FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 2962

Andreas Gamper, Philipp Dietsch, Michael Merk

Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2962

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9518-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Schlussbericht für das Forschungsvorhaben:

Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen

Forschungsstelle:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Arcisstraße 21
80333 München

Projektbearbeitung:

Andreas Gamper M.Sc.
Dr.-Ing. Philipp Dietsch
Dipl.-Ing. Michael Merk

unterstützt durch:

Scanntronik Mugrauer GmbH, Parkstraße 38, 85604 Zorneding.
Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Elfriede-Stremmel-Straße 69, 42369 Wuppertal.
Wiehag GmbH, Linzer Straße 24,4950 Altheim, Österreich.
bauart Konstruktions GmbH + Co. KG, Spessartstraße 13, 36341 Lauterbach.
Konstruktionsgruppe Bauen Kempten AG, Bahnhofplatz 1, 87435 Kempten.
IngPunkt Ingenieurgesellschaft für das Bauwesen mbH, Heilig-Kreuz-Straße 24, 86152 Augsburg.
BBI Bauer beratende Ingenieure GmbH, Liebigstrasse 3, 84030 Landshut.
Dr. Linse Ingenieure GmbH, Karlstraße 46, 80333 München.
Dr. Schütz Ingenieure, An der Stadtmauer 13, 87435 Kempten.
Häussler Ingenieure GmbH, Mozartstraße 12, 87435 Kempten.

gefördert von:

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmanns Aue 31-37
52179 Bonn

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7- 12.22 / II 3-F20-11-1-026)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München. 31. August 2014

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6

1.1 Anlass und Zielsetzung 6

1.2 Projektbeteiligte Expertengruppe 8

1.3 Termine Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ 8

1.4 Termine Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ 8

1.5 Danksagungen 8

2 Holz und das Verhalten gegenüber Feuchte 9

2.1 Grundlagen der Holzfeuchte 9

2.2 Feuchteaufnahme und -abgabe von Holz 12

2.2.1 Kapillarwirkung 12

2.2.2 Diffusion 12

2.2.3 Feuchtetransport durch Sorption 12

2.3 Formänderungen von Holz durch Feuchtigkeit 15

2.4 Feuchtegradienten und ihre Auswirkungen 16

2.4.1 Feuchtegradienten 16

2.4.2 Rissbildung durch Feuchtegradienten 19

2.4.3 Einfluss der Rissbildung auf die Beanspruchbarkeit von Holz 20

3 Feuchtebeanspruchung von Brettschichtholz 21

3.1 Allgemeines 21

3.2 Nutzungsklassen 22

3.3 Ausgleichsfeuchte 23

3.4 Bedeutung der Einteilung typischer Gebäudenutzungen in Nutzungsklassen 23

3.5 Berücksichtigung der klimatischen Randbedingungen in den Bemessungsnormen 24

4 Darstellung der Nutzungskategorien und Gebäudeauswahl 26

4.1 Vorabbemerkung 26

4.2 Auswahl der Nutzungen und Gebäudetypen im Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ 26

4.2.1 Allgemeines 26

4.2.2 Kategorie A – Schwimmhallen 27

4.2.3 Kategorie B – Eissporthallen 28

4.2.4 Kategorie C – Reithallen 29

4.2.5 Kategorie D – Sporthallen 30

4.2.6 Kategorie E – Produktions- und Verkaufshallen 31

4.2.7 Kategorie F – Landwirtschaftliche Hallen 31

4.2.8 Kategorie G – Lagerhallen 32

4.3 Auswahl der Nutzungen und Gebäudetypen im Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ 33

4.4 Vorstellung der gewählten Hallen für die beiden Forschungsvorhaben 35

4.4.1 Allgemeines 35

4.4.2 Begründung der für das Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ gewählten Hallen 37

5 Langzeitmessung von Holzfeuchtegradienten und Umgebungsbedingungen 39

5.1 Wahl des Messverfahrens 39

5.2 Beschreibung des gewählten Messverfahrens - Widerstandsmessverfahren 40

5.3 Beschreibung der Messvorrichtung für das Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ 42

5.4 Kalibrierung der Messtechnik 45

5.5 Kalibrierung der Klimasensoren für das Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ 47

5.6 Anpassung der Messtechnik für das Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ 47

5.7 Temperaturkompensation der Messwerte 50

5.8 Weiterführende Untersuchungen zur Validierung der Temperaturkompensation 56

5.8.1 Allgemeines 56

5.8.2 Untersuchungen zur Ermittlung der Materialtemperatur 56

5.8.3 Untersuchungen zur Validierung des verwendeten Modells zur Temperaturkompensation 59

5.8.4 Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Validierung der Temperaturkompensation 61

5.9 Auswertung der Messwerte der einzelnen Objekte 63

6 Ergebnisse der Langzeitmessungen 65

6.1 Vorabbemerkung 65

6.2 Darstellung der Ergebnisse aus den Langzeitmessungen 65

6.2.1 Verlauf der Holzfeuchte und des Hallenklimas 65

6.2.2 Resultierende Querschnittsverläufe 67

6.3 Ergebnisse und Anmerkungen zu den untersuchten Nutzungsarten 69

6.3.1 Allgemeines 69

6.3.2 Kategorie A – Schwimmhallen 70

6.3.3 Kategorie B – Eissporthallen 71

6.3.4 Kategorie C – Reithallen 73

6.3.5 Kategorie D – Sporthallen 74

6.3.6 Kategorie E – Produktions- und Verkaufshallen 75

6.3.7 Kategorie F – Landwirtschaftliche Hallen 76

6.3.8 Kategorie G – Lagerhallen 78

7 Schlussfolgerungen und Ausblick 80

7.1 Schlussfolgerungen 80

7.1.1 Allgemein 80

7.1.2 Schlussfolgerungen zur Langzeitmessung von Hallenklima und Holzfeuchtegradiente 80

7.1.3 Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen 81

7.1.4 Empfehlungen für die Praxis 84

7.2 Ausblick 87

Literaturverzeichnis 89

Abbildungsverzeichnis 96

Tabellenverzeichnis 100

1 Einleitung

1.1 Anlass und Zielsetzung

Die Reaktion von Holz gegenüber Feuchtigkeit ist integraler Bestandteil jeder Auseinandersetzung mit diesem natürlichen Rohstoff. Aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaft passt Holz seine Materialfeuchte ständig den gegebenen Umgebungsbedingungen an. Die in der Praxis auftretenden Größen und Verteilungen der Feuchte in Holzbauteilen können in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen stark variieren. Den damit verbundenen Schwind- und Quellvorgängen in den Holzbauteilen wird ein wesentlicher Anteil an der Entstehung ausgeprägter Rissbildungen in den Klebfugen und Lamellen von Brettschichtholzbauteilen zugesprochen. Klimatisch bedingte Rissbildungen repräsentieren mit einem Anteil von über 50 % das überwiegend festgestellte Schadensbild bei weitgespannten Holztragwerken. Ein wesentlicher Anteil an der Entstehung dieser Schäden wird der jahreszeitlichen und nutzungsbedingten, starken klimatischen Schwankung innerhalb von großvolumigen Gebäuden zugesprochen. In der Fachwelt herrschen dabei noch unterschiedliche Auffassungen, welche Gebäudetypen und Nutzungsarten zu den höchsten klimatischen Beanspruchungen führen und damit das größte Gefährdungspotential für die Entstehung von Schäden durch Risse in Brettschichtholzbauteilen ergeben.

Um die Fragestellung zu klären, welche Gebäudetypen und Nutzungsarten zu den höchsten klimatischen Beanspruchungen führen, wurde 2010 das Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen“ (Gamper, Dietsch, Merk, & Winter, 2013) begonnen. Dabei wurden Feuchteverteilungen in tragenden Holzbauteilen ermittelt, die sich in Gebäuden verschiedenster Nutzung mit daraus resultierenden unterschiedlichen Umgebungsbedingungen befinden. Gleichzeitig wurden Klimadaten wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Oberflächentemperatur der Querschnitte ermittelt, um Rückschlüsse auf die Größe und Geschwindigkeit der Anpassung der Feuchteverteilung im hygroskopischen Baustoff Holz an sich ändernde Umgebungsbedingungen zu erhalten. Bei einigen holzbautypischen Nutzungen, wie z.B. Reithallen, Lagerhallen oder landwirtschaftlichen Hallen, zeigt sich eine starke Beeinflussung des Innenraumklimas durch das Außenklima.

Ziel eines im Anschluss an das erste Forschungsvorhaben begonnene, weiterführende Folgevorhaben war dementsprechend die Fortführung der Langzeitmessungen von klimatischer Beanspruchung und resultierender Holzfeuchtegradiente an ausgewählten Messobjekten mit stark schwankenden Umgebungsbedingungen zur Verifizierung der bisher gewonnenen Messergebnisse im ersten Forschungsvorhaben. Von besonderem Interesse ist dabei die weitere Steigerung der Qualität der Messergebnisse durch Anpassung der Messtechnik an bis dahin gewonnene Erkenntnisse. Getroffene Annahmen bei der Auswertung der bisherigen Ergebnisse sollten durch Werte aus Messungen der entsprechenden Parameter ersetzt werden. Die Aufbereitung der Datensätze soll validiert und das erarbeitete Auswertungsprogramm gegebenenfalls angepasst werden.

Dieser Forschungsbericht führt die Ergebnisse des ersten Forschungsvorhabens und des darauf folgenden, eng verknüpften Forschungsvorhaben in einem Dokument zusammen. Die im Bericht dargestellten Ergebnisse ermöglichen fundierte Aussagen zum Verlauf der Holzfeuchte in Brettschichtholzbauteilen. Diese wiederum lassen präzisere Aussagen hinsichtlich einer potenziellen Rissentstehung an Holzkonstruktionen in Gebäudetypen mit kritischen Umgebungsbedingungen sowie die Definition möglicher Gegenmaßnahmen zu.

1.2 Projektbeteiligte Expertengruppe

Forschung:	Univ.-Prof. i.R. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger; Extraordinarius des Fachgebiet Holzbau Technische Universität München
Industrie (Hersteller Messtechnik):	Dipl.-Ing. Thomas Mugrauer; Scanntronik Mugrauer GmbH
Praxis (Ingenieurbüro):	Dipl.-Ing. (Univ.) Norbert Nieder; Konstruktionsgruppe Bauen Kempten AG
	Dipl.-Ing. (Univ.) Markus Bernhard IngPunkt Ingenieurgesellschaft für das Bauwesen mbH
Öffentliche Mittelgeber:	Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Michael Simon, Dipl.-Ing. Andreas Windisch; Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB in Stuttgart im Auftrag vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung BBR in Bonn

1.3 Termine Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“

1. Arbeitsgruppentreffen: 29. Juli 2010 - Seminarraum des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion, TUM.
2. Arbeitsgruppentreffen: 06. Dezember 2011 - Fakultätszimmer der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, TUM.

1.4 Termine Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“

1. Arbeitsgruppentreffen 18. September 2013 - Seminarraum des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion, TUM.

2. Arbeitsgruppentreffen: 10. Juli 2014 – Vorhölzer Forum der Technischen Universität München.

1.5 Danksagungen

An dieser Stelle sei allen Hallenbetreibern, Objektbesitzern und zuständigen Personen dafür gedankt, dass sie ihre Gebäude für die Langzeitmessungen zur Verfügung gestellt haben. Ohne ihre Unterstützung wäre die Durchführung dieser Forschungsvorhaben nicht möglich gewesen.

Den wissenschaftlichen Hilfskräften Michael Kraus, Manuel Waidelich, Daniel Bernhardt, Christian Laimer, Martin Oberhauser, Stephanie Riedler und Astrid Indefrey sei für ihre Hilfe bei der Installation der Messtechnik und ihre Zuarbeit beim Auslesen und Auswerten der Messdaten gedankt.

2 Holz und das Verhalten gegenüber Feuchte

2.1 Grundlagen der Holzfeuchte

Holz zeichnet sich durch seine hygroskopischen Eigenschaften aus. Aufgrund seines kapillarporösen Aufbaus und seines hohen Porenanteils hat Holz eine sehr große innere Oberfläche. Dadurch bedingt kann Holz – wie alle porösen Stoffe – Wasser aus der Luft absorbieren und in den Zellwänden speichern. Darüber hinaus kann Holz flüssiges Wasser durch kapillare Transportprozesse direkt aufnehmen (Niemz, 2005).

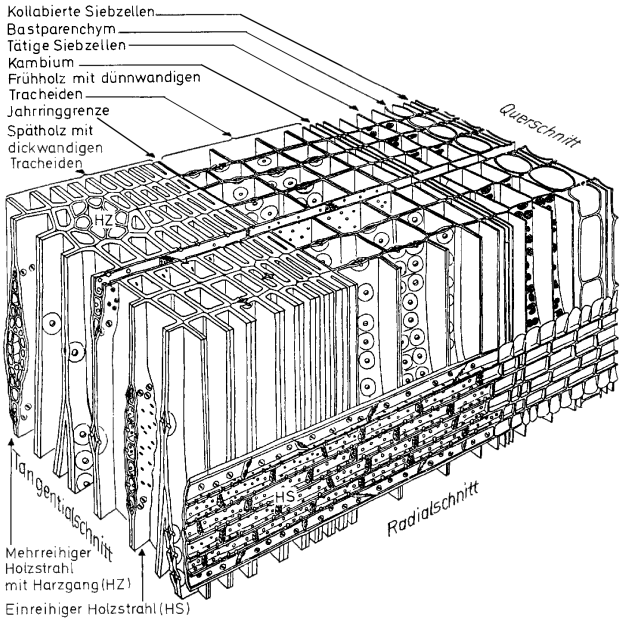


Abbildung 1: Aufbau von Nadelholz. Aus (Grosser, 1977);

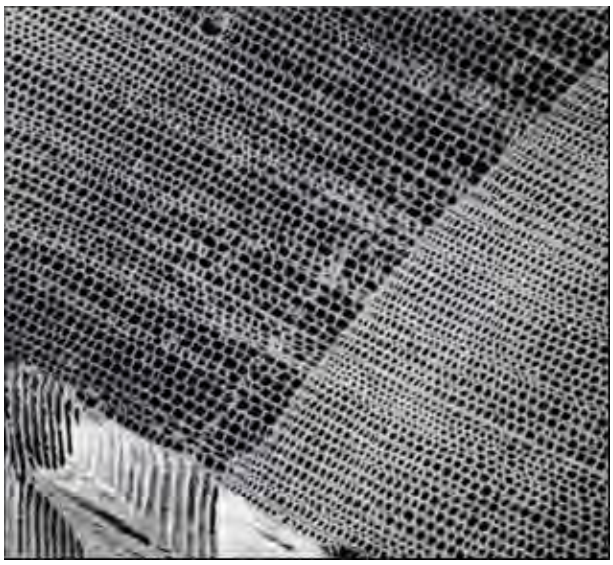


Abbildung 2: Übergang Früh- zu Spätholz bei Nadelholz. Aus (Lohmann, 2003)

In Abhängigkeit der klimatischen Umgebungsbedingungen beinhaltet Holz in seiner Zellstruktur immer eine gewisse Menge Wasser. Das Gewicht dieses Wasseranteils, bezogen auf das Gewicht des Holzes im absolut trockenen Zustand, wird Holzfeuchte *u* genannt und in Prozent angegeben.

$$u = \frac{m_w}{m_{dtr}} \cdot 100 = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100\ [\%]$$

mit

u = Holzfeuchte [%]
m_w = Masse des enthaltenen Wassers [g]
m_u = Masse des feuchten Holzes [g]
m_{dtr} = Masse des darrtrockenen Holzes [g]

In Abhängigkeit der Holzfeuchte werden zwei verschiedene Bereiche mit drei Grenzzuständen unterschieden (vgl. Abbildung 3):

- ① Wassersättigung (Grenzzustand): Die Zellwände und die Zellhohlräume des Holzes sind maximal mit Wasser gefüllt.
  Holzfeuchte > 100%
- ② Kapillarer Bereich: Durch Änderung des Wassergehaltes in den Zellhohlräumen (freies Wasser) schwindet oder quillt das Holz nicht, da die Fasern gesättigt bleiben und so keine Volumenänderung erfahren. Die Eigenschaften des Holzes sind weitestgehend unabhängig von der kapillaren Holzfeuchte.
  Holzfeuchte > 30%
- ③ Fasersättigungsbereich (Grenzzustand): die gesamten Zellwände des Holzes sind mit Wasser gefüllt, jedoch ist kein Wasser in den Zellhohlräumen vorhanden.
  Holzfeuchte ~ 30%
- ④ Hygroskopischer Bereich: Die Fasern sind nicht mehr gesättigt, es befindet sich nur noch gebundenes Wasser in den Zellwänden. Durch Änderung des Wassergehaltes in den Zellwänden bei Feuchteabgabe bzw. -aufnahme schwindet bzw. quillt das Holz. Die Eigenschaften des Holzes sind abhängig von der Holzfeuchte.
  Holzfeuchte < 30%
- ⑤ Darrtrockenes Holz (Grenzzustand): das Holz ist absolut trocken und es ist keinerlei Wasser vorhanden.
  Holzfeuchte = 0%

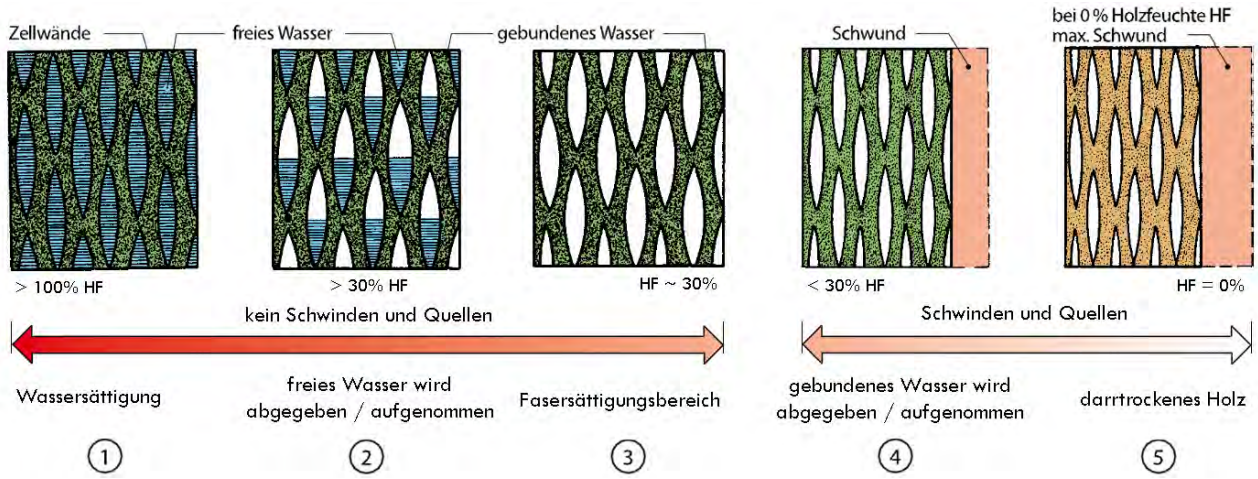


Abbildung 3: Wasserabgabe und -aufnahme des Holzes. Nach (Nutsch, 2007)

Im hygroskopischen Bereich unterhalb des Fasersättigungspunktes, der für die meisten Holzarten zwischen 25% und 35% liegt, treten bei Änderung der Holzfeuchte Form- und Volumenänderung des Querschnittes in Form von Schwinden und Quellen auf.

Der Fasersättigungspunkt ist zudem von Bedeutung, da unterhalb dieses Punktes bedeutende Änderungen nahezu aller physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes auftreten. Über dem Fasersättigungspunkt sind die meisten Eigenschaften annähernd konstant.

Der Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Holzeigenschaften begründet sich durch den strukturellen Aufbau des Holzes und macht sich wie folgt bemerkbar. Mit zunehmender Feuchtigkeit:

- sinkt die Festigkeit des Holzes
- steigt die Kriechverformung von Holz bei Langzeitbelastung
- steigt die Wärmeleitzahl des Holzes
- steigt die Anfälligkeit für Pilzbefall des Holzes, vor allem über 20% Holzfeuchte.

Der Grund für die Abnahme der Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte sind die Wasserstoffbindungen zwischen den Zellulosefasern im Holz, die mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt gelockert werden (Hoffmeyer, 1995).

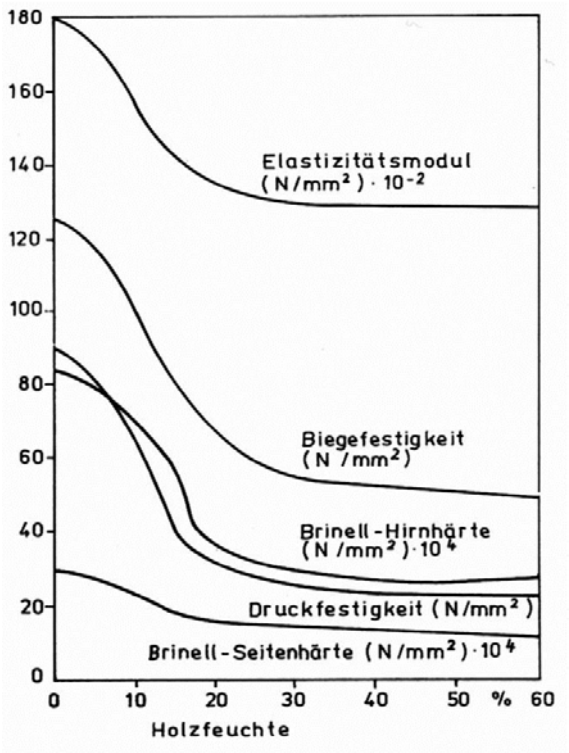


Abbildung 4: Einfluss der Holzfeuchte auf ausgewählte Eigenschaften des Holzes. Nach (Kollmann, 1951)

2.2 Feuchteaufnahme und -abgabe von Holz

2.2.1 Kapillarwirkung

Die Aufnahme von tropfbarem Wasser erfolgt über die Kapillaren im Makrosystem von Holz. Baupraktisch kann solch tropfbares Wasser immer dann auftreten, wenn Holzbauteile dem Schlagregen ausgesetzt sind oder wenn an Bauteilen in überdachten Gebäuden aufgrund von Temperaturen unterhalb des Taupunktes Kondensat an der Holzoberfläche ausfällt.

2.2.2 Diffusion

Unterhalb des Fasersättigungsbereiches ist die Diffusion der maßgebende Transportmechanismus für Feuchte. Im Holz ist für den Trocknungsvorgang hauptsächlich die Gas- bzw. Dampfdiffusion maßgebend. Dabei wandern die Wassermoleküle von Stellen größerer Konzentration zu den Stellen kleinerer Konzentration. Die Ursache und treibende Kraft für diese Teilchenbewegung sind dementsprechend die Feuchte-, Feuchtekonzentrations- und Dampfdruckunterschiede.

2.2.3 Feuchtetransport durch Sorption

Wird darrtrockenes Holz unter normalem Raumklima gelagert, so stellt sich im Material wegen der im Vergleich zur vorhandenen Holzfeuchte größeren Umgebungsfeuchte, ein Feuchtigkeitsgefälle ein. So nimmt das Holz Feuchtigkeit aus der Luft auf, indem Wasserdampf durch Diffusion in das Holz eindringt und sich die Wassermoleküle als gebundenes Wasser an den Innenoberflächen der Holzzellen ablagern. Diese Erscheinung wird Absorption genannt. Nimmt die relative Luftfeuchte geringere Werte an als die vorhandene Holzfeuchte im Material, so diffundieren die Wassermoleküle zurück in die Umgebungsluft, was auch als Desorption bezeichnet wird (vgl. Abbildung 5).

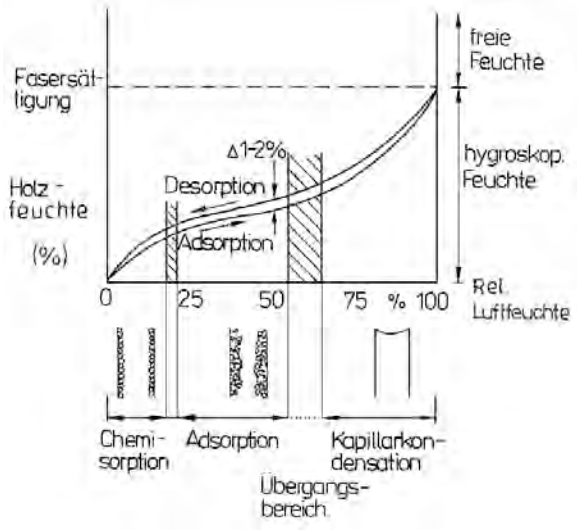


Abbildung 5: Sorptionsisothermen und Bindungsformen des Wassers. Nach (Niemz, 2005)

Da die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme bei Holz im Allgemeinen höher ist als bei der Wasserabgabe sind die typischen S- förmigen Sorptionsisothermen für De- und Adsorption nicht deckungsgleich und bilden eine sogenannte Hysterese (vgl. Abbildung 5).

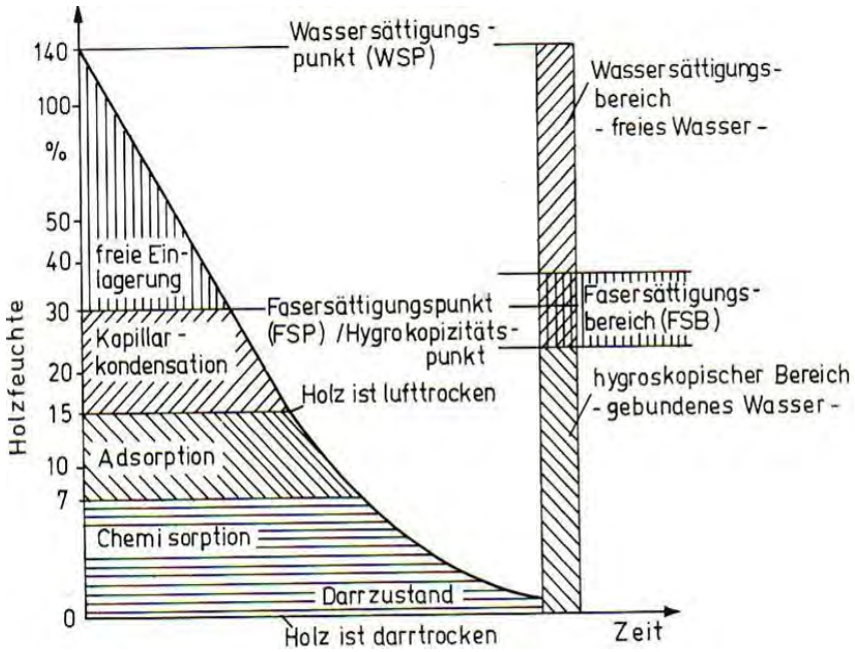


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers in Holz. Aus (Niemz, 2005)

Bei der Sorption von Holz bzw. Holzwerkstoffen unterscheidet man drei Teilprozesse bzw. Phasen die sich teilweise überlagern und von der Holzfeuchte abhängen. Sie gliedern sich nach (Kollmann, 1951) wie folgt (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6):

- Chemisorption: u = 0 ... 6 %
- Adsorption: u = 6 ... 15 %
- Kapillarkondensation: u > 15 % bis Fasersättigungsbereich

Alle drei Phasen der Sorption treten jeweils in einem bestimmten Bereich der relativen Luftfeuchte auf, wobei zwischen den einzelnen Phasen ein Übergangsbereich liegt.

a) Chemisorption:

Feuchtegehalt 0 bis 6 %; relative Luftfeuchte ≤ 20 %)

Innerhalb dieser Phase findet eine Reaktion zwischen den im Holz vorhandenen langen, linearen Zelluloseketten und den Wassermolekülen statt, wodurch sich an den Grenzflächen chemische Verbindungen bilden. Die Wassermoleküle werden über Wasserstoffbrücken fest zwischen die benachbarten Zelluloseketten gebunden und eingelagert, wodurch eine monomolekulare Schicht ausgebildet wird (vgl. Abbildung 5 links).

b) Adsorption:

(Feuchtegehalt 6 bis 15 %; relative Luftfeuchte ≤ 60 %)

Bei der sogenannten Adsorption, lagern sich die Wassermoleküle aufgrund molekularer Anziehungskräfte in den Poren des Mikrosystems ab. Die Anziehung und Bindung der Wassermoleküle erfolgt über van der Waal‘sche und über elektrostatische Kräfte. So kann sich eine polymolekulare Schicht aufbauen (vgl. Abbildung 5 Mitte).

c) Kapillarkondensation:

(Feuchtegehalt >15 % bis Fasersättigungsbereich; relative Luftfeuchte > 60 ... 100 %)

Zwischen einem Holzfeuchtegehalt von ca. 15 % und dem Fasersättigungsbereich findet die weitere Wasserdampfaufnahme durch Kapillarkondensation statt. Dabei kondensiert ein Teil des Wasserdampfes in den Kapillaren und schlägt sich als Flüssigkeit auf der Holzoberfläche des Zellwandsystems nieder. Das hierbei entstandene Kondensat lagert sich mit zunehmendem Feuchtegehalt immer mehr in die intermizellaren und interfibrillaren Hohlräume ein, bis sich die Zellwand nicht mehr weiter ausdehnen kann. Die Fasersättigung ist erreicht, wenn das gesamte Feuchteaufnahmepotential im Mikrosystem des Holzes erschöpft ist. Bei einer weiteren Feuchtebelastung über den Fasersättigungspunkt hinaus wird das Wasser als sogenanntes freies Wasser in den makroskopischen Hohlräumen eingelagert. Da die Zellwände zu diesem Zeitpunkt bereits maximal mit Wasser gesättigt und ausgedehnt sind, kommt es oberhalb des Fasersättigungspunktes zu keinem weiteren Quellen (Siau, 1983).

d) Sorptionsisothermen:

Wird Holz genügend lange in einer Umgebung mit konstanten klimatischen Verhältnissen gelagert, tritt ein Gleichgewichtszustand, die sogenannte Ausgleichfeuchte, ein. Dieser Gleichgewichtsfeuchtegehalt ist nach (Niemz, 2005) unter anderem abhängig von:

- der relativen Luftfeuchte,
- der Temperatur,
- dem Luftdruck und
- dem chemischen und strukturellen Aufbau des Holzes.

Der Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und der Gleichgewichtsfeuchte von Holz wird in der Literatur sehr häufig über sogenannte Sorptionsisothermen dargestellt. Am Beispiel der Sitka-Fichte ist der Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf den Feuchtegehalt in Abbildung 7 ((Hawley, 1931) aus Daten von Loughborough, von (Keylwerth R. , 1949) ins metrische System umgerechnet) dargestellt.

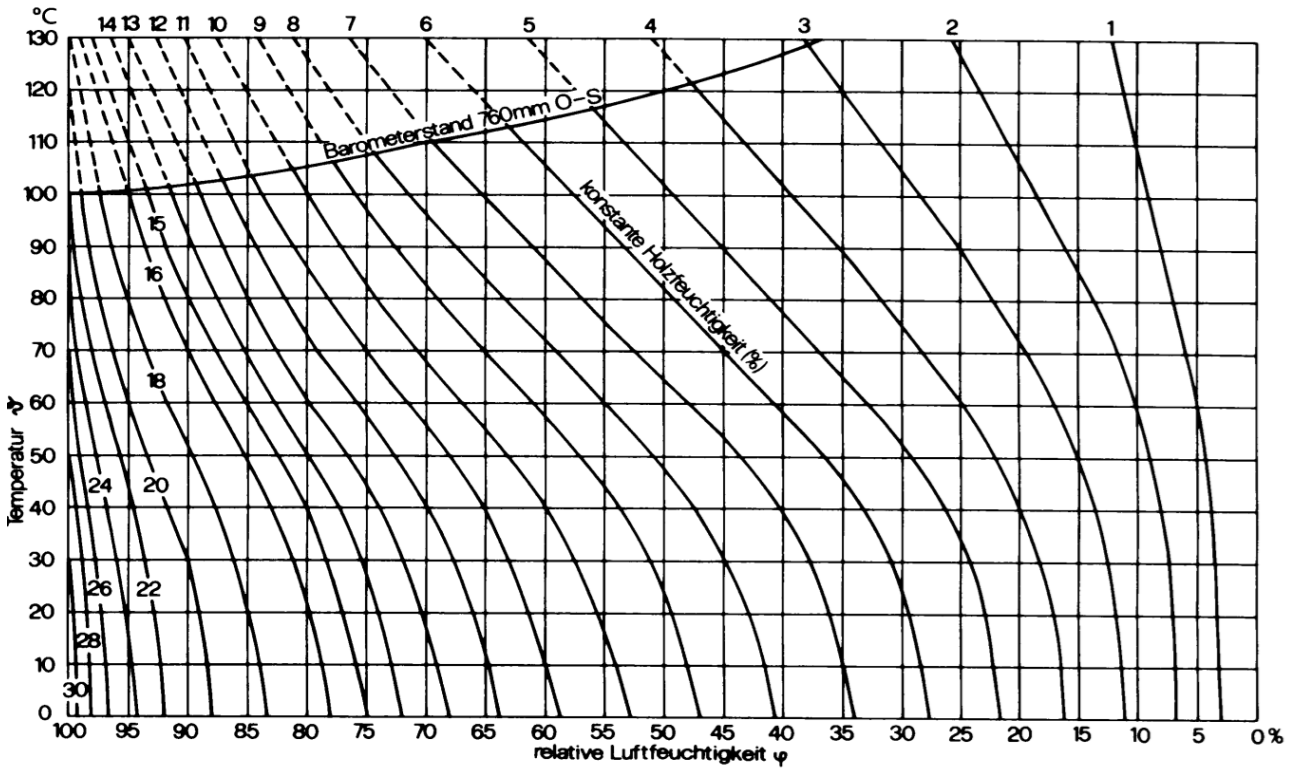


Abbildung 7: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur und relativer Luftfeuchte. Nach (Keylwerth R. , 1949).

2.3 Formänderungen von Holz durch Feuchtigkeit

Änderungen des Feuchtegehalts im hygroskopischen Bereich unterhalb des Fasersättigungsbereichs sind, wie bereits zuvor erläutert, mit Änderungen des Holzvolumens verbunden. Man bezeichnet dieses Verhalten des Holzes als Quellen und Schwinden oder umgangssprachlich als „Arbeiten des Holzes“.

Bei Feuchteaufnahme (Adsorption) wird Wasser in die Hohlräume der Zellwand eingelagert und die Zellwände dehnen sich aus, was zu einer Volumenvergrößerung des Holzquerschnittes führt. Bei Abgabe der Feuchte aus der Zellwand (Desorption) kommt es unterhalb des Fasersättigungsbereichs zur Volumenkontraktion der Zellen des Holzes, das als Schwinden bezeichnet wird. Schwinden und Quellen werden als feuchteabhängige Verformungen bezeichnet.

Aufgrund der inhomogenen, anisotropen Struktur des Holzes ist das Schwinden und Quellen je nach Richtung unterschiedlich. Diese richtungsabhängigen Verformungen des Holzes hängen vor allem von der Faserrichtung ab. So ist das Schwinden bzw. Quellen in radialer und tangentialer Richtung wesentlich ausgeprägter als in longitudinaler Richtung. Im baupraktisch relevanten Bereich zwischen 5 und 25% Holzfeuchte liegt das Verhältnis des Quellmaßes längs: radial: tangential für Fichtenholz bei ca. 0,01: 0,16: 0,32 prozentualer Längenänderung je 1% Holzfeuchteänderung und verläuft annähernd linear. Für baupraktische Anforderungen wird meist

ein aus radialem und tangentialem Quellen gemitteltes differentielles Quellmaß verwendet, welches z.B. für Fichte zu 0.25 % je Prozent Holzfeuchteänderung angegeben wird (DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12).

Eine Änderung der relativen Luftfeuchte führt zwangsläufig zur Änderung des Feuchtegehalts von Holz und somit zu Quell- und Schwinderscheinungen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Quell- und Schwindmaße in den drei Hauptachsen longitudinal, radial und tangential, hat das erhebliche Verformungen des Holzquerschnittes sowie innere Spannungen zur Folge (vgl. Abbildung 8).

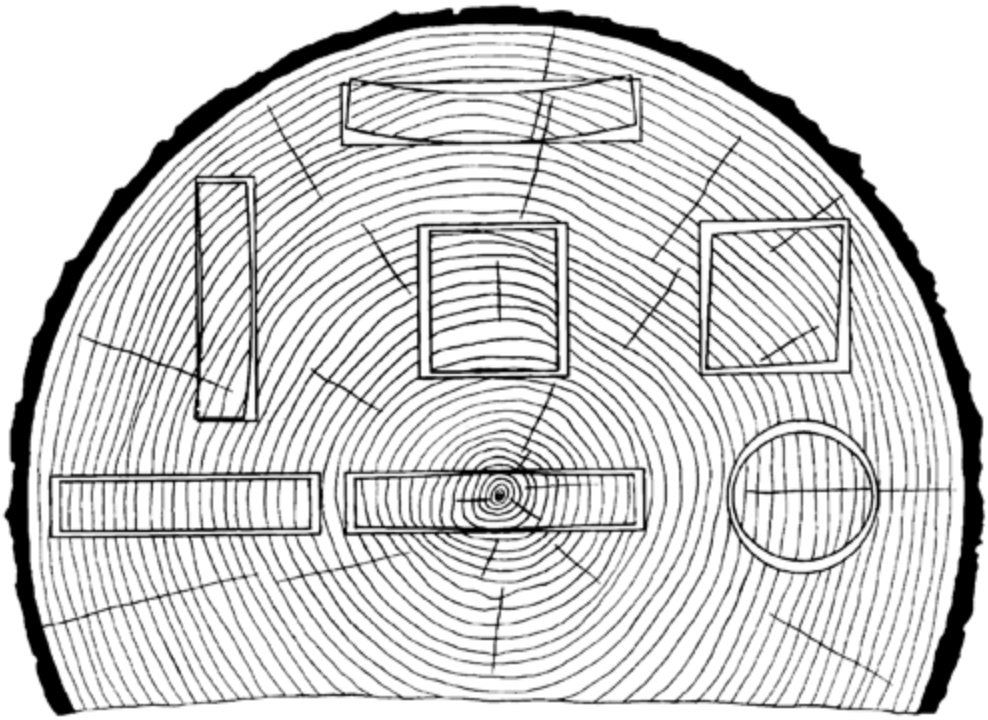


Abbildung 8: Verzerrung von Holz durch unterschiedliche Schwindung. Aus (Glass & Zelinka, 2010)

2.4 Feuchtegradienten und ihre Auswirkungen

2.4.1 Feuchtegradienten und Relaxation

Holztragwerke sind aufgrund ihrer weiten Einsetzbarkeit sehr unterschiedlichen, häufig schwankenden Klimabedingungen unterworfen die dazu führen, dass das Holz je nach relativer Luftfeuchte Feuchte aufnimmt bzw. abgibt. Da die Aufnahme und Abgabe von Feuchte im baupraktischen Holzfeuchtebereich zwischen 4 % und 28 % hauptsächlich durch Diffusion über die Oberflächen des Holzquerschnittes erfolgt, passen sich zunächst nur die äußeren Schichten an die klimatischen Bedingungen an, so dass sich ein Holzfeuchtegefälle zwischen den inneren Bereichen des Querschnitts und der Oberfläche einstellt. Dieser Feuchtegradient hängt unter anderem von der Art der Klimabeanspruchung ab.

Die Randzonen des Querschnitts passen sich viel schneller an das Umgebungsklima an, als die inneren Bereiche, die mehr Zeit zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte benötigen. Somit ist die Feuchteverteilung im Querschnitt nicht nur von der relativen Luftfeuchte, sondern auch von der Zeit abhängig, was insbesondere bei wechselnden klimatischen Bedingungen von Bedeutung ist. So schwinden die Randbereiche des Holzquerschnittes bei einer Trocknung, während es im Querschnittsinneren noch zu keiner großen Volumenänderung kommt. Das Schwinden des Holzes am Querschnittsumfang wird dabei durch das Querschnittsinnere verhindert und es entstehen innere Spannungen im Holz. In den außenliegenden Bereichen unter Schwindbeanspruchung entsteht Querzug, im innenliegenden Bereich werden die Holzfasern durch Querdruck gestaucht. Erste experimentelle Untersuchungen zur Größe von klimatisch bedingten Dehnungen und Stauchungen in Holzquerschnitten wurden von (MacMillen, 1955) vorgestellt (vgl. Abbildung 9).

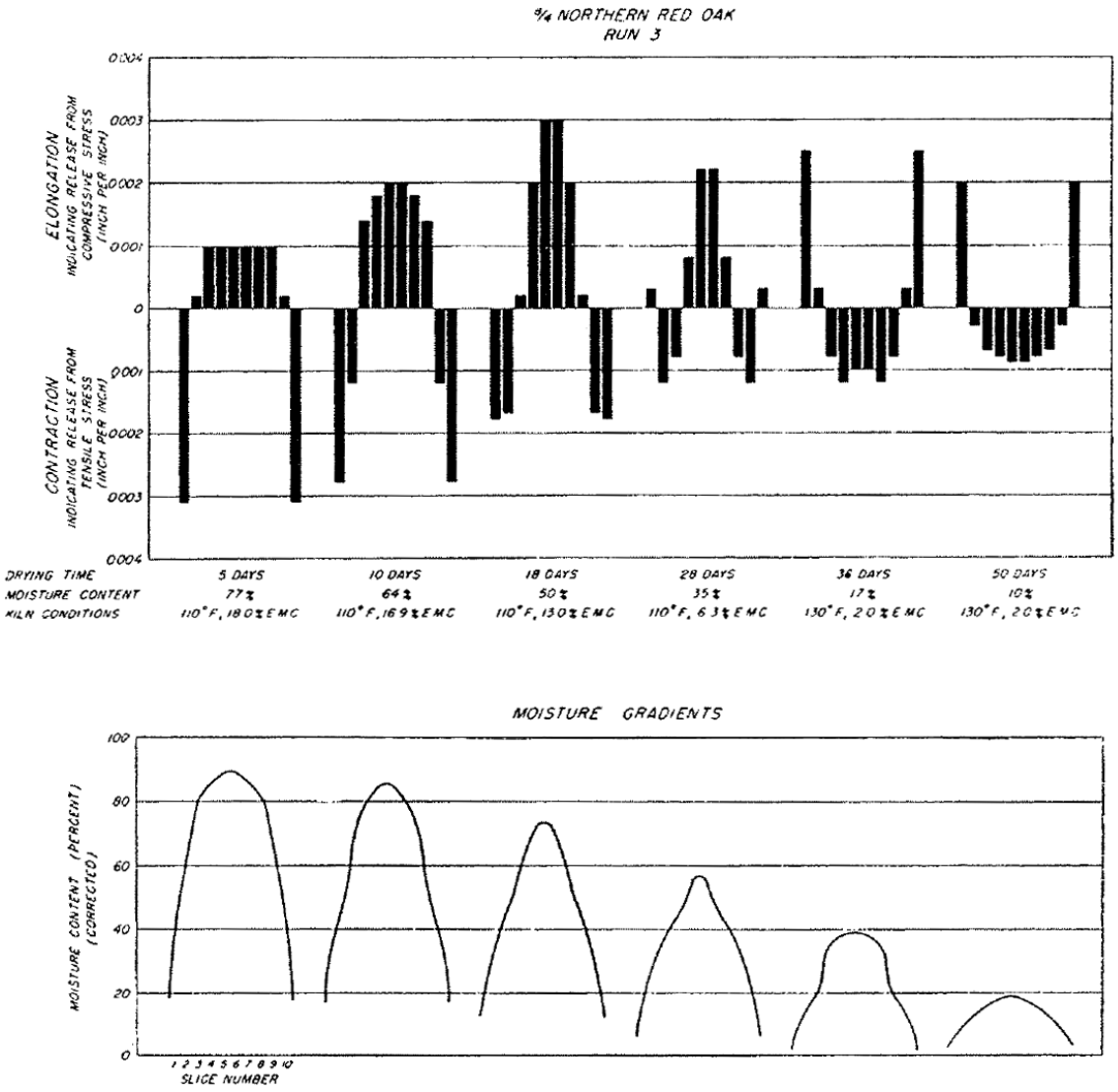


Abbildung 9: Dehnungsdiagramme und Feuchteverteilung für Red Oak, Abmessungen 2 x 7 inch (5.08 x 17.8 cm), getrocknet bei 110° F (43.3° C). Aus (MacMillen, 1955)

Hierbei wurden die Abmessungen der Prüfkörper zu verschiedenen Zeitpunkten des Trocknungsprozesses erfasst. Die Prüfkörper wurden anschließend in Scheiben geschnitten um die Abmessungen der nun spannungsfreien Scheiben erneut aufzunehmen. Aus den Dehnungsdifferenzen der einzelnen Scheiben wurde auf die Dehnungsverteilung im Prüfkörper geschlossen.

Versuche zum Verhalten von Brettschichtholzelementen baupraktischer Abmessungen gegenüber Holzfeuchteänderungen wurden von (Möhler & Steck, 1980) vorgestellt. Hierbei wurden die Prüfkörper unter Laborbedingungen unterschiedlichen Feucht- und Trockenklimata ausgesetzt. Abbildung 10 enthält eine Darstellung der zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Holzfeuchtegradienten aufgrund der sich ändernden Umgebungsbedingungen. Die Autoren geben an, dass Risse auftraten, wenn die Feuchteabnahme in den 10 mm dicken Randstreifen 5 % erreichte. Bei sehr schneller Trocknung entstanden Schwindrisse bereits bei geringeren Feuchteabnahmen. Eine vorherige Behandlung mit einem Feuchteschutzanstrich konnte laut Angabe der Autoren eine Rissbildung weitestgehend vermeiden.

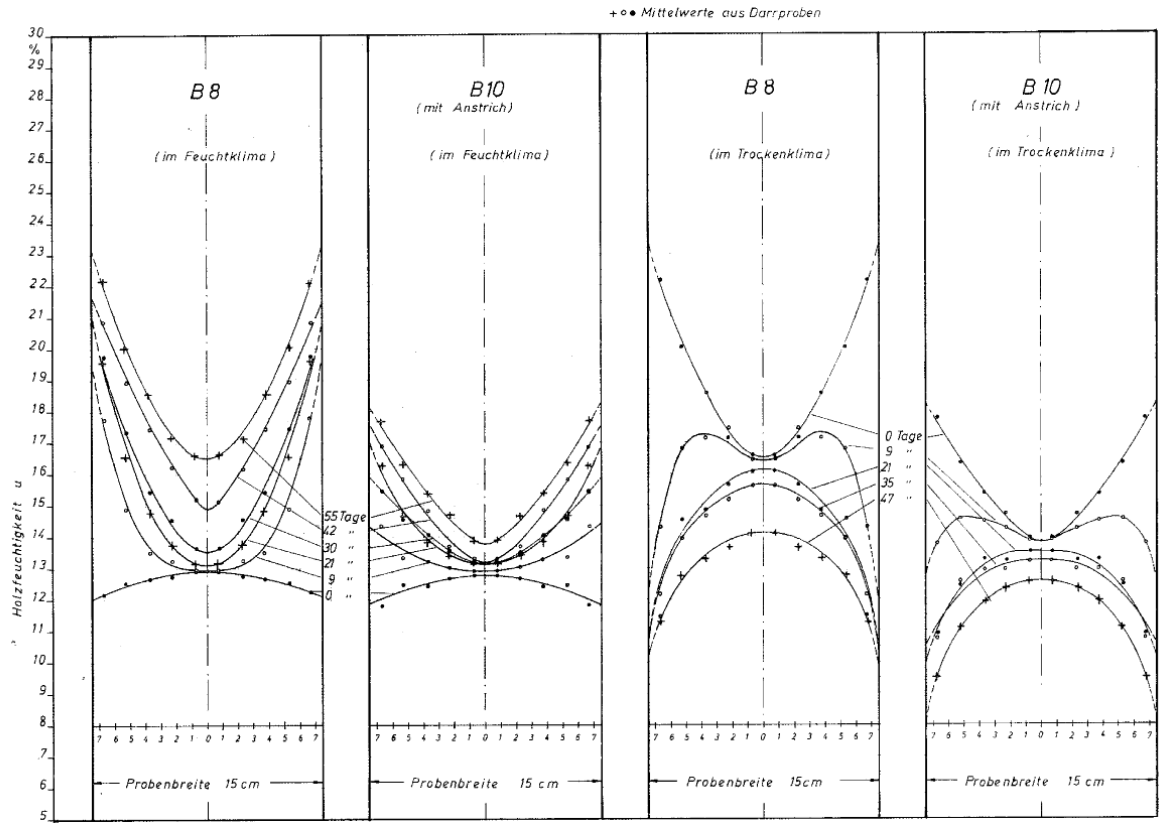


Abbildung 10: Beispielhafte Veränderung der Feuchtegradienten in BSH - Bauteilen. Aus (Möhler & Steck, 1980)

Spannungen im Holzquerschnitt aus Änderungen der Holzfeuchte werden zwar mit der Zeit durch Relaxation teilweise abgebaut. Untersuchungen dazu werden u.a. von (Kolb, Goth, & Epple, 1984), (Steck, 1985), (Toratti & Svensson, 2000) und (Svensson & Toratti, 2002) vorgestellt. Die von vorgenannten Autoren angegebenen Relaxationswerte liegen im Bereich zwischen 40 % und

60 %. Bei mehreren Feuchtewechseln wird die Relaxation tendenziell zunehmen. Wenn aber die aus Feuchtewechseln entstehenden Querzugspannungen die Querzugfestigkeit überschreiten (beispielsweise bei schnellem Spannungszuwachs), dann wird die Spannung in Form von Rissen abgebaut. Dadurch stellt eine schnelle Trocknung der äußeren Querschnittsbereiche die Klimabeanspruchung dar, die am häufigsten zur Rissbildung führt.

2.4.2 Rissbildung durch Feuchtegradienten

Werden die Querzugspannungen in den Randbereichen des Bauteils durch Risse abgebaut, so führt dies bei frei verformbaren Querschnitten zur Umlagerung von Eigenspannungen, was bedeutet, dass das Gleichgewicht zwischen Druck- und Zugspannungen nicht mehr erfüllt ist. Durch den Rissbeginn wird die Querzugspannung reduziert und es herrscht ein Überschuss an Druckspannungen. Der Spannungsverlauf nach Erstrissbildung muss nach oben korrigiert werden um das Gleichgewicht wieder herzustellen. Dadurch überschreiten weitere Bereiche die Querzugfestigkeit und der Riss wächst weiter in das Querschnittsinnere vor (vgl. Abbildung 11). Dieser Effekt kann auch als Reißverschlusseffekt bezeichnet werden und endet erst, sobald bei neuerlicher Verschiebung kein Wert die lokal vorliegende Querzugfestigkeit überschreitet (Aondio, 2008).

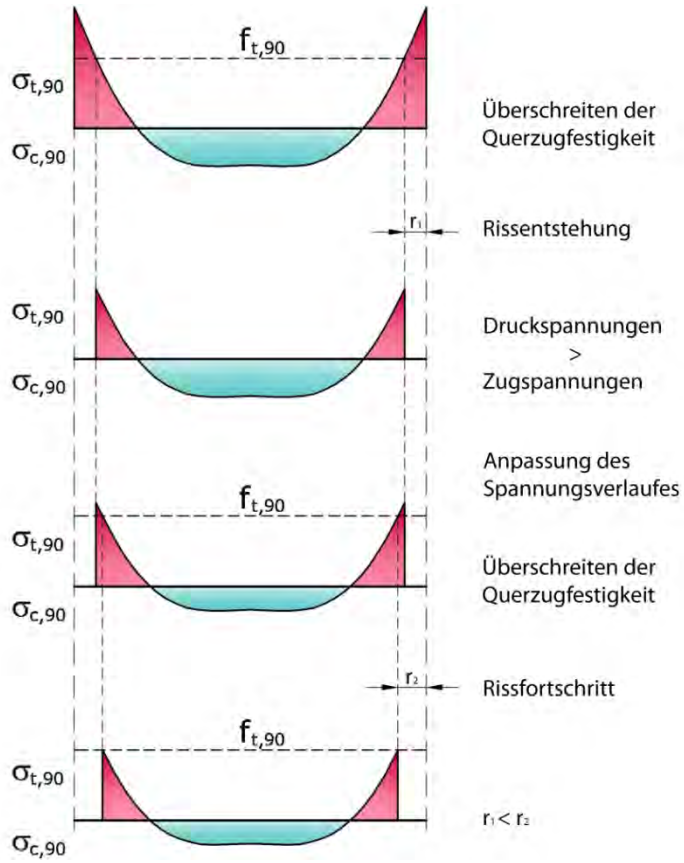


Abbildung 11: Ingenieurmäßiger Ansatz zur Rissentstehung bei freier Verformung des Querschnitts. Nach (Aondio, 2008)

Das Feuchteverhalten des Materials Holz ist in verschieden mechano-sorptiven Modellen erfasst worden, siehe z.B. (Fragiacomo, Fortino, Tononi, Usardi, & Toratti, 2011). Um mit diesen Computermodellen realistische Grenzwerte der Feuchtegradiente zu ermitteln, bei denen eine Rissbildung in Holzquerschnitt eintritt, sind validierte Messungen der klimatischen Randbedingungen und deren Auswirkungen auf Holzbauteile in Kombination mit vergleichenden Labormessungen erforderlich.

2.4.3 Einfluss der Rissbildung auf die Beanspruchbarkeit von Holz

Durch die mögliche Rissbildung aufgrund von klimatischen Randbedingungen wird die zur Aufnahme der Schubspannung aus Querkraft notwendige Querschnittsbreite *b* des Holzbauteiles verringert. Da aber nicht garantiert werden kann, dass keine Risse auftreten, muss eine mögliche Querschnittsschwächung bereits in den statischen Nachweisen berücksichtigt werden.

Die maximal zulässigen Risstiefen von Vollholz sind in DIN 4074-1:2003-06 definiert. Bei Brettschichtholz (BSH) darf die Risstiefe bei Beanspruchung auf Biegung bzw. Schub erfahrungsgemäß ein Sechstel der Querschnittsbreite von jeder Seite (also insgesamt ein Drittel der Breite) ausmachen, ohne dass die rechnerische Tragfähigkeit abgemindert werden muss (Radovic & Wiegand, 2005).

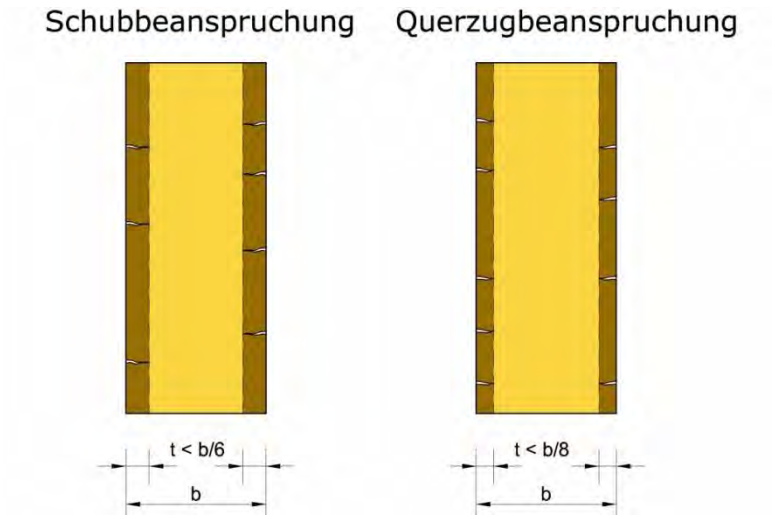


Abbildung 12: Zulässige Risstiefen in Brettschichtholz je nach Art der Beanspruchung. Nach (Kreuzinger, 2007)

Bei BSH-Bauteilen die planmäßig auf Querzug beansprucht werden, müssen Schwindrisse aufgrund der sehr geringen Festigkeitswerte für Querzug gesondert betrachtet werden. Es besteht die Gefahr, dass infolge der planmäßigen Querzugbeanspruchung in Kombination mit den klimatischen Beanspruchungen, ein Fortschreiten der Risstiefe eintritt. Erfahrungsgemäß darf die Risstiefe bei planmäßig auf Querzug beanspruchten Brettschichtholzteilen wie z.B. gekrümmten Trägern, ein Achtel der Querschnittsbreite von jeder Seite (also insgesamt ein Viertel der Breite) nicht überschreiten (Radovic & Wiegand, 2005).

3 Feuchtebeanspruchung von Brettschichtholz

3.1 Allgemeines

Um den Schwerpunkt der Betrachtungen dieser Forschungsvorhaben zu verdeutlichen, wird folgend die „Feuchtekette“ des Brettschichtholzes beschrieben. Diese veranschaulicht die Feuchtebeanspruchung und die sich einstellende Holzfeuchte eines Baumes über seine Verarbeitung zu Brettschichtholz und die anschließende Bauphase bis hin zum eingebauten Zustand in der Nutzungsphase. Letztgenannte Phase, also die Feuchtebeanspruchung von Brettschichtholz im eingebauten Zustand, soll in den vorliegenden Forschungsvorhaben für verschiedene Nutzungen untersucht werden.

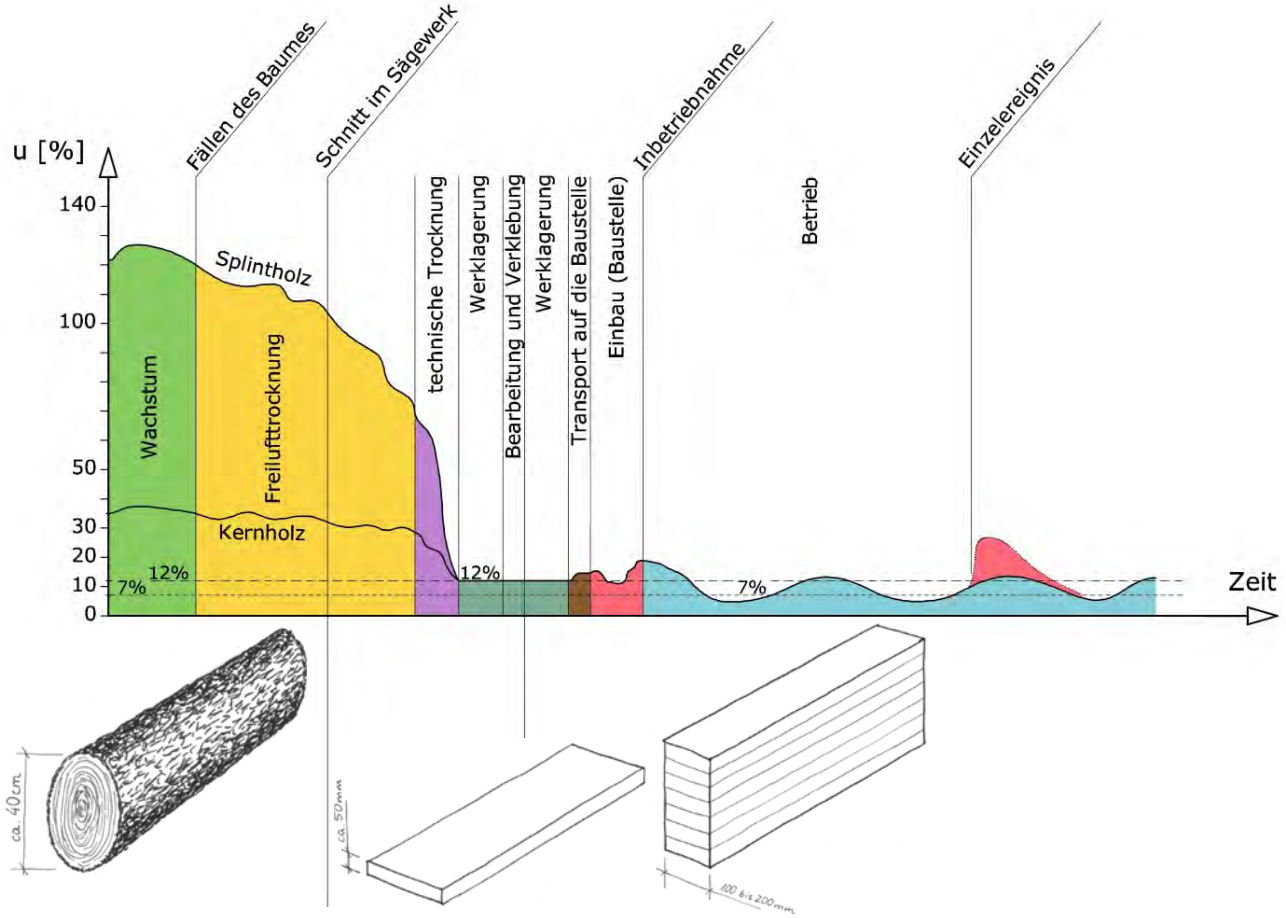


Abbildung 13: Skizze einer möglichen „Feuchtekette“, d.h. Feuchtebeanspruchung und Gefahr der Rissbildung vom Baum bis zum Brettschichtholz im Tragwerk.

3.2 Nutzungsklassen

Wie bereits erläutert ist der natürliche Baustoff Holz ein komplizierter organischer Stoff, der aufgrund seiner spezifischen Eigenschaft der Hygroskopizität auf das von außen einwirkende Klima reagiert, wenn es unter den Fasersättigungspunkt getrocknet ist. Die Holzfeuchte passt sich der vorherrschenden relativen Luftfeuchte an, wodurch sich unter anderem die mechanischen Eigenschaften ändern.

Um die Einflüsse der Hygroskopizität zu berücksichtigen werden die Bauteile von Holzbauten nach EN 1995-1-1:2004-11 entsprechend dem Umgebungsklima während ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer in Nutzungsklassen (NKL) eingeordnet. Je nach Bewitterung und Luftfeuchte sind die Bauwerke in folgende drei Nutzungsklassen einzuteilen.

Nutzungsklasse 1

In die Nutzungsklasse 1 sind alle Bauteile einzustufen, die in einer dauerhaften, geschlossenen Hülle gegenüber dem Außenklima geschützt sind. Die relative Luftfeuchte der umgebenden Luft sollte nur wenige Wochen im Jahr einen Wert von 65% überschreiten. Das trifft vor allem für Bauteile in allseitig geschlossenen und beheizbaren Bauwerken zu. Die Holzfeuchte liegt dann in einem Bereich zwischen 5 und 15% (vgl. Kap 3.3 Ausgleichsfeuchte). In den meisten Fällen wird die Ausgleichsfeuchte bei Nadelhölzern in der Nutzungsklasse 1 ca. 12% nicht übersteigen.

Wenn nur für einige Wochen im Jahr Klimabedingungen herrschen, die auf lange Sicht zu einer deutlich höheren Holzfeuchte führen würden, dann steigt die Holzfeuchte eines Bauteils wegen der sehr langsamen Feuchtetransportvorgänge im Holz nur unbedeutend an. Diese Umstände führen somit nicht zu einer Einstufung in eine höhere Nutzungsklasse (Blaß, Ehlbeck, Kreuzinger & Steck, 2004).

Nutzungsklasse 2

Zur Nutzungsklasse 2 zählen in erster Linie alle Holzbauteile in offenen, aber überdeckten Bauwerken. Sind die Bauteile vor der unmittelbaren Bewitterung geschützt und überschreitet die relative Luftfeuchte nur für wenige Wochen im Jahr 85%, so sollte die mittlere Holzfeuchte bei Nadelhölzern 20 % meist nicht übersteigen.Es können aber auch geschlossene Bauten mit einer hohen relativen Luftfeuchte, wie z.B. Gewächshäuser, Treibhäuser, Wintergärten oder Tierhäuser in zoologischen Gärten in diese Nutzungsklasse einzuordnen sein. Auch Bauteile einer belüfteten Dachkonstruktion (Kaltdach) müssen der Nutzungsklasse 2 zugerechnet werden (Blaß, Ehlbeck, Kreuzinger & Steck, 2004).

Nutzungsklasse 3

In die Nutzungsklasse 3 sind alle Bauteile einzustufen, die der Witterung ungeschützt ausgesetzt sind und somit die Bedingungen für eine Einstufung in die Nutzungsklassen 1 und 2 nicht garantiert werden können.

Typische Beispiele für Bauteile in der Nutzungsklasse 3 sind nicht überdachte Balkone und ungeschützte Bauteile in hölzernen Brückentragwerken. Wegen der hohen Gefahr der Kondenswasserbildung an den kalten Bauteiloberflächen von Dachkonstruktionen bei offenen Eissporthallen sollten auch diese der Nutzungsklasse 3 zugewiesen werden (Blaß, Ehlbeck, Kreuzinger & Steck, 2004).

3.3 Ausgleichsfeuchte

Die Ausgleichsfeuchte ist die Holzfeuchte, die sich nach dem Einbau des Holzes nach einer gewissen Zeit einstellen wird. Die benötigte Zeitspanne, damit sich im gesamten Querschnitt die Ausgleichsfeuchte einstellen kann, hängt dabei von der Einbaufeuchte und den Abmessungen der Bauteile ab. Um nachteilige Auswirkungen auf die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten zu vermeiden, sollte die Einbaufeuchte der Bauteile zum Zeitpunkt des Einbaus bereits der späteren Ausgleichsfeuchte entsprechen. Wenn die Bauteile bei Transport, Zwischenlagerung auf der Baustelle oder bei der Montage über eine längere Zeit einer Feuchteaufnahme ausgesetzt sind, wird empfohlen ein Nachtrocknen nach dem Einbau zu ermöglichen. Eine zu rasche Trocknung nach dem Einbau, beispielsweise durch schnelle Inbetriebnahme einer Heizung, kann allerdings zu erheblichen Schädigungen z.B. in Form von Schwindrissen führen. Deshalb sollte die Austrocknung der Baufeuchte entsprechend langsam geschehen (Blaß, Ehlbeck, Kreuzinger & Steck, 2004).

DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 gibt mit den Nutzungsklassen eine Einteilung der Bauteile in definierte Umgebungsklimas mit zugehörigen relativen Luftfeuchten während ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer an. Daraus ergeben sich übliche Bereiche der sich einstellenden Holzfeuchte nach Tabelle 1.

Tabelle 1: Ausgleichsfeuchten von Holzbaustoffen. Nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

Nutzungsklasse	**1**	**2**	**3**
Holzfeuchte	5 bis 15%	10 bis 20%	12 bis 24%

3.4 Bedeutung der Einteilung typischer Gebäudenutzungen in Nutzungsklassen

Obwohl in EN 1995-1-1:2004-11 eine Einteilung in Nutzungsklassen gefordert wird, fehlen bis auf wenige in den Erläuterungen der DIN 1052 (Blaß, Ehlbeck, Kreuzinger, & Steck, 2004) enthaltene Ausnahmen, genauere Aussagen hinsichtlich der Einteilung üblicher Gebäudenutzungen in Nutzungsklassen. Ist aber bei der Planung eines Projektes das Klima innerhalb des Gebäudes nicht genau bekannt, ergibt sich das Problem der Zuteilung in eine Nutzungsklasse nach Norm. So fallen z.B. Nutzungen mit trockenem Klima wie Sporthallen oder einige Produktionshallen und Nutzungen mit feuchterem Klima wie unbeheizte Lagerhallen alle in die NKL 1, was für den Planer auf den ersten Blick nicht immer nachvollziehbar sein mag.

Die im Rahmen dieser Forschungsvorhaben durchzuführenden Langzeitmessungen in verschiedenen Hallen mit Holztragwerken sollen Erkenntnisse liefern, anhand derer eine Überprüfung und Erweiterung der bisherigen Klassifizierung von Gebäuden in Nutzungsklassen ermöglicht wird. Daraus könnte eine klarere Einteilung und konkrete Zuordnung von verschiedenen Nutzungen in die Nutzungsklassen entstehen. Ebenso können Bereiche der sich einstellenden Ausgleichsfeuchte für die konkreten Nutzungen angegeben werden, wodurch ein Einbau des Holzes mit einer angepassten Holzfeuchte ermöglicht wird. Dies würde es unterstützen, unerwünschte Schwind- und Quellerscheinungen des Holzes, mit Rissbildungen oder Aufwölbungen, in größerem Umfang zu vermeiden. Bisher sieht die Norm für die Nutzungsklasse 1 im Normalfall eine Einbaufeuchte von 12% vor. Gleichzeitig gibt sie einen Bereich der Ausgleichsfeuchte mit einem unteren Grenzwert von 5% an. Dies kann vor allem für großvolumige Brettschichtholzbauteile zu kritischen Beanspruchungszuständen führen. Eine genauere Kenntnis über die sich im späteren Einsatzbereich einstellende Holzfeuchte und der Einbau von Holz mit entsprechend angepasster Holzfeuchte, hat eine nicht zu unterschätzende Bedeutung. Dies wird durch den großen Anteil von Rissen aus Schwindvorgängen an der Gesamtzahl der Schäden in mehreren Untersuchungen (Blaß & Frese, 2010), (Frühwald, Serrano, Emilsson & Thelandersson, 2007) und (Dietsch & Winter, 2009)) bestätigt.

3.5 Berücksichtigung der klimatischen Randbedingungen in den Bemessungsnormen

Der Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeitseigenschaften wird in den aktuellen Normenwerken ((DIN EN 1995-1-1:2010-12), (DIN 1052:2008-12)) über den sog. Modifikationsbeiwert k_{mod} geregelt. Für Vollholz- und Brettschichtholzbauteile wird diese Festigkeitsreduktion erst in Nutzungsklasse (NKL) 3 berücksichtigt, welche Klimarandbedingungen mit sehr hohen Ausgleichsfeuchten abdeckt (Blaß, Ehlbeck, Kreuzinger, & Steck, 2004). In der in Deutschland bis Ende Juni 2009 bauaufsichtlich anwendbaren Vorgängernorm (DIN 1052:1988-04 + A1 1996-10) waren für Bauteile, bei denen mit einer Ausgleichsfeuchte > 18 % zu rechnen ist, die zulässigen Spannungen um 1/6 abzumindern.

Der Einfluss der Holzfeuchte auf das Ausmaß der Kriechanteile an der Gesamtverformung wird in (DIN EN 1995-1-1:2010-12) und (DIN 1052:2008-12) über den Faktor k_{def} geregelt, welcher vor allem in der NKL 3 signifikant steigt, da Kriechen bei häufig wechselnden Holzfeuchten am ausgeprägtesten ist (z.B. (Hearmon & Patton, 1964)). In der deutschen Vorgängernorm (DIN 1052:1988-04 + A1 1996-10) war eine von der Gleichgewichtsfeuchte abhängige Kriechzahl φ implementiert. Alle genannten Normen enthalten zudem Ansätze zur Abminderung der Steifigkeitskennwerte bei feuchten Randbedingungen.

Durch Holzfeuchtegradienten induzierte Querzugspannungen reduzieren die Beanspruchbarkeit des Querschnitts gegenüber Querzugspannungen aus z.B. geometriebedingten Umlenkkräften. In (DIN 1052:2008-12) werden für Satteldachträger und gekrümmte Träger, in denen die Querzugbeanspruchung aus Umlenkkräften mehr als 60 % der Querzugbeanspruchbarkeit beträgt, konstruktive Verstärkungen zur Aufnahme klimabedingter Querzugspannungen gefordert.

In (DIN EN 1995-1-1:2010-12) sind hierzu keine Angaben enthalten, in Deutschland wurde der Ansatz der (DIN 1052:2008-12) im Rahmen der zusätzlichen, nicht widersprechenden Regeln (engl. Abkürzung NCCI) in (DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12) übernommen. Ein in Fachkreisen diskutierter, aber nicht genormter Vorschlag von (Ranta-Maunus, 2003) ist, feuchteinduzierte Spannungen als veränderliche Beanspruchung auf der Lastseite in die Bemessungsgleichungen zu integrieren.

Rissbildungen in Faserrichtung reduzieren den Querschnitt zur Übertragung von Schub- und Querzugspannungen. Da eine Rissbildung bei Holzbauteilen (teilgerissene Querschnitte) nicht ausgeschlossen werden kann, wird eine derartige Querschnittsreduzierung in den Bemessungsnormen bereits berücksichtigt. Hierzu enthalten die deutschen bzw. europäischen Bemessungsnormen zwei unterschiedliche Ansätze:

- In (DIN 1052:2008-12) werden Querschnittsreduzierungen aufgrund Rissbildung über reduzierte Festigkeitskennwerte berücksichtigt. Für die Schubfestigkeit von Brettschichtholz beträgt diese Reduktion $f_{v,k,BSH,ger.}$/ $f_{v,k,BSH,unger.}$ = 2.5/3.5 = 0.71. Sie korrespondiert damit mit der in der Baupraxis akzeptierten zulässigen Risstiefe von 1/6 je Seite (Radovic & Wiegand, 2005). Für planmäßig auf Querzug beanspruchte Bauteile geben die Autoren eine zulässige Risstiefe von 1/8 je Seite an.

- In (DIN EN 1995-1-1:2010-12) wurde mit dem ersten Änderungspapier (EN 1995-1-1/A1:2008-06) ein anderer Ansatz implementiert. Hier ist bei der Ermittlung der Schubbeanspruchung eine wirksame Breite des Bauteils anzusetzen, die über die Multiplikation der tatsächlichen Breite mit dem Rissfaktor k_{cr} zu ermitteln ist. Der Rissfaktor ist ein national festzulegender Parameter (engl. Abkürzung NDP), für Vollholz und Brettschichtholz wird ein Wert k_{cr} = 0.67 empfohlen. In (DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12) wird ein Faktor $k_{cr} = 2.5/f_{v,k}$ angegeben.

4 Darstellung der Nutzungskategorien und Gebäudeauswahl

4.1 Vorabbemerkung

In diesem Forschungsbericht werden die Ergebnisse der beiden aufeinander folgenden und aufeinander aufbauenden Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ und „Gebäudeklima – Validierung“ zu einem Dokument zusammengefügt. Im Sinne einer besseren Nachvollziehbarkeit der getroffenen Auswahl der untersuchten Nutzungen und Gebäudetypen, wird diese im Folgenden für die beiden Forschungsvorhaben separat beschrieben.

4.2 Auswahl der Nutzungen und Gebäudetypen im Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“

4.2.1 Allgemeines

Bei der Auswahl der Nutzungen und der zugehörigen Hallen die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ untersucht wurden, wurde darauf geachtet eine möglichst große Vielfalt an holzbautypischen Nutzungen und Tragsystemen zusammenzustellen. Für die Langzeitmessungen wurden insgesamt sieben verschiedene Nutzungstypen vorgesehen, die für eine eindeutige und schnelle Zuweisung der einzelnen Hallen in Kategorien eingeteilt sind, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Nomenklatur der untersuchten Nutzungen und Anzahl der Hallen je Nutzung im ersten Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“

Nutzung	**Kategorie**	**Anzahl der Hallen**
Schwimmhalle	A	3
Eissporthalle	B	4
Reithalle	C	3
Sporthalle	D	3
Produktions- und Verkaufshalle	E	2
Landwirtschaftliche Halle	F	3
Lagerhalle	G	3
Summe	**7**	**21**

Dem Forschungsantrag entsprechend sollten zu den einzelnen Nutzungstypen je drei Objekte ausgewählt werden, was bei sieben Nutzungstypen zu insgesamt 21 Hallen führt (vgl. Tabelle 2). Die Messung in drei Gebäuden je Nutzung, soll eine ausreichende statistische Aussage ermöglichen. Nach Beratung mit der begleitenden Projektgruppe des Forschungsvorhabens wurde die Anzahl der Objekte in der Kategorie Eissporthalle auf vier erhöht, da dieser Hallentyp als besonders interessant für eine Untersuchung der Holzfeuchte erscheint. Um die maximale

Anzahl von 21 Objekten nicht zu überschreiten wurde die Kategorie Produktions- und Verkaufshallen auf zwei Objekte beschränkt.

In jeder Halle werden zwei Messstellen installiert, wobei die Messstellen für jede Halle individuell festgelegt werden müssen. Dabei ist darauf zu achten, auch über die Hallenfläche hinweg möglicherweise variierende Bedingungen zu erfassen. Dies sind z.B. Stellen mit außergewöhnlichen Klimabeanspruchungen durch z.B. Sonneneinstrahlung oder Wärmeabgabe von haustechnischen Anlagen.

Da für die überwiegende Mehrheit aller weitgespannten Holztragwerke Brettschichtholz aus Nadelholz verwendet wird, sollen die zu untersuchenden Tragwerksbauteile der ausgewählten Hallen ebenfalls ausschließlich aus diesem Material bestehen.

4.2.2 Kategorie A – Schwimmhallen

Um für die Badegäste ein angenehmes Raumklima zu schaffen, herrschen in Hallenbädern meist hohe Temperaturen um die 30°C bei gleichzeitig konstanter relativer Luftfeuchte von ca. 65%. Üblicherweise wird das Innenraumklima von Hallenbädern durch eine passende Heizung und Lüftung dauerhaft konstant gehalten, so dass es zu keinen großen jahreszeitlichen Schwankungen kommt. Die Holzfeuchte der Tragkonstruktion bei Hallenbädern sollte somit relativ konstant bleiben, kann aber z.B. bei Abkühlung und damit steigender Luftfeuchte auch höhere Werte annehmen.

Die Klimabeanspruchung der Konstruktion ist abhängig von der gewählten Wasser- und Lufttemperatur, der Wasserdampfverdunstungsmenge von der Beckenoberfläche, den Badegästen sowie der Art der Heizung und Lüftung.

Typische Feuchteschäden in Schwimmbädern entstehen meist im Deckenbereich, da die feuchte warme Luft aufsteigt und sich unter der Decke sammelt. Deshalb herrschen im Bereich der Decke höhere Temperaturen mit größeren Feuchtegehalten als im übrigen Bereich der Halle. Wird der Taupunkt nun zum Beispiel im Bereich von Wärmebrücken oder Schäden in der Dachabdichtung unterschritten, kann sich im Dachbereich Kondensat bilden. Der Wassergehalt im Holz erhöht sich dadurch, was über einen längeren Zeitraum hinweg letztendlich zu Schäden durch Pilzbefall und Fäulnis führen kann.

(Krabbe & Neuhaus, 1989) und (Paulsen & Trinkert, 2011) bestätigen in ihren Untersuchungen, dass in Hallenbädern nach Abschluss der Bauphase und dem ersten Jahr der Nutzung im Allgemeinen ein sehr konstantes und für Holzkonstruktionen unkritisches Klima herrschen.

4.2.3 Kategorie B – Eissporthallen

Das sich einstellende Gebäudeklima bei Eissporthallen wird maßgeblich von der ausgeführten Bauweise beeinflusst. Die offene, teilweise offene und geschlossene Bauweise unterscheiden sich dabei wesentlich voneinander.

Bei einer offenen Eissporthalle gleichen sich die Temperaturen den Außentemperaturen an, so dass das Hallenklima dem Außenklima entspricht. Offene Eissporthallen sind nach (Blaß, Ehlbeck, Kreuzinger & Steck, 2004) nicht wie andere offene Gebäude in die Nutzungsklasse 2 einzuordnen, da die Träger der Dachkonstruktion durch den Strahlungsaustausch mit der kalten Eisoberfläche zusätzlich ausgekühlt werden, wodurch es sehr schnell zum Ausfall von großen Tauwassermengen kommen kann. Im Sommer dagegen trocknet das Tragwerk wieder aus was eine große jahreszeitliche Schwankung der Holzfeuchte bedingt.

Teilweise offene Hallen sind partiell mit den offenen Hallen vergleichbar, die Temperaturspitzen des Außenklimas werden hier jedoch nicht übertragen. Im Unterschied zu den offenen Eissporthallen führt die Bauweise der teilweise offenen Hallen jedoch zu einer Einschränkung des möglichen Luftwechsels, was bei Einstreichen von warmer Luft und anschließender Abkühlung über der Eisfläche zu Nebelbildung und Tauwasserausfall führen kann. Untersuchungen zu teilweise offenen Hallen wurden von (Feldmeier, 2007) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bestätigen die hohe klimatische Beanspruchung des Holztragwerkes in teilweise offenen Eissporthallen, was vor allem an der erhöhten Gefahr der Tauwasserbildung an den Oberflächen der Brettschichtholzträger liegt. Das führt zur Erhöhung der Holzfeuchte und mitunter zur Bildung von Eispanzern (vgl. Abbildung 14).



Abbildung 14: Eisbildung am Untergurt oberhalb der Eisfläche. Aus (Winter, 2007).



Abbildung 15: Tropfenbildung auf Unterseite eines Binders. Aus (Güldenpfennig, Vogelsberg & Stamminger, 2010).

Bei geschlossenen Hallen ist zwischen klimatisierten und nicht klimatisierten Eissporthallen zu unterscheiden. Das Klima in klimatisierten Eissporthallen ist relativ unabhängig von der Außenlufttemperatur, es wird jedoch von der Abstrahlung der Eisfläche beeinflusst.

Um eine Reifbildung an der Eisoberfläche zu verhindern, wird die Hallentemperatur in wärmeren Perioden mittels Klimatisierung abgesenkt. Hierbei soll auch die Bildung von Nebel verhindert werden, der bei der Vermischung von warmer Hallenluft und kalter Luft direkt über der Eisoberfläche entstehen kann. Die Gefahr von Nebelbildung ist vor allem im Sommer, wenn sich die Halle aufheizt, jedoch immer noch gegeben. Um den Zuschauer nicht den niedrigen Temperaturen auf der Eisfläche auszusetzen, wird im Tribünenbereich meist wärmere Luft zugeführt. Dies schafft angenehmere Temperaturen für die Zuschauer, ohne die Schichtung über dem Eis zu stören.

Dadurch ergeben sich in geschlossenen, klimatisierten Eissporthallen zwei Bereiche mit unterschiedlicher klimatischer Beanspruchung des Tragwerks. Ein relativ warmer Bereich bei den Zuschauerrängen und ein kalter Bereich über der Eisfläche. In letzterem ist es nicht ausgeschlossen, dass sich an den kalten Trägerunterseiten Tauwasser niederschlagen kann (vgl. Abbildung 15).

Von (Marquardt & Mainka, 2008) wurden Simulationen zur Beschreibung des Tauwasserausfalls in Eissporthallen in allen Bauweisen durchgeführt. In den Untersuchungen von (Güldenpfennig, Vogelsberg & Stamminger, 2010) wurden mögliche Verbesserungsvorschläge zur Feuchteproblematik in Eissporthallen ausgearbeitet.

Da im Falle der offenen und teiloffenen Eisporthallen schon Forschungsergebnisse in Form von Messwerten und Berechnungen vorliegen wurde entschieden, in diesem Forschungsvorhaben den Fokus auf die geschlossenen, klimatisierten und nicht klimatisierten Eissporthallen zu legen. Hiermit sollte eine Aussage ermöglicht werden ob und in welchem Ausmaß vergleichbare klimatische Bedingungen wie in den offenen und teiloffenen Eissporthallen vorliegen.

4.2.4 Kategorie C – Reithallen

Reithallen können sowohl als offene als auch als geschlossene Räume ausgeführt werden. In Bezug auf das Hallenklima sind jedoch keine großen Unterschiede zu erwarten, da die geschlossenen ungedämmten Hallen aus Kostengründen und um die Gesundheit der Pferde nicht zu gefährden unbeheizt bleiben. Die großen, meist offen stehenden Hallentore tragen zusätzlich dazu bei, dass sich der Temperaturverlauf in der Halle dem der Außentemperaturen annähert. Demzufolge kann es im Winter durchaus vorkommen, dass der Gefrierpunkt unterschritten wird. Ebenso können die Temperaturen in den Sommermonaten vor allem in den Bereichen der häufig vorhandenen Lichtbänder stark ansteigen.

Der Bodenbelag in Reithallen besteht aus Sand, Torf, Sägespänen und ähnlichen Materialien und muss regelmäßig bewässert werden, um größere Staubentwicklung zu vermeiden und optimale

Bodenverhältnisse zu schaffen. Die Beregnung des Bodenbelags erfolgt meist über Sprinkleranlagen die im Dachbereich untergebracht sind. Im Gegensatz zu einer Bewässerung von Hand oder mit bodennahen Einrichtungen, bei der das Wasser sofort vom Boden aufgenommen wird, ist die Luftfeuchte vor allem bei einer Beregnung von oben sehr hoch, da das Wasser von der Decke auf den Boden regnet und so gut von der Luft aufgenommen werden kann. Zudem wird durch die hohe Anstrengung der Tiere beim Training eine nicht unerhebliche Menge Wasser freigesetzt. Dementsprechend hoch ist die Luftfeuchte in der Halle.

Lüftungen oder Heizungen werden in Reithallen aus Kostengründen normalerweise nicht oder nur in sehr geringem Umfang genutzt, auch da die Pferde bei trockener Heizungsluft besonders Anfällig gegen Asthma sind. Der Luftaustausch erfolgt somit meist nur über natürliche Lüftung.

Reithallen können daher im Hinblick auf die klimabedingten Belastungen der Holz-Tragkonstruktion eine kritische Nutzung darstellen (Schnitzer, 1973).

4.2.5 Kategorie D – Sporthallen

Die in der Norm DIN 18032-1:2003-11 enthaltenen Grundsätze für die Planung von Sporthallen sehen eine Temperatur von 20°C vor. In DIN 4108-3:2001-07 sind vereinfachte Klimabedingungen für Innenklimata enthalten, die ebenfalls eine Temperatur von 20°C und eine relative Luftfeuchte von 50% vorsehen. Um diese Temperatur auch in den Sommermonaten zu gewährleisten, kommt vermehrt eine natürliche Lüftung über Fenster oder eine automatische Lüftung über eine Lüftungsanlage zum Einsatz. Im Winter hingegen muss die Heizung in Sporthallen dauernd betriebsbereit sein, um ein schnelles Aufheizen zu ermöglichen, damit im Betrieb von Beginn an angenehme Temperaturen in der Halle herrschen.

Verschiedene Sportarten haben unterschiedliche Wohlfühltemperaturen, dementsprechend muss die Heizung in der Halle zum Beispiel für bewegungsintensive Sportarten wie Fußball oder Handball nur auf eine Temperatur von 15-16°C eingestellt werden, während für Gymnastik oder vergleichbare Sportarten über 20°C herrschen sollten.

Da der Betrieb von Sporthallen meist durch öffentliche Träger erfolgt, werden Heizung und Lüftung aus Kostengründen meist genau reguliert und laufen deshalb oft nur während der Betriebszeiten der Sporthalle, was vor allem im Winter zu starken Nachtabkühlungen führen kann. Auch durch die unregelmäßige Nutzung der Hallen wie z.B. bei Schulsporthallen, die in den Ferien und im Sommer nur in geringerem Umfang genutzt werden, kann es zu Schwankungen im Klima kommen, die eine besondere Beanspruchung für das Holztragwerk darstellen können.

Bei Sporthallen wird im Betrieb durch die Anstrengungen und Aktivität der Sportler Feuchtigkeit abgegeben, die durch die Lüftungsanlagen aber wieder abgeführt wird. Aus Gründen der Belichtung sind meist Lichtbänder vorhanden, wodurch direkte Sonneneinstrahlung auf das Tragwerk gelangt und dieses austrocknet. Die meist verwendeten Heizsysteme über Lüftungsanlagen mit hohen Luftwechselraten tragen auch dazu bei, dass in Sporthallen vor allem

im Winter ein für das Tragwerk sehr trockenes Klima herrscht. Von (Machnicki, 2009) durchgeführte Simulationen zu sich einstellenden Klimawerten in Sporthallen mit Umluft-Heizungsanlagen bestätigen dies.

4.2.6 Kategorie E – Produktions- und Verkaufshallen

Bei Produktionshallen ist das Hallenklima sehr stark von der Nutzungsart abhängig, da in der Industrie sehr unterschiedliche Anforderungen an das Gebäudeklima und die technische Gebäudeausrüstung wie Heizung, Kühlung und Lüftung gestellt werden.

In den meisten Branchen ist vor allem darauf zu achten, dass das Hallenklima innerhalb vorgeschriebener Grenzen bleibt, um keine Schäden am Produkt zu verursachen. So ist zum Beispiel bei einem stahlverarbeitenden Betrieb eine geringe Luftfeuchte gefordert, um das Korrodieren des Stahls zu verhindern. Die Anforderungen an Produktionsstätten mit hohem Automatisierungsgrad sind in der Regel nicht so hoch wie bei Räumen mit hoher Personenbesetzung. Jedoch können hoch automatisierte Anlagen erheblichen Einfluss auf das Hallenklima haben. So wird sich in einer Wäscherei eine sehr hohe, in einem Stahlwerk dagegen eine sehr niedrige Luftfeuchte bei gleichzeitig sehr hohen Temperaturen aufgrund des Wärmeeintrages der Maschinen einstellen.

In der Industrie gibt es zahlreiche andere Beispiele mit unterschiedlichen Anforderungen, woraus sich verschiedenste klimatische Beanspruchungen für das Tragwerk ergeben können. Somit sind diese objektspezifisch zu ermitteln.

4.2.7 Kategorie F – Landwirtschaftliche Hallen

Landwirtschaftliche Hallen lassen sich nutzungstechnisch in die Bereiche Ställe, Lagerhallen für Heu, Stroh oder Getreide und Maschinenhallen unterteilen. Für alle gilt, dass sie als Kaltraum meist in offener Bauweise ausgeführt werden. In Stallungen herrscht meist eine hohe Dichte an Tieren, wodurch sehr viel Feuchte durch das Vieh eingetragen wird. Die Lagerhallen müssen aufgrund der verderblichen Güter eher trocken gehalten werden. Der Luftwechsel erfolgt dabei häufig nur über natürliche Lüftung durch öffenbare Lichtbänder und Seitenwände oder kleinere wenig leistungsfähige Be- und Entlüftungsanlagen. Erwartungsgemäß sollten daraus vor allem bei den feuchten Umgebungsbedingungen in Ställen höhere Holzfeuchten im Bereich von ca. 14 - 18% resultieren.

Landwirtschaftliche Hallen sind in ihrer Konstruktionsweise mit Reithallen vergleichbar, wobei die Luftfeuchte vermutlich nur in den Ställen ähnliche hohe Werte erreichen kann. Konkrete Untersuchungen zu landwirtschaftlichen Nutzungen sind den Verfassern nicht bekannt. Da solche Hallen jedoch bevorzugt in Holzbauweise ausgeführt werden, ist es von besonderem Interesse, die klimatischen Randbedingungen mittels Langzeitmessungen zu untersuchen.

4.2.8 Kategorie G – Lagerhallen

Lagerhallen sind je nach Anforderung offen oder geschlossen. Spielt die Temperatur und relative Luftfeuchte für die gelagerten Güter eine Rolle, so werden sie geschlossen ausgeführt und falls erforderlich mit einer genau abgestimmten technischen Gebäudeausrüstung versehen, um die speziellen klimatischen Bedürfnisse des Lagergutes erfüllen zu können. Die technische Gebäudeausrüstung kann Lüftung, Heizung, Klimatisierung sowie Luftbefeuchtungsanlagen beinhalten.

Das gewünschte Klima in der Halle ist ebenso wie bei Produktionshallen von der Art der gelagerten Materialien abhängig. Vor allem bei empfindlichen Materialien wie Papier, Magnetbändern, Filmen oder ähnlichem ist die Einhaltung von bestimmten Werten für die Dauerhaftigkeit der Güter wichtig. Andere Güter wiederum stellen geringere Bedingungen an die Temperatur und die Luftfeuchte und können in offenen, halb - offenen oder unbeheizten geschlossenen Hallen unter dem Außenklima vergleichbaren Randbedingungen gelagert werden. Letztgenannte Konstruktionstypen weisen meist höhere Holzfeuchten auf, da dort gerade im Herbst die Hallenluft abkühlt und die relative Luftfeuchte und somit auch die Holzfeuchte ansteigen. In offenen Hallen kann in einer solchen Situation die Feuchtigkeit durch den Luftaustausch entweichen.

Die Randbedingungen in Lagerhallen sind somit je nach gelagertem Material unterschiedlich und dementsprechend, wie auch im Fall von Produktionshallen, objektspezifisch zu ermitteln.

4.3 Auswahl der Nutzungen und Gebäudetypen im Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“

Entsprechend des Forschungsantrages des Folgevorhabens „Gebäudeklima – Validierung“ sollen die Langzeitmessungen in hinsichtlich der Umgebungsbedingungen besonders interessanten Messobjekten fortgeführt werden um auch für diese Nutzungen präzise und belastbare Aussagen machen zu können bzw. um die bisher gewonnenen Erkenntnisse zu verifizieren. Die Fortführung der Langzeitmessung wird dabei auf zehn Objekte beschränkt. Nachfolgend wird die Auswahl der Nutzungen und Gebäudetypen für das Folgevorhaben kurz vorgestellt und anhand der Ergebnisse aus dem ersten Forschungsvorhaben begründet.

Kategorie A – Schwimmhallen

Bei den untersuchten Schwimmhallen ließ sich ein sehr konstantes und warmes Hallenklima feststellen. Durch die Klimatisierung ist das Klima in den untersuchten Schwimmhallen unabhängig vom Außenklima. Die Holzfeuchte verläuft konstant und weist nur geringe Schwankungen und kleine Gradienten auf. Somit stellt die Umgebung Schwimmhalle für ein Holztragwerk nur eine geringe klimatische Beanspruchung dar. Aus diesem Grund wurden Objekte dieser Nutzungskategorie für das Folgevorhaben nicht weiter betrachtet.

Kategorie B – Eissporthallen:

Das Umgebungsklima in geschlossenen, nicht klimatisierten Eissporthallen ist durch eine deutliche Änderung zwischen den Wintermonaten und den Sommermonaten (eisfreie Zeit) geprägt. Dementsprechend weist der jahreszeitliche Verlauf der Holzfeuchte eine große Amplitude auf. In klimatisierten Objekten stellt sich bei Betrieb der dort vorhandenen Heizung über eine Lüftungsanlage ein gemäßigteres Hallenklima mit geringeren jahreszeitlichen Schwankungen ein. Insgesamt stellen sich bei Eissporthallen eher hohe Holzfeuchten ein, die im Vergleich zu anderen Nutzungen stärker schwanken, was eine weitere Beobachtung dieser Nutzungskategorie begründet.

Kategorie C – Reithallen

Durch den Einsatz von Sprinkleranlagen kommt es in Reithallen zu sehr hohen Luftfeuchten. In Wintermonaten kommt es durch die ungedämmte Bauweise sowie der fehlenden Beheizung teilweise zu starkem Tauwasserausfall. Die Holzfeuchten sind dadurch erwartungsgemäß hoch und wie bei anderen vom Außenklima beeinflussten Nutzungen starken Schwankungen unterworfen. Diese für Reithallen typischen Randbedingungen stellen starke klimatische Beanspruchungen für das Holztragwerk dar und machen sie für die Fortführung der Langzeitmessung interessant.

Kategorie D – Sporthallen

In den untersuchten Sporthallen ist ein sehr konstantes und eher trockenes Klima zu beobachten. Die Durchschnittstemperaturen sind durch die Belüftung und Beheizung der Hallen weitgehend unabhängig vom Außenklima. Daraus ergeben sich Holzfeuchten die sich über das Jahr hinweg nur wenig verändern. Für alle Objekte gilt, dass die während des Betriebes ermittelten Holzfeuchtegradienten sehr gering sind. Die kontrollierten Umgebungsbedingungen in Sporthallen begründen die Entscheidung Sporthallen bei der Fortführung der Langzeitmessungen nicht mehr zu untersuchen.

Kategorie E – Produktions- und Verkaufshallen

Das Klima in den beiden untersuchten Hallen ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Nutzung nur bedingt miteinander vergleichbar. Beide Hallen werden teilweise vom Außenklima beeinflusst, aufgrund der Beheizung sind die Schwankungen der Luftfeuchte- und Temperatur jedoch gedämpft. Der Verlauf der Holzfeuchte und der Holzfeuchtegradiente während des Betriebes ist bei beiden untersuchten Objekten sehr konstant. Im Zuge des Umbaus und der Erweiterung eines Objektes wurden die Schmiedearbeiten, die für das sehr trockene Hallenklima verantwortlich waren, eingestellt und die Halle wurde umgenutzt. Bei einer Fortführung der Langzeitmessung kann der Einfluss dieser Nutzungsänderung auf den Verlauf der Holzfeuchte untersucht werden.

Kategorie F – Landwirtschaftliche Hallen

In den untersuchten landwirtschaftlichen Hallen mit Viehhaltung herrscht wegen der offenen und ungedämmten Bauweise und der starken Belüftung (Seitenflächen teilweisen ganzjährig offen, zusätzlich Dachentlüftung) praktisch Außenklima. Die relative Luftfeuchte ist aufgrund des Feuchteeintrags durch das Vieh leicht erhöht. Daraus ergeben sich hohe Holzfeuchten die zudem stark schwanken. Wegen dieser sowohl für das Holztragwerk als auch für die Messung der Holzfeuchte kritischen Randbedingungen wurde beschlossen die Langzeitmessung in zwei der drei Objekte dieser Nutzung fortzuführen.

Kategorie G – Lagerhallen

Da Lagerhallen meist offen sind, ist das Hallenklima stark vom Außenklima abhängig. Die Holzfeuchten schwanken wegen des Einflusses des Außenklimas stärker als bei allen anderen untersuchten Nutzungsarten. In einer de untersuchten Hallen stellt sich aufgrund eines hohen Feuchteeintrags in den Wintermonaten höhere Luftfeuchten ein als bei den anderen Messobjekten. Das führte zeitweise zu erheblicher Tauwasserbildung an den Oberflächen des Holztragwerks der Lagerhalle was zur größten jahreszeitlichen Amplitude der Holzfeuchte wie auch den größten Holzfeuchtegradienten aller untersuchten Objekte resultierte. Diese Ergebnisse machen die Kategorie Lagerhalle auch für die Fortführung der Langzeitmessungen interessant.

4.4 Vorstellung der gewählten Hallen für die beiden Forschungsvorhaben

4.4.1 Allgemeines

Im Folgenden wird die Auswahl der einzelnen Objekte vorgestellt, die für die Langzeitmessung im Rahmen der beiden Forschungsvorhaben getroffen wurde (vgl. Abbildung 16 und Tabelle 3). Die Objekte befinden sich alle in Bayern, da nähergelegene Hallen wegen der kürzeren Anfahrtswege bevorzugt wurden. Da für die Interpretation der Umgebungsbedingungen und der Messwerte eine Vielzahl an Bauwerksinformationen notwendig ist, wurde entschieden, diese in Form von Objektinformationsblättern im Anhang aufzuführen. Auf diesen sind für jedes Objekt die relevanten Informationen wie Gebäudehülle, Umgebungsbedingungen, Klimatisierung, Tragsystem, Bauteilabmessungen, Oberflächenbehandlung und Lage der Messstellen vermerkt. Zusätzlich sind dort jeweils ein Grundriss und Schnitt des Objektes sowie Fotos des Innenraumes und der Messstellen gegeben. Um gegebenenfalls geänderte Randbedingungen bei der Fortführung der Langzeitmessung zu dokumentieren, wurden die wichtigsten Informationen zum Bauwerk für das Folgevorhaben aktualisiert.

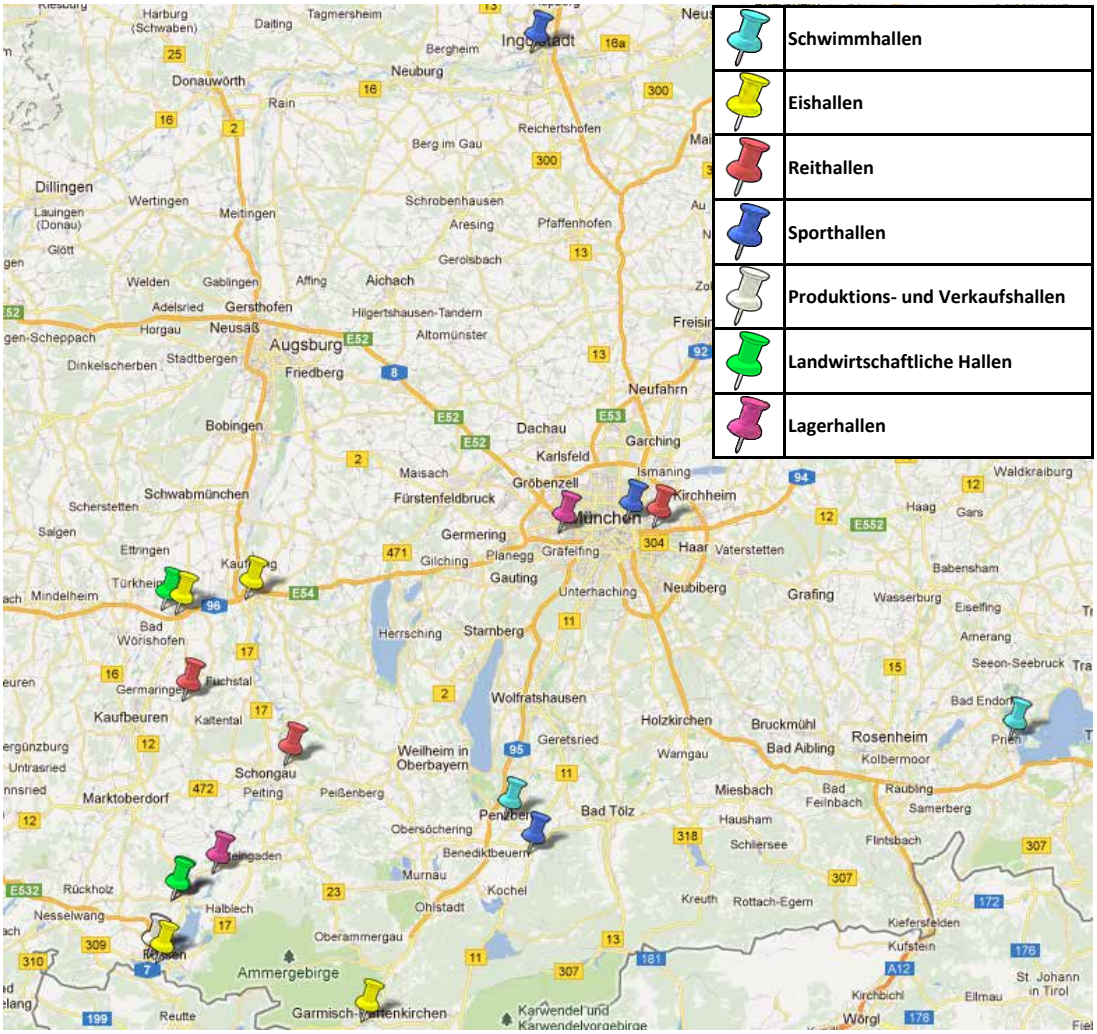


Abbildung 16 Darstellung der Gebäudestandorte für alle ausgewählten Hallen. Aus (Google Maps).

Tabelle 3: Gewählte Hallen für die Langzeitmessungen

Kategorie		Hallentyp	Gebäudeklima Validierung
	**A**	**Schwimmhallen**	
	A1	Wellenbad Penzberg – Hallenbereich	
	A2	Wellenbad Penzberg – Durchgang zum Außenbecken	
	A3	Schwimmhalle Prienavera Prien	
	**B**	**Eissporthallen**	**X**
	B1	Eissporthalle Landsberg	
	B2	Eissporthalle Buchloe	
	B3	Olympia – Eissporthalle Garmisch- Partenkirchen	X
	B4	Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen	X
	**C**	**Reithallen**	**X**
	C1	Olympia Reithalle München- Riem	X
	C2	Gestüt Obere Mühle Blonhofen	
	C3	Sternstunden – Reithalle Herzogsägmühle	X
	**D**	**Sporthallen**	
	D1	Paul Wegmann-Halle Ingolstadt	
	D2	Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern	
	D3	Turnhalle Gebeleschule München	
	**E**	**Produktions- und Verkaufshallen**	**X**
	E1	Verkaufshalle Sportmarkt Füssen	X
	E2	Produktionshalle MW Racing Füssen	X
	**F**	**Landwirtschaftliche Hallen**	**X**
	F1	Landwirtschaftsbetrieb Greiß Roßhaupten	X
	F2	Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten	
	F3	Schmitz – Kälberzentrum Buchloe	X
	**G**	**Lagerhallen**	**X**
	G1	Pflanzenhalle Willibaldstraße München	X
	G2	Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem	X
	G3	Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf	

4.4.2 Begründung der für das Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ gewählten Hallen

Im Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ sollen Nutzungen mit stark schwankenden Hallenklima untersucht werden. Die beiden Nutzungskategorien Schwimmhallen und Sporthallen werden wegen ihres relativ konstanten Hallenklimas demzufolge nicht weiter untersucht. Die verbleibenden fünf Nutzungskategorien wurden jeweils auf zwei Objekte beschränkt um die im Forschungsvorhaben angegebene Anzahl von insgesamt zehn Untersuchungsobjekten nicht zu überschreiten. Die Auswahl der Messobjekte innerhalb einer Nutzungskategorie erfolgte anhand mehrerer Kriterien. Dazu gehören die Qualität der bisher erhaltenen Messergebnisse, die Beeinflussung der Messung durch äußere Umstände, die Zugänglichkeit der Messtechnik sowie die Randbedingungen der Installation.

In der Kategorie Eissporthallen werden die beiden Objekte B3 und B4 weiter untersucht. Im Objekt B1 (Eissporthalle Landsberg) wurden im Mai 2011 Renovierungsarbeiten durchgeführt, die dazu führten, dass die Zugänglichkeit des Dachtragwerkes nicht mehr gegeben ist. Die Langzeitmessungen konnten in dieser Halle somit nicht fortgeführt werden. Im Objekt B2 (Eissporthalle Buchloe) führten Starkstromleitungen auf der Rückseite des untersuchten Dachträgers zu Beeinflussungen der Messung während des Betriebs der Beleuchtung. Da diese Stromleitungen an allen Trägern des Dachtragwerks angebracht sind, wurde die Entscheidung getroffen das Objekt B2 bei der Fortführung der Langzeitmessung nicht mehr zu berücksichtigen. Zu Objekt B3 (Olympia-Eissportzentrum Garmisch-Partenkirchen) ist anzumerken, dass die Halle im Zeitraum Dez. 2010 – Anfang März 2011 als Pressezentrum für eine Sportveranstaltung genutzt wurde. Somit stellt die erste Messperiode von einem Jahr keinen Normalbetrieb dar, was eine Fortführung der Messung in diesem Fall sinnvoll erscheinen lässt. Die geschlossenen Eissporthallen B3 und B4 stellen zudem die heutzutage meist realisierte Bauweise für Eissporthallen dar.

Bei der Nutzungskategorie Reithallen wurde das Objekt C2 (Gestüt Obere Mühle Blonhofen) für die weiteren Untersuchungen nicht mehr betrachtet, da die anderen Objekte dieser Nutzung qualitativ hochwertigere Messergebnisse lieferten.

Bei den landwirtschaftlichen Hallen sollte das Objekt F3 (Kälberzentrum Schmitz Buchloe) und einer der beiden Landwirtschaftlichen Betriebe (Objekte F1 und F2) weiter untersucht werden. Bei ansonsten sehr ähnlichen Bedingungen wurde dem Objekt F1 wegen der besseren Zugänglichkeit der Messtechnik der Vorzug gegeben.

Die Nutzungskategorie Produktions- und Verkaufshallen bestand im ersten Forschungsvorhaben nur aus zwei Objekten, die bei der Fortführung der Langzeitmessung weiterhin untersucht werden.

Die Lagerhalle der Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf (Objekt G3) wurde für die weiteren Untersuchungen nicht mehr betrachtet, da die geschlossene Halle im Vergleich zu den anderen beiden Objekten dieser Nutzungskategorie die geringste Schwankung des Hallenklimas aufweist.

In Tabelle 4 ist eine Zusammenfassung der getroffenen Auswahl der Nutzungen mit der Anzahl der Hallen je Nutzung enthalten.

Tabelle 4: Auswahl der zu untersuchenden Nutzungen und Anzahl der Hallen je Nutzung im Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“

Nutzung	**Kategorie**	**Anzahl der Hallen**
~~**Schwimmhalle**~~	~~A~~	~~3~~
Eissporthalle	B	~~4~~ → 2
Reithalle	C	~~3~~ → 2
~~**Sporthalle**~~	~~D~~	~~3~~
Produktions- und Verkaufshalle	E	2 → 2
Landwirtschaftliche Halle	F	~~3~~ → 2
Lagerhalle	G	~~3~~ → 2
Summe	~~**7**~~ → **5**	~~**21**~~ → **10**

5 Langzeitmessung von Holzfeuchtegradienten und Umgebungsbedingungen

5.1 Wahl des Messverfahrens

Grundsätzlich wird bei der Holzfeuchtebestimmung zwischen den direkten und den indirekten Verfahren unterschieden. Bei den direkten Messverfahren wird der Wasseranteil durch Darren oder Feuchteextraktion unmittelbar ermittelt. Bei den indirekten Messverfahren wird der Feuchtegehalt über korrelierende physikalische Eigenschaften des Holzes ermittelt, bei denen der Zusammenhang zwischen der Materialfeuchte und der gemessenen physikalischen Größe bekannt ist. Wegen der eindeutigen und genaueren Bestimmung der Holzfeuchte bei den direkten Verfahren sind diese gegenüber den indirekten vorzuziehen (Niemz, 2005).

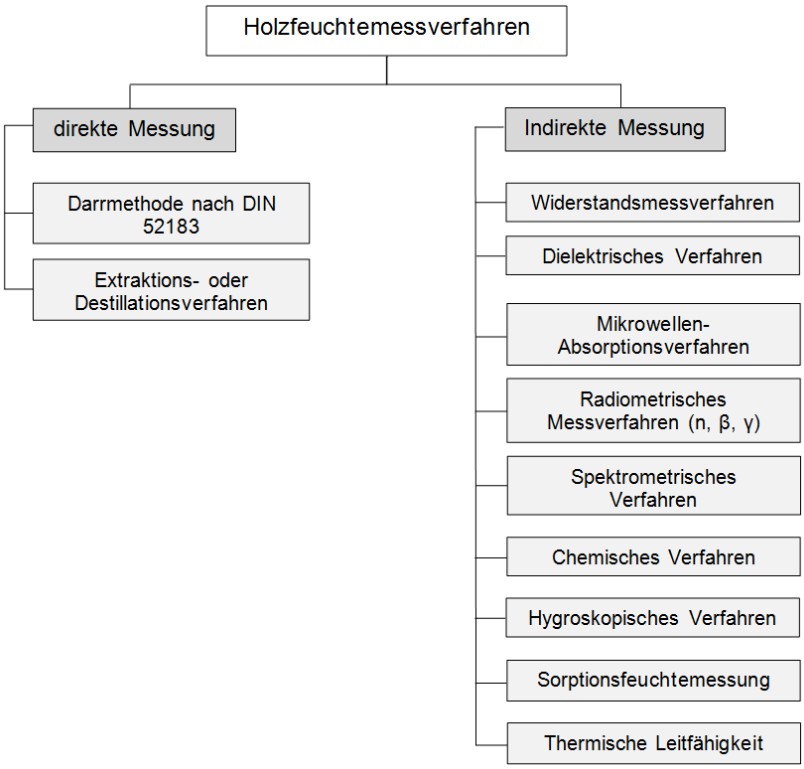


Abbildung 17: Übersicht über die Holzfeuchtemessverfahren. Aus (Herrmann, 2009).

Im Rahmen dieser Forschungsvorhaben sollen Langzeitmessungen an bestehenden Hallen in Holzbauweise durchgeführt werden um Aussagen über die Feuchteverteilung in Holzquerschnitten des Tragwerkes und dessen Abhängigkeit vom Hallenklima machen zu können.

Das verwendete Messverfahren muss eine Messvorrichtung aufweisen, die am Tragwerk montiert werden kann, nach Möglichkeit unabhängig Messungen durchführt und die dabei erhaltenen Ergebnisse speichert. Die Messung muss zerstörungsfrei sein, da die bestehende Tragstruktur nicht beschädigt und keine Proben entnommen werden dürfen. Entscheidend ist, dass mit dem gewählten Messverfahren genaue Holzfeuchtemessungen in unterschiedlichen Messtiefen möglich sind, um eine Feuchtegradiente über den Querschnitt ableiten zu können.

Zu Langzeitmessungen der Holzfeuchte in Holzkonstruktionen gibt es mehrere Untersuchungen z.B. von (Brischke & Rapp, 2007) zur Holzfeuchtemessung mit dem Widerstandsverfahren und von (Evans, Kleppe & Dyken, 2006) zur Sorptionsfeuchtemessung. (Kießl & Steinbach, 2006) zeigen in ihrer Arbeit die Grenzen der Einsatzgebiete dieser beiden Messverfahren in Bezug auf vorbehandelte Holzbauteile auf. In den Arbeiten von (Du, Geissen, & Noack, 1991) und (Forsén & Tarvainen, 2000) werden die erreichbare Genauigkeit und die Einsatzmöglichkeit handelsüblicher Holzfeuchtemessgeräte behandelt. In (Dietsch, Franke, Franke, Gamper, & Winter, 2014) werden verschiedene Methoden zur Bestimmung von Holzfeuchte und deren Verwendung in Monitoring Konzepten vorgestellt.

Unter Beachtung dieser Aspekte wurde im Rahmen der Forschungsvorhaben das Widerstandsmessverfahren ausgewählt. Die Gründe für diese Wahl liegen in den ausreichend genauen Messwerten (± 0,5%), die mit diesem Verfahren annähernd zerstörungsfrei gemessen werden können. Bei Verwendung von Tiefenelektroden verschiedener Länge ist eine Ermittlung der Feuchtegradiente über den Holzquerschnitt möglich. Zudem stellt dieses Verfahren eine bewährte und in Fachkreisen anerkannte Messmethode dar. Es ist das bis vor einigen Jahren fast ausschließlich und heute nach wie vor am häufigsten angewendete Verfahren zur Holzfeuchte-Bestimmung. Es stellt damit den momentan allgemein anerkannten Stand der Technik dar. Zudem ist es möglich auf eine Vielzahl von auf dem Markt angebotenen elektrischen Messgeräten zurückzugreifen.

5.2 Beschreibung des gewählten Messverfahrens - Widerstandsmessverfahren

Das gewählte Messverfahren beruht auf der Messung des elektrischen Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit von Holz. Da Wasser eine viel höhere elektrische Leitfähigkeit besitzt als Holz, sinkt der elektrische Widerstand mit zunehmender Holzfeuchte. Bei genauer Kenntnis dieser Gesetzmäßigkeit, kann somit auf die lokal vorhandene Holzfeuchte geschlossen werden.

Neben dem Feuchtegehalt ist der elektrische Wiederstand von Holz auch von der Temperatur abhängig. Somit gehört Holz zu den sogenannten Heißleitern, d.h. der elektrische Widerstand nimmt mit zunehmender Temperatur ab (vgl. Abbildung 18). Um bei der Holzfeuchtemessung zuverlässige Aussagen über den tatsächlichen Feuchtegehalt machen zu können, ist aufgrund des Einflusses die Holztemperatur mit zu erfassen.

In der Praxis werden bei der elektrischen Widerstandsmessung zwei Elektroden in einem definierten Abstand von ca. 30 mm möglichst senkrecht zur Faser in das Holz geschlagen oder an der Oberfläche befestigt. Über diese wird eine vom Messgerät erzeugte Spannung angelegt um den feuchteabhängigen Spannungsabfall zu ermitteln.

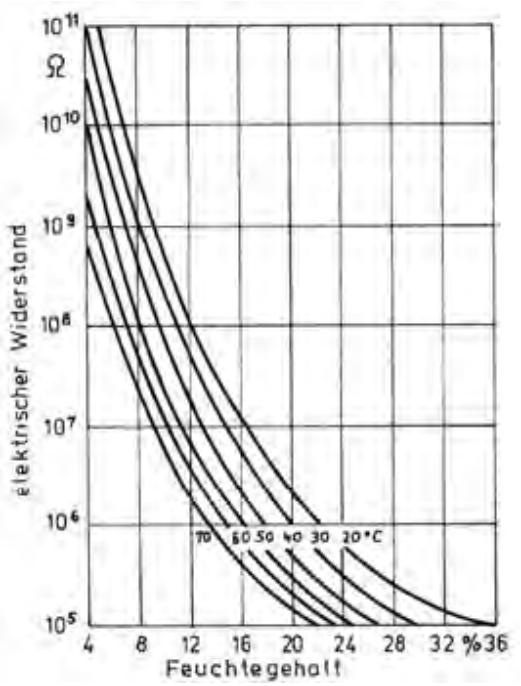


Abbildung 18: Einfluss von Feuchtegehalt und Temperatur auf den elektrischen Widerstand von Holz. Aus (Niemz, 2005) nach (Keylwerth & Noack, 1956)

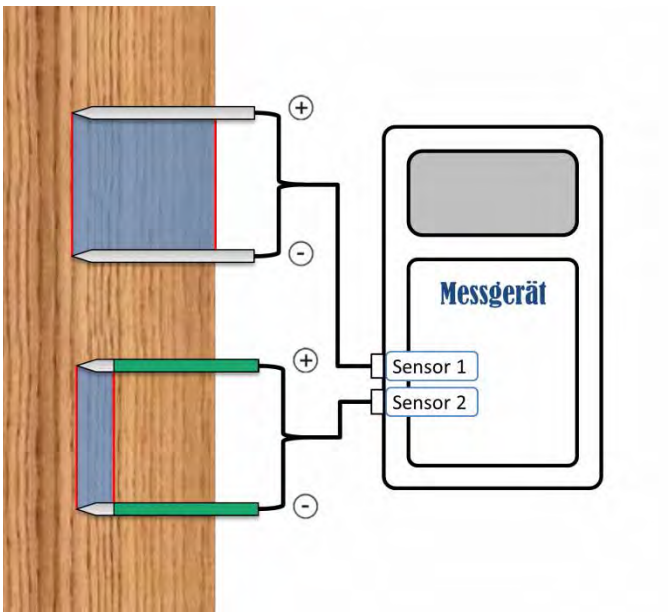


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Widerstandsmessverfahrens und des Messbereiches bei isolierten und nicht isolierten Messelektroden.



Abbildung 20: Verwendetes Referenz-Holzfeuchtemessgerät (Hydromette RTU 600) der Firma GANN.

Um die Holzfeuchten in verschiedenen Tiefen messen zu können sind unterschiedliche Elektrodentypen verfügbar. Es gibt nicht isolierte Oberflächenelektroden und teflonisolierte

Elektroden, die eine Feuchtemessung in genau definierten Schichten des Bauteils zulassen. Mit letzteren kann bei Anordnung mehrerer Elektrodenpaare in unterschiedlichen Tiefen die Feuchteverteilung über den Querschnitt und somit ein eventuell vorliegender Feuchtegradient ermittelt werden (vgl. Abbildung 19).

5.3 Beschreibung der Messvorrichtung für das Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“

Um den Anforderungen des Forschungsvorhabens zu entsprechen muss die Messtechnik zwei Messstellen mit jeweils mehreren unterschiedlich langen Tiefenelektrodenpaaren umfassen. Die Holzfeuchte soll stündlich gemessen und gespeichert werden. Parallel dazu sollen die Klimadaten der Hallen, wie relative Luftfeuchte, Raumtemperatur und Oberflächentemperatur der zwei Messstellen aufgenommen und gespeichert werden. Dementsprechend werden Datenlogger benötigt, die diese Datenmengen aufnehmen können.

In Zusammenarbeit mit der Firma Scanntronik Mugrauer GmbH wurde ein geeignetes Messsystem gewählt und konfiguriert. Bei diesem Projektpartner handelt es sich um einen Hersteller von Messtechnik, der Datenlogger zur Messdatenerfassung von Luftfeuchte, Temperatur, Materialfeuchtigkeit, Rissbewegung, Spannung, Strom, u.v.m. entwickelt. Ein Grund für die Wahl dieses Industriepartners war, dass die Firma bis zum Beginn des ersten Forschungsvorhabens ein neues Messsystem entwickelt hatte, das den oben genannten Anforderungen an ein Messsystem für Langzeitmessungen entspricht.

Bei diesem Messsystem handelt es sich um ein Modul, mit dem auf bis zu acht Kanälen Materialfeuchten nach dem Widerstandsmessverfahren bestimmt werden können. Da dieses Modul zum Zeitpunkt der Wahl des Messsystems noch weiterentwickelt wurde, konnte es an die Bedürfnisse des Forschungsvorhabens angepasst werden. In Verbindung mit einem Datenlogger, Messkabeln und geeigneten Messelektroden stellt diese Messtechnik ein Messsystem für Holzfeuchte dar, das den gestellten Anforderungen entspricht.

Damit an den zwei Messstellen die Holzfeuchte jeweils in vier unterschiedlichen, genau definierten Tiefen gemessen werden kann, sind isolierte Messelektroden mit entsprechender Länge erforderlich. Hierbei wurde auf Messelektroden zurückgegriffen, die in Holztrocknungsanlagen verwendet werden. Diese werden unter anderen von der Firma GANN hergestellt und sind in diesem Fall in fünf verschiedenen Längen von 10 bis 70 mm erhältlich. Für diese Forschungsvorhaben wurden die Längen 15, 25, 40 und 70 mm ausgewählt, um den Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt erfassen zu können (vgl. Abbildung 21). Anforderungen beim Setzen von Messelektroden sind in z.B. in Merkblättern von (BES BOLLMANN - Drying & Control Systems, 2012) enthalten.

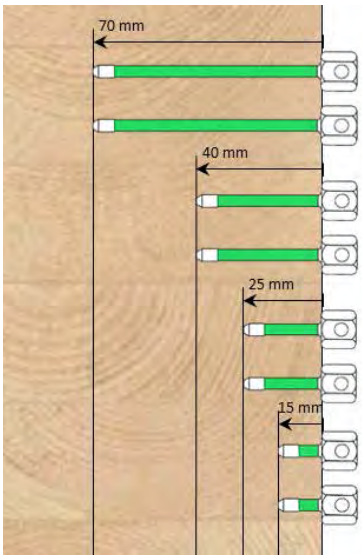


Abbildung 21: Schematische Darstellung der verwendeten Messelektroden. (Hinweis: die dargestellte Lage der Elektroden entspricht nicht dem eingebauten Zustand, dort wurden sie in einer Lamelle angebracht).

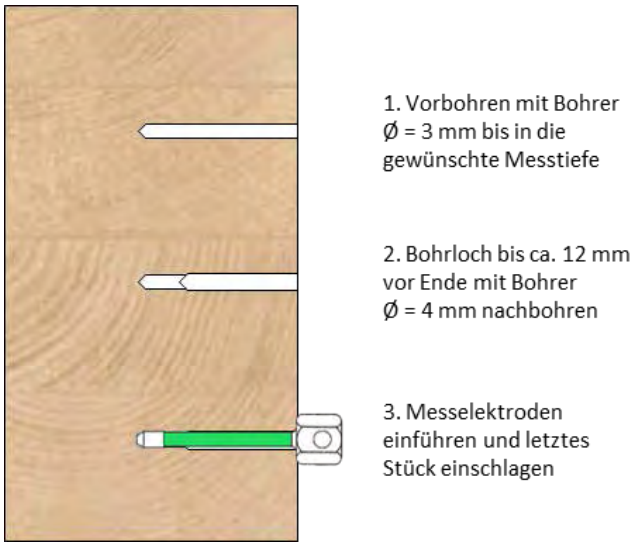


Abbildung 22: Richtiges Setzen der Messelektroden im Brettschichtholzquerschnitt.

Die Messelektroden sollten in einer Lamelle und möglichst senkrecht zur Faser angeordnet werden. Um dies wie auch die geforderte Abstände und Tiefen der Bohrungen bei der Montage ohne Nachmessen einhalten zu können wurde eine Montagehilfe entwickelt, mit deren Hilfe die Messelektroden schnell, einfach und genau installiert werden können. Es handelt sich dabei um je eine Aluminium- Bohrführung für jede Länge der Messelektroden und eine Bohrschablone aus einer Furnierschichtholzplatte (vgl. Abbildung 23).

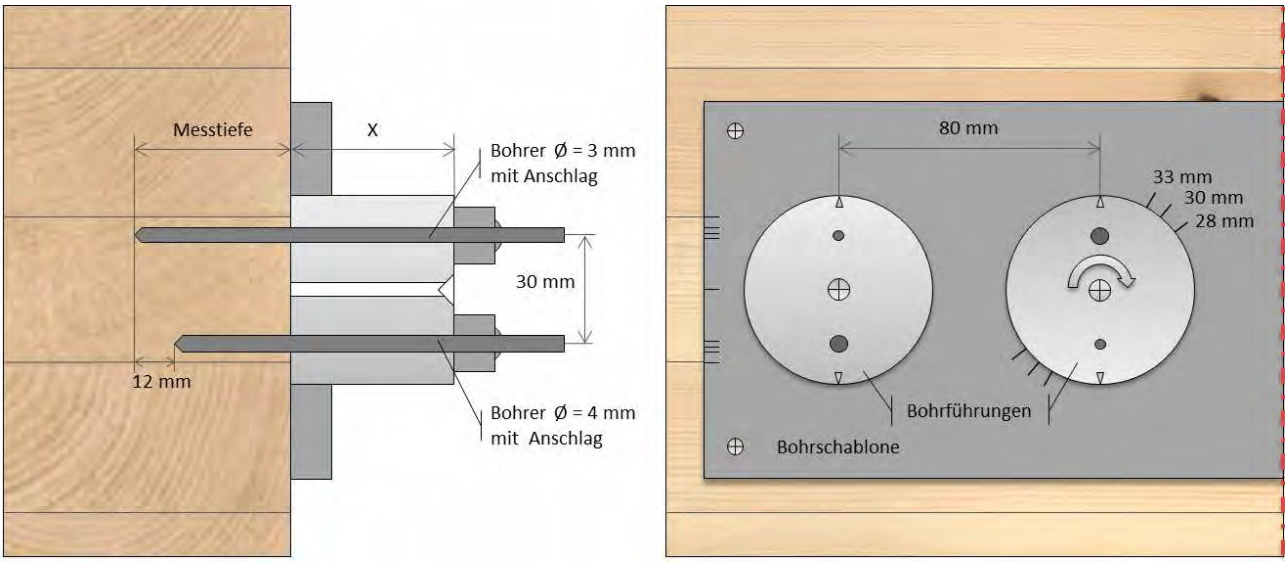


Abbildung 23: Montagehilfe in Form einer Bohrschablone und Bohrführungen als Hilfe bei der Installation der Messelektroden in BSH- Lamellen unterschiedlicher Stärke.

Über speziell angefertigte, abgeschirmte Koaxialkabel werden die Messelektroden an das zuvor beschriebenen Materialfeuchtemessgerät angeschlossen. In Verbindung mit einem Datenlogger können so an zwei Messstellen je vier Widerstände in unterschiedlicher Tiefe erfasst werden. Über einen zweiten Datenlogger in Kombination mit einer Sensoreinheit für relative Luftfeuchte und Lufttemperatur werden die Klimadaten aufgezeichnet. Durch zwei externe Sensoren werden zudem die Oberflächentemperaturen an den beiden Messstellen erfasst um eine Referenztemperatur für die Temperaturkompensation der Holzfeuchtemesswerte zu erhalten (vgl. Abbildung 24).

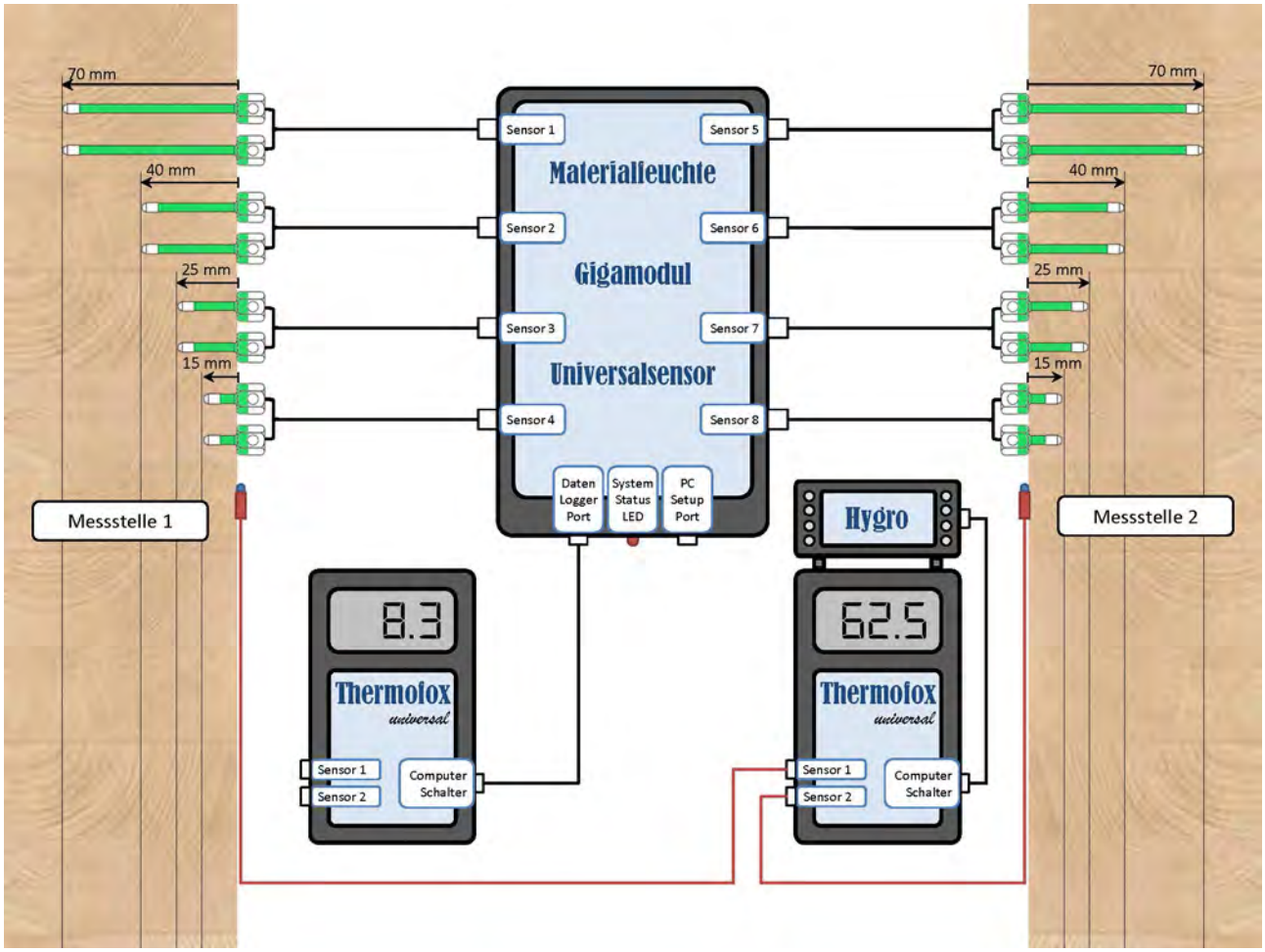


Abbildung 24: Systematische Darstellung der Messtechnik.

5.4 Kalibrierung der Messtechnik

Bevor die Messtechnik in den Hallen installiert werden konnte wurde sie anhand verschiedener Laborversuche getestet. Das System wurde an Probekörpern aus Brettschichtholz installiert und in den Klimakammern der Prüfstelle Holzbau der TU München unterschiedlichen Randbedingungen ausgesetzt. Es wurden sehr trockene, sehr feuchte und stark schwankende Klimabedingungen erfasst. Die Holzfeuchte der Probekörper unter diesen verschiedenen Umgebungsbedingungen wurde hierbei mit dem ausgewählten Messsystem kontinuierlich gemessen, wobei eine ständige Verifizierung durch Vergleichsmessungen mit einem kalibrierten Referenz- Holzfeuchtemessgerät der Firma GANN durchgeführt wurde. Dabei konnte kein wesentlicher Unterschied in den Messergebnissen der beiden Systeme festgestellt werden.

Um einen eventuellen Einfluss der Elektroden auf die Holzfeuchtemessung festzustellen wurde zusätzlich ein Vergleich der unterschiedlichen Messelektroden durchgeführt. Untersucht wurden Einschlagelektroden mit und ohne isoliertem Schaft und Messelektroden aus Trocknungsanlagen, jeweils hergestellt von der Firma GANN. Mit diesen Elektroden und der vorliegenden Messtechnik wurde die Holzfeuchte über einen längeren Zeitraum an einem sehr homogenen Probekörper gemessen. Gleichzeitig wurde der Probekörper in gleichmäßigen Abständen mit dem Referenz-Holzfeuchtemessgerät (Hydromette RTU 600) der Firma GANN nachgemessen und die erhaltenen Werte verglichen. Es konnte kein wesentlicher Unterschied zwischen den verwendeten Messelektroden beobachtet werden. Deshalb blieb die Elektrodenform bei der Auswertung unberücksichtigt.

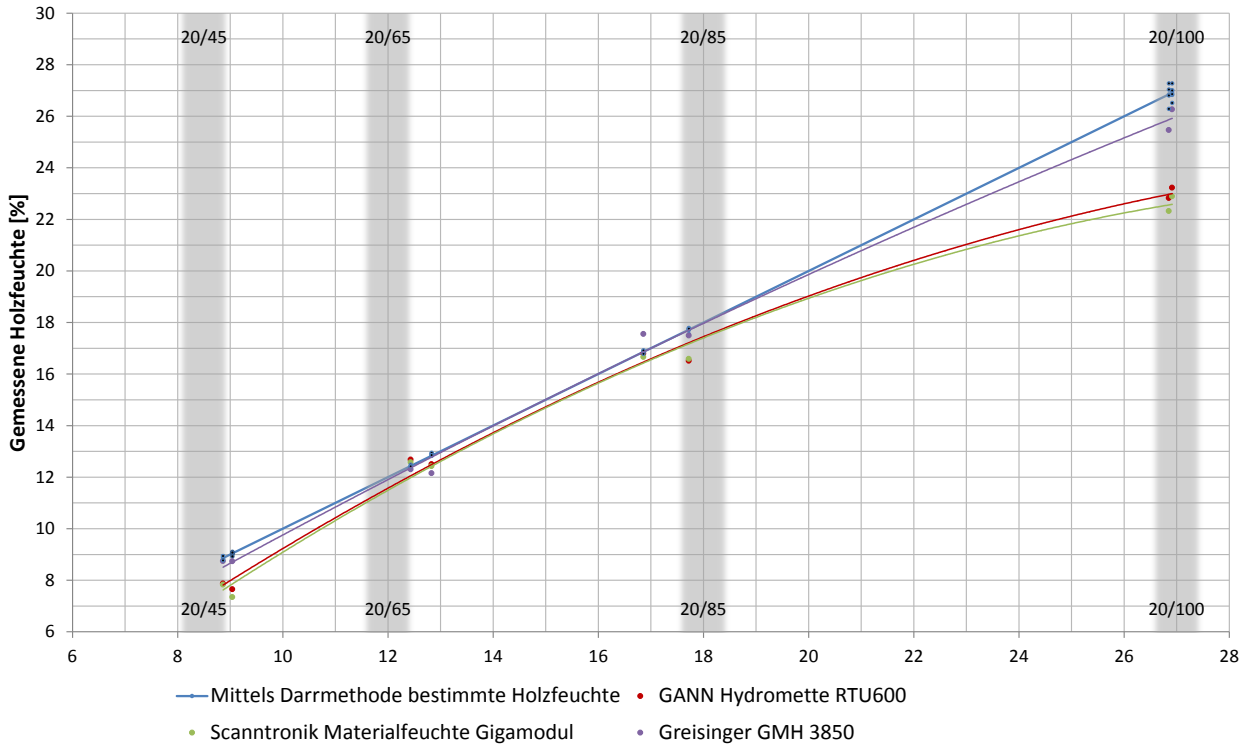
Zur weiteren Kalibrierung des Messgerätes wurden Vergleichsmessungen an Darrproben durchgeführt. Hierzu wurden zwei voneinander unabhängige Serien von Prüfkörpern hergestellt und hintereinander geprüft. Jede Serie bestand aus 4 x 6 Probekörpern mit den Abmessungen *L* x *B* x *H* = 85 x 60 x 30 mm, welche unter vier verschiedenen kontrollierten klimatischen Umgebungsbedingungen bis zur Gewichtskonstanz gelagert wurden. Die Umgebungs-bedingungen (20°C / 45 %rF; 20°C / 65 %rF; 20°C / 85 %rF und 20°C / 100 %rF) wurden in mehreren Behältern mittels verschiedener gesättigter Salzlösungen realisiert. Die Holzfeuchte dieser Probekörper wurde anschließend mit der für das Forschungsvorhaben ausgewählten Messtechnik und zwei Referenz - Holzfeuchtemessgeräten der Firma GANN (Hydromette RTU 600) sowie der Firma Greisinger (GMH 3850) bestimmt. Nach Ermittlung des Gewichtes der Probekörper bei Ausgleichsfeuchte wurden die Probekörper im Darrofen getrocknet und anschließend der tatsächliche Feuchtegehalt durch folgende Gleichung ermittelt:

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100\ [\%]$$

mit

u = Holzfeuchte [%]
m_{u} = Masse des feuchten Holzes [g]
m_{dtr} = Masse des darrtrockenen Holzes [g]

Der Vergleich der durch die Messgeräte erhaltenen Werte mit den mittels der Darrmethode ermittelten Holzfeuchten, ist für beide Serien in Abbildung 25 dargestellt.



		20/45	20/65	20/85	20/100	
Versuchs-reihe 1	Mittels Darrmethode bestimmte Holzfeuchte	9,04	12,83	17,72	26,91	[%]
	GANN Hydromette RTU600	7,65	12,50	16,51	23,23	[%]
	Scanntronik Materialfeuchte Gigamodul	7,35	12,42	16,59	22,89	[%]
	Greisinger GMH 3850	8,73	12,15	17,49	26,27	[%]
Versuchs-reihe 2	Mittels Darrmethode bestimmte Holzfeuchte	8,86	12,43	16,86	26,85	[%]
	GANN Hydromette RTU600	7,87	12,68	16,79	22,83	[%]
	Scanntronik Materialfeuchte Gigamodul	7,82	12,58	16,66	22,32	[%]
	Greisinger GMH 3850	8,74	12,30	17,55	25,46	[%]

Abbildung 25: Ergebnisse der Laborversuche zur Kalibrierung der Messtechnik.

Aus dem Diagramm wie auch der zugehörigen Datentabelle ist erkennbar, dass die Ergebnisse der verwendeten Messtechnik der Firma Scanntronik mit denen der Referenz- Messtechnik der Firma GANN gute Übereinstimmung zeigen, was bereits bei den vorangegangenen Untersuchungen festgestellt werden konnte. Es zeigt sich jedoch auch, dass mit zunehmender Holzfeuchte die Abweichungen zwischen den mit beiden Geräten sowie der über die Darrmethode ermittelten Holzfeuchte zunehmen. Im Bereich der in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Holzfeuchten ($u \leq 18\%$) ergeben sich maximale Abweichungen von 1,3% im Bereich der trockenen Probekörper, wobei die für das Forschungsvorhaben ausgewählte Messtechnik die Holzfeuchten tendenziell unterschätzt. Messungen mit dem Gerät der Firma Greisinger ergaben geringere Abweichungen, die im Rahmen der Messungenauigkeit von ±0,5% Holzfeuchte lagen.

5.5 Kalibrierung der Klimasensoren für das Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“

Bevor die Messtechnik im Folgevorhaben erneut Anwendung finden konnte, mussten die eingesetzten Klimasensoren für den zweiten Messzeitraum von einem Jahr kalibriert werden. Entsprechend den Herstellerangaben wird eine Kalibrierung alle ein bis eineinhalb Jahre empfohlen um eine ordnungsgemäße und möglichst genaue Aufzeichnung der Messdaten zu gewährleisten.

Für die Kalibrierung wurden Behälter mit verschiedenen gesättigten Salzlösungen verwendet, welche bereits für die Konditionierung der Prüfkörper für die Vergleichsmessungen des Messsystems zu Beginn des ersten Forschungsvorhaben zum Einsatz gekommen waren. Für die Kalibrierung wurden die Salzlösungen mit einer Ausgleichsfeuchte von 33 % r.F. und 75 % r.F. verwendet, um zwei repräsentative Stützstellen der auftretenden Bandbreite der Luftfeuchte abzudecken. Die beiden Behälter wurden hierfür mit Ventilatoren ausgestattet, um die Ausgleichsfeuchte nach dem Öffnen der Behälter möglichst schnell zu erreichen, bzw. um das Klima im Behälter möglichst homogen zu gestalten. Die Sensoren wurden unter den gewählten Randbedingungen gelagert bis sich das Klima stabilisierte. Der angezeigte Messwert wurde daraufhin jeweils an den theoretischen Soll-Wert und an den Messwert eines digitalen Referenzsensors desselben Herstellers angeglichen. Die so kalibrierten Messsensoren konnte so für einen weiteren Messzeitraum von einem Jahr eingesetzt werden.

5.6 Anpassung der Messtechnik für das Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“

Für die Fortführung der Langzeitmessung im Rahmen des Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ in 10 der ursprünglich 21 Messobjekte konnte die vorhandene Messtechnik aus dem ersten Forschungsvorhaben weitestgehend weiter verwendet werden. Dafür wurden die Messsysteme gewartet. Einige Sensoren waren für den zweiten Messzeitraum von einem Jahr zu kalibrieren wie vorab beschrieben, da die Messungenauigkeit bei langem Einsatz zunehmen kann. Bei den verbleibenden elf Messobjekten, die im Folgevorhaben nicht weiter herangezogen wurden, wurde die Messtechnik komplett deinstalliert.

Bei der Auswertung der Messergebnisse im Zuge des ersten Forschungsvorhaben konnten unterschiedliche Beeinflussungen der Messtechnik durch äußere Umstände beobachtet werden. So können z.B. Starkstromleitungen, die nahe an der Messtechnik verlaufen, zu Verfälschungen der Messdaten führen. Tauwasserbildung oder starke Verschmutzungen an der Trägeroberfläche können zu einem Kurzschluss zwischen den nicht isolierten Steckverbindungen zweier Messelektroden und damit zu falschen Messdaten führen (vgl. Abbildung 29). Zudem wurde eine nicht zu vernachlässigende Abhängigkeit der Messung der Holzfeuchte von der Temperaturverteilung innerhalb des Querschnittes festgestellt. Der Ansatz, die Temperatur im Holzquerschnitt aus der gemessenen Oberflächentemperatur (vgl. Abbildung 24) abzuleiten, führte in den meisten Fällen zu plausiblen Werten mit annehmbarer Genauigkeit. Bei Messobjekten mit stark schwankenden klimatischen Bedingungen konnte diese Genauigkeit über den vorgenannten theoretischen Ansatz nicht immer erreicht werden. Aus diesen Gründen wurde

die Messtechnik der verbleibenden zehn Messobjekte an die bisher gewonnenen Ergebnisse angepasst (Abbildung 24 und Abbildung 26).

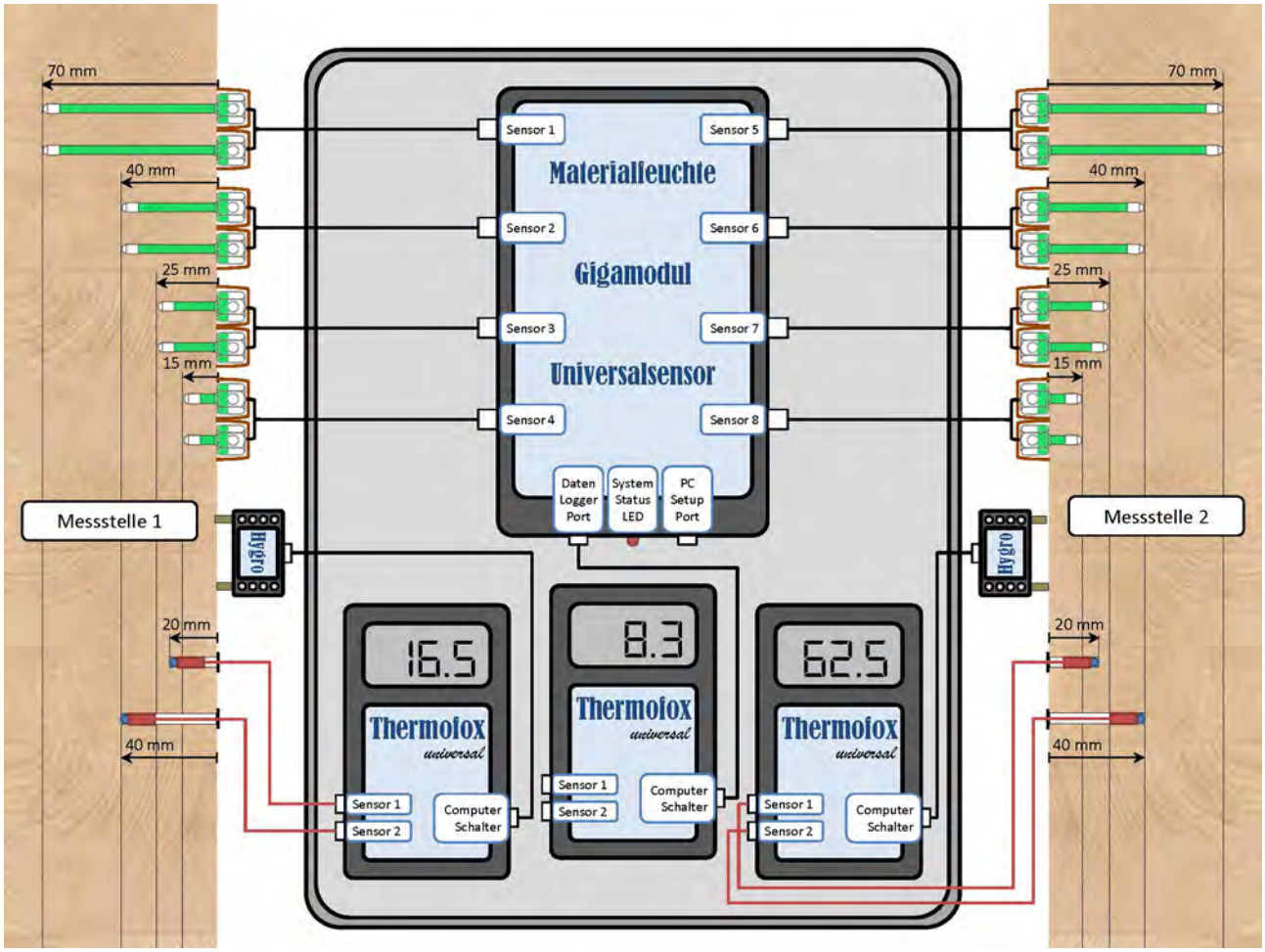


Abbildung 26: Systematische Darstellung der Messtechnik im Folgevorhaben.

Die Anzahl der Klimasensoren wurde auf zwei erhöht. Diese erfassen nun die Temperatur und die relative Luftfeuchte der umgebenden Luft an der Oberfläche der Träger im direkten Umfeld der Messstellen (vgl. Abbildung 26). Durch Messung der klimatischen Randbedingungen an der Trägeroberfläche im direkten Umfeld der Holzfeuchtemessung kann die theoretische Ausgleichsfeuchte für beide Messstellen gegenüber dem System des ersten Forschungsvorhabens genauer abgeleitet werden.

Der NTC-Temperatursensor an der Trägeroberfläche der beiden Messstellen (vgl. Abbildung 24) wurde in den Trägerquerschnitt in eine Tiefe von 20 mm versetzt (vgl. Abbildung 26). Hierfür musste ein Loch mit entsprechender Tiefe gebohrt werden in welches der Sensor eingesteckt wurde. Um eine Luftzirkulation durch den schmalen verbleibenden Spalt zwischen Messkabel und Bohrloch zu verhindern, wurde dieses von außen mit Isolierkitt abgedichtet. Zusätzlich wurde je Messstelle ein weiterer NTC-Temperatursensor in 40 mm Tiefe eingebaut. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Temperatursensoren werden die klimatischen Randbedingungen an den Messstellen präziser erfasst und die Temperaturkompensation der Holzfeuchte kann nun auf Grundlage von Messwerten anstelle von theoretisch errechneten Werten erfolgen.



Abbildung 27: Beispielhafte Darstellung der installierten Messtechnik im geöffneten Installationsgehäuse



Abbildung 28: Beispielhafte Darstellung der installierten Messtechnik im geschlossenen Installationsgehäuse.

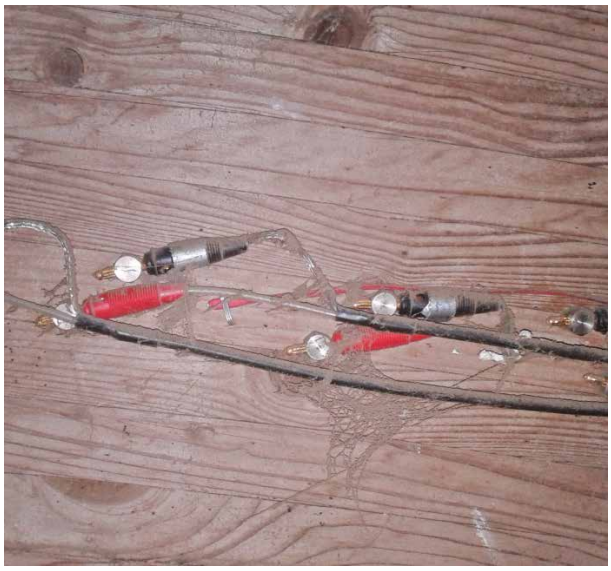


Abbildung 29: Beispielhafte Darstellung einer Messstelle mit stark verschmutzten Elektrodenköpfen



Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung einer Messstelle mit Isolierung der Elektrodenköpfe und zusätzlichen Sensoren.

Eine Unterbringung der Messgeräte in einem Elektro-Installationskasten schützt diese vor Verschmutzung und dämpft klimatische Schwankungen ab (vgl. Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 34). Durch eine Isolierung der Elektrodenköpfe, bzw. der Verbindung der Elektroden mit den Messkabeln kann ein Kurzschluss der Messkanäle z.B. durch starke Verschmutzung oder Tauwasser verhindert werden (vgl. Abbildung 30).

Durch die beschriebenen Maßnahmen wird bei einer Fortführung der Langzeitmessungen eine Steigerung der Qualität der Messergebnisse erwartet um die Zielsetzung, genauere Aussagen über klimatische Beanspruchungen und daraus resultierende Holzfeuchtegradienten an den ausgewählten Messobjekten zu ermöglichen.

5.7 Temperaturkompensation der Messwerte

Bei der Auswertung der Messergebnisse im ersten Forschungsvorhaben wurden bei drei Objekten mit starken klimatischen Schwankungen partiell ungewöhnliche Sprünge und Abweichungen in den Verläufen beobachtet. Der Grund für diese Abweichungen wird in der Temperaturkompensation der Messwerte vermutet, da diese auf der gemessenen Oberflächentemperatur basierte und folglich teilweise zu hohe Korrekturwerte lieferte. Um eine realistischere Temperaturkompensation der Messdaten im Rahmen der Auswertung zu erreichen, wurde für jeden Auswertezeitpunkt aus der gemessenen Oberflächentemperatur ein Temperaturverlauf über den Querschnitt der jeweiligen Messstelle errechnet. Hierfür wurde das explizite Verfahren nach (Euler, 1755) (vgl. auch Fortuin, 2003) mit nach (Kollmann, 1951) berechneten Werten für die Temperaturleitfähigkeit von Holz verwendet und im

Auswerteprogramm implementiert. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass für die Kompensation der gemessenen Holzfeuchtewerte in den unterschiedlichen Tiefen stets realistische Temperaturen zugrunde lagen. Diese theoretisch berechneten Temperaturverläufe führen in den meisten Fällen zu einer annehmbaren Genauigkeit der Holzfeuchtewerte. Bei Messobjekten mit stark schwankenden klimatischen Bedingungen (z.B. bei direkter Sonneneinstrahlung) führte dieser theoretische Ansatz jedoch teilweise zu unzureichend genauen Ergebnissen.

Aus diesem Grund sollten im Folgevorhaben die berechneten Verläufe durch gemessene Verläufe der Materialtemperatur ersetzt werden. Dementsprechend wurde das Messsystem im Folgevorhaben mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet. Der für eine Temperaturkompensation erforderliche Temperaturverlauf erfolgt im Folgevorhaben mittels zweier NTC-Temperatursensoren die in 20 mm bzw. 40 mm Tiefe im Querschnitt eingebracht sind und einem Klimasensor, der die Temperatur der den Träger unmittelbar umgebenden Luft ermittelt. Da die Holzfeuchtemesswerte in 15 und 25 mm Tiefe recht nahe beieinander liegen, sollten die Temperaturunterschiede in diesem Bereich relativ gering ausfallen. Bei der Temperatur-kompensation für die Holzfeuchtemesswerte in 15 und 25 mm Tiefe wurde daher die in 20 mm Tiefe gemessene Temperatur verwendet. Für den Holzfeuchtemesswert in 40 mm Tiefe steht durch den zweiten Temperatursensor ein Messwert in gleicher Tiefe zu Verfügung. Durch die Annahme, dass die Temperaturschwankung bei einer Tiefe von mehr als 40 mm nur noch gering ausfällt, wurde für die Temperaturkompensation des Holzfeuchtmesswertes in 70 mm Tiefe ebenfalls die Temperatur in 40 mm Tiefe verwendet.

Um die beiden unterschiedlichen Ansätze für die Temperaturkompensation vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse beider Kompensationsmethoden für den gleichen Messabschnitt verglichen. Bei dem gewählten Messzeitraum vom 17.06. bis 21.06.2013 (KW 25) handelt es sich um fünf aufeinanderfolgende Tage mit klarem Wetter und hohen Temperaturen. Die Außen-temperatur weist an diesen Tagen große Schwankungen auf. Da das Klima in den untersuchten Hallen mehr oder weniger stark vom Außenklima beeinflusst wird, schwankt die Temperatur in den Hallen und damit auch der Temperaturverlauf über die Trägerquerschnitte ebenfalls deutlich.

Bei dem ersten der beiden für den Vergleich gewählten Messobjekte handelt es sich um die Olympia-Reithalle in München Riem (Objekt C1). Diese ist durch die fehlende Kühlung bzw. Heizung relativ stark vom Außenklima abhängig. Aus Abbildung 31 ist zu erkennen, dass sich die Amplitude der Temperaturen an einem Tag für dieses Objekt im betrachteten Zeitraum auf $A_{T,Luft}$ ~ 7°C belaufen. Neben dem Verlauf der gemessenen Lufttemperatur sind in Abbildung 31 für das Objekt C1 sowohl die aus diesen für die einzelnen Tiefen (15, 25, 40 und 70 mm) berechneten Temperaturverläufe als auch die in 20 mm und 40mm gemessenen Temperaturen gegeben. Es lässt sich erkennen, dass für derartige Umgebungsbedingungen die berechneten Verläufe mit den gemessenen Verläufen relativ gut übereinstimmen. Die aus berechneten (vgl. Abbildung 32) und aus gemessenen (vgl. Abbildung 33) Temperaturverläufen kompensierten Messwerte der Holzfeuchte liegen entsprechend nahe beieinander.

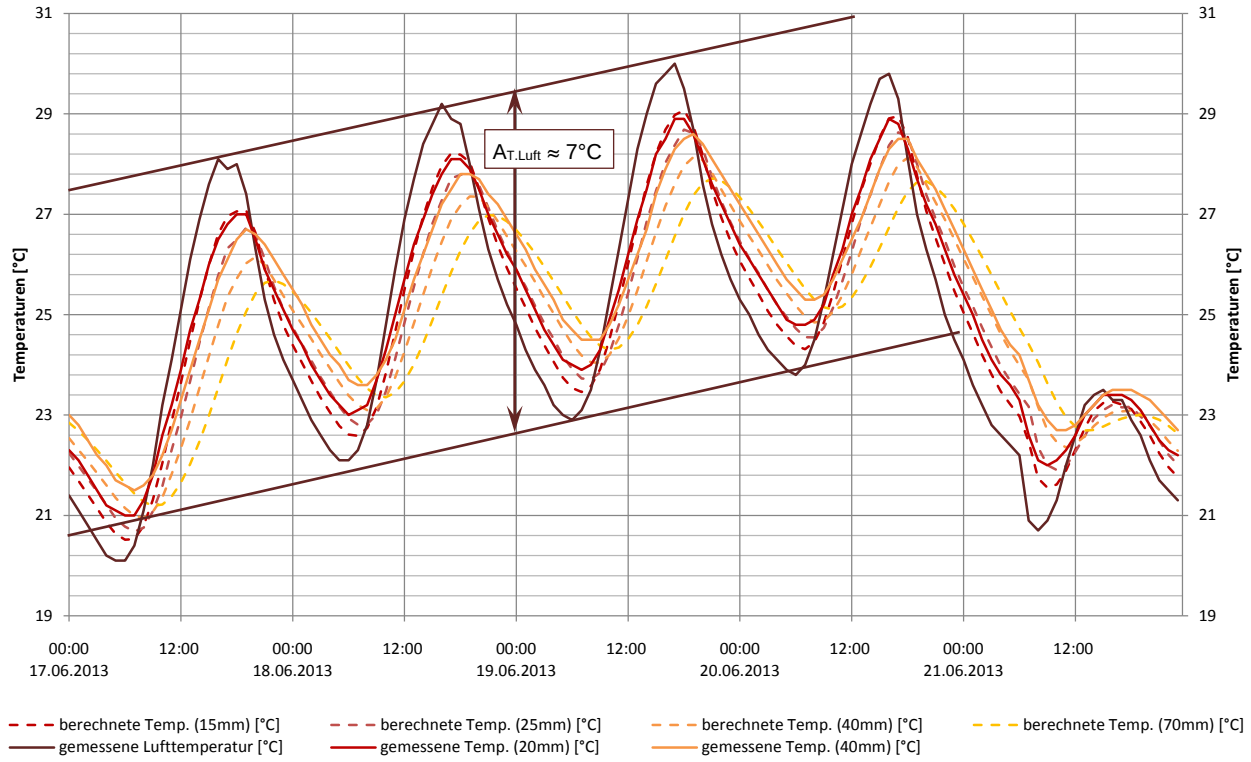


Abbildung 31: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Materialtemperatur am Beispiel der Olympia-Reithalle in München Riem (Objekt C1)

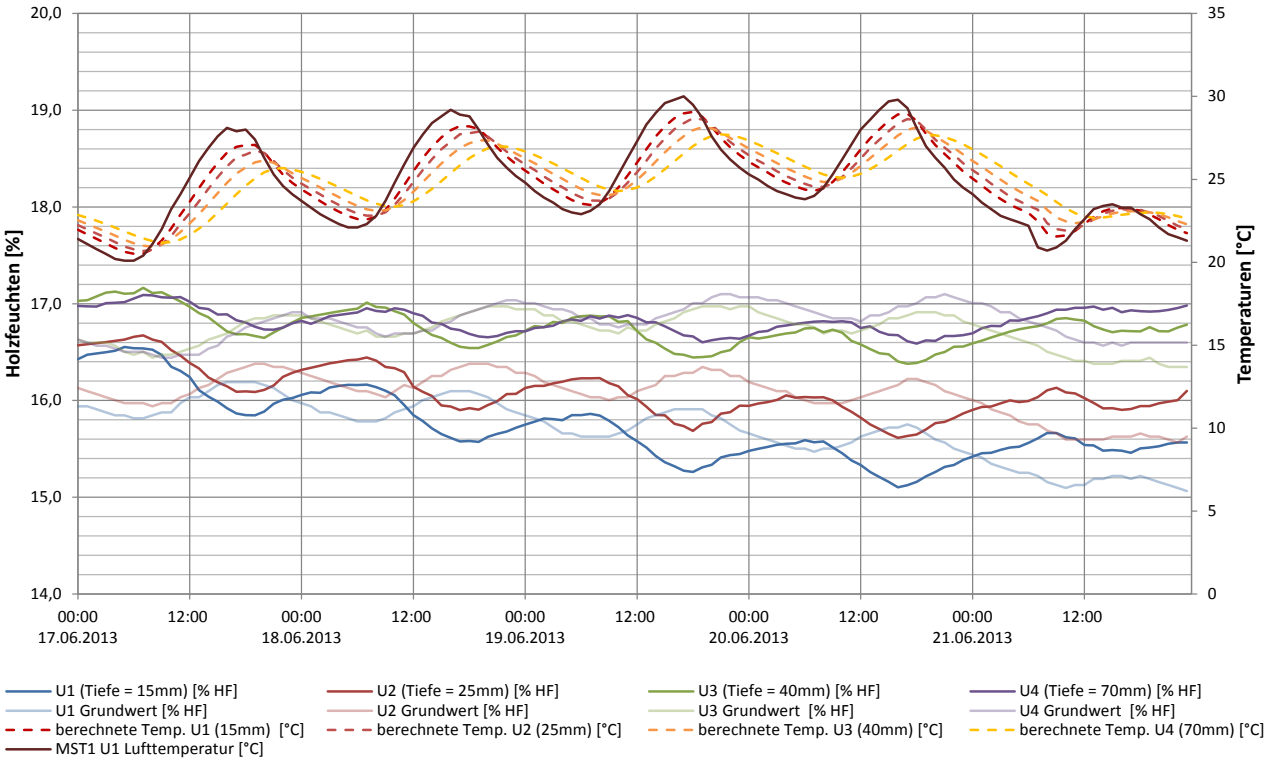


Abbildung 32: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt C1 bei Kompensation mit berechneten Temperaturen

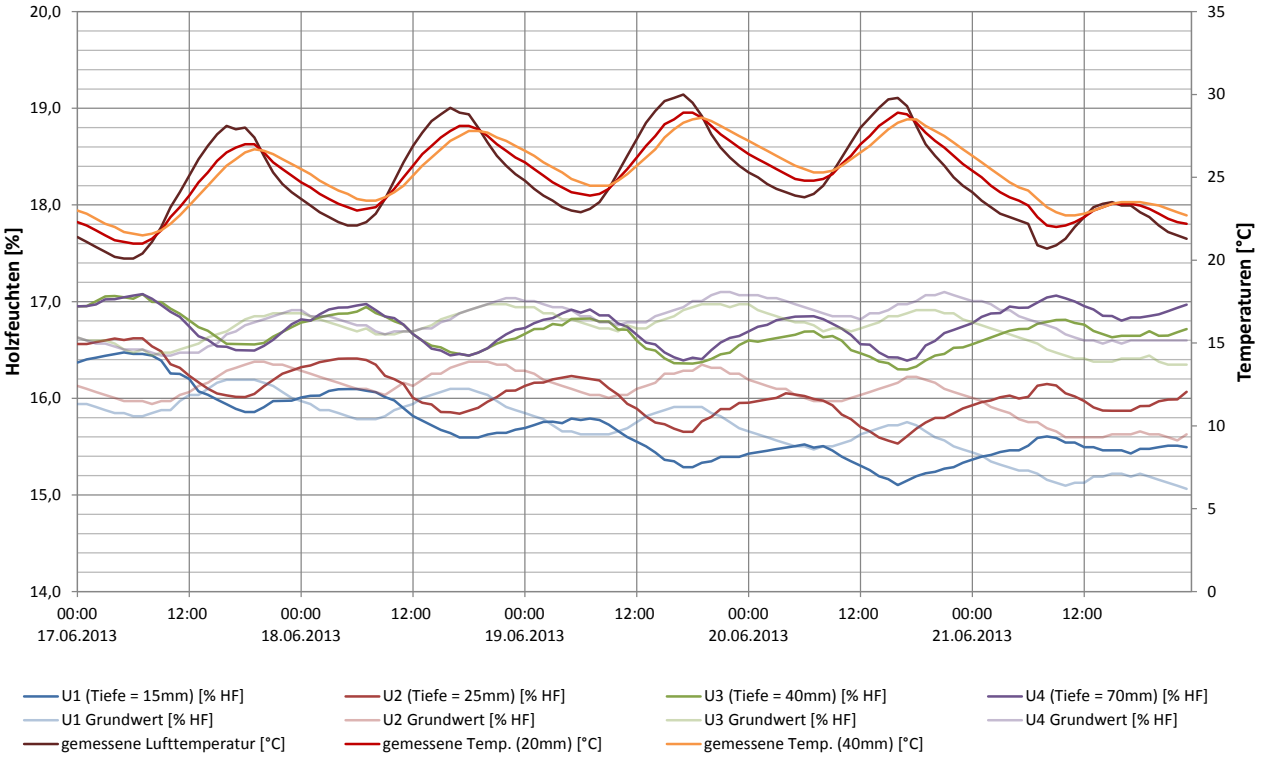


Abbildung 33: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt C1 bei Kompensation mit gemessenen Temperaturen

Die zweite für diesen Vergleich gewählte Messstelle befindet sich in der Lagerhalle einer Pflanzenschule in München (Objekt G1). Innerhalb dieser befindet sie sich im Bereich des Lichtbandes des Satteldaches. Die Messstelle wird dadurch direkt von der Sonne beschienen. Die Temperaturen im Bereich des Lichtbandes können lokal sehr hoch sein und schwanken im Verlauf eines Tages mit schönem Wetter um ein Vielfaches im Vergleich zum ersten Objekt (vgl. Abbildung 34). Im ersten Forschungsvorhaben konnte unter solchen Bedingungen, bei Verwendung der Temperaturkompensation mit berechneten Temperaturverläufen, keine Anpassung der Messergebnisse erzielt werden, die innerhalb der angestrebten Genauigkeit lag. Diese erschwerten Umstände bei der Kompensation des Temperatureinflusses waren ausschlaggebend für die Entscheidung, die Temperaturkompensation im Folgevorhaben auf Messwerte zu stützen, siehe Abschnitt 5.6.

Das Objekt G1 stellt bezüglich auftretender Temperaturschwankungen ein Extrembeispiel dar. Durch das sich im Bereich des Lichtbandes einstellende, lokale Mikroklima ergibt sich für den betrachteten Zeitraum eine Amplitude des täglichen Temperaturverlaufs $A_{T,Luft}$ von bis zu 35°C (vgl. Abbildung 34). Zwischen berechneten und gemessenen Temperaturverläufen ergeben sich für dieses Beispiel größere Abweichungen von ΔT_{20mm} ~ 7°C in der Tiefe von 20 mm, für die Tiefe von 40 mm ergibt sich ein ΔT_{40mm} ~ 8°C. Die sich daraus ergebenden Holzfeuchten unterscheiden sich entsprechend stark voneinander.

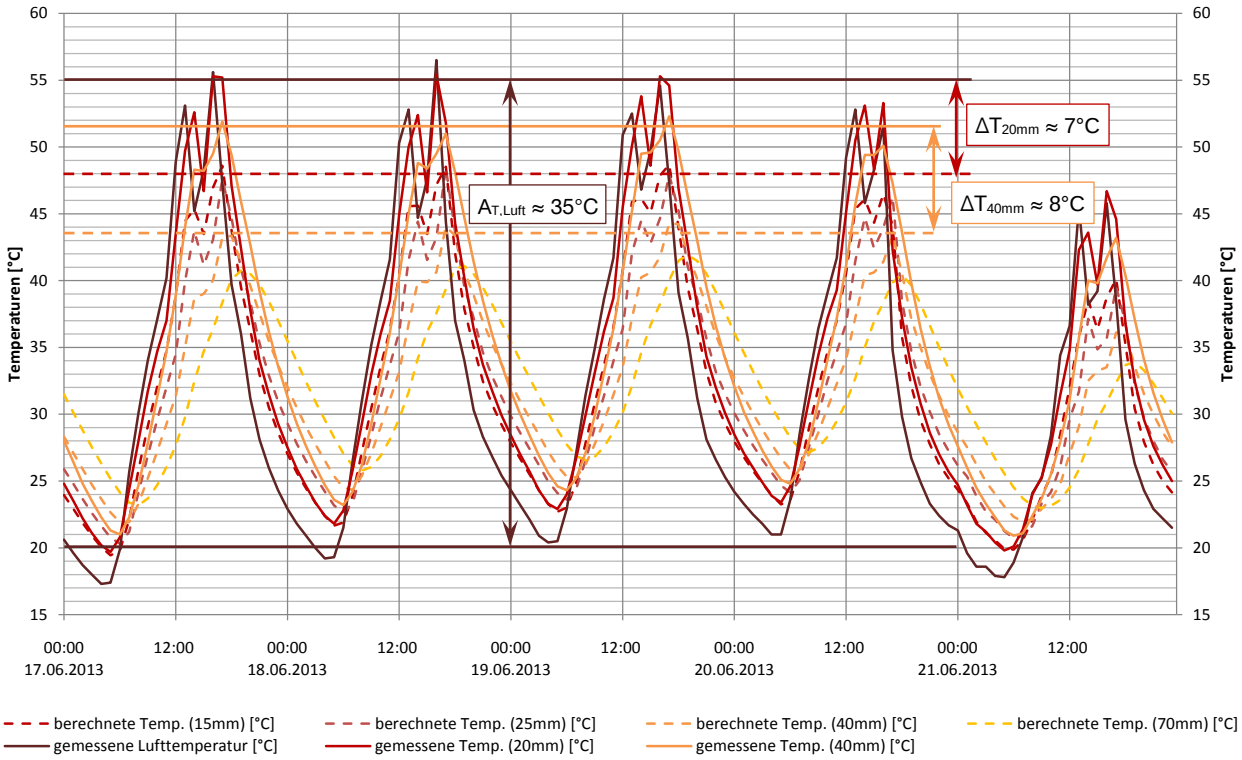


Abbildung 34: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Materialtemperatur am Beispiel einer Pflanzenhalle in München (Objekt G1)

Während die Kompensationsmethode mit berechneten Temperaturverläufen für die tiefer gelegenen Holzfeuchten (40 und 70 mm) recht gute und für die äußeren beiden Holzfeuchten annehmbare Ergebnisse liefert (vgl. Abbildung 36), weisen die durch Kompensation mit gemessenen Werten erhaltenen Holzfeuchteverläufe in Zeiträumen hoher Temperaturen in allen Tiefen starke Sprünge der Holzfeuchte von ca. 1,5% auf (vgl. Abbildung 35). In geringen Messtiefen von 15 oder 25mm können solche Änderungen der Holzfeuchte in dieser Zeit noch erwartet werden, für Holzfeuchten in 40 und 70mm Tiefe sind solche Sprünge unrealistisch.

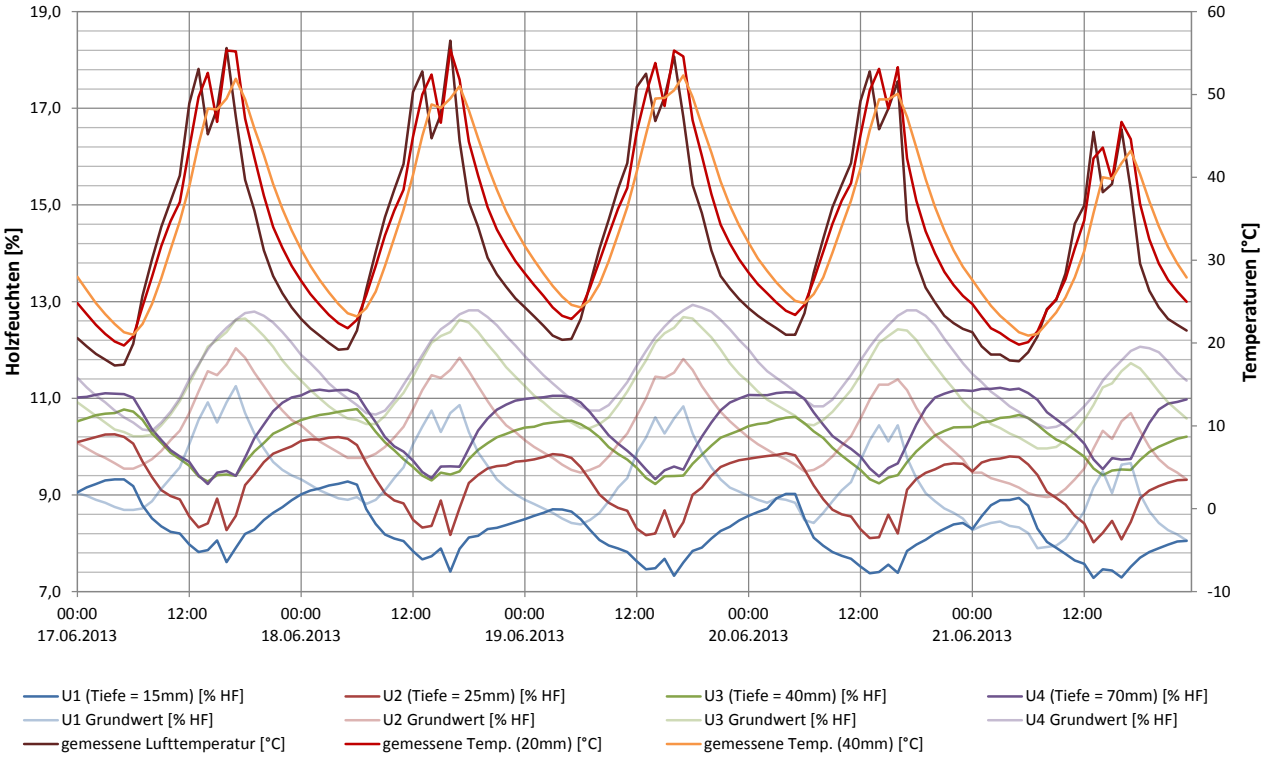


Abbildung 35: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit gemessenen Temperaturen

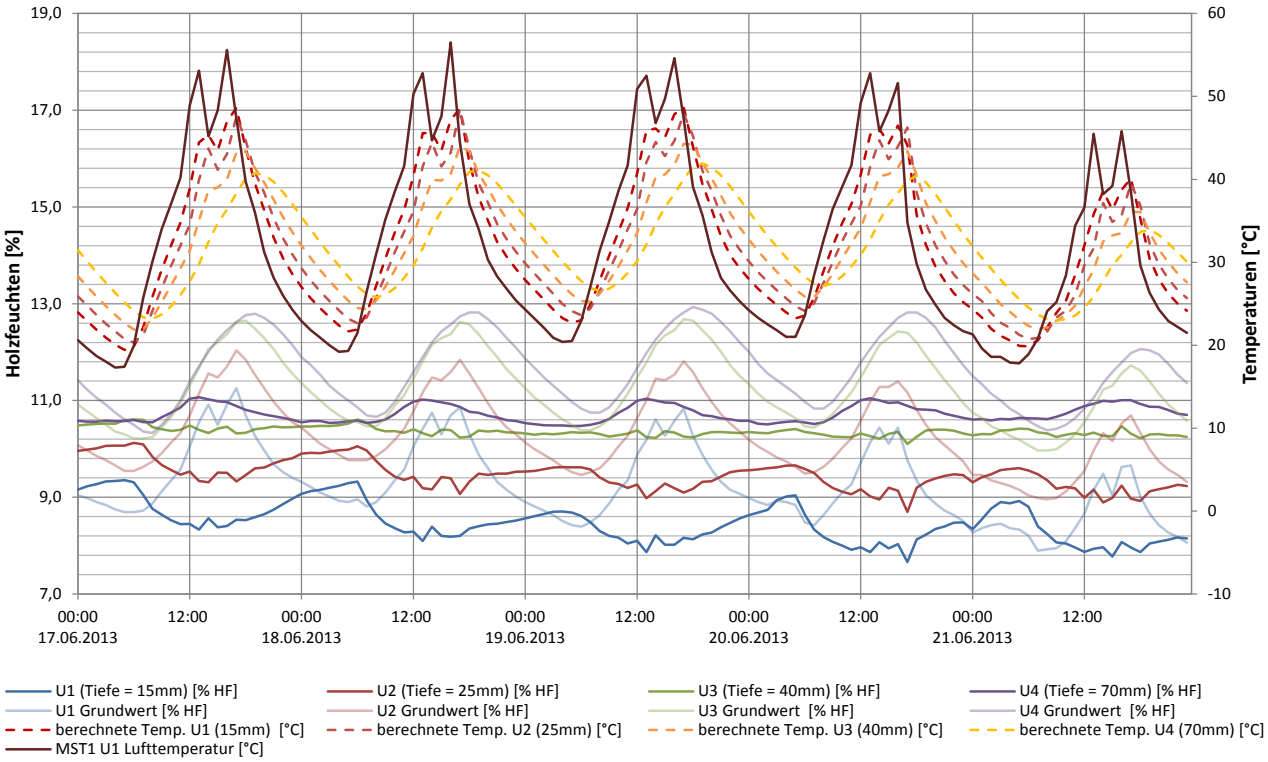


Abbildung 36: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit berechneten Temperaturen

Ob der Grund für diese Abweichungen an zu hohen gemessenen Temperaturen, oder im Bereich von Temperaturen größer 45°C an unzureichend funktionierender Temperaturkompensation liegt, oder aber an Temperaturverläufen, die für sonnenbeschienene Holzquerschnitte nicht hinreichend genau berechnet wurden, konnte nur mit weiteren, im folgenden Abschnitt 5.8 beschriebenen Untersuchungen beurteilt werden.

Betrachtet man die gemessenen Verläufe der Temperatur für das Objekt G1 erkennt man, dass sich die Temperaturen in 20 mm oder 40 mm Tiefe relativ schnell an die Außentemperatur angleichen (vgl. Abbildung 35). Ob sich der Temperaturverlauf in sonnenbeschienen Querschnitten tatsächlich schnell anpasst, oder ob diese hohen Messwerte auf eine Temperaturweiterleitung über den Kabelquerschnitt der Sensoren, welche von der Trägeroberfläche senkrecht eingebracht wurden, zurückzuführen sind, wurde mittels zusätzlichen, im Rahmen des Folgevorhabens durchgeführten Untersuchungen geklärt, siehe Abschnitt 5.8.

5.8 Weiterführende Untersuchungen zur Validierung der Temperaturkompensation

5.8.1 Allgemeines

Bei Objekten mit Messstellen, die direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt sind zeigt sich, dass die Temperaturkompensation der Holzfeuchte anhand über den Trägerquerschnitt gemessener Temperaturen nicht zu Ergebnissen mit gewünschter Genauigkeit führt. Der im ersten Forschungsvorhaben verfolgte Ansatz, den Temperaturverlauf über den Trägerquerschnitt von der Temperatur der umgebenden Luft abzuleiten, führt in solchen Fällen zu Holzfeuchteverläufen mit geringeren und weniger sprunghaften, kurzzeitigen Änderungen. Um den Grund für die Abweichung zwischen den beiden Ansätzen zur Temperaturkompensation zu analysieren, wurden zwei unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt.

5.8.2 Untersuchungen zur Ermittlung der Materialtemperatur

In der ersten hierzu durchgeführten Untersuchung soll die mögliche Beeinflussung der Temperaturmessung durch einen Wärmetransport über die Zuleitung der verwendeten NTC-Sensoren in den Trägerquerschnitt festgestellt bzw. widerlegt werden. Hierfür wurde die Messstelle im Objekt G1 mit zwei zusätzlichen Temperatursensoren in 20 mm und 40 mm Tiefe ausgestattet. Diese wurden von der gegenüberliegenden, nicht sonnenbeschienenen Trägerseite eingebracht, um die Temperatur in gleicher Messtiefe, jedoch ohne Beeinflussung durch die Sonnenstrahlung zu ermitteln (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Zudem wurden die Zuleitungen dieser zusätzlichen Temperatursensoren mit einem Dämmstreifen abgeklebt und durch eine vorgehängte Konstruktion verschattet (vgl. Abbildung 37 und Abbildung 38). Dadurch sollte der Einfluss der Temperaturweiterleitung über den Kabelquerschnitt der Sensoren möglichst gering gehalten, bzw. vermieden werden.

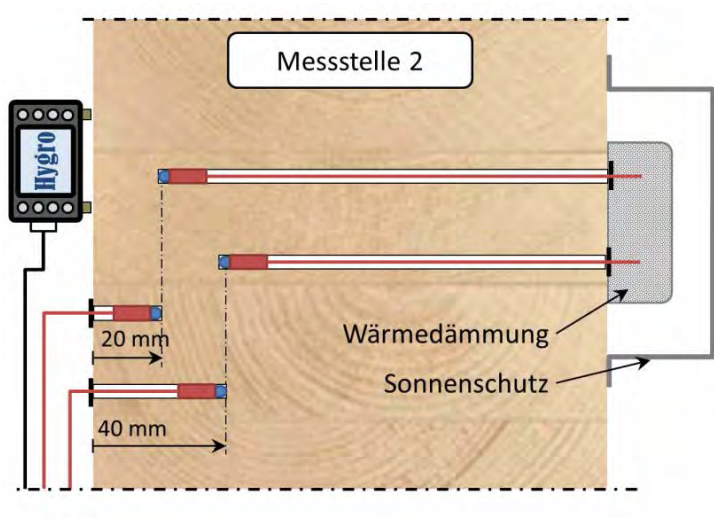


Abbildung 37: Systematische Darstellung des Aufbaus der Kontrollmessung der Materialtemperatur



Abbildung 38: Foto der Messstelle der Kontrollmessung der Materialtemperatur

Die Untersuchung zeigt, dass die in gleicher Tiefe durch die von unterschiedlichen Trägerseiten eingebrachten Sensoren ermittelten Temperaturen voneinander abweichen. Die Temperaturen, der von der sonnenabgewandten Seite aus eingebrachten Sensoren, liegen dabei stets unterhalb der Temperaturen, die von der sonnenbeschienenen Trägerseite aus gemessen wurden (vgl. Abbildung 39). Dies lässt darauf schließen, dass ein nicht unerheblicher Teil der auf die Trägeroberfläche auftreffenden thermischen Energie aus den Sonnenstrahlen durch Wärmeleitung über den Kabelquerschnitt in das Querschnittsinnere und damit zum Temperatursensor hin transportiert wird. Ein Vergleich der Temperaturverläufe der zusätzlich eingebrachten Sensoren mit aus dem Umgebungsklima berechneten Temperaturverläufen zeigt eine gute Übereinstimmung, was die Vermutung der Wärmeleitung über den Kabelquerschnitt der Sensoren unterstützt (vgl. Abbildung 40). Es kann somit belegt werden, dass der Messwert des Temperatursensors durch zusätzlich in das Messkabel eingebrachte thermische Energie verfälscht und die Materialtemperatur an sonnenbeschienenen Trägeroberflächen damit überschätzt wird.

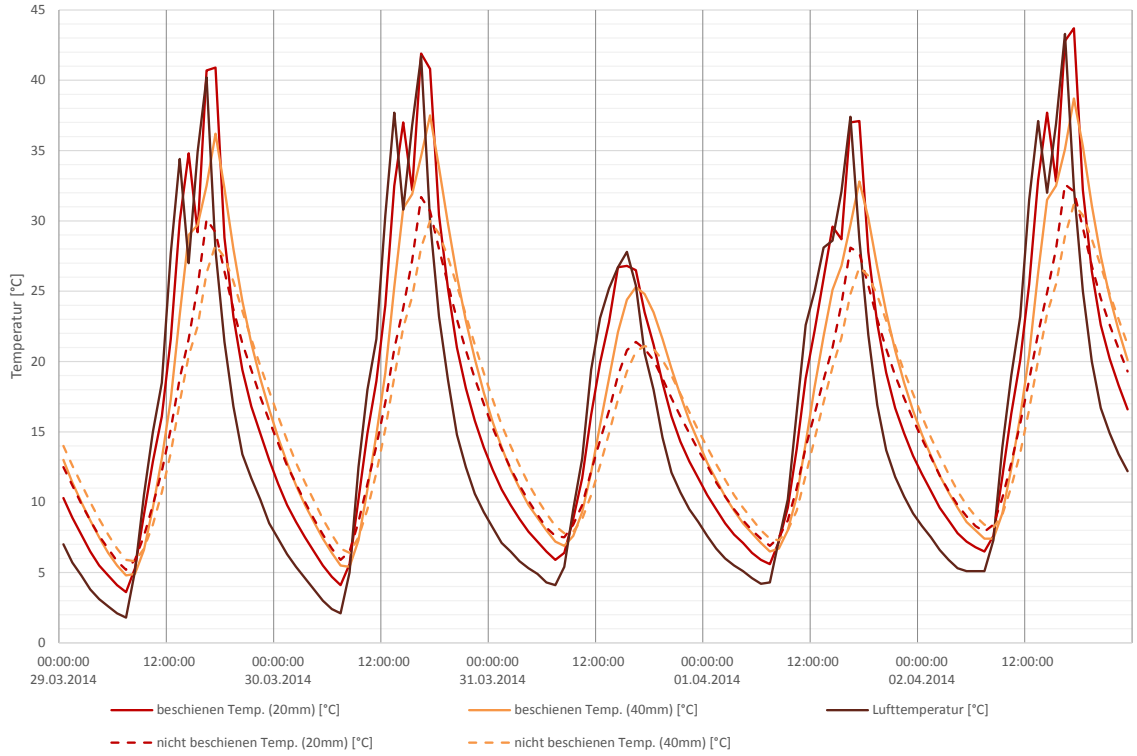


Abbildung 39: Vergleich der von unterschiedlichen Trägeroberflächen aus gemessenen Materialtemperaturen

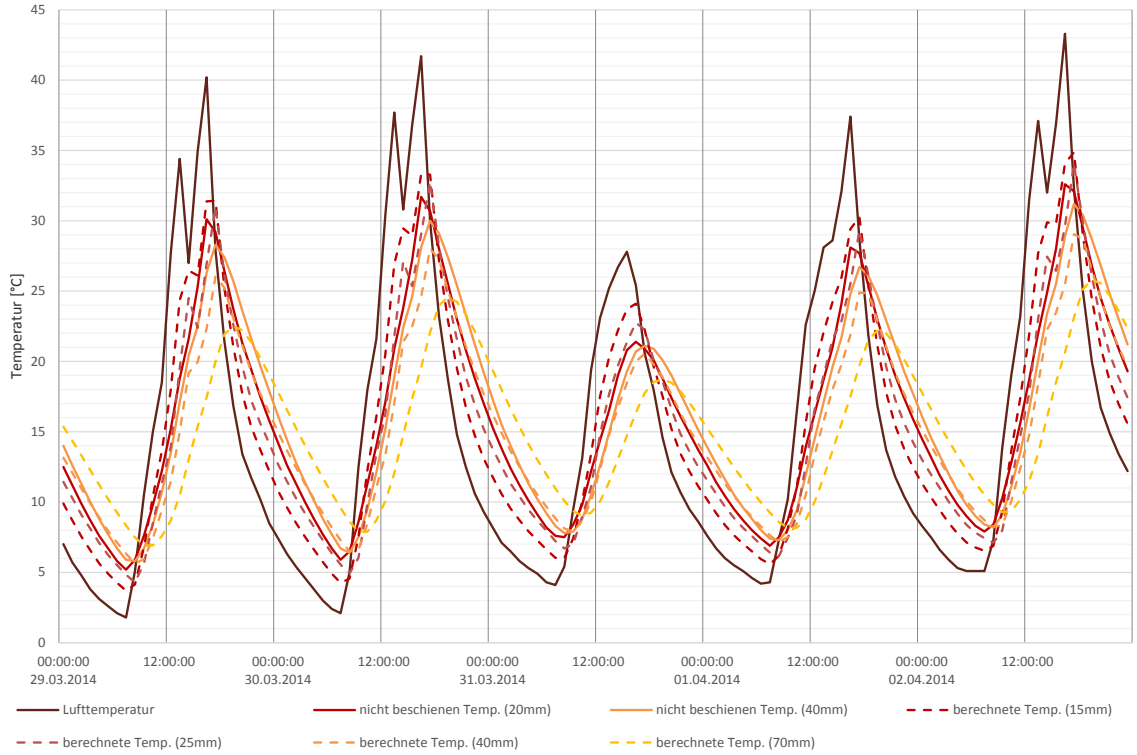


Abbildung 40: Vergleich der von der nicht beschienenen Trägeroberfläche aus gemessenen mit den aus der Lufttemperatur berechneten Materialtemperaturen

5.8.3 Untersuchungen zur Validierung des verwendeten Modells zur Temperaturkompensation

In einer zweiten hierzu durchgeführten Untersuchung sollte die Richtigkeit des verwendeten Modells zur Kompensation des Temperatureinflusses auf den Messwert der Holzfeuchte vor allem bei Temperaturen über 45°C bestätigt werden. Hierfür wurden Prüfkörper aus Brettschichtholz aus Fichte mit Abmessungen *b*x*h*x*ℓ* 80x120x250 mm und einer homogenen Holzfeuchteverteilung verwendet. Diese wurden mit Messelektroden ausgestattet und von allen Seiten dampfdicht abgeklebt, um eine Änderung der Holzfeuchte zu unterbinden. Die Köpfe der Messelektroden wurden mit Kautschuk luftdicht an die dampfdichte Klebefolie angebunden, um Leckagen in der Abdichtung möglichst gering zu halten. Die Materialtemperatur wurde mit Temperatursensoren in 10, 20, 30 und 40 mm Tiefe erfasst. Um den Weg für eine Wärmeleitung über den Kabelquerschnitt zu den Sensoren im Prüfkörper möglichst lang zu halten, wurden die Sensoren von der den Messelektroden gegenüberliegenden Seite eingebracht. Zusätzlich wurden sowohl die Austrittsstellen der Messkabel der Temperatursensoren, als auch die Messelektroden mit einem Dämmstreifen abgedeckt, um eine Wärmeweiterleitung durch die Messkabel bzw. Messelektroden in den Prüfkörper möglichst gering zu halten (vgl. Abbildung 41 und Abbildung 42).

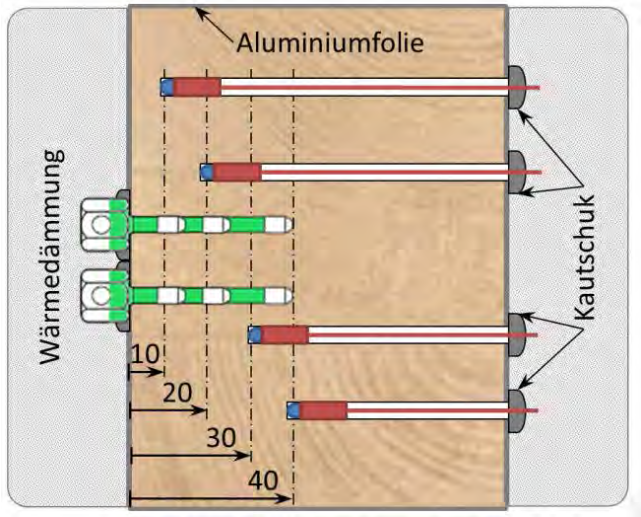


Abbildung 41: Schematische Darstellung des Prüfkörpers zur Validierung des verwendeten Modells zur Kompensation des Temperatureinflusses auf die Holzfeuchtemessung

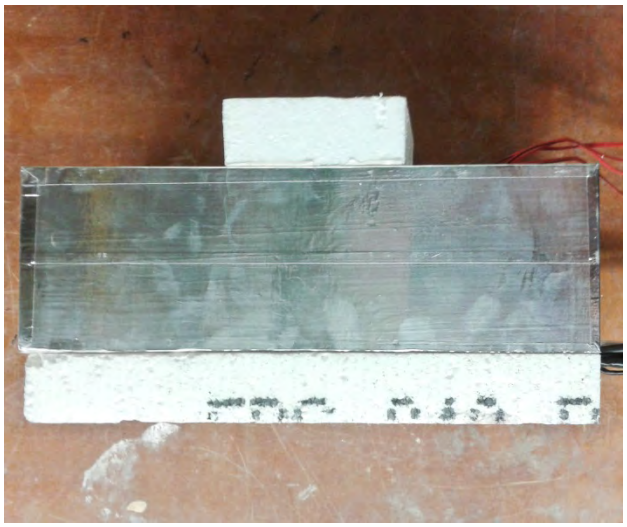


Abbildung 42: Foto des Prüfkörpers mit aufgeklebter Aluminiumfolie und Wärmedämmung in Form von Polystyrolplatten

Die Prüfkörper wurden in einem Klimaschrank unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt. Dabei wurde der Temperaturbereich von -5°C bis 60°C in Stufen von ca. 5°C abgedeckt. Gleichzeitig wurde die Holzfeuchte und Materialtemperatur kontinuierlich gemessen. Wie vorab beschrieben wird der gemessene elektrische Widerstand und damit der Messwert der Holzfeuchte durch die Materialtemperatur maßgeblich beeinflusst. Bei einer Materialtemperatur von 60°C ist der gemessene elektrische Wiederstand ca. um den Faktor 600 kleiner als der Widerstand, der sich bei gleicher Holzfeuchte und einer Materialtemperatur von ca. -5°C ergibt. Im Rahmen der

Versuchsauswertung muss der Einfluss der Temperatur auf die Messwerte der Holzfeuchte anhand der gemessenen Materialtemperaturen und dem zu Grunde gelegten mathematischen Zusammenhang der Temperaturkompensation kompensiert werden. Da sich die Holzfeuchte der Prüfkörper durch die dampfdichte Abdichtung während des Versuchs nicht ändern kann, sollte sich bei einer fehlerfreien Kompensation des Temperatureinflusses eine konstante Holzfeuchte ergeben. Die gemessenen Holzfeuchten mit und ohne Kompensation des Temperatureinflusses sind in Abbildung 43 enthalten. Es zeigt sich, dass der gemessene Holzfeuchtewert mit steigender Materialtemperatur zunimmt. Bei der Referenztemperatur von 25°C stimmt die gemessene Holzfeuchte mit der tatsächlichen Holzfeuchte überein. Des Weiteren lässt sich aus den Ergebnissen ablesen, dass die temperaturkompensierten Holzfeuchten bis zu einer Temperatur von 25°C konstant verlaufen. Über 25°C lässt sich eine leicht abfallende Tendenz der Holzfeuchte feststellen. Dies ist auf eine etwas zu hohe Temperaturkompensation zurückzuführen. Die Abweichungen vom Sollwert betragen ca. 0,6% Holzfeuchte und liegen damit im Rahmen der allgemeinen Messungenauigkeit. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das untersuchte und verwendete Modell zur Kompensation des Temperatureinflusses auf den Messwert der Holzfeuchte im untersuchten Temperaturbereich von ca. -5°C bis 60°C funktioniert und hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

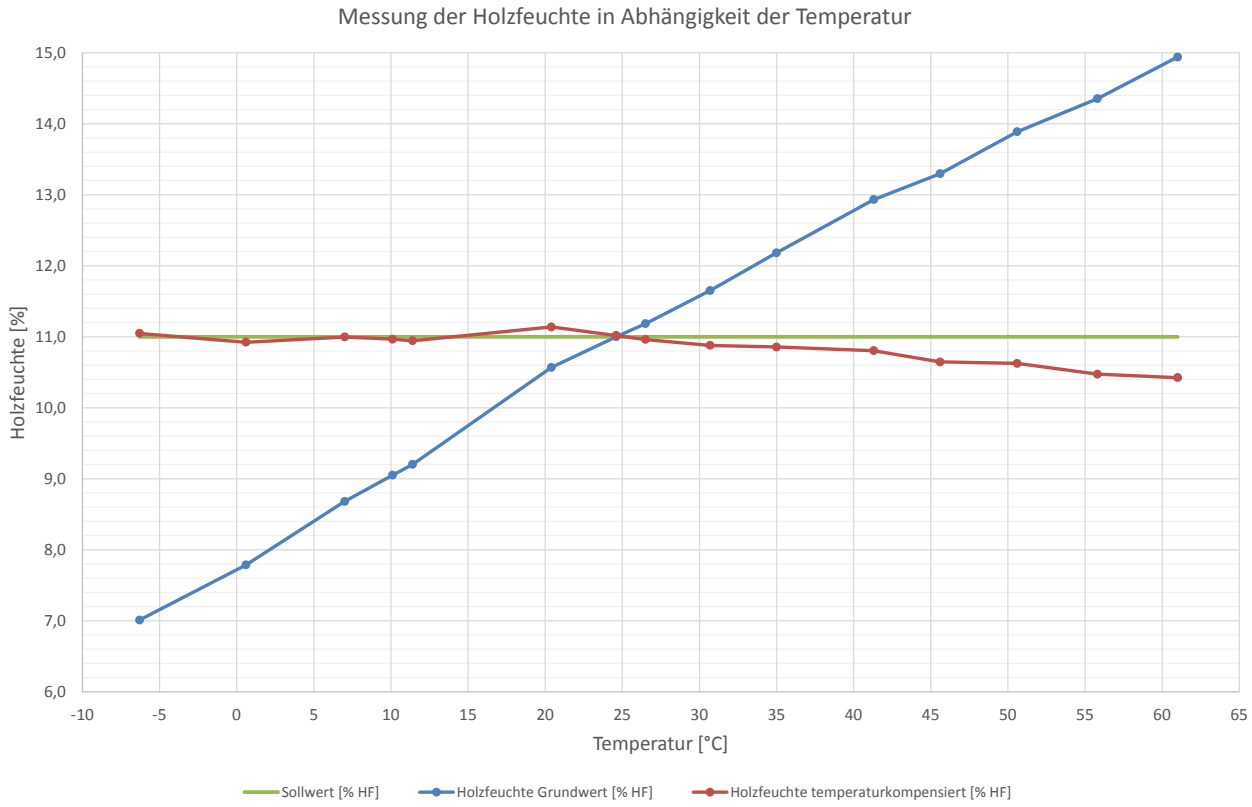


Abbildung 43: Auswertung des Versuchs zur Validierung des verwendeten Modells zur Kompensation des Temperatureinflusses auf die Holzfeuchtemessung

5.8.4 Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Validierung der Temperaturkompensation

Die vorab beschriebene Untersuchung zur Validierung der Temperaturkompensation zeigt, dass die Materialtemperatur für sonnenbeschienene Messstellen mit der bisherigen Methode der Temperaturermittlung überschätzt wird. In einer zweiten Untersuchung konnte bestätigt werden, dass der verwendete analytische Ansatz zur Kompensation des Temperatureinflusses auf die Holzfeuchtemessung Ergebnisse liefert, die innerhalb der zu erwartenden Messgenauigkeit liegen. Somit ist die in Abschnitt 5.7 beschriebene Problematik der korrekten Temperaturkompensation bei von der sonnenbeschienenen Trägerseite aus gemessenen Materialtemperaturen auf die Methode zur Messung der Temperatur zurückzuführen. Um die Erkenntnisse zu veranschaulichen wird folgend ein Vergleich der Temperaturkompensation mit den auf unterschiedliche Weise ermittelten Materialtemperaturen für den Messabschnitt vom 27.03. bis 31.03.2014 geführt. Unter Verwendung der von der sonnenbeschienenen Trägerseite aus gemessenen Materialtemperaturen für die Temperaturkompensation ergeben sich Holzfeuchteverläufe, die durch den Temperatureinfluss um ca. 2% schwanken (vgl. Abbildung 44). Werden die Temperaturen von der gegenüberliegenden Trägerseite aus gemessen, sind die Schwankungen mit denen vergleichbar, die sich bei Verwendung der berechneten Materialtemperaturen ergeben. Einzig für die Holzfeuchte in 70mm Tiefe ergeben sich noch größere Schwankungen im Holzfeuchteverlauf. Grund ist, dass die Materialtemperatur in dieser Tiefe nicht gemessen wurde und stattdessen die Temperatur in 40mm Tiefe für die Kompensation verwendet wurde (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46).

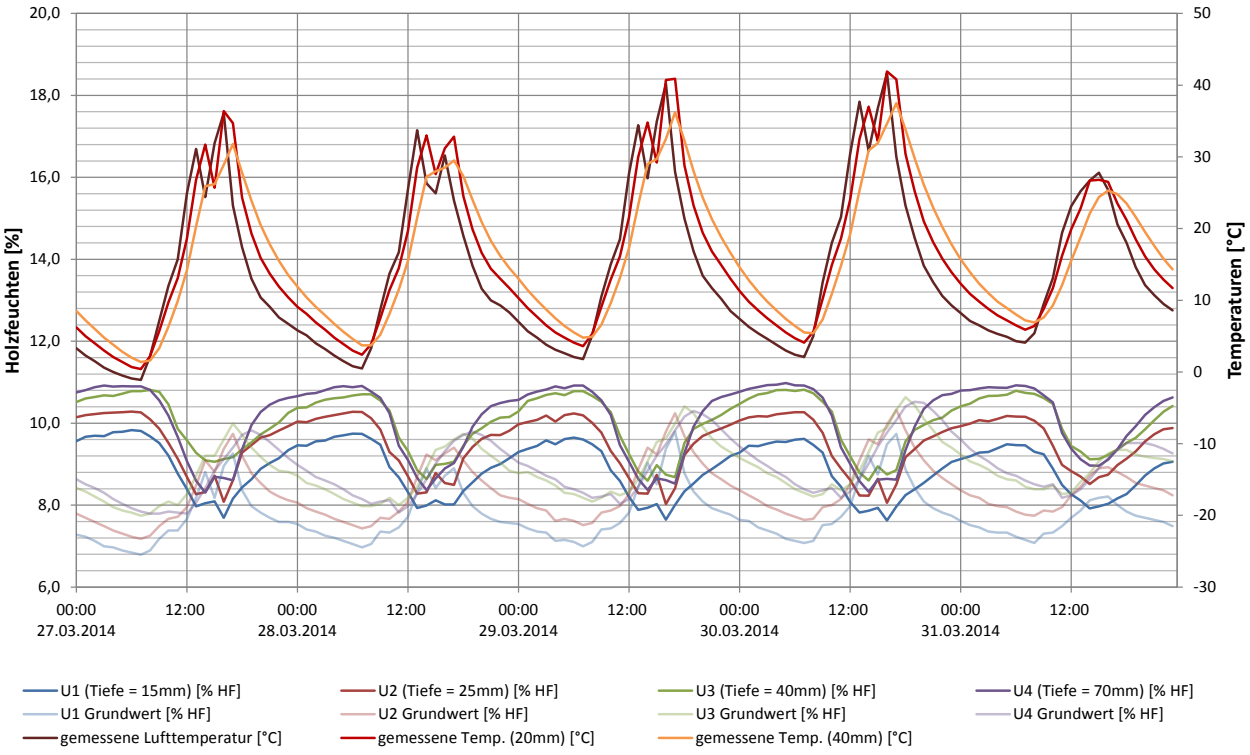


Abbildung 44: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit von der sonnenbeschienenen Trägerseite aus gemessenen Materialtemperaturen

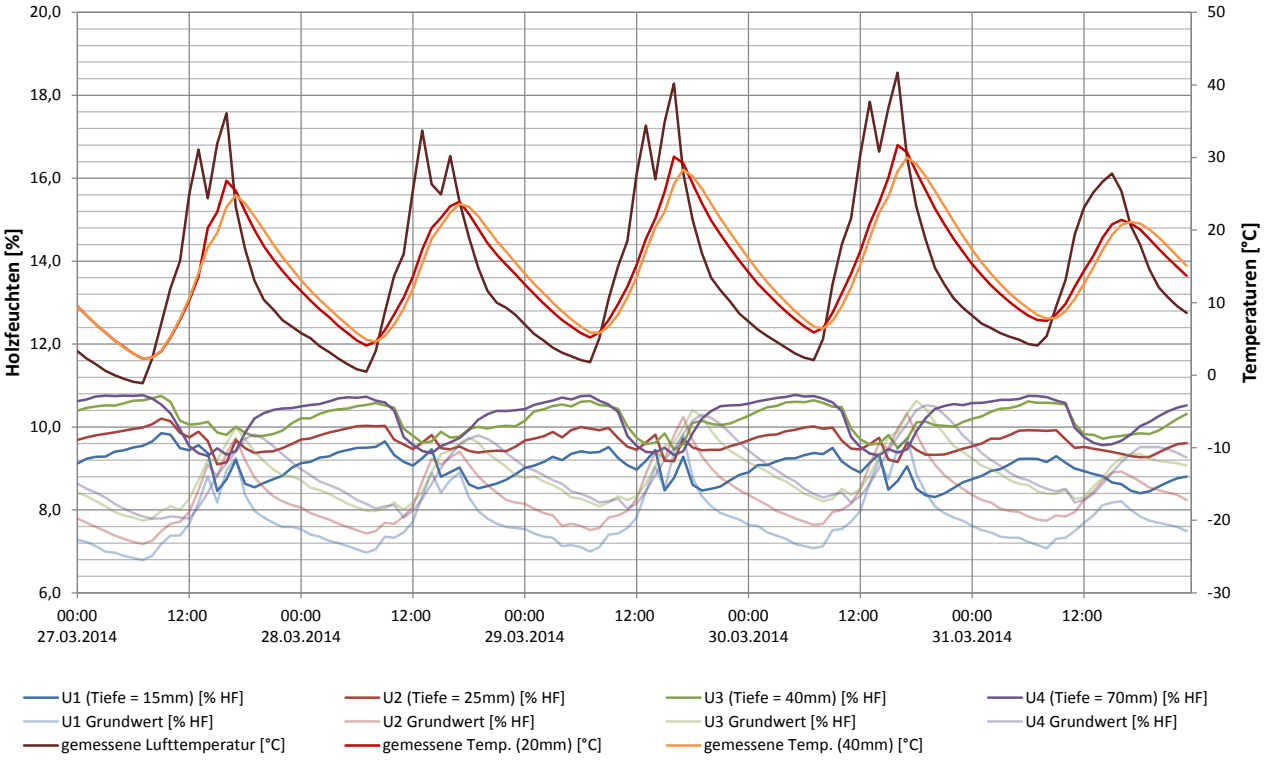


Abbildung 45: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit von der nicht sonnenbeschienenen Trägerseite aus gemessenen Materialtemperaturen

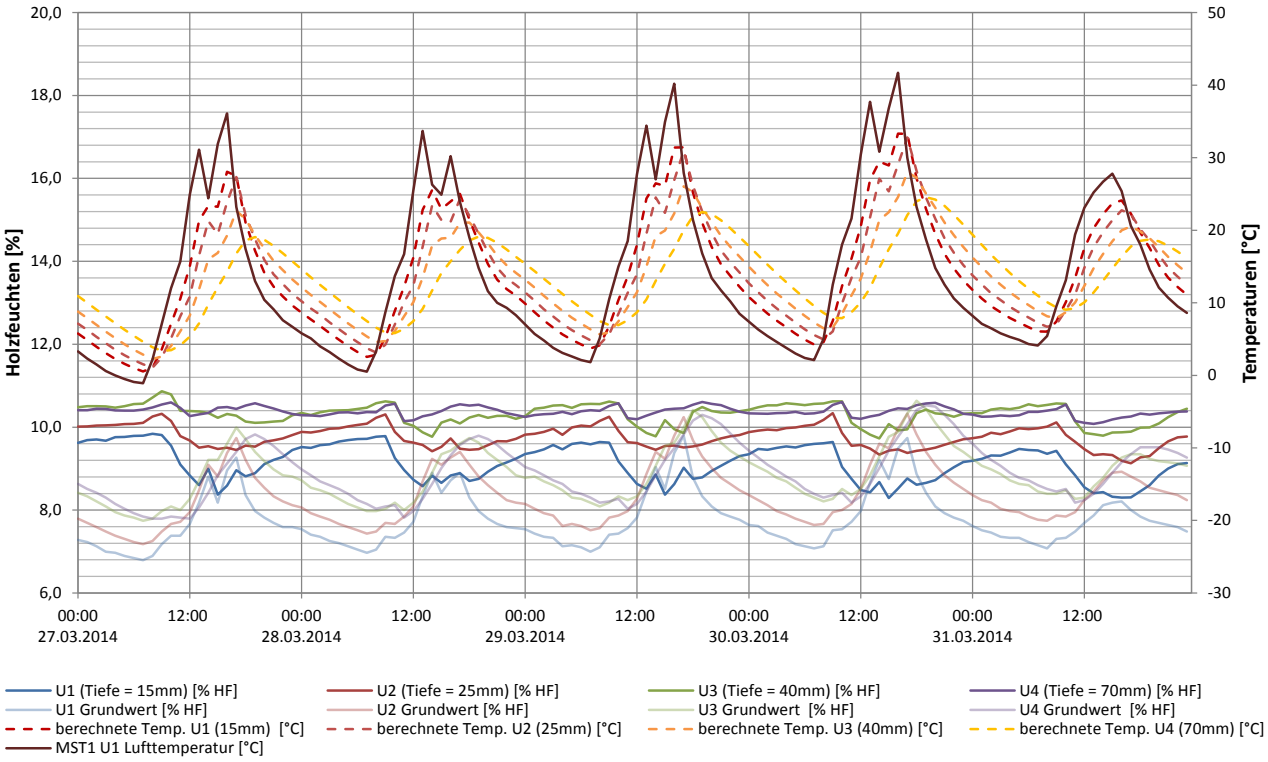


Abbildung 46: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit aus der Lufttemperatur berechneten Materialtemperaturen

5.9 Auswertung der Messwerte der einzelnen Objekte

Über die Messzeiträume hinweg wurden in den einzelnen Objekten an zwei Messstellen Messwerte der Temperatur, relativen Luftfeuchte und Holzfeuchte erfasst und in Datenloggern gespeichert. Die in den Datenloggern gespeicherten Messdaten wurden je Objekt mehrmals vor Ort mit Hilfe eines Messkabels ausgelesen. Dabei wurde gleichzeitig eine Referenzmessung mit einem anderen Messgerät vorgenommen. Für das verwendete Messsystem sind zwar Möglichkeiten der Datenfernübertragung erhältlich, in diesem Forschungsvorhaben wurde jedoch die händische Auslesung bevorzugt, da mit ihr gleichzeitig eine Funktionskontrolle wie auch eine Kontrolle der Messstellen selbst realisiert werden konnte.

Um die Messdaten auszuwerten, müssen diese auf einen PC übertragen werden. Das erfolgt über ein geeignetes USB- Auslesekabel und der Software „SoftFox“ des Herstellers der Messtechnik. Mit dieser Software können die Messwerte veranschaulicht und in geringem Umfang bearbeitet werden. Das reicht für eine erste Kontrolle der Messwerte aus. Um die Daten entsprechend den Anforderungen der Forschungsvorhaben auszuwerten, sind jedoch zusätzliche Funktionen erforderlich. Daher wurde ein eigenes Programm auf Excel - Basis erarbeitet, das zur Auswertung der erhaltenen Werte aus den Messungen dienen soll. Dieses ermöglichte es, die große Datenmenge (für die beiden Messzeiträume insgesamt über 3,6 Millionen Messwerte) am Ende der geplanten Messdauer der Forschungsvorhaben in angemessenem Zeitaufwand auszuwerten.

Mit dem Programm können die Messwerte in Excel eingelesen, weiterverarbeitet und grafisch in verschiedenen Diagrammen veranschaulicht werden. So wird eine genauere Beurteilung der ausgelesenen Messdaten ermöglicht. Zudem werden die als Widerstände gespeicherten Messwerte der Holzfeuchte auf eventuell vorhandene Messfehler (z.B. unrealistische Sprünge) geprüft. Falls erforderlich können Messfehler automatisch korrigiert werden. Die Rohdaten werden zu Tagesmittelwerten zusammengefasst und programmintern an verschiedene Tabellen zur weiteren Bearbeitung weitergeleitet. In diesen Tabellen erfolgt das Umrechnen der Widerstände aus den Rohdaten in Holzfeuchtewerte sowie die Kompensation des Temperatureinflusses.

Die erhaltenen Messwerte lassen in Kombination mit dem erarbeiteten Programm vielfältigste Optionen der Auswertung zu. Für den vorliegenden Bericht wurden die Messwerte in mehreren Diagrammen wie folgt grafisch aufbereitet. Für die zwei in jedem Objekt installierten Messstellen werden die Werte der Holzfeuchte als Verläufe über die Zeit und über den Querschnitt angezeigt. Vereinzelt aufgetretene Messperioden mit fehlenden oder belegbar fehlerhaften Messungen wurden hierbei nicht berücksichtigt. Als Anhaltspunkt für die Anpassung der Holzfeuchte an das schwankende Umgebungsklima wurde in diese Diagramme zudem die Ausgleichsfeuchte von Holz nach dem theoretischen Sorptions- Modell von (Hailwood & Horrobin, 1946) eingefügt. Hierzu wurden die von (Simpson, 1973) für das Hailwood-Horrobin-Modell bestimmten Koeffizienten für Holz verwendet. Mehrere Untersuchungen, u.a. von (Fortuin, 2003) belegen, dass dieser Ansatz die genauesten Ergebnisse liefert. Da die berechnete Ausgleichsfeuchte mit der relativen Luftfeuchte und der Temperatur der umgebenden Luft stark schwankt, die Anpassung

der Holzfeuchte an die Umgebungsbedingungen jedoch auch in den oberflächennahen Bereichen des Querschnittes gedämpft ist (siehe Abschnitt 2.2.3), wurde für die Ausgleichsfeuchte ein gleitender Durchschnitt über zehn Tage berechnet. Eine Anpassung hinsichtlich der in den Laborversuchen festgestellten Abweichungen zwischen der mit dem Messsystem und der über die Darrmethode ermittelten Holzfeuchte (max. Δu = 1 %) wurde nicht vorgenommen. Der Einfluss filmbildender Anstriche (in zwei Eissporthallen vorhanden) wurde hierbei nicht berücksichtigt. In einem weiteren Diagramm werden die minimalen, maximalen und die über den Messzeitraum gemittelten Holzfeuchtewerte als Umhüllende über den Querschnitt dargestellt. In gleicher Form wird die Umhüllende der Holzfeuchtegradienten dargestellt. Da die innere Beschaffenheit einer Lamelle eines Brettschichtholzträgers an deren Seitenflächen nicht immer ersichtlich sind, kam nicht ausgeschlossen werden, dass Messelektroden in wenigen Fällen in Bereichen von zu lokalen Inhomogenitäten wie Ästen, Harzgallen, Rissen o.Ä. gesetzt werden. Dies kann zu einer Verschiebung des gemessenen elektrischen Widerstandes und somit zu einer Verfälschung des Messwertes der Holzfeuchte führen. Ersichtlich ist dies vor allem in der Darstellung der Verläufe über den Querschnitt. Eine Korrektur dieses Einflusses wurde bei der Auswertung der Ergebnisse nicht vorgenommen. Entsprechende Fälle, bei denen die Vermutung einer Parallelverschiebung vorliegt, wurden im Anhang jedoch zur besseren Interpretation der Ergebnisse gekennzeichnet. Der Verlauf des Hallenklimas ist in einem zusätzlichen Diagramm enthalten und kann dafür verwendet werden, die Korrelation zwischen Holzfeuchte und den klimatischen Randbedingungen nachzuvollziehen. Beim Folgevorhaben wurde das Hallenklima an beiden untersuchten Messstellen aufgezeichnet. Um den Verlauf des Hallenklimas beider Messstellen eines Objektes besser miteinander vergleichen zu können, sind diese Werte in einem Diagramm gemeinsam dargestellt. Für die grafischen Auswertungen von Holzfeuchte, relativer Luftfeuchte, Temperatur und Holzfeuchtegradiente jedes Objektes wird auf den Anhang zu diesem Forschungsbericht verwiesen.

6 Ergebnisse der Langzeitmessungen

6.1 Vorabbemerkung

Für diesen Schlussbericht wurden alle zur Verfügung stehenden Messdaten aus den beiden Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ (Gamper, Dietsch, Merk, & Winter, 2013) und „Gebäudeklima – Validierung“ bearbeitet. Die Auswertung mit Jahresverläufen der Holzfeuchte und des Klimas, dazugehörigen Querschnittsverläufen mit Umhüllenden der Holzfeuchte und der Holzfeuchtegradiente jedes Objektes kann dem Anhang zu diesem Forschungsbericht entnommen werden. Im Folgenden wird zuerst die Darstellung der Ergebnisse erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse des ersten Forschungsvorhabens vorgestellt. Hierfür wurden Messdaten vom 01. Oktober 2010 bis einschließlich 30. September 2011 untersucht. Das entspricht dem Zeitraum vom 4. Quartal 2010 zum 3. Quartal 2011 und somit der auszuwertenden Messdauer von einem Jahr. Anschließend wird auf die Ergebnisse des Folgevorhabens eingegangen. Für die zweite Messperiode stehen Messdaten aus dem Zeitraum vom 01. April 2013 bis einschließlich 31. März 2014 zur Verfügung. Ein wichtiges Ziel des Folgevorhabens ist es, eine Aussage darüber zu treffen, ob es möglich ist von einem untersuchten Messzeitraum von einem Jahr auf das Langzeitverhalten der Holzfeuchteverteilung über mehrere Jahren zu schließen. Dazu werden die Ergebnisse der hier untersuchten Nutzungsarten, bzw. Messobjekte aus den beiden Forschungsvorhaben miteinander verglichen.

6.2 Darstellung der Ergebnisse aus den Langzeitmessungen

6.2.1 Verlauf der Holzfeuchte und des Hallenklimas

Die Messwerte der Holzfeuchte in den vier Messtiefen sind für jedes Messobjekt in einem Diagramm je Messstelle über den betrachteten Zeitraum dargestellt. Aus diesem Verlauf können die Schwankungen der Holzfeuchte über den Messzeitraum abgelesen werden (vgl. Abbildung 47). Als Anhaltspunkt für die Holzfeuchteänderungen aufgrund des schwankenden Umgebungsklimas wurde in diese Diagramme zudem die Ausgleichsfeuchte eingefügt (siehe Abschnitt 5.9.

Des Weiteren ist für alle Objekte ein Diagramm mit der relativen und absoluten Luftfeuchte sowie der Referenztemperatur an der jeweiligen Messstelle angefügt (vgl. Abbildung 48). In der Auswertung der zweiten Messperiode ist in diesem Diagramm zudem der berechnete Taupunkt enthalten.

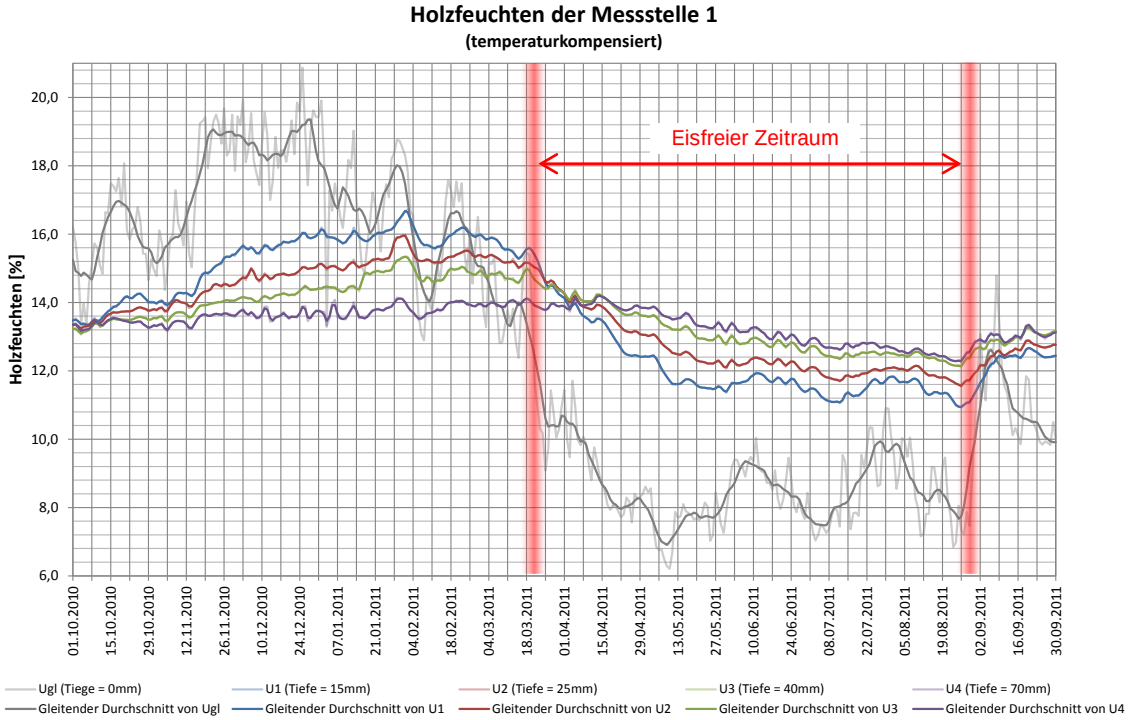


Abbildung 47: Verlauf der Holzfeuchte über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe (die Messwerte und der gleitende Durchschnitt liegen teilweise übereinander).

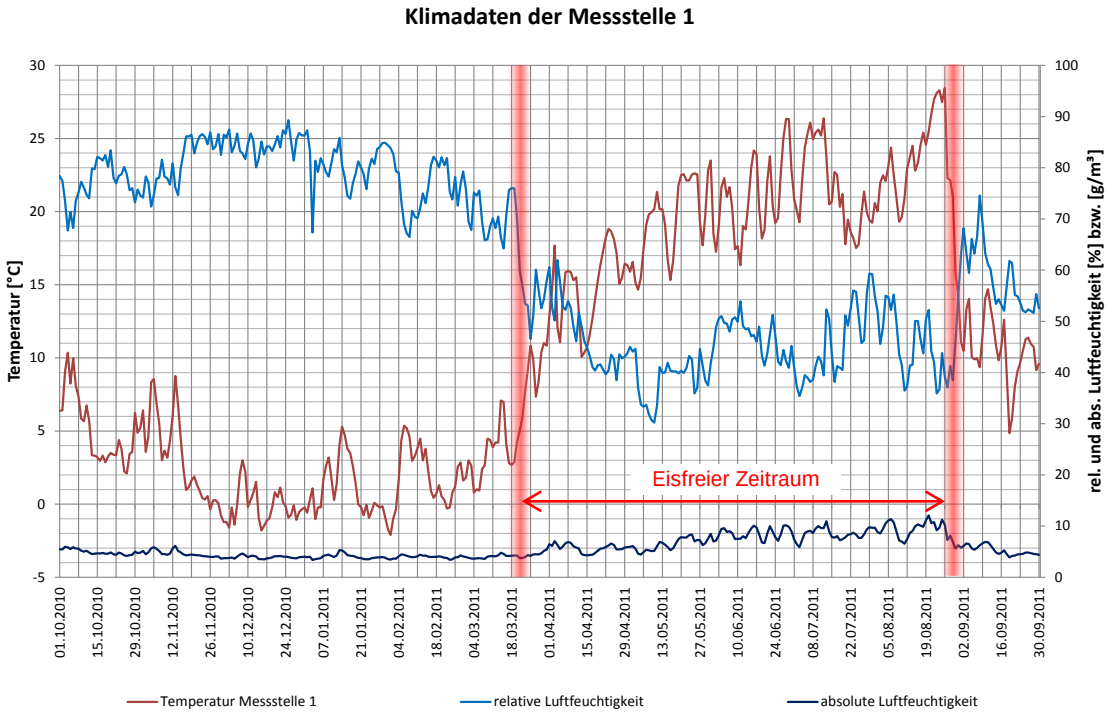


Abbildung 48: Verlauf der relativen und absoluten Luftfeuchte sowie der Referenztemperatur über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

6.2.2 Resultierende Querschnittsverläufe

Bei genauer Betrachtung der vier Verläufe der Holzfeuchte aus den zuvor gezeigten Diagrammen ist eine Ableitung der Querschnittsverläufe bereits möglich. Um den Holzfeuchtegradienten genauer darzustellen und um die Auswirkungen des Hallenklimas auf die Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt zu verdeutlichen, wurde bei der Auswertung der Ergebnisse ein weiteres Diagramm angefertigt, in dem Querschnittsverläufe zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander verglichen werden können. Die Zeitpunkte der Auswertung wurden so gewählt, dass der Messzeitraum von einem Jahr in vier etwa gleich lange Abschnitte unterteilt wird. Obwohl die Holzfeuchtemessungen nur an einer Trägerseite durchgeführt wurden, werden die Ergebnisse in den Diagrammen zur Verdeutlichung der Verläufe an der Symmetrielinie des Trägers gespiegelt. Ein beispielhaftes Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 49 gegeben.

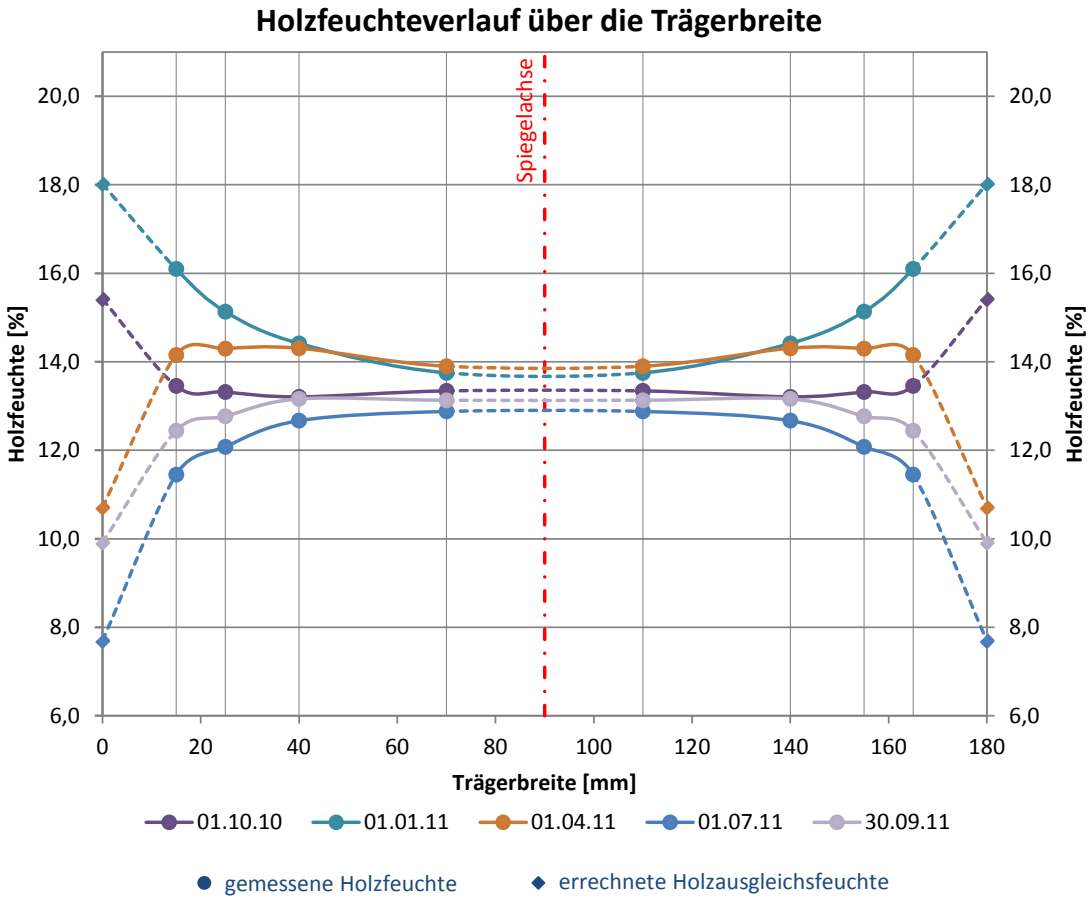


Abbildung 49: Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

Für die Auswertung der zweiten Messperiode wurde auf die Darstellung des Querschnittsverlaufs verzichtet, da die enthaltenen Verläufe nur Momentaufnahmen darstellen und somit nur eine geringe Aussagekraft über den tatsächlichen Jahresverlauf der Holzfeuchte haben.

Die minimalen und maximalen Werte der über den betrachteten Auswertungszeitraum in den unterschiedlichen Tiefen gemessenen Holzfeuchten sowie der berechneten Ausgleichsfeuchten an der Trägeroberfläche sind als umhüllende Holzfeuchteverläufe in einem weiteren Diagramm dargestellt (vgl. Abbildung 50). Aus diesem Diagramm kann man erkennen, dass sowohl der Schwankungsbereich der Holzfeuchte, als auch der zugehörige Mittelwert vom Abstand zur Oberfläche abhängt. Mit zunehmender Tiefe sinkt die Amplitude des Holzfeuchteverlaufes über die Zeit aufgrund der dämpfenden Wirkung der zwischen Messpunkt und Oberfläche liegenden Holzschicht. In gleicher Form ist die Umhüllende der Gradienten der Holzfeuchte grad(u) = du / dx, ausgewertet zwischen den einzelnen Tiefen der Holzfeuchtemessungen, in einem Diagramm dargestellt (vgl. Abbildung 25).

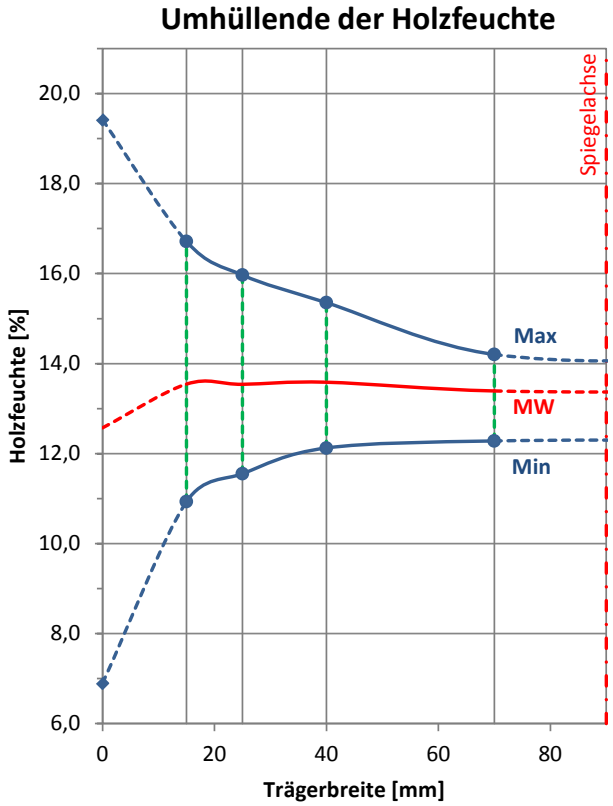


Abbildung 50: Umhüllende der Holzfeuchte über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

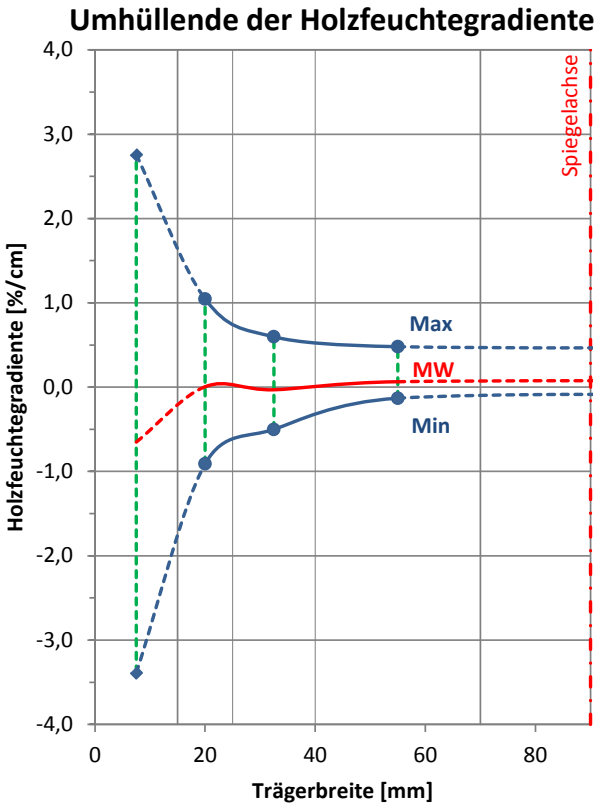


Abbildung 51: Umhüllende der Holzfeuchte-gradiente über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

6.3 Ergebnisse und Anmerkungen zu den untersuchten Nutzungsarten

6.3.1 Allgemeines

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt viele Gemeinsamkeiten der einzelnen Objekte innerhalb einer Nutzungsart. Zwischen den Nutzungsarten sind oft markante Unterschiede feststellbar. Im Folgenden wird eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse aller Objekte, je Nutzungsart, aufgeführt. Diese Darstellungsweise wurde gewählt, da eine graphische Auswertung zwar unmittelbar verständlich ist, jedoch keinen schnellen und prägnanten Überblick über die Ergebnisse aller Objekte zulässt. Für die grafischen Auswertungen von Holzfeuchte, relativer Luftfeuchte, Temperatur und Holzfeuchtegradiente jedes Objektes wird auf den Anhang verwiesen. Die tabellarische Zusammenfassung enthält neben den für den Messzeitraum ermittelten Mittelwerten von Luftfeuchte, Temperatur (jeweils beruhend auf Tagesmittelwerten) und Holzfeuchte, für alle drei Parameter auch die maximale Amplitude, d.h. die Differenz zwischen größtem und niedrigstem über den Messzeitraum ermittelten Messwert. Für die Holzfeuchte ist zudem die maximale Gradiente der Holzfeuchte grad(u) = du/dx zwischen zwei benachbarten Messstellen sowie die maximale Holzfeuchtedifferenz zwischen innerster und äußerster Messstelle angegeben. Eine graphische Erläuterung der in den Tabellen aufgeführten Daten enthält Abbildung 52.

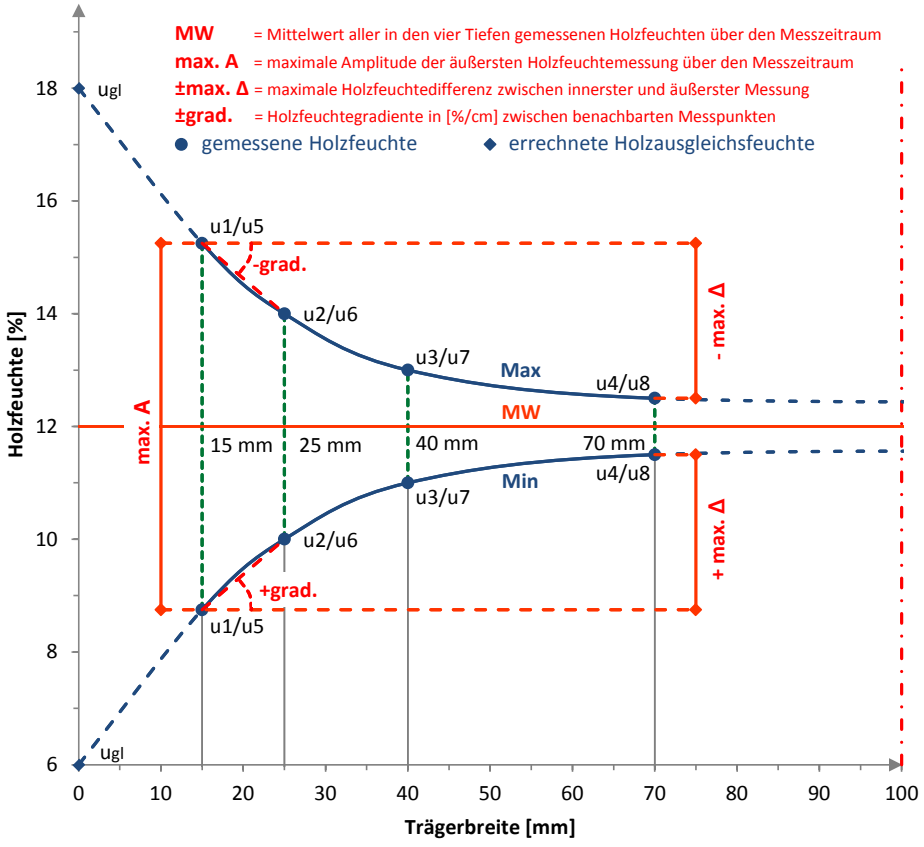


Abbildung 52: Schematische Darstellung des maximalen und minimalen umhüllenden Feuchteverlaufs im Holzquerschnitt mit Bezeichnung der ausgewerteten Größen.

6.3.2 Kategorie A – Schwimmhallen

Bei den untersuchten Schwimmhallen lässt sich ein sehr konstantes und warmes Hallenklima feststellen. Die durchschnittliche Lufttemperatur beträgt ca. 30°C und die relative Luftfeuchte um 50%. Es ist anzumerken, dass die Klimasensoren in den Schwimmhallen, vermutlich aufgrund der für die Messtechnik aggressiven, chlorhaltigen Luft, zeitweise ausfielen. Dementsprechend beruhen die in Tabelle 5 mit * gekennzeichneten Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums. Durch die Klimatisierung ist das Klima in den untersuchten Schwimmhallen unabhängig vom Außenklima. Die Holzfeuchte verläuft konstant und weist nur geringe Schwankungen und kleine Gradienten auf. Eine Ausnahme stellt das Messobjekt A2 (Wellenbad Penzberg) dar, in welchem die Messtechnik in einem Übergangsbereich zu einem Außenbecken installiert war. Aufgrund der kälteren Außenluft, die durch die Öffnung nach innen gelangt, ist die relative Luftfeuchte und damit auch die Holzfeuchte hier stark erhöht und stärkeren Schwankungen unterworfen. In Objekt A3 (Schwimmhalle Prienavera) wurden ab März 2011 (ca. sechs Monate nach Beginn der Messungen) umfangreiche Renovierungsarbeiten durchgeführt und das Objekt für den folgenden Zeitraum geschlossen. Auf diesen Umstand ist der starke Abfall der Holzfeuchte und das Ansteigen der Holzfeuchtegradiente in den Randbereichen des Holzquerschnittes sowie der Anstieg der Temperatur bei Messobjekt A3 zurückzuführen. Durch die Renovierungsarbeiten bedingt war in diesem Objekt die Messtechnik temporär zu deinstallieren, was die zum Ende der Messperiode hin fehlenden Messzeiträume in den im Anhang gegebenen Grafiken erklärt.

Aufgrund der geringen festgestellten klimatischen Beanspruchung der Holztragwerke in Schwimmhallen wurden die Objekte dieser Nutzungskategorie für das Folgevorhaben nicht weiter betrachtet.

Tabelle 5: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie A.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Schwimmhallen											
A1	MST1	8,7	1,4	+1,0	-0,0	+0,1	-0,2	29,7	6,7	48,3*	6,8*
	MST2	9,3	1,2	+0,4	-0,2	+0,5	+0,0				
A2	MST1	16,1	1,8	+0,6	-0,5	+0,6	-0,4	28,7	6,0	88,6*	19,4*
	MST2	15,0	2,6	+1,6	-0,6	+1,3	-0,3				
A3	MST1	8,7	1,6	+4,8	+2,3	+1,4	+0,7	30,5	19,5	45,6*	29,0*
	MST2	7,7	1,8	+1,7	+0,2	+1,0	+0,3				

* Da es bei diesen Objekten zu einem zeitweisen Ausfall der Klimasensoren kam, beruhen die Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums.

6.3.3 Kategorie B – Eissporthallen

Das Umgebungsklima in geschlossenen, nicht klimatisierten Eissporthallen (Objekte B1 – Eissporthalle Landsberg und B2 – Eissporthalle Buchlohe) ist durch eine deutliche Änderung zwischen den Wintermonaten und den Sommermonaten (eisfreie Zeit) geprägt. Herrschen in den Wintermonaten durchschnittlich Temperaturen von 4° bei ca. 75% relativer Luftfeuchte, so ändert sich dies in den Sommermonaten auf Werte von ca. 15° und 60% relativer Luftfeuchte. Die dementsprechende Anpassung der Holzfeuchte innerhalb dieses Zeitraums wird durch die große jahreszeitliche Amplitude (vgl. Tabelle 6) belegt und ist auch in den im Anhang gegebenen Diagrammen gut zu erkennen. In den Objekten B3 (Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen) und B4 (Bundesleistungszentrum Füssen) stellt sich bei Betrieb der dort vorhandenen Heizung über eine Lüftungsanlage ein gemäßigteres Hallenklima mit geringeren jahreszeitlichen Schwankungen ein. Hierbei ist anzumerken, dass das Objekt B3 im Zeitraum Dez. 2010 – Anfang März 2011 als Pressezentrum für eine Sportveranstaltung genutzt wurde, was die hohen Temperaturen und geringen relativen Luftfeuchten innerhalb dieses Zeitraums erklärt. In den Objekten B1 (Eissporthalle Landsberg) und B4 (Bundesleistungszentrum Füssen) ist eine dämpfende Wirkung des filmbildenden Anstrichs auf die Holzfeuchteänderungen und die Größe der Holzfeuchtegradiente festzustellen. Im Objekt B1 (Eissporthalle Landsberg) wurden im Mai 2011 Renovierungsarbeiten durchgeführt. Diese resultierten jedoch in keiner nennenswerten Änderung der Umgebungsbedingungen. Bei geschlossenen, nicht klimatisierten Eissporthallen wird das Hallenklima in abgeschwächter Form vom Außenklima beeinflusst. In allen Objekten stellt die Eisfläche einen zweiten, nicht zu vernachlässigenden Einflussfaktor dar. Das zeigt sich in den Holzfeuchten, die über den Eisflächen (entsprechende Messstellen sind in Tabelle 6 mit * gekennzeichnet) im Mittel um 1.5 % höher sind als in den Randbereichen der Halle. Es wird darauf hingewiesen, dass die Messung der Holzfeuchte an den Trägerseitenflächen und nicht an der der Eisfläche gegenüberliegenden und damit feuchteren Trägerunterseite durchgeführt wurde. In den Sommermonaten ist das Klima in den Hallen stärkeren Schwankungen unterworfen, was auf den fehlenden Einfluss der Eisfläche bei gleichzeitigem Fehlen einer Dachdämmung zurückgeführt werden kann.

Von den vier im ersten Forschungsvorhaben untersuchten Eissporthallen wurden die beiden geschlossenen und klimatisierten Objekte B3 (Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen) und B4 (Bundesleistungszentrum Füssen) weiter untersucht.

Beim Messobjekt B3, der Olympia-Eissporthalle Garmisch Partenkirchen, herrschte während des Messzeitraums des Folgevorhabens Normalbetrieb mit einer eisfreien Zeit von drei Monaten im Frühjahr. Im Messzeitraum des ersten Forschungsvorhabens war die eisfreie Zeit, bedingt durch die Unterbringung des Pressezentrums für die Ski-Weltmeisterschaften 2011, mit sieben Monaten außergewöhnlich lang. Somit sind die beiden Messzeiträume nur bedingt miteinander vergleichbar. Aufgrund dieser unterschiedlichen Nutzung während der beiden Messzeiträume unterscheiden sich auch die klimatischen Randbedingungen in der Halle. Die durchschnittliche Lufttemperatur liegt um ca. 4°C niedriger, gleichzeitig stieg die relative Luftfeuchte um 8% (vgl.

Tabelle 6 und Tabelle 7). Das führte in der zweiten Messperiode zu leicht höheren Holzfeuchten (MST1 +0,9%, MST2 +0,6%), die im Vergleich zur ersten Messperiode mit der zeitlich beschränkten Nutzungsänderung aber wesentlich geringere Schwankungen aufweisen. Im ersten Messzeitraum waren die Holzfeuchtegradienten durch die schnelle Änderung der klimatischen Randbedingungen ebenfalls deutlich größer.

Tabelle 6: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie B.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Eissporthallen											
B1	MST1*	15,5	3,3	+1,7	-1,0	+0,9	-0,5	9,4	26,2	69,0	44,0
	MST2	14,2	2,5	+0,4	-1,9	+0,7	-0,3				
B2	MST1	13,5	5,8	+1,9	-2,8	+0,9	-1,0	9,9	29,9	62,2	59,1
	MST2*	15,2	6,6	+1,9	-3,9	+1,2	-0,8				
B3	MST1*	10,8	5,1	+3,8	-1,6	+1,5	-1,0	19,9	14,1	40,2	57,0
	MST2	9,6	4,0	+2,1	-1,7	+1,3	-0,4				
B4	MST1	13,3	1,9	+0,9	-0,6	+0,7	+0,2	9,2	18,8	68,3	44,7
	MST2*	14,9	2,8	-0,3	-2,1	-0,0	-0,7				

* Die mit * gekennzeichneten Messstellen liegen über der Eisfläche.

Tabelle 7: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie B.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Eissporthallen											
B3	MST1*	11,7	3,1	+1,9	-1,4	+0,6	-1,0	16,1	19,8	49,5	60,2
	MST2	10,1	2,5	+0,6	-1,7	+0,7	-0,5	15,9	20,2	47,0	44,6
B4***	MST1	14,3	1,6	+1,4	+0,4	+0,7	+0,4	7,4	22,7	76,9	36,5
	MST2*	16,0	2,5	+0,4	-1,0	+0,1	-0,3	7,4**	22,7**	76,9**	36,5**

* Die mit * gekennzeichneten Messstellen liegen über der Eisfläche.

** Diese Werte entsprechen den Ergebnissen der regulär aufgezeichneten Messstelle 1.

*** Da es bei diesem Objekt zu einem zeitweisen Ausfall der Messdaten kam, beruhen die Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums.

Im Messobjekt B4, dem Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen, wurde innerhalb der ersten zwei Monate des Messzeitraumes ein Ausfall der Holzfeuchtemesswerte festgestellt. In diesen Zeitraum fiel das Abtauen und Wiederherstellen der Eisfläche. Somit konnte der Einfluss des sich in dieser Zeit ändernden Hallenklimas auf die Holzfeuchte nicht erfasst werden. Nach Beginn des Abtauens der Eisfläche am 01.04.14 stieg die relative Luftfeuchte rasch an. Ohne Eisfläche ergaben sich in der Halle höhere Temperaturen bei gleichzeitig niedrigerer Luftfeuchte. Das führte zu einem starken Abfall der theoretischen Holzausgleichsfeuchte. Mit Beginn der

Eisherstellung stieg die Luftfeuchte wieder an und blieb für den Rest des Messzeitraums konstant zwischen 70 und 80%, d.h. etwas höher als in der ersten Messperiode. Die Holzfeuchte verlief in dieser Zeit ebenfalls sehr konstant bei durchschnittlich ca. 14 % für die Messstelle über der Tribüne und bei ca. 16% über der Eisfläche (vgl. Tabelle 7). Somit konnte auch in der zweiten Messperiode eine Differenz der Holzfeuchte im Tribünenbereich und über der Eisfläche festgestellt werden.

6.3.4 Kategorie C – Reithallen

Mit einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchte von fast 80% ist in den untersuchten Reithallen ein sehr feuchtes Klima anzutreffen, welches im Winter tendenziell höhere Luftfeuchten aufweist als im Sommer. Begründet werden kann dies durch die ungedämmte Bauweise der Reithallen sowie der fehlenden Beheizung, wodurch in den Wintermonaten teils sehr niedrige Temperaturen zu beobachten sind. Durch den Betrieb der Sprinkleranlagen kommt es dabei zu sehr hohen Luftfeuchten bis hin zum Tauwasserausfall. Die Holzfeuchten sind erwartungsgemäß hoch und betragen im Mittel fast 16%, siehe Tabelle 8. Wie bei anderen vom Außenklima beeinflussten Nutzungen sind die Holzfeuchten zudem starken Schwankungen unterworfen. Auch die Holzfeuchtegradienten sind merklichen Änderungen unterworfen. Extremwerte wurden jedoch nicht verzeichnet, da die Anpassung der Holzfeuchte zu einem großen Teil auf der jahreszeitlichen Anpassung des Außenklimas beruht.

Tabelle 8: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie C.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Reithallen											
C1	MST1	17,1	3,3	+1,3	-1,0	+0,6	-0,5	13,3	22,5	79,7	52,6
	MST2	16,4	3,4	-0,0	-2,8	-0,2	-1,2				
C2	MST1	15,5	5,1	+0,1	-3,5	-0,1	-2,8	10,5	28,6	77,8	48,6
	MST2	15,8	3,8	+1,2	-1,4	+0,8	-0,7				
C3	MST1	14,4	4,9	+2,7	-1,5	+0,7	-1,1	9,8	30,5	77,9	52,3
	MST2	15,5	4,5	+1,8	-1,6	+0,8	-0,5				

Bei der Nutzungsklasse Reithallen wurden die beiden Messobjekte C1 und C3 für das Folgevorhaben weiter untersucht. Die beiden Reithallen weisen mit einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchte von ca. 75% auch in der zweiten Messperiode ein sehr feuchtes Hallenklima auf. Durch ihre Bauweise und die fehlende Heizung ist das Klima in den untersuchten Reithallen zudem stark vom Außenklima abhängig. Das resultiert in großen Amplituden der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte (vgl. Tabelle 9). Da durch den Betrieb der Sprinkleranlagen viel Feuchte in die Hallen eingebracht wird, sind die sich daraus ergebenden durchschnittlichen Holzfeuchten mit knapp 16% entsprechend hoch.

Tabelle 9: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie C.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Reithallen											
C1	MST1	17,1	3,8	+1,6	-0,8	+0,6	-0,5	14,1	22,6	78,5	46,6
	MST2*	16,3	4,0	+0,7	-1,7	+0,3	-1,0	14,3	22,2	75,8	44,8
C3	MST1	14,1	3,8	+2,2	+0,2	+0,6	-0,7	12,0	30,2	71,5	42,5
	MST2	15,2	4,4	+1,5	-1,0	+0,4	-0,6	10,4	28,5	71,6	41,5

* Da es bei dieser Messstelle zu einem zeitweisen Ausfall der Messdaten in den Tiefen 40 und 70mm kam, beruhen die Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums.

Die Messergebnisse beim Objekt C1 sind sehr gut mit den Verläufen aus dem ersten Forschungsvorhaben vergleichbar. Das Hallenklima in der zweiten Messperiode ist besonders im Juli 2013 stärkeren Schwankungen unterworfen. Das führt zu einer etwas größeren Amplitude im zweiten Messzeitraum, die Umhüllende der Holzfeuchte fällt für beide Messperioden jedoch sehr ähnlich aus. Bei beiden Messzeiträumen lässt sich eine starke temporäre Änderung des Hallenklimas beobachten, die auf eine Großveranstaltung in der Halle zurückzuführen ist, die jedes Jahr zur selben Zeit abgehalten wird.

Wie beim Messobjekt C1 sind die Ergebnisse aus den beiden Messzeiträumen auch in der zweiten Reithalle, C3, stark vom Außenklima abhängig. Durch den im Vergleich zum ersten Messzeitraum etwas milderen Winter ergibt sich im zweiten Messzeitraum über die Wintermonate eine etwas geringere relative Luftfeuchte. Das führt im Randbereich der Trägerquerschnitte zu etwas geringeren Holzfeuchten. Alle anderen Ergebnisse aus den beiden Messzeiträumen sind sehr gut miteinander vergleichbar.

6.3.5 Kategorie D – Sporthallen

In den Sporthallen ist ein sehr konstantes Klima zu beobachten, das mit einer Luftfeuchte von ca. 40 bis 50% eher trocken ist. Die Durchschnittstemperaturen betragen ca. 20 °C und sind durch die Belüftung und Beheizung der Hallen weitgehend unabhängig vom Außenklima. Daraus ergeben sich Holzfeuchten im Bereich von 8 bis 10% die sich über das Jahr hinweg nur wenig verändern (siehe Tabelle 10).Hierbei stellt das Messobjekt D1 (Paul-Wegmann-Halle Ingolstadt) eine Ausnahme dar, da sich das Tragwerk in einer Lichtkuppel befindet. Hier wurden, abweichend von den anderen Sporthallen und bedingt durch die direkte Sonneneinstrahlung, höhere Temperaturen und deutlich geringere durchschnittliche Luftfeuchten (MW 27%) gemessen. Mit durchschnittlich gemessenen Holzfeuchten von 4 bzw. 6% sind die Querschnitte dieses Tragwerkes sehr trocken. Es ist anzumerken, dass die verwendete Messtechnik die Holzfeuchte trockener Bauteile tendenziell unterschätzt (siehe Abschnitt 0). Für alle Objekte gilt, dass die während des Betriebes ermittelten Holzfeuchtegradienten sehr gering sind. Hinsichtlich einer Fortführung der Langzeitmessungen wurden Sporthallen daher nicht weiter betrachtet.

Tabelle 10: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie D.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		Temperatur MW [°C]	max. A [°C]	rel. Luftfeuchte MW [%]	max. A [%]
Sporthallen											
D1	MST1	4,4	2,1	+0,6	-0,3	+0,3	-0,2	27,4	26,7	27,7	29,6
	MST2	5,9	1,2	+1,1	+0,0	+0,7	+0,2				
D2	MST1	8,0	2,0	+0,7	-0,9	+0,2	-0,3	20,6	16,7	42,8	42,0
	MST2	8,1	2,1	+1,1	-0,6	+0,6	-0,2				
D3	MST1	10,2	2,2	+1,3	-0,5	+0,8	-0,1	20,8	7,9	51,2	34,0
	MST2	10,0	2,1	+1,7	-0,2	+0,7	-0,1				

6.3.6 Kategorie E – Produktions- und Verkaufshallen

Das Klima in den beiden untersuchten Hallen ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Nutzung nur partiell miteinander vergleichbar. Beide Hallen werden teilweise vom Außenklima beeinflusst, aufgrund der Beheizung sind die Schwankungen der Luftfeuchte- und Temperatur jedoch gedämpft, siehe Tabelle 11. Auch der Verlauf der Holzfeuchte und der Holzfeuchtegradiente während des Betriebes ist dementsprechend sehr konstant. Das Messobjekt E2 (Produktionshalle Füssen) repräsentiert eine außergewöhnliche Nutzung. Durch Schmiedearbeiten herrschen in dieser Halle mit teilweise über 30°C sehr hohe Temperaturen bei einer gleichzeitig extrem geringen Luftfeuchte, die über lange Zeit unter 20% lag. Daraus ergibt sich eine durchschnittlich gemessene Holzfeuchte unter 5%. Anfang August 2011 wurde die Produktion in der Halle eingestellt und der Schmiedeofen, der das Klima im der Halle maßgeblich beeinflusste, abgeschaltet. Die dadurch bewirkte plötzliche Änderung der klimatischen Umgebungsbedingungen kann zu schnellem Auffeuchten und dementsprechend zu erheblicher Rissbildung im Querschnittsinneren der gekrümmten Träger führen. Dies zeigt sich auch schon ansatzweise in der erhöhten Holzfeuchtegradiente der Messstelle 2. Bedingt durch den auszuwertenden Messzeitraum konnten jedoch nur die ersten zwei Monate der Anpassung der Holzfeuchte an das geänderte Umgebungsklima abgedeckt werden.

Tabelle 11: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie E.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		Temperatur MW [°C]	max. A [°C]	rel. Luftfeuchte MW [%]	max. A [%]
Produktions- und Verkaufshallen											
E1	MST1	7,7	1,8	+0,6	-1,2	+0,5	-0,1	18,4	17,5	40,9	38,6
	MST2	7,8	1,6	+0,3	-1,3	+0,5	-0,1				
E2	MST1	4,8	1,9	+0,5	-0,7	+0,7	-0,3	27,1	21,3	25,8	49,9
	MST2	4,7	2,2	+0,9	-1,1	+0,5	-0,9				

Tabelle 12: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie E.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte MW [%]	Holzfeuchte max. A [%]	Holzfeuchte ±max. Δ [%]		Holzfeuchte ±max. Grad. [%/cm]		Temperatur MW [°C]	Temperatur max. A [°C]	rel. Luftfeuchte MW [%]	rel. Luftfeuchte max. A [%]
Produktions- und Verkaufshallen											
E1	MST1	7,2	1,8	+1,1	-0,5	+0,6	-0,0	21,9	13,7	37,1	35,8
	MST2	7,2	1,7	+1,0	-0,5	+0,7	+0,1	21,8	13,6	37,8	34,9
E2	MST1	5,5	1,6	+0,1	-1,3	+0,5	-0,2	23,0	15,9	34,7	41,4
	MST2	5,4	2,0	+0,7	-1,0	+0,2	-0,7	22,6	15,9	36,0	41,8

Die beiden Messobjekte dieser Nutzungsart stellen einen Sonderfall dar. Gegen Ende des Messzeitraumes des ersten Forschungsvorhabens wurde der metallverarbeitende Betrieb im Messobjekt E2 eingestellt. Die Halle wurde anschließend als Lager für das anliegende Sportgeschäft genutzt. Im Zuge eines Umbaus des Sportgeschäftes, Objekt E1 (unter anderem Einbau einer Fußbodenheizung), wurde auch die Halle E2 umgebaut und ebenfalls in eine Verkaufshalle umgenutzt. Ab Mitte 2013 gingen beide Verkaufshallen in Betrieb. Aufgrund dieser Umnutzung sind die Ergebnisse aus den beiden Messzeiträumen nur bedingt miteinander vergleichbar.

Die im Folgevorhaben ermittelten Verläufe des Hallenklimas und der Holzfeuchte des Messobjekts E1 korrelieren trotz der Umnutzung sehr gut mit den Messwerten aus dem ersten Messzeitraum. Durch die eingebaute Fußbodenheizung und den kontinuierlichen Betrieb ist das Hallenklima im Winter wärmer, trockener und gleichzeitig konstanter. Über die Sommermonate ergibt sich ein vergleichbares Hallenklima, das stärker vom Außenklima beeinflusst wird. Die Holzfeuchte ist im Vergleich zum ersten Messzeitraum um ca. 0,5% gesunken, was auf das wärmere und trockenere Klima im Winter zurückzuführen ist.

Bei Messobjekt E2 stellt sich aufgrund der gleichen Lage und Nutzung wie Objekt E1 ein ähnliches Hallenklima ein. Durch das im ersten Messzeitraum sehr warme und sehr trockene Hallenklima, steigen die Mittelwerte der Holzfeuchte in der zweiten Messperiode mit höherer Luftfeuchte und niedrigeren Temperaturen im Mittel um ca. 0,7% an.

Die im Folgevorhaben gemessenen Verläufe der Holzfeuchte in den beiden Hallen sind gut miteinander vergleichbar und passen sich zunehmend aneinander an. Durch die sehr konstanten klimatischen Bedingungen ergeben sich bei dieser Nutzung die geringsten Amplituden und Gradienten der Holzfeuchte aller im Folgevorhaben weiter untersuchten Messobjekte.

6.3.7 Kategorie F – Landwirtschaftliche Hallen

In den untersuchten landwirtschaftlichen Hallen mit Viehhaltung herrscht wegen der offenen und ungedämmten Bauweise und der starken Belüftung (Seitenflächen teilweisen ganzjährig offen, zusätzlich Dachentlüftung) praktisch Außenklima. Die relative Luftfeuchte ist aufgrund des

Feuchteeintrags durch das Vieh leicht erhöht. Aus einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchte von ca. 70% ergeben sich Holzfeuchten im Bereich von 15%, die zudem stark schwanken (vgl. Tabelle 13). Landwirtschaftliche Hallen sind in ihren Klimarandbedingungen demnach gut mit Reithallen vergleichbar, bei etwas gedämpften Höchstwerten der relativen Luftfeuchte.

Tabelle 13: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie F.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Landwirtschaftliche Hallen											
F1	MST1	16,4	3,7	-0,9	-3,7	-0,3	-1,2	11,6	21,6	74,7	45,6
	MST2	15,6	3,0	-0,9	-2,7	-0,5	-1,9				
F2	MST1	14,9	5,6	-0,1	-2,8	-0,7	-2,1	14,2	22,4	68,4	48,1
	MST2	15,1	3,7	+0,2	-2,1	-0,1	-1,4				
F3	MST1	14,4	4,7	-1,3	-5,5	-0,9	-2,8	12,6	28,2	69,2	54,1
	MST2	15,2	4,5	-1,2	-5,1	-0,7	-2,6				

Tabelle 14: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie F.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Landwirtschaftliche Hallen											
F1	MST1	16,3	8,6	+5,2	-2,2	+1,1	-0,7	12,1	23,5	78,3	41,2
	MST2	16,8	10,1	+5,2	-1,8	+3,5	-0,4	13,3	21,5	77,2	36,5
F3	MST1	14,3	4,1	-1,2	-4,2	-0,9	-2,2	13,2	26,9	65,0	50,2
	MST2	15,0	4,3	-1,1	-4,0	-0,6	-1,8	13,2*	26,9*	65,5*	50,1*

* Da es bei dieser Messstelle zu einem zeitweisen Ausfall der Klimamessdaten kam, beruhen die Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums.

Die untersuchten landwirtschaftlichen Hallen werden durch ihre teiloffene, ungedämmte Bauweise vom Außenklima beeinflusst. Wie stark diese Beeinflussung ist, wird durch den Vergleich der Klimamesswerte der beiden nur wenige hundert Meter voneinander entfernten Messobjekte F1 und G2 deutlich. Die Messstelle 1 des Objektes G2 befindet sich im überdachten Außenbereich und liefert eine gute Referenz für das vorhandene Außenklima. Ein Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der Verläufe. Aufgrund der inneren Wärme- und Feuchtelast durch das Vieh fällt die Lufttemperatur in den Wintermonaten nur selten unter +5°C und ist im Jahresdurchschnitt um ca. 2,5°C höher (vgl. Tabelle 13 und Tabelle 14). Auch die relative Luftfeuchte verläuft wesentlich konstanter und ist im Vergleich ca. 10% höher als im Referenzklima außen. Das führt bei diesem Messobjekt zu einer durchschnittlichen Holzfeuchte von ca. 16,5%. Dieser Wert liegt gut 3% über der Holzfeuchte der Referenzmessstelle im Objekt G2. Ein Vergleich mit dem ersten Messzeitraum zeigt einen gut vergleichbaren Verlauf des Hallenklimas. Die im Objekt F1 ermittelten Messwerte

der Holzfeuchte des zweiten Messzeitraumes sind jedoch mit einer gestiegenen Anzahl an Messfehlern behaftet und weisen mehrere unrealistische Sprünge auf. Dies erschwert einen Vergleich der Verläufe der Holzfeuchte aus beiden Messzeiträumen. Die Verläufe des Hallenklimas sind hingegen gut mit denen aus dem ersten Messzeitraum vergleichbar (vgl. Tabelle 13 und Tabelle 14).

Die Ergebnisse in Messobjekt F3 sind sehr gut mit denen aus der ersten Messperiode vergleichbar. Durch den etwas milderen Winter ergeben sich im zweiten Messzeitraum etwas höhere Temperaturen und dementsprechend geringere relative Luftfeuchten. Die sich daraus ergebenden Verläufe der Holzfeuchte sind geringfügig niedriger aber in ihrer Charakteristik sehr gut vergleichbar. Die Amplituden und Gradienten der Holzfeuchte unterscheiden sich ebenfalls nur unwesentlich von den Werten des ersten Messzeitraumes.

6.3.8 Kategorie G – Lagerhallen

Da Lagerhallen meist offen sind, ist das Hallenklima stark vom Außenklima abhängig. Die Holzfeuchten stellen sich im Mittel bei ca. 12% ein, schwanken wegen des Einflusses des Außenklimas jedoch stärker als bei allen anderen untersuchten Nutzungsarten (vgl. Tabelle 15). In der Halle des Messobjekts G1 (Pflanzenhalle München) stellen sich aufgrund des hohen Feuchteeintrags durch die winterliche Lagerung von Pflanzen höhere Luftfeuchten ein als bei den anderen Messobjekten. Das führte zeitweise zu erheblicher Tauwasserbildung an den Oberflächen des Holztragwerks der Lagerhalle was zur größten jahreszeitlichen Amplitude der Holzfeuchte wie auch den größten Holzfeuchtegradienten aller untersuchten Objekte resultierte.

Tabelle 15: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie G.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	±max. Δ [%]		±max. Grad. [%/cm]		MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]
Lagerhallen											
G1	MST1	10,5	8,7	+3,0	-5,2	+1,2	-3,2	10,1	32,6	74,3	62,5
	MST2	13,9	5,4	+1,4	-2,6	+0,7	-2,1				
G2	MST1	13,3	6,1	+1,2	-4,4	+1,2	-1,4	9,7	32,5	67,1	54,0
	MST2	12,7	3,6	+0,7	-2,5	+0,5	-1,0				
G3	MST1	11,5	3,6	+1,7	-1,4	+1,1	-0,3	13,4	25,6	61,3	44,0
	MST2	12,1	2,9	+0,7	-1,7	+0,7	-0,7				

Bei der Nutzungsart Lagerhalle bestätigt sich auch im zweiten untersuchten Messzeitraum die starke Abhängigkeit des Hallenklimas vom Außenklima. Das Hallenklima ist dadurch starken Schwankungen unterworfen. Der Jahresmittelwert der Holzfeuchte hat sich gegenüber der ersten Messperiode nur geringfügig verändert (vgl. Tabelle 15 und Tabelle 16).

Tabelle 16: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie G.

Objekt	Mess-stelle	Holzfeuchte MW [%]	Holzfeuchte max. A [%]	Holzfeuchte ±max. Δ [%]		Holzfeuchte ±max. Grad. [%/cm]		Temperatur MW [°C]	Temperatur max. A [°C]	rel. Luftfeuchte MW [%]	rel. Luftfeuchte max. A [%]
Lagerhallen											
G1	MST1	9,7	4,6	+3,0	-1,5	+1,0	-0,8	12,8*	38,0*	58,4*	56,5*
	MST2	13,6	5,1	+1,9	-1,6	+0,8	-1,0	10,5	32,7	74,8	56,2
G2	MST1	13,4	5,8	+1,9	-3,0	+1,2	-1,7	9,8	34,3	66,6	55,9
	MST2	12,8	2,2	+1,4	-1,0	+0,6	-0,8	10,2	31,9	67,7	50,6

* Da es bei dieser Messstelle zu einem zeitweisen Ausfall der Klimamessdaten kam, beruhen die Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums.

Durch den etwas milderen Winter war bei der Halle des Messobjekts G1 (Pflanzenhalle München) seltener Tauwasserausfall an den Trägern des Dachtragwerks zu beobachten. Dementsprechend stellten sich in den Wintermonaten der zweiten Messperiode geringere Holzfeuchten, geringere Amplituden im jahreszeitlichen Verlauf der Holzfeuchte und deutlich geringere negative Holzfeuchtegradienten im Außenbereich des Trägerquerschnittes ein. Beim Messzeitraum des Folgevorhabens wurde das Hallenklima nicht mehr am Standort der Messtechnik, sondern direkt an jeder Messstelle erfasst. Dadurch ist bei diesem Messobjekt ein deutlicher Unterschied in den klimatischen Randbedingungen der beiden untersuchten Messstellen zu verzeichnen. Für die Messstelle 2 im Bereich des Lichtbandes ergab sich mit durchschnittlich 12,8°C und 58%r.F. ein im Vergleich zum ersten Messzeitraum wesentlich trockeneres Hallenklima. Im ersten Messzeitraum war das Hallenklima nahe dem Traufbereich bei Messstelle zwei erfasst worden (durchschnittlich 10°C und 74%r.F). Dies erklärt den Umstand, dass die berechnete theoretische Holzausgleichsfeuchte für Messstelle 1 im ersten Messzeitraum stets oberhalb der gemessenen Holzfeuchte lag. In der zweiten Messperiode fiel der Klimasensor vermutlich durch die exponierte Lage im sonnenbeschienenen Lichtbandbereich über längere Zeit aus. Aussagen bezüglich des Hallenklimas können dementsprechend nur auf den regulär aufgezeichneten Zeitraum gestützt werden.

Bei Messobjekt G2 sind die Klimabedingungen aus beiden Messperioden sehr gut miteinander vergleichbar. Die jahreszeitlichen Durchschnittswerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte sowie deren maximale Amplituden sind für beide Messzeiträume praktisch identisch. Im Folgevorhaben wurde das Hallenklima an beiden Messstellen erfasst. Messstelle 1 befindet sich im überdachten Außenbereich, Messstelle 2 im Innenbereich der Lagerhalle. Anhand dieser Klimamesswerte konnte eine sehr starke Abhängigkeit des Hallenklimas vom Außenklima festgestellt werden. Das Außenklima wird durch die Gebäudehülle nur geringfügig gedämpft. Der Durchschnittswert der Holzfeuchte entspricht für beide Messstellen, den Werten aus der ersten Messperiode.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Schlussfolgerungen

7.1.1 Allgemein

Das Thema der Materialfeuchte von tragenden Holzbauteilen wurde bisher tendenziell vor dem Hintergrund behandelt, hohe Holzfeuchten zu vermeiden um Fäulnis oder Pilzbildung zu verhindern. Die Auswertung von Schäden an weitgespannten Holzkonstruktionen zeigt als überwiegend festgestelltes Schadensbild ausgeprägte Rissbildung in Lamellen und Klebefugen der Brettschichtholzbauteile aufgrund niedriger oder stark schwankender Holzfeuchten. Diese Schwindrisse reduzieren den verbleibenden Querschnitt zur Übertragung von Querzug- oder Schubspannungen. Grund für derartige Holzfeuchten und Holzfeuchtegradienten sind schnelle und/oder starke Änderungen der Umgebungsbedingungen, welche sich zum einen aus konstruktiven Bedingungen, zum anderen aus der Gebäudenutzung ergeben können. Lokal können diese Änderungen verstärkt auftreten, wie z.B. im Bereich von Oberlichtern oder Lüftungsauslässen.

Ziel des Forschungsvorhabens „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ war, mittels Langzeitmessserien die klimatischen Beanspruchungen und das sich daraus ergebende Gefährdungspotential bezogen auf holzbautypische Gebäudetypen und -nutzungen zu ermitteln. Insgesamt wurden 21 Messobjekte aus sieben unterschiedlichen Nutzungskategorien untersucht. Dazu zählen die Nutzungen Schwimmhalle, Eissporthalle, Reithalle, Sporthallen Produktions- und Verkaufshalle, landwirtschaftliche Halle und Lagerhalle.

7.1.2 Schlussfolgerungen zur Langzeitmessung von Hallenklima und Holzfeuchtegradiente

Das für dieses Forschungsvorhaben entwickelte Messsystem erwies sich als grundsätzlich geeignet, Langzeitmessungen der Holzfeuchte mit einer Genauigkeit von ±0,5 % (vgl. Kapitel 5) und des Klimas in Hallen in Holzbauweise zu realisieren. In 21 untersuchten Objekten mit je zwei Messstellen waren nur in den Schwimmhallen Ausfälle von Klimasensoren und ein Ausleseproblem bei einem Datenlogger festzustellen. Die defekten Komponenten, an welchen Flugrostbildung festgestellt wurde, konnten ausgetauscht werden, fielen aber nach kurzer Zeit erneut aus. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Defekte auf das für metallische Sensoren sehr aggressive, chlorhaltige Klima in den Schwimmbädern zurückzuführen sind. So korrodierten selbst die vernickelten Anschlüsse der Datenlogger und der Verbindungskabel, was in einem Fall zum kompletten Ausfall des Datenloggers führte. Abhilfe könnte durch die Verwendung von robusteren digitalen Sensoren zur Erfassung des Hallenklimas und durch die Unterbringung der Messtechnik in Installationsgehäusen geschaffen werden.

Im Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ wurden die Langzeitmessungen von klimatischen Bedingungen und resultierender Holzfeuchtegradiente an ausgewählten Messobjekten mit stark schwankenden Umgebungsbedingungen fortgeführt, um die im ersten

Forschungsvorhaben gewonnenen Messergebnisse zu verifizieren. Von den ursprünglich sieben Nutzungskategorien und 21 Messobjekten wurden aus fünf augewählten Nutzungen je zwei Objekte weiter untersucht. Schwimm- und Sporthallen wurden wegen ihres sehr konstanten und vom Außenklima unabhängigen Hallenklimas für die Fortführung der Langzeitmessung nicht weiter in Betracht gezogen. Von besonderem Interesse im Rahmen der Fortführung war die Anpassung der Messtechnik an bislang gewonnene Erkenntnisse. Getroffene Annahmen bei der Auswertung der bisherigen Ergebnisse wurden durch Messungen realer Werte der entsprechenden Parameter ersetzt. So wurde die Verteilung der Materialtemperatur über den Holzquerschnitt, die für die Kompensation des Temperatureinflusses auf die Holzfeuchtemessung benötigt wird, mittels zweier in den Querschnitt eingebrachter Temperatursensoren ermittelt. Im ersten Forschungsvorhaben wurde der Temperaturverlauf aus der gemessenen Oberflächentemperatur abgeleitet. Im Vergleich der beiden unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Materialtemperaturen wurde bei sonnenbeschienenen Messstellen eine nicht unerhebliche Abweichung festgestellt. Eine Temperaturkompensation mit aus der gemessenen Lufttemperatur berechneten Temperaturverläufen im Querschnitt resultiert in Holzfeuchteverläufen mit geringeren und weniger sprunghaften, kurzzeitigen Änderungen. Bei Verwendung der in den Trägern in 20 mm und 40 mm Tiefe gemessenen Temperaturen, ergeben sich für Zeiten, in der die Trägeroberfläche von der Sonne direkt beschienen wird, relativ große Sprünge in den Verläufen der Holzfeuchte. Für das betrachtete Beispiel lagen diese Sprünge im Untersuchungszeitraum bei ca. 1,5 % Holzfeuchte. Der Grund für diese Abweichung wurde mittels zweier hierfür durchgeführter Untersuchungen eingegrenzt. Hierbei wurde festgestellt, dass ein nicht unerheblicher Teil der auf die Trägeroberfläche auftreffenden thermischen Energie aus den Sonnenstrahlen durch Wärmeleitung über den Kabelquerschnitt des Sensors in das Querschnittsinnere und damit zum Temperatursensor hin transportiert wird. Dies führt dazu, dass die Materialtemperatur für sonnenbeschienene Messstellen mit der bisherigen Methode der Temperaturermittlung überschätzt wird. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass eine Messung der Materialtemperatur von der sonnenabgewandten Trägereite aus realistische Messwerte liefert.

Mit der zweiten Untersuchung konnte anhand von Laborversuchen bestätigt werden, dass der verwendete analytische Ansatz zur Kompensation des Temperatureinflusses auf die Holzfeuchtemessung Ergebnisse liefert, die innerhalb der zu erwartenden Messgenauigkeit liegen. Eine Berechnung der im Querschnitt vorhandenen Temperaturverläufe mittels der expliziten Euler Methode unter Verwendung von im direkten Umfeld der Messstelle durch Klimasensoren gemessenen Lufttemperaturen resultiert in realistischen, für die Praxis ausreichend genauen Ergebnissen.

7.1.3 Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen

In den beiden betrachteten Auswertezeiträumen vom 1. Oktober 2010 mit 30. September 2011 bzw. vom 1. April 2013 mit 31. März 2014 wurden insgesamt über 3,6 Millionen Messwerte erfasst und mit Hilfe eines eigens entwickelten Programmes ausgewertet. Für jedes Messobjekt wurden Diagramme zum Verlauf der Holzfeuchte und des Hallenklimas erstellt. Aus letzterem wurde die

sich einstellende Ausgleichsfeuchte des Holzes errechnet. Diese wurde zum Zwecke der Vergleichbarkeit in die Verläufe der gemessenen Holzfeuchten eingefügt. Die Verwendung von unterschiedlich langen Messelektroden ermöglichte klare Aussagen über den Verlauf der Holzfeuchte in den Querschnitten. Aus den für jede Messstelle erstellten Querschnittsverläufen der Holzfeuchte kann die Größe der vorliegenden Feuchtegradiente abgelesen sowie die Differenz der Holzfeuchte zwischen Bauteiloberfläche und Querschnittsinneren ermittelt werden. Beide Parameter bilden die Grundlage, um Rückschlüsse auf die Größe der feuchteinduzierten Spannungen und damit potentieller Rissentstehung zu ziehen.

Ein Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Nutzungen bestätigt die große Bandbreite der möglichen klimatischen Bedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte) in Gebäuden mit Holztragwerken. Diese resultiert, über alle Nutzungen und Messzeiträume hinweg betrachtet, in mittleren Holzfeuchten zwischen 4.4 % und 17.1 %. Aus den Verläufen der Holzfeuchte lässt sich mit zunehmender Messtiefe im Holzquerschnitt sowohl eine gedämpfte als auch eine zeitliche Verzögerung der Anpassung der Holzfeuchte an die Umgebungsbedingungen erkennen. Daraus ergeben sich über die Trägerbreite unterschiedliche Holzfeuchten welche aufgrund der zugehörigen Schwind- und Quellverformungen zu Spannungen im Holzquerschnitt führen.

Die Holzfeuchtegradienten fallen in der Gruppe der gedämmten und geheizten Gebäude geringer aus als in der Gruppe von Gebäuden mit stärkerem Einfluss des jahreszeitlich schwankenden Außenklimas.

Schwimmhallen fallen in die erstgenannte Gruppe. Für sie wurden im Forschungsvorhaben sehr konstante, hinsichtlich der Ausgleichsfeuchte der Holzbauteile unkritische Randbedingungen festgestellt. Ausnahme bilden Übergangsbereiche zum Außenklima, in denen aufgrund des Absinkens der Temperatur, sehr hohe Luftfeuchten auftreten können, die zudem stärkeren Schwankungen unterworfen sind. Der gleichen Gruppe (geschlossene, gedämmte und geheizte Gebäude) sind Sporthallen zuzurechnen. Für diese wurde durchgängig ein konstantes aber trockenes Klima festgestellt. Verstärkt wurde der Effekt trockenen Klimas in Bereichen direkter Sonneneinstrahlung z.B. im Bereich von Lichtbändern. Die für Sporthallen gemachten Feststellungen treffen auch auf Verkaufshallen zu. Produktionshallen können, in Abhängigkeit der speziellen Nutzung, unterschiedliche klimatische Bedingungen aufweisen. Die Klimarandbedingungen sind dementsprechend objektspezifisch zu ermitteln. Meist werden diese jedoch einem konstanten und trockenen Klima zuzurechnen sein. Bei einigen der dieser Gruppe zugeordneten Messobjekte wurden erhebliche Schwindrisse an den Holzbauteilen des Dachtragwerkes festgestellt. Der hinsichtlich des Gefährdungspotentials für die Entstehung dieser Schwindrisse kritischste Zeitraum wird in den meisten Fällen der erste Winter nach Inbetriebnahme des Gebäudes sein. Durchschnittlich stellten sich in der Gruppe der gedämmten und geheizten Gebäude Temperaturen $\geq 20°C$ (für Schwimmbäder bei ca. 30°C) und relative Luftfeuchten $< 50\%$ ein. Die aus diesen klimatischen Randbedingungen resultierenden Holzfeuchten lagen im Bereich von 6 – 10 % bei jährlichen Amplituden von $< 2\%$ (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Aus den Messwerten des gesamten Messzeitraums abgeleitete Anhaltswerte für die Gruppe der gedämmten und beheizten Gebäude unter Normalbetrieb.

Kategorie		Holzfeuchte MW [%]	Holzfeuchte max. A [%]	Temperatur MW [°C]	rel. Luftfeuchte MW [%]
A	Schwimmhallen	8-9	< 1,5	≈ 30	< 50
D	Sporthallen	8-10	< 2	≈ 20	< 50
E	Produktions- und Verkaufshallen	6-7	< 2	15-25	< 40
Ø	gedämmt, beheizt	6-10	< 2	> 20	< 50

Der zweitgenannten Gruppe (teiloffene, ungedämmte, unbeheizte Gebäude) sind die Reithallen zuzuordnen. Das Hallenklima in diesen ist starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. In den Wintermonaten führt das Zusammenspiel von kalter Luft und der von den Sprinkleranlagen eingebrachten Feuchte häufig zu Tauwasserausfall. Ähnlich starke jahreszeitliche Schwankungen des Hallenklimas wurden für landwirtschaftliche Hallen ermittelt. Viehbetrieb bedingt einen zusätzlichen Feuchteeintrag und damit eine erhöhte Luftfeuchte. Ähnlich wie bei Reithallen führt in den Wintermonaten kalte, von außen einstreichenden Luft und die erhöhte Luftfeuchte im Gebäude zu hohen Holzfeuchten und teilweise zu Tauwasserausfall. Wie in anderen vom Außenklima beeinflussten Nutzungen ergeben sich starke Schwankungen der Holzfeuchte, die aufgrund des jahreszeitlichen Charakters der Schwankungen in merklichen, nicht jedoch in außergewöhnlich hohen Holzfeuchtegradienten resultieren. Die in Lagerhallen im Mittel festgestellten Holzfeuchten liegen in einem für Holzbauteile günstigen Bereich von 9.5 % bis 14.0 %. Zum Teil bedingt durch die gelagerten Güter wurden für die Lagerhallen jedoch die stärksten jahreszeitlichen Schwankungen der Umgebungsbedingungen in diesem Forschungsvorhaben ermittelt.

Tabelle 18: Aus den Messwerten des gesamten Messzeitraums abgeleitete Anhaltswerte für die Gruppe der teiloffenen, ungedämmten und unbeheizten Gebäude unter Normalbetrieb.

Kategorie		Holzfeuchte MW [%]	Holzfeuchte max. A [%]	Temperatur MW [°C]	rel. Luftfeuchte MW [%]
C	Reithallen	14-17	3-5	10-15	70-80
F	Landwirtschaftliche Hallen	14-17	4-5	10-15	65-75
G	Lagerhallen	11-14	4-5	10-15	60-75
Ø	teiloffen, ungedämmt, unbeheizt	12-16	4	10-15	> 65

Für die Kategorie der teiloffenen, ungedämmten und unbeheizten Gebäude konnten im Mittel Temperaturen im Bereich von 10° - 15°C und relative Luftfeuchten größer 65 % beobachtet werden. Die mittlere Holzfeuchte stellt sich zwischen 12 und 16 % ein. Durch die schwankenden

klimatischen Randbedingungen ergibt sich eine durchschnittliche Amplitude der Holzfeuchte von 4 % (vgl. Tabelle 18).

Weniger durch das Außenklima als vielmehr bedingt durch die Nutzung ist auch das Klima in Eissporthallen starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Durchschnittlich konnte bei Eishallen eine mittlere relative Luftfeuchte zwischen 60 und 70 % bei aufgrund der Nutzung schwankenden Temperaturen festgestellt werden. Die Holzfeuchte ist mit durchschnittlich 15,5 % über der Eisfläche um 1,5 % höher als die Holzfeuchte im Randbereich der Halle. Die Amplitude der Holzfeuchte stellt sich im Mittel bei ca. 3,5 % ein (vgl. Tabelle 19). Die Holzfeuchte in Eissporthallen ist generell hoch und schwankt stark. Die stärkste Änderung der klimatischen Bedingungen, resultierend in größeren Holzfeuchtegradienten, ergab sich zum Zeitpunkt der Eisherstellung nach der Sommerpause.

Tabelle 19: Aus den Messwerten des gesamten Messzeitraums abgeleitete Anhaltswerte für die Objekte der Kategorie Eissporthallen.

Kategorie			Holzfeuchte MW [%]	Holzfeuchte max. A [%]	Temperatur MW [°C]	rel. Luftfeuchte MW [%]
B	Eissporthallen	über Eisfläche Randbereich	15,5 14	3-6	8-16	60-70

Neben den vorab beschriebenen, nutzungsbedingten Klimabedingungen und dessen Beanspruchungspotential für die Holzbauteile, verdeutlichen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens einen weiteren wichtigen Aspekt. Temporäre Eingriffe, wie Renovierungsarbeiten oder Nutzungsänderungen (temporär oder dauerhaft) können zu stark veränderten klimatischen Bedingungen führen, die sich in ausgeprägten Holzfeuchteänderungen niederschlagen. So wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sowohl ein starkes Austrocknen von Holzbauteilen (temporäre Umnutzung einer Eissporthalle sowie Renovierung eines Hallenbades) wie auch das starke Auffeuchten von sehr trockenen Holzbauteilen (Umnutzung eines ehemals metallverarbeitenden Betriebes) festgestellt. Das sich dabei ergebende Gefährdungspotential für die Entstehung von Schäden durch Risse in Brettschichtholzbauteilen ist entsprechend hoch. Daher sollte bei derartigen Eingriffen auf eine schonende Änderung des Klimas geachtet werden.

7.1.4 Empfehlungen für die Praxis

In der praktischen Anwendung des Baustoffs Holz ist die Kenntnis seines feuchteabhängigen Materialverhaltens von entscheidender Bedeutung. Dazu zählen neben der Planung und dem Neubau von auch die Nutzung bzw. temporäre oder dauerhafte Umnutzung sowie die gutachterliche Untersuchung. Die im Folgenden gegebenen Empfehlungen für die Praxis werden für die genannten drei Bereiche getrennt aufgeführt:

Planung / Neubau

In gedämmten, beheizten Gebäuden (u.a. Schwimmhallen, Sporthallen, Verkaufs- und Produktionshallen) mit relativ konstanten aber trockenen Umgebungsbedingungen sollte schon bei Produktion, Transport, Einbau und Baustellenbetrieb darauf geachtet werden, dass die Holzfeuchte von (speziell großvolumigen) Holzbauteilen nur um wenige Prozent von der späteren Ausgleichsfeuchte abweicht ($u \leq 12\%$). Mögliche Maßnahmen sind u.a. ein abgestimmtes Baustellenregime (u.a. Verhindern einer Befeuchtung bei längerer Lagerung, Reduktion unnötiger Baufeuchte) und/oder ein Holzfeuchtemonitoring während der Bauzeit in Verbindung mit vorab festgelegten Handlungsanweisungen. Beim Entwurf derartiger Tragwerke sollte darauf geachtet werden, Sperreffekte gegenüber dem freien Schwinden und Quellen der Bauteile (z.B. Verbindungsmittel mit großem Abstand senkrecht zur Faser, in geringem Abstand angeordnete Querzugverstärkungen) weitestgehend zu vermeiden.

In Gebäuden mit erhöhtem Einfluss des Außenklimas auf das Innenraumklima (z.B. in Reithallen, landwirtschaftliche Hallen und Lagerhallen) könnte das Aufbringen einer Dachdämmung helfen, die starken Schwankungen des Innenraumklimas und dementsprechend die Holzfeuchtegradienten zu dämpfen. Bei teiloffenen Bauwerken reduziert sich der Effekt einer solchen Maßnahme mit zunehmendem Anteil an dauerhaft geöffneten Bereichen in der Außenhülle. Holzbauteilen die aufgrund lokaler Gegebenheiten wie Oberlichtern oder Lüftungsauslässen verstärkten Änderungen des Umgebungsklimas ausgesetzt sind sollte erhöhte Aufmerksamkeit hinsichtlich potentieller Rissentstehung aufgrund eines zu schnellen Austrocknens nach einer Feuchteperiode geschenkt werden. In diesen Bereichen bietet die Verwendung von außen auf die Holzbauteile aufgebrachten, austauschbaren Holzwerkstoffplatten eine Möglichkeit, die saisonalen Holzfeuchteänderungen zu dämpfen. Dieses Prinzip wird zurzeit von den Autoren im Rahmen eines weiteren, in Zusammenarbeit mit der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. durchgeführten Projekts untersucht.

Nutzung / Umnutzung

Der hinsichtlich des Gefährdungspotentials für die Entstehung von Schwindrissen kritischste Zeitraum wird bei gedämmten und beheizten Gebäuden in den meisten Fällen der erste Winter nach Erstellung des Gebäudes sein. In diesem Zeitraum sollte beim Einsatz der Heizanlagen darauf geachtet werden, die relative Luftfeuchte nicht schnell und stark abzusenken. Eine künstliche Luftbefeuchtung, z.B. in Form von Verdunstungsbecken ist eine weitere Möglichkeit, die Geschwindigkeit der Austrocknung der Holzquerschnitte zu dämpfen. Eine Alternative stellt eine Oberflächenbehandlung der Holzquerschnitte, z.B. in Form von Feuchteschutzmitteln dar, welche die Feuchteaufnahme und –abgabe für die ersten Jahre nach der Erstellung des Gebäudes dämpft. Zum momentanen Zeitpunkt können noch keine konkreten Angaben hinsichtlich anwendbarer, diffusionshemmender Produkte zur Oberflächenbehandlung gegeben werden.

In teiloffenen, ungedämmten und unbeheizten Gebäuden ist der Einfluss des Nutzers auf das Innenklima wesentlich geringer. Dennoch kann die Entstehung hoher relativer Luftfeuchten durch verschiedene Maßnahmen reduziert werden. In Reithallen würde sich der aus dem Zusammenspiel von kalter Luft und der von den Sprinkleranlagen eingebrachten Feuchte auftretende Tauwasserausfall reduzieren, wenn die Sprinkleranlagen in der kalten Jahreszeit nur eingesetzt werden, sofern dies für den Reitbetrieb unbedingt erforderlich ist. In Lagerhallen sollte während der generell feuchteren Wintermonate darauf geachtet werden, dass durch die gelagerten Güter keine hohe, zusätzliche Feuchte eingebracht wird. In Eissporthallen ergab sich die stärkste Änderung der klimatischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Eisherstellung nach der Sommerpause. Durch eine kontrollierte Lüftung und Heizung der Eissporthallen kann die Auswirkung dieses Effekts deutlich gedämpft werden.

Neben den vorab beschriebenen, nutzungsbedingten Klimarandbedingungen und deren Beanspruchungspotential für die Holzbauteile, verdeutlichen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens, dass temporäre Eingriffe, wie Renovierungsarbeiten oder Nutzungsänderungen zu stark veränderten klimatischen Bedingungen führen können. Diese können in ausgeprägten Holzfeuchteänderungen resultieren. Dementsprechend sollte bei derartigen Eingriffen auf eine schonende Änderung des Klimas geachtet werden und die Verwendung von Hilfsmaßnahmen (z.B. Verdunstungsbecken, Oberflächenbehandlung) für eine zeitlich kontrollierte Änderung des Raumklimas in Betracht gezogen werden. Idealerweise sind solche Eingriffe von einem im Holzbau kundigen Fachplaner zu begleiten.

Untersuchung im Schadensfall

Bei der Begutachtung von Schäden an Holztragwerken ist eine nähere Betrachtung der klimatischen Randbedingungen und der resultierenden Holzfeuchte der Bauteile von entscheidender Bedeutung. Herrschen am zu untersuchenden Tragwerk unterschiedliche klimatische Randbedingungen, so sollten über das Tragwerk hinweg an mehreren Orten Messungen der Holzfeuchte in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt werden. Da die Kenntnis der zum Zeitpunkt der Untersuchung vorhandenen Holzfeuchteverteilung in den meisten Fällen nicht ausreicht um die Schadensursache vollständig zu klären sollte angestrebt werden, die Feuchtehistorie der Bauteile zu rekonstruieren. Dies kann durch Recherche in Dokumenten wie dem Leimbuch, dem Baustellentagebuch oder früheren Inspektionsberichten erfolgen, sofern diese vorhanden sind. Ist keine solche Dokumentation der Feuchtekette vorhanden oder wurde das Gebäude umgenutzt, können gegebenenfalls über eine Nutzerbefragung Informationen über die klimatischen Randbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte) gesammelt werden.

Bei der Sanierung klimatisch bedingter Risse ist sich die Fachwelt über den richtigen Zeitpunkt für eine Rissverpressung bzw. Sanierung noch uneinig. In diesem Zusammenhang ist der Einfluss der Superposition der Spannungen vor und nach der Sanierung, ein möglicher Rissfortschritt an der Bauteiloberfläche bzw. im Bauteilinneren, die inhomogene Verteilung des Steifigkeit quer zur Faser über die Lamellenbreite (innen meist steifer als außen) sowie die unterschiedliche

Geschwindigkeit einer Feuchteaufnahme bzw. Feuchteabgabe von Holz zu berücksichtigen. Für belastbare Aussagen hinsichtlich des richtigen Zeitpunktes zur Risssanierung sind noch eingehende Untersuchungen, gepaart mit Versuchen an Prüfkörpern mit baupraktisch relevanten Querschnittsabmessungen, notwendig. Die in diesem Forschungsvorhaben ermittelten klimatischen Umgebungsbedingungen können die Grundlage solcher weiterführender Untersuchungen darstellen.

7.1.5 Empfehlungen für die Umsetzung in Lehrbüchern, Richtlinien und Normen

Es sollte angestrebt werden, das Bewusstsein von Planern und Ausführenden zum Thema der Umgebungsbedingungen und resultierender Holzfeuchte während der Errichtung und Nutzung wie auch temporärer Eingriffe und Nutzungsänderungen ihres Gebäudes zu erhöhen. Erreicht werden könnte dies über die Angabe wesentlicher Informationen in Kommentaren zu Normen sowie Lehrbüchern. Dazu zählt Holzbauteile mit einer Holzfeuchte einzubauen, die der Gleichgewichtsfeuchte im fertig gestellten Bauwerk entspricht. Des Weiteren wird empfohlen, Beispiele der Klassifizierung von Gebäuden in Nutzungsklassen (z.B. Reithallen, Eissporthallen) anzugeben. Gleichzeitig ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die erwarteten Ausgleichsfeuchten von Holzbauteilen für jedes Gebäude objektspezifisch aus den erwarteten Klimarandbedingungen zu ermitteln sind. Vor allem sollte das Bewusstsein der Planer und Ausführenden gegenüber trockenen Umgebungsbedingen erhöht werden. Dementsprechend wird empfohlen, künftig in den Normen zur Bemessung und Konstruktion von Holzbauten darauf hinzuweisen, dass die Ausgleichsfeuchte von Bauteilen aus Nadelholz in beheizten und gedämmten Gebäuden (Nutzungsklasse 1) in den meisten Fällen unter 10 % liegt.

7.2 Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war, mittels Langzeitmessserien klimatische Umgebungsbedingungen und sich daraus ergebende Holzfeuchtegradienten bezogen auf holzbautypische Gebäudetypen und -nutzungen im Normalbetrieb zu generieren. Um realistische Referenzwerte in Bezug auf das Schädigungspotential (Rissbildung) von Holzfeuchtegradienten festzulegen und um Grenzwerte der Holzfeuchtegradiente angeben zu können, bei denen eine Rissbildung in Holzquerschnitt eintritt, sind weitere Forschungsarbeiten in Form von Simulationen und Sensitivitätsstudien (u.a. zu Innenraumklimata sowie lokalen Klimarandbedingungen und daraus resultierenden Holzfeuchtegradienten), in Verbindung mit Laboruntersuchungen (u.a. unterschiedlichen Klimaregimen in der Klimakammer ausgesetzte Holzbauteile) notwendig. Aufgrund der Komplexität dieser Aufgabe ist es erforderlich, das Expertenwissen unterschiedlicher Institutionen in den Bereichen mechano-sorptiver Simulationsmodelle zum Materialverhalten von Holz, Laboruntersuchungen zum mechano-sorptiven Verhalten des Baustoffs Holz sowie Felduntersuchungen zu klimatischen Randbedingungen in Gebäuden mit Holztragwerken zusammenzuführen.

An der Fragestellung wie groß bzw. von welcher Dauer eine Änderung der klimatischen Umgebungsbedingungen sein muss, um einen baupraktisch relevanten Einfluss auf die Holzfeuchte und deren Verteilung in Holzbauteilen zu haben, wird zur zeit am Lehrstuhl gearbeitet.

Im Hinblick auf Gebäude mit relativ konstanten aber trockenen Umgebungsbedingungen (u.a. Sporthallen, Verkaufs- und Produktionshallen) wird empfohlen, dass die Holzfeuchte der Bauteile bereits vor Inbetriebnahme nur wenig von der späteren Ausgleichsfeuchte abweicht. Ist dies nicht der Fall und/oder trocknen die Holzbauteile nach Inbetriebnahme zu schnell aus, so kann dies zu erheblicher Schwindrissbildung an den Holzquerschnitten führen. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Bauteile mit einer Holzfeuchte produziert werden, die über der späteren Ausgleichsfeuchte liegt. Dies ist nicht immer zu vermeiden, da für das Verkleben von Holzbauteilen Holzfeuchten größer 8 - 9 % notwendig sind. Häufig jedoch nehmen die Bauteile noch während der Bauphase größere Mengen an Feuchte auf, z.B. nach dem Einbringen von Estrich oder aber aufgrund stehender Feuchte im bereits geschlossenen Gebäude. Über die Größe der Schwankungen der Holzfeuchte von der Herstellung der Holzbauteile bis zur Inbetriebnahme des Gebäudes gibt es bis heute nur wenige Untersuchungen. Momentan begleiten die Autoren derartige Messungen an zwei Einzelobjekten. Um belastbare Anhaltswerte zur Holzfeuchteverteilung und Holzfeuchtegradienten während der Bauphase im Hinblick auf potentielle Rissentstehung nach Inbetriebnahme des Gebäudes geben zu können, sind jedoch umfassendere Untersuchungen notwendig. In diesen könnte die Entwicklung der Holzfeuchte vom Werk über die Baustelle und Eröffnung bis in das erste Jahr der Nutzung gemessen und dokumentiert werden. Damit würde die Lücke in der „Feuchtekette“ eines Holzbauteils von der Produktion des Bauteils bis zum Betrieb des Gebäudes geschlossen und mit Erfahrungswerten belegt.

Literaturverzeichnis

Aondio, P. (2008). *Auswirkungen klimatischer Umgebungsbedingungen auf sanierte BSH-Bauteile.* Diplomarbeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.

Bariska, M., Rotach, P. E., & Hunziker, S. H. (2001). *Holzkunde II - Teil 2 Holzchemie.* Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule.

Baum, S., Pöhler, E., Seubert, H. H., Weber, P., Kupferschmid, A., & Andrea, D. (2010). *Holzkunde II.* ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Department Forstwissenschaften, Professur Holzwisenschaften.

Becker, G. (2007). *Holzkundliche Grundlagen - Stoffliche und molekulare Zusammensetzung. anatomische Grundlagen, Aufbau der Gehölze.* Albert- Ludwigs- Universität Freiburg: Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft.

BES BOLLMANN - Drying & Control Systems. (2012). *Hinweise zum richtigen Setzen der Holzfeuchte- Messelektroden.* Abgerufen am 31. 08 2014 von www.bes-bollmann.de.

BINE. (2001). Energetisch optimierte Produktionshalle. (Fachinformationszentrum Karlsruhe, Hrsg.) *Projektinfo*(6/2001).

Blaß, H. J. (2004). *Skriptum zur Vorlesung, Holz und Holzwerkstoffe, Wintersemester 2004/05.* Universität Karlsruhe: Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen.

Blaß, H. J., & Frese, M. (2010). *Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau,* (Bd. 16). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Blaß, H. J., Ehlbeck, J., Kreuzinger, H., & Steck, G. (2004). *Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08.* München: DGfH Innovations- und Service GmbH.

Brischke, C. (2007). *Untersuchung abbaubestimmender Faktoren zur Vorhersage der Gebrauchsdauer feuchtebeanspruchter Holzbauteile.* Hamburg: Dissertation am Department für Biologie der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften.

Brischke, C., & Rapp, A. O. (2007). *Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufs an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing.* Hamburg: Arbeitsbericht Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.

Dietsch, P., & Winter, S. (2009). *Typische Tragwerksmängel im Ingenieurholzbau und Empfehlungen für Planung, Ausführung und Instandhaltung.* Österreich: 8. Grazer Holzbau-Fachtagung, TU Graz.

Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., & Winter, S. (2014). Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*.

DIN 1052:1988-04 + A1 1996-10. (1988). *Holzbauwerke; Berechnung und Ausführung, Teile 1-3.* Berlin: DIN.

DIN 1052:2008-12. (2008). *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.* Berlin: DIN.

DIN 18032-1:2003-09. (2003). *Sporthallen – Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung. Grundsätze für die Planung.* Berlin: DIN.

DIN 4074-1:2003-06. (2003). *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz.* Berlin: DIN.

DIN 4108-3:2001-07. (2001). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.* Berlin: DIN.

DIN 52182:1976-09. (1976). *Prüfung von Holz - Bestimmung der Rohdichte.* Berlin: DIN.

DIN 52183:1977-11. (1977). *Prüfung von Holz - Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes.* Berlin: DIN.

DIN 52184:1979-05. (1979). *Prüfung von Holz - Bestimmung der Quellung und Schwindung.* Berlin: DIN.

DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12. (2010). *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.* Berlin: DIN.

DIN EN 1995-1-1:2010-12. (2010). *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.* Berlin: DIN.

Du, Q. P., Geissen, A., & Noack, D. (1991). Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip. *Holz als Roh- und Werkstoff, 49*, S. 1-6.

Du, Q. P., Geissen, A., & Noack, D. (1991). Widerstandskennlinien einiger Handelshölzer und ihre Messbarkeit bei der elektrischen Holzfeuchtemessung. *Holz als Roh- und Werkstoff, 49*, S. 305-311.

EN 1995-1-1/A1:2008-06. (2008). *Amendment A1 zu Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.* Brüssel: CEN.

EN 1995-1-1:2004-11. (2004). *Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauwerken - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.* Brüssel: CEN.

Euler, L. (1755). *Institutiones Calculi differentialis.*

Evans, F., Kleppe, O., & Dyken, T. (2006). *Monitoring of Timber Bridges in Norway - Results December 2005.* Norwegen: Report des Norsk Treteknisk Institutt Oslo.

Feldmeier, F. (2007). Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Feldntersuchung einer Eissporthalle. *Ingenieurholzbau; Karlsruher Tage 2007*, S. 98-104.

Fiedler, E. (2009). Klimatisierung von Eissporthallen – Schichtlüftungssysteme sorgen für bessere Nutzungsbedingungen und höhere Gebäudesicherheit. *Fachjournal Klima/Kälte*, S. 1-6.

Forest Products Laboratory. (2010). *Wood handbook - Wood as an engineering material.* Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Forsén, H., & Tarvainen, V. (2000). *Accuracy and functionality of hand wood moisture content meters.* Espoo: Technical Research Centre of Finland.

Fortuin, G. (2003). *Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz.* Dissertation an der Universität Hamburg.

Fragiacomo, M., Fortino, S., Tononi, D., Usardi, I., & Toratti, T. (2011). Moisture-induced stresses perpendicular to grain in cross-sections of timber members exposed to different climates. *Engineering Structures, Volume 33,* (Issue 11), S. 3071-3078.

Frühwald, E., Serrano, E., Emilsson, A., & Thelandersson, S. (2007). *Design of safe timber structures – How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber?* Lund University: Div. of Struct. Eng.

Gamper, A. (2008). *Versagensmechanismen im Holzbau - Schub und Abscheren Veranschaulichung mittels Versuchen.* Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.

Gamper, A., Dietsch, P., Merk, M., & Winter, S. (2013). *Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen. Abschlussbericht.* München: Fraunhofer IRB Verlag.

GANN. (kein Datum). *Elektrische Holzfeuchte-Messgeräte.* Abgerufen am Januar 2011 von www.gann.de.

Glass, S. V., & Zelinka, S. L. (2010). Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In U.S. Department of Agriculture, Forest Service, & Forest Products Laboratory, *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material* (S. Chapter 04). Madison, WI.

Glauert, M. (2005). *Klimamessung und Klimaregulierung im Archivmagazin.* Potsdam: Veröffentlichungen der brandenburgischen Landesfachstelle für Archive und öffentliche Bibliotheken.

Grosser, D. (1977). *Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.

Güldenpfennig, J., Vogelsberg, A., & Stamminger, P. (März 2010). Zur Feuchteproblematik in Eissporthallen. *Bautechnik*(87), S. 133-138.

Hailwood, A. J., & Horrobin, S. (1946). Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. *Transactions of the Faraday Society, Vol. 42B*, p. 84-92.

Hawley, L. F. (1931). *Wood-liquid relations.* Technical Bulletin Nr. 248: United States Department of Agriculture, Washington, D.C.

Hearmon, R. F., & Patton, J. M. (1964). Moisture content changes and creep of wood. *Forest Products Journal, Issue 8*, 357-359.

Herrmann, M. (2009). *Innovationen der Holzfeuchtemessung.* Diplomarbeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.

Hoadley, R. B. (1990). *Holz als Werkstoff.* Ravensburg: Otto Meier Verlag.

Hoffmeyer, P. (1995). STEP A4: Holz als Baustoff. In J. Blaß, R. Görlacher, & G. Steck, *Informationsdienst Holz; Holzbauwerke STEP 1: Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5.* Düsseldorf: Fachverlag Holz.

Jönsson, J. (2005). *Moisture Induced Stresses in Timber Structures.* Lund, Sweden: Doktorarbeit an der Lund University, Division of Structural Engineering.

Keylwerth, R. (1949). Einfache Kontrollmessung bei der Holztrocknung. *Holz- Zentralblatt* (75), S. 307-309.

Keylwerth, R., & Noack, D. (1956). Über den Einfluss höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip. *Holz als Roh- und Werkstoff, 14*, S. 162-172.

Kießl, K., & Steinbach, S. (2006). Feuchteschutz - das immerwährende Thema der Bauphysik. In WTA Almanach 2006, *Bauinstandsetzen und Bauphysik* (S. 423-431). München.

Kolb, H., Goth, H., & Epple, A. (1984). *Untersuchungen zum Einfluss von Dauerbelastung, Temperatur- und Klimawechsellagerung auf die Querzugfestigkeit von Fichtenholz.* Forschungsbericht, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg - FMPA. Stuttgart: Otto-Graf-Institut, Stuttgart.

Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe.* (Bd. 1). München: Springer Verlag.

Krabbe, E., & Neuhaus, H. (1989). Über Konstruktion, Klima und Holzfeuchtigkeit eines Hallenbades. *Bauen mit Holz* (1989/4), S. 214-217.

Kreuzinger, H. (2007). *Bauwerksüberwachung, Bauwerksüberprüfung.* Augsburg: 8. Holzbau-Praxistag Fachhochschule Augsburg.

Kühne, H., & Strässler, H. (1952). Über die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit. *Schweizer Archiv Band 18,*(Heft 8), S. 264-275.

Lignatur AG. (06 2010). *Der Bademeister bringt die Bestätigung.* Abgerufen am 20. November 2010 von Lignatur Newsletter: http://www.lignatur.ch/infos/newsletter/newsletter-0610/

Lohmann, U. (2003). *Holz- Lexikon* (Bd. 4. Auflage). Drw Verlag Weinbrenner.

Machnicki, J. (2009). *Feuchtebeanspruchung von Brettschichtholzbauteilen – von der Herstellung bis zum fertigen Bauwerk.* Seminararbeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.

MacMillen, J. M. (1955). Drying stresses in red oak. *Forest Products Journal, Volume 5,* (Issue 2), S. 71-76.

Marquardt, H., & Mainka, G.-W. (2008). Tauwasserausfall in Eissporthallen. *Bauphysik*(30), S. 91-101.

Meierhofer, U., & Sell, J. (1979). Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Holzbauteilen - Tragende Holzbauteile im Freien unter Dach. *Holz als Roh- und Werkstoff, 37*, S. 227-234.

Möhler, K., & Steck, G. (1980). Untersuchungen über die Rissbildung in BSH infolge Klimabeanspruchung. *Bauen mit Holz*(4/80), S. 194-200.

Niemz, P. (2005). *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe* (Bd. 3). ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Institut für Baustoffe IfB.

Niemz, P. (2006). *Skript zur Vorlesung Holzphysik.* ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Institut für Baustoffe IfB, Holzphysik.

Nutsch, W. (2007). *Fachkunde Holztechnik* (21. Ausg.). Europa Lehrmittel.

Paulsen, D., & Trinkert, A. (11 2011). Schwimmen unter Holz. *Bauen mit Holz*, S. 34-35.

Planungs- und Baureferat der Stadt Regensburg. (2006). *Einfachturnhalle – Licht- und wärmetechnische Untersuchung.*

Radovic, R., & Wiegand, T. (2005). Oberflächenqualität von Brettschichtholz. *Bauen mit Holz* (7), S. 33-38.

Ranta-Maunus, A. (2003). Effects of climate and climate variations on strength. In S. Thelandersson, & H. J. Larsen, *Timber Engineering* (S. 153-167). London: Wiley & Sons.

Rijsdijk, J. F. (1969). Die Genauigkeit von Holzfeuchtemessungen mit elektrischen Feuchtigkeitsmessgeräten. *Holz Roh- Werkstoff, 27*, S. 17-23.

Ruis, P. (2008). *Weitgespannte Holztragwerke – Einfluss wechselnder Umgebungsbedingungen auf die Holzfeuchte.* Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.

Scanntronik Mugrauer GmbH. (2011). *Produktkatalog Ausgabe 2011.* Zorneding.

Schnitzer, U. (1973). Reitanlagen aus Holz. *Bauen mit Holz* (4), S. 167 f.

Schröder, H.-W. (2007). *Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe.* Vorlesungsmaterialien SS 08. Lehrstuhl für Thermische und Umweltverfahrenstechnik: Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Siau, J. F. (1983). *Transport Processes in Wood.* Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer Verlag.

Simpson, W. T. (1973). Prediction equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber, Vol. 5*, p.41-48.

Steck, G. (1985). *Abbau von Eigenspannungen aus Feuchteänderungen bei Brettschichtholz durch Sägeschnitte.* Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau . Universität Karlsruhe.

Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (2010). *BS-Holz-Merkblatt.* Wuppertal.

Svensson, S., & Toratti, T. (2002). Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. *Wood Science and Technology, Volume 36* (Issue 2), S. 145-156.

Tichelmann, K., & Grimminger, U. (2007). *Manuskript zur Vorlesung: Methodische Instandsetzung von Bauwerken - Untersuchungsverfahren.* Technische Universität Darmstadt: Versuchsanstalt Holz- und Trockenbau.

Toratti, T., & Svensson, S. (2000). Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. *Wood Science and Technology, Volume 34* (Issue 4), S. 317-326.

Trendelenburg, R. (1955). *Holz als Rohstoff.* München: Hanser.

Uhlendorf, K. (2001). *Soziologisches Gutachten – im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts „Messprogramm und Evaluation einer neuen Produktionshalle der Firma Hübner in Kassel“.* Universität Hannover: Institut für Bautechnik und Entwerfen, Abt. Technischer Ausbau und Ressourcensparendes Bauen.

Wagenführ, R. (1966). *Anatomie des Holzes.* Leipzig: Fachbuchverlag.

Winter, S. (2007). *Aktuelle Schäden an Holzkonstruktionen - Bestandsaufnahme.* Augsburg: 8. Holzbau- Praxistag Fachhochschule Augsburg.

Wittchen, B., Josten, E., & Reiche, T. (2009). *Holzfachkunde: Ein Lehr-, Lern- und Arbeitsbuch für Tischler/Schreiner, Holzmechaniker und Fachkräfte - für Möbel-, Küchen- und Umzugsservice* (Bd. 5). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Zillig, W. (2009). *Moisture transport in wood using a multiscale approach.* Belgien: Katholieke Universiteit Leuven - Faculteit Ingenieurswetenschappen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau von Nadelholz. Aus (Grosser, 1977); 9

Abbildung 2: Übergang Früh- zu Spätholz bei Nadelholz. Aus (Lohmann, 2003) 9

Abbildung 3: Wasserabgabe und -aufnahme des Holzes. Nach (Nutsch, 2007) 10

Abbildung 4: Einfluss der Holzfeuchte auf ausgewählte Eigenschaften des Holzes. Nach (Kollmann, 1951) 11

Abbildung 5: Sorptionsisothermen und Bindungsformen des Wassers. Nach (Niemz, 2005)..... 12

Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers in Holz. Aus (Niemz, 2005)..... 13

Abbildung 7: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur und relativer Luftfeuchte. Nach (Keylwerth R. , 1949). 15

Abbildung 8: Verzerrung von Holz durch unterschiedliche Schwindung. Aus (Glass & Zelinka, 2010)..... 16

Abbildung 9: Dehnungsdiagramme und Feuchteverteilung für Red Oak, Abmessungen 2 x 7 inch (5.08 x 17.8 cm), getrocknet bei 110° F (43.3° C). Aus (MacMillen, 1955) 17

Abbildung 10: Beispielhafte Veränderung der Feuchtegradienten in BSH - Bauteilen. Aus (Möhler & Steck, 1980) 18

Abbildung 11: Ingenieurmäßiger Ansatz zur Rissentstehung bei freier Verformung des Querschnitts. Nach (Aondio, 2008) 19

Abbildung 12: Zulässige Risstiefen in Brettschichtholz je nach Art der Beanspruchung. Nach (Kreuzinger, 2007)..... 20

Abbildung 13: Skizze einer möglichen „Feuchtekette“, d.h. Feuchtebeanspruchung und Gefahr der Rissbildung vom Baum bis zum Brettschichtholz im Tragwerk..... 21

Abbildung 14: Eisbildung am Untergurt oberhalb der Eisfläche. Aus (Winter, 2007). 28

Abbildung 15: Tropfenbildung auf Unterseite eines Binders. Aus (Güldenpfennig, Vogelsberg & Stamminger, 2010). 28

Abbildung 16 Darstellung der Gebäudestandorte für alle ausgewählten Hallen. Aus (Google Maps)..... 35

Abbildung 17: Übersicht über die Holzfeuchtemessverfahren. Aus (Herrmann, 2009). 39

Abbildung 18: Einfluss von Feuchtegehalt und Temperatur auf den elektrischen Widerstand von Holz. Aus (Niemz, 2005) nach (Keylwerth & Noack, 1956)..... 41

Abbildung 19: Schematische Darstellung des Widerstandsmessverfahrens und des Messbereiches bei isolierten und nicht isolierten Messelektroden..... 41

Abbildung 20: Verwendetes Referenz- Holzfeuchtemessgerät (Hydromette RTU 600) der Firma GANN. 41

Abbildung 21: Schematische Darstellung der verwendeten Messelektroden. (Hinweis: die dargestellte Lage der Elektroden entspricht nicht dem eingebauten Zustand, dort wurden sie in einer Lamelle angebracht). 43

Abbildung 22: Richtiges Setzen der Messelektroden im Brettschichtholzquerschnitt. 43

Abbildung 23: Montagehilfe in Form einer Bohrschablone und Bohrführungen als Hilfe bei der Installation der Messelektroden in BSH- Lamellen unterschiedlicher Stärke..... 43

Abbildung 24: Systematische Darstellung der Messtechnik..... 44

Abbildung 25: Ergebnisse der Laborversuche zur Kalibrierung der Messtechnik..... 46

Abbildung 26: Systematische Darstellung der Messtechnik im Folgevorhaben. 48

Abbildung 27: Beispielhafte Darstellung der installierten Messtechnik im geöffneten Installationsgehäuse 49

Abbildung 28: Beispielhafte Darstellung der installierten Messtechnik im geschlossenen Installationsgehäuse. 49

Abbildung 29: Beispielhafte Darstellung einer Messstelle mit stark verschmutzten Elektrodenköpfen..... 50

Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung einer Messstelle mit Isolierung der Elektrodenköpfe und zusätzlichen Sensoren. 50

Abbildung 31: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Materialtemperatur am Beispiel der Olympia-Reithalle in München Riem (Objekt C1)..... 52

Abbildung 32: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt C1 bei Kompensation mit berechneten Temperaturen 52

Abbildung 33: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt C1 bei Kompensation mit gemessenen Temperaturen 53

Abbildung 34: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Materialtemperatur am Beispiel einer Pflanzenhalle in München (Objekt G1) 54

Abbildung 35: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit gemessenen Temperaturen 55

Abbildung 36: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit berechneten Temperaturen 55

Abbildung 37: Systematische Darstellung des Aufbaus der Kontrollmessung der Materialtemperatur 57

Abbildung 38: Foto der Messstelle der Kontrollmessung der Materialtemperatur 57

Abbildung 39: Vergleich der von unterschiedlichen Trägeroberflächen aus gemessenen Materialtemperaturen 58

Abbildung 40: Vergleich der von der nicht beschienenen Trägeroberfläche aus gemessenen mit den aus der Lufttemperatur berechneten Materialtemperaturen 58

Abbildung 41: Schematische Darstellung des Prüfkörpers zur Validierung des verwendeten Modells zur Kompensation des Temperatur-einflusses auf die Holzfeuchtemessung 59

Abbildung 42: Foto des Prüfkörpers mit aufgeklebter Aluminiumfolie und Wärmedämmung in Form von Polystyrolplatten 59

Abbildung 43: Auswertung des Versuchs zur Validierung des verwendeten Modells zur Kompensation des Temperatureinflusses auf die Holzfeuchtemessung 60

Abbildung 44: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit von der sonnenbeschienenen Trägerseite aus gemessenen Materialtemperaturen 61

Abbildung 45: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit von der nicht sonnenbeschienenen Trägerseite aus gemessenen Materialtemperaturen 62

Abbildung 46: Verlauf der Holzfeuchte im Objekt G1 bei Kompensation mit aus der Lufttemperatur berechneten Materialtemperaturen 62

Abbildung 47: Verlauf der Holzfeuchte über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe (die Messwerte und der gleitende Durchschnitt liegen teilweise übereinander) 66

Abbildung 48: Verlauf der relativen und absoluten Luftfeuchte sowie der Referenztemperatur über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe. 66

Abbildung 49: Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe..... 67

Abbildung 50: Umhüllende der Holzfeuchte über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe..... 68

Abbildung 51: Umhüllende der Holzfeuchte-gradiente über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe. 68

Abbildung 52: Schematische Darstellung des maximalen und minimalen umhüllenden Feuchteverlaufs im Holzquerschnitt mit Bezeichnung der ausgewerteten Größen..... 69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgleichsfeuchten von Holzbaustoffen. Nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 23

Tabelle 2: Nomenklatur der untersuchten Nutzungen und Anzahl der Hallen je Nutzung im ersten Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung“ 26

Tabelle 3: Gewählte Hallen für die Langzeitmessungen 36

Tabelle 4: Auswahl der zu untersuchenden Nutzungen und Anzahl der Hallen je Nutzung im Folgevorhaben „Gebäudeklima – Validierung“ 38

Tabelle 5: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie A. 70

Tabelle 6: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie B. 72

Tabelle 7: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie B. 72

Tabelle 8: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie C. 73

Tabelle 9: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie C. 74

Tabelle 10: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie D. 75

Tabelle 11: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie E. 75

Tabelle 12: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie E. 76

Tabelle 13: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie F. 77

Tabelle 14: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie F. 77

Tabelle 15: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Objekte der Kategorie G. 78

Tabelle 16: Mittelwerte der einzelnen Messwerte über den gemessenen Zeitraum von 01. April 2013 bis 31. März 2014 für die Objekte der Kategorie G. 79

Tabelle 17: Aus den Messwerten des gesamten Messzeitraums abgeleitete Anhaltswerte für die Gruppe der gedämmten und beheizten Gebäude unter Normalbetrieb. 83

Tabelle 18: Aus den Messwerten des gesamten Messzeitraums abgeleitete Anhaltswerte für die Gruppe der teiloffenen, ungedämmten und unbeheizten Gebäude unter Normalbetrieb. 83

Tabelle 19: Aus den Messwerten des gesamten Messzeitraums abgeleitete Anhaltswerte für die Objekte der Kategorie Eissporthallen. 84

Anhang

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis A-2

A1 Wellenbad Penzberg – Hallenbereich A-3

A2 Wellenbad Penzberg – Durchgang zum Außenbecken A-13

A3 Schwimmhalle Prienavera Prien A-23

B1 Eishalle Landsberg A-33

B2 Eishalle Buchlohe A-43

B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen A-53

B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen A-65

C1 Olympia-Reithalle München-Riem A-77

C2 Gestüt Obere Mühle Blonhofen A-89

C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle A-99

D1 Paul-Wegmann-Halle Ingolstadt A-111

D2 Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern A-121

D3 Turnhalle Gebeleschule München A-131

E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen A-141

E2 Produktionshalle MW Racing Füssen A-153

F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten A-165

F2 Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten A-177

F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe A-187

G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München A-199

G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem A-211

G3 Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf A-223

Abbildungsverzeichnis A-233

A1 Wellenbad Penzberg – Hallenbereich

Anschrift: Seeshaupter Straße 24
82377 Penzberg

Ansprechpartner: Hr. Stephan (vor Ort)

Anwesende vor Ort: Philipp Dietsch, Andreas Gamper, stellv. Badleiter

Installationsdatum: 13.09.2010, 18:00 – 21:00
Letztes Auslesedatum: 12.10.2011, 07:00 – 08:00

Umgebungsbedingungen: Schwimmhalle, allseitig geschlossener, beheizter und energetisch gedämmter Raum

Temperatur: 28,7 °C; Luftfeuchte: 59,4 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: Nahe Trägerauflager an der Fassade;
(Außerhalb des Einflussbereiches des Schwimmbeckens als Referenz zu Messstelle 2)

Messstelle 2: Über dem Nichtschwimmerbecken am Beckenrand;
(Möglichst weit über dem Schwimmbecken um den Einfluss der aufsteigenden Feuchte des Wassers zu erfassen)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	8,6	98,7	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 1
u2	25	8,6	98,8	gemessene	
u3	40	9,1	97,4	Temperatur	
u4	70	9,6	95,6	t_1: 29,6°C	
u5	15	9,4	96,4	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 2
u6	25	9,7	95,3	gemessene	
u7	40	9,9	94,7	Temperatur	
u8	70	9,4	96,6	t_2: 29,1°C	

Tragsystem: Unterspannte 3- Gelenkträger, eingespannt von Doppelstützen, Spannweite ℓ = 15,70 m, temporär mit Hilfsstützen unterstützt

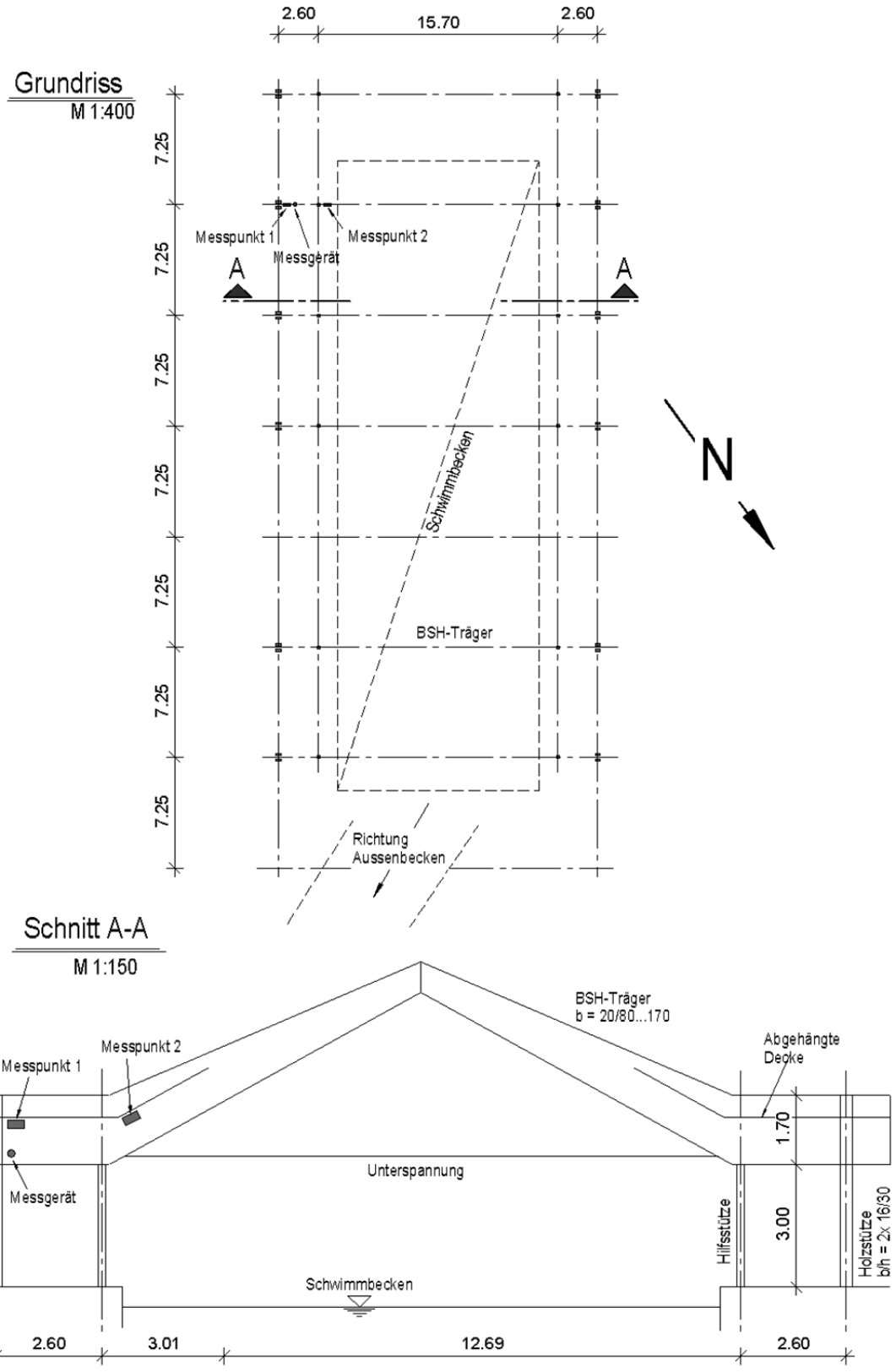
7 Achsen im Innenbeckenbereich, Achsabstand e = 7,23 m,

Trägerabmessungen b/h = 0,20/1,7 … 0.85 m

Lamellenstärke t = 30 mm

Offenporiger Anstrich

Skizzen:


Grundriss
M 1:400
2.60
15.70
2.60
7.25
7.25
7.25
7.25
7.25
7.25
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
A
A
Schwimmbecken
BSH-Träger
N
Richtung
Aussenbecken
Schnitt A-A
M 1:150
BSH-Träger
b = 20/80...170
Abgehängte
Decke
Messpunkt 1
Messpunkt 2
Messgerät
Unterspannung
1.70
3.00
Hilfsstütze
Holzstütze
b/h = 2x 16/30
Schwimmbecken
2.60
3.01
12.69
2.60

Bilder:



Abbildung A1-1: Ansicht Tragwerk

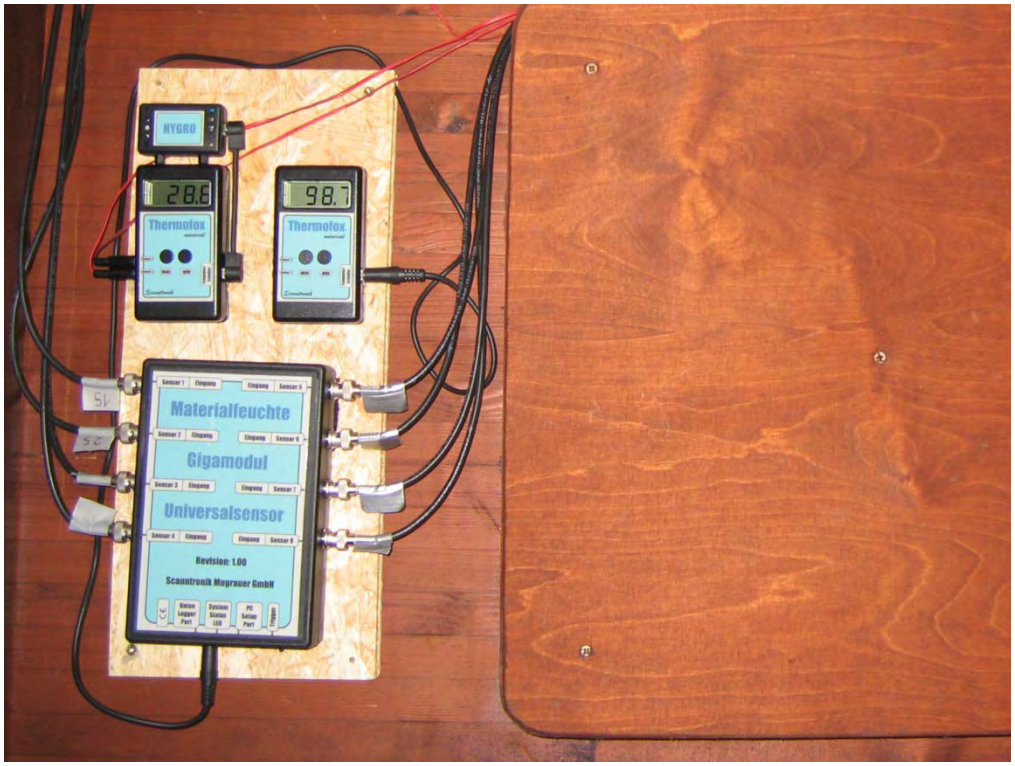


Abbildung A1-2: Anssicht Messstation



Abbildung A1-3: Ansicht Messstelle 1

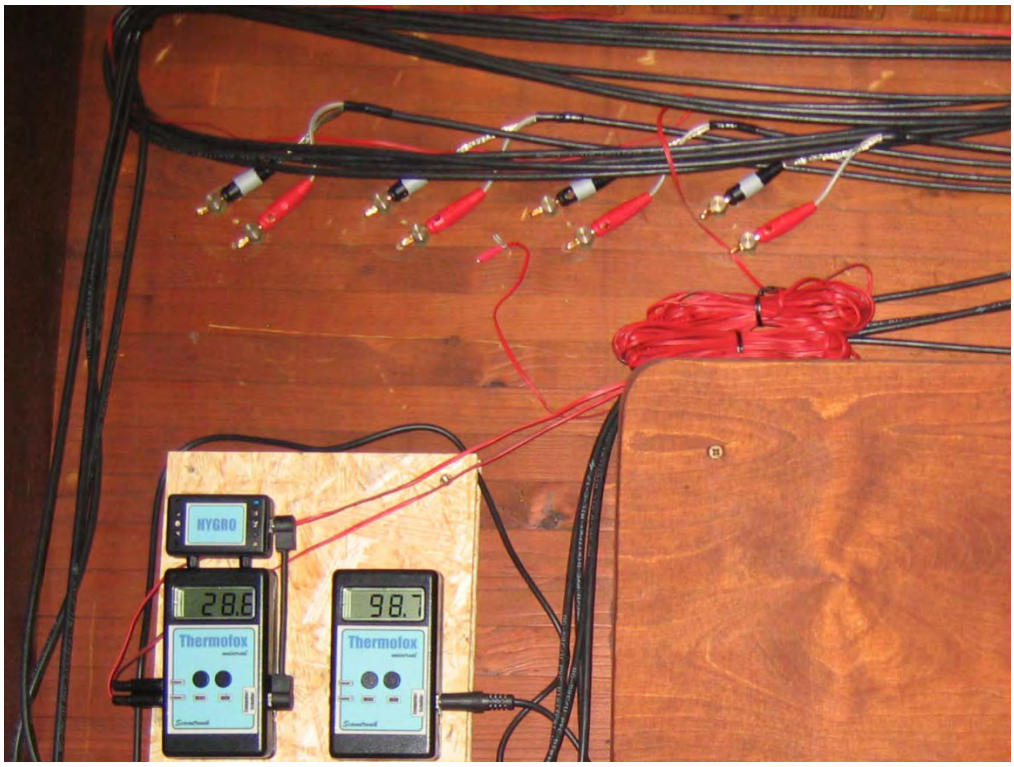
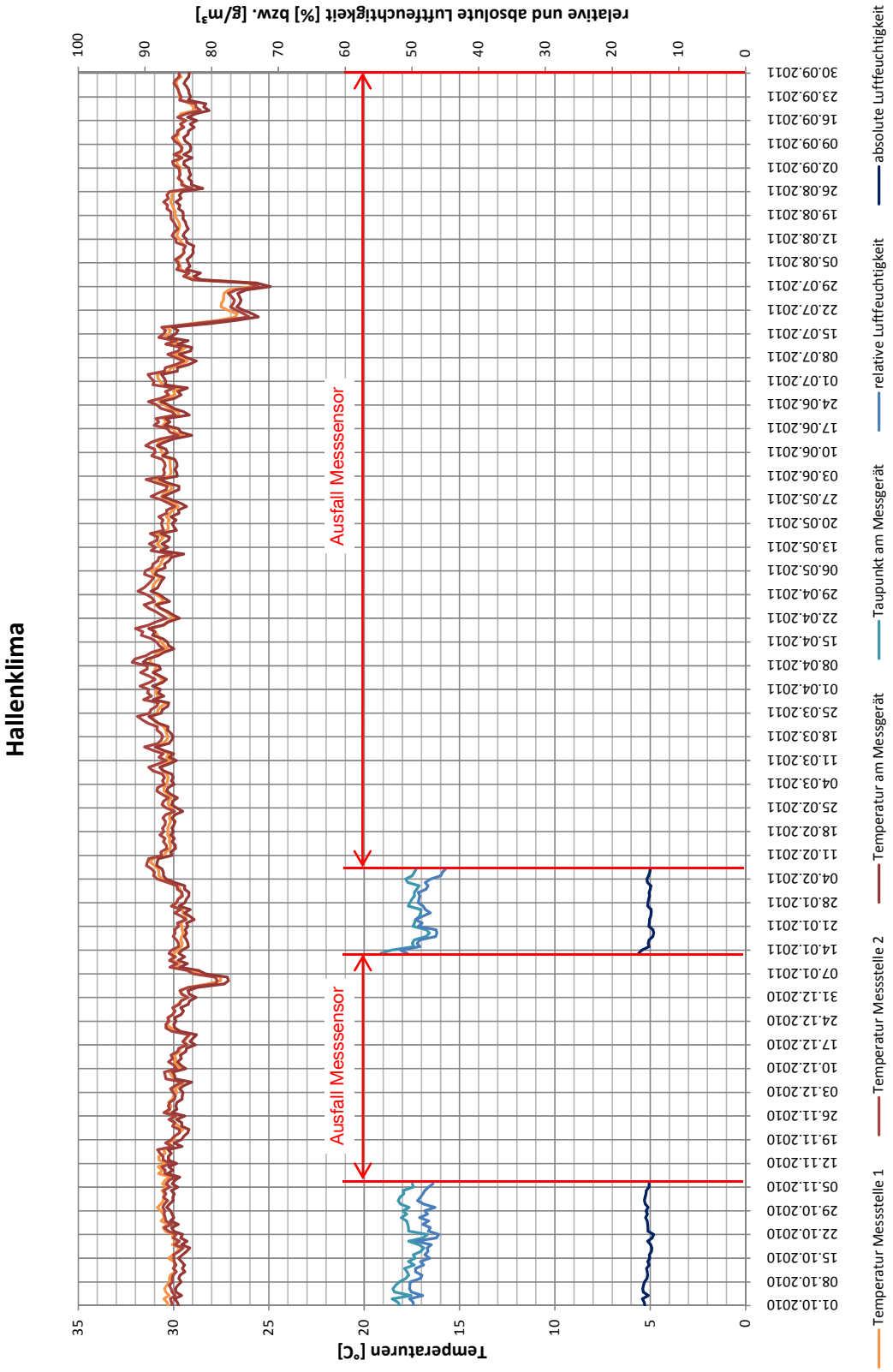


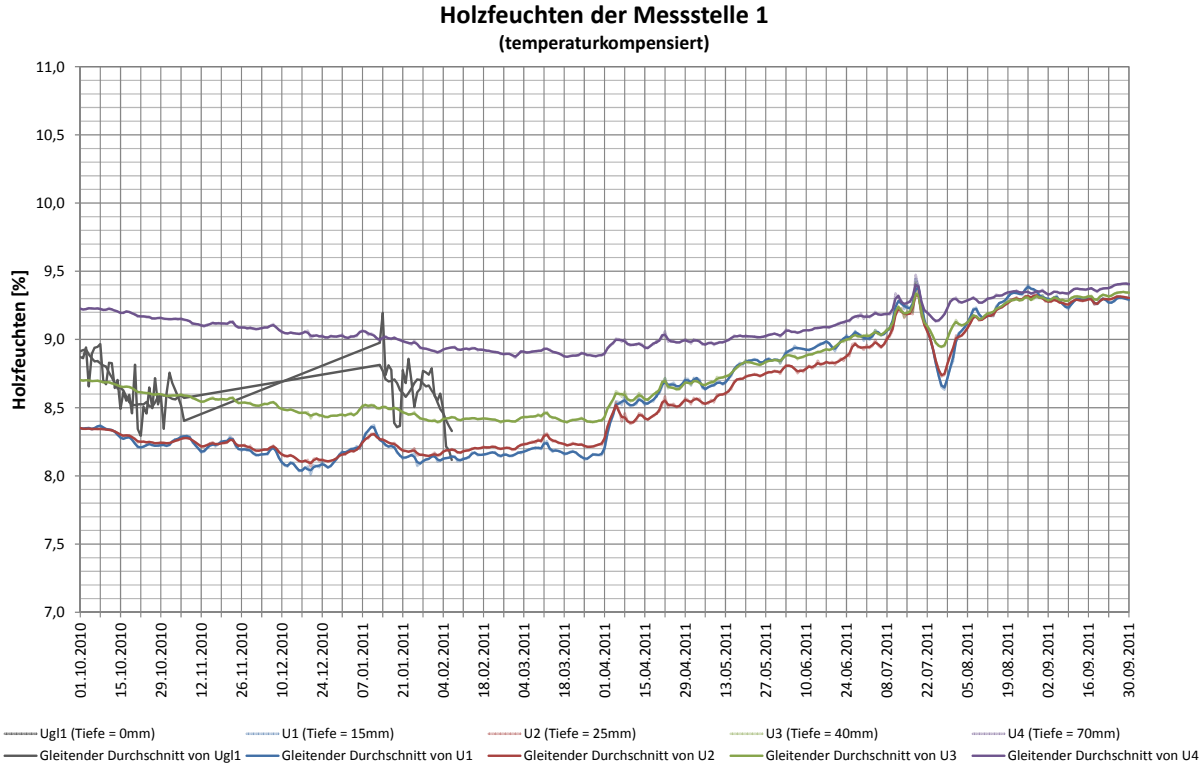
Abbildung A1-4: Ansicht Messstelle 2

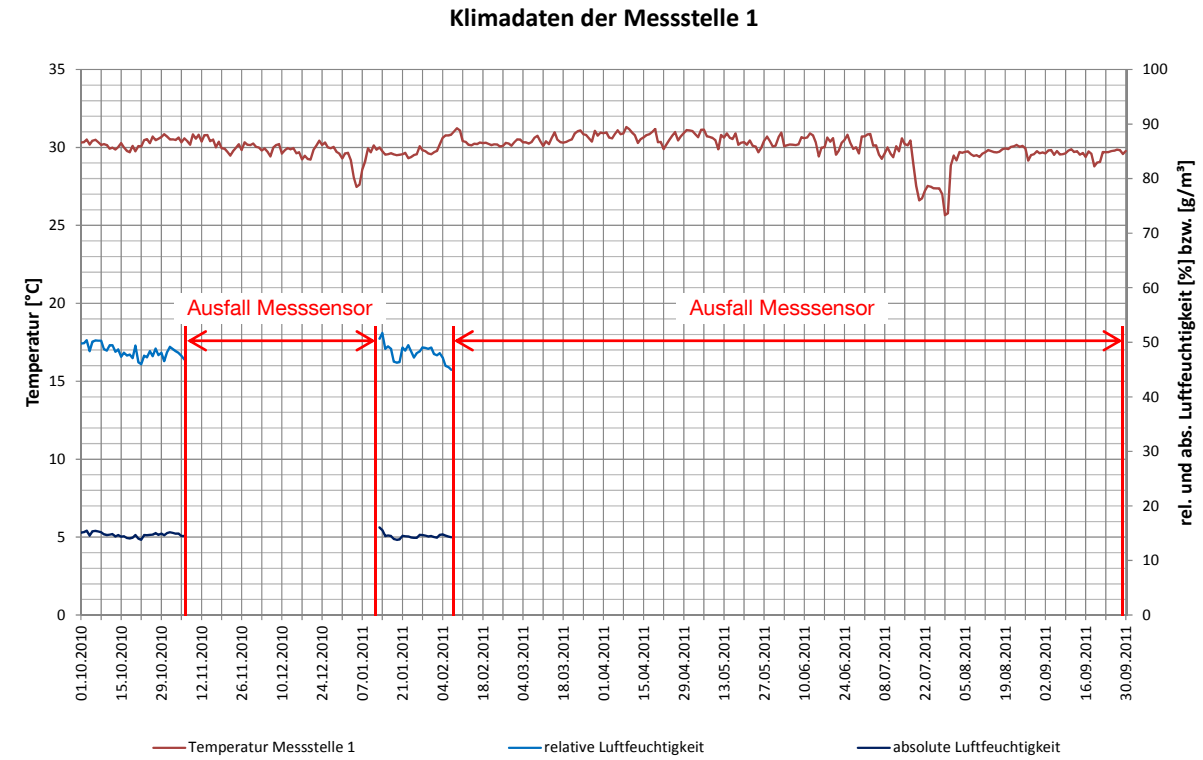
A1 Wellenbad Penzberg - Hallenbereich



A1 Wellenbad Penzberg – Hallenbereich

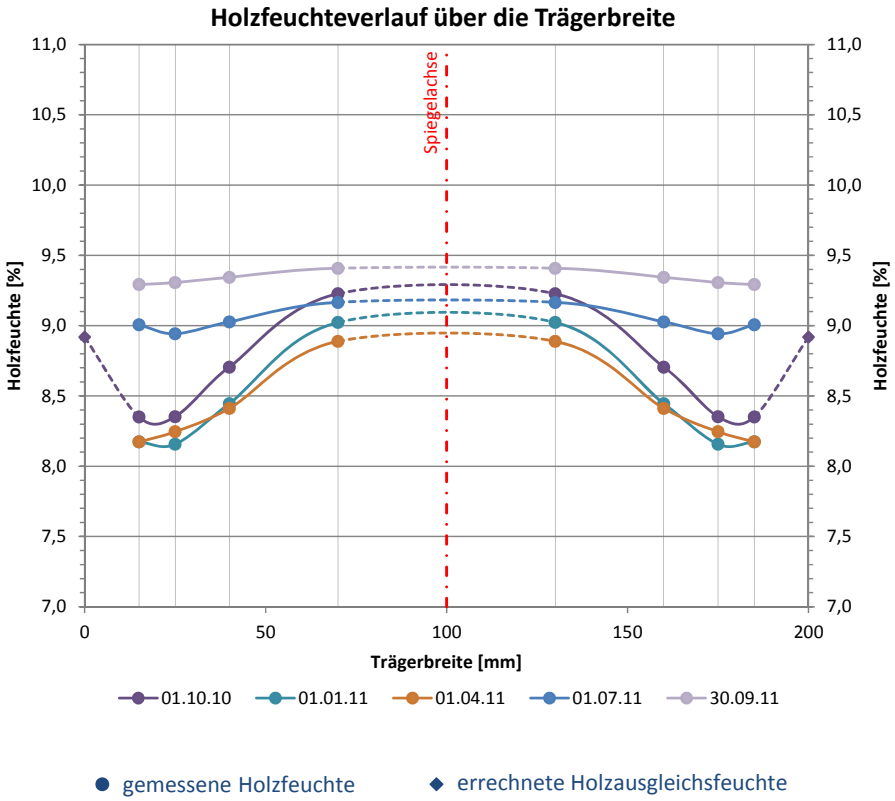
Messstelle 1: Randbereich des Beckens an der Fassade

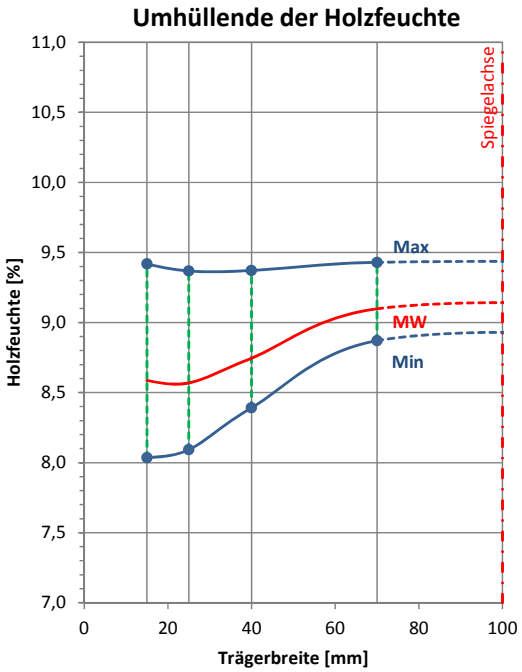


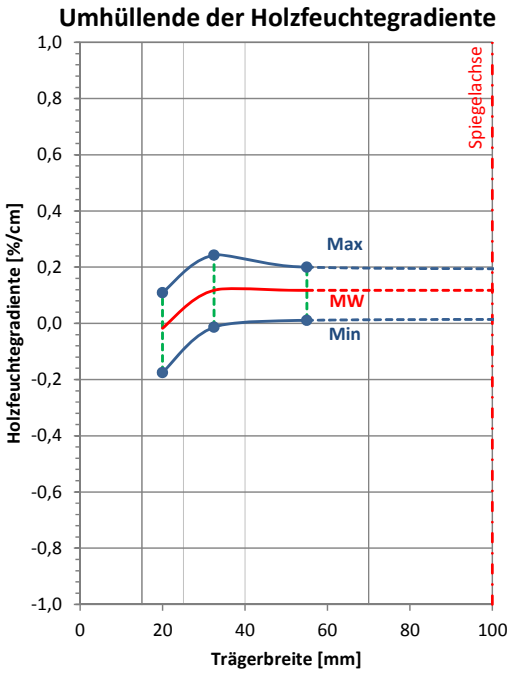


A1 Wellenbad Penzberg – Hallenbereich

Messstelle 1: Randbereich des Beckens an der Fassade

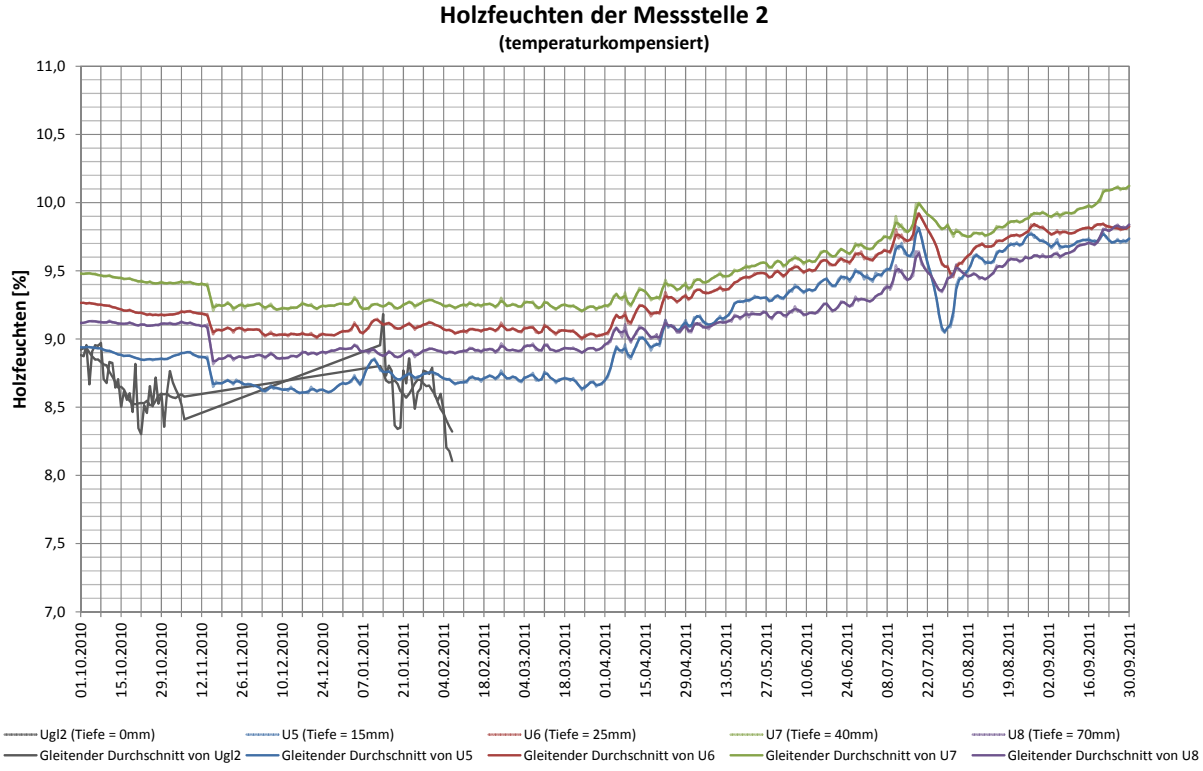


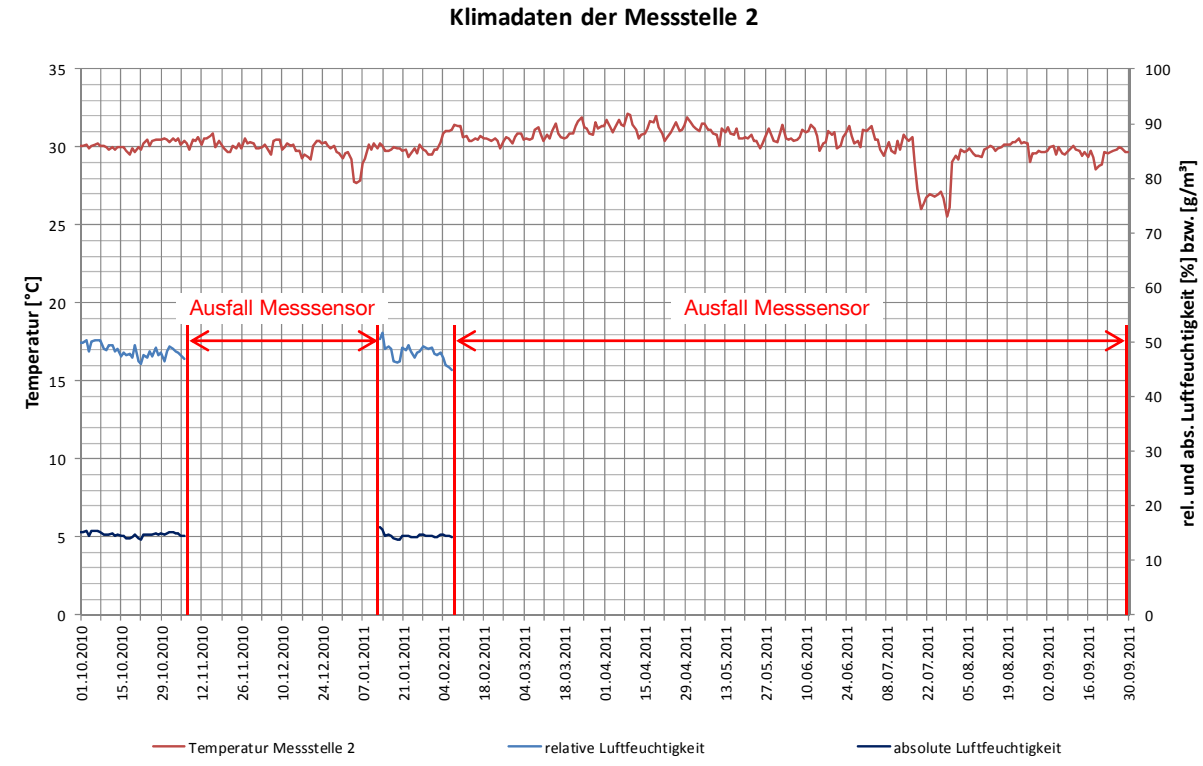




A1 Wellenbad Penzberg – Hallenbereich

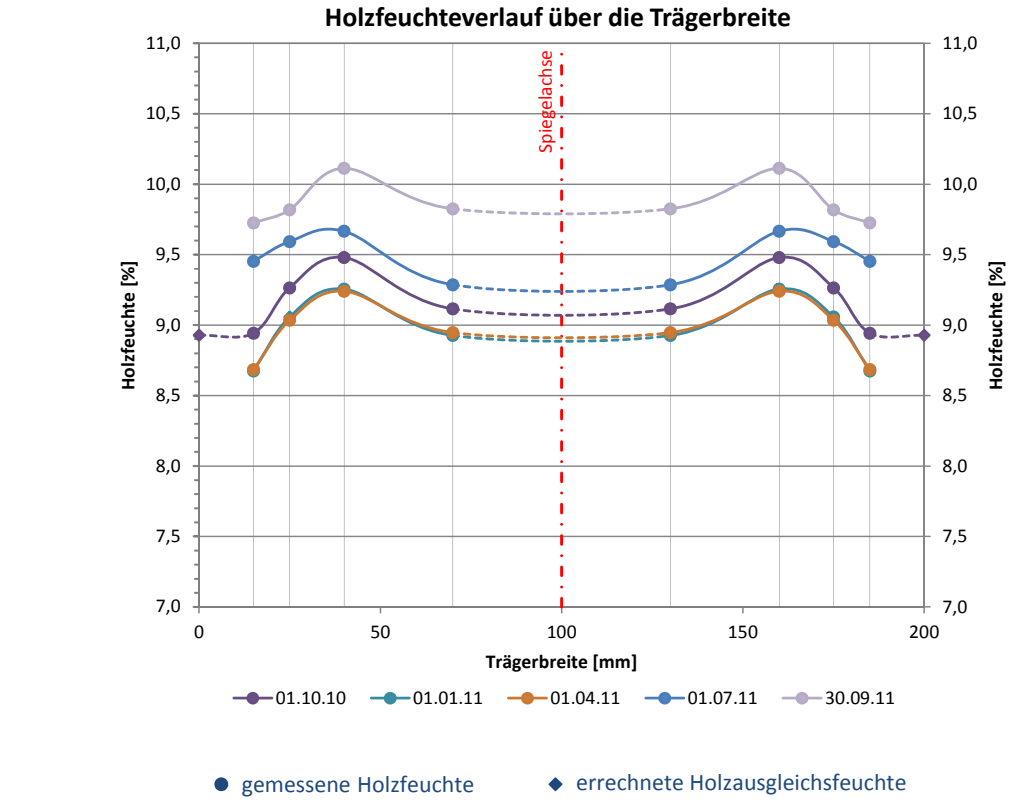
Messstelle 2: Über Nichtschwimmerbecken am Beckenrand

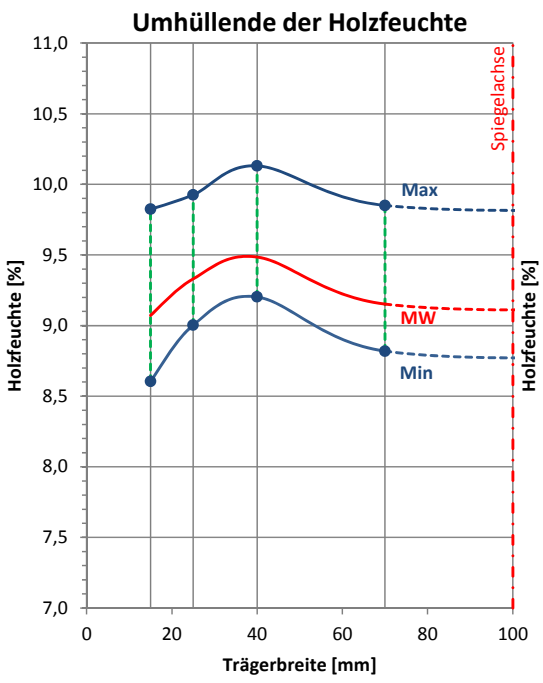


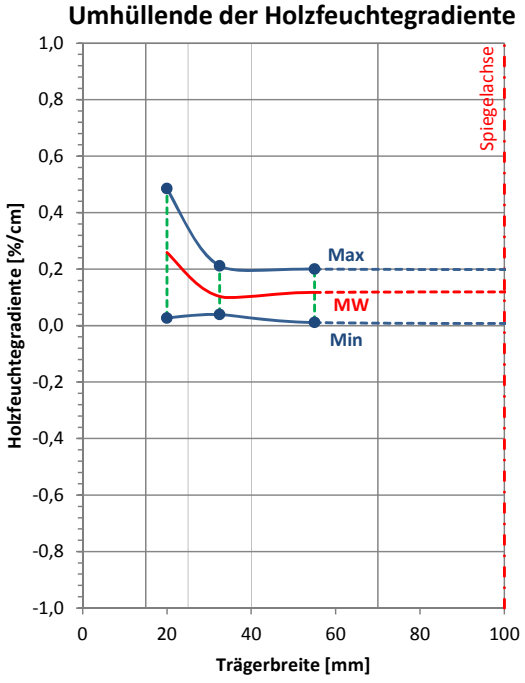


A1 Wellenbad Penzberg – Hallenbereich

Messstelle 2: Über Nichtschwimmerbecken am Beckenrand







Anzeichen einer Parallelverschiebung der Messergebnisse der Sensors in 70 mm Tiefe (vgl. Absatz 5.9 im Hauptteil)!

A2 Wellenbad Penzberg – Durchgang zum Außenbecken

Anschrift: Seeshaupter Straße 24
82377 Penzberg

Ansprechpartner: Hr. Stephan (vor Ort)

Anwesende vor Ort: Philipp Dietsch, Andreas Gamper, stellv. Badleiter

Installationsdatum: 13.09.2010, 21:00 – 23:00
Letztes Auslesedatum: 12.10.2011, 07:00 – 08:00

Umgebungsbedingungen: Einstieg und Übergang zum Außenbecken der Schwimmhalle; einseitig offener, dreiseitig verglaster, beheizter und energetisch gedämmter Raum

Temperatur: 29,6 °C; Luftfeuchte: 85,5 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: Durchgangsbereich zum Außenbecken;
(aufgrund der kalten, von außen einströmenden Luft, liegt in diesem Bereich die für dieses Objekt höchste Luftfeuchte vor)

Messstelle 2: Einstiegsbereich Übergang zu Außenbecken;
(Regelbereich, dient als Referenz zu Messstelle 2)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	15,9	73,8	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 1
u2	25	15,2	76,0	gemessene	
u3	40	15,5	74,9	Temperatur	
u4	70	15,5	75,2	t_1: 28,9°C	
u5	15	14,6	80,3	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 2
u6	25	14,9	78,9	gemessene	
u7	40	14,8	78,5	Temperatur	
u8	70	15,1	77,9	t_2: 29,4°C	

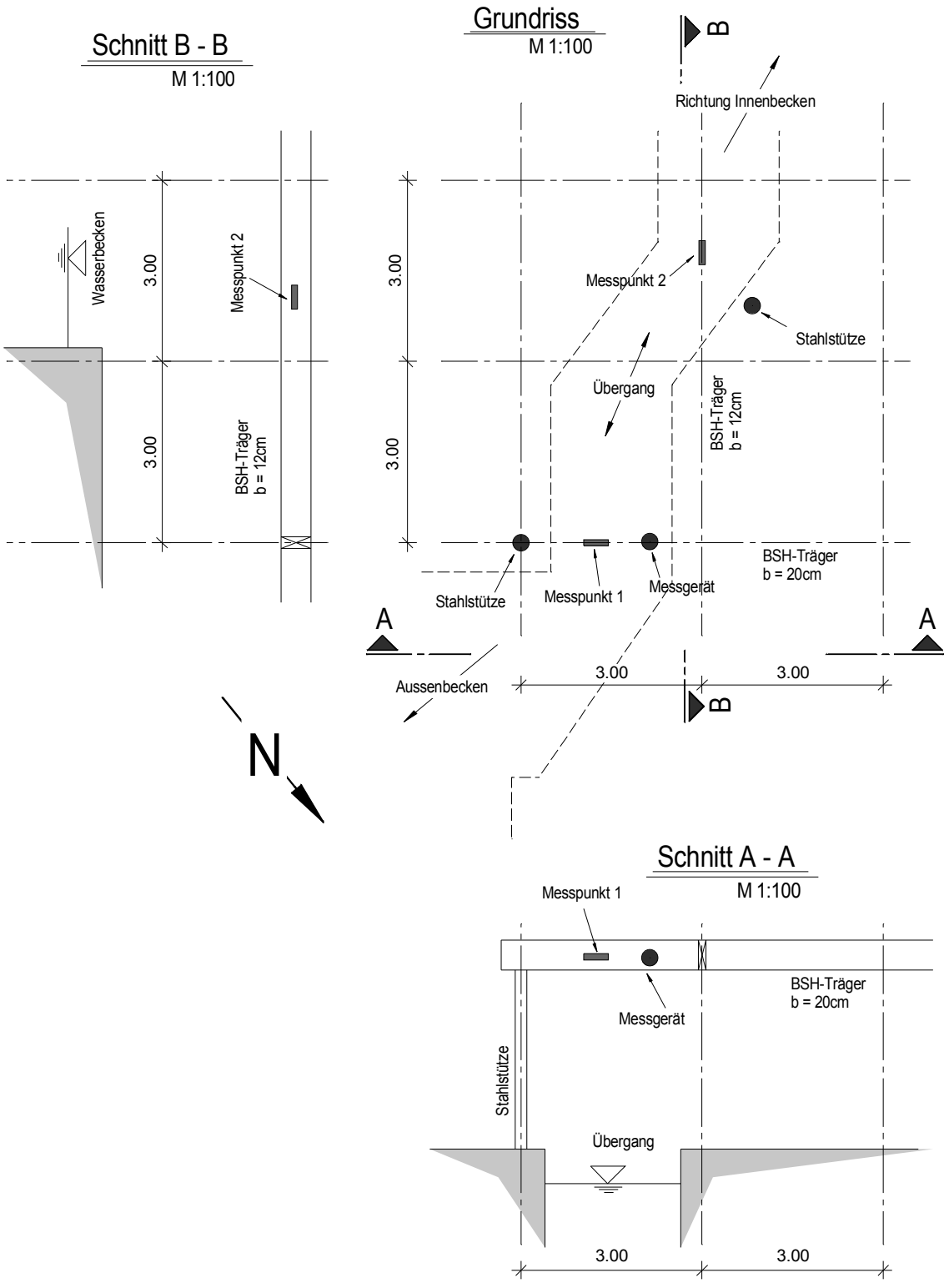
Tragsystem: Messstelle 1: Mehrfeldträger
Trägerabmessungen b/h = 20/40 cm²

Messstelle 2: Mehrfeldträger
Trägerabmessungen b/h = 12/40 cm²

Lamellenstärke 40 mm

Bauteile unbehandelt
(vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Schnitt B - B
M 1:100
Wasserbecken
3.00
3.00
Messpunkt 2
BSH-Träger
b = 12cm
Grundriss
M 1:100
B
Richtung Innenbecken
3.00
3.00
Messpunkt 2
Stahlstütze
Übergang
BSH-Träger
b = 12cm
BSH-Träger
b = 20cm
Stahlstütze
Messpunkt 1
Messgerät
A
A
Aussenbecken
3.00
3.00
B
N
Schnitt A - A
M 1:100
Messpunkt 1
BSH-Träger
b = 20cm
Messgerät
Stahlstütze
Übergang
3.00
3.00

Bilder:



Abbildung A2-1: Ansicht Tragwerk

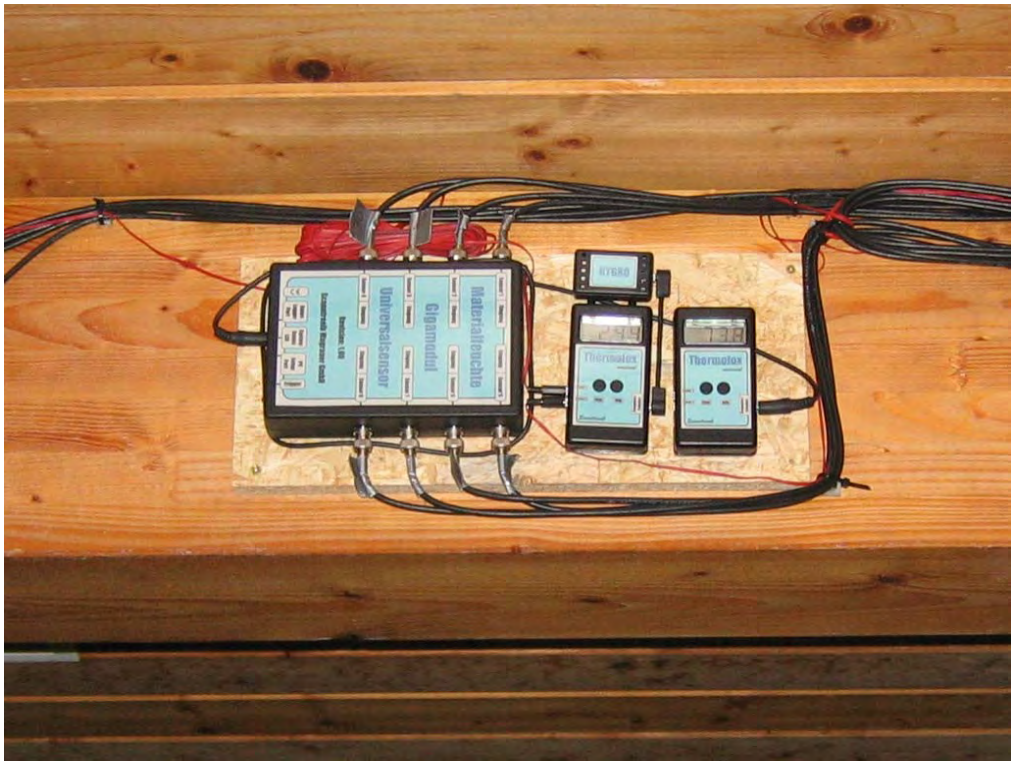


Abbildung A2-2: Ansicht Messstation

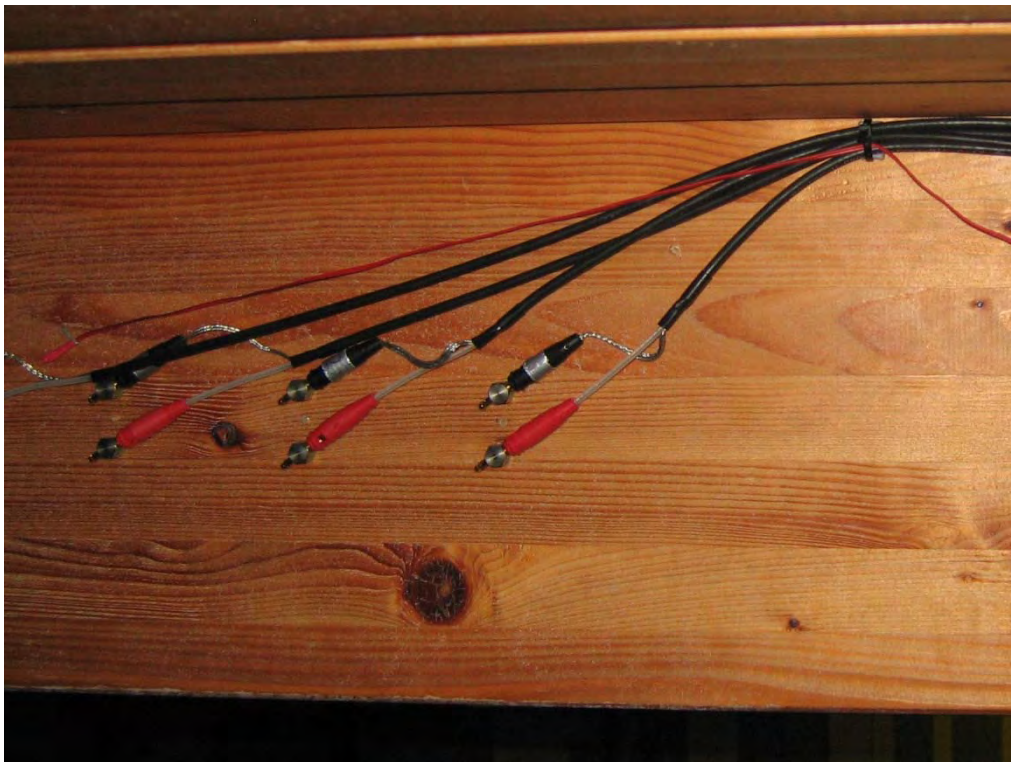


Abbildung A2-3: Ansicht Messstelle 1

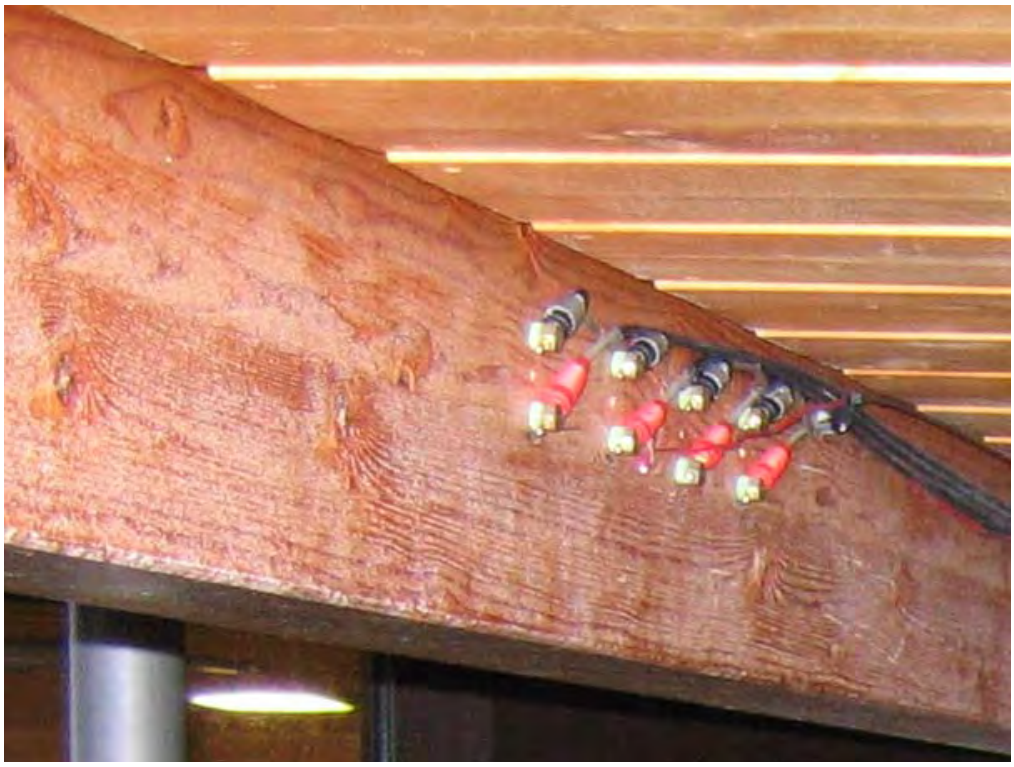
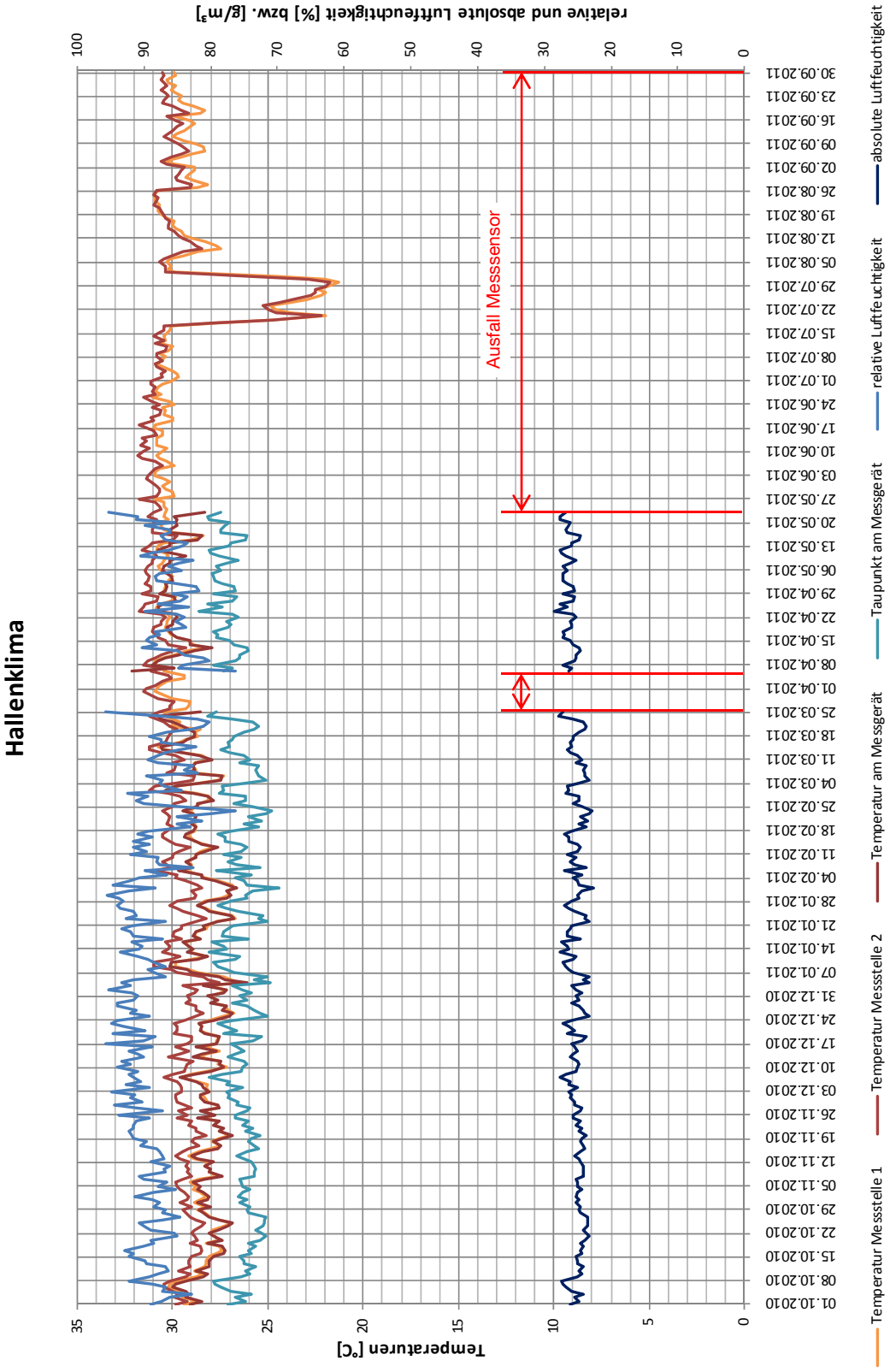


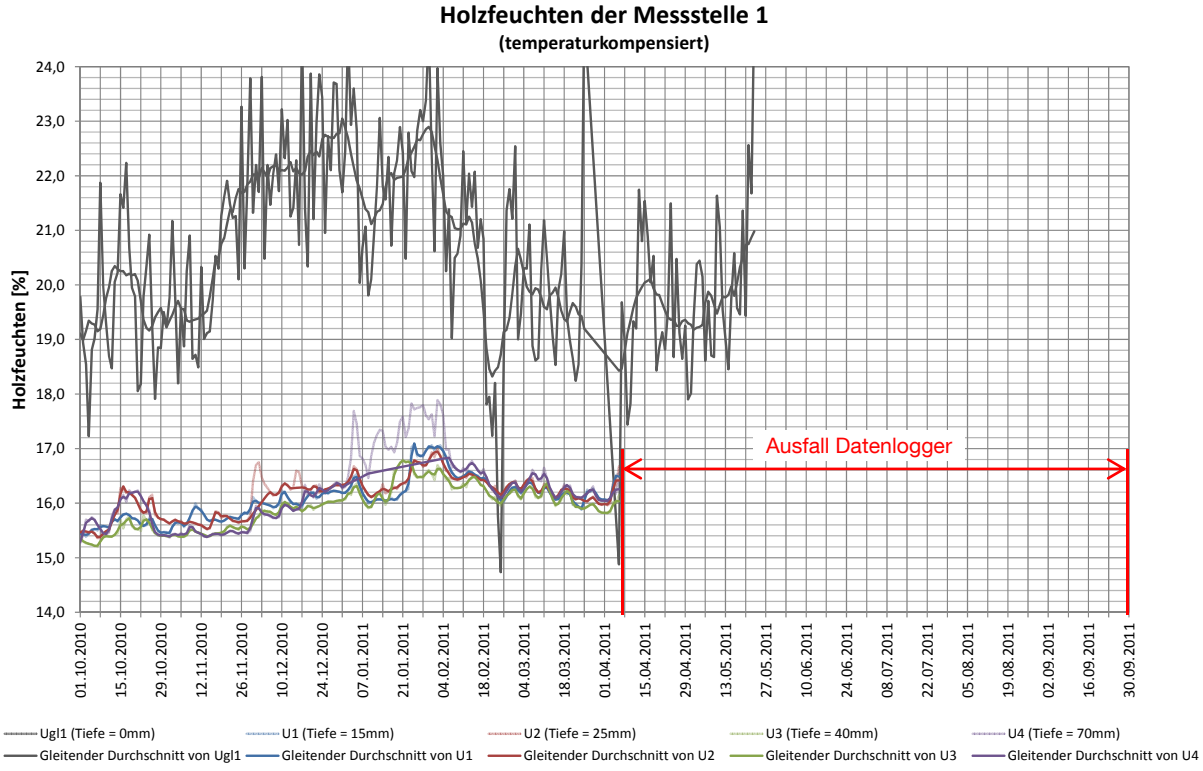
Abbildung A2-4: Ansicht Messstelle 2

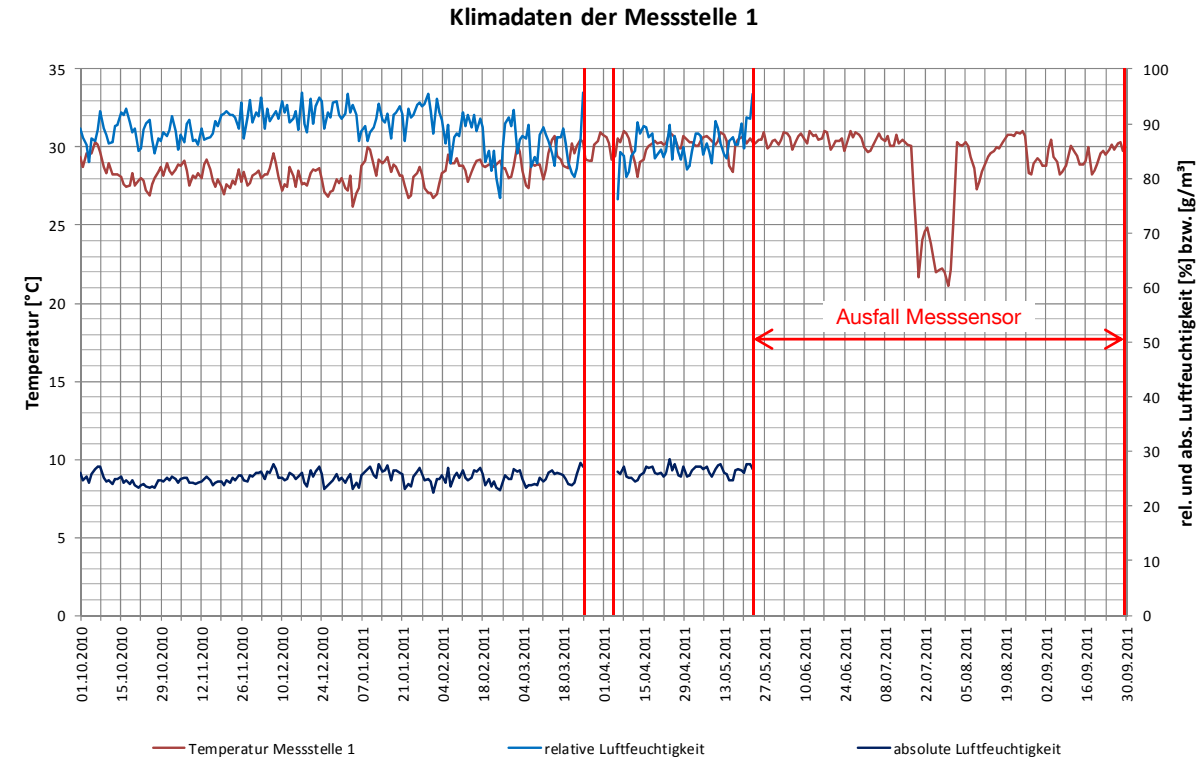
A2 Wellenbad Penzberg - Durchgang



A2 Wellenbad Penzberg - Durchgang

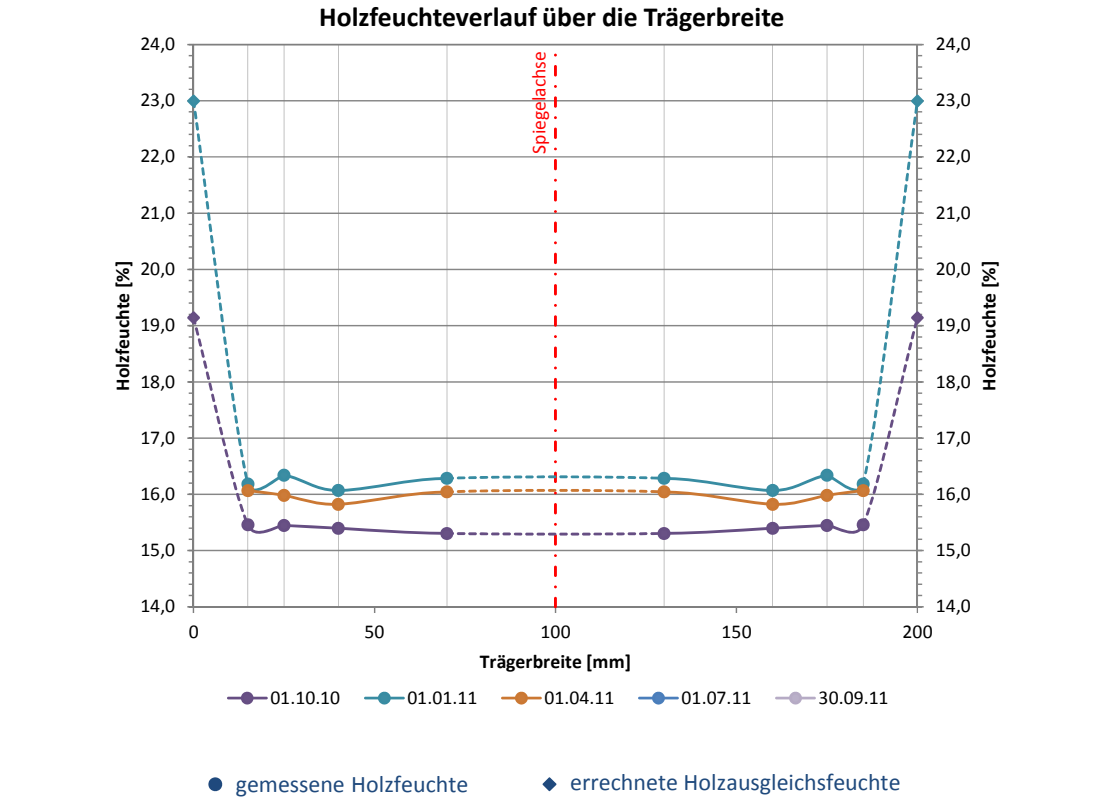
Messstelle 1: Durchgangsbereich ins Außenbecken

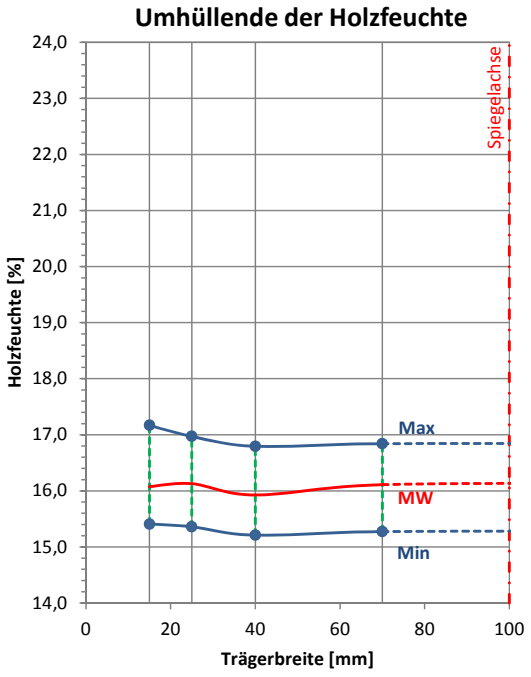


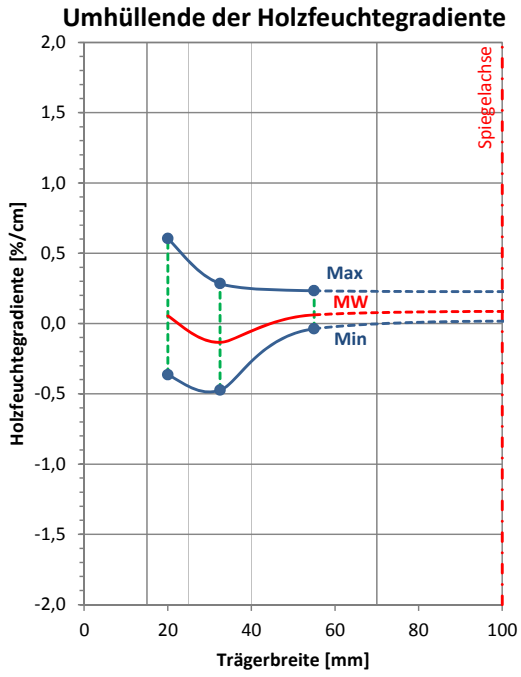


A2 Wellenbad Penzberg - Durchgang

Messstelle 1: Durchgangsbereich ins Außenbecken

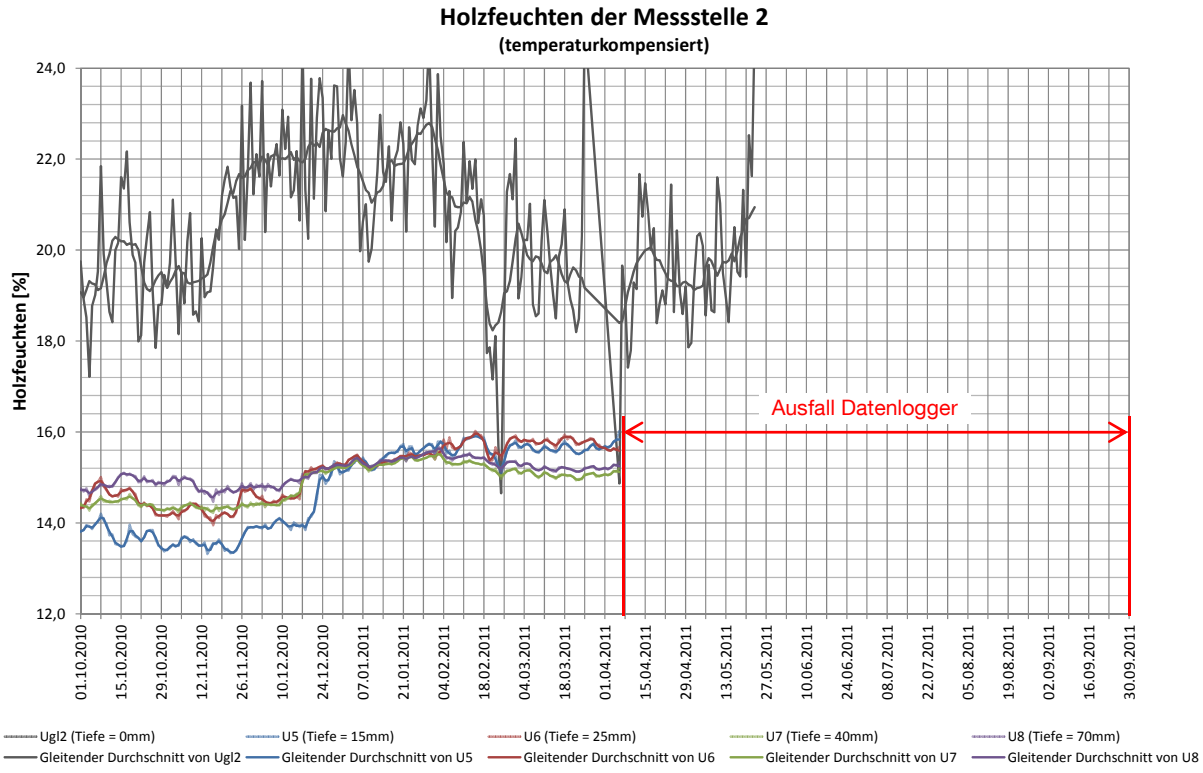


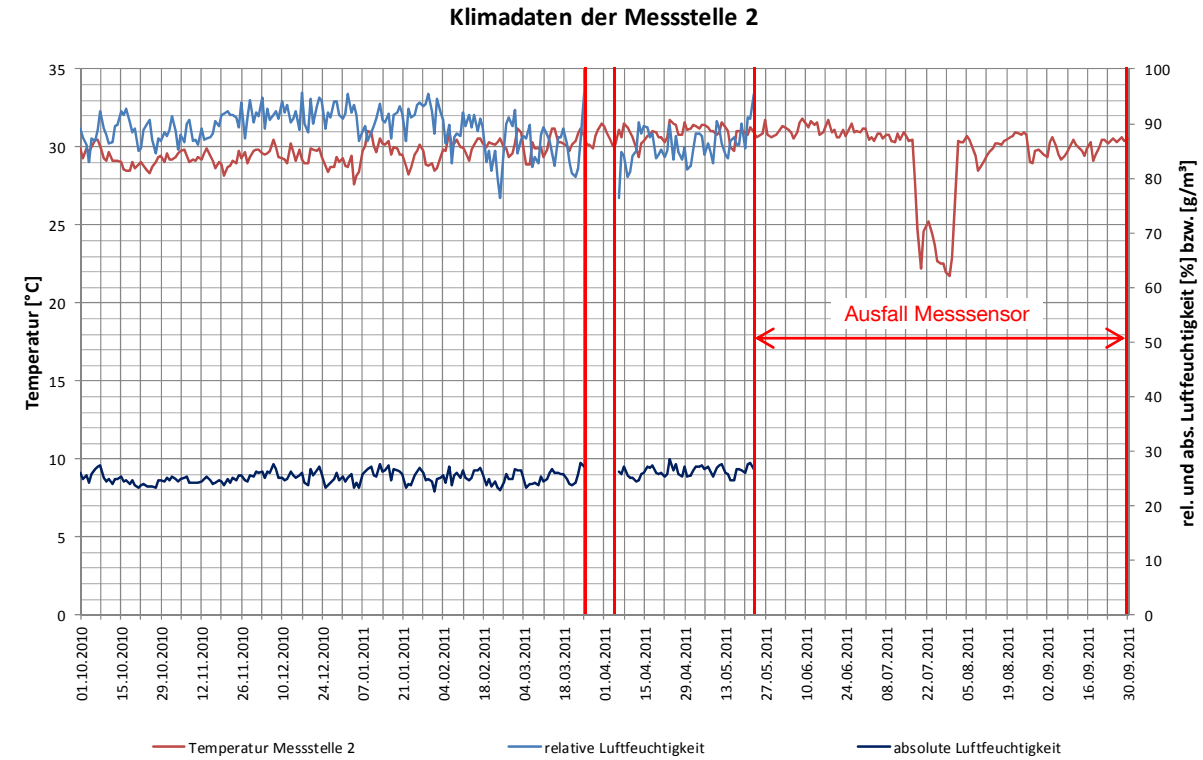




A2 Wellenbad Penzberg - Durchgang

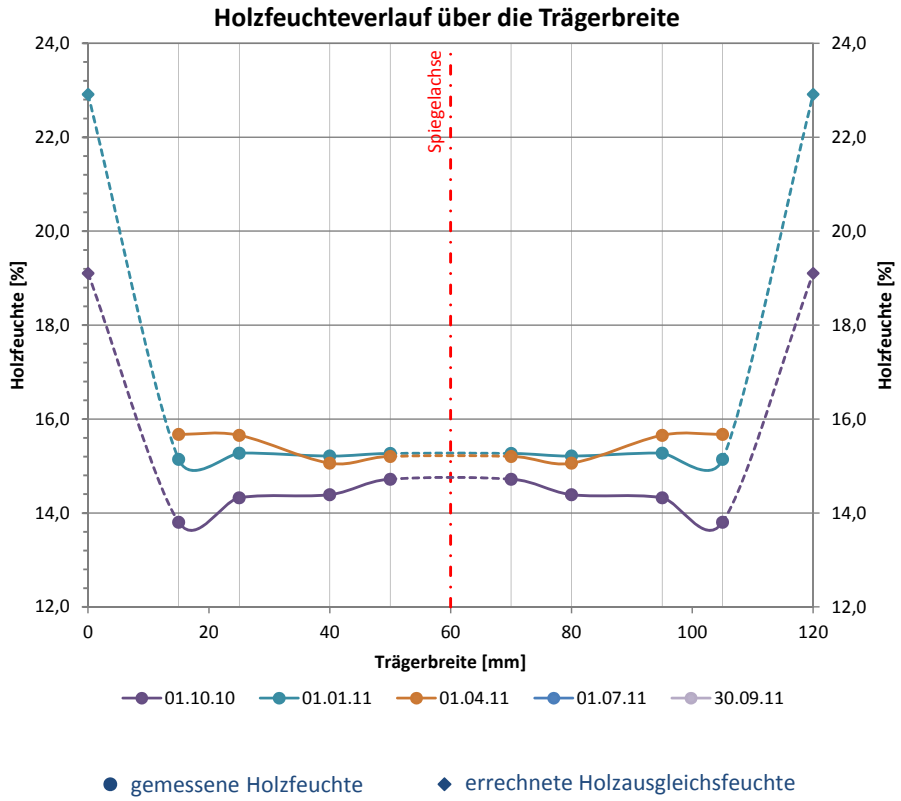
Messstelle 2: Einstiegsbereich im Übergang zu Außenbecken

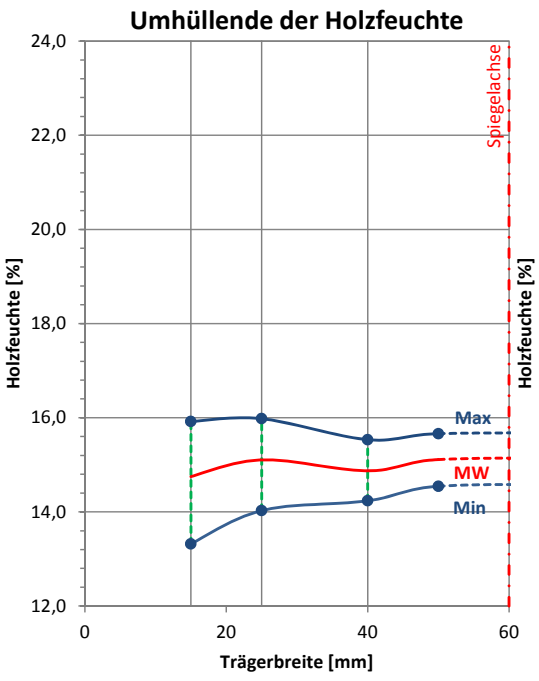


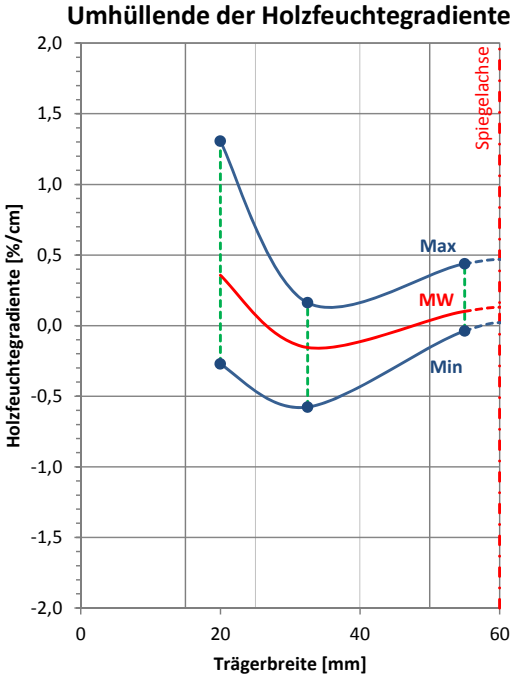


A2 Wellenbad Penzberg - Durchgang

Messstelle 2: Einstiegsbereich im Übergang zu Außenbecken







A3 Schwimmhalle Prienavera Prien

Anschrift: Seestraße 120
83209 Prien

Ansprechpartner: Hr. Freier (vor Ort)

Anwesende vor Ort: Andreas Gamper, Manuel Waidelich, Herr Freier

Installationsdatum: 29.09.2010, 13:00 – 17:00
Letztes Auslesedatum: 13.10.2011, 07:00 – 08:00

Umgebungsbedingungen: Schwimmhalle, allseitig geschlossener, beheizter Raum, Dämmwirkung durch Luftkissen zwischen Dachträgern, zur Zeit der Installation kein Wasser im Becken

Temperatur: 28,5 °C; Luftfeuchte: 34,1 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: Beckenbereich, ca. 12 m über der Wasseroberfläche (entsprechend der Kabellänge und den Montagemitteln möglichst weit über dem Schwimmbecken um den Einfluss der aufsteigenden Feuchte des Wassers zu erfassen)

Messstelle 2: Tribünenbereich (außerhalb des Einflussbereiches des Beckens, Referenz zu Messstelle 1)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	6,6	106,1	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 1
u2	25	7,7	101,9	gemessene	
u3	40	8,3	100	Temperatur	
u4	70	9,2	97,1	t_1: 28,8°C	
u5	15	6,9	105,2	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 2
u6	25	7,5	101,4	gemessene	
u7	40	7,6	102,7	Temperatur	
u8	70	7,6	101,6	t_2: 28,2°C	

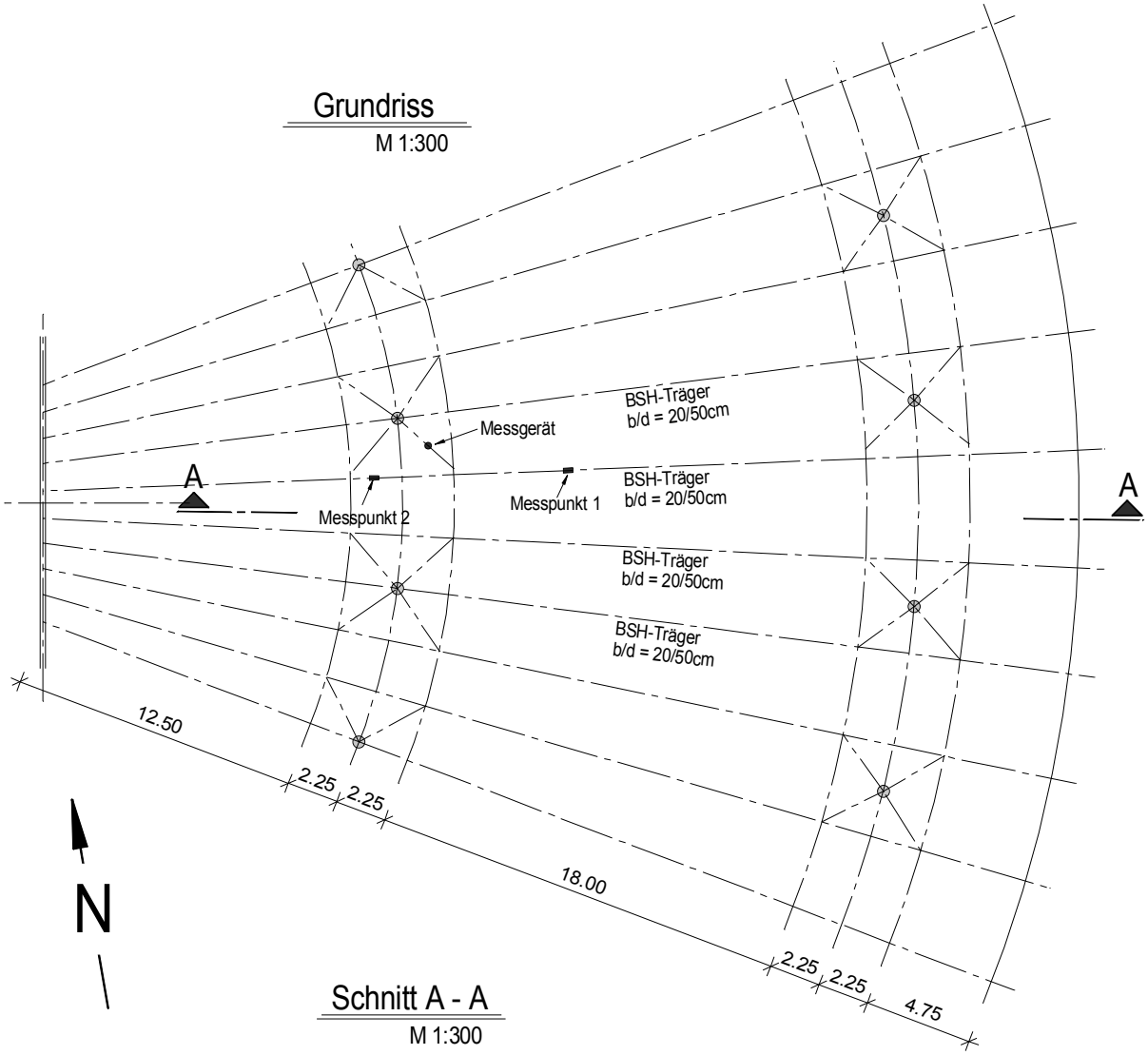
Tragsystem: Gelenkträger auf zwei Baumstützen, max. Spannweite ℓ = 18,0m

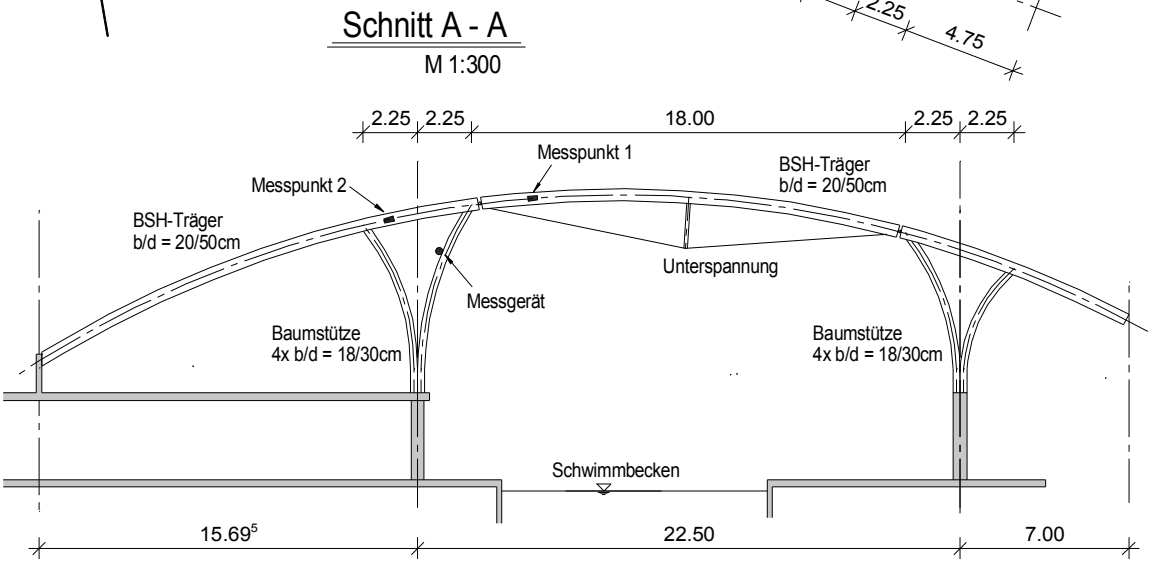
Trägerabmessungen b/h = 20/50 cm^2

Lamellenstärke 34 mm

Bauteile unbehandelt
(vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:300
BSH-Träger
b/d = 20/50cm
Messgerät
Messpunkt 1
Messpunkt 2
A
A
12.50
2.25
2.25
18.00
2.25
2.25
4.75
N


Schnitt A - A
M 1:300
2.25
2.25
18.00
2.25
2.25
Messpunkt 1
Messpunkt 2
BSH-Träger
b/d = 20/50cm
BSH-Träger
b/d = 20/50cm
Unterspannung
Messgerät
Baumstütze
4x b/d = 18/30cm
Baumstütze
4x b/d = 18/30cm
Schwimmbecken
15.69
22.50
7.00

Bilder:

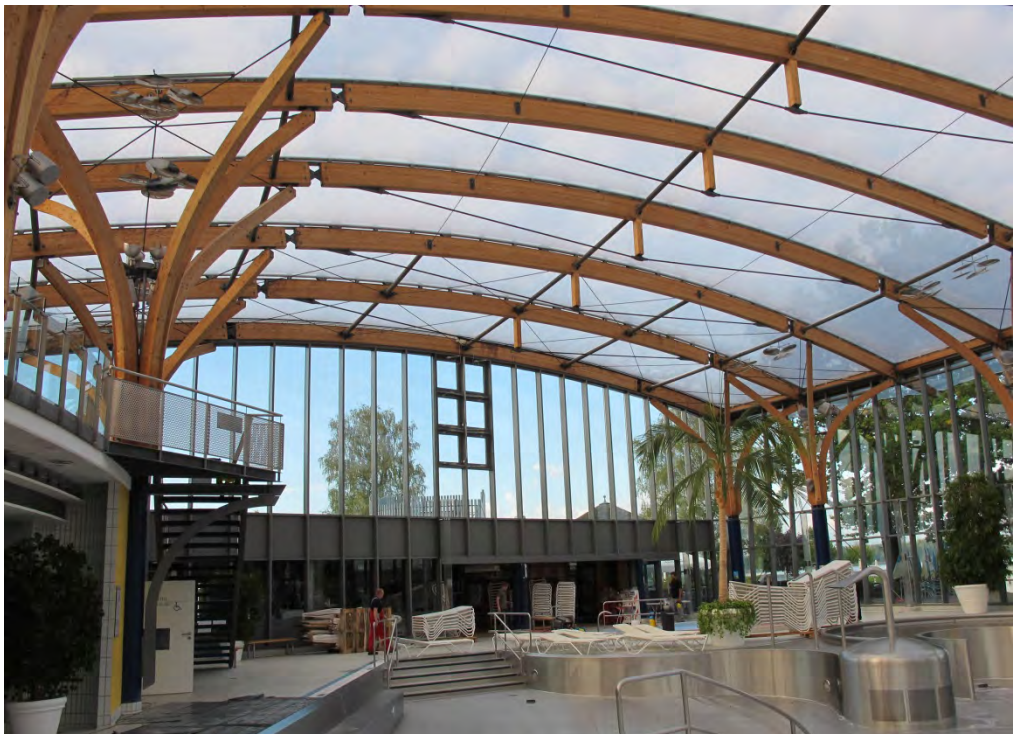


Abbildung A3-1: Ansicht Tragwerk



Abbildung A3-2: Ansicht Messstation

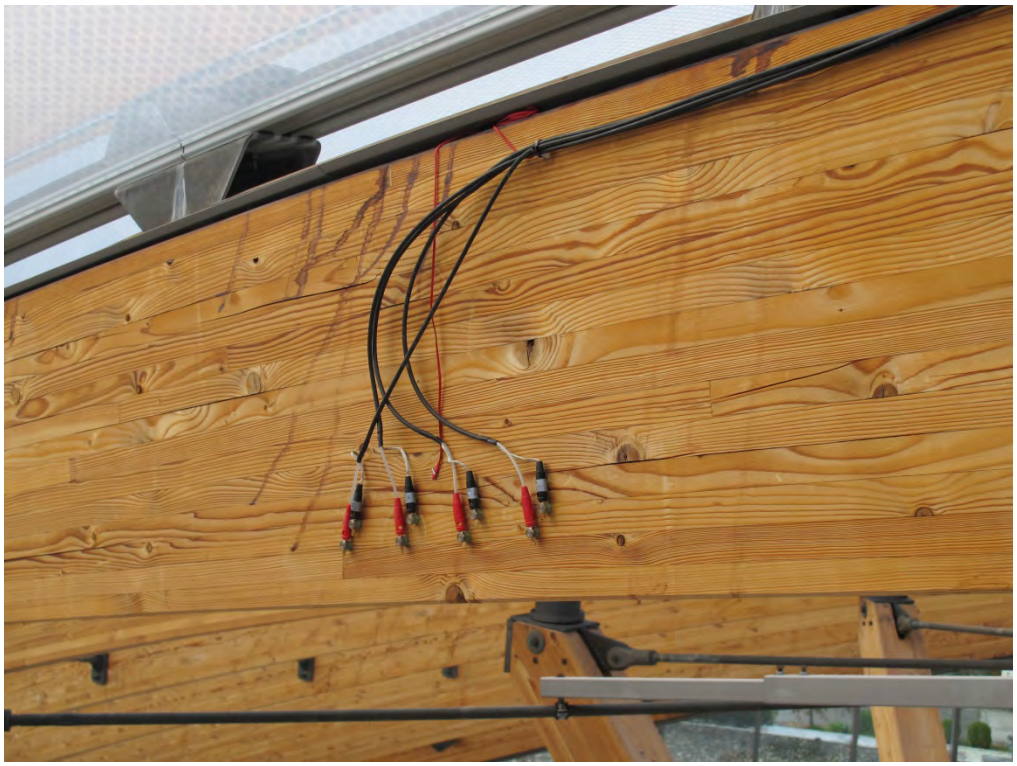


Abbildung A3-3: Ansicht Messstelle 1

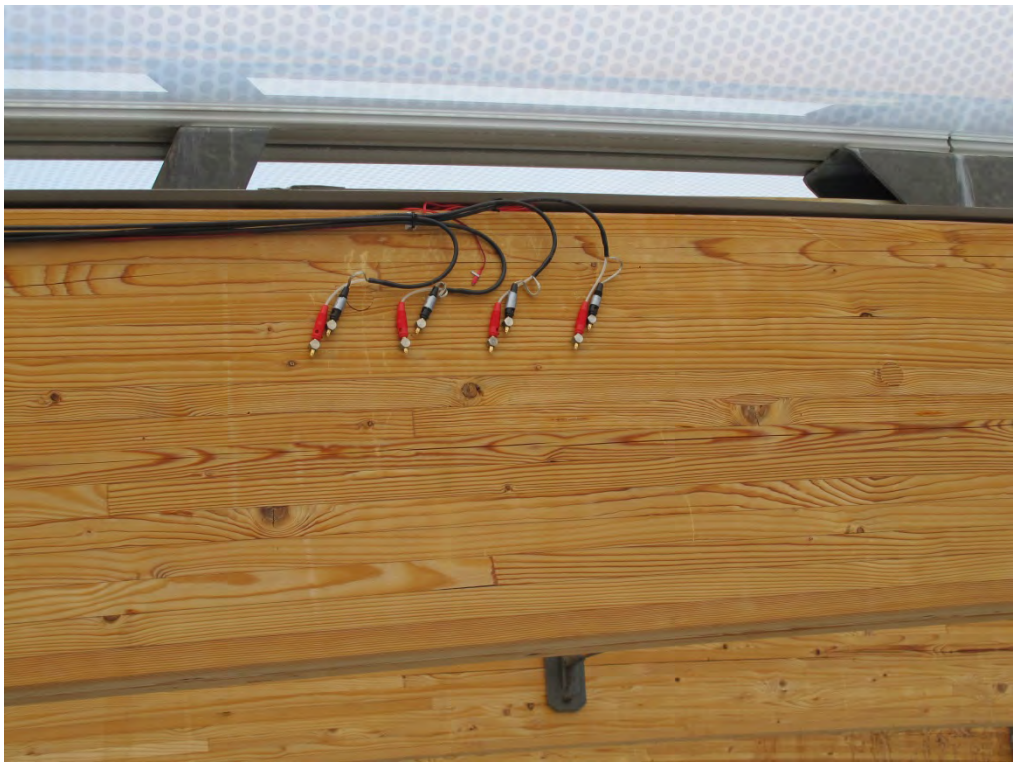
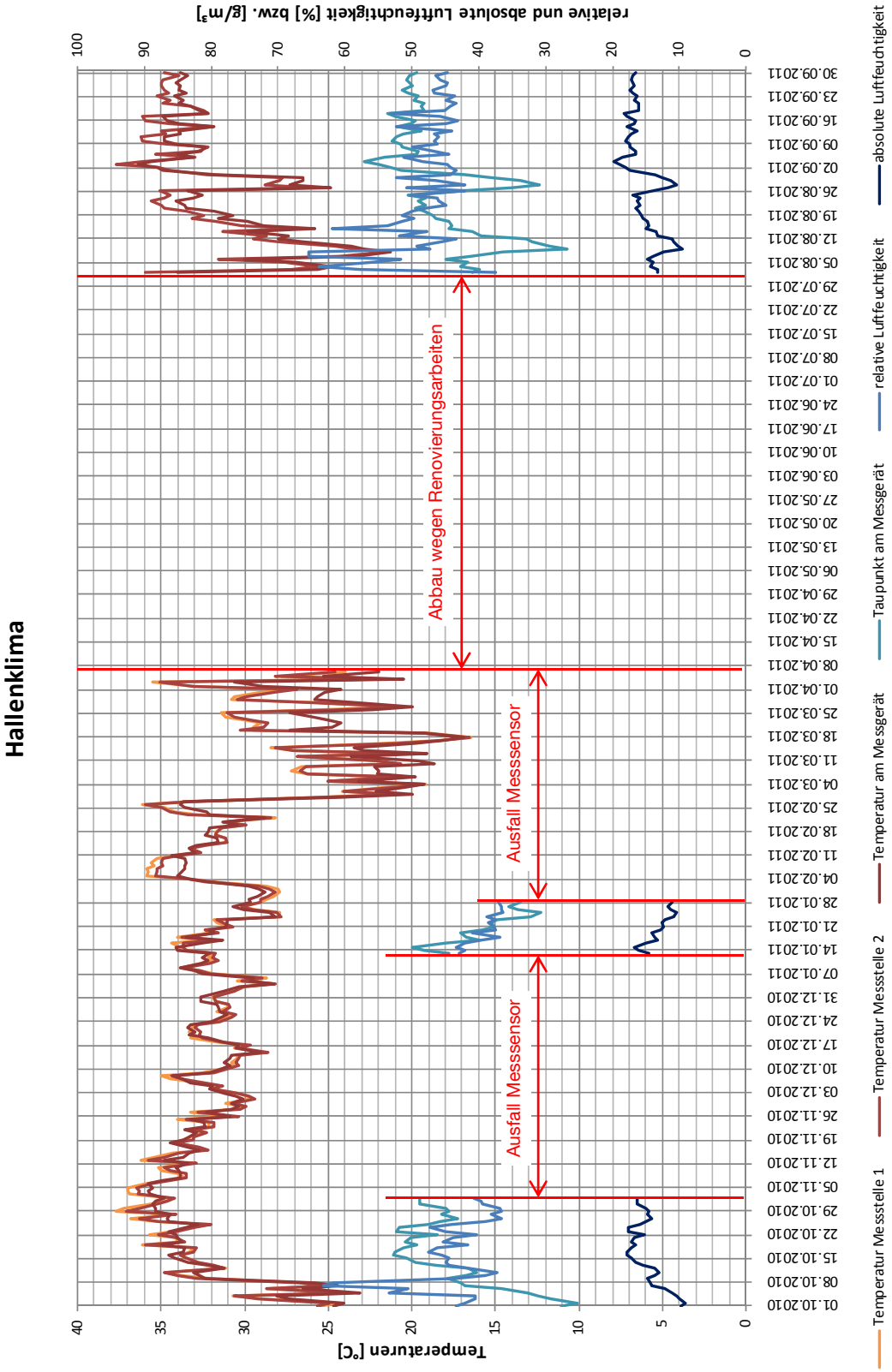


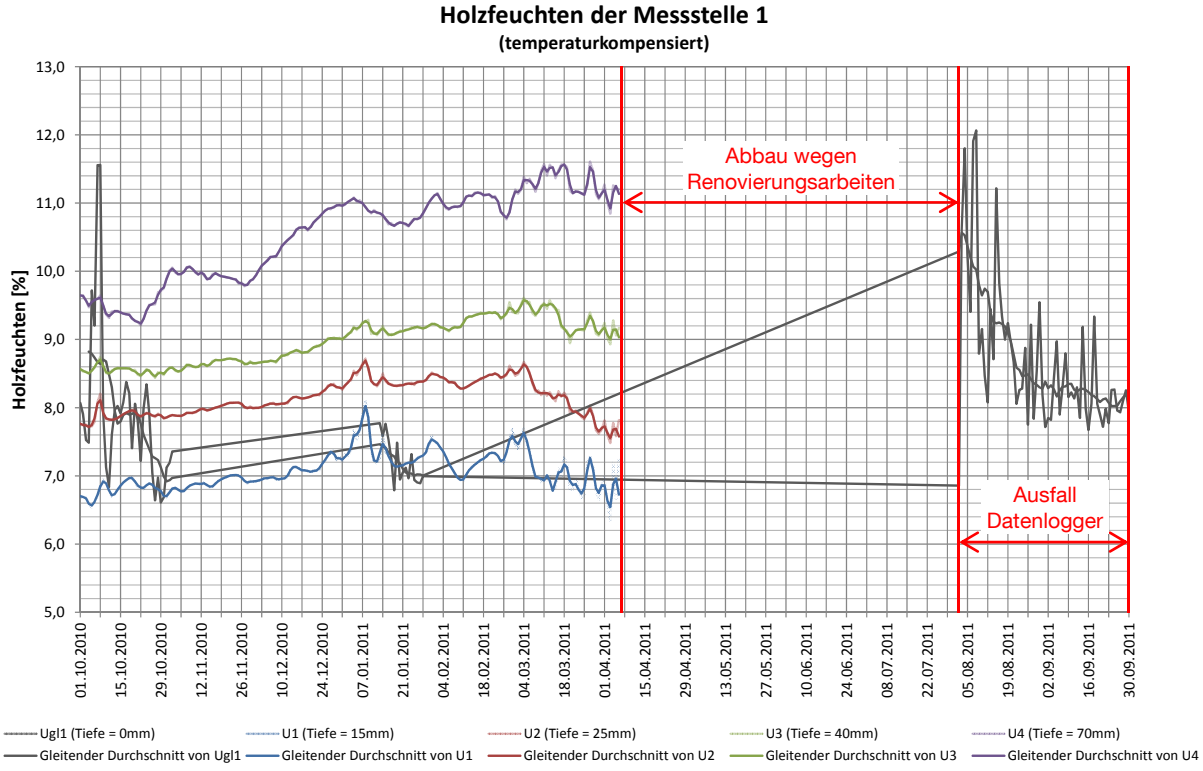
Abbildung A3-4: Ansicht Messstelle 2

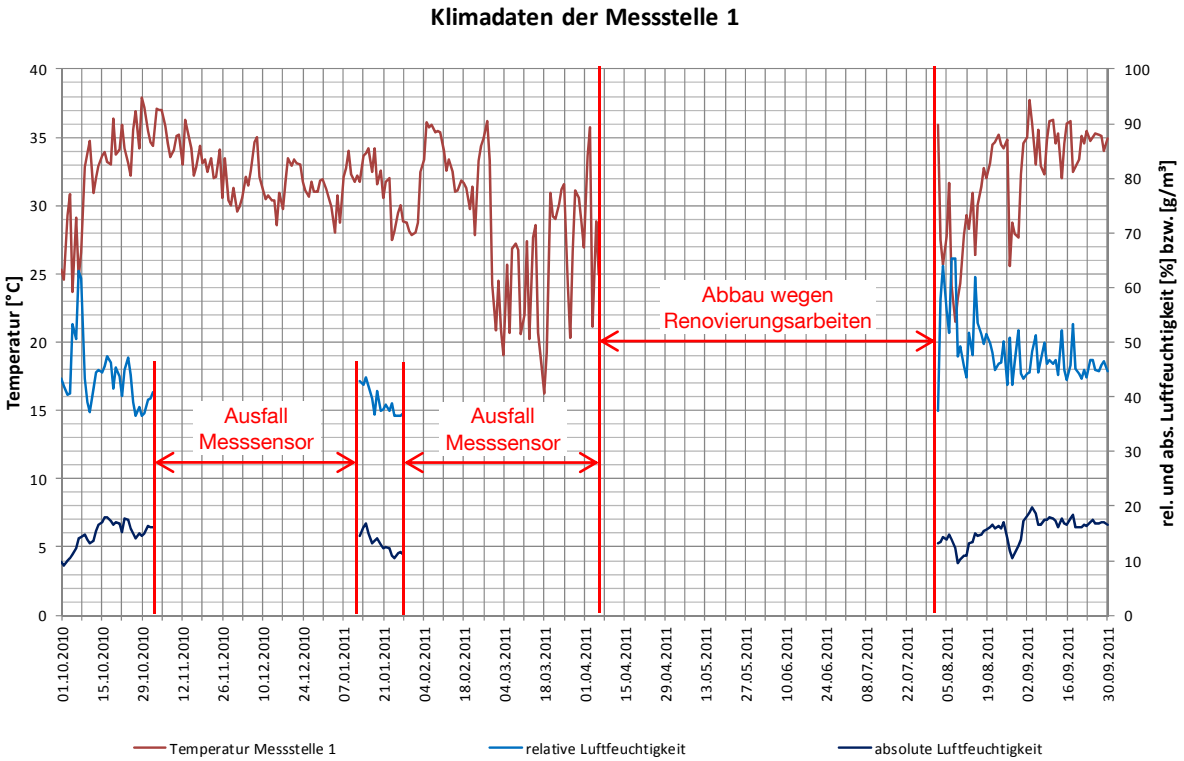
A3 Schwimmhalle Prienavera Prien



A3 Schwimmhalle Prienavera Prien

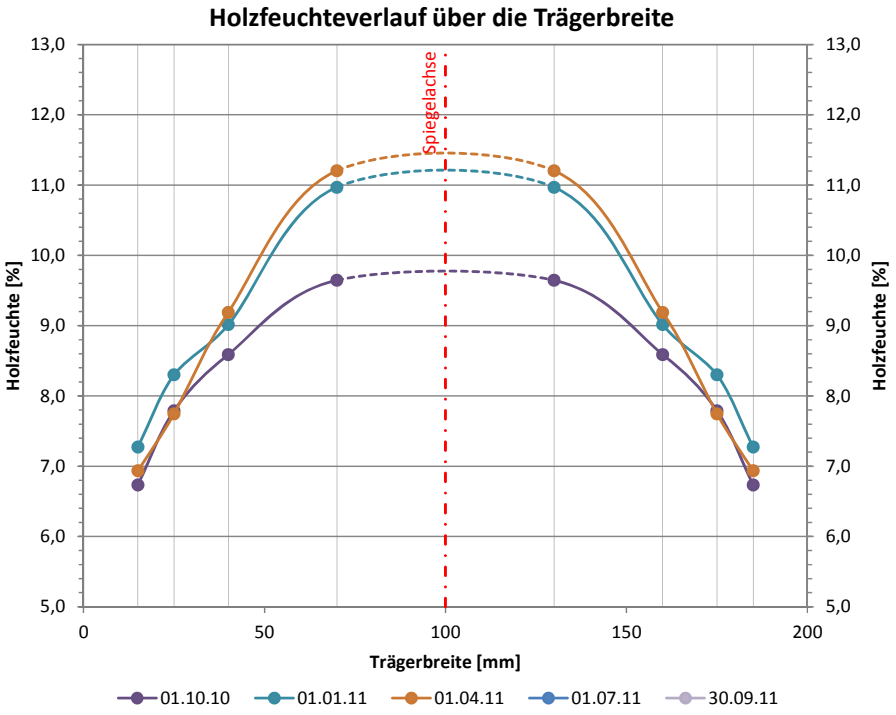
Messstelle 1: Beckenbereich

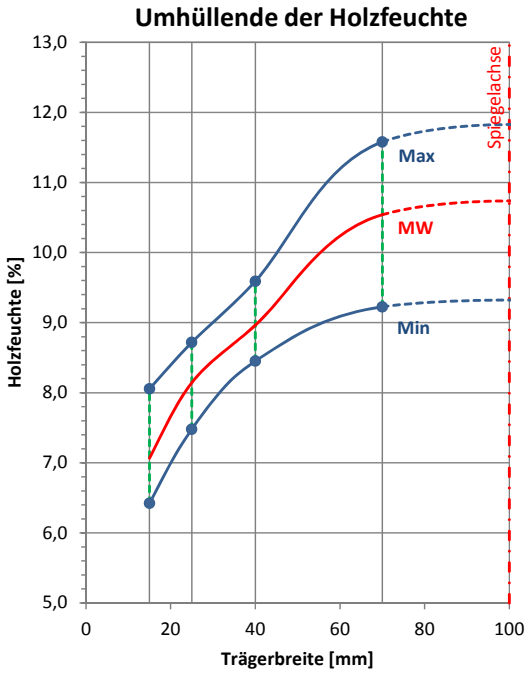


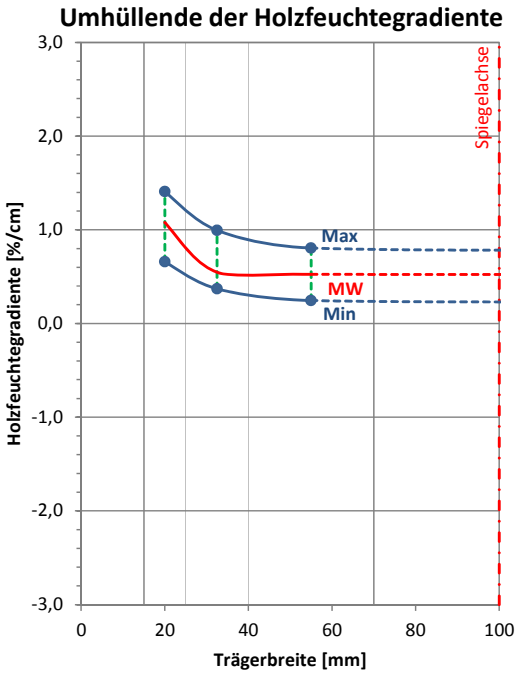


A3 Schwimmhalle Prienavera Prien

Messstelle 1: Beckenbereich



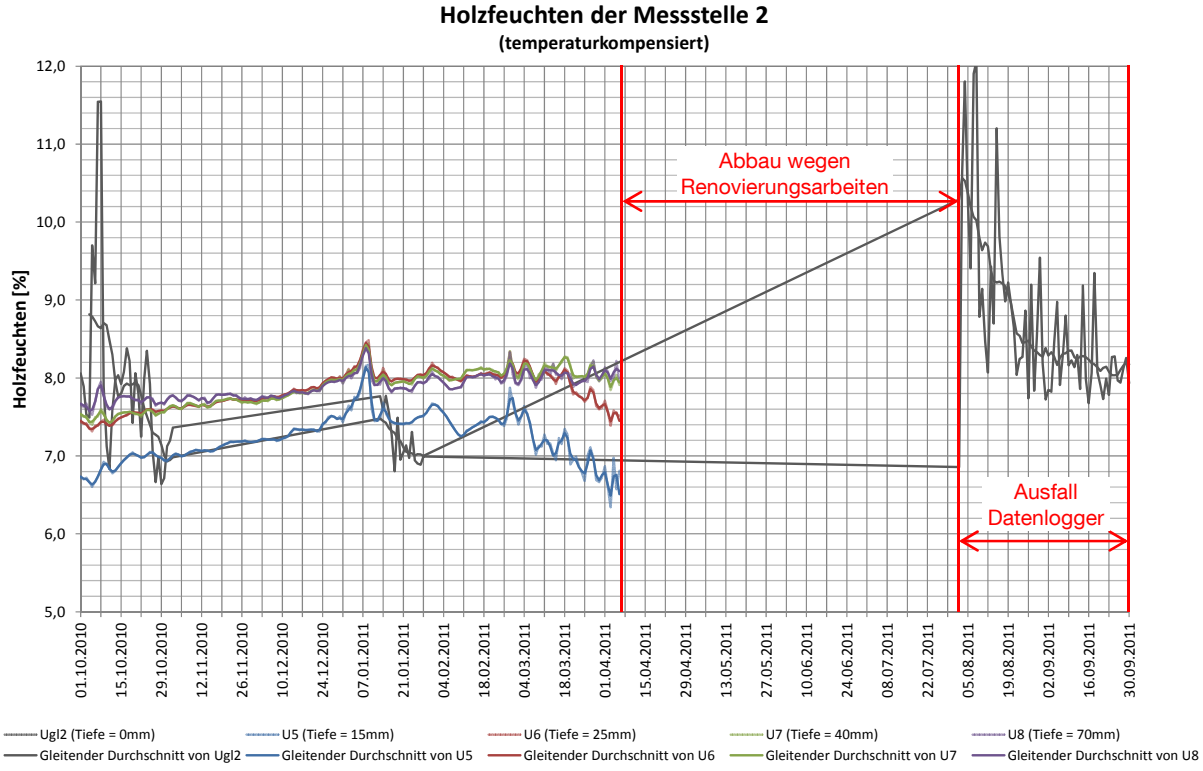


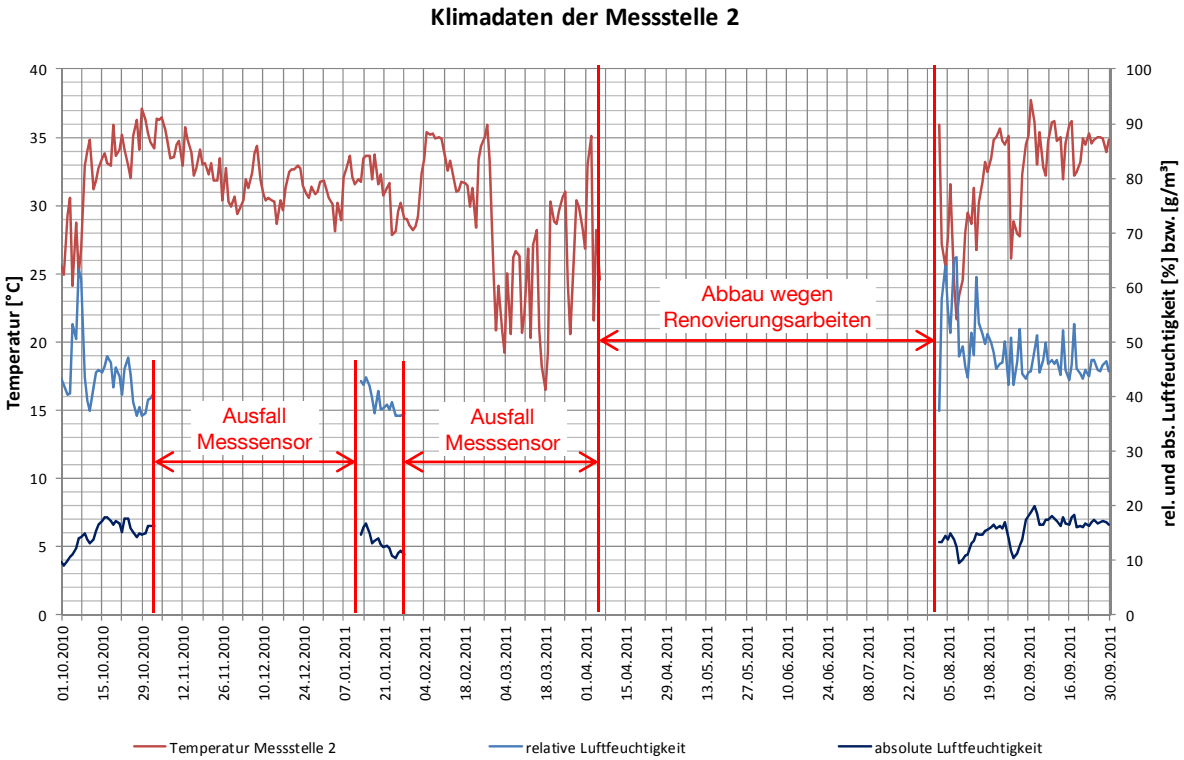


Anzeichen einer Parallelverschiebung der Messergebnisse der Sensoren (vgl. Absatz 5.9 im Hauptteil)!

A3 Schwimmhalle Prienavera Prien

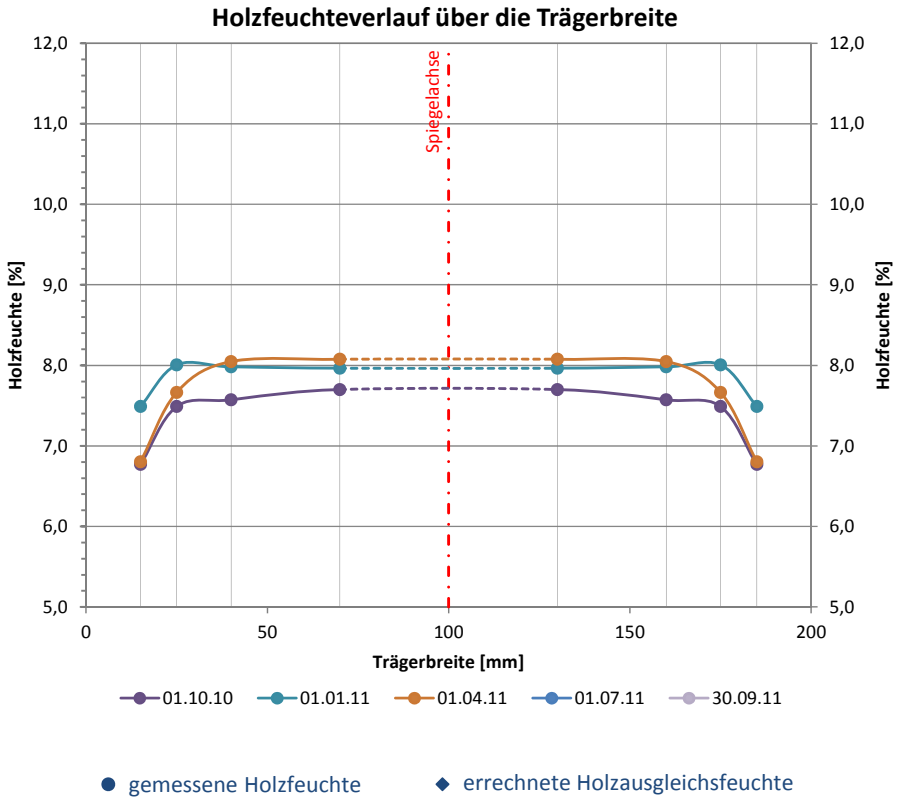
Messstelle 2: Im Tribünenbereich mit Sonnenbänken und Liegestühlen

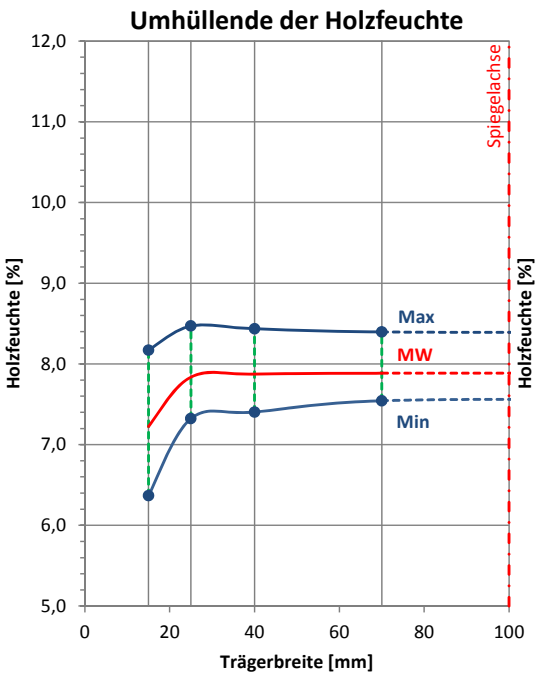


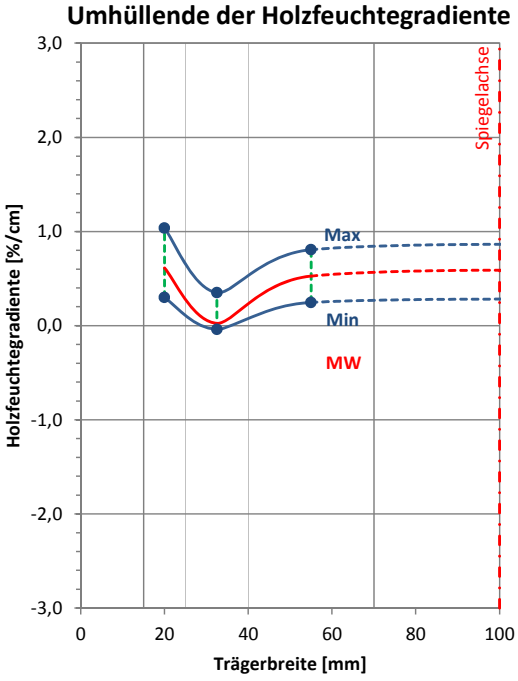


A3 Schwimmhalle Prienavera Prien

Messstelle 2: Im Tribünenbereich mit Sonnenbänken und Liegestühlen







Anzeichen einer Parallelverschiebung der Messergebnisse des Sensors in 15 mm Tiefe (vgl. Absatz 5.9 im Hauptteil)!

B1 Eishalle Landsberg

Anschrift: Hungerbachweg 1
86899 Landsberg am Lech

Ansprechpartner: Hr. Kinzl (Eismeister); Hr. Wilhelm

Anwesende vor Ort: Andreas Gamper, Manuel Waidelich, Hr. Kinzl

Installationsdatum: 29.09.2010, 9:00 – 11:00
Letztes Auslesedatum: 10.10.2011, 10:00 – 11:00

Umgebungsbedingungen: Eishalle, allseitig geschlossener, konstruktiv gedämmter, unbeheizter Raum

Temperatur: 5,0 °C; Luftfeuchte: 68,4 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: über Eisfläche, ca. 12,0 m von Bande entfernt
(möglichst zentral über der Eisfläche um den Einfluss der kalten Eisoberfläche zu erfassen)

Messstelle 2: über Tribüne, ca. 2,0 m vor Bande
(möglichst zentral über der Tribüne um den Einfluss der Besucher bei Veranstaltungen zu erfassen)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	16,5	85,5	x–y: 6–5; 5°	Messstelle 1
u2	25	16,3	86,1	gemessene	
u3	40	16,2	86,1	Temperatur	
u4	70	16,1	86,3	t_1: 4,7°C	
u5	15	15,3	90,5	x–y: 6–5; 5°	Messstelle 2
u6	25	15,2	90,7	gemessene	
u7	40	14,5	92,6	Temperatur	
u8	70	13,5	97,3	t_2: 5,0°C	

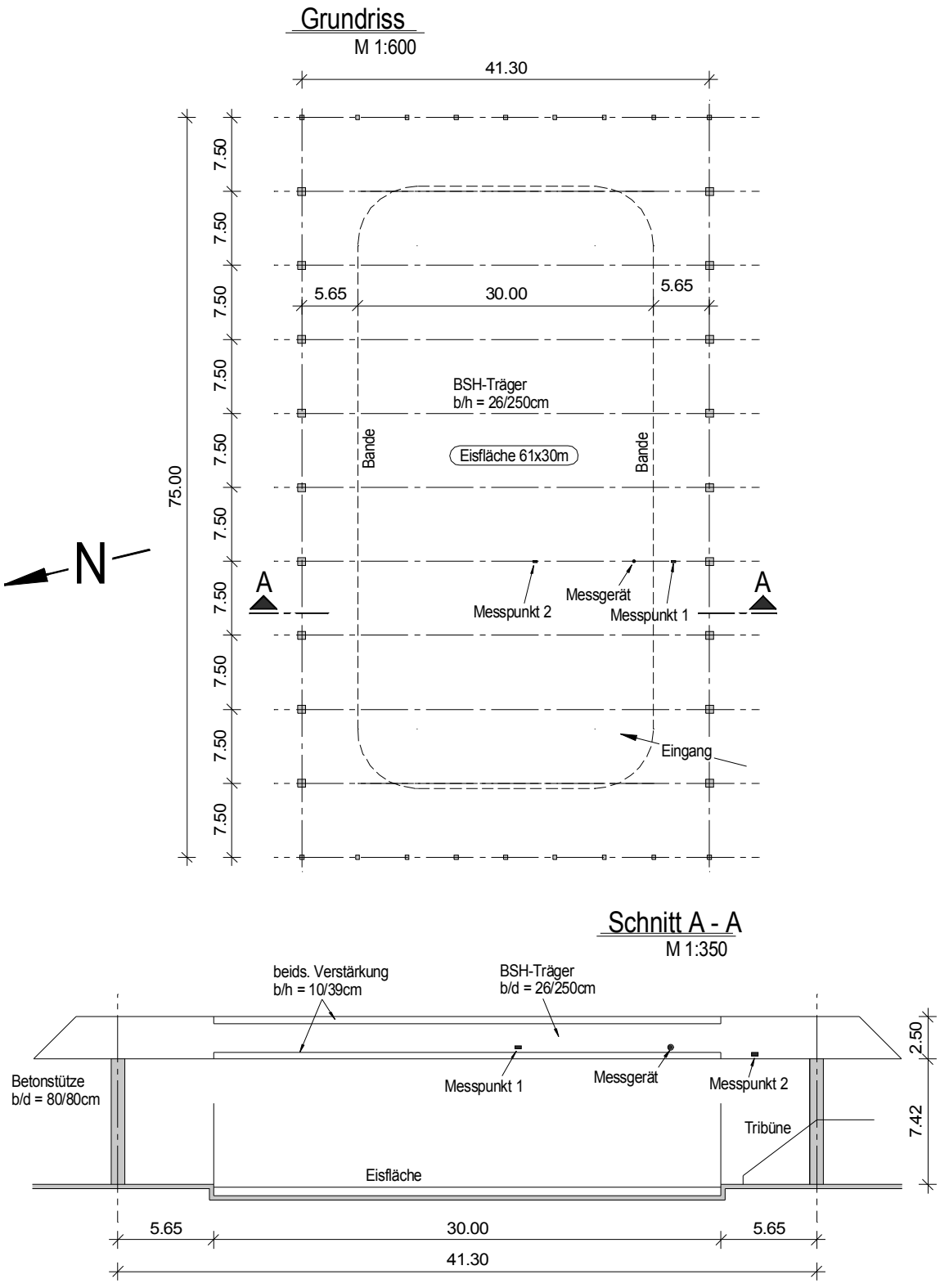
Tragsystem: Einfeldträger mit 2 Kragarmen, Spannweite ℓ = 40,5 m
11 Achsen, Binderachsabstand e = 7,50 m, Gebäudehöhe h = 7,42m
Trägerabmessungen b/h = 26/250 cm^2

Beidseitige Verstärkung an Ober- und Unterkante,
jeweils b/h = 10/39 cm^2

Lamellenstärke 32 mm

Filmbildender Anstrich auf Träger und Verstärkungen

Skizzen:


Grundriss
M 1:600
41.30
75.00
7.50
5.65
30.00
5.65
BSH-Träger
b/h = 26/250cm
Bande
Eisfläche 61x30m
Bande
N
A
A
Messpunkt 2
Messgerät
Messpunkt 1
Eingang
Schnitt A - A
M 1:350
beids. Verstärkung
b/h = 10/39cm
BSH-Träger
b/d = 26/250cm
Betonstütze
b/d = 80/80cm
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
Tribüne
Eisfläche
2.50
7.42
5.65
30.00
5.65
41.30

Bilder:



Abbildung B1-1: Ansicht Tragwerk

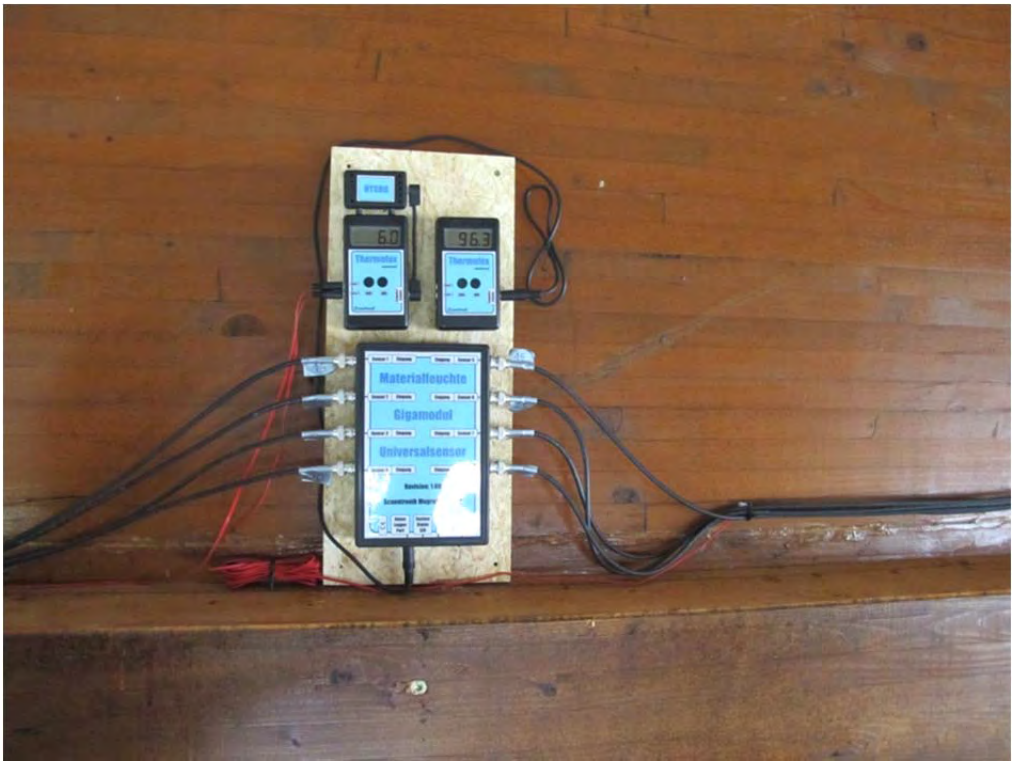


Abbildung B1-2: Anssicht Messstation

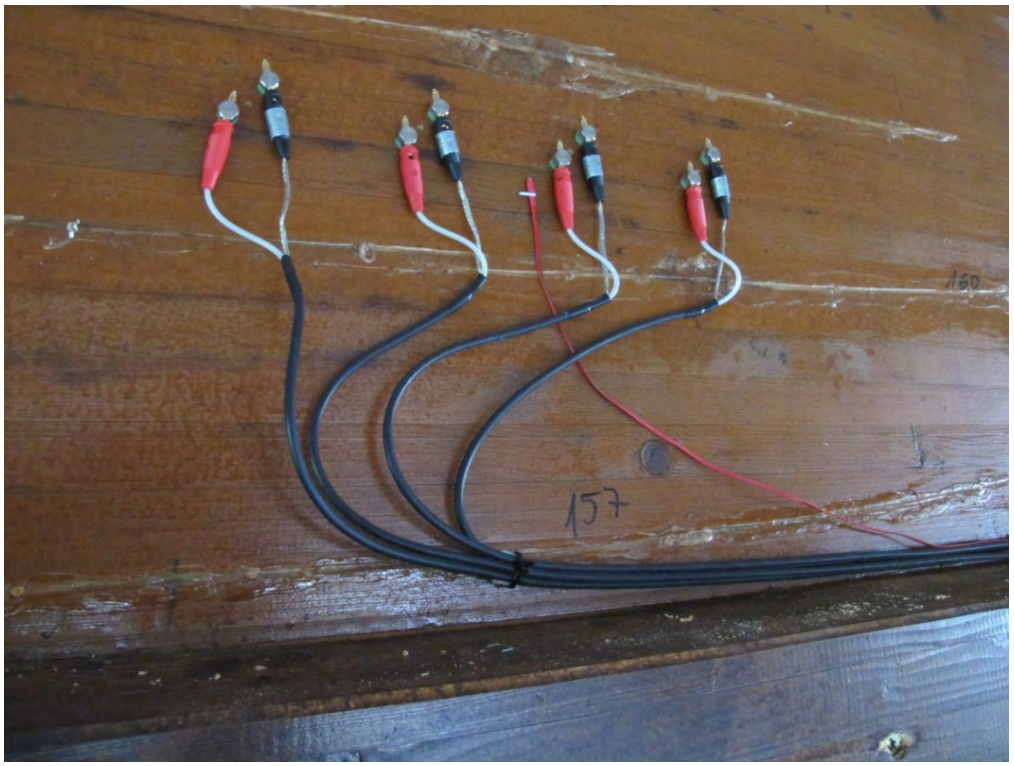


Abbildung B1-3: Ansicht Messstelle 1

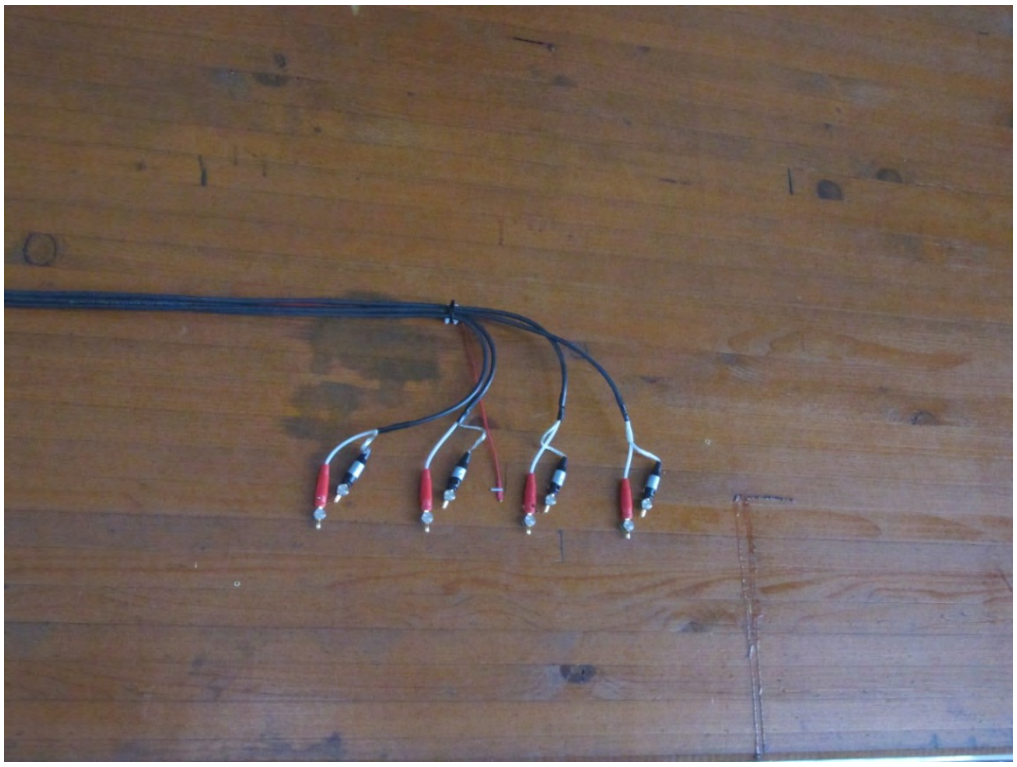
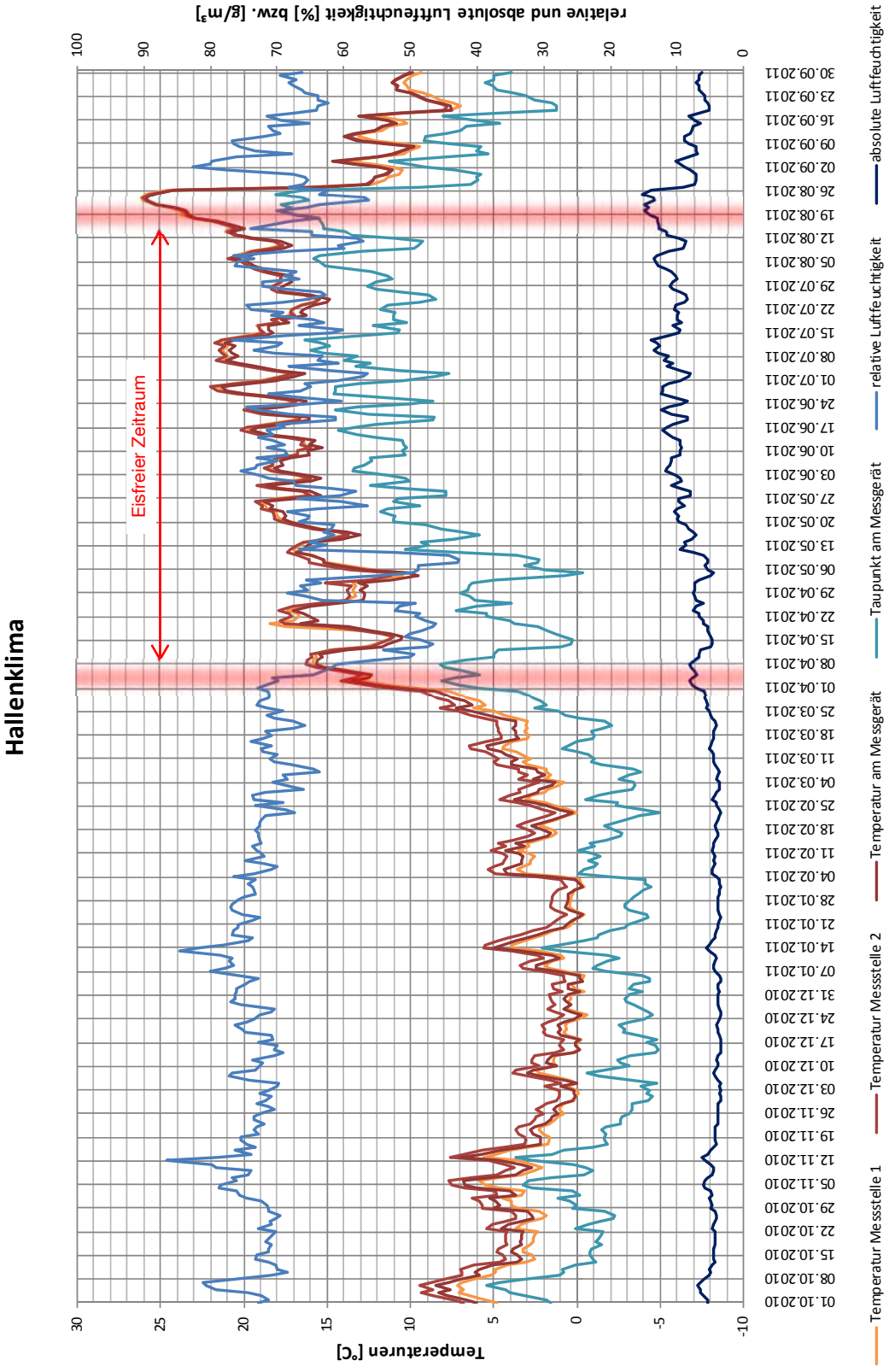


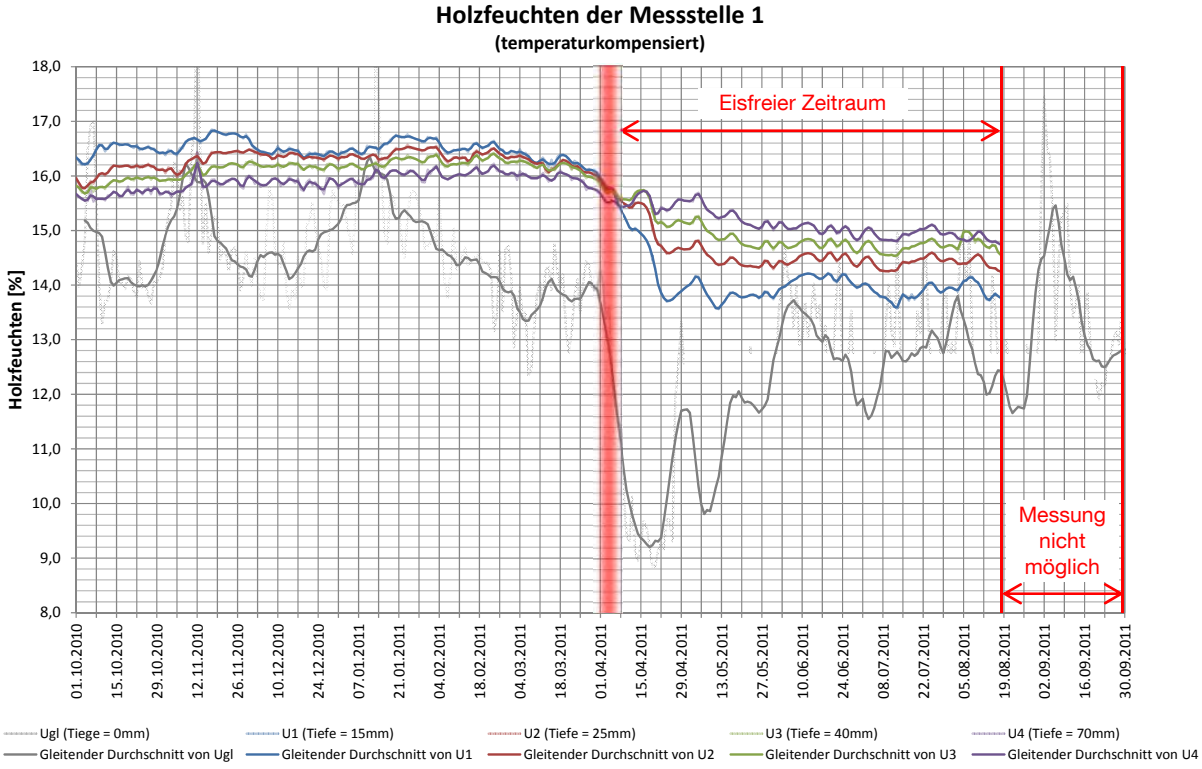
Abbildung B1-4: Ansicht Messstelle 2

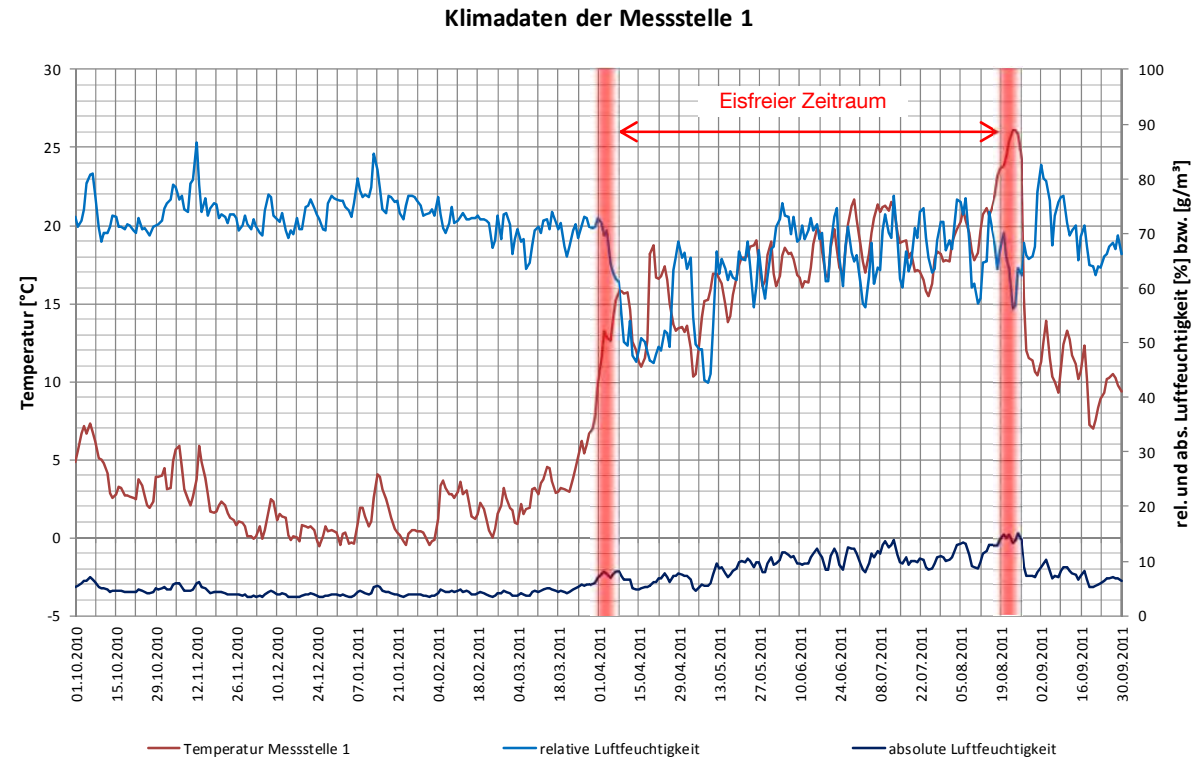
B1 Eishalle Landsberg



B1 Eishalle Landsberg

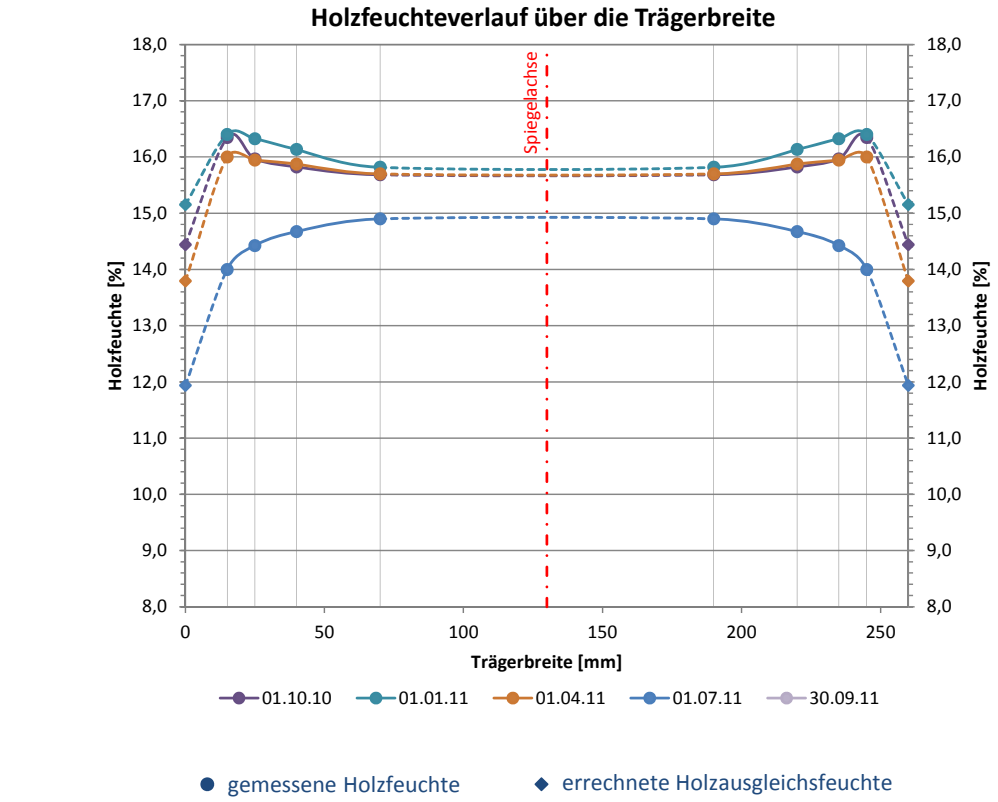
Messstelle 1: Über Eisfläche, ca. 12,0 m von Bande entfernt

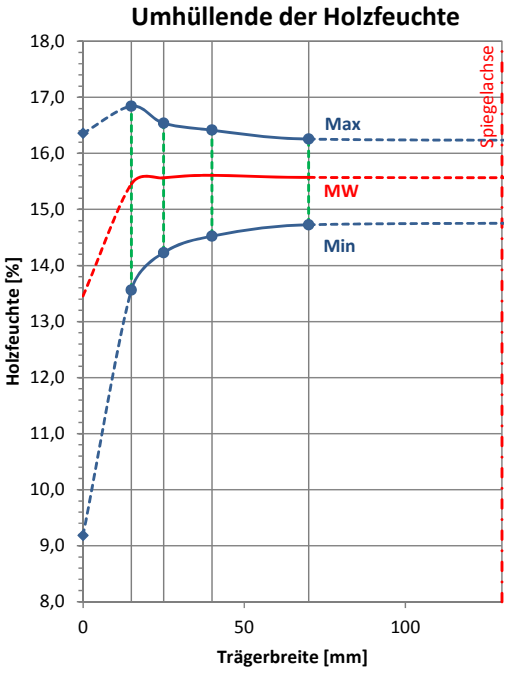


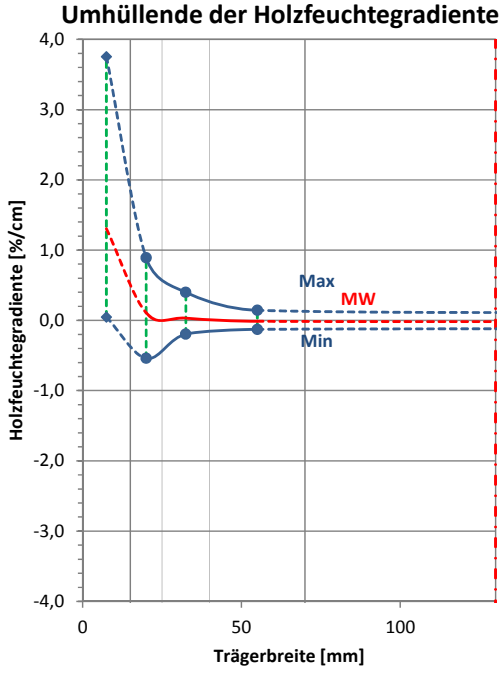


B1 Eishalle Landsberg

Messstelle 1: Über Eisfläche, ca. 12,0 m von Bande entfernt

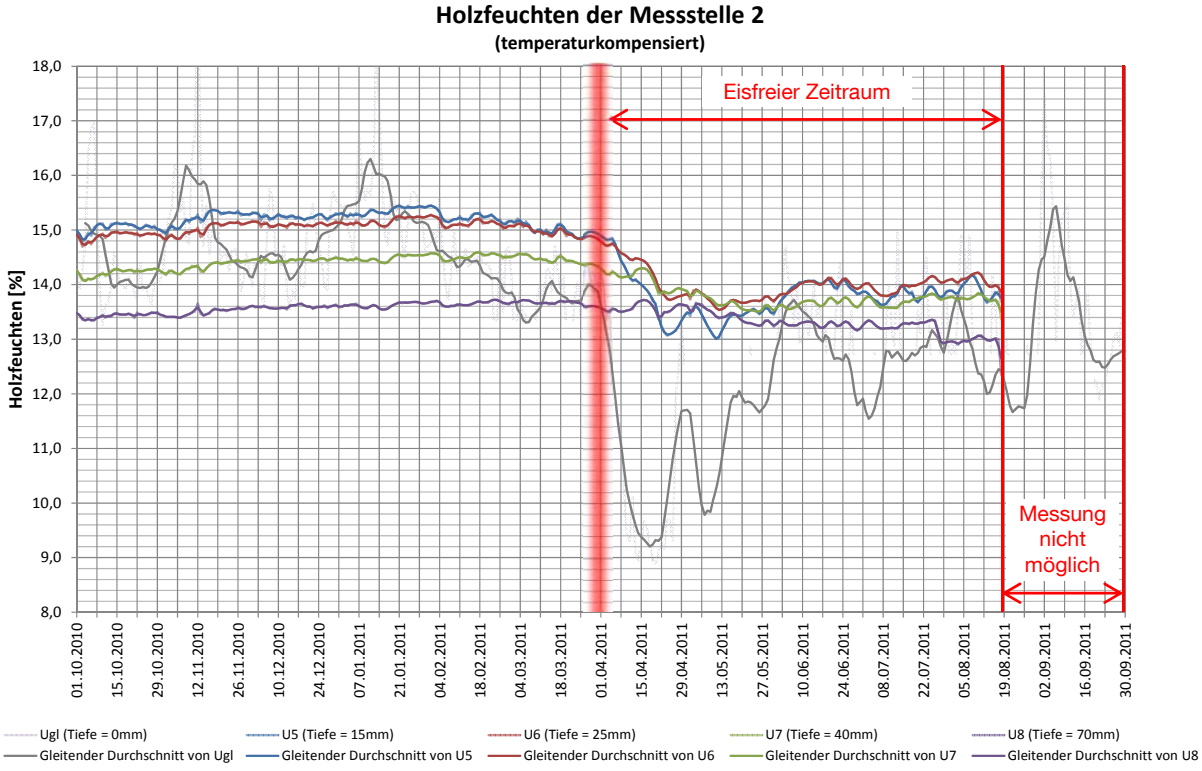


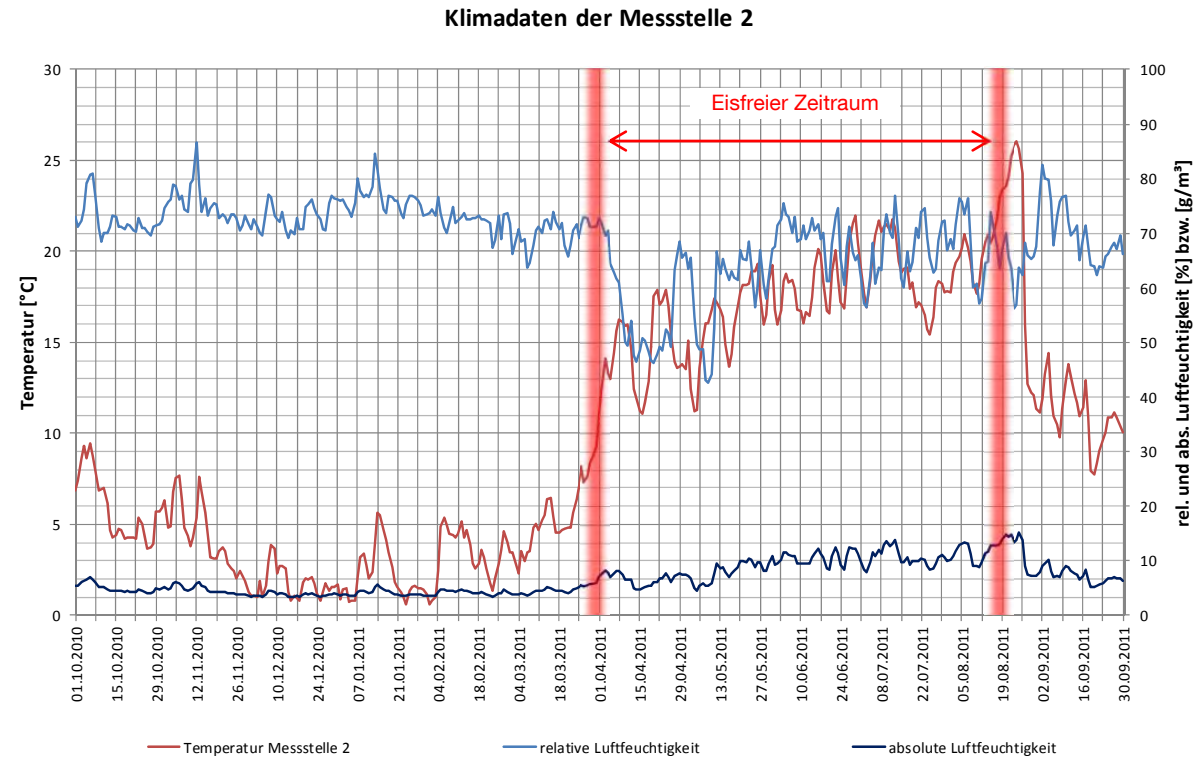




B1 Eishalle Landsberg

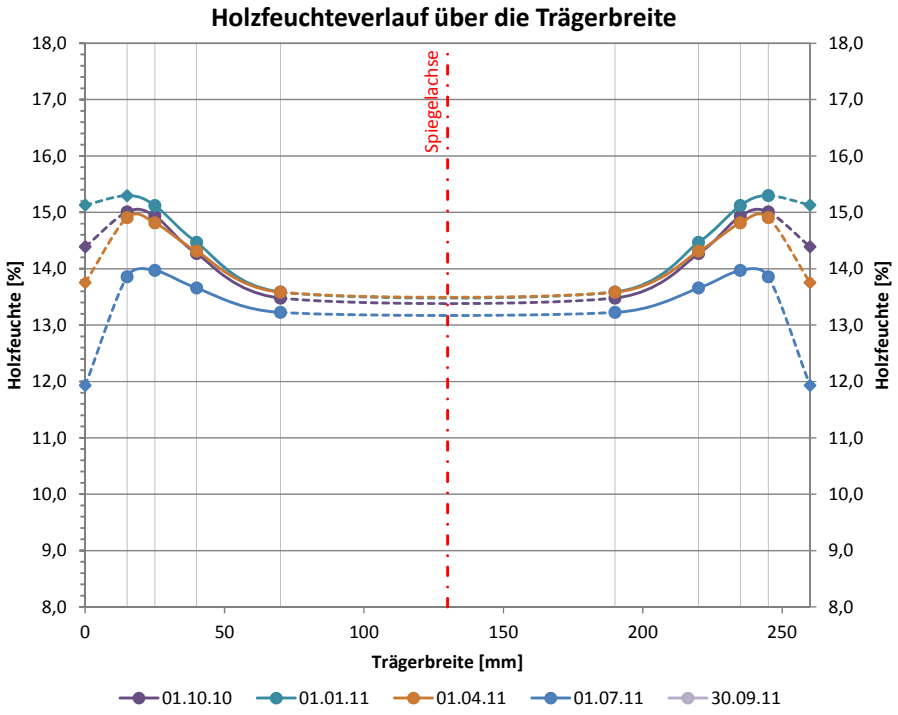
Messstelle 2: Über Tribüne, ca. 2,0 m vor Bande

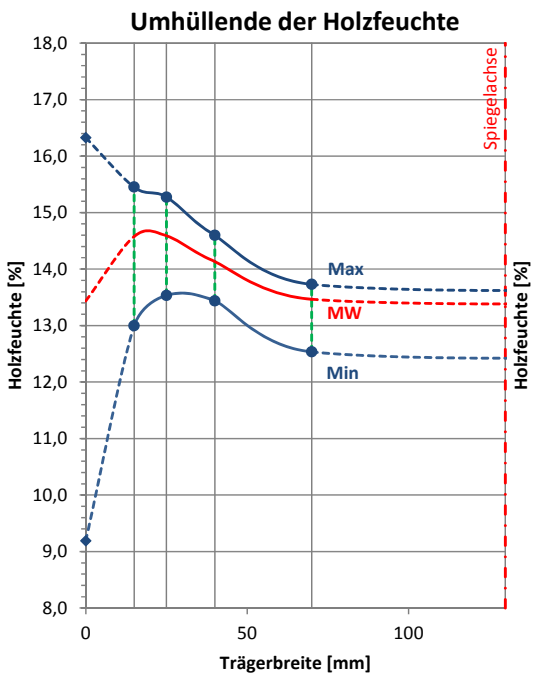


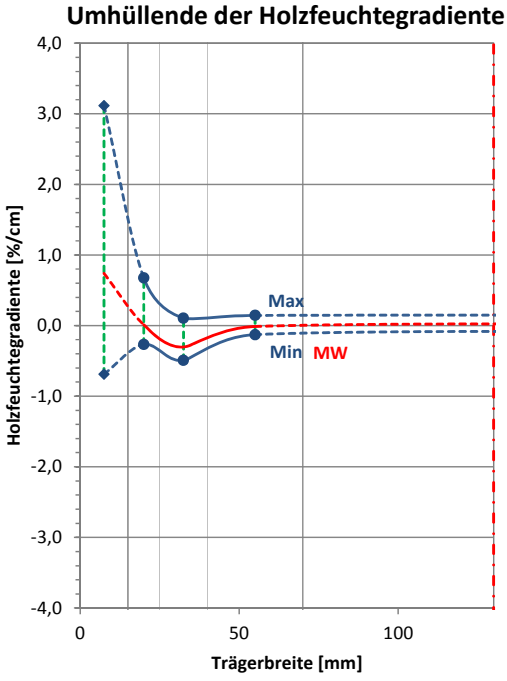


B1 Eishalle Landsberg

Messstelle 2: Über Tribüne, ca. 2,0 m vor Bande







B2 Eishalle Buchlohe

Anschrift: Rießerseestr. 1
86807 Buchloe

Ansprechpartner: Herr A. Stiegelmeyr
Herr Melder

Anwesende vor Ort: Philipp Dietsch, Andreas Gamper, Hr. Stiegelmeyr

Installationsdatum: 17.09.2010, 09:30 – 12:00
Letztes Auslesedatum: 10.10.2011, 08:30 – 09:30

Umgebungsbedingungen: Allseitig geschlossener, unbeheizter, konstruktiv gedämmter Raum

Temperatur: 10,0 °C; Luftfeuchte: 56,6 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: Über der Tribüne, an der Binderoberkante bei Koppelpfette; (über der Tribüne um den Einfluss der Besucher bei Veranstaltungen zu erfassen)

Messstelle 2: Über der Eisfläche, zu Beginn des Krümmungsbereiches, nahe Lichtband (möglichst zentral über der Eisfläche um den Einfluss der kalten Eisoberfläche zu erfassen; eventuell Einfluss durch Lichtband)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	13,3	93,0	x–y: 6–5; 10°	Messstelle 1
u2	25	13,4	92,5	gemessene	
u3	40	13,4	92,5	Temperatur	
u4	70	13,8	90,7	t_1: 9,3°C	
u5	15	15,3	89,0	x–y: 6–5; 5°	Messstelle 2
u6	25	15,3	89,1	gemessene	
u7	40	15,3	89,1	Temperatur	
u8	70	14,8	91,1	t_2: 6,6°C	

Tragsystem: Einfeldträger mit 2 Kragarmen, Spannweite ℓ = 36,8 m

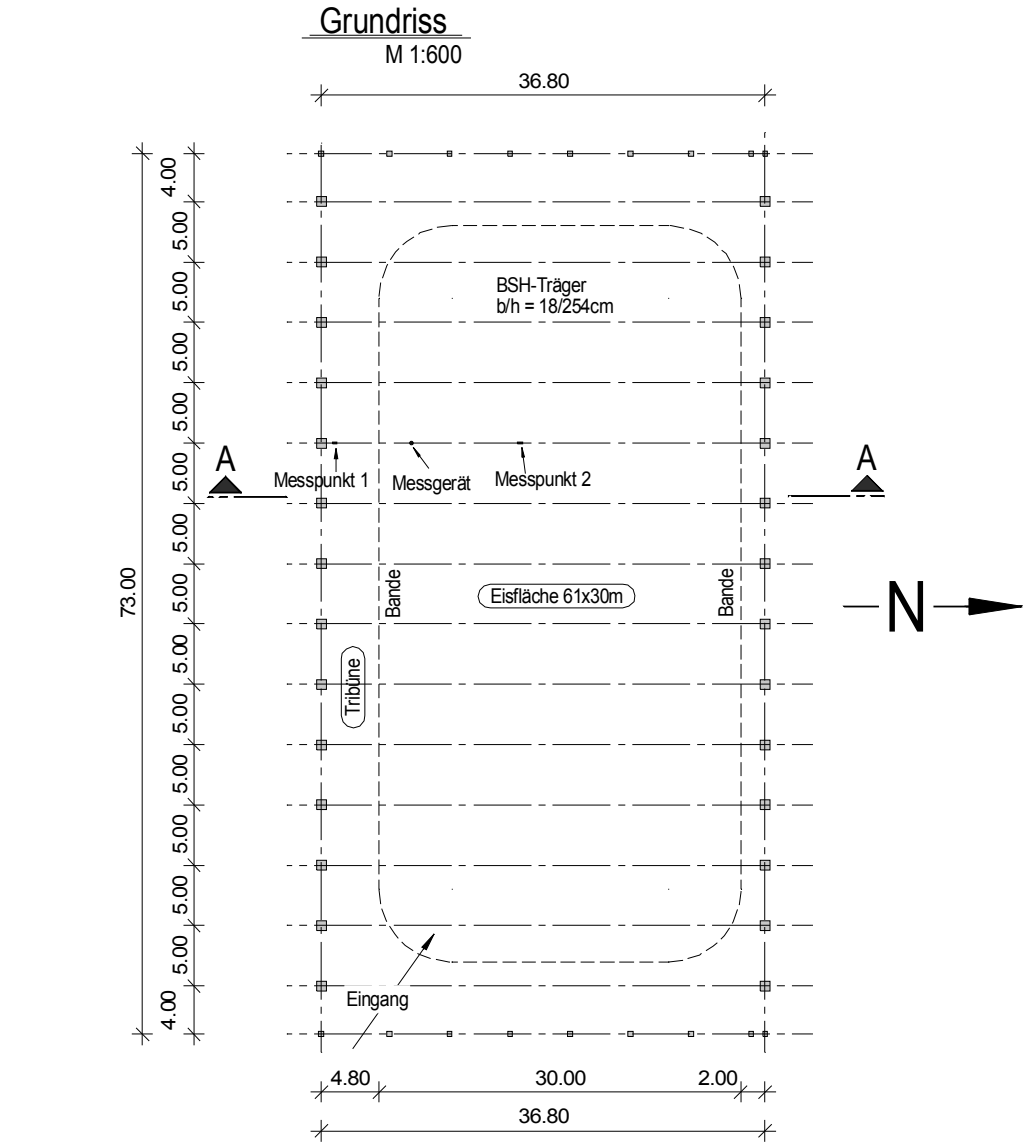
15 Achsen mit Binderachsenabstand e = 5,0m, Firsthöhe h = 11,20m

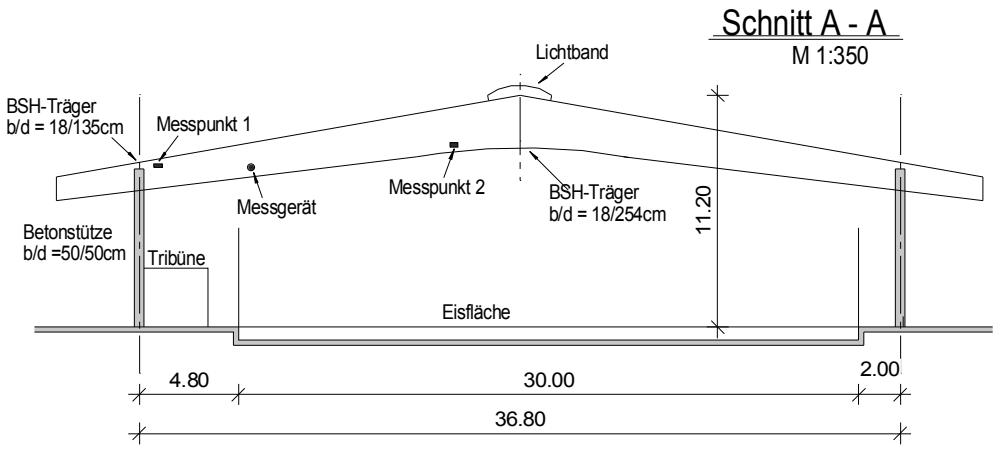
Trägerabmessungen b/h = 18/135 …254 cm²

Lamellenstärke t = 33 mm

Bauteile unbehandelt
(vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:600
36.80
73.00
4.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
4.00
A
A
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
BSH-Träger
b/h = 18/254cm
Bande
Eisfläche 61x30m
Bande
Tribüne
N
Eingang
4.80
30.00
2.00
36.80


Schnitt A - A
M 1:350
Lichtband
BSH-Träger
b/d = 18/135cm
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
BSH-Träger
b/d = 18/254cm
11.20
Betonstütze
b/d =50/50cm
Tribüne
Eisfläche
4.80
30.00
2.00
36.80

Bilder:



Abbildung B2-1: Ansicht Tragwerk

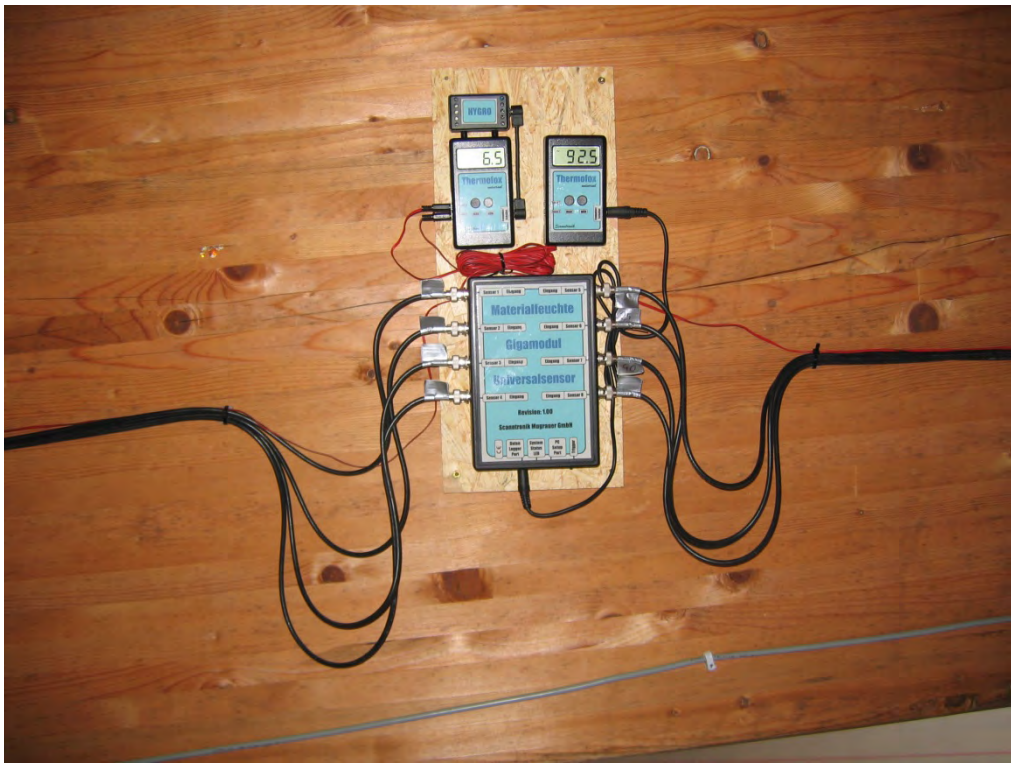


Abbildung B2-2: Ansicht Messstation

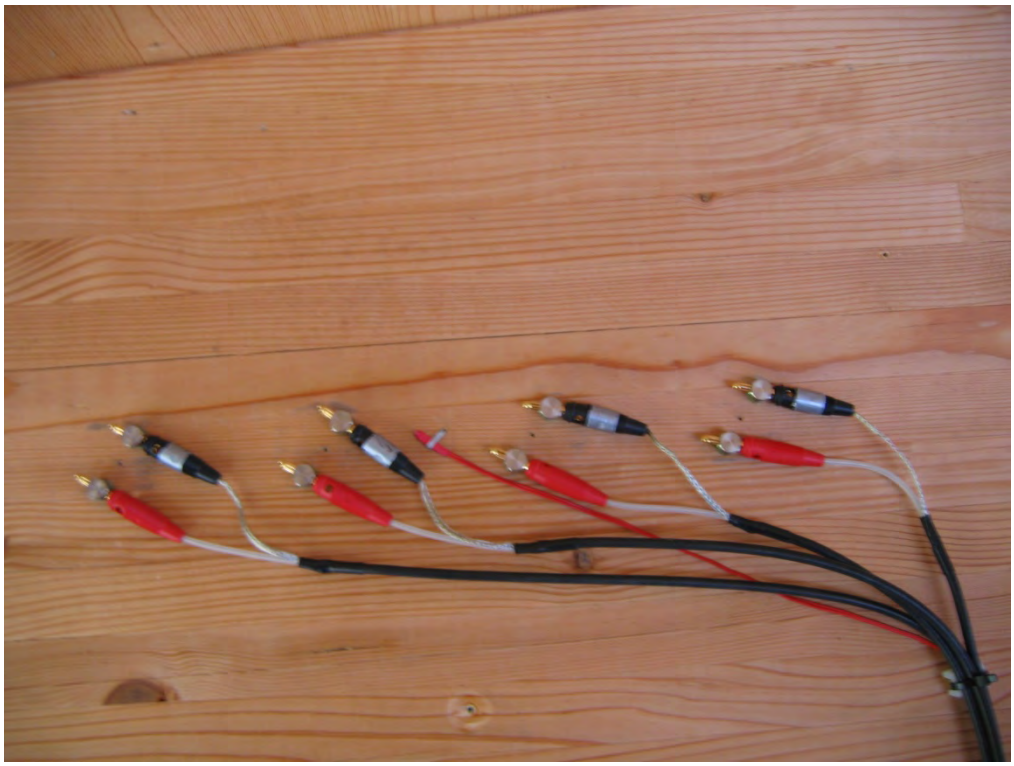


Abbildung B2-3: Ansicht Messstelle 1

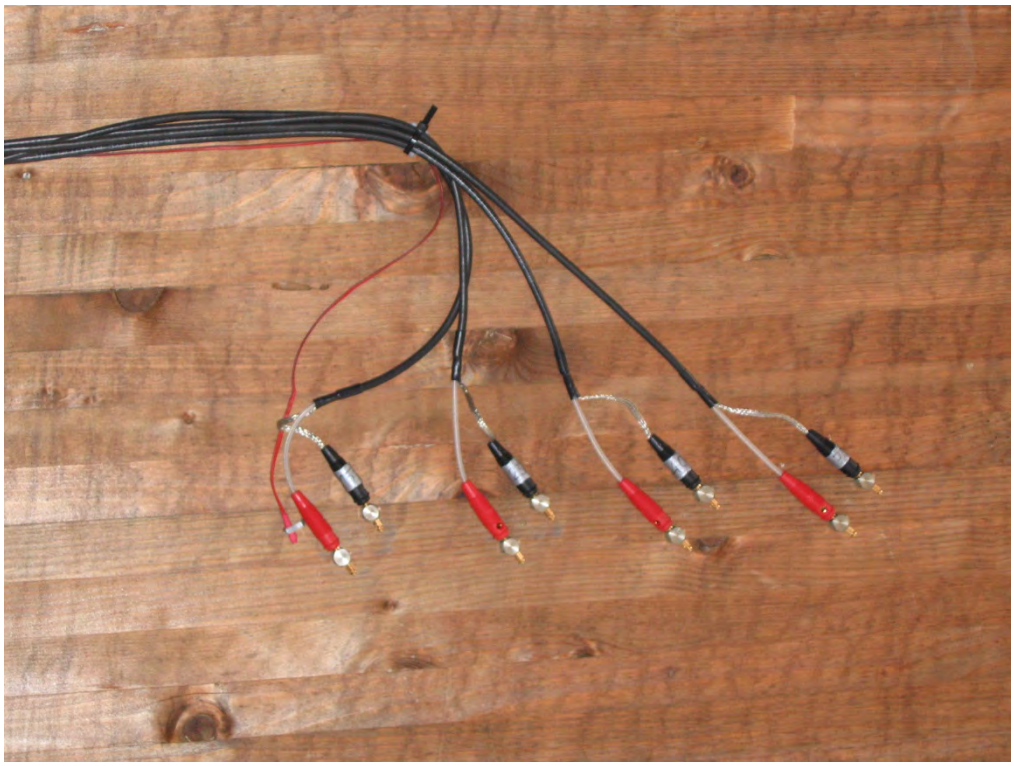
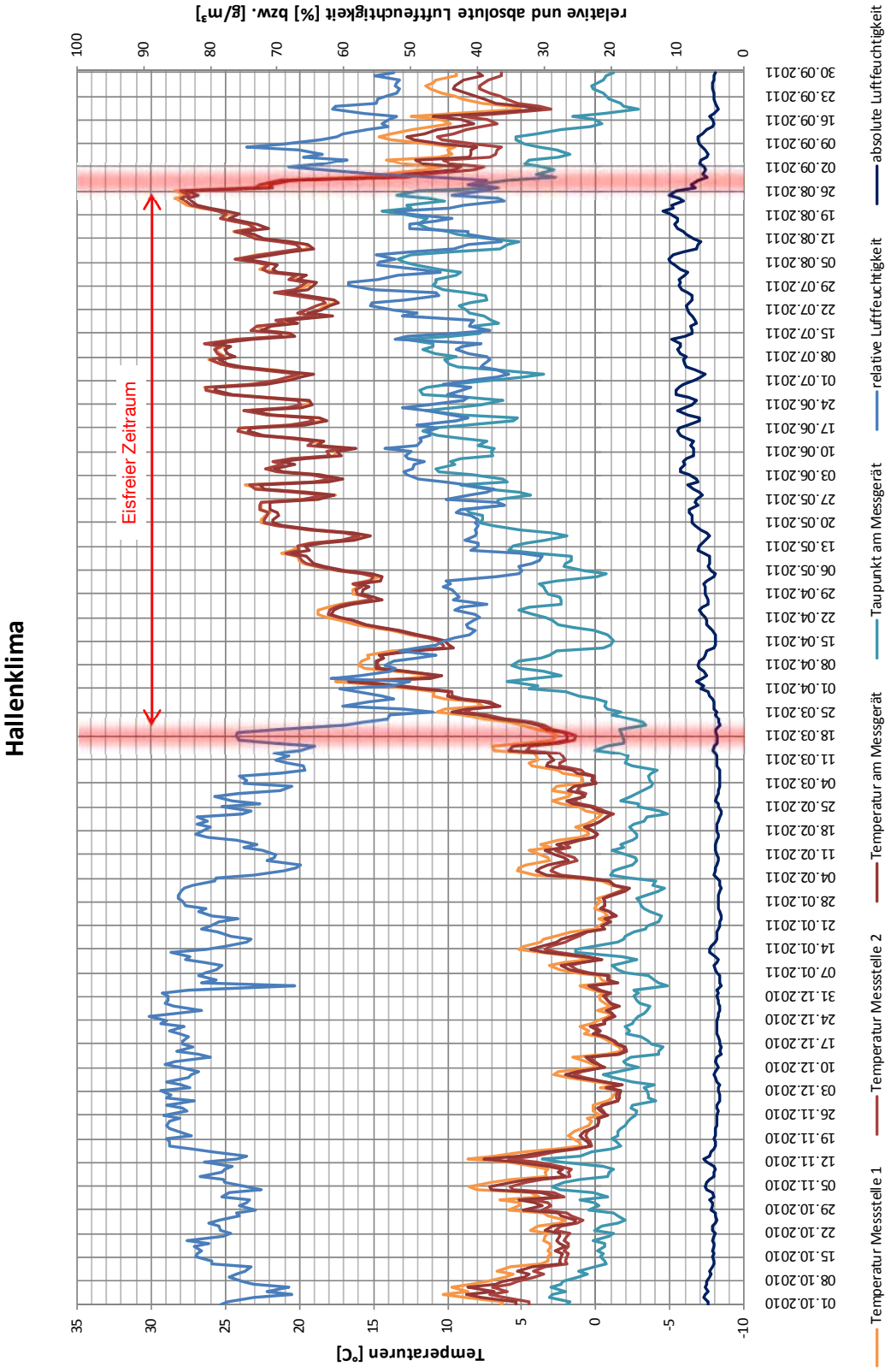


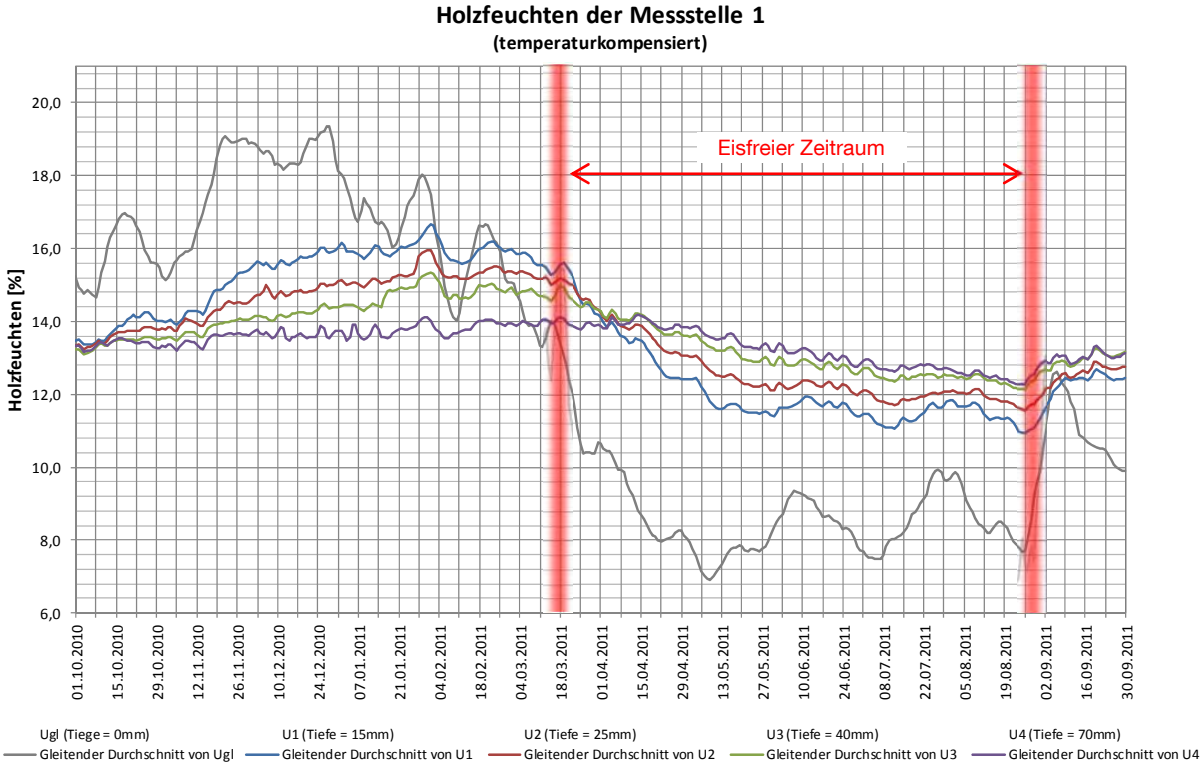
Abbildung B2-4: Ansicht Messstelle 2

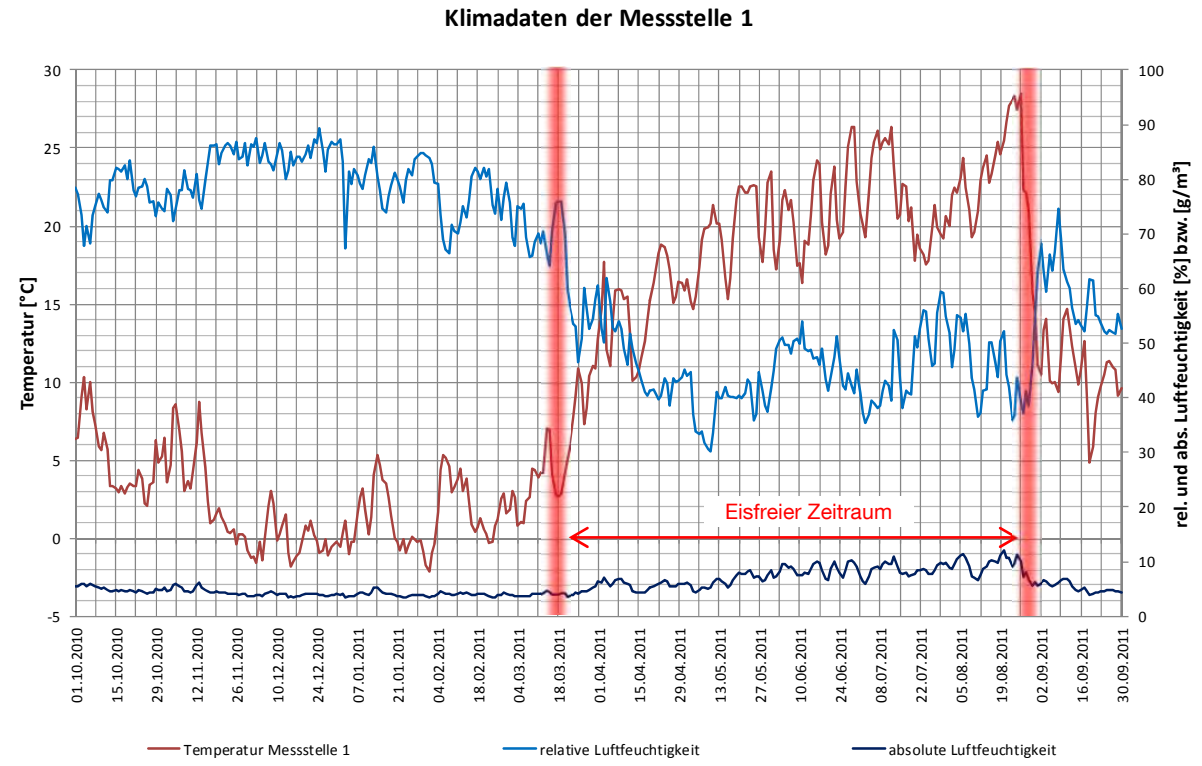
B2 Eishalle Buchloe



B2 Eishalle Buchloe

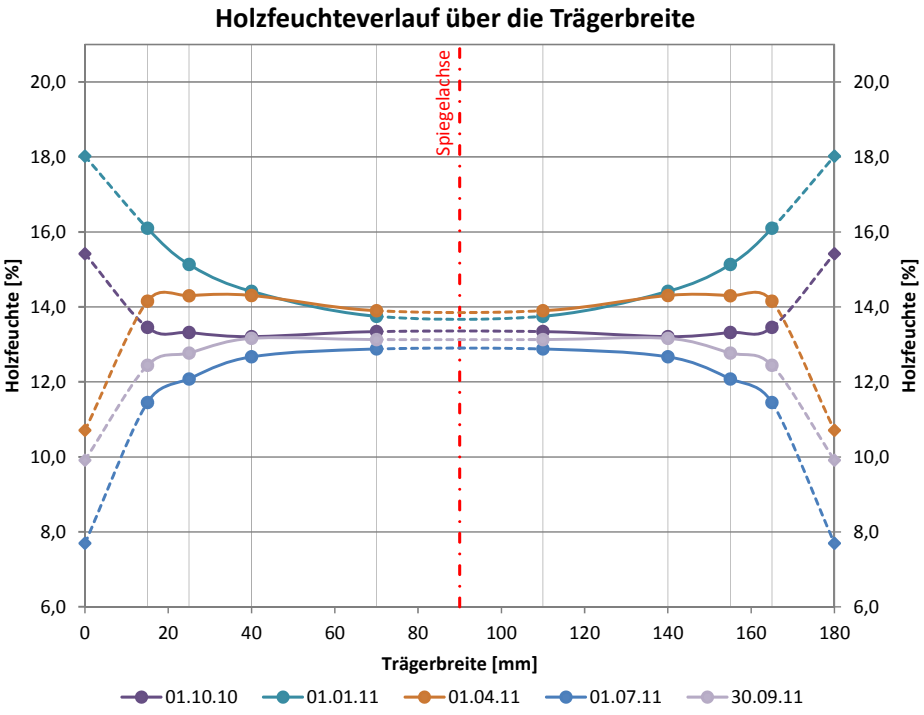
Messstelle 1: Über der Tribüne, an der Binderoberkante bei Koppelpfette

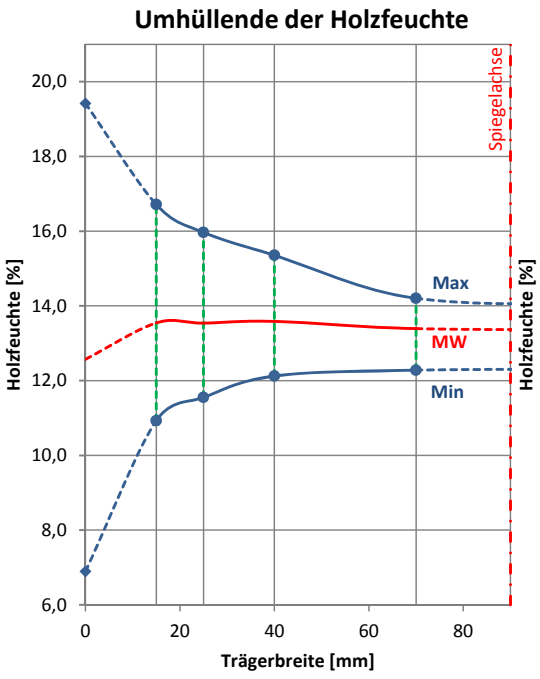


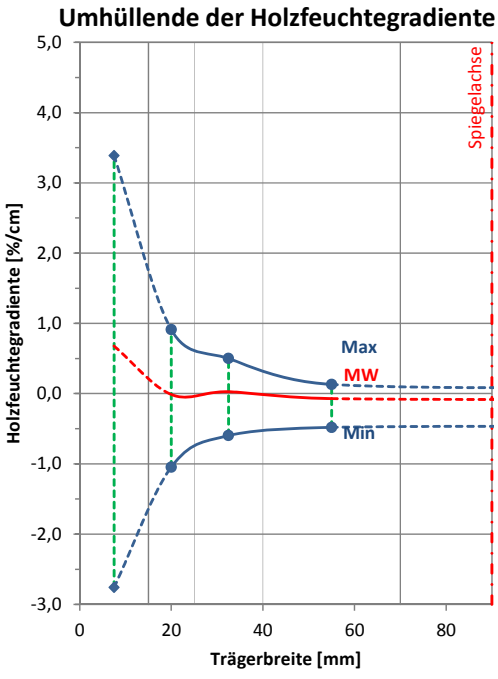


B2 Eishalle Buchloe

Messstelle 1: Über der Tribüne, an der Binderoberkante bei Koppelpfette

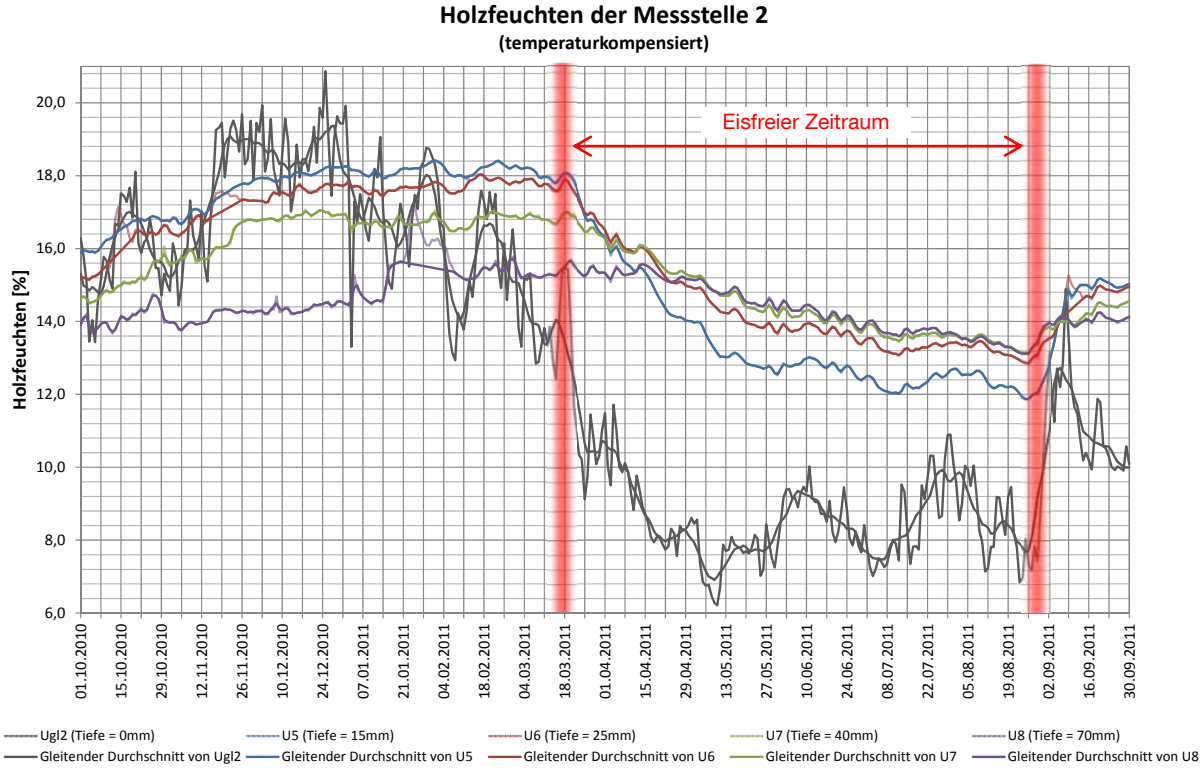


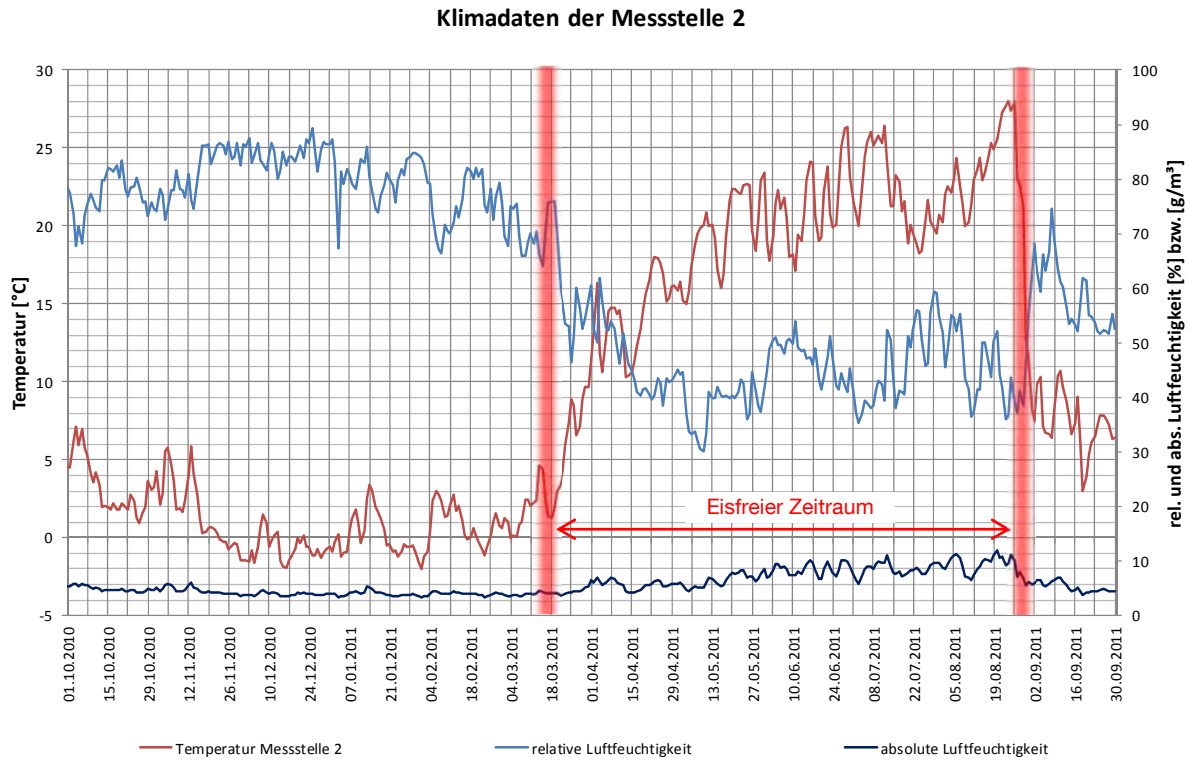




B2 Eishalle Buchloe

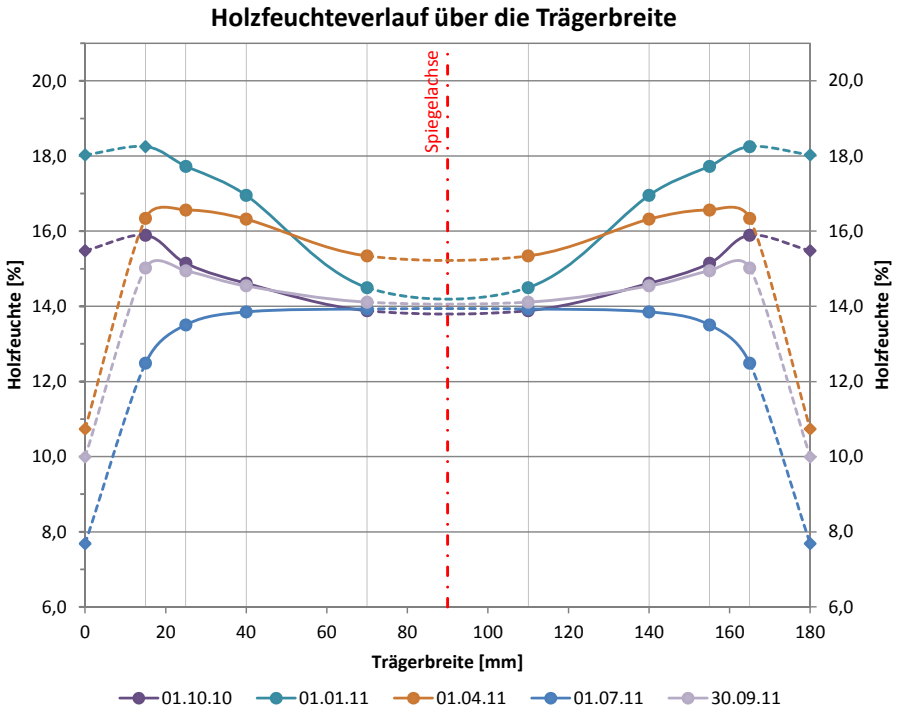
Messstelle 2: Über der Eisfläche, an Anfang der Krümmung, nahe Lichtband

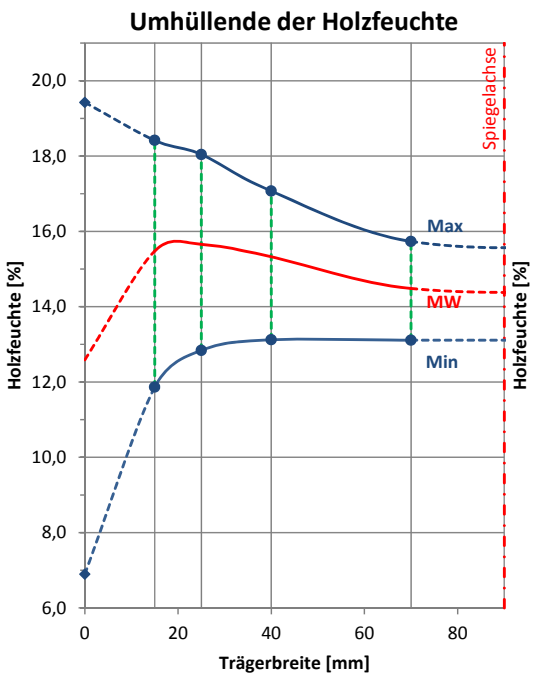


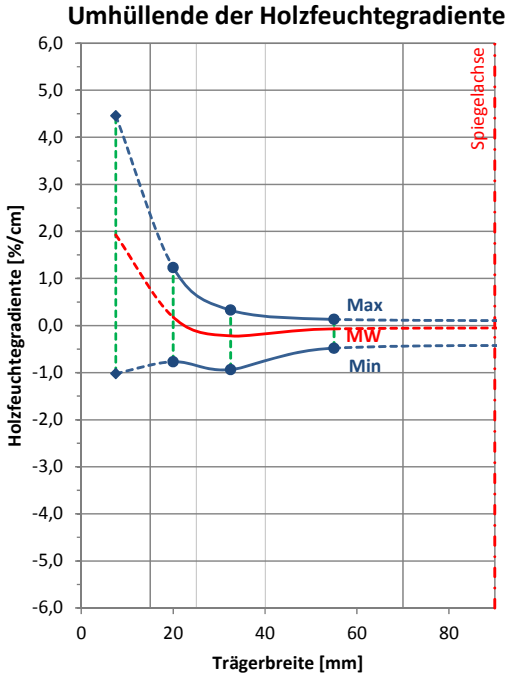


B2 Eishalle Buchloe

Messstelle 2: Über der Eisfläche, an Anfang der Krümmung, nahe Lichtband







B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen

Anschrift:	Am Eisstadion 1 82467 Garmisch-Partenkirchen
Ansprechpartner:	Andreas Wittig (vor Ort)
Anwesende vor Ort:	Philipp Dietsch, Andreas Gamper

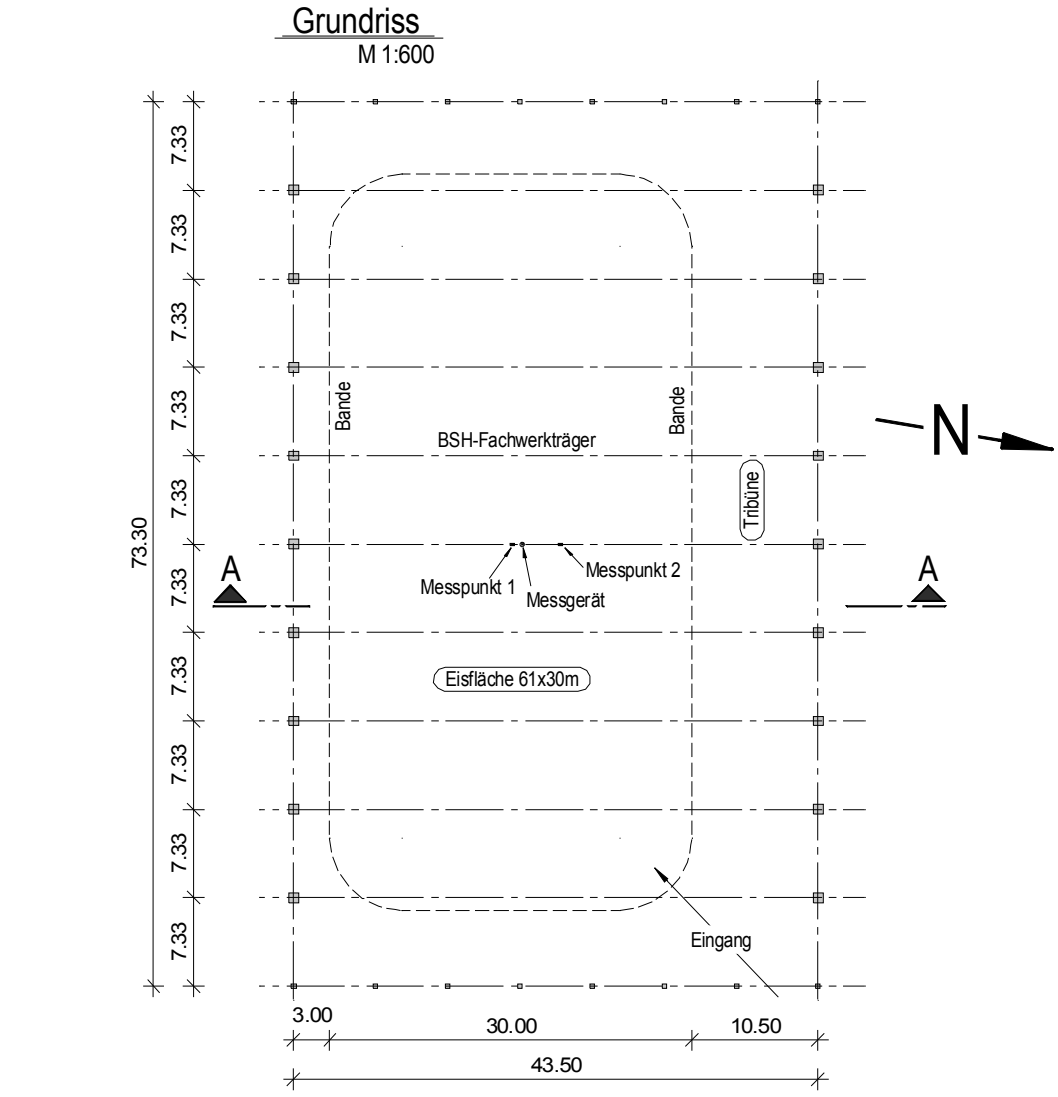
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	04.09.2010, 07:30 – 10:00	22.02.2013, 07:30 – 09:00
Letztes Auslesedatum	12.10.2011, 09:00 – 10:00	01.04.2014, 06:00 – 07:00

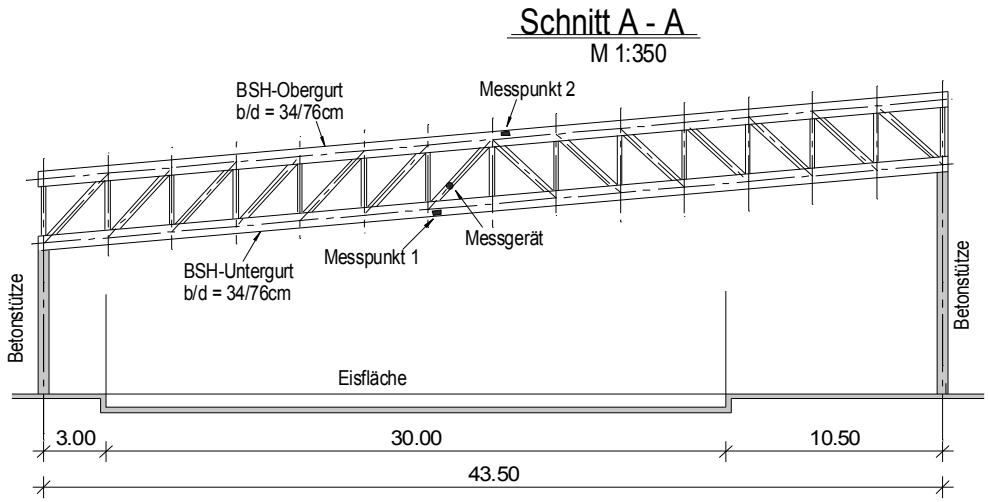
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, über Lüftungsanlage beheizter, energetisch gedämmter Raum Temperatur: 19,8 °C; Luftfeuchte: 47,7 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Untergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von unten (eine Erfassung des Klimas sowohl über Eisfläche als auch über Tribüne war aufgrund der Hallengröße nicht möglich)
Messstelle 2:	Obergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von oben

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	13,9	88,3	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 1
u2	25	14,0	92,5	gemessene	
u3	40	13,7	92,5	Temperatur	
u4	70	13,6	90,7	t_1: 16,1°C	
u5	15	11,6	93,6	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	11,7	93,0	gemessene	
u7	40	11,7	93,1	Temperatur	
u8	70	9,4	100,7	t_2: 17,9°C	

Tragsystem:	FW-Träger als Einfeldträger mit 2 Kragarmen, Spannweite ℓ = 43,50m 10 Achsen mit Trägerachsabstand e = 7,33 m Abmessungen Fachwerkträger: Höhe h = 3,85 m, b_{UG}/h_{UG} = 34/76 cm^2 Lamellenstärke t = 33 mm Farbloser, offenporiger Anstrich bei Bauwerkserstellung

Skizzen:


Grundriss
M 1:600
7.33
7.33
7.33
7.33
7.33
7.33
7.33
7.33
7.33
73.30
Bande
Bande
BSH-Fachwerkträger
Tribüne
N
A
A
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
Eisfläche 61x30m
Eingang
3.00
30.00
10.50
43.50


Schnitt A - A
M 1:350
BSH-Obergurt
b/d = 34/76cm
Messpunkt 2
Messgerät
Messpunkt 1
BSH-Untergurt
b/d = 34/76cm
Betonstütze
Betonstütze
Eisfläche
3.00
30.00
10.50
43.50

Bilder:



Abbildung B3-1: Ansicht Tragwerk



Abbildung B3-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2



Abbildung B3-3: Ansicht Messstelle 1

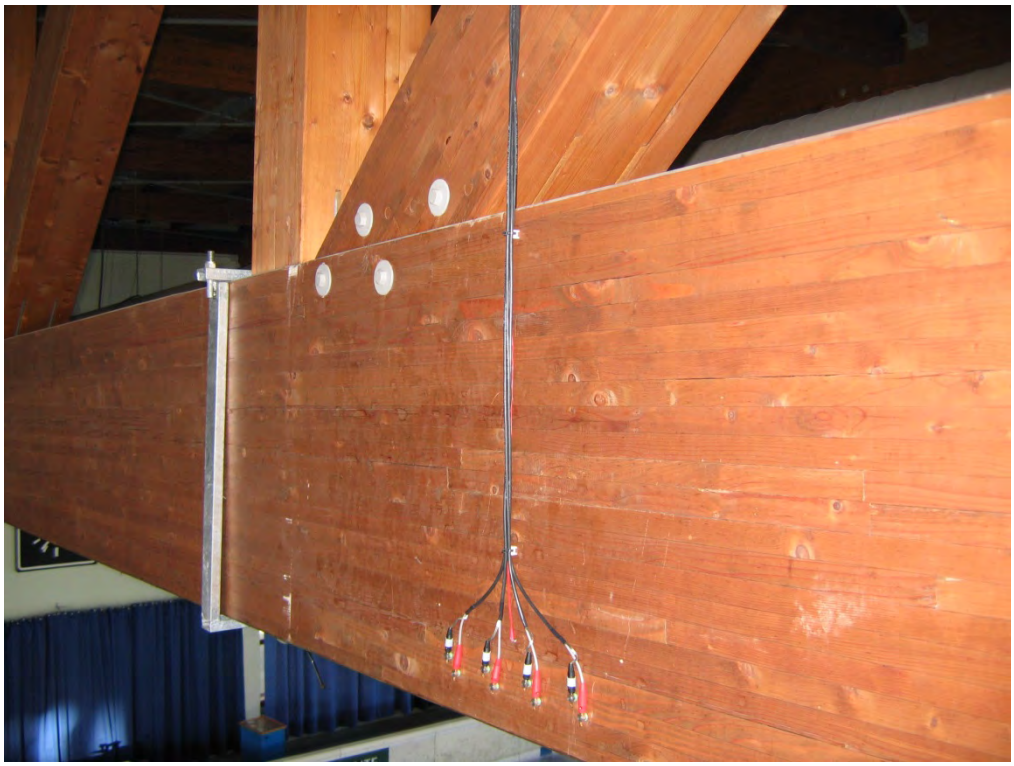
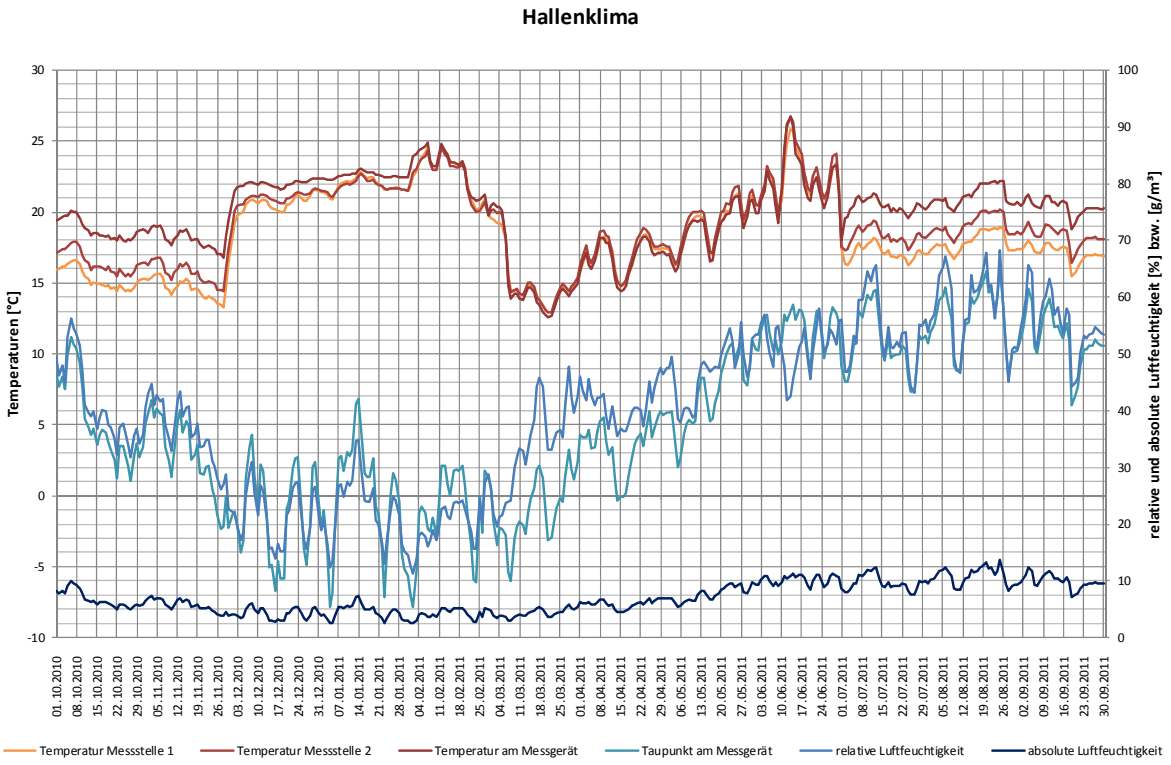


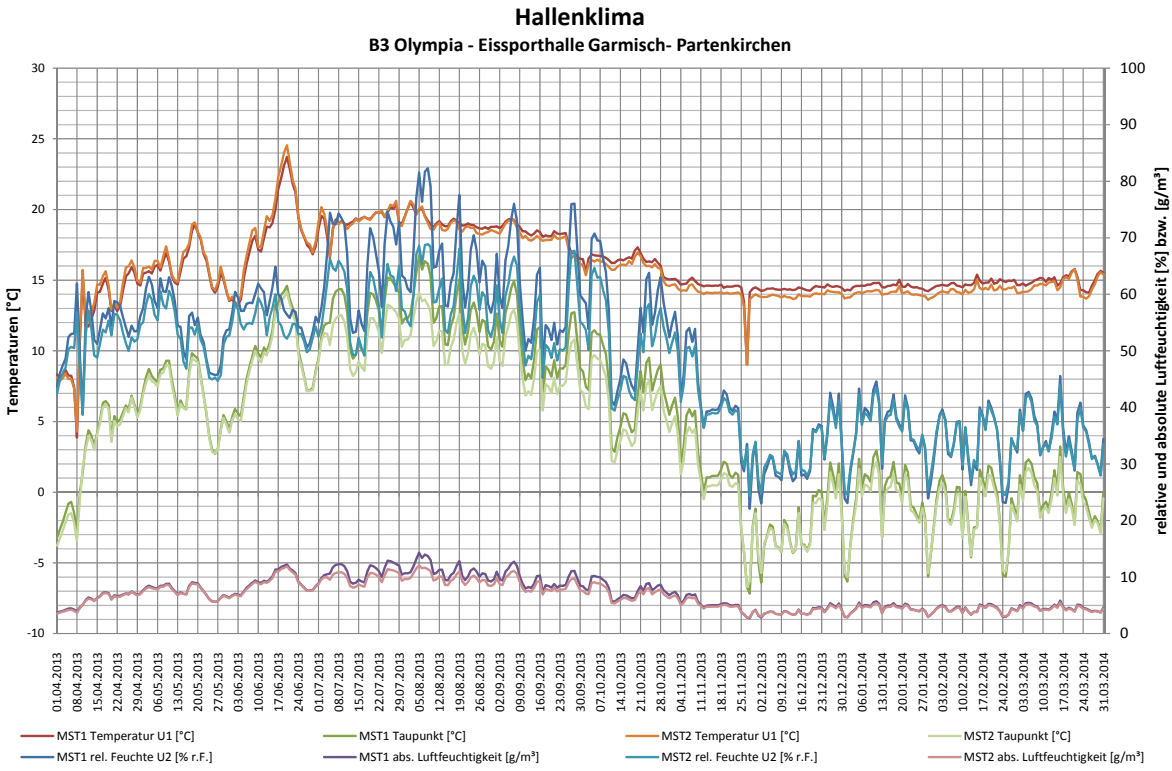
Abbildung B3-4: Ansicht Messstelle 2

B3 Eissporthalle Garmisch- Partenkirchen

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

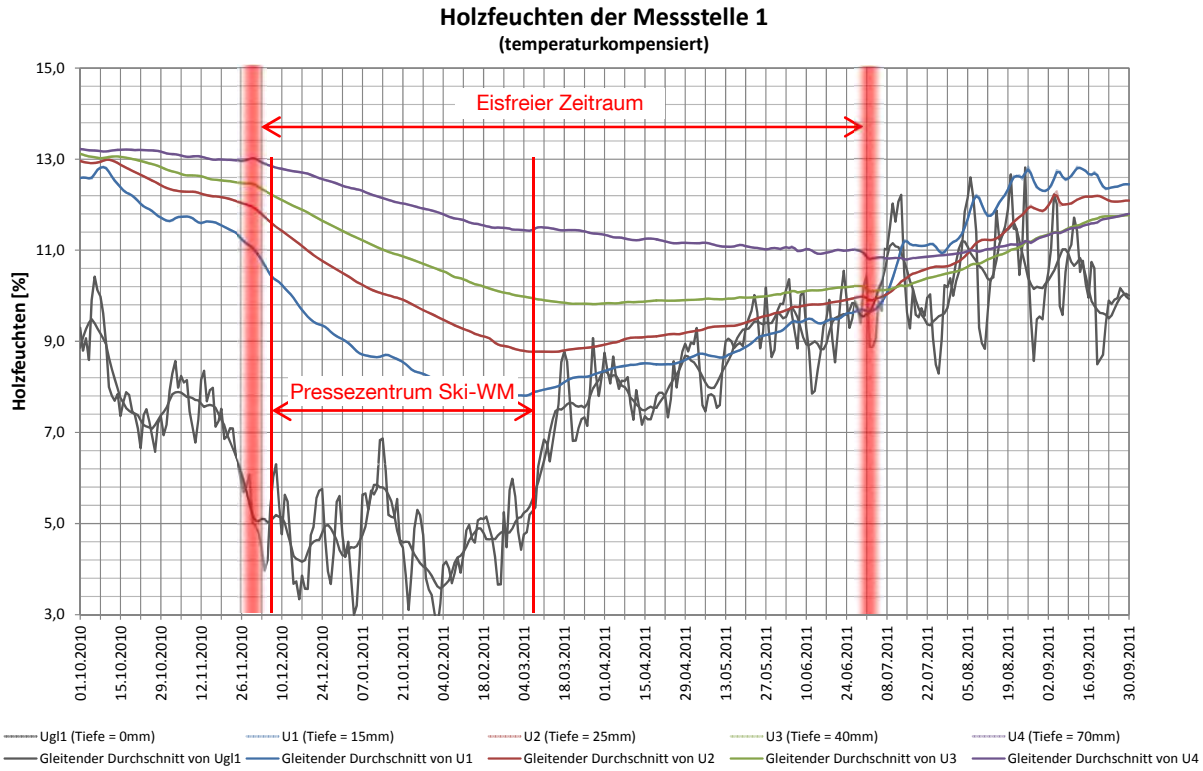


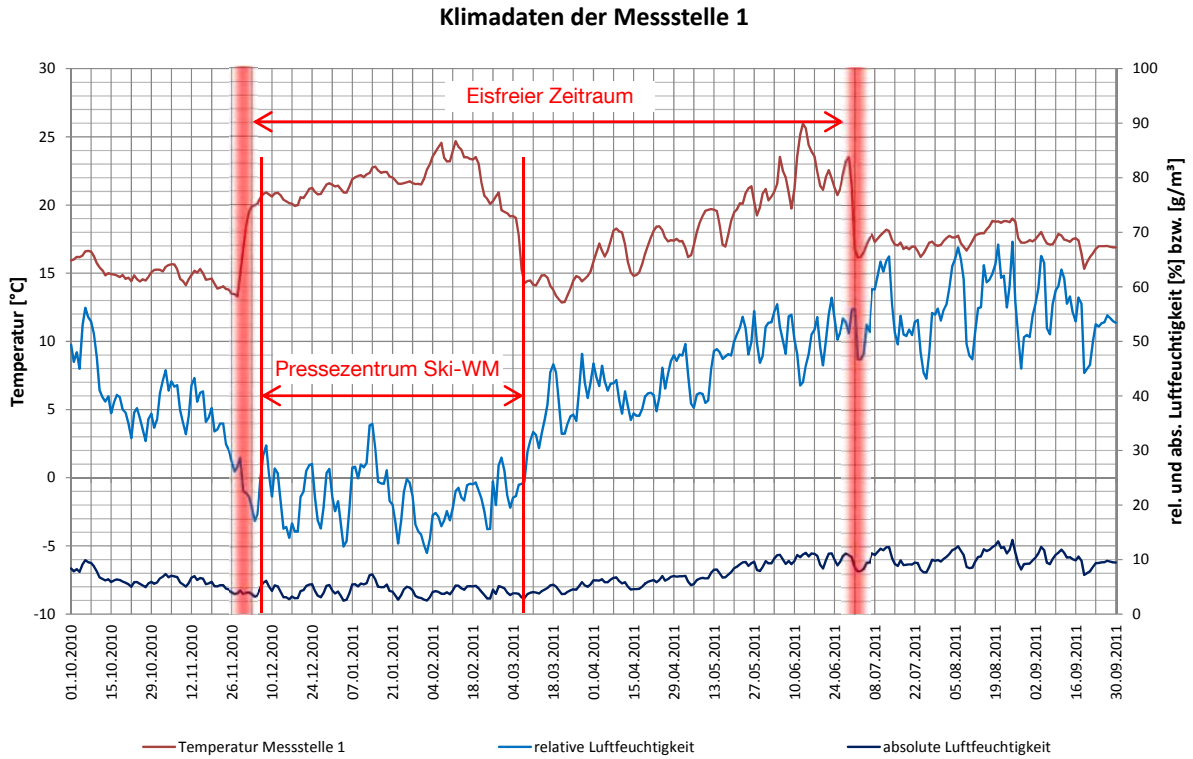
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen

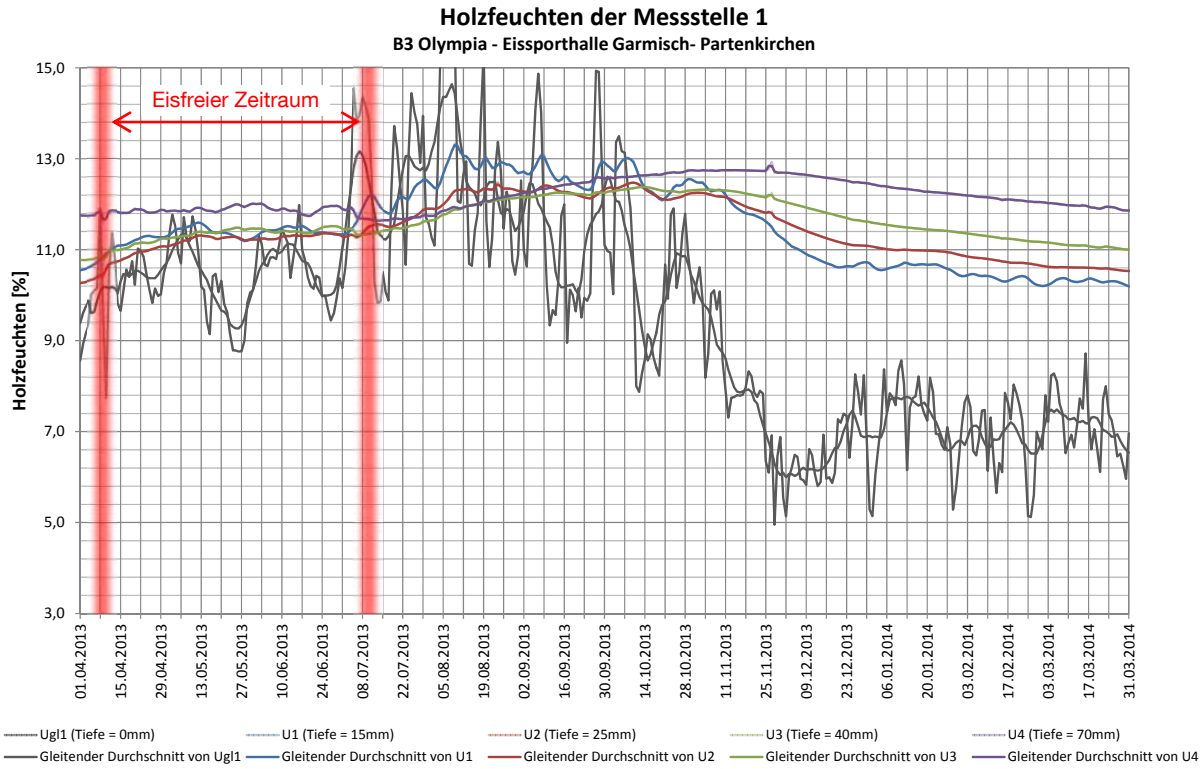
Messstelle 1: Untergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von unten
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

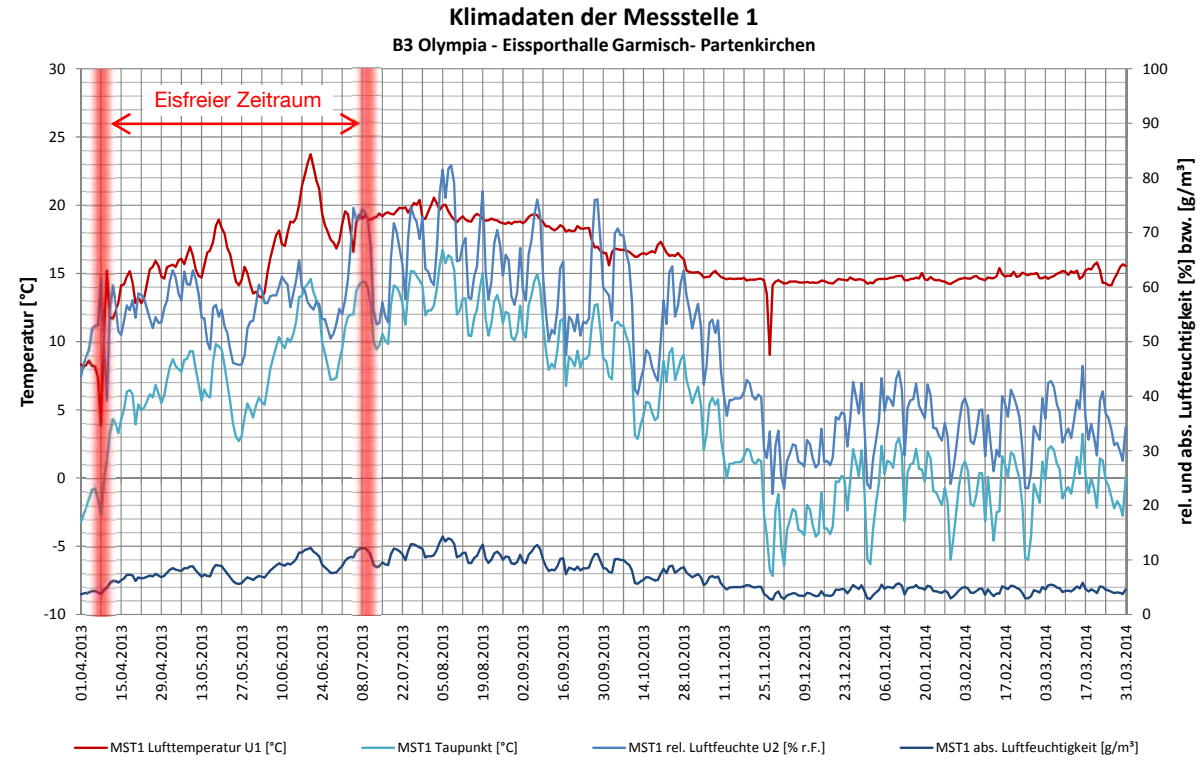




B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen

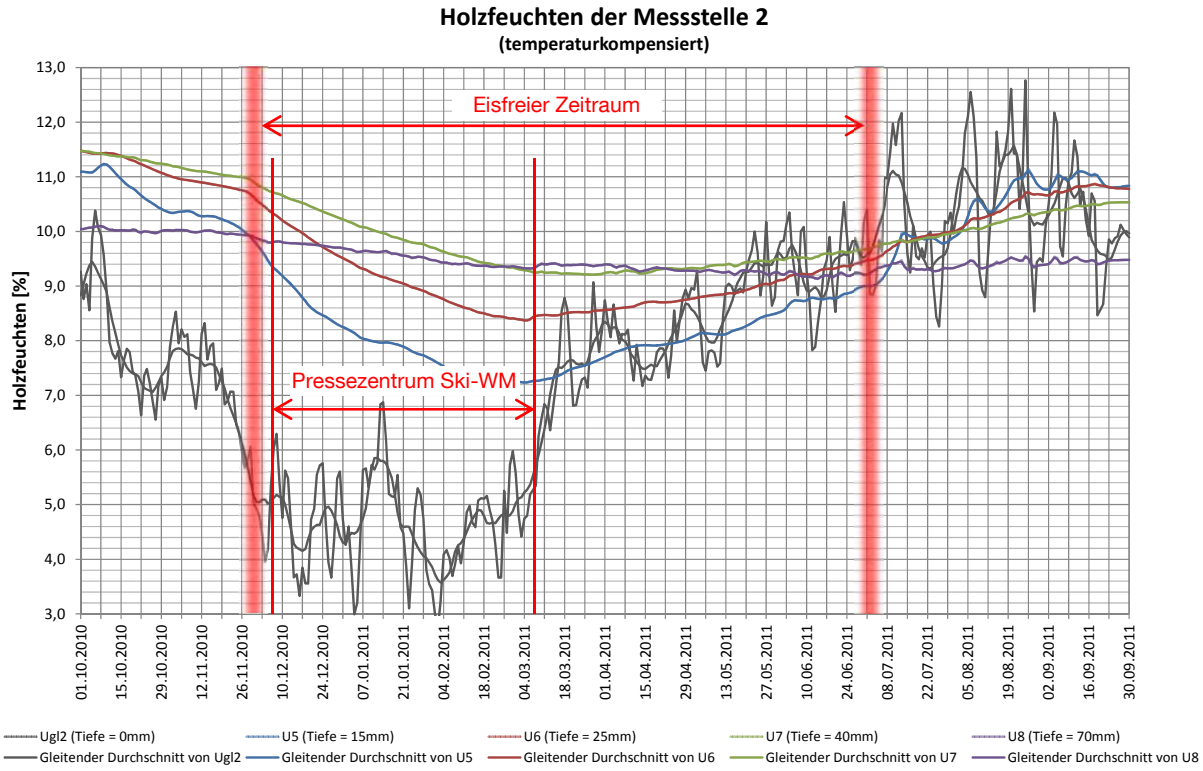
Messstelle 1: Untergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von unten
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

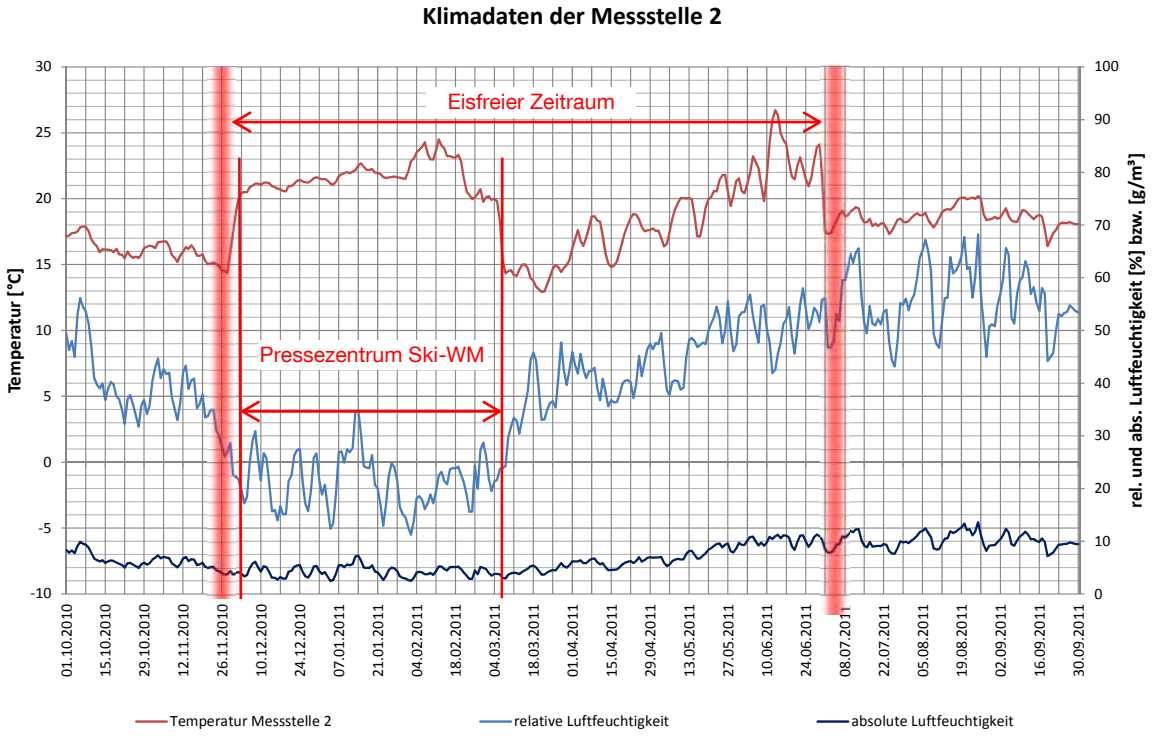




B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen

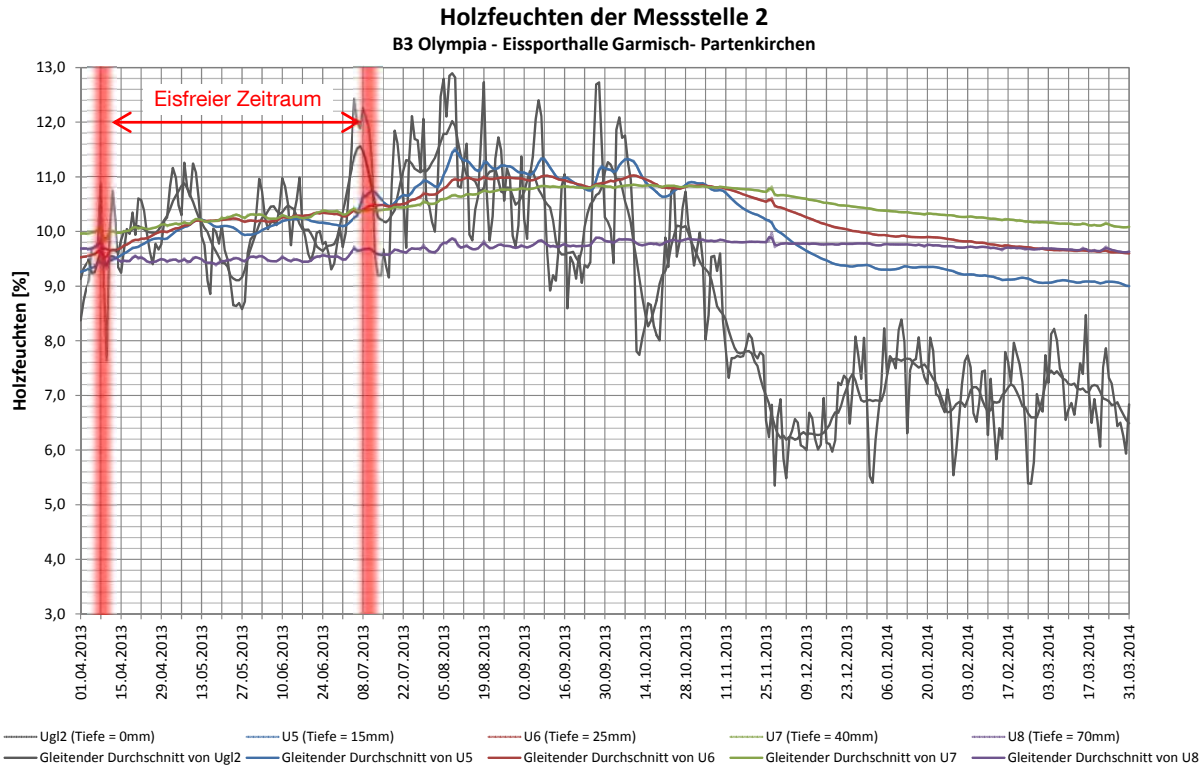
Messstelle 2: Obergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von oben
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessun

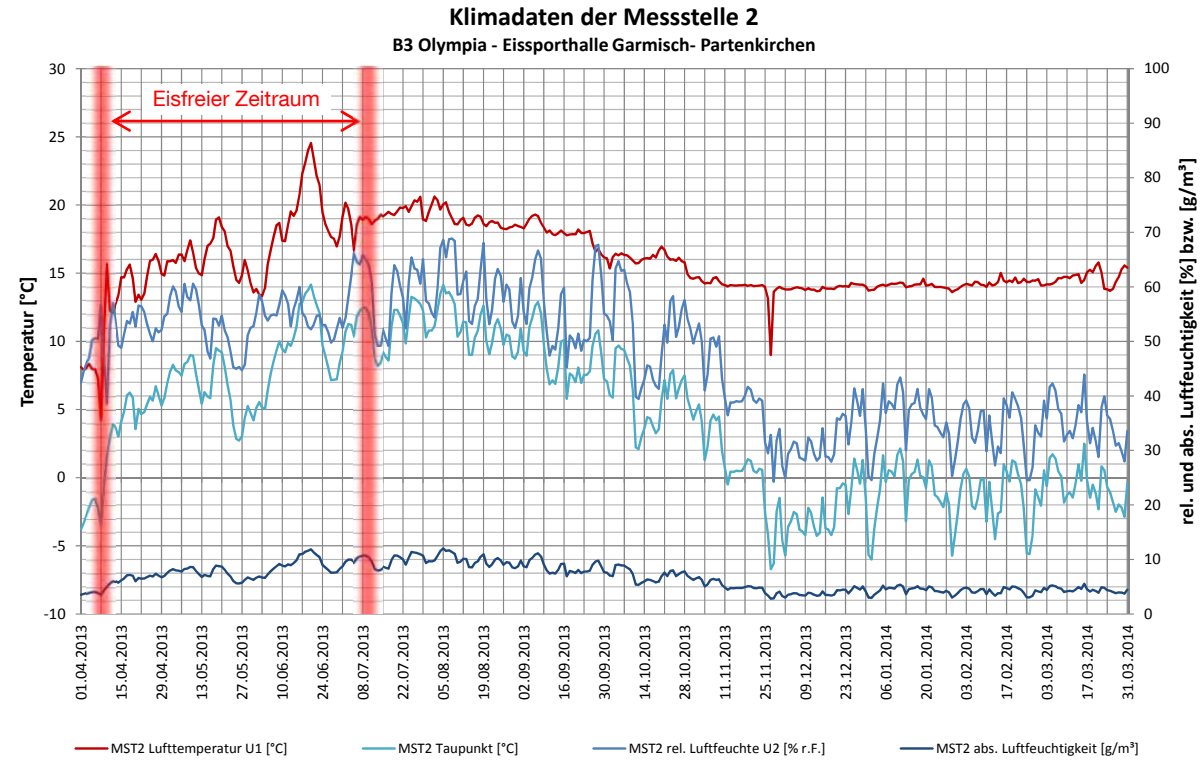




B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen

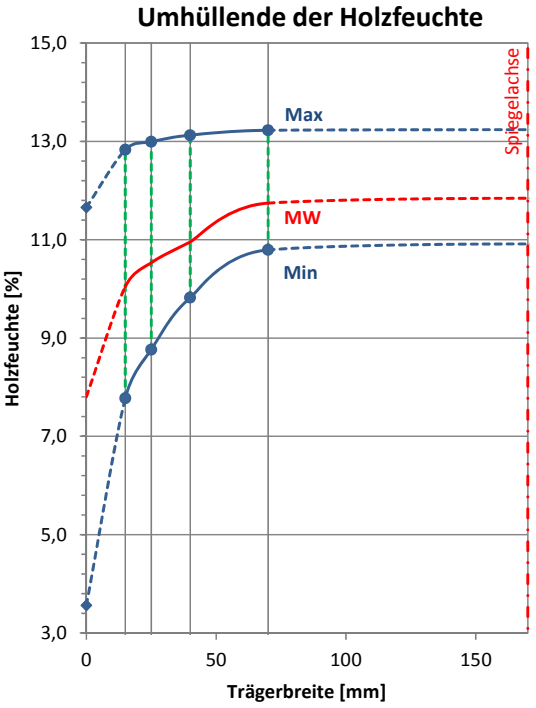
Messstelle 2: Obergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von oben
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

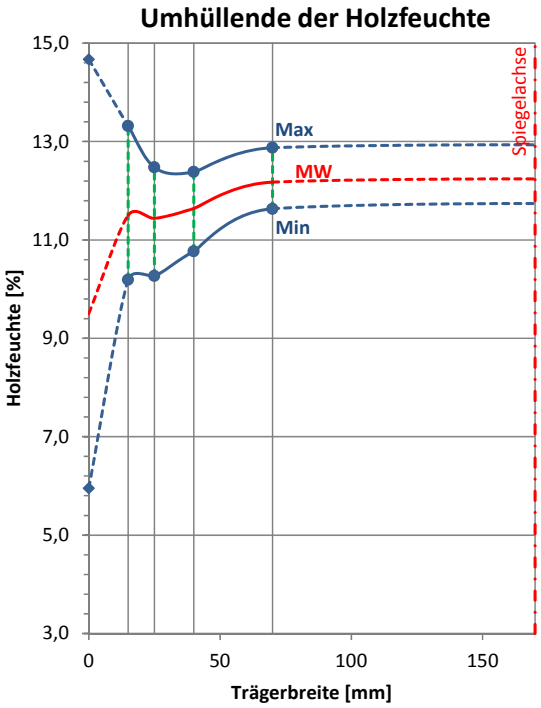


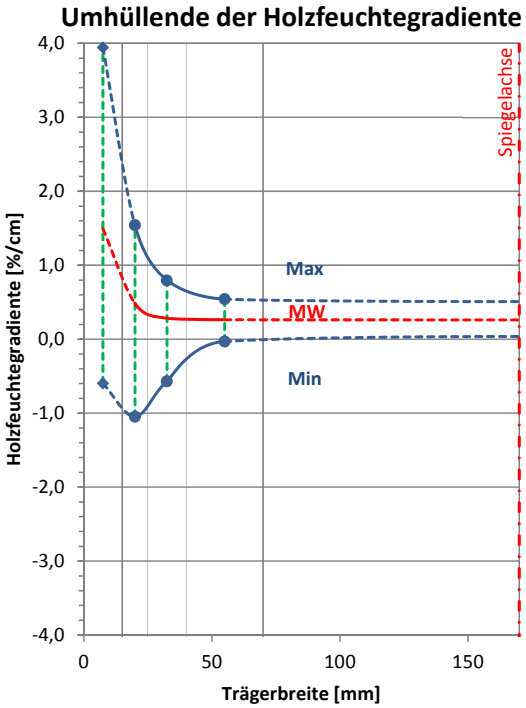


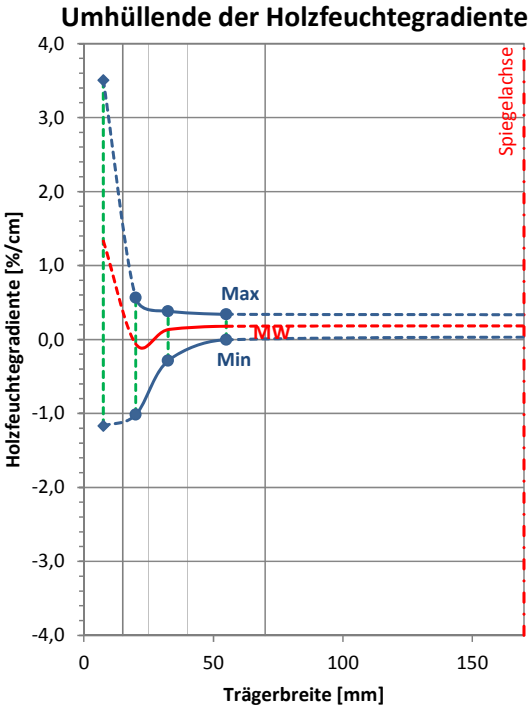
B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen

Messstelle 1: Untergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von unten
links: Messperiode 1- Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



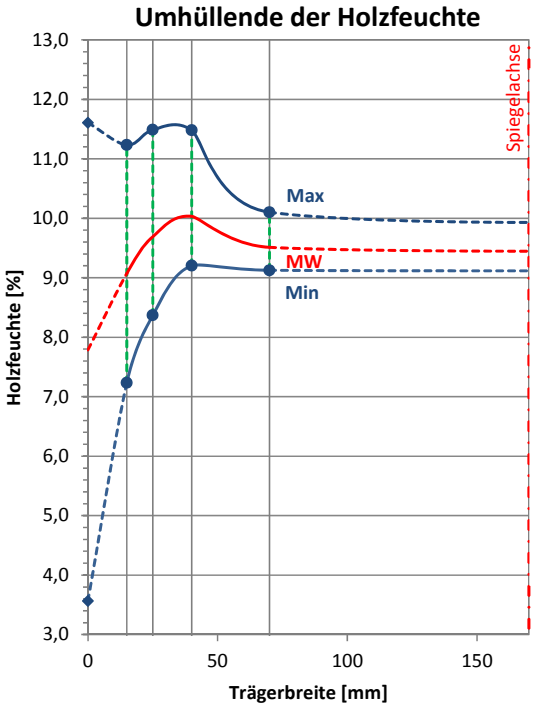


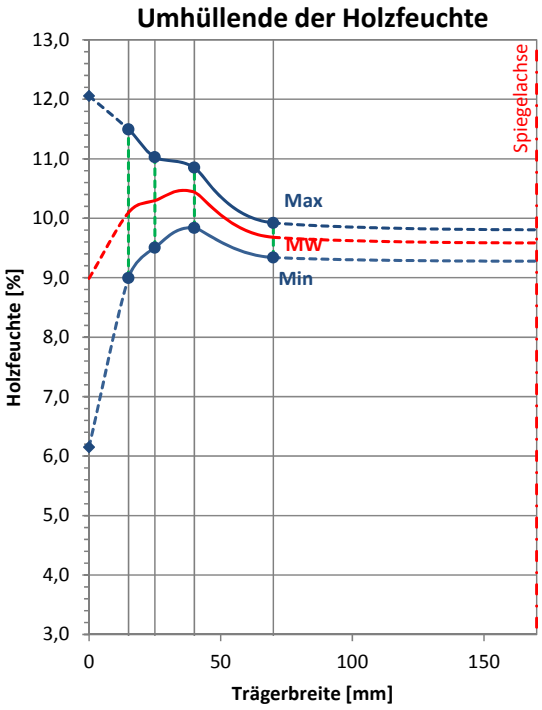


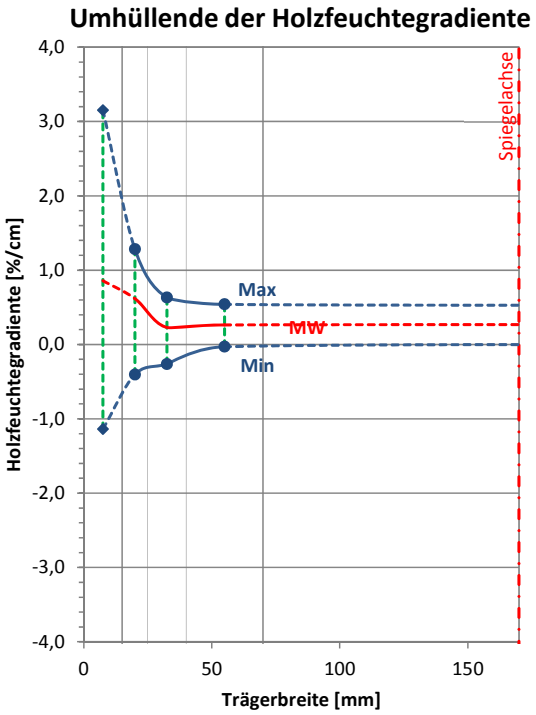


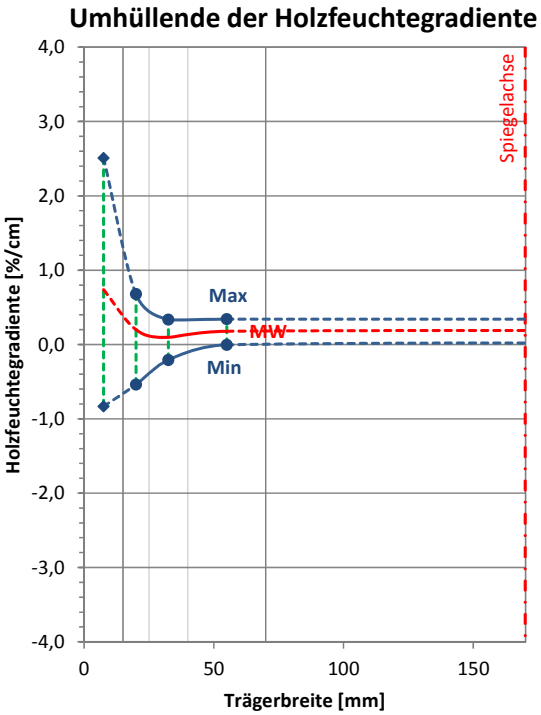
B3 Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen

Messstelle 2: Obergurt Fachwerkträger, mittig über Eisfläche, 3. Lamelle von oben
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen

Anschrift:	Bundesleistungszentrum f. Eishockey Füssen Verwaltung: Fr. Jasmin Wöhrle Am Kobelhang D 87629 Füssen
Ansprechpartner:	Eismeister Thomas Meier
Anwesende vor Ort:	Andreas Gamper, Manuel Waidelich, Hr. Meier

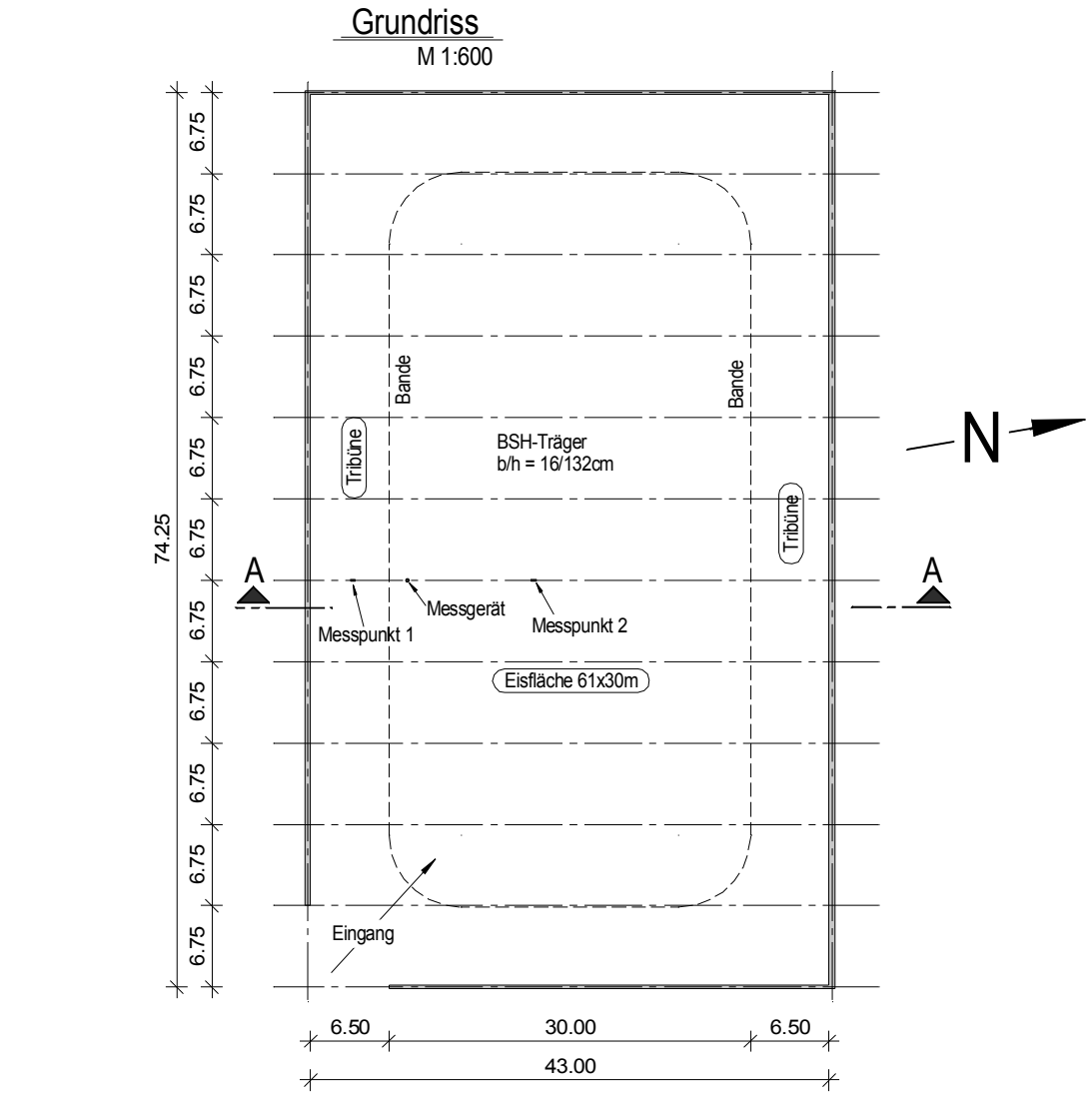
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	28.09.2010, 09:00 – 12:00	11.12.2013, 09:00 – 12:00
Letztes Auslesedatum	03.11.2011, 07:30 – 08:30	08.05.2014, 11:30 – 12:30

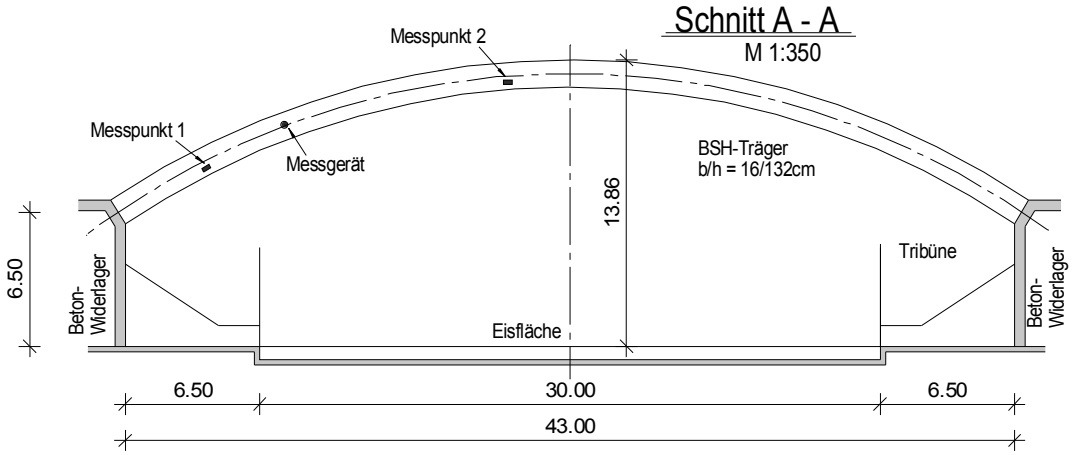
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, beheizter, konstruktiv gedämmter Raum Temperatur: 5,3 °C; Luftfeuchte: 72,6 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Über Tribüne ca. 3,5 m von Bande, Höhe ca. 6,0 m über der Tribüne; (möglichst zentral über der Tribüne um den Einfluss der Besucher bei Veranstaltungen zu erfassen)
Messstelle 2:	Über Eisfläche ca. 12,0 m von Bande, Höhe ca. 13,0 m über dem Eis; (möglichst zentral über der Eisfläche um den Einfluss der kalten Eisoberfläche zu erfassen)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	14,5	92,8	x–y: 6–5; 5°	Messstelle 1
u2	25	14,6	91,9	gemessene	
u3	40	14,3	93,0	Temperatur	
u4	70	13,8	94,9	t_1: 5,5°C	
u5	15	16,8	85,3	x–y: 6–5; 5°	Messstelle 2
u6	25	16,0	87,2	gemessene	
u7	40	15,3	89,8	Temperatur	
u8	70	14,8	91,4	t_2: 5,3°C	

Tragsystem:	Dreigelenkbogen auf Widerlagern in Massivbauweise, Spannweite ℓ = 43,0 m, Trägerachsabstand e = 6,767 m Trägerabmessungen b/h = 16/132 cm² Lammellenstärke t = 32 mm Filmbildender Anstrich

Skizzen:


Grundriss
M 1:600
74.25
6.75
Bande
Bande
Tribüne
Tribüne
BSH-Träger
b/h = 16/132cm
N
A
A
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
Eisfläche 61x30m
Eingang
6.50
30.00
6.50
43.00


Schnitt A - A
M 1:350
Messpunkt 2
Messpunkt 1
Messgerät
BSH-Träger
b/h = 16/132cm
13.86
6.50
Beton-
Widerlager
Tribüne
Eisfläche
Beton-
Widerlager
6.50
30.00
6.50
43.00

Bilder:



Abbildung B4-1: Ansicht Tragwerk

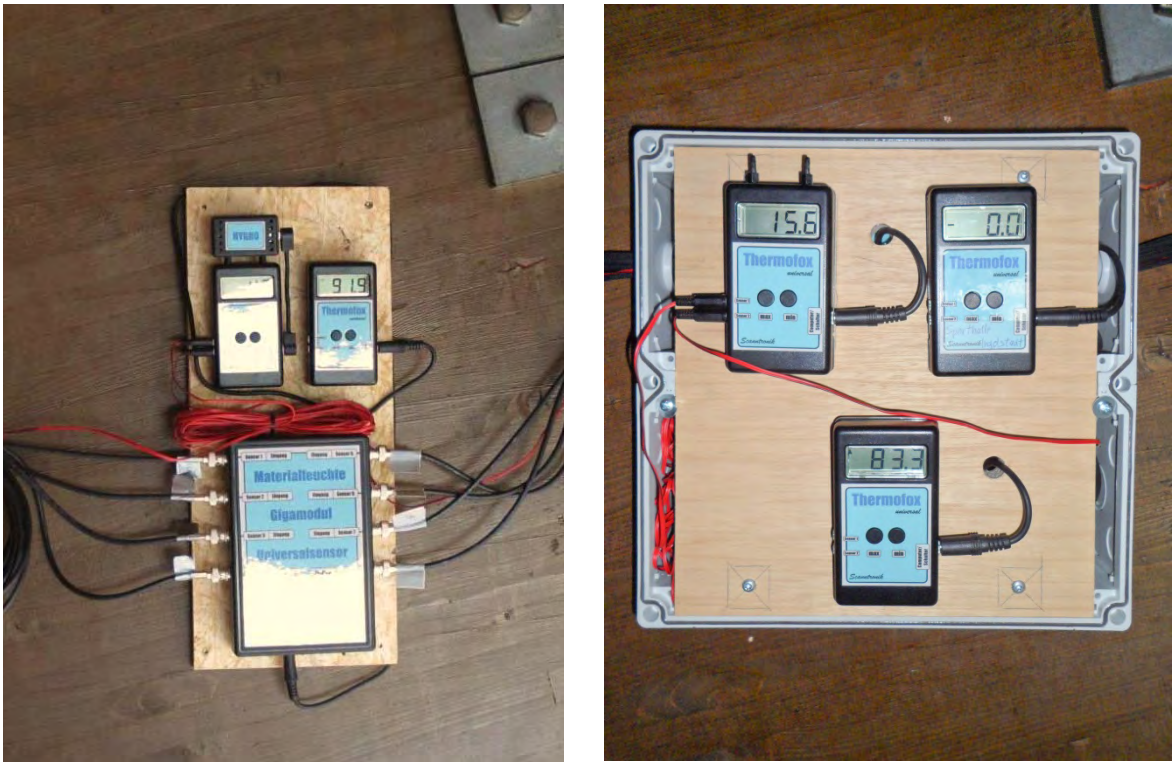


Abbildung B4-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2

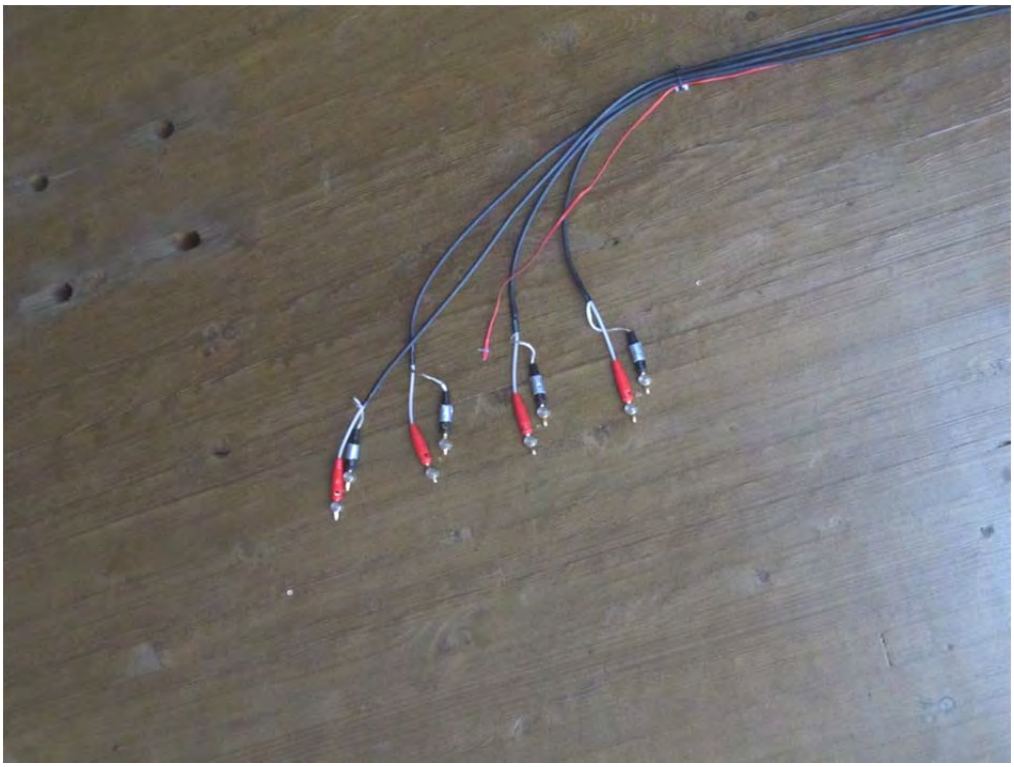


Abbildung B4-3: Ansicht Messstelle 1

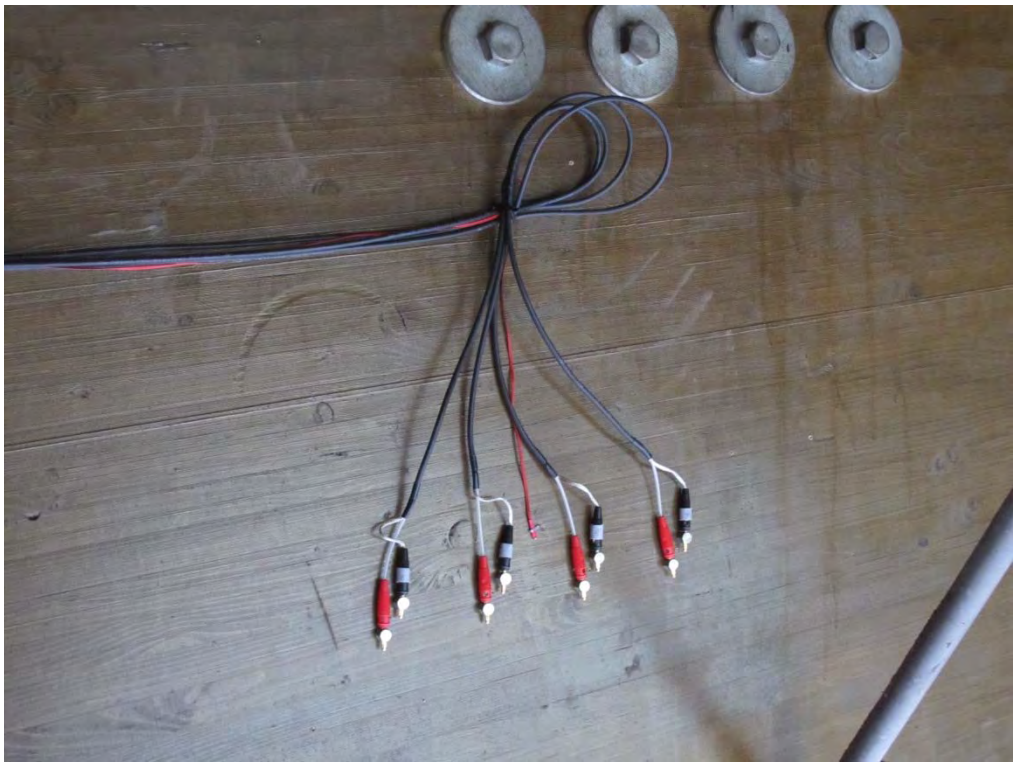
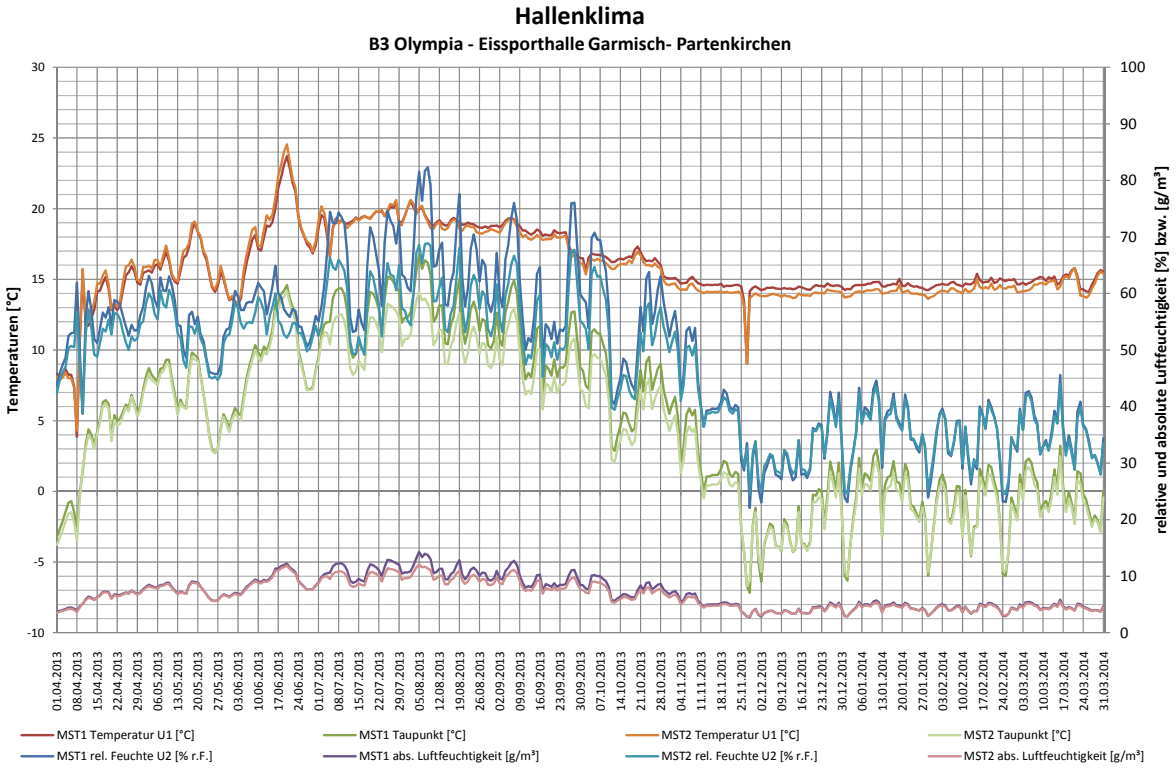


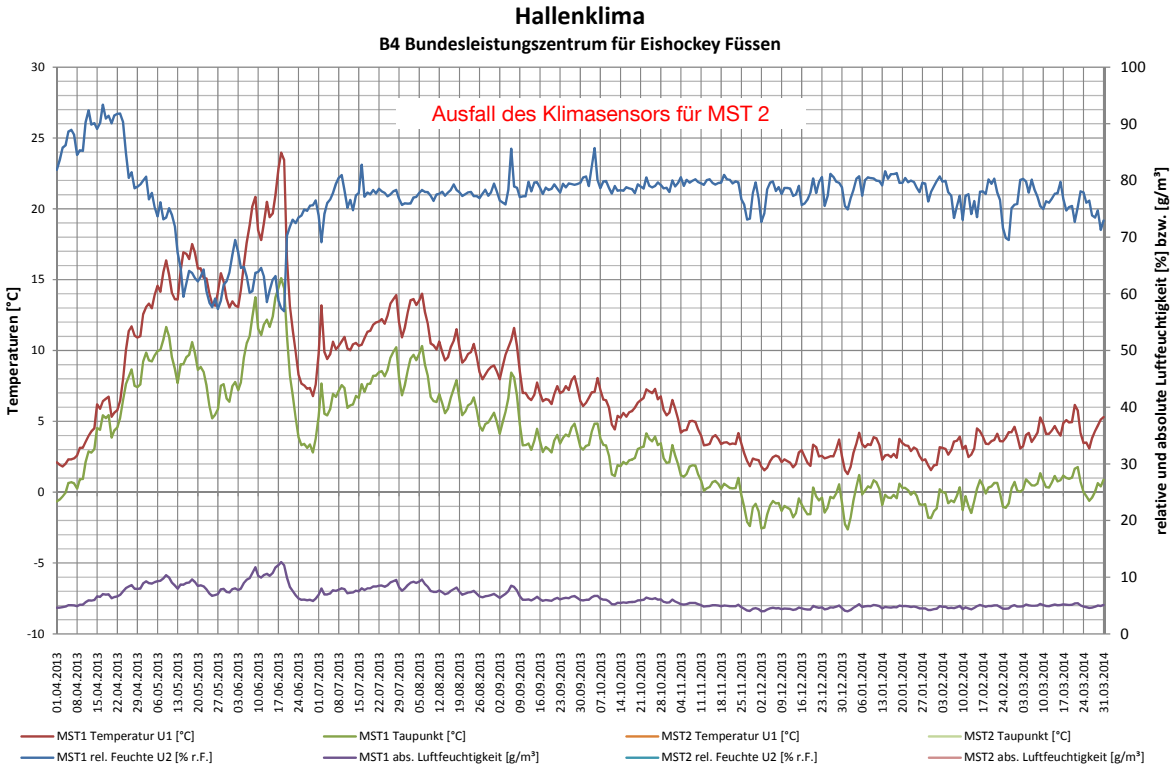
Abbildung B4-4: Ansicht Messstelle 2

B4 BLZ Füssen

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

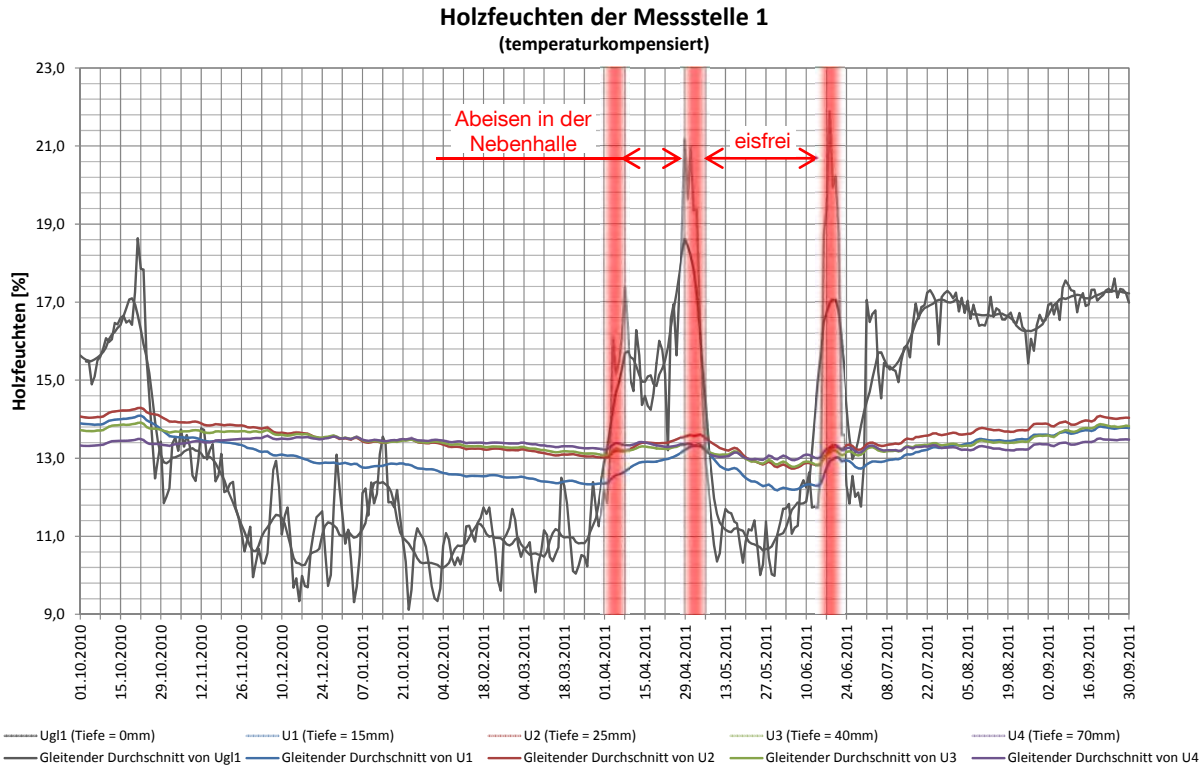


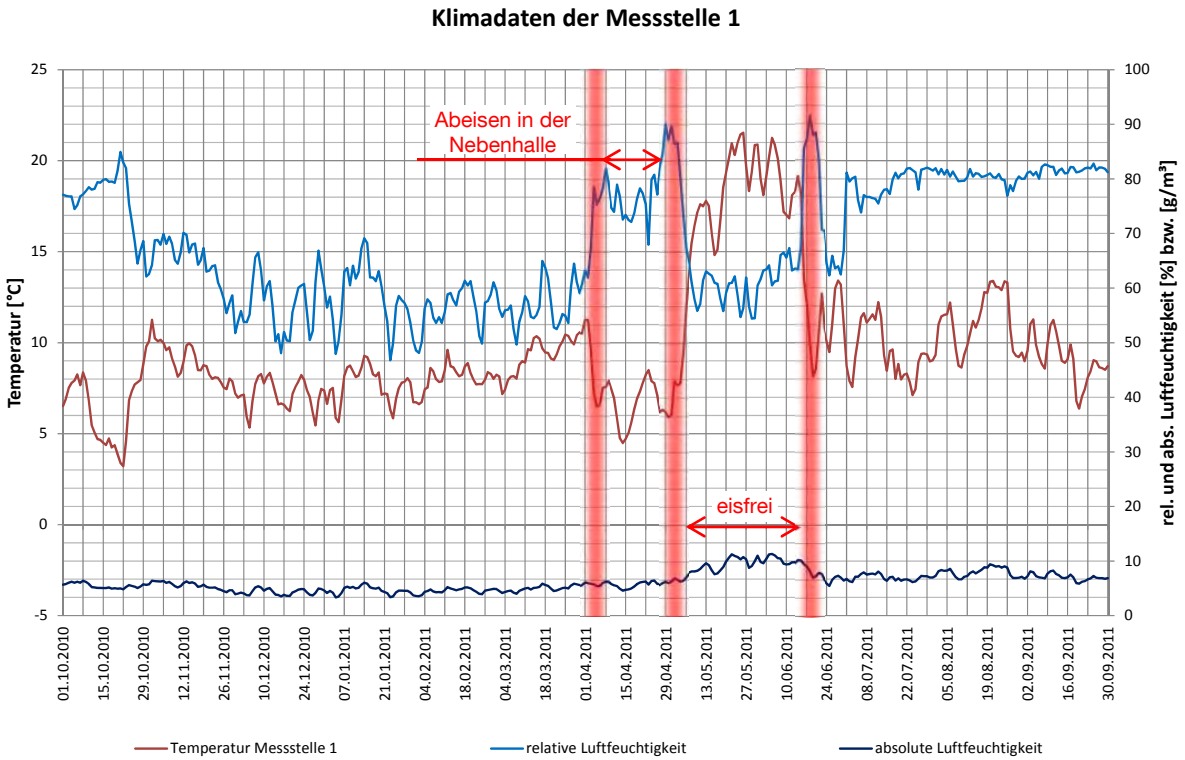
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen

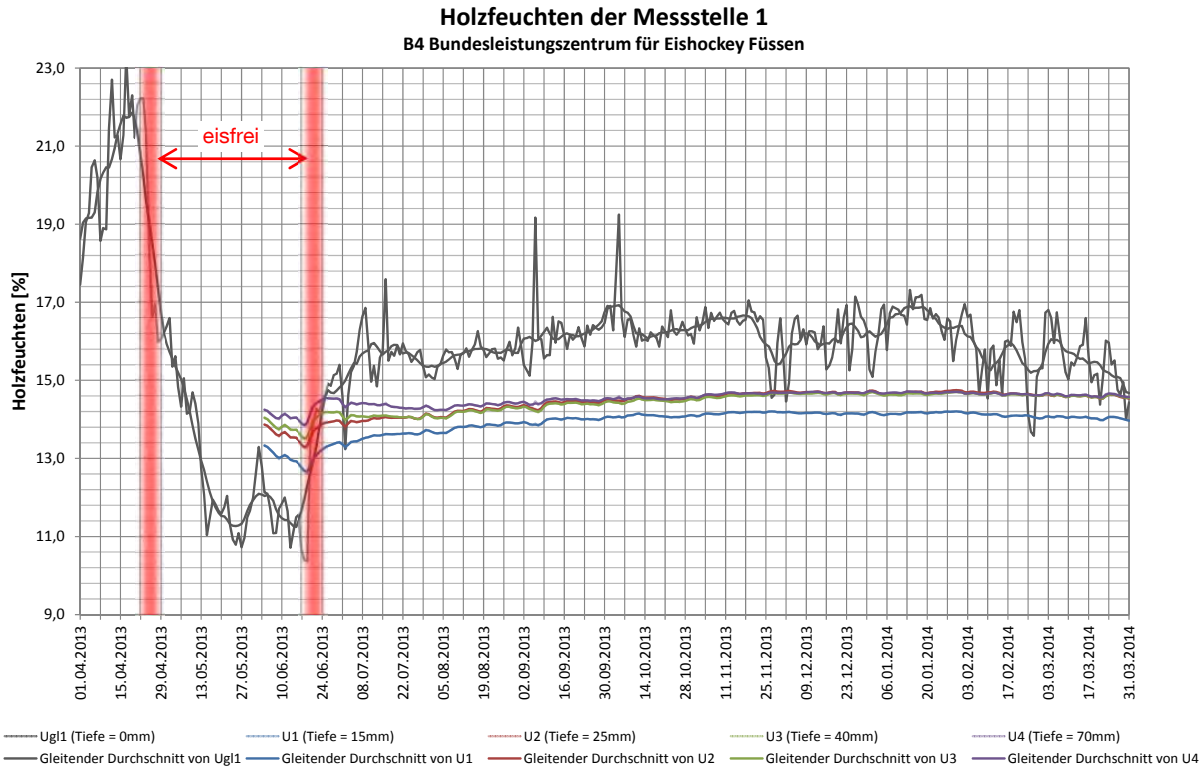
Messstelle 1: Über Tribüne ca. 3,5 m von Bande, Höhe ca. 6,0 m über der Tribüne
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

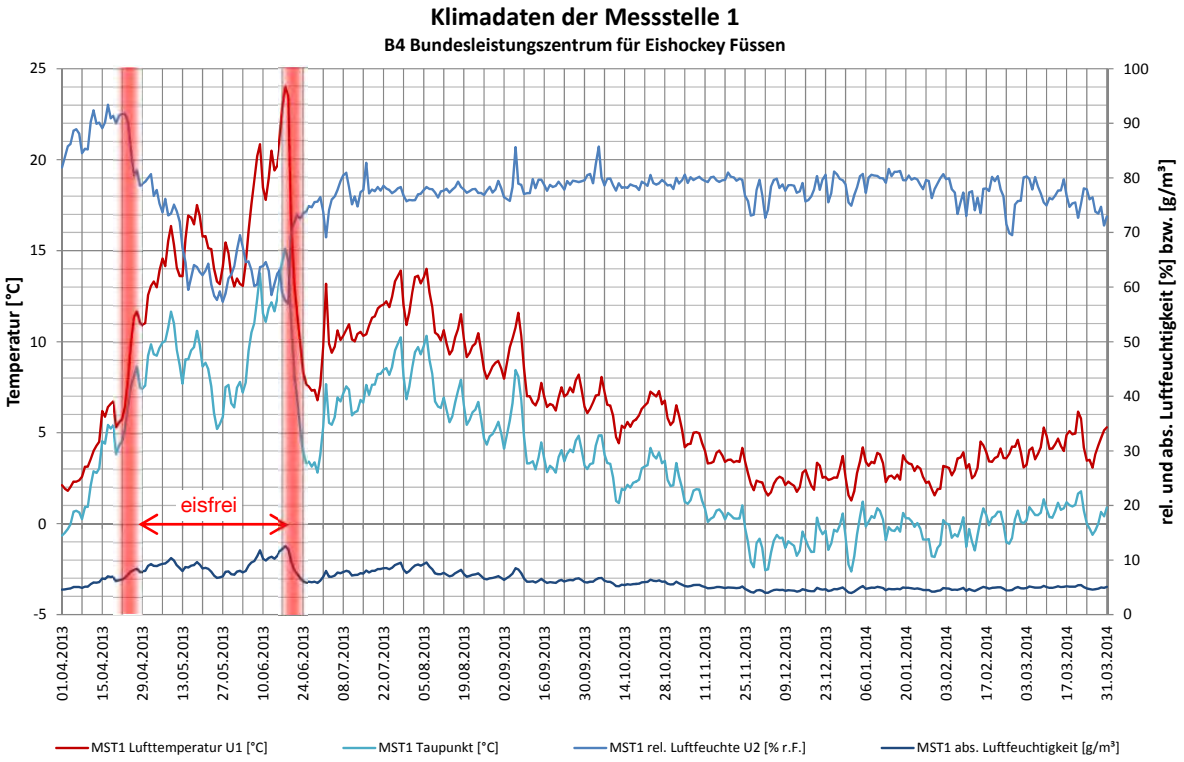




B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen

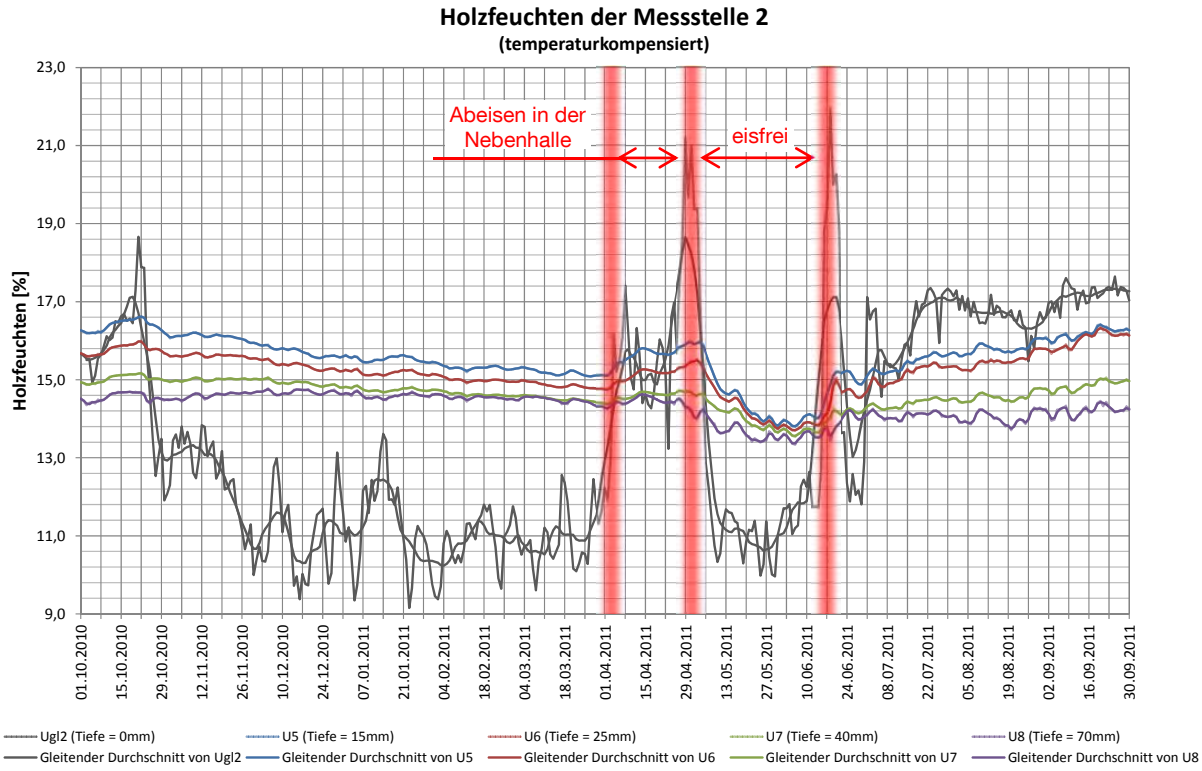
Messstelle 1: Über Tribüne ca. 3,5 m von Bande, Höhe ca. 6,0 m über der Tribüne
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

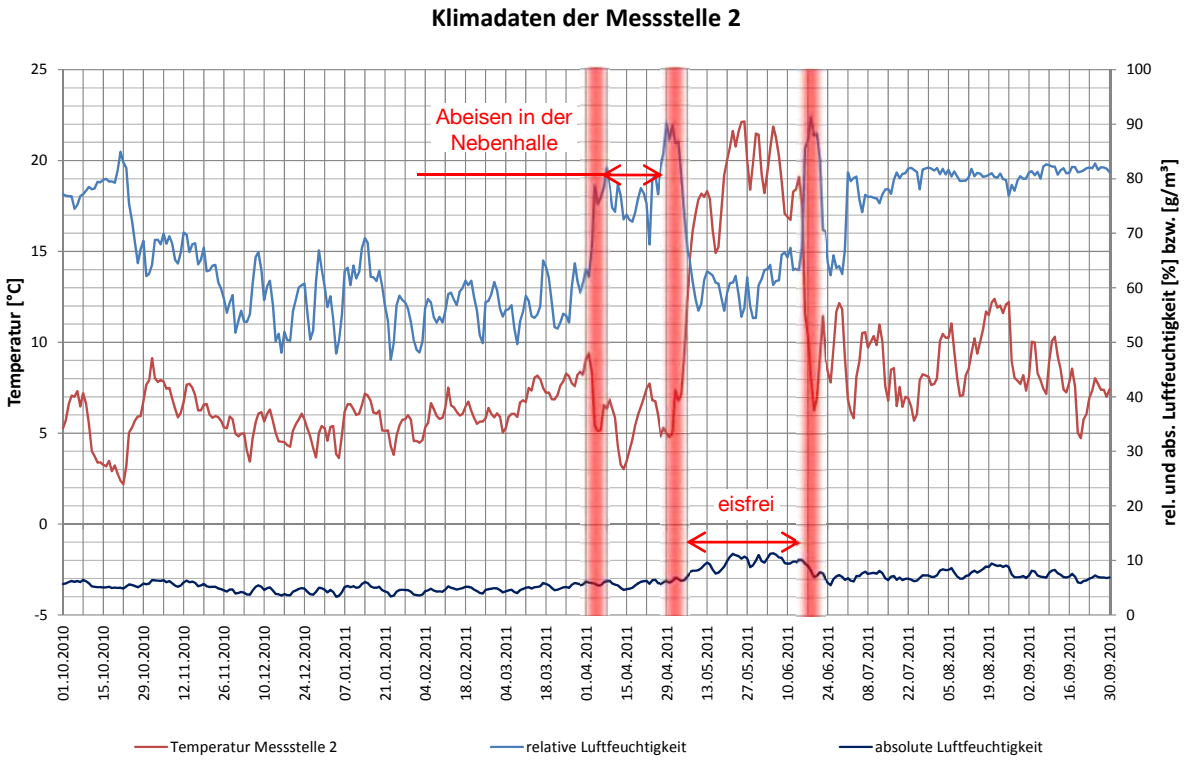




B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen

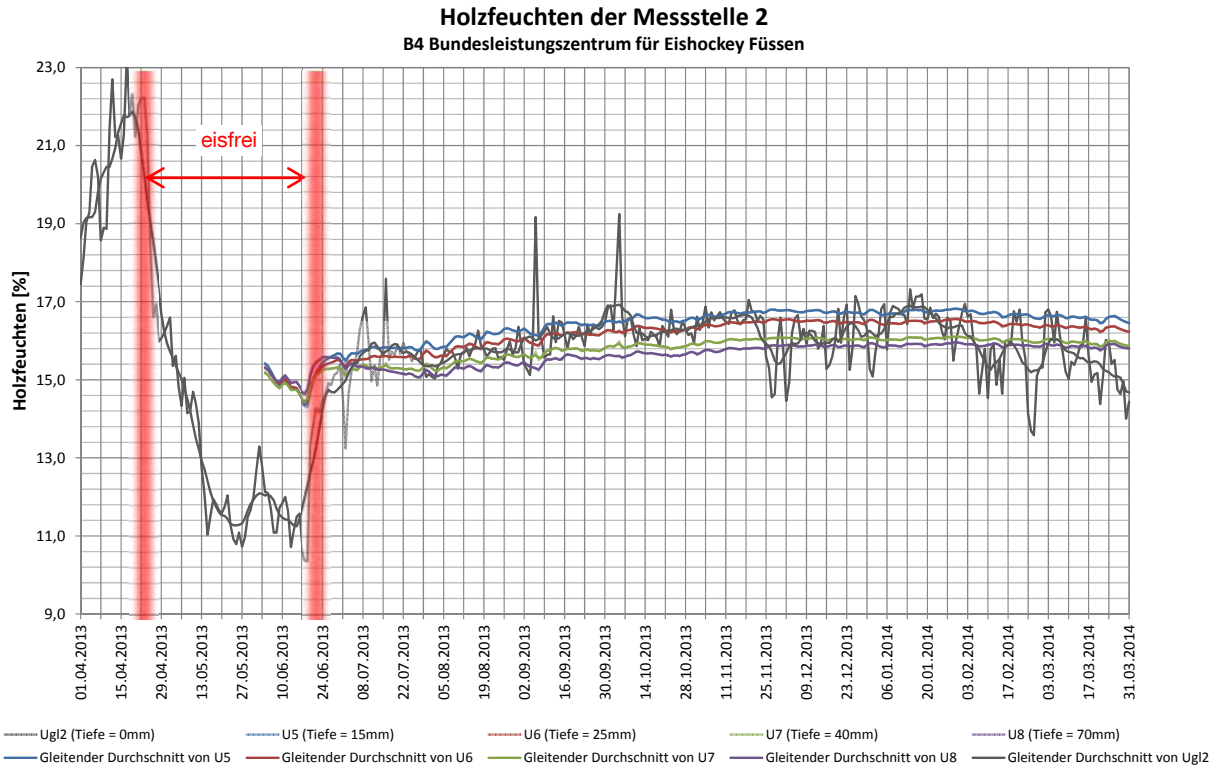
Messstelle 2: Über Eisfläche ca. 12,0 m von Bande, Höhe ca. 13,0 m über dem Eis
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

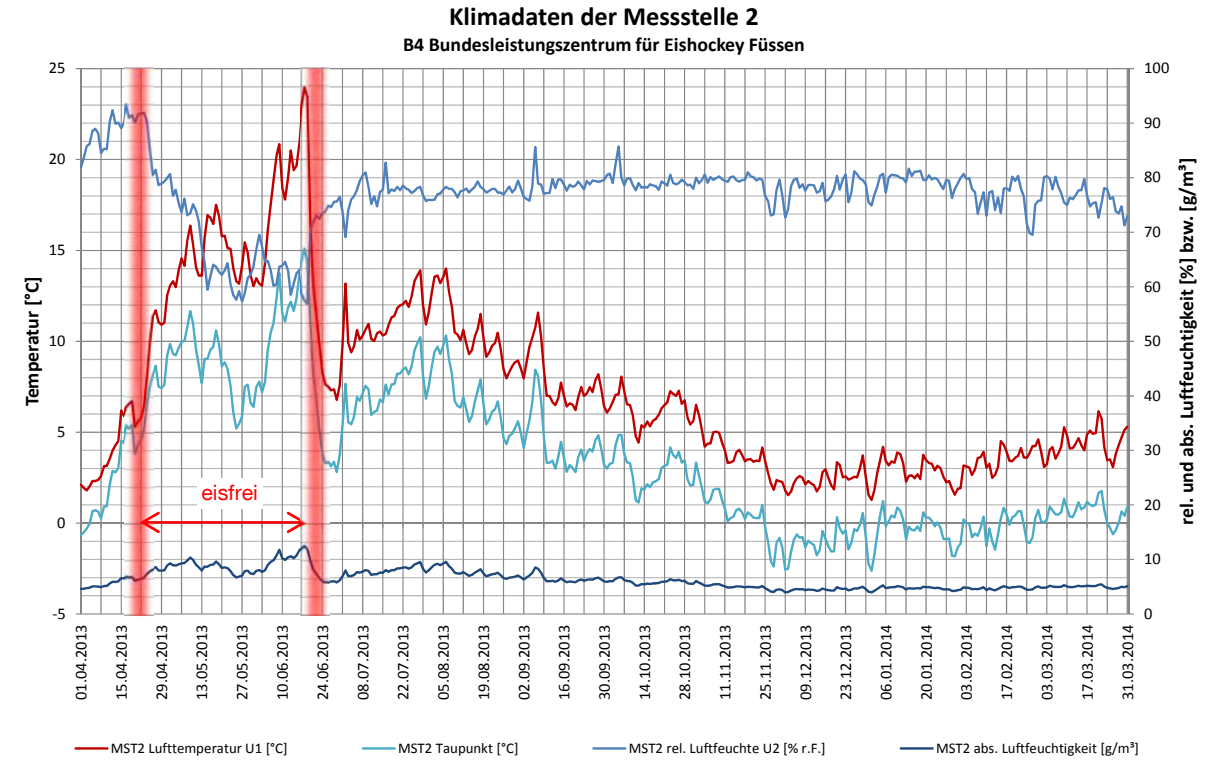




B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen

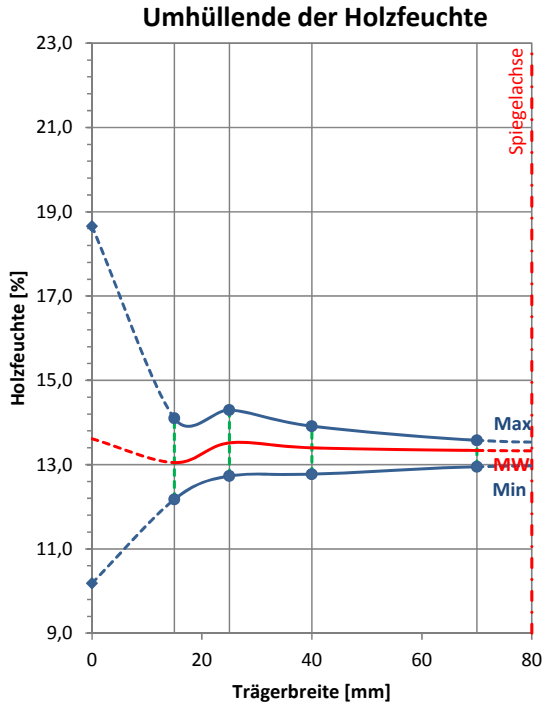
Messstelle 2: Über Eisfläche ca. 12,0 m von Bande, Höhe ca. 13,0 m über dem Eis
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

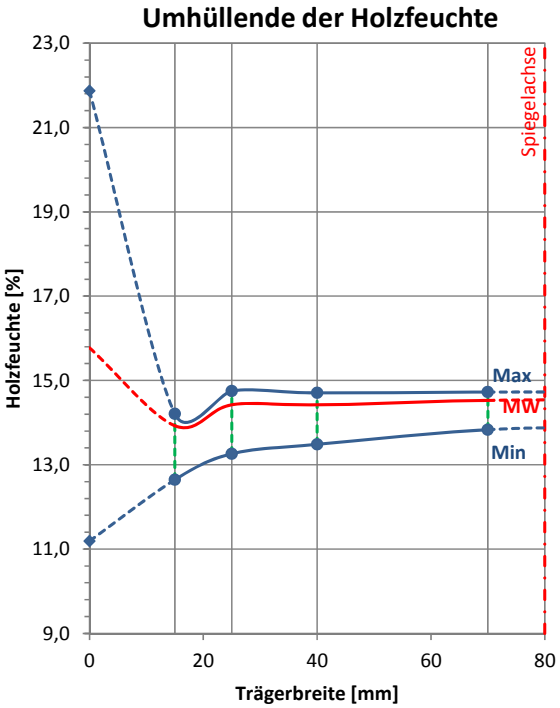


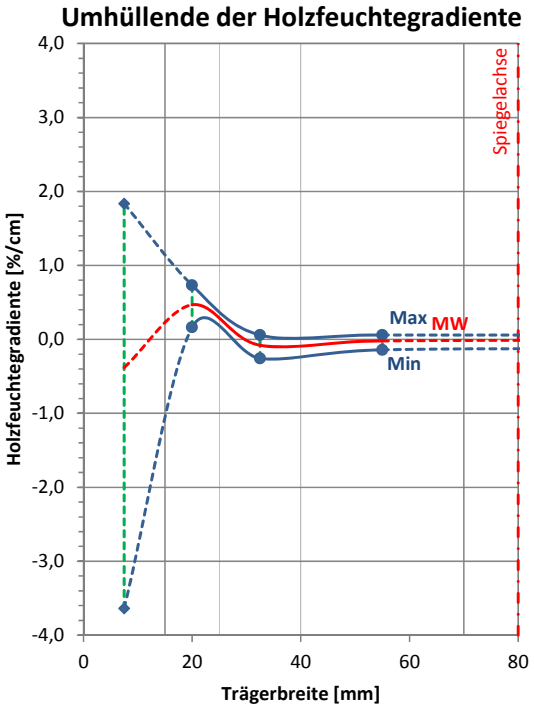


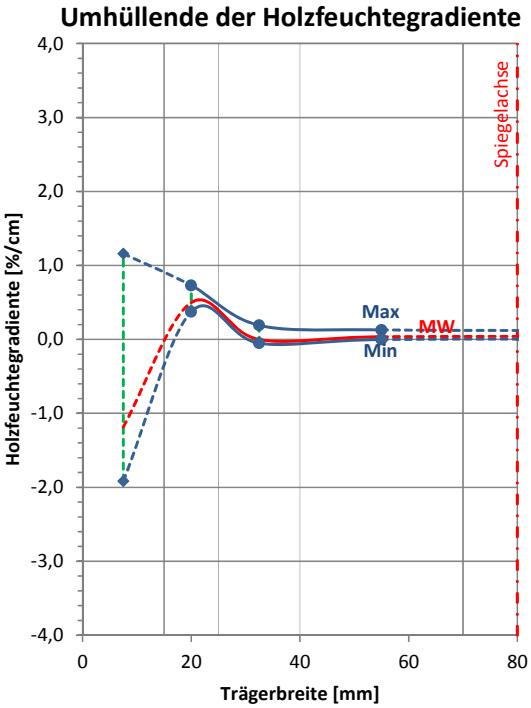
B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen

Messstelle 1: Über Tribüne ca. 3,5 m von Bande, Höhe ca. 6,0 m über der Tribüne
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



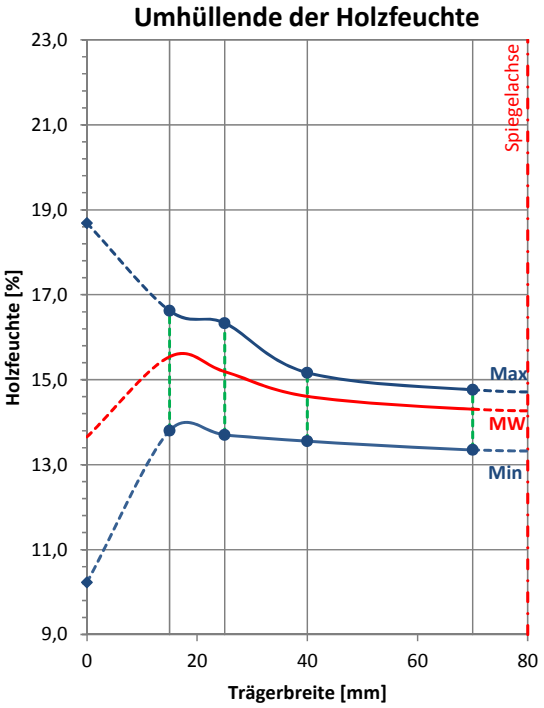


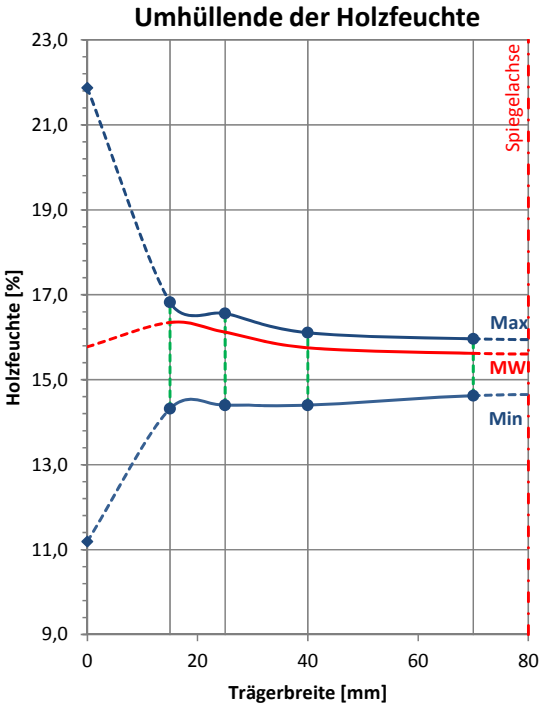


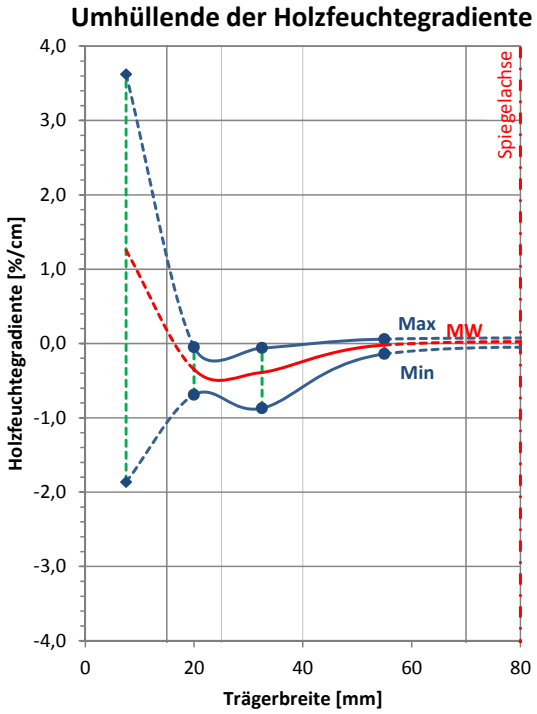


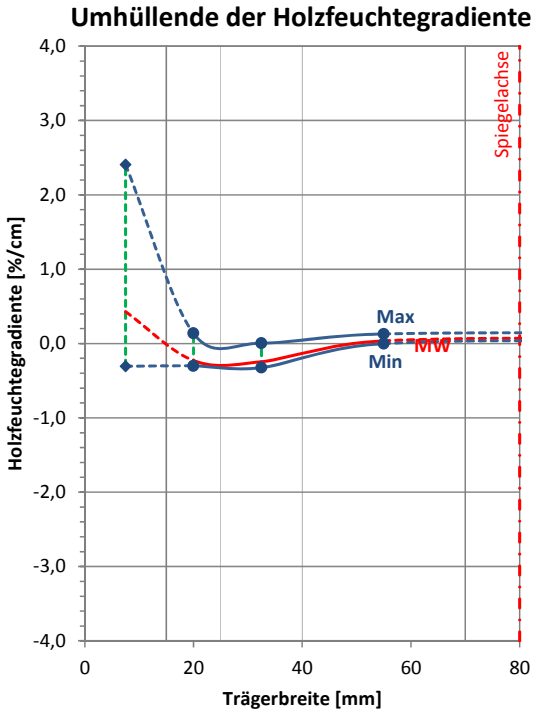
B4 Bundesleistungszentrum für Eishockey Füssen

Messstelle 2: Über Eisfläche ca. 12,0 m von Bande, Höhe ca. 13,0 m über dem Eis
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









C1 Olympia-Reithalle München-Riem

Anschrift:	Olympia-Reithalle München-Riem Landshamer Straße 11 81929 München
Ansprechpartner:	Herr Hohlmeier (vor Ort)
Anwesende vor Ort:	Andreas Gamper, Manuel Waidelich, Hr. Hohlmeier

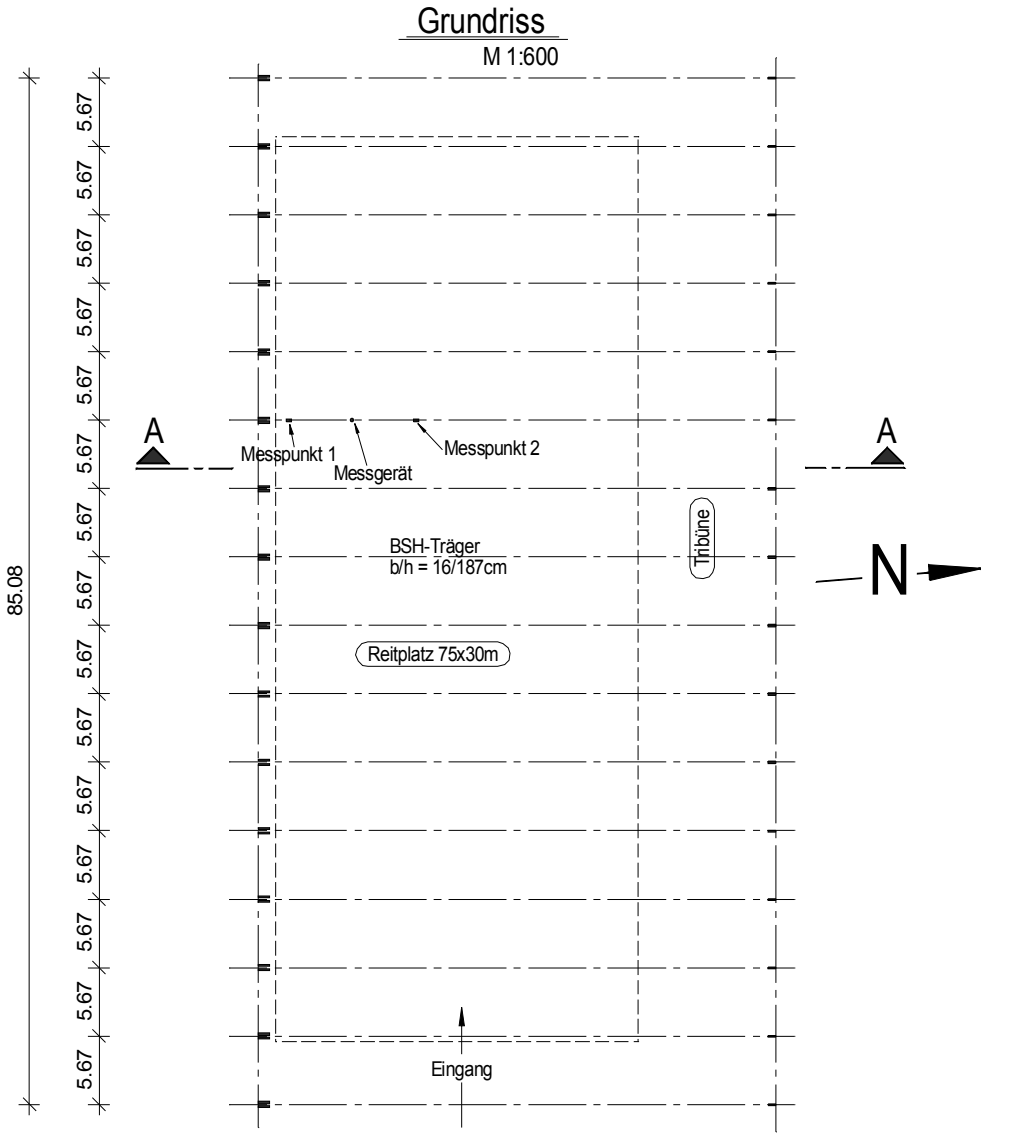
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	30.09.2010, 15:45 – 17:15	21.03.2013, 13:00 -14:00
Letztes Auslesedatum	11.10.2011, 13:00 – 14:00	08.05.2014, 09:00 -10:00

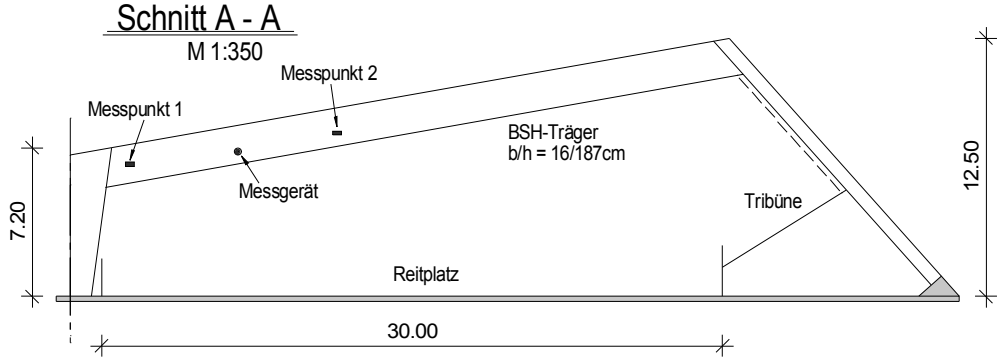
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, unbeheizter, konstruktiv gedämmter Raum Temperatur: 14,1 °C; Luftfeuchte: 63,7 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Randbereich über Reitfläche, nahe Rahmenecke (Regelbereich, eventuell Beeinflussung durch Lichtband in der Rahmenecke)
Messstelle 2:	Zentraler Bereich über Reitfläche (Regelbereich, Einfluss des feuchten Hallenbodens)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	16,8	79,0	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 1
u2	25	16,6	79,4	Gemessene	
u3	40	16,9	78,5	Temperatur	
u4	70	16,4	80,1	t_1: 13,3°C	
u5	15	17,4	76,9	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 2
u6	25	16,2	80,7	Gemessene	
u7	40	15,0	84,6	Temperatur	
u8	70	15,3	83,8	t_2: 14,8°C	

Tragsystem:	Dreigelenkrahmen auf Widerlagern in Massivbauweise 10 Achsen mit einem Trägerachsabstand e = 5,67 m Spannweite ℓ = 36,5 m, b/h 16/187 cm² Lammellenstärke t = 32 mm Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:600
85.08
5.67
A
A
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
BSH-Träger
b/h = 16/187cm
Tribüne
N
Reitplatz 75x30m
Eingang


Schnitt A - A
M 1:350
Messpunkt 2
Messpunkt 1
BSH-Träger
b/h = 16/187cm
Messgerät
Tribüne
Reitplatz
7.20
12.50
30.00

Bilder:



Abbildung C1-1: Ansicht Tragwerk

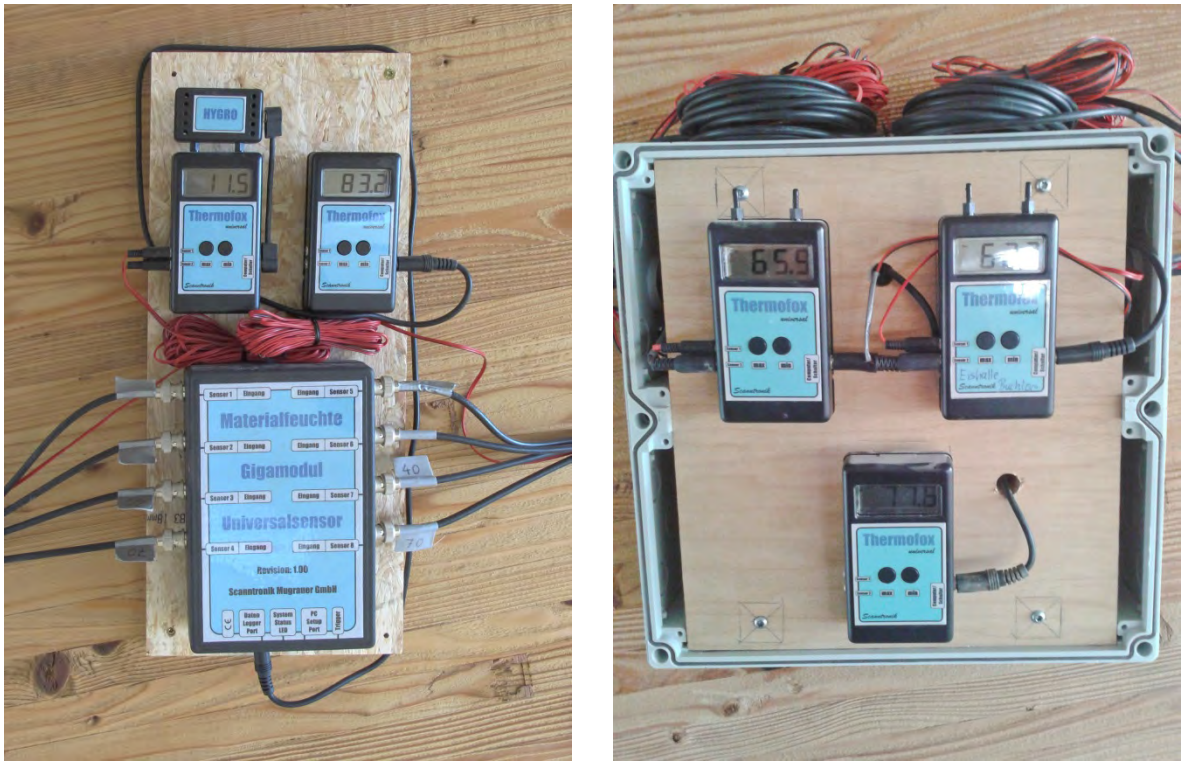


Abbildung C1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2



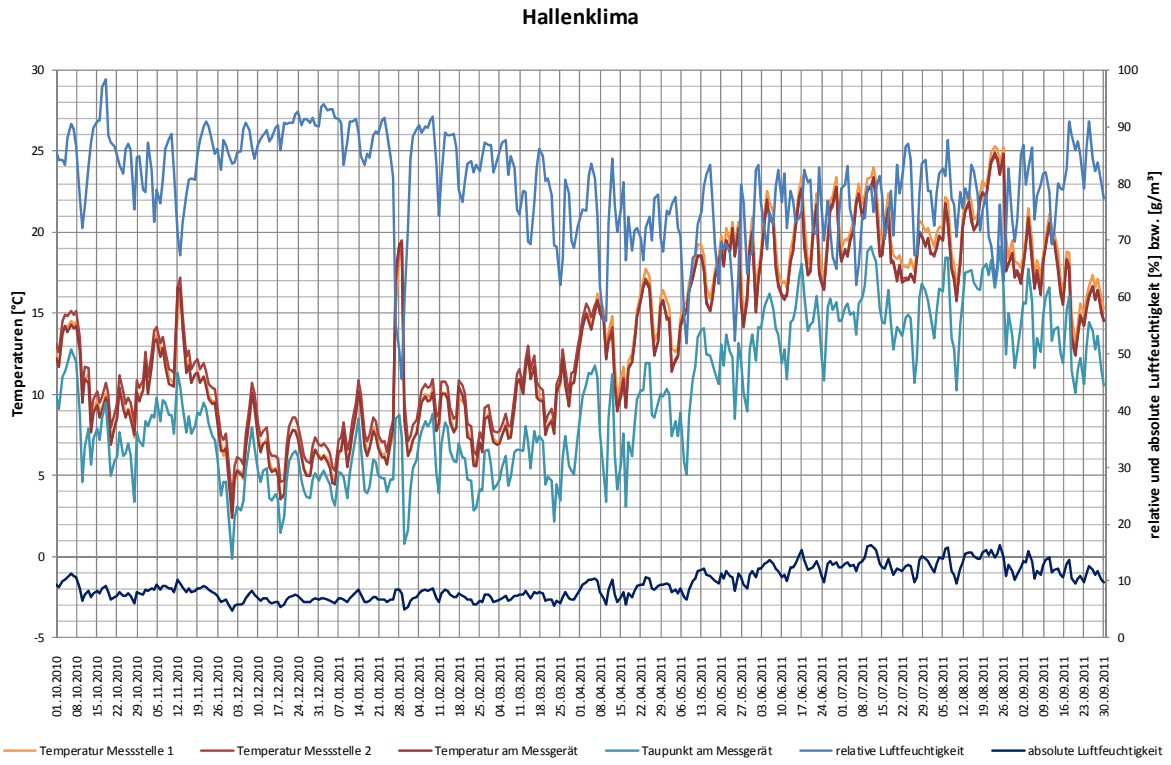
Abbildung C1-3: Ansicht Messstelle 1



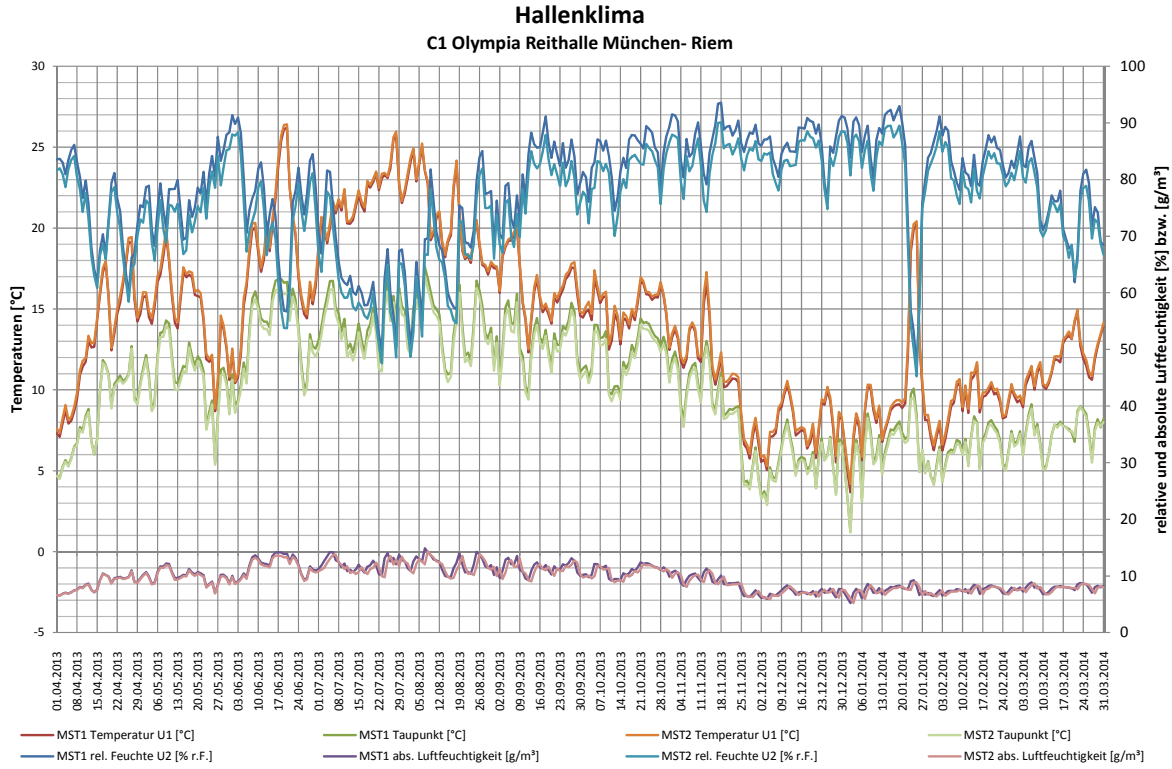
Abbildung C1-4: Ansicht Messstelle 2

C1 Olympia Reithalle Riem

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

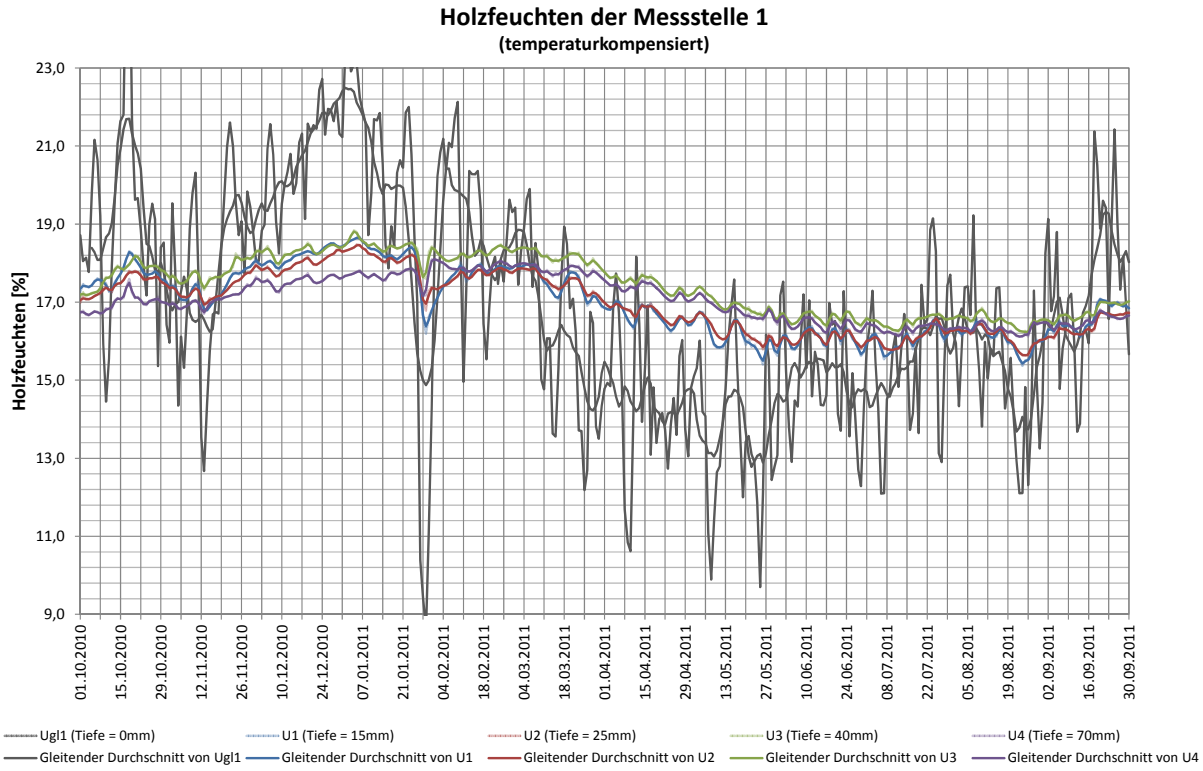


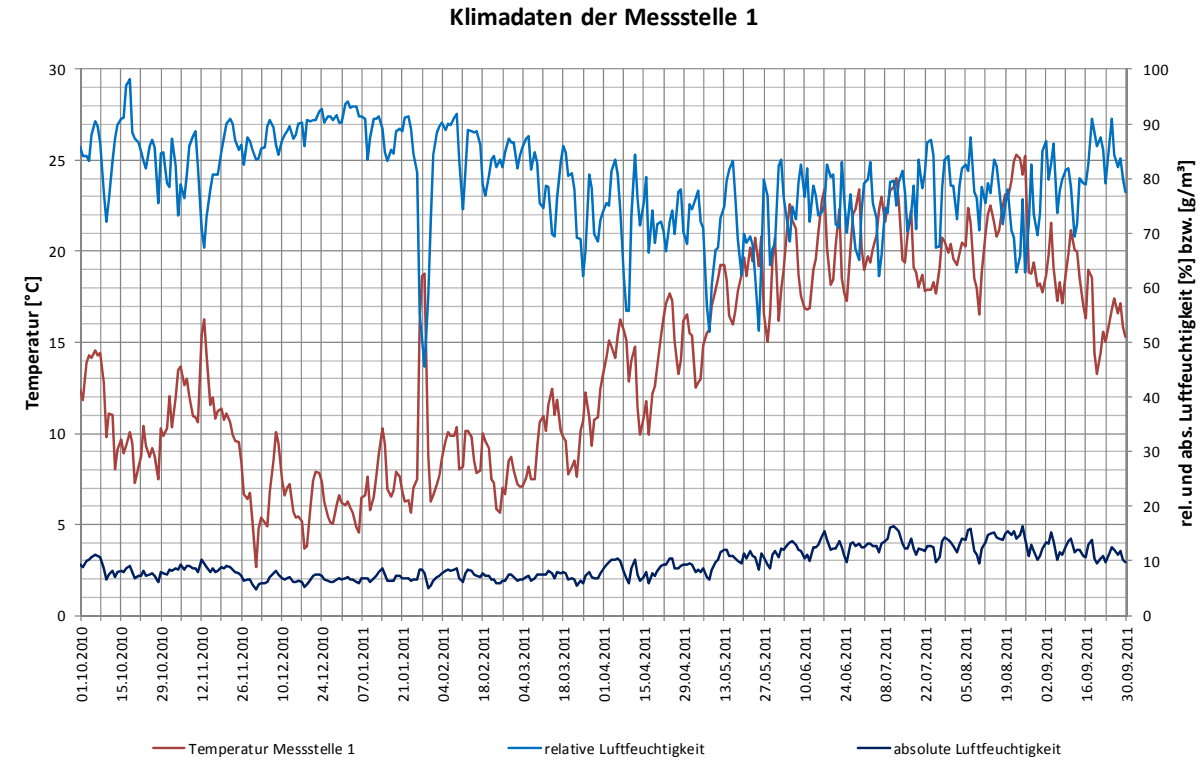
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



C1 Olympia-Reithalle München-Riem

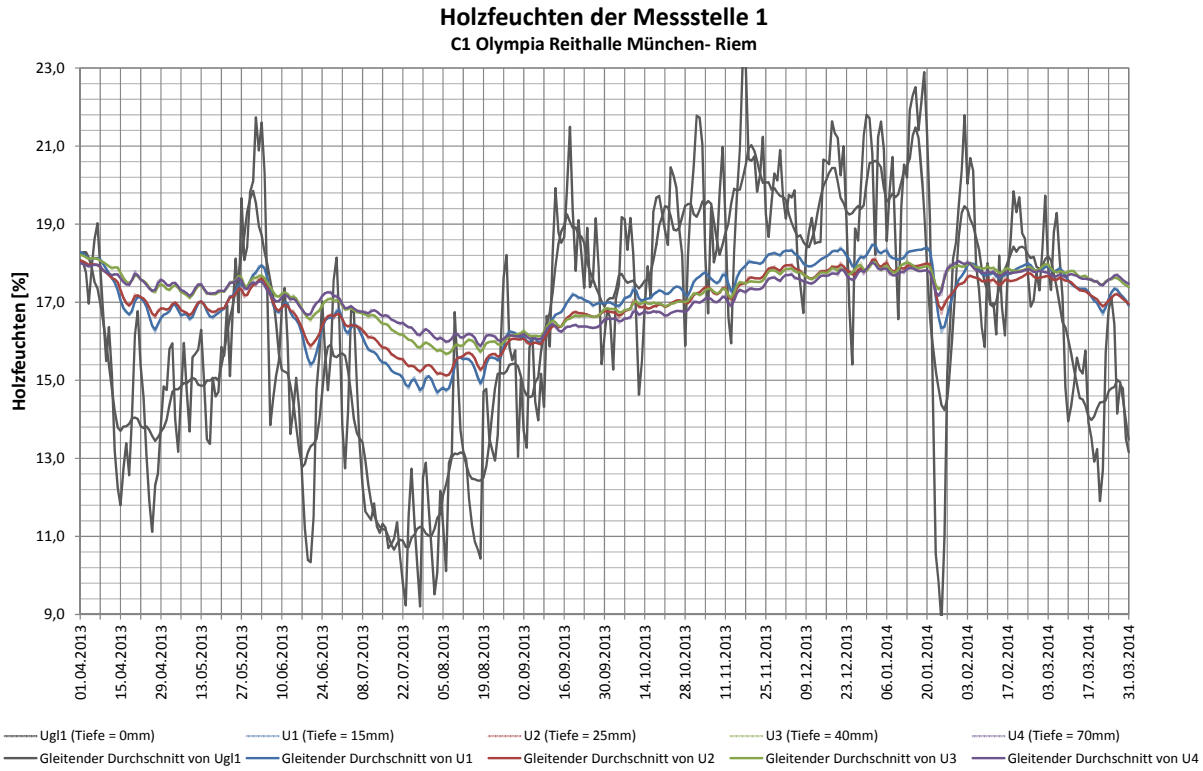
Messstelle 1: Randbereich über Reitfläche, nahe Rahmenecke
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

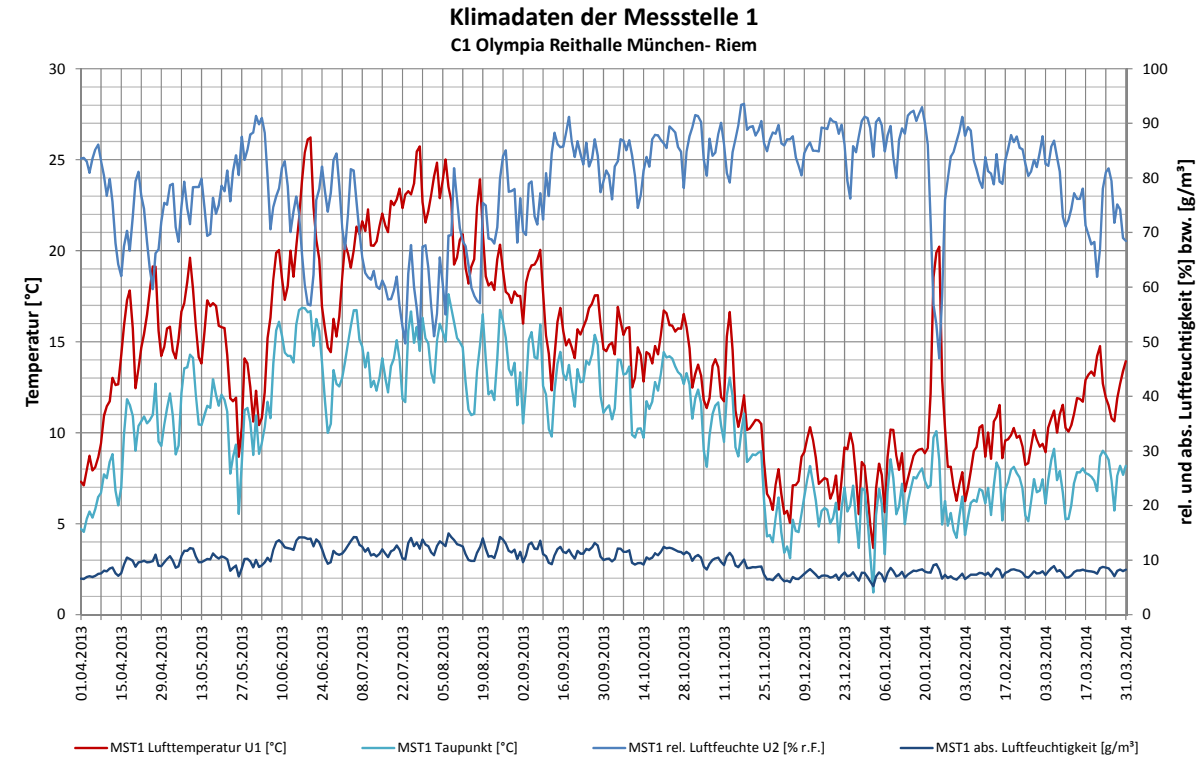




C1 Olympia-Reithalle München-Riem

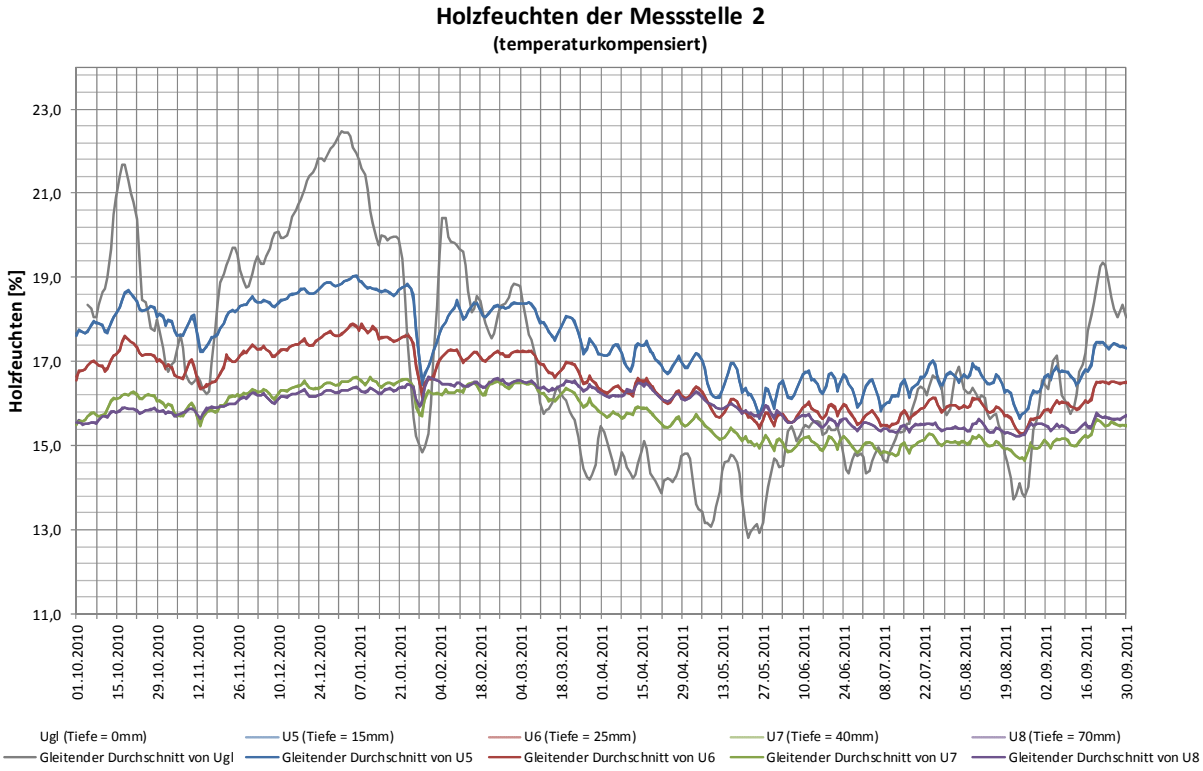
Messstelle 1: Randbereich über Reitfläche, nahe Rahmenecke
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

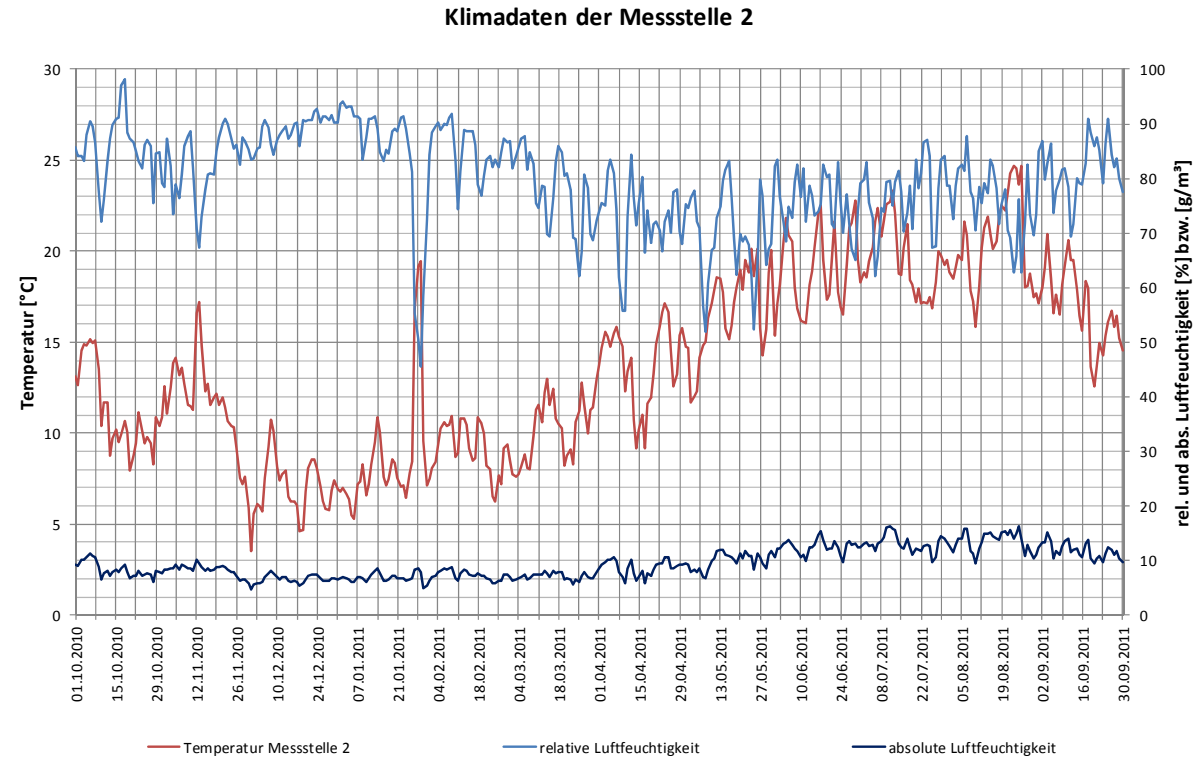




C1 Olympia-Reithalle München-Riem

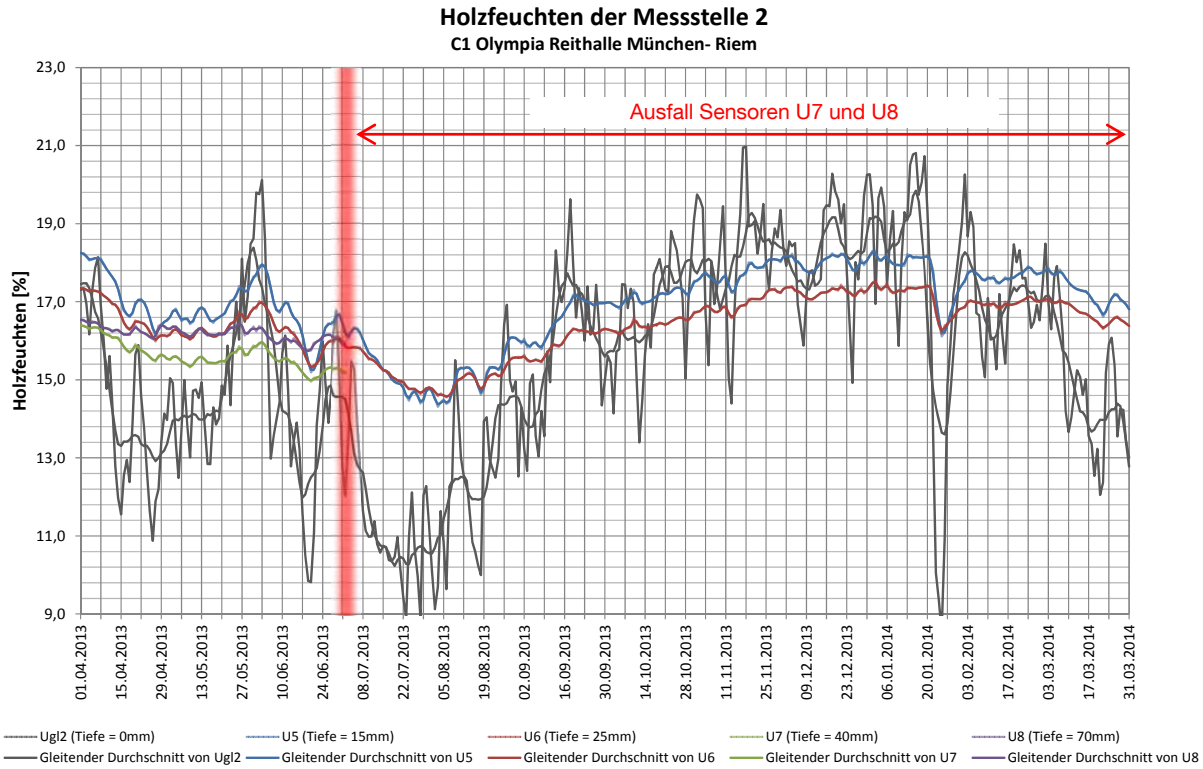
Messstelle 2: Zentraler Bereich über Reitfläche
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

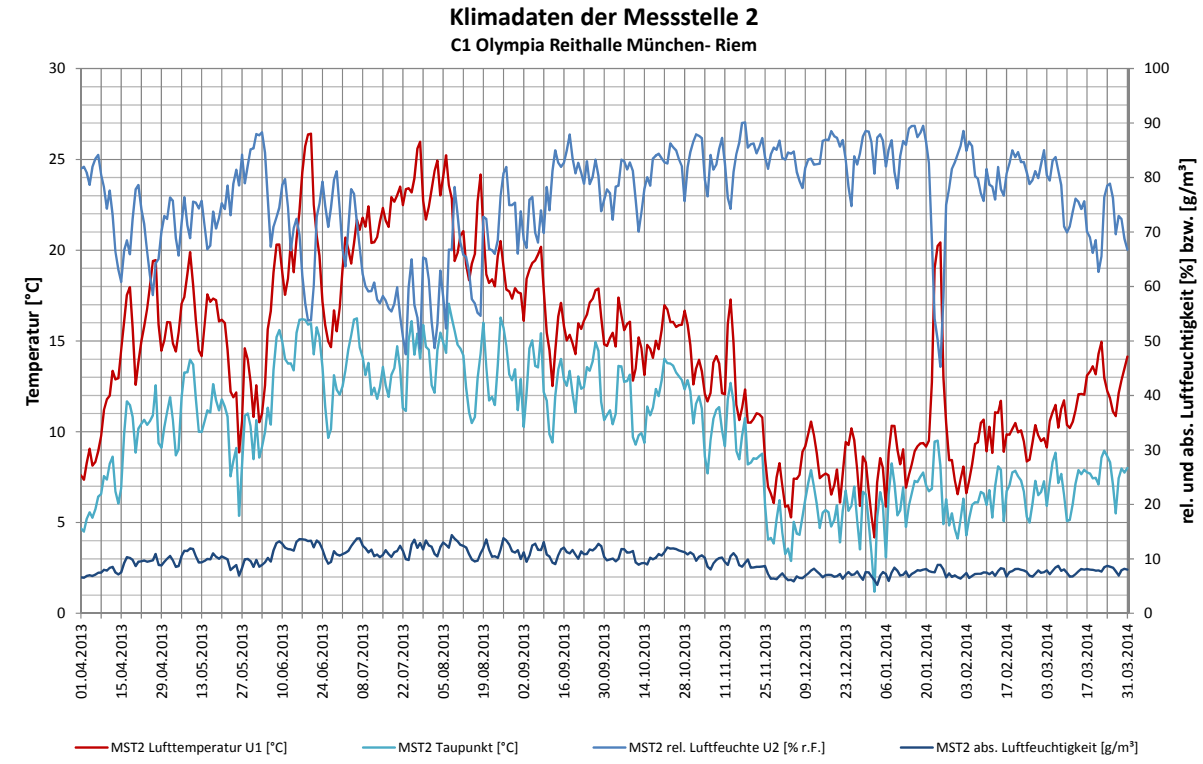




C1 Olympia-Reithalle München-Riem

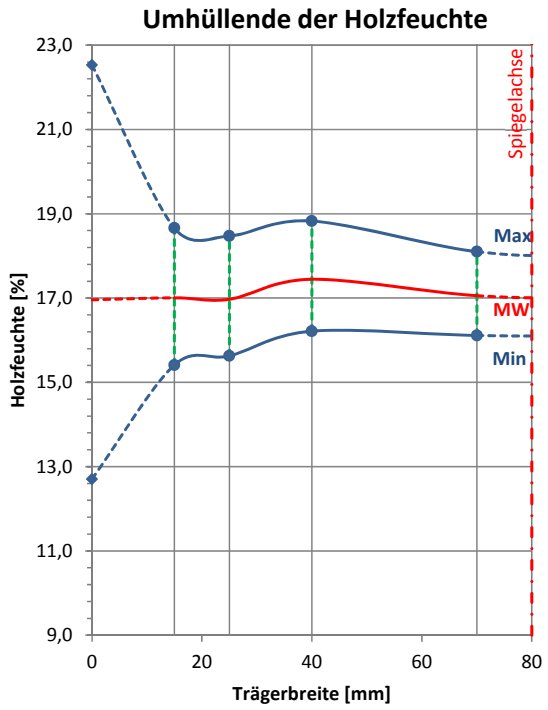
Messstelle 2: Zentraler Bereich über Reitfläche
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

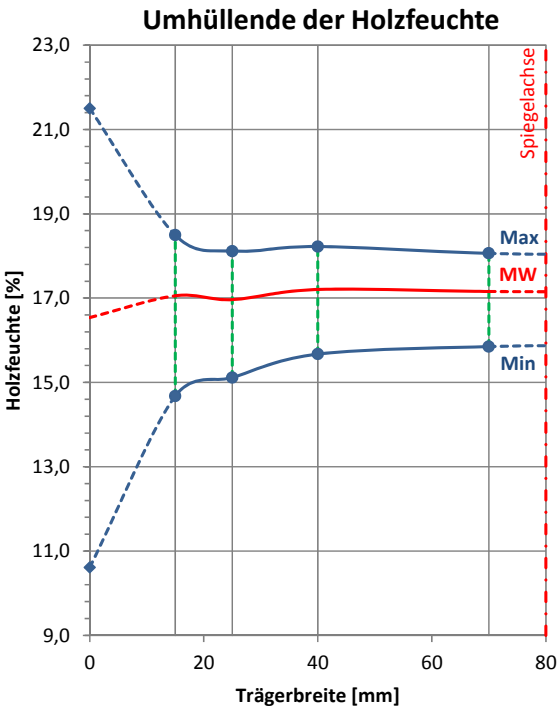


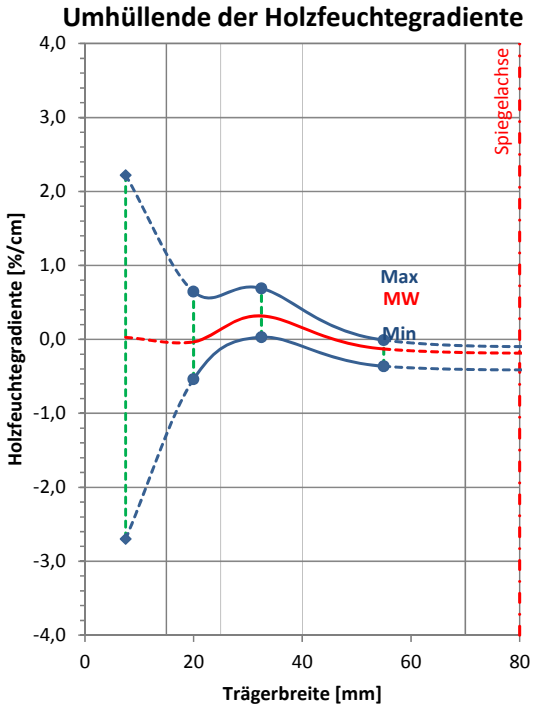


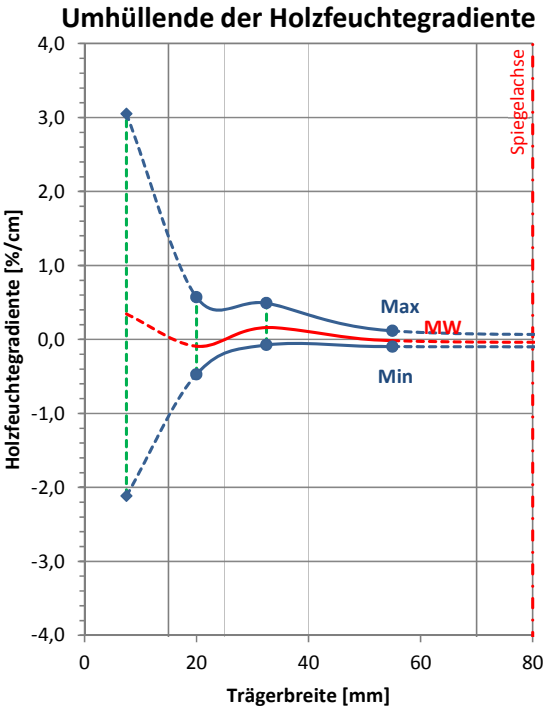
C1 Olympia-Reithalle München-Riem

Messstelle 1: Randbereich über Reitfläche, nahe Rahmenecke
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



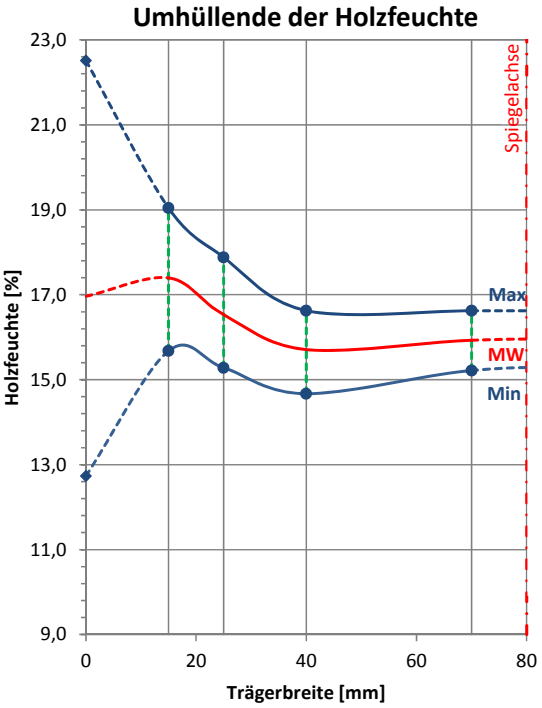


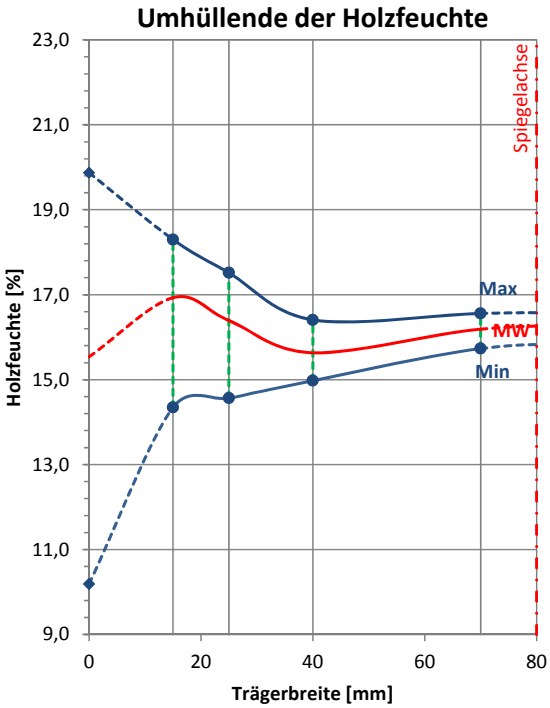


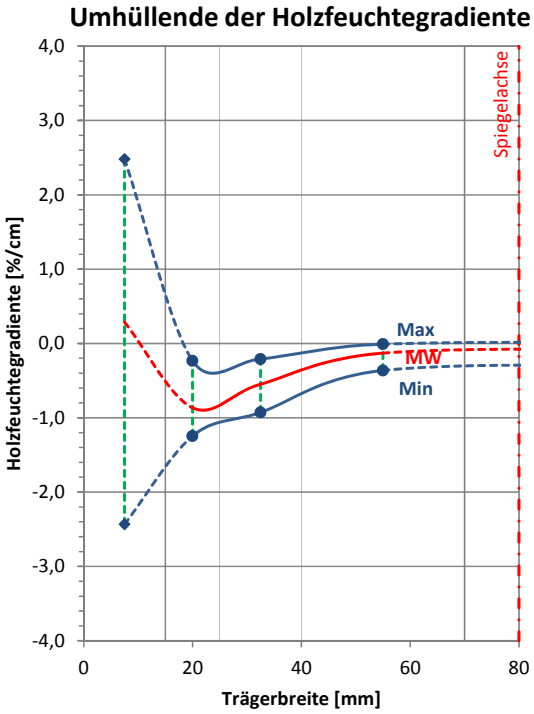


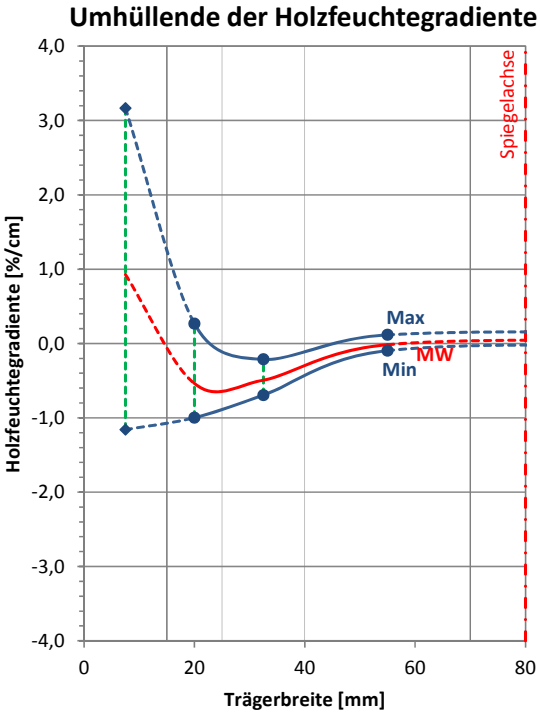
C1 Olympia-Reithalle München-Riem

Messstelle 2: Zentraler Bereich über Reitfläche
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









C2 Gestüt Obere Mühle Blonhofen

Anschrift: Ortsstraße 52
87662 Blonhofen

Ansprechpartner: Thomas Gnadl

Anwesende vor Ort: Michael Merk, Andreas Gamper, Hr. Gnadl

Installationsdatum: 09.09.2010, 11:00 – 12:00
Letztes Auslesedatum: 10.10.2011, 16:00 – 17:00

Umgebungsbedingungen: Allseitig geschlossener, unbeheizter, konstruktiv gedämmter Raum

Temperatur: 14,6 °C; Luftfeuchte: 63,3 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: Firstbereich unter dem Lichtband
(Regelbereich, beeinflusst durch das Lichtband im Firstbereich)

Messstelle 2: Feldbereich über Reitfläche, oberhalb Sprinkleranlage
(zentral, Beeinflussung durch Sprinkleranlage)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	17,0	78,4	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 1
u2	25	15,7	82,7	Gemessene	
u3	40	14,6	86,1	Temperatur	
u4	70	14,6	86,4	t_1: 15,8°C	
u5	15	16,2	80,9	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 2
u6	25	15,8	82,8	gemessene	
u7	40	15,0	85,3	Temperatur	
u8	70	15,6	83,1	t_2: 14,7°C	

Tragsystem: Dreigelenkrahmen auf eingespannten StB-Stützen

Spannweite ℓ = 20,80 m

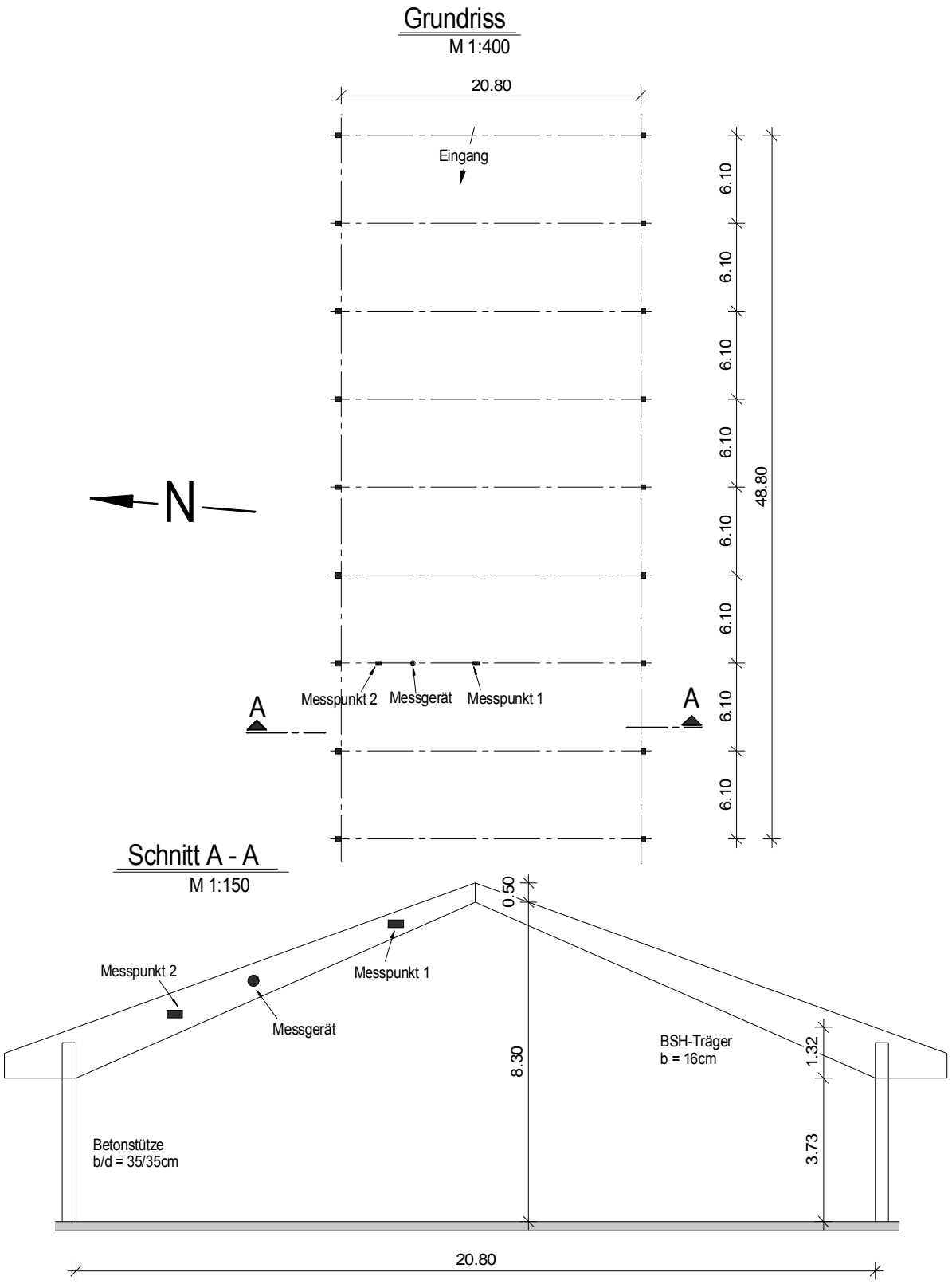
9 Achsen mit einem Binderachsabstand e = 6,10 m

Trägerabmessungen b/h = 16/50 … 132 cm^2

Lamellenstärke t = 33 mm

Bauteile unbehandelt
(vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:400
20.80
Eingang
6.10
6.10
6.10
6.10
6.10
6.10
6.10
48.80
N
A
A
Messpunkt 2
Messgerät
Messpunkt 1
Schnitt A - A
M 1:150
0.50
Messpunkt 2
Messpunkt 1
Messgerät
8.30
BSH-Träger
b = 16cm
1.32
3.73
Betonstütze
b/d = 35/35cm
20.80

Bilder:



Abbildung C2-1: Ansicht Tragwerk

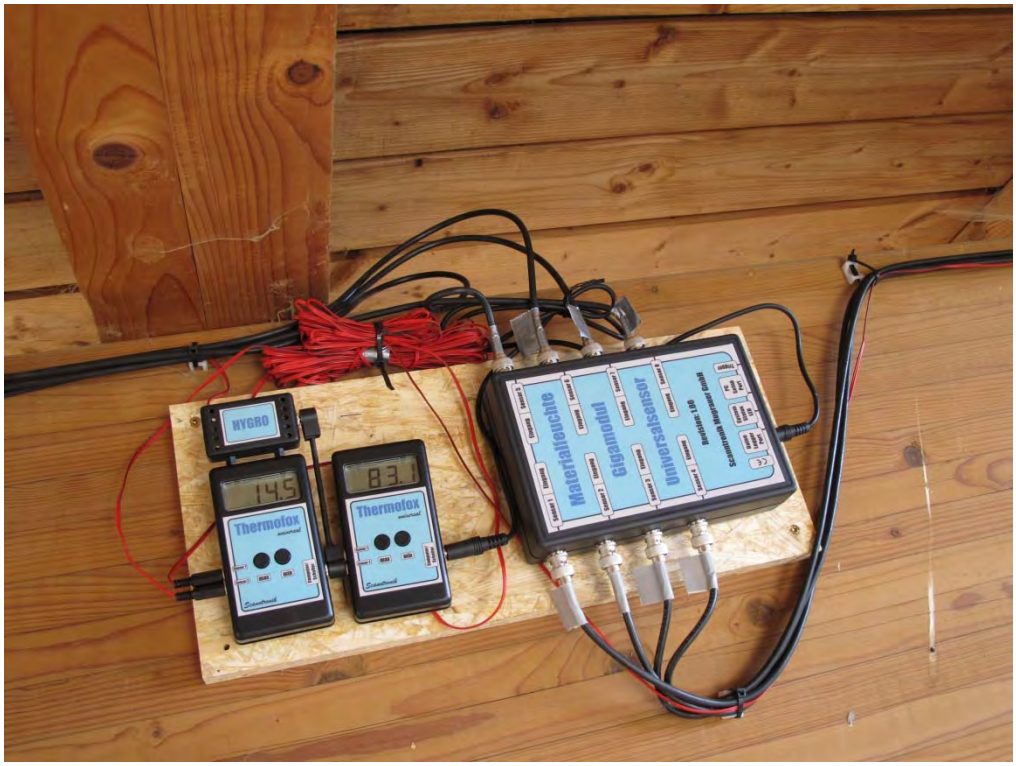


Abbildung C2-2: Ansicht Messstation



Abbildung C2-3: Ansicht Messstelle 1

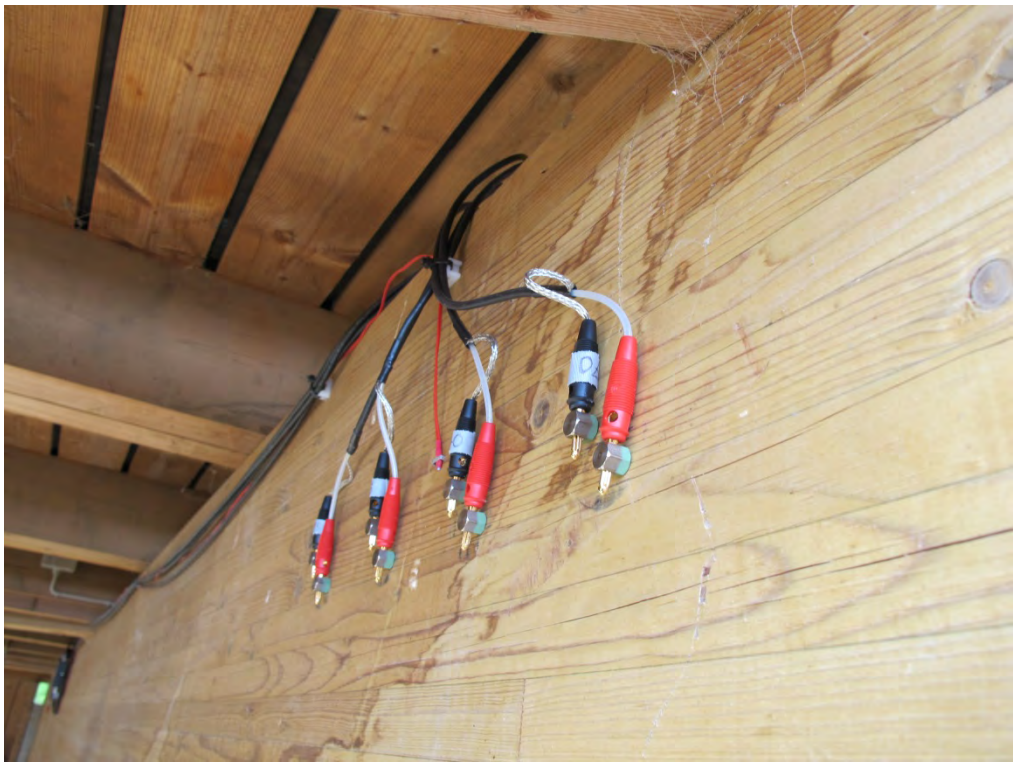
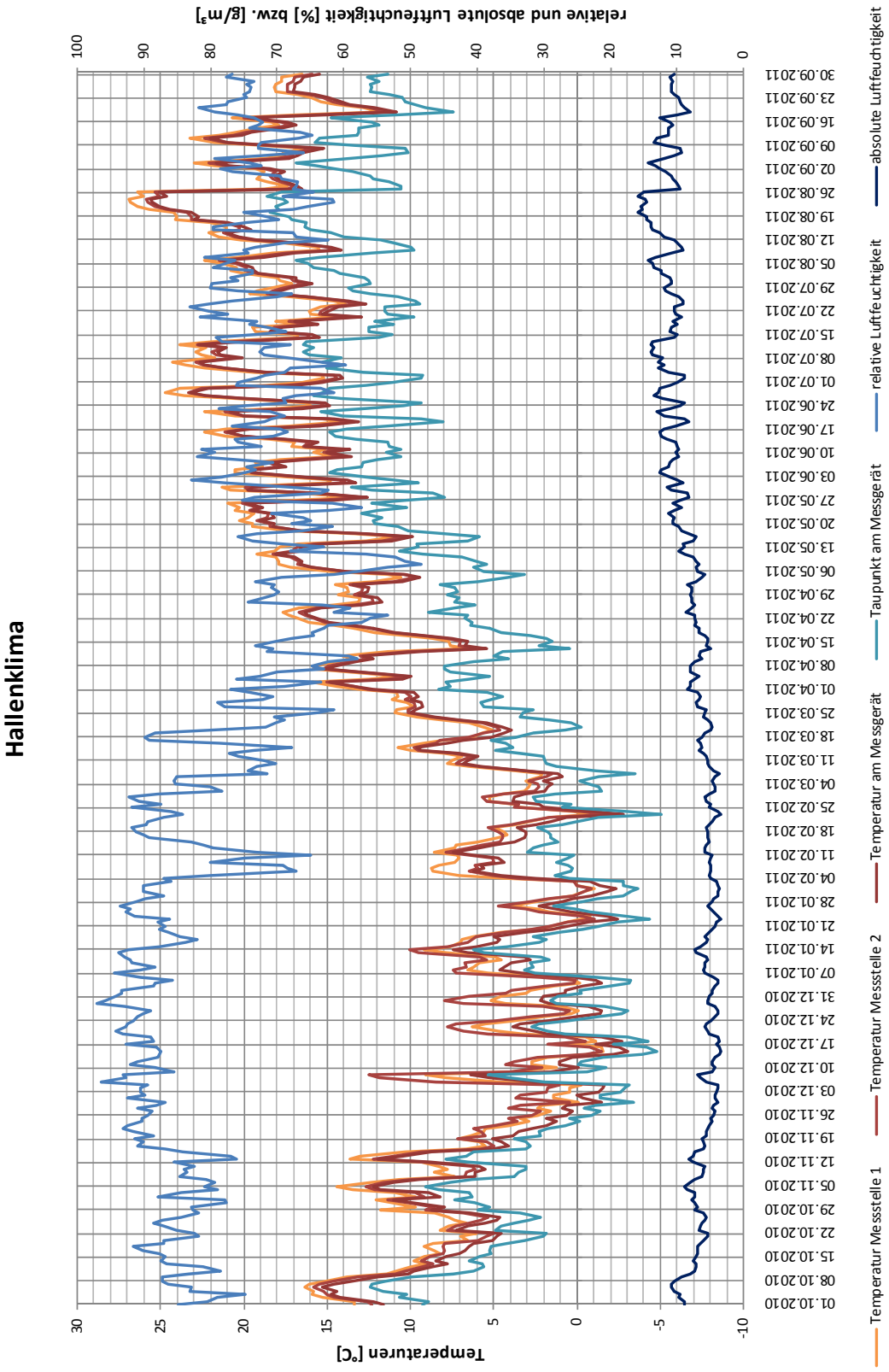


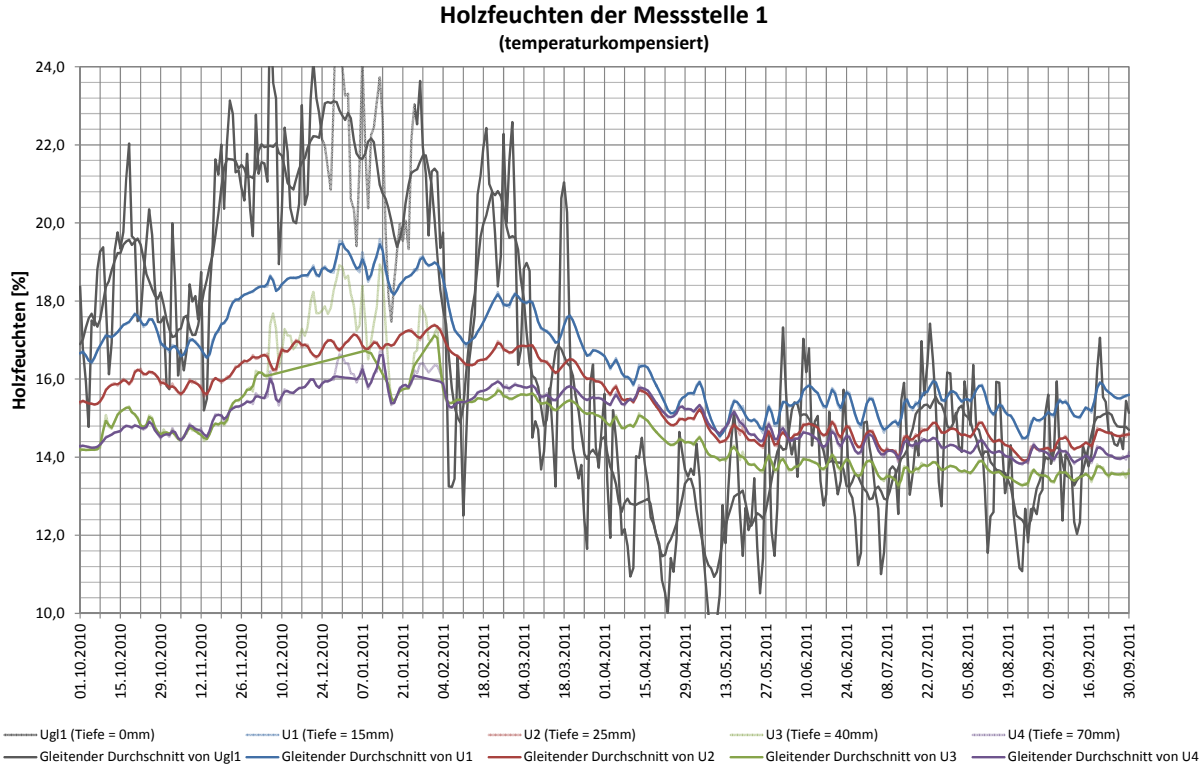
Abbildung C2-4: Ansicht Messstelle 2

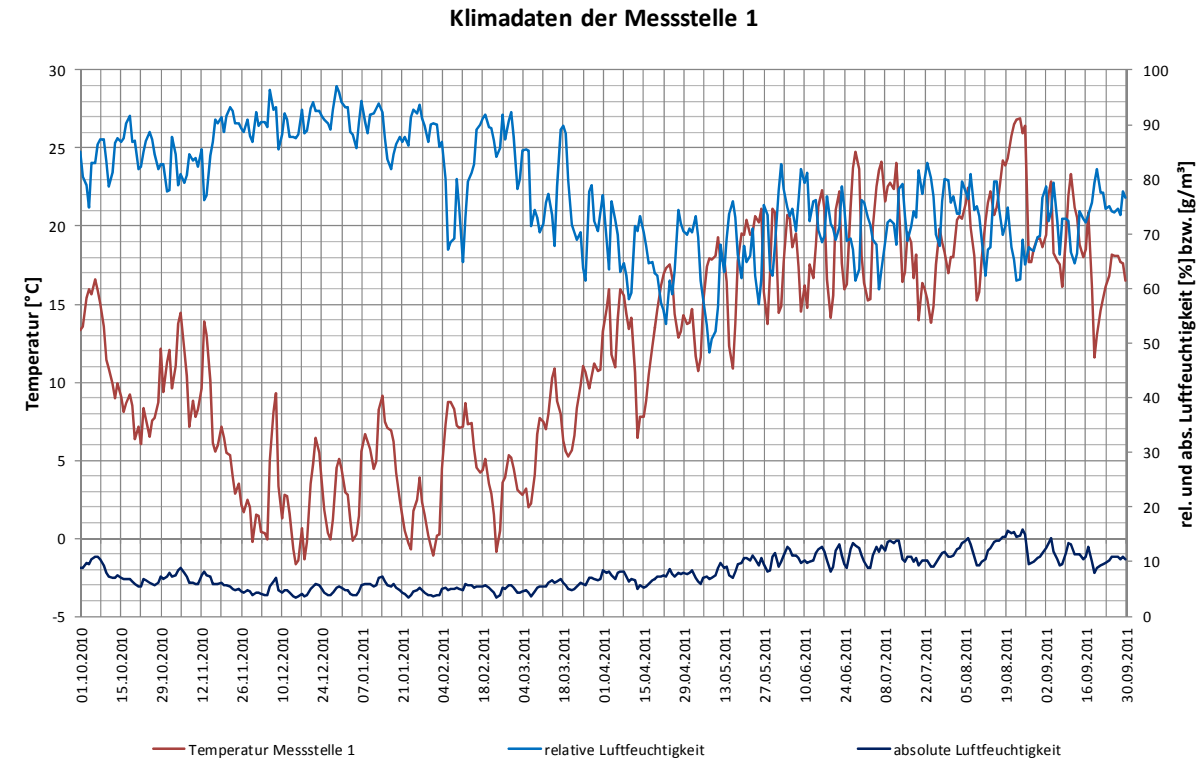
C2 Reithalle Gnadl Blonhofen



C2 Gestüt Obere Mühle Blonhofen

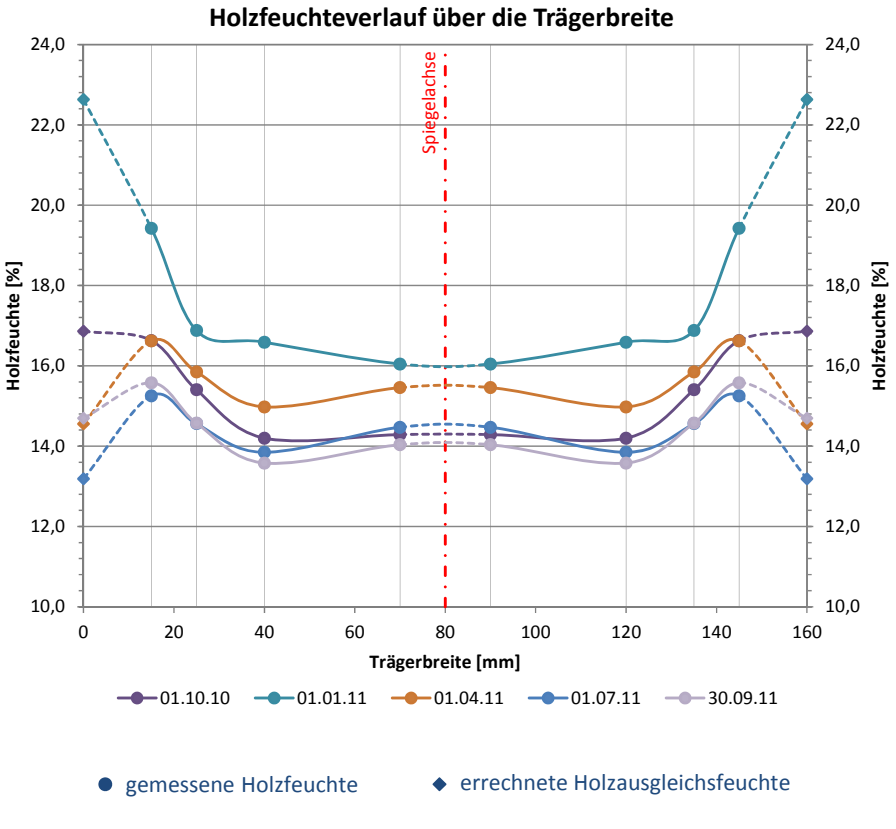
Messstelle 1: Firstbereich unter dem Lichtband

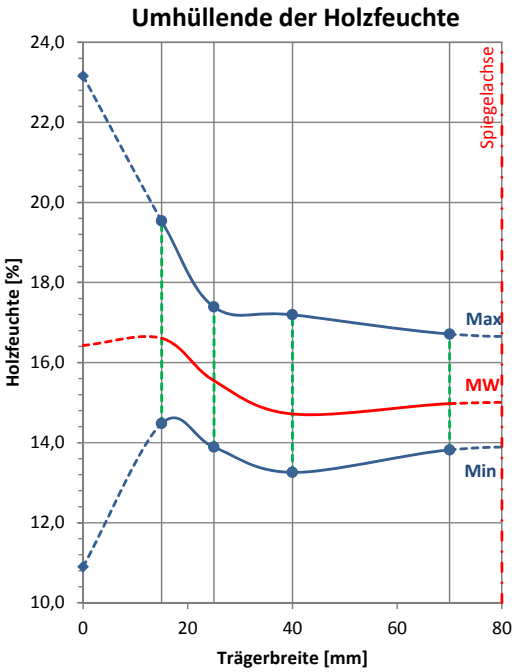


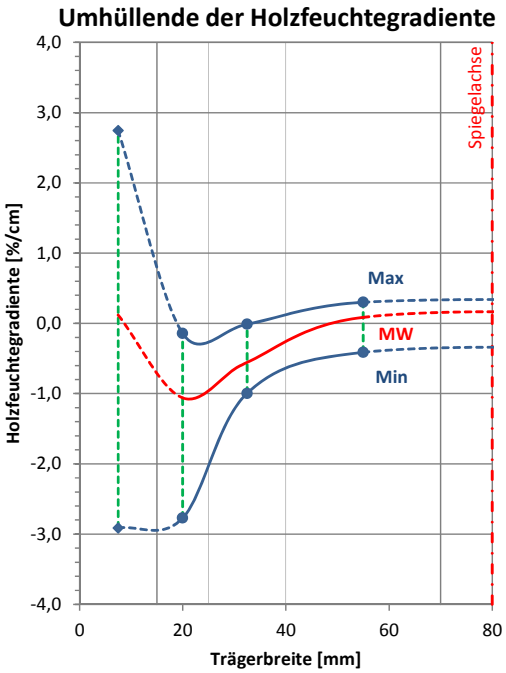


C2 Gestüt Obere Mühle Blonhofen

Messstelle 1: Firstbereich unter dem Lichtband

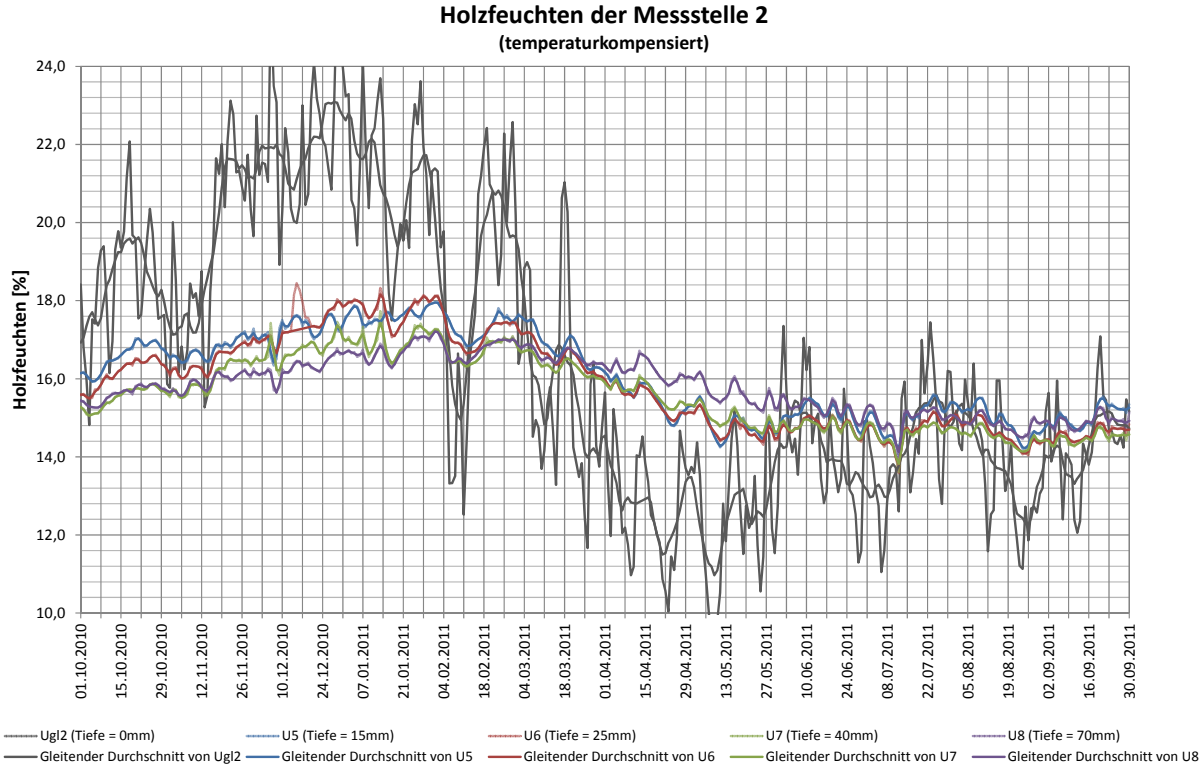


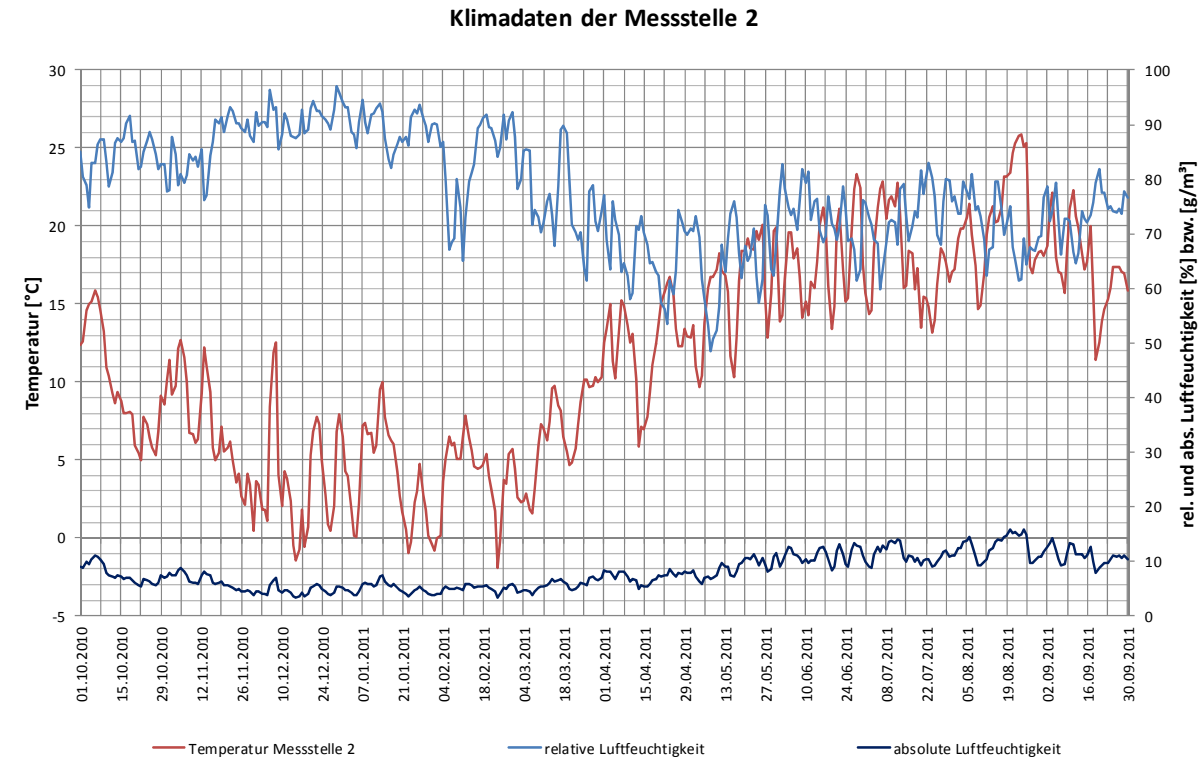




C2 Gestüt Obere Mühle Blonhofen

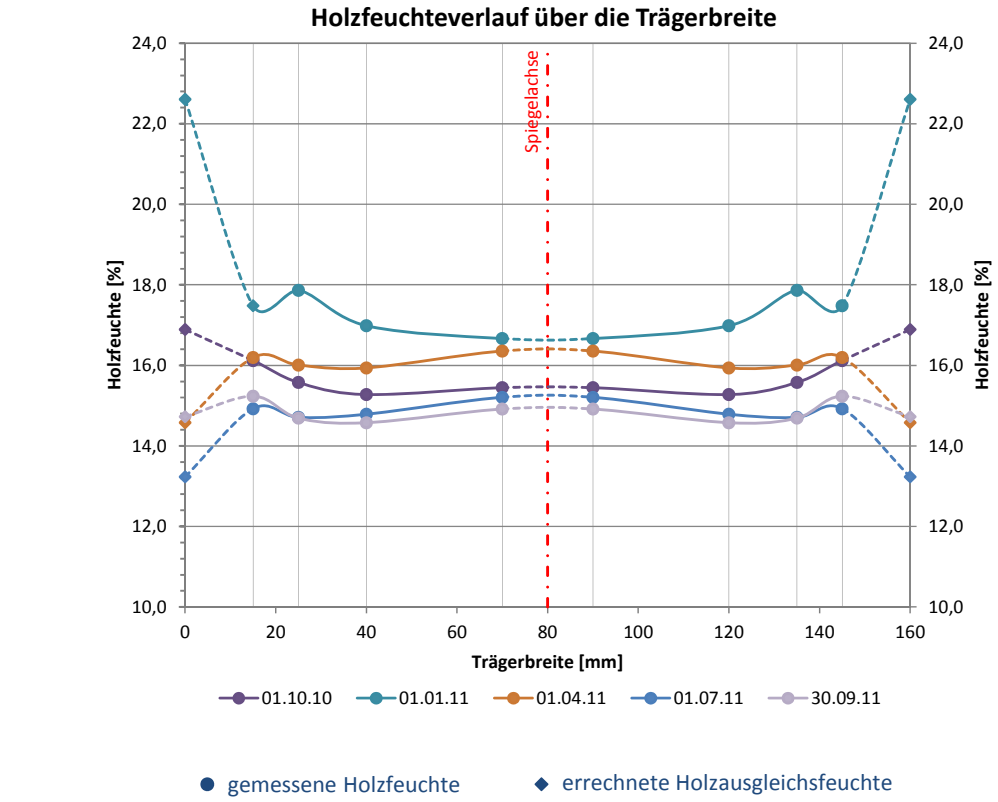
Messstelle 2: Feldbereich über Reitfläche, oberhalb Sprinkleranlage

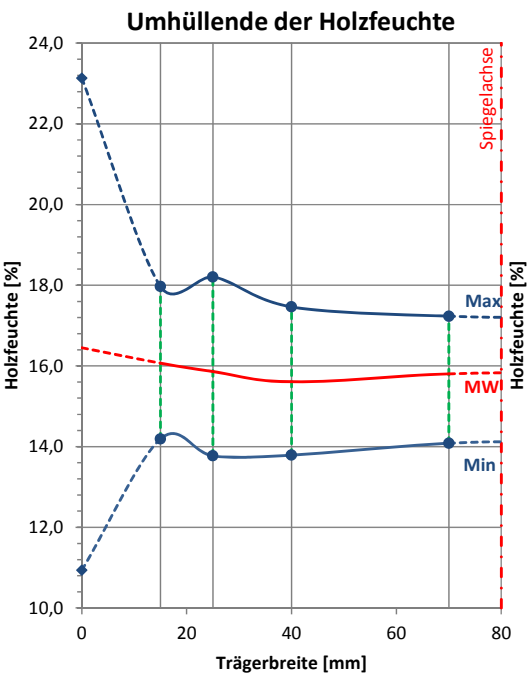


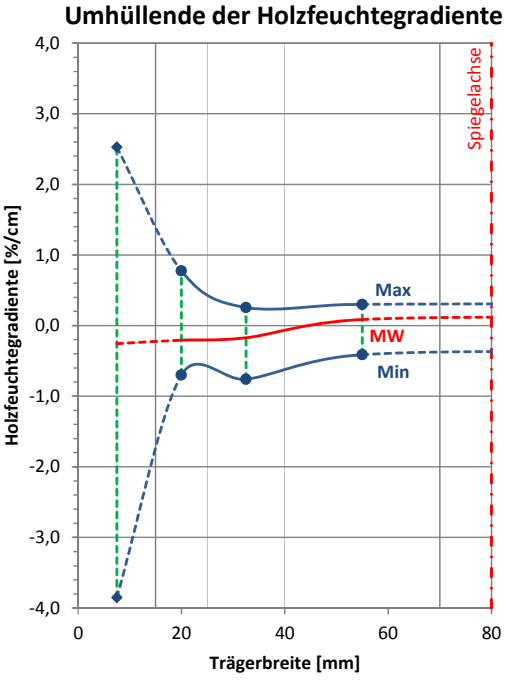


C2 Gestüt Obere Mühle Blonhofen

Messstelle 2: Feldbereich über Reitfläche, oberhalb Sprinkleranlage







C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

Anschrift:	Oblandstraße 3 86971 Peiting
Ansprechpartner:	Frau Sylvia Jindra
Anwesende vor Ort:	Philipp Dietsch, Andreas Gamper, Frau Jindra

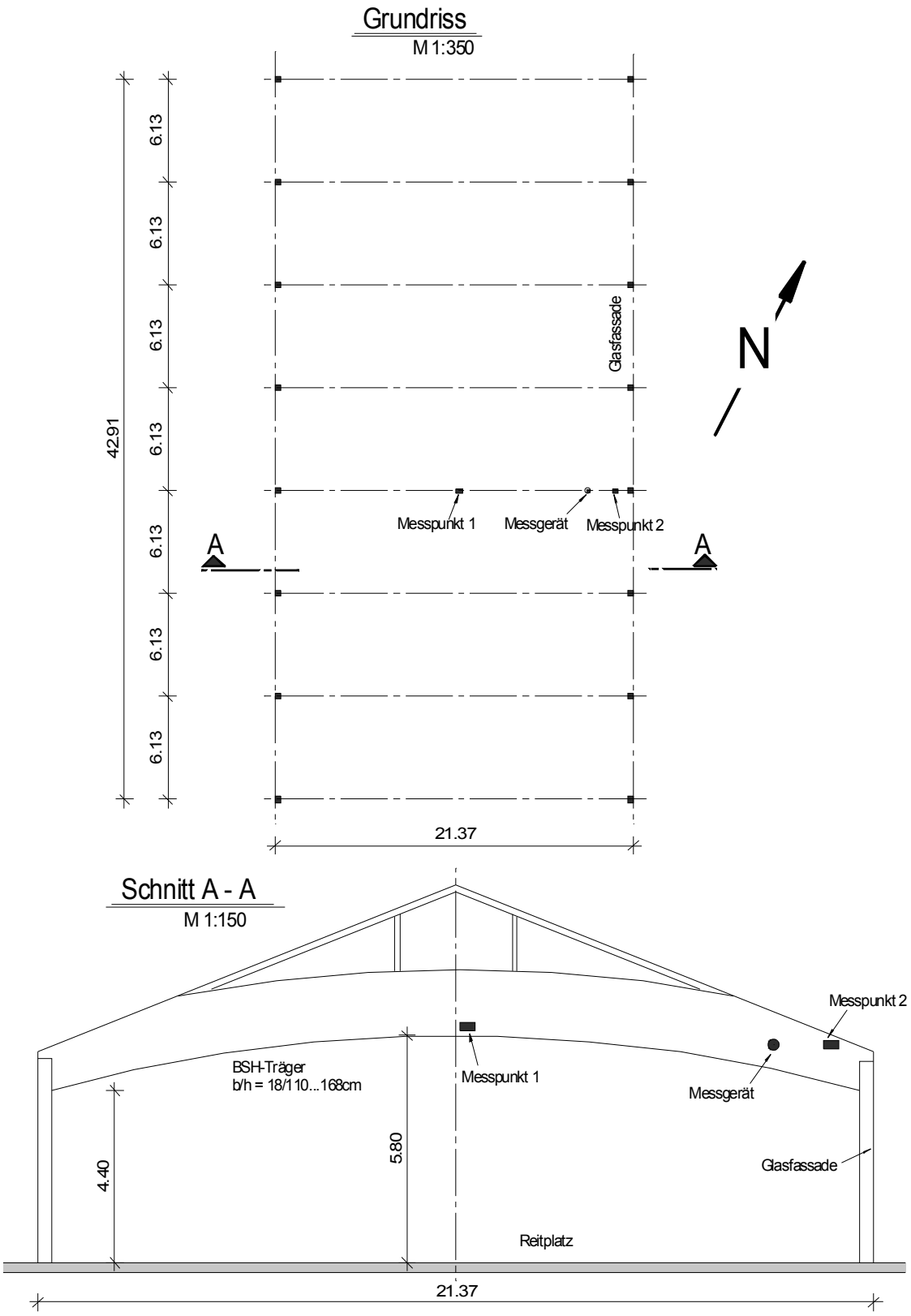
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	14.09.2010, 14:00 – 17:00	22.03.2013, 15:00 - 16:00
Letztes Auslesedatum	10.10.2011, 11:00 – 12:00	01.04.2014, 16:00 - 17:00

Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, unbeheizter, konstruktiv gedämmter Raum mit großem Tor Temperatur: 18,6 °C; Luftfeuchte: 63,0 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Firstbereich, oberhalb der Sprinkleranlage (Beeinflussung durch Sprinkleranlage und Lichtband im Firstbereich)
Messstelle 2:	Traufbereich an lichtdurchlässiger Fassade (Regelbereich, eventuell durch die leicht lichtdurchlässige Fassade beeinflusst)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	14,7	85,9	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 1
u2	25	14,4	87,6	Gemessene	
u3	40	14,5	86,4	Temperatur	
u4	70	15,8	84,4	t_1: 16,6°C	
u5	15	16,2	81,2	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 2
u6	25	15,8	82,0	gemessene	
u7	40	15,2	84,0	Temperatur	
u8	70	15,3	84,1	t_2: 16,6°C	

Tragsystem:	Gekrümmter Einfeldträger, Trägerspannweite ℓ = 21,73 m 8 Achsen mit einem Trägerachsabstand e = 6,25 m, Firsthöhe h = 9,65 m Trägerabmessungen b/h = 18/110…168 Lamellenstärke t = 33 mm Offenporiger Anstrich

Skizzen:


Grundriss
M 1:350
6.13
6.13
6.13
6.13
6.13
6.13
6.13
42.91
Glasfassade
N
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
A
A
21.37
Schnitt A - A
M 1:150
Messpunkt 2
BSH-Träger
b/h = 18/110...168cm
Messpunkt 1
Messgerät
4.40
5.80
Glasfassade
Reitplatz
21.37

Bilder:



Abbildung C3-1: Ansicht Tragwerk

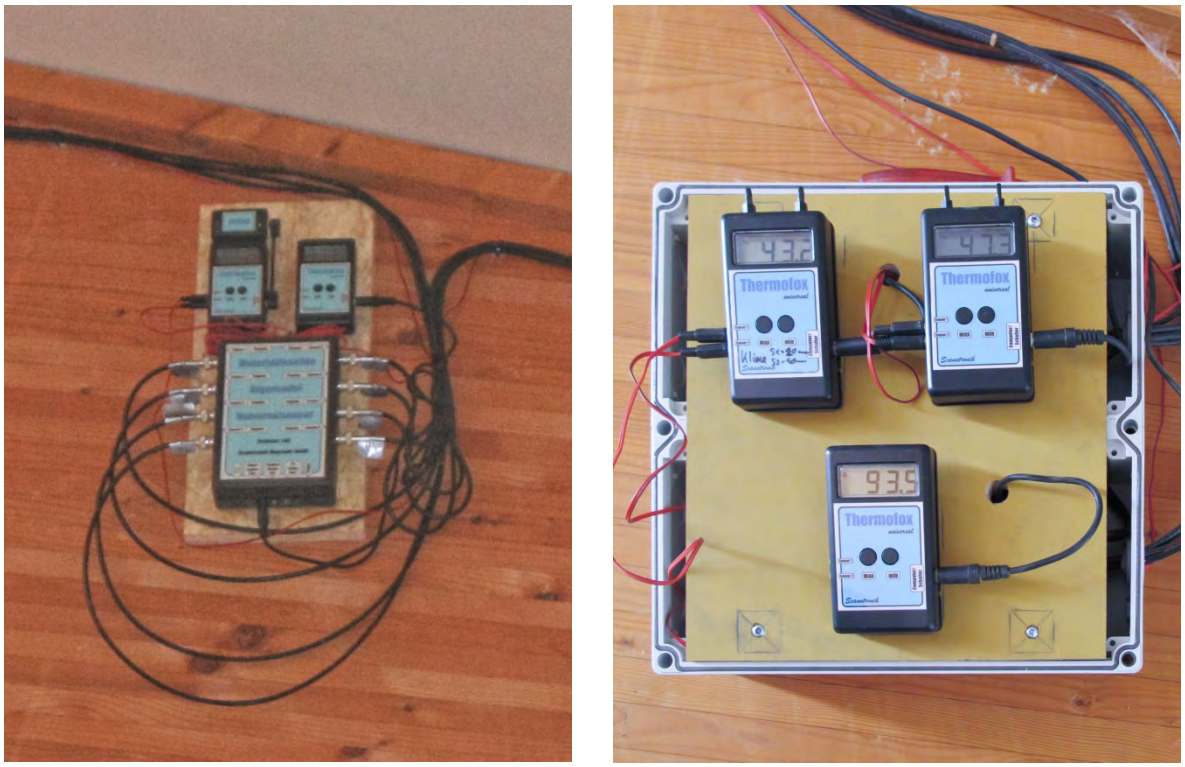


Abbildung C3-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2



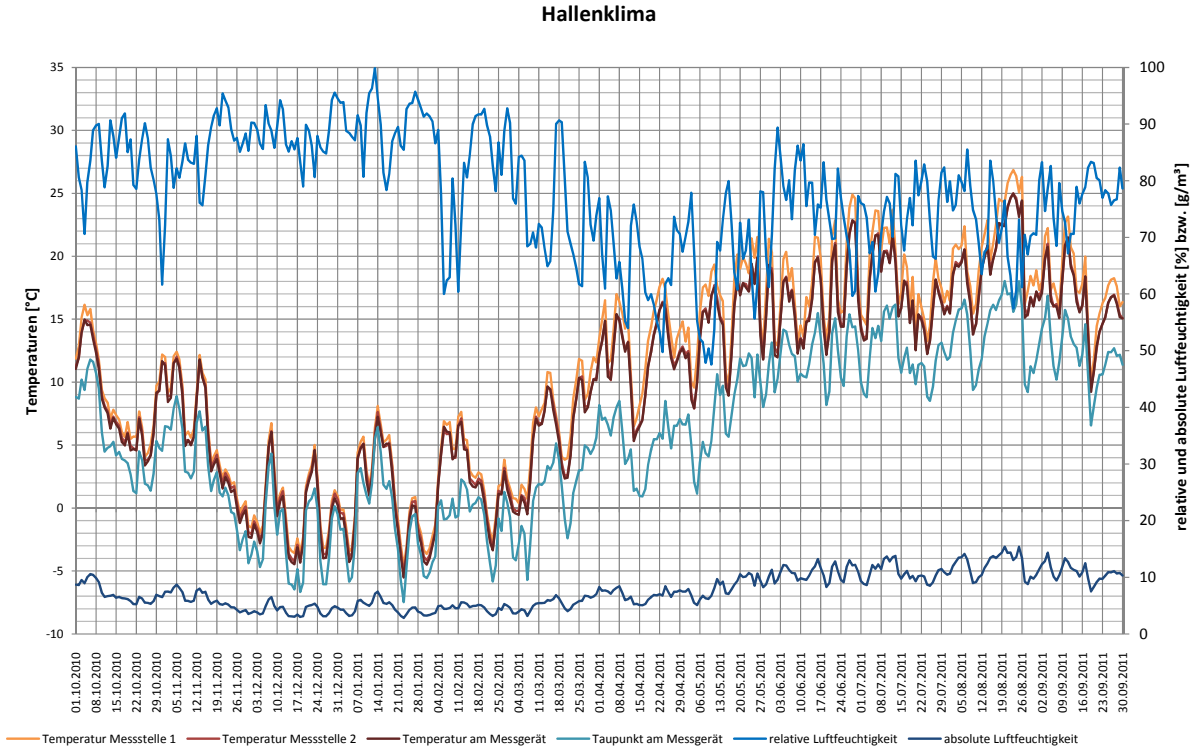
Abbildung C3-3: Ansicht Messstelle 1



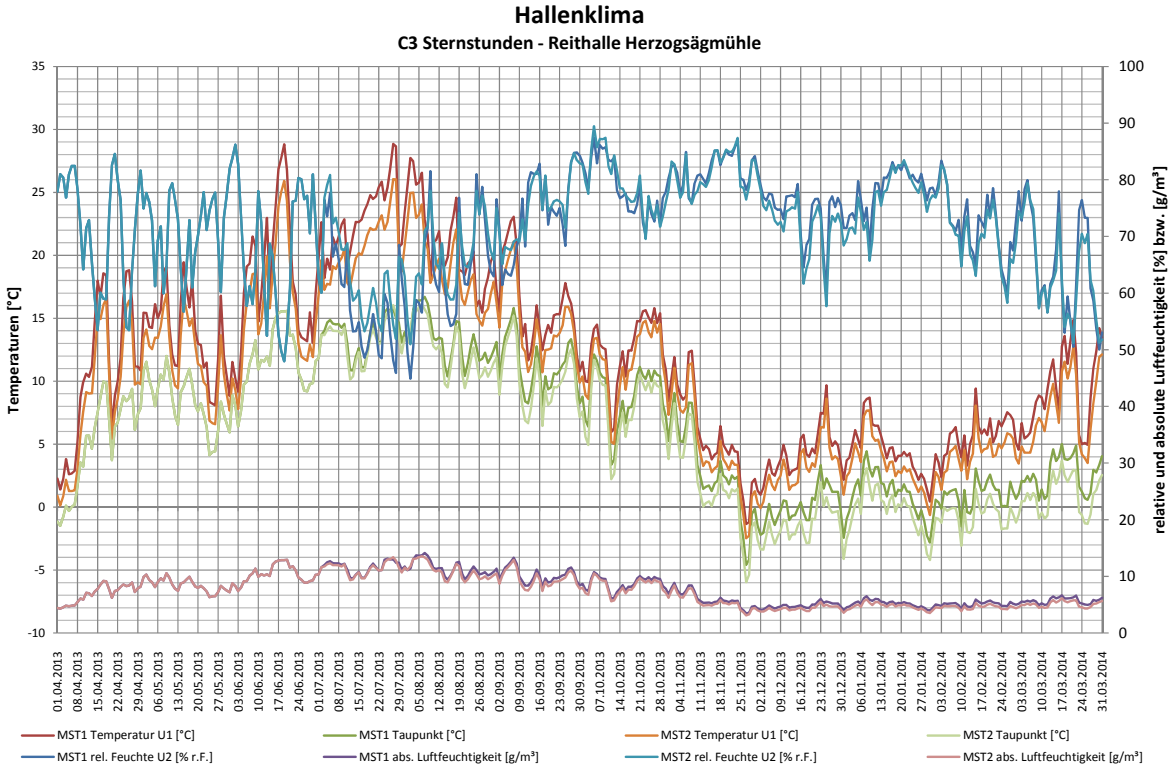
Abbildung C3-4: Ansicht Messstelle 2

C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

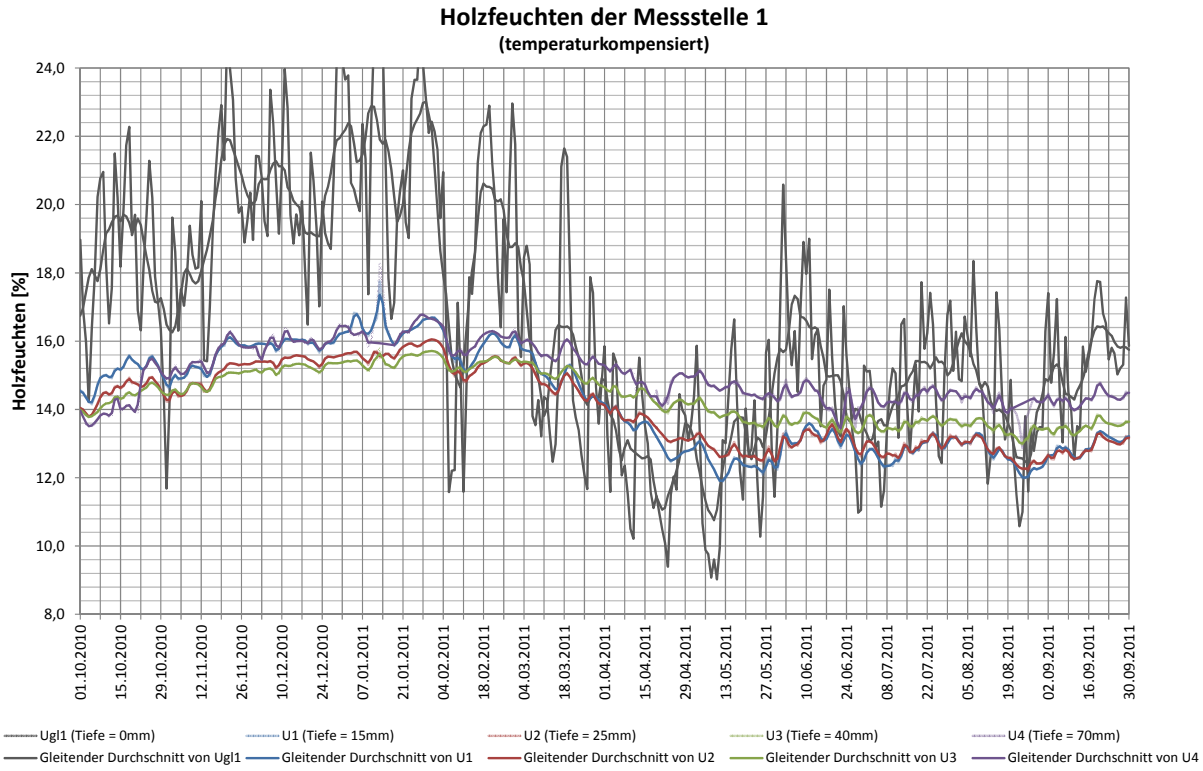


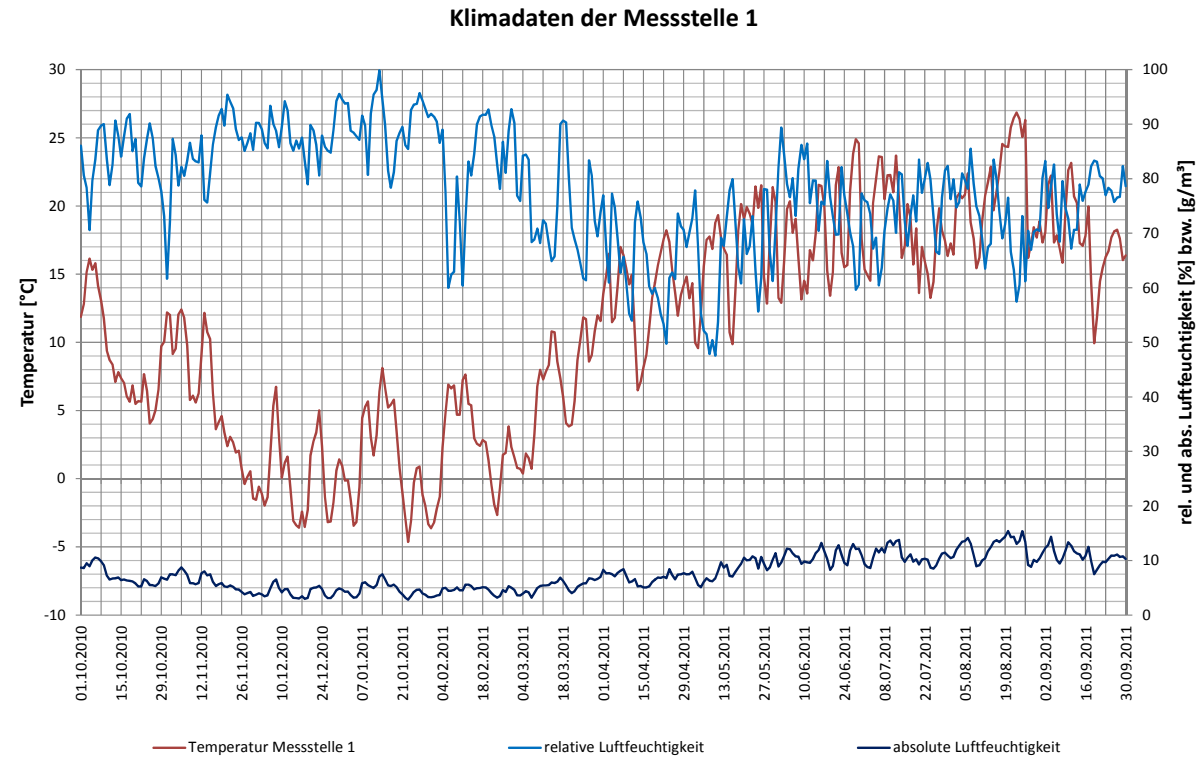
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

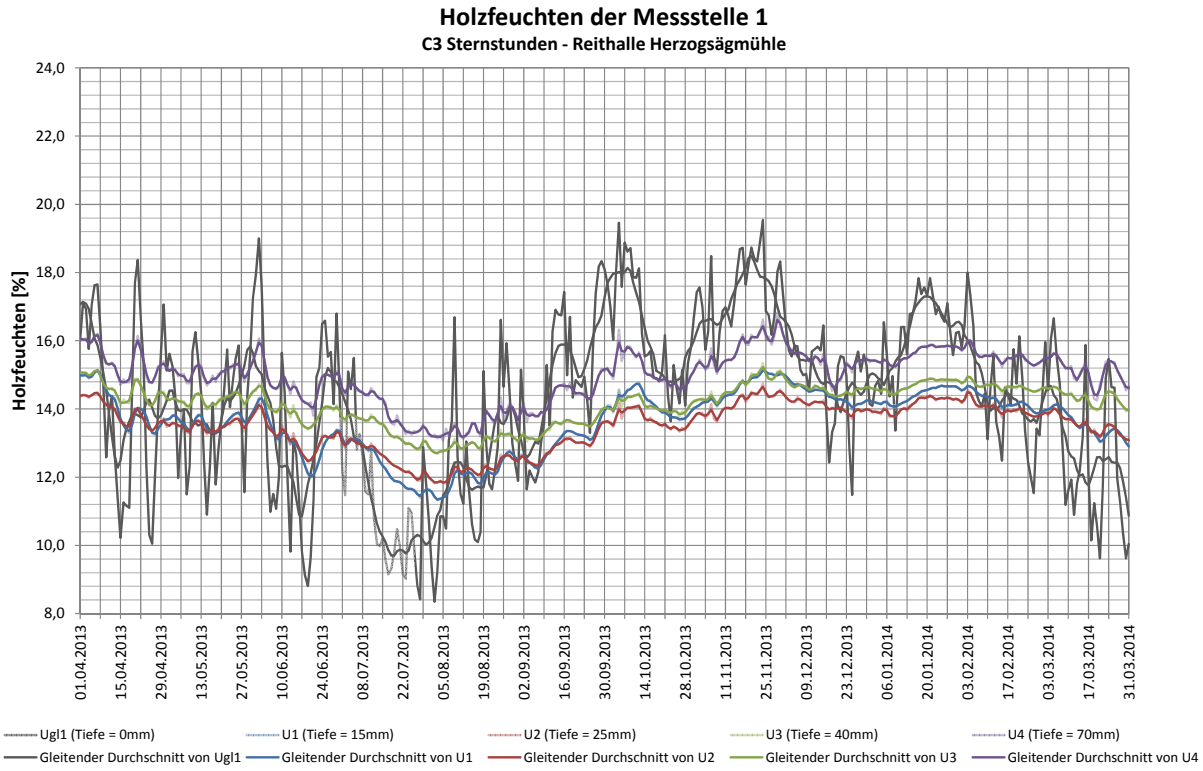
Messstelle 1: Firstbereich, oberhalb der Sprinkleranlage
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

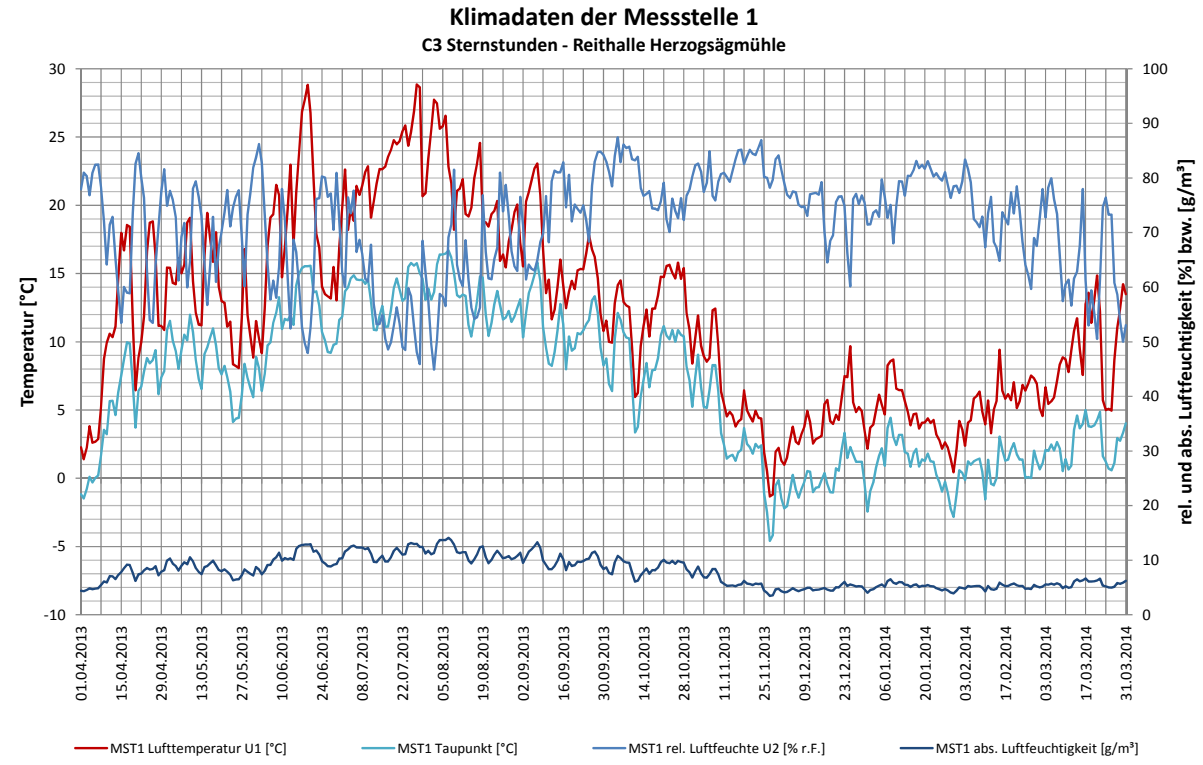




C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

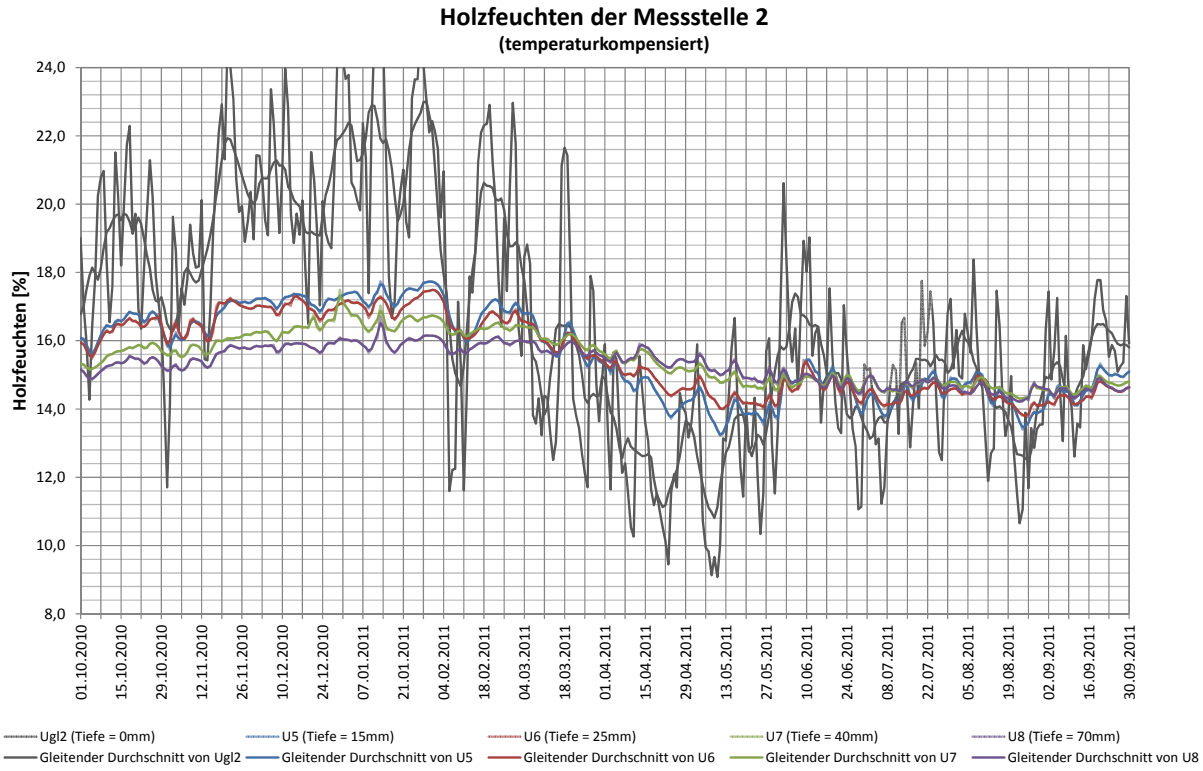
Messstelle 1: Firstbereich, oberhalb der Sprinkleranlage
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

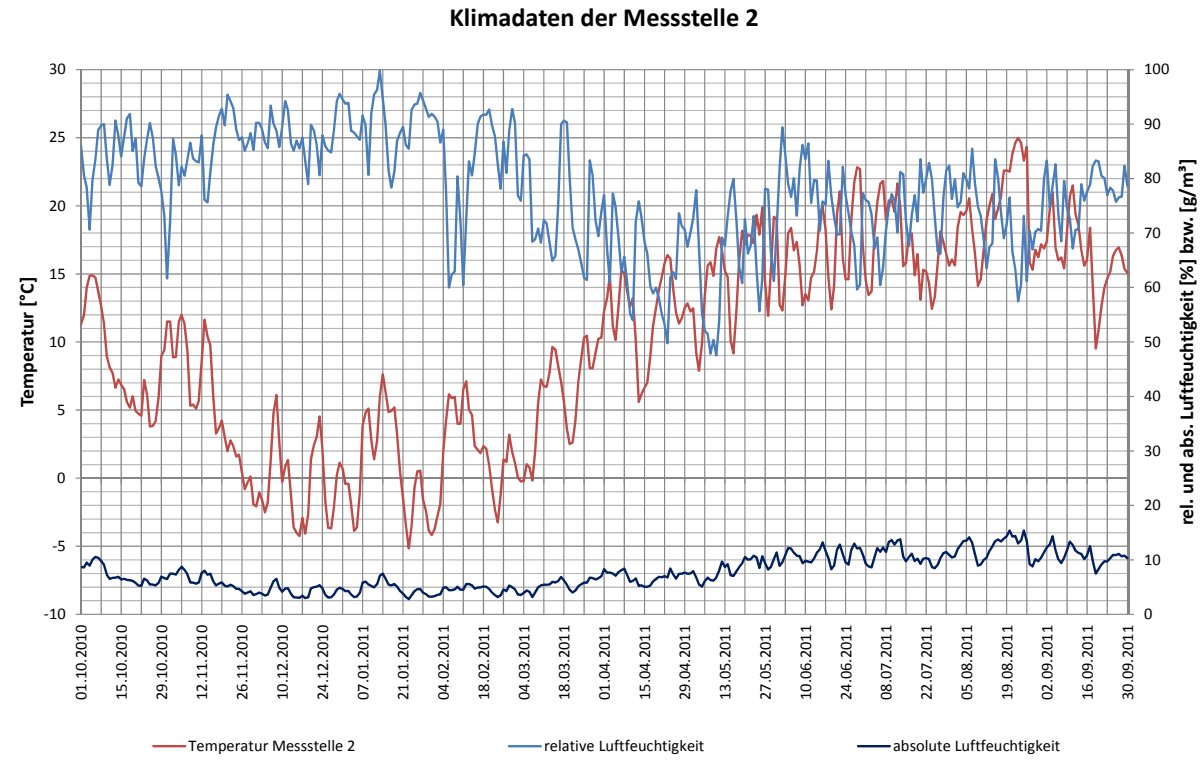




C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

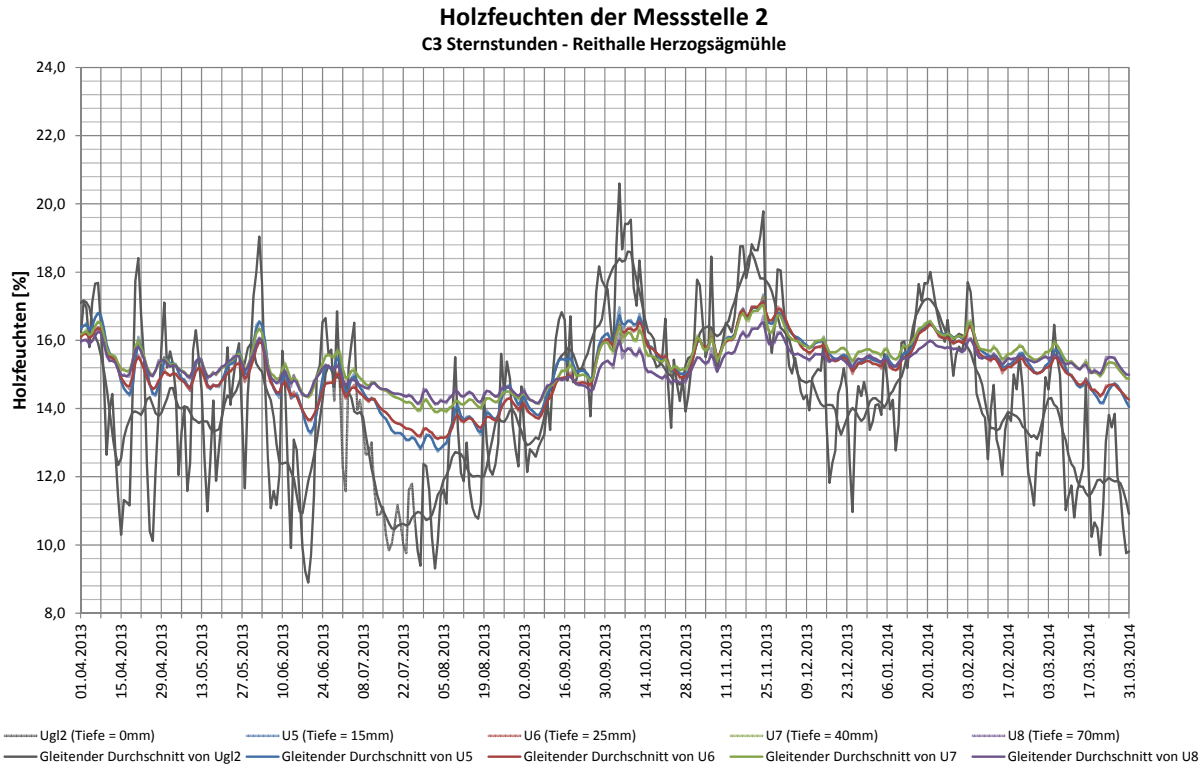
Messstelle 2: Traufbereich an lichtdurchlässiger Fassade
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

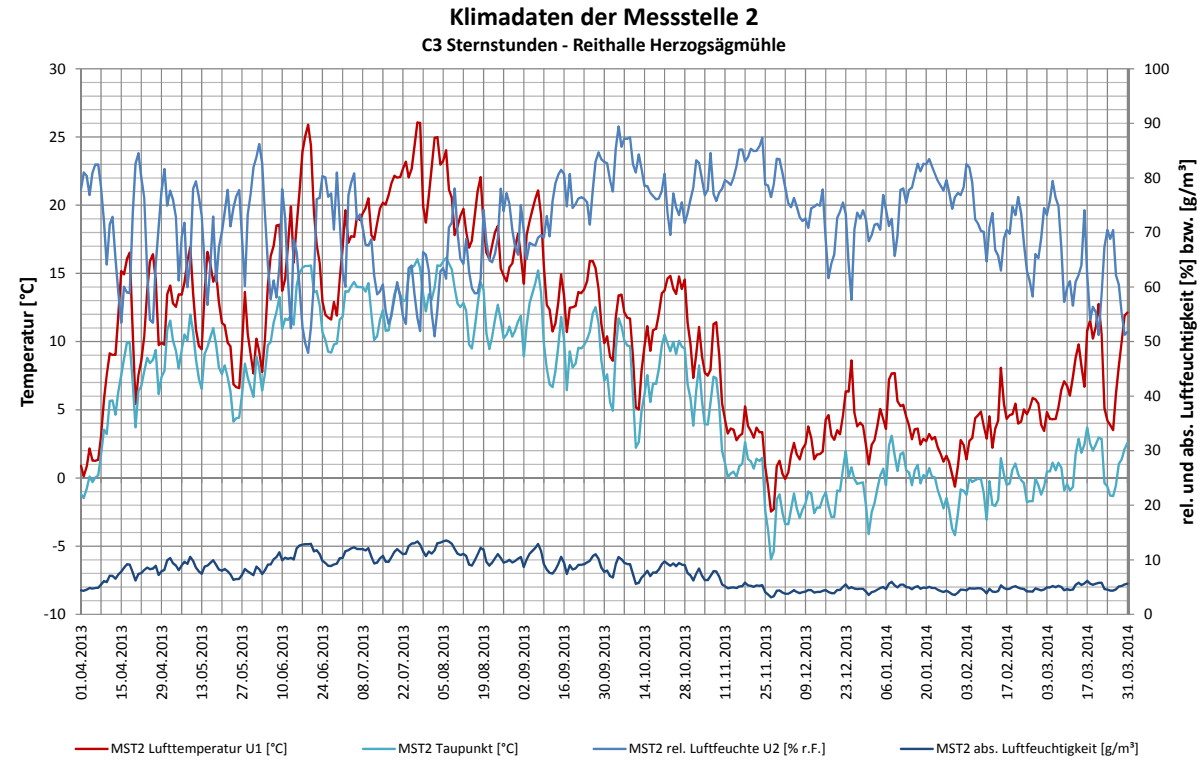




C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

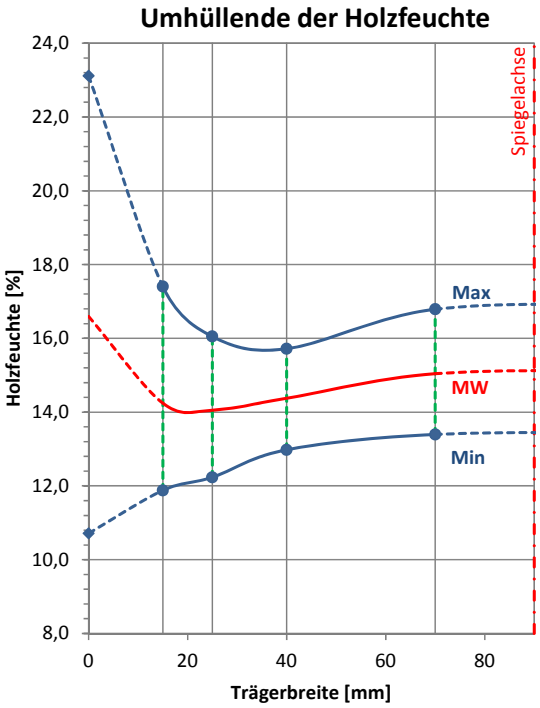
Messstelle 2: Traufbereich an lichtdurchlässiger Fassade
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

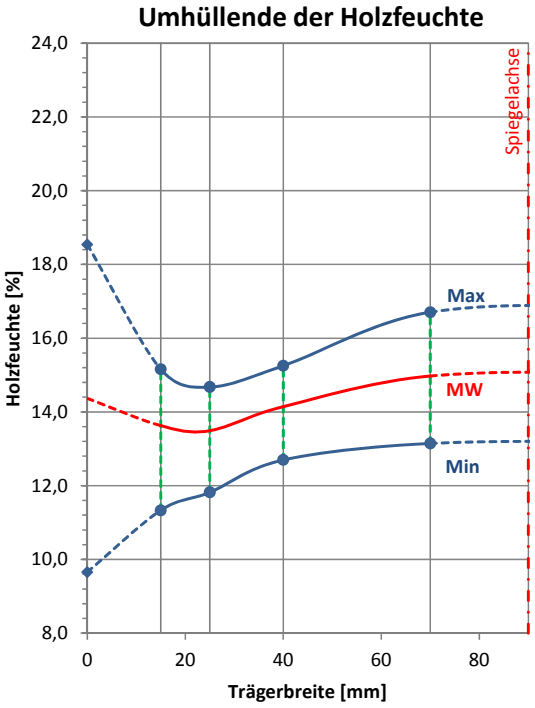


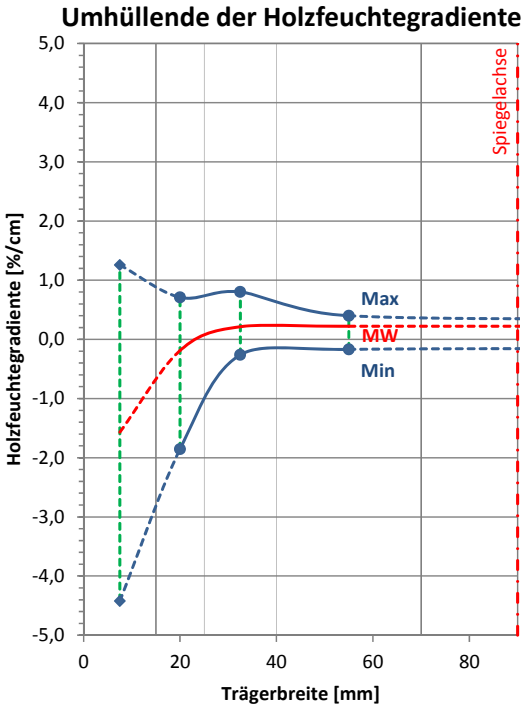


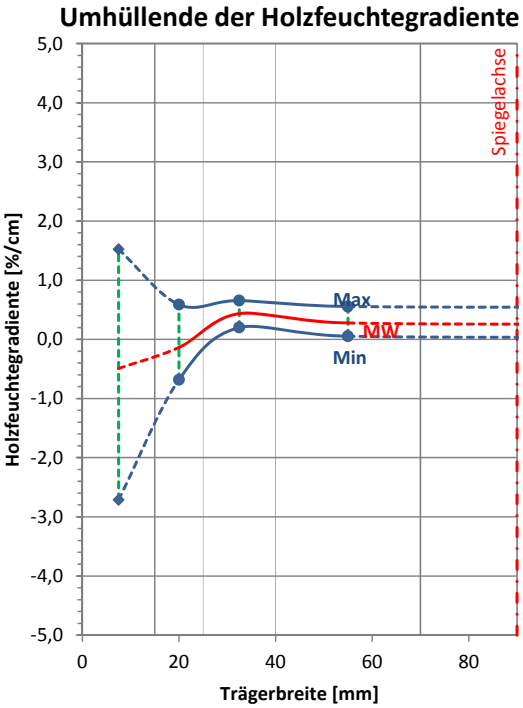
C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

Messstelle 1: Firstbereich, oberhalb der Sprinkleranlage
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



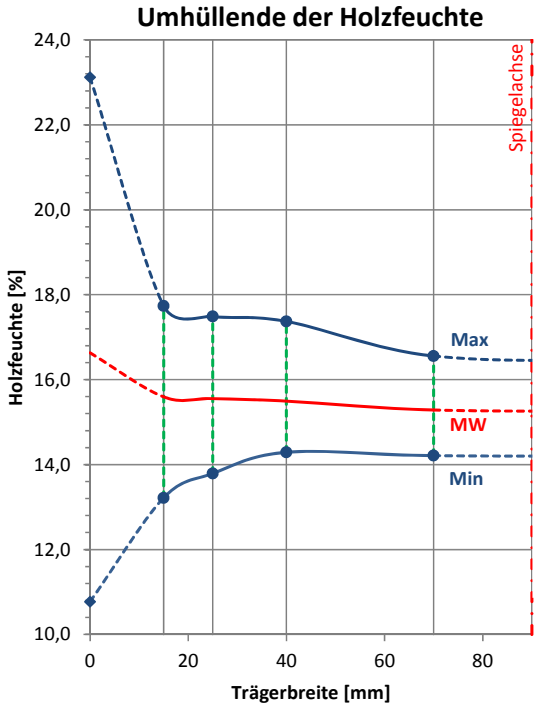


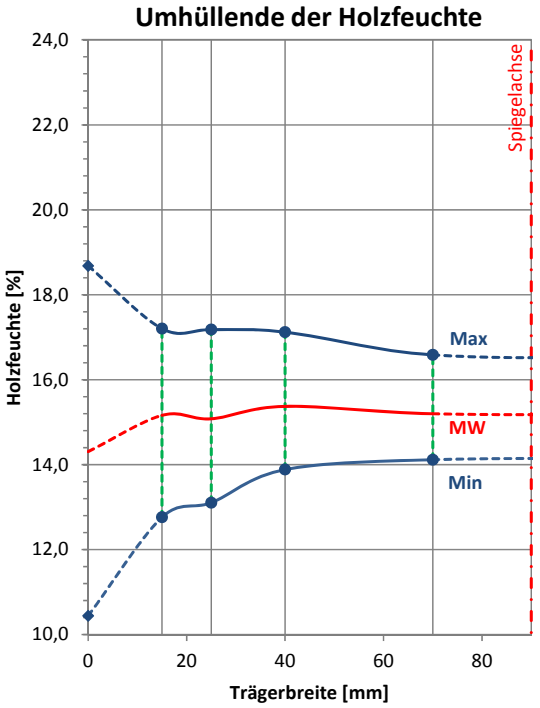


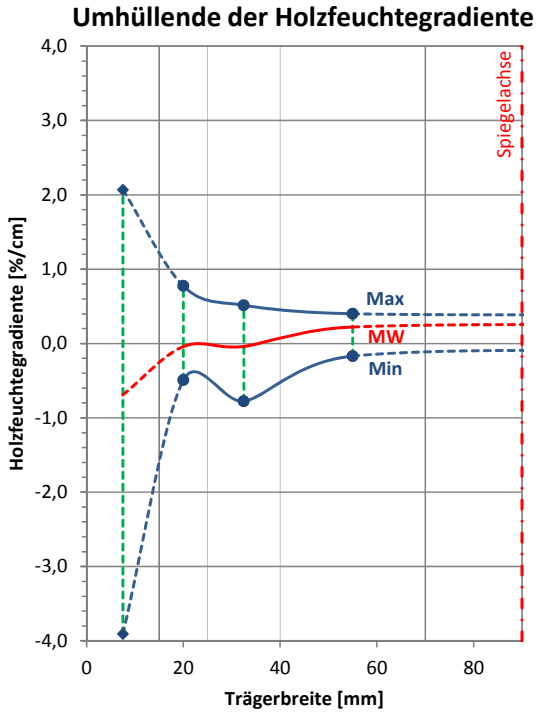


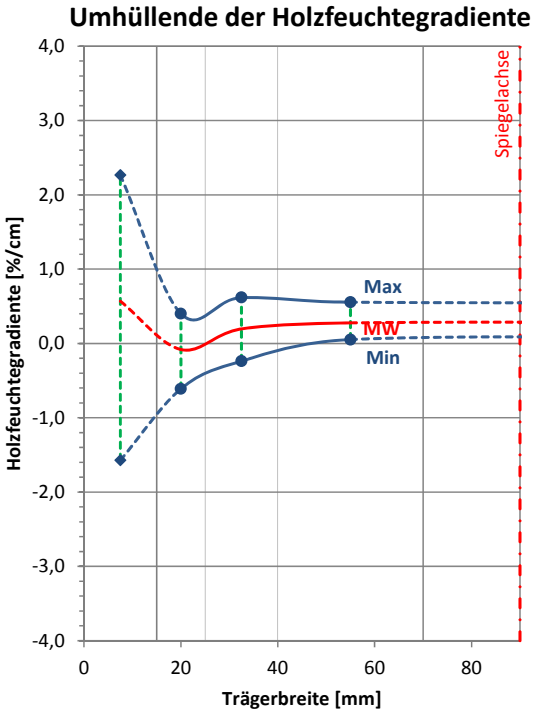
C3 Sternstunden Reithalle Herzogsägmühle

Messstelle 2: Traufbereich an lichtdurchlässiger Fassade
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









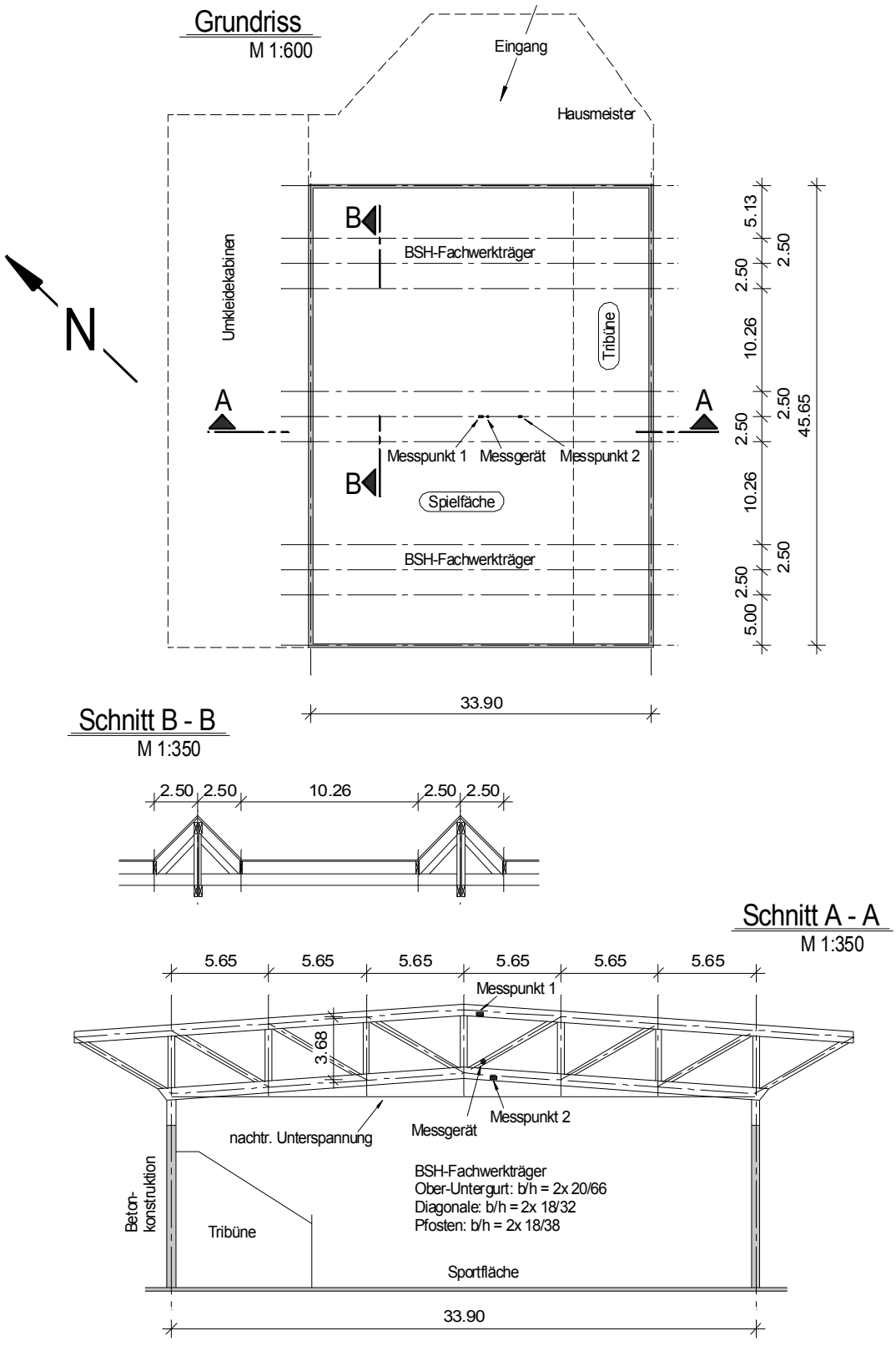
D1 Paul-Wegmann-Halle Ingolstadt

Anschrift:	Paul-Wegmann-Halle Martin-Hemm-Str. 2 85053 Ingolstadt
Ansprechpartner:	Herr Weiß (vor Ort); Herr Lindner (Stadt)
Anwesende vor Ort:	Andreas Gamper, Manuel Waidelich, Herr Weiß
Installationsdatum: Letztes Auslesedatum:	01.10.2010, 09:00 - 11:00 11.10.2011, 09:00 – 10:00
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, beheizter, energetisch gedämmter Raum Temperatur: 21,2 °C; Luftfeuchte: 47,7 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Obergurt Fachwerkträger, im Firstbereich unter Lichtband (Starker Einfluss des Lichtbandes vermutet, Erwärmung der Luft)
Messstelle 2:	Untergurt Fachwerkträger, im Firstbereich unter Lichtband (Beurteilung des Einflusses der Lage innerhalb des Fachwerkträgers, unterschiedliche Beanspruchung zwischen Ober- und Untergurt)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	3,4	115,7	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 1
u2	25	3,8	116,2	gemessene	
u3	40	3,9	116,1	Temperatur	
u4	70	3,9	115,5	t_1: 22,5°C	
u5	15	6,4	110,9	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	6,7	110,1	gemessene	
u7	40	6,6	110,5	Temperatur	
u8	70	6,7	110,2	t_2: 21,5°C	

Tragsystem:	Fachwerkträger in Sheddach, Trägerspannweite ℓ = 34,0 m Bauteilabmessungen: Ober-Untergurt b/h = 20/66 cm², Diagonalen b/h = 18/32 cm², Pfosten b/h = 18/38 cm², Shedträger b/h = 18/38 cm², Shedlängsträger b/h = 18/75 cm², Pfetten b/h = 18/66 cm², Achsmaß der Fachwerkpfosten e = 5,65 m Lamellenstärke t = 33 mm Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:600
Eingang
Hausmeister
N
Umkleidekabinen
B
BSH-Fachwerkträger
Tribüne
A
A
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
B
Spielfäche
BSH-Fachwerkträger
5.13
2.50
2.50
10.26
2.50
2.50
45.65
2.50
10.26
2.50
2.50
5.00
33.90
Schnitt B - B
M 1:350
2.50
2.50
10.26
2.50
2.50
Schnitt A - A
M 1:350
5.65
5.65
5.65
5.65
5.65
5.65
Messpunkt 1
3.68
Messpunkt 2
Messgerät
nachtr. Unterspannung
BSH-Fachwerkträger
Ober-Untergurt: b/h = 2x 20/66
Diagonale: b/h = 2x 18/32
Pfosten: b/h = 2x 18/38
Beton-
konstruktion
Tribüne
Sportfläche
33.90

Bilder:



Abbildung D1-1: Ansicht Tragwerk



Abbildung D1-2: Ansicht Messstation

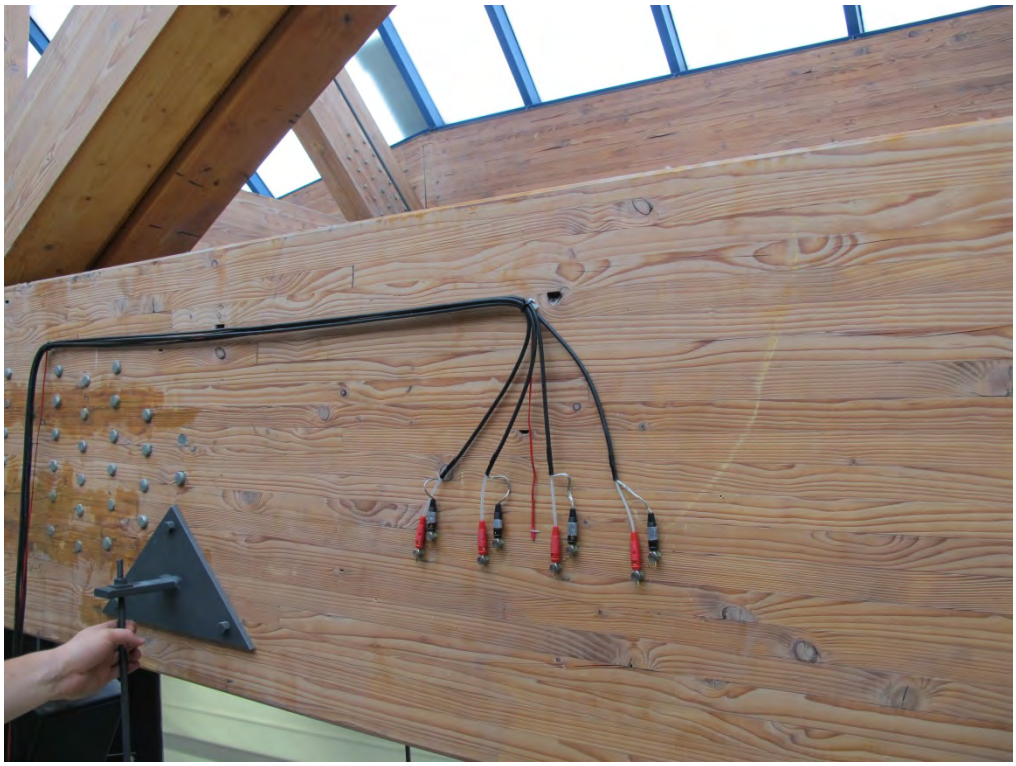


Abbildung D1-3: Ansicht Messstelle 1

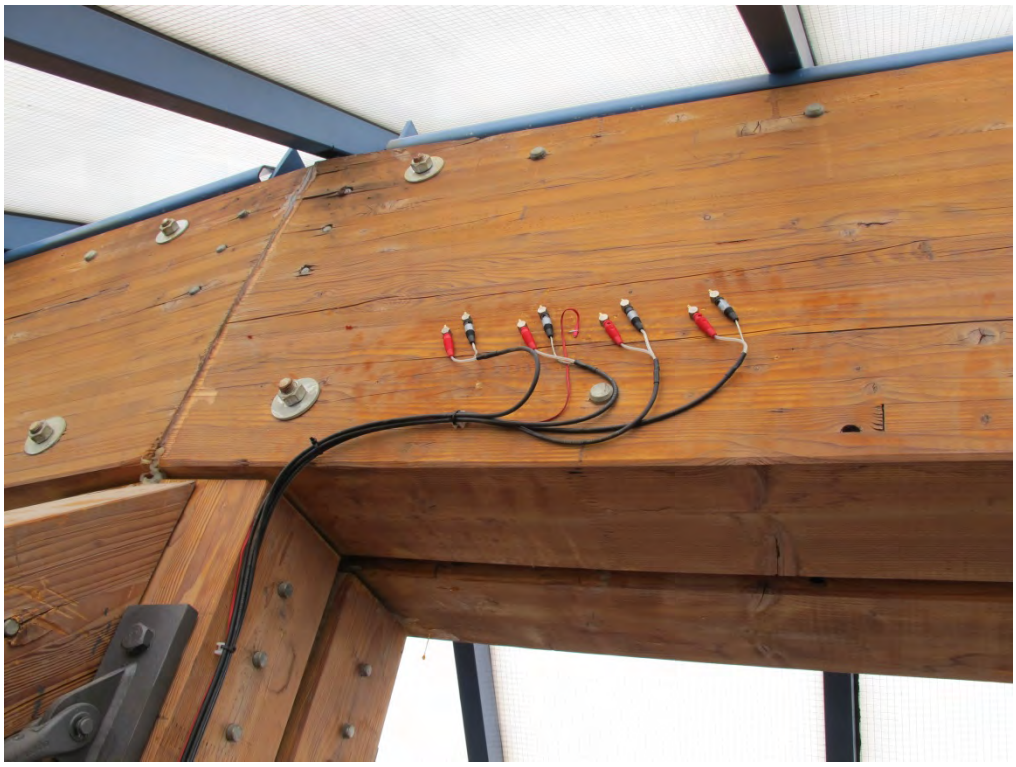
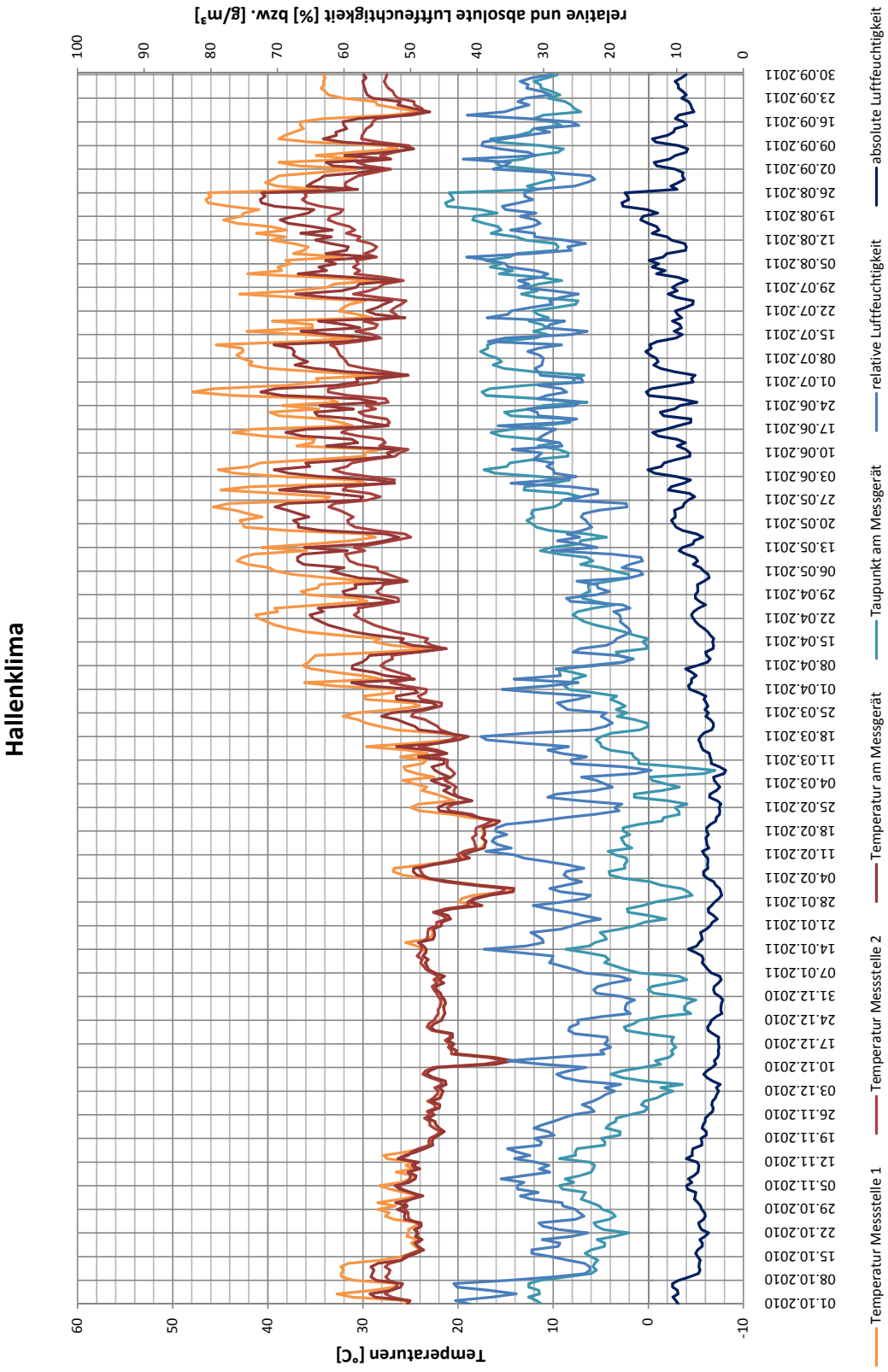


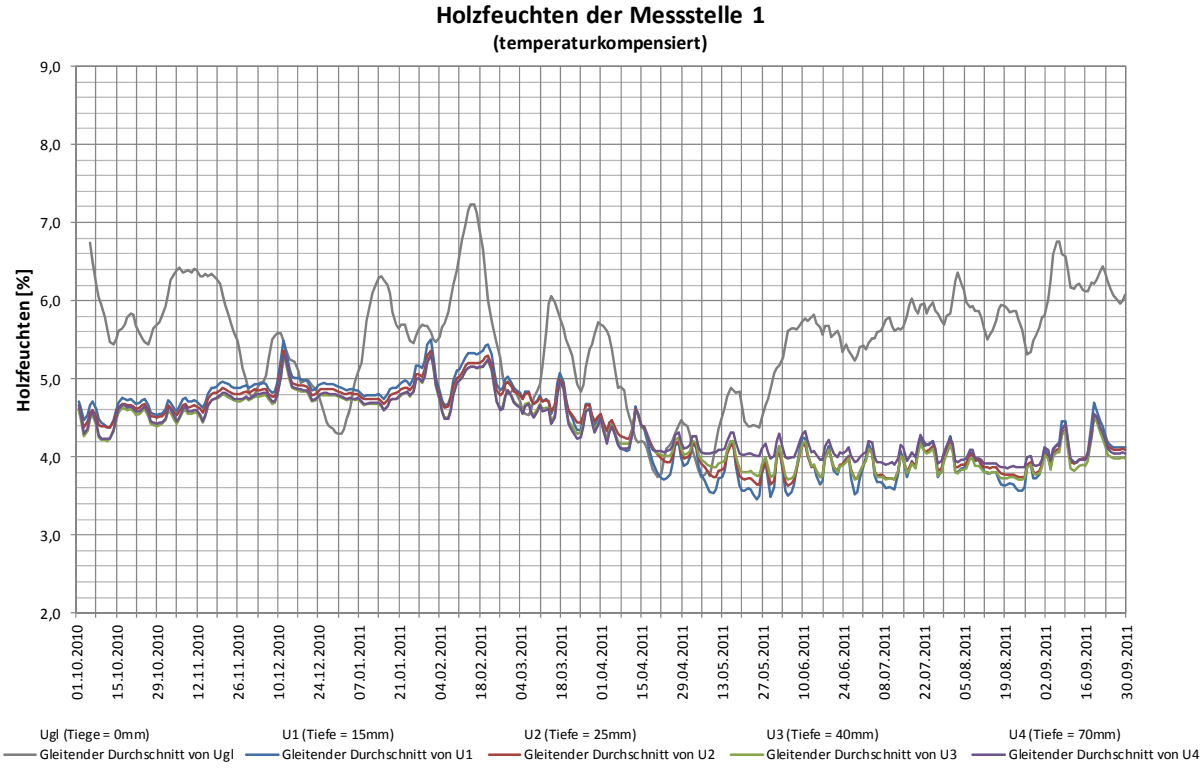
Abbildung D1-4: Ansicht Messstelle 2

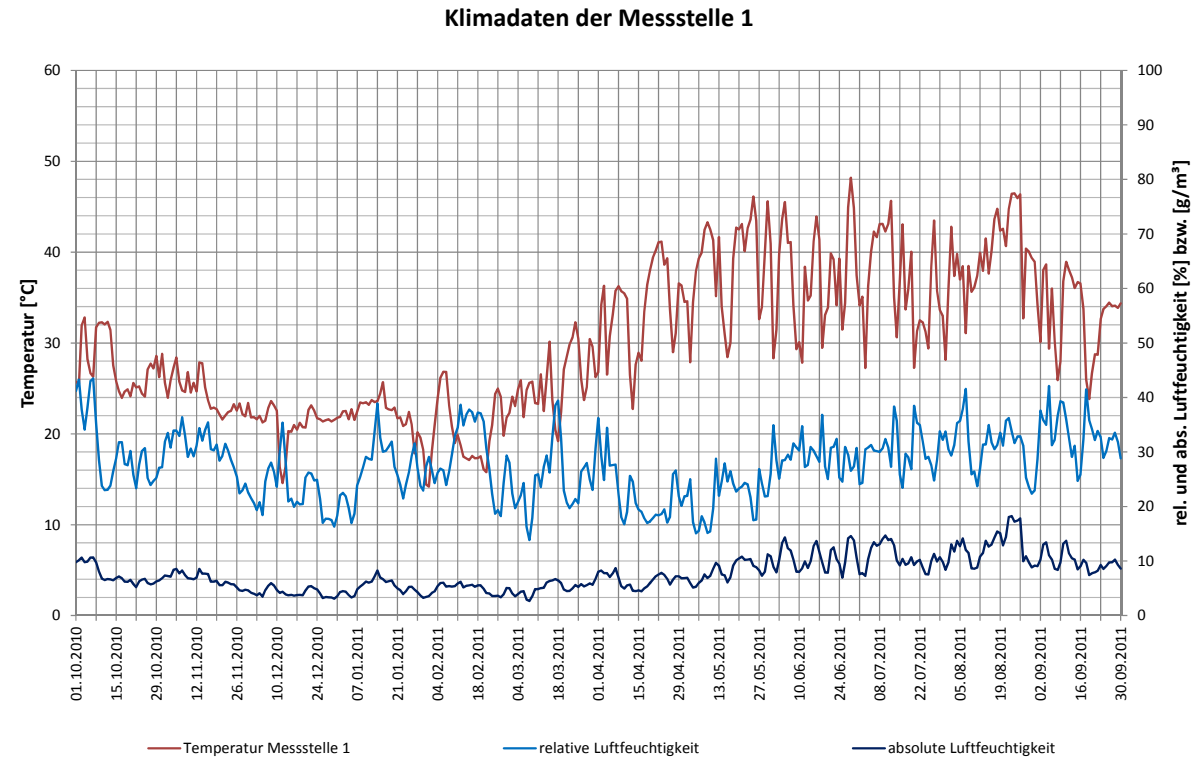
D1 Paul Wegmann-Halle Ingolstadt



D1 Paul-Wegmann-Halle Ingolstadt

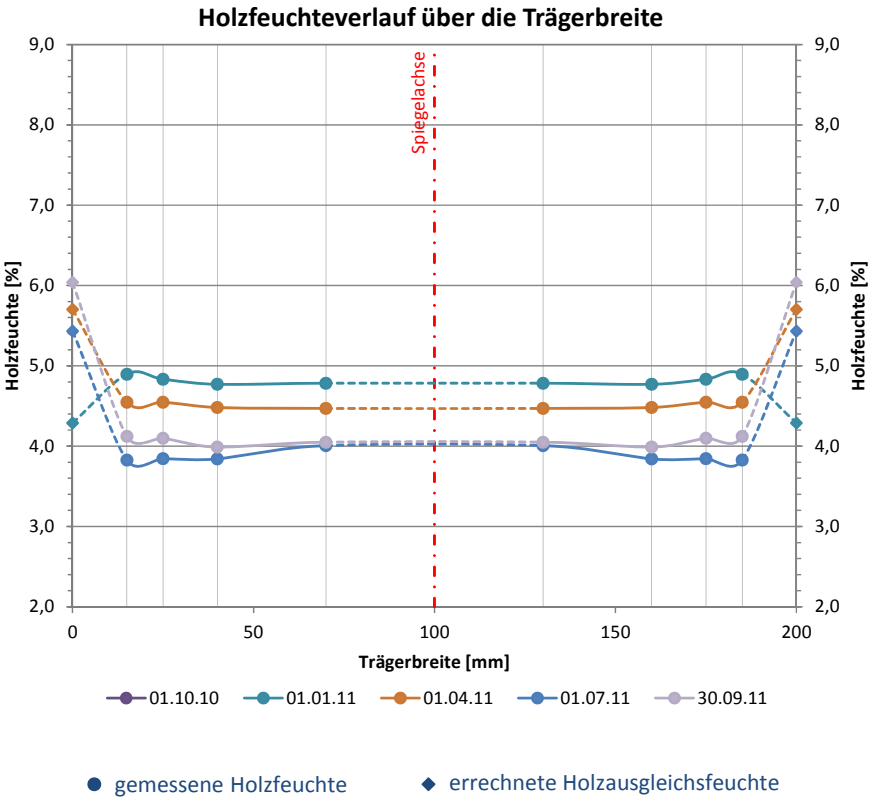
Messstelle 1: Obergurt Fachwerkträger, im Firstbereich unter Lichtband

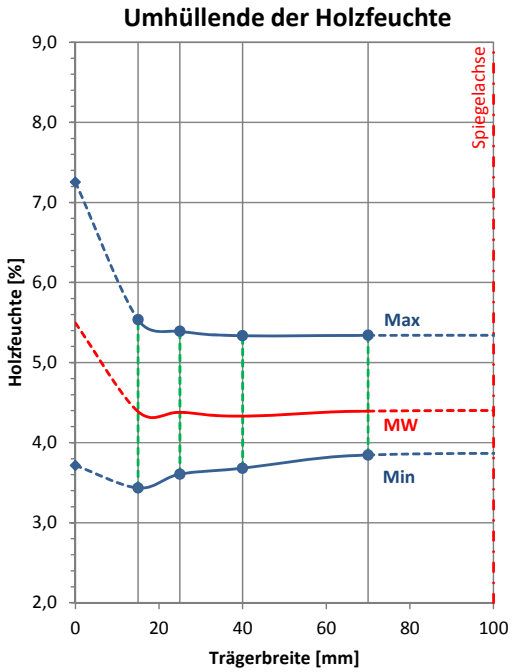


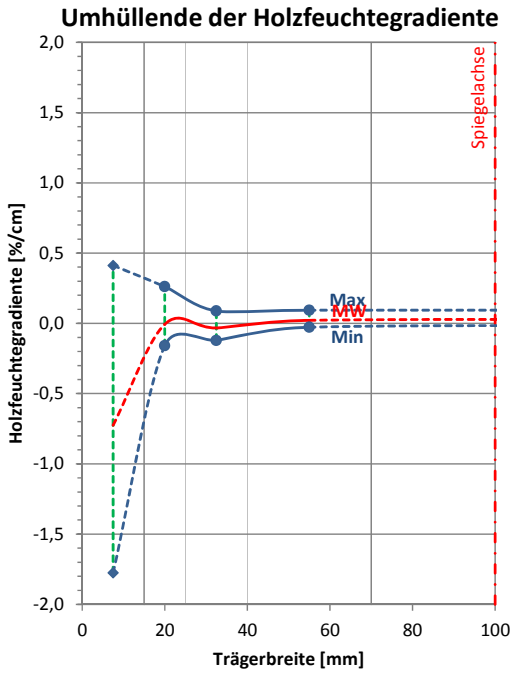


D1 Paul-Wegmann-Halle Ingolstadt

Messstelle 1: Obergurt Fachwerkträger, im Firstbereich unter Lichtband

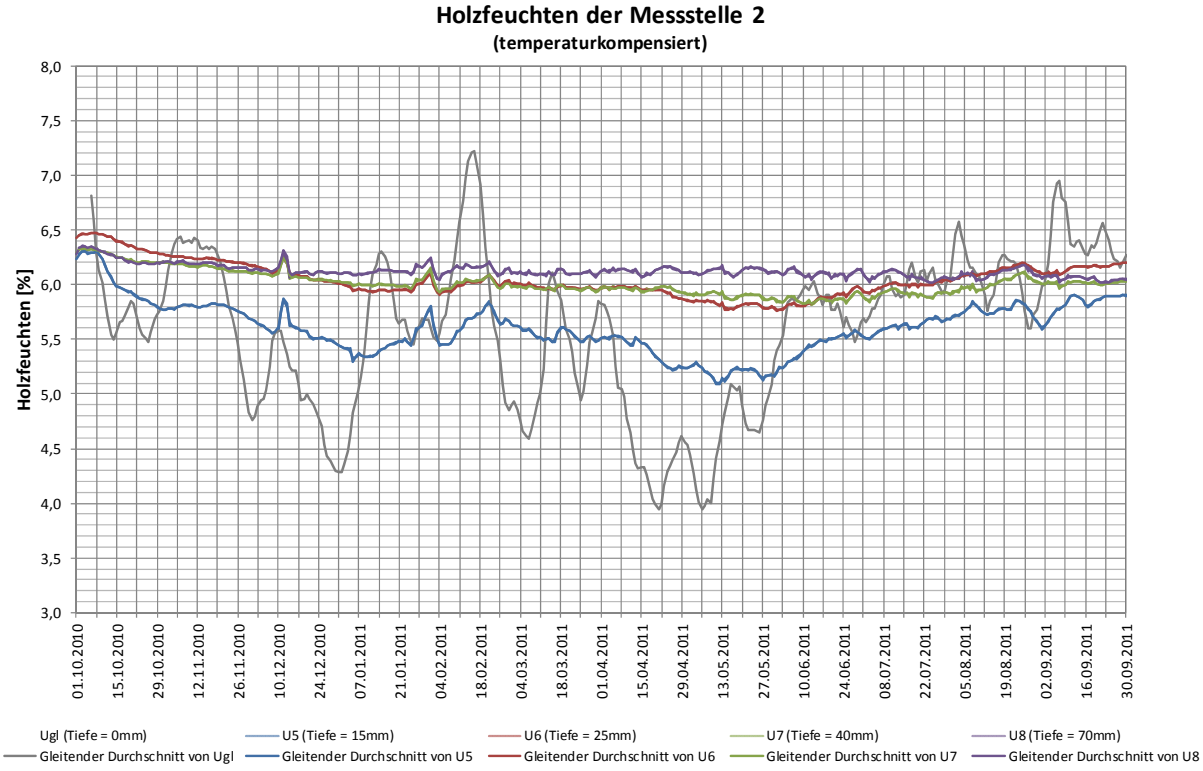


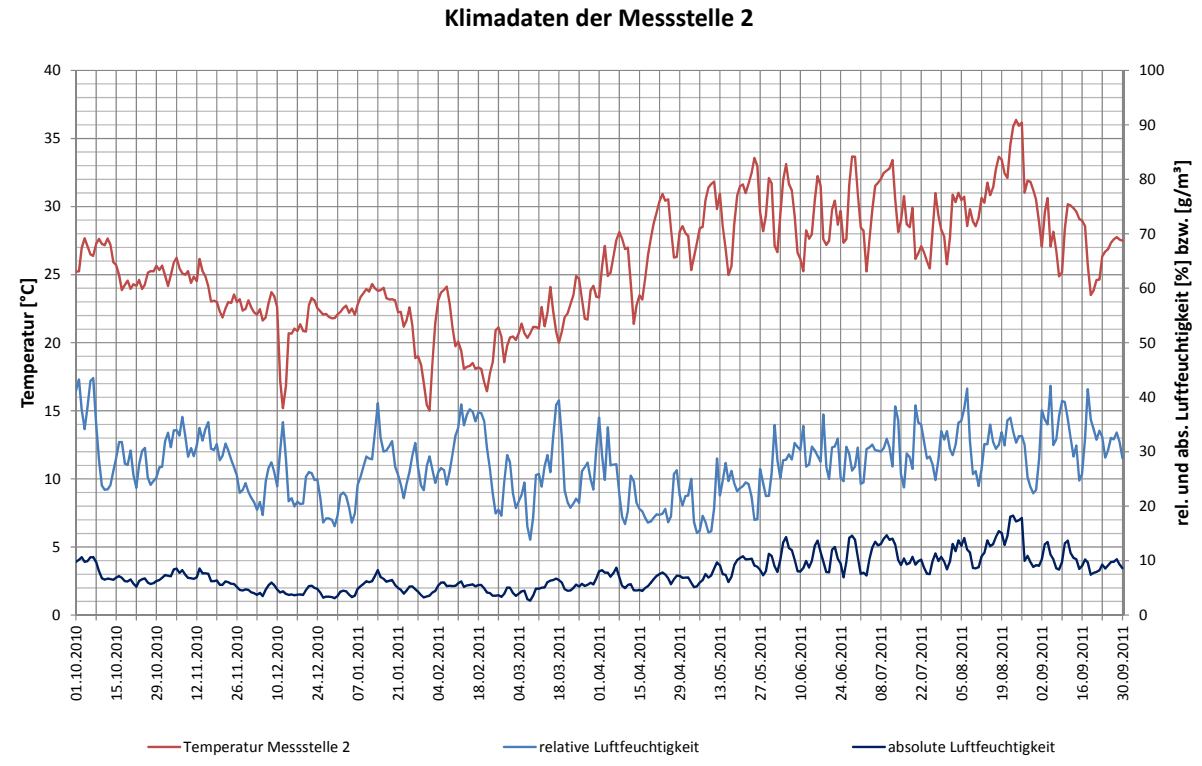




D1 Paul-Wegmann-Halle Ingolstadt

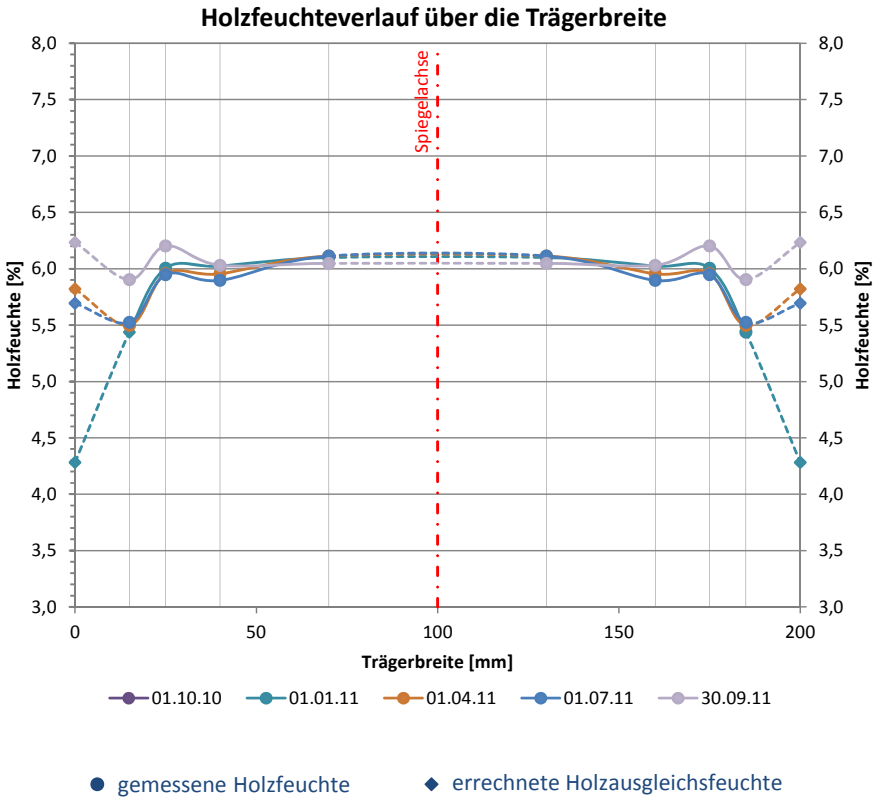
Messstelle 2: Untergurt Fachwerkträger, im Firstbereich unter Lichtband

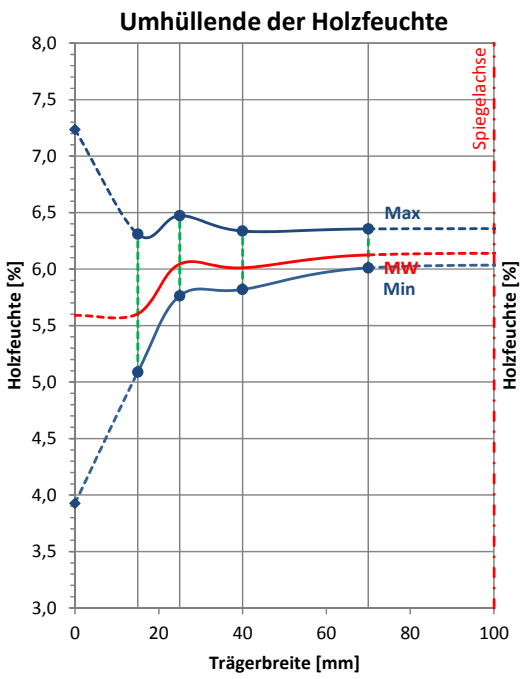


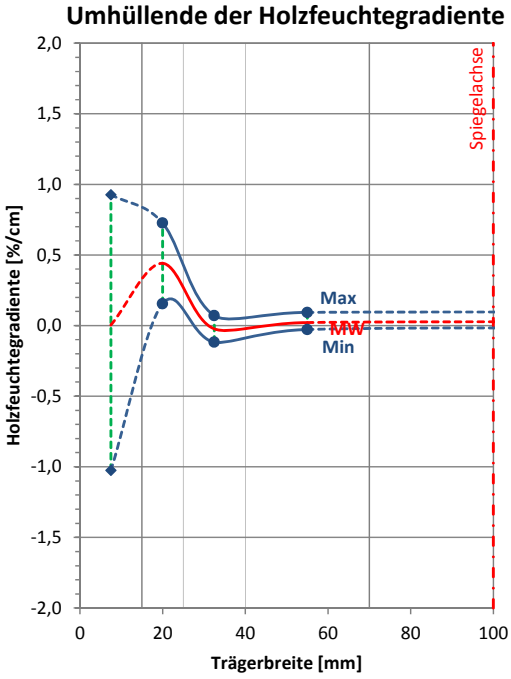


D1 Paul-Wegmann-Halle Ingolstadt

Messstelle 2: Untergurt Fachwerkträger, im Firstbereich unter Lichtband







Anzeichen einer Parallelverschiebung der Messergebnisse des Sensors in 15 mm Tiefe (vgl. Absatz 5.9 im Hauptteil)!

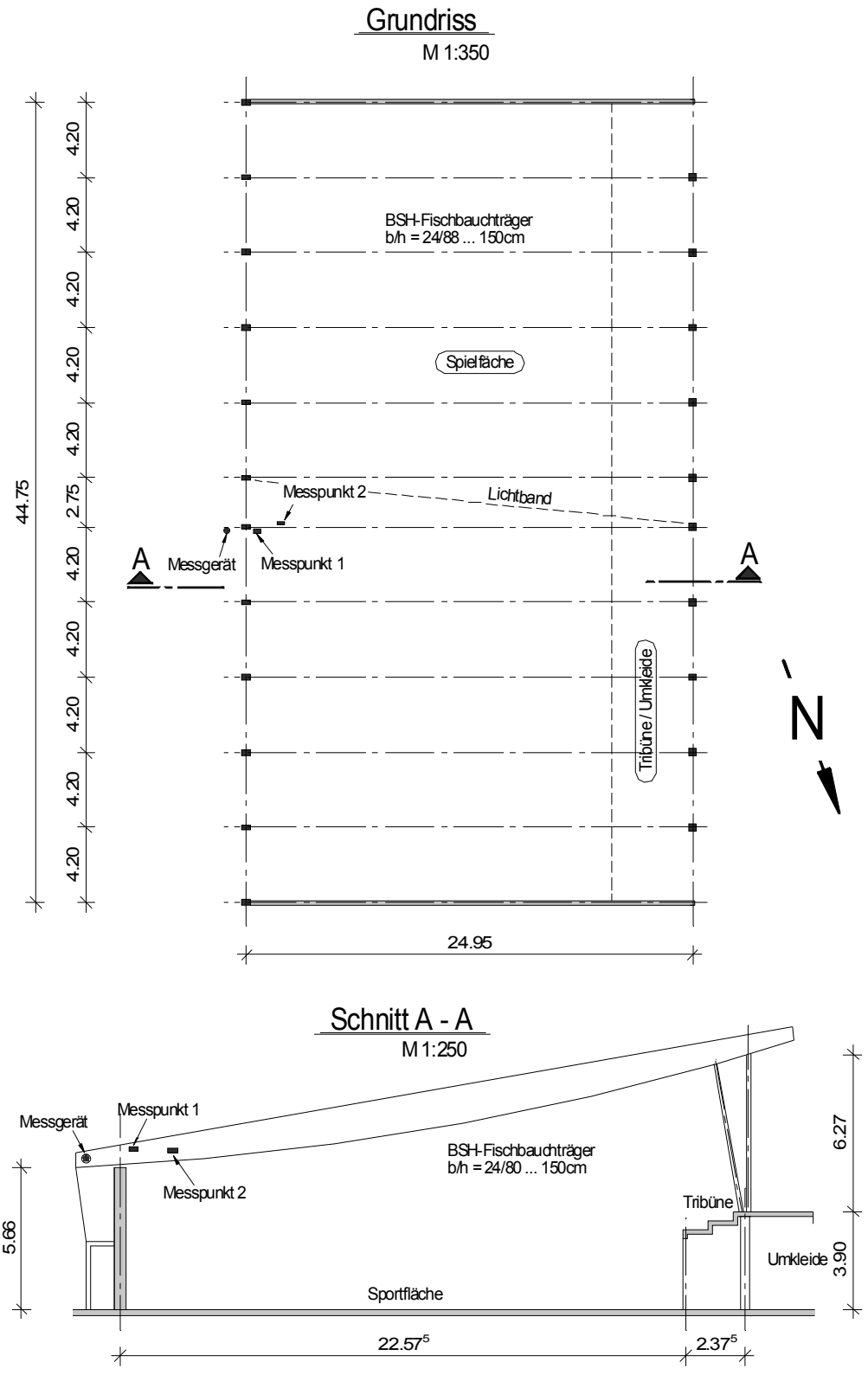
D2 Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern

Anschrift:	Ludlmühlstraße 17 83671 Benediktbeuern
Ansprechpartner:	Herr und Frau Koenen
Anwesende vor Ort:	Philipp Dietsch, Andreas Gamper, Herr Koenen
Installationsdatum:	14.09.2010, 17:00 - 20:00
Letztes Auslesedatum:	12.10.2011, 11:00 – 12:00
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, beheizter, energetisch gedämmter Raum Temperatur: 20,6°C; Luftfeuchte: 60,8 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Traufseite, nahe Fassade an Lüftungsauslass (Beurteilung des Einflusses einer Lüftungsanlage)
Messstelle 2:	Traufseite über dem Spielfeld im Bereich des Lichtbands (Regelbereich über Spielfläche, Beeinflussung durch direkte Sonneneinstrahlung durch das Lichtband)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	9,6	102,2	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 1
u2	25	9,6	101,4	gemessene	
u3	40	9,7	101,0	Temperatur	
u4	70	10,0	100,5	t_1: 21,4°C	
u5	15	9,3	102,7	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	9,8	101,6	gemessene	
u7	40	9,4	102,2	Temperatur	
u8	70	9,4	101,9	t_2: 21,0°C	

Tragsystem:	Fischbauchträger als Einfeldtr. mit Kragarm, Spannweite ℓ = 24,95m 12 Achsen mit einem Trägerachsabstand e = 4,20 m Trägerabmessungen b/h = 24/ 80 … 150 Lamellenstärke t = 32 mm Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:350
4.20
4.20
4.20
4.20
4.20
2.75
4.20
4.20
4.20
4.20
4.20
44.75
BSH-Fischbauchträger
b/h = 24/88 ... 150cm
Spielfläche
Messpunkt 2
Lichtband
A
Messgerät
Messpunkt 1
A
Tribüne / Umkleide
N
24.95
Schnitt A - A
M 1:250
Messgerät
Messpunkt 1
Messpunkt 2
BSH-Fischbauchträger
b/h = 24/80 ... 150cm
Tribüne
Umkleide
Sportfläche
5.66
6.27
3.90
22.57⁵
2.37⁵

Bilder:



Abbildung D2-1: Ansicht Tragwerk



Abbildung D2-2: Ansicht Messstation

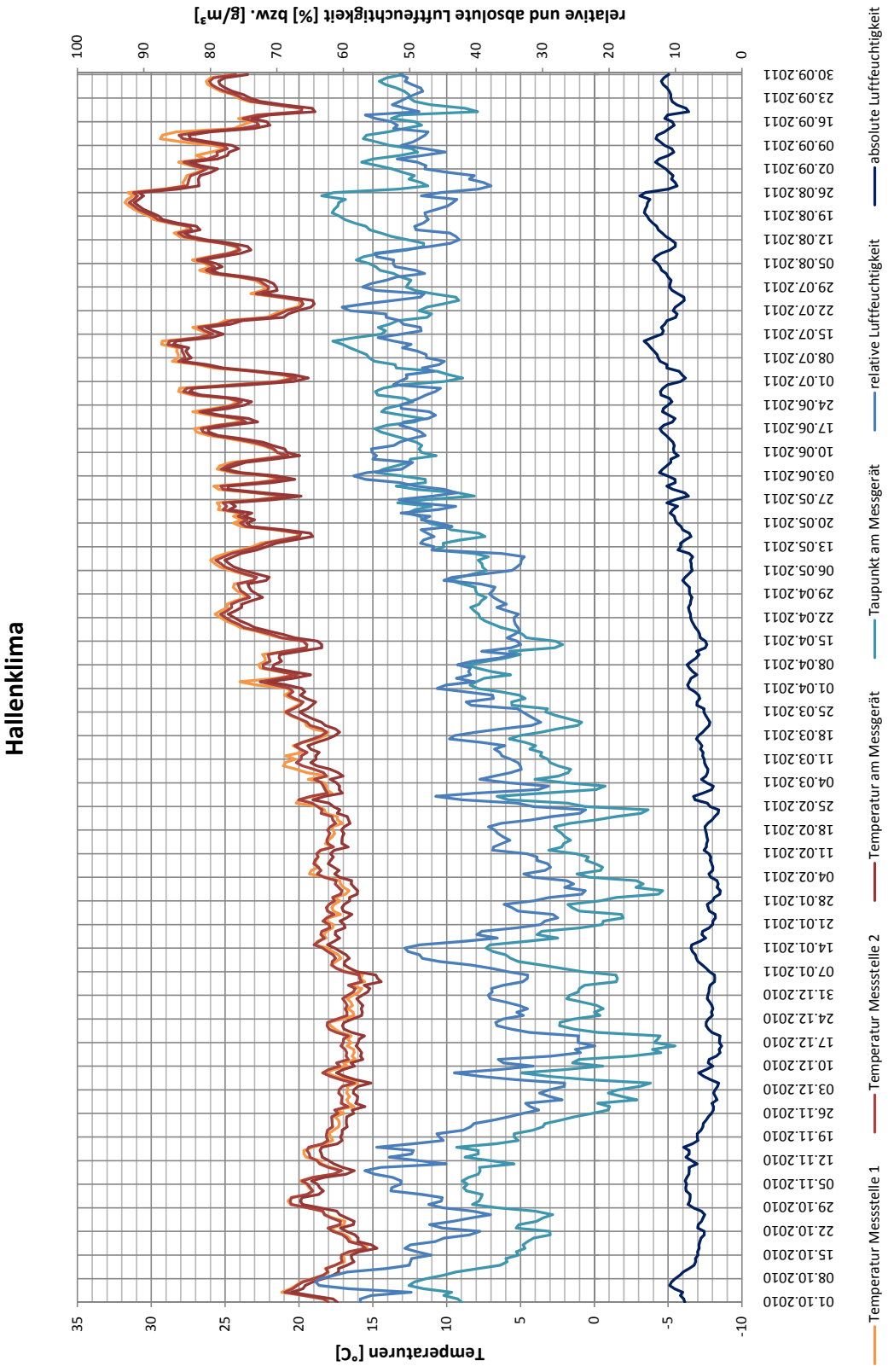


Abbildung D2-3: Ansicht Messstelle 1



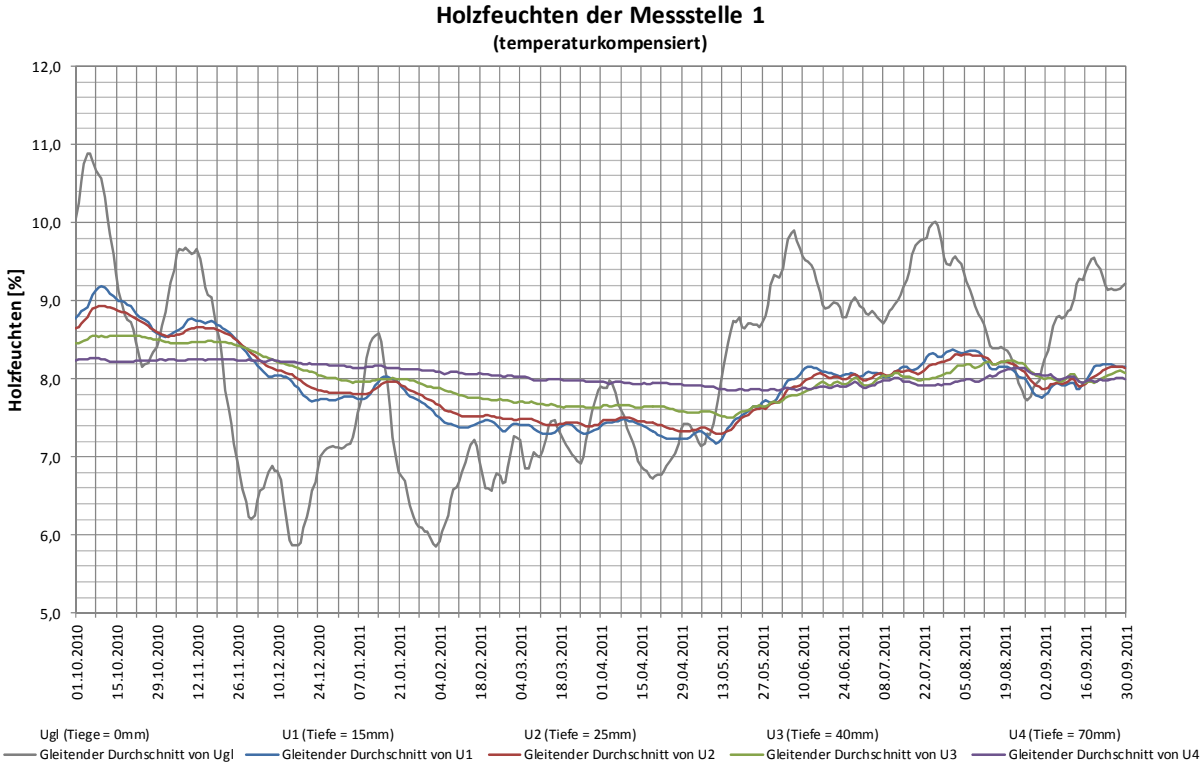
Abbildung D2-4: Ansicht Messstelle 2

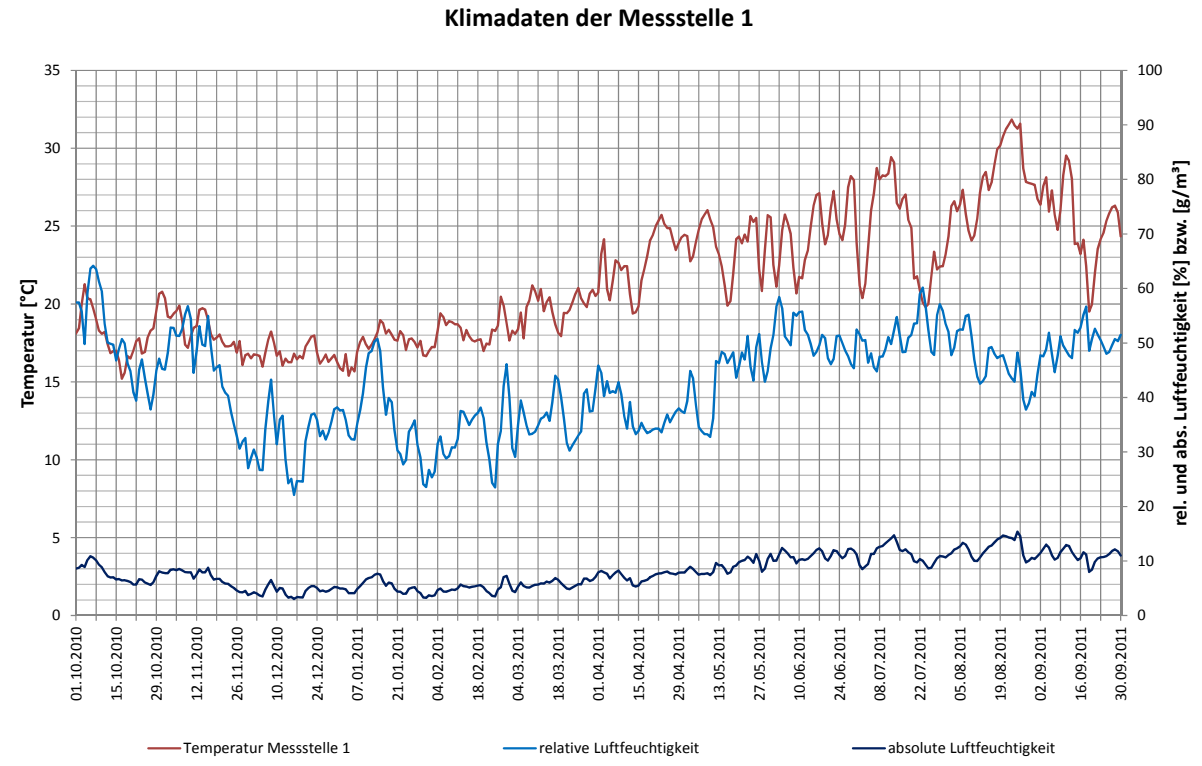
D2 Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern



D2 Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern

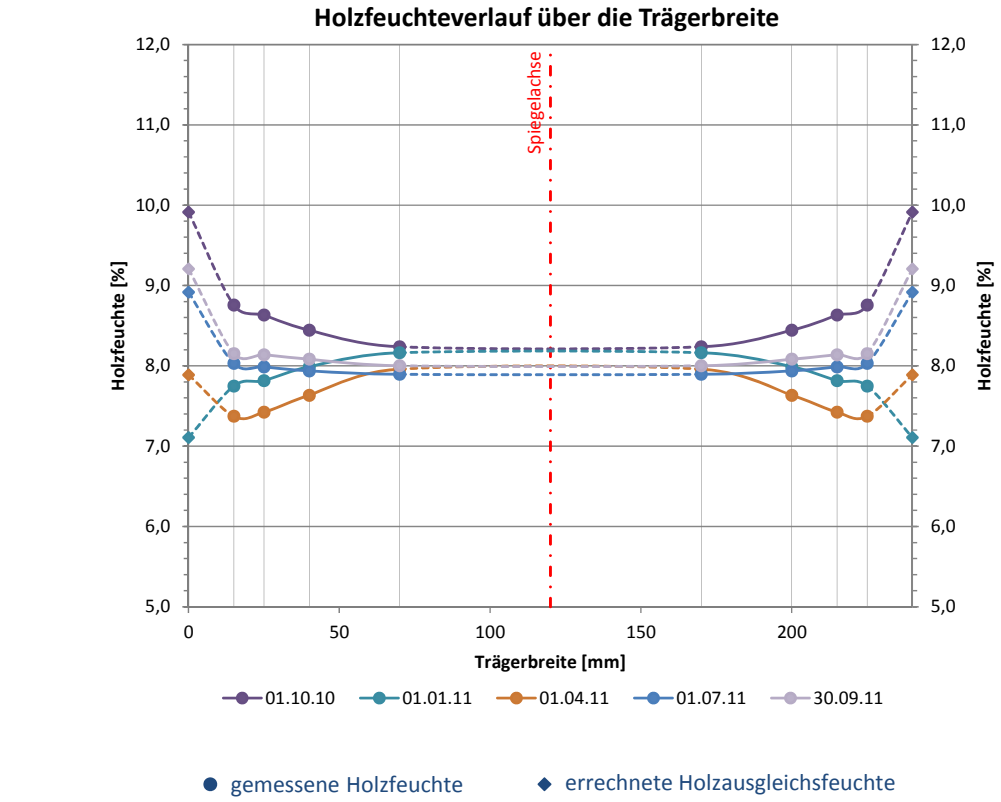
Messstelle 1: Traufseite, Nahe Fassade an Lüftungsauslass

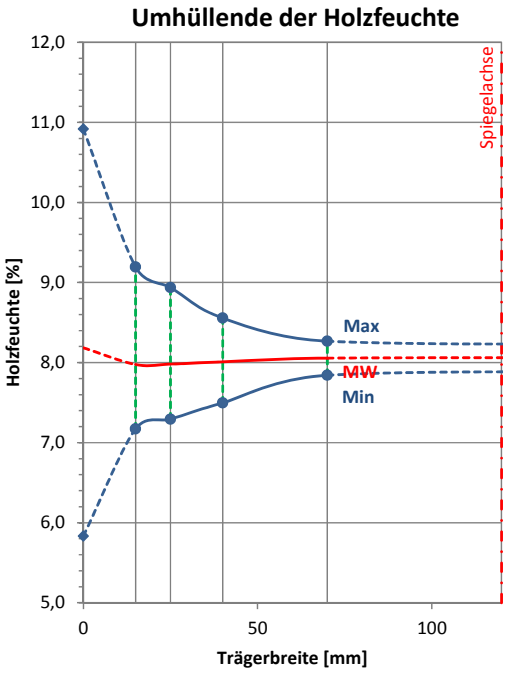


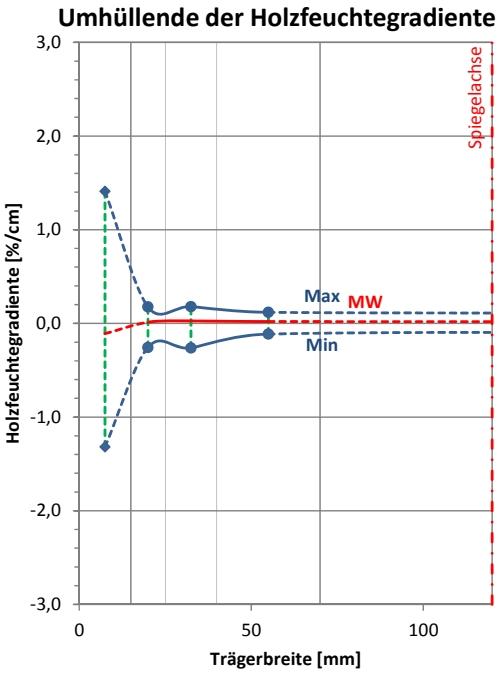


D2 Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern

Messstelle 1: Traufseite, Nahe Fassade an Lüftungsauslass

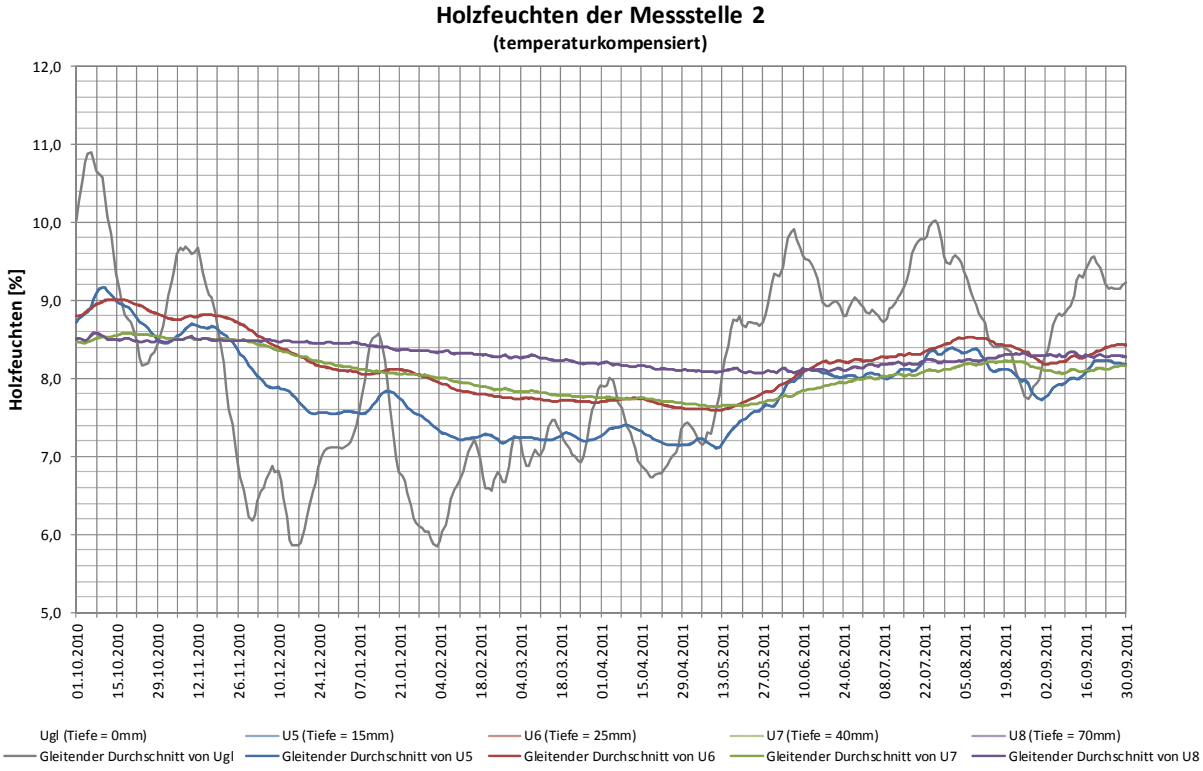


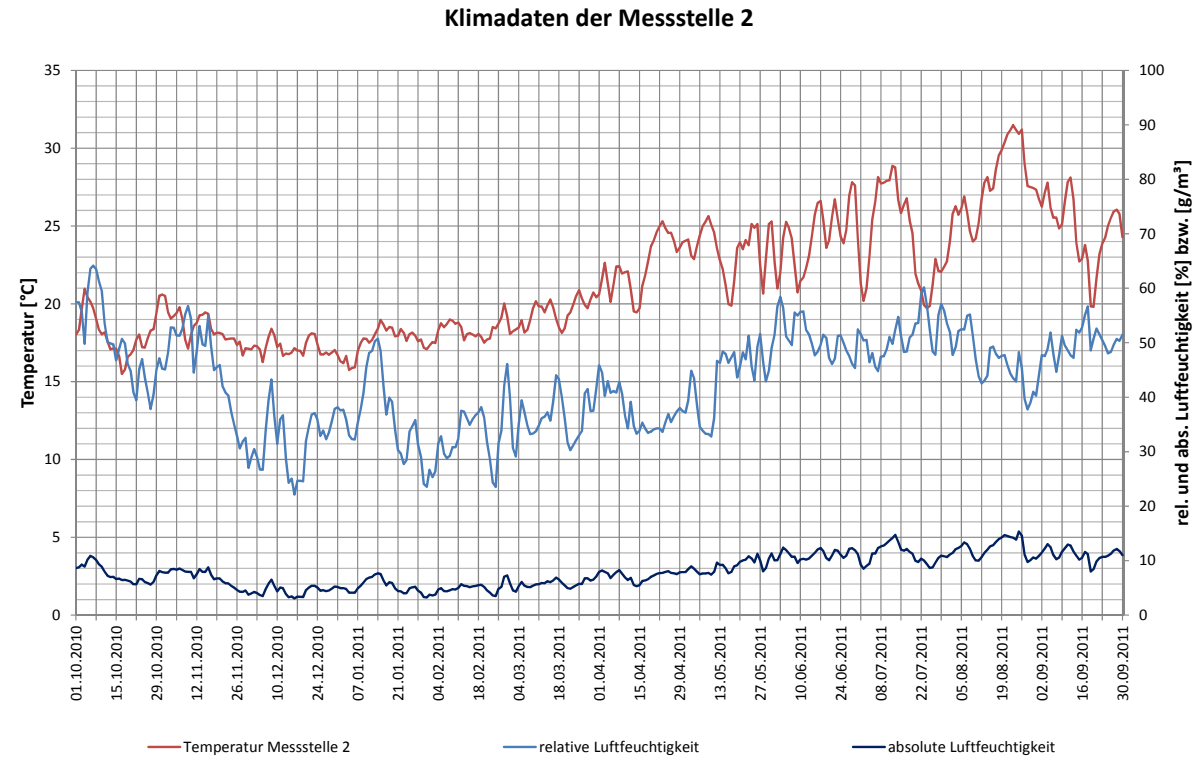




D2 Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern

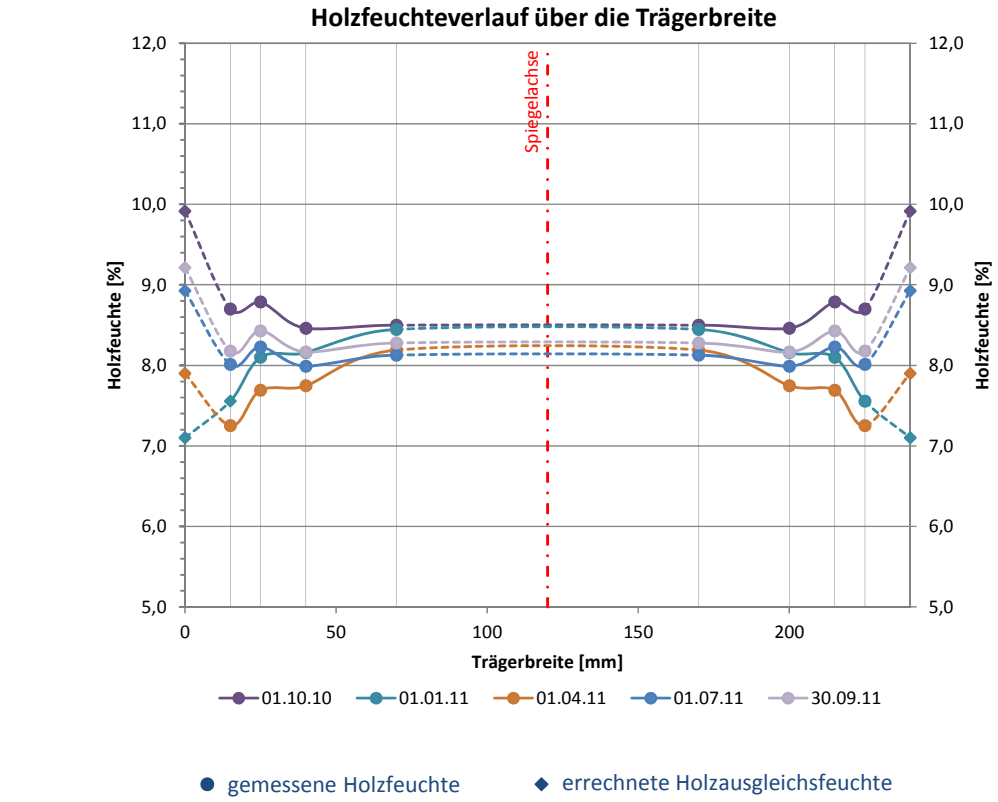
Messstelle 2: Traufseite über dem Spielfeld im Bereich des Lichtbands

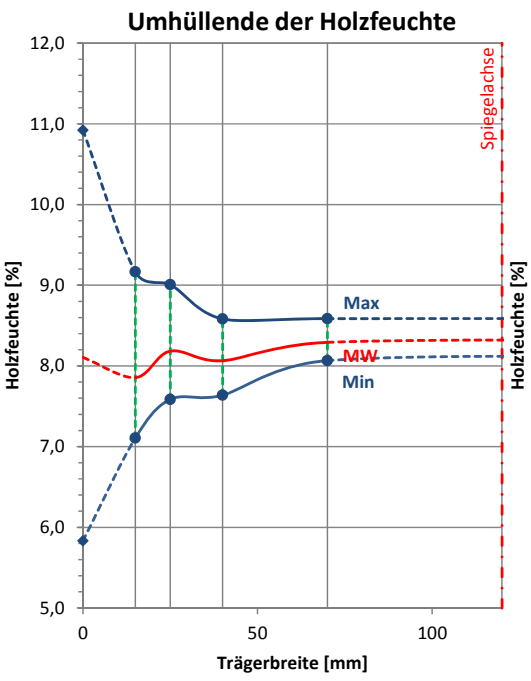


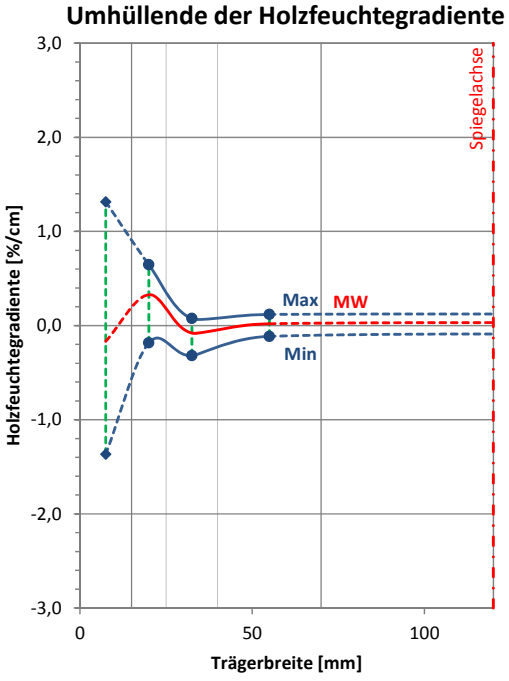


D2 Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern

Messstelle 2: Traufseite über dem Spielfeld im Bereich des Lichtbands







D3 Turnhalle Gebeleschule München

Anschrift: Gebelestraße 2
81679 München

Ansprechpartner: Herr Fischer (vor Ort)

Anwesende vor Ort: Andreas Gamper, Manuel Waidelich, Herr Fischer

Installationsdatum: 01.10.2010, 13:30 - 16:00
Letztes Auslesedatum: 13.10.2011, 13:00 – 14:00

Umgebungsbedingungen: Allseitig geschlossener, beheizter, energetisch gedämmter Raum

Temperatur: 21,9°C; Luftfeuchte: 61,3 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: In der Feldmitte über Spielfeld
(Erfassung des Regelbereichs)

Messstelle 2: Am Auflager bei Empore
(Erfassung des Randbereichs mit eventueller Beeinflussung durch Empore, Referenz zur Messstelle 1)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	11,6	93,6	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 1
u2	25	11,8	93,1	gemessene	
u3	40	11,8	93,5	Temperatur	
u4	70	11,5	94,3	t_1: 21,7°C	
u5	15	11,3	94,7	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	11,3	94,8	gemessene	
u7	40	11,4	94,3	Temperatur	
u8	70	11,3	94,9	t_2: 22,7°C	

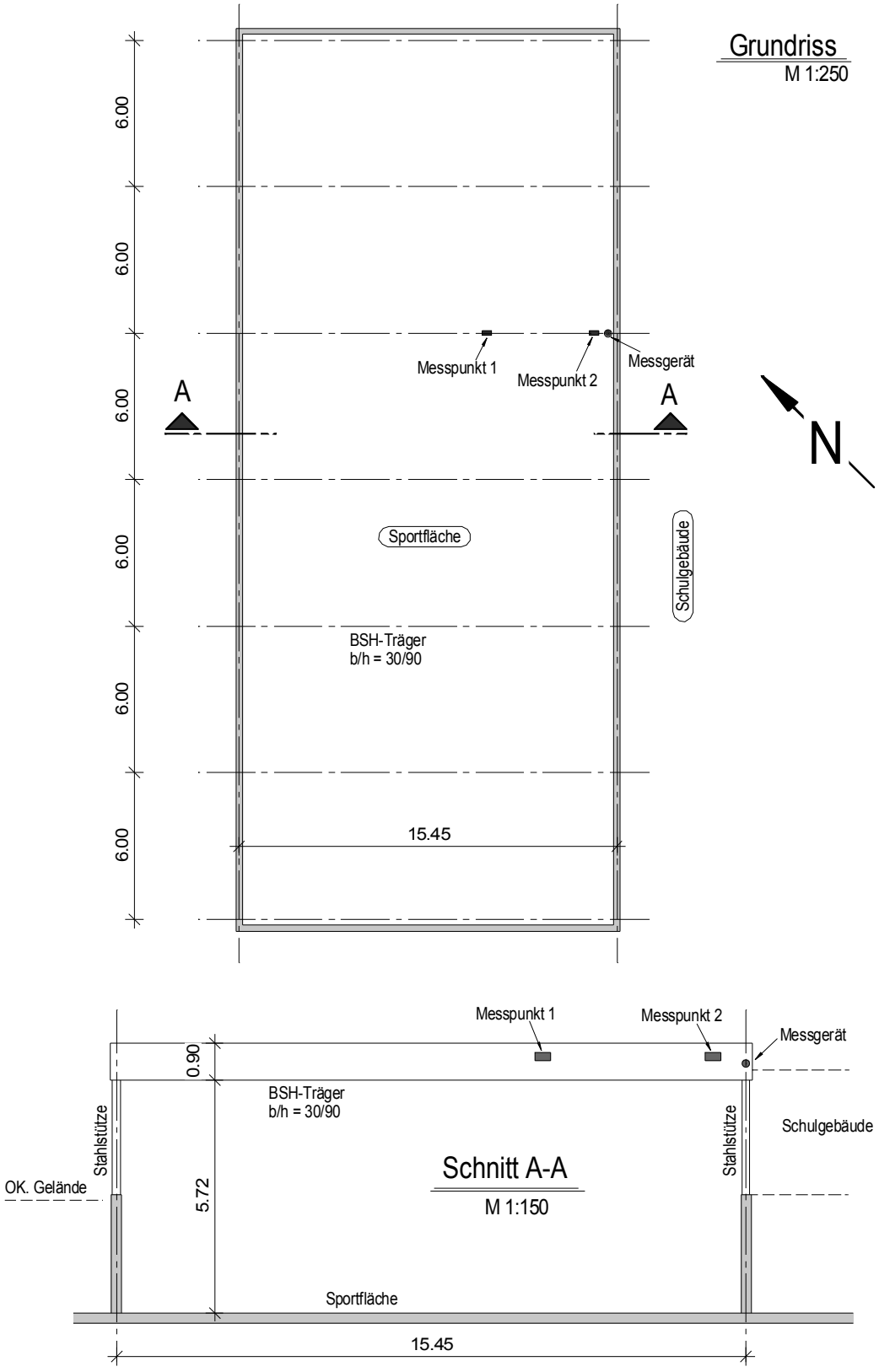
Tragsystem: Einfeldträger, Trägerspannweite ℓ =15,45 m

Trägerabmessungen b/h = 30/90 cm^2

Lamellenstärke t = 40 mm

Offenporiger Anstrich

Skizzen:


Grundriss
M 1:250
6.00
6.00
6.00
6.00
6.00
6.00
A
A
Messpunkt 1
Messpunkt 2
Messgerät
N
Sportfläche
Schulgebäude
BSH-Träger
b/h = 30/90
15.45
Messpunkt 1
Messpunkt 2
Messgerät
0.90
BSH-Träger
b/h = 30/90
Stahlstütze
Stahlstütze
Schulgebäude
OK. Gelände
5.72
Schnitt A-A
M 1:150
Sportfläche
15.45

Bilder:



Abbildung D3-1: Ansicht Tragwerk



Abbildung D3-2: Ansicht Messstation

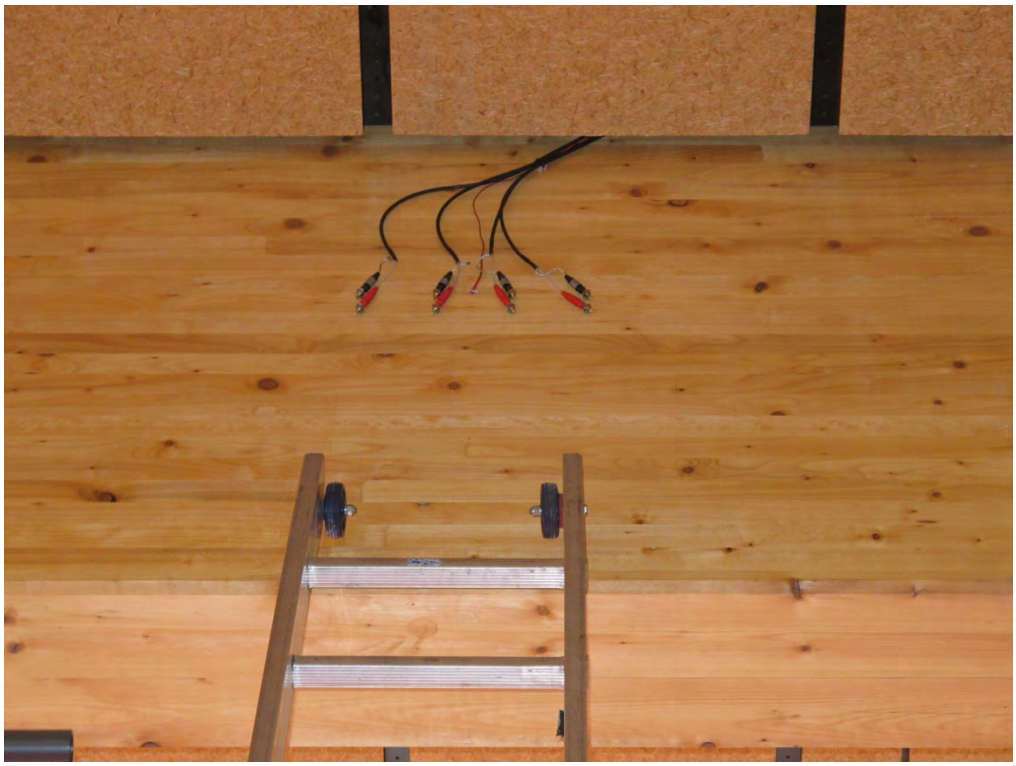


Abbildung D3-3: Ansicht Messstelle 1

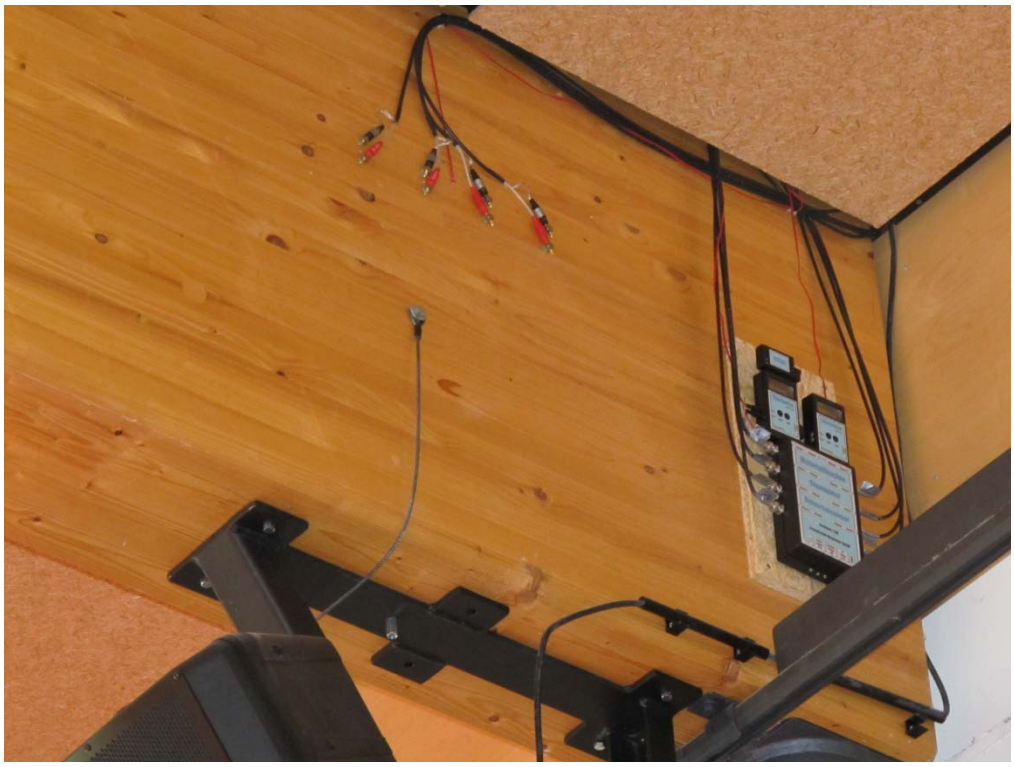
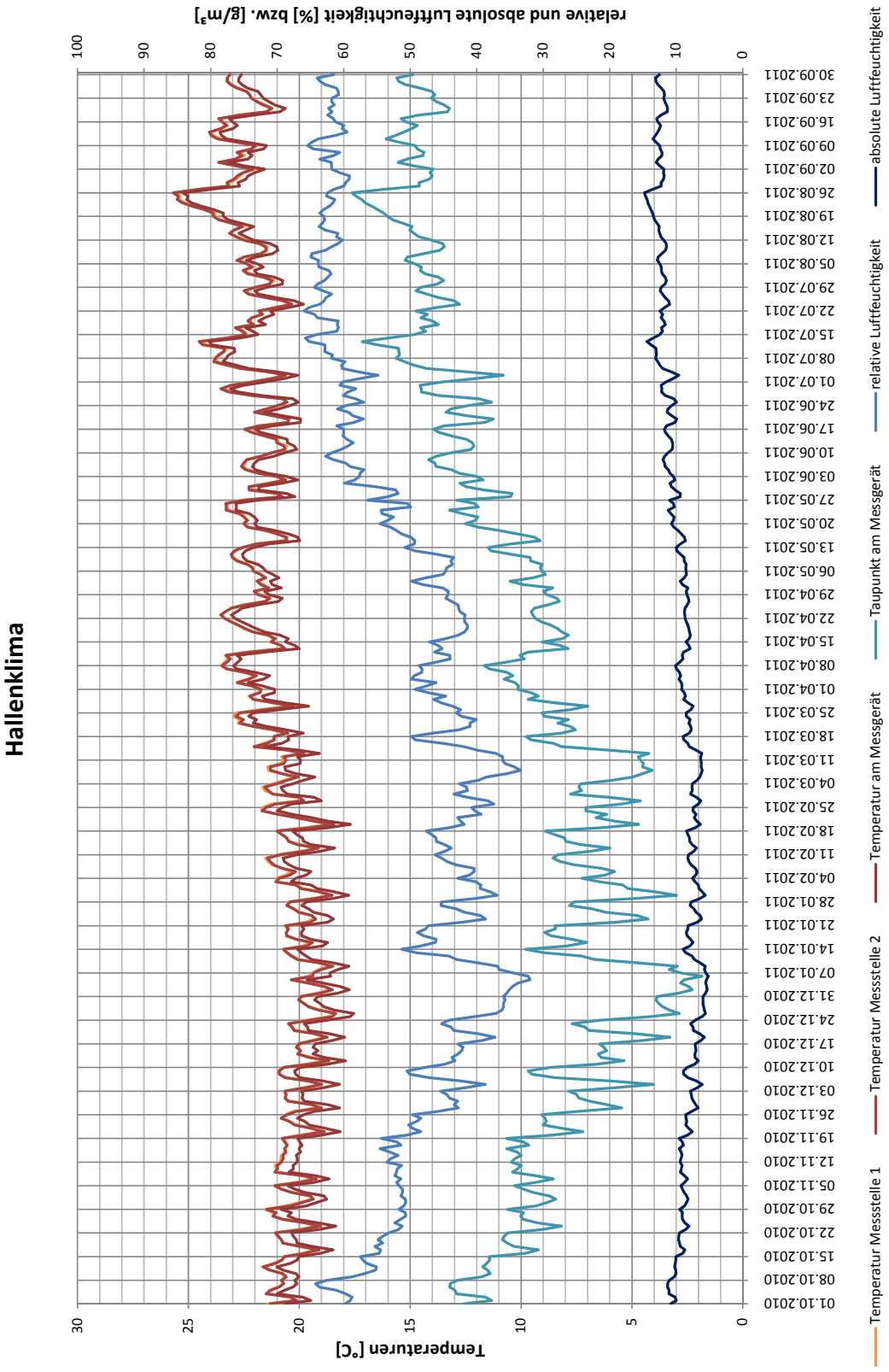


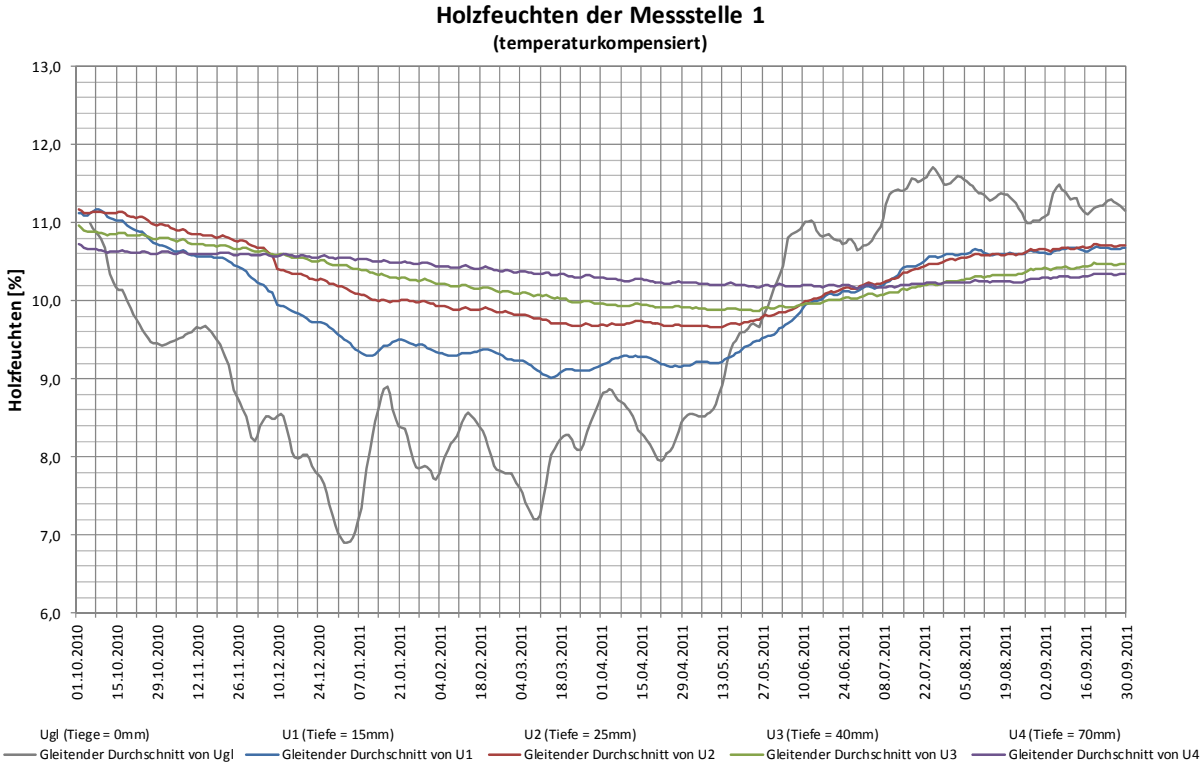
Abbildung D3-4: Ansicht Messstelle 2

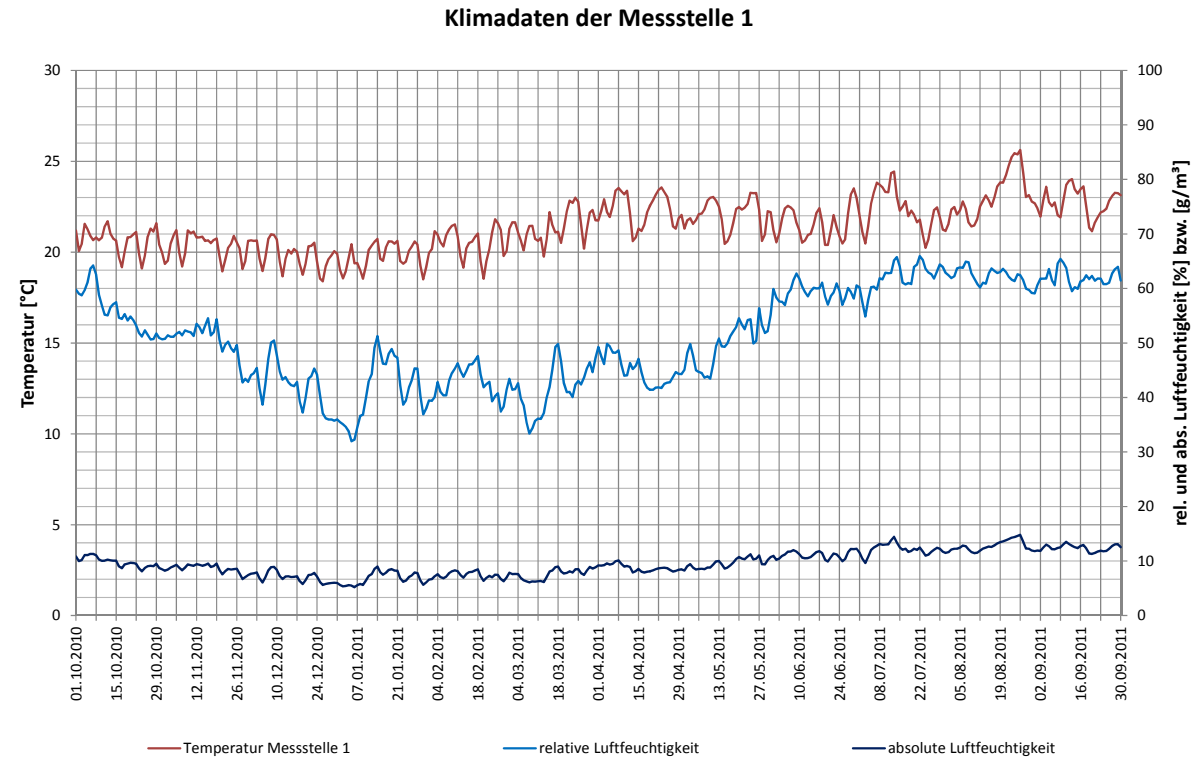
D3 Turnhalle Gebeleschule



D3 Turnhalle Gebeleschule München

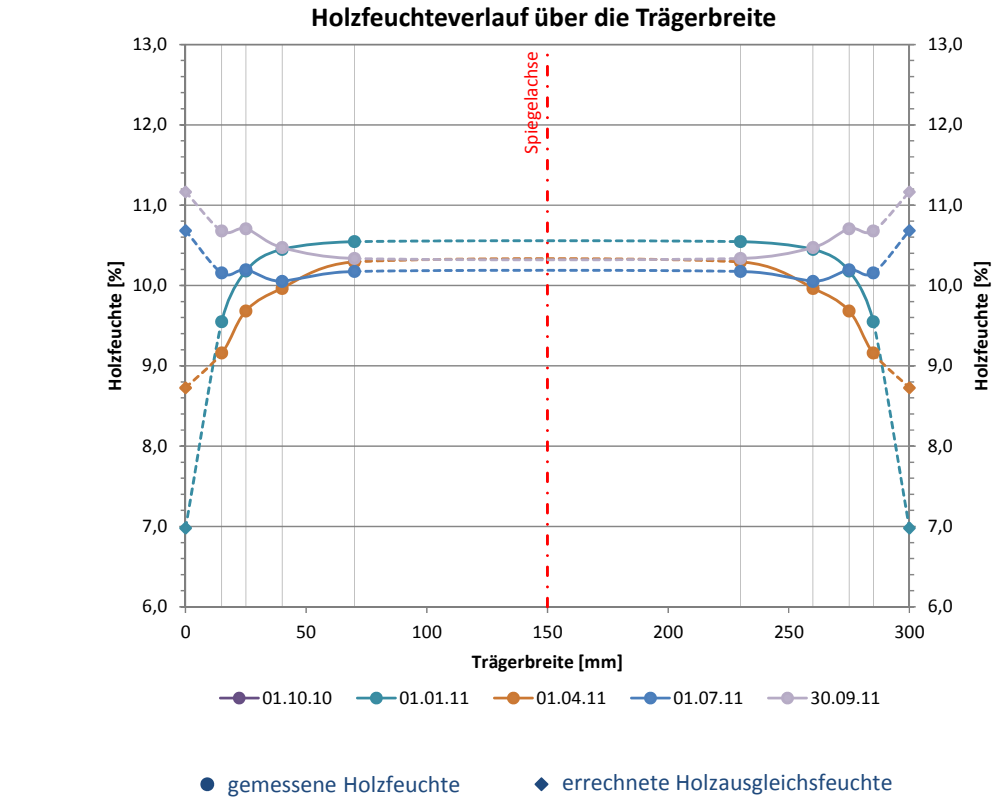
Messstelle 1: In der Feldmitte über Spielfeld

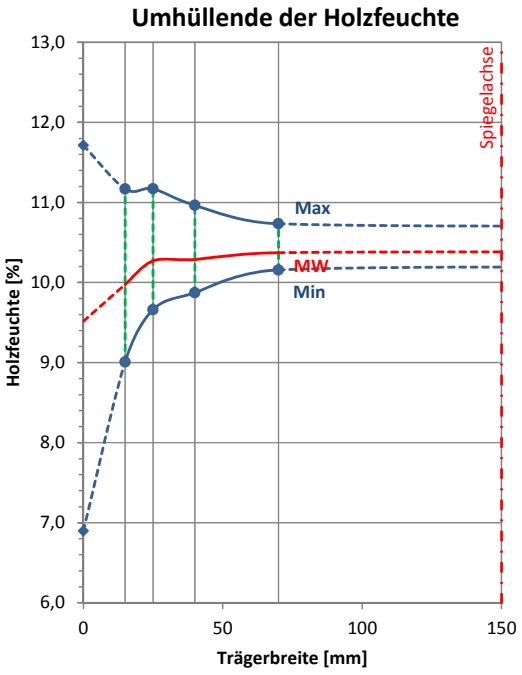


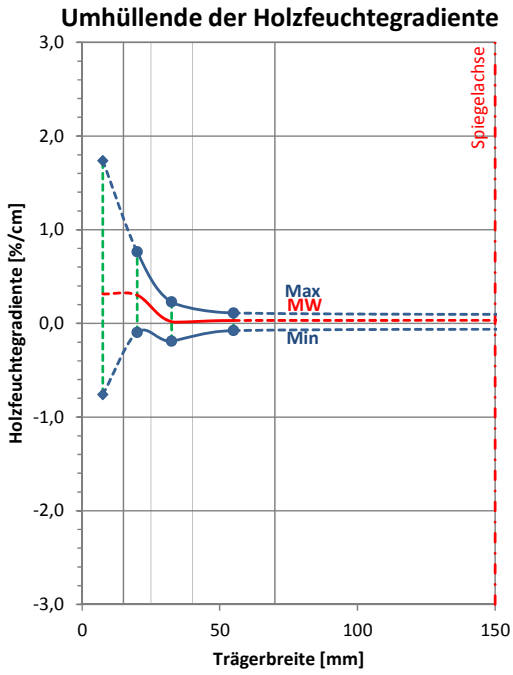


D3 Turnhalle Gebeleschule München

Messstelle 1: In der Feldmitte über Spielfeld

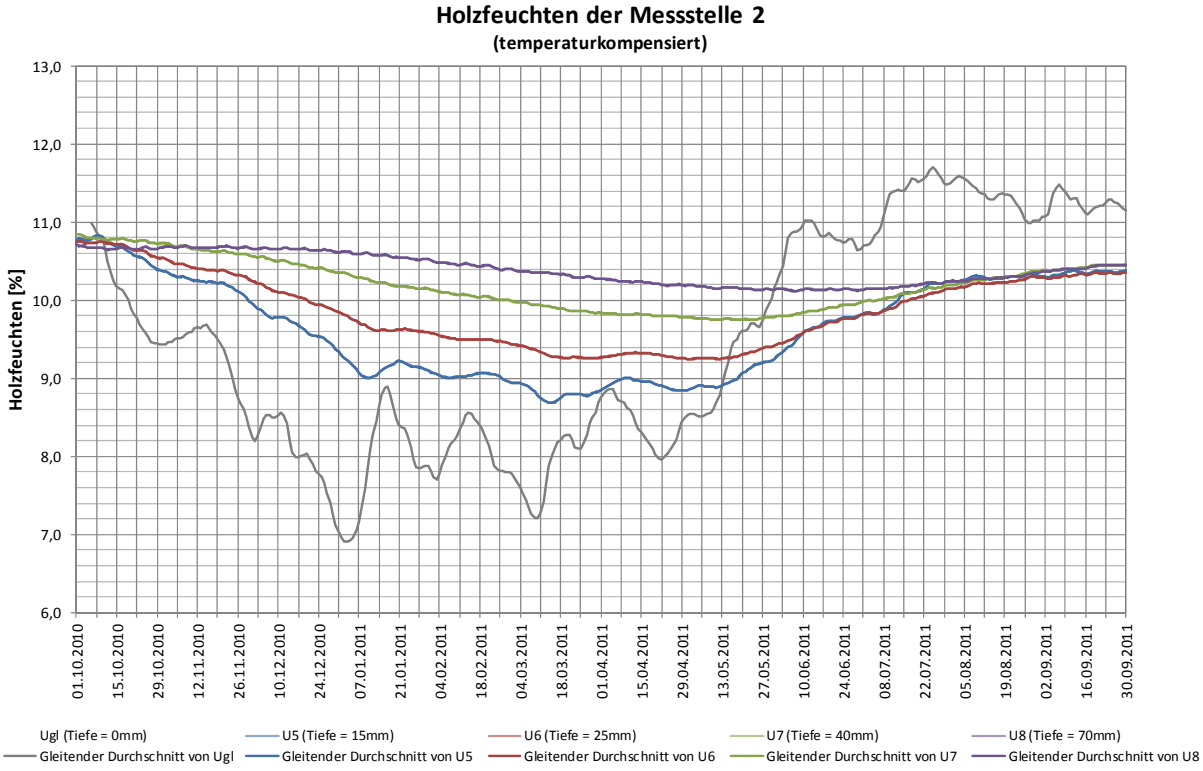


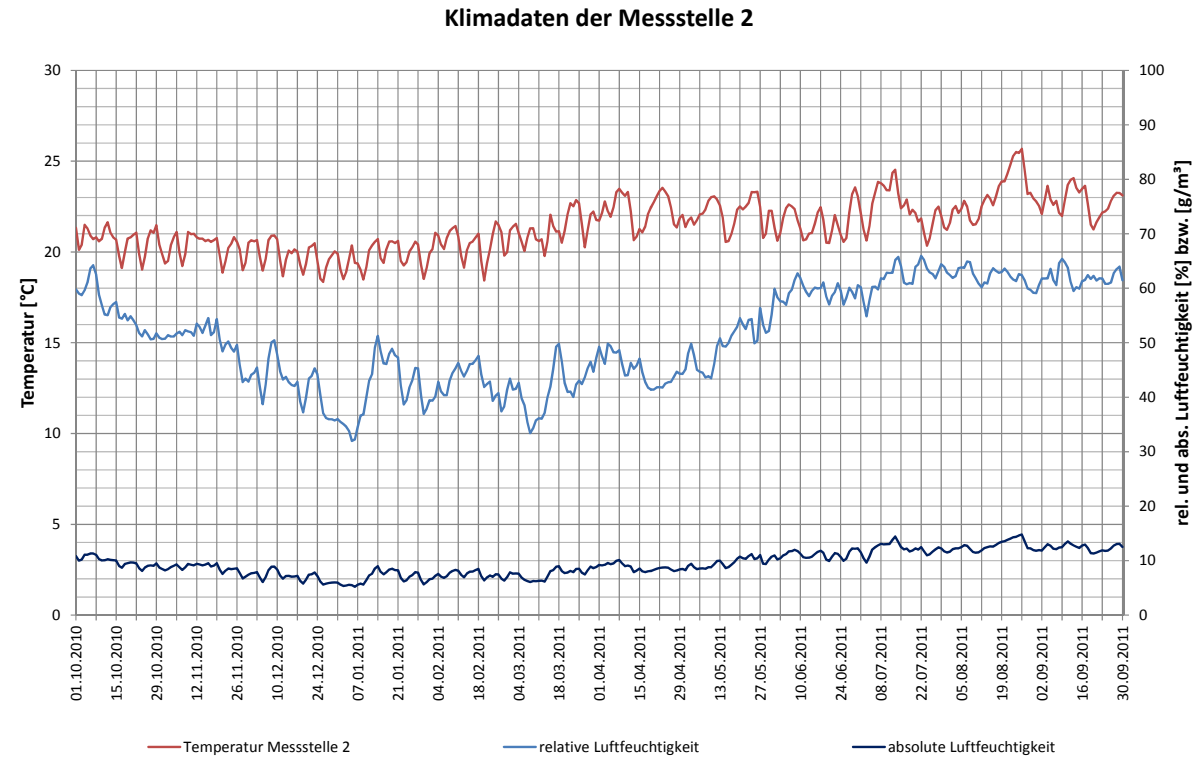




D3 Turnhalle Gebeleschule München

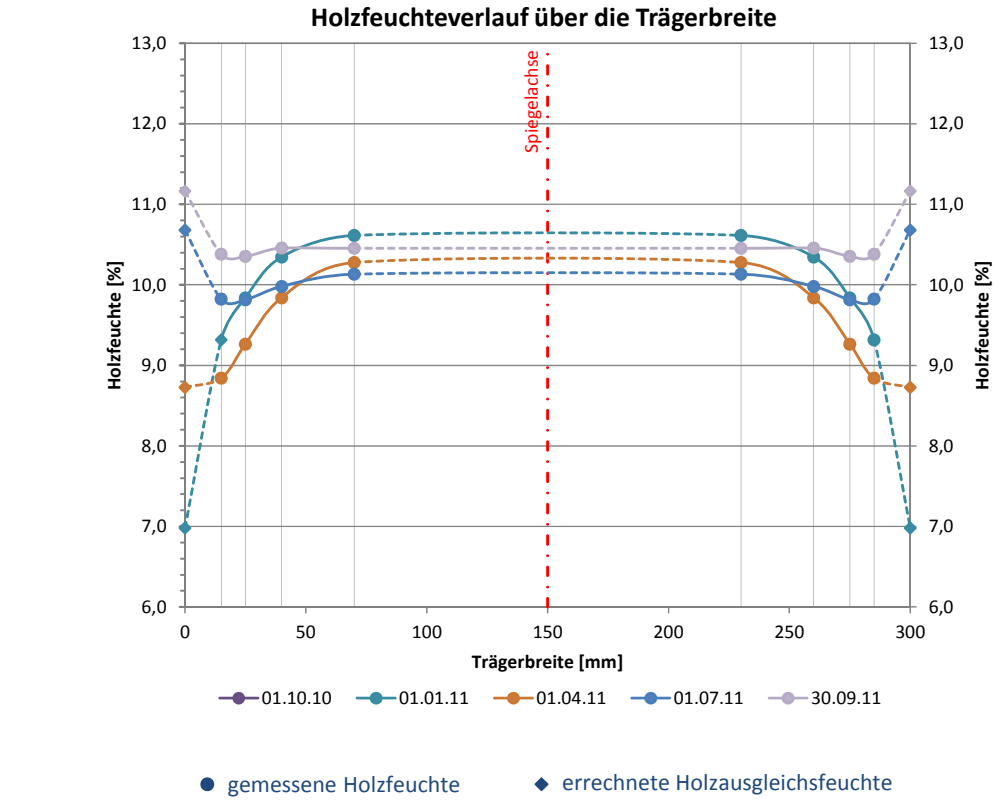
Messstelle 2: Am Auflager bei Empore

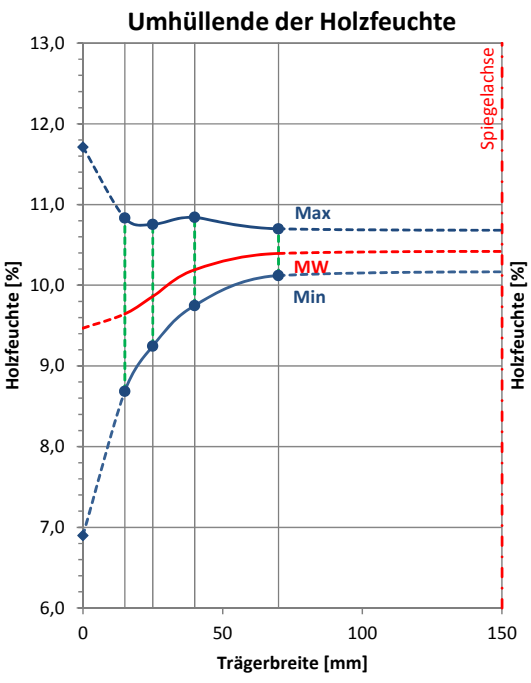


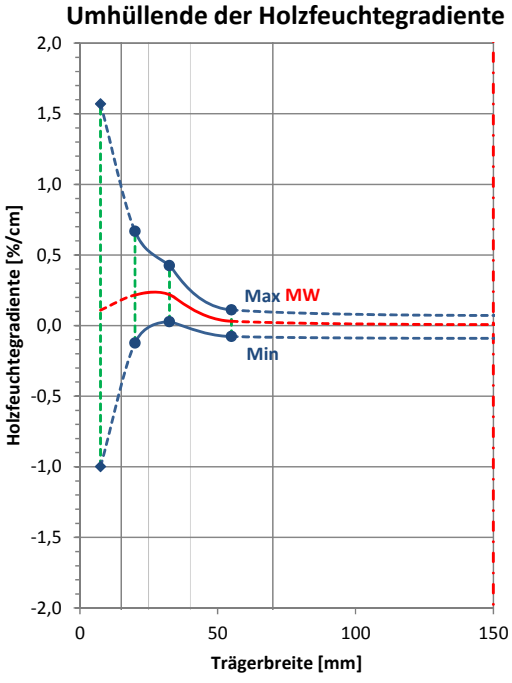


D3 Turnhalle Gebeleschule München

Messstelle 2: Am Auflager bei Empore







E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

Anschrift:	Schäfflerstr. 15 87629 Füssen
Ansprechpartner:	Herr Fritz Schweiger (Besitzer)
Anwesende vor Ort:	Andreas Gamper, Manuel Waidelich, Herr Schweiger

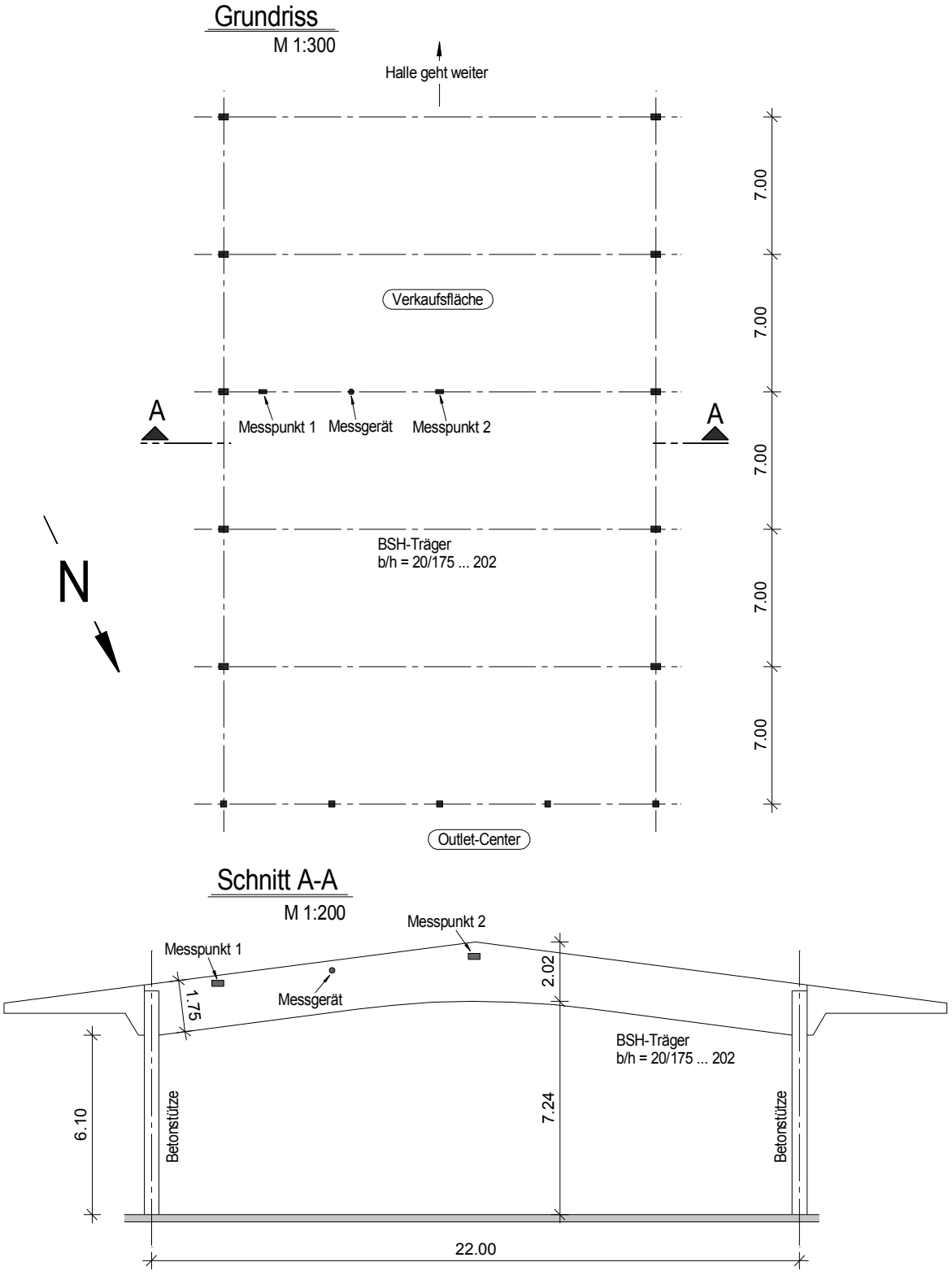
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	28.09.2010, 13:30 - 16:00	11.12.2012, 13:30 - 16:00
Letztes Auslesedatum	27.10.2011, 08:00 – 09:00	01.04.2014, 08:00 - 09:00

Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, beheizter, konstruktiv gedämmter Raum (bis Winter Produktionshalle metallverarbeitender Betrieb, danach Verkaufshalle Sportmarkt) Temperatur: 19,1°C; Luftfeuchte: 48,8 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Im Traufbereich des Satteldachbinders (Regelbereich)
Messstelle 2:	Im Firstbereich des Satteldachbinders (Regelbereich, Referenz zu Messstelle 1)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	8,7	104,3	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 1
u2	25	8,7	103,8	gemessene	
u3	40	8,4	104,8	Temperatur	
u4	70	7,8	106,9	t_1: 20,2°C	
u5	15	8,7	103,6	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	8,6	103,8	gemessene	
u7	40	8,2	105,5	Temperatur	
u8	70	7,6	107,4	t_2: 19,3°C	

Tragsystem:	Unten gekrümmter Satteldachträger als Einfeldträger, Spannweite ℓ = 22,00 m 6 Achsen mit einem Binderachsabstand e = 7,0 m Trägerabmessungen b/h = 20/175 …202 cm² Lamellenstärke t = 32 mm Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)
Hinweis:	Die Halle wird bis zum Winter als Produktionshalle eines metallverarbeitenden Betriebs genutzt, anschließend umgebaut um als zusätzliche Verkaufshalle des angrenzenden Sport-Marktes zu dienen.

Skizzen:


Grundriss
M 1:300
Halle geht weiter
7.00
7.00
7.00
7.00
7.00
Verkaufsfläche
A
A
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
N
BSH-Träger
b/h = 20/175 ... 202
Outlet-Center
Schnitt A-A
M 1:200
Messpunkt 2
Messpunkt 1
Messgerät
1.75
2.02
BSH-Träger
b/h = 20/175 ... 202
6.10
Betonstütze
7.24
Betonstütze
22.00

Bilder:

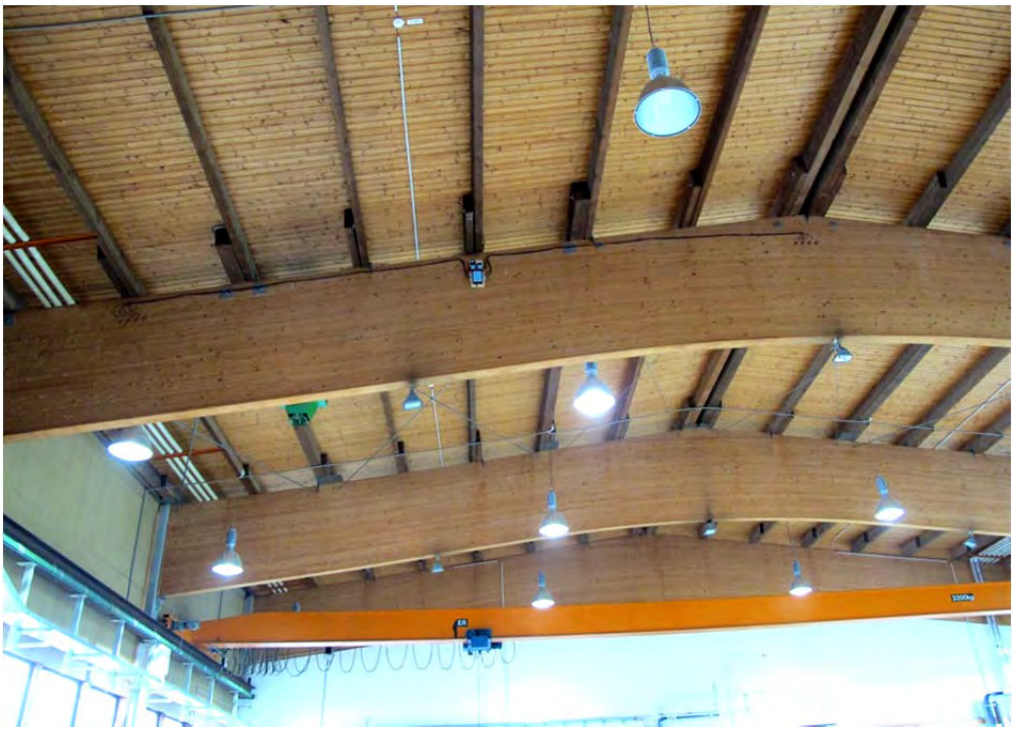


Abbildung E1-1: Ansicht Tragwerk

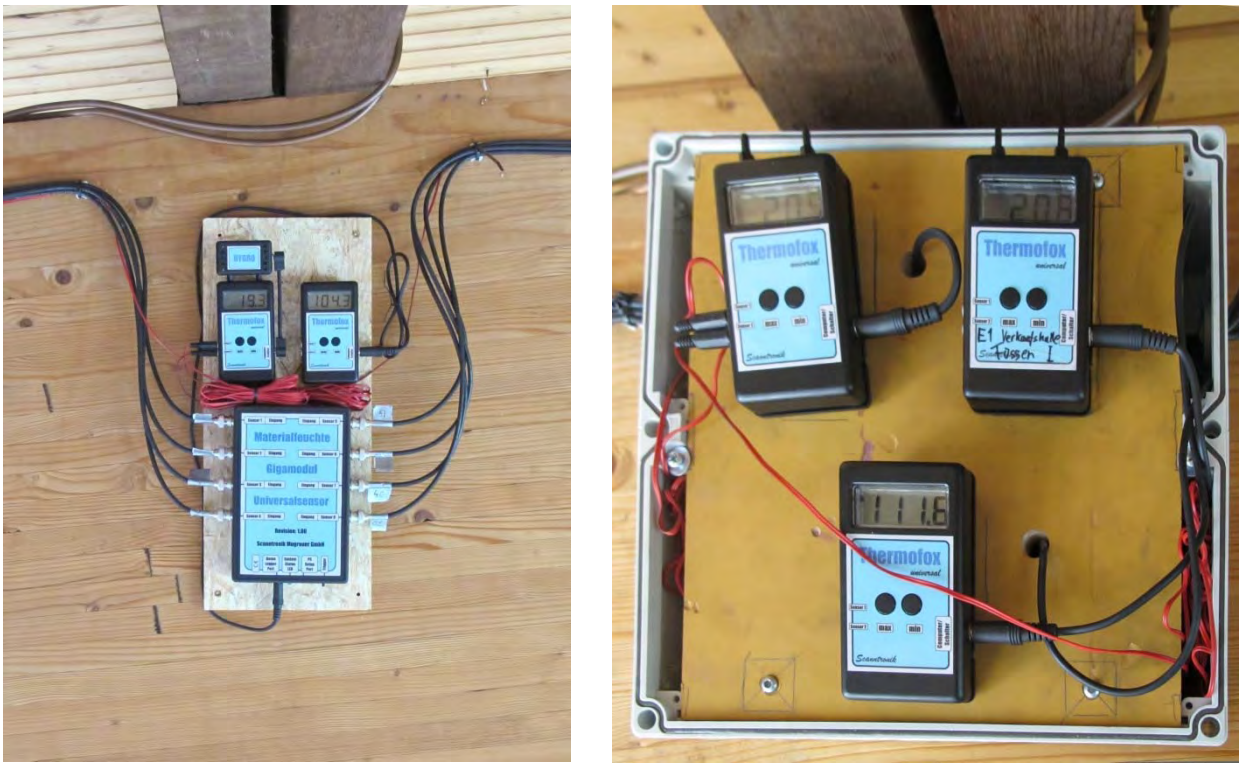


Abbildung E1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2

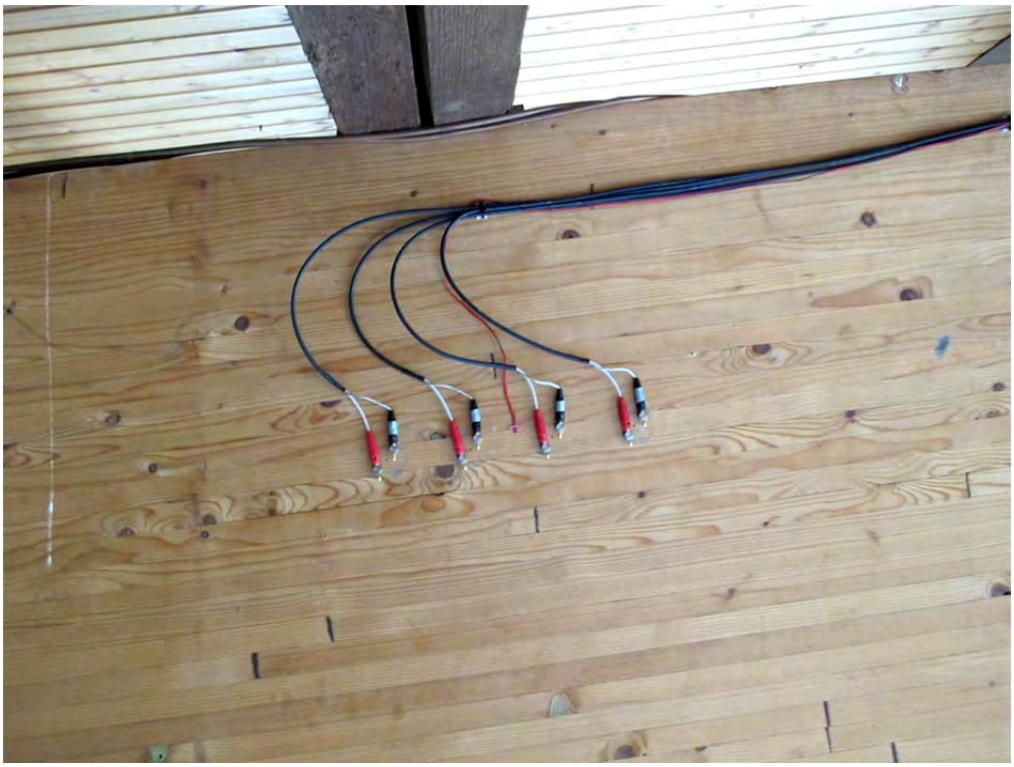


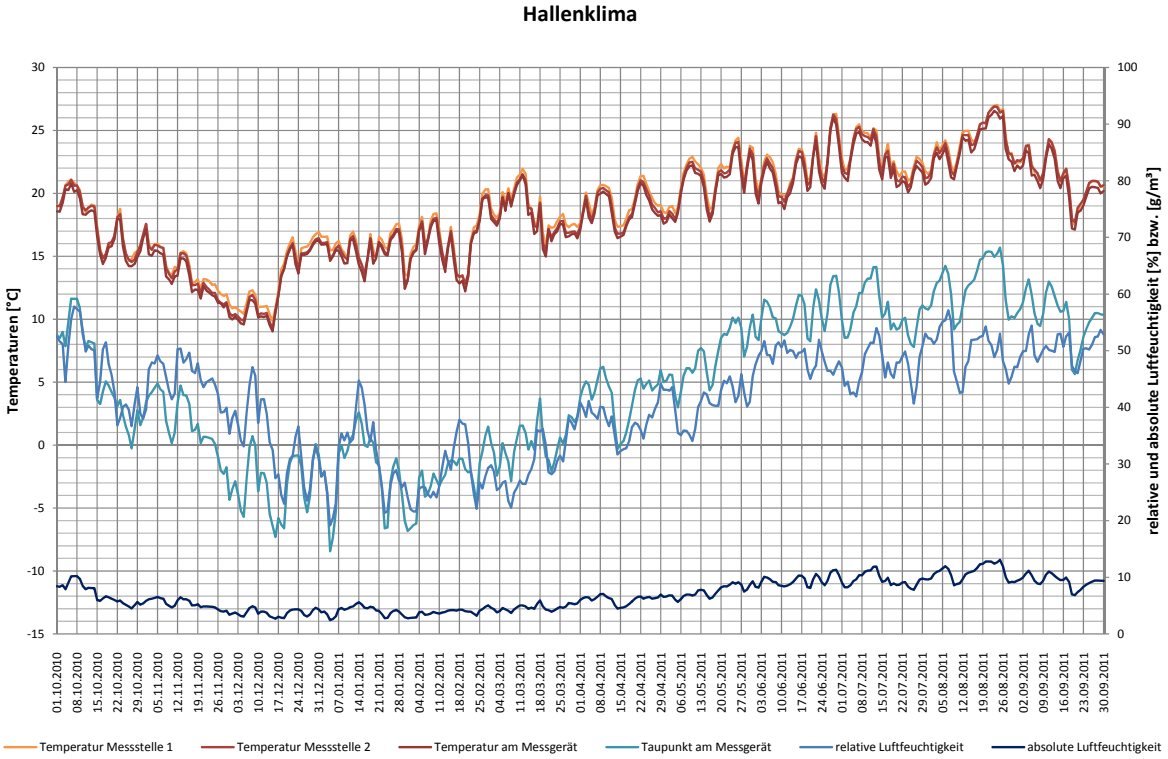
Abbildung E1-3: Ansicht Messstelle 1



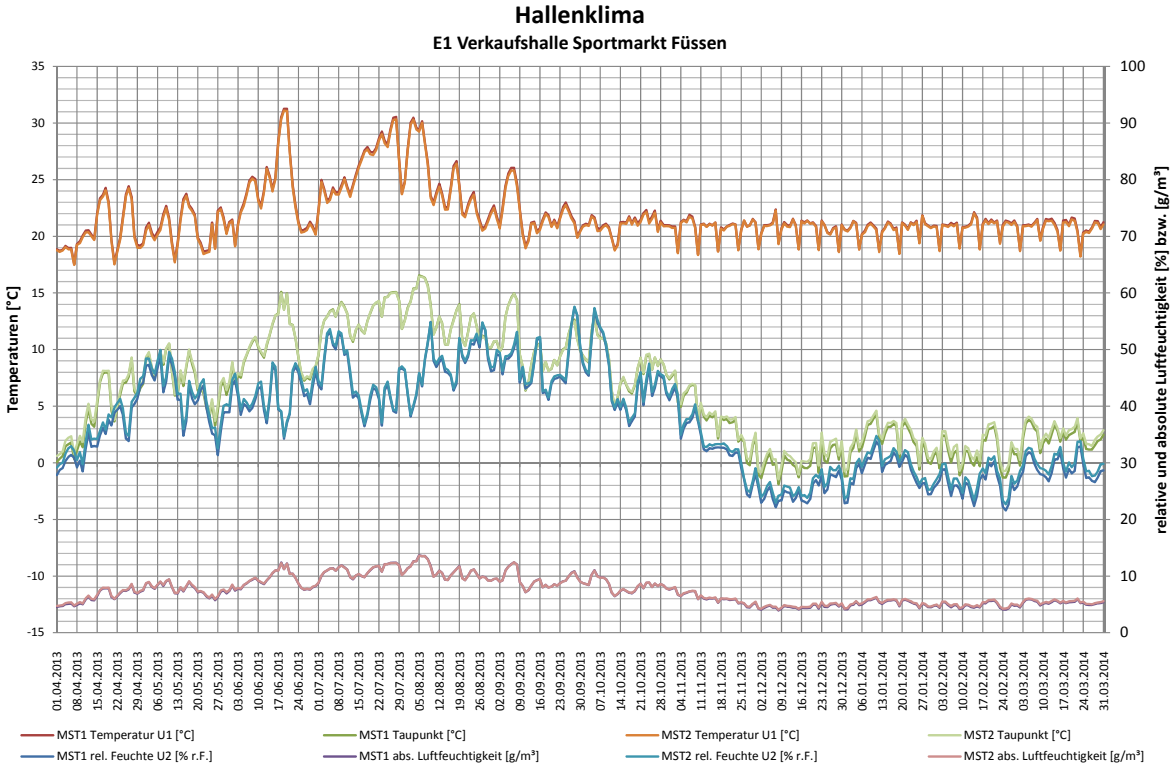
Abbildung E1-4: Ansicht Messstelle 2

E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

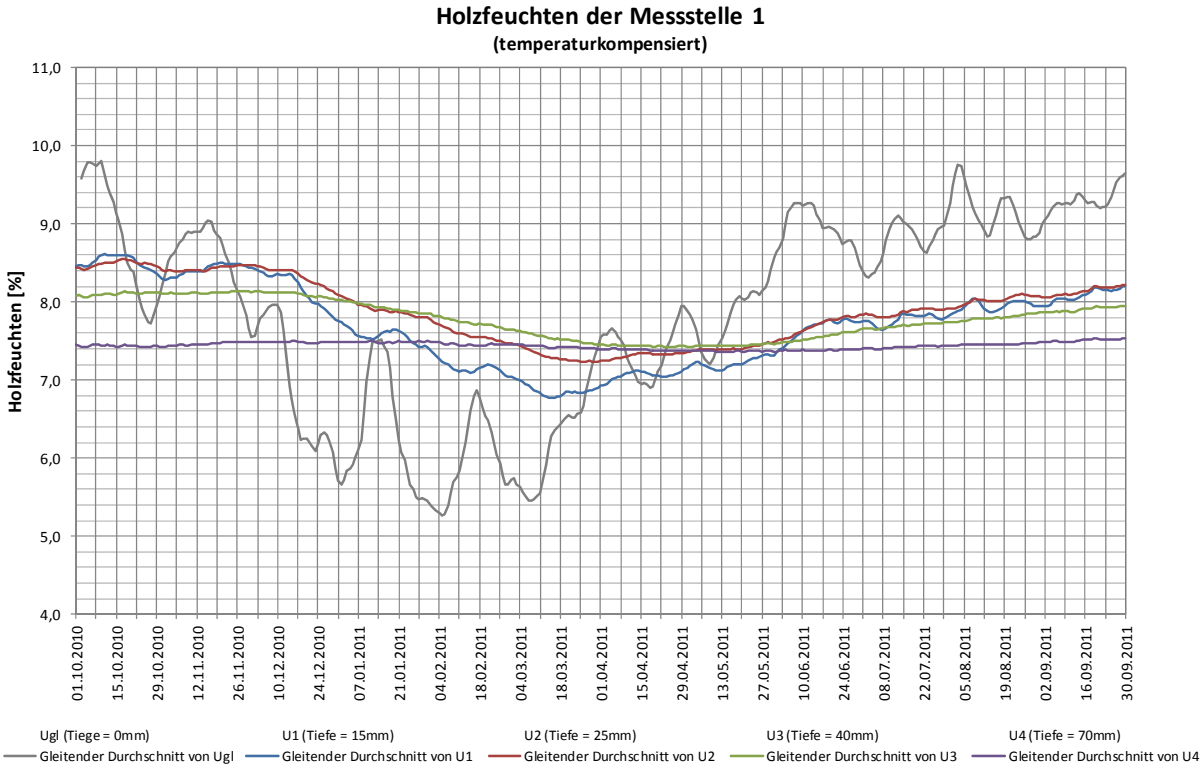


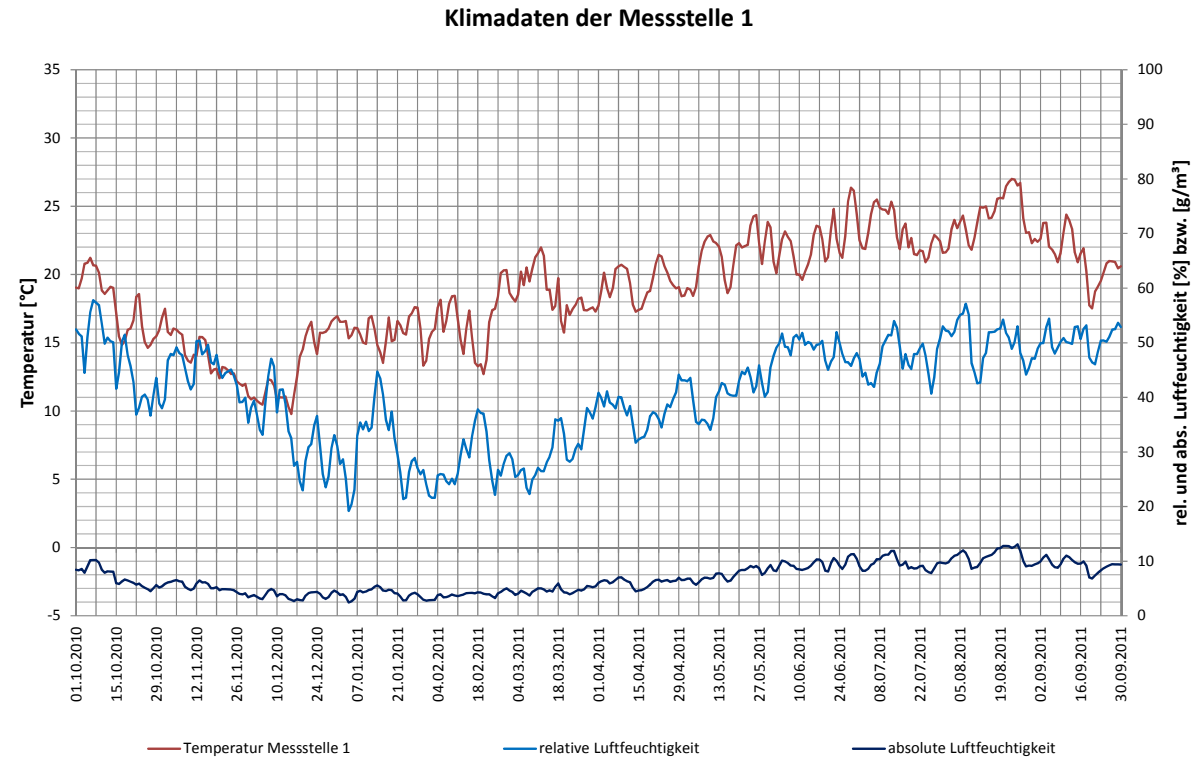
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

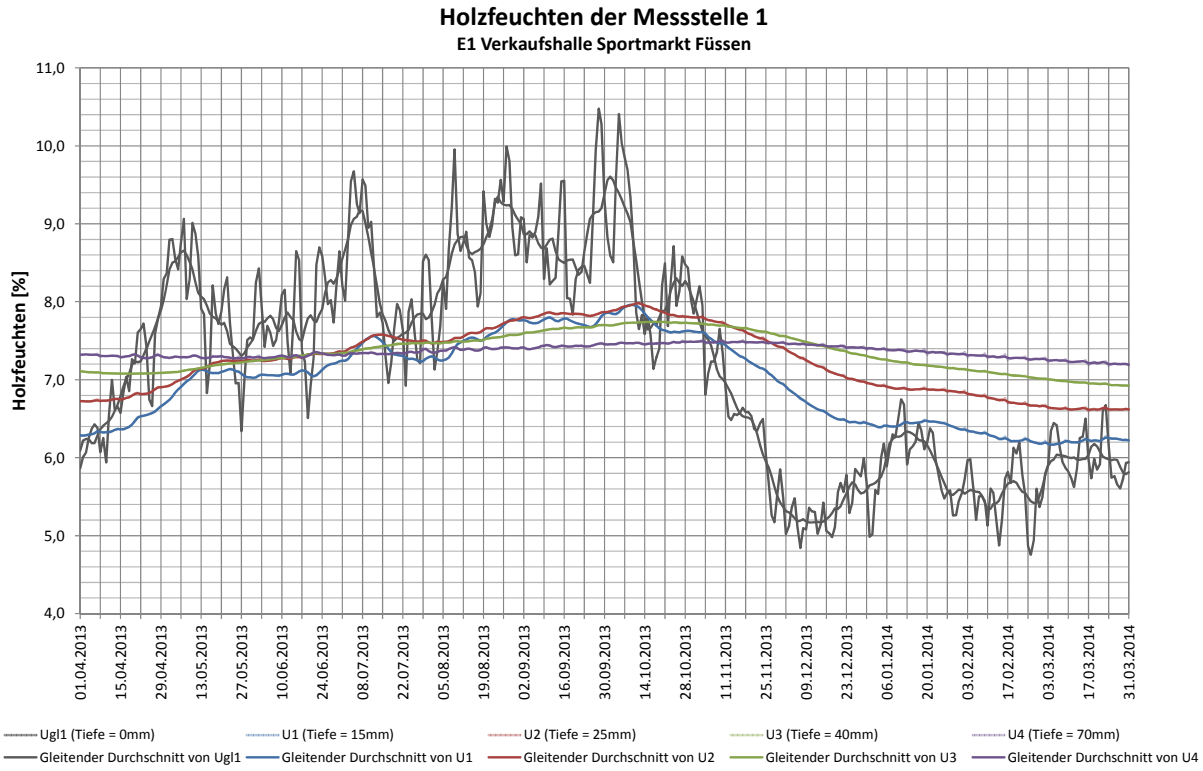
Messstelle 1: Im Traufbereich des Satteldachbinders
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

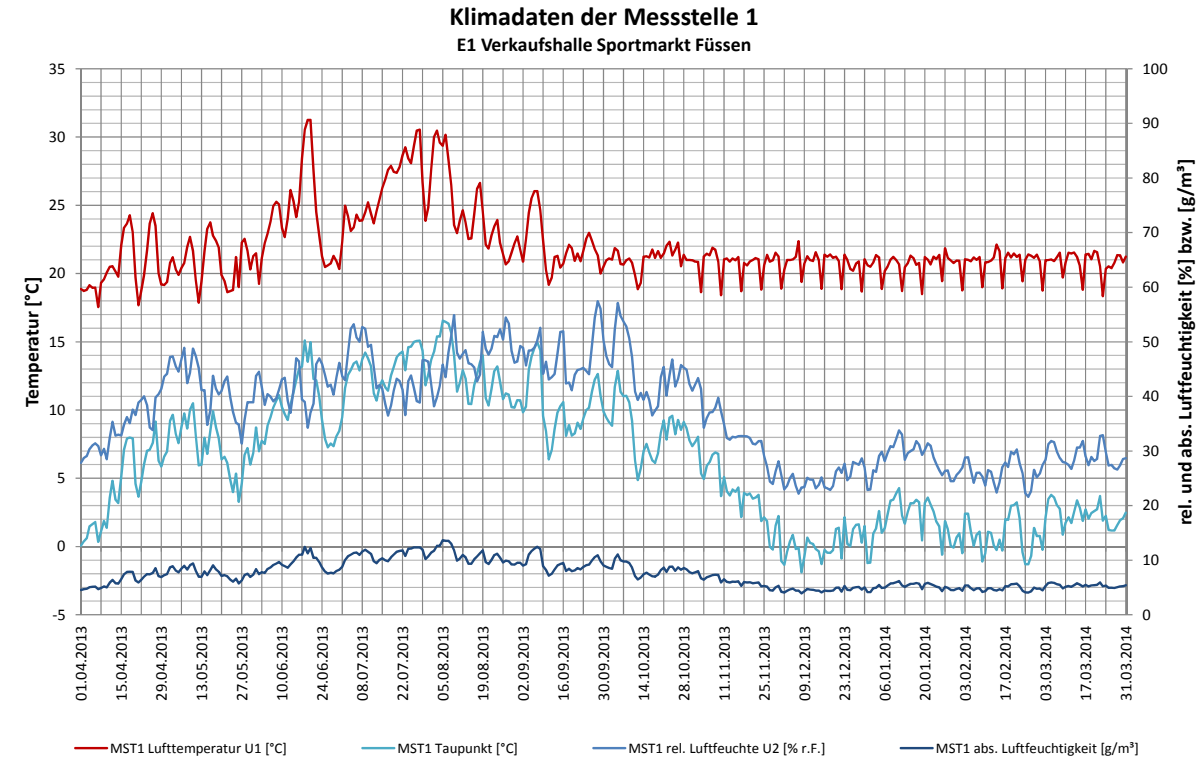




E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

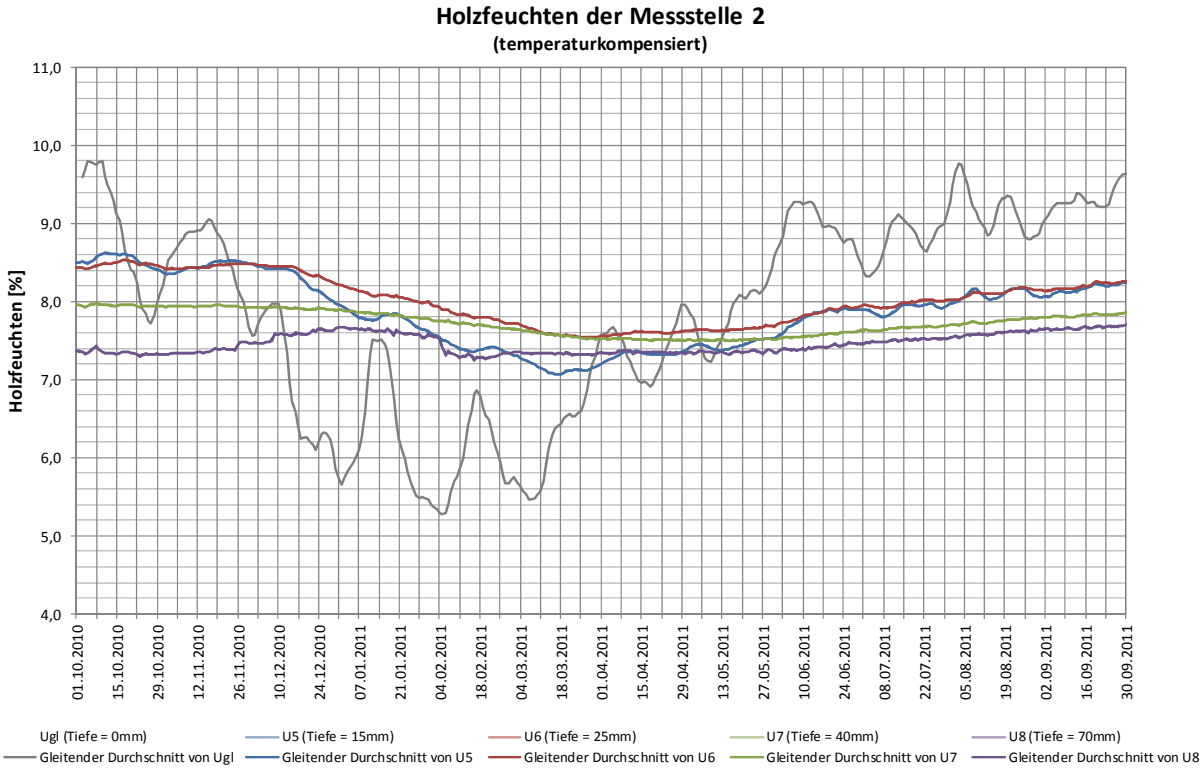
Messstelle 1: Im Traufbereich des Satteldachbinders
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

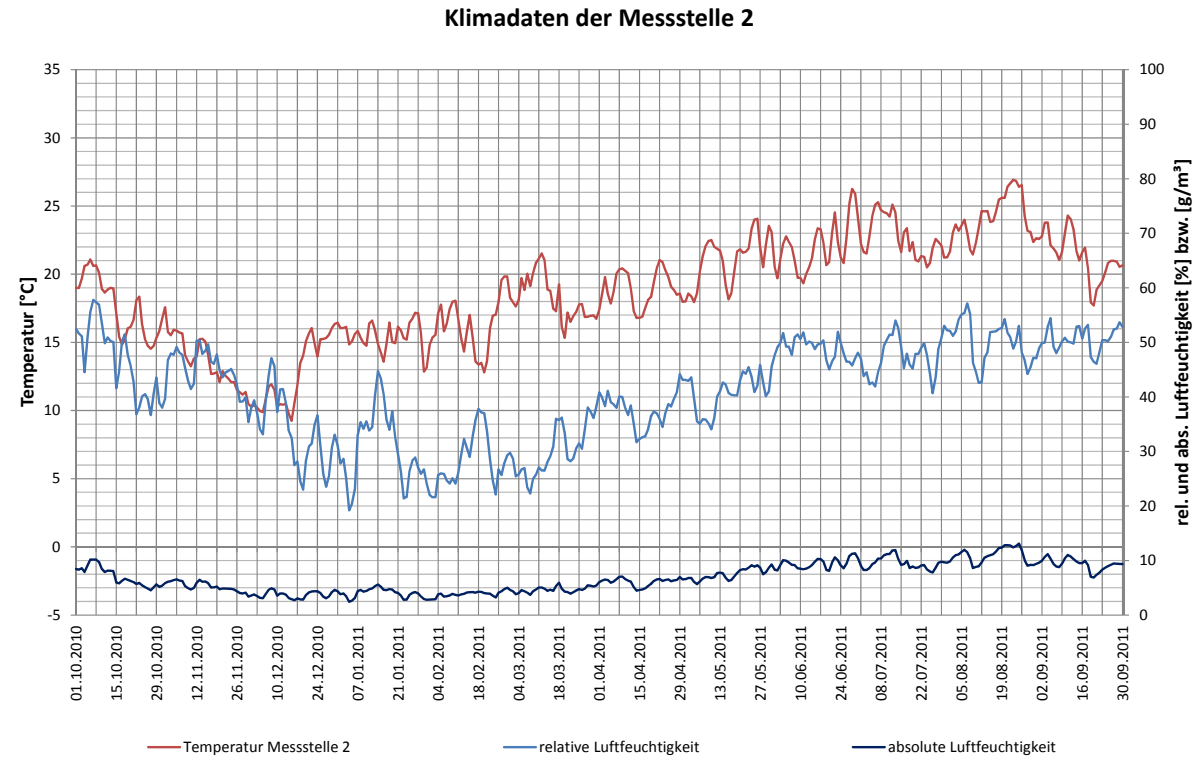




E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

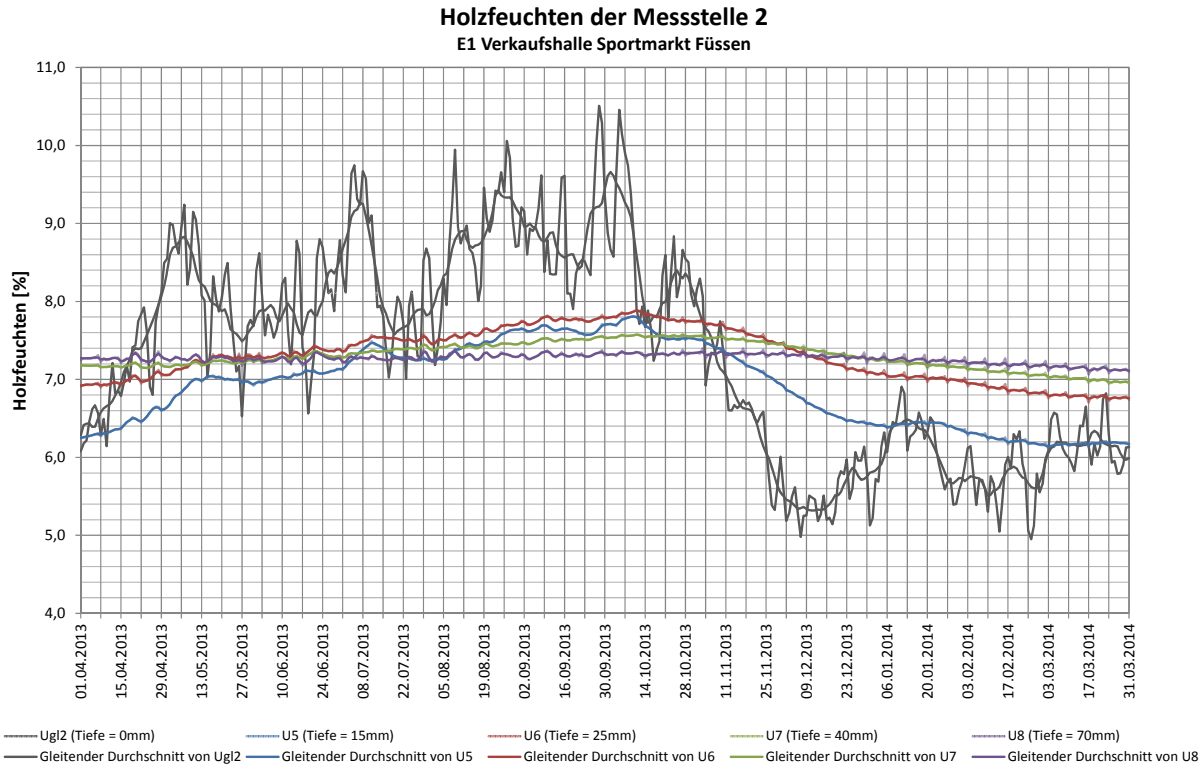
Messstelle 2: Im Firstbereich des Satteldachbinders
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

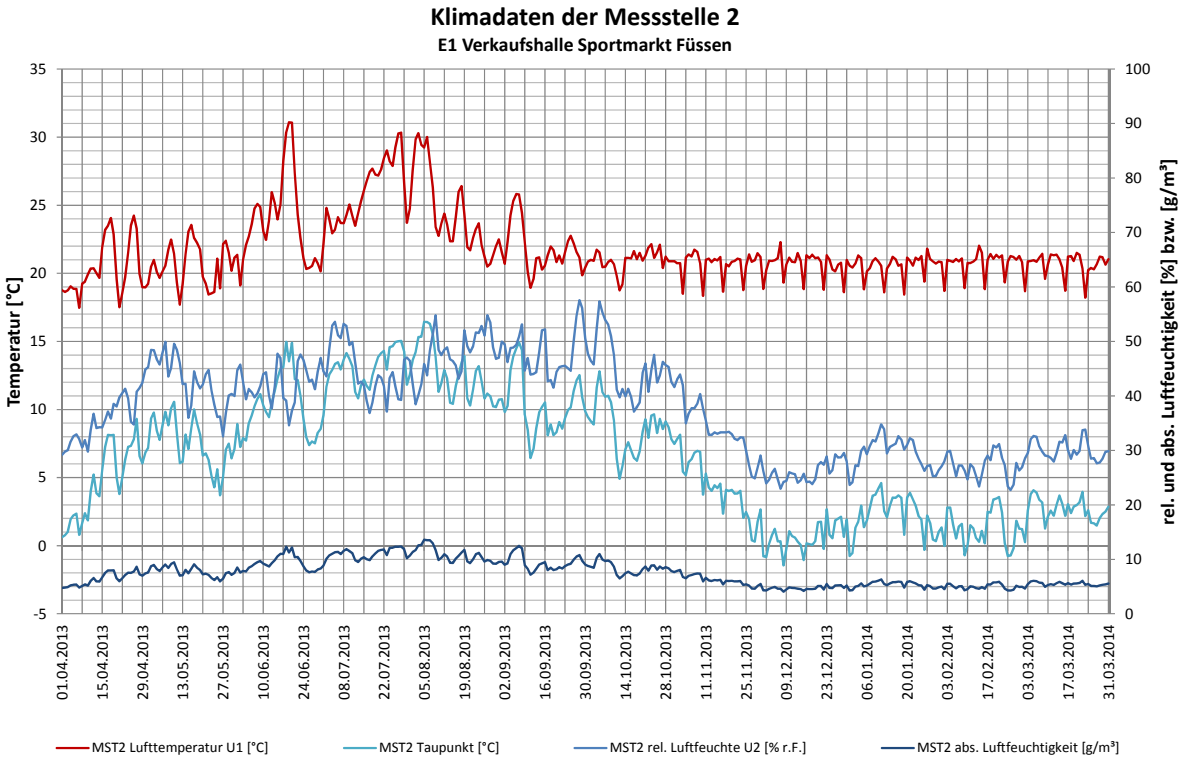




E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

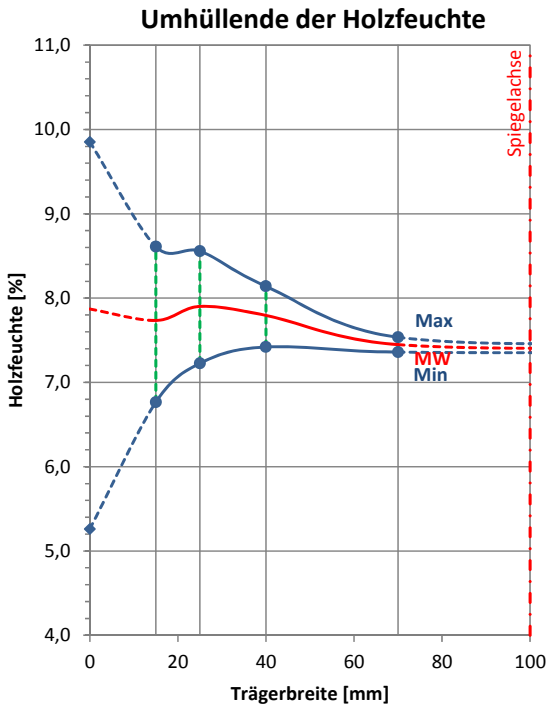
Messstelle 2: Im Firstbereich des Satteldachbinders
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

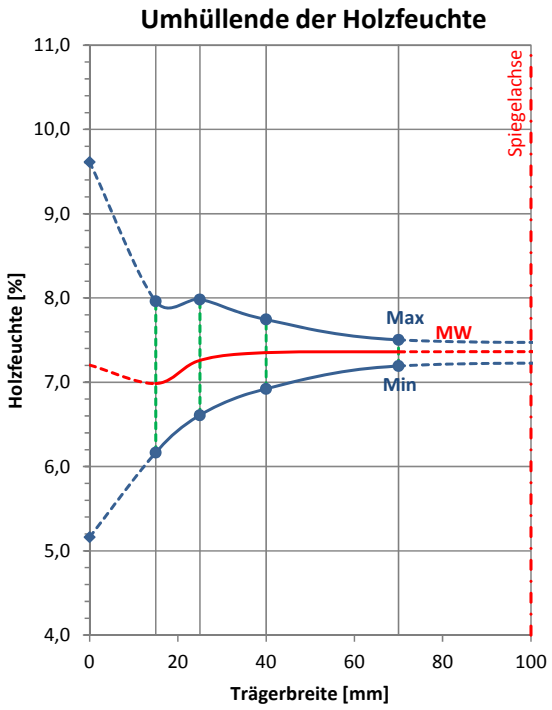


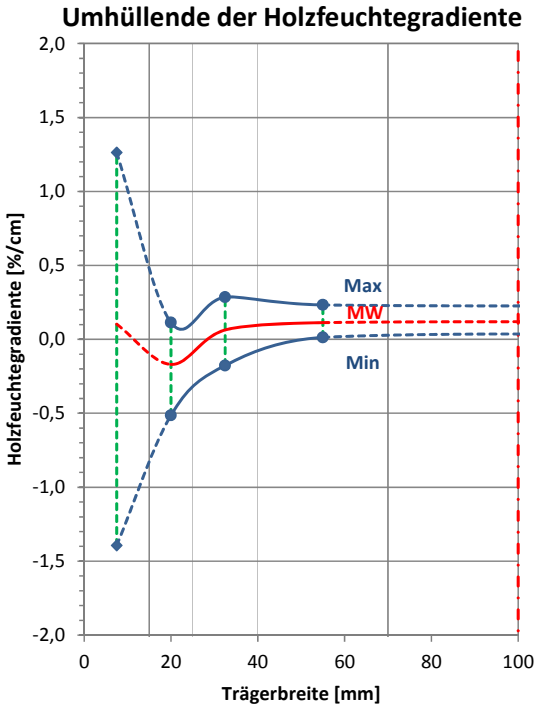


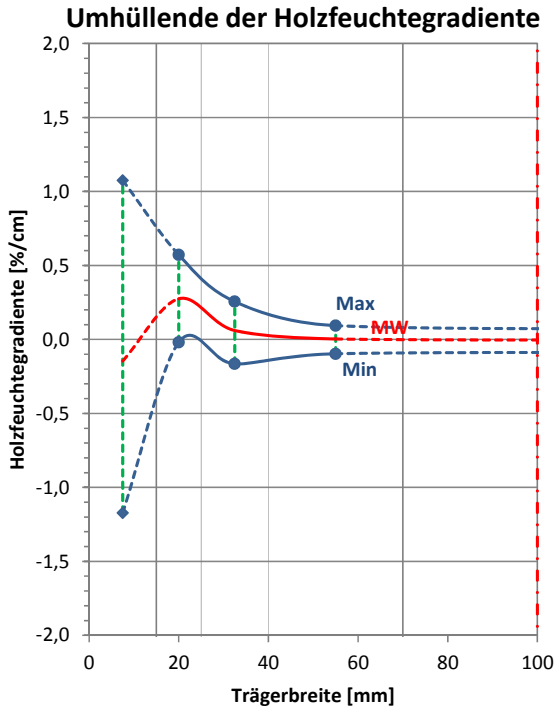
E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

Messstelle 1: Im Traufbereich des Satteldachbinders
links: Messperiode 1- Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



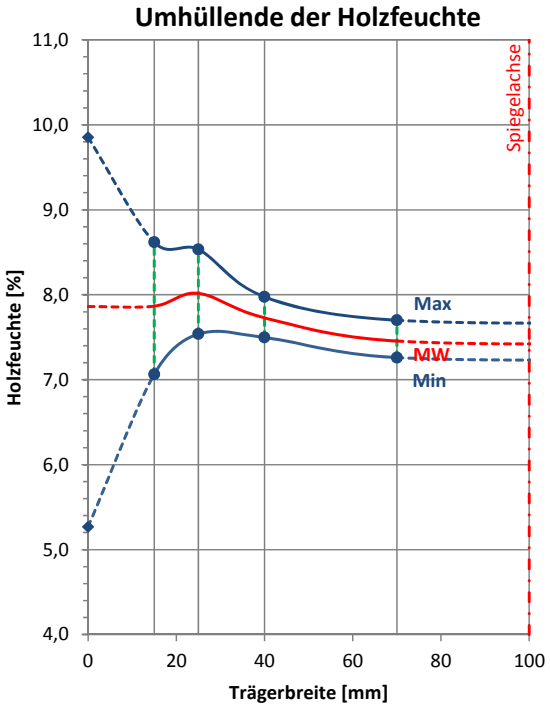


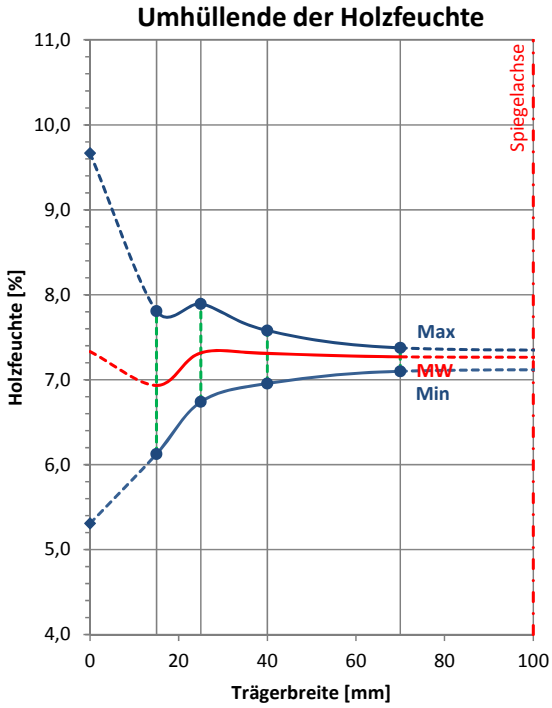


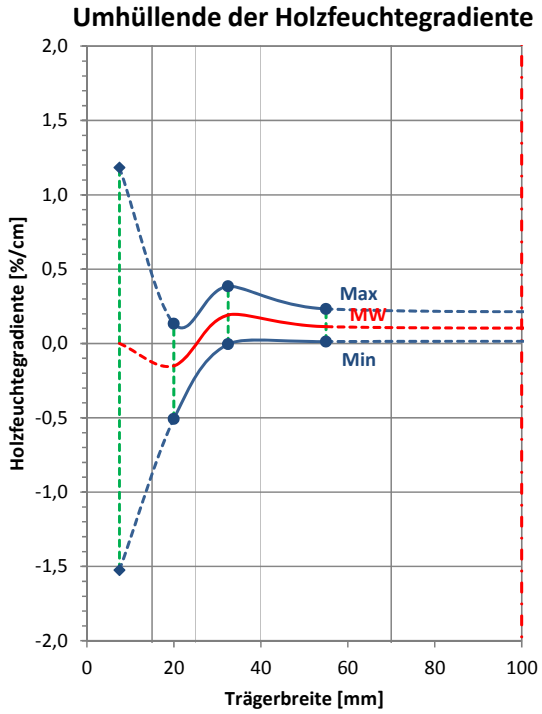


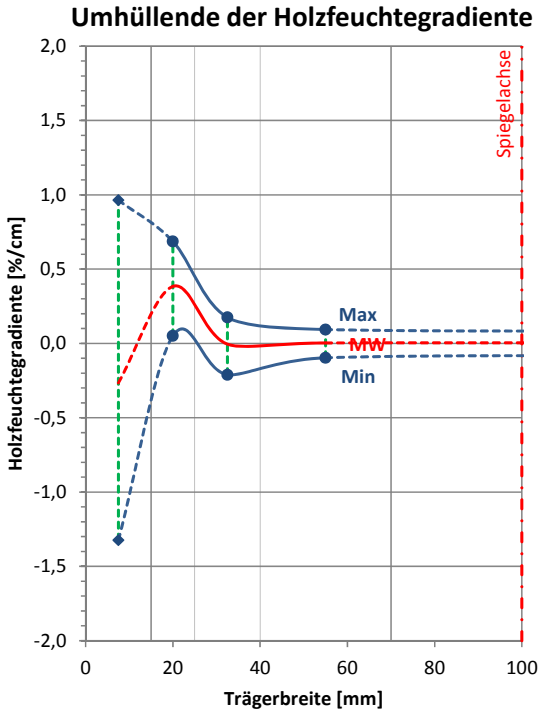
E1 Verkaufshalle Sportmarkt Füssen

Messstelle 2: Im Firstbereich des Satteldachbinders
links: Messperiode 1- Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

Anschrift:	Schäfflerstr. 15 87629 Füssen
Ansprechpartner:	Herr Fritz Schweiger (Besitzer)
Anwesende vor Ort:	Michael Merk, Andreas Gamper, Herr Schweiger

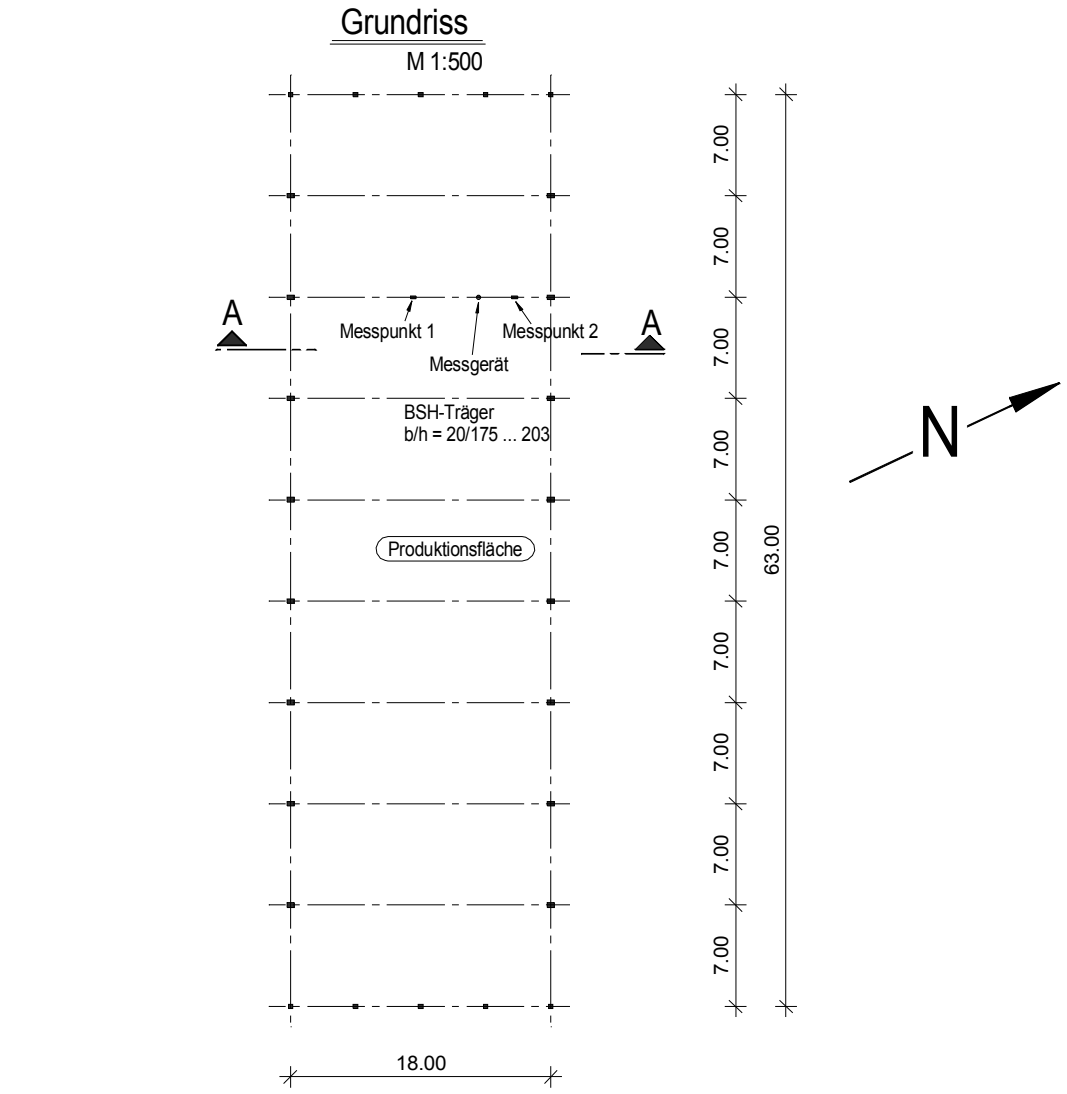
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	08.09.2010, 09:00 - 12:00	13.12.2013, 12:00 - 14:00
Letztes Auslesedatum	25.10.2011, 14:00 – 15:00	01.04.2014, 09:30 - 10:30

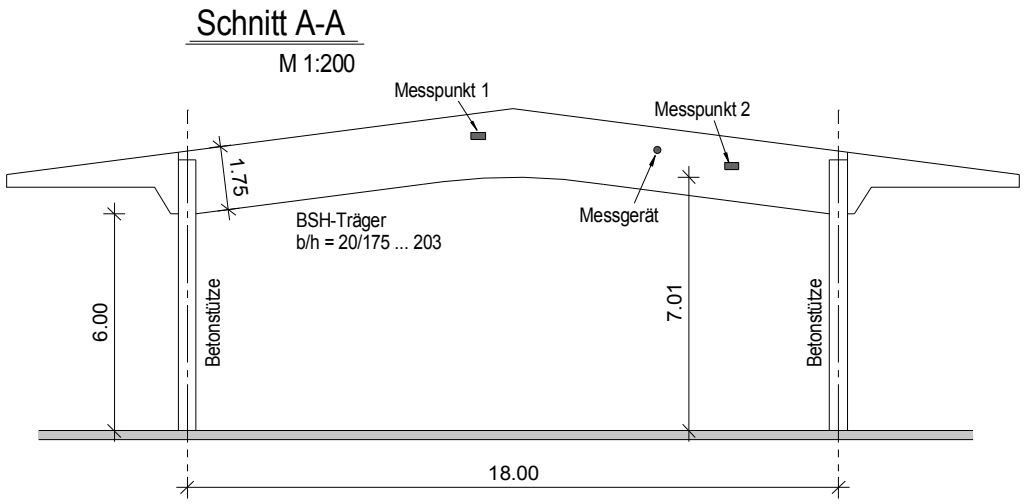
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossener, beheizter, konstruktiv gedämmter Raum, Schmiedewerkzeuge sowie Metallvergütung, daraus folgend sehr hohe Temperaturen Temperatur: 28,6°C; Luftfeuchte: 42,7 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Im Firstbereich des Satteldachbinders (Über dem Schmiedewerkzeug, direkter Einflussbereich)
Messstelle 2:	Im Traufbereich des Satteldachbinders (Regelbereich außerhalb des Einflussbereichs des Schmiedewerkzeugs, Referenz zu Messstelle 1)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	5,0	111,5	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 1
u2	25	5,5	109,9	gemessene	
u3	40	5,1	112,0	Temperatur	
u4	70	5,1	112,0	t_1: 28,9°C	
u5	15	4,9	112,5	x–y: 6–5; 30°	Messstelle 2
u6	25	5,0	112,6	gemessene	
u7	40	5,3	112,0	Temperatur	
u8	70	5,3	111,4	t_2: 28,6°C	

Tragsystem:	Einfeldträger, Spannweite ℓ = 18,0 m 10 Achsen mit einem Trägerachsabstand e = 7,0 m Trägerabmessungen b/h = 20/175 …203 cm^2 Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:500
A
A
Messpunkt 1
Messpunkt 2
Messgerät
BSH-Träger
b/h = 20/175 ... 203
Produktionsfläche
N
7.00
7.00
7.00
7.00
7.00
7.00
7.00
7.00
63.00
18.00


Schnitt A-A
M 1:200
Messpunkt 1
Messpunkt 2
1.75
BSH-Träger
b/h = 20/175 ... 203
Messgerät
6.00
Betonstütze
7.01
Betonstütze
18.00

Bilder:



Abbildung E2-1: Ansicht Tragwerk

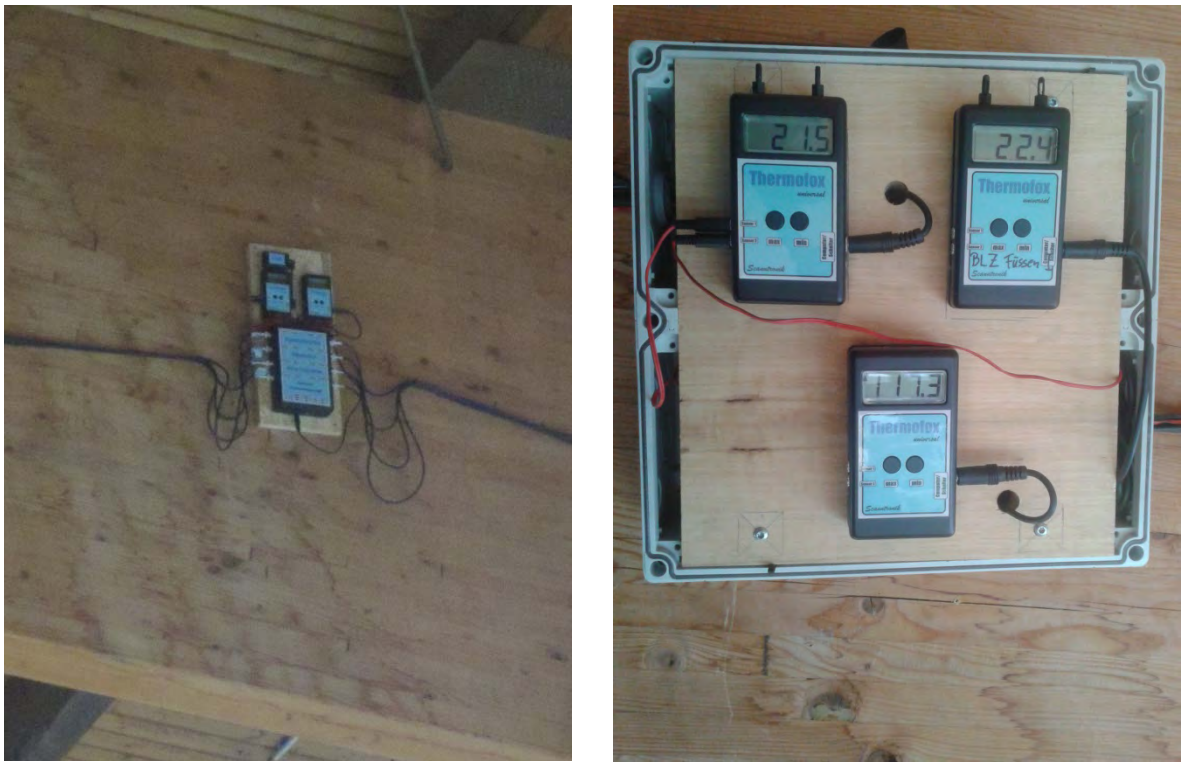


Abbildung E2-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2

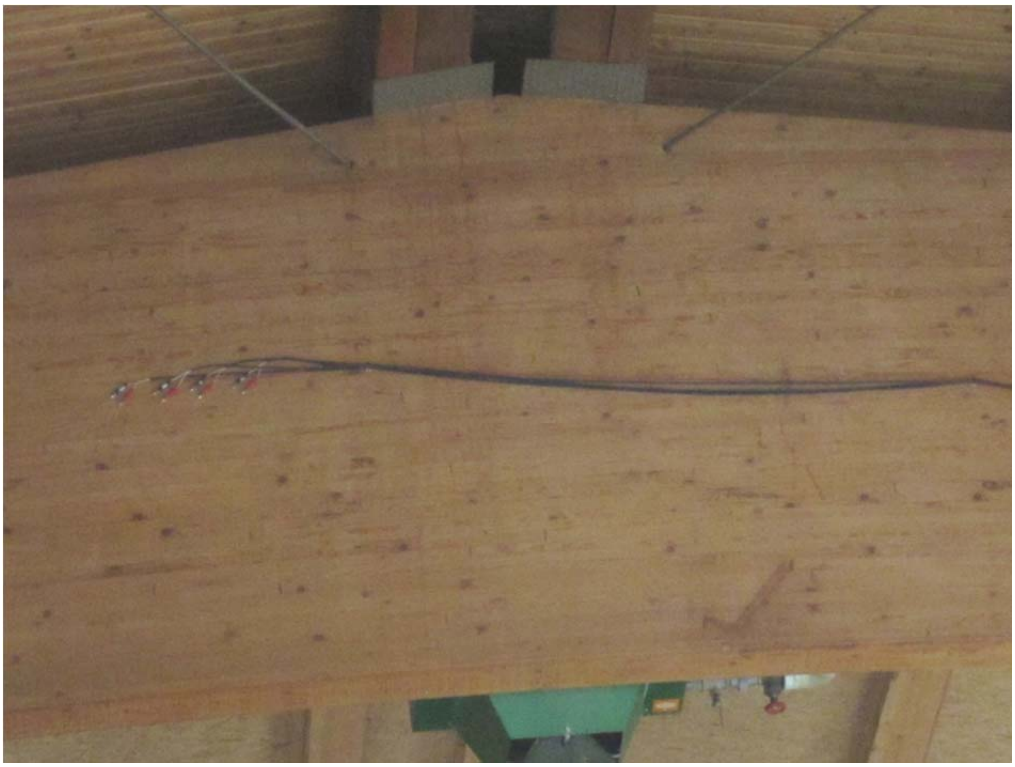


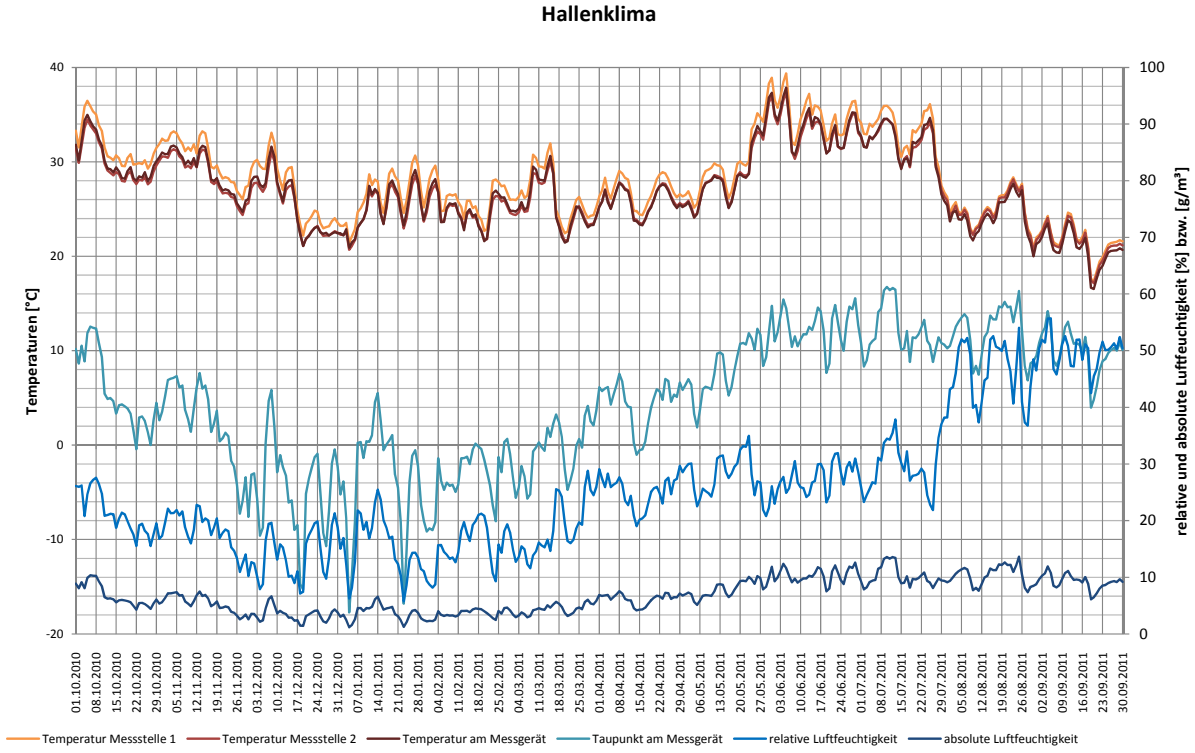
Abbildung E2-3: Ansicht Messstelle 1



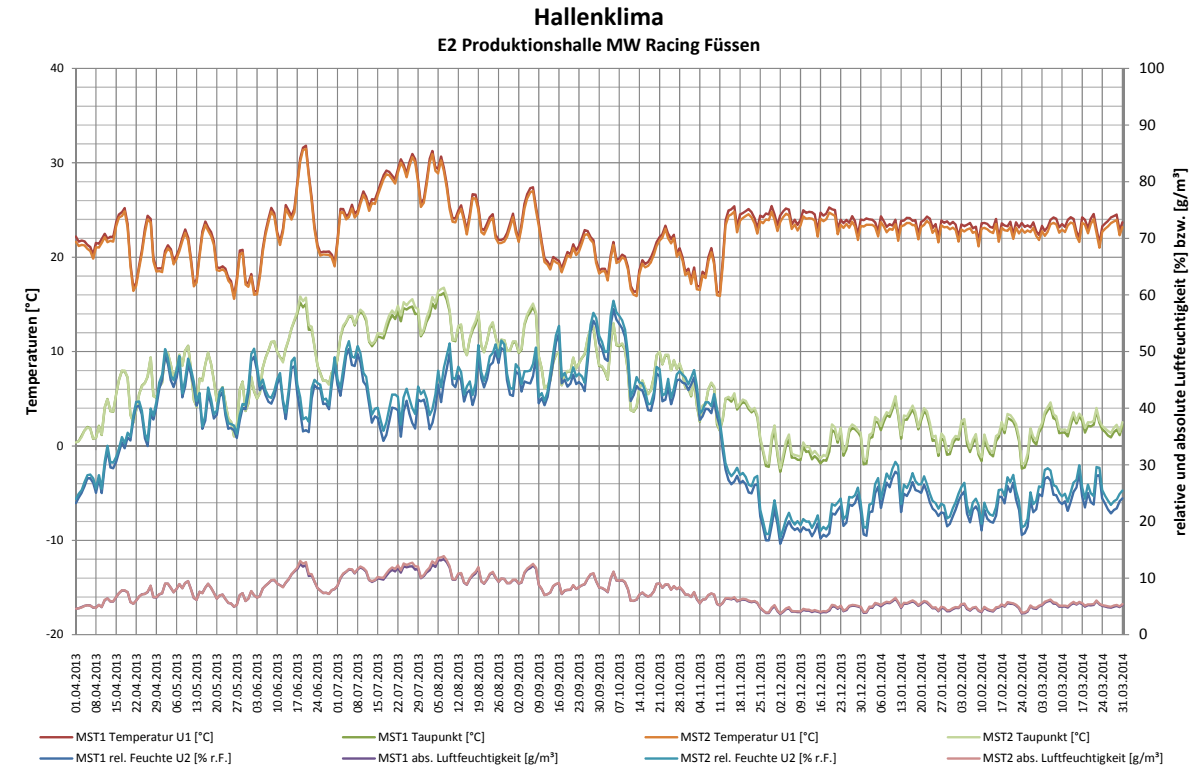
Abbildung E2-4: Ansicht Messstelle 2

E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

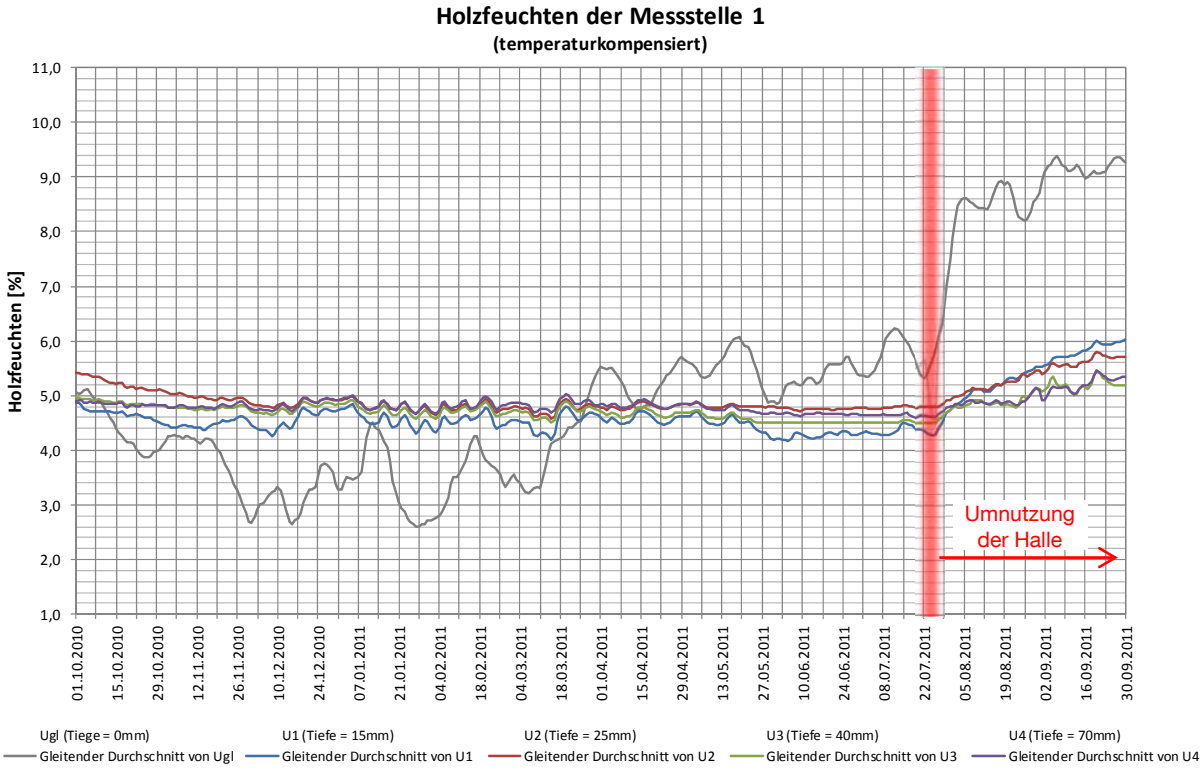


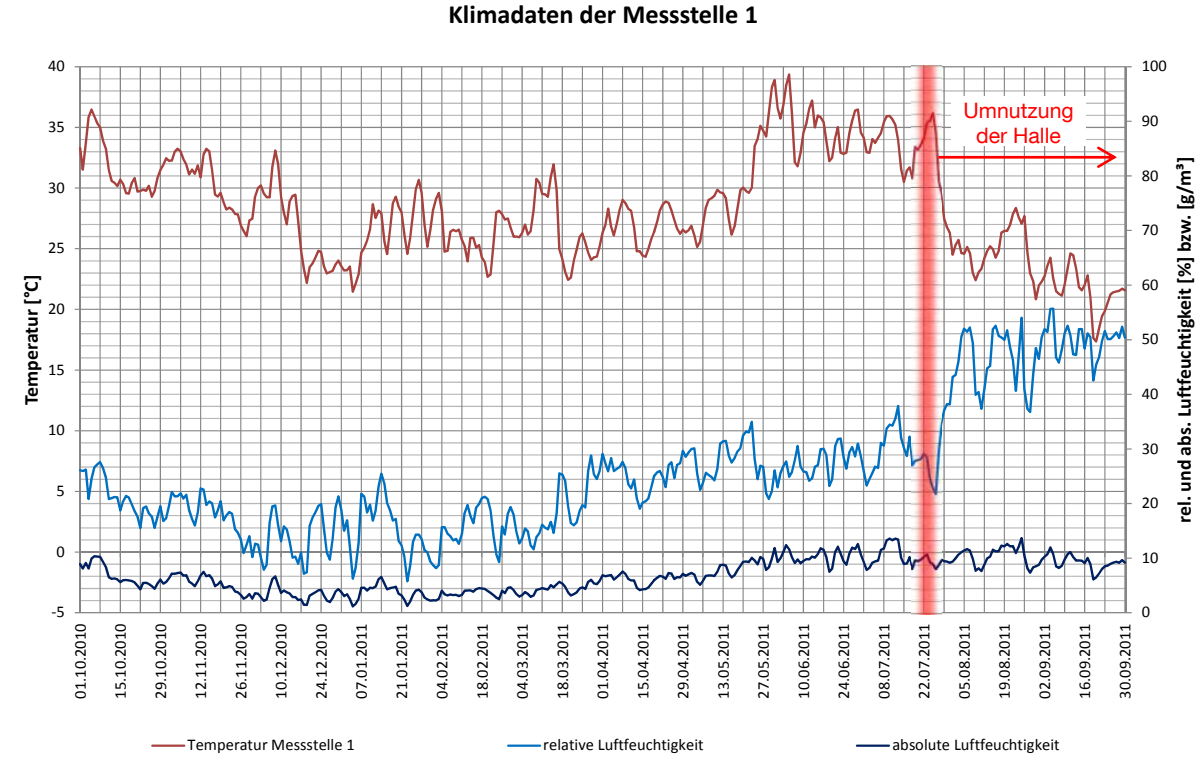
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

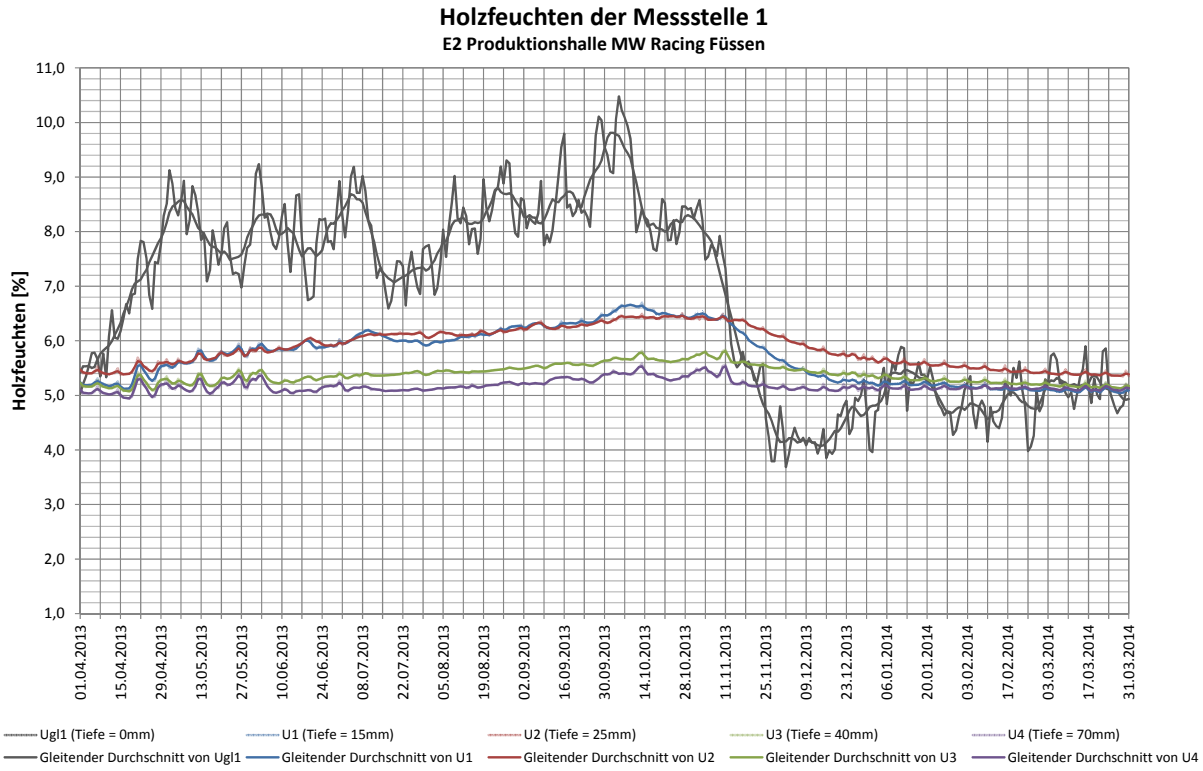
Messstelle 1: Im Firstbereich des Satteldachbinders
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

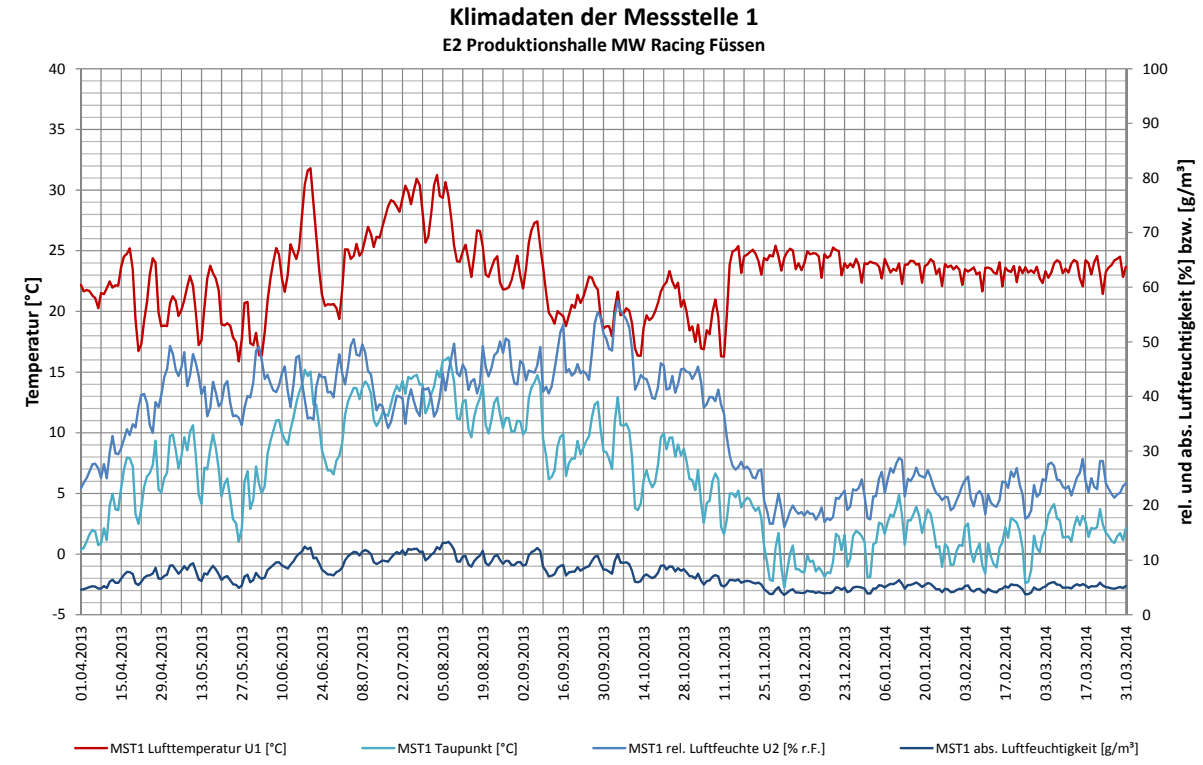




E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

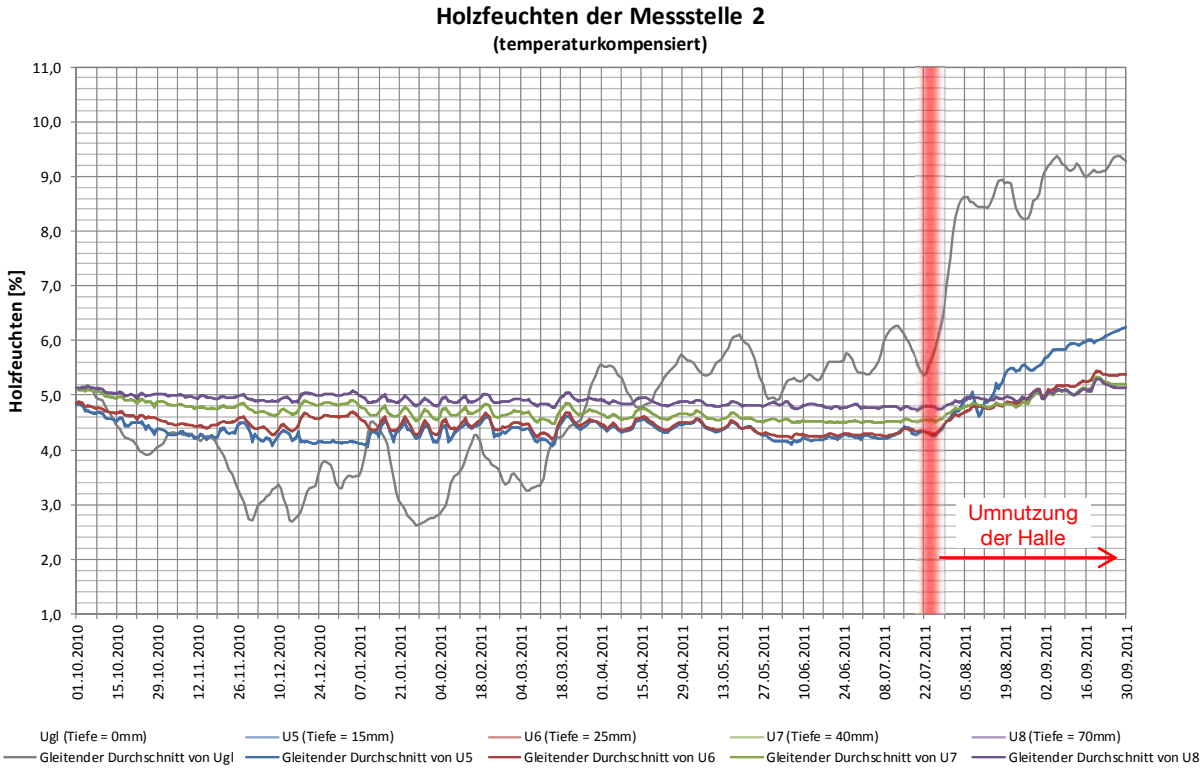
Messstelle 1: Im Firstbereich des Satteldachbinders
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

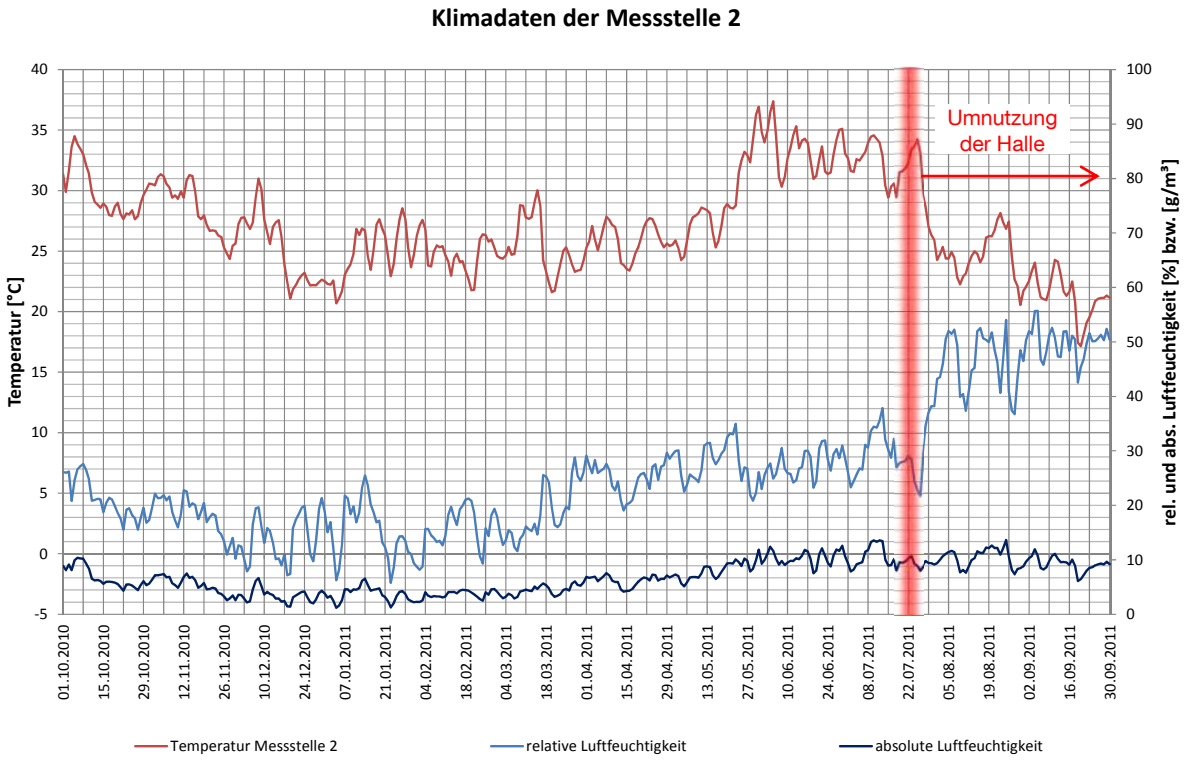




E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

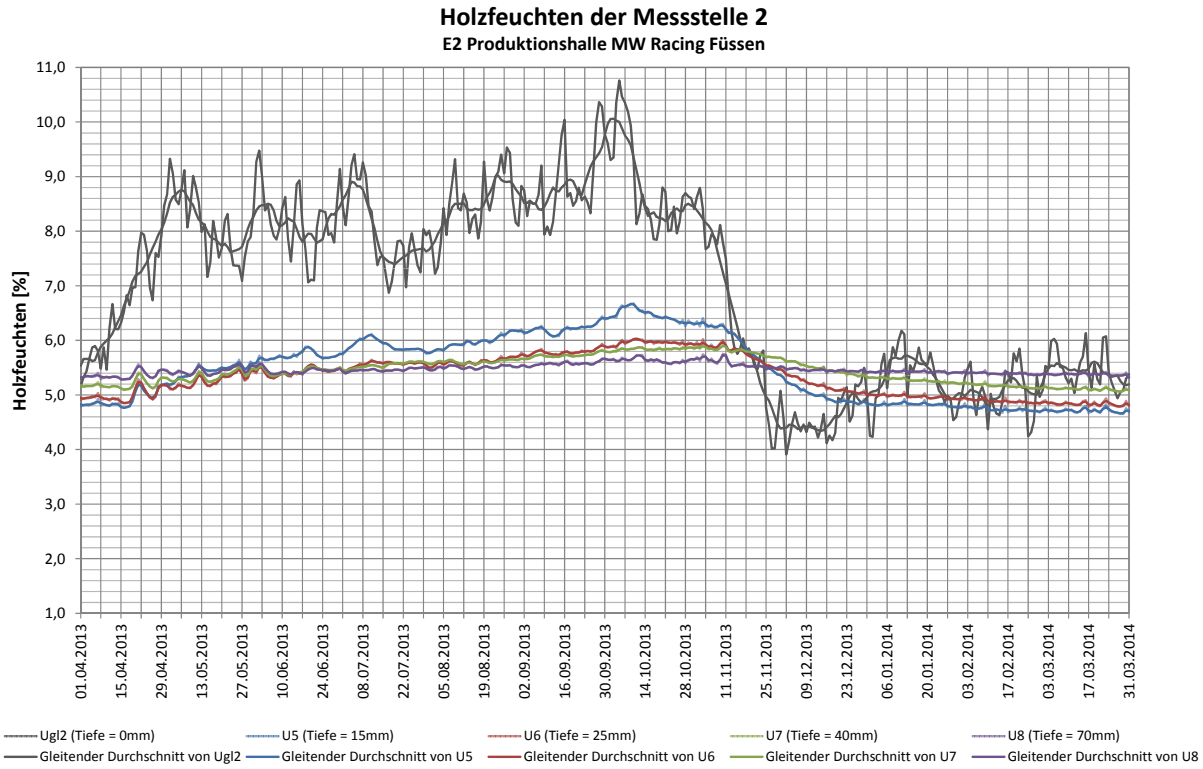
Messstelle 2: Im Traufbereich des Satteldachbinders
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

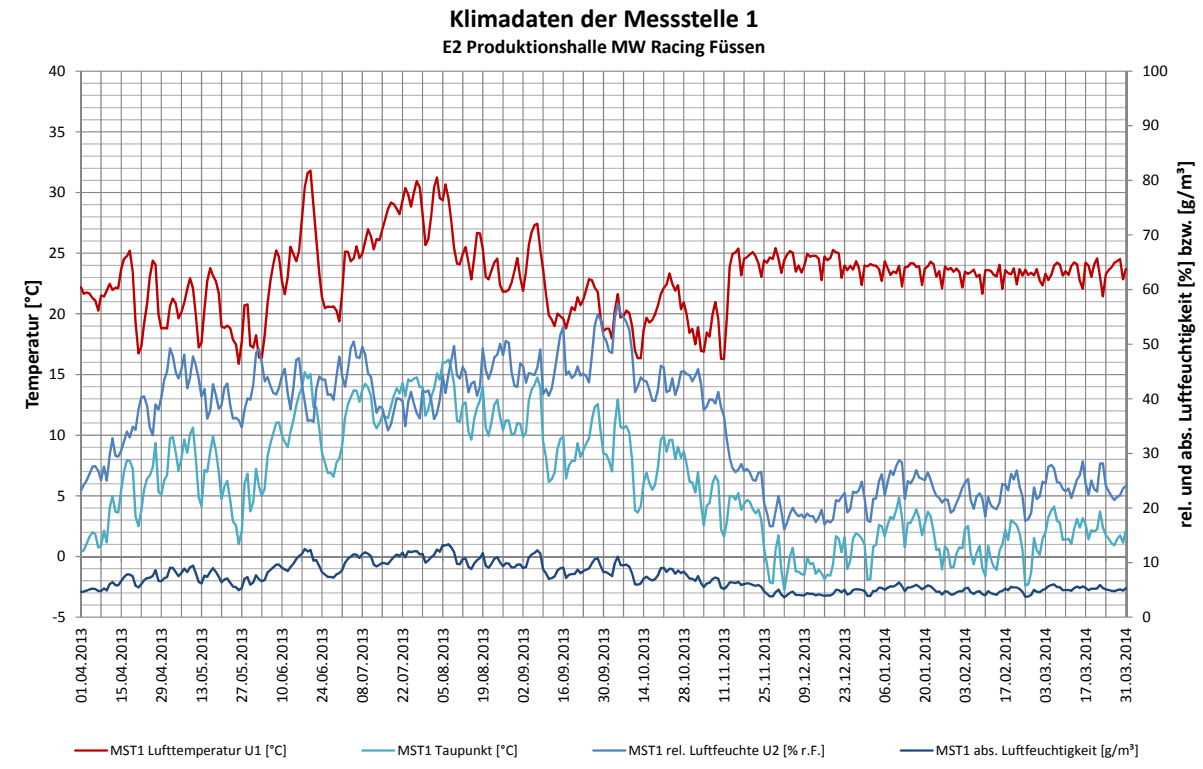




E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

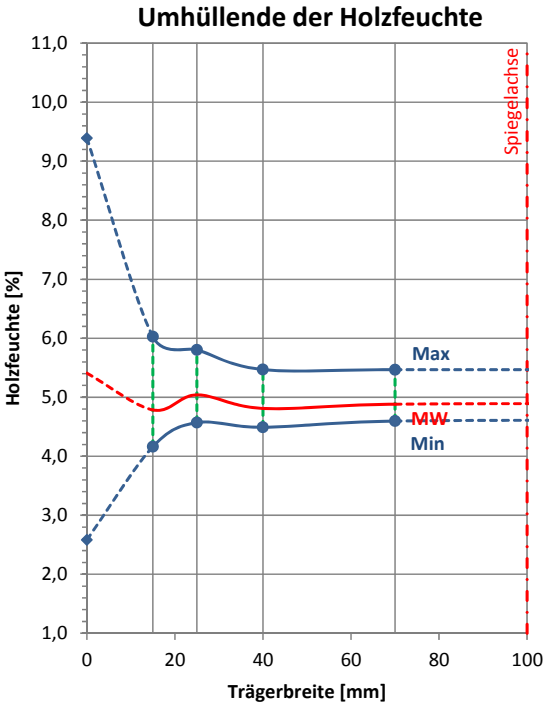
Messstelle 2: Im Traufbereich des Satteldachbinders
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

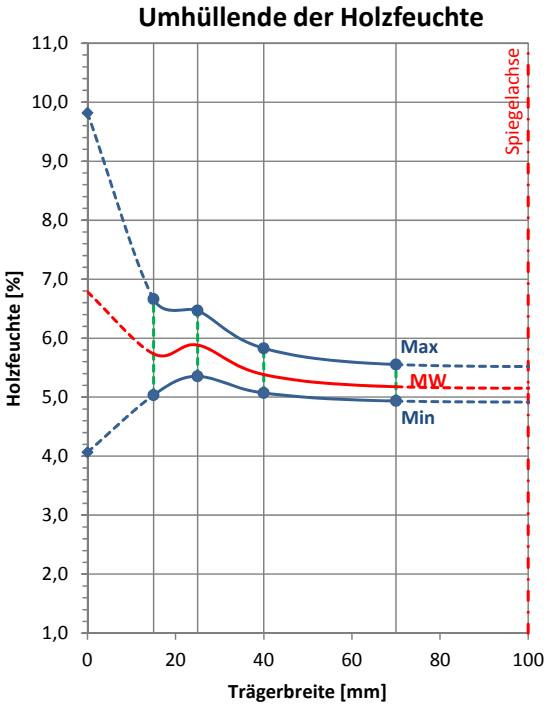


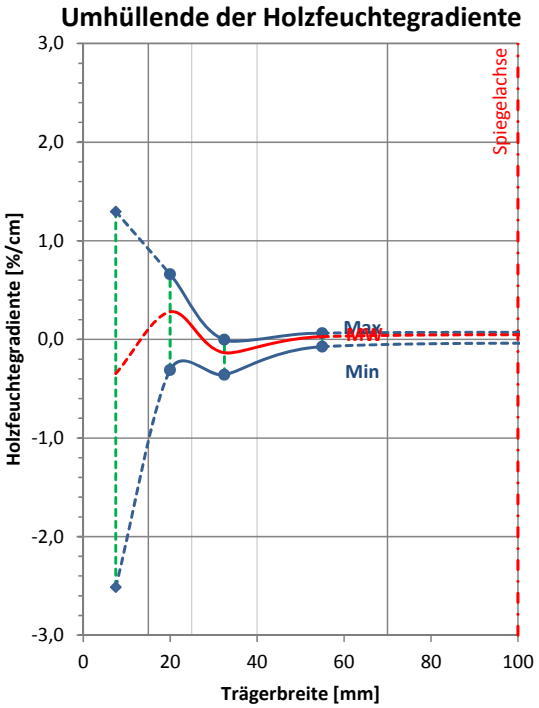


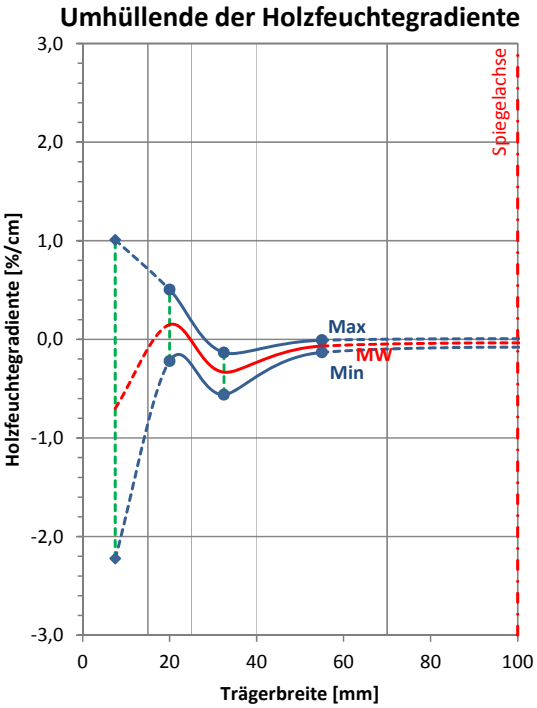
E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

Messstelle 1: Im Firstbereich des Satteldachbinders
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



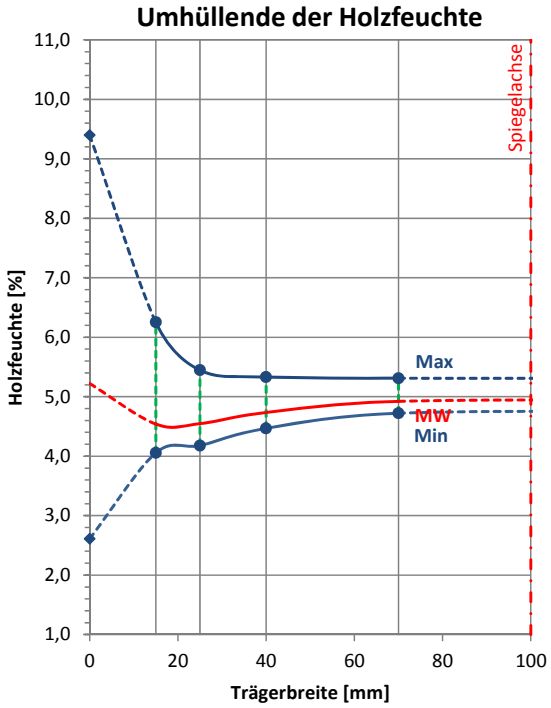


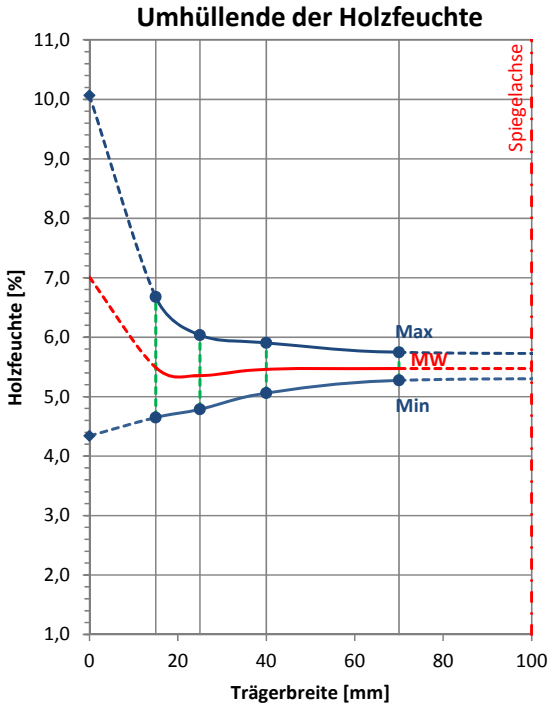


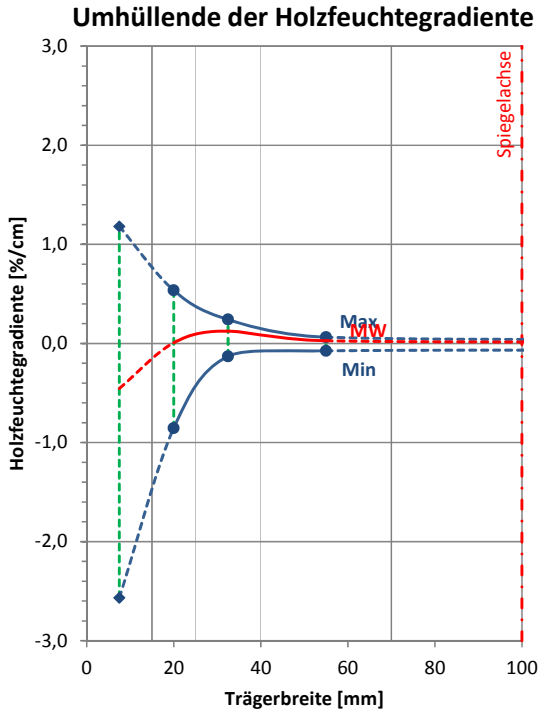


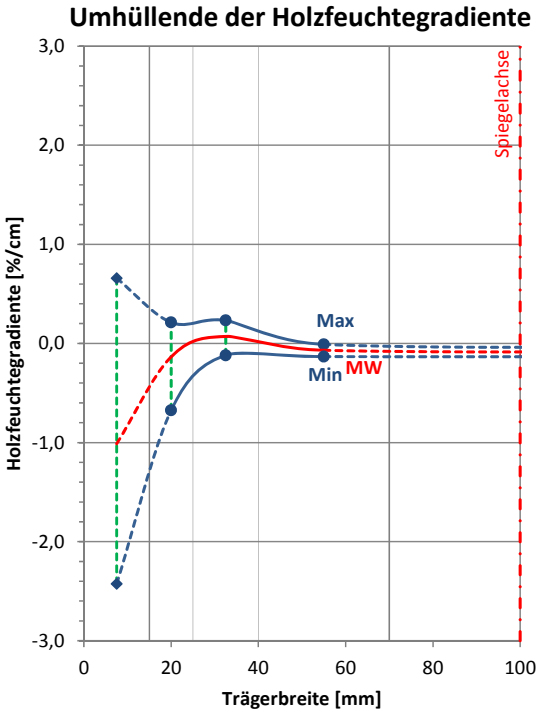
E2 Produktionshalle MW Racing Füssen

Messstelle 2: Im Traufbereich des Satteldachbinders
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Anschrift:	Fischhaus 5 87672 Roßhaupten
Ansprechpartner:	Hr. Greis (vor Ort)
Anwesende vor Ort:	Michael Merk, Andreas Gamper, Hr. Greis jun.

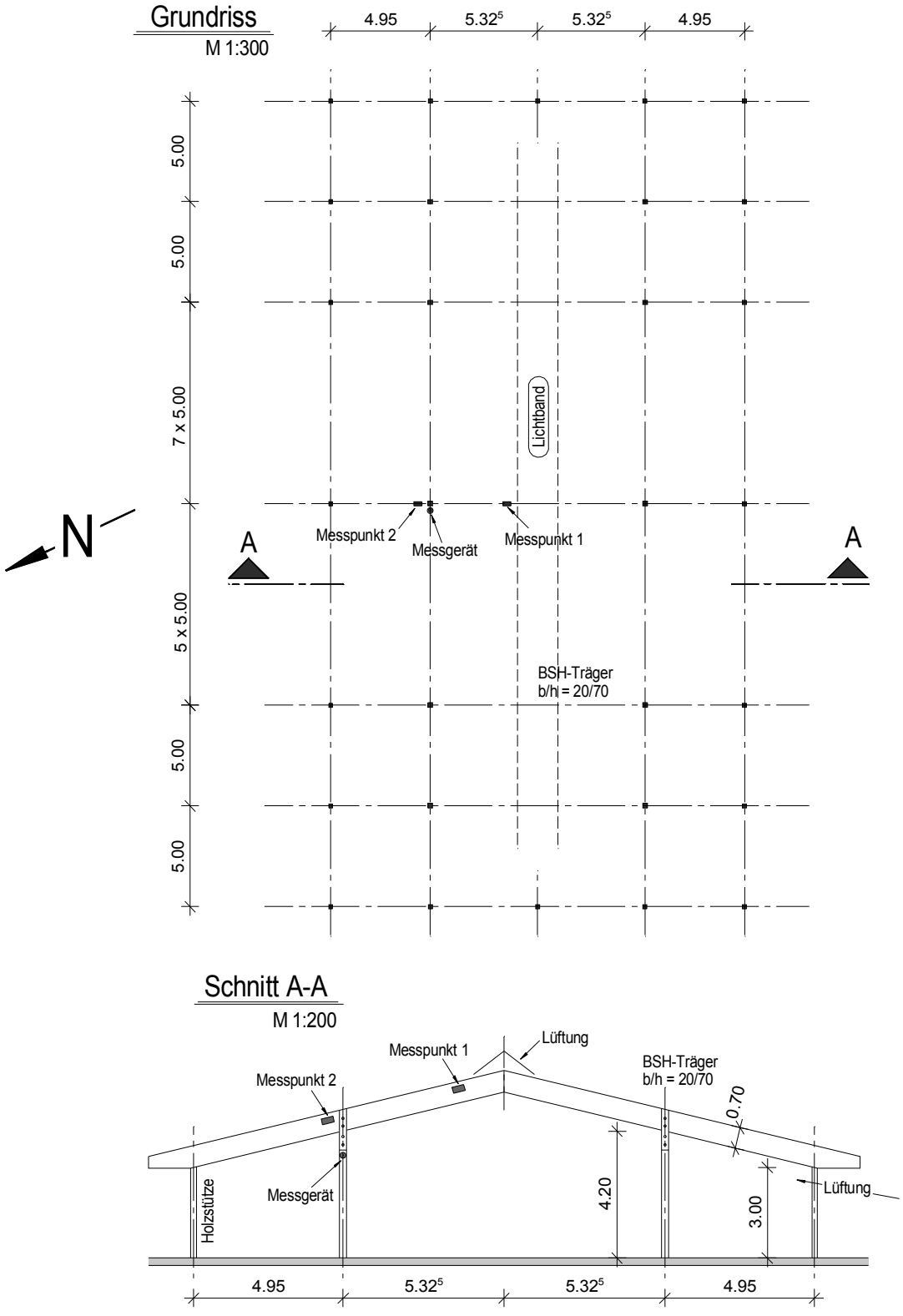
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	07.09.2010, 12:30 - 14:15	22.02.2013, 12:00 - 13:00
Letztes Auslesedatum	10.10.2011, 14:00 – 15:00	01.04.2014, 11:00 - 12:00

Umgebungsbedingungen:	Einseitig offene Halle, ungeheizter, konstruktiv gedämmter Raum Temperatur: 19,1°C; Luftfeuchte: 70,6 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Im Firstbereich (Über Futtertisch im Einflussbereich des öffenbaren Lichtbandes)
Messstelle 2:	Im Bereich der Zwischenauflager (Über den Stallungen des Jungviehs zur Beurteilung des Einflusses des Feuchteeintrages durch das Vieh)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	16,8	77,6	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 1
u2	25	15,8	79,8	gemessene	
u3	40	15,6	81,2	Temperatur	
u4	70	14,8	84,1	t_1: 18,8°C	
u5	15	16,8	76,6	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	15,6	80,2	gemessene	
u7	40	14,1	85,0	Temperatur	
u8	70	14,2	85,1	t_2: 18,8°C	

Tragsystem:	Durchlaufträger, Feldlänge $\ell_1 = \ell_4 = 4{,}95$ m (im Grundmaß), Feldlänge $\ell_2 = \ell_3 = 5{,}375$ m (im Grundmaß) 17 Achsen mit einem Trägerachsabstand $e = 5{,}0$ m Trägerabmessungen $b/h = 20/70$ cm^2 Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:300
4.95
5.32⁵
5.32⁵
4.95
5.00
5.00
7 x 5.00
5 x 5.00
5.00
5.00
Lichtband
N
A
A
Messpunkt 2
Messgerät
Messpunkt 1
BSH-Träger
b/h = 20/70
Schnitt A-A
M 1:200
Messpunkt 1
Lüftung
Messpunkt 2
BSH-Träger
b/h = 20/70
0.70
Messgerät
Holzstütze
4.20
3.00
Lüftung
4.95
5.32⁵
5.32⁵
4.95

Bilder:



Abbildung F1-1: Ansicht Tragwerk

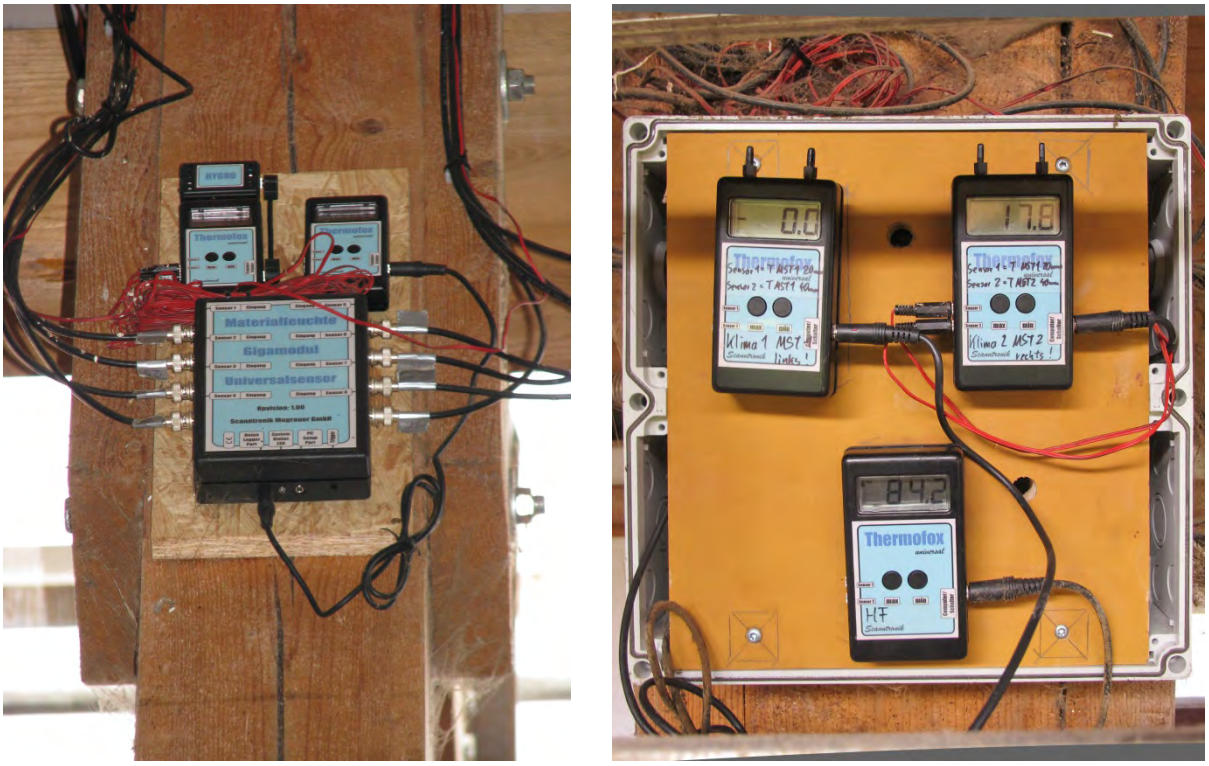


Abbildung F1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2
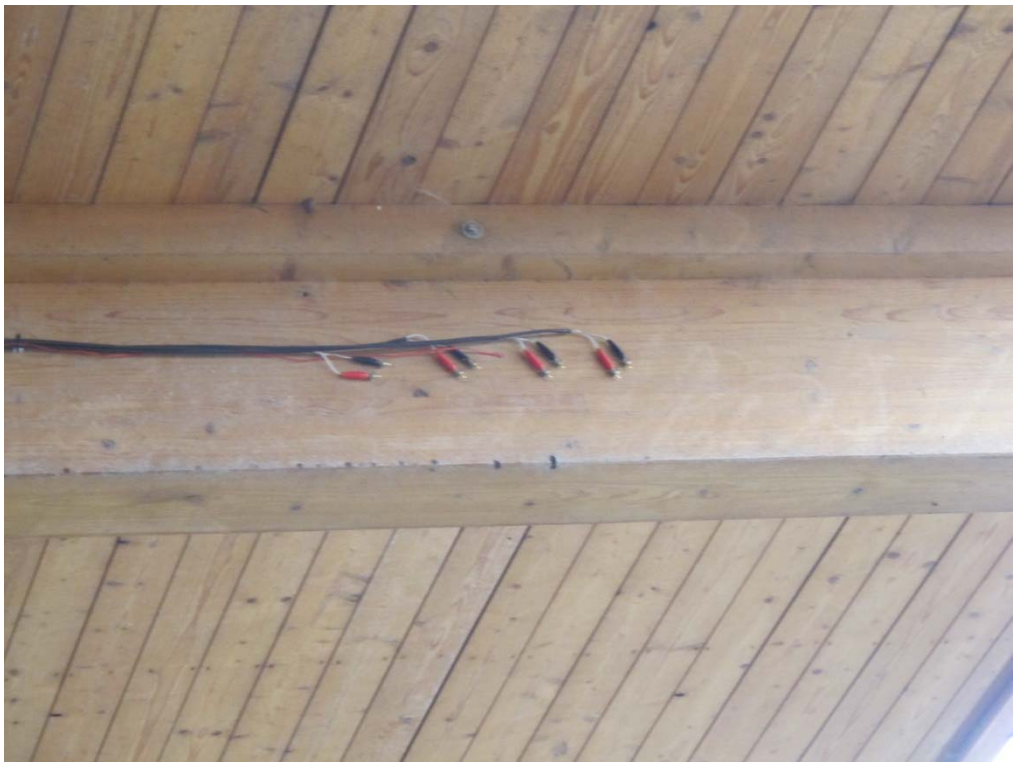


Abbildung F1-3: Ansicht Messstelle 1

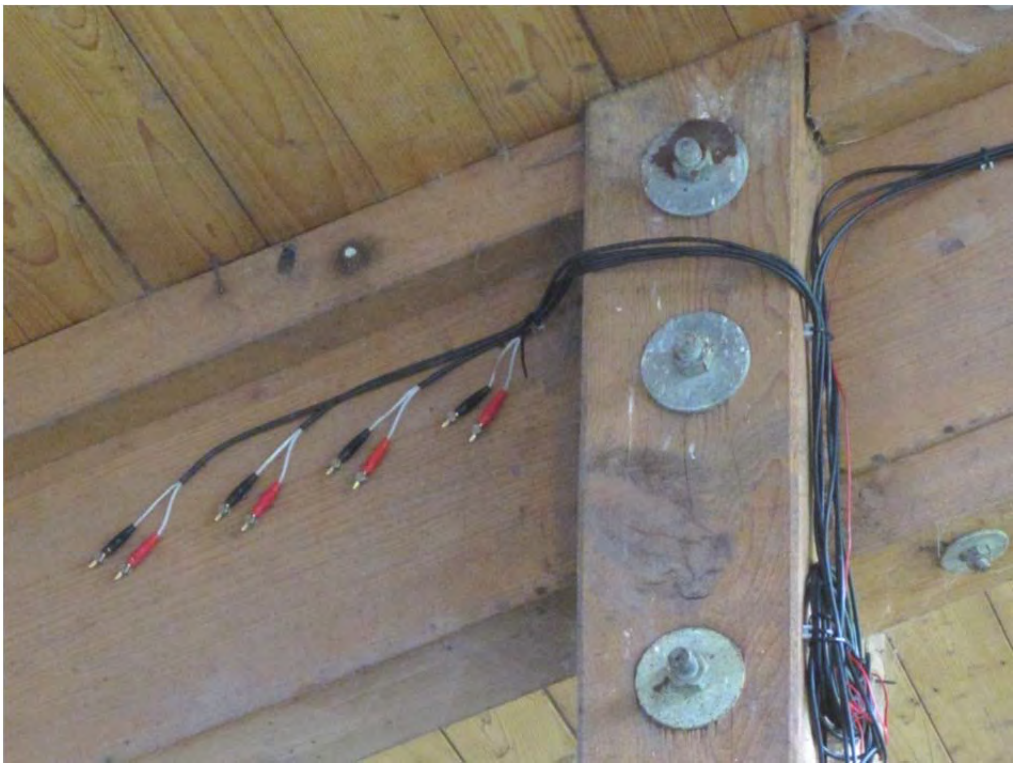
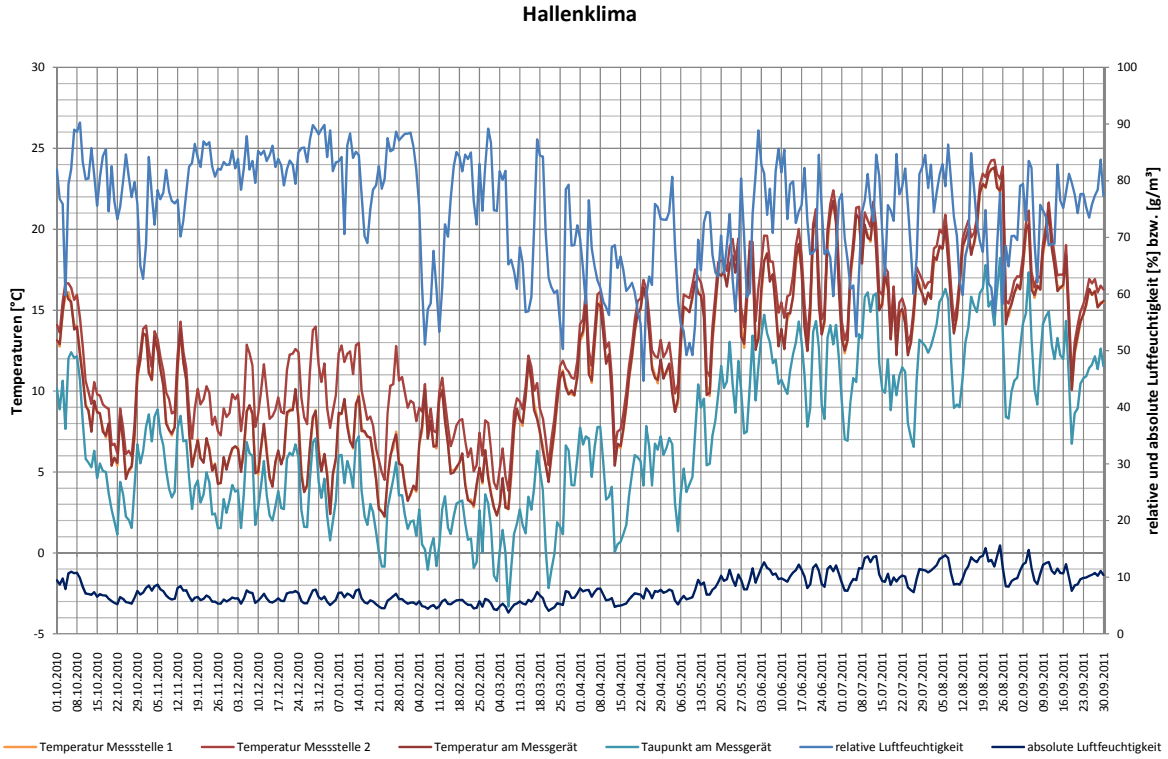


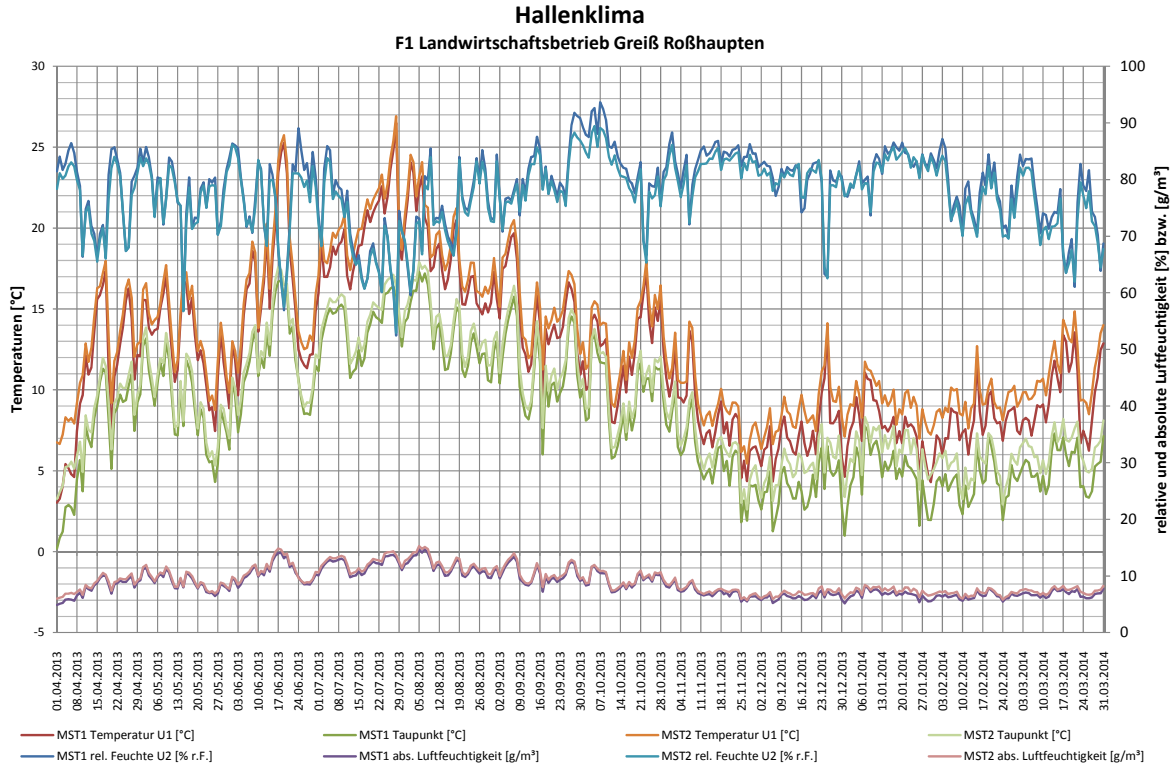
Abbildung F1-4: Ansicht Messstelle 2

F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung



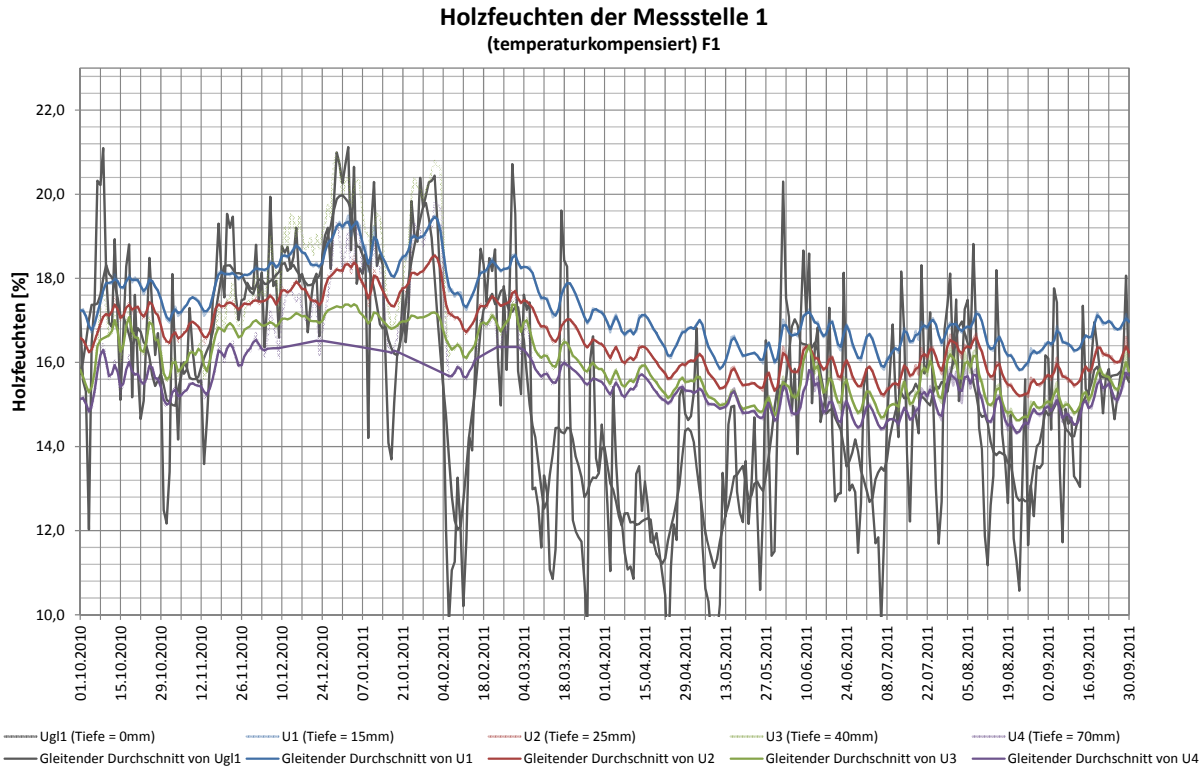
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

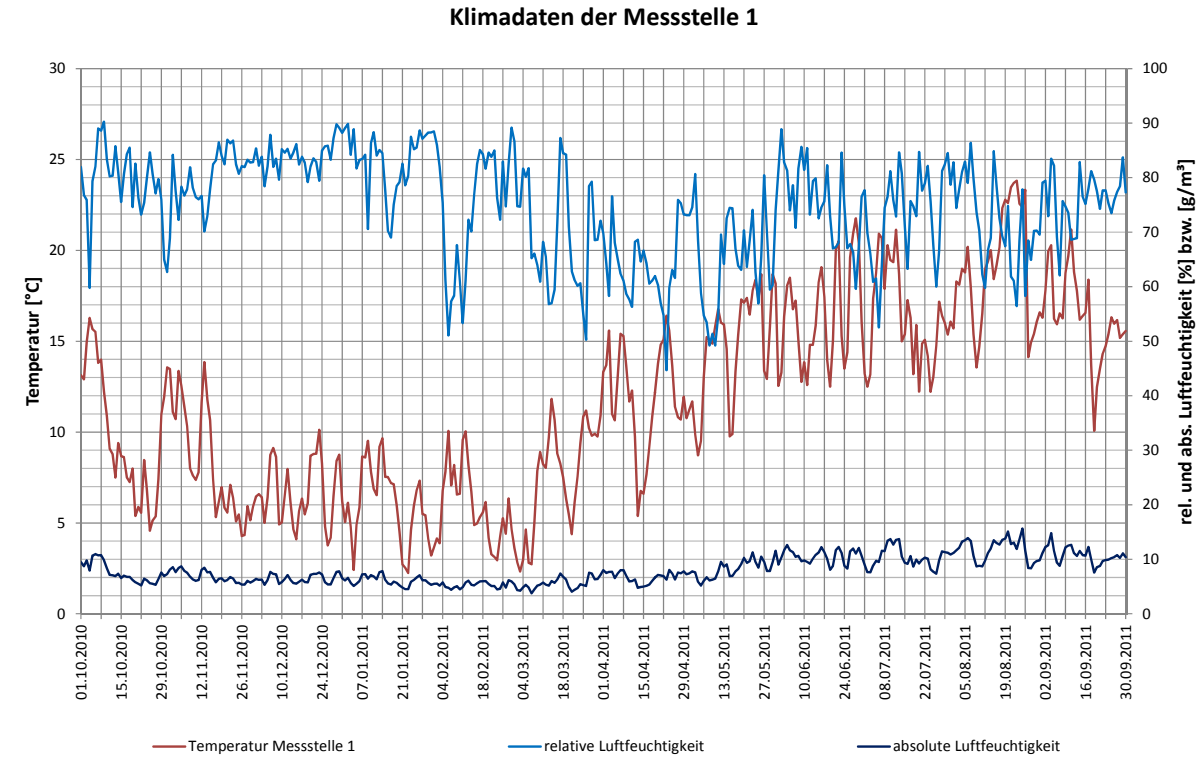


F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Messstelle 1: Im Firstbereich

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

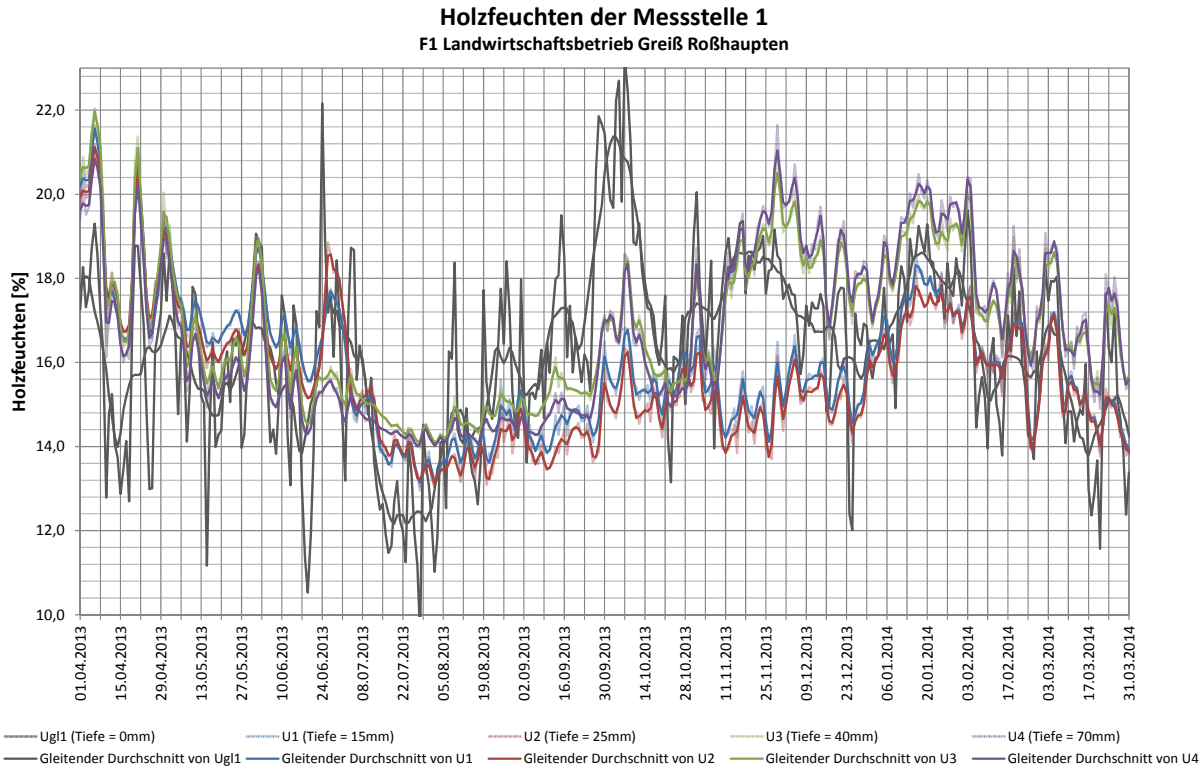


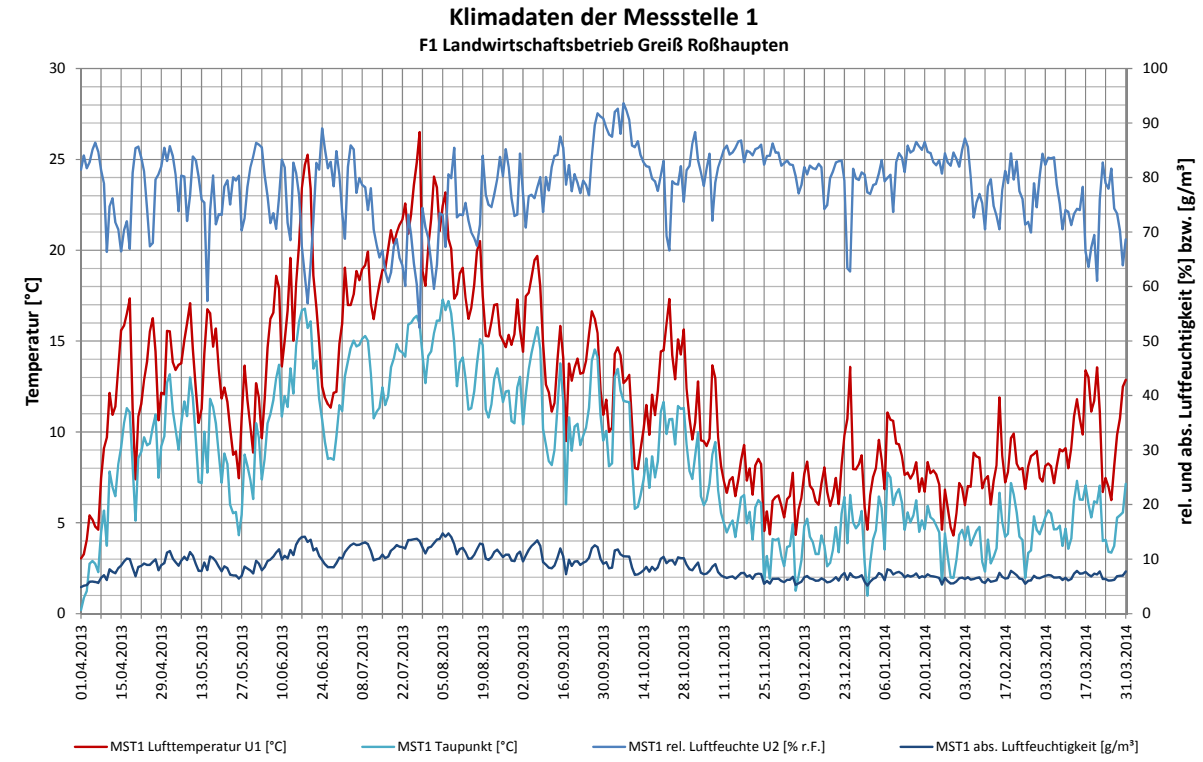


F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Messstelle 1: Im Firstbereich

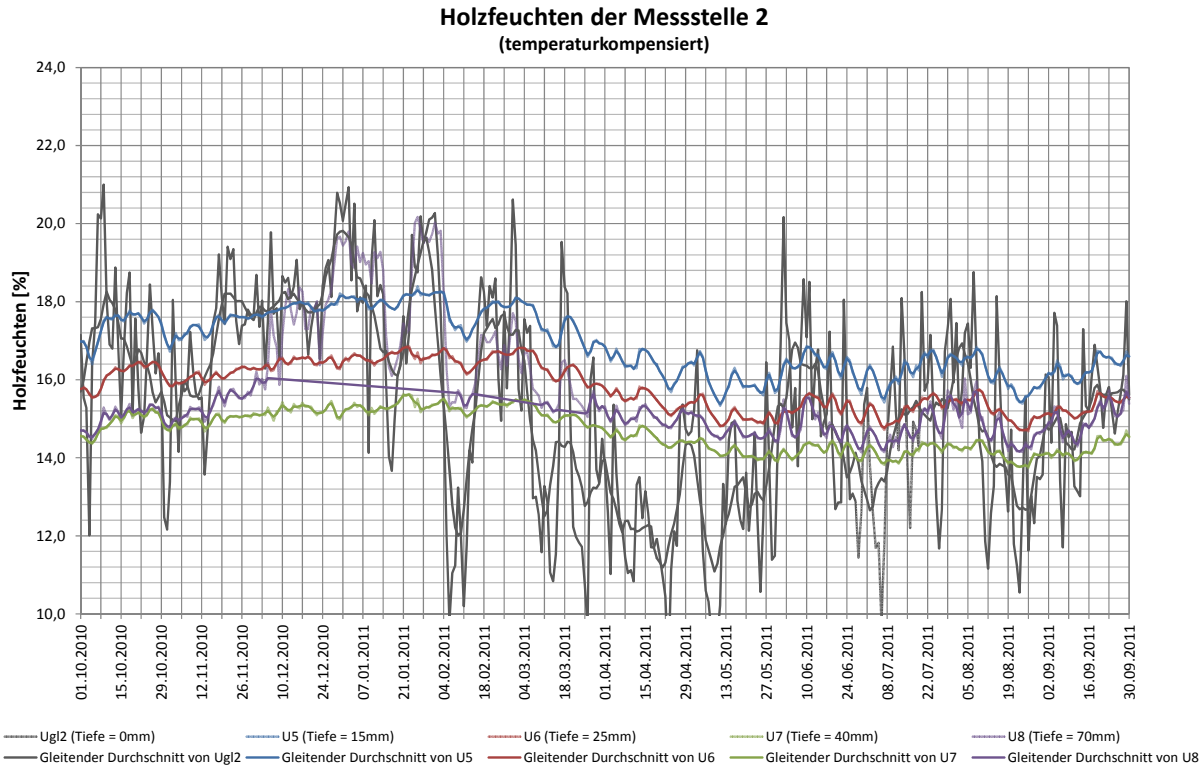
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

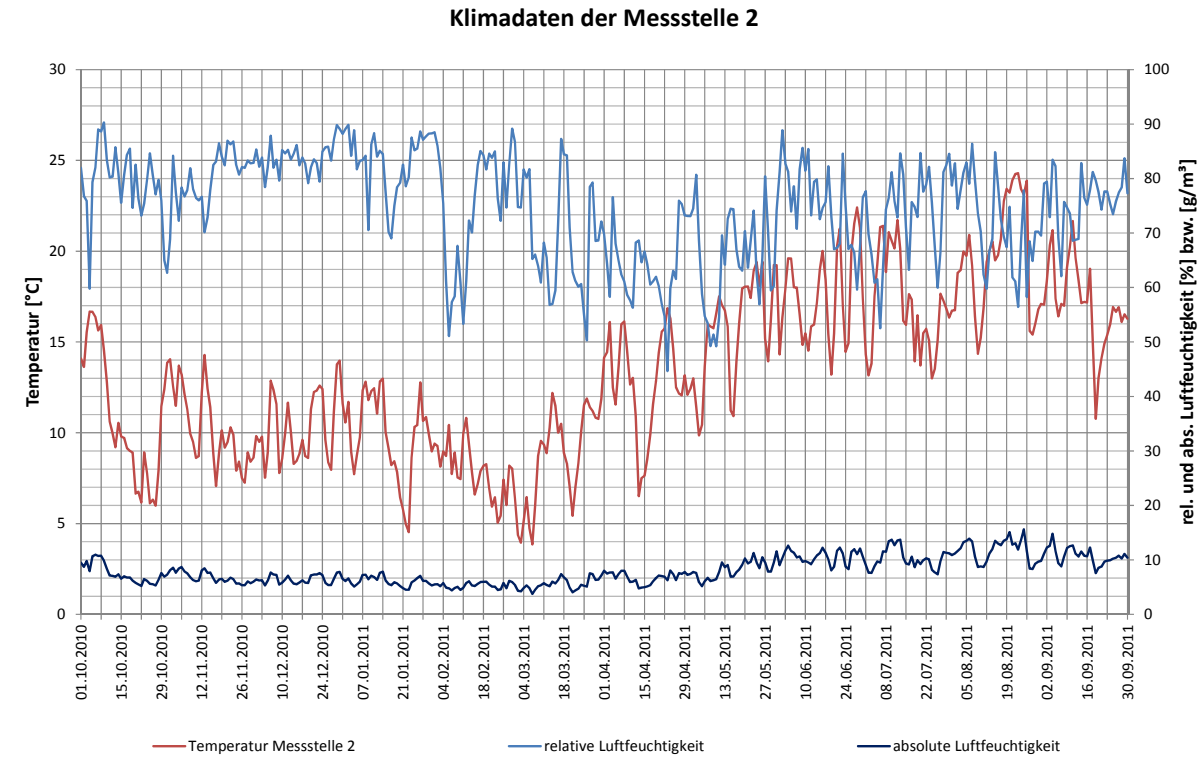




F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Messstelle 2: Im Bereich der Zwischenauflager
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

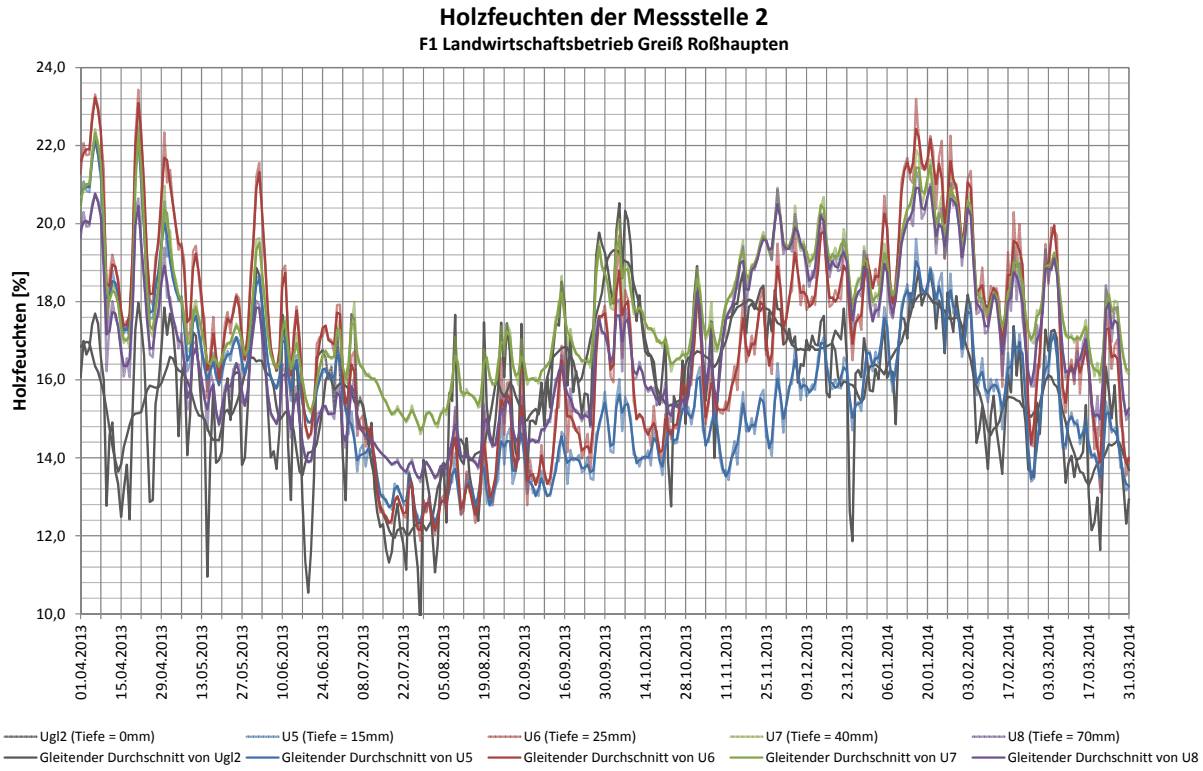


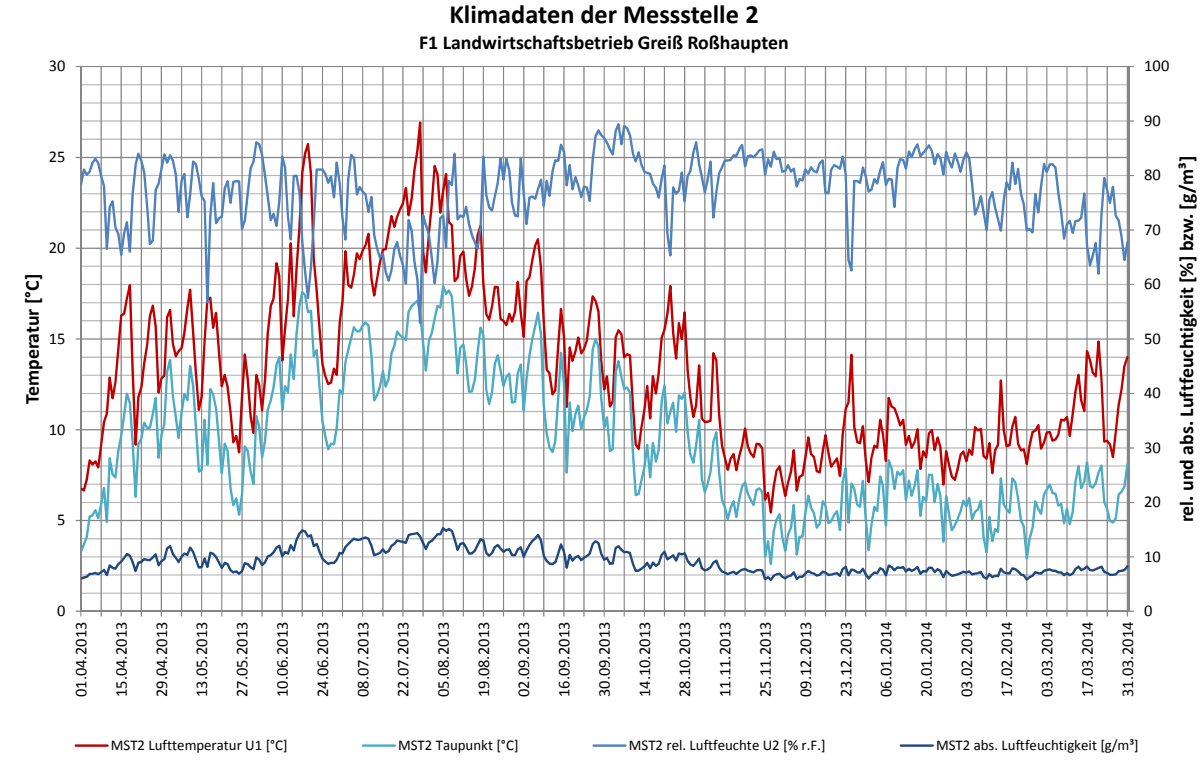


F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Messstelle 2: Im Bereich der Zwischenauflager

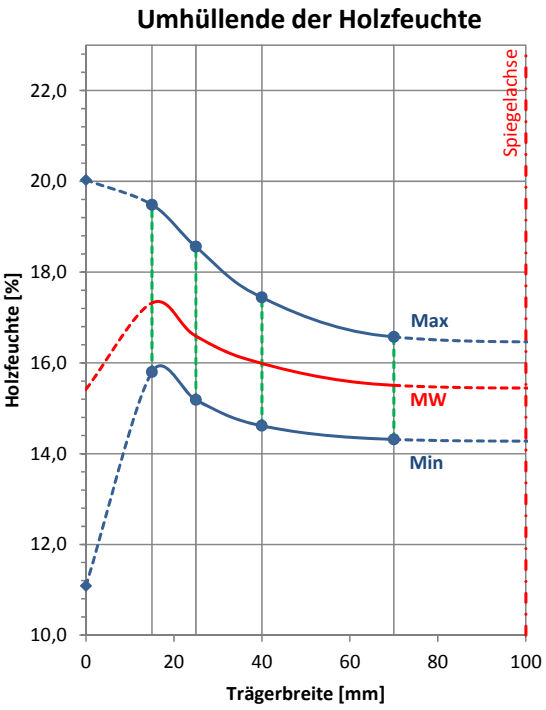
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

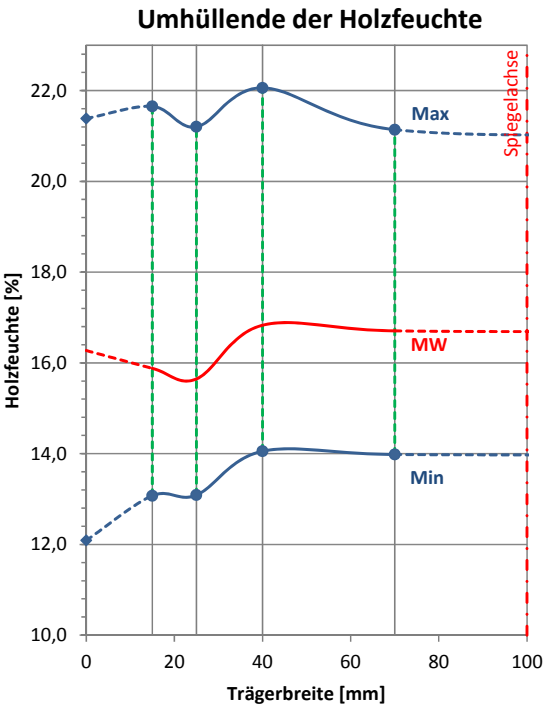


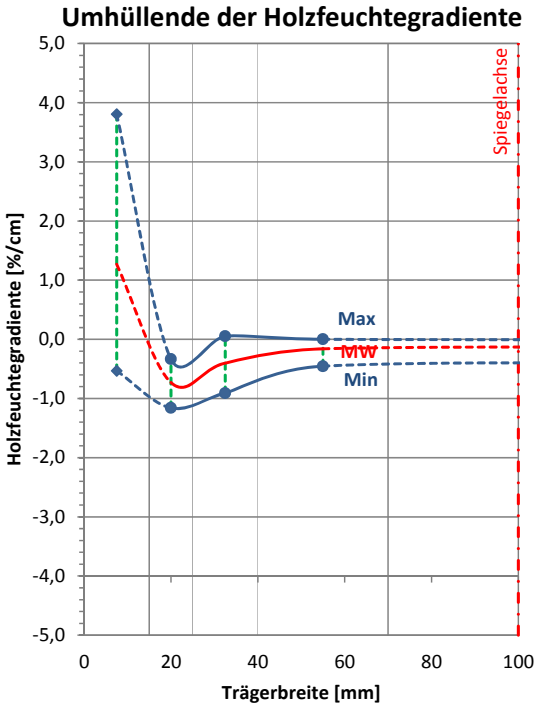


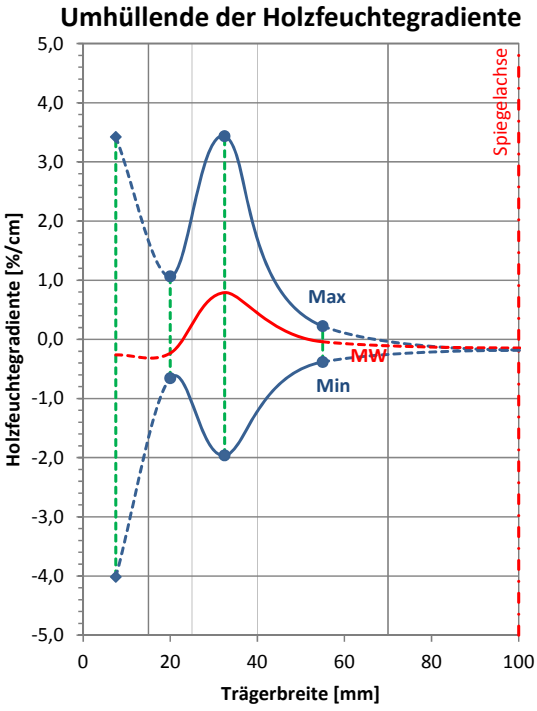
F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Messstelle 1: Im Firstbereich
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



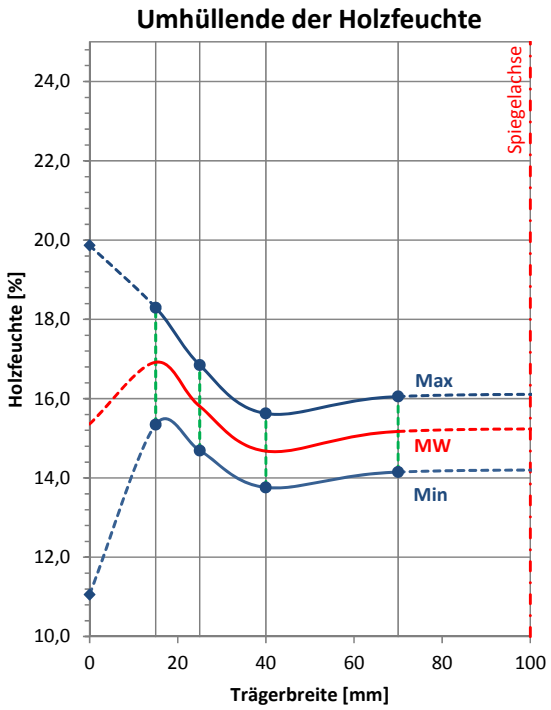


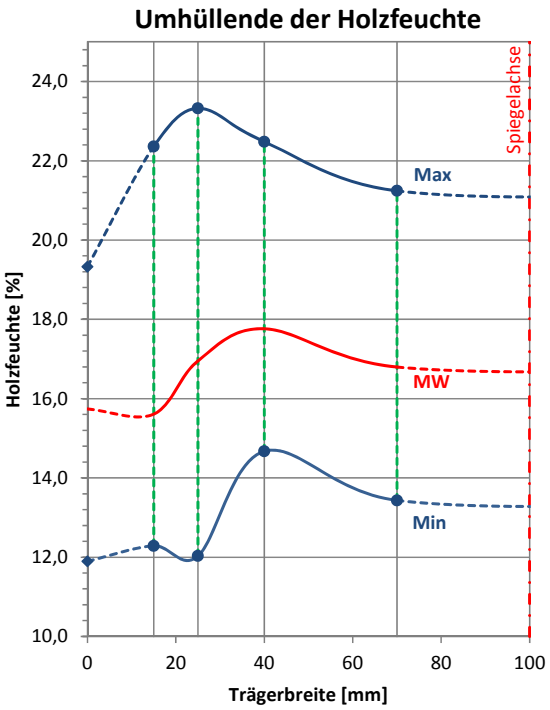


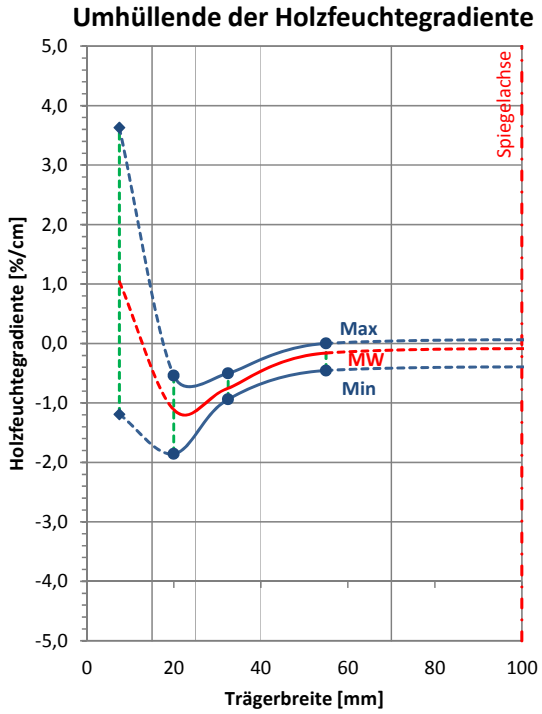


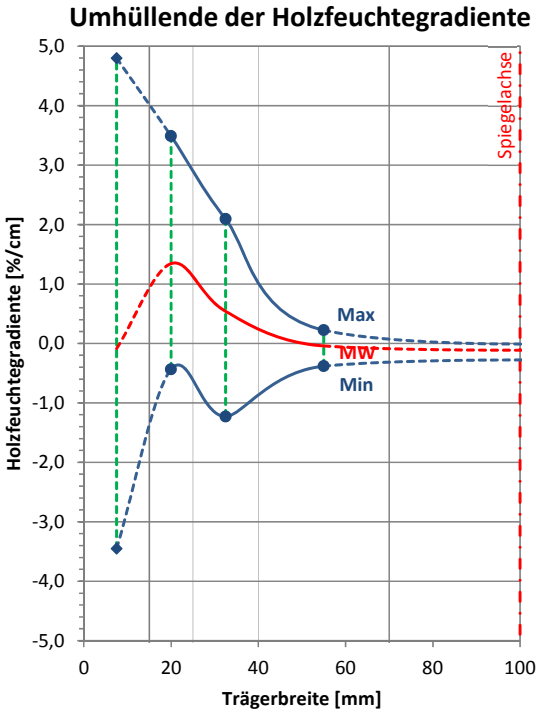
F1 Landwirtschaftsbetrieb Greis Roßhaupten

Messstelle 2: Im Bereich der Zwischenauflager
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









F2 Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten

Anschrift: Tiefenbruggerstr. 10
87672 Roßhaupten

Ansprechpartner: Hr. Christian Mair (vor Ort)

Anwesende vor Ort: Michael Merk, Andreas Gamper, Hr. Mair

Installationsdatum: 07.09.2010, 12:30 - 14:30
Letztes Auslesedatum: 10.10.2011, 12:00 – 13:00

Umgebungsbedingungen: Einseitig offene Halle, ungeheizter, konstruktiv gedämmter Raum

Temperatur: 16,5°C; Luftfeuchte: 86,2 % (z.Zt. d. Installation)

Messstelle 1: Im Firstbereich, unter Lichtband im Bereich der Lüftungsöffnungen (Direkt über den Stallungen des Viehs, in Einflussbereich des Lichtbandes das auch zur Lüftung genutzt wird)

Messstelle 2: Zwischen den Zwischenabstützungen, 5 m über dem Futtertisch (Regelbereich über Futtertisch, Referenz zu Messstelle 2)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	15,9	79,4	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 1
u2	25	14,0	85,6	Gemessene	
u3	40	13,9	86,1	Temperatur	
u4	70	13,4	88,2	t_1: 16,4°C	
u5	15	15,8	82,5	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	15,7	83,0	gemessene	
u7	40	15,3	84,0	Temperatur	
u8	70	15,1	85,1	t_2: 19,3°C	

Tragsystem: Durchlaufträger
Feldlänge ℓ_1 = 5,65 m (im Grundmaß); ℓ_2 = 5,40 m (im Grundmaß)
Feldlänge ℓ_3 = 6,50 m (im Grundmaß); ℓ_4 = 12,75 m (im Grundmaß)

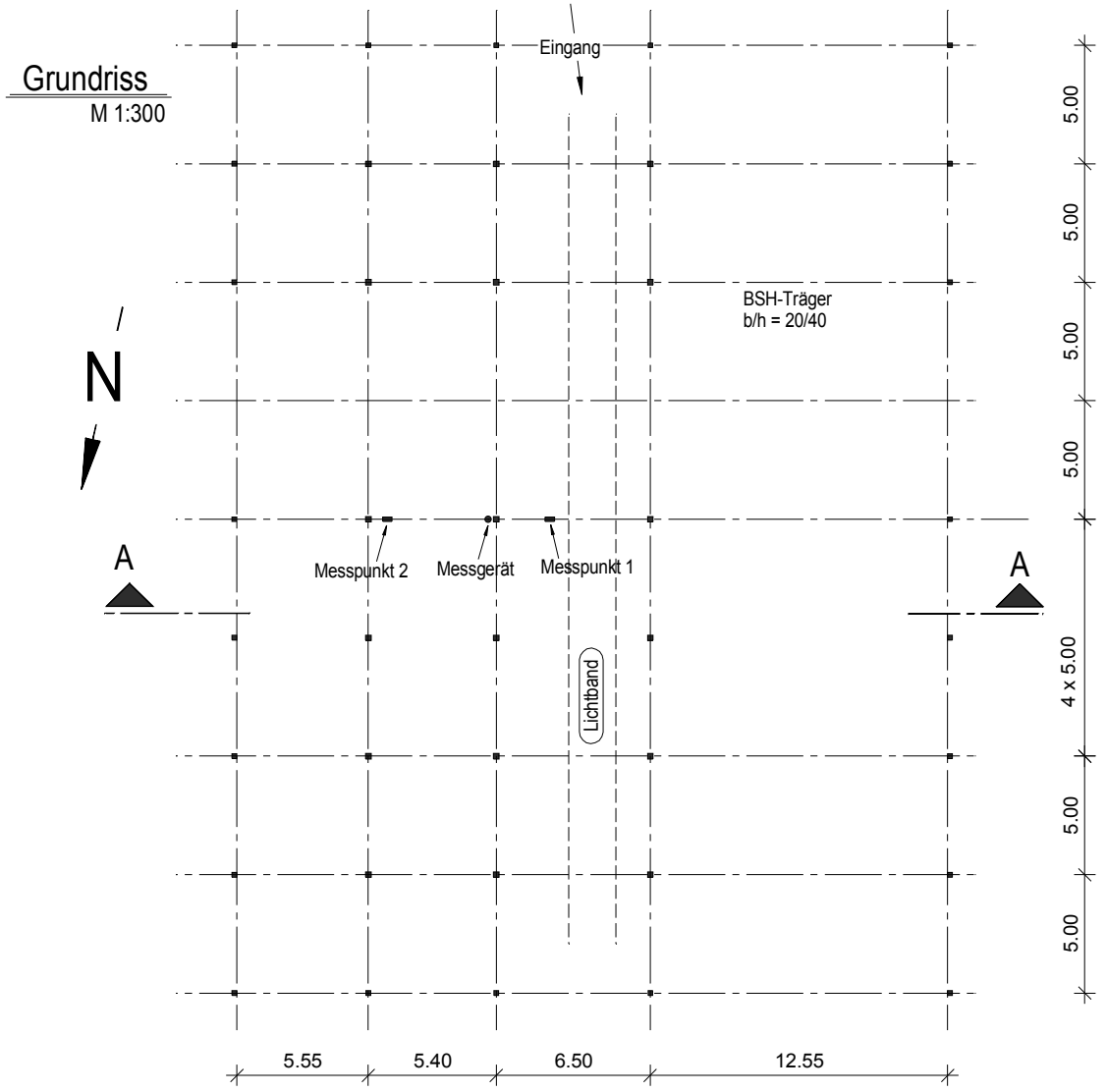
11 Achsen mit einem Trägerachsabstand e = 5,00

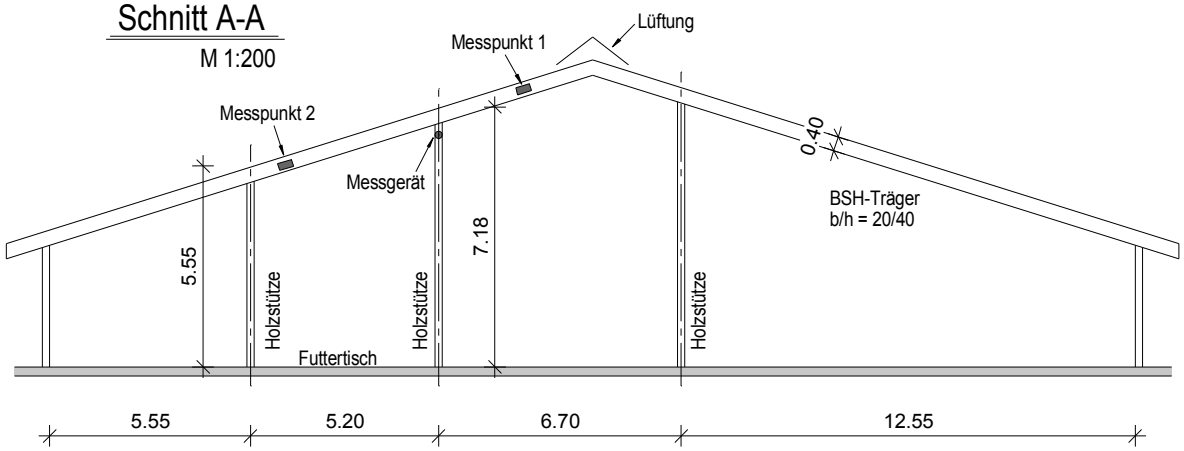
Lamellenstärke t = 40 mm

Trägerabmessungen b/h = 20/40

Bauteile unbehandelt
(vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:300
Eingang
BSH-Träger
b/h = 20/40
N
A
A
Messpunkt 2
Messgerät
Messpunkt 1
Lichtband
5.00
5.00
5.00
5.00
4 x 5.00
5.00
5.00
5.55
5.40
6.50
12.55


Schnitt A-A
M 1:200
Messpunkt 1
Lüftung
Messpunkt 2
Messgerät
0.40
BSH-Träger
b/h = 20/40
5.55
Holzstütze
Holzstütze
7.18
Holzstütze
Futtertisch
5.55
5.20
6.70
12.55

Bilder:



Abbildung F2-1: Ansicht Tragwerk



Abbildung F2-2: Ansicht Messstation



Abbildung F2-3: Ansicht Messstelle 1

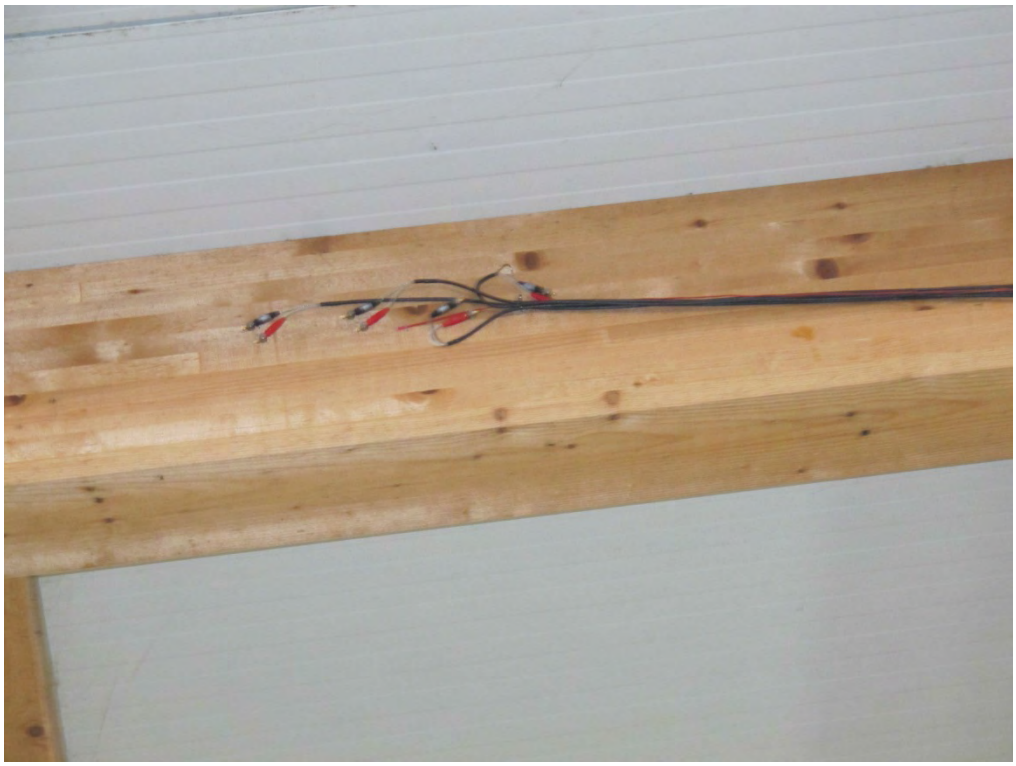
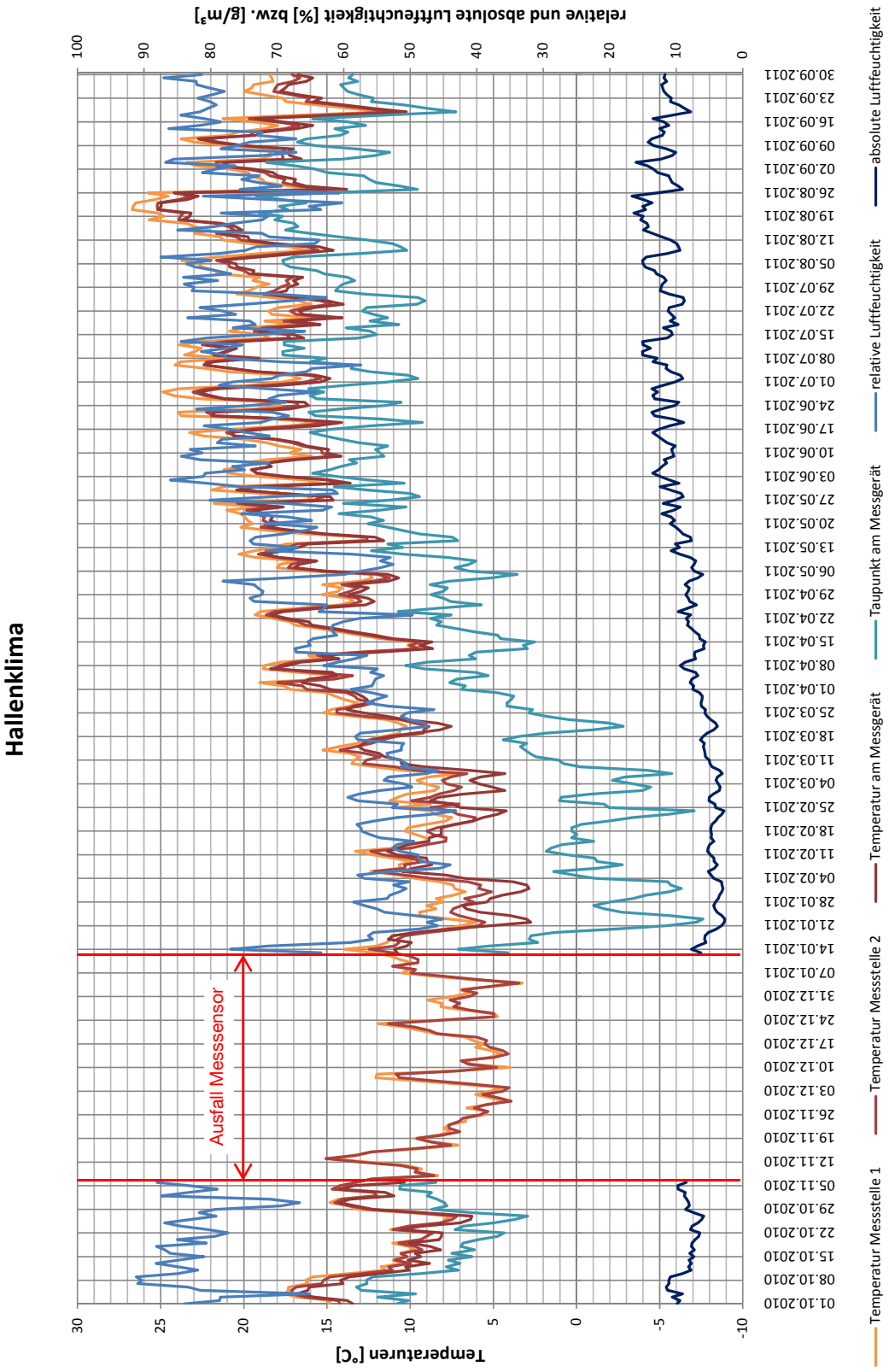


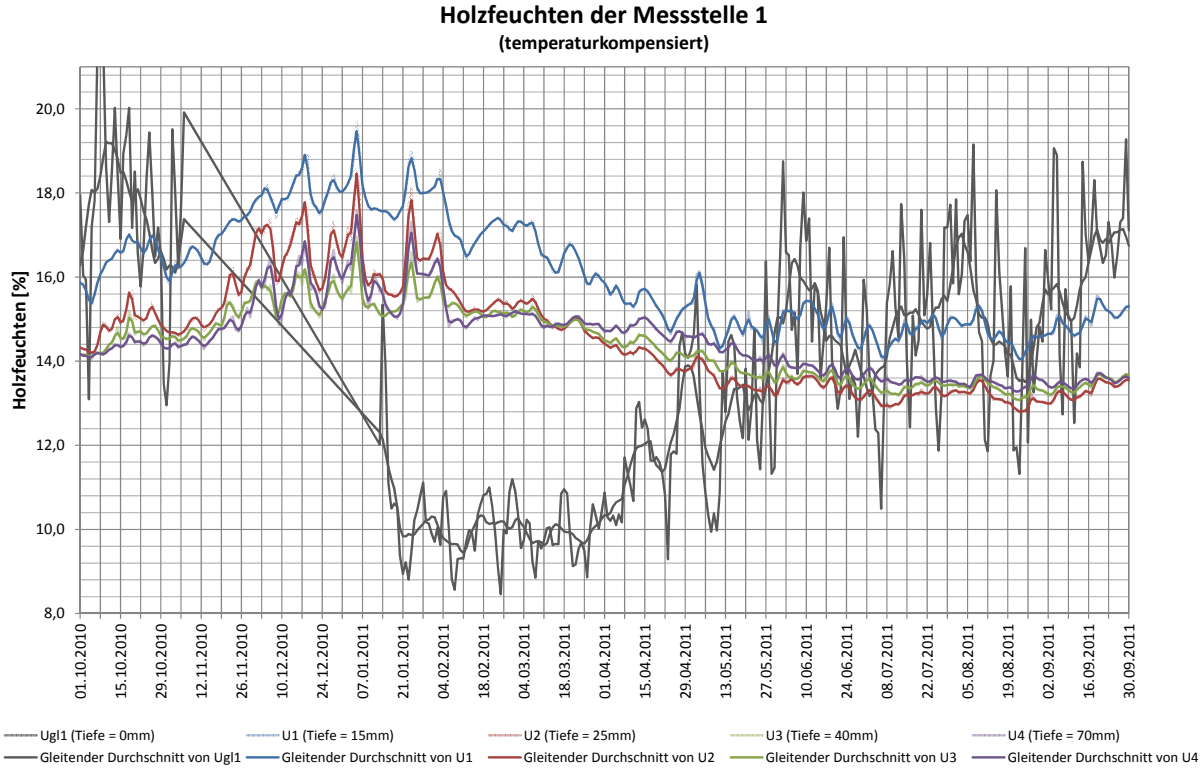
Abbildung F2-4: Ansicht Messstelle 2

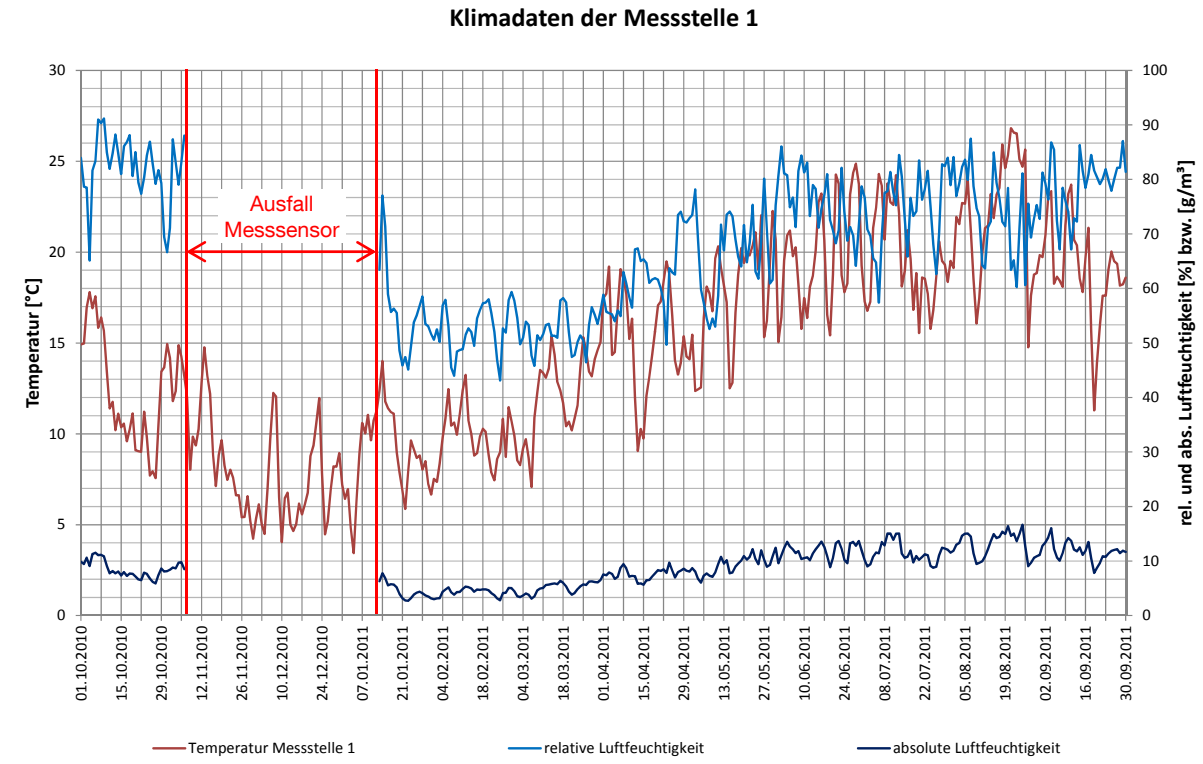
F2 Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten



F2 Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten

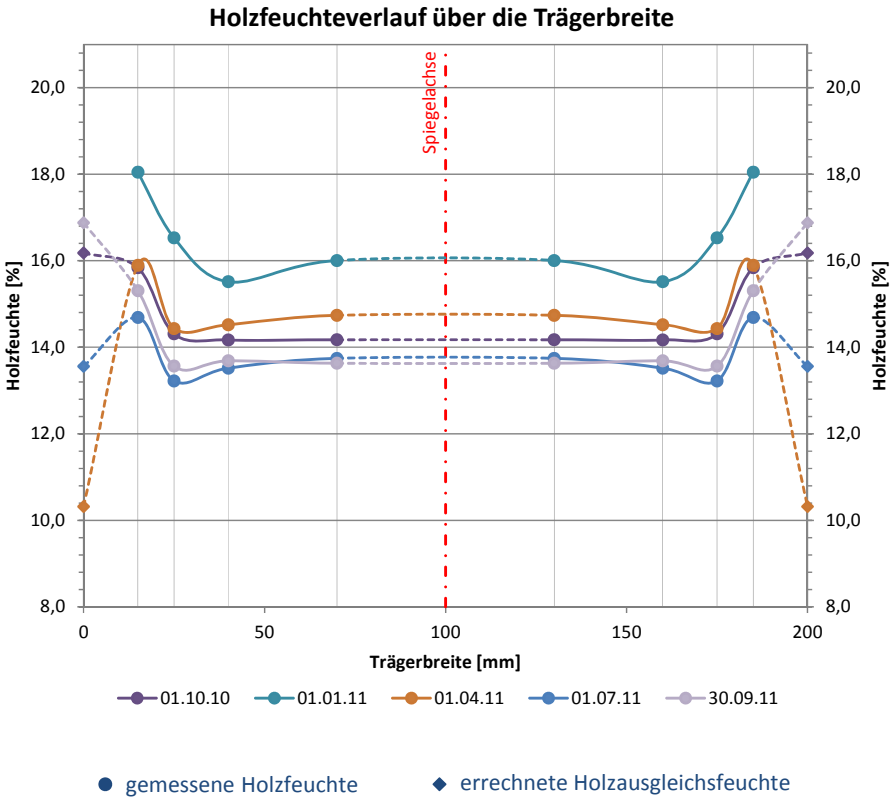
Messstelle 1: Im Firstbereich, unter Lichtband im Bereich Lüftung

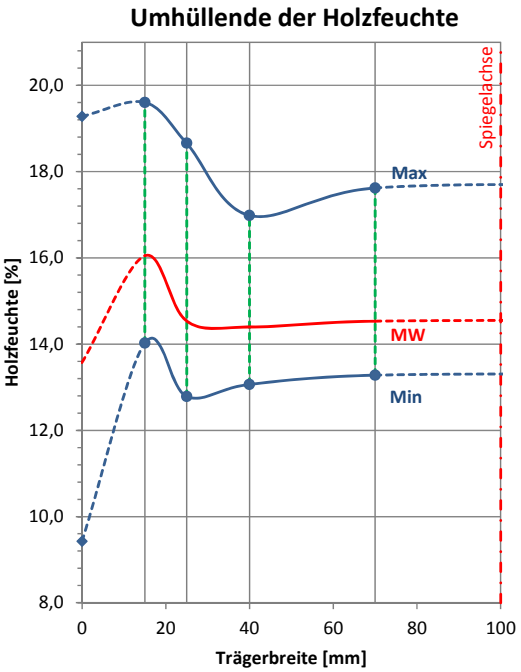


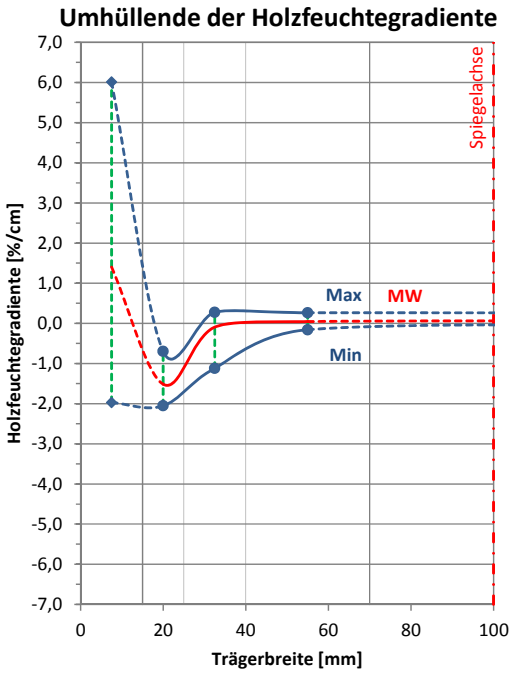


F2 Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten

Messstelle 1: Im Firstbereich, unter Lichtband im Bereich Lüftung



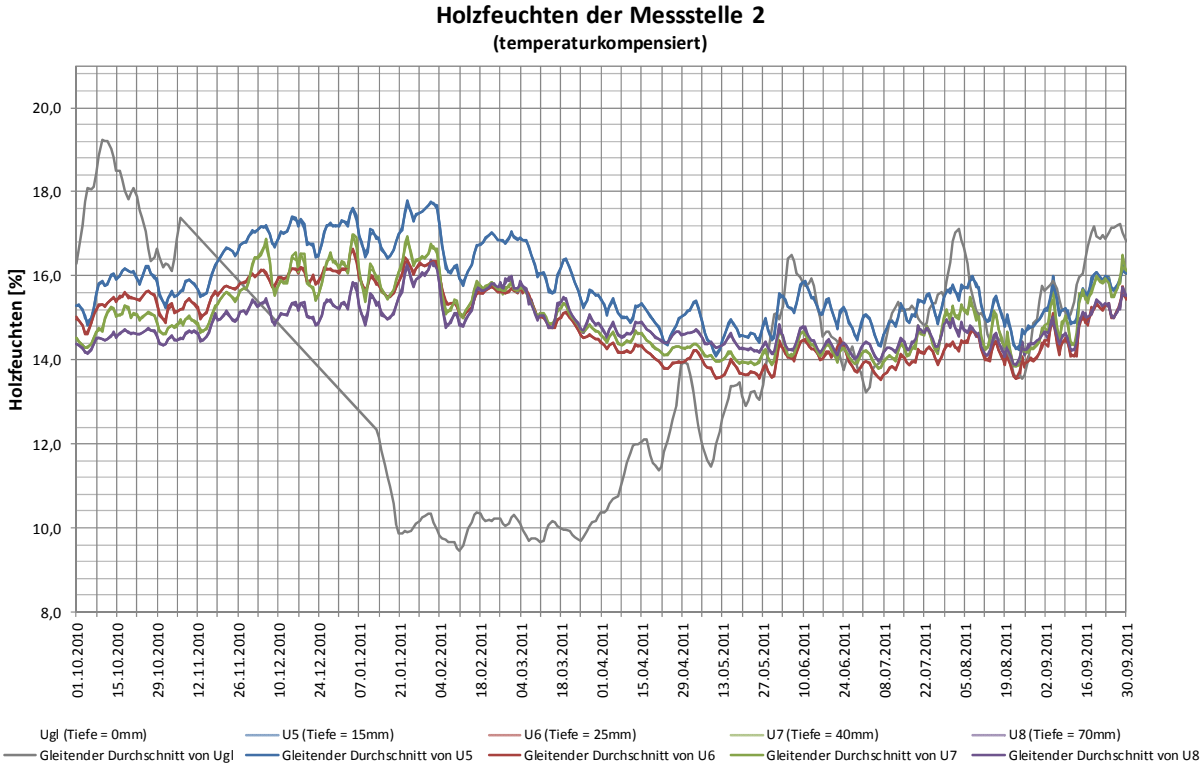


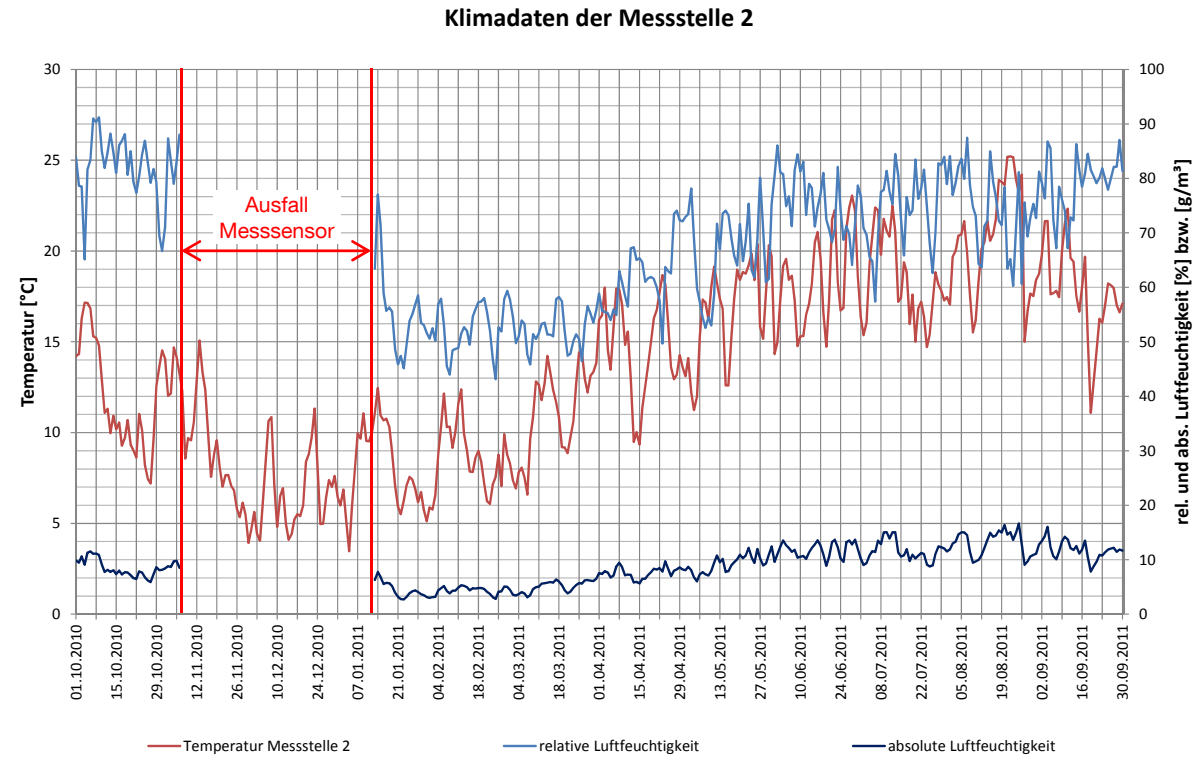


Anzeichen einer Parallelverschiebung der Messergebnisse des Sensors in 15 mm Tiefe (vgl. Absatz 5.9 im Hauptteil)!

F2 Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten

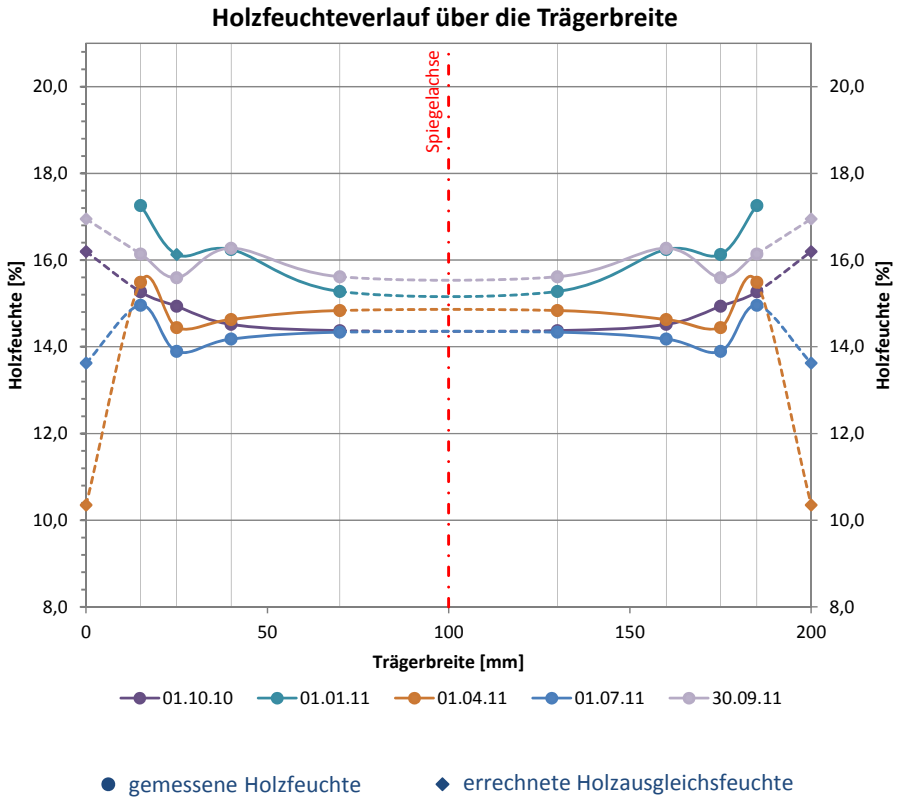
Messstelle 2: Zwischen den Zwischenabstützungen, 5 m über dem Futtertisch

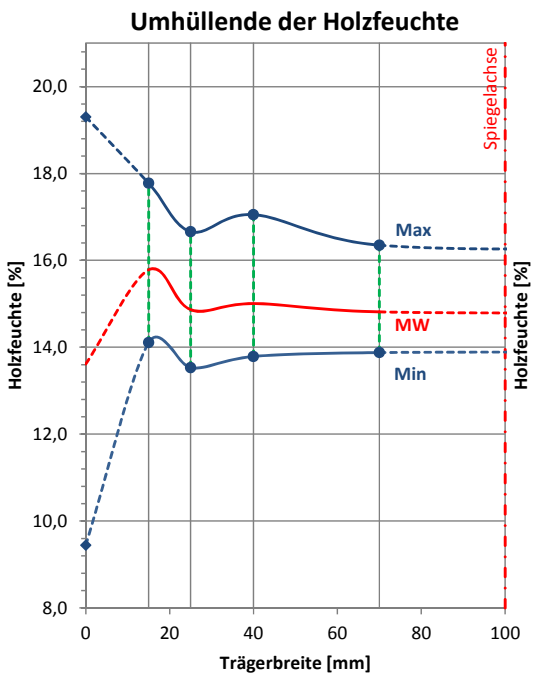


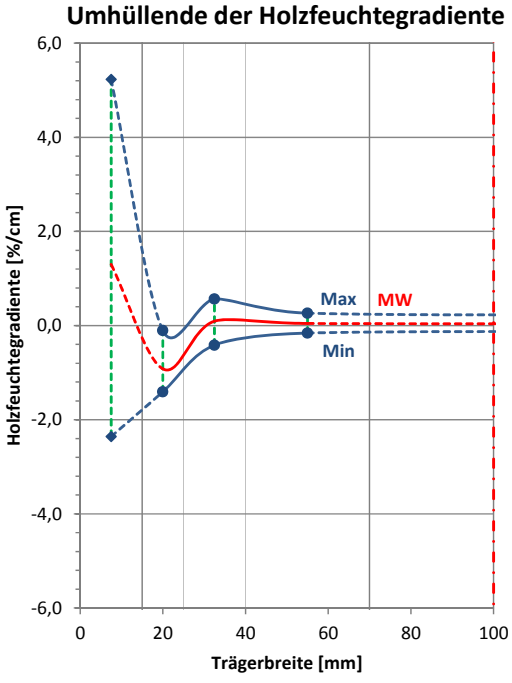


F2 Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten

Messstelle 2: Zwischen den Zwischenabstützungen, 5 m über dem Futtertisch







Anzeichen einer Parallelverschiebung der Messergebnisse des Sensors in 15 mm Tiefe (vgl. Absatz 5.9 im Hauptteil)!

F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

Anschrift:	Joh.-Jos.-Schmitz-Straße 1 86807 Buchloe
Ansprechpartner:	Herr Andreas Schmitz
Anwesende vor Ort:	Philipp Dietsch, Andreas Gamper, Herr Andreas Schmitz

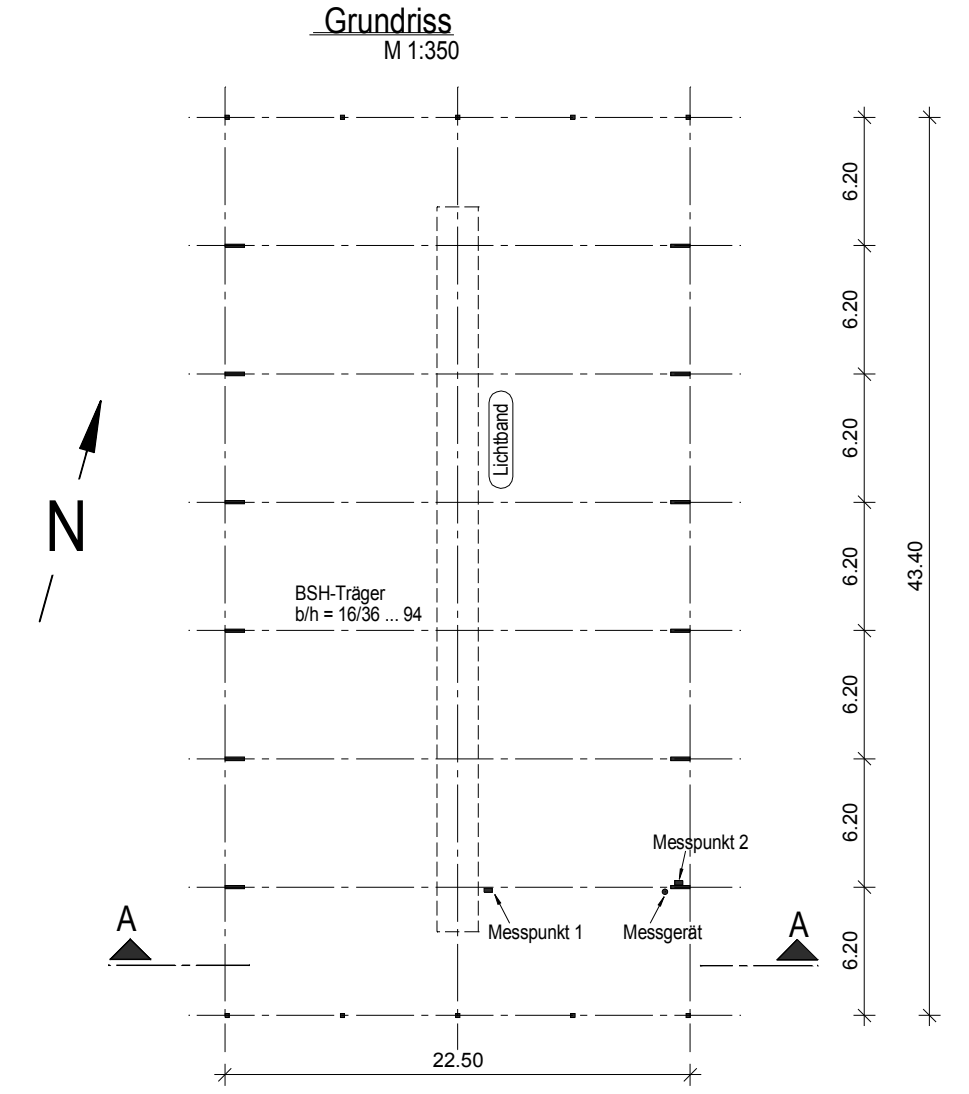
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	01.09.2010, 13:00 - 16:00	15.02.2013, 09:00 - 11:00
Letztes Auslesedatum	10.10.2011, 08:00 – 08:30	08.05.2014, 11:30 – 12:30

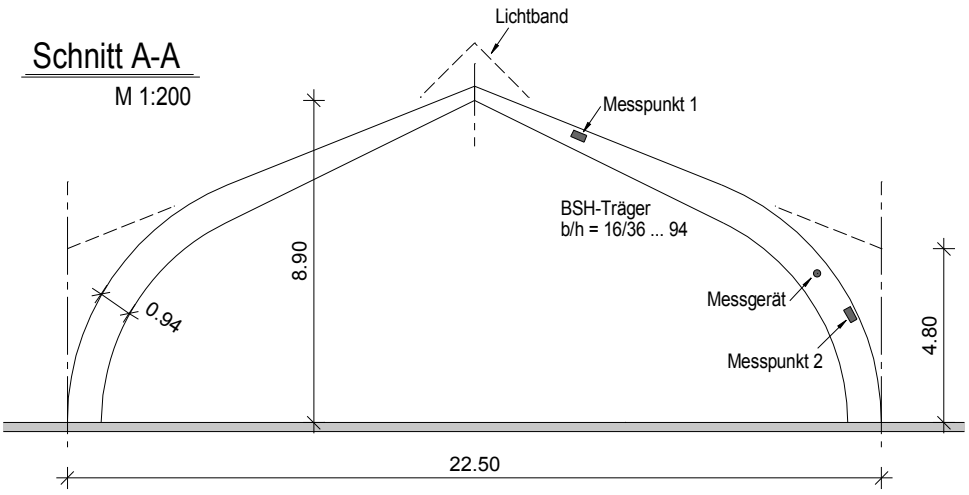
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossene, konstruktiv gedämmte Halle, Tore jedoch häufig geöffnet Temperatur: 15,6°C; Luftfeuchte: 57,0 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Im Firstbereich, Nähe Lampenaufhängung; (Zur Erfassung des Regelbereiches über den Stallungen des Viehs)
Messstelle 2:	In Traufbereich, beim Tor an Rückseite des Trägers neben Tor; (möglicher Einfluss der Toröffnung, Referenz zu Messstelle 1)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	16,5	80,2	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 1
u2	25	14,6	86,1	gemessene	
u3	40	13,5	89,7	Temperatur	
u4	70	13,1	90,9	t_1: 15,9°C	
u5	15	17,2	77,6	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 2
u6	25	15,6	82,4	gemessene	
u7	40	14,4	86,6	Temperatur	
u8	70	14,1	87,5	t_2: 15,6°C	

Statisches System:	Dreigelenkbogen, Spannweite ℓ = 22,50 m 8 Achsen mit einem Trägerachsabstand e = 6,20 m Trägerabmessungen b/h = 16/36 … 94 cm² Lamellenstärke t = 30 mm Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:350
N
Lichtband
BSH-Träger
b/h = 16/36 ... 94
Messpunkt 2
Messpunkt 1
Messgerät
A
A
6.20
6.20
6.20
6.20
6.20
6.20
43.40
22.50


Schnitt A-A
M 1:200
Lichtband
Messpunkt 1
BSH-Träger
b/h = 16/36 ... 94
Messgerät
Messpunkt 2
0.94
8.90
4.80
22.50

Bilder:



Abbildung F3-1: Ansicht Tragwerk

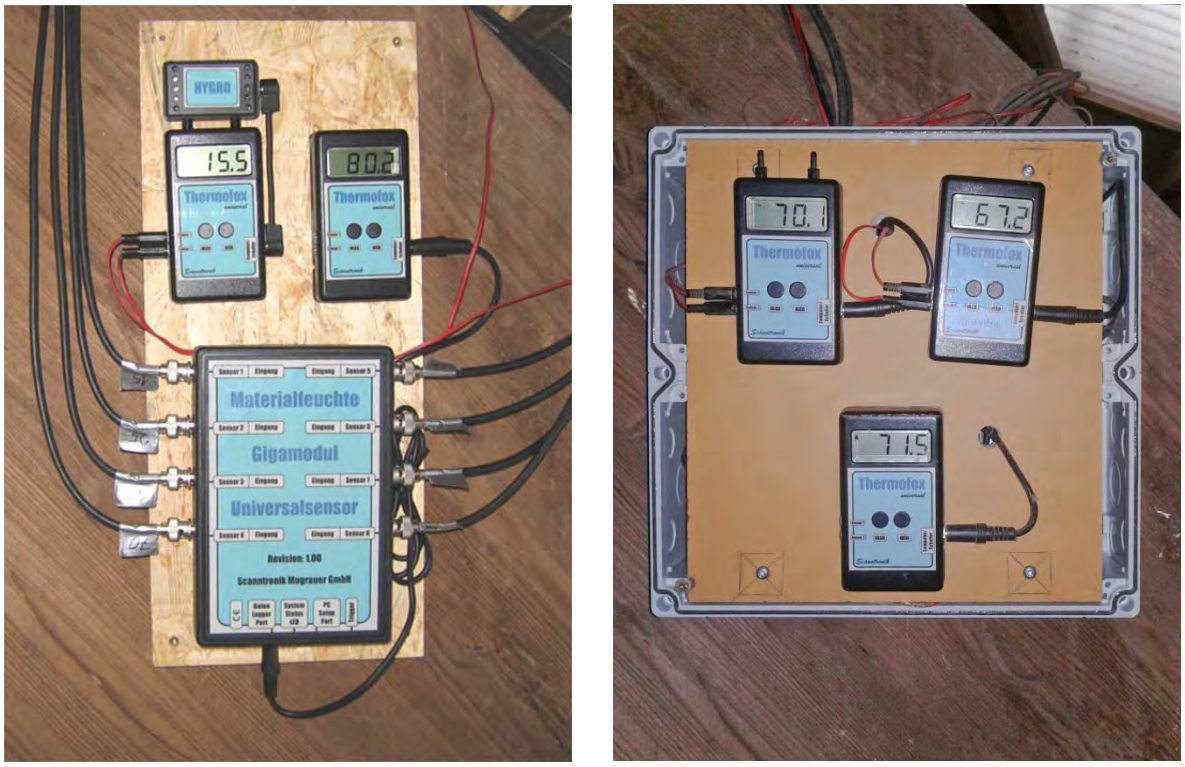


Abbildung F3-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2



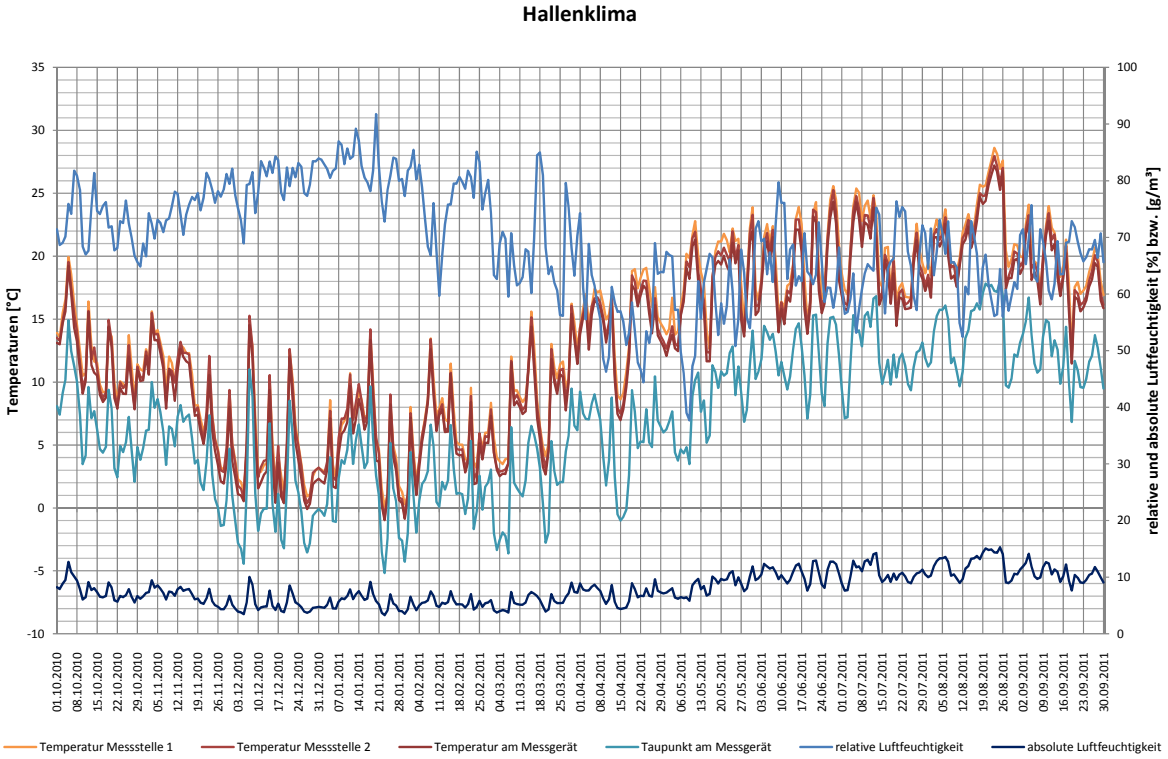
Abbildung F3-3: Ansicht Messstelle 1



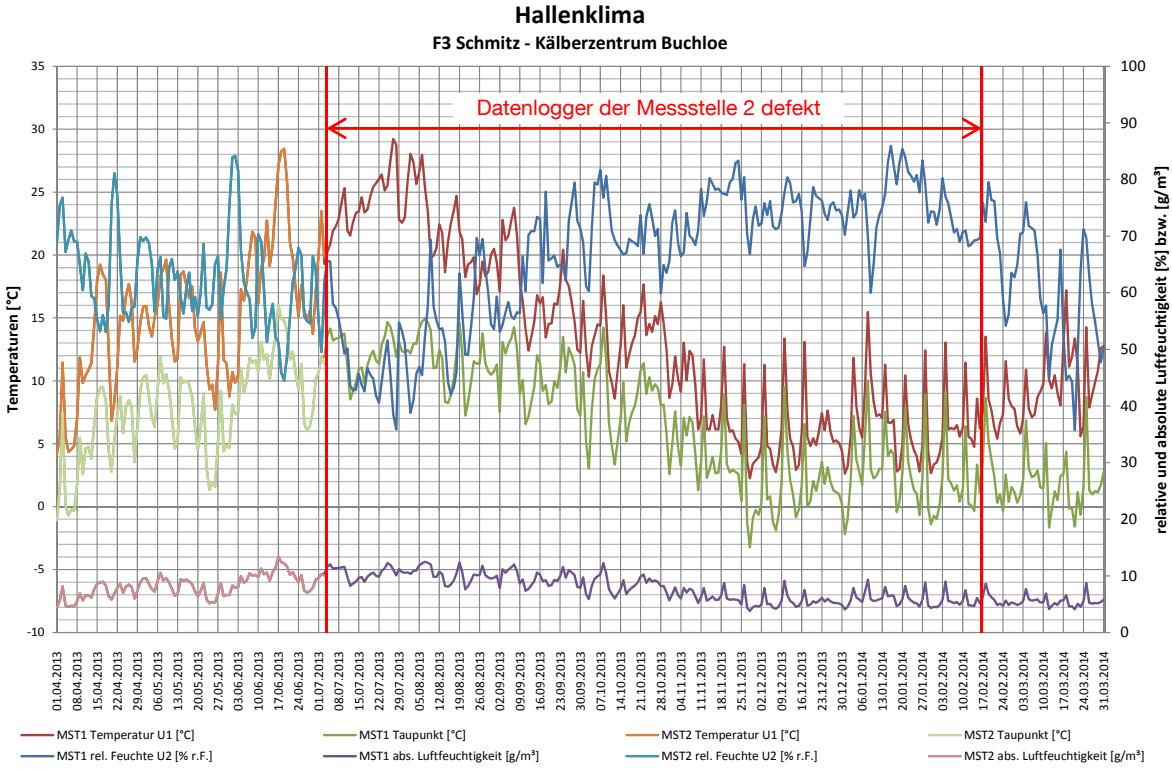
Abbildung F3-4: Ansicht Messstelle 2

F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

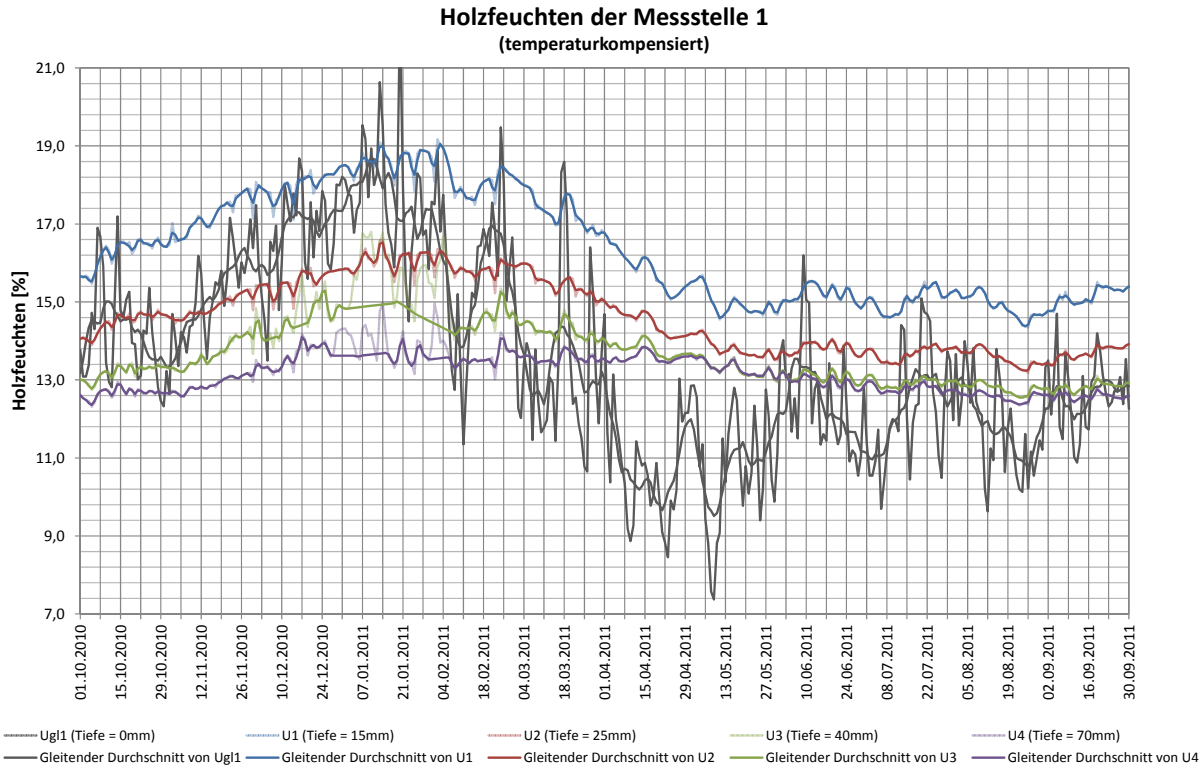


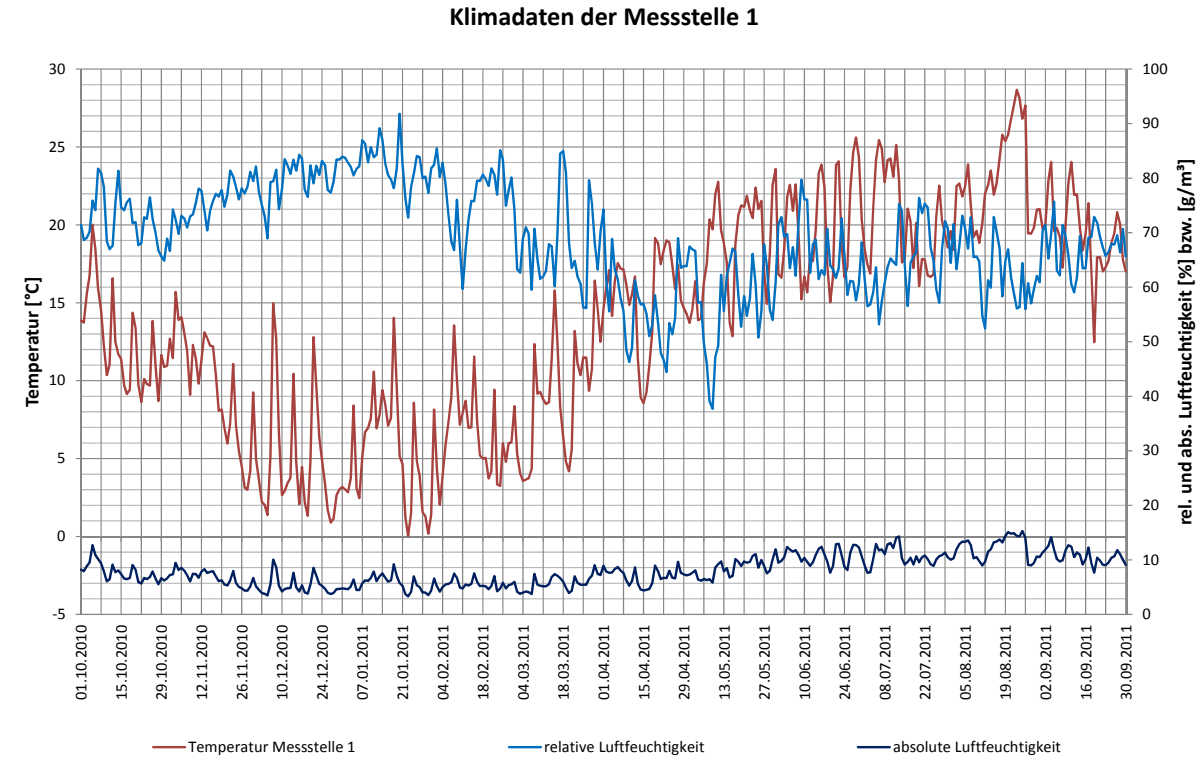
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

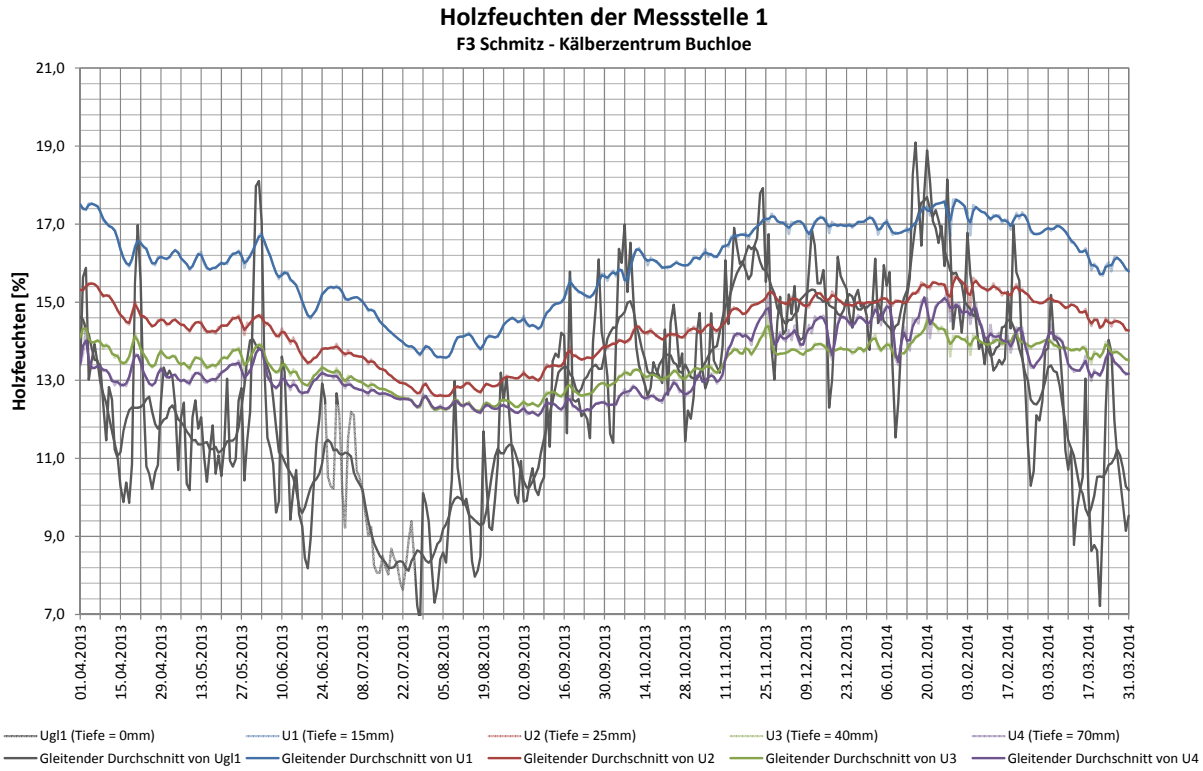
Messstelle 1: Im Firstbereich, Nähe Lampenaufhängung
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

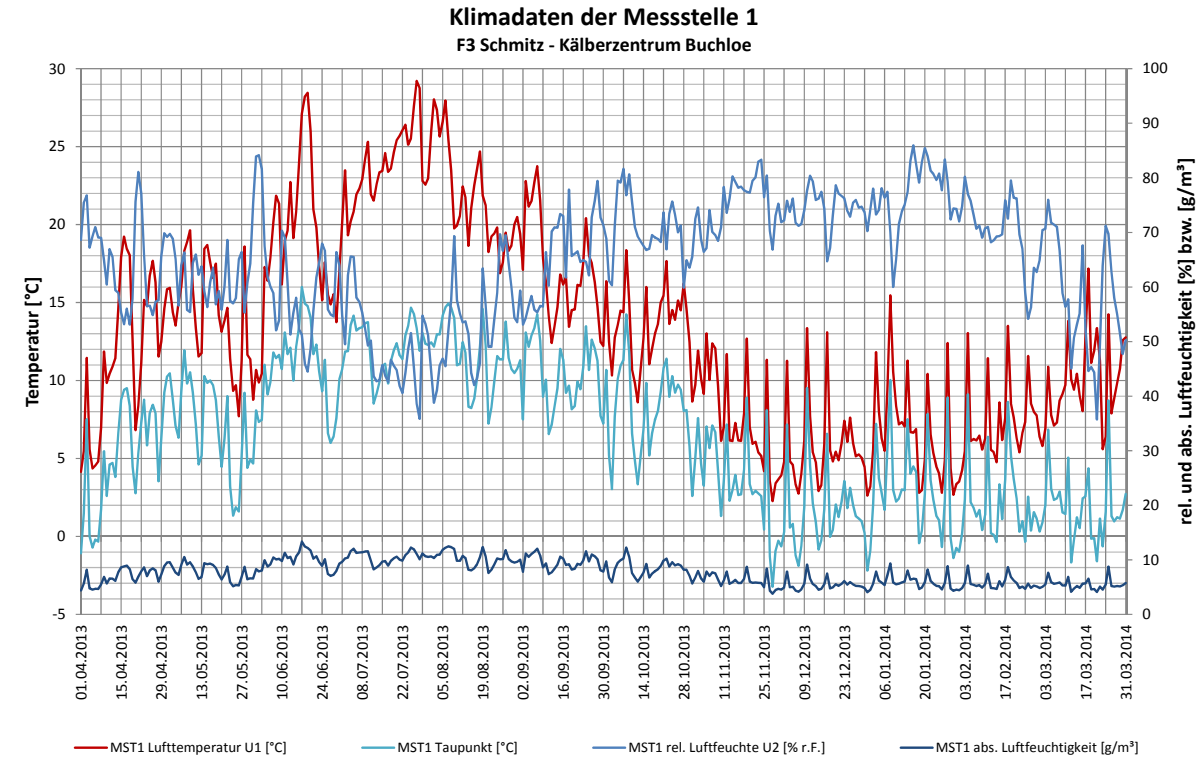




F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

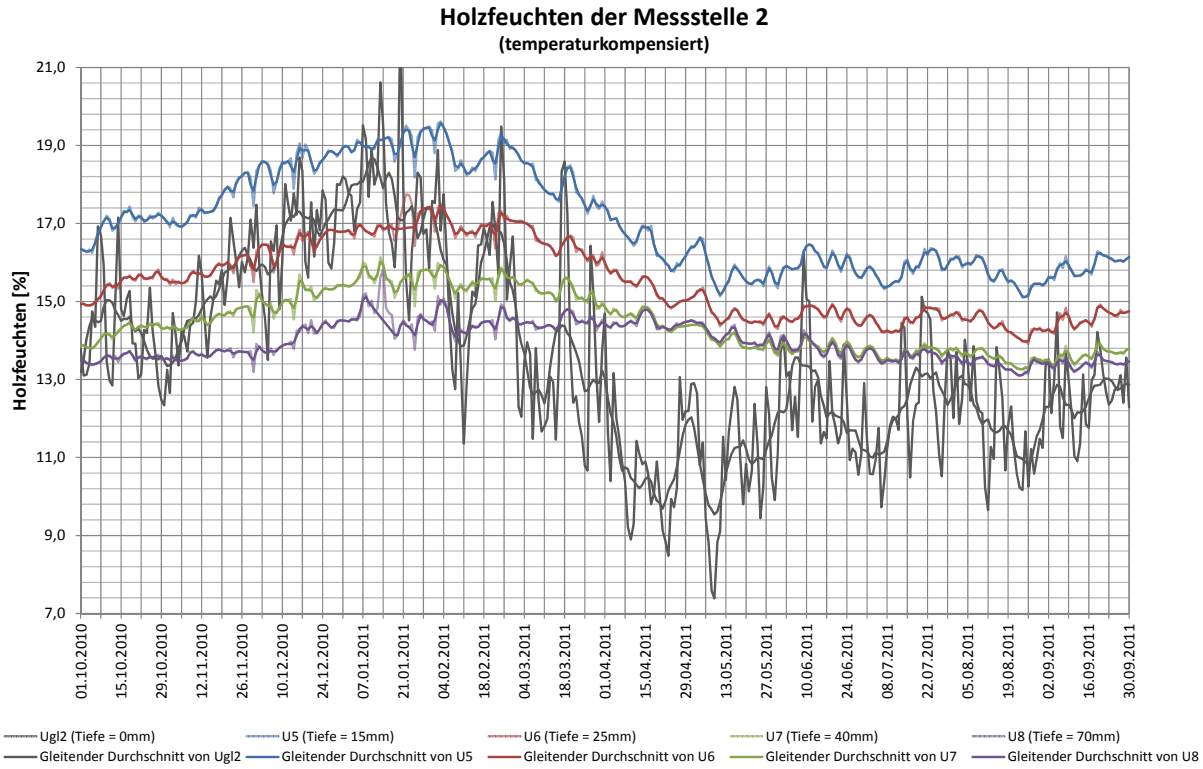
Messstelle 1: Im Firstbereich, Nähe Lampenaufhängung
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

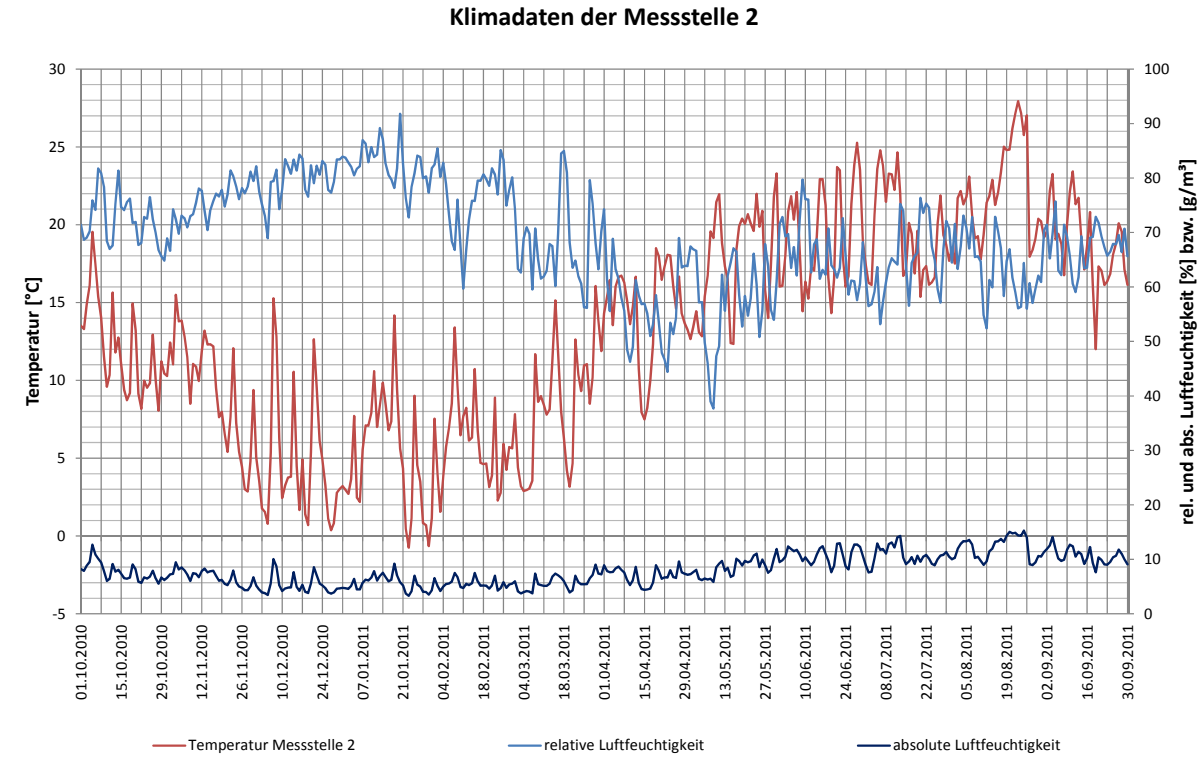




F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

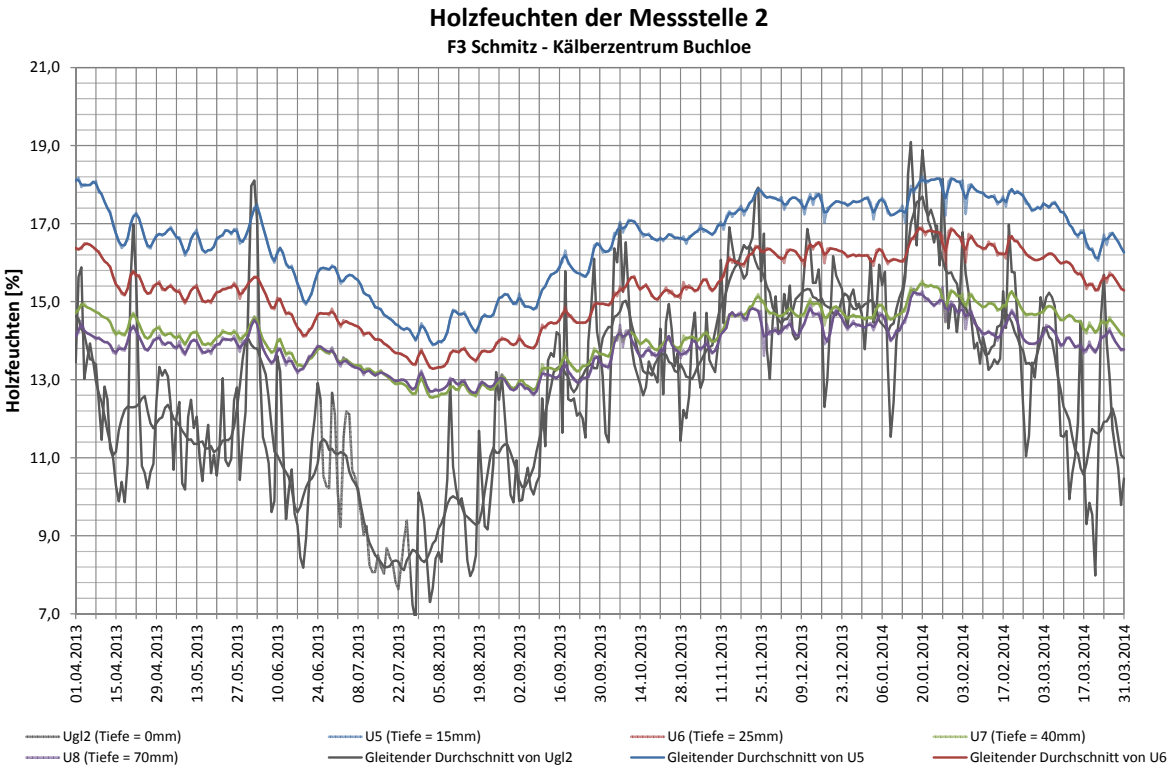
Messstelle 2: In Traufbereich, an der Rückseite des Trägers neben dem Tor
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

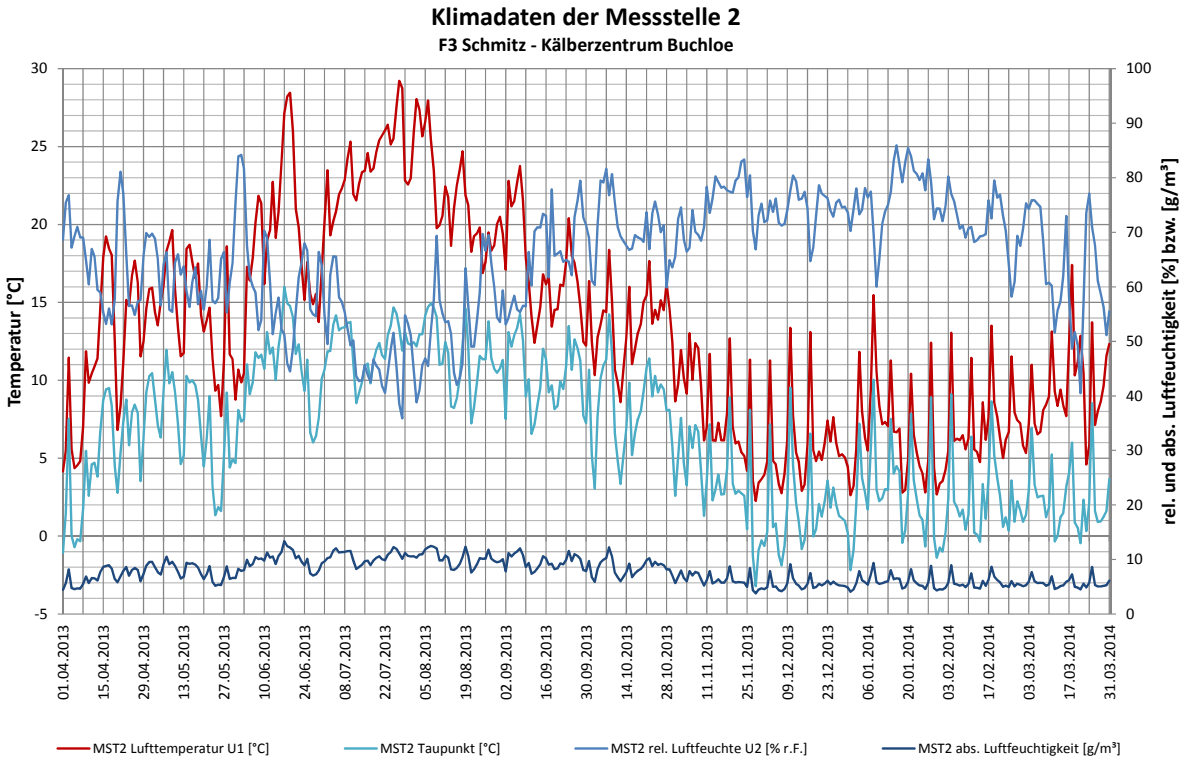




F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

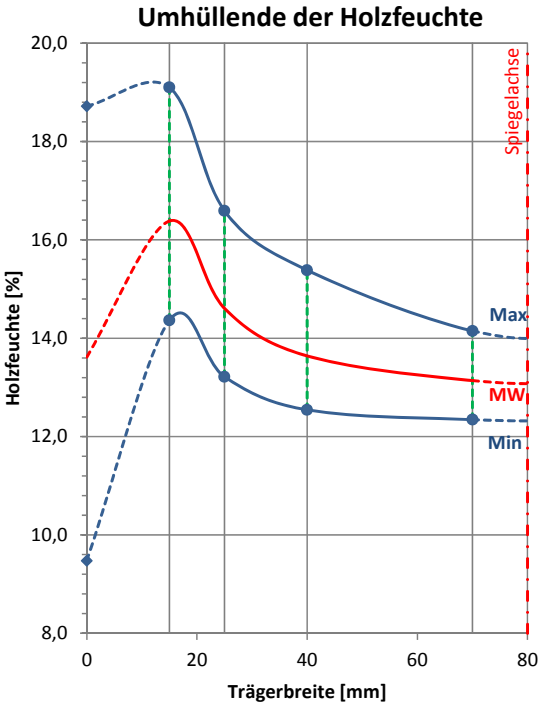
Messstelle 2: In Traufbereich, an der Rückseite des Trägers neben dem Tor
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

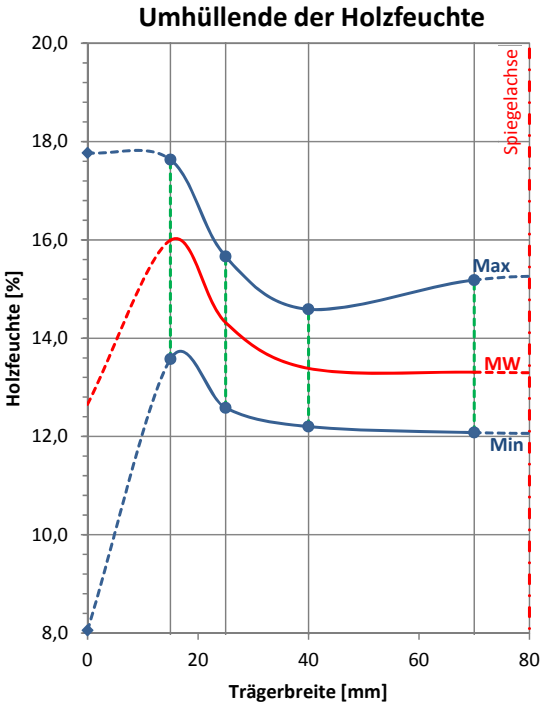


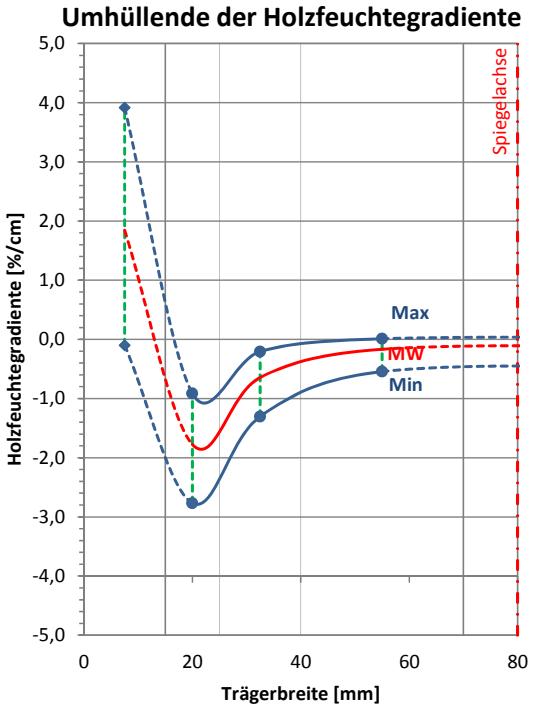


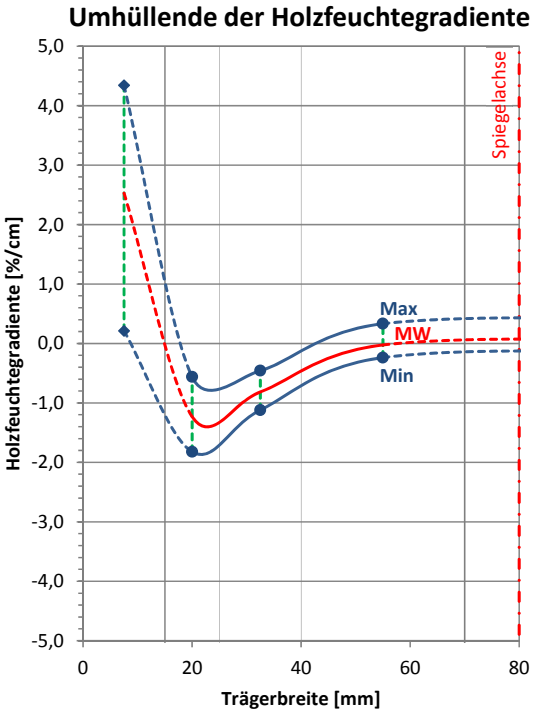
F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

Messstelle 1: Im Firstbereich, Nähe Lampenaufhängung
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



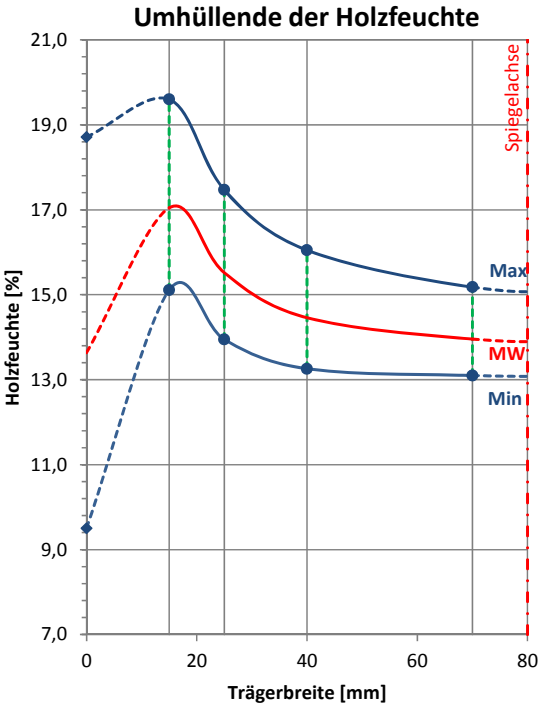


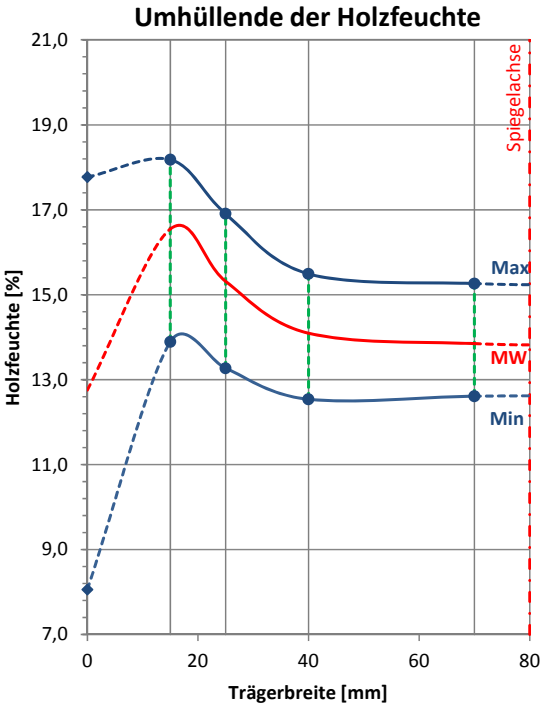


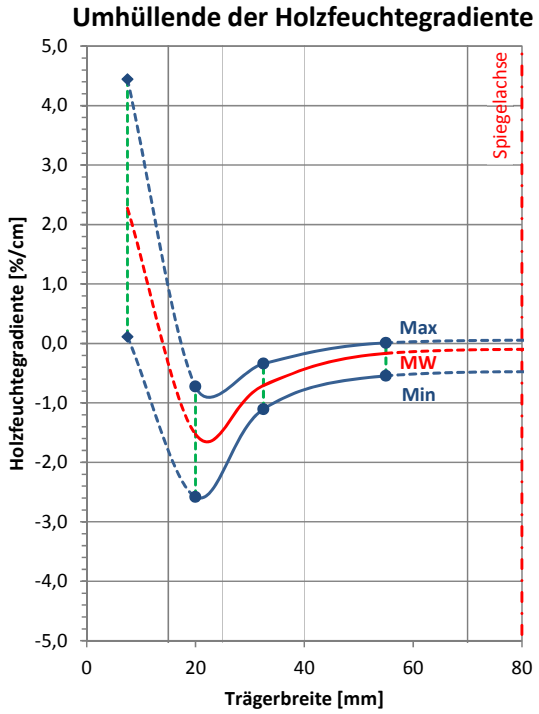


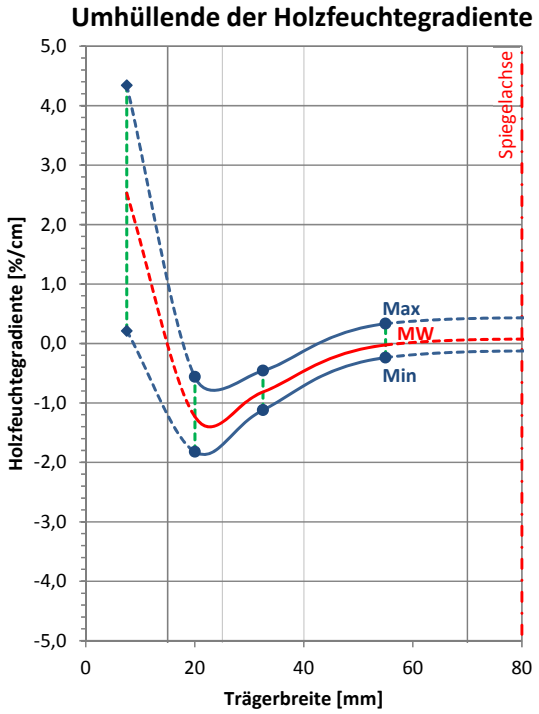
F3 Schmitz – Kälberzentrum Buchloe

Messstelle 2: In Traufbereich, an der Rückseite des Trägers neben dem Tor
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

Anschrift:	Willibaldstraße 70 80689 München
Ansprechpartner:	Herr Polomski (vor Ort)
Anwesende vor Ort:	Andreas Gamper, Michael Kraus, Herr Polomski

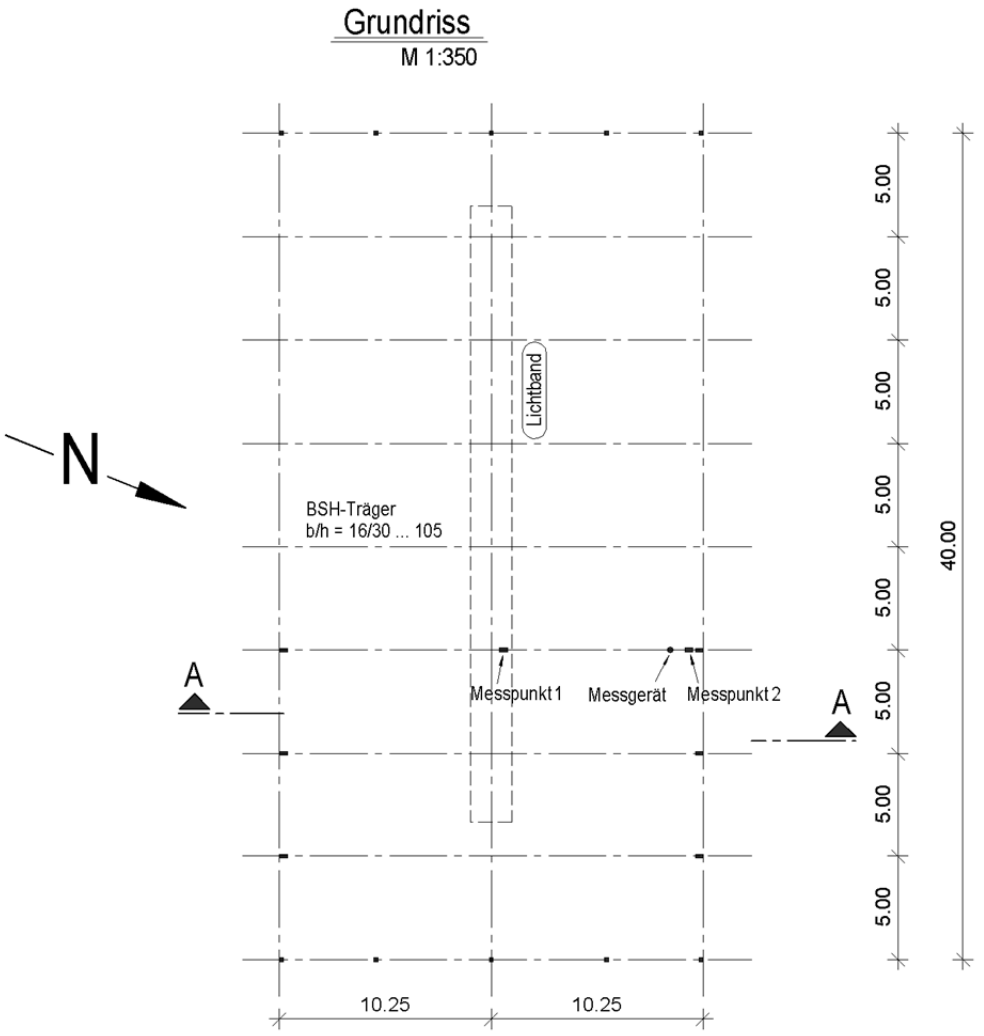
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	01.09.2010, 14:30 - 16:30	21.03.2013, 09:00 - 10:00
Letztes Auslesedatum	11.10.2011, 11:00 – 12:00	15.04.2014, 09:00 - 10:00

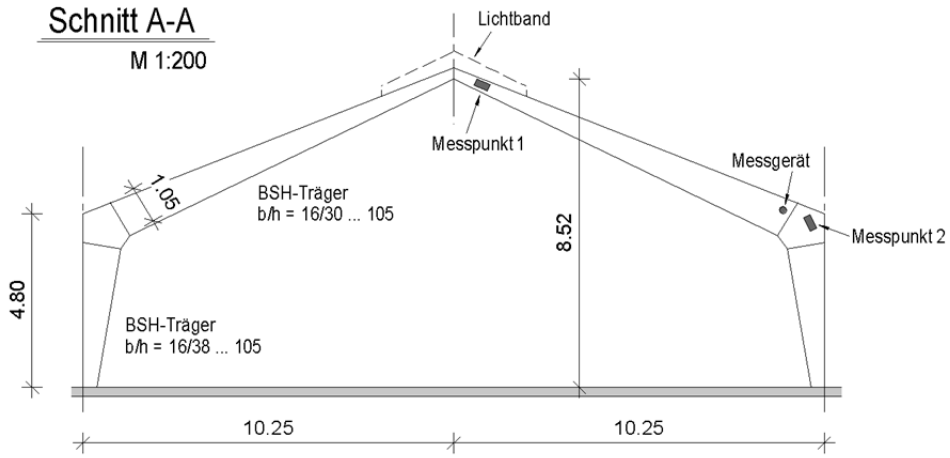
Umgebungsbedingungen:	Allseitig geschlossene Halle, ungeheizter, konstruktiv gedämmter Raum Temperatur: 26,8°C; Luftfeuchte: 44,7 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Im Firstbereich unter Lichtband; (Erfassung des Einflusses des Lichtbandes und der direkten Sonnenstrahlung)
Messstelle 2:	Im Traufbereich bei Lufteinlässen Fassade; (Regelbereich, Referenz zu Messstelle 1)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	10,2	91,4	x–y: 6–5; 35°	Messstelle 1
u2	25	10,3	91,1	Gemessene	
u3	40	10,2	91,5	Temperatur	
u4	70	9,7	93,8	t_1: 48,0°C	
u5	15	13,1	85,5	x–y: 6–5; 25°	Messstelle 2
u6	25	12,9	86,2	Gemessene	
u7	40	12,8	86,6	Temperatur	
u8	70	12,3	88,3	t_2: 25,6°C	

Tragsystem:	Dreigelenkrahmen, Spannweite ℓ = 20,50 m 9 Achsen mit einem Binderachsabstand e = 5,0 m Trägerabmessungen b/h = 16/30…105 cm² Lamellenstärke t = 32 mm Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:350
N
Lichtband
BSH-Träger
b/h = 16/30 ... 105
A
A
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
5.00
40.00
10.25
10.25


Schnitt A-A
M 1:200
Lichtband
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
1.05
BSH-Träger
b/h = 16/30 ... 105
8.52
4.80
BSH-Träger
b/h = 16/38 ... 105
10.25
10.25

Bilder:



Abbildung G1-1: Ansicht Tragwerk

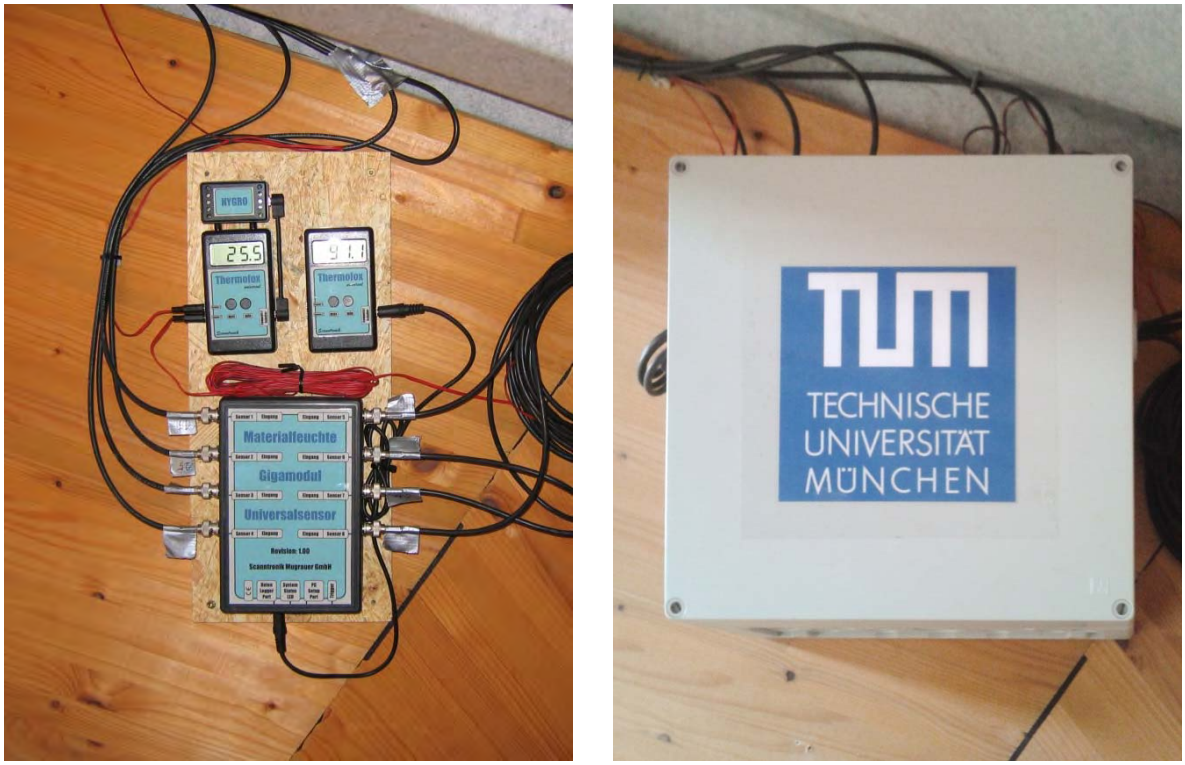


Abbildung G1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2



Abbildung G1-3: Ansicht Messstelle 1

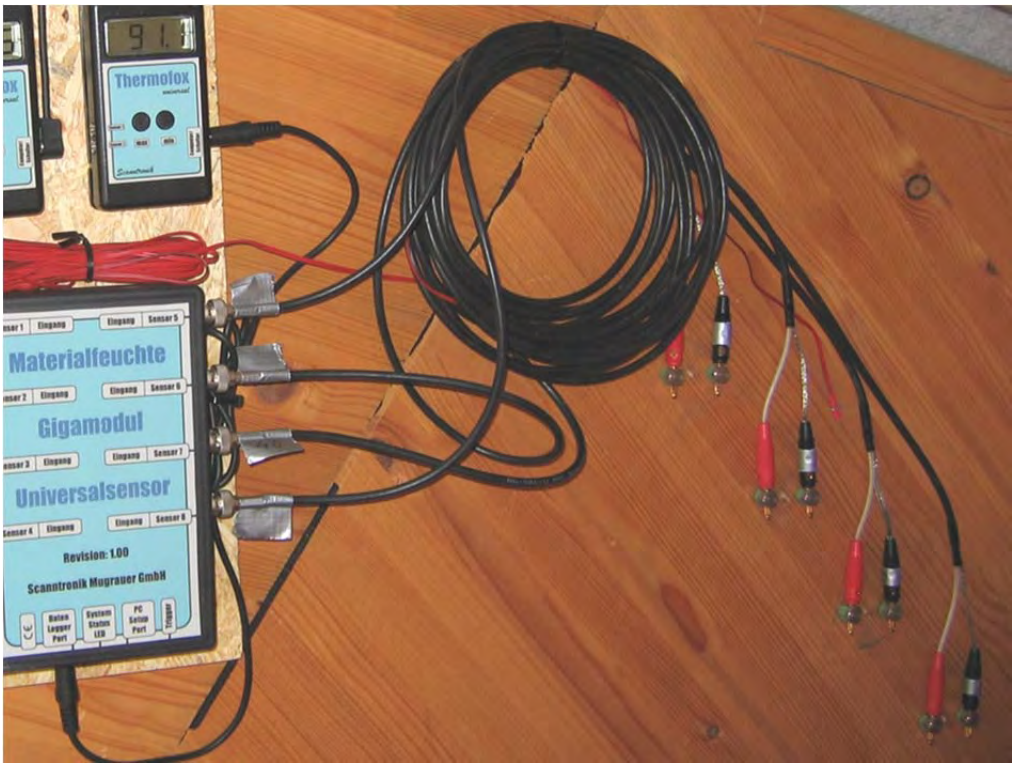
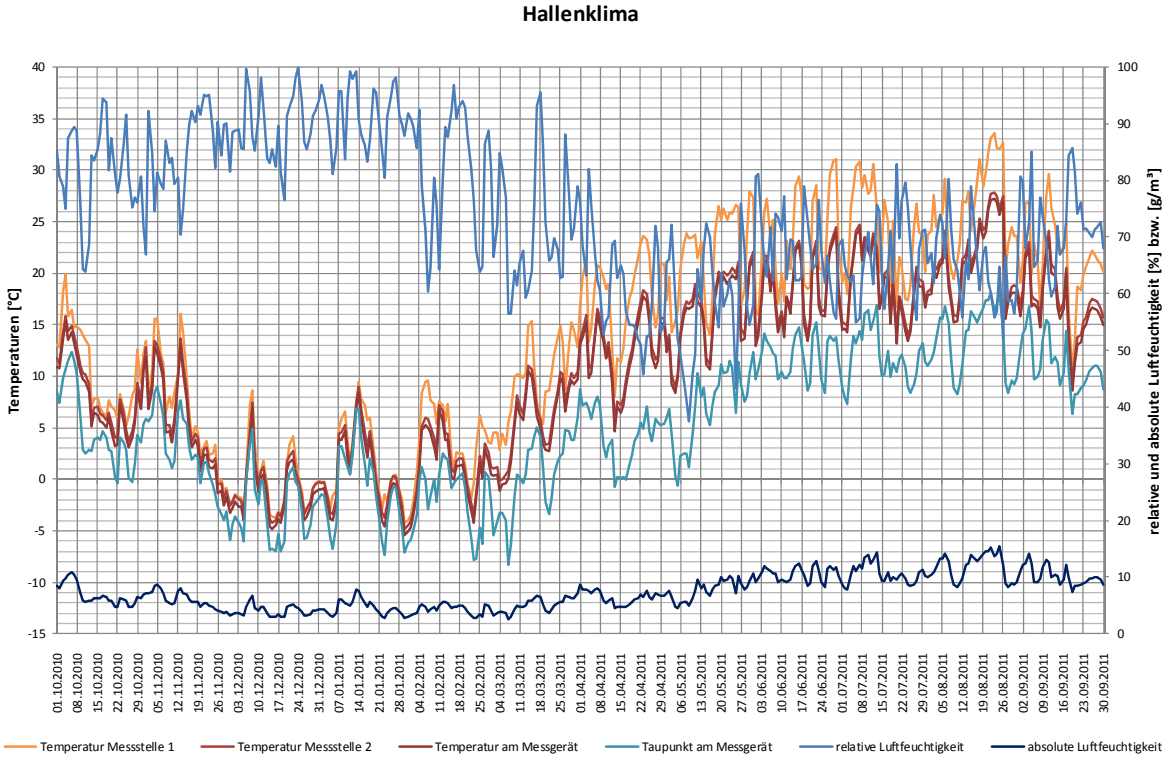


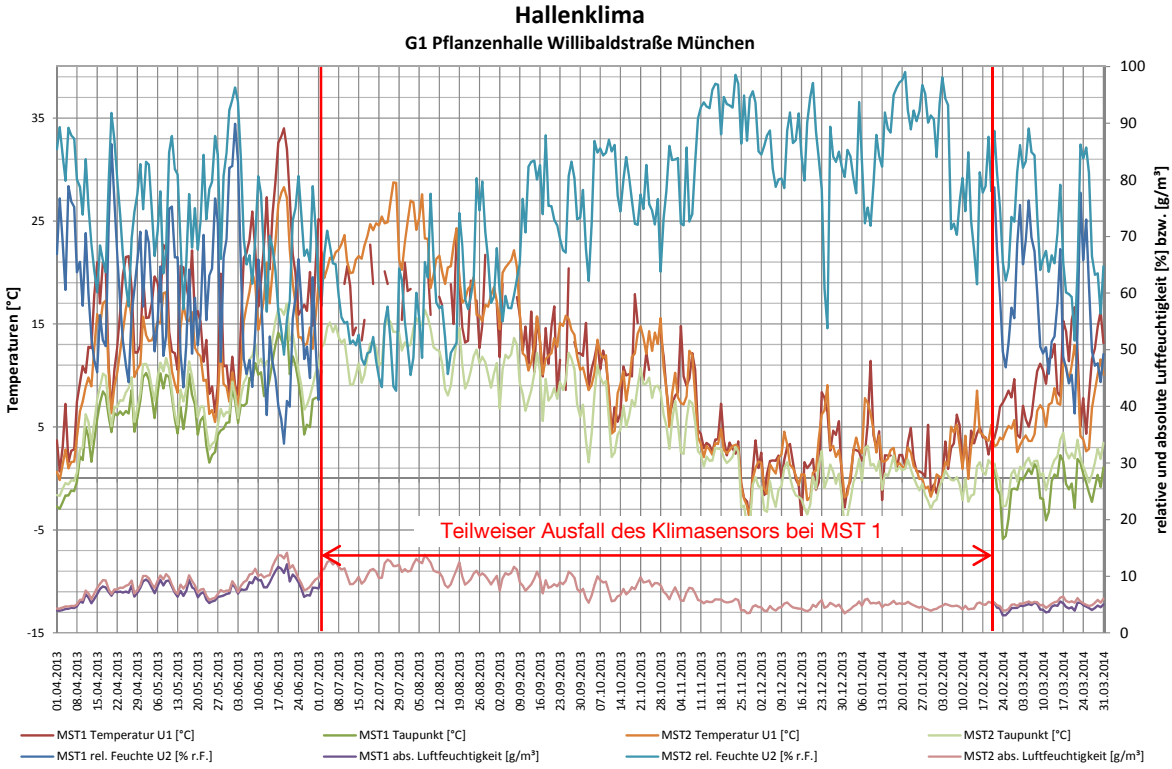
Abbildung G1-4: Ansicht Messstelle 2

G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

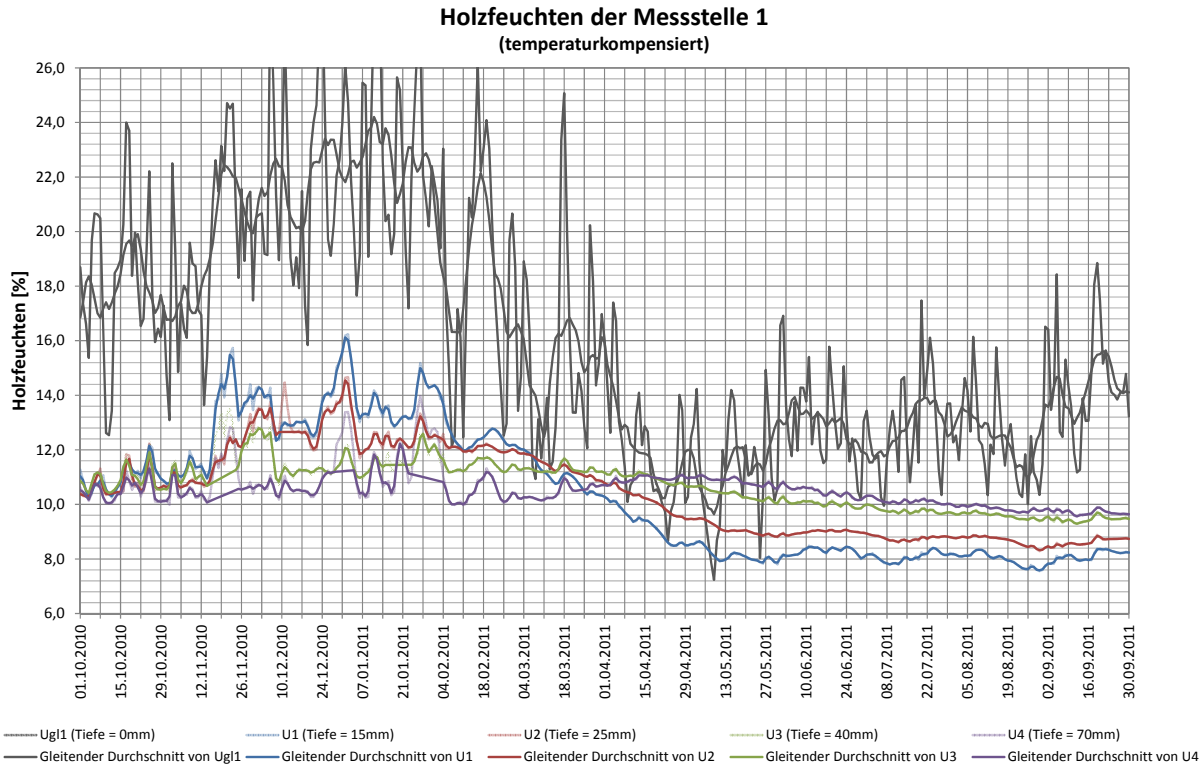


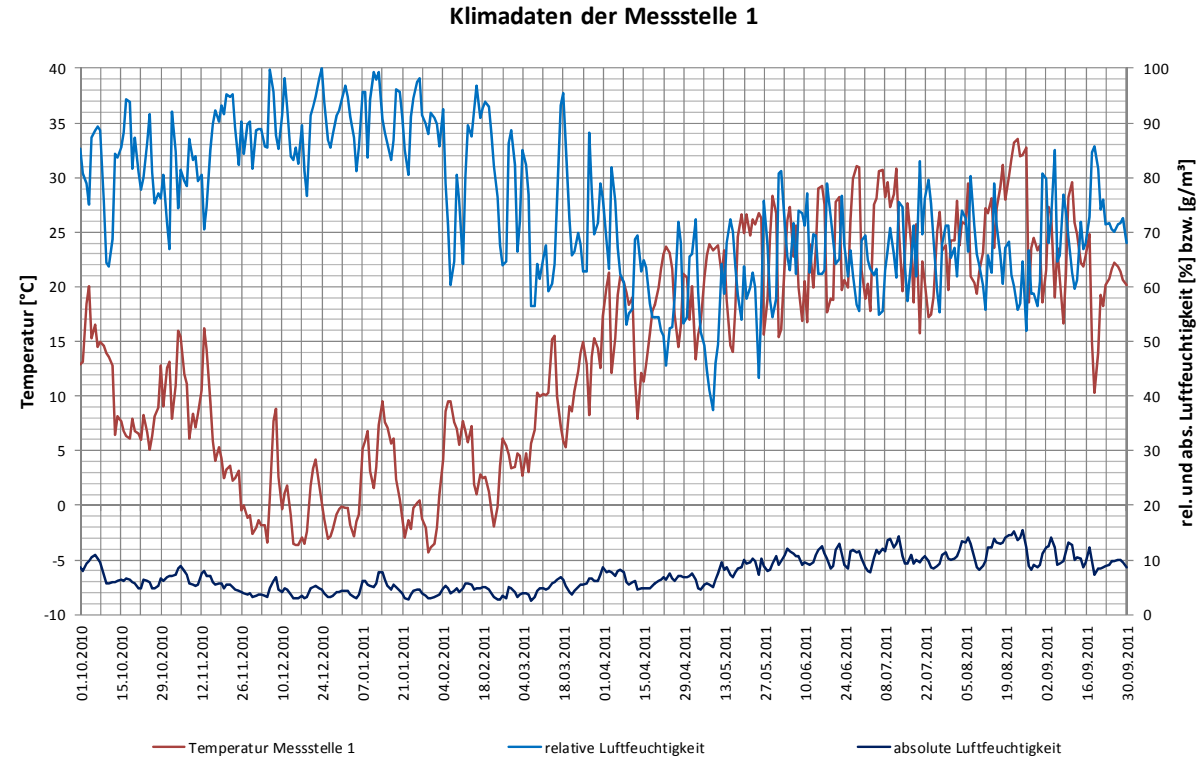
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

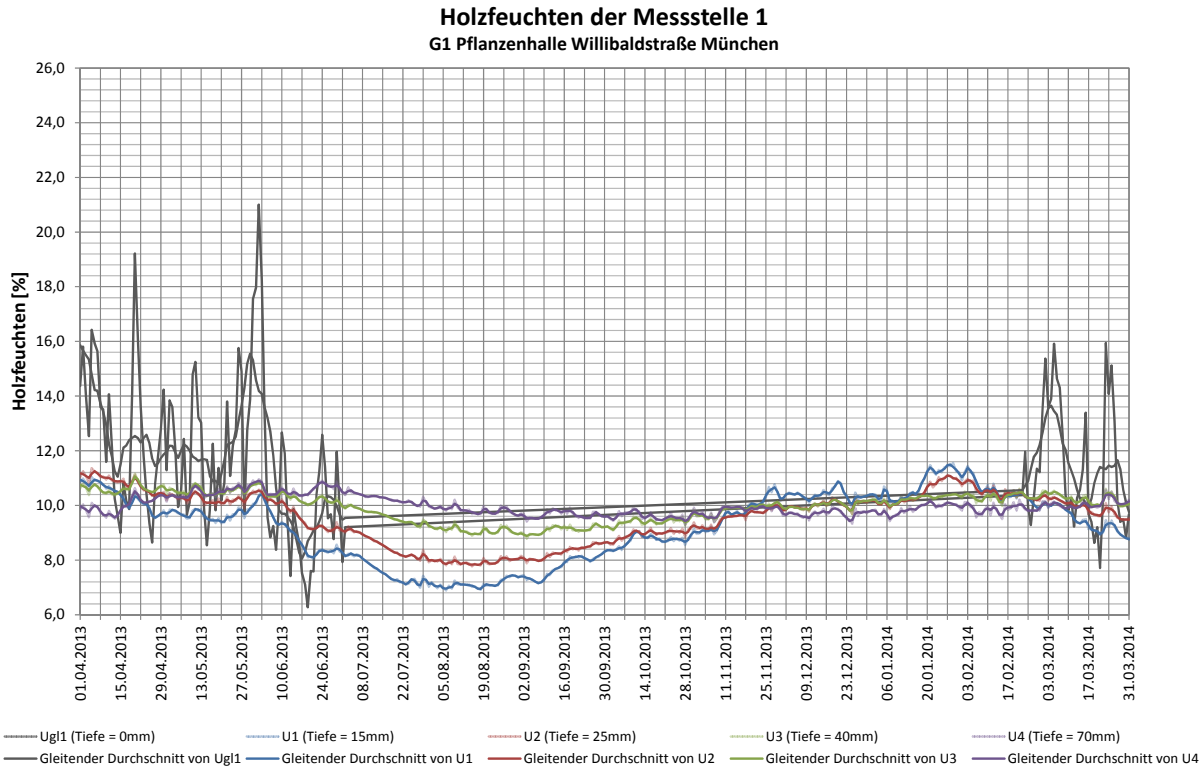
Messstelle 1: Im Firstbereich unter Lichtband
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

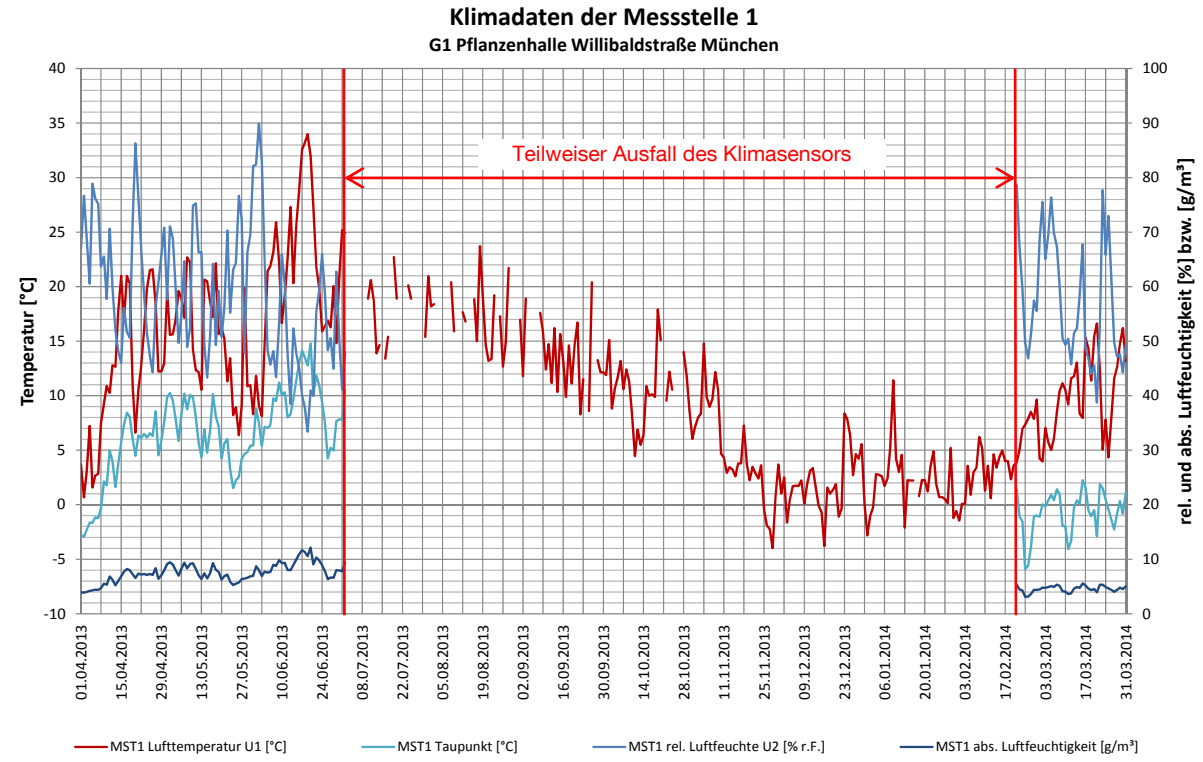




G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

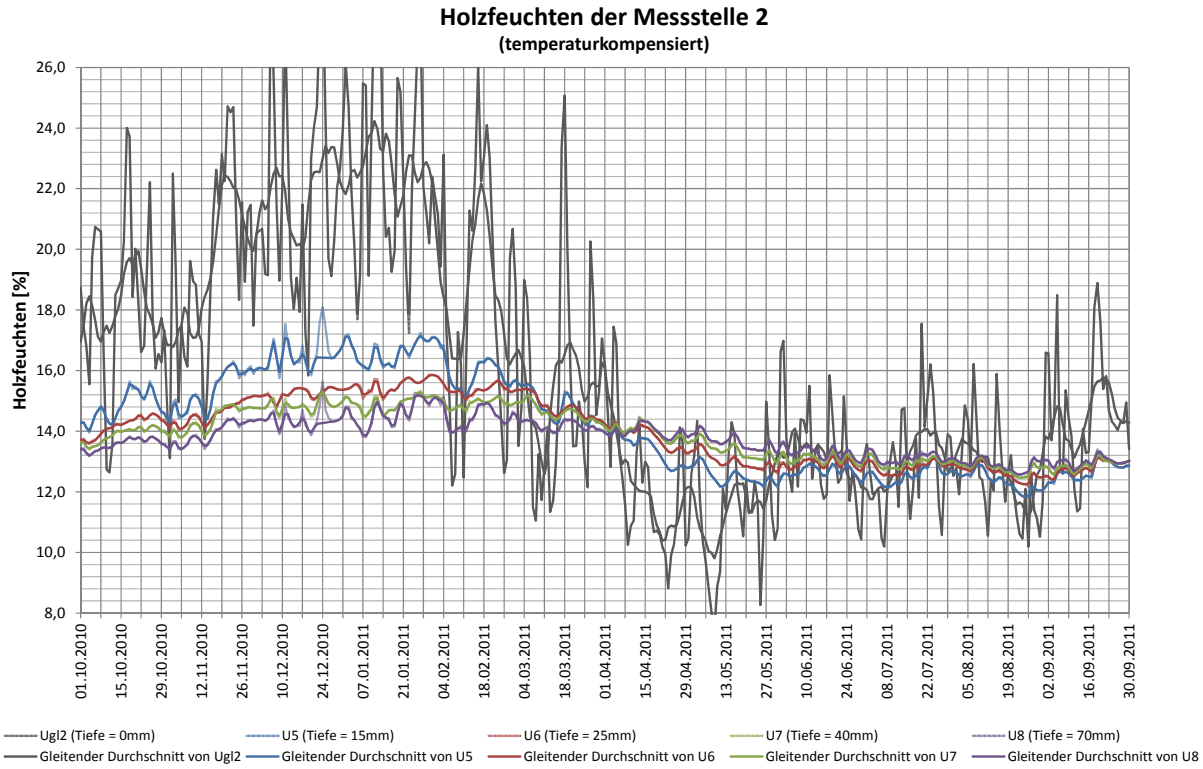
Messstelle 1: Im Firstbereich unter Lichtband
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

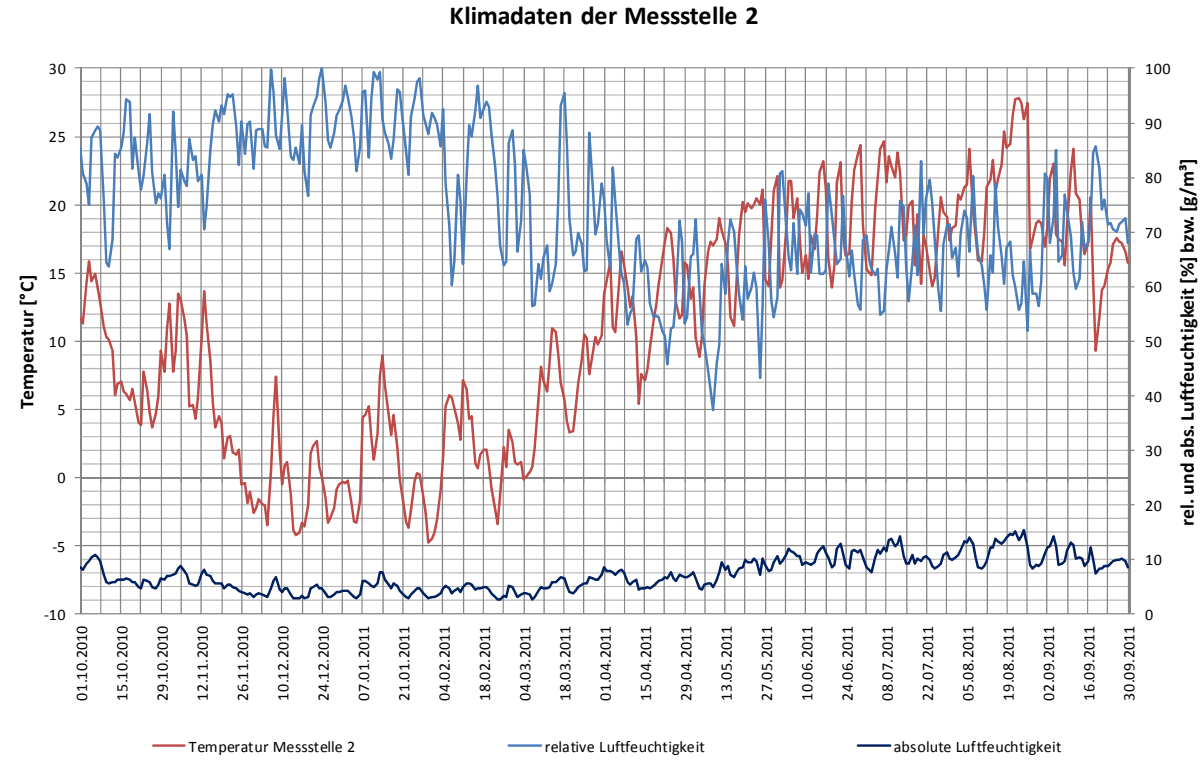




G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

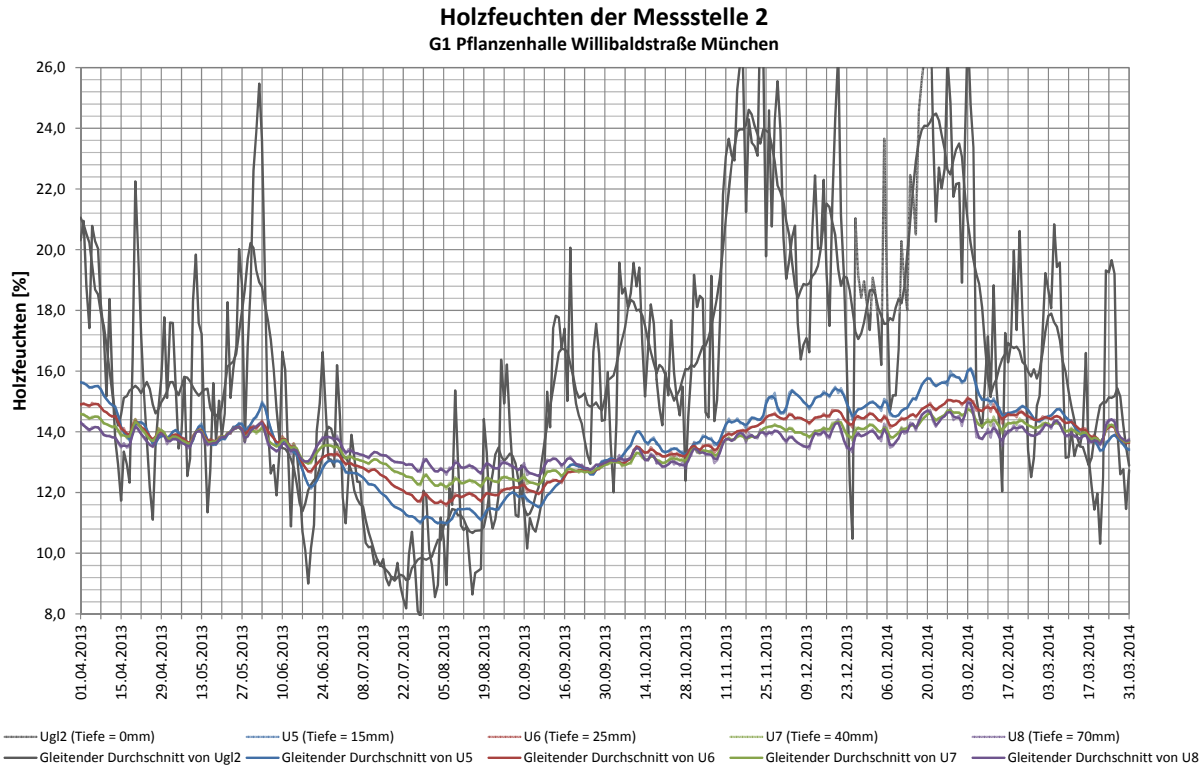
Messstelle 2: Im Traufbereich bei Lufteinlässen Fassade
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

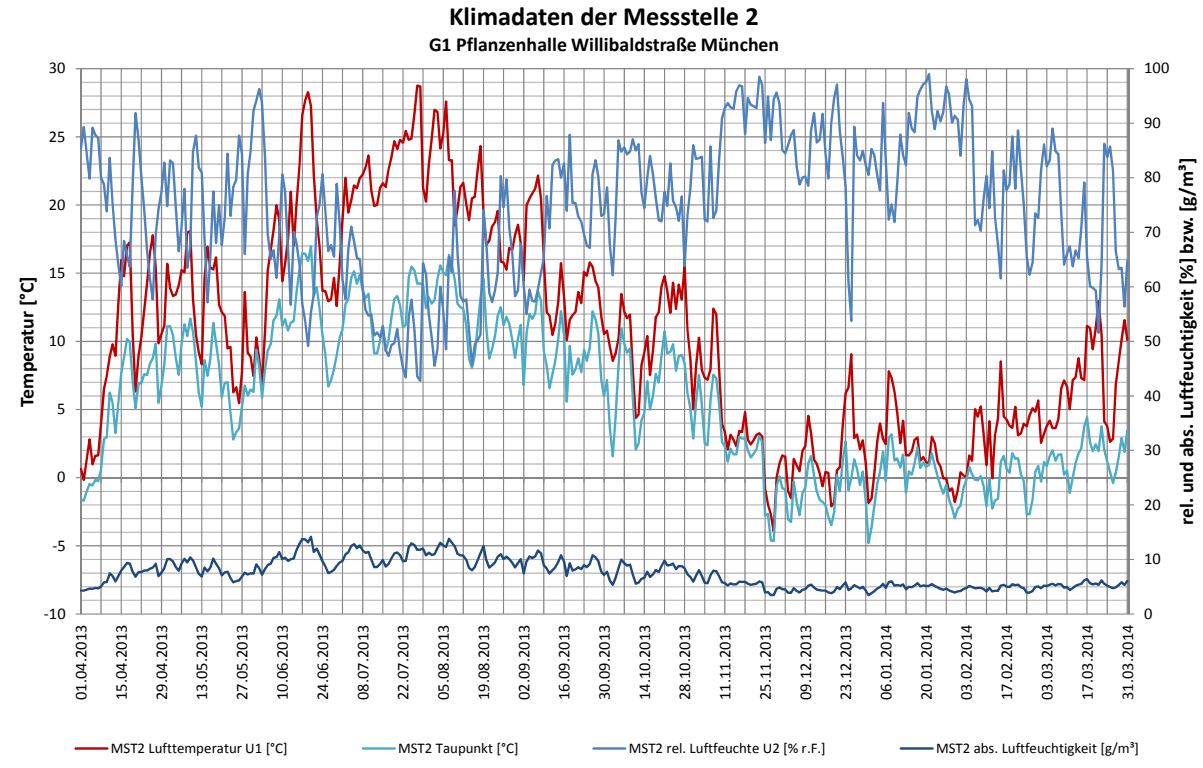




G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

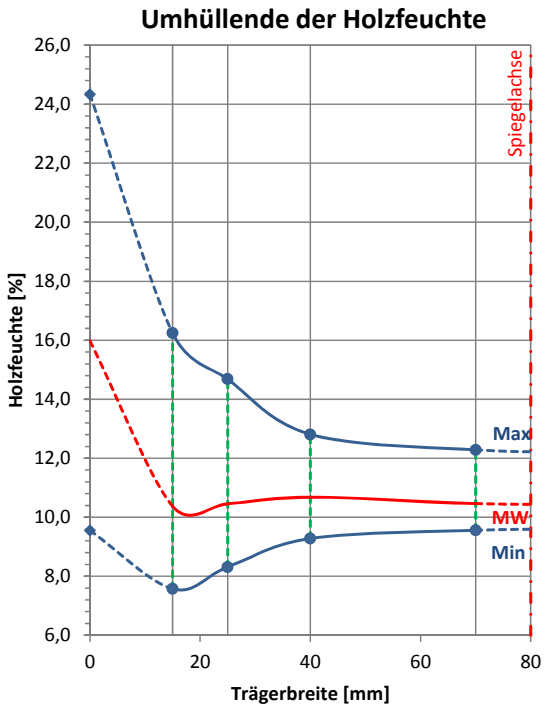
Messstelle 2: Im Traufbereich bei Lufteinlässen Fassade
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

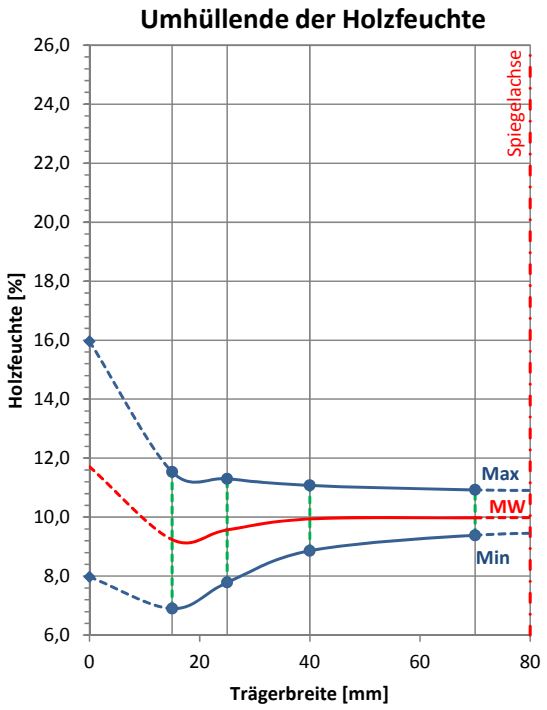


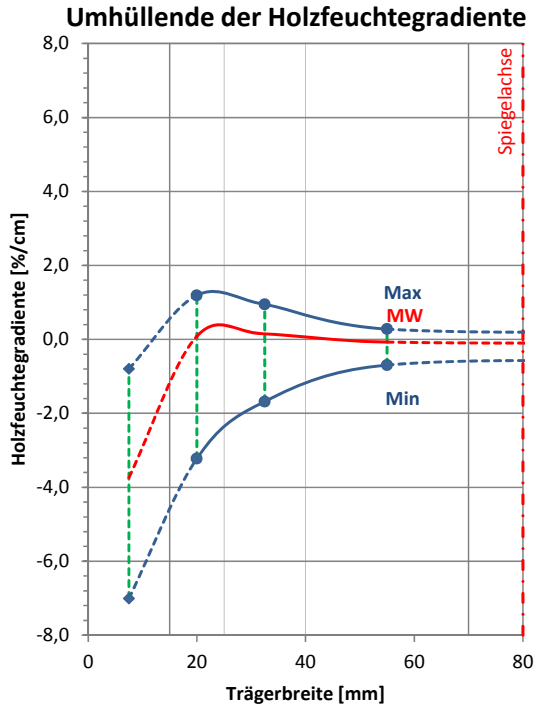


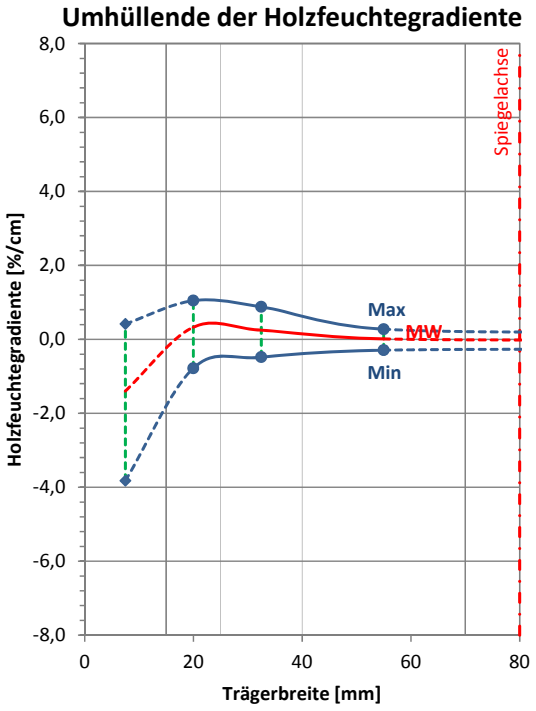
G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

Messstelle 1: Im Firstbereich unter Lichtband
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



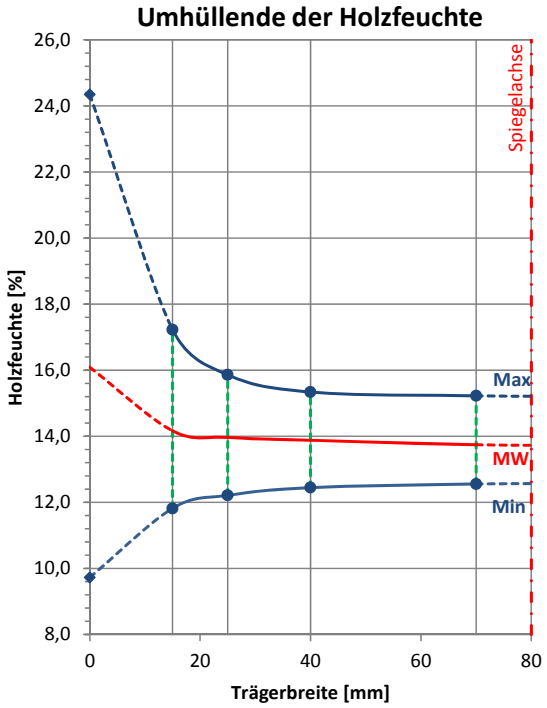


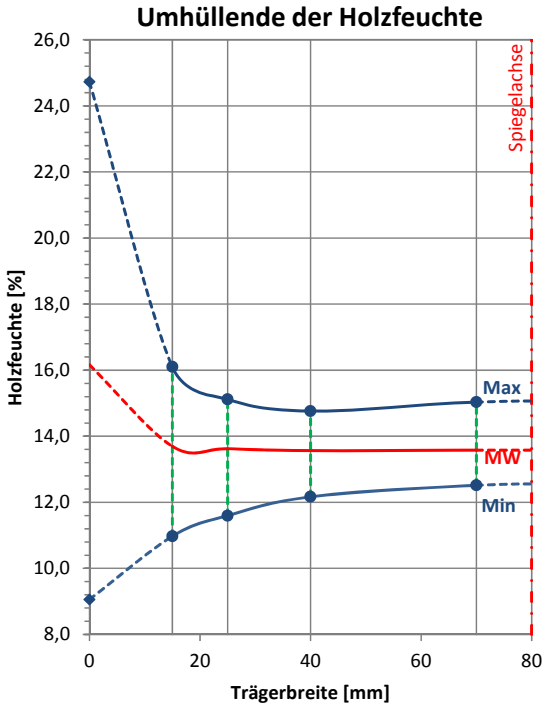


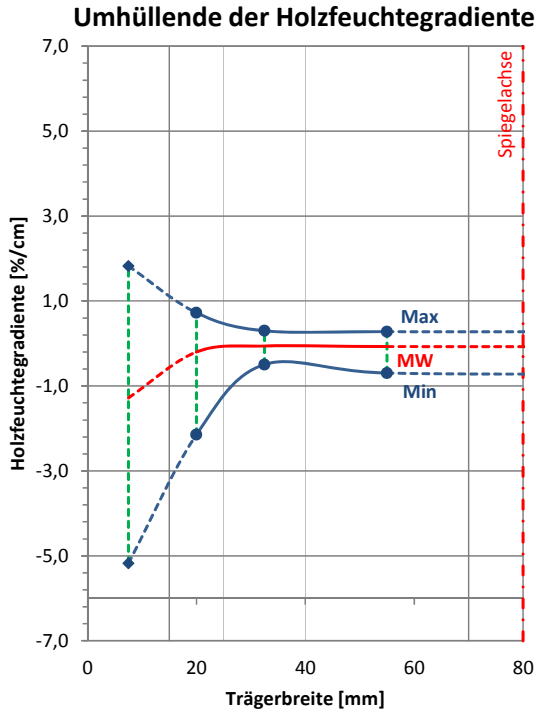


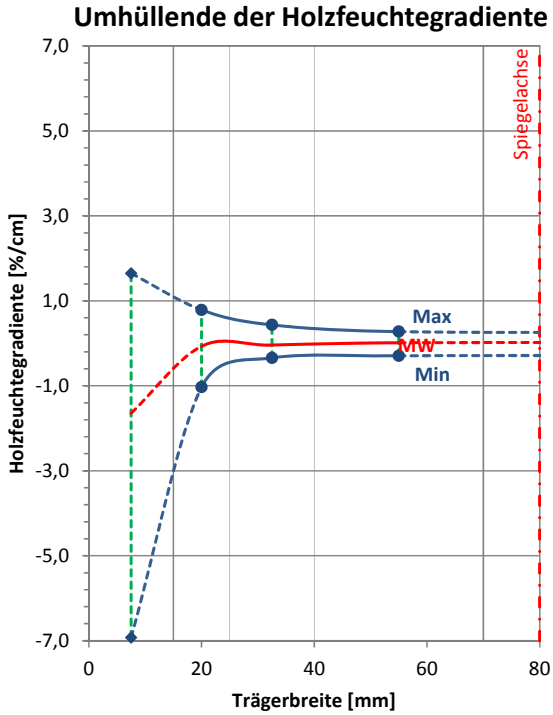
G1 Pflanzenhalle Willibaldstraße München

Messstelle 2: Im Traufbereich bei Lufteinlässen Fassade
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem

Anschrift:	Schwerblmühle 4 86984 Prem
Installationsort:	Lusse 4 87672 Roßhaupten
Ansprechpartner:	Hr. Heinloth (vor Ort)
Anwesende vor Ort:	Michael Merk, Andreas Gamper, Herr Heisserer Jr.

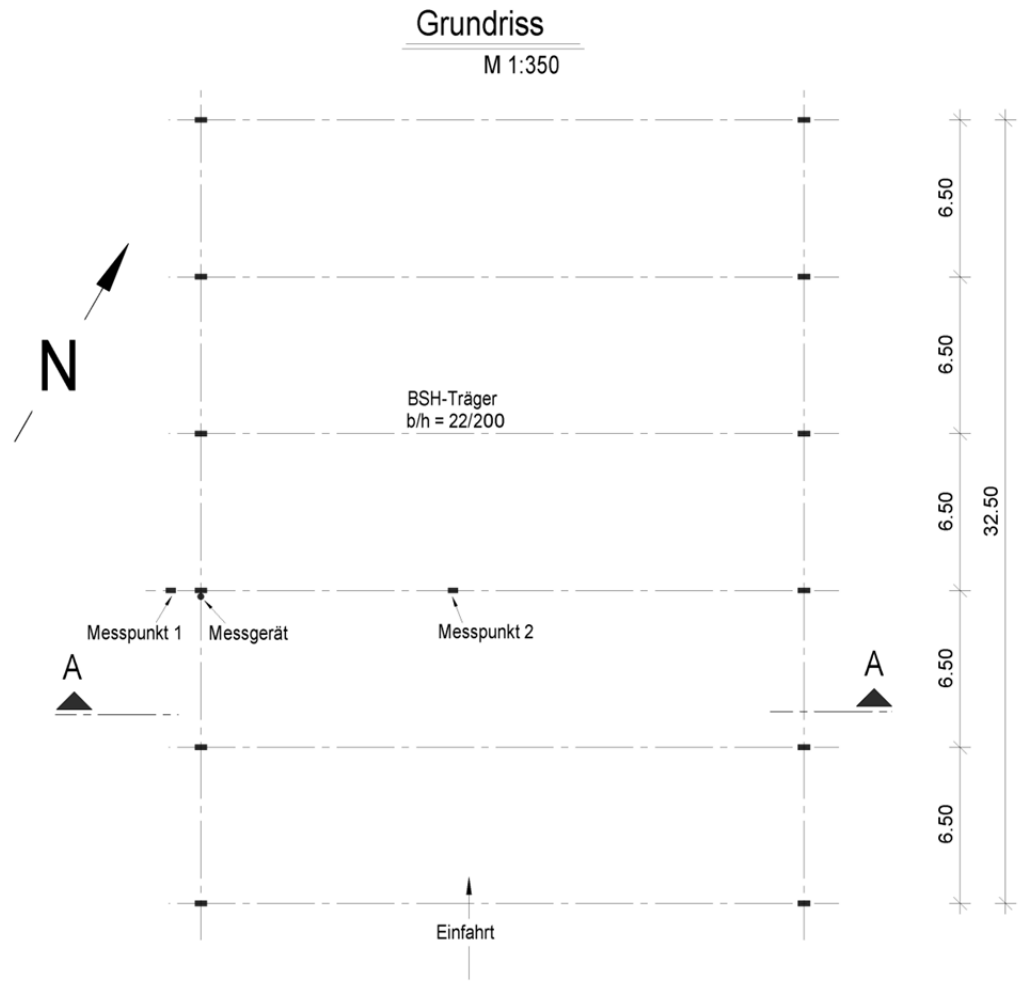
	Gebäudeklima - Langzeitmessung	Gebäudeklima - Validierung
Installationsdatum	07.09.2010, 10:00 – 12:30	22.02.2013, 10:00 - 11:30
Letztes Auslesedatum	10.10.2011, 15:00 – 16:00	01.04.2014, 14:00 - 15:00

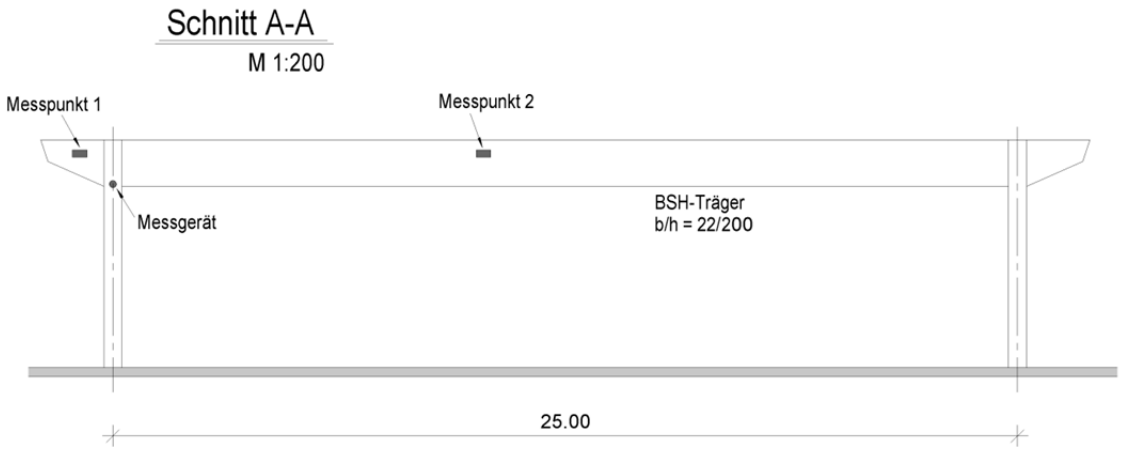
Umgebungsbedingungen:	Einseitig offene, ungeheizte, konstruktiv gedämmte Lagerhalle Temperatur: 16,6 °C; Luftfeuchte: 73 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Außen am Kragarm, unter Vordach; (Referenz zum Regelbereich im Halleninneren zur Unterscheidung des Einflusses von Innen- und Außenklima)
Messstelle 2:	Im Hallenbereich, Nähe Feldmitte; (Regelbereich)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	14,2	87,6	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 1
u2	25	13,8	88,9	gemessene	
u3	40	13,1	90,7	Temperatur	
u4	70	12,4	93,7	t_1: 17,8°C	
u5	15	13,6	89,6	x–y: 6–5; 15°	Messstelle 2
u6	25	13,0	91,7	gemessene	
u7	40	12,7	92,7	Temperatur	
u8	70	12,2	94,8	t_2: 16,6°C	

Tragsystem:	Einfeldträger mit 2 Kragarmen, Spannweite ℓ = 25,00 m 6 Achsen, Achsabstand e = 6,50 m Trägerabmessungen b/h = 22/200 mm² Lamellenstärke t = 30 mm Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:350
N
BSH-Träger
b/h = 22/200
Messpunkt 1
Messgerät
Messpunkt 2
A
A
Einfahrt
6.50
6.50
6.50
6.50
6.50
32.50


Schnitt A-A
M 1:200
Messpunkt 1
Messpunkt 2
Messgerät
BSH-Träger
b/h = 22/200
25.00

Bilder:



Abbildung G2-1: Ansicht Tragwerk

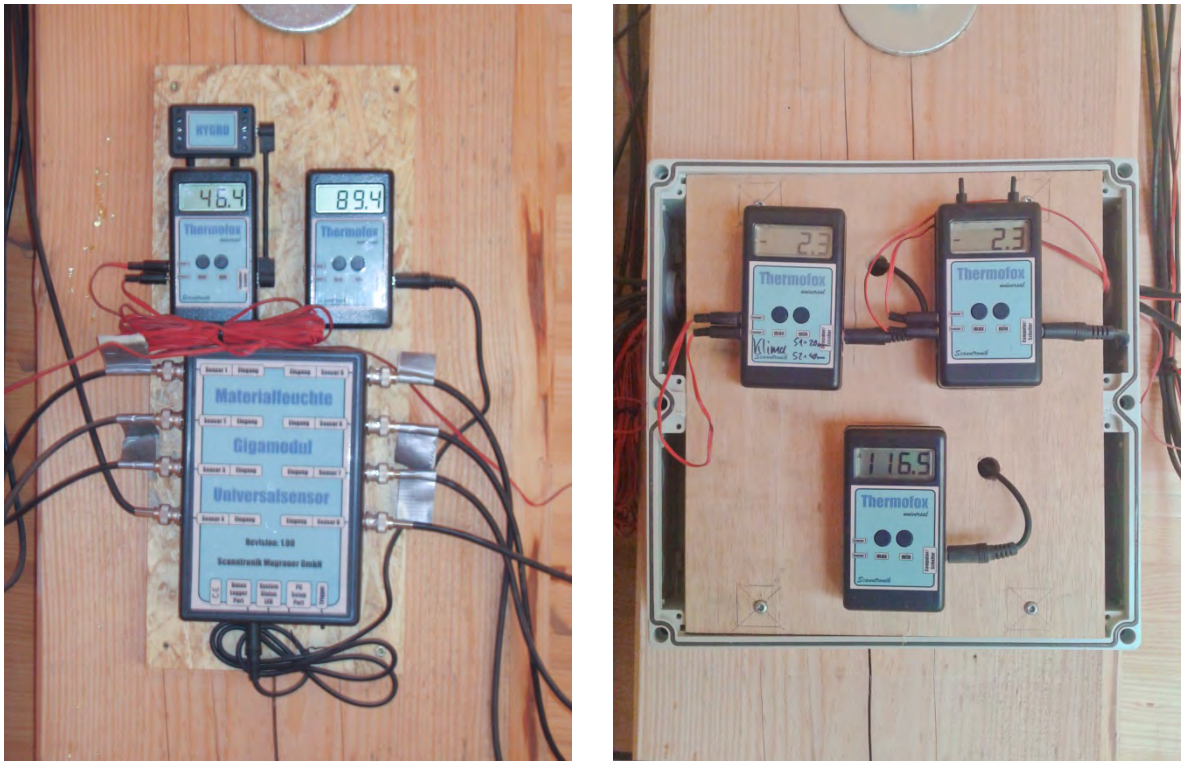


Abbildung G2-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2



Abbildung G2-3: Ansicht Messstelle 1

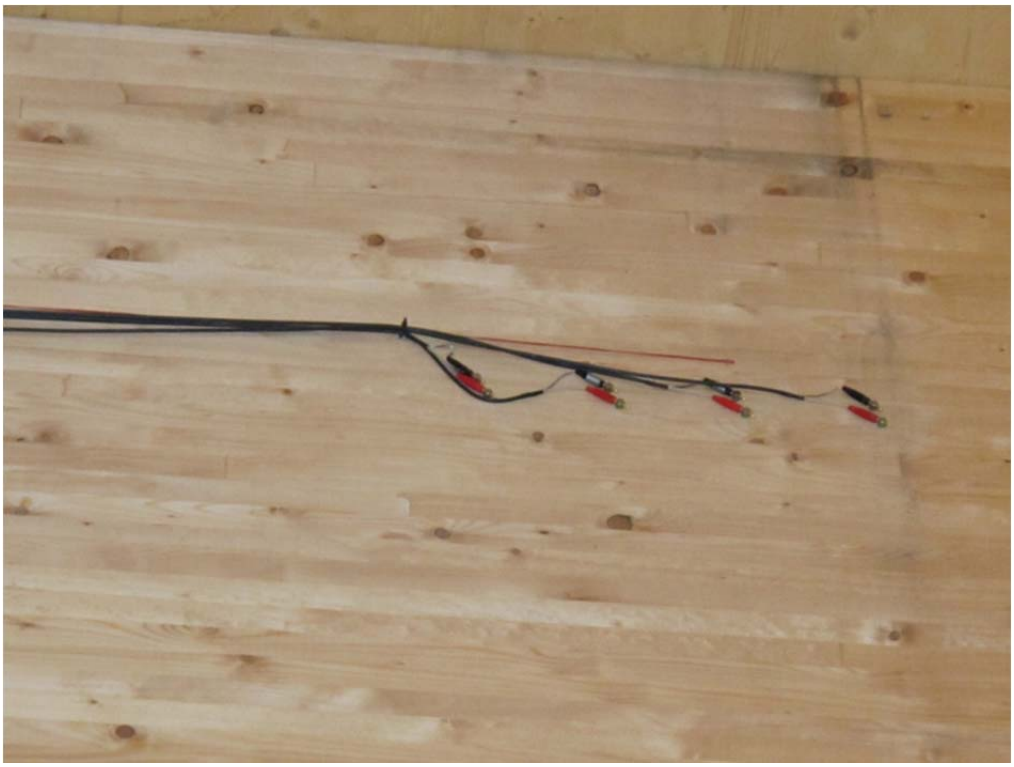
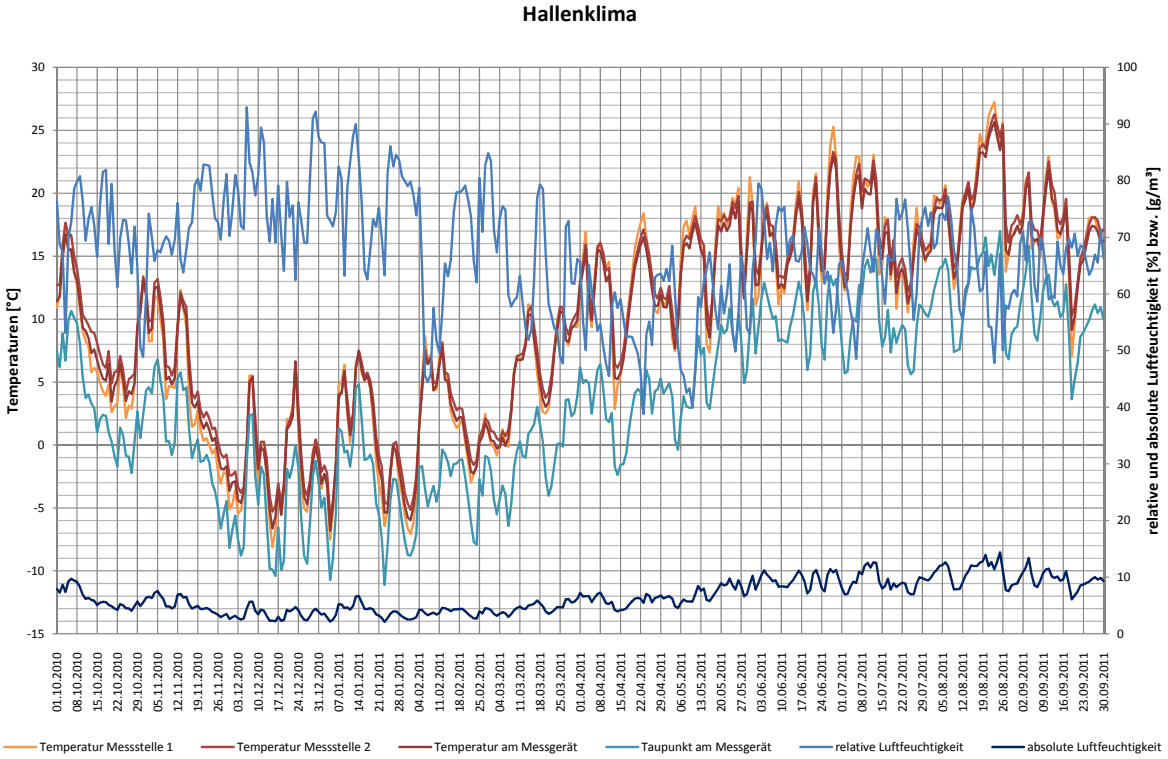


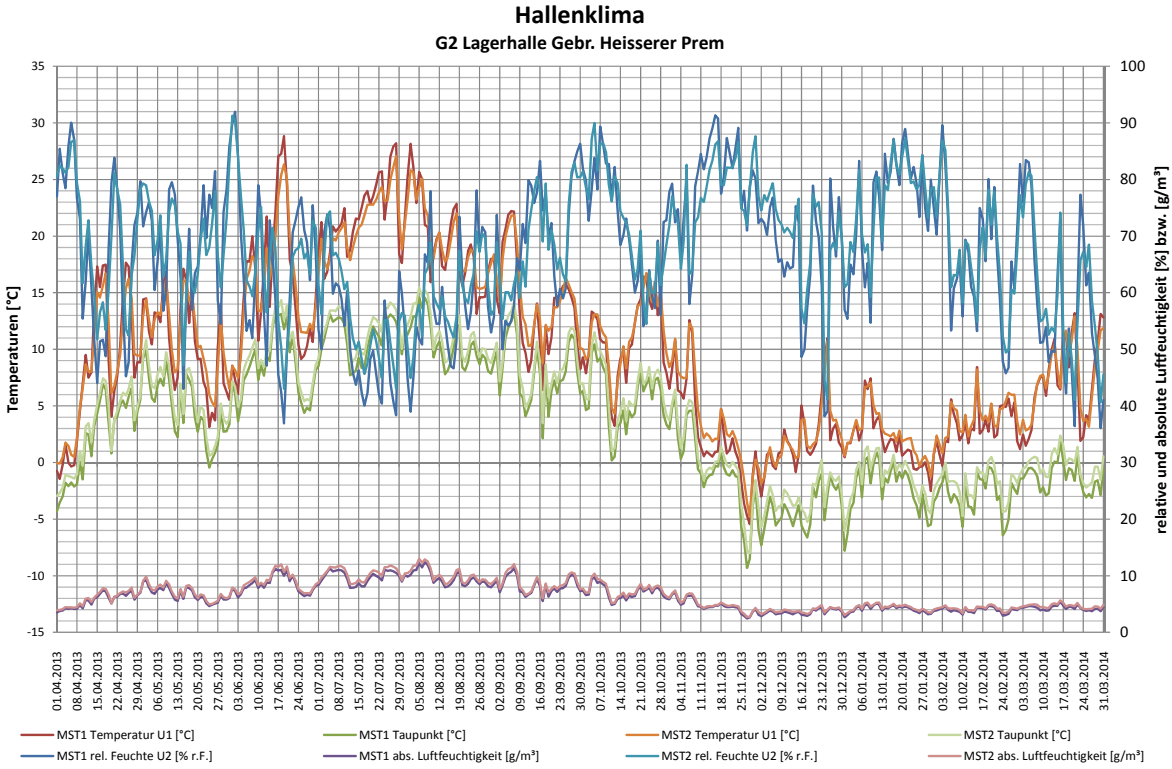
Abbildung G2-4: Ansicht Messstelle 2

G2 Lagerhalle Heisserer Prem

Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

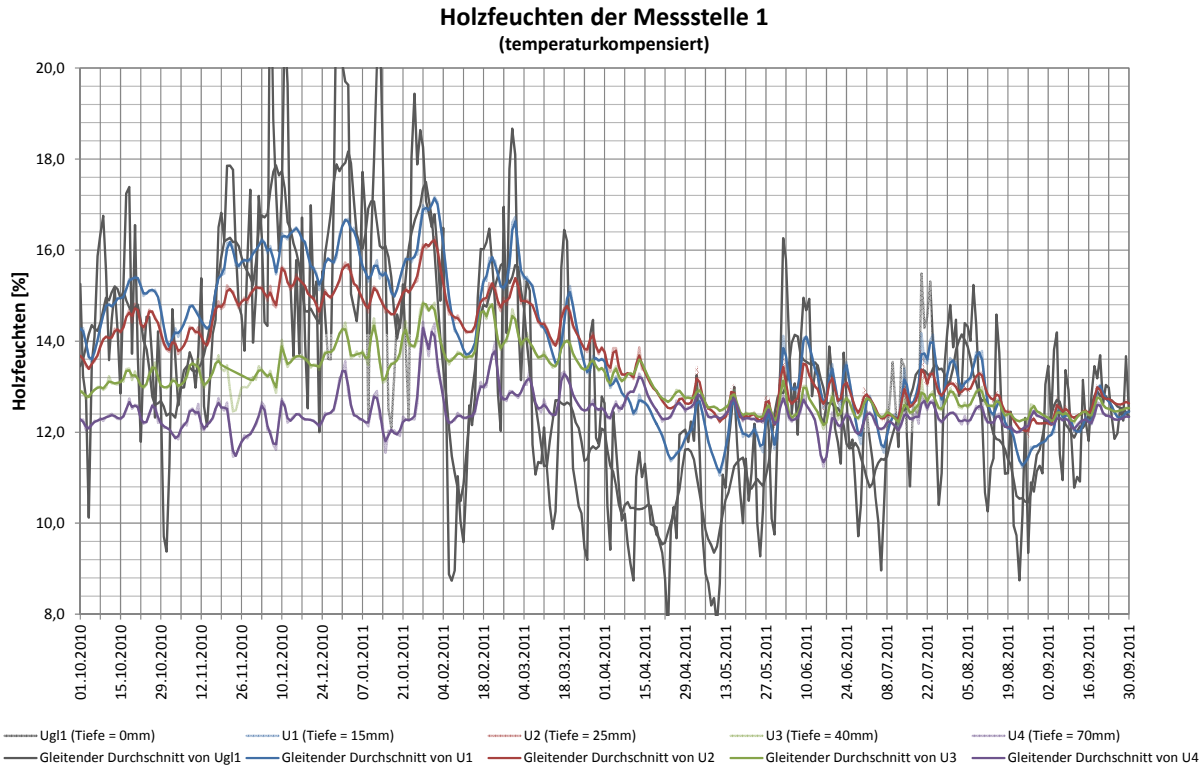


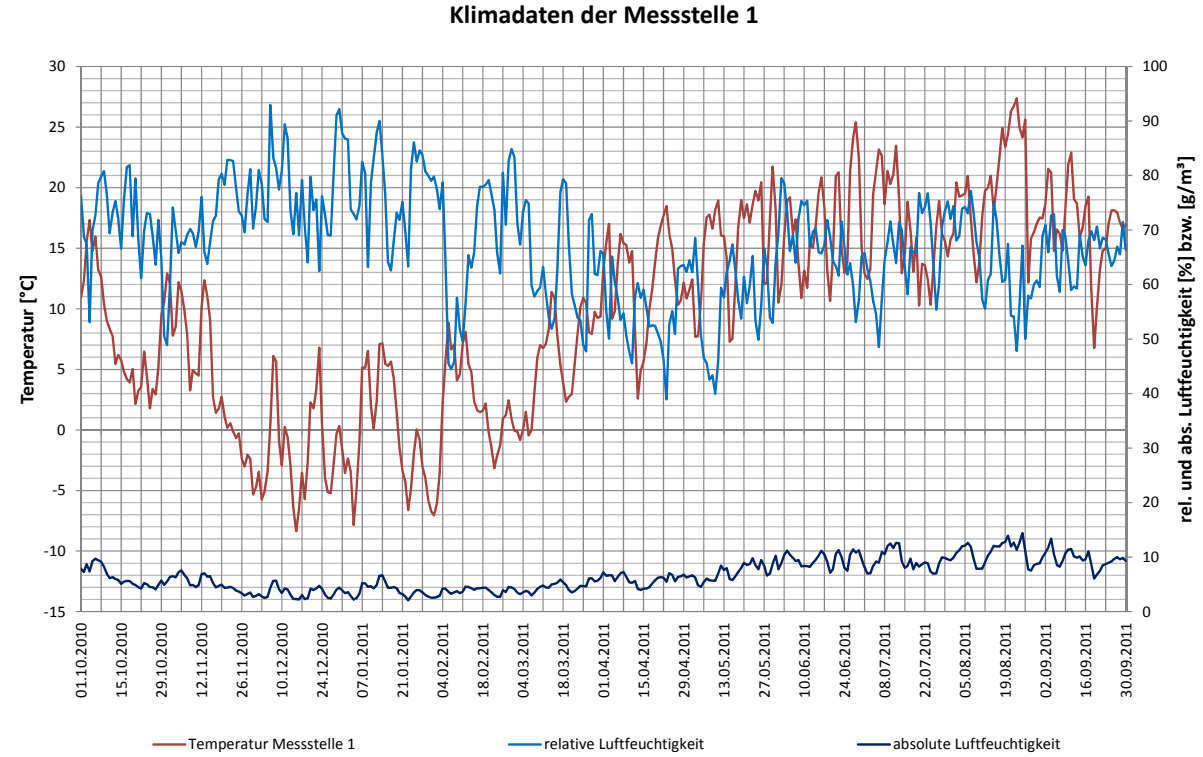
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung



G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem

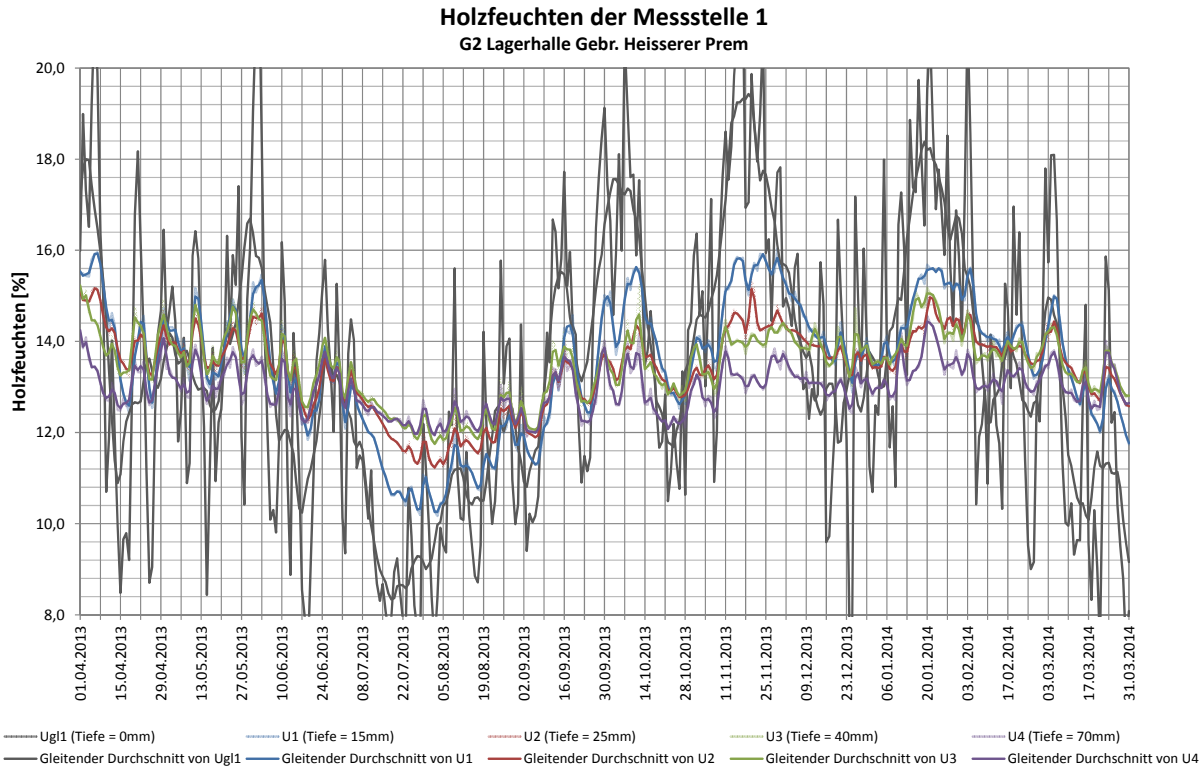
Messstelle 1: Außen am Kragarm, unter Vordach
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

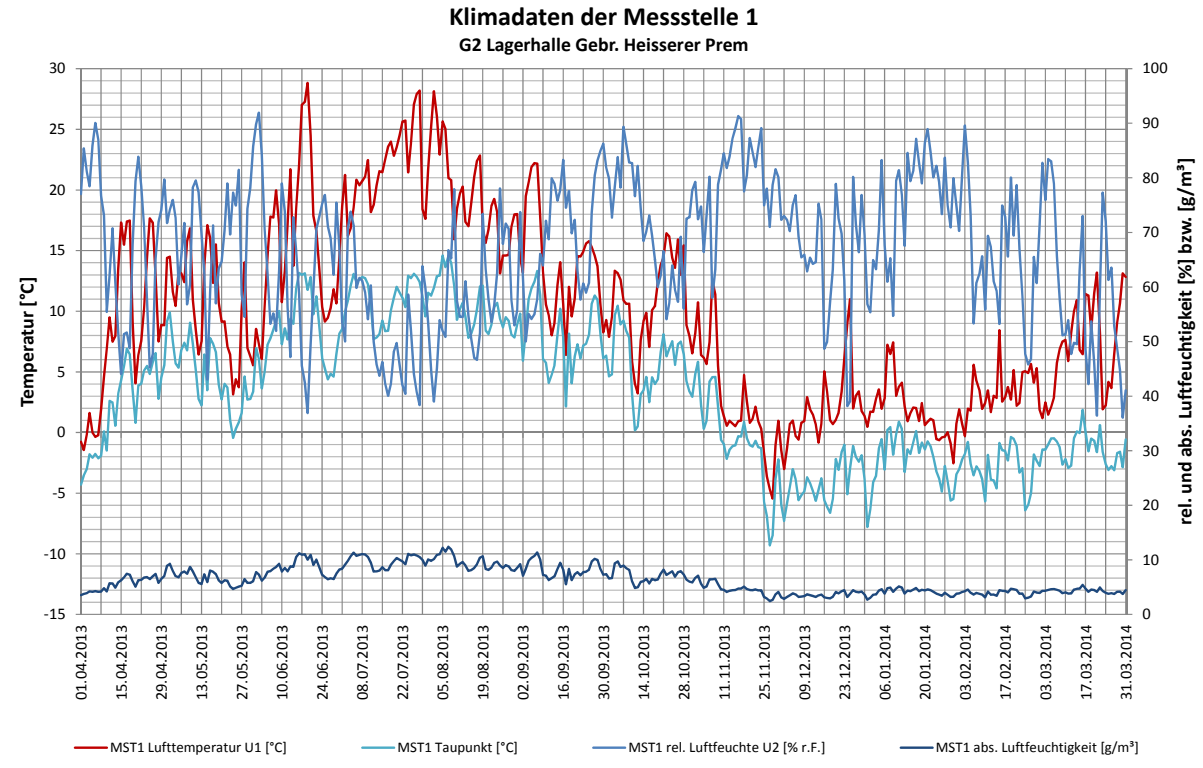




G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem

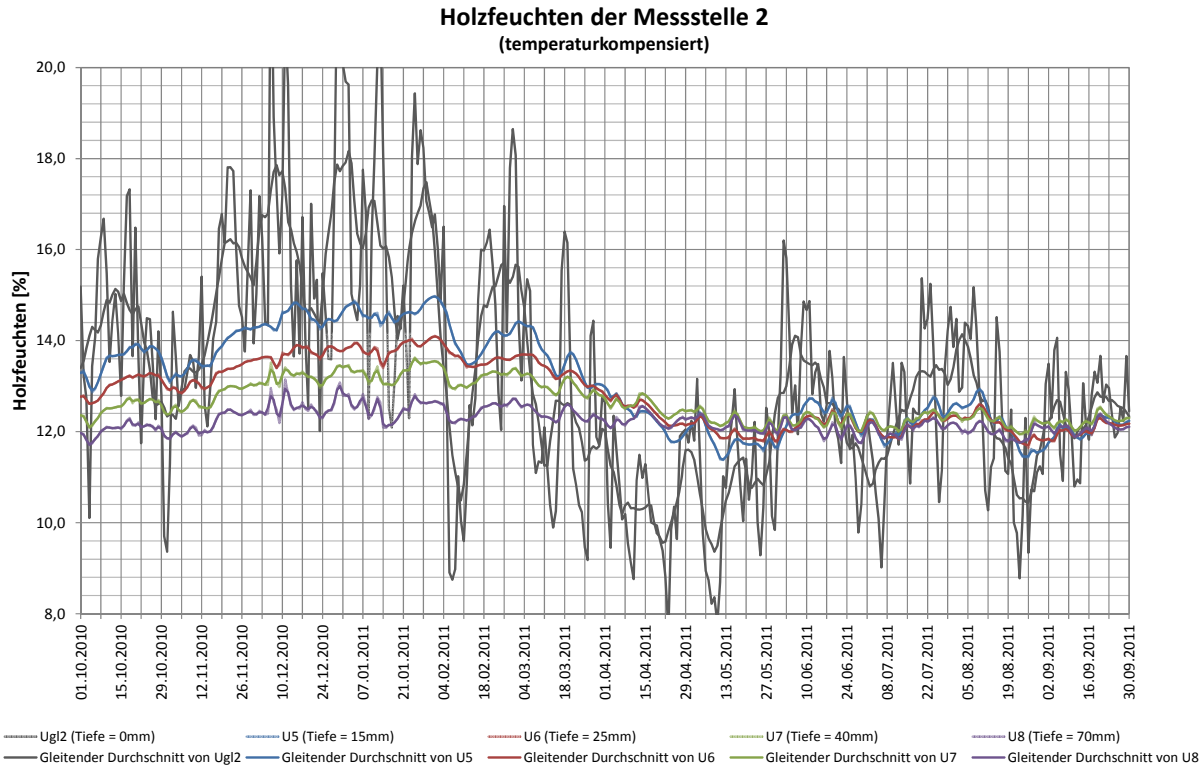
Messstelle 1: Außen am Kragarm, unter Vordach
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

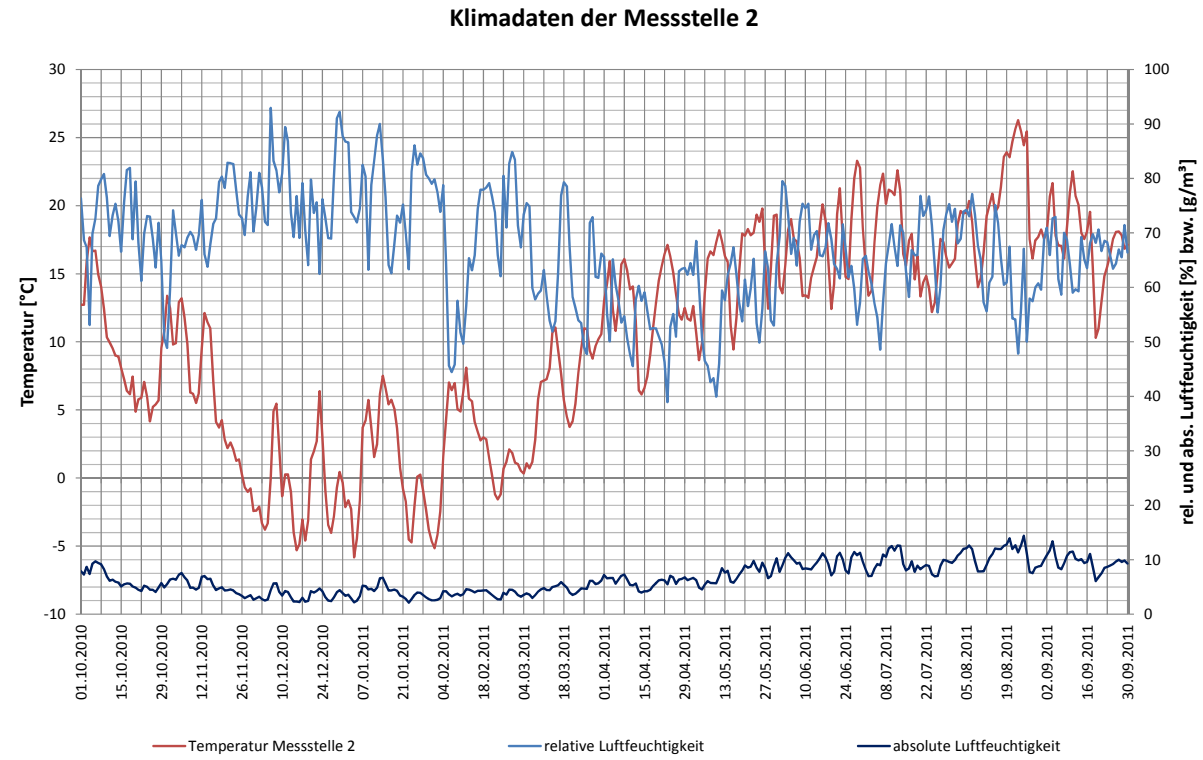




G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem

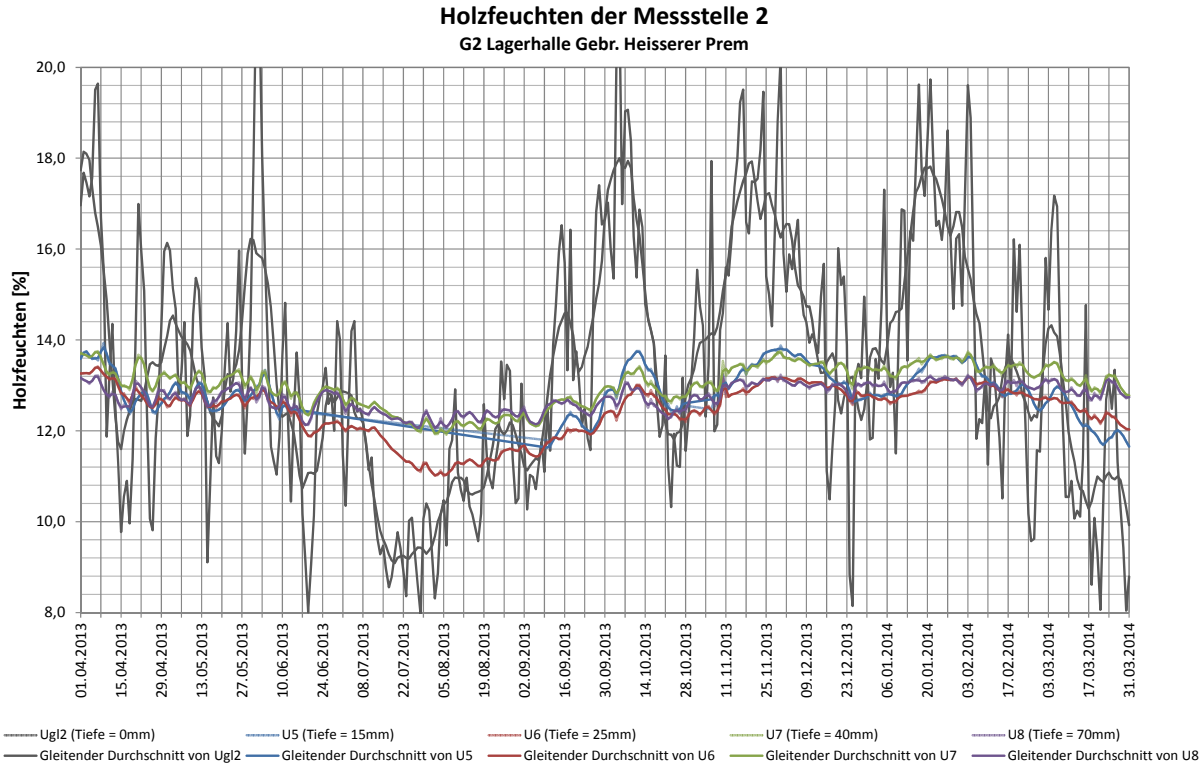
Messstelle 2: Im Hallenbereich, Nähe Feldmitte
Messperiode 1: Gebäudeklima Langzeitmessung

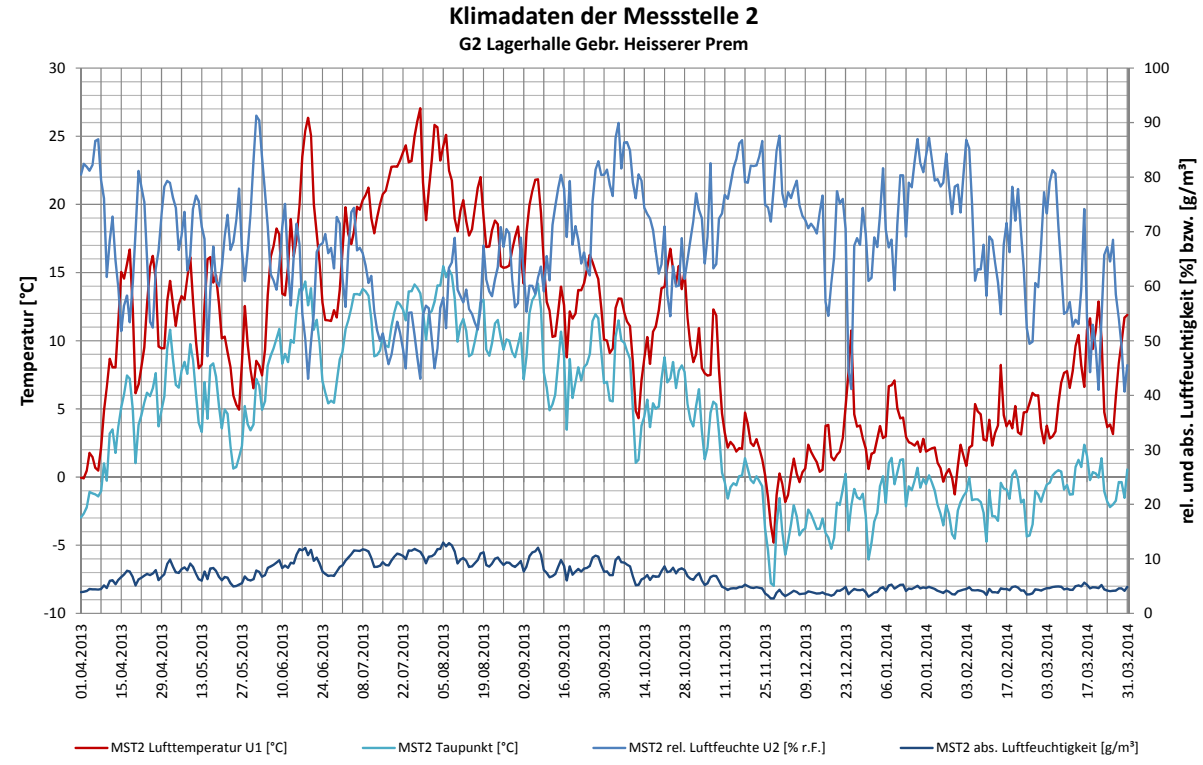




G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem

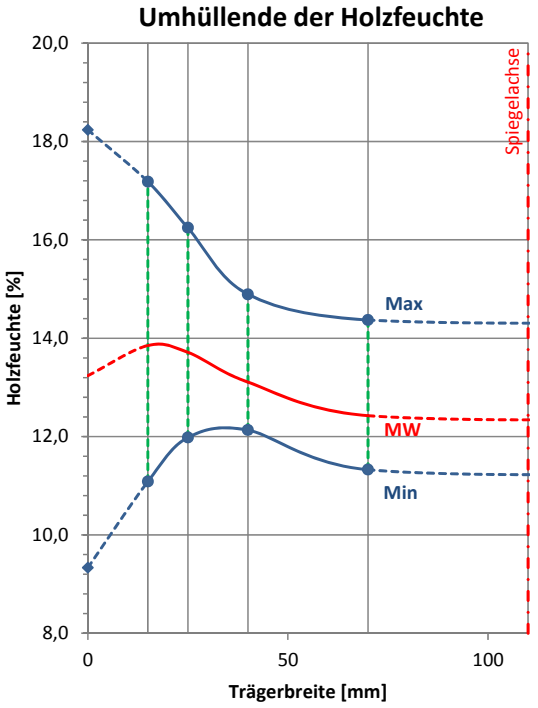
Messstelle 2: Im Hallenbereich, Nähe Feldmitte
Messperiode 2: Gebäudeklima Validierung

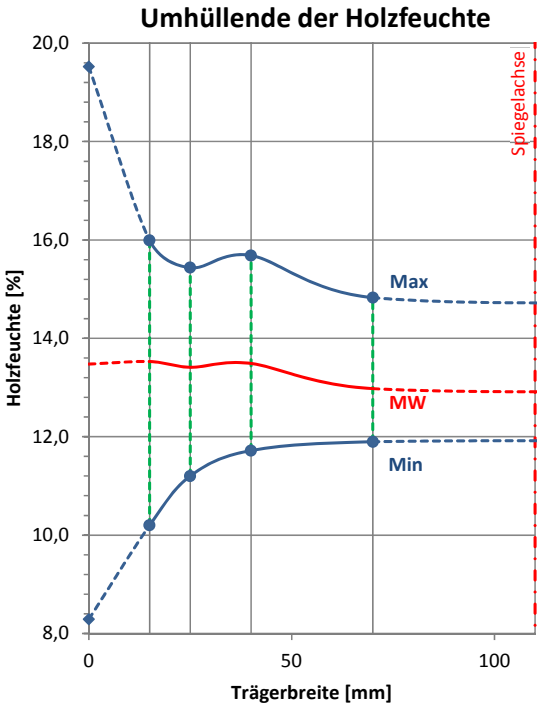


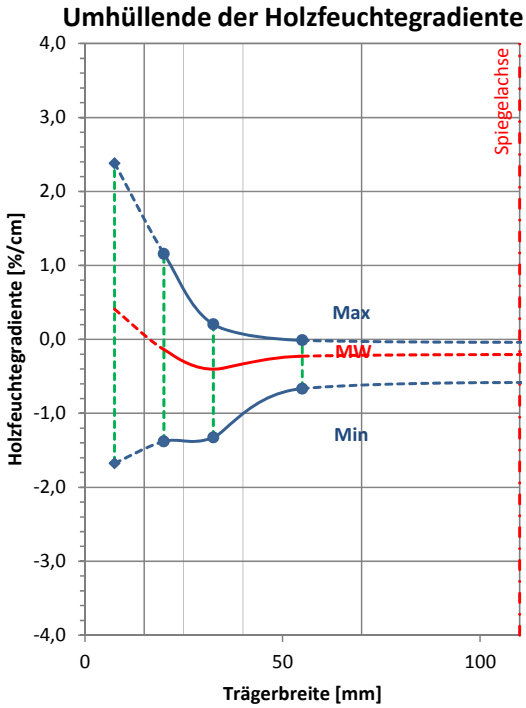


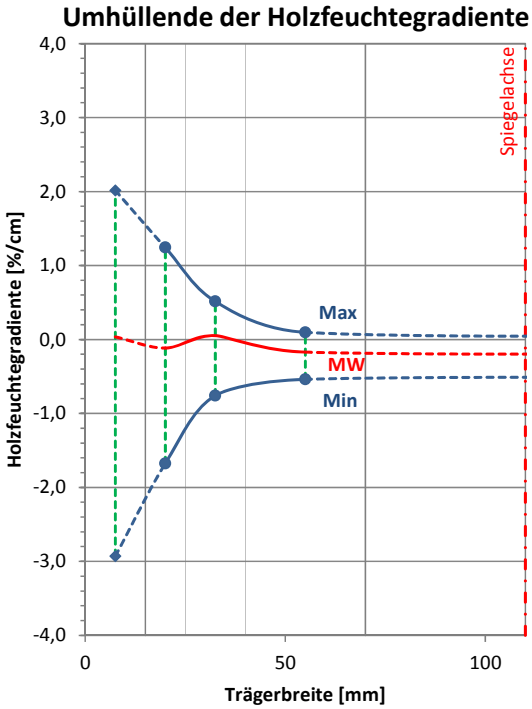
G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem

Messstelle 1: Außen am Kragarm, unter Vordach
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung



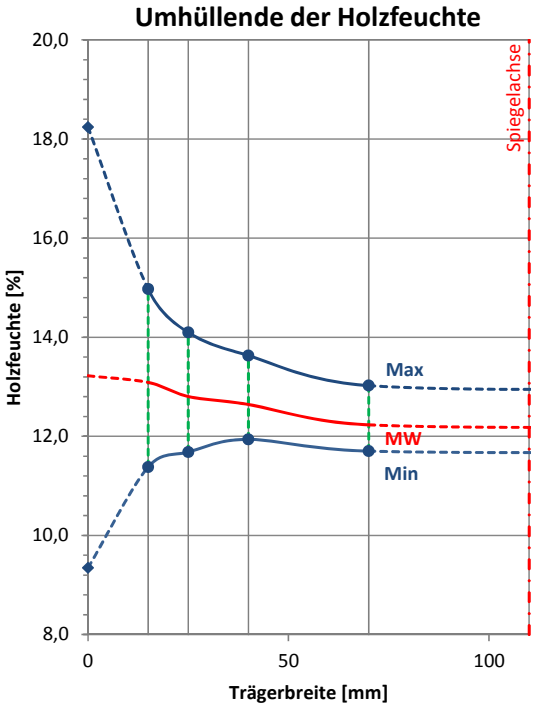


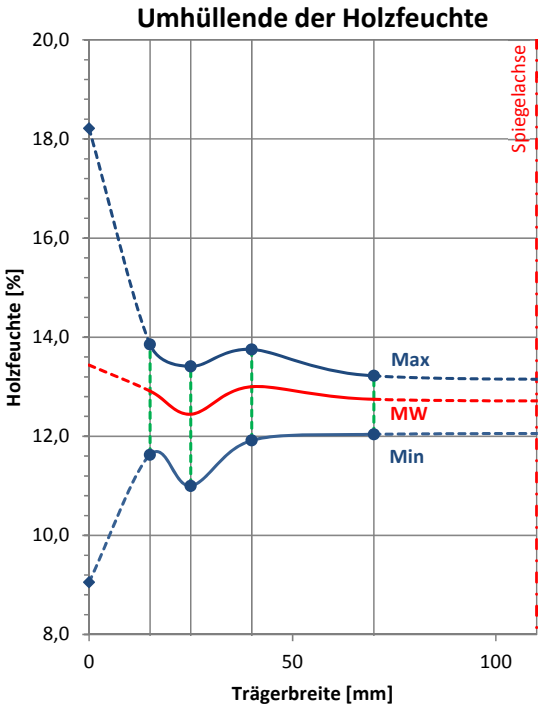


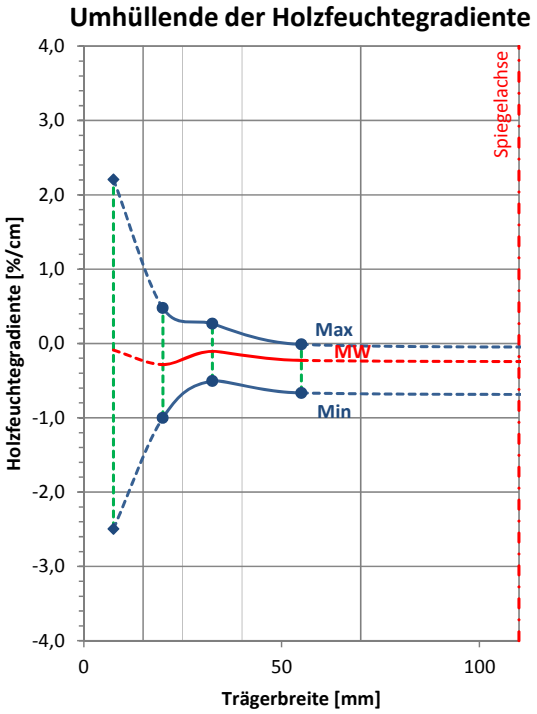


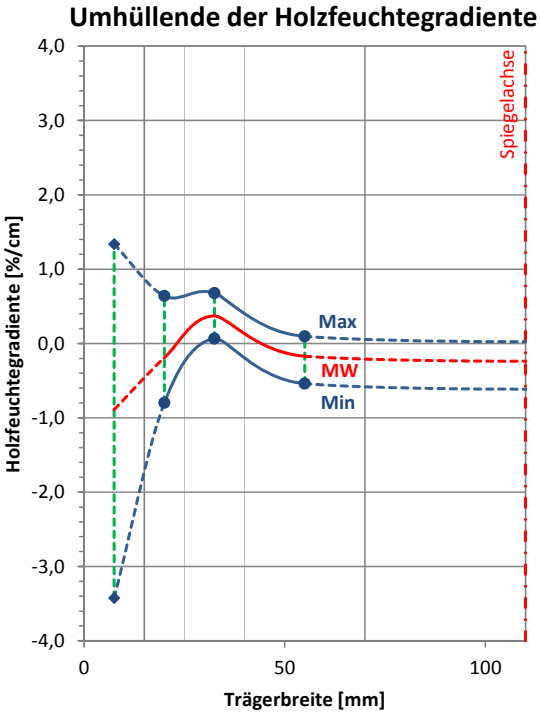
G2 Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem

Messstelle 2: Im Hallenbereich, Nähe Feldmitte
links: Messperiode 1 - Gebäudeklima Langzeitmessung
rechts: Messperiode 2 - Gebäudeklima Validierung









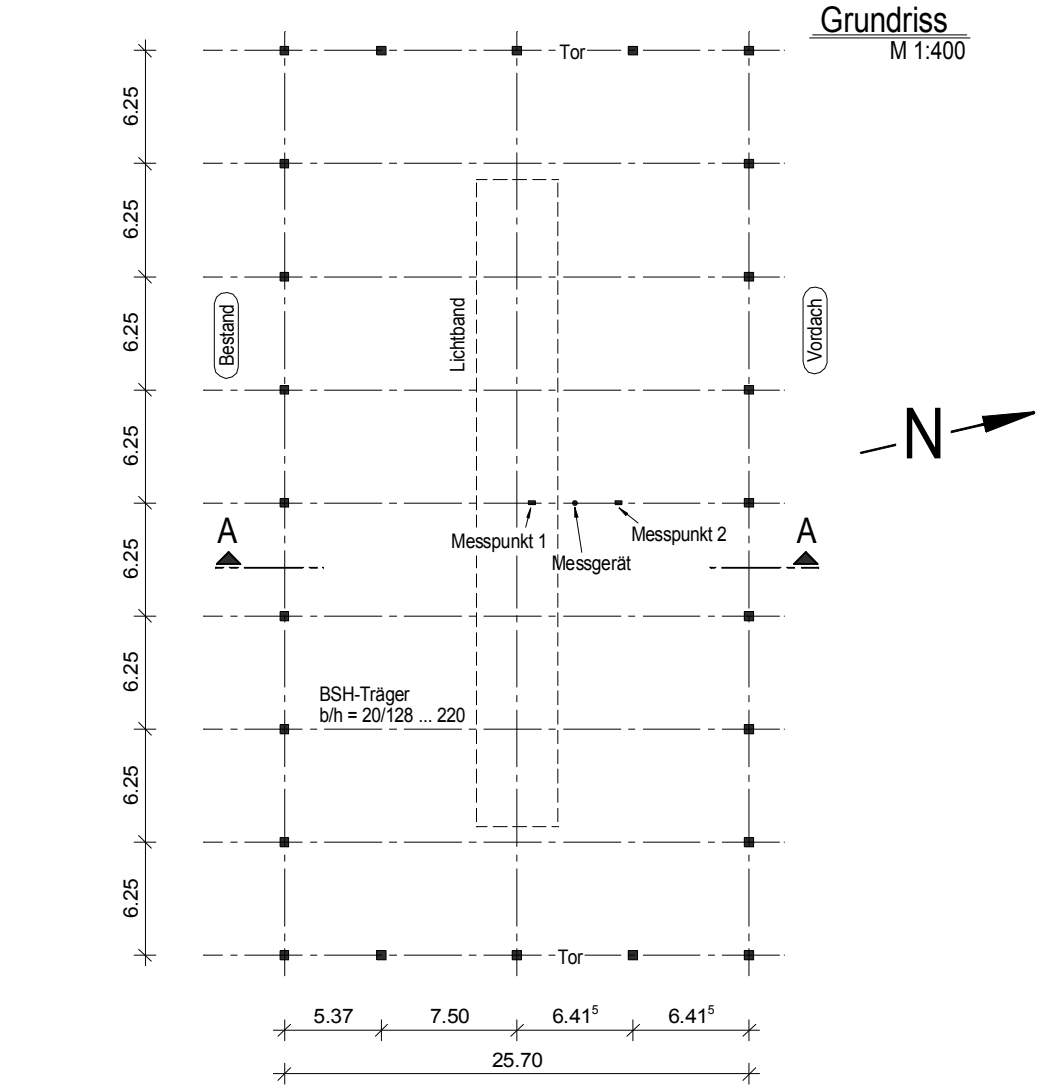
G3 Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf

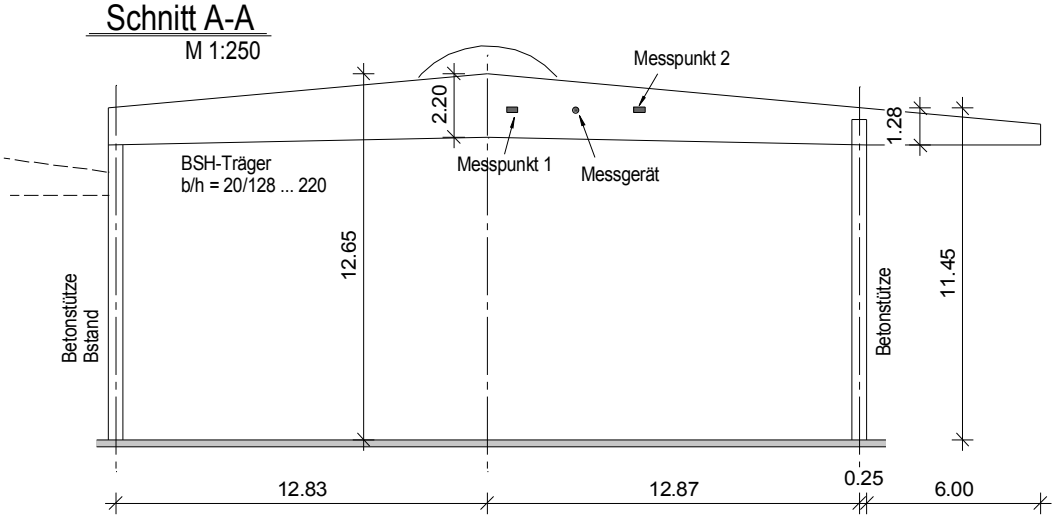
Anschrift:	Röntgenring 20-28 87616 Marktoberdorf
Ansprechpartner:	Herr Florian Schmid
Anwesende vor Ort:	Michael Merk, Andreas Gamper, Florian Schmid
Installationsdatum: Letztes Auslesedatum:	06.09.2010, 16:00 - 17:30 28.10.2011, 17:00 – 18:00
Umgebungsbedingungen:	Geschlossene, ungeheizte, konstruktiv gedämmte Lagerhalle mit großen Toren Temperatur: 20,6 °C; Luftfeuchte: 49 % (z.Zt. d. Installation)
Messstelle 1:	Im Firstbereich, unter der Lichtkuppel (Erfassung des Einflusses der Lichtkuppel als Referenz zu Messstelle 2)
Messstelle 2:	Am Viertelspunkt, zwischen First und Traufe; (Regelbereich in der Mitte der Lagerhalle)

Sensor	Messtiefe [mm]	Holzfeuchte GANN [%]	Messwert Mugrauer [10lg(Ω)]	Einstellwerte GANN	
u1	15	11,6	93,8	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 1
u2	25	11,8	92,7	Gemessene	
u3	40	11,6	93,3	Temperatur	
u4	70	11,4	93,6	t_1: 21,0°C	
u5	15	11,2	91,2	x–y: 6–5; 20°	Messstelle 2
u6	25	12,0	91,9	gemessene	
u7	40	11,9	92,2	Temperatur	
u8	70	11,5	93,4	t_2: 19,6°C	

Tragsystem:	Satteldachträger mit geradem UG als Einfeldträger mit Kragarm Spannweite ℓ = 25,70 m, Firsthöhe h = 12,65 m 9 Achsen, Achsabstand e = 6,25 m Trägerabmessungen b/h = 20/128 … 220 cm^2 Bauteile unbehandelt (vorbehaltlich eines nicht mehr erkennbaren, farblosen, offenporigen Anstrichs)

Skizzen:


Grundriss
M 1:400
Tor
Bestand
Lichtband
Vordach
N
A
A
Messpunkt 1
Messpunkt 2
Messgerät
BSH-Träger
b/h = 20/128 ... 220
6.25
6.25
6.25
6.25
6.25
6.25
6.25
5.37
7.50
6.41⁵
6.41⁵
25.70
Tor


Schnitt A-A
M 1:250
Messpunkt 2
2.20
1.28
BSH-Träger
b/h = 20/128 ... 220
Messpunkt 1
Messgerät
12.65
11.45
Betonstütze
Bstand
Betonstütze
12.83
12.87
0.25
6.00

Bilder:



Abbildung G3-1: Ansicht Tragwerk

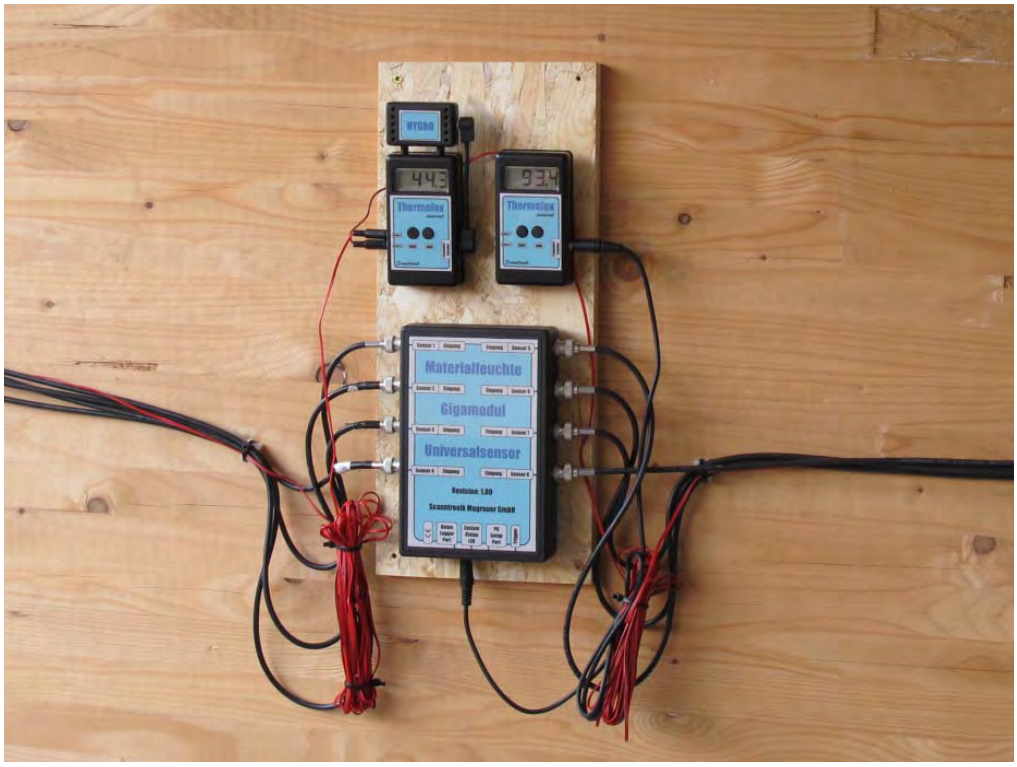


Abbildung G3-2: Ansicht Messstation

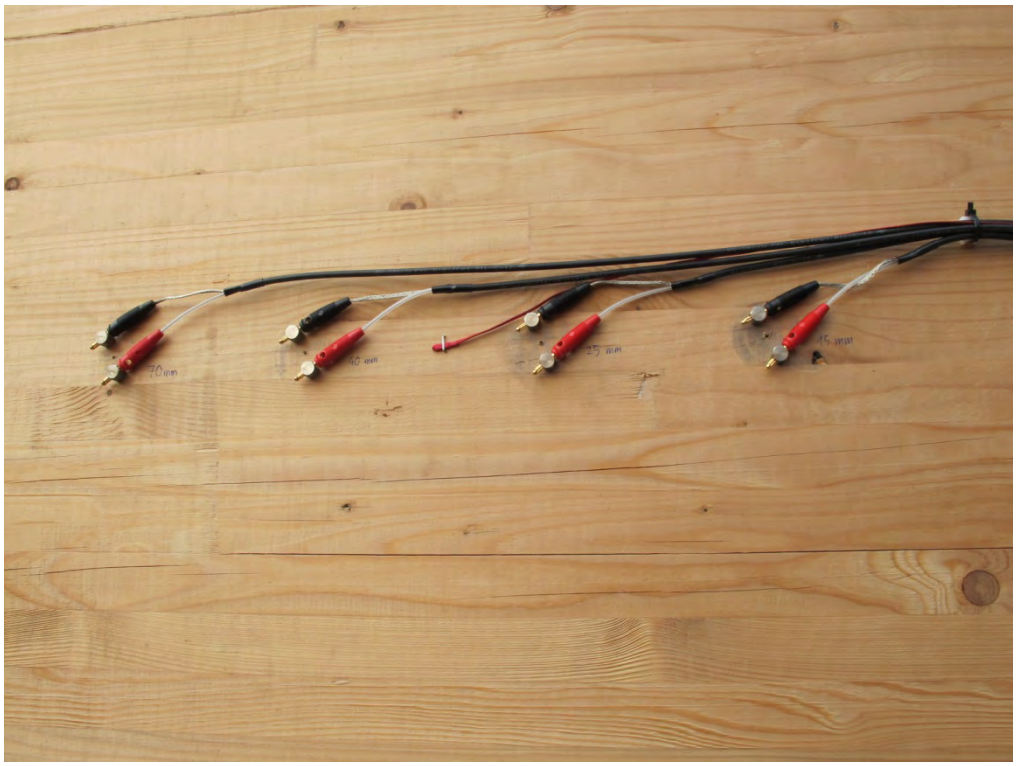
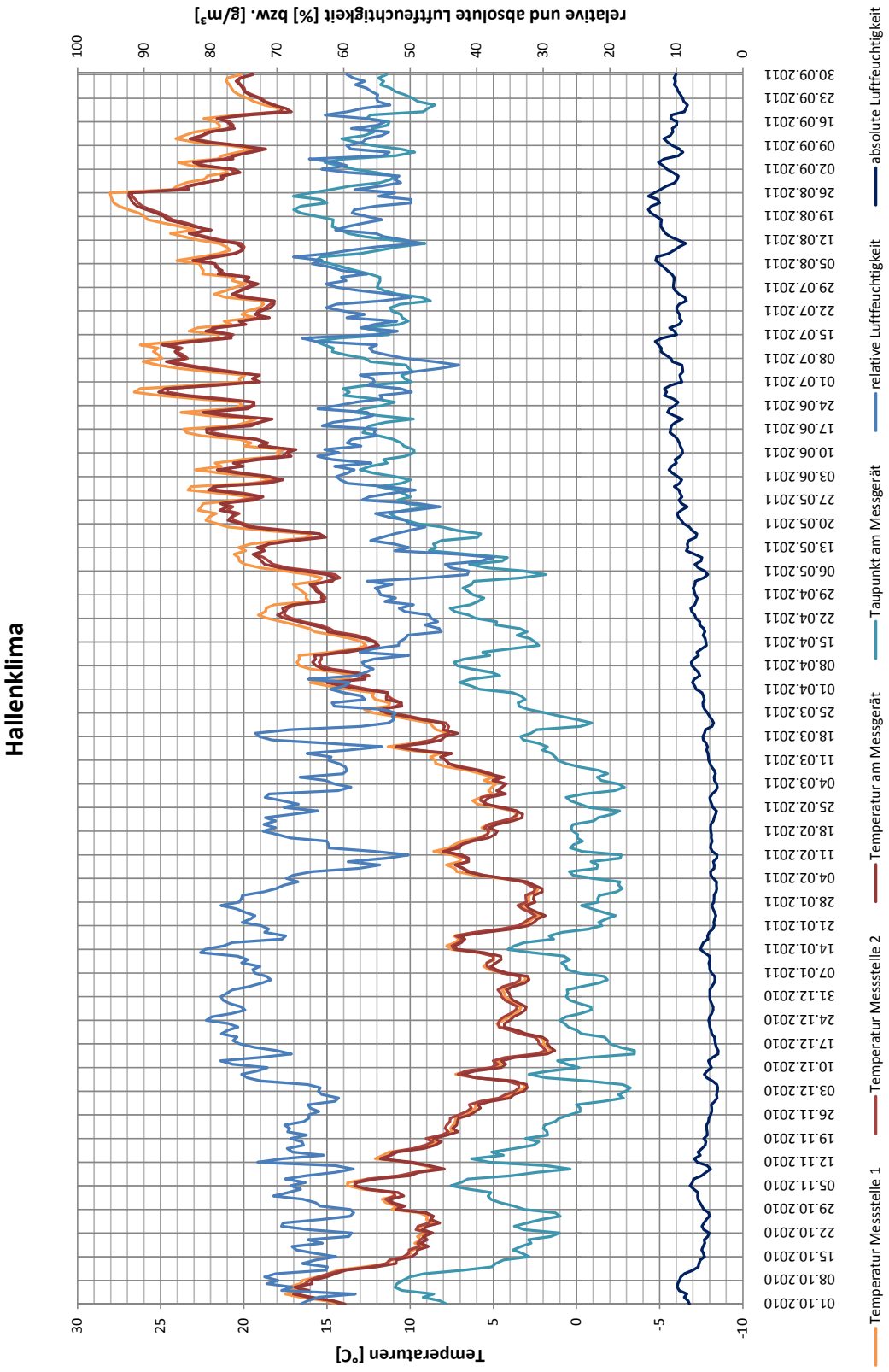


Abbildung G3-3: Ansicht Messstelle 1



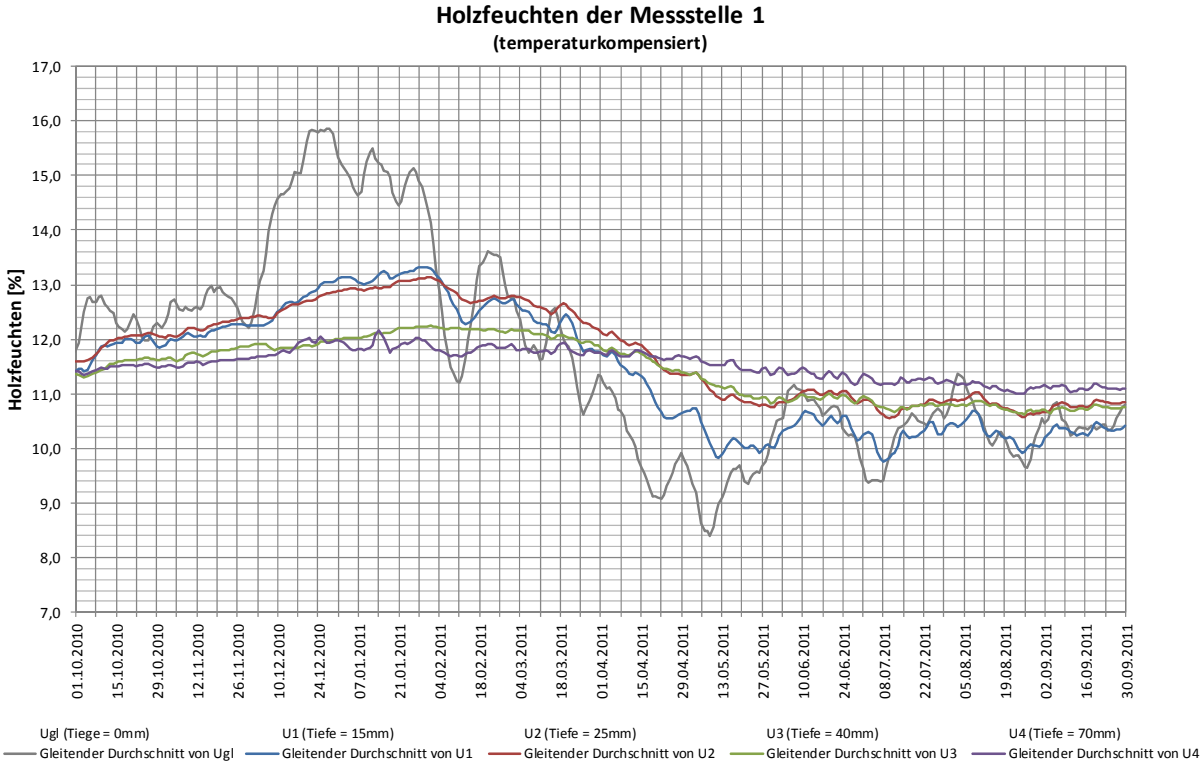
Abbildung G3-4: Ansicht Messstelle 2

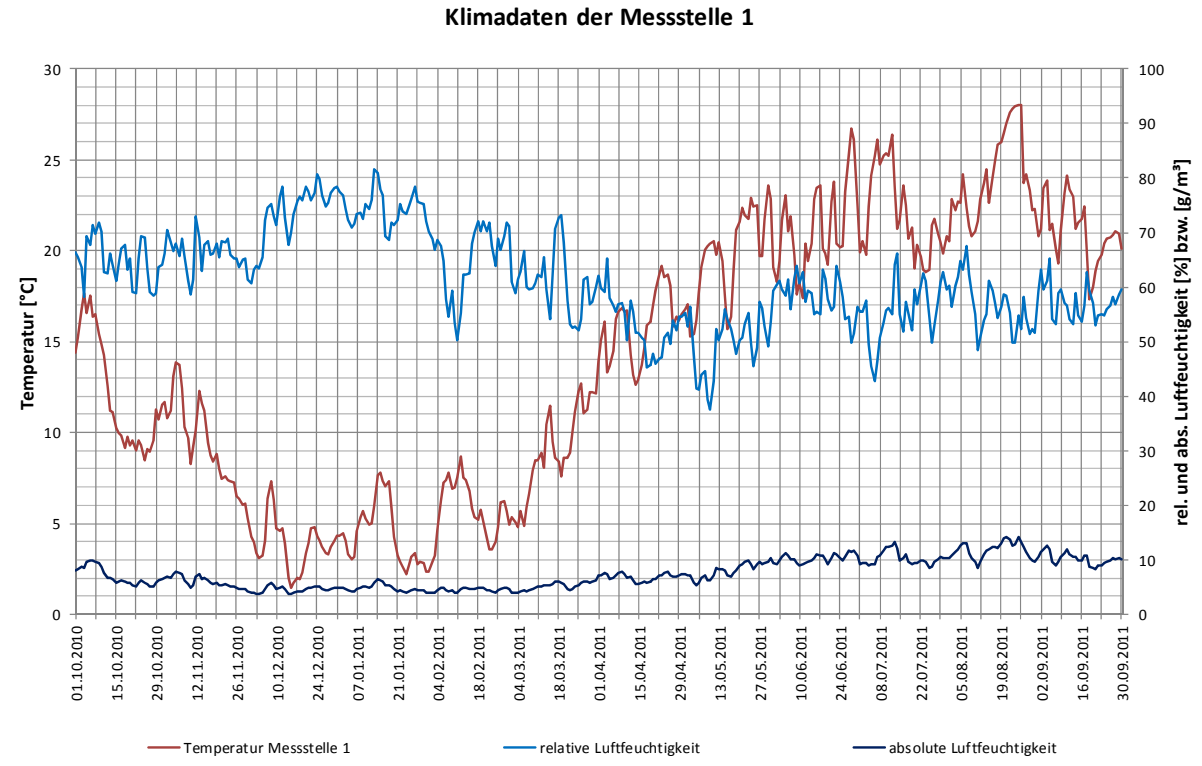
G3 Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf



G3 Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf

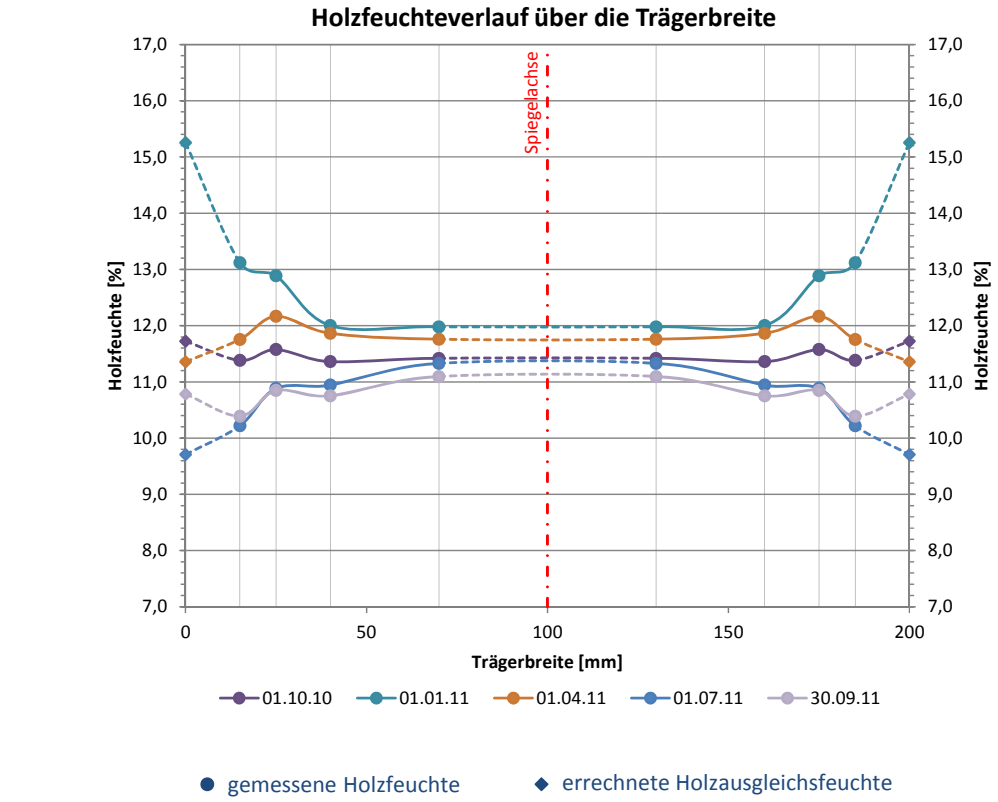
Messstelle 1: Im Firstbereich, unter der Lichtkuppel

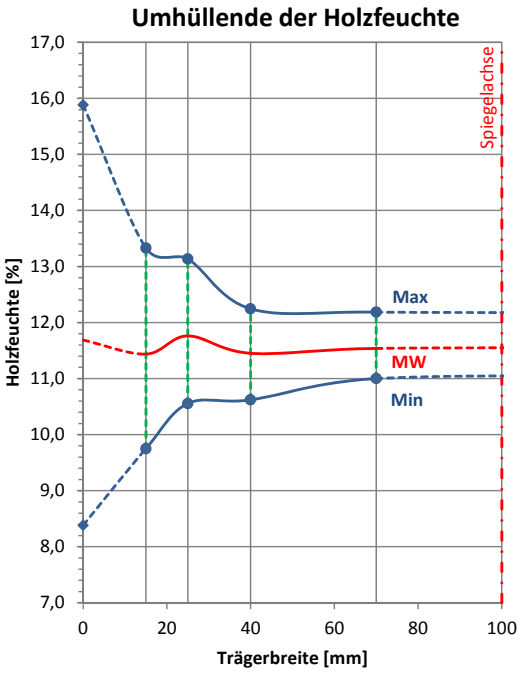


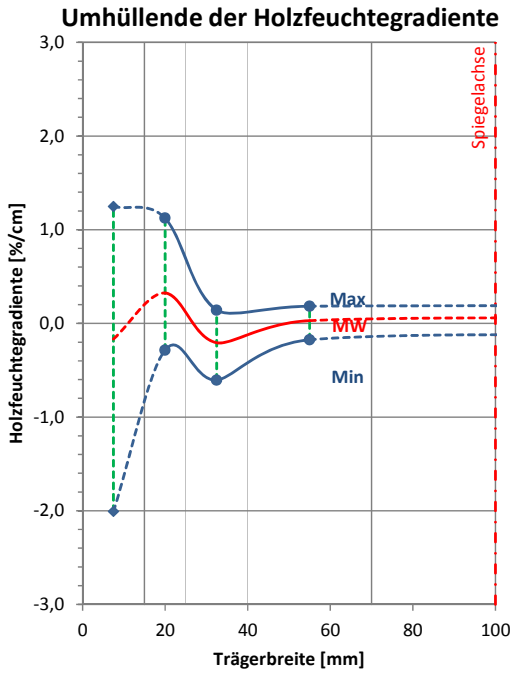


G3 Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf

Messstelle 1 Im Firstbereich, unter der Lichtkuppel

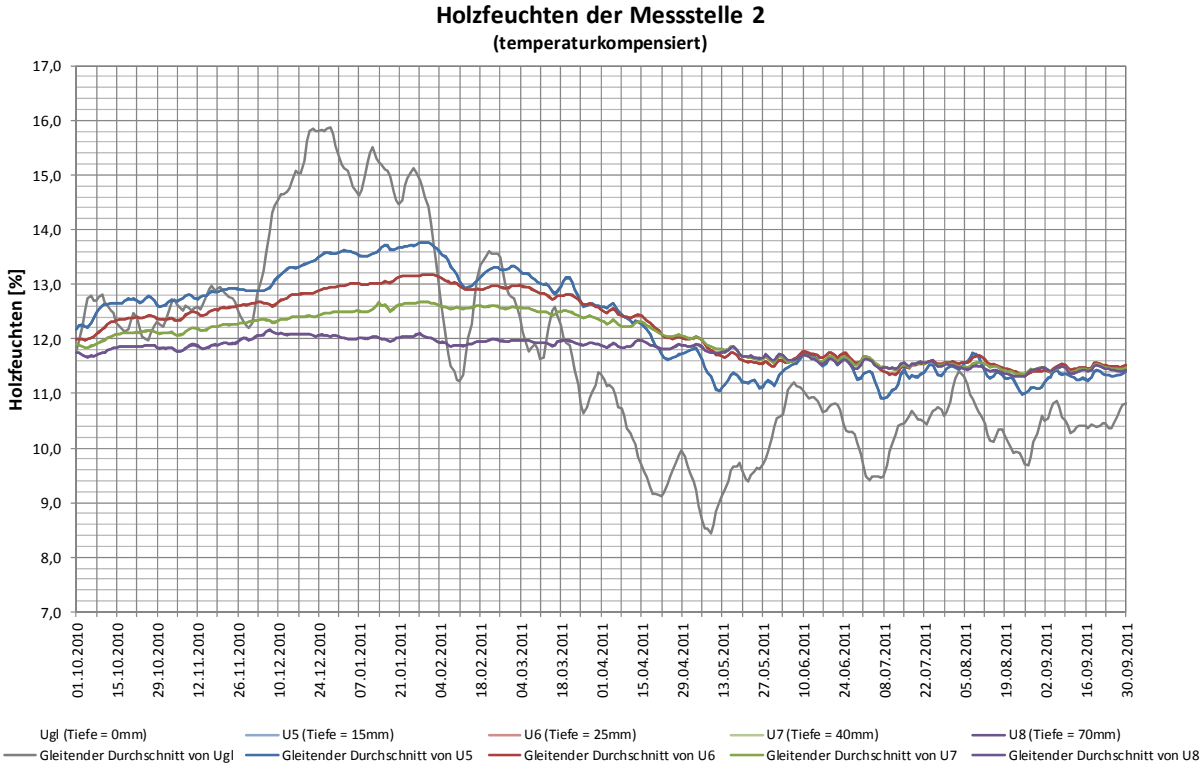


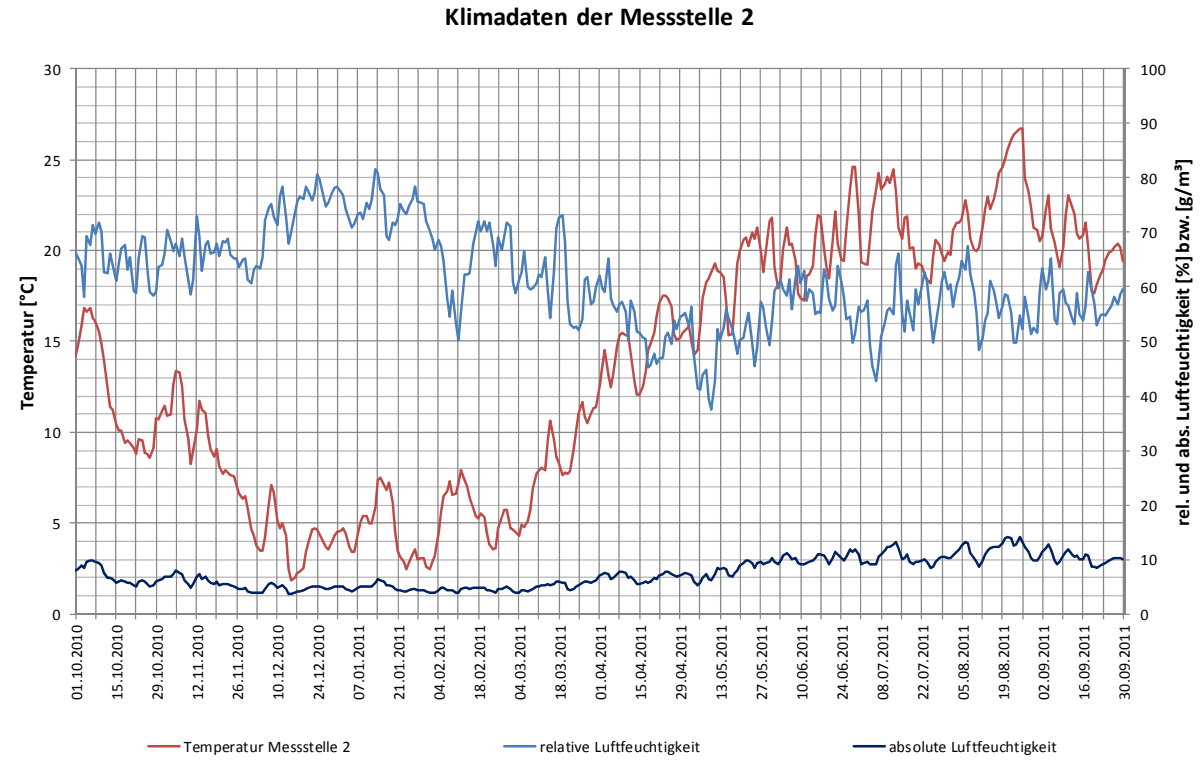




G3 Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf

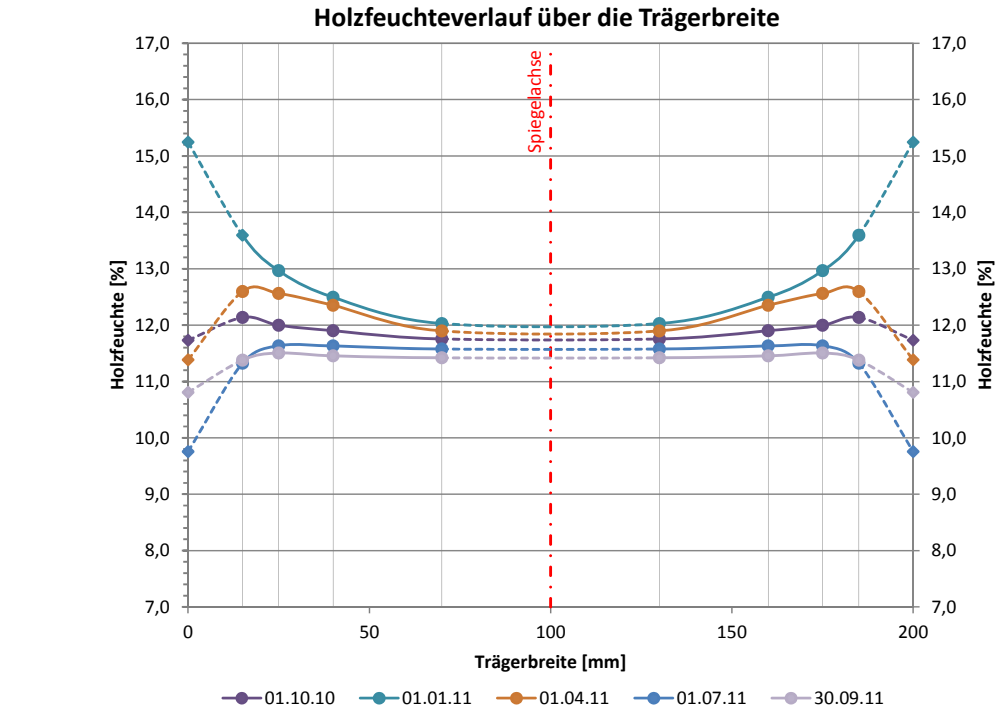
Messstelle 2: Am Viertelspunkt, zwischen First und Traufe

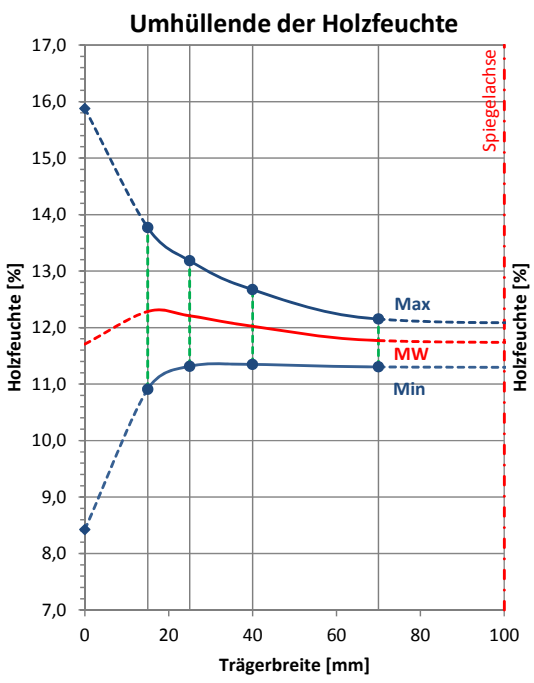


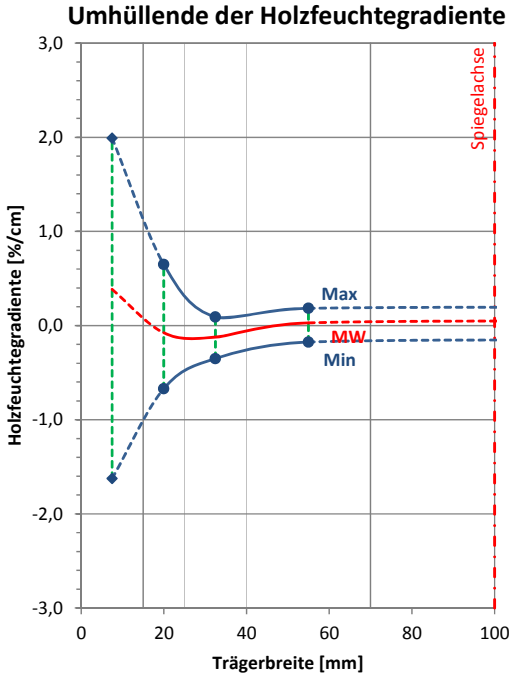


G3 Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf

Messstelle 2 Am Viertelspunkt, zwischen First und Traufe







Abbildungsverzeichnis

Abbildung A1-1: Ansicht Tragwerk A-5
Abbildung A1-2: Ansicht Messstation A-5
Abbildung A1-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-6
Abbildung A1-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-6
Abbildung A2-1: Ansicht Tragwerk A-15
Abbildung A2-2: Ansicht Messstation A-15
Abbildung A2-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-16
Abbildung A2-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-16
Abbildung A3-1: Ansicht Tragwerk A-25
Abbildung A3-2: Ansicht Messstation A-25
Abbildung A3-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-26
Abbildung A3-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-26
Abbildung B1-1: Ansicht Tragwerk A-35
Abbildung B1-2: Ansicht Messstation A-35
Abbildung B1-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-36
Abbildung B1-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-36
Abbildung B2-1: Ansicht Tragwerk A-45
Abbildung B2-2: Ansicht Messstation A-45
Abbildung B2-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-46
Abbildung B2-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-46
Abbildung B3-1: Ansicht Tragwerk A-55
Abbildung B3-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-55
Abbildung B3-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-56

Abbildung B3-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-56

Abbildung B4-1: Ansicht Tragwerk A-67

Abbildung B4-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-67

Abbildung B4-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-68

Abbildung B4-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-68

Abbildung C1-1: Ansicht Tragwerk A-79

Abbildung C1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-79

Abbildung C1-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-80

Abbildung C1-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-80

Abbildung C2-1: Ansicht Tragwerk A-91

Abbildung C2-2: Ansicht Messstation A-91

Abbildung C2-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-92

Abbildung C2-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-92

Abbildung C3-1: Ansicht Tragwerk A-101

Abbildung C3-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-101

Abbildung C3-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-102

Abbildung C3-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-102

Abbildung D1-1: Ansicht Tragwerk A-113

Abbildung D1-2: Ansicht Messstation A-113

Abbildung D1-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-114

Abbildung D1-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-114

Abbildung D2-1: Ansicht Tragwerk A-123

Abbildung D2-2: Ansicht Messstation A-123

Abbildung D2-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-124

Abbildung D2-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-124

Abbildung D3-1: Ansicht Tragwerk A-133

Abbildung D3-2: Ansicht Messstation A-133

Abbildung D3-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-134

Abbildung D3-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-134

Abbildung E1-1: Ansicht Tragwerk A-143

Abbildung E1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-143

Abbildung E1-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-144

Abbildung E1-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-144

Abbildung E2-1: Ansicht Tragwerk A-155

Abbildung E2-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-155

Abbildung E2-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-156

Abbildung E2-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-156

Abbildung F1-1: Ansicht Tragwerk A-167

Abbildung F1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-167

Abbildung F1-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-168

Abbildung F1-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-168

Abbildung F2-1: Ansicht Tragwerk A-179

Abbildung F2-2: Ansicht Messstation A-179

Abbildung F2-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-180

Abbildung F2-4: Ansicht Messstelle 2 ..... A-180

Abbildung F3-1: Ansicht Tragwerk A-189

Abbildung F3-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 ..... A-189

Abbildung F3-3: Ansicht Messstelle 1 ..... A-190

Abbildung F3-4: Ansicht Messstelle 2 .....A-190

Abbildung G1-1: Ansicht Tragwerk.....A-201

Abbildung G1-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 .....A-201

Abbildung G1-3: Ansicht Messstelle 1 .....A-202

Abbildung G1-4: Ansicht Messstelle 2 .....A-202

Abbildung G2-1: Ansicht Tragwerk.....A-213

Abbildung G2-2: Ansicht Messstation; links: Messperiode 1; rechts: Messperiode 2 .....A-213

Abbildung G2-3: Ansicht Messstelle 1 .....A-214

Abbildung G2-4: Ansicht Messstelle 2 .....A-214

Abbildung G3-1: Ansicht Tragwerk.....A-225

Abbildung G3-2: Ansicht Messstation A-225

Abbildung G3-3: Ansicht Messstelle 1 .....A-226

Abbildung G3-4: Ansicht Messstelle 2 .....A-226