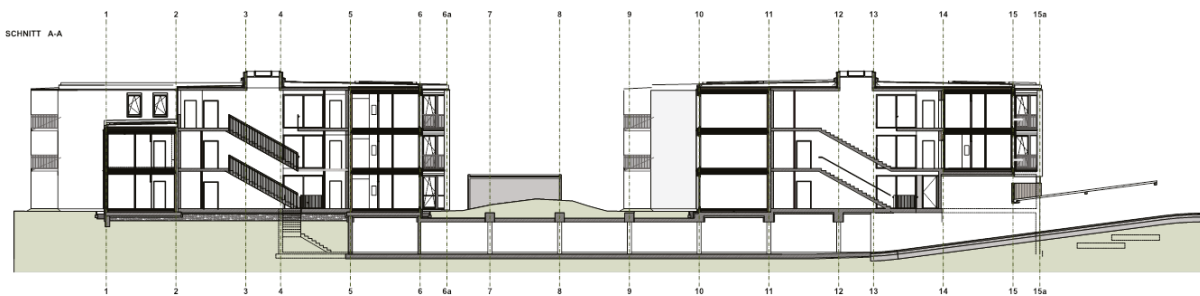


Abbildung 4.9: _massive_living Schnitt A-A, (ARCH. DI PETER ZINGANEL bearbeitet)

Für die Holz-Massivbauweise ist der Bau der Tragstruktur aus flächig verarbeiteten Holzelementen üblich. Die Wohneinheiten des _massive_living-Gebäudes sind aus 5-schichtigen Brettsperrholzelementen aufgebaut. Die Wandscheiben sind aus Fichtenholz mit einer Stärke von 95 mm ausgeführt, die Zwischengeschossplatten sind 198 mm stark und die Dachelemente 184 mm. Die horizontalen Platten sind ebenso aus 5-schichtigem Fichtenholz aufgebaut.



Abbildung 4.10: _massive_living Impressionen, aus (Ringhofer, et al., 2012)

Das Besondere an diesem Bauprojekt ist jedoch die sogenannte Laubholzwohnung. Sie besteht aus 5-schichtigen Birken-Brettsperrholzwandelementen und ist der Ausgangspunkt der anschließenden Untersuchungen. Bei der Betrachtung des Schnittes A-A (Abbildung 4.9) ist die Forschungswohnung im ersten Obergeschoss des rechten Baukörpers zu finden. (siehe hierzu auch Abbildung 4.11)

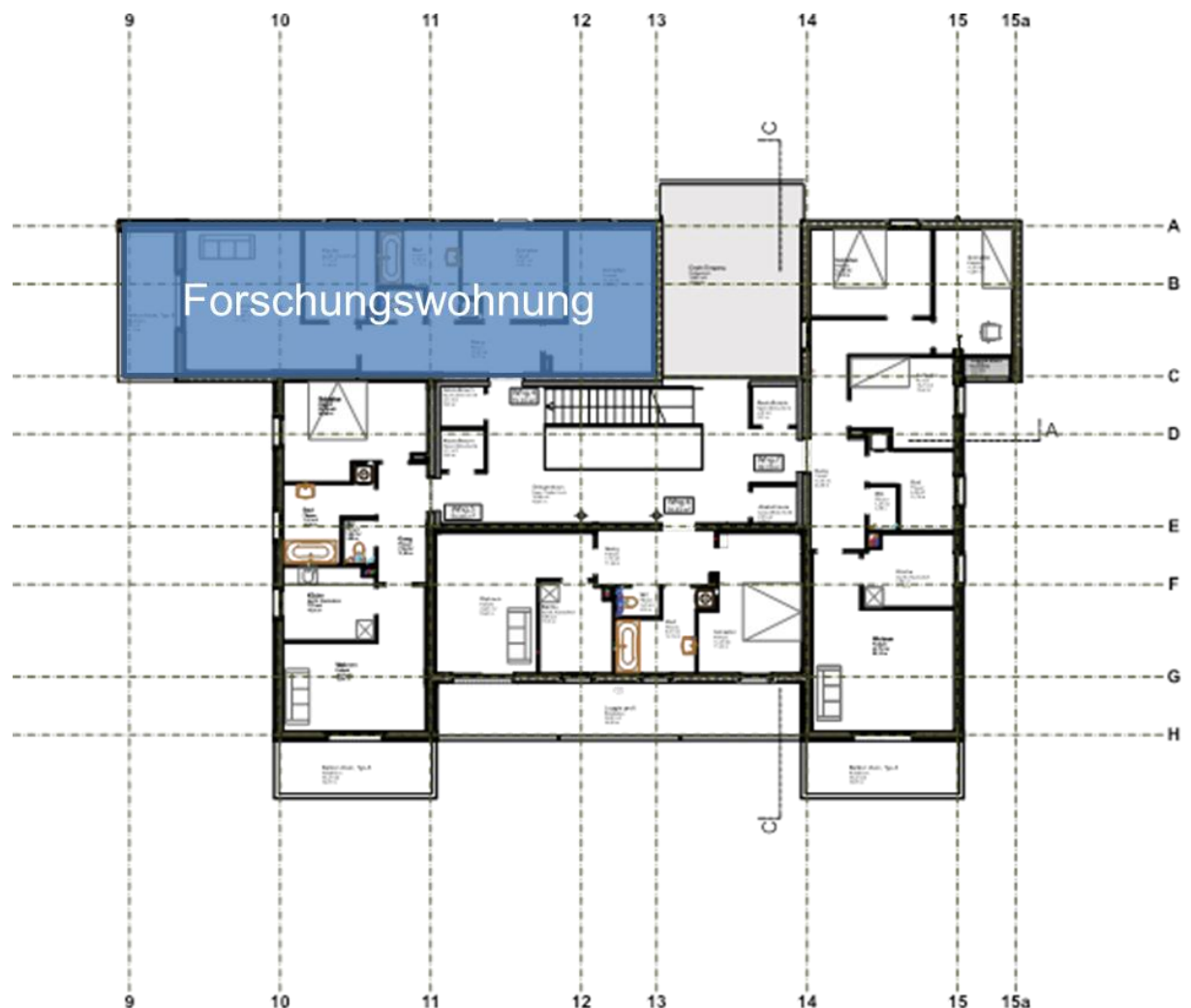


Abbildung 4.11: _massive_living Grundriss 1.OG, (ARCH. DI PETER ZINGANEL bearbeitet)

Im Grundriss sind die vier Wohneinheiten des ersten Obergeschosses klar zu erkennen. Eine zusätzliche Besonderheit der Bauweise ist die Entkoppelung der Wohneinheiten untereinander. Vor allem aus schalltechnischen Gründen sind die einzelnen Wohneinheiten durch eine vertikale Fuge von 3 cm vollständig voneinander getrennt und bilden ein eigenes unabhängiges Tragsystem. Die Geschossdecken der jeweiligen Wohneinheiten sind am Treppenhaukern durch Stahllaschen angeschlossen, sodass deren Lagesicherung gegeben ist und Horizontalkräfte an den Treppenhaukern weitergeleitet werden können. Durch diesen getrennten Aufbau wird auch die Errichtung einer einzelnen Laubholzwohnung innerhalb des sonst aus Fichten-BSP-Elementen bestehenden Gebäudes möglich. Ein weiterer Vorteil dieser Entkoppelung ist, dass die vier einzelnen Türme separat voneinander errichtet werden können. (Zimmer, 2013)

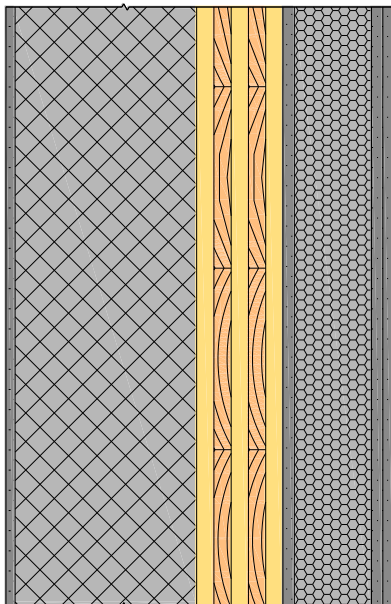
4-2.7 WANDAUFBAU

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, ist die Forschungswohnung aus 5-schichtigen Birken-BSP-Elementen aufgebaut. Die Birken-BSP-Wandelemente sind aus 18 mm starken Brettern aufgebaut, was zu einer Gesamtdicke von 90 mm führt. Dadurch, dass die Langzeitmessung parallel an einem Fichten-BSP-Querschnitt durchgeführt wird, ist innerhalb der Forschungswohnung ein 1-m breiter Fichten-BSP Referenzquerschnitt zu finden (siehe Abbildung 4.15), welcher aufgrund 19 mm starker Bretter auf eine Gesamtdicke von 95 mm kommt. Damit sich die Messergebnisse miteinander vergleichen lassen, ist der restliche Aufbau des Außenwandquerschnittes zueinander identisch. Auf der Außenseite ist eine Fassadenplatte aus Mineralwolle angebracht, worauf ein Unter- und Oberputz aufgebracht ist. Die Innenseite schützt eine Gipskartonfeuerschutzplatte sowie eine zusätzliche 85 mm starke Mineralwolle, die mit zwei Gipskartonplatten verkleidet ist (siehe Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14).



Abbildung 4.12: massive living Anordnung der BSP-Elemente, aus (Zimmer, 2013)

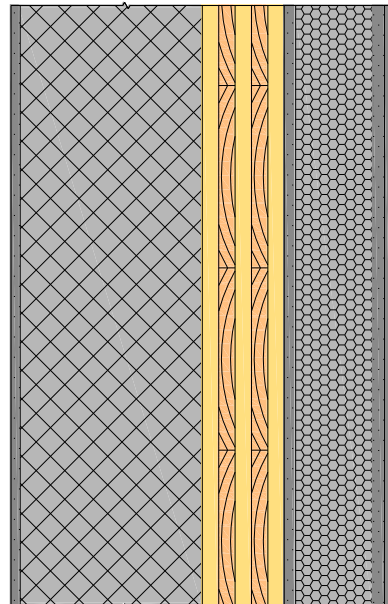
Fichte



25,0 mm Gipskartonplatte 2x
85,0 mm Mineralwolle
12,5 mm Gipskartonfeuerschutzplatte
95,0 mm Brettsperrholz (19|19|19|19|19)
200,0 mm Fassadenplatte (Mineralwolle)
10,0 mm Unter- und Oberputz

Abbildung 4.13 Wandaufbau Fichte

Birke



25,0 mm Gipskartonplatte 2x
85,0 mm Mineralwolle
12,5 mm Gipskartonfeuerschutzplatte
90,0 mm Brettsperrholz (18|18|18|18|18)
200,0 mm Fassadenplatte (Mineralwolle)
10,0 mm Unter- und Oberputz

Abbildung 4.14 Wandaufbau Birke

4-3 LANGZEITMESSSYSTEM

4-3.1 ANORDNUNG

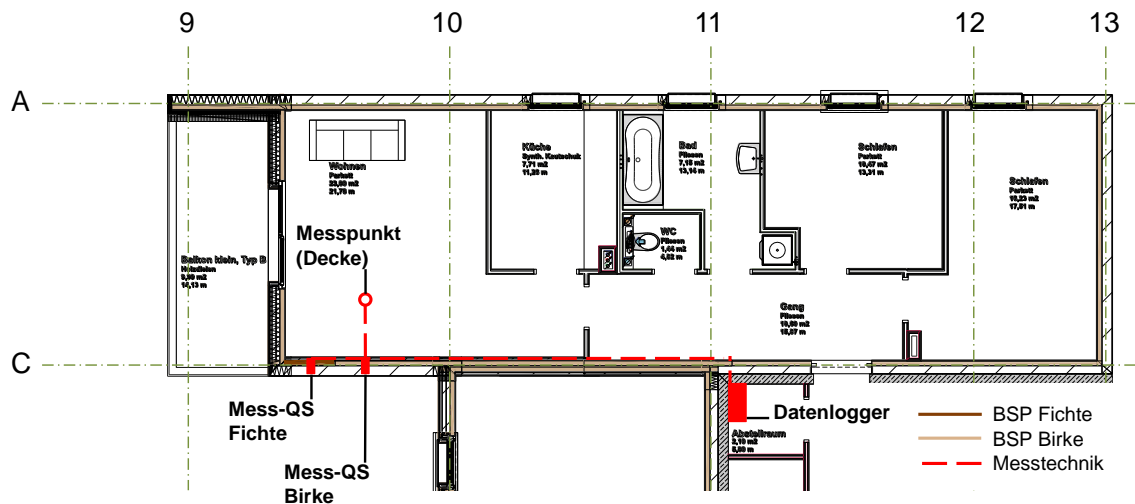


Abbildung 4.15: Messkonfiguration, (ARCH. DI PETER ZINGANEL bearbeitet)

Die Messstellen befinden sich in der nord-östlichen Außenwand der Forschungswohnung. Das Messsystem besteht aus mehreren Komponenten. Zunächst sind in den zwei Messquerschnitten jeweils sechs Sensoren eingebaut (siehe Abbildung 4.16), welche Temperatur und relative Luftfeuchte an sechs verschiedenen Stellen innerhalb des Querschnitts aufzeichnen können. Sie definieren sich durch folgende Messpunkte:

Fichte

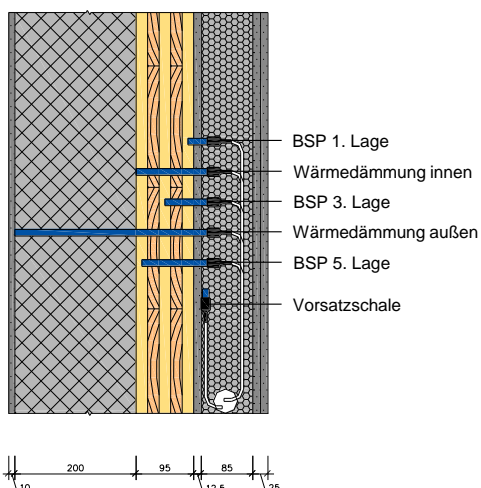


Abbildung 4.16: Anordnung der Sensoren im Mess-QS Fichte

- Wärmedämmung außen
- Wärmedämmung innen
- BSP 5. Lage
- BSP 3. Lage
- BSP 1. Lage
- Vorsatzschale

Zusätzlich befindet sich im Rauminneren an der Decke ein weiterer Sensor, der das Innenraumklima aufzeichnet (siehe Abbildung 4.15). Ein Datenkabel übermittelt die aufgezeichneten Messwerte an einen Datenlogger, der in einem Abstellraum vor der Wohnung zu finden ist. Der Datenlogger arbeitet mit einer 20-minütigen Messfrequenz und speichert die Messdaten intern ab. Die Daten können anhand eines Übertragungskabels ausgelesen werden und stehen dann für die weitere Bearbeitung zur Verfügung.

Das Messprogramm wird durch eine außenliegende Messstelle komplettiert, die an einem windgeschützten Ort das Außenklima (Temperatur und relative Luftfeuchte) aufzeichnet. (Ringhofer, et al., 2012)

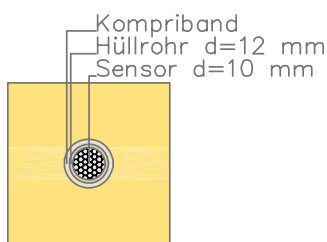
4-3.2 FUNKTIONSWEISE

Bei den Messsensoren innerhalb des Wandquerschnittes handelt es sich um Sensoren vom Typ HIH-4602-A/C der Firma Honeywell, die in der Lage sind, sowohl Temperatur als auch relative Luftfeuchte gleichzeitig zu messen. Die Temperatur wird hierbei mit einem Widerstandsthermometer gemessen. Den Messwiderstand (Thermistor) bildet ein gesinterter Edelstahlfilter, der aufgrund seiner Temperaturabhängigkeit einen elektrischen Widerstand liefert, welcher sich dann zur Temperatur der umliegenden Luft umrechnen lässt. Parallel dazu beinhaltet der Sensor einen Planarkondensator, welcher beim Anlegen einer Spannung dazu führt, dass elektrischer Strom fließt. Wie stark die resultierende Spannung ist bedingt der Feuchtegehalt der umliegenden Luft, was sich anschließend zur relativen Luftfeuchte umrechnen lässt. Der Kondensator ist durch eine zusätzliche Polymerschicht gegen Schmutz, Staub, Öl und andere Schadstoffe geschützt. (Honeywell, 2007)

Der Einbau der Messsensoren gliedert sich in mehrere Schritte. Zunächst werden die Bohrlöcher für die Sensoren mittels Schlangenbohrer hergestellt. Die Länge der Bohrlöcher ergibt sich aus der Anordnung der Sensoren für den jeweiligen Messquerschnitt (siehe Abbildung 4.16). Die Sensoren werden dann im Bohrloch angebracht, wobei hier darauf zu achten ist, dass ein luftdichter Messbereich im Bohrloch entsteht. Am Beginn und am Ende des Bohrkanals werden daher aufgeklebte Kompribänder (Fugendichtbänder) an der Sensoreinheit angebracht und das Bohrloch wird anschließend mit Hilfe einer Silikoninjektion luftdicht versiegelt (siehe Abbildung 4.17). (Ringhofer, et al., 2012)

Dadurch, dass das Bohrloch und der jeweilige Sensor gegen die Außenluft verschlossen ist stellt sich im Bohrloch das Klima der umliegenden Holzschichten ein. Das Prinzip entspricht dem hygroskopischen Verfahren, welches in Kapitel 3-6.9 bereits beschrieben wurde.

Schnitt 1–1



Längsschnitt

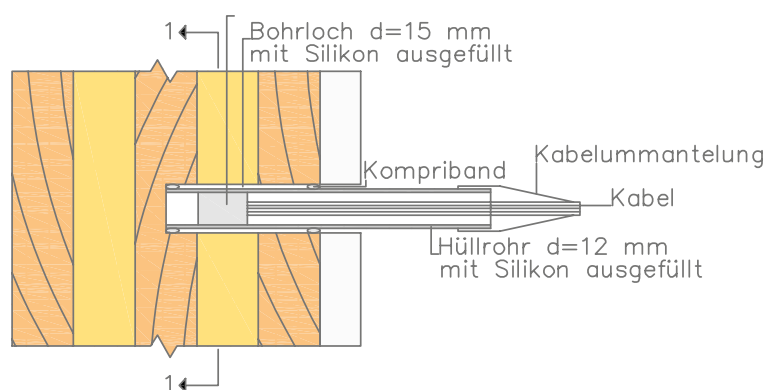


Abbildung 4.17: Sensor Detail

KAPITEL 5: AUFBEREITUNG DER MESSDATEN

5-1 EINLEITUNG

Für den Auswertzeitraum vom 04.10.2012 bis 03.10.2014 sammelt das beschriebene Messsystem mehr als 1,4 Mio. Messwerte. Aufgrund des enormen Datenvolumens und der besseren Darstellbarkeit in den anschließend angeführten Diagrammen werden die 20 minütigen Messwerte zu 24 h Mittelwerten zusammengefasst.

Die gesammelten Daten lassen sich auf mehrere Arten bildlich und tabellarisch darstellen. Die schlüssigste Art der Darstellung ist, die Daten als Verläufe der relativen Luftfeuchte und der Temperatur an den verschiedenen Messstellen über die Zeit darzustellen. Solche Verläufe werden als Ganglinien bezeichnet. Die Unterkapitel 5-2 bis 5-6 zeigen die Ganglinien in mehreren Diagrammen jeweils getrennt für den Fichten-BSP-Wandaufbau und den Birken-BSP-Wandaufbau.

Das anschließende Unterkapitel 5-7 beinhaltet den Vergleich der jeweiligen Ganglinien an derselben Messstelle, welche einmal im Fichten-BSP-Wandaufbau zu finden ist und einmal im Birken-BSP-Wandaufbau.

Zur besseren Veranschaulichung der maximalen und minimalen Werte an den einzelnen Messstellen werden im Kapitel 5-8 die Werte aus Tabelle 5.1 grafisch in Form der Umhüllenden von Temperatur und relativer Luftfeuchte am Querschnitt dargestellt.

5-2 ALLE MESSSTELLEN

Die ersten vier Diagramme (Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.4) zeigen die jeweiligen Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchte an den zwei Messquerschnitten in allen acht Messpunkten. Bei den Temperaturverläufen ist zunächst das direkte Reaktionsverhalten der einzelnen Schichten auf die Außenlufttemperatur zu erkennen. Sobald es zu einer größeren Abnahme oder einer deutlichen Zunahme der Außenlufttemperatur kommt, ist dieser Sprung zeitgleich ebenfalls in den einzelnen Bauteilschichten unabhängig vom Material zu sehen. Eine Ausnahme bildet hier der Anstieg der Temperatur in den Bauteilschichten am 28.10.2012. Dieser Anstieg ist auf das erstmalige Beheizen der Wohnung nach der Errichtung des Gebäudes zurückzuführen. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien und der Position im Gesamtbauteil haben die Schichten aber auch einen dämpfenden Einfluss auf die Temperaturschwankungen der Außenluft. Besonders im Winter ist zwischen den jeweiligen Schichten eine klare Temperaturdifferenz zu erkennen, wobei die größten Differenzen innerhalb der äußeren Wärmedämmung zu finden sind. Die anschließend weiter innenliegenden Bauteilschichten (ab dem Übergang von äußerer Wärmedämmung zum Brettsperrholz) schmiegen sich deutlich dem Temperaturverlauf des Innenraumes an. Im Sommer rücken die Ganglinien der Temperatur deutlich zusammen. Es kann im Sommer 2013 beobachtet werden, dass in der Nähe von 30 °C Außenlufttemperatur auch die Temperaturen innerhalb des Bauteiles diesen Wert erreichen, sodass eine konstante Temperaturverteilung im gesamten Querschnitt vorhanden ist. Im Sommer 2014, wo die Höchstwerte nicht die 30 °C-Grenze erreichen, ist innerhalb der Wärmedämmung noch eine Temperaturdifferenz zu erkennen. Der Verlauf der relativen Luftfeuchte innerhalb der Bauteilschichten erscheint in dem Gesamtdiagramm zunächst als sehr unübersichtlich und bedarf einer genaueren Betrachtung in den anschließenden Kapiteln. Dennoch gilt es am Gesamtverlauf herauszustellen, wie sich die Verläufe der einzelnen Messpunkte zueinander verhalten. Auch wenn es nicht allzu sehr auffällt, kann anhand der Messdaten festgestellt werden, dass die Reaktion der einzelnen Schichten auf einen signifikanten Anstieg oder einen Abfall der relativen Außenluftfeuchte nicht so direkt erfolgt wie bei der Temperatur. Die Messwerte zeigen, dass ein Maximum/Minimum der relativen Außenluftfeuchte ein Maximum/Minimum in der Vorsatzschale bewirkt, welches sich drei bis vier Tage später einstellt. Diese zeitliche Verzögerung in Bezug auf die Anpassung des gesamten Bauteiles an das Umgebungsklima beobachtet auch (Gamper, et al., 2013), deren Arbeit zu Beginn vorgestellt wurde. Des Weiteren ist zu beobachten, dass im Sommer 2013, genau wie bei der Entwicklung der Temperatur, es auch zu einer Annäherung der relativen Luftfeuchte in allen Messpunkten, hin zu einem gemeinsamen Wert kommt. Dieser liegt bei etwa 50 % für den Fichten-BSP-Aufbau und bei etwa 48 % für den Birken-BSP-Aufbau. Im Sommer 2014 wird dieses Charakteristikum, genau wie bei der Temperaturentwicklung, nicht so deutlich sichtbar. Generell ist anzumerken, dass sich der Feuchtetransport entlang eines Temperaturgefälles oder eines Gefälles der relativen Luftfeuchte einstellt (siehe auch Kapitel 3-7.5). Für den Querschnitt und die gemessenen Verläufe bedeutet dies im Winter, wenn es draußen kalt ist und ein großes Temperaturgefälle besteht, dass die relative Luftfeuchte nach außen hin ansteigen müsste. Dies kann für die Messstellen an der Außenseite des BSP beobachtet werden aber für alle anderen Messstellen ist jedoch eine Abnahme der relativen Luftfeuchte zu erkennen. Dies hängt damit zusammen, dass die Temperatur von der Innenseite bis zur Außenseite des BSP ziemlich konstant ist und es im Brettsperrholz zu einer Einlagerung des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes kommt. Dadurch sinkt der Teildruck des Wasserdampfes bei gleichbleibendem Sättigungsdampfdruck (siehe auch Kapitel 3-7.4).

5-2.1 FICHTE

5-2.1.1 Temperatur

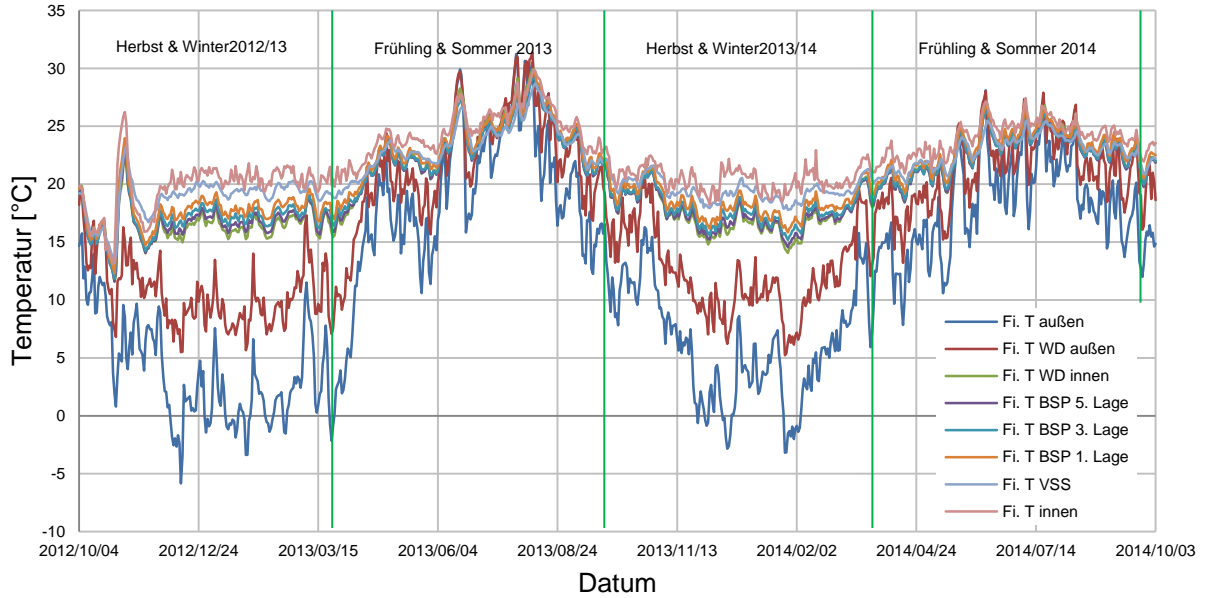


Abbildung 5.1: Temperatur Fichte gesamt

5-2.1.2 relative Luftfeuchte

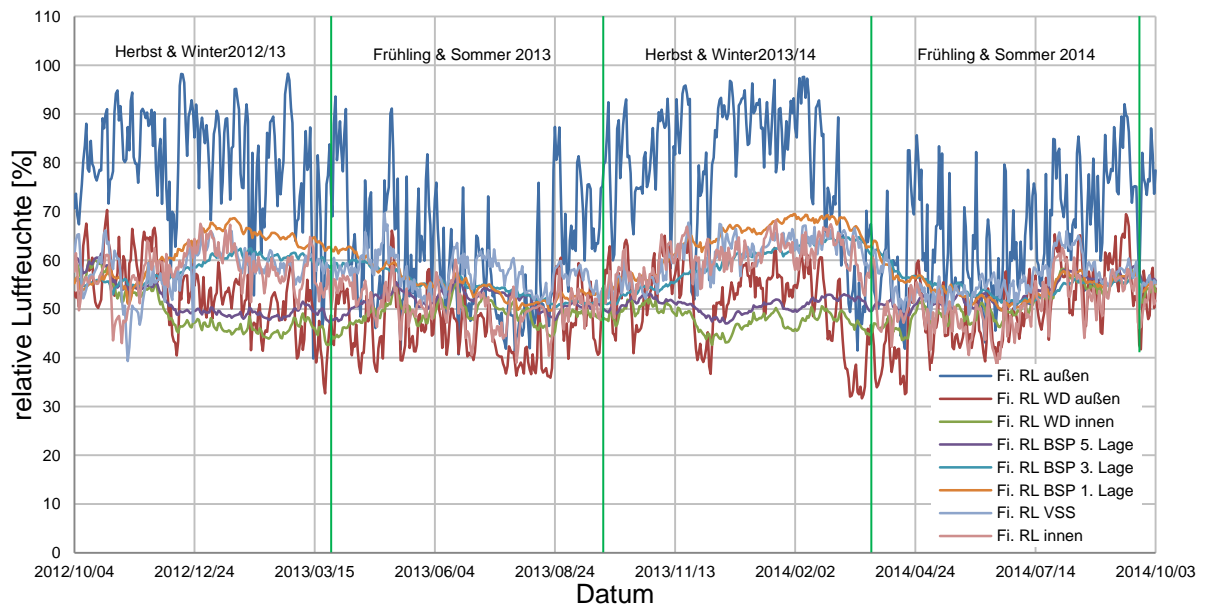


Abbildung 5.2: relative Luftfeuchte Fichte gesamt

5-2.2 BIRKE

5-2.2.1 Temperatur

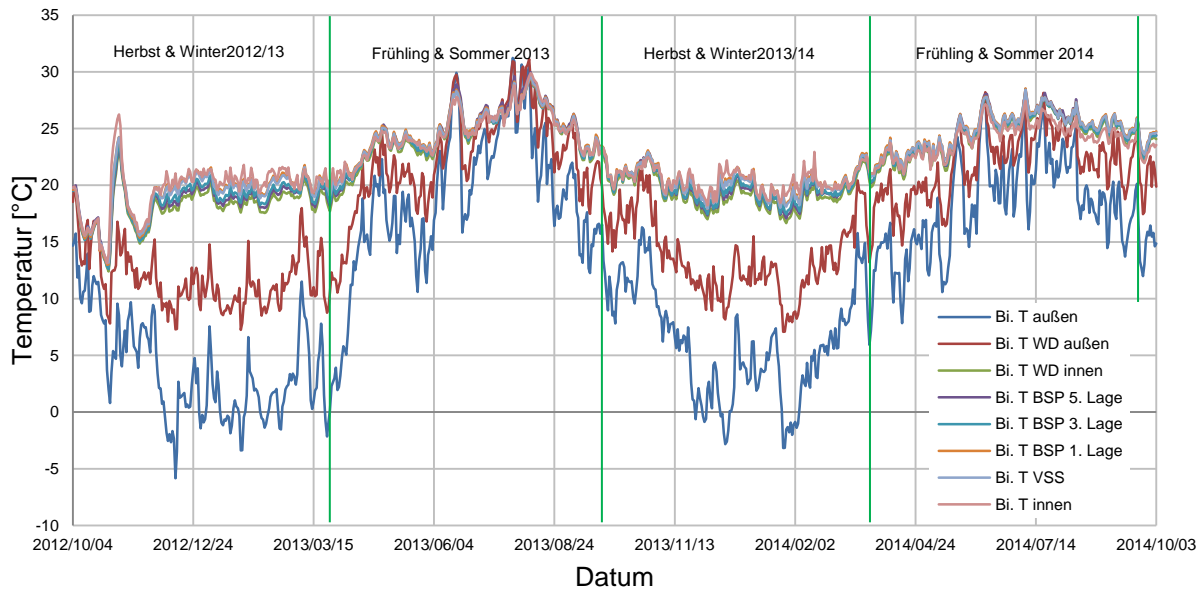


Abbildung 5.3: Temperatur Birke gesamt

5-2.2.2 relative Luftfeuchte

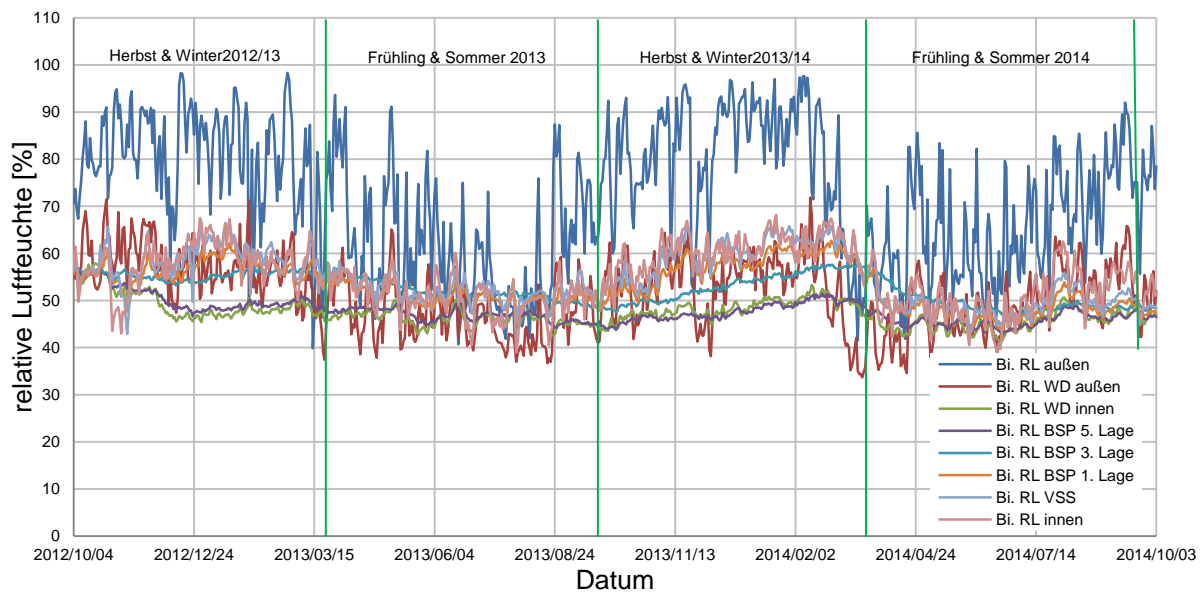


Abbildung 5.4: relative Luftfeuchte Birke gesamt

5-3 AUßENKLIMA

An den Verläufen des Außenklimas (Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6) ist zunächst zu erkennen, dass sich Temperatur und relative Luftfeuchte tendenziell zeitlich in entgegengesetzte Richtung entwickeln. Bei hohen Temperaturen im Sommer wird eine niedrige relative Luftfeuchte gemessen, wobei im Winter, wenn die Lufttemperatur niedrig ist, die relative Luftfeuchte ihre Maximalwerte erreicht.

Der Winter 2012/2013 in Graz wird von trübem Wetter bestimmt und ist im Mittel, aufgrund einzelner Wärmephasen, etwas wärmer als sonst. Eine ausgeprägte Kältephase kann nicht beobachtet werden, der niedrigste Wert der Tagesmitteltemperatur liegt bei $-5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dennoch dauert der Winter länger als sonst im Mittel üblich und die Temperaturen fallen Ende März nochmals unter den Gefrierpunkt. Der Frühling 2013 beginnt Anfang April, ist aber durch eher nasses, trübes und kühles Wetter geprägt. Dies zeigt sich dadurch, dass die relative Luftfeuchte noch auf einem eher hohen Niveau bleibt. Der Sommer 2013 ist dahingegen umso wärmer und zudem zeitweise auch sehr trocken. Österreichweit gilt er als sechstwärmster Sommer seit Messbeginn. Die maximale Tagesmitteltemperatur liegt bei $31,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Im Herbst entwickelt sich die Temperatur stetig abwärts und kann als normaler Verlauf betrachtet werden. Es ergibt sich im Gegenzug aber eher ein größerer Anstieg der relativen Luftfeuchte, was durch vermehrten Niederschlag bedingt ist. Ende November zeigt sich dann nochmals eine eher trockene Phase bis dann Anfang Dezember der Winter 2013/2014 einsetzt. Dieser ist von höheren Temperaturen geprägt, die ZAMG spricht vom zweitwärmsten Winter der Messgeschichte. Der stetige Anstieg der Temperatur lässt sich ab Anfang Februar deutlich beobachten, wobei dann Ende April, Anfang Mai 2014 deutlich feuchtere Luft, aufgrund von Niederschlägen, die relative Luftfeuchte ansteigen lässt. Der Sommer 2014 zeigt mit $28,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht ganz so hohe Tagesmitteltemperaturwerte wie im Sommer 2013, wobei die anschließenden Monate länger die Temperatur halten. (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2015)

5-3.1 LUFTTEMPERATUR

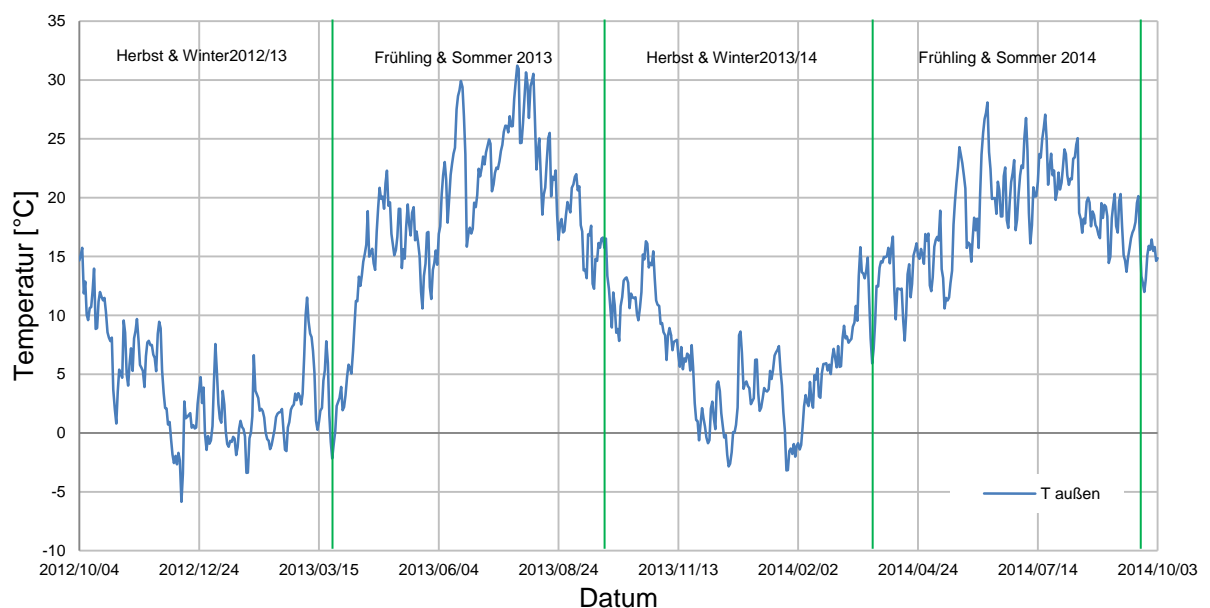


Abbildung 5.5: Temperatur außen

5-3.2 RELATIVE LUFTFEUCHTE

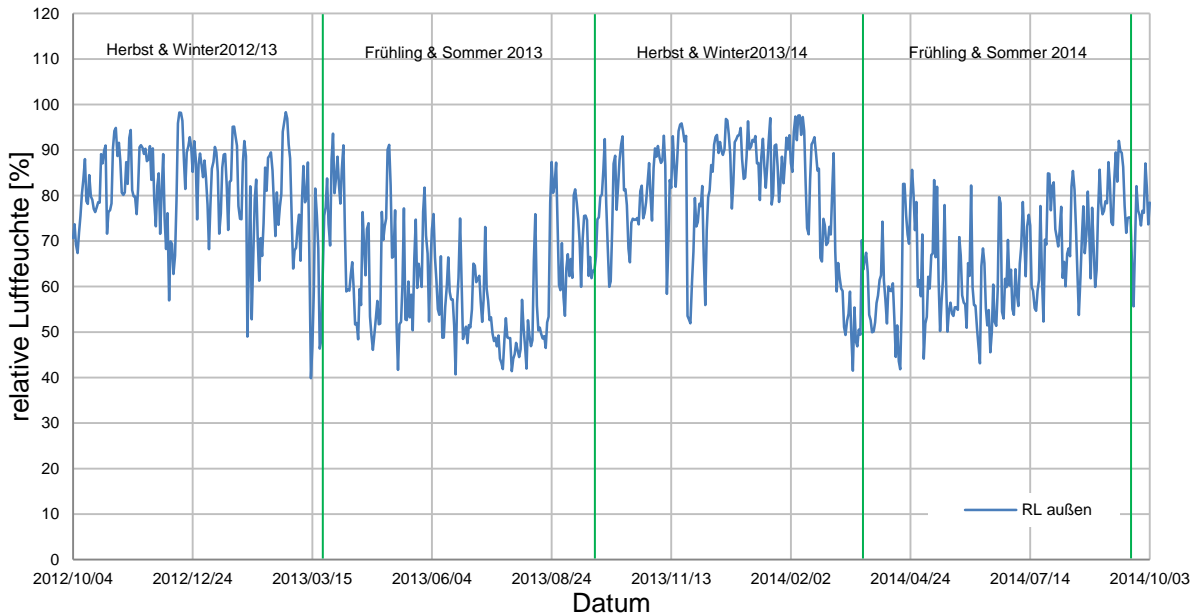


Abbildung 5.6: relative Luftfeuchte außen

5-4 MESSSTELLEN AUßEN

An den äußeren Messstellen (siehe Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.10) lässt sich noch einmal verdeutlichen, wie groß der dämpfende Einfluss der Wärmedämmung bezüglich der Temperaturentwicklung der weiter innen liegenden Bauteilschichten ist. Bemerkenswert ist aber vor allem, wie groß die Differenz bereits zwischen Außenlufttemperatur und der Temperatur am äußeren Rand der Wärmedämmung sein kann. Es befindet sich hier nur der Unter- und Oberputz zwischen den beiden Messpunkten. Am 12.12.2012 stellt sich hier eine maximale Temperaturdifferenz von rund 13 °C im Birken-BSP-Wandaufbau ein. Innerhalb der Wärmedämmung ist die Temperaturdifferenz vom äußeren Rand zum inneren Rand ebenso am größten und erreicht am 25.01.2014 ebenfalls im Birken-BSP-Wandaufbau ihren Maximalwert von rund 10 °C. Je höher die Außenlufttemperaturen ansteigen, desto näher rücken die Ganglinien zusammen und nähern sich einer gemeinsamen Temperatur an. Am wärmsten Tag im Sommer 2013 werden in den beiden äußeren Messstellen knapp 31 °C als maximale Werte gemessen, wobei an der Innenseite der Wärmedämmung die Temperatur etwa 1 °C darunterliegt. Dies gilt für beide Wandaufbauten.

Genau wie bei der Temperatur ist bei der relativen Luftfeuchte auch ein stark dämpfender Effekt zwischen der äußersten Messstelle und der nächstgelegenen Messstelle am äußeren Rand der Wärmedämmung zu beobachten. Hier werden maximale Differenzen von bis zu 44 % im Winter gemessen. Abgesehen von den kleineren Amplituden, folgt der Verlauf der relativen Luftfeuchte am äußeren Rand der Wärmedämmung dennoch sehr stark dem Verlauf der relativen Außenluftfeuchte. Er verläuft jedoch schon leicht (1-3 Tage) zeitlich versetzt. Die Ganglinie der relativen Luftfeuchte am inneren Rand der Wärmedämmung zeigt sich im Vergleich zu den

beiden anderen Messstellen als viel stetiger und konstanterer Verlauf, dessen Grenzwerte um die 50 % schwanken. Die obere Grenze liegt bei 60 %, die untere bei knapp 40 %.

5-4.1 FICHTE

5-4.1.1 Temperatur

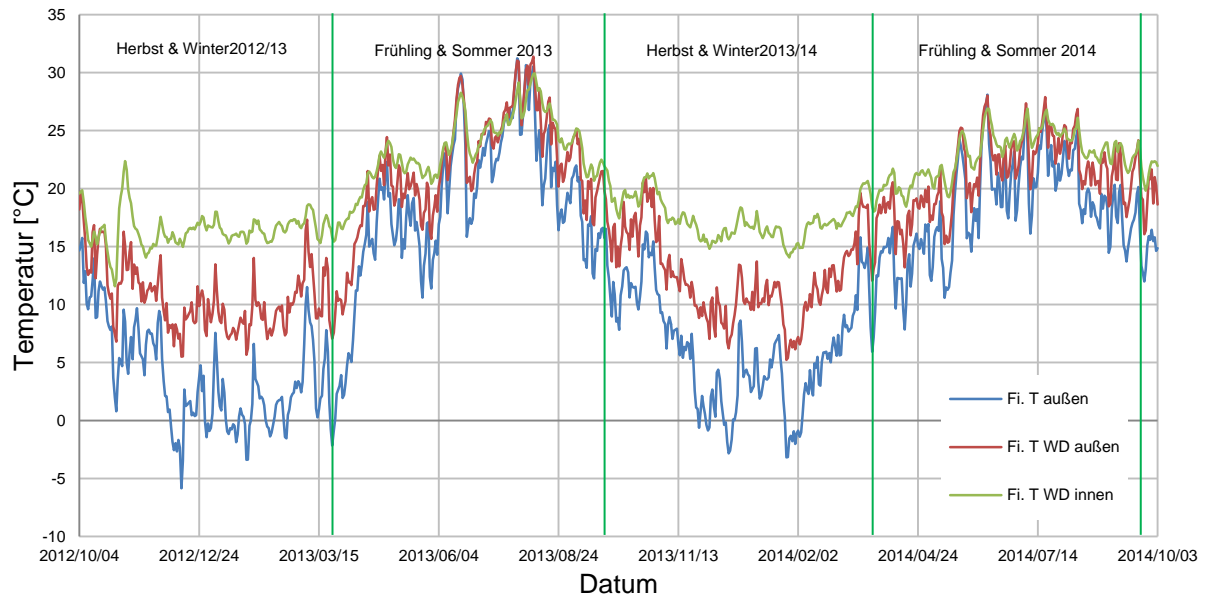


Abbildung 5.7: Temperatur Fichte außen

5-4.1.2 relative Luftfeuchte

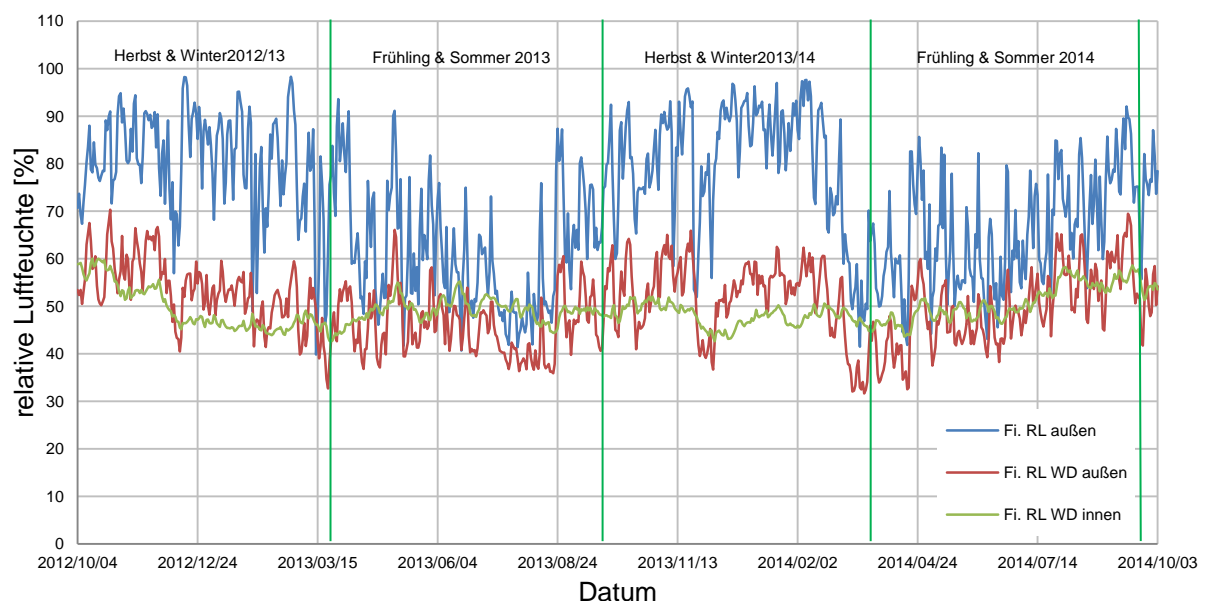


Abbildung 5.8: relative Luftfeuchte Fichte außen

5-4.2 BIRKE

5-4.2.1 Temperatur

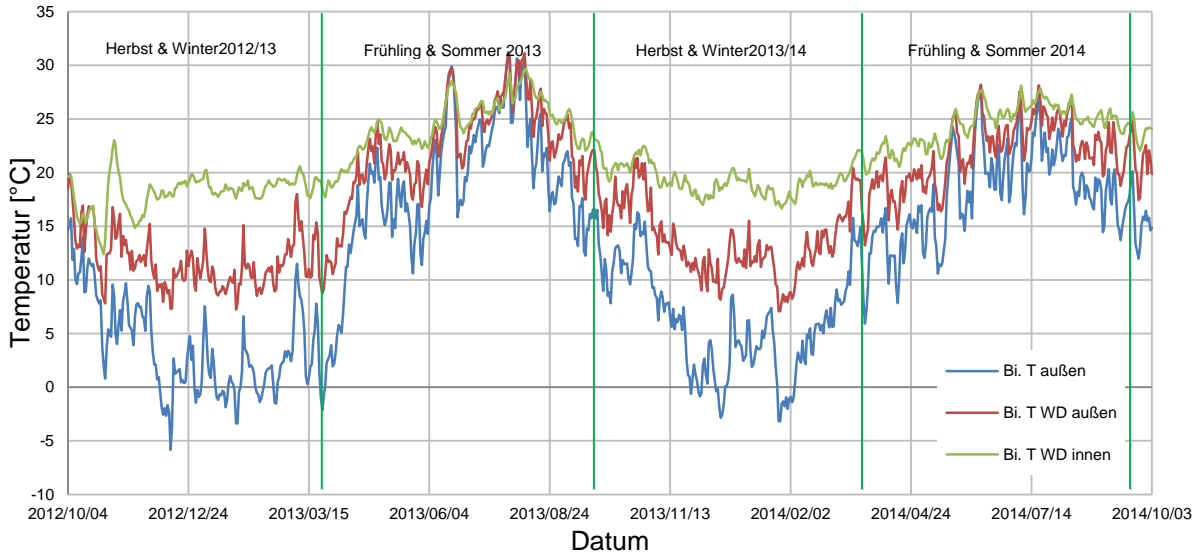


Abbildung 5.9: Temperatur Birke außen

5-4.2.2 relative Luftfeuchte

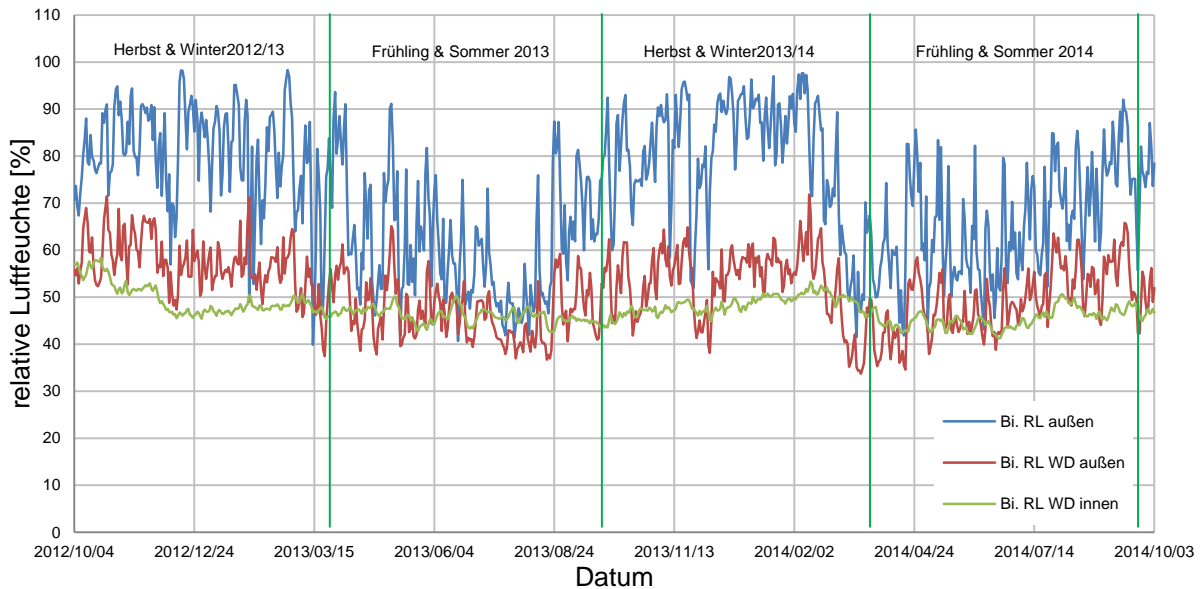


Abbildung 5.10: relative Luftfeuchte Birke außen

5-5 MESSSTELLEN BSP

Das thermische Verhalten von Holz richtet sich nach der Wärmeleitfähigkeit und ist somit vor allem von der Rohdichte und von dem Holzfeuchtegehalt abhängig (vgl. Kapitel 3-4.1). Hinzu kommt der Aspekt der Wärmespeicherung, welche anhand der spezifischen Wärmekapazität beurteilt werden kann. Diese beträgt bei Holz stets 1600 J/kgK. Anhand der Temperaturganglinien (siehe Abbildung 5.11 und Abbildung 5.14) in den drei Messstellen innerhalb des Brettsperrholzes lässt sich erkennen, dass die Temperaturen sehr nah beieinander liegen: Im Sommer kann von der gleichen Temperatur in den drei Messstellen des jeweiligen Wandaufbaues gesprochen werden, wobei im Winter die Temperaturdifferenz zwischen 5. und 3. Lage maximal 1,25 °C erreicht. Das dämpfende Verhalten ist demnach fast nicht mehr vorhanden und zudem ist zu erkennen, dass das Material stets auf die umliegende Lufttemperatur reagiert. Die BSP-Elemente erreichen im Sommer knapp 30 °C und im Winter etwa 12 °C (siehe auch Kapitel 5-8), wobei dieser Minimalwert eher eine Ausnahme bildet, da die Forschungswohnung zu diesem Zeitpunkt noch nicht benutzt wurde. Demnach ergeben sich minimale Temperaturen von ca. 15 °C im Brettsperrholz.

Die Verläufe der relativen Luftfeuchte charakterisieren sich dadurch, dass es zu einem Wechsel innerhalb der Messstellen kommt, was die maximalen Amplituden angeht. So folgt die relative Luftfeuchte in der fünften Lage nicht mehr dem abfallenden Trend, welcher in den äußeren Schichten zu beobachten war, sondern es kommt zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte. Dieser Anstieg ist vor allem im Winter zu beobachten und bedarf einer Analyse, die sich nach dem allgemeinen Wasserdampftransport richtet. Bauphysikalisch verläuft der Wassertransport entlang eines Temperaturgefälles oder eines Gefälles der relativen Luftfeuchte im Bauteil. Das Temperaturgefälle verläuft im Winter von innen (warme Lufttemperatur) nach außen (kalte Lufttemperatur). Wie bereits beschrieben, herrschen an den drei BSP-Messstellen beinahe konstante Temperaturverhältnisse. Wenn der warme Wasserdampf nun von innen her das Holz durchströmt wird gleichzeitig das transportierte Wasser im Holz durch Chemisorption, Adsorption und Kapillarkondensation (siehe Kapitel 3-5.2) eingelagert. Zuerst in der ersten Brettlage, dann in der zweiten bis hin zur fünften Brettlage. Dadurch nimmt die Dampfmenge ab und es kommt zu einem Abfall der relativen Luftfeuchte von der ersten BSP-Brettlage hin zur fünften BSP-Brettlage. Dies ist besonders beim Fichten-BSP-Wandaufbau zu beobachten, da hier die Differenzen der relativen Luftfeuchten innerhalb des Brettsperrholzes im Winter größer sind. Dies hängt mit der geringeren Rohdichte, der unterschiedlichen Holzstruktur und der Größe und Art der Poren zusammen. Im Birken-Brettsperrholz divergieren die Werte im Winter nicht so stark auseinander und es wird weniger Wasser im Holz gebunden. Im Sommer ist wieder eine Annäherung der Ganglinien zu beobachten, was parallel zur gleichen Lufttemperatur zu einer konstanten relativen Luftfeuchte im Querschnitt führt. Das Birken-Brettsperrholz verhält sich im Sommer 2013 nicht ganz so direkt, folgt aber im darauffolgenden Sommer diesem Trend und zeigt etwa gleiche relative Luftfeuchten an den drei Messstellen.

Aufgrund der stärkeren Einlagerung von Wassermolekülen im Fichten-Brettsperrholz, kommt es zu einem höheren Wert der Holzfeuchte als im Birken-Brettsperrholz. Eine größere Holzfeuchte bewirkt auch eine größere Wärmeleitfähigkeit, da Wasser eine größere Wärmeleitfähigkeit besitzt als darrtrockenes Holz.

5-5.1 FICHTE

5-5.1.1 Temperatur

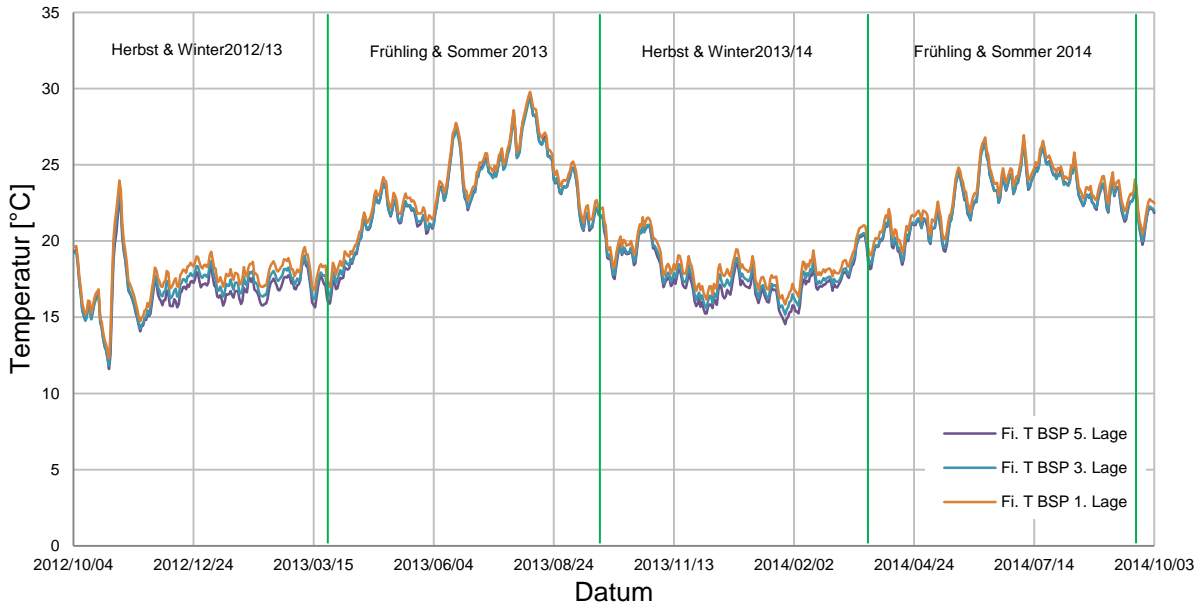


Abbildung 5.11: Temperatur Fichte BSP

5-5.1.2 relative Luftfeuchte

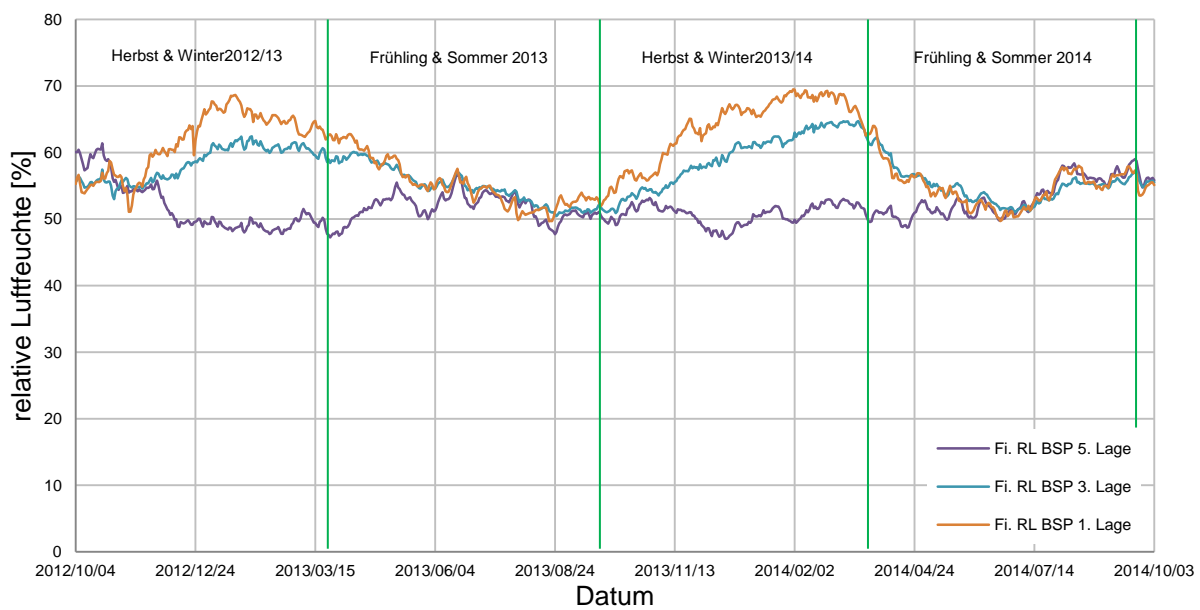


Abbildung 5.12: relative Luftfeuchte Fichte BSP

5-5.1.3 Temperatur und relative Luftfeuchte

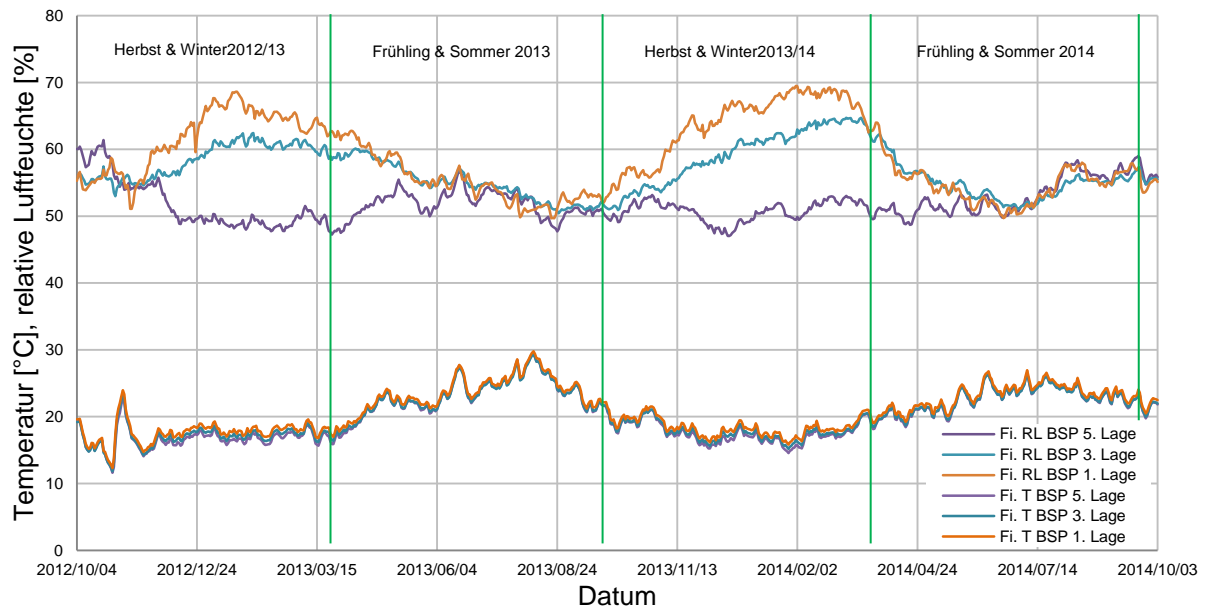


Abbildung 5.13: Temperatur und relative Luftfeuchte Fichte BSP

5-5.2 BIRKE

5-5.2.1 Temperatur

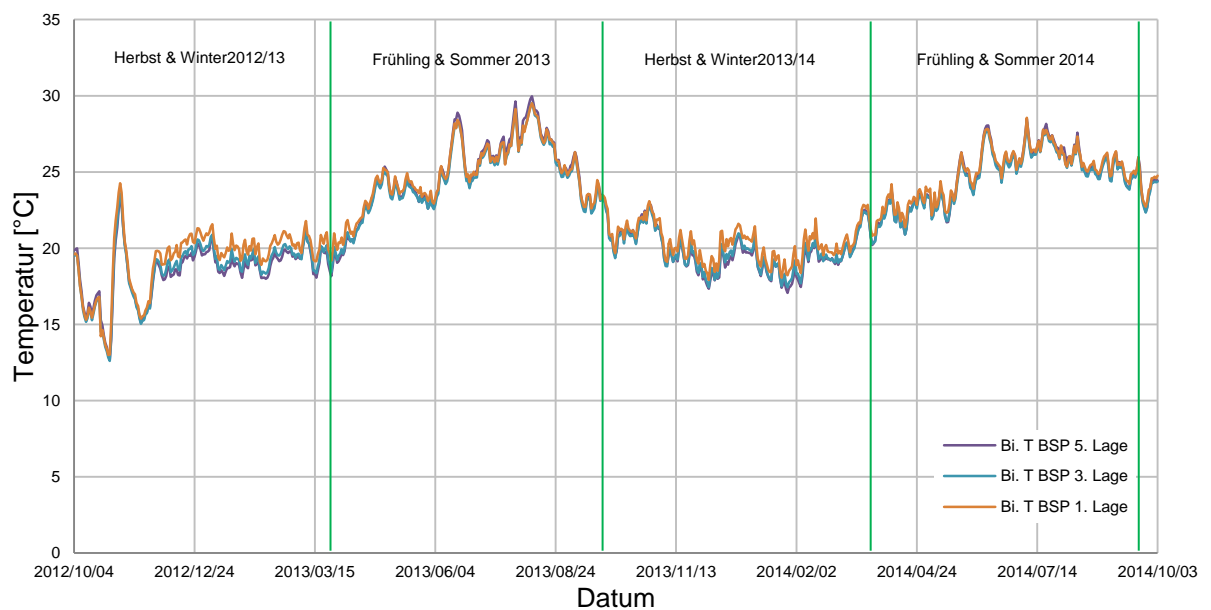


Abbildung 5.14: Temperatur Birke BSP

5-5.2.2 relative Luftfeuchte

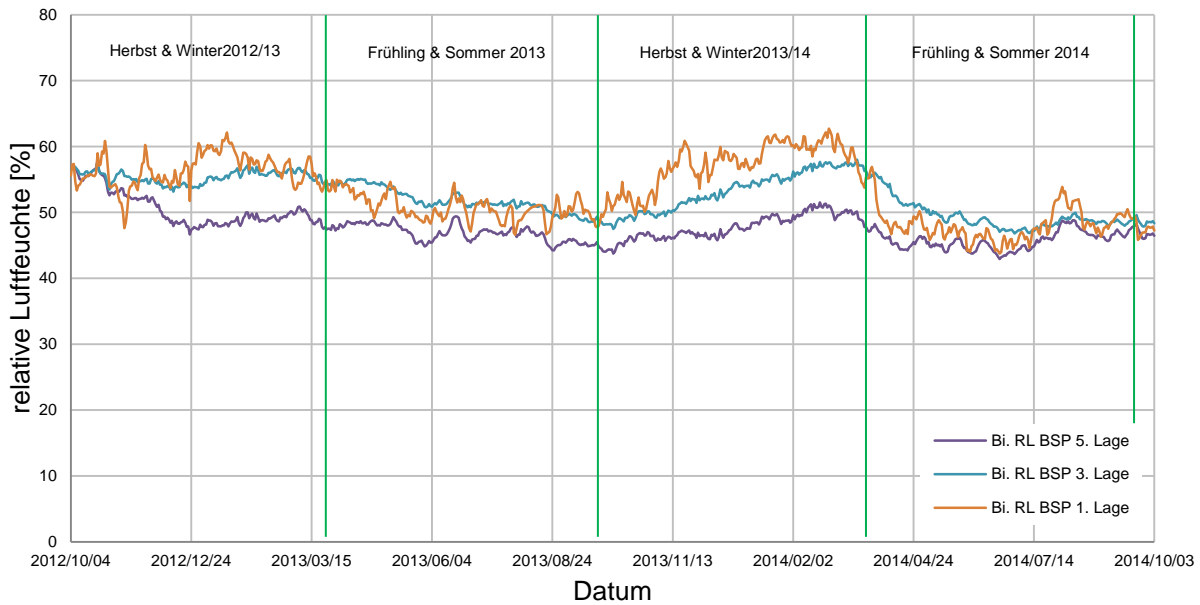


Abbildung 5.15: relative Luftfeuchte Birke BSP

5-5.2.3 Temperatur und relative Luftfeuchte

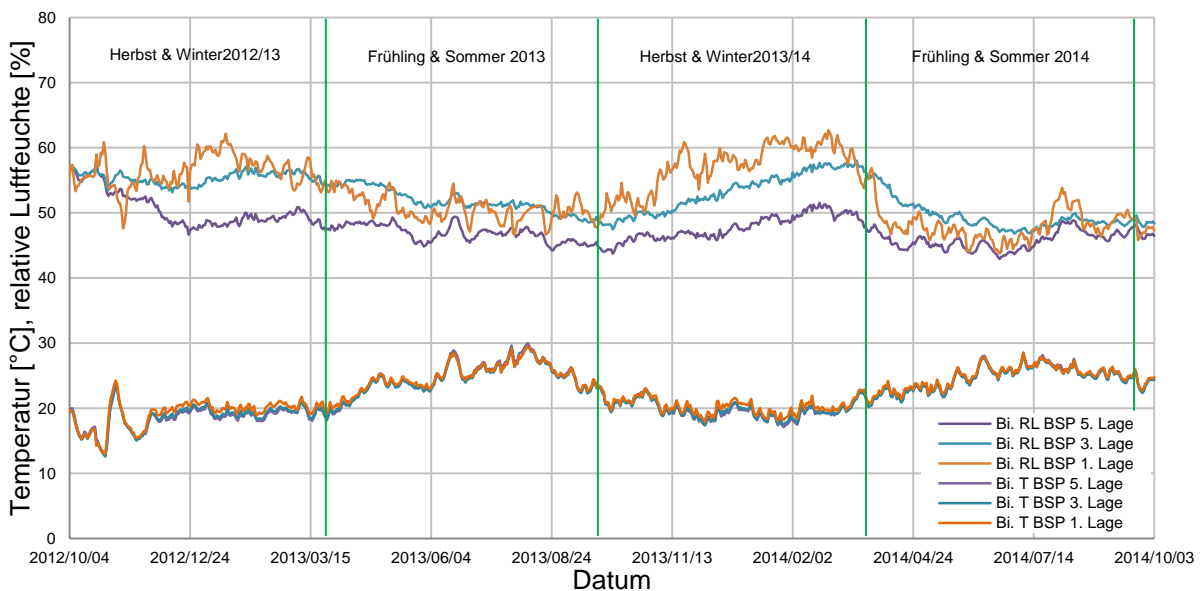


Abbildung 5.16: Temperatur und relative Luftfeuchte Birke BSP

5-6 MESSSTELLEN INNEN

An den innenliegenden Messstellen ist der Temperaturverlauf der Innenraumlufte und der Lufttemperatur in der Vorsatzschale als gleich anzunehmen. Die Differenzen betragen hier maximal ca. 1 °C, wobei in Ringhofer, et al., 2012 hier auf eine Fehlfunktion des Sensors im Fichten-BSP-Wandaufbau aufmerksam gemacht wird. Daher wird auf diese Ganglinie nicht weiter eingegangen. Für die Temperatur der Innenraumlufte ist zu erwähnen, dass es generell gilt, eine Überhitzung der innenliegenden Räume im Sommer zu vermeiden (ÖNORM B 8110-3, 2012). In Österreich liegt der Grenzwert des benutzten Raumes

tagsüber bei $t^* \leq 27 \text{ °C}$ und
 in der Nacht bei $t^* \leq 25 \text{ °C}$. aus (Richard, et al., 2013)

In der Forschungswohnung wird der obere Grenzwert im Sommer 2013 für zwei Wochen überschritten, wobei anzumerken ist, dass die Werte im Diagramm den Mittelwert der Tagestemperatur darstellen. Wenn die Nacht einen Anteil von 25 % am gesamten Tag darstellt, kann von einem Grenzwert von $t^* = 26,5 \text{ °C}$ ausgehend, der Überschreitungszeitraum auf knapp vier Wochen bestimmt werden.

Die Verläufe der relativen Luftfeuchte an den beiden Messstellen sind auch nahezu identisch. Die Belastung des Innenraumes bezüglich der Wasserdampfmenge entsteht durch die Nutzung des Raumes durch Menschen und Tiere. Andere Feuchtequellen wie Pflanzen oder feuchte Wäsche erhöhen den Wasserdampfgehalt in der Raumlufte. Je nach Lüftungsgewohnheiten und Raumlufteemperatur stellt sich dann eine entsprechende relative Luftfeuchte ein.

5-6.1 FICHTE

5-6.1.1 Temperatur

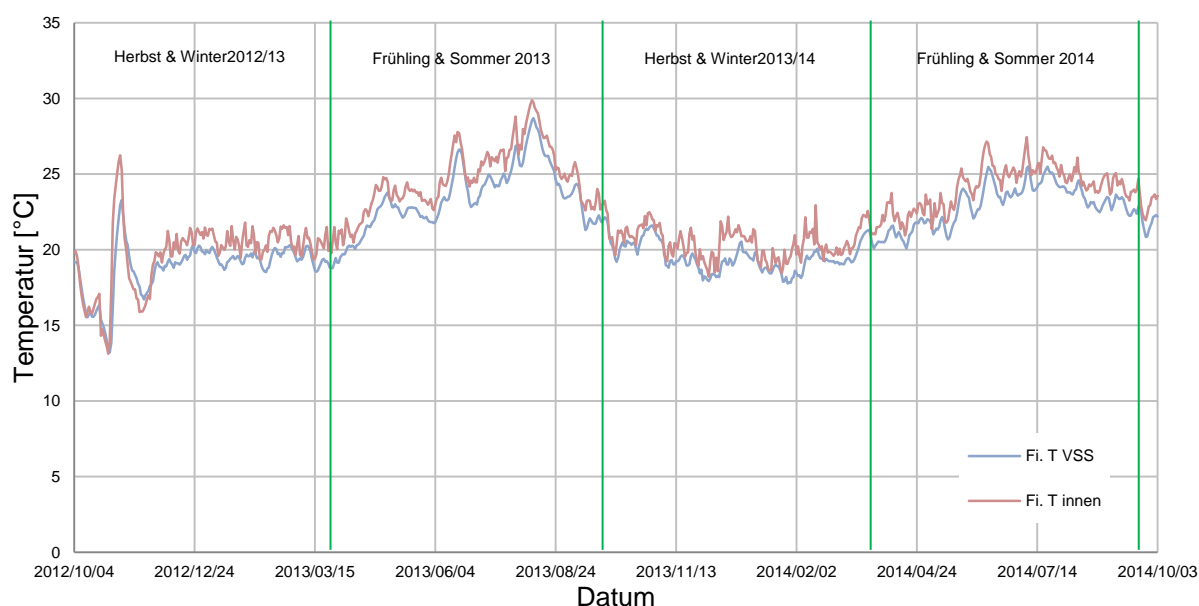


Abbildung 5.17: Temperatur Fichte innen

5-6.1.2 relative Luftfeuchte

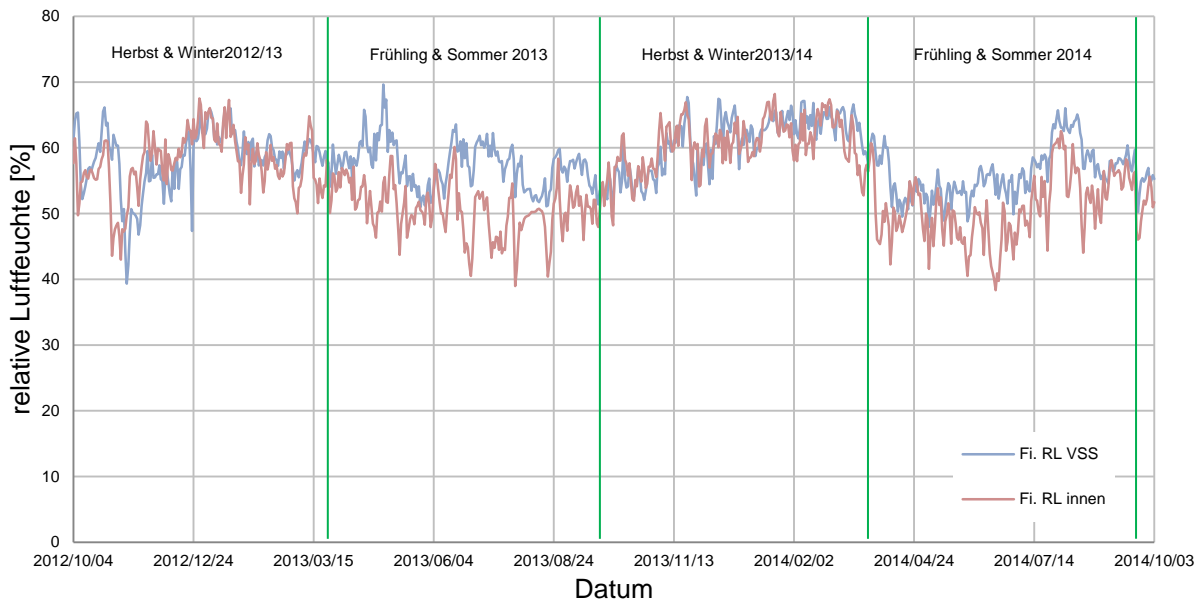


Abbildung 5.18: relative Luftfeuchte Fichte innen

5-6.2 BIRKE

5-6.2.1 Temperatur

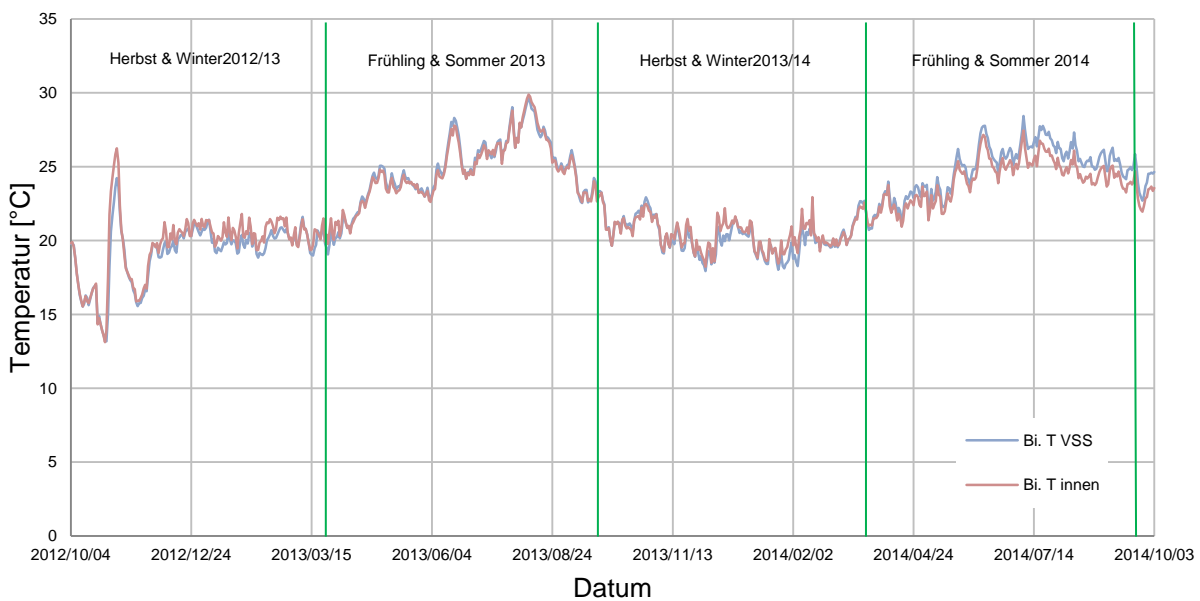


Abbildung 5.19: Temperatur Birke innen

5-6.2.2 relative Luftfeuchte

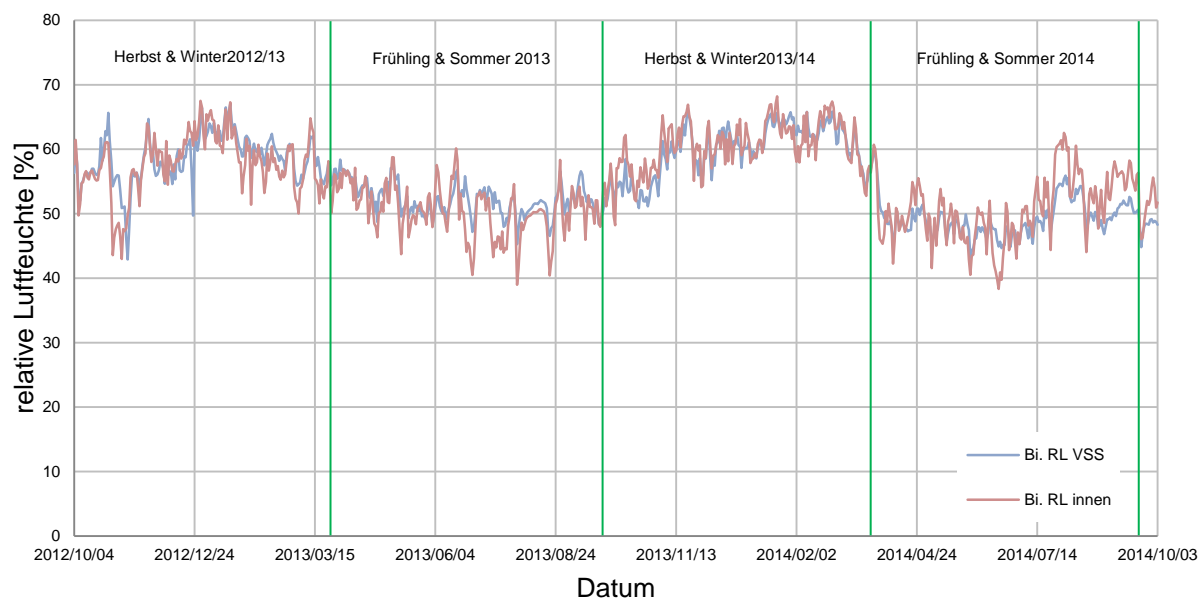


Abbildung 5.20: relative Luftfeuchte Birke innen

5-7 VERGLEICH FICHTE UND BIRKE

Der Fokus bei den Vergleichen der einzelnen Messstellen von Fichten-BSP-Wandaufbau zu Birken-BSP-Wandaufbau (Abbildung 5.21 bis Abbildung 5.26) liegt in den drei Messpunkten, die sich in den beiden Brettsperrholzelementen befinden, da der Wandaufbau zwischen den beiden Messquerschnitten sonst identisch ist.

Wenn man von einem gleichen Klima bis zu dem Messpunkt der Vorsatzschale ausgeht, so ist in Abbildung 5.25 zu erkennen, dass die relative Luftfeuchte am Messpunkt BSP 1. Lage im Fichten-BSP-Wandaufbau deutlich über dem Wert des Birken-BSP-Wandaufbaus liegt. Dies hängt mit der vermehrten Bindung von gasförmigem Wasser im Fichtenholz, aufgrund seiner spezifischen Holzeigenschaften, zusammen. Diese höherliegende relative Luftfeuchte bedingt andererseits eine niedrigere Temperatur an der Messstelle, da das gebundene Wasser die Wärme viel besser leitet als das relativ trockenere Birkenholz. Die Differenzen der relativen Luftfeuchte ergeben sich vor allem bei großem Temperaturgefälle, sprich in den Wintermonaten und können bis zu 10 % betragen (siehe auch Tabelle 5.1). In den Sommermonaten und besonders bei hohen Temperaturen egalisiert sich der Unterschied der relativen Luftfeuchte zueinander, da der Wandaufbau austrocknet, sodass auch die Temperaturdifferenz sich daraufhin einem gemeinsamen Wert nähert. Dieses Verhalten ist auch in der 3. Brettsperrholzlage zu beobachten, wobei die maximalen Differenzen zueinander abnehmen. In der 5. Brettsperrholzlage ist jedoch ein anderes Verhalten zu beobachten. Hier fällt auf, dass die relativen Luftfeuchten sich eher in den kälteren Wochen gleichen und in den warmen Abschnitten des Jahres auseinander divergieren. Besonders auffällig ist jedoch, dass das Übereinanderliegen der relativen Luftfeuchte in der äußeren Brettsschichtlage genau dann der Fall ist, wenn die Temperatur der Außenluft (siehe Abbildung 5.5) den Gefrierpunkt unterschreitet. So bedingt der härtere Winter 2012/2013 eine längere Phase, in welcher die relative Luftfeuchte im Fichten-BSP-Wandaufbau der relativen Luftfeuchte im Birken-BSP-Wandaufbau entspricht als der mildere Winter 2013/2014. Demnach gilt, dass die äußere Brettlage in der Zeit, in welcher die Temperaturen über dem Gefrierpunkt liegen, auch stark auf das vorherrschende Außenklima reagiert. Der Wasserdampftransport wird hier in erster Linie vom Gefälle der relativen Luftfeuchte bestimmt. Er stellt sich von der Außenluftschicht, welche durch eine höhere relative Luftfeuchte gekennzeichnet ist, hin zum Zentrum des Bauteils ein, wo deutlich geringere relative Luftfeuchte herrscht. Auch hier gilt, dass das Fichtenholz stärker auf Feuchtigkeitseinflüsse von außen reagiert und somit im Sommer einen höheren Feuchtegehalt als das Birken-BSP besitzt, was zu einer größeren relativen Luftfeuchte führt.

Die Effekte des unterschiedlichen bauphysikalischen Verhaltens der jeweiligen Hölzer lässt sich auch noch in der anschließenden Bauteilschicht beobachten. So zeigt sich an der Innenseite der Wärmedämmung auch eine niedrigere Temperatur im Winter am Birken-BSP-Wandaufbau, da Birke eine größere Wärmeleitfähigkeit besitzt. Was die relative Luftfeuchte angeht, so korreliert der Verlauf mit dem beschriebenen Verhalten der äußeren BSP-Brettlage, wobei die Differenz nicht mehr allzu deutlich ist. Was den Messpunkt an der äußeren Seite der Wärmedämmung angeht, so weist Ringhofer, et al., 2012 hier auf ein mögliches Fehlverhalten des Messensors im Birken-BSP-Wandaufbau hin, wobei gleichzeitig auch ersichtlich ist, dass die Effekte des unterschiedlichen Wandaufbaus deutlich nachgelassen haben.

Tabelle 5.1: minimale/maximale Messwerte und maximale Differenz in den einzelnen Messpunkten

Messpunkt		Fichte		Birke		Fi./Bi.
		min	max	min	max	max Tages- Δ
Wärmedämmung außen	T [°C]	5,23	31,38	7,08	31,13	2,09
	RL [%]	31,65	70,33	33,69	71,83	22,76
Wärmedämmung innen	T [°C]	11,57	29,94	12,39	29,69	3,01
	RL [%]	42,64	60,04	41,23	58,43	9,48
BSP 5. Lage	T [°C]	11,60	29,50	12,66	29,97	2,93
	RL [%]	47,02	61,39	42,91	57,97	10,99
BSP 3. Lage	T [°C]	11,83	29,36	12,61	29,51	2,69
	RL [%]	50,43	64,72	46,81	58,00	7,88
BSP 1. Lage	T [°C]	12,31	29,79	13,00	29,52	2,93
	RL [%]	49,68	69,48	43,73	62,71	10,70
Vorsatzschale	T [°C]	13,21	28,70	13,17	29,63	3,23
	RL [%]	39,33	69,62	42,91	67,05	16,03

5-7.1 WÄRMEDÄMMUNG AUßEN

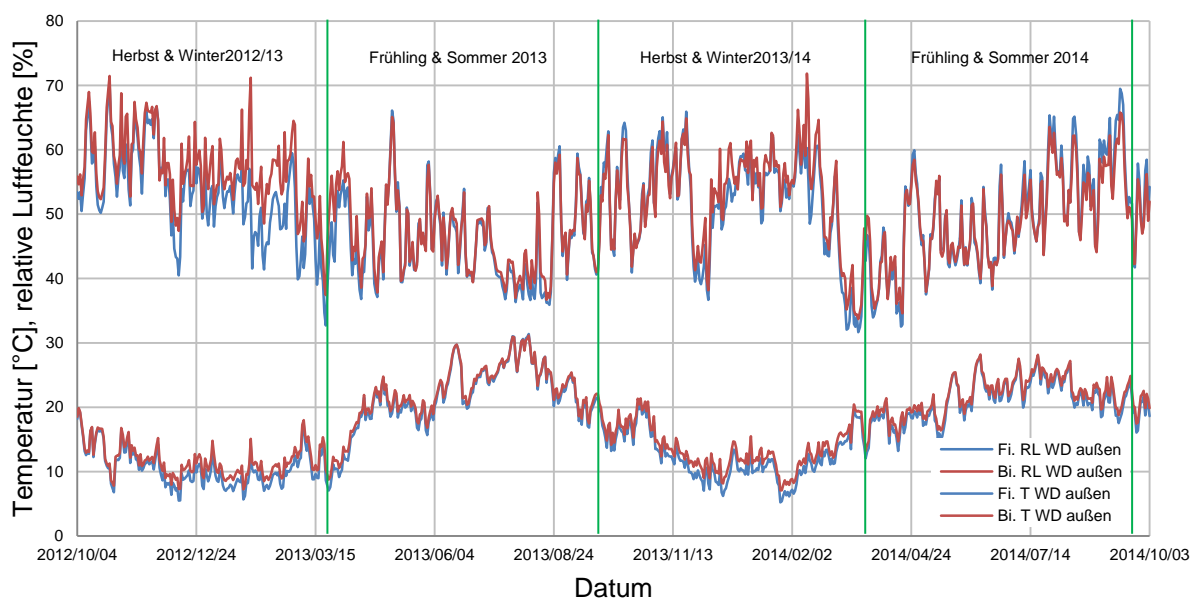


Abbildung 5.21: Vergleich Wärmedämmung außen

5-7.2 WÄRMEDÄMMUNG INNEN

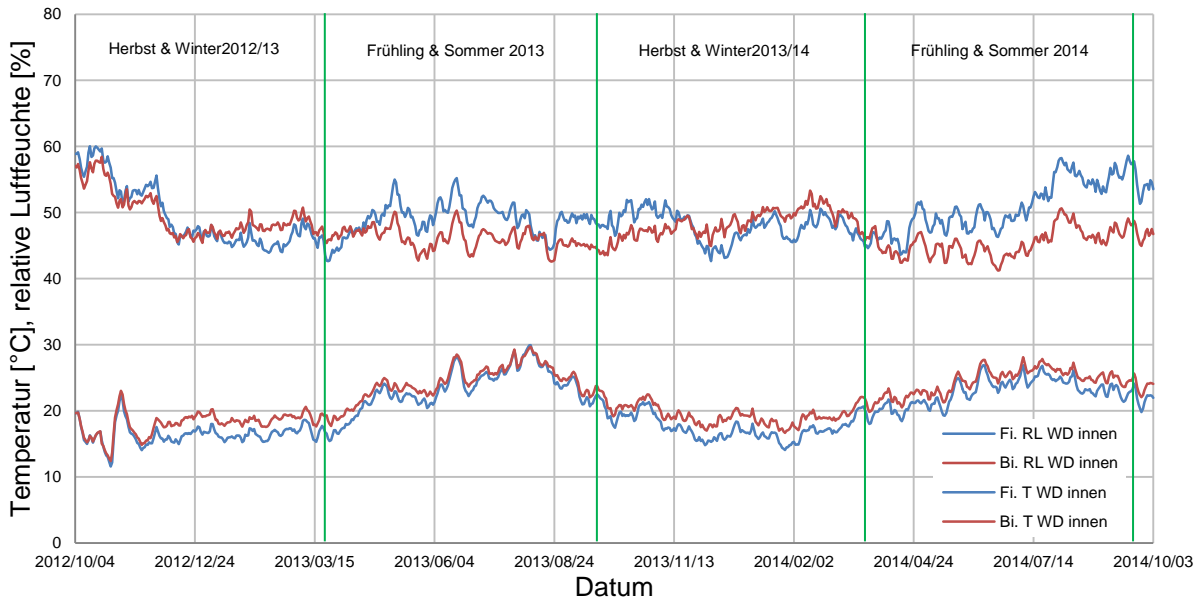


Abbildung 5.22: Vergleich Wärmedämmung innen

5-7.3 BSP 5. LAGE

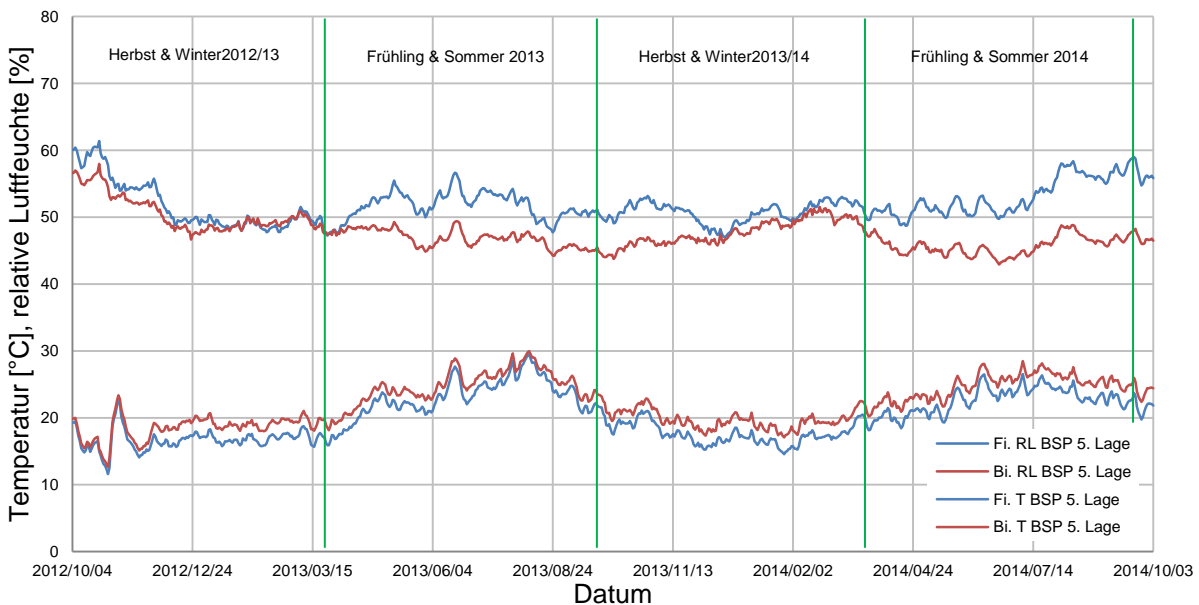


Abbildung 5.23: Vergleich BSP 5. Lage

5-7.4 BSP 3. LAGE

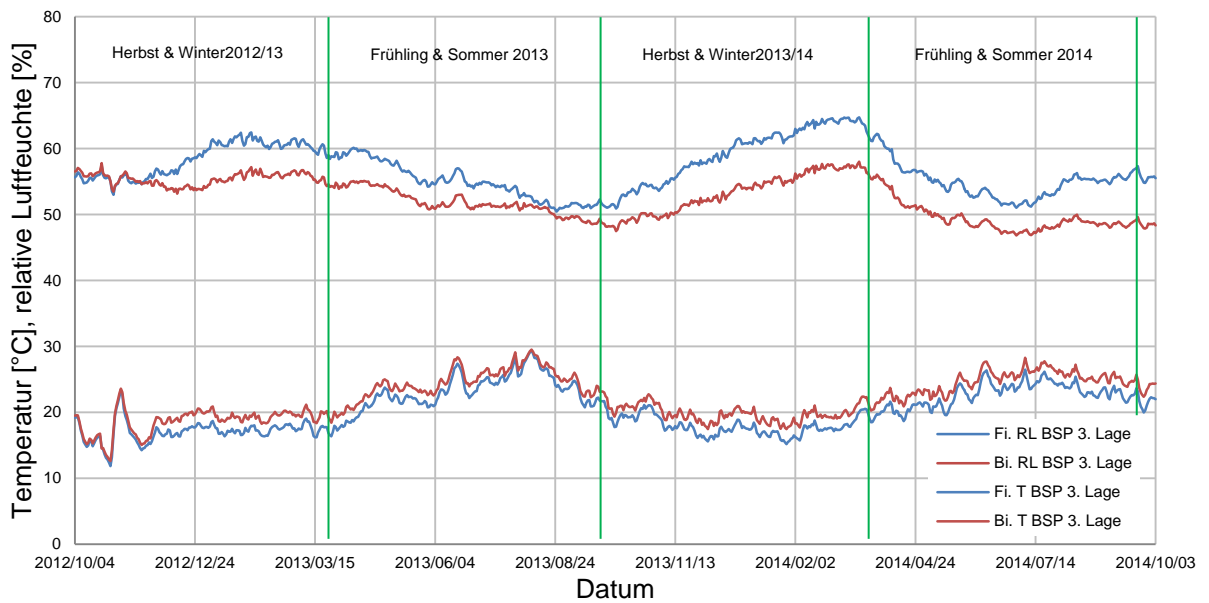


Abbildung 5.24: Vergleich BSP 3. Lage

5-7.5 BSP 1. LAGE

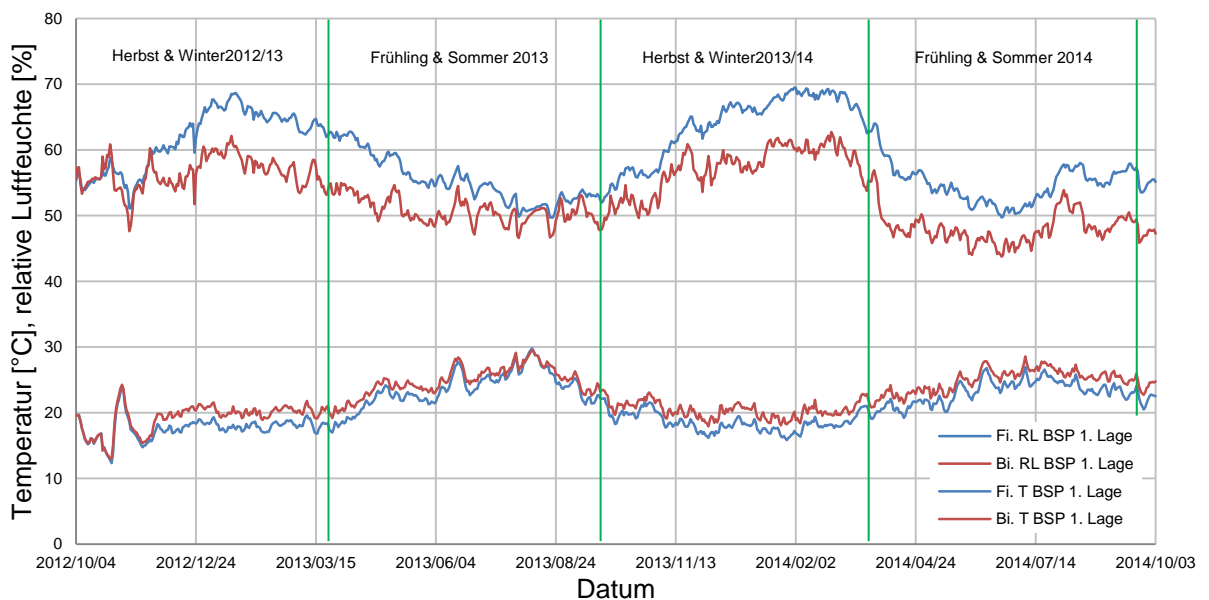


Abbildung 5.25: Vergleich BSP 1. Lage

5-7.6 VORSATZSCHALE

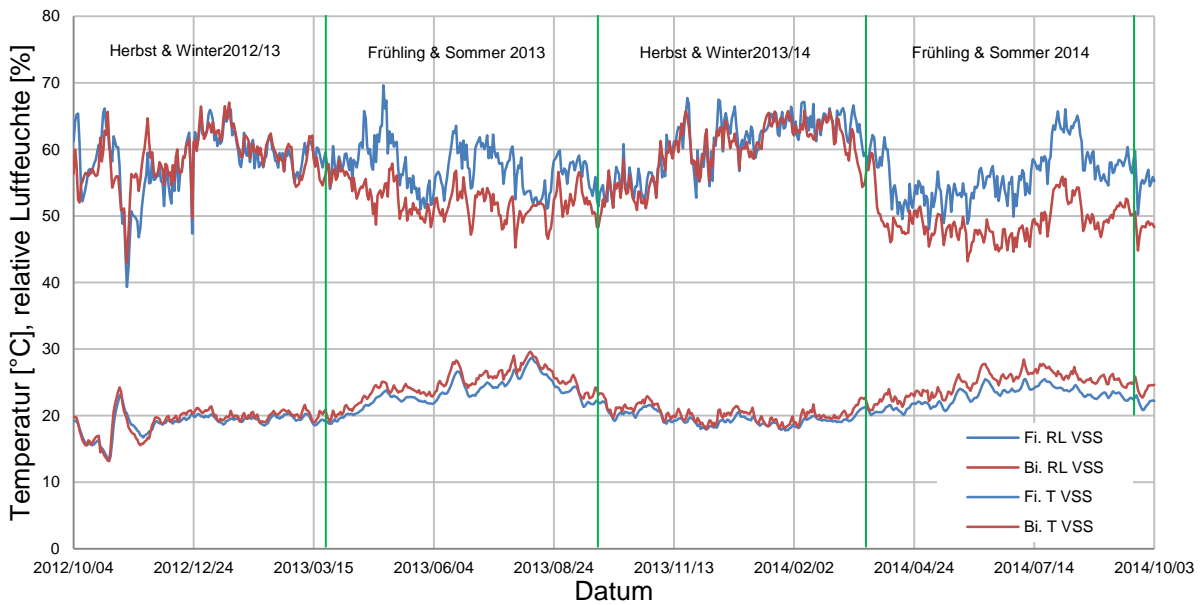


Abbildung 5.26: Vergleich Vorsatzschale

5-8 UMHÜLENDE VON TEMPERATUR UND RELATIVER LUFTFEUCHTE

Die Verläufe (Abbildung 5.27 bis Abbildung 5.30) der maximalen und minimalen Werte entlang des jeweiligen Messquerschnittes ergeben sich aus den Werten, die in Tabelle 5.1 bereits angeführt sind. Zudem sind die Mittelwerte aller gemessenen Werte im jeweiligen Messpunkt grafisch dargestellt.

5-8.1 FICHTE

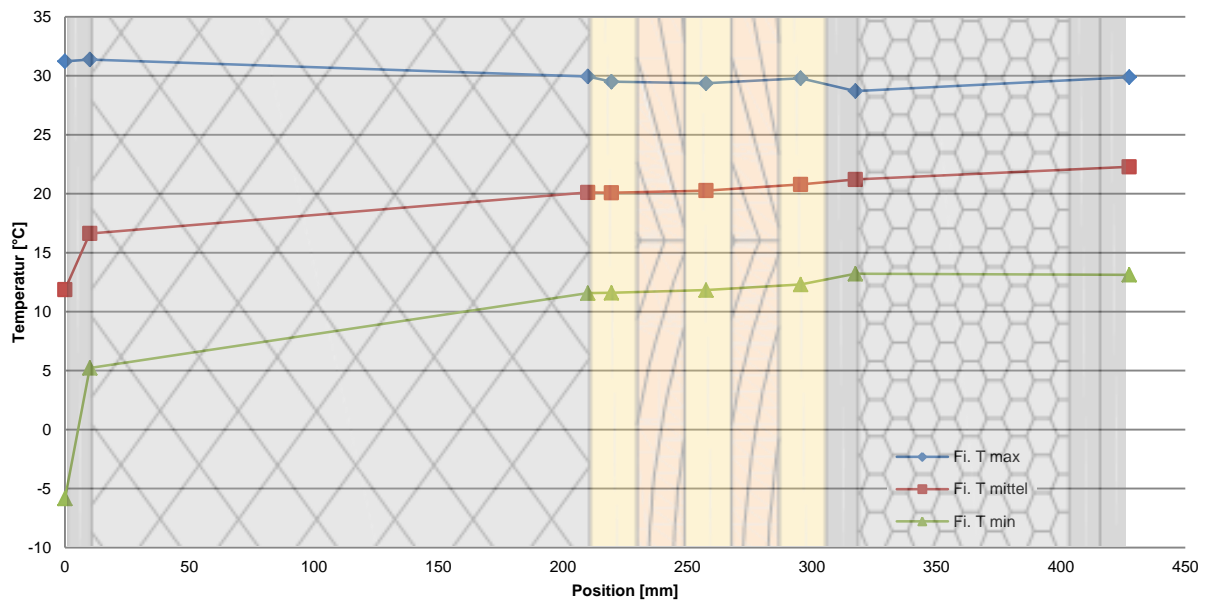


Abbildung 5.27: Umhüllende der Temperatur Fichte

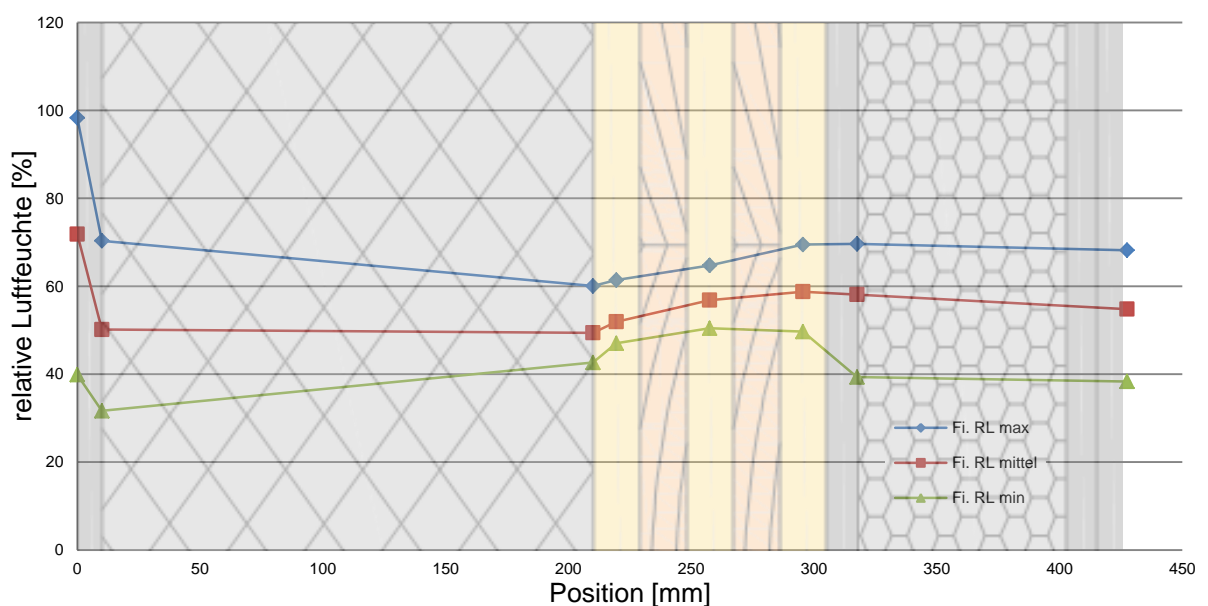


Abbildung 5.28: Umhüllende der relativen Luftfeuchte Fichte

5-8.2 BIRKE

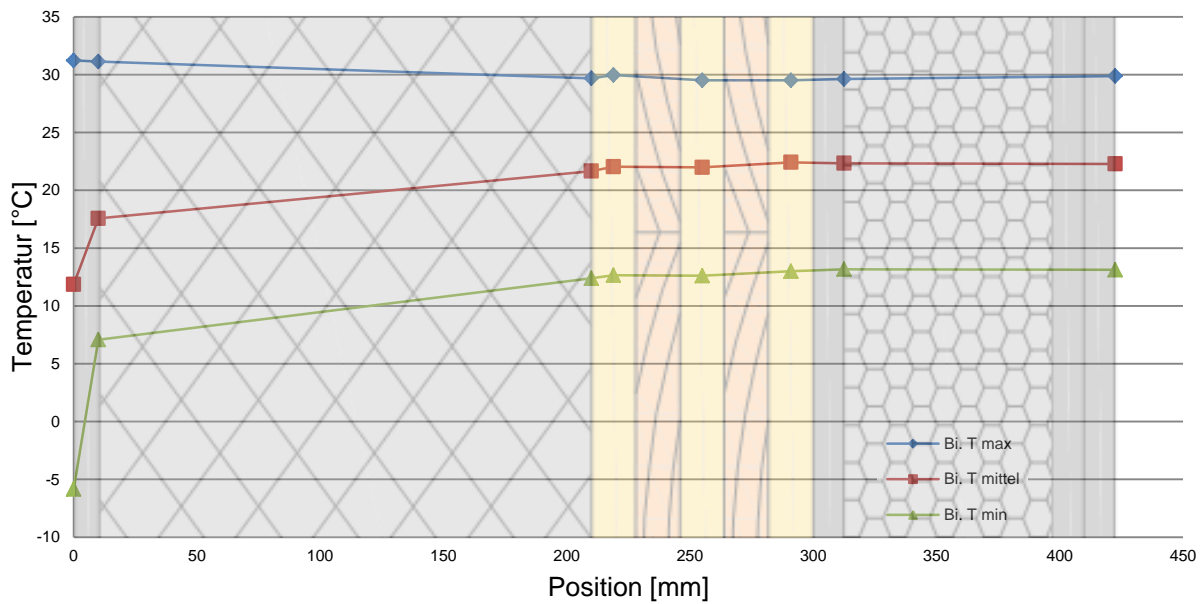


Abbildung 5.29: Umhüllende der Temperatur Birke

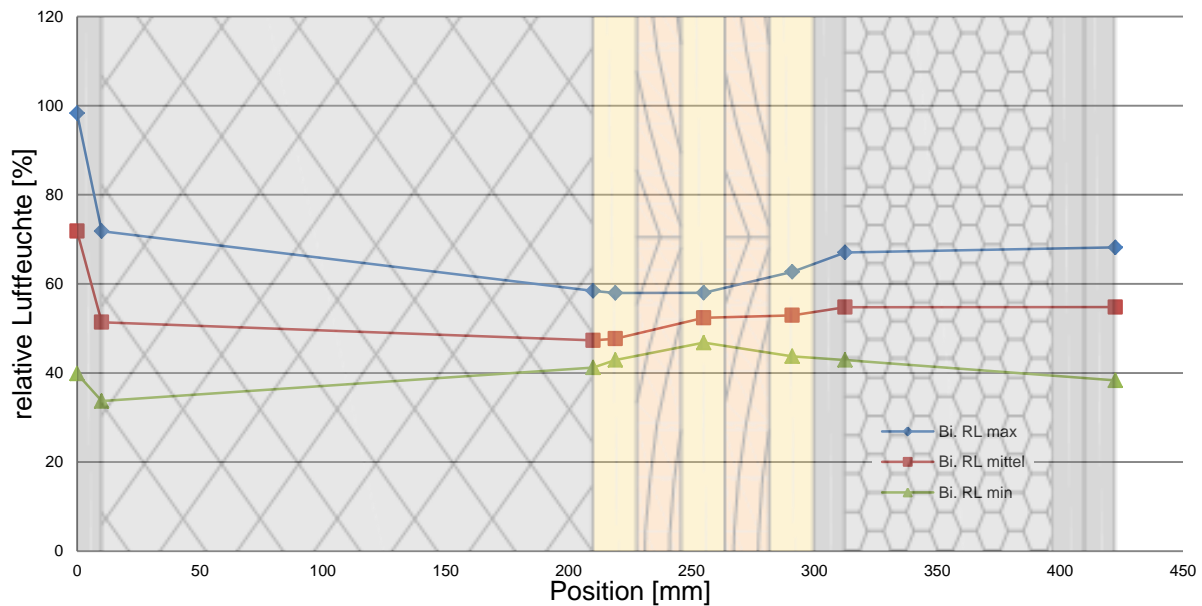


Abbildung 5.30: Umhüllende der relativen Luftfeuchte Birke

Anhand der gezeigten Diagramme lässt sich sehr gut erkennen, in welchem Bereich sich die Temperatur bzw. die relative Luftfeuchte während der Nutzung des Gebäudes in den einzelnen Bauteilschichten bewegt.

5-9 ZUSAMMENFASSUNG DES BAUPHYSIKALISCHEN VERHALTENS

Aufgrund der gesammelten Messwerte und der anschließend dargestellten Verläufe können folgende Schlüsse hinsichtlich des bauphysikalischen Verhaltens in den beiden Wandaufbauten gezogen werden.

Was die gemessene Temperatur angeht, so ist zu erkennen, dass ein sehr direktes und zeitlich nicht verzögertes Reaktionsverhalten aller Materialien auf Änderungen der Außenlufttemperatur besteht. Zudem ist sehr gut die dämpfende Wirkung der einzelnen Materialschichten zu erkennen, wobei gilt, je wärmer die Außenlufttemperaturen, desto näher rücken die Ganglinien zusammen und nähern sich einer gemeinsamen Querschnittstemperatur an. Dies ist besonders im Sommer 2013 zu beobachten, wenn die Temperatur nahezu 30 °C erreicht. Die größte dämpfende Wirkung ist in der äußeren Wärmedämmung zu finden (siehe Abbildung 5.7 und Abbildung 5.9), welche besonders in den kalten Wintermonaten zu beobachten ist. Im Vergleich von Fichten-BSP-Wandaufbau zu Birken-BSP-Wandaufbau ist nahezu immer eine größere Temperatur im Birken-BSP-Querschnitt zu beobachten (siehe Abbildung 5.23 bis Abbildung 5.25). Aufgrund der unterschiedlichen Kennwerte, welche in Kapitel 4-2.4 verglichen wurden, ist ein solches Verhalten zu erwarten gewesen, da bei Birkenholz mit einer größeren Rohdichte auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit einhergeht. Die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen Fichten- und Birken-BSP-Querschnitt in den drei BSP-Schichten liegen bei 2,93 bzw 2,69 °C. Die obere Grenze von 20 °C, welche in Nutzungsklasse 1 gefordert wird, kann vor allem im Birkenholz über die Sommermonate nicht eingehalten werden. Höhere Temperaturen führen jedoch zu einer geringeren Ausgleichsfeuchte (siehe Kapitel 3-5.2), was der Dauerhaftigkeit des Holzes eher zu Gute kommt. Die maximal erreichten Innenraumlufttemperaturen erreichen im Sommer 2013 knapp 30 °C (siehe Abbildung 5.17 und Abbildung 5.19) und stellen eine zeitweilige Überhitzung für knapp vier Wochen dar. Somit wäre ein Nachweis zur Vermeidung der sommerlichen Überwärmung (vgl. ÖNORM B 8110-3, 2012) hier nicht erfüllt.

Bei den Ganglinien der relativen Luftfeuchte zeigt sich zunächst eine zeitlich verzögerte Anpassung auf Änderungen der relativen Außenluftfeuchte, was die länger andauernden Wasserdampftransportvorgänge durch das gesamte Bauteil hindurch erkennen lässt. Die Abbildung 5.2 und Abbildung 5.4 zeigen, dass sich die Ganglinien im Sommer sehr stark aneinander annähern, wenn gleichzeitig konstante Temperaturverhältnisse im Querschnitt herrschen. Was die dämpfende Wirkung betrifft, so ist in den Abbildungen zu erkennen, dass vor allem in den äußeren Materialschichten bis hin zum Brettsperrholz die relative Luftfeuchte im Winter stark abfällt, was mit der nach innen hin zunehmenden Lufttemperatur in Verbindung steht. Somit ergibt sich hier ein Gefälle der relativen Luftfeuchte nach innen hin (siehe Abbildung 5.8 und Abbildung 5.10). Im Holz ist zu beobachten, dass in den Wintermonaten die weiter innen liegenden Brettsperrholzschichten größere Werte der relativen Luftfeuchte aufzeigen (siehe Abbildung 5.12 und Abbildung 5.15) als die äußere Brettlage. Dies verdeutlicht den Wasserdampftransport entlang des von innen nach außen verlaufenden Temperaturgefälles. Zudem lassen die weiter auseinanderliegenden Ganglinien des Fichten-BSP-Querschnittes das unterschiedliche Verhalten von Fichten- und Birkenholz erahnen. Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaues und der unterschiedlichen Rohdichte der Hölzer wird im Fichten-Brettsperrholz wohl mehr Feuchtigkeit in den mikroskopischen Hohlräumen durch Chemisorption, Adsorption und Kapillarkondensation (siehe Kapitel 3-5.2) aufgenommen, was

zu einer größeren relativen Luftfeuchte und zu einer größeren Holzfeuchte führt. Generell ist die relative Luftfeuchte im Fichten-BSP-Wandaufbau fast immer höher als im Birken-BSP-Wandaufbau (siehe Abbildung 5.23 bis Abbildung 5.25), was zudem auf einen kleineren Wasserdampfdiffusionswiderstand des Fichtenholzes schließen lässt. Da die relative Luftfeuchte an den sechs Messpunkten, welche im Bauteil angeordnet sind, nie den Wert von 100 % übersteigt, ist der vorhandene Dampfdruck auch stets kleiner als der Sättigungsdruck, wodurch es zu keiner Kondensatbildung im Bauteil kommt. Die obere Grenze von 65 % relativer Luftfeuchte, welche in Nutzungsklasse 1 gefordert wird, kann nur in der inneren Brettlage des Fichtenbrettsperrholzes für einen Zeitraum von maximal drei Monaten (siehe Abbildung 5.12) nicht eingehalten werden, wobei der Maximalwert bei 69,5 % liegt und somit nicht wesentlich vom Grenzwert abweicht.

Generell können die Messwerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte im Wesentlichen eine Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit der beiden Wandaufbauten bestätigen. Somit werden die planerischen Annahmen zur Berechnung von Hochbauten in Massivholzbauweise, was die bauphysikalischen Nachweise angeht, nicht in Frage gestellt.

KAPITEL 6: LABOR

6-1 EINLEITUNG

In den drei definierten Nutzungsklassen (siehe Kapitel 4-2.5) ist jeweils der Hinweis zur sich einstellenden Holzfeuchte für die meisten Nadelhölzer gegeben, was die Frage aufwirft, ob der Wert in der Forschungswohnung während der zwei Jahre eingehalten wird. Das anschließende Kapitel stellt den Zusammenhang zwischen gemessener Temperatur, gemessener relativer Luftfeuchte und der sich daraus ergebenden Holzfeuchte her.

6-2 MESSUMGEBUNG UND MESSMETHODE

Für die Bewertung der Wandaufbauten in Fichten- und Birkenbrettsperrholz gemäß den im Holzbau festgelegten Nutzungsklassen (siehe Kapitel 4-2.4) ist es von besonderem Interesse, in welchem Bereich sich die Holzfeuchte in den BSP-Elementen bewegt. Aufgrund der Eingangsparameter Temperatur und relativer Luftfeuchte aus dem verwendeten Messsystem bedarf es daher einer Kalibrierungsfunktion, die den Zusammenhang zwischen Temperatur, relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte herstellt.

Es werden dafür acht Prüfkörper hergestellt, vier in Fichtenholz und vier in Birkenholz, die eine Breite von ca. 40 mm, eine Höhe von ca. 55 mm und eine Länge von ca. 100 mm haben. Jeweils in drei der vier Prüfkörper sind die baugleichen Messsensoren nach demselben Prinzip wie auch in der Forschungswohnung eingebaut (siehe Kapitel 4-3.2). Die Probekörper werden in einem Klimaschrank (siehe Abbildung 6.1) einer bestimmten Temperatur und einer bestimmten relativen Luftfeuchte ausgesetzt bis sich das Holz seiner Umgebung angepasst hat und sich eine Ausgleichsfeuchte im Holz einstellt (siehe auch Kapitel 3-5.2). Dieser Prozess dauert etwa zwei Wochen. Damit der Einfluss der Temperatur und der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Holzfeuchte unabhängig voneinander untersucht werden können, werden

Tabelle 6.1: Messreihen, grüne Werte durchgeführt

	Temperatur [°C]		
	10	20	30
relative Luftfeuchte [%]	90	90	90
	80	80	80
	65	65	65
	48	48	48
	29	29	29
	15	15	15

drei Messreihen definiert in denen die Temperatur jeweils konstant am Klimaschrank eingestellt ist (siehe Tabelle 6.1). Da sich die Temperatur in einem Wandaufbau, wie er in der Forschungswohnung zu finden ist, nur in einem bestimmten Bereich bewegt, ist eine obere Grenze von 30 °C und eine untere Temperaturgrenze von 10 °C festgelegt worden. Für die relative Luftfeuchte sollte das ganze Spektrum abgedeckt werden, was zu sechs einstellbaren Werten von 15 % bis maximal 90 % führt.

Die Untersuchung wurde bereits von den Autoren des Forschungsberichtes (Ringhofer, et al., 2012) initiiert und für den Temperaturbereich von 20 °C lagen für die in Tabelle 6.1 grün markierten relativen Luftfeuchtwerte bereits die

Sensormessergebnisse vor. Das Messprogramm beinhaltet zum einen die Messung der relativen Luftfeuchte und der Temperatur anhand des eingebauten Sensors, andererseits wird gleichzeitig auch die Masse aller Probekörper bei der Messung bestimmt. Nach zwei Wochen werden die Probekörper im Abstand von zwei Tagen gewogen und es wird überprüft, ob die Masse der Probekörper konstant ist. Wenn dann die Massendifferenz $\leq 1\%$ ist, können die Sensoren aktiviert werden und die Kenngrößen Temperatur und relative Luftfeuchte gemessen werden. Hierzu bedarf es eines Multimeters, welcher in der Lage ist einen Widerstand und eine Spannung zu messen. Der Messwiderstand, welcher im Widerstandsthermometer aufgebaut wird, liefert dann die entsprechende Temperatur im Holz wobei beim Anlegen einer Spannung mittels Netzteil am Planarkondensator ein Stromfluss entsteht, welcher zur relativen Luftfeuchte im Probekörper umgerechnet werden kann (vgl. Kapitel 4-3.2).



Abbildung 6.1: Klimaschrank

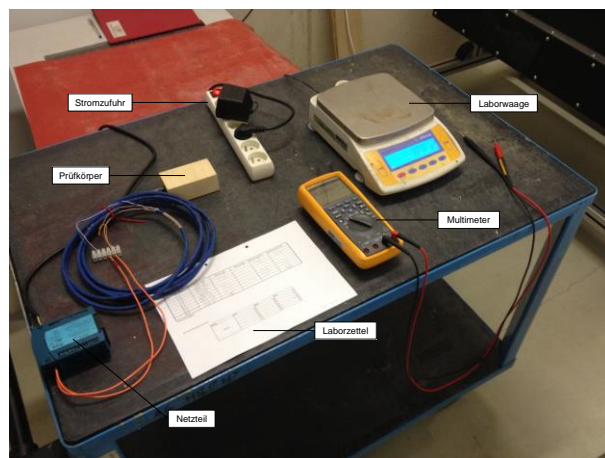


Abbildung 6.2: Messinstrumente

Da die Akklimatisierung der Probekörper im Klimaschrank stets zwei Wochen in Anspruch nimmt und der Klimaschrank zwischenzeitlich von einer zweiten Partei benutzt wurde, konnte die 10 °C-Serie nicht vollständig zu Ende geführt werden. Aufgrund der ausgewerteten Messdaten lässt sich jedoch erkennen, dass die Minimalwerte der relativen Luftfeuchte in den BSP-Elementen der Forschungswohnung nie unter 42 % fallen, sodass mit einem unteren Wert von 48 % das Spektrum der relativen Luftfeuchte beinahe abgedeckt ist. Die Probekörper werden im Anschluss entsprechend der Darmmethode (siehe Kapitel 3-6.1) getrocknet und deren darrtrockenes Gewicht bestimmt. Da für jedes untersuchte Klima die feuchte Masse der Probekörper bestimmt wurde, kann entsprechend Gleichung (3.6) die Holzfeuchte berechnet werden.

6-3 KALIBRIERUNG

Die Herstellung der Beziehung von Temperatur und relativer Luftfeuchte gegenüber der Holzfeuchte erfolgt in drei Schritten. Zunächst werden die im Labor ermittelten Werte der

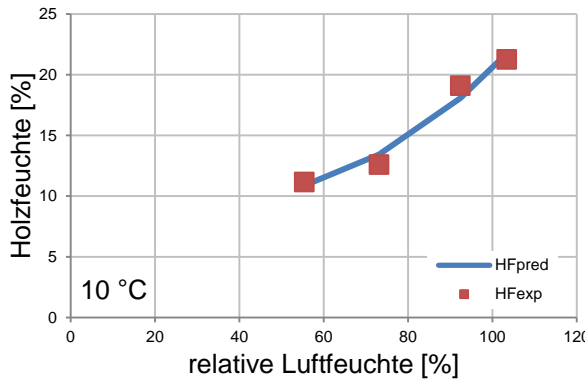


Abbildung 6.3: Holzfeuchte Fichte bei 10 °C

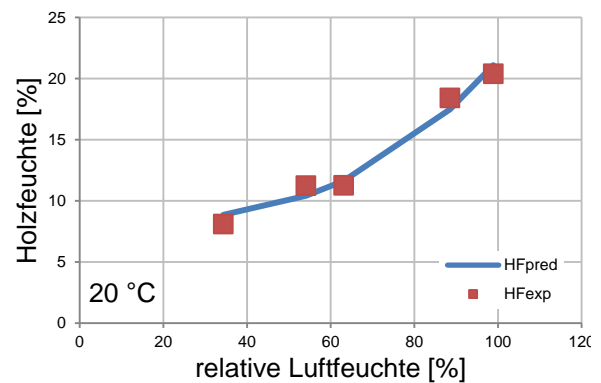


Abbildung 6.4: Holzfeuchte Fichte bei 20 °C

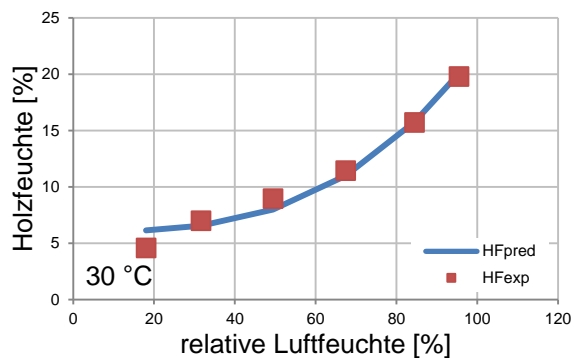


Abbildung 6.5: Holzfeuchte Fichte bei 30 °C

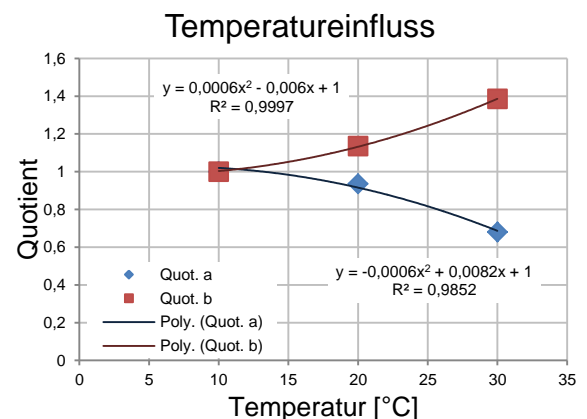


Abbildung 6.6: Temperatureinfluss Fichte

Holzfeuchte über der jeweiligen relativen Luftfeuchte aufgetragen (siehe Abbildung 6.3 bis Abbildung 6.5), wobei hier das Prozedere am Fichtenholz dargestellt wird. Die vom Prinzip her gleiche Auswertung für das Birkenholz ist im ANHANG A zu finden.

Die Messpunkte (HF_{exp}) werden im Anschluss entlang einer kubischen Parabel mit der allgemeinen Form $HF_{pred} = a + b \cdot RL^3$ gefittet. Aus diesen drei Trendgleichungen ergeben sich jedoch für alle drei Temperaturbereiche andere Werte für die Faktoren a und b. Dieser Umstand wird genutzt, um den Einfluss der Temperatur auf die Holzfeuchte an die bereits aufgestellte

Tabelle 6.2: Fitting-Faktoren Fichte

	Temperatur [°C]		
	10	20	30
a	8,887808156	8,316180681	6,043231786
b	$1,16286 \cdot 10^{-5}$	$1,32027 \cdot 10^{-5}$	$1,6111 \cdot 10^{-5}$

allgemeine Form, welche den besonderen Einfluss der relativen Luftfeuchte beschreibt, zu knüpfen. Dafür wird zunächst untersucht, wie sich die Faktoren a und b zwischen den drei Temperaturbereichen entwickeln (siehe

Abbildung 6.6). Die Bezugsgröße bildet der Faktor a bzw. b bei 10 °C und es zeigt sich, dass ein Polynom 2. Grades den Trend der Fitting-Faktoren sehr gut beschreibt. Daraufhin kann die allgemeine Form wie folgt komplettiert werden:

$$HF = a * (c * T^2 + d * T + 1) + b * (e * T^2 + f * T + 1) * RL^3 \quad (6.1)$$

HF	–	Holzfeuchte	[%]
T	–	Temperatur	[°C]
RL	–	relative Luftfeuchte	[%]
a,b,c,d,e,f	–	Kalibrierungsfaktoren Fichte	[-]

Da die Trendlinie der Fitting-Faktoren sich auf die Faktor a und b bei 10 °C beziehen bilden diese beiden Faktoren nun auch die konstanten Faktoren a und b in Gleichung 6.1. Die anderen Kalibrierungsfaktoren ergeben sich gemäß Abbildung 6.6 zu:

Tabelle 6.3: Kalibrierungsfaktoren

	a	b	c	d	e	f
Fichte	8,887808156	1,16286*10 ⁻⁵	-0,0006	0,0082	0,0006	-0,006
Birke	7,716166396	1,34001*10 ⁻⁵	-0,0006	0,0096	0,0005	-0,0028

6-4 HOLZFEUCHTE

Anhand Gleichung 6.1 lassen sich aufgrund der gesammelten Daten in der Forschungswohnung nun die Ganglinien der Holzfeuchte in Abhängigkeit der gemessenen Temperatur und relativen Luftfeuchte ermitteln. Sie werden in den Abbildungen 6.7 und 6.9 dargestellt. Komplettiert werden die ermittelten Werte mit den Umhüllenden der Holzfeuchte, welche in Abbildung 6.8 und Abbildung 6.10 gezeigt werden. Hier lässt sich der Gesamtbereich der möglichen Holzfeuchte in den drei einzelnen Brettlagen besser ablesen. Im Anschluss wird wieder der Vergleich zwischen dem Fichten-BSP und dem Birken-BSP gezogen (siehe Abbildung 6.11 bis Abbildung 6.13).

6-4.1 FICHTE

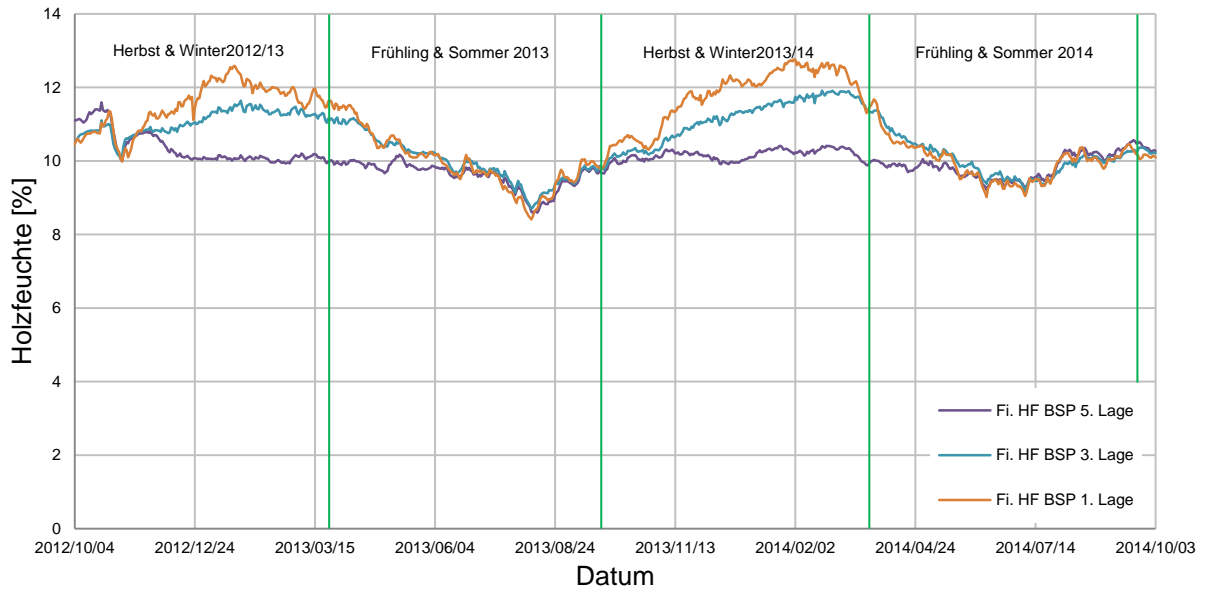


Abbildung 6.7: Holzfeuchte Fichte BSP

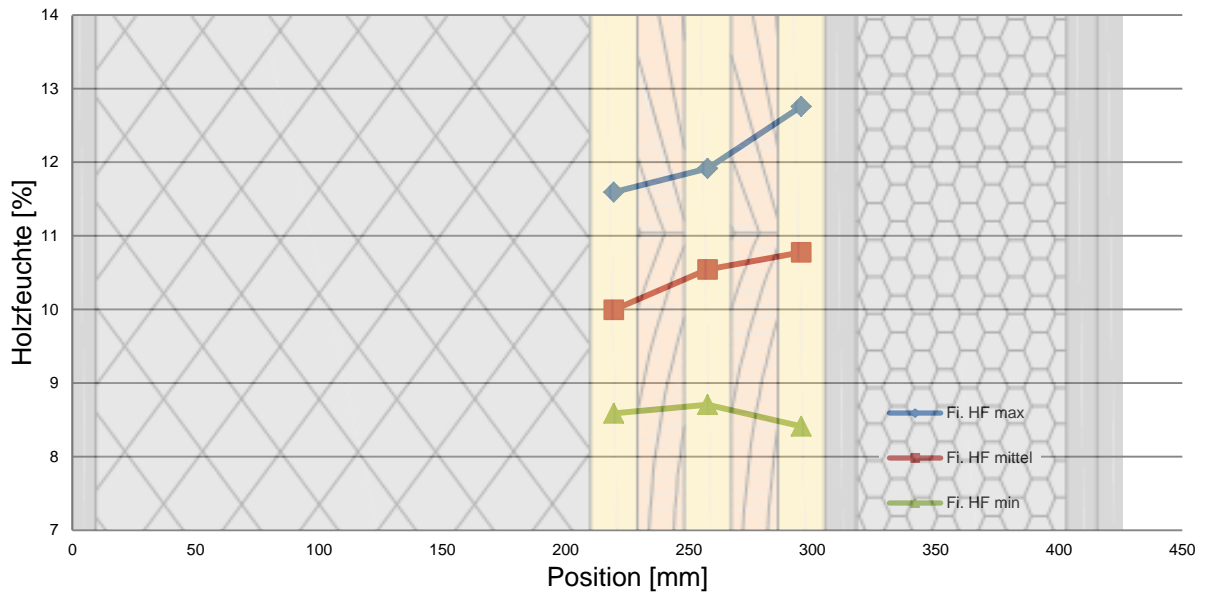


Abbildung 6.8: Umhüllende der Holzfeuchte Fichte

6-4.2 BIRKE

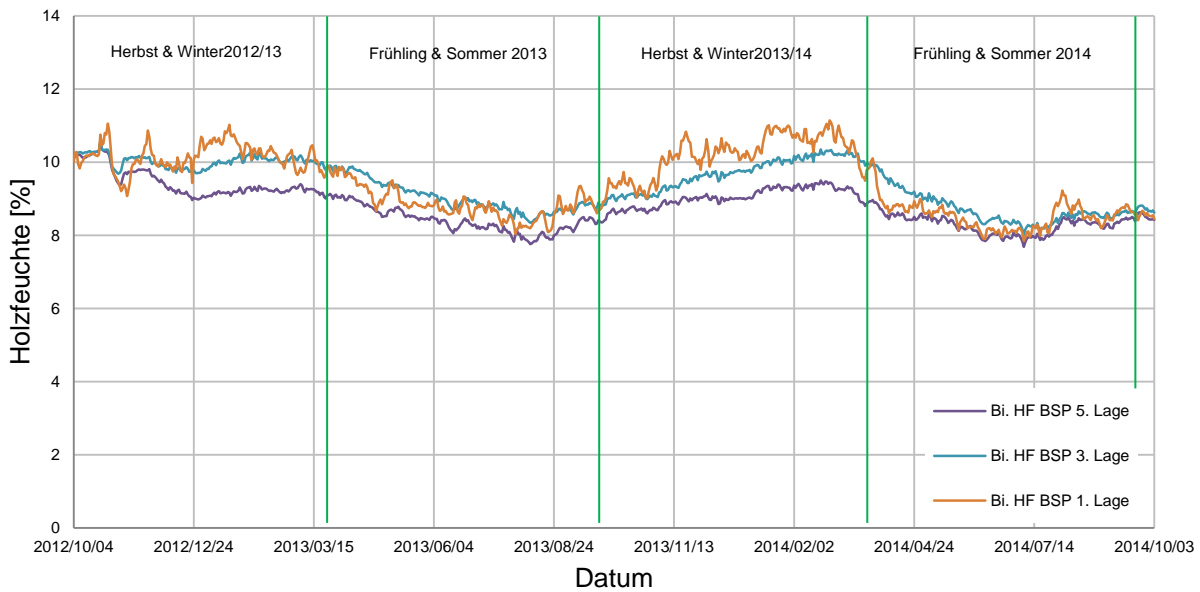


Abbildung 6.9: Holzfeuchte Birke BSP

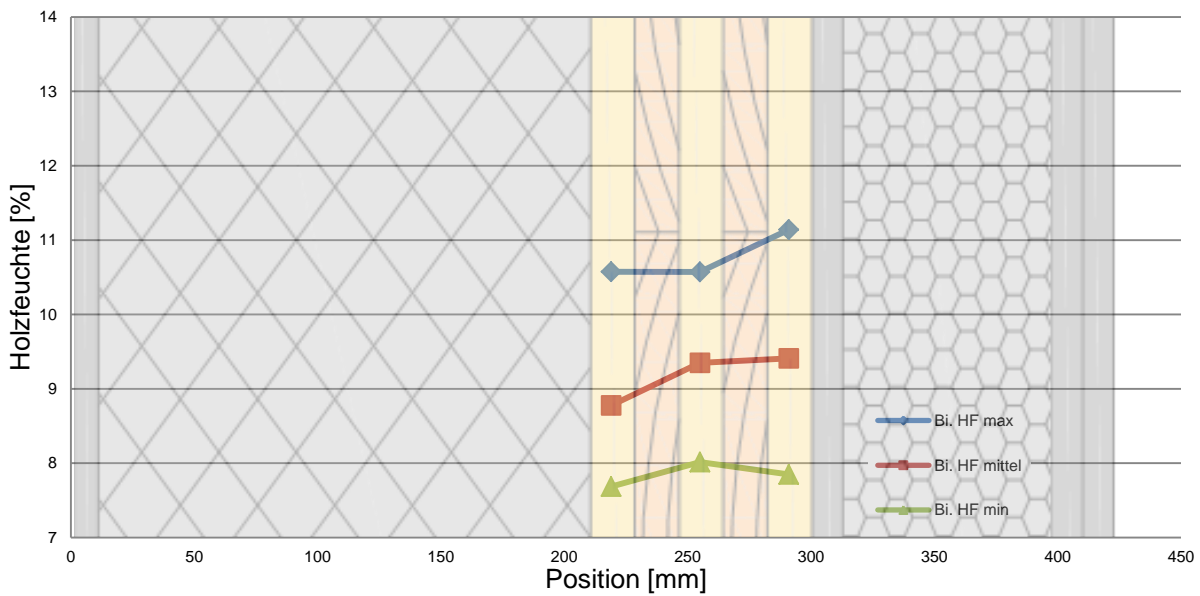


Abbildung 6.10: Umhüllende der Holzfeuchte Birke

6-4.3 VERGLEICH FICHTE UND BIRKE

6-4.3.1 BSP 5. Lage

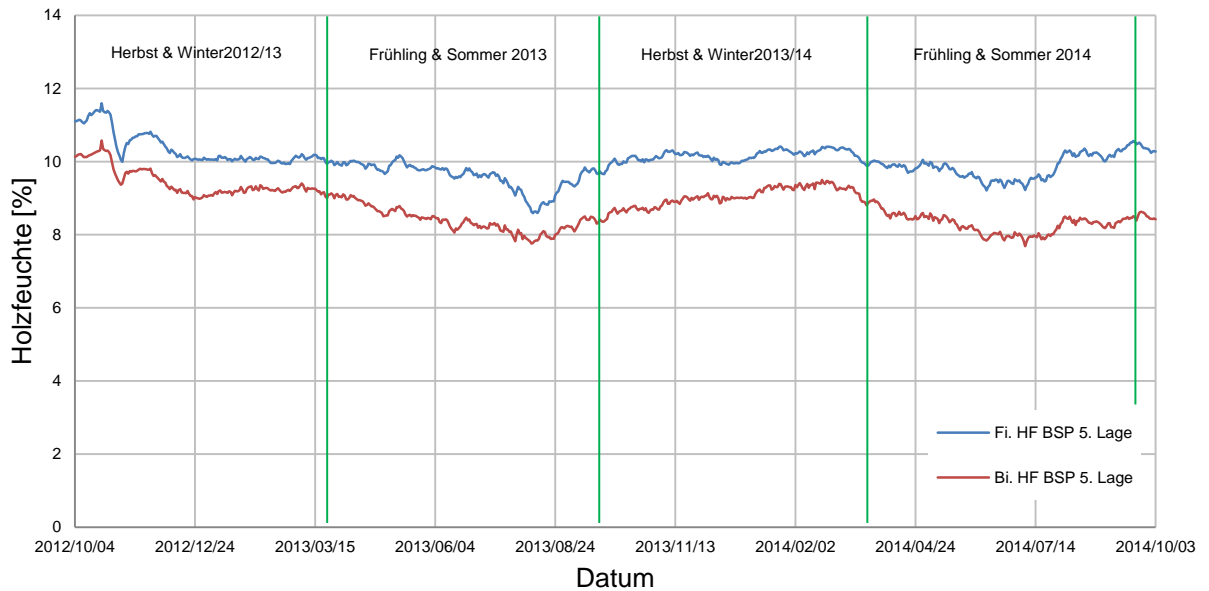


Abbildung 6.11: Vergleich Holzfeuchte BSP 5. Lage

6-4.3.2 BSP 3. Lage

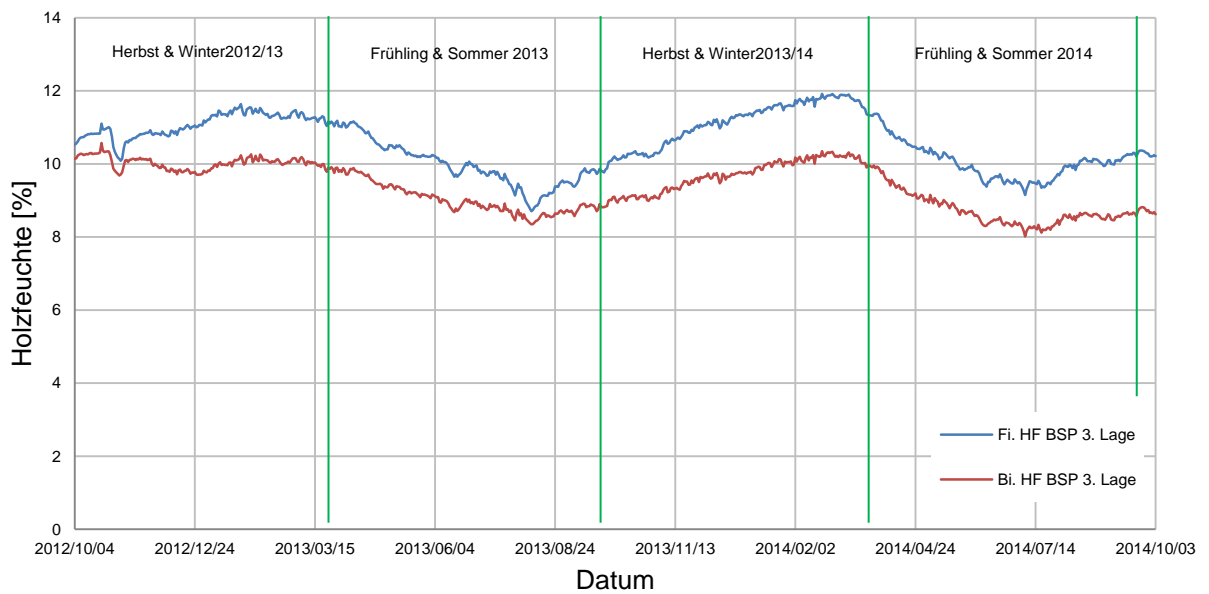


Abbildung 6.12: Vergleich Holzfeuchte BSP 3. Lage

6-4.3.3 BSP 1. Lage

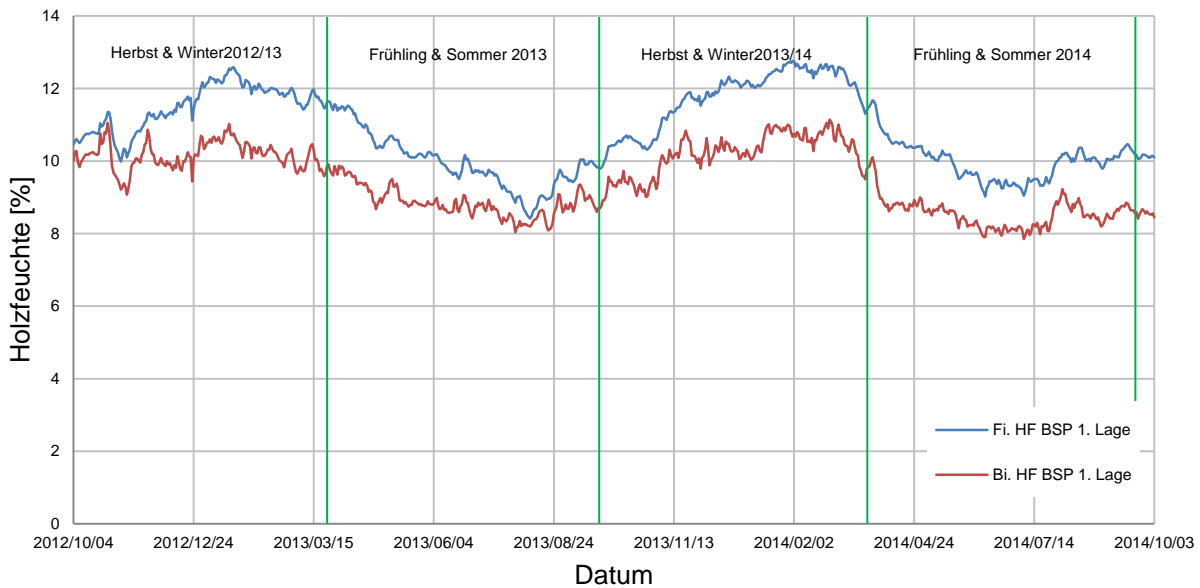


Abbildung 6.13: Vergleich Holzfeuchte BSP 1. Lage

Tabelle 6.4: minimale/maximale Messwerte und maximale Differenz der Holzfeuchte im BSP

Messpunkt		Fichte		Birke		Fi./Bi.
		min	max	min	max	max Tages- Δ
BSP 5. Lage	HF [%]	8,59	11,59	7,69	10,57	2,09
BSP 3. Lage	HF [%]	8,71	11,92	8,01	10,57	1,69
BSP 1. Lage	HF [%]	8,41	12,76	7,85	11,14	2,09

6-4.4 BEWERTUNG

Man erkennt in den Abbildungen 6.7 und 6.9 sehr gut, dass die Holzfeuchte vor dem Bezug der Forschungswohnung im gesamten Fichten-BSP-Querschnitt bei etwa 11 % liegt, wohingegen die Holzfeuchte im Birken-BSP bereits etwas tiefer bei rund 10 % startet. Es kommt dann beim erstmaligen Beheizen der Wohnung zu einem kollektiven Abfall der Holzfeuchte um etwa 1 %, was den Einfluss der Temperaturdifferenz auf das Bauteil verdeutlicht. Sobald der innenliegende Wohnraum beheizt wird, differieren die Ganglinien der Holzfeuchte, ähnlich wie die der relativen Luftfeuchte (siehe Kapitel 5-5), auseinander, da es nun aufgrund des entstandenen Temperaturgefälles zum Wasserdampftransport durch die Außenwand kommt. Die höchsten Holzfeuchten stellten sich in der innenliegenden Brettlage ein und die unterschiedlichen Amplituden lassen sich besonders im Fichtenholz deutlich erkennen. Die Birke verhält sich nicht so extrem. Deren Ganglinien driften bei größerem Temperaturgefälle im Winter nicht so weit auseinander. Genau wie bei den Ganglinien der relativen Luftfeuchte,

kommt es auch bei der Holzfeuchte im Sommer zu einer Annäherung der Ganglinien in den drei Schichten, wobei die Holzfeuchte insgesamt auch deutlich abnimmt. So fällt sie zum Beispiel im Sommer 2013 im Fichten-BSP von 12,6 % auf 8,4 %, wohingegen das Birken-BSP einen Abfall von 11,0 % auf 7,8 % verzeichnet. Beim Birken-BSP ist zudem auffällig, dass die Holzfeuchte in der äußeren Brettlage sich nicht zu 100% im Sommer den Holzfeuchten der weiter innenliegenden Brettlagen anpasst. Sie bildet eigentlich durchgängig über den kompletten Zeitraum die untere Grenze der gemessenen Holzfeuchte. Es wird hier, aufgrund der größeren Dichte des Birkenholzes, auf einen geringeren Wasserdampftransport entlang des Temperaturgefälles geschlossen, sodass weniger Feuchte in der äußeren Brettlage ankommt und gebunden wird, was zu einer dauerhaften Differenz der Holzfeuchte zwischen der äußeren Brettlamelle und dem in der Mitte liegenden Brett führt. Dies wird durch den eher parallelen Verlauf der Holzfeuchte von 3. und 5. Lage untermauert.

Im direkten Vergleich der jeweiligen Brettlagen (Abbildung 6.11 bis Abbildung 6.13) wird das unterschiedliche hygroskopische Verhalten der zwei verbauten Hölzer noch einmal sehr deutlich. Zunächst ist ersichtlich, dass sich im Birkenholz eine stets niedrigere Ausgleichsfeuchte einstellt, was aufgrund der tiefer liegenden Ganglinien der Holzfeuchte im Vergleich zu den Ganglinien des Fichtenholzes zu erkennen ist. Dieses Verhalten beschreiben auch die Forschungsergebnisse von (Popper & Niemz, 2009) bis zu einer relativen Luftfeuchte von 70 % bei 20 °C. In der äußeren Brettlage bewegen sich die Werte der Holzfeuchte im Fichten-BSP-Element etwa im Bereich von 10 ± 1 % und im Birkenbrettsperholz etwa im Bereich von 9 ± 1 %. Sie verlaufen dabei sehr parallel zueinander, was nochmals die Reaktion der äußeren Brettlage auf das Außenklima verdeutlicht. Das parallele Verhalten ist auch in den weiter innenliegenden Brettlagen zu beobachten, wobei der Unterschied der Amplitudenhöhe nach innen hin zunimmt.

In Bezug auf die Nutzungsklasse (siehe Kapitel 4-2.4) werden die BSP-Elemente als Bauteile definiert, die sich in einer dauerhaften und geschlossenen Hülle befinden und somit können sie der Nutzungsklasse 1 zugeordnet werden. Nutzungsklasse 1 definiert für die Holzfeuchte einen Ausgleichsfeuchtebereich von 5 bis 15 %, wobei die meisten Nadelhölzer einen Feuchtegehalt von 12 % meist nicht überschreiten. Die Messdaten ergeben für einen maximalen Bereich von etwa drei Monaten (14.12.2013 – 16.03.2014) in der innenliegenden Brettschichtlage des Fichten-BSP-Elementes eine Überschreitung der geforderten 12 %, wobei der Maximalwert bei 12,76 % liegt. Aufgrund der Tatsache, dass Nutzungsklasse 2 als oberen Grenzwert der Holzfeuchte in den meisten Nadelhölzern bereits 20 % vorsieht, gilt eine solch geringe Überschreitung der Holzfeuchte nicht als ein Gefahrenpotenzial hinsichtlich der Entstehung einer biologischen Schädigung des Fichtenholzes wie z.B. die Entwicklung von Pilzen, zu beurteilen.

KAPITEL 7: STATIONÄRE MODELLIERUNG

7-1 EINLEITUNG

Von stationären Verhältnissen wird dann gesprochen, wenn man von zeitlich konstanten Bedingungen ausgeht. In Bezug auf die bauphysikalischen Größen bedeutet es, dass sowohl Wasserdampfstromdichte als auch Wärmestromdichte als konstante Größen angenommen werden. Daraus ergeben sich ein zeitlich konstantes Wasserdampfprofil und ein zeitlich konstantes Wärmeprofil in der Außenwand. (Häupl, 2008) Ausgehend von stationären Verhältnissen, welche auf den oben beschriebenen Randbedingungen beruhen, wird nun versucht, die erzielten Resultate aus Kapitel 5 zu reproduzieren und zu verifizieren. Die berechneten Werte stützen sich auf die Formeln und Definitionen, welche in Kapitel 3-7 beschrieben sind. Als Eingangsgrößen werden hier die gemessenen Werte des äußeren Klimas (Temperatur und relative Luftfeuchte) und des inneren Raumklimas verwendet. Für die Berechnung der Temperatur an den einzelnen Messstellen dienen die Ansätze aus Kapitel 3-7.1 und vor allem aus Kapitel 3-7.2 Die relative Luftfeuchte ergibt sich zum einen aus dem Sättigungsdampfdruck entsprechend der Gleichung 3.18 bzw. 3.19 (siehe Kapitel 3-7.4) und dem vorhandenen Wasserdampfdruck gemäß Kapitel 3-7.6. Das anschließende Verhältnis wird entsprechend Gleichung 3.20 gebildet.

7-2 MATERIALKENNGRÖßEN

Tabelle 7.1: Kenngrößen Fichten-BSP-Wandaufbau

Nr.	Schicht	d [m]	λ [W/mK]	μ [-]	d/ λ bzw. R_s [m ² K/W]	d* μ bzw. s_d [m]	
	innen				0,13		
1	Gipskartonplatte	0,025	0,25	10	0,10	0,25	
2	Mineralwolle	0,085	0,04	1	2,13	0,085	
3	Gipskartonfeuer- schutzplatte	0,0125	0,25	10	0,05	0,125	
4	Brettsperrholz	0,095	0,12	50	0,79	4,75	
5	MUF Leimfugen					1,56	
6	Fassadenplatte Mineralwolle	0,2	0,04	1	5,00	0,2	
7	Unter- und Oberputz	0,01	0,4	6	0,03	0,06	
	außen				0,04		
					Σ	8,26	7,03
					U	0,12	W/m ² K

Die Materialkenngrößen wurden der ÖNORM EN ISO 10456, 2010 entnommen. Dort werden die wärme- und feuchtetechnischen Eigenschaften für die gängigen Baustoffe und Bauprodukte tabellarisch angegeben. Für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl finden sich für jeden Baustoff zwei Werte, welche nach den Bedingungen aus der DIN EN ISO 12752 für das „trockene Prüfgefäß“ und das „nasse Prüfgefäß“ bestimmt sind. Die ÖNORM EN ISO 10456, 2010 führt hierzu an, dass für beheizte Gebäude in der Regel die Zahlenwerte für das trockene Prüfgefäß bei Materialschichten zu verwenden sind, welche sich an der Innenseite der Dämmschicht befinden. Hierbei wird generell davon ausgegangen, dass eine mittlere relative Luftfeuchte von 70 % in der Bauteilschicht nicht überschritten wird. In den vorliegenden Wandaufbauten ist an den Messstellen im Brettsperrholz und in der Vorsatzschale dieses Kriterium stets eingehalten (siehe Kapitel 5-5 und 5-6). Für die an der Außenseite der Dämmschicht angebrachten Baustoffe ergeben sich dann die Kennzahlen für das nasse Prüfgefäß. Für Brettsperrholz wird in (Richard, et al., 2013) angeführt, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in den meisten Fällen dem des rissefreien Vollholzes gleicht. Um diese bauphysikalische Größe genauer zu erfassen, wird hier die Forschung von (Volkmer, et al., 2012) mitberücksichtigt, welche sich mit dem Einfluss der Klebstoffart auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen beschäftigt. Die Autoren geben hierin einen gemessenen s_d -Wert für ein Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (aus Hübner, 2012), als Klebstoff an, welcher unter den Bedingungen für das trockene Prüfgefäß einen Wert von 0,39 m ergibt. Dieser gilt für eine Leimfuge, was bei 5-schichtigem Brettsperrholz zu einer zusätzlichen wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von 1,56 m führt.

Tabelle 7.2: Kenngrößen Birken-BSP-Wandaufbau

Nr.	Schicht	d [m]	λ [W/mK]	μ [-]	d/ λ bzw. R_s [m ² K/W]	s_d [m]
	innen				0,13	
1	Gipskartonplatte	0,025	0,25	10	0,10	0,25
2	Mineralwolle	0,085	0,04	1	2,13	0,085
3	Gipskartonfeuer- schutzplatte	0,0125	0,25	10	0,05	0,125
4	Brettsperrholz	0,09	0,17	170	0,53	15,3
5	Leimfugen					1,56
6	Fassadenplatte Mineralwolle	0,2	0,04	1	5,00	0,2
7	Unter- und Oberputz	0,01	0,4	6	0,03	0,06
	außen				0,04	
				Σ	8,00	17,58
				U	0,13	W/m ² K

7-3 ALLE MESSSTELLEN

Wie bereits zu Beginn des Kapitels beschrieben, beruhen die stationär simulierten Verläufe auf den Werten der Temperatur und relativen Luftfeuchte, welche an der außenliegenden Messstelle und im innenliegenden Wohnraum gemessen wurden. Anhand eines zeitlich konstanten Wärmestromes lässt sich der Temperaturverlauf durch den jeweiligen Wandquerschnitt berechnen. Abbildung 7.1 und Abbildung 7.3 zeigen die Ganglinien für den Fichten-BSP-Wandaufbau und den Birken-BSP-Wandaufbau in jeweils acht Punkten des Querschnittes, welche den Messpunkten der Sensoren des Langzeitmesssystems entsprechen. Es ergeben sich stationäre Temperaturganglinien, welche sich durch die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialschichten charakterisieren. Der Wärmestrom verläuft von der wärmeren Innenlufttemperatur hin zur meist kälteren Außenlufttemperatur. Das jeweilige Gefälle lässt sich in den Abbildungen sehr gut erkennen. Es zeigt sich, dass bei einem geringen Temperaturgefälle im Sommer die Ganglinien sehr nah oder zum Teil direkt aufeinander liegen. Bei größeren Temperaturgefällen in den kälteren Monaten des Jahres lässt sich ein stetiges Abnehmen der Temperatur in den hintereinander liegenden Schichten beobachten. Im Winter ist der dämpfende Effekt vor allem in den dämmenden Mineralwolle-Schichten zu erkennen. Es ist eine deutliche Abnahme der Temperatur innerhalb der innenliegenden Dämmschicht, wie auch in der äußeren Dämmschicht zu beobachten. Im Holz herrscht hingegen eine nahezu gleiche Temperatur, der maximale Temperaturunterschied liegt bei rund 2,5 °C in den Wintermonaten. Alle anderen Materialschichten, wie Putz und Gipskartonplatte weisen aufgrund ihrer geringen Schichtdicke und der größeren Wärmeleitfähigkeit keine dämmende Wirkung auf. Dies ist an den übereinander liegenden Ganglinien der Außenluft und der Messstelle „Wärmedämmung außen“ deutlich zu erkennen. Es zeigen sich keine Unterschiede der Temperaturganglinien zwischen Fichten-BSP- und Birken-BSP-Wandaufbau.

Die relative Luftfeuchte berechnet sich aus dem Verhältnis des vorhandenen Wasserdampfdruckes und dem Sättigungsdruck des Wasserdampfes. Der Sättigungsdruck wird aus den ermittelten Temperaturen in den einzelnen Bauteilschichten errechnet, wobei sich der vorhandene Wasserdampfdruck aufgrund eines zeitlich konstanten Wasserdampfstromes durch das Bauteil hindurch ergibt. Die zeitlich länger dauernden Feuchtetransportvorgänge werden hierbei nicht berücksichtigt, was zu keinen zeitlich verzögerten Verläufen führt. Die Ganglinien (siehe Abbildung 7.2 und Abbildung 7.4) folgen dennoch dem zu erwartendem hygrischen Verhalten und es kann ein Zusammenrücken in den Sommermonaten beobachtet werden. Im Winter hingegen divergieren die Ganglinien deutlich auseinander. Zunächst zeigt sich im Winter, dass die relative Luftfeuchte in der Vorsatzschale gegenüber der relativen Luftfeuchte im Innenraum, deutlich ansteigt, was mit dem Abfall der Temperatur innerhalb der beiden Messstellen zu tun hat. Daraufhin sinkt sie innerhalb des Holzes bei nahezu gleichbleibender Temperatur, was auf den großen Wasserdampfdiffusionswiderstand des Holzes zurückzuführen ist. In der ersten Brettschichtlage sind dadurch größere relative Luftfeuchten im Vergleich zur mittleren und äußeren Brettlage zu verzeichnen. Innerhalb der äußeren Wärmedämmung steigt sie dann wieder, was wiederum mit der berechneten Temperaturdifferenz zusammenhängt. Die äußeren beiden Ganglinien liegen dann wieder deckungsgleich übereinander. Es zeigen sich minimale Unterschiede zwischen Fichten-BSP- und Birken-BSP-Wandaufbau bei der relativen Luftfeuchte auf dessen Gründe in Kapitel 9 eingegangen wird. Die einzelnen Ganglinien entsprechend den Kategorien „Messstellen außen“, „Messstellen BSP“ und „Messstellen innen“ sind ergänzend im ANHANG B zu finden, da sie für ein besseres Verständnis der Modellierung keine zusätzlichen Auskünfte liefern.

7-3.1 FICHTE

7-3.1.1 Temperatur

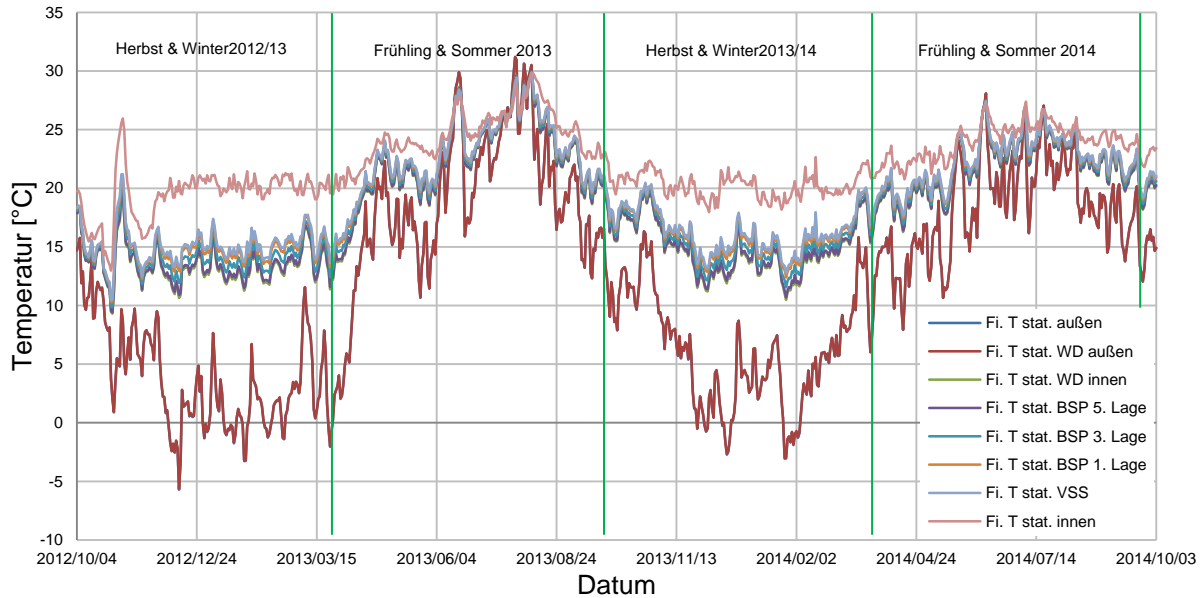


Abbildung 7.1: Temperatur stationär Fichte gesamt

7-3.1.2 relative Luftfeuchte

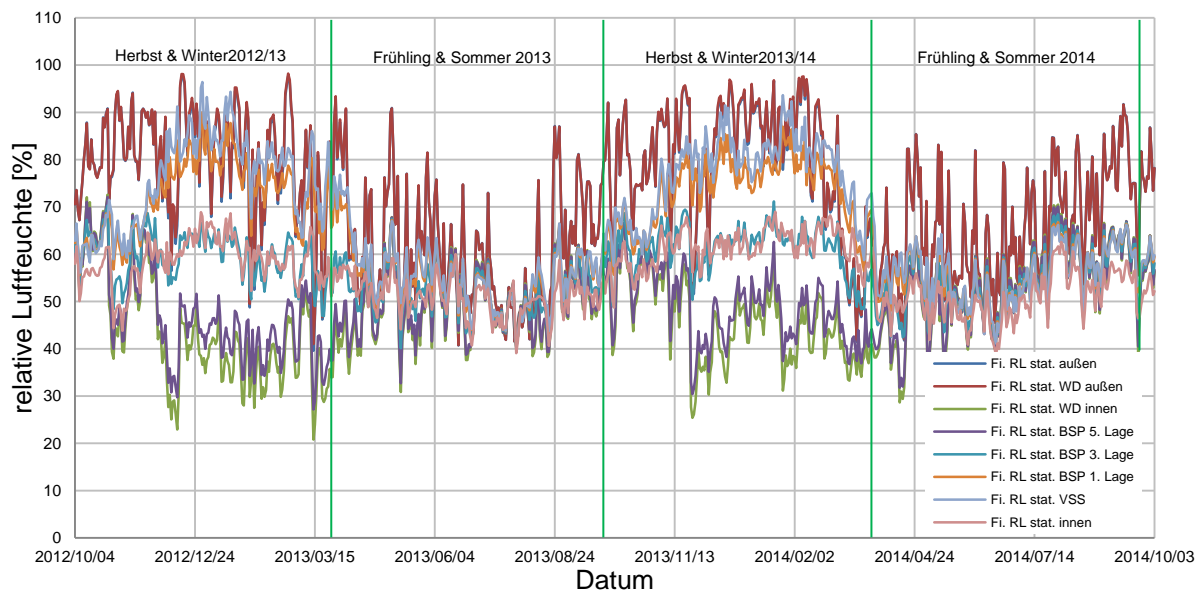


Abbildung 7.2: relative Luftfeuchte stationär Fichte gesamt

7-3.2 BIRKE

7-3.2.1 Temperatur

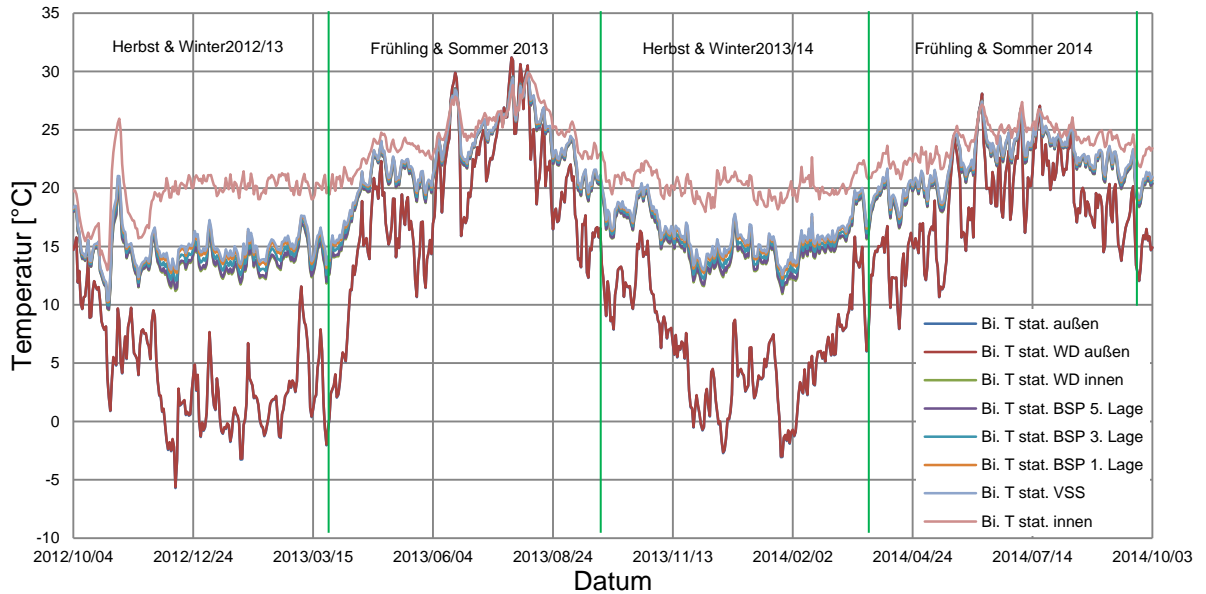


Abbildung 7.3: Temperatur stationär Birke gesamt

7-3.2.2 relative Luftfeuchte

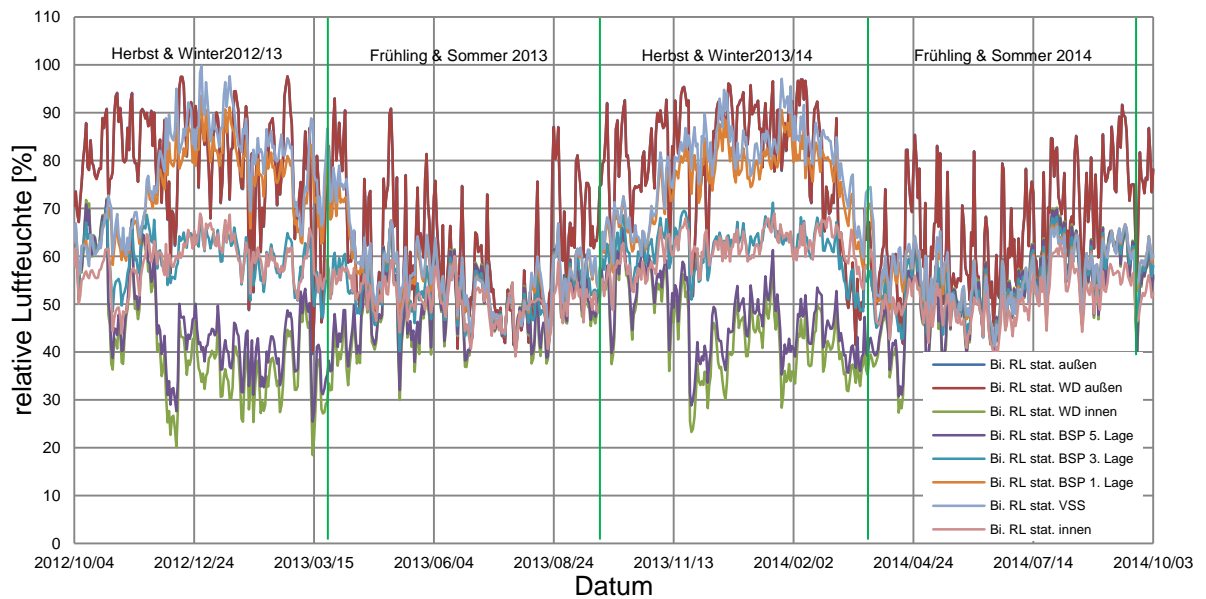


Abbildung 7.4: relative Luftfeuchte stationär Birke gesamt

KAPITEL 8: INSTATIONÄRE MODELLIERUNG

8-1 EINLEITUNG

Der stationäre Ansatz, welcher auf zeitlich konstanter Wärmestrom- und Wasserdampfstromdichte aufbaut, ist für eine gesamtheitliche Betrachtung des bauphysikalischen Verhaltens eines Wandaufbaues wohl nicht ausreichend, da nicht nur ein spezieller Zeitpunkt betrachtet wird, sondern ein Zeitraum von zwei Jahren simuliert wird. Unter diesem Gesichtspunkt und der Tatsache, dass die Wärmeleitfähigkeit besonders im Holz auch abhängig von dem Feuchtegehalt ist, bedarf es einer gekoppelten Betrachtung des Wärme- und Feuchtetransportes. Daher wird an dieser Stelle eine instationäre Modellierung aufgrund der Feuchtebilanzgleichung (siehe Kapitel 3-7.7) mittels derselben Materialkenngrößen wie bei der stationären Modellierung (vgl. Kapitel 7-2) durchgeführt.

8-1.1 DELPHIN

Die Simulation wird anhand des Programmes DELPHIN des Institutes für Bauklimatik der TU Dresden durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein numerisches Simulationsprogramm, welches auf Basis der gekoppelten Feuchtebilanzgleichung (vgl. Gleichung 3.25 in Kapitel 3-7.7) arbeitet. Es lassen sich mit der Software 1D, 2D und rotationssymmetrische 3D Modelle für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport erstellen. Das Programm beruht auf der Analyse einzelner Randelemente innerhalb eines oder mehrerer Volumenelemente, welche in einer Konstruktionsebene erstellt werden können (siehe Abbildung 8.1). Die Volumenelemente sind an die jeweiligen Materialien und ihre Kenngrößen gebunden. Die Materialkenngrößen sind dem Materialkatalog, welcher in der Software implementiert ist, entnommen, wobei Fichte als Holzart zu finden ist aber Birke als Holzart nicht definiert ist. Daraufhin wurde das Birkenholz aus dem katalogisierten Buchenholz entlang dem Dichteunterschied entwickelt, da es sich hierbei um zwei zerstreutporige Hölzer handelt. Die Anpassung betrifft die Materialkenngrößen Porosität, effektive Sättigung, Kapillarsättigung, hygroskopischer Sorptionswert bei 80-prozentiger relativen Luftfeuchte und den Wasseraufnahmekoeffizienten A_w .

Für eine mehrjährige Temperatur- und Feuchtesimulation müssen folgende bauklimatischen Randbedingungen eingegeben werden:

- Lufttemperatur
- relative Luftfeuchte
- Niederschlag
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- kurzwellige Wärmestrahlung
- langwellige Wärmestrahlung

Die Klimadaten für Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Windrichtung werden für die zweijährige Simulation von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik bereitgestellt (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2015). Die Strahlungsdaten für kurzwellige und langwellige Wärmestrahlung werden vom ARAD-Netzwerk (Austrian Radiation) bezogen (Olefs, et al., 2012). Die erhaltenen Daten der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte wurden mit den an der Forschungswohnung aufgezeichneten

Außenklimadaten verglichen und es zeigt sich, dass eine sehr gute Übereinstimmung gegeben ist (siehe Abbildung 8.2)

Da es sich bei der Feuchtebilanzgleichung um ein nichtlineares, partielles Differentialgleichungssystem handelt, nähert sich die Software Delphin einer Lösung auf iterativer Weise anhand der Newton-Iteration für gewöhnliche Differentialgleichungen. Die Software stellt eine Zeitintegrationsschleife für die Annäherung her. Gleichzeitig werden die Volumenelemente feinmaschig vernetzt, sodass sehr feine Randelemente an den Rändern entstehen. Der Zerlegungsalgorithmus und die aufeinanderfolgende Berechnung der Transportkoeffizienten und die Gradienten der Antriebspotentiale erlauben die Bestimmung des Energieflusses und ihrer gegenseitigen Divergenz. Die Prozedur wird iterativ angewendet, bis eine Konvergenz für den aktuellen Zeitschritt erreicht wird.

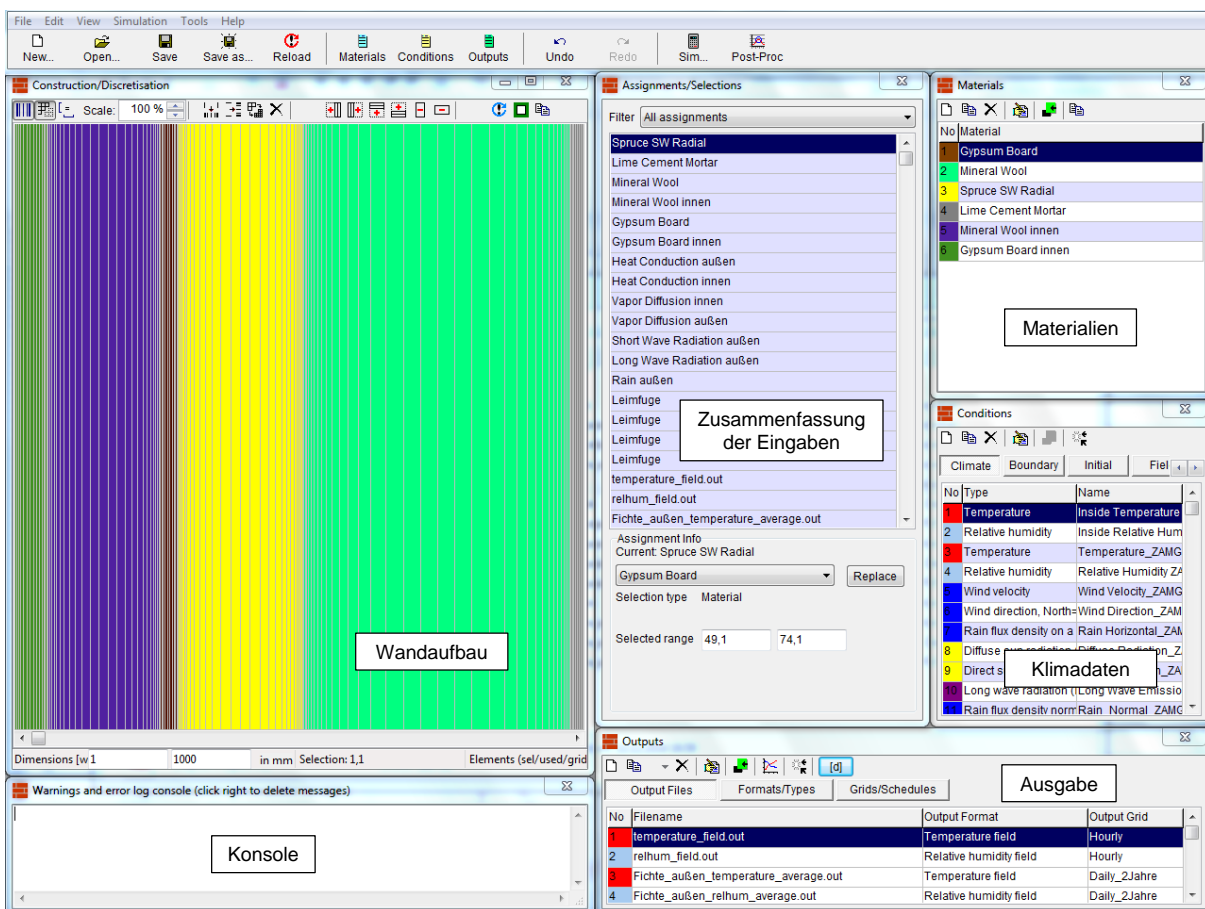


Abbildung 8.1: Interface Delphin

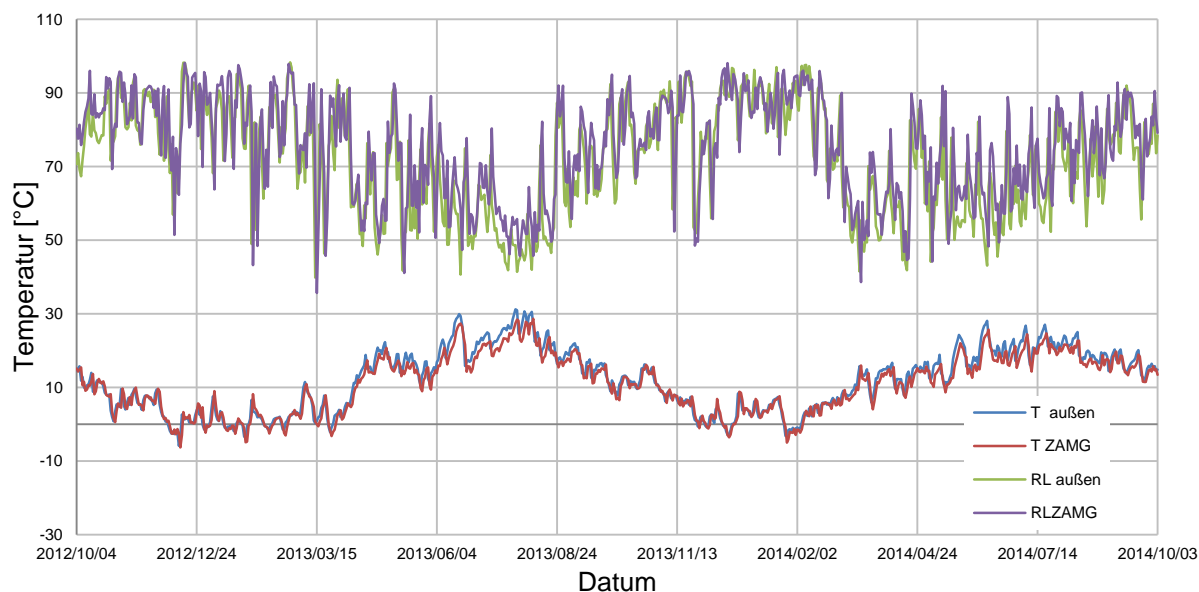


Abbildung 8.2: Vergleich gemessenes Klima Forschungswohnung und Klima ZAMG

8-2 ALLE MESSSTELLEN

Die Ganglinien der instationären Modellierung bilden folgendes bauphysikalisches Verhalten ab. Es zeigt sich, dass die Temperaturen (siehe Abbildung 8.3 und Abbildung 8.5) in den einzelnen Messpunkten etwas anders verlaufen, als bisher bei der stationären Modellierung oder an den Verläufen der Messdaten beobachtet wurde. Es ist auffällig, dass die Temperatur an der Außenseite der äußeren Wärmedämmung, in ihrer Tendenz, über den ganzen Simulationszeitraum nahezu parallel zum Temperaturverlauf der Außenluft verläuft. Diese Beobachtung lässt sich aufgrund der eingegebenen klimatischen Randbedingungen (siehe Kapitel 8-1.1) nur anhand der eingegebenen Wärmestrahlungsdaten erklären, welche dazu führen, dass es zu einer zusätzlichen Erwärmung des Wandaufbaues aufgrund der solaren Einwirkung kommt. Dies führt dazu, dass sich die Bauteilschichten insgesamt auch stärker erwärmen. Die Ganglinien weisen im Sommer 2013 maximale Temperaturen an der Außenseite der äußeren Wärmedämmung von ca. 38,5 °C auf, was zu einer Temperatur von 35 °C in den Messstellen im Brettsperrholz und in der Vorsatzschale führt. Demnach ist im Sommer die typisch gleichmäßige Dämpfung durch alle Materialschichten und eine Annäherung an eine gemeinsame Bauteilschichtentemperatur nicht gegeben, da sich ein Temperaturgefälle von außen nach innen ergibt. In den Wintermonaten entspricht das Verhalten dem Gefälle der Temperatur, welches von innen nach außen gerichtet ist und die Dämpfung stellt sich nach der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlichen Materialien ein.

Durch das beschriebene thermische Verhalten durch die einzelnen Schichten hindurch ergibt sich auch ein etwas anderer Verlauf der relativen Luftfeuchte (siehe Abbildung 8.4 und Abbildung 8.6). Es ist zu erkennen, dass eine niedrigere Innenlufttemperatur im Vergleich zur Temperatur in der Vorsatzschale während der Wintermonate eine höhere relative Luftfeuchte in der Vorsatzschale bedingt, wobei es sich im Sommer genau umgekehrt verhält. Dort ist die relative Luftfeuchte in der Vorsatzschale niedriger, was an dem umgekehrten Temperaturgefälle

liegt. Im Brettsperrholz ist wieder das typische hygrische Verhalten zu erkennen, bei welchem die relative Luftfeuchte in der innenliegenden Brettlage während der Wintermonate höher ist als in den weiter außen liegenden Brettlagen. Im Sommer kommt es zu einer Annäherung der Ganglinien, wobei die Ganglinie der relativen Luftfeuchte in der fünften Brettlage stets unter den Ganglinien der ersten und der dritten Brettlage liegt. In den äußeren Messstellen ist das hygrische Verhalten von den parallel verlaufenden Temperaturlinien der Außenlufttemperatur und der Temperatur an der Außenseite der äußeren Dämmung geprägt. Es zeigt sich, dass die relative Luftfeuchte an der Außenseite der äußeren Dämmung stets kleiner ist als derjenigen der Außenluft und es zu keiner Berührung der beiden Ganglinien kommt. Dennoch ist der stark dämpfende Effekt aufgrund des stetigen Temperaturunterschiedes dauerhaft zu erkennen. An der Innenseite der äußeren Wärmedämmung ist in Bezug auf die Außenseite der äußeren Wärmedämmung nochmals eine Dämpfung während der Wintermonate zu erkennen, was an der Temperaturdifferenz der beiden Schichtgrenzen während dieser Zeit liegt. Im Sommer hingegen herrschen hier nahezu gleiche Temperaturen, was auch zu einem Übereinanderliegen der beiden Ganglinien führt.

Die einzelnen Ganglinien entsprechend den Kategorien „Messstellen außen“, „Messstellen BSP“ und „Messstellen innen“ sind erneut ergänzend im ANHANG C zu finden, da sie für ein besseres Verständnis der Modellierung keine zusätzlichen Auskünfte liefern.

8-2.1 FICHTE

8-2.1.1 Temperatur

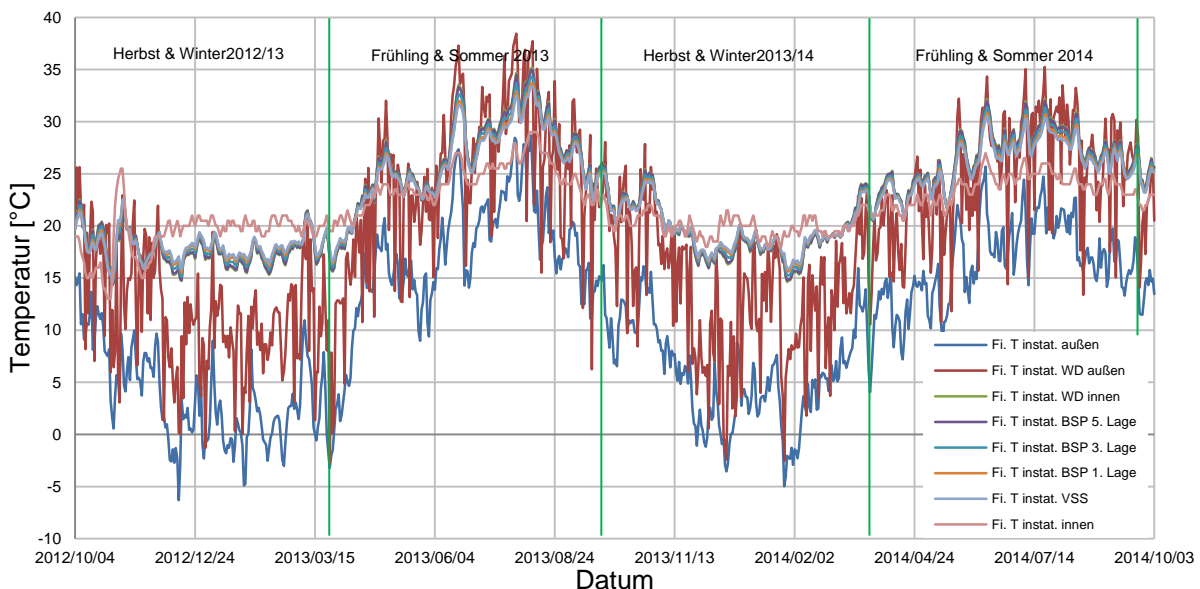


Abbildung 8.3: Temperatur instationär Fichte gesamt

8-2.1.2 relative Luftfeuchte

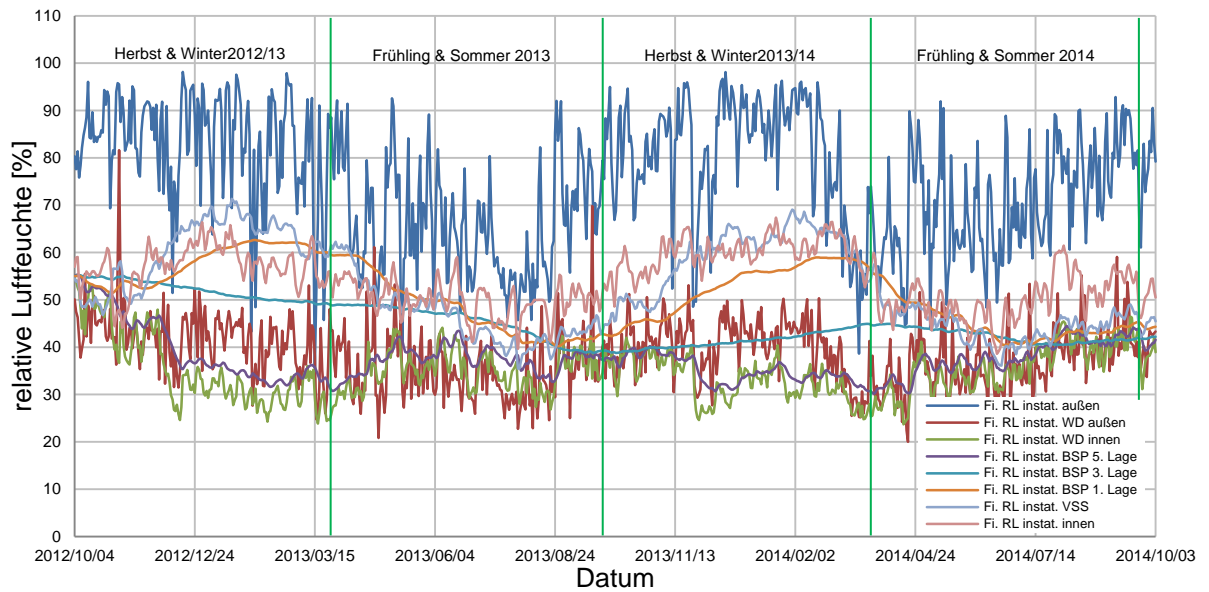


Abbildung 8.4: relative Luftfeuchte instationär Fichte gesamt

8-2.2 BIRKE

8-2.2.1 Temperatur

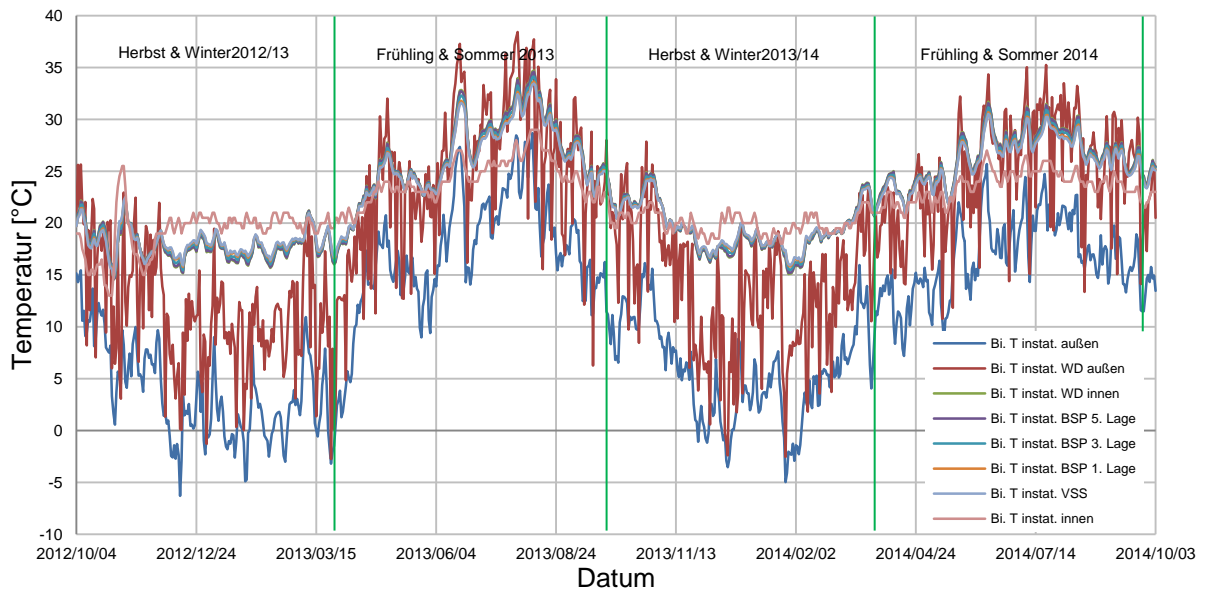


Abbildung 8.5: Temperatur instationär Birke gesamt

8-2.2.2 relative Luftfeuchte

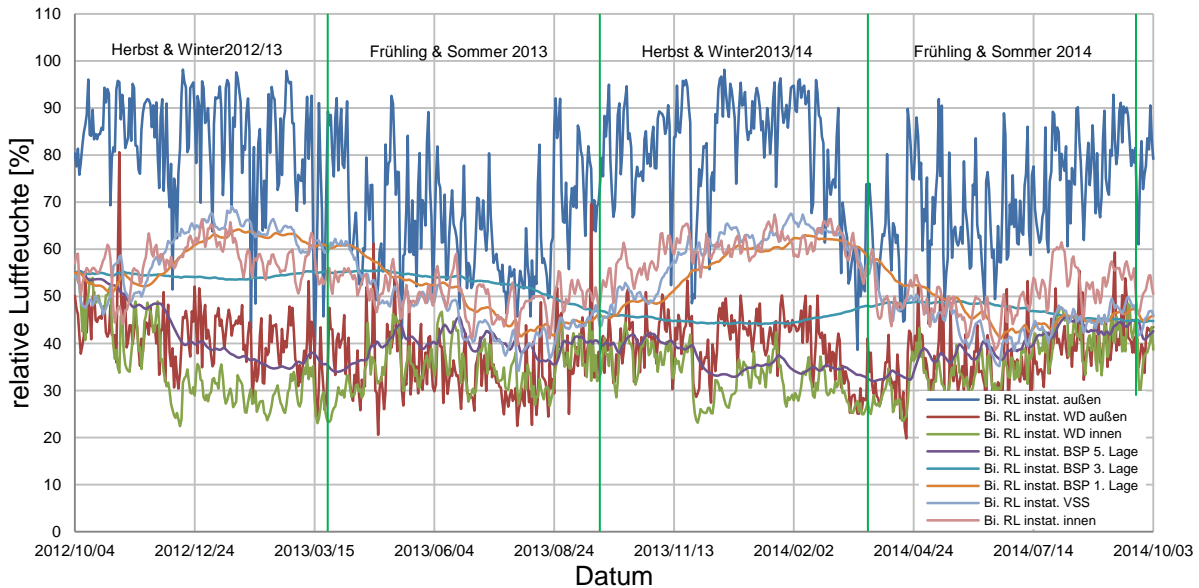


Abbildung 8.6: relative Luftfeuchte instationär Birke gesamt

8-3 HOLZFEUCHTE

Die Ganglinien der Holzfeuchte (siehe Abbildung 8.7 und Abbildung 8.8) ergeben sich anhand des Feuchte-Massenintegrals, welches eine Ausgabeoption der Delphin-Software ist. Das Feuchte-Massenintegral gibt den gesamten Feuchtegehalt innerhalb eines Volumenelementes in Kilogramm an. Mit Hilfe der Masse des darrtrockenen Holzes und der Dicke des Volumenelementes kann so die Holzfeuchte in der Messstelle berechnet werden.

$$u = \frac{m_m}{\rho_0 * d} * 100 \quad (8.1)$$

u – Holzfeuchtegehalt [%]

m_m – Masse der Feuchte des Feuchte-Massenintegrals [kg]

ρ_0 – Dichte des darrtrockenen Holzes [kg]

d – Dicke des Volumenelementes [m]

$\rho_{\text{Fichte}} = 410 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ aus (Fellner, et al., 2006)

$\rho_{\text{Birke}} = 640 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ aus (Fellner, et al., 2006)

Tabelle 8.1 beinhaltet die minimalen und maximalen Werte der Holzfeuchte. Die maximale Tagesdifferenz der beiden Hölzer in den drei Brettlagen liegt zwischen 1,4 % und 1,6 %. Es ist festzuhalten, dass die Holzfeuchte im Fichtenholz stets größer ist als die Holzfeuchte im Birkenholz, was dem charakteristischen hygroskopischen Verhalten entspricht. Nur in der äußeren Brettlage werden zum Teil auch niedrigere Holzfeuchten im Fichtenholz simuliert. Die

Ganglinien starten von einer gemeinsamen Holzfeuchte aus, welche im Fichten-BSP bei etwa 9,2 % und im Birken-BSP bei etwa 7,9 % liegt. Die Ganglinien driften während der kälteren Wintermonate auseinander, wobei die größten Werte der Holzfeuchte während dieser Zeit in der innenliegenden Brettlage zu finden sind. Dort werden im Fichtenholz knapp 11 % erreicht, wobei im Birkenholz die Obergrenze bei ca. 9,7 % liegt. Die Holzfeuchte nimmt dann nach außen hin ab und bewegt sich in der äußeren Brettlage tendenziell im Bereich von etwa 6 %. In den warmen Sommermonaten kommt es zu einer Annäherung der drei simulierten Holzfeuchten, wobei die Holzfeuchte im gesamten Querschnitt ihre Minimalwerte erreicht. Es zeigt sich besonders im Sommer 2013, dass die im Zentrum des Brettsperrholzes liegende Brettlage länger die Feuchte hält und somit über einen kurzen Zeitraum die größte Holzfeuchte in den drei Messstellen aufzeigt. Dies ist besonders im Birkenholz gut zu erkennen. Generell ist festzustellen, dass die Holzfeuchte in der äußeren Brettlage in beiden Holzarten stets am geringsten ist.

8-3.1 FICHTE

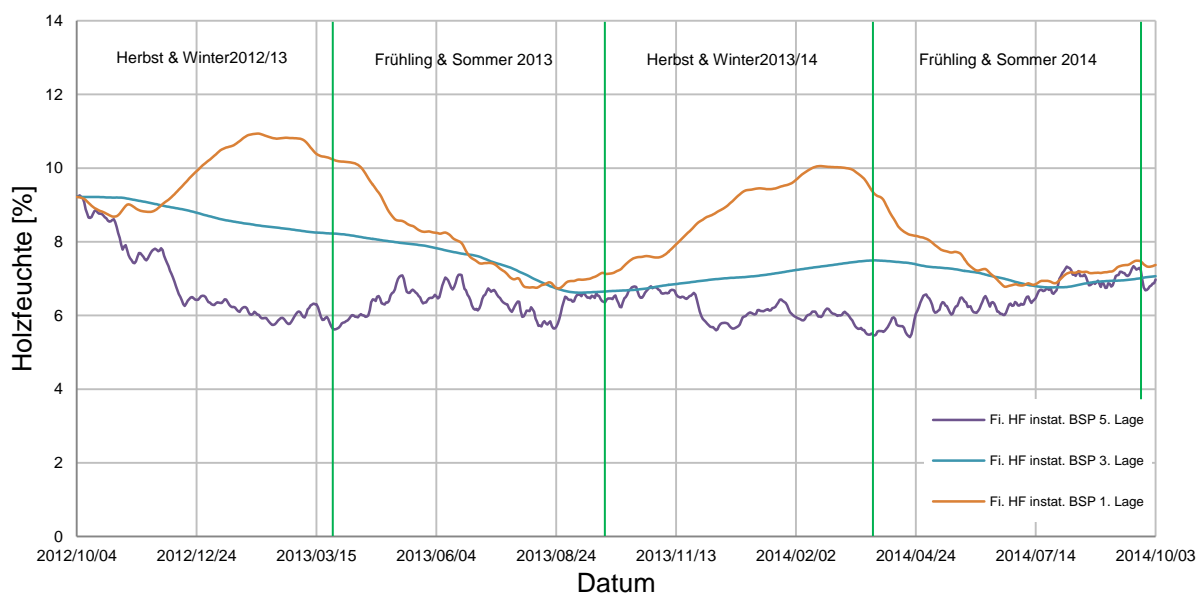


Abbildung 8.7: Holzfeuchte instationär Fichte

8-3.2 BIRKE

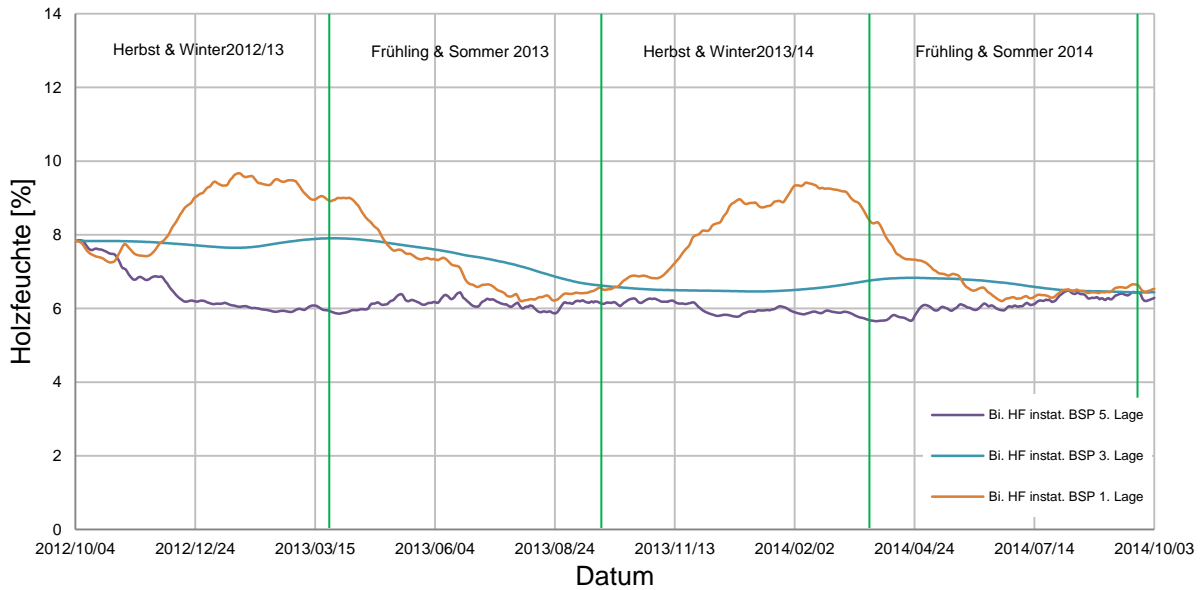


Abbildung 8.8: Holzfeuchte instationär Birke

Tabelle 8.1: minimale/maximale Messwerte und maximale Differenz der instationären Holzfeuchte im BSP

Messpunkt		Fichte		Birke		Fi./Bi.
		min	max	min	max	max Tages- Δ
BSP 5. Lage	HF [%]	5,41	9,26	5,65	7,85	1,41
BSP 3. Lage	HF [%]	6,62	9,22	6,44	7,90	1,39
BSP 1. Lage	HF [%]	6,73	10,94	6,20	9,67	1,58

KAPITEL 9: VERGLEICHSFÜHRUNG

9-1 EINLEITUNG

Die Vergleichsführung beschäftigt sich mit der Gegenüberstellung und Diskussion der in Kapitel 5, Kapitel 6, Kapitel 7 und Kapitel 8 gemessenen und simulierten Verläufe von Temperatur, relativer Luftfeuchte und der daraus resultierenden Holzfeuchte. Es werden hier die Ganglinien aus den Messdaten (blaue Ganglinien), der stationären (rote Ganglinien) und instationären (grüne Ganglinien) Modellierung für jede Messstelle einzeln gezeigt und auf die sich ergebenden Unterschiede eingegangen.

9-2 MESSSTELLE WÄRMEDÄMMUNG AUßEN

An der Außenseite der äußeren Wärmedämmung werden folgende thermische Unterschiede deutlich (siehe Abbildung 9.1 und Abbildung 9.3). Die Ganglinie der stationären Modellierung ist von der hohen Wärmeleitfähigkeit des Unter- und Oberputzes geprägt, sodass sie theoretisch mit der Außenlufttemperatur gleichzusetzen ist (vgl. Kapitel 7-3). Dadurch ergibt sich eine Temperaturdifferenz im Winter zum vor Ort gemessenen Temperaturverlauf von bis zu 10 °C. In den Sommermonaten verringert sich diese Differenz, da dann gleiche Temperaturen über den Querschnitt gemessen werden, und da die stationären Klimadaten auf den gemessenen Außen- und Innenklimadaten beruhen, werden hier gleiche Temperaturen angezeigt. Der instationäre Temperaturverlauf ist von den eingegebenen Wärmestrahlungsdaten geprägt (vgl. Kapitel 8-2) und verläuft tendenziell entlang der in der Forschungswohnung gemessenen Temperatur. Dabei streuen die Werte jedoch um den gemessenen Verlauf herum, was die solaren Gewinne bzw. Verluste je nach Sonnenscheindauer zeigt. Generell werden dadurch in den Sommermonaten meist größere Temperaturen im Vergleich zu den gemessenen Werten erzielt. Die Differenz kann bis zu ca. 8 °C erreichen. In den Wintermonaten sind auch solare Gewinne zu verzeichnen, dennoch liegt die Temperatur auch oft unterhalb der gemessenen Werte, was mit Differenzen zum gemessenen Temperaturverlauf von bis zu ca. 9 °C einhergeht. Insgesamt erscheint die instationäre Modellbildung jedoch besser den gemessenen Verlauf über den Betrachtungszeitraum zu erfassen, wobei eine größere thermische Belastung festzustellen ist. Die stationär modellierte relative Luftfeuchte, welche in besonderem Zusammenhang mit der modellierten Temperatur steht (vgl. Kapitel 7-3), gibt auch hier sehr stark die relative Luftfeuchte der Außenluft wider. Demnach ist der Unterschied zu dem gemessenen Verlauf der relativen Luftfeuchte nicht allzu verwunderlich (siehe Abbildung 9.2 und Abbildung 9.4). Es ergeben sich erhebliche Unterschiede an den kältesten Tagen des Modellierungszeitraumes, wobei im Sommer wieder eine Annäherung an die gemessene Temperatur zu verzeichnen ist. Tendenziell ist die stationäre relative Luftfeuchte stets höher als jene der gemessenen. Bei dem instationären Verlauf ist genau das Gegenteil der Fall, nämlich, dass die Ganglinie stets unterhalb der gemessenen relativen Luftfeuchte verläuft. Zudem erscheint es, dass die beiden Verläufe eher parallel zueinander verschoben sind, da die Differenzen zueinander nicht besonders zu- oder abnehmen. Dies ist zunächst anhand der generell höher liegenden Temperaturen der instationären Simulation zu erklären, kann aber wohl auch auf einen geringeren simulierten Wasserdampfeintrag von außen her begründet werden. Durch einen geringeren Wasserdampfeintrag entstehen hier niedrigere relative Luftfeuchten, was für die folgenden Schichten ein größeres Gefälle der relativen Luftfeuchte bedeutet. Dieses größere Gefälle beeinflusst den Verlauf der relativen Luftfeuchte in den anschließenden Messstellen.

Generell sind an dieser Messstelle keine Unterschiede im stationären und instationären Modell zwischen Fichten-BSP- und Birken-BSP-Wandaufbau zu registrieren, sowohl was die Temperatur als auch die relative Luftfeuchte betrifft. Die Unterschiede vor Ort sind in Kapitel 5-7.1 beschrieben.

9-2.1 FICHTE

9-2.1.1 Temperatur

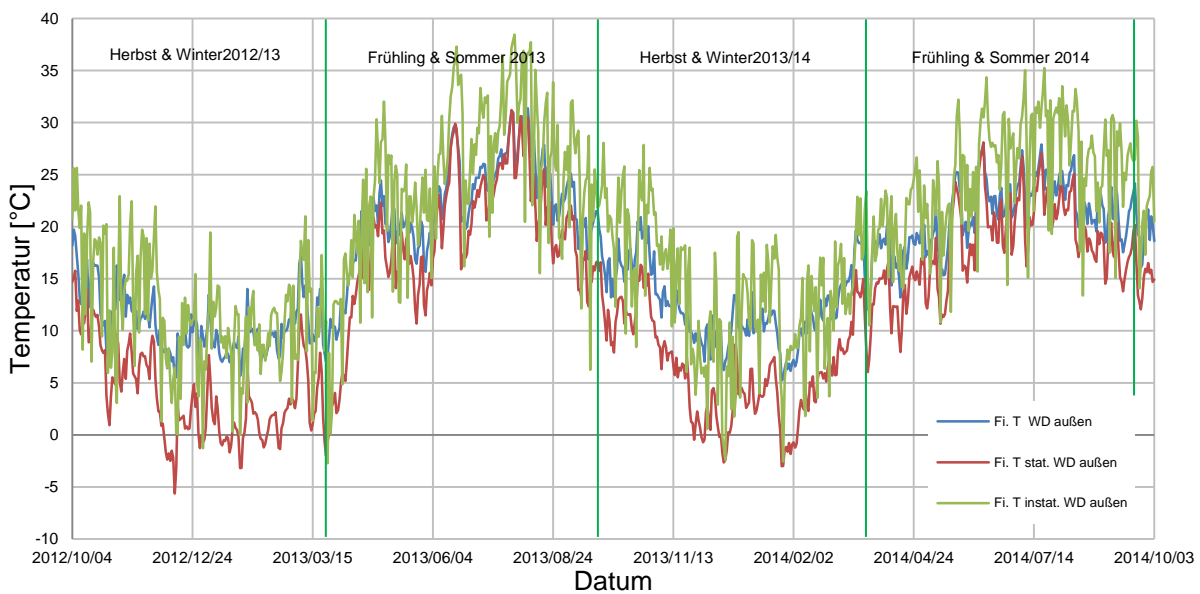


Abbildung 9.1: Vergleich Temperatur Fichte Wärmedämmung außen

9-2.1.2 relative Luftfeuchte

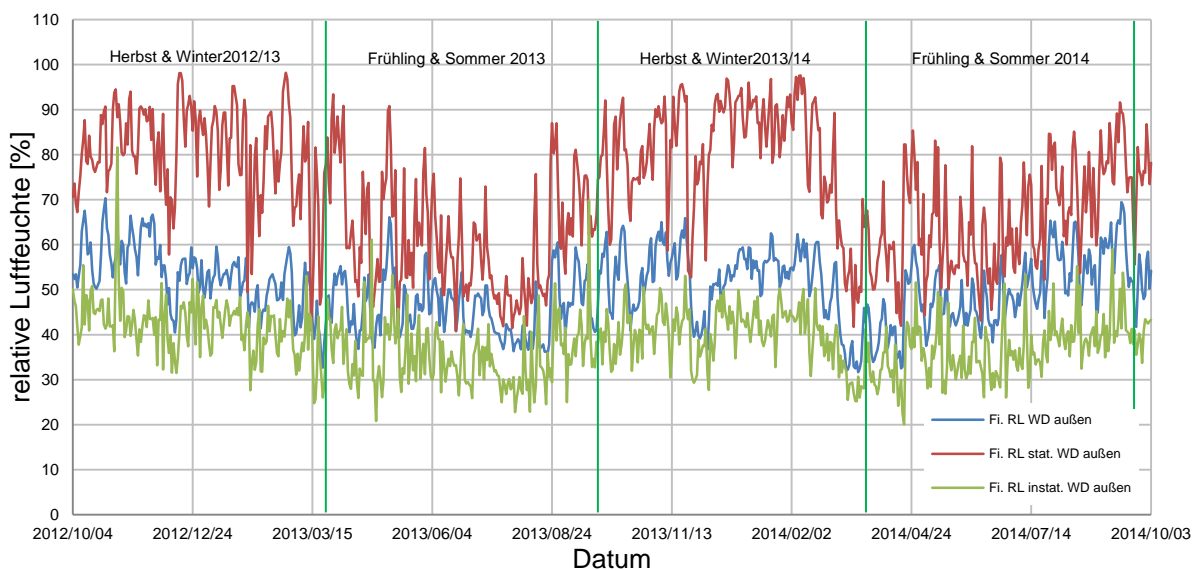


Abbildung 9.2: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte Wärmedämmung außen

9-2.2 BIRKE

9-2.2.1 Temperatur

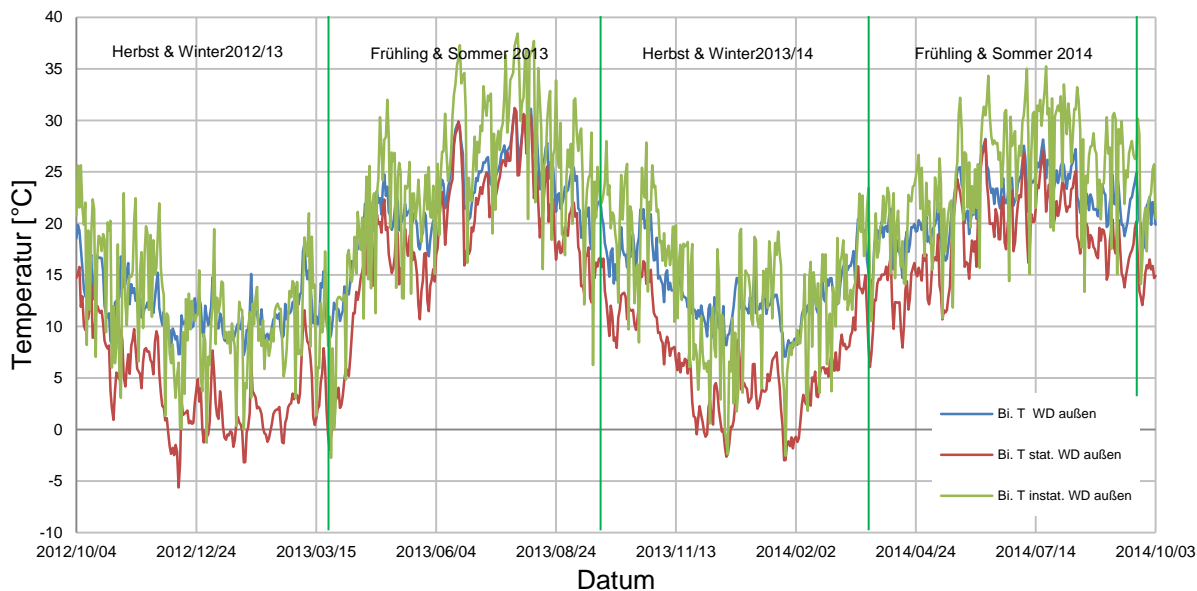


Abbildung 9.3: Vergleich Temperatur Birke Wärmedämmung außen

9-2.2.2 relative Luftfeuchte

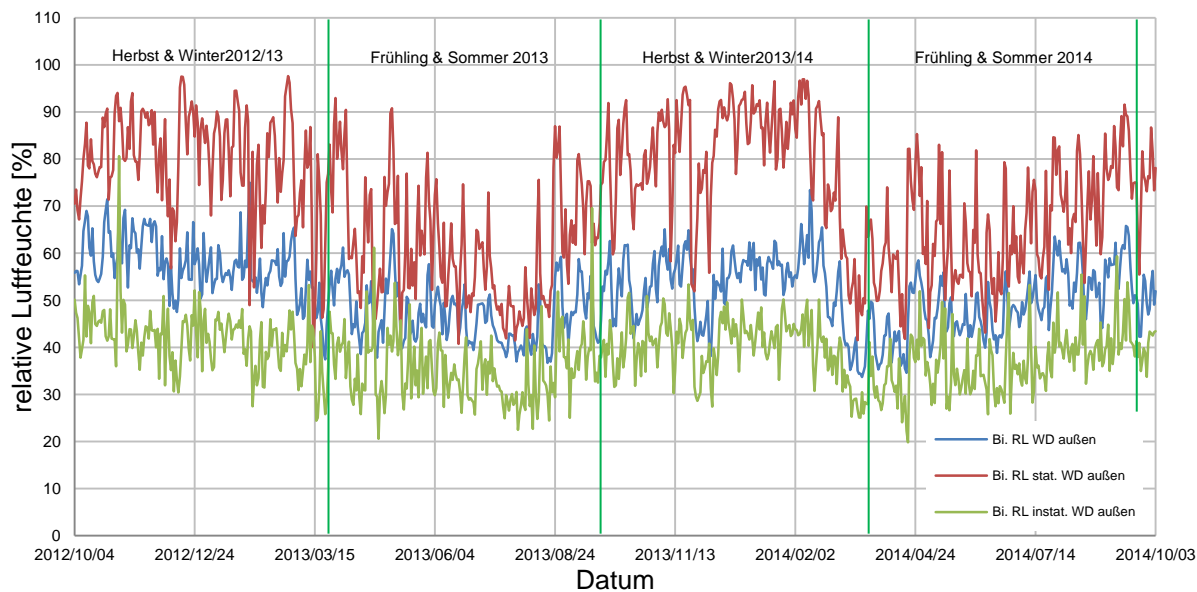


Abbildung 9.4: Vergleich relative Luftfeuchte Birke Wärmedämmung außen

9-3 MESSSTELLE WÄRMEDÄMMUNG INNEN

An der Innenseite der äußeren Wärmedämmung sind die Temperaturen (siehe Abbildung 9.5 und Abbildung 9.7) bereits nicht mehr durch größere Streuungen charakterisiert. Die Temperaturganglinie der stationären Berechnung haben sich aufgrund der dämpfenden Wirkung der Wärmedämmung bereits deutlich dem Verlauf der vor Ort gemessenen Temperatur angenähert. Im Sommer entsprechen sie in der Regel dem gemessenen Temperaturverlauf, wobei an den kälteren Tagen noch Differenzen bis zu ca. 4 °C registriert werden. Der instationäre Temperaturverlauf verhält sich dahingegen genau umgekehrt. Hier ist die Differenz zur gemessenen Temperatur im Sommer zu beobachten, welche sich bereits an der Außenseite der äußeren Wärmedämmung gezeigt hat und im Winter schmiegen sich die Ganglinien einander an. Dadurch, dass sich die Temperatur der stationären Simulation der gemessenen Temperatur vor Ort angeglichen hat, tritt auch der Unterschied zwischen stationärer relativer Luftfeuchte und vor Ort gemessener relativer Luftfeuchte nicht mehr so stark auf (siehe Abbildung 9.6 und Abbildung 9.8). Es zeigt sich dennoch, dass größere Amplitudenschwankungen während des Verlaufes auftreten, was mit dem zeitlich konstanten Wärme- und Wasserdampfstrom zusammenhängt. Bei der instationären Simulation setzt sich der Trend aus der vorherigen Messstelle fort. Der Verlauf weist die parallel verschobene Position zum vor Ort gemessenen Verlauf der relativen Luftfeuchte auf, was auf das größere Gefälle der relativen Luftfeuchte im Bauteil insgesamt hinweist. Die Differenz liegt hier bei rund 10 % im Fichten-BSP-Wandaufbau, wohingegen im Birken-BSP-Wandaufbau die Differenzen bis zu ca. 17 % betragen können. Zudem zeigt sich im Birken-BSP-Wandaufbau auch eine Schwankung im Verlauf, was auf größere Temperaturdifferenzen im Vergleich zum Fichten-BSP-Wandaufbau zurückzuführen ist.

9-3.1 FICHTE

9-3.1.1 Temperatur

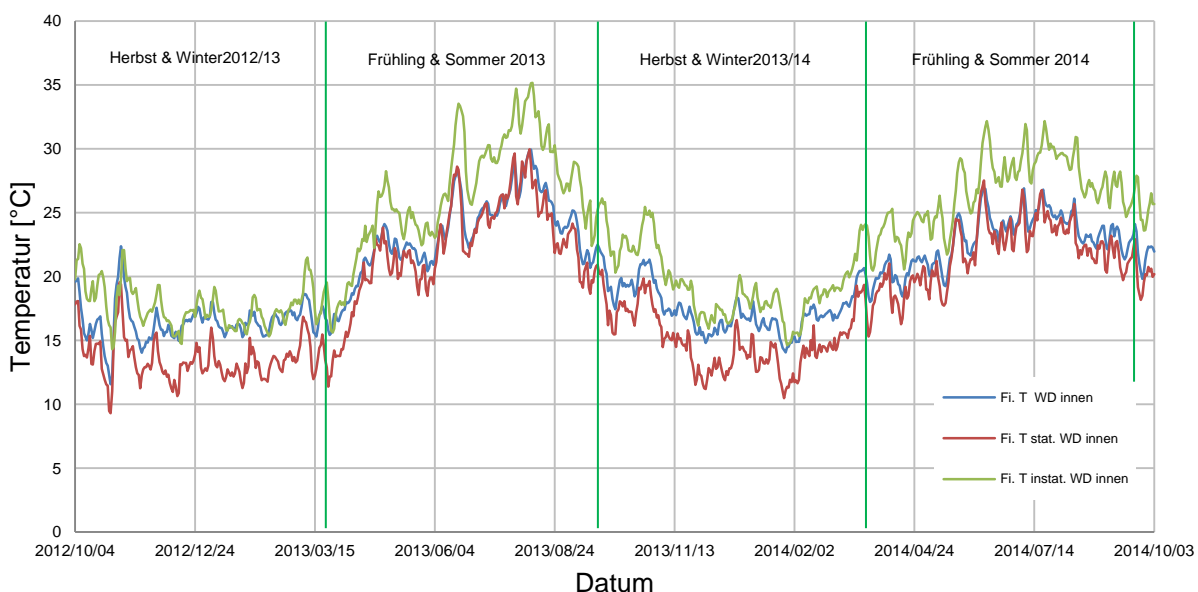


Abbildung 9.5: Vergleich Temperatur Fichte Wärmedämmung innen

9-3.1.2 relative Luftfeuchte

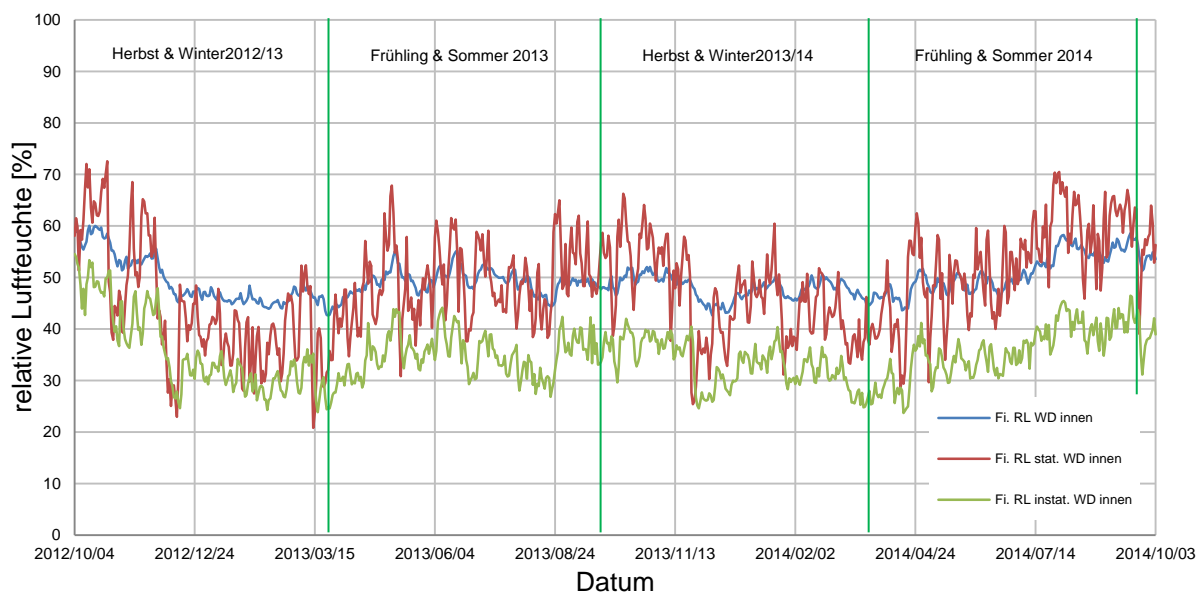


Abbildung 9.6: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte Wärmedämmung innen

9-3.2 BIRKE

9-3.2.1 Temperatur

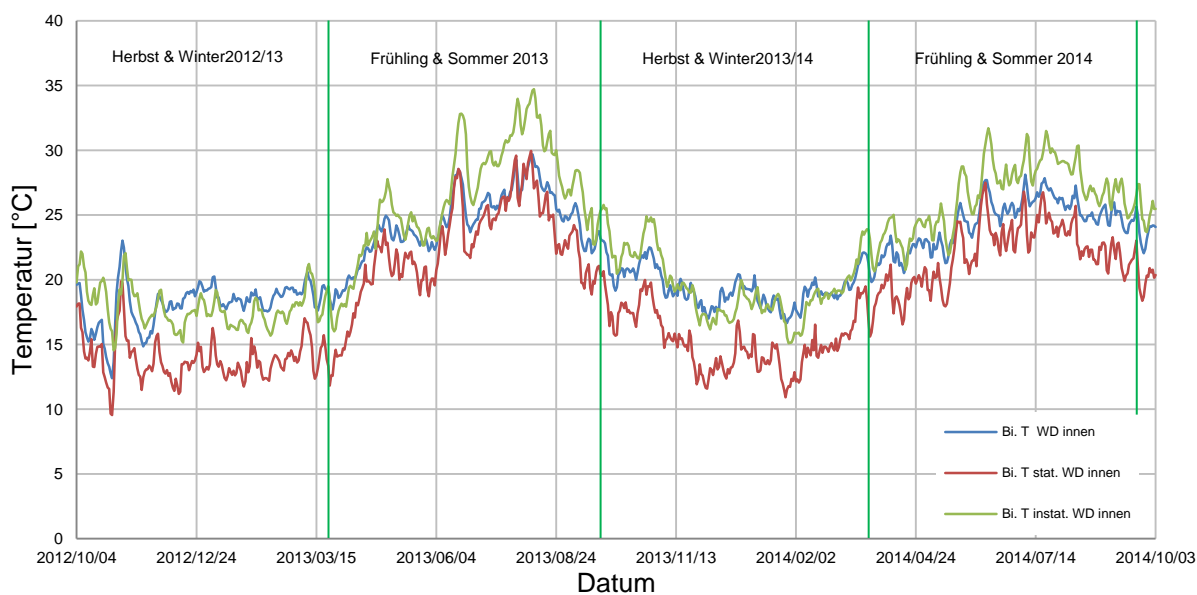


Abbildung 9.7: Vergleich Temperatur Birke Wärmedämmung innen

9-3.2.2 relative Luftfeuchte

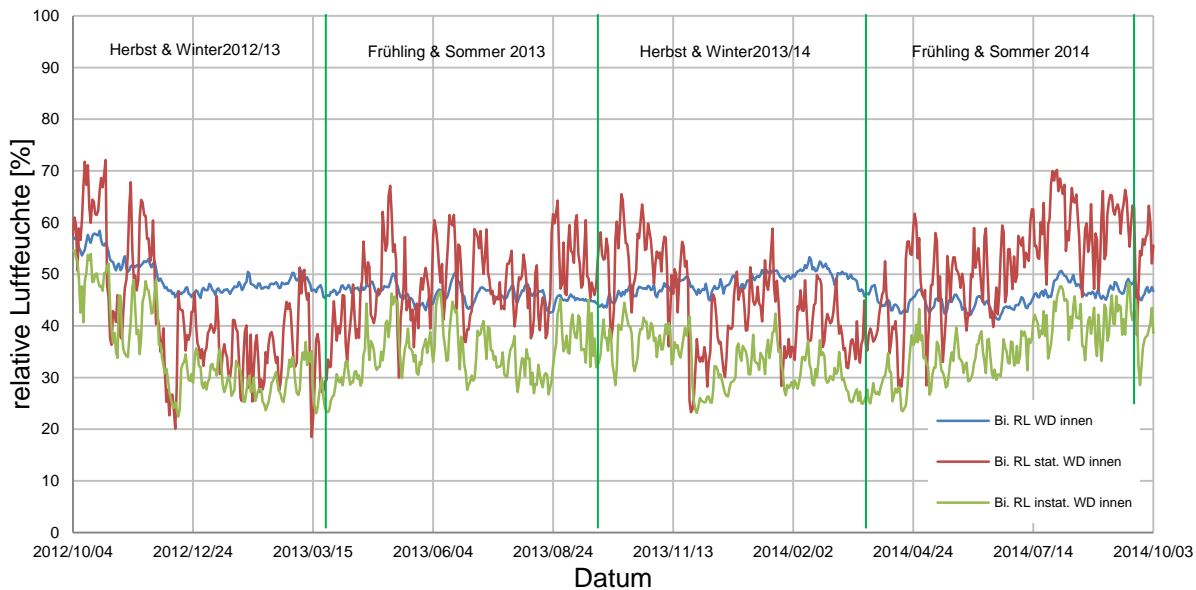


Abbildung 9.8: Vergleich relative Luftfeuchte Birke Wärmedämmung innen

9-4 MESSSTELLE BSP 5. LAGE

Das Temperaturverhalten der drei Ganglinien (siehe Abbildung 9.10 und Abbildung 9.12) entspricht nahezu dem der Messstelle „Wärmedämmung innen“. Die Temperatur, welche in der Forschungswohnung gemessen wurde ist im Vergleich zur Temperatur an der Innenseite der Wärmedämmung während der Wintermonate um etwa 1 °C höher. Der stationäre Temperaturverlauf wird dadurch ebenfalls während dieser Zeit angehoben. Die instationäre Simulation folgt wieder dem Trend, dass sie im Fichten-BSP-Wandaufbau im Sommer über der vor Ort gemessenen Temperatur liegt, wobei im Winter annähernd gleiche Temperaturen simuliert wurden. Im Birken-BSP-Wandaufbau liegen die Temperaturen auch öfter unter den vor Ort gemessenen Temperaturen während der kalten Tage im Winter.

Die relative Luftfeuchte (siehe Abbildung 9.11 und Abbildung 9.13) der vor Ort gemessenen Wandaufbauten weist im Fichtenholz etwas höhere Werte als im Birkenholz auf. Aufgrund der größeren Wärmeleitfähigkeit des Birkenholzes herrschen hier tendenziell etwas höhere Temperaturen, wodurch die relative Luftfeuchte niedriger ausfällt. Zudem transportiert das Fichtenholz aufgrund der kleineren Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl auch mehr Wasserdampf durch das Holz hindurch. Prinzipiell kann der Verlauf des vorhandenen Wasserdampfdruckgefälles entlang einer Geraden, welche über der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschicht aufgetragen ist, erklärt werden (ÖNORM B 8110-2, 2003). Dieses Prinzip ist in Abbildung 9.9 an den beiden vorhandenen Wandquerschnitten für einen allgemeinen Fall dargestellt. Es ergeben sich generell größere Wasserdampfdrücke in der ersten und dritten Birkenbrettsperrholzschiicht im Vergleich zum Fichten-BSP, und in der fünften Brettlage entsprechen sich die Wasserdampfdrücke in etwa. Demzufolge ergeben sich nahezu identische stationäre Verläufe der relativen Luftfeuchte, wobei diese aufgrund der Temperaturabhängigkeit eher schwankend verlaufen und nicht den stetigen Verlauf der

gemessenen relativen Luftfeuchte vor Ort aufzeigen. Das instationäre Modell liefert wieder parallel zum vor Ort gemessenen relativen Luftfeuchteverlauf verschobene Ganglinien, wobei das Fichtenholz hier noch niedrigere Werte im Vergleich zum Birkenholz aufweist. Dies hängt wohl mit dem gekoppelten Rechenmodell zusammen. Es zeigen sich hier in Bezug auf die vor Ort gemessene Ganglinie maximale Differenzen im Fichtenholz von knapp 20 % und im Birkenholz von knapp 17 %.

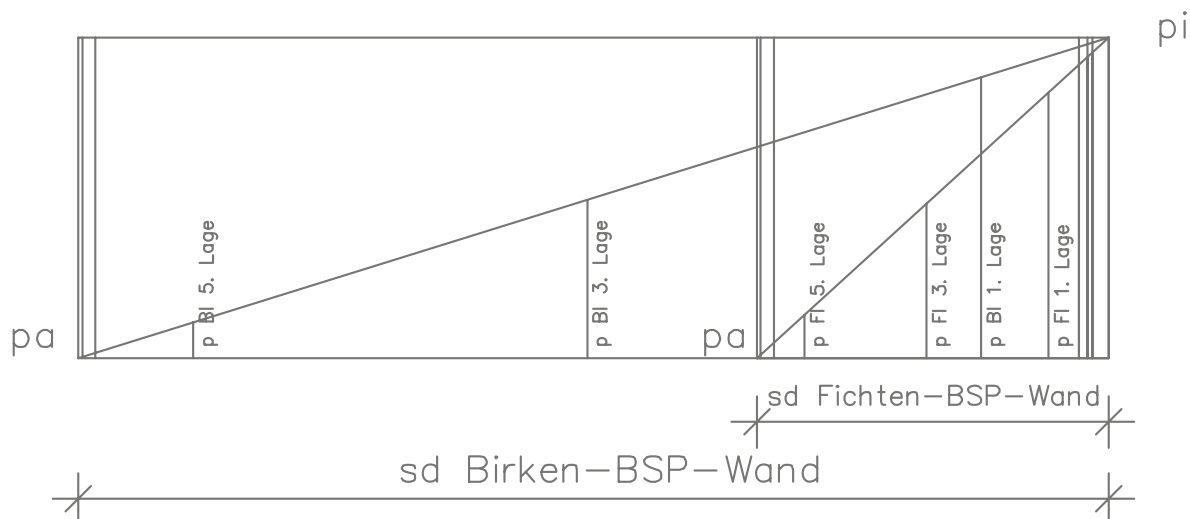


Abbildung 9.9: Prinzip der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschicht

9-4.1 FICHTE

9-4.1.1 Temperatur

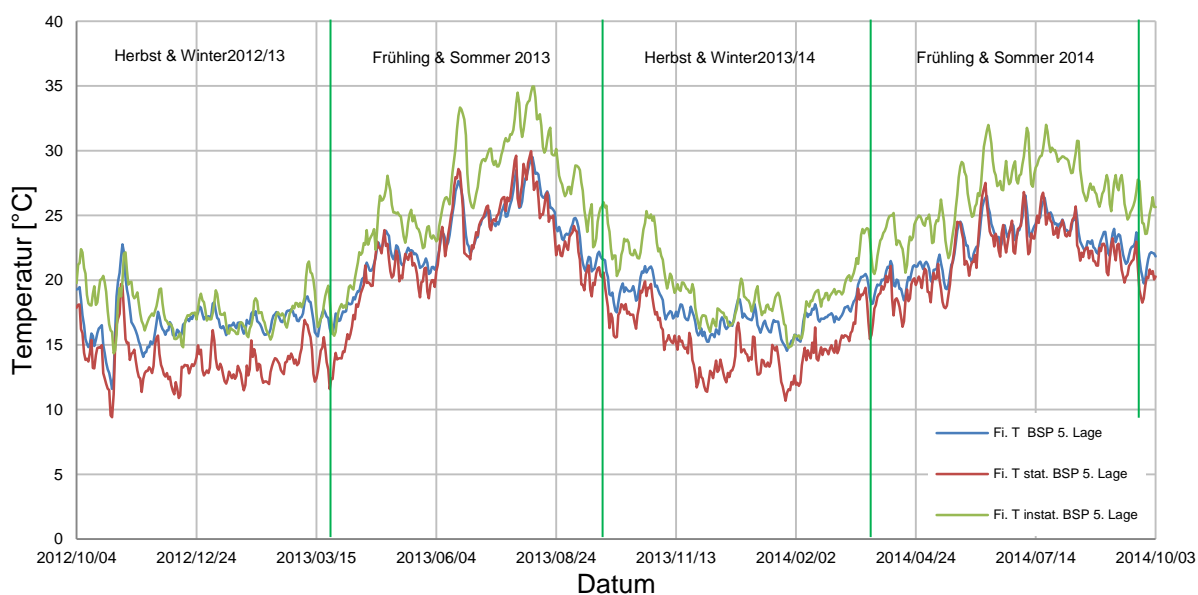


Abbildung 9.10: Vergleich Temperatur Fichte BSP 5. Lage

9-4.1.2 relative Luftfeuchte

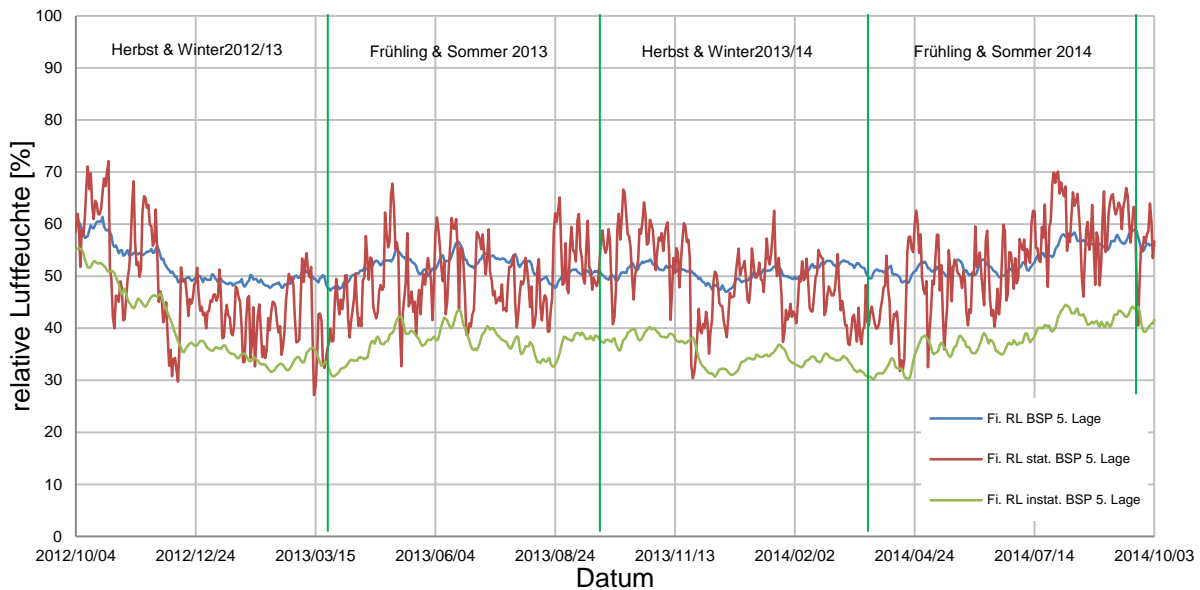


Abbildung 9.11: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte BSP 5. Lage

9-4.2 BIRKE

9-4.2.1 Temperatur

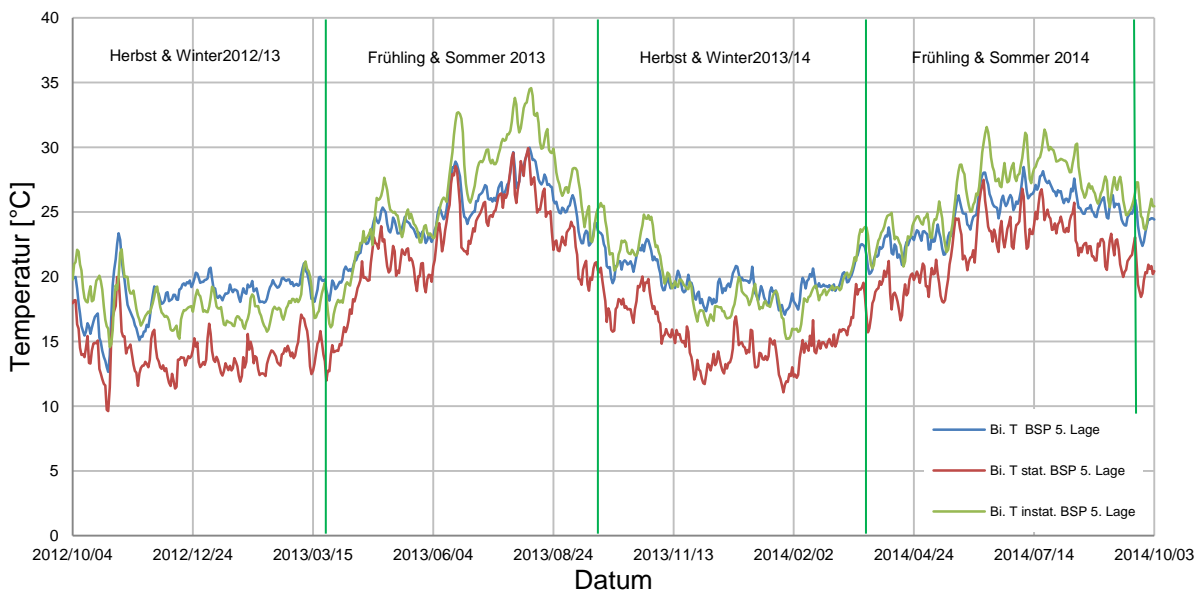


Abbildung 9.12: Vergleich Temperatur Birke BSP 5. Lage

9-4.2.2 relative Luftfeuchte

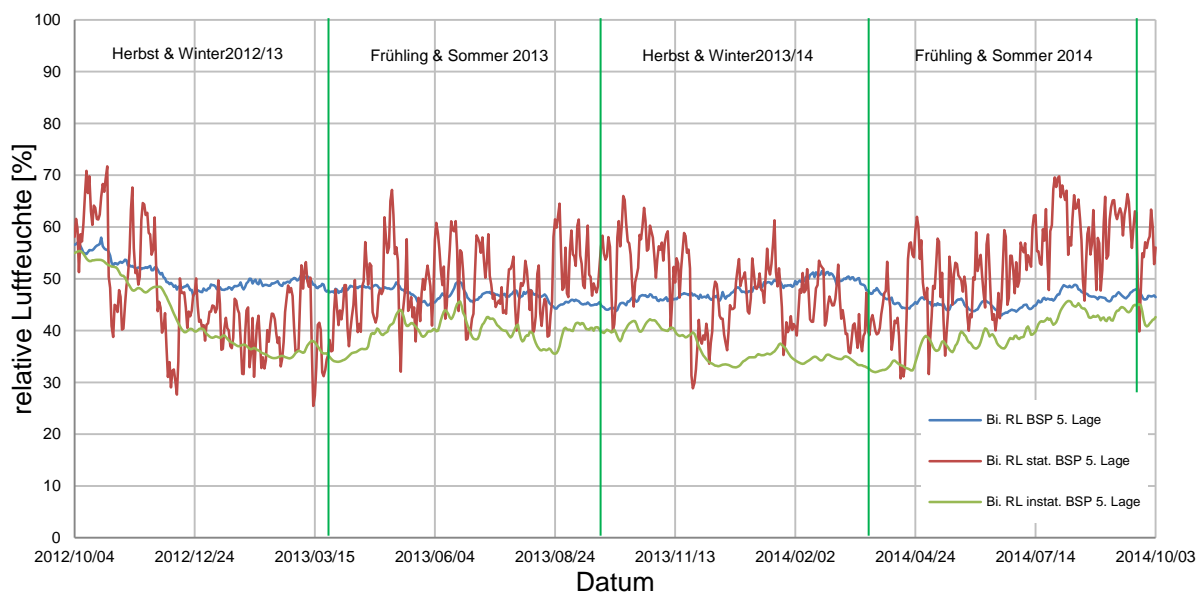


Abbildung 9.13: Vergleich relative Luftfeuchte Birke BSP 5. Lage

9-5 MESSSTELLE BSP 3. LAGE

Die Temperaturganglinien (siehe Abbildung 9.14 und Abbildung 9.18) im Zentrum des Brettsperrholzelementes folgen dem Temperaturverlauf aus der fünften Brettlage. Wie in den Kapiteln 5-2, 7-3 und 8-2 bereits erkannt wurde, sind innerhalb des Holzquerschnittes keine besonderen Temperatursprünge festgestellt worden. Der größte Dämpfungseffekt ergab sich hier im Winter, wobei der Unterschied zwischen äußerer und innerer Brettlage maximal 3 °C betrug. Dadurch, dass das stationäre Modell sehr stark von dem bereits dämmenden Effekt der innenliegenden Wärmedämmung geprägt ist, ergibt sich auch hier eine niedrigere Temperatur im Winter im Vergleich zu den vor Ort gemessenen Temperaturen. Die instationäre Temperatur liegt im Sommer wieder deutlich über den gemessenen Temperaturen bei ca. 34 °C, wobei im Winter eine Annäherung im Fichtenholz und im Birkenholz zu beobachten ist. Teilweise tritt auch eine niedrigere Temperatur, als vor Ort gemessen, auf. Inwieweit die instationär simulierten Temperaturen mit den vor Ort gemessenen Temperaturen übereinstimmen, ist in Abbildung 9.15 für das Fichtenholz dargestellt und in Abbildung 9.16 für das Birkenholz dargestellt. Es zeigt sich, dass der instationären Modellierung im Temperaturbereich von 20 bis 35 °C meist niedrigere gemessene Temperaturen gegenüberstehen.

Die vor Ort gemessene relative Luftfeuchte (siehe Abbildung 9.17 und Abbildung 9.19) schwankt im Fichtenholz zwischen ca. 50 % und 65 % und im Birkenholz zwischen ca. 47 % und 57 %. Die stationär berechnete relative Luftfeuchte folgt dieser Schwankung, obwohl im Sommer 2014 ein zeitlicher Versatz zu beobachten ist, was mit der direkten mathematischen Koppelung der relativen Luftfeuchte an das Innenraumklima zusammenhängt, welche länger andauernde Wasserdampftransportprozesse nicht mitberücksichtigt. Die Ganglinie des Fichtenholzes sollte nach dem Prinzip der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschicht (siehe Abbildung 9.9) etwas geringere Werte aufzeigen, was an Spitzenwerten wie am

25.11.2013 zu erkennen ist. Das instationäre Modell ergibt zunächst vom Simulationsbeginn weg eine abfallende relative Luftfeuchte, dessen Verlauf im Fichtenholz Anfang September 2013 eine schwingende Form aufnimmt. Im Birkenholz fällt die relative Luftfeuchte sogar bis Mitte Dezember 2013 ab bevor sie dann zum ersten Mal ansteigt. Dennoch wird hier eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen relativen Luftfeuchte vor Ort bis Anfang September erzielt. Die Ganglinien entwickeln sich dann etwas gegenläufig, bevor es im Sommer 2014 wieder zu einer Annäherung und Überlagerung kommt. Generell liegen die Werte der relativen Luftfeuchte im Fichtenholz bei der instationären Modellierung dauerhaft unter den Werten des Birkenholzes, was dem Wasserdampfdruckgefälle und den sich daraus ergebenden Amplituden (siehe Abbildung 9.9) entspricht. Im Fichtenholz ergeben sich Differenzen von bis zu 20 % relativer Luftfeuchte im Vergleich zu der vor Ort gemessenen relativen Luftfeuchte. Dieser große Unterschied wirft die Frage nach den im Programm hinterlegten Materialparametern auf. Im Gegenzug stellt sich die Frage, inwieweit das eingebaute Material vor Ort den recherchierten Angaben (vgl. Kapitel 7-2) entspricht. Es sei hier vor allem auf die mögliche Dichtestreuung der Hölzer aufmerksam gemacht, welche wiederum einen großen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit und das Sorptionsverhalten und somit auch auf die Wasserdampfdiffusion hat (siehe Kapitel 3-3.2). Zudem müsste ebenso abgeschätzt werden, welchen Einfluss das Messsystem mit den verbauten Materialien auf die Transportvorgänge hat, da es aufgrund seiner Anordnung stets im Wärme- und Feuchtestrom liegt.

9-5.1 FICHTE

9-5.1.1 Temperatur

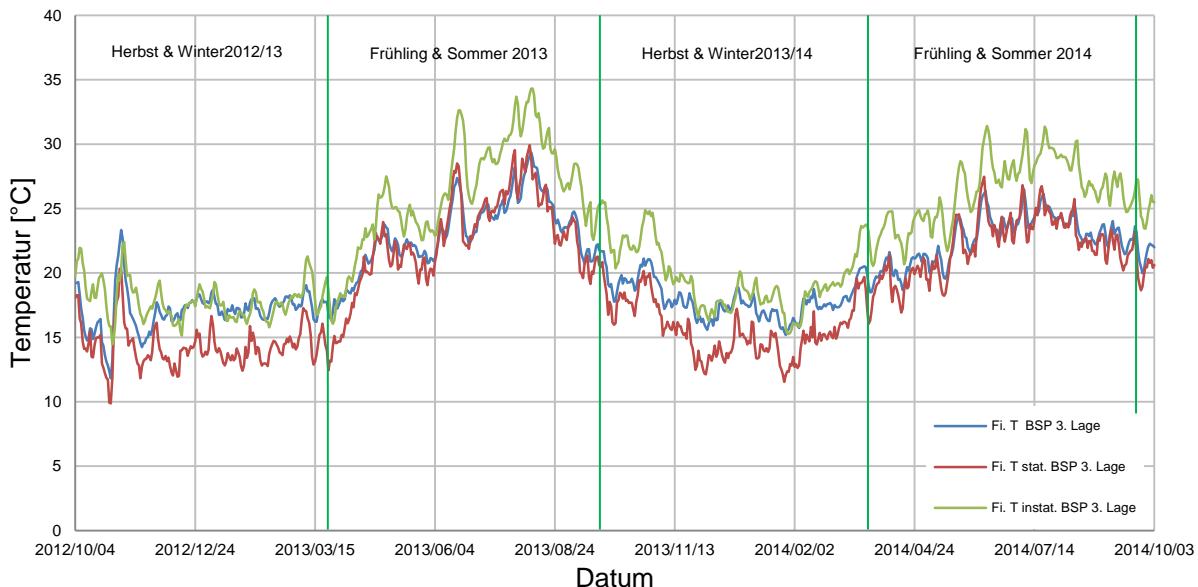


Abbildung 9.14: Vergleich Temperatur Fichte BSP 3. Lage

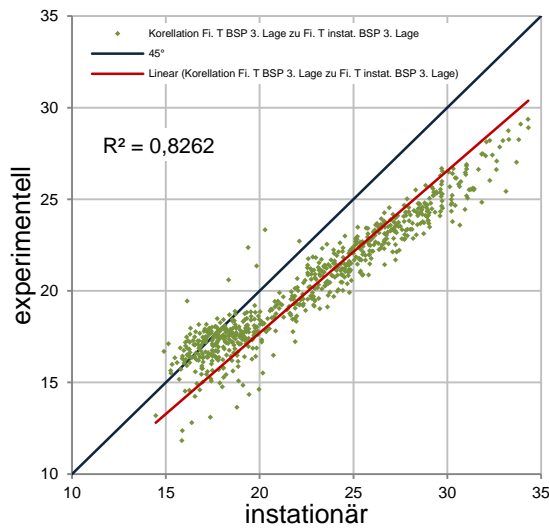


Abbildung 9.15: Korrelation der Temperatur vor Ort und im instationären Modell im Fichten BSP 3. Lage

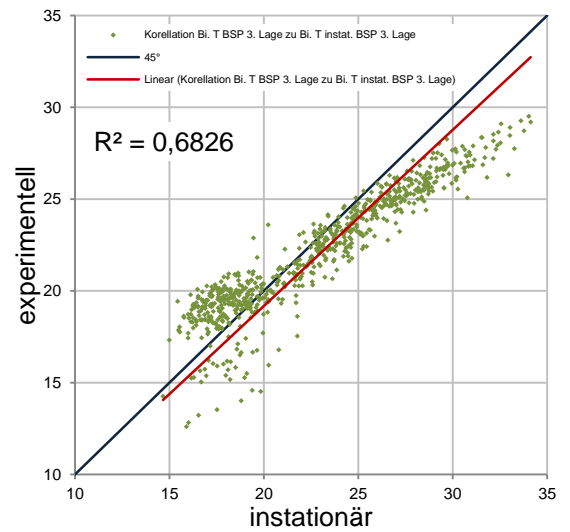


Abbildung 9.16: Korrelation der Temperatur vor Ort und im instationären Modell im Birken-BSP 3. Lage

9-5.1.2 relative Luftfeuchte

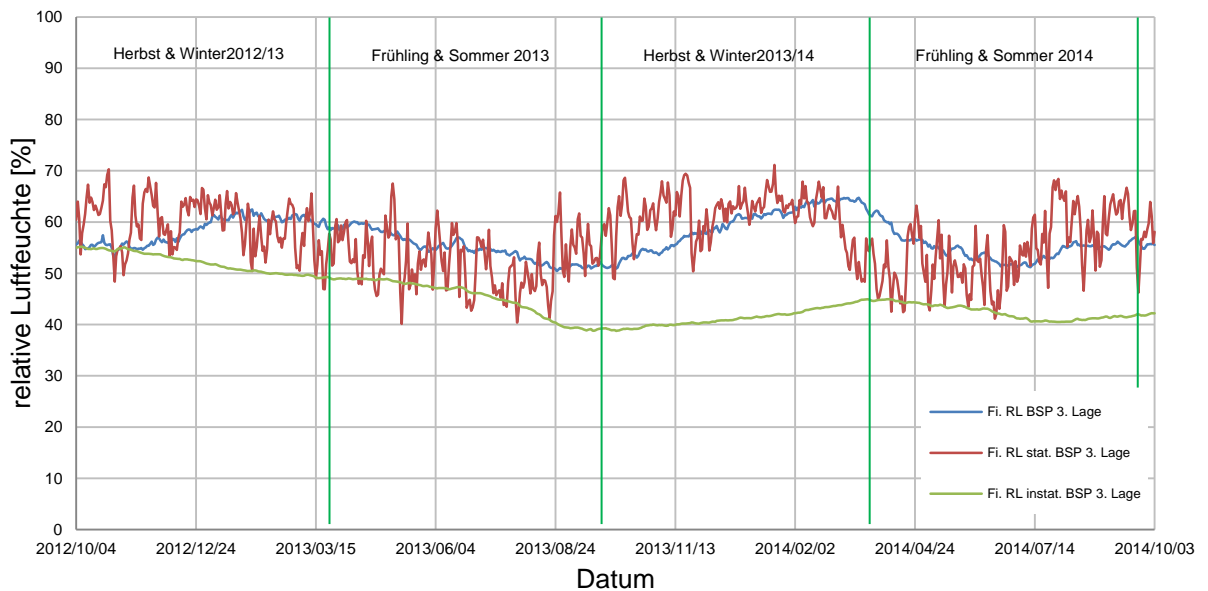


Abbildung 9.17: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte BSP 3. Lage

9-5.2 BIRKE

9-5.2.1 Temperatur

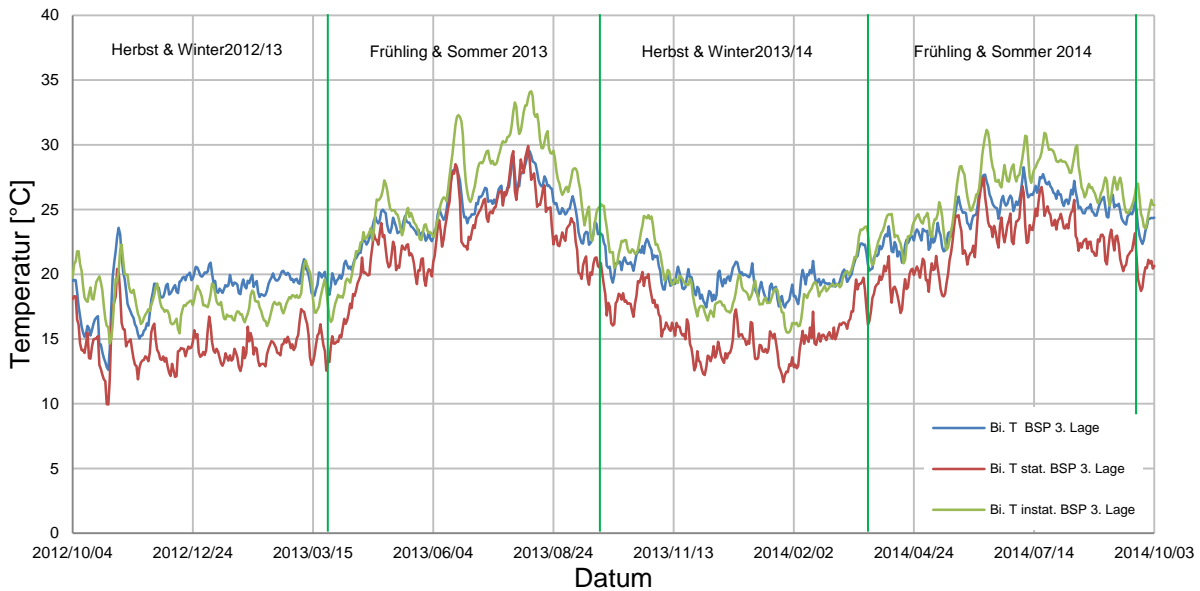


Abbildung 9.18: Vergleich Temperatur Birke BSP 3. Lage

9-5.2.2 relative Luftfeuchte

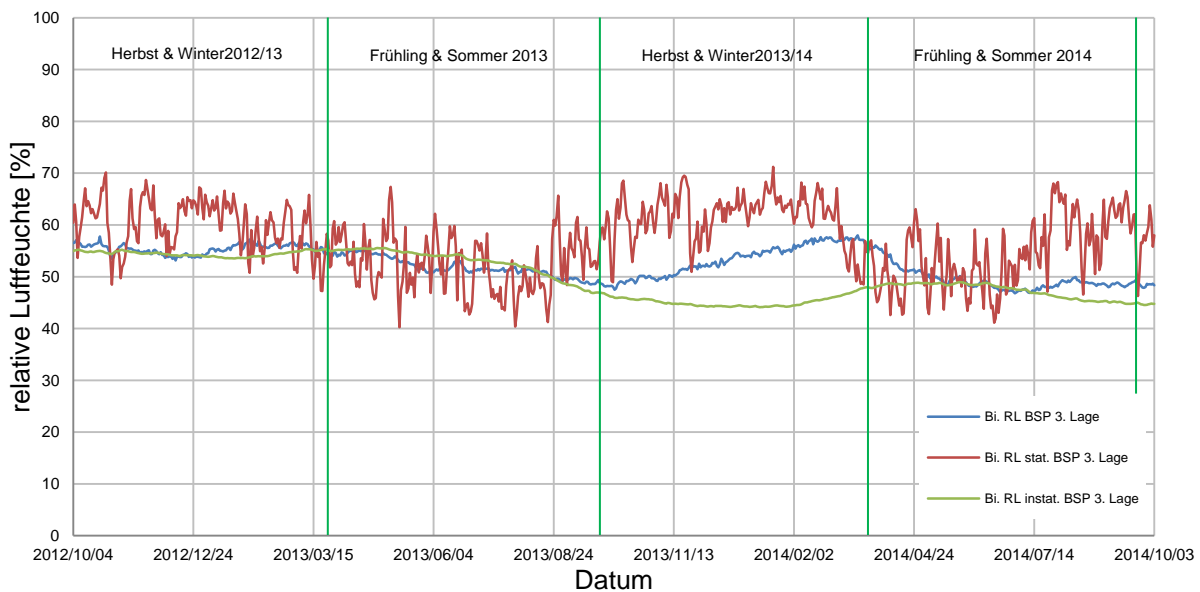


Abbildung 9.19: Vergleich relative Luftfeuchte Birke BSP 3. Lage

9-6 MESSSTELLE BSP 1. LAGE

In der ersten Brettlage zeigt sich im Prinzip das gleiche Temperaturbild wie bereits in der dritten und fünften Brettlage. Demnach verhalten sich die drei Ganglinien (siehe Abbildung 9.20 und Abbildung 9.22) zueinander auch entsprechend.

Die relative Luftfeuchte (siehe Abbildung 9.21 und Abbildung 9.23) verläuft nicht mehr so stark abgedämpft. Die Amplitudenhöhen sind in allen drei Ganglinien gestiegen. Der größte Zuwachs verzeichnet die stationäre Ganglinie während der Wintermonate. Hier spielt die Position innerhalb der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschicht im Brettsperrholz eine große Rolle, da nun ein größerer vorhandener Dampfdruck simuliert wird, was zu einer größeren relativen Luftfeuchte führt. Im Sommer liegt das stationäre Modell sehr nah an den Ganglinien der vor Ort gemessenen Temperatur. Es wird nun auch der kleine Unterschied zwischen höherer relativer Luftfeuchte im Birkenholz zur niedrigeren relativen Luftfeuchte im Fichtenholz sichtbar. Das instationäre Modell bildet die Ganglinie der vor Ort gemessenen relativen Luftfeuchte im Birkenholz ganz gut ab und entwickelt Werte, die zum Teil über und solche, die unterhalb der vor Ort gemessenen Ganglinie liegen. Im Fichtenholz werden noch immer zu geringe Werte simuliert. Die Differenz zu den vor Ort gemessenen Werten kann mitunter noch knapp 15 % betragen. Es zeigt sich hier wieder das eher parallel nach unten verschobene Bild, was auf das größer simulierte Temperaturgefälle durch das ganze Bauteil hinweist.

9-6.1 FICHTE

9-6.1.1 Temperatur

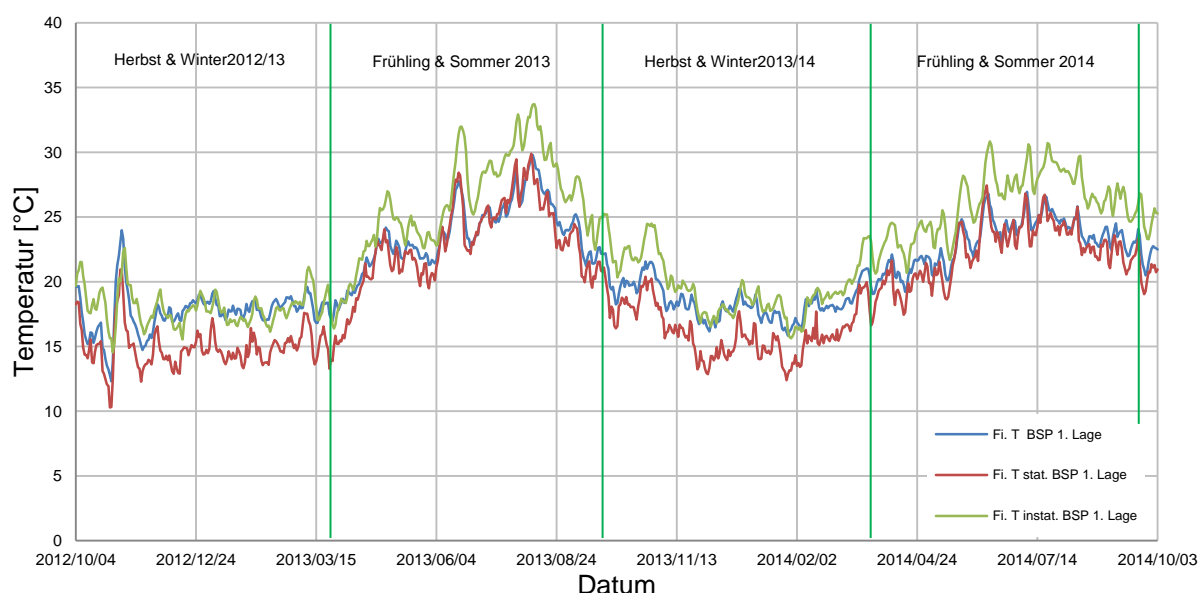


Abbildung 9.20: Vergleich Temperatur Fichte BSP 1. Lage

9-6.1.2 relative Luftfeuchte

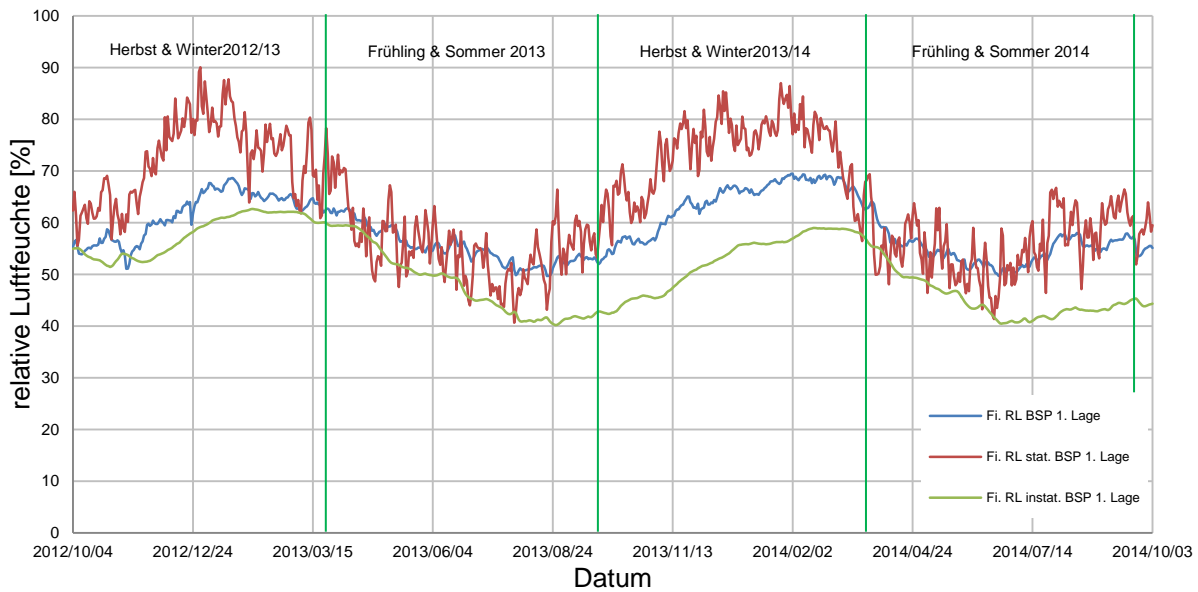


Abbildung 9.21: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte BSP 1. Lage

9-6.2 BIRKE

9-6.2.1 Temperatur

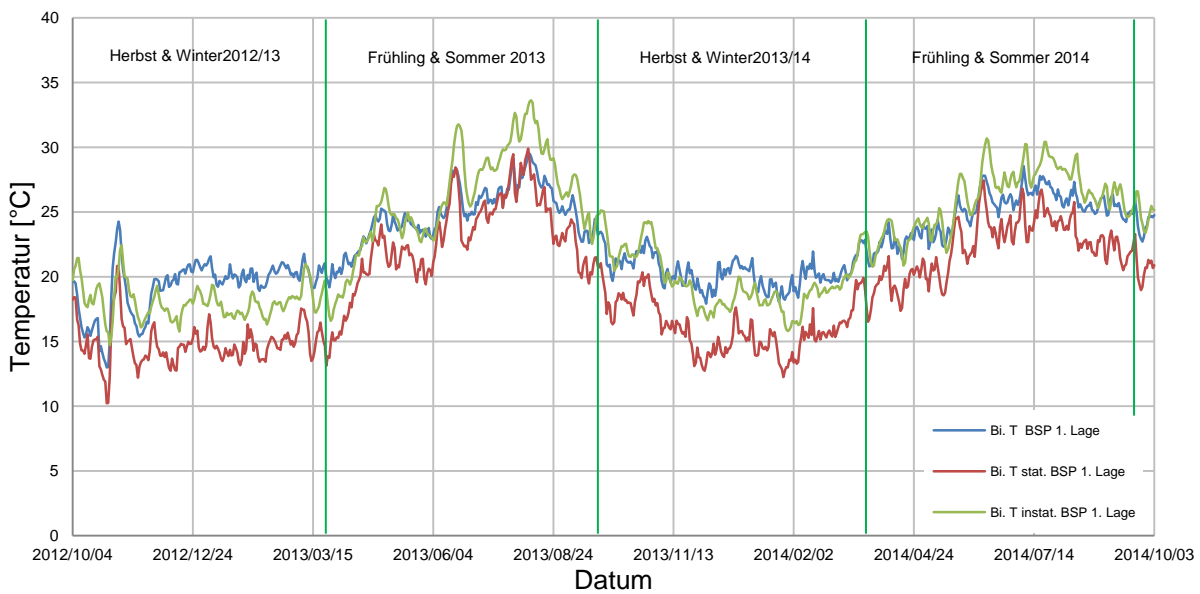


Abbildung 9.22: Vergleich Temperatur Birke BSP 1. Lage

9-6.2.2 relative Luftfeuchte

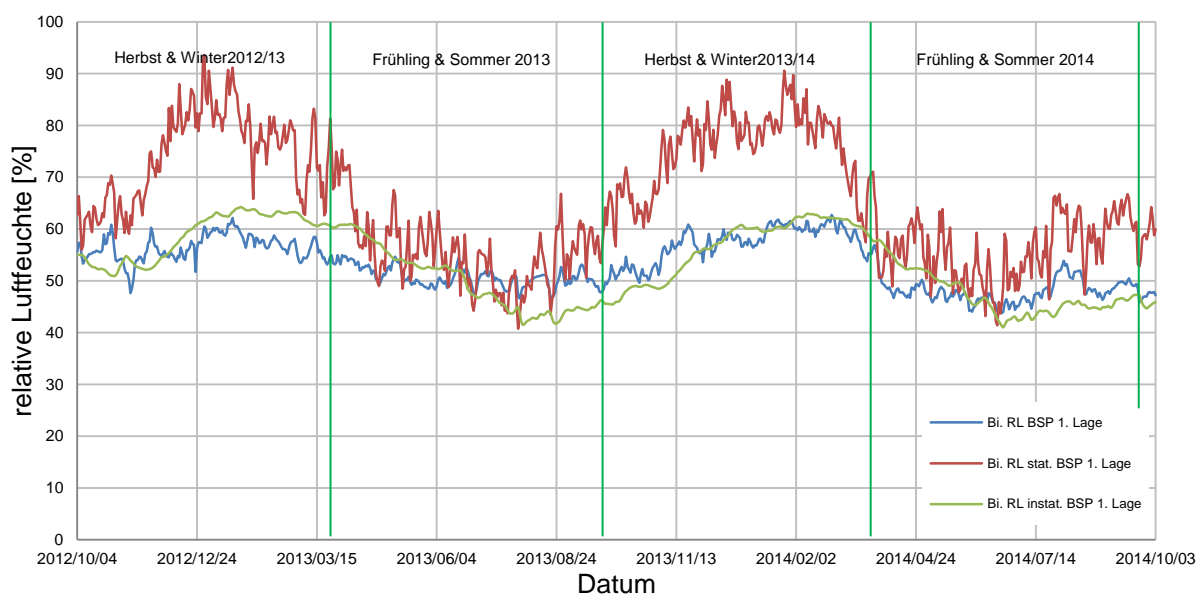


Abbildung 9.23: Vergleich relative Luftfeuchte Birke BSP 1. Lage

9-7 MESSSTELLE VORSATZSCHALE

In der Vorsatzschale ist folgendes zu beobachten. Die simulierten Werte der Temperatur (siehe Abbildung 9.24 und Abbildung 9.26), sowohl stationär als auch instationär sind nahezu identisch dem Verlauf, welcher in der ersten Brettlage des Brettspertholzes beobachtet wurde (vgl. Abbildung 9.20 und Abbildung 9.22). Zudem entspricht auch der vor Ort gemessene Verlauf im Birken-BSP-Wandaufbau in der Vorsatzschale dem Temperaturverlauf in der ersten Brettlage. Im Fichten-BSP-Wandaufbau ist die gemessene Temperatur im Winter in der Vorsatzschale um bis zu ca. 2,5 °C höher als in der ersten Brettlage, was anhand der geringeren Wärmeleitfähigkeit und der daraus resultierenden größeren Dämmwirkung des Fichtenholzes zu erklären ist.

Die Ganglinien der relativen Luftfeuchte (siehe Abbildung 9.25 und Abbildung 9.27) verlaufen in der Vorsatzschale vor Ort im Fichten-BSP-Wandaufbau zwischen ca. 48 % und 70 %, wohingegen im Birken-BSP-Wandaufbau 44 % bis ca. 67 % registriert wurden. Das stationäre Modell ist diesen Ganglinien im Sommer stets nahe, wohingegen im Winter im Fichten-BSP-Wandaufbau ca. 96 % simuliert werden und im Birken-BSP-Wandaufbau volle Wasserdampfsättigung für einen Tag auftritt. Dies hängt am Temperaturabfall, welcher durch die innenliegende Wärmedämmung auftritt und dem gleichzeitig sehr geringen Verlust der Wasserdampfmenge (siehe Abbildung 9.9). Das instationäre Modell bietet da stets eine genauere Übereinstimmung mit der vor Ort gemessenen relativen Luftfeuchte. Die Abweichung, welche im Sommer zu beobachten ist, ist der erhöhten Temperatur im Vergleich zur vor Ort gemessenen Temperatur zuzuschreiben, welche dafür sorgt, dass eine geringere relative Luftfeuchte simuliert wird.

9-7.1 FICHTE

9-7.1.1 Temperatur

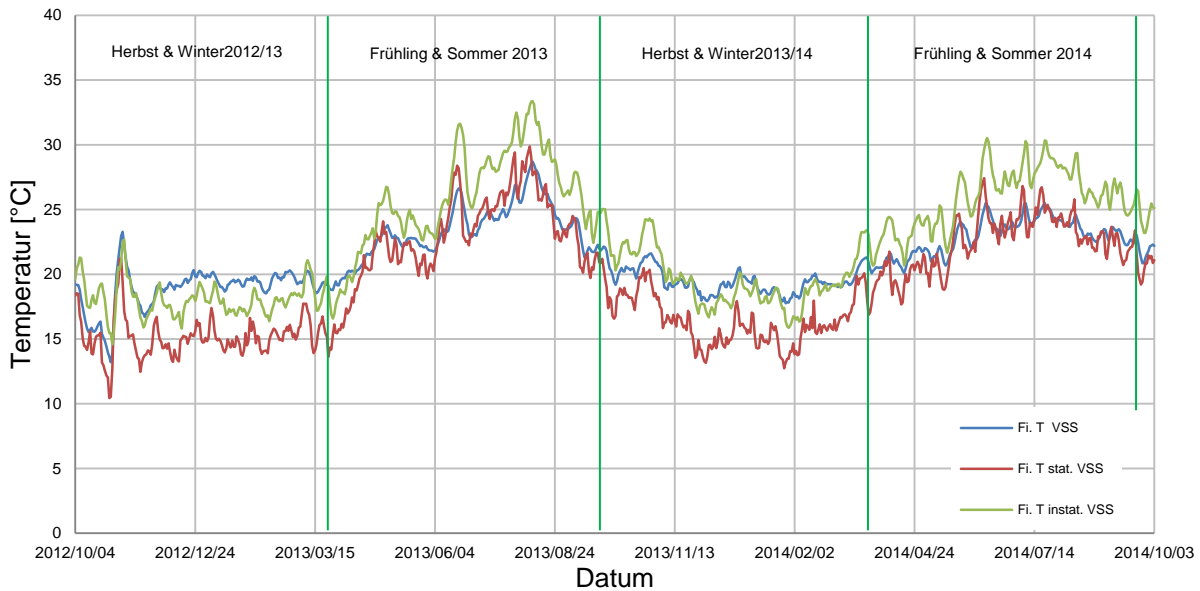


Abbildung 9.24: Vergleich Temperatur Fichte Vorsatzschale

9-7.1.2 relative Luftfeuchte

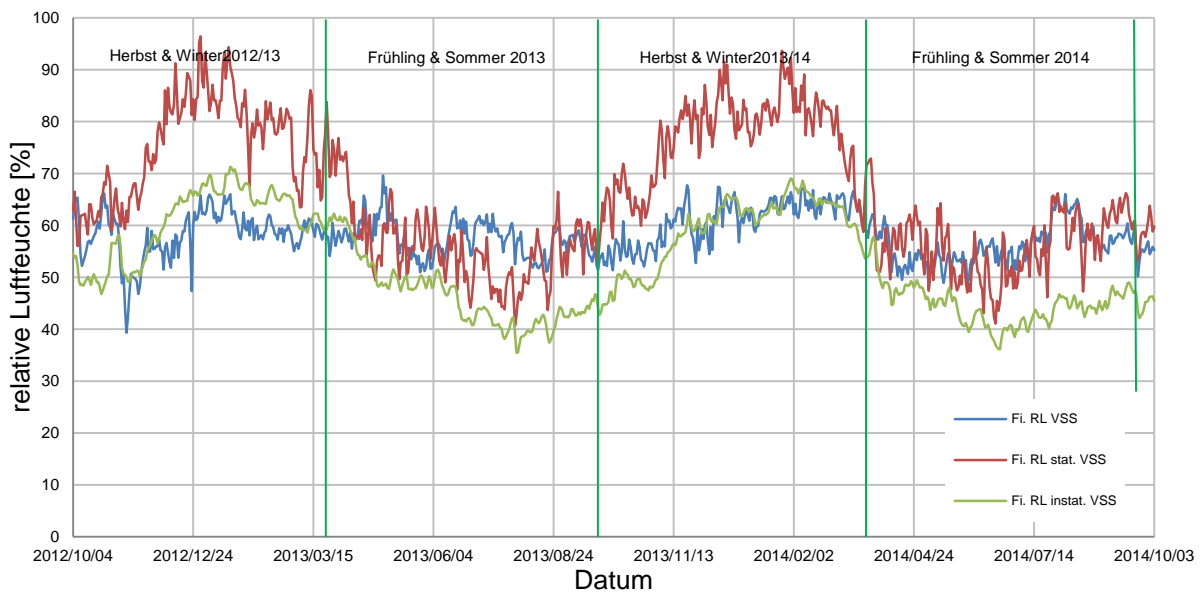


Abbildung 9.25: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte Vorsatzschale

9-7.2 BIRKE

9-7.2.1 Temperatur

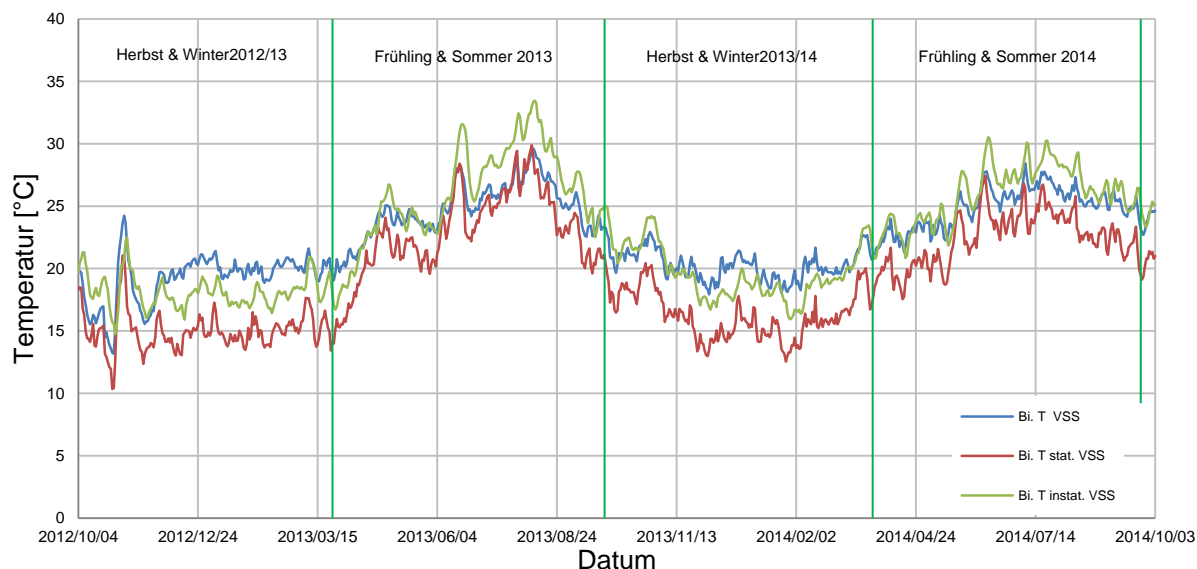


Abbildung 9.26: Vergleich Temperatur Birke Vorsatzschale

9-7.2.2 relative Luftfeuchte

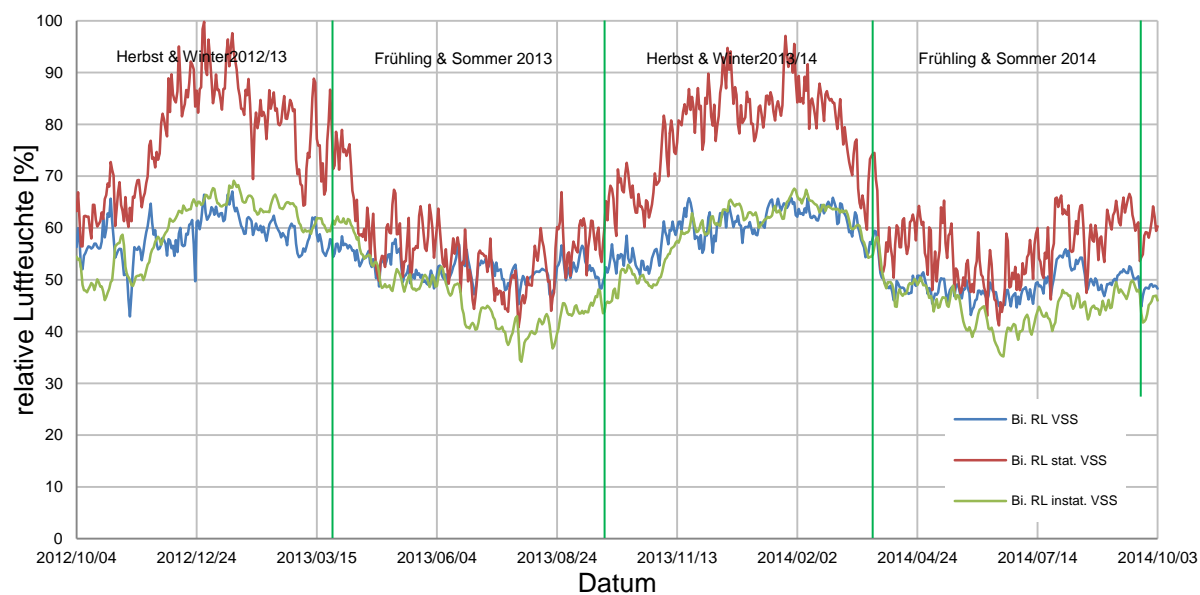


Abbildung 9.27: Vergleich relative Luftfeuchte Birke Vorsatzschale

9-8 HOLZFEUCHTE

Die Gegenüberstellung der Holzfeuchte (siehe Abbildung 9.28 und Abbildung 9.29) enthält die Holzfeuchte in der Forschungswohnung, welche sich anhand der Kalibrierungsfunktion ergibt (vgl. Kapitel 6-4) und die Holzfeuchte, welche sich aus der Delphin-Simulation (vgl. Kapitel 8-3) anhand des Feuchte-Massenintegrals errechnet. Es ist zu erkennen, dass in den einzelnen Messstellen im Brettsperrholz die simulierte Holzfeuchte stets unterhalb der kalibrierten Holzfeuchte in der Forschungswohnung liegt. Ein Vergleich der minimalen bzw. der maximalen Holzfeuchte in Tabelle 9.1 verdeutlicht den vorhandenen Unterschied. Wie sich in Kapitel 6-3 gezeigt hat, hängt die Holzfeuchte in besonderem Maße von der relativen Luftfeuchte ab. Da sich in der instationären Simulation bereits Differenzen der relativen Luftfeuchte zur relativen Luftfeuchte in der Forschungswohnung von bis zu 20 % ergeben haben, ist die Abweichung der jeweiligen Holzfeuchte nicht all zu verwunderlich. Generell ist sowohl in der Forschungswohnung als auch in der instationären Simulation das hygroskopische Verhalten im Brettsperrholz zu erkennen. Demnach ist im Winter die Holzfeuchte in der innenliegenden Brettlage am höchsten und nimmt nach außen hin ab. Im Sommer schmiegen sich die Ganglinien an, da es zu einer kollektiven Erwärmung des Querschnittes kommt, was zu einer Austrocknung des Materials führt. Besonders im Birkenholz ist zu erkennen, dass hierbei im Zentrum des Brettsperrholzes der Austrocknungsprozess langsamer geschieht und die Holzfeuchte länger gehalten wird, sodass hier zeitweilig die größten Holzfeuchtwerte auftreten. Die Simulation ergibt im Winter eine deutlich größeres Spektrum der Holzfeuchte über den Querschnitt. So wird im Fichtenholz etwa ein Bereich von ca. 6 % bis 11 % simuliert während es vor Ort nur ca. 10 % bis 12,7 % sind. Im Birkenholz beträgt die Modell-Bandbreite im Winter ca. 6 % bis 9,7 % und in der Forschungswohnung ca. 9 % bis 11,1 %.

Tabelle 9.1: minimale/maximale Messwerte der Holzfeuchte in der Forschungswohnung und der instationären Holzfeuchte im BSP

Messpunkt		Fichte		Birke	
		min	max	min	max
BSP 5. Lage	Messung	8,59	11,59	7,69	10,57
HF [%]	instationäres Modell	5,41	9,26	5,65	7,85
BSP 3. Lage	Messung	8,71	11,92	8,01	10,57
HF [%]	instationäres Modell	6,62	9,22	6,44	7,90
BSP 1. Lage	Messung	8,41	12,76	7,85	11,14
HF [%]	instationäres Modell	6,73	10,94	6,20	9,67

9-8.1 FICHTE

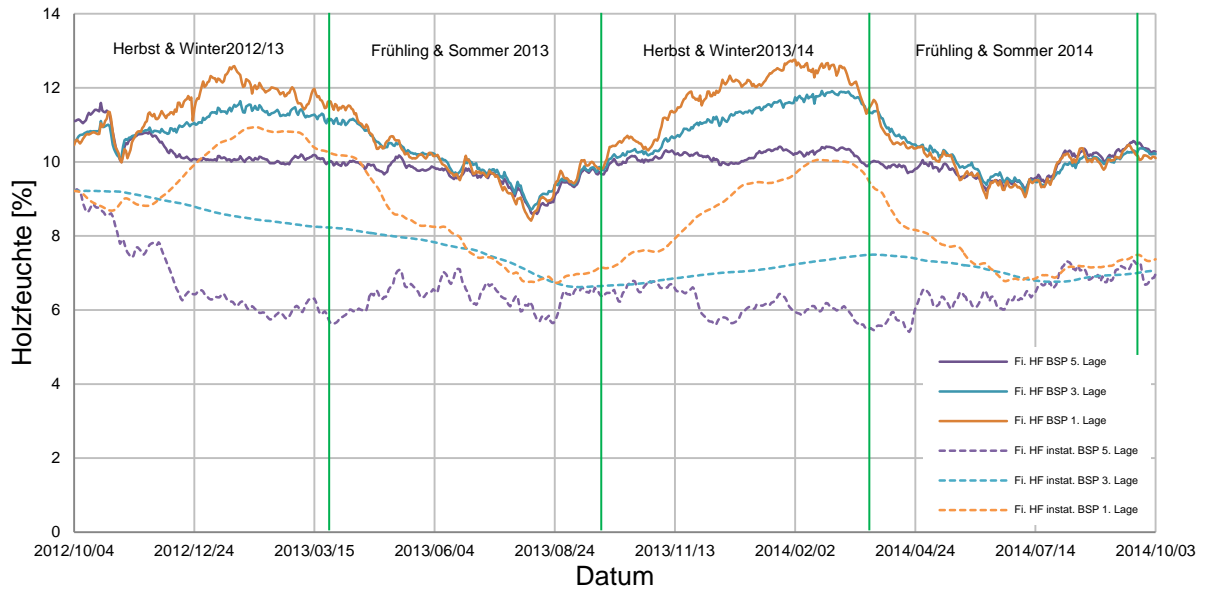


Abbildung 9.28: Vergleich Holzfeuchte Fichte

9-8.2 BIRKE

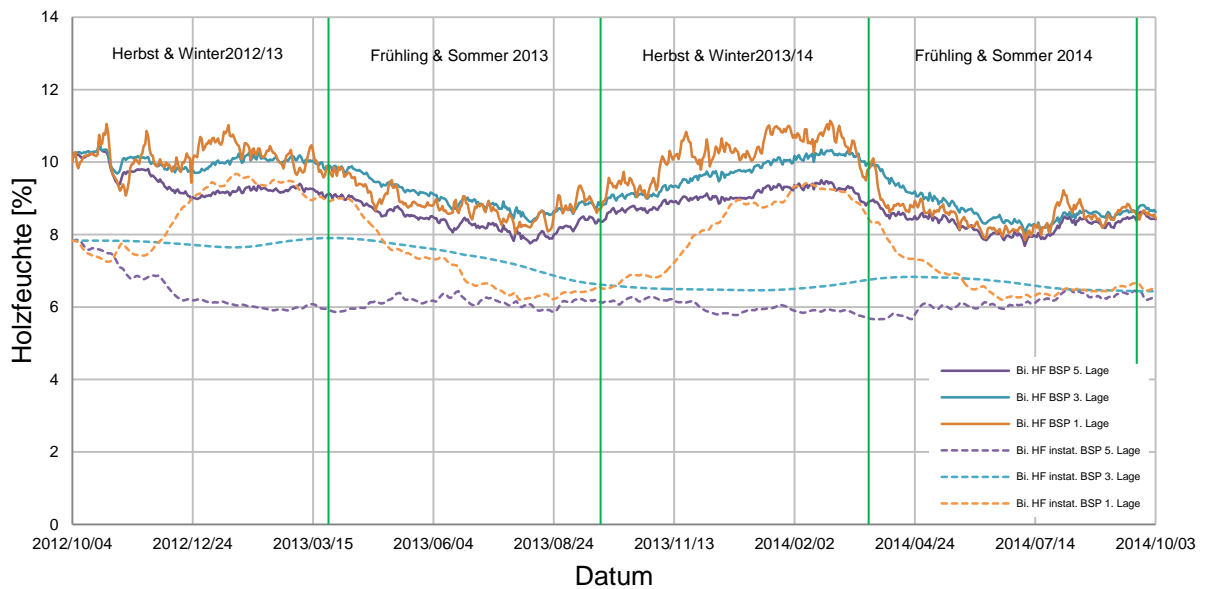


Abbildung 9.29: Vergleich Holzfeuchte Birke

KAPITEL 10: SCHLUSSBETRACHTUNG

10-1 RESÜMEE UND AUSBLICK

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde ein Langzeit-Monitoring in einer Forschungswohnung in Graz ausgewertet. Die Auswertung beinhaltet die Betrachtung der aufgezeichneten Daten von Temperatur und relativer Luftfeuchte für einen Zeitraum von zwei Jahren. Das Monitoring bietet die Grundlage zur Analyse des bauphysikalischen Verhaltens eines Wandaufbaues in Holz-Massivbauweise während der Nutzung, wobei im gegebenen Fall Fichten- und Birkenbrettsperrholz untersucht worden sind.

Das bauphysikalische Verhalten des Wandaufbaues in Holz-Massivbauweise ist von einem direkten Temperaturreaktionsverhalten geprägt und weist eine durchgehende Dämpfung durch die einzelnen Materialschichten auf. Der Vergleich vom Fichten-BSP- zum Birken-BSP-Wandaufbau bestätigt die höheren Temperaturen im Birken-BSP-Wandaufbau, welche aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Birkenholzes zu erwarten waren. Die obere Grenze von 20 °C für Holzbauteile, welche in Nutzungsklasse 1 in der ÖNORM B 1995-1-1, 2014 gefordert wird kann in den Sommermonaten nicht eingehalten werden. Dennoch ist eine Abminderung der Dauerhaftigkeit des Holzes dadurch nicht zu erwarten, da im Gegenzug eine Austrocknung und damit eine geringere Holzfeuchte einhergeht. Im innenliegenden Wohnraum wird eine vierwöchige sommerliche Überwärmung gemäß ÖNORM B 8110-3, 2012 festgestellt. In Bezug auf das hygrische Verhalten wird anhand des Monitorings eine zeitlich verzögerte Anpassung der weiter innenliegenden Materialien auf eine Änderung der relativen Außenluftfeuchte festgestellt. Das hygroskopische Verhalten des Holzes bewirkt in Zusammenarbeit mit dem vorhandenen Temperaturgefälle im Winter eine höhere relative Luftfeuchte in der innenliegenden Brettlage, welche dann nach außen hin abnimmt. Generell wird im Fichten-BSP-Wandaufbau meist eine höhere relative Luftfeuchte als im Birken-BSP-Wandaufbau gemessen, was aufgrund der geringeren Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Fichtenholzes zu erwarten war. In beiden Wandaufbauten kann zu keinem Zeitpunkt während der Messperiode eine Kondensatbildung festgestellt werden. In Bezug auf Nutzungsklasse 1 liegt der obere Grenzwert der relativen Luftfeuchte bei 65 %, welcher nur in der innenliegenden Fichtenbrettsperrholzlage für knapp drei Monate um maximal 4,5 % nicht eingehalten werden kann. Diese unwesentliche Abweichung, welche nicht den gesamten Holzquerschnitt repräsentiert, wird nicht als kritisch eingeschätzt.

Da in den Nutzungsklassen auch Aussagen zur Holzfeuchte getroffen werden, komplettiert die vorliegende Masterarbeit auch die bauphysikalische Untersuchung am Forschungsobjekt, indem die sich einstellende Holzfeuchte aus den gewonnenen Daten generiert wird. Hierbei zeigt sich eine entsprechend größere Holzfeuchte im Fichtenholz als im Birkenholz, welche in der innenliegenden Brettlage kurzzeitig über die in der Nutzungsklasse 1 angekündigten 12 %-Marke liegt. Diese kurzzeitige Überschreitung wird nicht als Gefahrenpotenzial hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des Holzes gesehen.

Der Autor schätzt den Wert des Monitorings und der daraus resultierenden Daten, genau wie die Autoren der eingangs aufgeführten Forschungsberichte, als sehr wertvoll ein, da es in Bezug auf Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Standsicherheit von Bauwerken ein praktisches Werkzeug ist. Zudem dient die auf der Datenmenge beruhende Untersuchung dem besseren Verständnis der bauphysikalischen Vorgänge eines speziellen Objektes während der

Nutzung. Bei der vorhandenen Messkonfiguration ist anzumerken, dass eine direkte Anordnung der Messtechnik im Wärme- und Wasserdampfstrom nicht ideal ist. Eine orthogonal zum Wärme- und Wasserdampfstrom angebrachte Konfiguration ist zu empfehlen, obwohl der Einfluss auf das Messergebnis hier nicht untersucht wurde. Zudem ist eine Erweiterung der Konfiguration zu überdenken. Es empfiehlt sich die Holzfeuchte direkt vor Ort durch eingebrachte Messsensoren, die gemäß dem Widerstandsmessverfahren funktionieren, zu bestimmen.

Der Verifizierungsversuch der Messergebnisse aufgrund stationärer Verhältnisse stellt keine zufriedenstellende Lösung dar. Es zeigt sich zwar, dass im Sommer eine Übereinstimmung mit dem gemessenen Klima simuliert werden kann, jedoch weichen die Ergebnisse im Winter umso mehr vom gemessenen Zustand ab. Die innenliegende Wärmedämmung bewirkt eine zu niedrige Temperatursimulation, die sich in allen weiteren Materialschichten fortsetzt, was im Umkehrschluss zu einer Überschätzung der relativen Luftfeuchte führt. Das stationäre Modell würde aufgrund einer simulierten relativen Luftfeuchte von bis zu ca. 92 % im Brettsperrholz zu einer Einordnung der tragenden Holzbauteile in Nutzungsklasse 3 führen.

Die instationäre Simulation hingegen führt zu einer Bestätigung von Nutzungsklasse 1 und beschreibt den Charakter des gemessenen Bauteilklimas. Das bedeutet, dass der gemessene Klimaverlauf entweder bestätigt werden kann oder eine parallele Verschiebung des Verlaufes über den Beobachtungszeitraum zu registrieren war. Die parallele Verschiebung betrifft die simulierte relative Luftfeuchte besonders in den äußeren Materialschichten, was auf eine andere klimatische Wetterbelastung hindeutet. Es zeigen sich größere thermische Belastungen, welche geringere relative Luftfeuchten bedingen, wobei auch hier die Vermutung im Raum steht, dass auch eine niedrigere hygrische Belastung simuliert wurde.

Dennoch bildet das instationäre Modell einen sinnvollen Klimaverlauf im untersuchten Bauteil ab, wobei zur tatsächlichen Verifikation des gemessenen Bauteilklimas zusätzliche Abklärungen und weiterführende Untersuchungen notwendig sind. Zum einen bedarf es einer Untersuchung vor Ort, inwieweit sich die Wärmestrahlungsintensität, die normal zur Außenwand ankommende Regenmenge und die Windintensität an der Außenwandoberfläche zu den Wetterdaten der ZAMG verhalten. Vor Ort müssten auch die genauen Holzkenngößen abgeklärt werden, denn die Dichte der einzelnen Holzarten können doch enorm schwanken. In Fellner, et al., 2006 werden Dichteschwankungen für Fichtenholz von 330 bis 680 kg/m³ und für Birkenholz von 510 bis 830 kg/m³ angegeben. Wie gezeigt wurde, sind die Wärmeleitfähigkeit und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von der Dichte abhängig. Diese Erkenntnisse würden evtl. andere Simulationsparameter ergeben, wobei auch das Simulationsprogramm auf hinterlegte Sorptionsisotherme, Kapillarität, Konduktivität und Diffusivität der einzelnen Materialien untersucht werden müsste. Denkbar wäre die mögliche Materialstreuung in der Simulation so zu verankern, dass anhand der Extremwerte eine Bandbreite für das Bauteilklima errechnet werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird festgestellt, dass eine Bauteilklimasimulation mittels der verwendeten Software, eine enorme Fülle an materialtechnischer und klimatechnischer Kenntnis der örtlichen Situation erfordert, sodass der Schluss gezogen wird, dass ein Monitoring einer allgemeinen Simulation vorzuziehen ist.

KAPITEL 11: QUELLENVERZEICHNIS

11-1 LITERATUR

- Fellmoser, P., 2012. *Langzeitüberwachung von Holztragwerken*, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Fellner, J., Teischinger, A. & Zschokke, W., 2006. *Holzspektrum - Ansichten, Beschreibung und Vergleichswerte*. 1. Hrsg. Wien: proHolz Austria.
- Forest Products Laboratory, 2010. *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, Madison: Forest Products Laboratory.
- Gamper, A., Dietsch, P., Merk, M. & Winter, S., 2013. Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen. *Bautechnik*, August, pp. 508-519.
- Grosser, D., 1977. *Die Hölzer Mitteleuropas - Ein mikrophotographischer Lehratlas*. 1. Hrsg. Remagen: Dr. Kessel Verlag.
- Häupl, P., 2008. *Bauphysik - Klima, Wärme, Feuchte, Schall*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Honeywell, 2007. *Produktbeschreibung - H1H-4602-A/C Series*. Minneapolis: Honeywell International Inc..
- Hübner, U., 2012. *Birke für Brettschichtholz und Brettsperrholz*, Graz: holz.bau forschungs gmbh.
- Kautsch, P., 2011. *Bauphysik 1*, Graz: Institut für Hochbau.
- Kollmann, F., 1951. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Niemz, P., 1993. *Physik des Holzes und der Werkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW Verlag.
- Olefs, M., Baumgartner, D., Obleitner, F. & Weihs, P., 2012. *The ARAD Project: New radiation initiatives in Austria*. Potsdam: 12th Science and Review BSRN Workshop.
- Popper, R. & Niemz, P., 2009. Wasserdampfsorptionsverhalten ausgewählter heimischer und überseeischer Holzarten. *Bauphysik 31*, pp. 117-121.
- Ressel, P. D. J. B., 2006. *Fundamentals of Wood Moisture Content Measurement*. Hamburg: University of Hamburg.
- Richard, H., Ringhofer, A. & Gerhard, S., 2013. *Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*. 2. Hrsg. Graz: University of Bath.
- Ringhofer, A., Wallner, B. & Schickhofer, G., 2012. *Dauermessungen der Luftfeuchtigkeit und Bauteiltemperatur in Wandaufbauten aus Fichten- und Birken-Brettsperrholz*, Graz: holz.bau forschungs GmbH.
- Schickhofer, G., 2006. *Holzbau - Der Roh- und Werkstoff Holz*, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- Schickhofer, G., Bogensperger, T. & Moosbrugger, T., 2010. *BSPhandbuch - Holzmassivbauweise in Brettsperrholz*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.

Serrano, E., Enquist, B. & Vessby, J., 2014. *Long term in-situ measurements of displacement, temperature and relative humidity in a multi-storey residential CLT-building*. Quebec, World Conference on Timber Engineering.

Volkmer, T., Schmidt, J.-A., Kranitz, K. & Niemz, P., 2012. Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen. *Bauphysik*, April, pp. 55-60.

Zimmer, S., 2013. *Ein Beitrag zur Aufarbeitung der Schwingungsproblematik im Holz-Massivbau mit Brettsperrholz*. TU Graz: s.n.

11-2 NORMEN

DIN 68364, 2003. *Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

ÖNORM B 1995-1-1, 2014. *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM B 8110-2, 2003. *Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM B 8110-3, 2012. *Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM EN 13183-1, 2004. *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM EN ISO 10456, 2010. *Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

11-3 INTERNET

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2015. [Online] Available at: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news> [Zugriff am 23 Februar 2015].

11-4 ABILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Ansicht Schwimmhalle	3
Abbildung 2.2: Wasserflecken	4
Abbildung 2.3: Lage der Messstellen und des Datenloggers	4
Abbildung 2.4: Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Holzfeuchte Messstelle Nr. 4	5
Abbildung 2.5: Holzfeuchte an den acht Messstellen	5
Abbildung 2.6: Lufttemperatur an den acht Messstellen.....	5
Abbildung 2.7: relative Luftfeuchte an den acht Messstellen.....	5
Abbildung 2.8: Temperatur, relative und absolute Luftfeuchte, Eishalle B2	8
Abbildung 2.9: Umhüllende der Holzfeuchte, Eishalle B2	9
Abbildung 2.10: Holzfeuchten im Querschnitt, Eishalle B2.....	9
Abbildung 2.11: Umhüllende der Holzfeuchtegradienten, Eishalle B2	9
Abbildung 2.12: Limnologen	11
Abbildung 2.13: Wandaufbau und Messpunkte	11
Abbildung 2.14: Temperatur und relative Luftfeuchte Station 3.....	12
Abbildung 2.15: Temperatur und relative Luftfeuchte Station 6.....	12
Abbildung 2.16: Temperatur und relative Luftfeuchte Punkt 3.....	12
Abbildung 2.17: Temperatur und relative Luftfeuchte Punkt 4.....	12
Abbildung 2.18: Temperatur und relative Luftfeuchte Punkt 5.....	13
Abbildung 2.19: Temperatur und relative Luftfeuchte Wand Station 5	13
Abbildung 3.1: Strukturebenen des Holzes	17
Abbildung 3.2: Makrostruktur.....	18
Abbildung 3.3: Schema Tüpfel.....	21
Abbildung 3.4: Schema Nadelholz.....	22
Abbildung 3.5: Schema Laubholz	23
Abbildung 3.6: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte	25
Abbildung 3.7: Einfluss der Rohdichte auf Holz.....	27
Abbildung 3.8: Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit	27
Abbildung 3.9: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit	28
Abbildung 3.10: Einfluss des Feuchtegehalts auf die spezifische Wärmekapazität	28
Abbildung 3.11: Grenzzustände der Wasseranteile in der Holzsubstanz.....	29
Abbildung 3.12: Hysterese-Effekt zwischen Adsorption und Desorption.....	30
Abbildung 3.13: Bindungsformen des Wassers im Holz.....	31

Abbildung 3.14: hygroskopische Isothermen für Fichtenholz	32
Abbildung 3.15: Schema Wärmeleitung	36
Abbildung 4.1: Herstellung von Brettsperrholz	44
Abbildung 4.2: Hartberg (AUT)	46
Abbildung 4.3: London (UK)	46
Abbildung 4.4: Feldbach (AUT)	46
Abbildung 4.5: Beispiel Fichte	47
Abbildung 4.6: mikroskopischer Querschnitt Fichte.....	47
Abbildung 4.7: Beispiel Birke	49
Abbildung 4.8: mikroskopischer Querschnitt Birke	49
Abbildung 4.9: _massive_living Schnitt A-A	52
Abbildung 4.10: _massive_living Impressionen.....	52
Abbildung 4.11: _massive_living Grundriss 1.OG	53
Abbildung 4.12: _massive_living Anordnung der BSP-Elemente	54
Abbildung 4.13 Wandaufbau Fichte	54
Abbildung 4.14 Wandaufbau Birke	54
Abbildung 4.15: Messkonfiguration	55
Abbildung 4.16: Anordnung der Sensoren im Mess-QS Fichte	55
Abbildung 4.17: Sensor Detail	56
Abbildung 5.1: Temperatur Fichte gesamt	59
Abbildung 5.2: relative Luftfeuchte Fichte gesamt.....	59
Abbildung 5.3: Temperatur Birke gesamt	60
Abbildung 5.4: relative Luftfeuchte Birke gesamt	60
Abbildung 5.5: Temperatur außen	61
Abbildung 5.6: relative Luftfeuchte außen	62
Abbildung 5.7: Temperatur Fichte außen	63
Abbildung 5.8: relative Luftfeuchte Fichte außen	63
Abbildung 5.9: Temperatur Birke außen.....	64
Abbildung 5.10: relative Luftfeuchte Birke außen	64
Abbildung 5.11: Temperatur Fichte BSP	66
Abbildung 5.12: relative Luftfeuchte Fichte BSP	66
Abbildung 5.13: Temperatur und relative Luftfeuchte Fichte BSP	67
Abbildung 5.14: Temperatur Birke BSP	67
Abbildung 5.15: relative Luftfeuchte Birke BSP	68

Abbildung 5.16: Temperatur und relative Luftfeuchte Birke BSP	68
Abbildung 5.17: Temperatur Fichte innen.....	69
Abbildung 5.18: relative Luftfeuchte Fichte innen.....	70
Abbildung 5.19: Temperatur Birke innen	70
Abbildung 5.20: relative Luftfeuchte Birke innen	71
Abbildung 5.21: Vergleich Wärmedämmung außen	73
Abbildung 5.22: Vergleich Wärmedämmung innen	74
Abbildung 5.23: Vergleich BSP 5. Lage.....	74
Abbildung 5.24: Vergleich BSP 3. Lage.....	75
Abbildung 5.25: Vergleich BSP 1. Lage.....	75
Abbildung 5.26: Vergleich Vorsatzschale	76
Abbildung 5.27: Umhüllende der Temperatur Fichte	77
Abbildung 5.28: Umhüllende der relativen Luftfeuchte Fichte	77
Abbildung 5.29: Umhüllende der Temperatur Birke.....	78
Abbildung 5.30: Umhüllende der relativen Luftfeuchte Birke	78
Abbildung 6.1: Klimaschrank	82
Abbildung 6.2: Messinstrumente	82
Abbildung 6.3: Holzfeuchte Fichte bei 10 °C	83
Abbildung 6.4: Holzfeuchte Fichte bei 20 °C	83
Abbildung 6.5: Holzfeuchte Fichte bei 30 °C	83
Abbildung 6.6: Temperatureinfluss Fichte	83
Abbildung 6.7: Holzfeuchte Fichte BSP	85
Abbildung 6.8: Umhüllende der Holzfeuchte Fichte.....	85
Abbildung 6.9: Holzfeuchte Birke BSP	86
Abbildung 6.10: Umhüllende der Holzfeuchte Birke	86
Abbildung 6.11: Vergleich Holzfeuchte BSP 5. Lage.....	87
Abbildung 6.12: Vergleich Holzfeuchte BSP 3. Lage.....	87
Abbildung 6.13: Vergleich Holzfeuchte BSP 1. Lage.....	88
Abbildung 7.1: Temperatur stationär Fichte gesamt.....	94
Abbildung 7.2: relative Luftfeuchte stationär Fichte gesamt.....	94
Abbildung 7.3: Temperatur stationär Birke gesamt	95
Abbildung 7.4: relative Luftfeuchte stationär Birke gesamt.....	95
Abbildung 8.1: Interface Delphin.....	98
Abbildung 8.2: Vergleich gemessenes Klima Forschungswohnung und Klima ZAMG.....	99

Abbildung 8.3: Temperatur instationär Fichte gesamt	100
Abbildung 8.4: relative Luftfeuchte instationär Fichte gesamt	101
Abbildung 8.5: Temperatur instationär Birke gesamt	101
Abbildung 8.6: relative Luftfeuchte instationär Birke gesamt.....	102
Abbildung 8.7: Holzfeuchte instationär Fichte	103
Abbildung 8.8: Holzfeuchte instationär Birke	104
Abbildung 9.1: Vergleich Temperatur Fichte Wärmedämmung außen.....	106
Abbildung 9.2: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte Wärmedämmung außen.....	106
Abbildung 9.3: Vergleich Temperatur Birke Wärmedämmung außen	107
Abbildung 9.4: Vergleich relative Luftfeuchte Birke Wärmedämmung außen	107
Abbildung 9.5: Vergleich Temperatur Fichte Wärmedämmung innen	108
Abbildung 9.6: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte Wärmedämmung innen	109
Abbildung 9.7: Vergleich Temperatur Birke Wärmedämmung innen.....	109
Abbildung 9.8: Vergleich relative Luftfeuchte Birke Wärmedämmung innen.....	110
Abbildung 9.9: Prinzip der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschicht	111
Abbildung 9.10: Vergleich Temperatur Fichte BSP 5. Lage	111
Abbildung 9.11: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte BSP 5. Lage	112
Abbildung 9.12: Vergleich Temperatur Birke BSP 5. Lage.....	112
Abbildung 9.13: Vergleich relative Luftfeuchte Birke BSP 5. Lage.....	113
Abbildung 9.14: Vergleich Temperatur Fichte BSP 3. Lage	114
Abbildung 9.15: Korrelation Temperatur vor Ort und instationär im Fichten BSP 3. Lage	115
Abbildung 9.16: Korrelation Temperatur vor Ort und instationär im Birken-BSP 3. Lage.....	115
Abbildung 9.17: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte BSP 3. Lage	115
Abbildung 9.18: Vergleich Temperatur Birke BSP 3. Lage.....	116
Abbildung 9.19: Vergleich relative Luftfeuchte Birke BSP 3. Lage.....	116
Abbildung 9.20: Vergleich Temperatur Fichte BSP 1. Lage	117
Abbildung 9.21: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte BSP 1. Lage	118
Abbildung 9.22: Vergleich Temperatur Birke BSP 1. Lage.....	118
Abbildung 9.23: Vergleich relative Luftfeuchte Birke BSP 1. Lage.....	119
Abbildung 9.24: Vergleich Temperatur Fichte Vorsatzschale.....	120
Abbildung 9.25: Vergleich relative Luftfeuchte Fichte Vorsatzschale	120
Abbildung 9.26: Vergleich Temperatur Birke Vorsatzschale	121
Abbildung 9.27: Vergleich relative Luftfeuchte Birke Vorsatzschale.....	121
Abbildung 9.28: Vergleich Holzfeuchte Fichte	123

Abbildung 9.29: Vergleich Holzfeuchte Birke.....	123
Abbildung 11.1: Holzfeuchte Birke bei 10 °C.....	I
Abbildung 11.2: Holzfeuchte Birke bei 20 °C.....	I
Abbildung 11.3: Holzfeuchte Birke bei 30 °C.....	I
Abbildung 11.4: Temperatureinfluss Birke.....	I
Abbildung 11.5: Temperatur stationär Fichte außen.....	II
Abbildung 11.6: relative Luftfeuchte stationär Fichte außen.....	II
Abbildung 11.7: Temperatur stationär Birke außen.....	III
Abbildung 11.8: relative Luftfeuchte stationär Birke außen.....	III
Abbildung 11.9: Temperatur stationär Fichte BSP.....	IV
Abbildung 11.10: relative Luftfeuchte stationär Fichte BSP.....	IV
Abbildung 11.11: Temperatur stationär und relative Luftfeuchte stationär Fichte BSP.....	V
Abbildung 11.12: Temperatur stationär Birke BSP.....	V
Abbildung 11.13: relative Luftfeuchte stationär Birke BSP.....	VI
Abbildung 11.14: Temperatur stationär und relative Luftfeuchte stationär Birke BSP.....	VI
Abbildung 11.15: Temperatur stationär Fichte innen.....	VII
Abbildung 11.16: relative Luftfeuchte stationär Fichte innen.....	VII
Abbildung 11.17: Temperatur stationär Birke innen.....	VIII
Abbildung 11.18: relative Luftfeuchte stationär Birke innen.....	VIII
Abbildung 11.19: Temperatur instationär Fichte außen.....	IX
Abbildung 11.20: relative Luftfeuchte instationär Fichte außen.....	IX
Abbildung 11.21: Temperatur instationär Birke außen.....	X
Abbildung 11.22: relative Luftfeuchte instationär Birke außen.....	X
Abbildung 11.23: Temperatur instationär Fichte BSP.....	X
Abbildung 11.24: relative Luftfeuchte instationär Fichte BSP.....	X
Abbildung 11.25: Temperatur instationär und relative Luftfeuchte instationär Fichte BSP.....	X
Abbildung 11.26: Temperatur instationär Birke BSP.....	X
Abbildung 11.27: relative Luftfeuchte instationär Birke BSP.....	X
Abbildung 11.28: Temperatur instationär und relative Luftfeuchte instationär Birke BSP.....	X
Abbildung 11.29: Temperatur instationär Fichte innen.....	X
Abbildung 11.30: relative Luftfeuchte instationär Fichte innen.....	X
Abbildung 11.31: Temperatur instationär Birke innen.....	X
Abbildung 11.32: relative Luftfeuchte instationär Birke innen.....	X

11-5 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: gewählte Nutzungen und Anzahl der Objekte	7
Tabelle 2.2: Messergebnisse.....	10
Tabelle 2.3: Zusammenfassung der aktuellen Forschungspublikationen.....	15
Tabelle 3.1: Holzgewebe und ihre darin vorkommenden Holzzellen für Nadel- und Laubholz ..	20
Tabelle 3.2: Anordnung und Funktion der Nadelholzzellen	22
Tabelle 3.3: Anordnung und Funktion der Laubholzzellen	24
Tabelle 4.1: Kennwerte Fichte	48
Tabelle 4.2: Kennwerte Birke	50
Tabelle 5.1: minimale/maximale Messwerte und maximale Differenz in den einzelnen Messpunkten	73
Tabelle 6.1: Messreihen	81
Tabelle 6.2: Fitting-Faktoren Fichte	83
Tabelle 6.3: Kalibrierungsfaktoren	84
Tabelle 6.4: minimale/maximale Messwerte und maximale Differenz der Holzfeuchte im BSP .	88
Tabelle 7.1: Kenngrößen Fichten-BSP-Wandaufbau	91
Tabelle 7.2: Kenngrößen Birken-BSP-Wandaufbau	92
Tabelle 8.1: minimale/maximale Messwerte und maximale Differenz der instationären Holzfeuchte im BSP.....	104
Tabelle 9.1: minimale/maximale Messwerte der Holzfeuchte in der Forschungswohnung und der instationären Holzfeuchte im BSP	122
Tabelle 11.1: Fittingfaktoren Birke	I

ANHANG A KALIBRIERUNG BIRKE

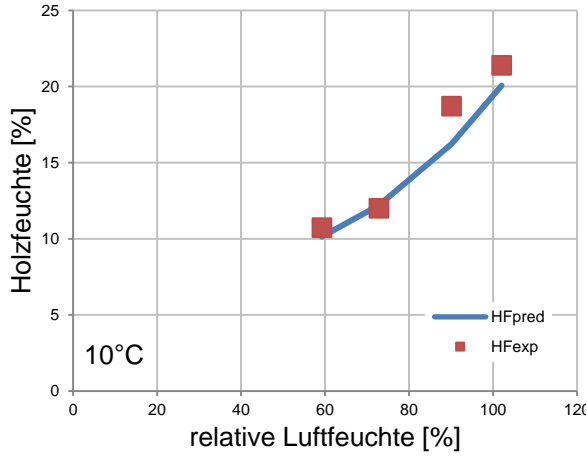


Abbildung 11.1: Holzfeuchte Birke bei 10 °C

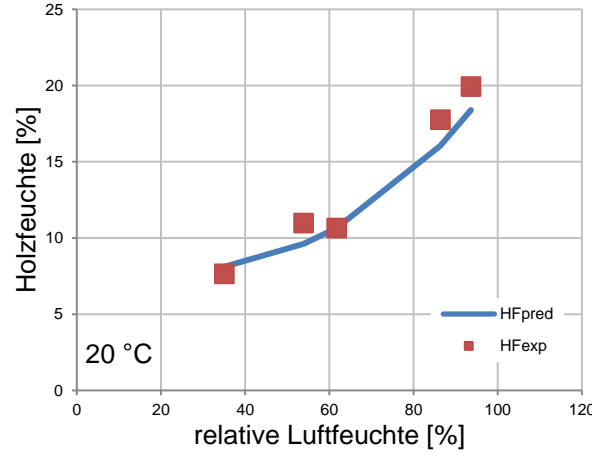


Abbildung 11.2: Holzfeuchte Birke bei 20 °C

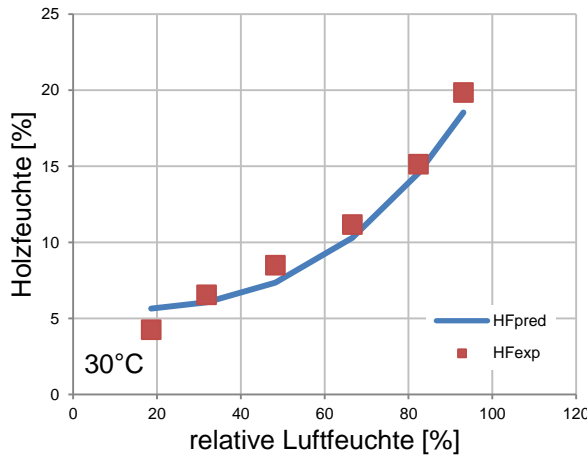


Abbildung 11.3: Holzfeuchte Birke bei 30 °C

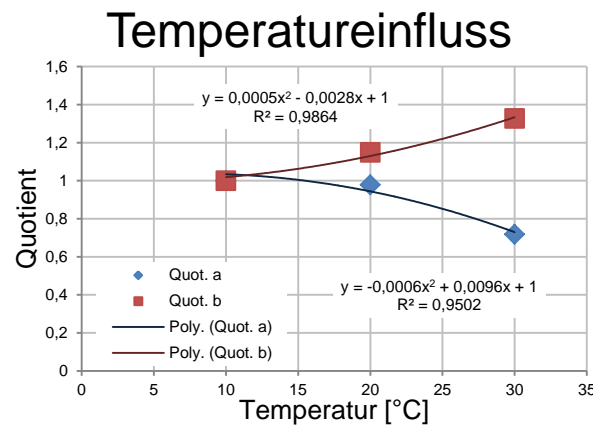


Abbildung 11.4: Temperatureinfluss Birke

Tabelle 11.1: Fittingfaktoren Birke

	Temperatur [°C]		
	10	20	30
a	7,716166396	7,545932332	5,542107625
b	$1,34001 \cdot 10^{-5}$	$1,53889 \cdot 10^{-5}$	$1,77872 \cdot 10^{-5}$

ANHANG B STATIONÄRE MODELLIERUNG

B-1 Messstellen außen

Fichte

Temperatur

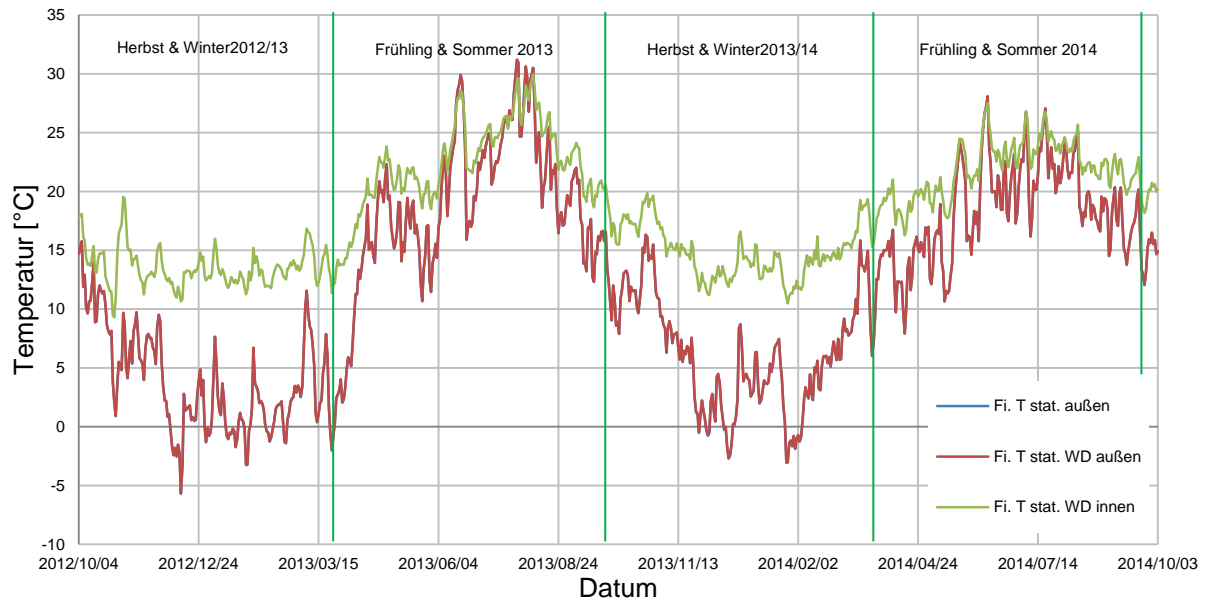


Abbildung 11.5: Temperatur stationär Fichte außen

relative Luftfeuchte

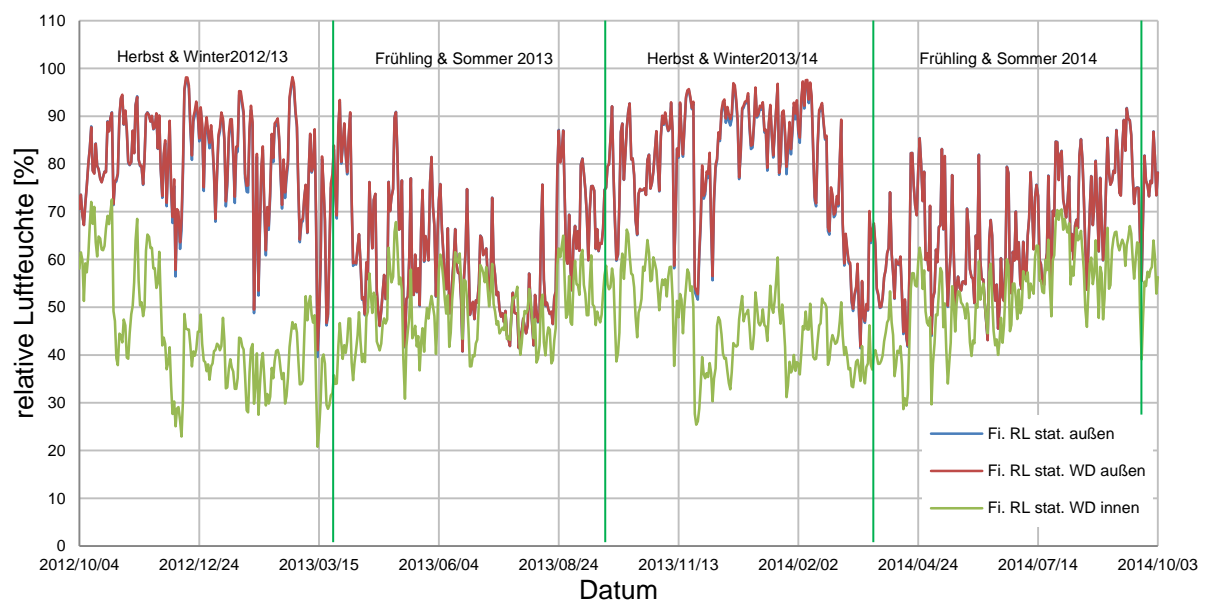


Abbildung 11.6: relative Luftfeuchte stationär Fichte außen

Birke

Temperatur

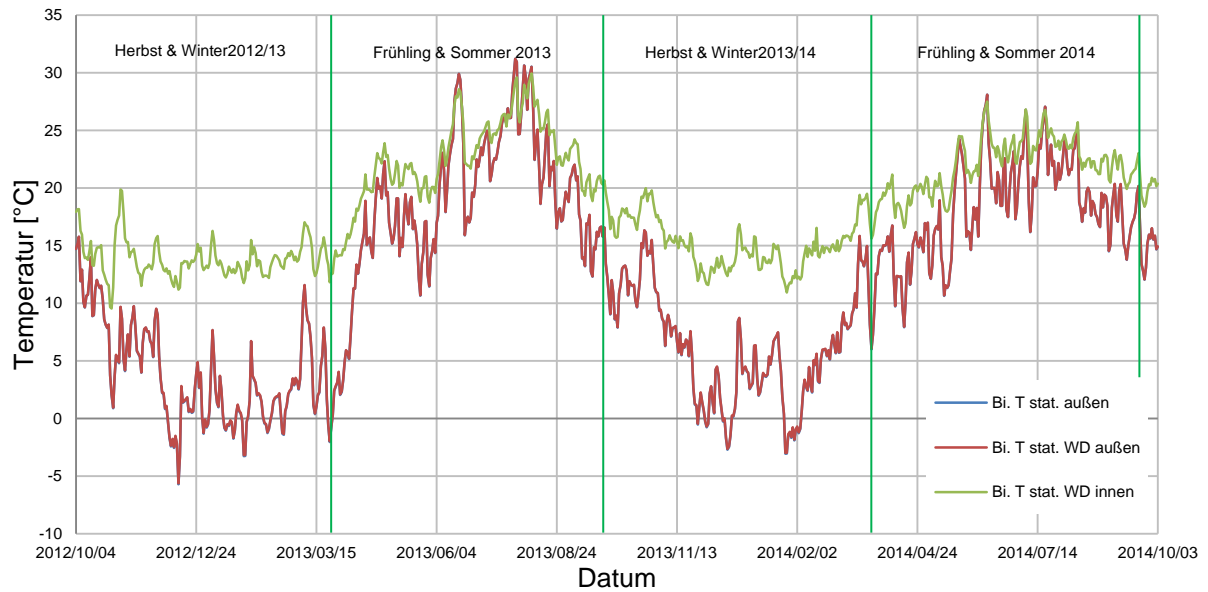


Abbildung 11.7: Temperatur stationär Birke außen

relative Luftfeuchte

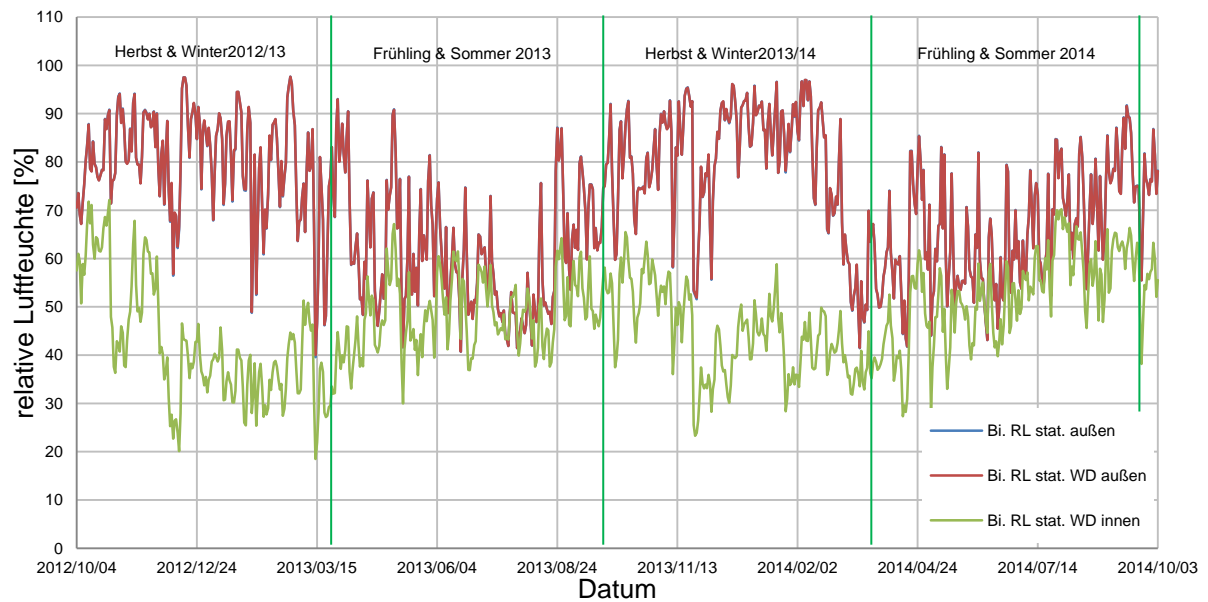


Abbildung 11.8: relative Luftfeuchte stationär Birke außen

B-2 Messstellen BSP

Fichte

Temperatur

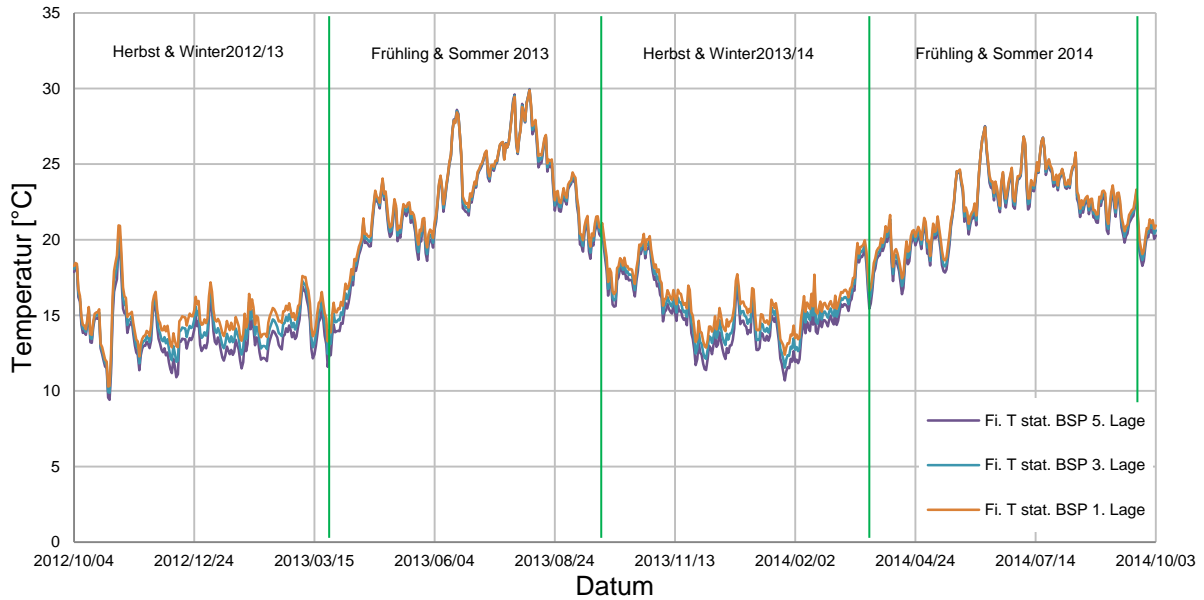


Abbildung 11.9: Temperatur stationär Fichte BSP

relative Luftfeuchte

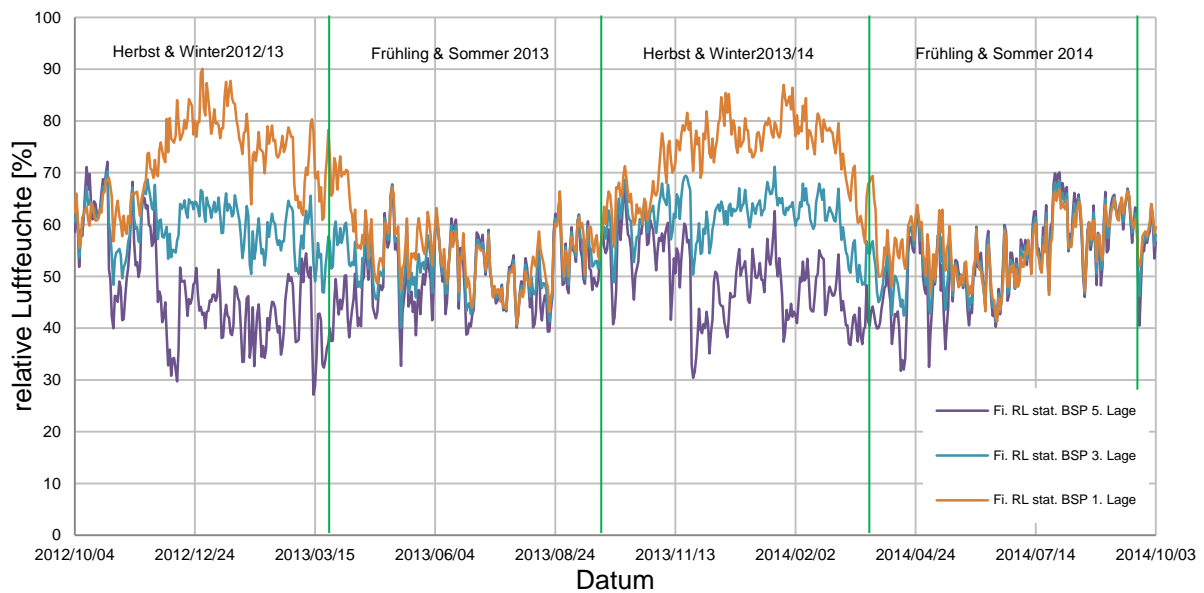


Abbildung 11.10: relative Luftfeuchte stationär Fichte BSP

Temperatur und relative Luftfeuchte

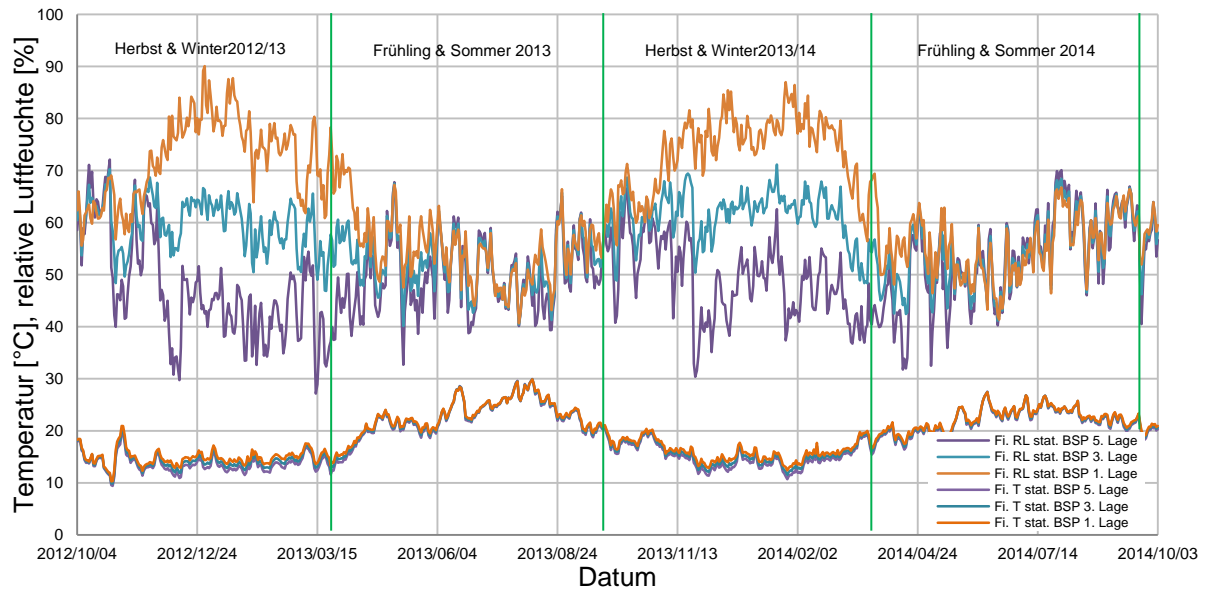


Abbildung 11.11: Temperatur stationär und relative Luftfeuchte stationär Fichte BSP

Birke

Temperatur

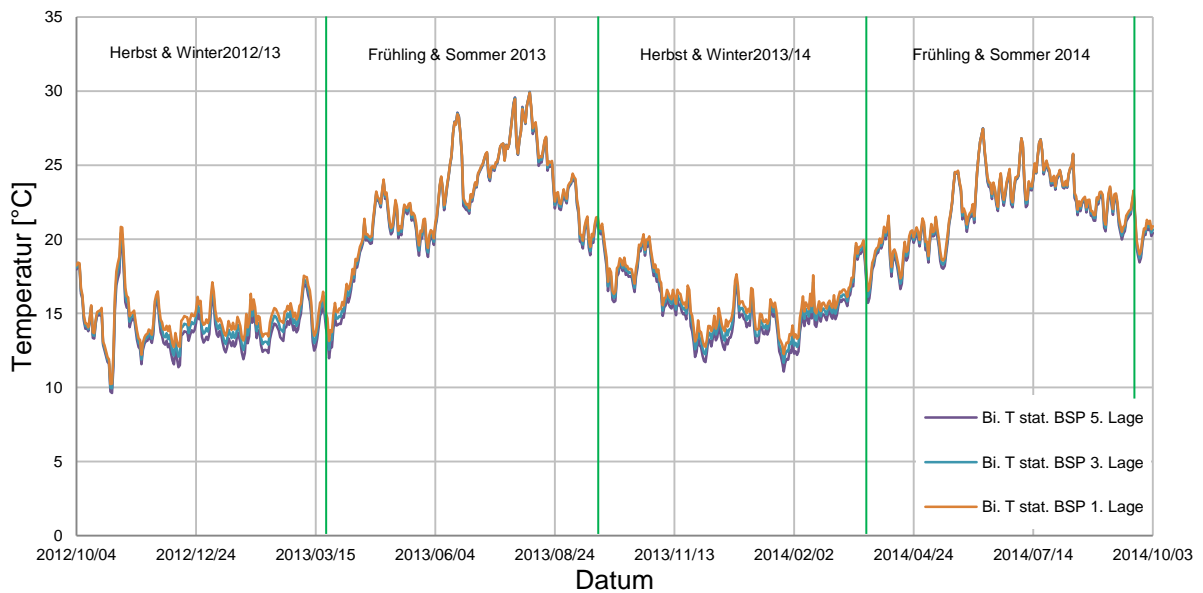


Abbildung 11.12: Temperatur stationär Birke BSP

relative Luftfeuchte

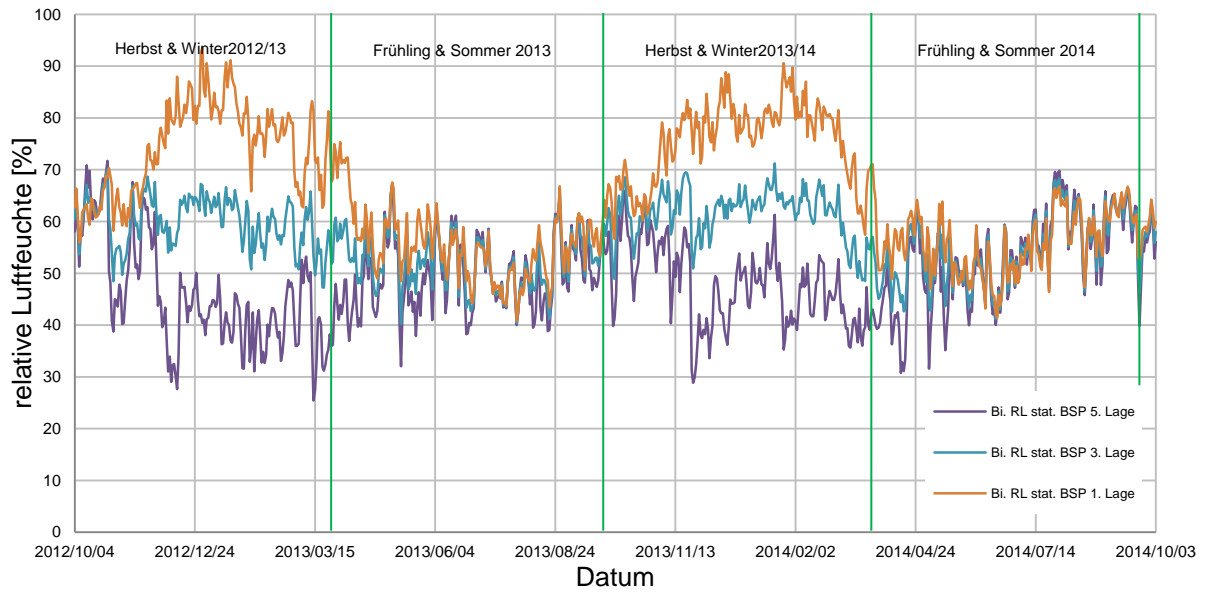


Abbildung 11.13: relative Luftfeuchte stationär Birke BSP

Temperatur und relative Luftfeuchte

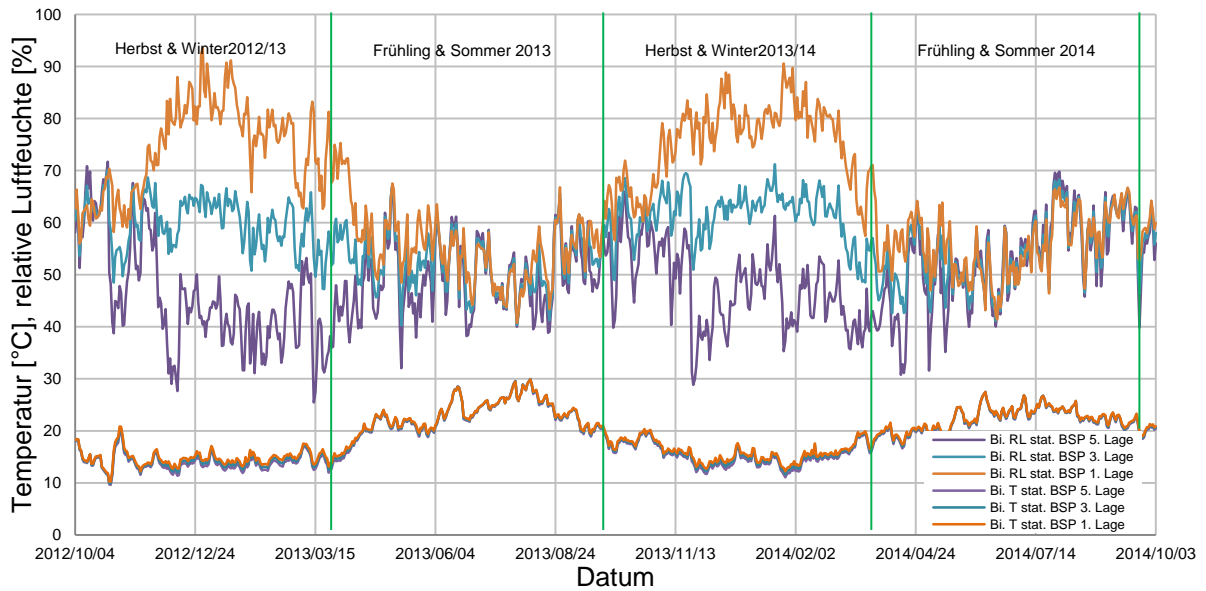


Abbildung 11.14: Temperatur stationär und relative Luftfeuchte stationär Birke BSP

B-3 Messstellen innen

Fichte

Temperatur

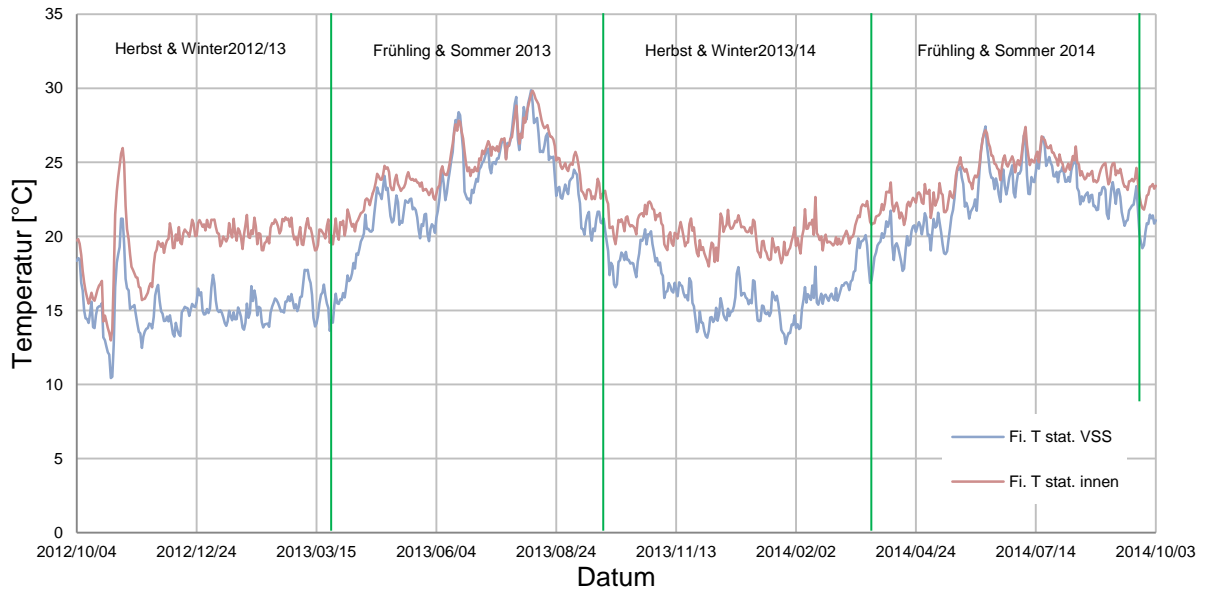


Abbildung 11.15: Temperatur stationär Fichte innen

relative Luftfeuchte

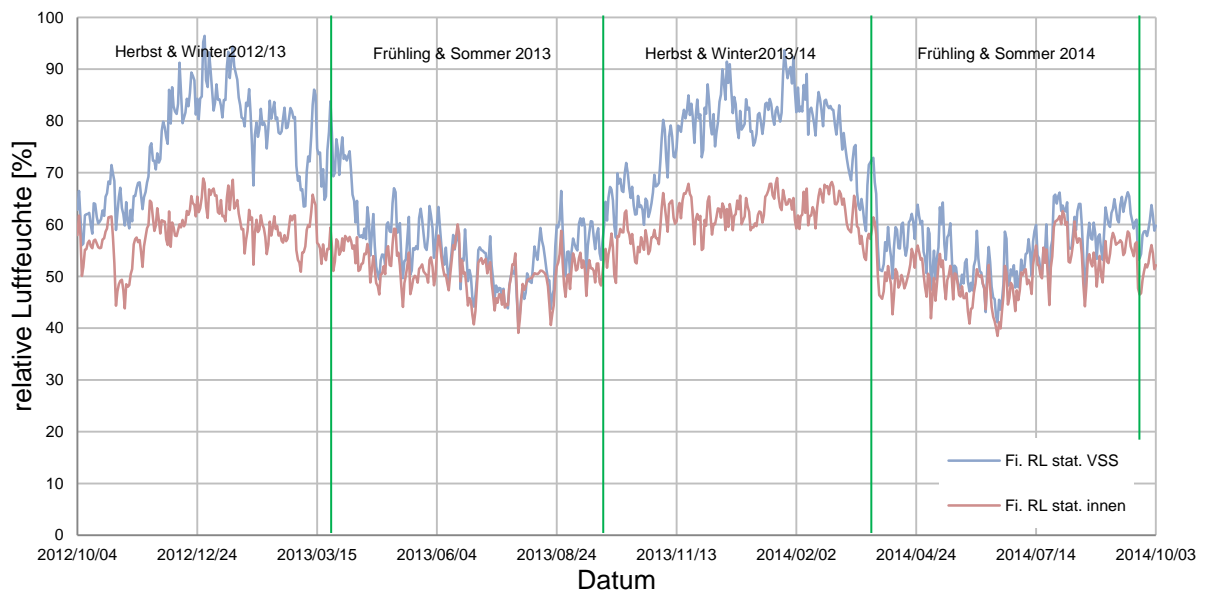
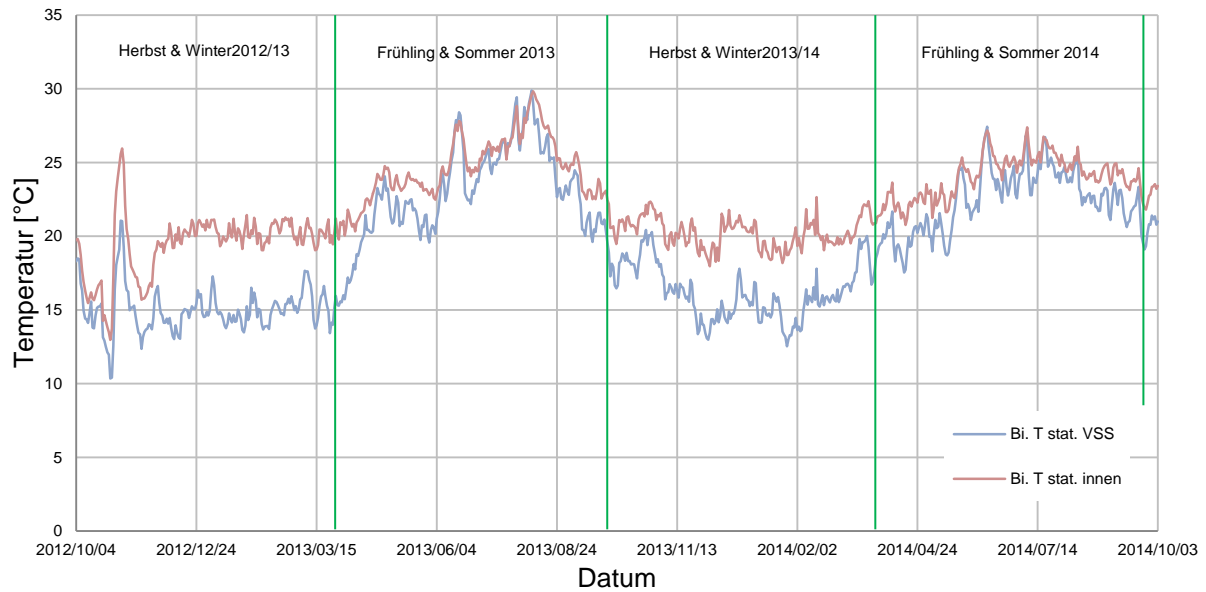


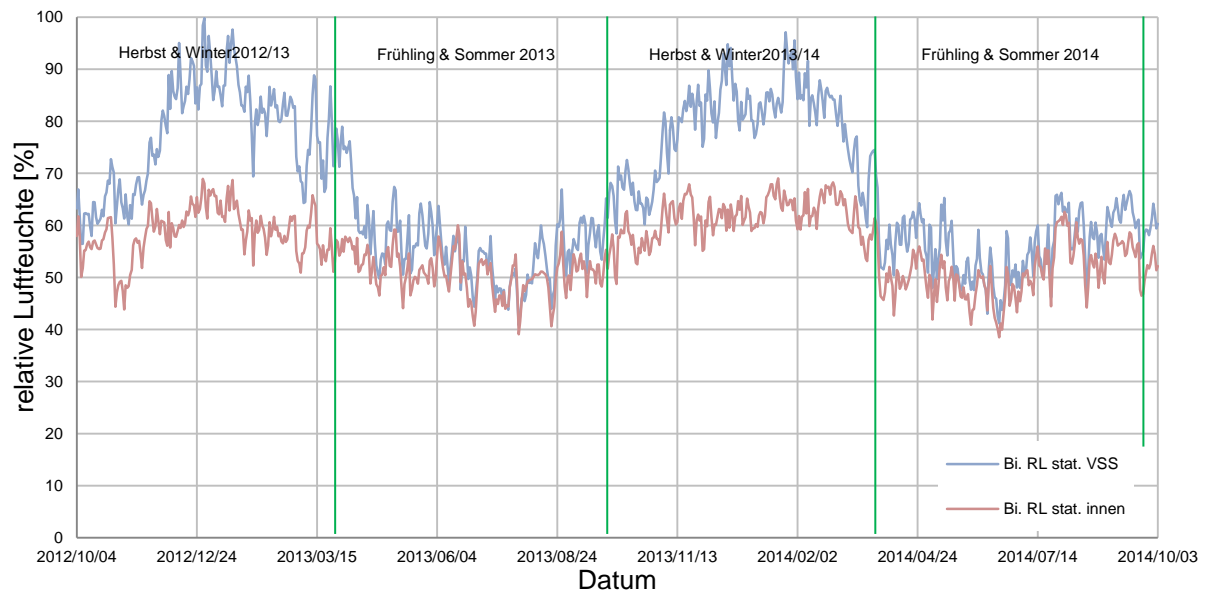
Abbildung 11.16: relative Luftfeuchte stationär Fichte innen

Birke

Temperatur


Abbildung 11.17: Temperatur stationär Birke innen

relative Luftfeuchte


Abbildung 11.18: relative Luftfeuchte stationär Birke innen

ANHANG C INSTATIONÄRE MODELLIERUNG

C-1 Messstellen außen

Fichte

Temperatur

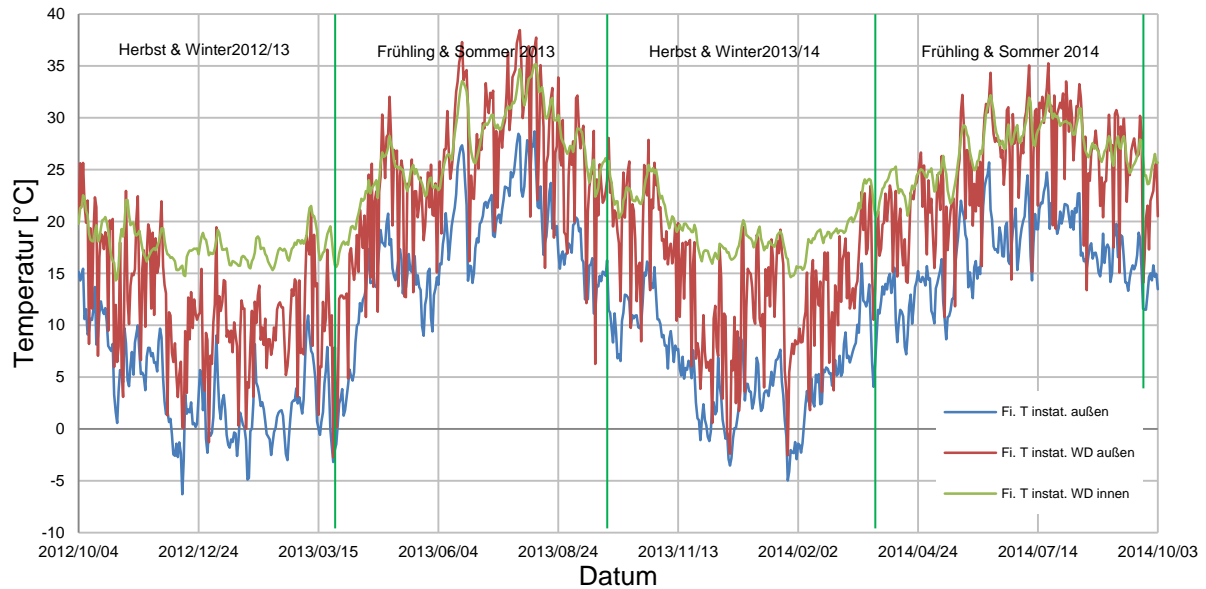


Abbildung 11.19: Temperatur instationär Fichte außen

relative Luftfeuchte

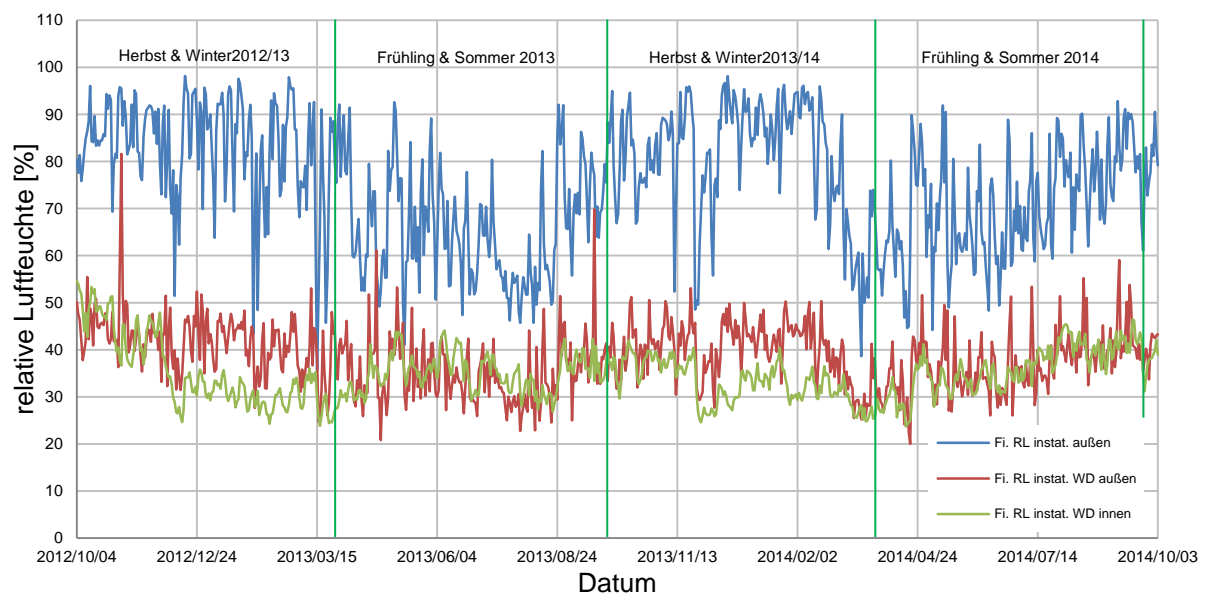


Abbildung 11.20: relative Luftfeuchte instationär Fichte außen

Birke

Temperatur

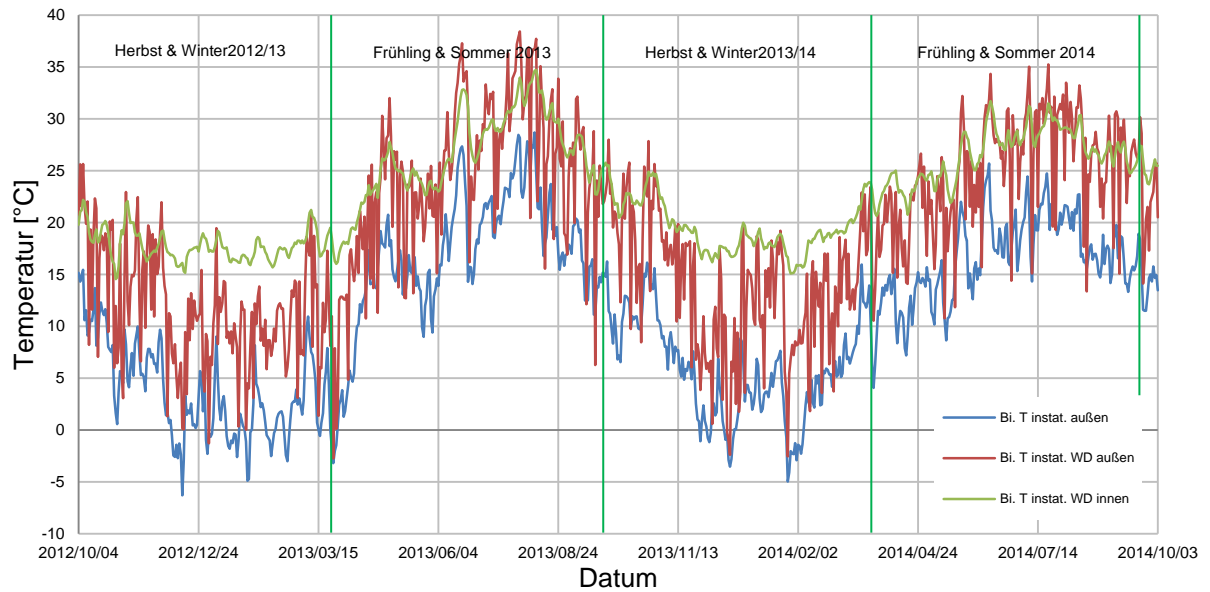


Abbildung 11.21: Temperatur instationär Birke außen

relative Luftfeuchte

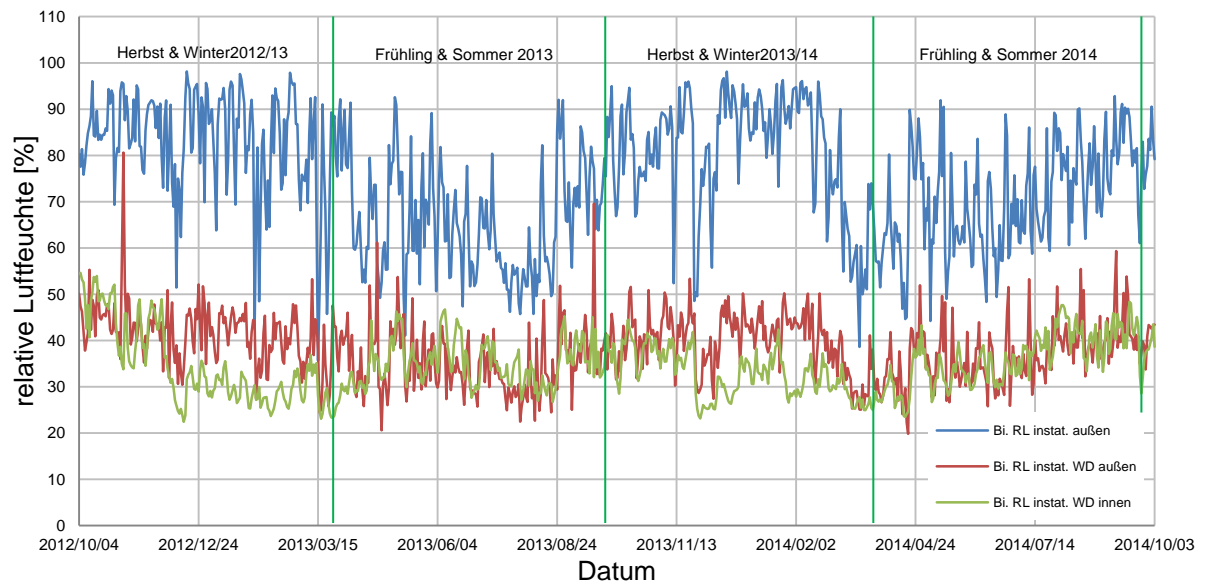


Abbildung 11.22: relative Luftfeuchte instationär Birke außen

C-2 Messstellen BSP

Fichte

Temperatur

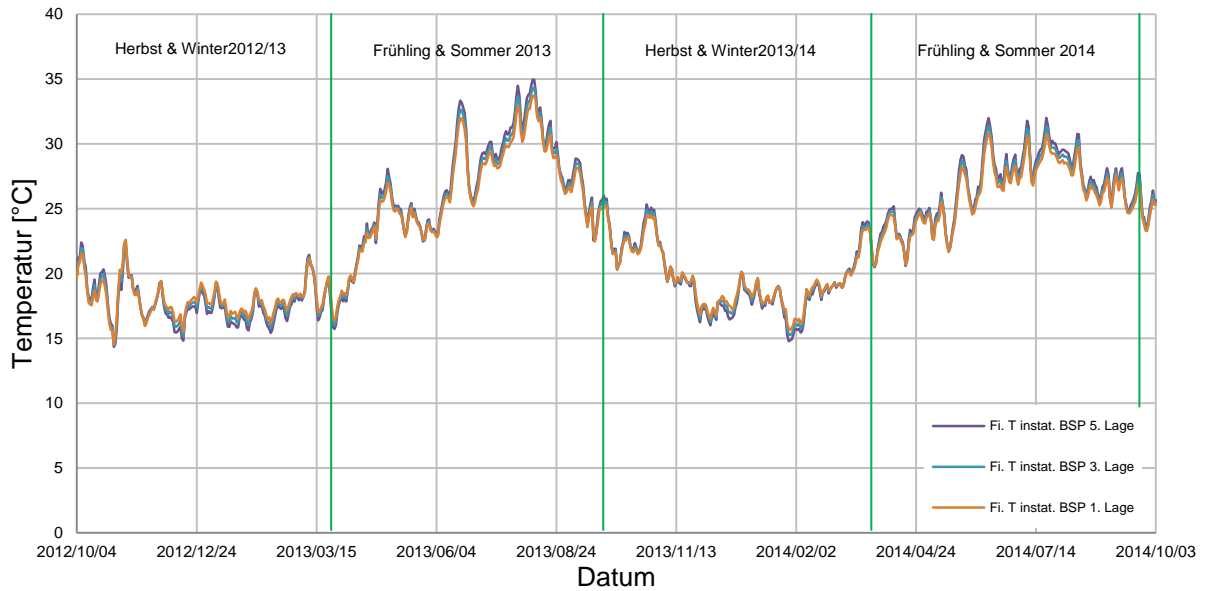


Abbildung 11.23: Temperatur instationär Fichte BSP

relative Luftfeuchte

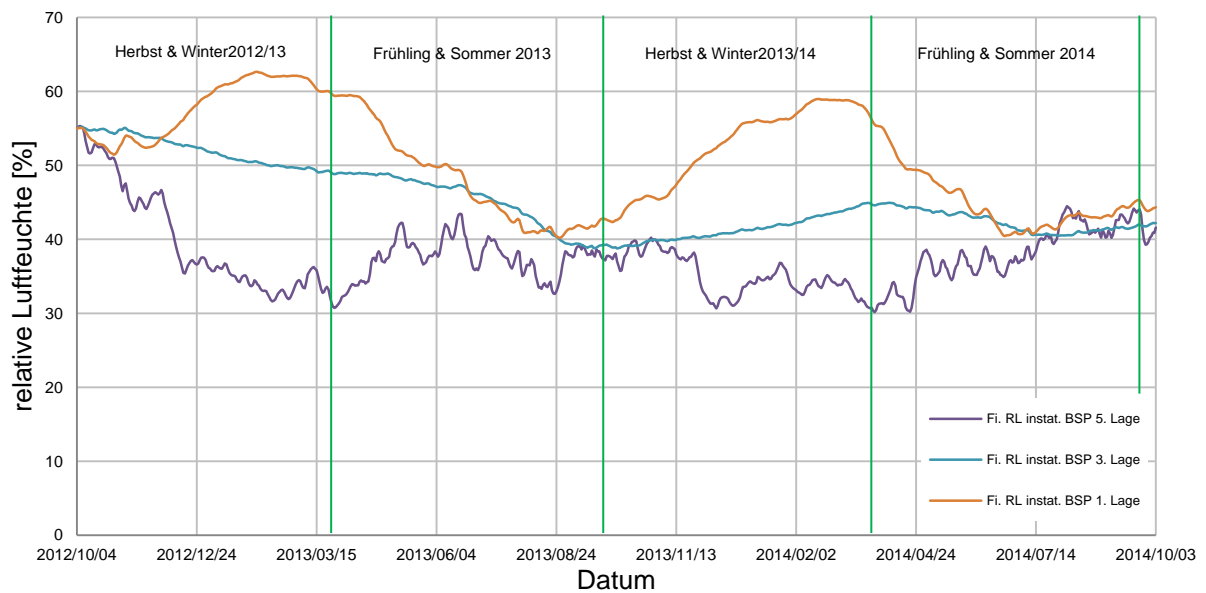


Abbildung 11.24: relative Luftfeuchte instationär Fichte BSP

Temperatur und relative Luftfeuchte

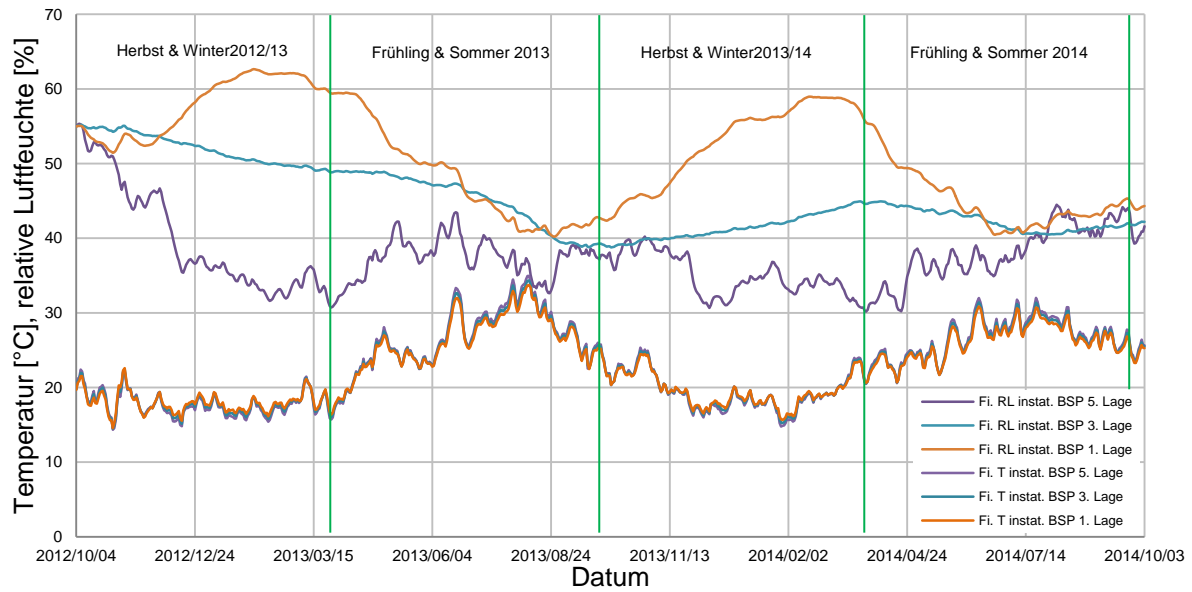


Abbildung 11.25: Temperatur instationär und relative Luftfeuchte instationär Fichte BSP

Birke

Temperatur

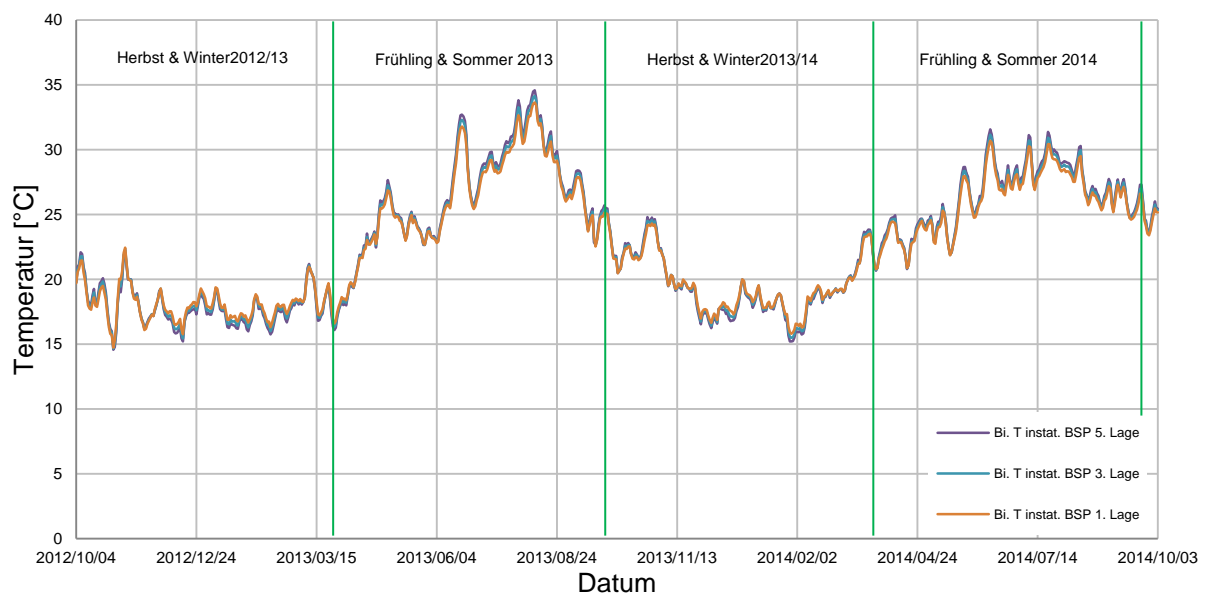


Abbildung 11.26: Temperatur instationär Birke BSP

relative Luftfeuchte

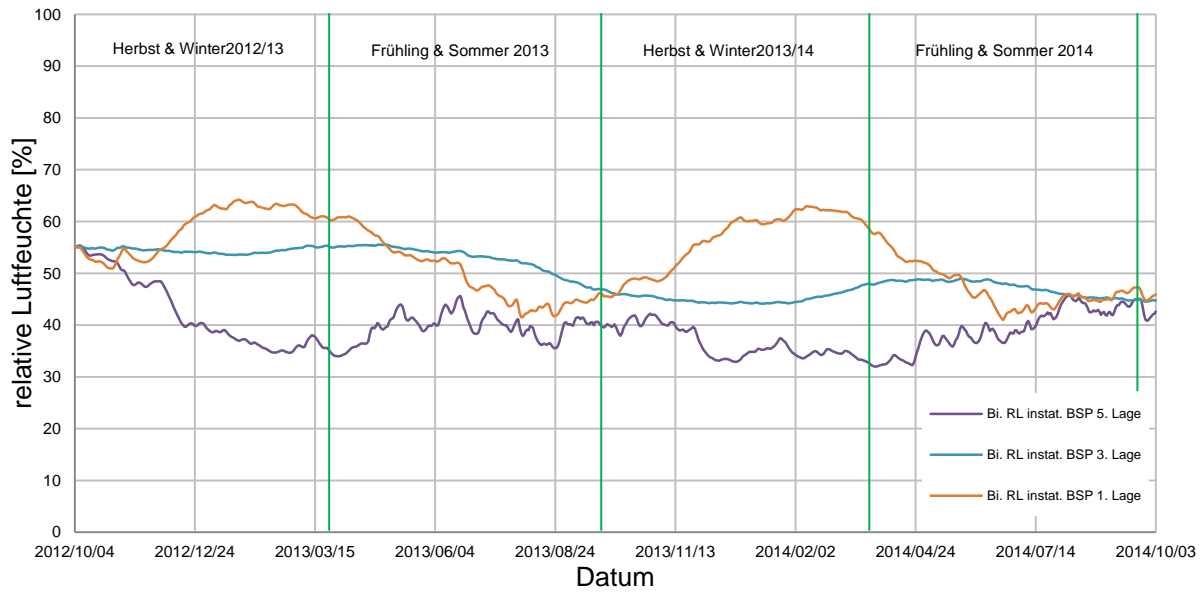


Abbildung 11.27: relative Luftfeuchte instationär Birke BSP

Temperatur und relative Luftfeuchte

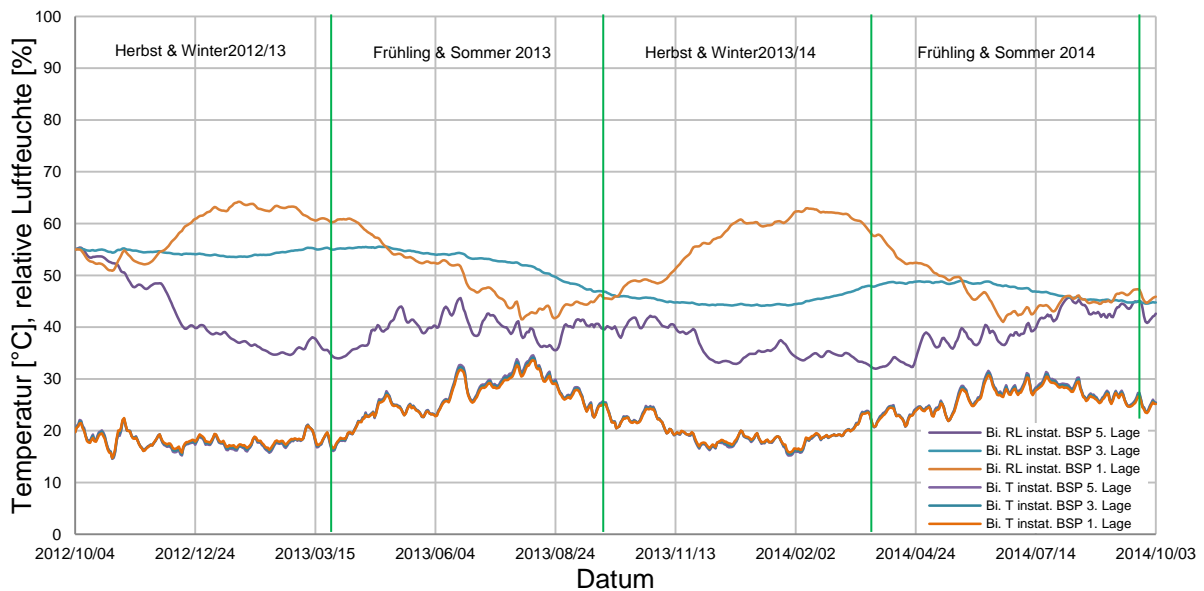


Abbildung 11.28: Temperatur instationär und relative Luftfeuchte instationär Birke BSP

C-3 Messstellen innen

Fichte

Temperatur

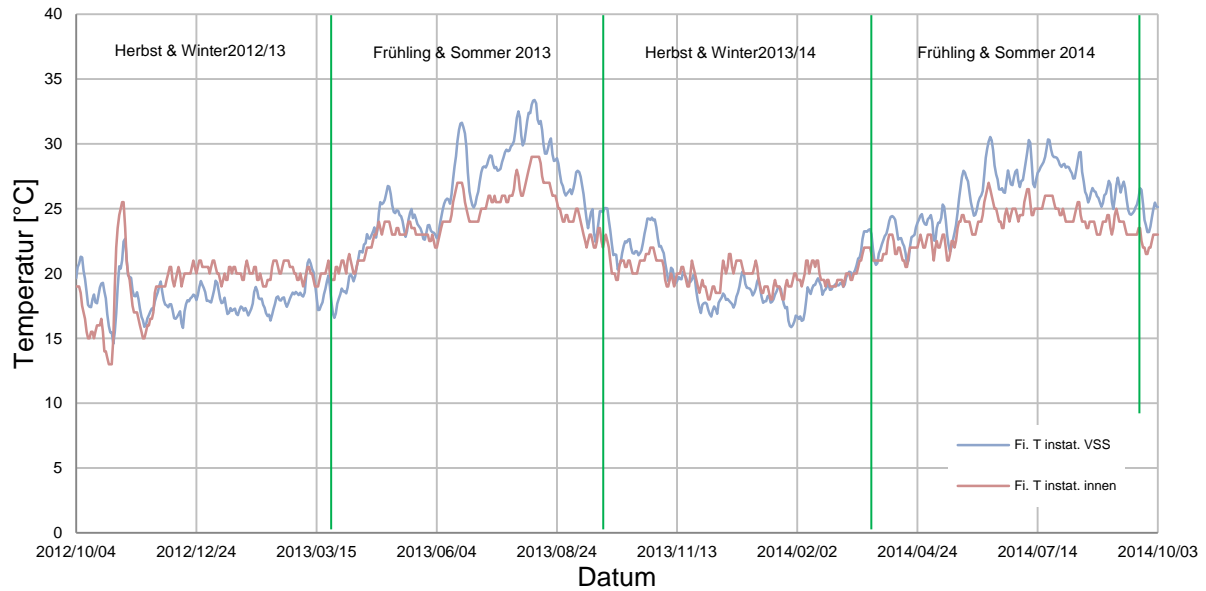


Abbildung 11.29: Temperatur instationär Fichte innen

relative Luftfeuchte

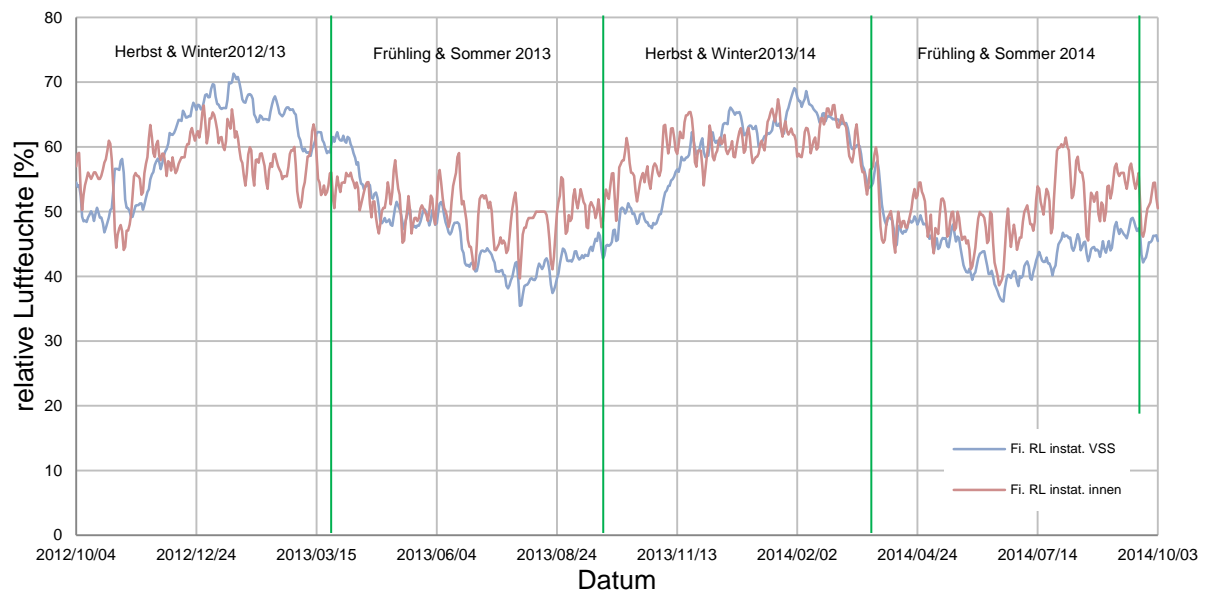


Abbildung 11.30: relative Luftfeuchte instationär Fichte innen

Birke

Temperatur

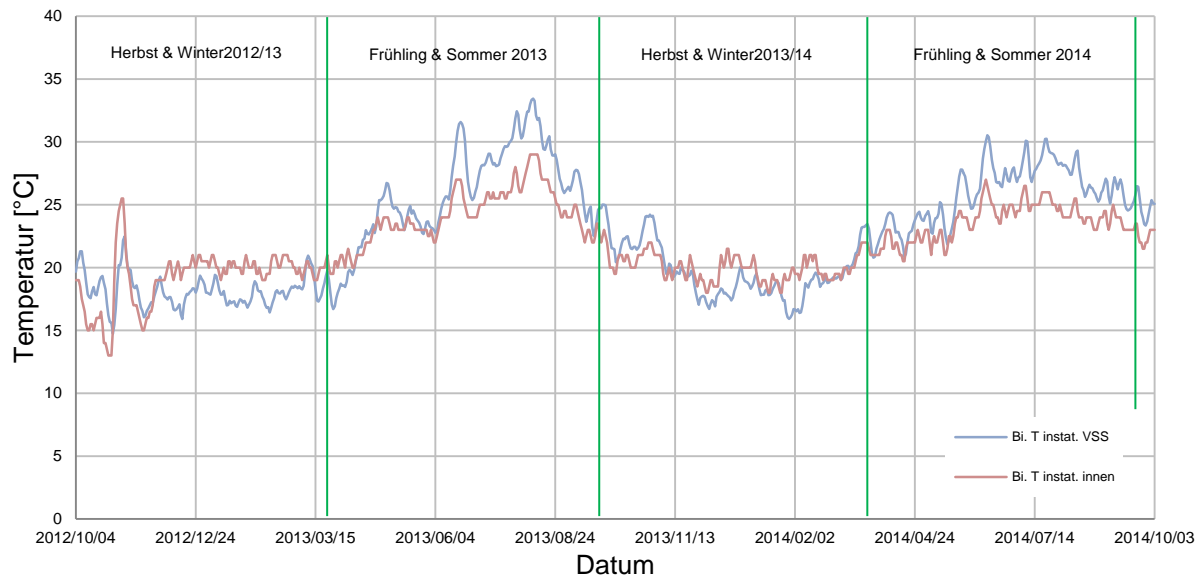


Abbildung 11.31: Temperatur instationär Birke innen

relative Luftfeuchte

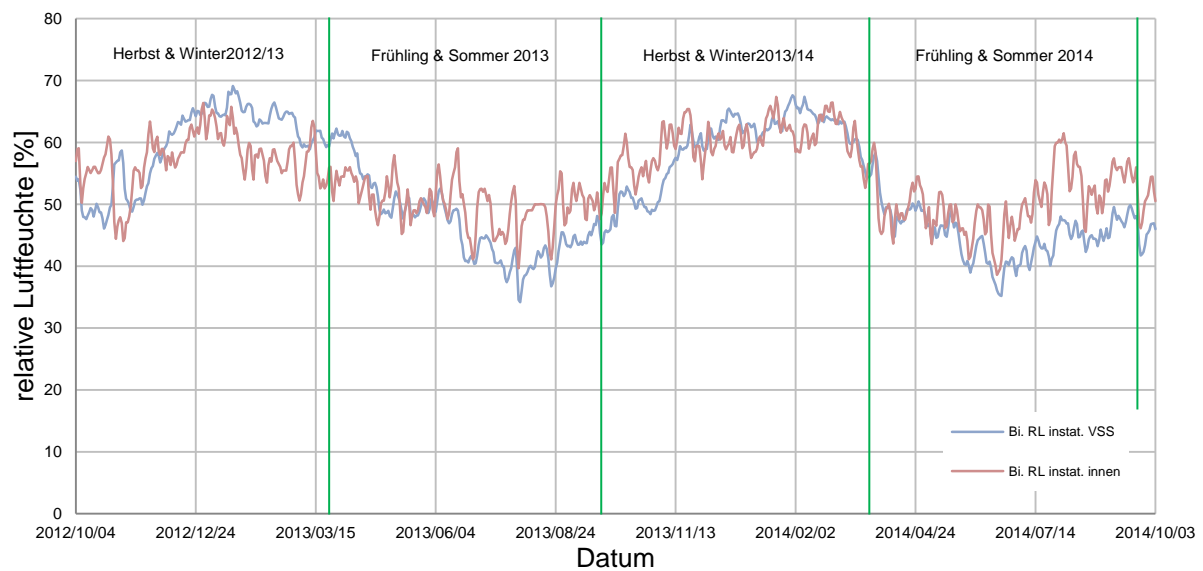


Abbildung 11.32: relative Luftfeuchte instationär Birke innen

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl