

**Ermittlung des Gefährdungsrisikos  
von Holzaußenbauteilen mit  
Plattenwerkstoffen infolge  
Schwind- und Quellverformungen  
anhand praxisnaher Untersuchungen**

**T 3140**

T 3140

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

2007

ISBN 978-3-8167-7370-2

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

## **Ermittlung des Gefährdungsrisikos von Holzaußenbauteilen mit Plattenwerkstoffen infolge Schwind- und Quellverformungen anhand praxisnaher Untersuchungen**

gefördert durch:

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Kolonnenstraße 30, D-10829 Berlin  
ZP 52-5 13.165-1161/05

**Forschungsinstitut:** Fraunhofer-Institut für Holzforschung  
Wilhelm-Klauditz-Institut – WKI  
Bienroder Weg 54 E  
D-38108 Braunschweig  
Telefon: 0531-2155-0  
Fax: 0531-351587  
E-Mail: info@wki.fraunhofer.de

**Projektleitung:** Johann W. Herlyn  
Fachbereich Bauanwendung Holz / Holzwerkstoffe  
Telefon: 0531-2155-448  
E-Mail: johann.herlyn@wki.fraunhofer.de

Braunschweig, November 2006

---

Dipl.-Ing. Johann W. Herlyn  
Projektleiter

---

Prof. Dr. Rainer Marutzky  
Institutsleiter



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	4
1 Ausgangssituation .....	4
2 Notwendigkeit des Vorhabens .....	4
3 Ziele des Vorhabens .....	5
4 Bauphysikalische Grundlagen.....	6
4.1 Einfluss der Temperatur.....	6
4.2 Einfluss der Feuchte und hygroskopisches Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen	7
4.3 Materialfeuchte und Einflussfaktoren .....	7
4.3.1 Materialfeuchte.....	7
4.3.2 Luftfeuchte .....	9
4.3.3 Mechanismen des Feuchtetransportes .....	10
4.3.4 Wasserdampfdiffusion .....	11
4.4 Vergleich wärme- und feuchtetechnischer Kenngrößen.....	13
4.4.1 Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ .....	13
4.4.2 Spezifische Wärmekapazität $c$ .....	14
4.4.3 Kenngrößenvergleich .....	14
5 Versuche in Doppelklimakammern .....	15
5.1 Versuch mit zwei Plattenwerkstoffen.....	15
5.1.1 Versuchsaufbau .....	15
5.1.2 Versuchsablauf.....	17
5.1.3 Ergebnisse und Auswertung .....	18
5.1.3.1 Ermittlung der Materialfeuchten.....	18
5.1.3.2 Bestimmung des Feuchteausdehnkoeffizienten $\alpha_v$ und der Rohdichte der Holzwerkstoffplatten.....	20
5.1.3.3 Bestimmung des E-Moduls mit 3-Punkt-Biegeversuch .....	21
5.1.3.4 Darstellung der Plattenverformungen .....	22
5.1.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	23
5.2 Versuch mit sechs Plattenwerkstoffen .....	25
5.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung.....	25
5.2.2 Ergebnisse der Verformungsmessungen .....	29
5.3 Untersuchungen mit rechnerischen Methoden .....	31
5.3.1 Berechnungen nach der Finite Elemente Methode .....	31
5.3.1.1 Modellgenerierung.....	31
5.3.1.2 Materialeigenschaften.....	34
5.3.1.3 Transiente Feuchteverteilungsberechnung .....	38
5.3.1.4 Verformungen .....	38
5.3.2 Simulation und Auswertung mit ANSYS .....	39
5.3.2.1 Verformungssimulation .....	41
5.3.3 Betrachtung und Vergleich der ANSYS-Berechnungen mit den Versuchsergebnissen .....	42
5.3.3.1 Vergleich der Feuchteverteilungen.....	42
5.3.3.2 Vergleich der Verformungen .....	44
5.3.3.3 Schlussfolgerungen und kritische Betrachtung.....	47
5.3.4 Betrachtungen mit Hilfe einfacher Rechenverfahren .....	47
5.3.4.1 Arbeitssatz .....	48
5.3.4.2 Bi-Metall-Theorie.....	49
5.3.4.3 Biegelinie .....	52



5.4	Verformungsverhalten unter anderen Lagerungsbedingungen.....	54
5.4.1	Einfluss und Bewertung einer Einspannung am Auflager .....	54
5.4.2	Einfluss und Bewertung der Plattenspannweite und unterschiedlicher statischer Systeme .....	56
6	Übertragung der Ergebnisse auf praxisnahe Anwendungen - Ermittlung eines Gefährdungsrisikos .....	57
6.1	Übertragung der Ergebnisse auf praxisnahe Anwendungen .....	57
6.1.1	Wärmedämmverbundsysteme .....	58
6.1.1.1	geklebte Wärmedämmverbundsysteme auf Holzwerkstoffen.....	58
6.1.1.2	Mechanisch befestigte Wärmedämmverbundsysteme.....	61
6.1.1.3	Wärmedämmverbundsysteme aus Holzfaserdämmplatten .....	61
6.1.2	Belüftete Ebenen, vorgehängte Fassaden .....	61
6.1.3	Direktbeschichtungen - Fliesen .....	62
7	Berechnungsparameter .....	62
7.1	Materialeigenschaften und geometrische Daten .....	62
7.2	Klimabedingungen.....	63
7.3	Lagerungssituation.....	63
8	Zusammenfassung .....	64
9	Anhang .....	65
10	Literatur / Endnoten .....	109



## Vorwort

### 1 Ausgangssituation

Plattenwerkstoffe sind unverzichtbare Baustoffe in tragenden Holzaußenbauteilen. Als Beplankungen in Holztafelwänden sind sie maßgeblich an der Lastabtragung beteiligt und dürfen in dieser Funktion nicht beeinträchtigt werden. Aber auch als Bekleidung müssen Plattenwerkstoffe funktionsfähig bleiben, wenn sie eine wesentliche Schicht eines Bauteils sind. In Außenbauteilen sind Plattenwerkstoffe nicht nur statischen Beanspruchungen, sondern auch Beanspruchungen aus Feuchte- und Temperaturänderungen ausgesetzt. Je nach Plattentyp unterliegen sie dabei unterschiedlichen, in erster Linie hygrysch bedingten Quell- und Schwindverformungen. Diese Verformungen können als Längenänderungen in Plattenrichtung oder als sog. Schüsselung senkrecht zur Plattenebene auftreten. Insbesondere die Verformungen senkrecht zur Plattenebene bei einseitiger Feuchteänderung können in einer Größe auftreten, dass die Befestigung der Platten auf der Holzunterkonstruktion beeinträchtigt wird oder dass die Verformungen der Platten zu einer Beschädigung angrenzender Bauteilschichten mit eventuellen Auswirkungen auf die Funktionstüchtigkeit des gesamten Bauteils führen.

Eine rechnerische Ermittlung und anschließende Beurteilung des Verformungsverhaltens von Plattenwerkstoffen ist zur Zeit nicht möglich, da weder in Normen noch in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen Berechnungsgrundlagen hierfür vorhanden sind. Das Verformungsverhalten unter praxisnahen Bedingungen bei Feuchtebeanspruchungen ist somit nicht bekannt und muss daher experimentell in aufwendigen Untersuchungen ermittelt werden.

Als Plattenwerkstoffe im Holzbau werden überwiegend Spanplatten, Oriented-Strand-Boards (OSB), bautechnische mitteldichte Faserplatten (MDF), Holzfaserdämmplatten, Gipsbauplatten und Calciumsilikatplatten mit organischen oder anorganischen Bindemitteln eingesetzt.

### 2 Notwendigkeit des Vorhabens

Die Anwendung von Plattenwerkstoffen im Holzbau ist durch nationale oder europäische Normen sowie allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen baurechtlich geregelt. In den Normen oder Zulassungen werden entweder die Plattenwerkstoffe selbst oder die Bauarten für ihre Anwendung in Bauteilen mit Plattenwerkstoffen behandelt, z. B. /1, 2, 3, 4/. In diesen technischen Regeln werden zwar teilweise Eigenschaften für das hygrysch bedingte Verformungsverhalten beschrieben. Ein Bezug dieser Eigenschaften zum Verformungsverhalten im eingebauten Zustand unter Praxisbedingungen bei Feuchtebeanspruchungen besteht jedoch nicht. Kenntnisse über das Verformungsverhalten infolge Schwinden und Quellen fehlen nicht nur für in der jüngeren Zeit baurechtlich geregelte Plattenwerkstoffe, wie sog. bautechnische MDF, sondern auch für bereits Jahrzehnte bauaufsichtlich geregelte Plattenwerkstoffe, wie zementgebundene Spanplatten. Auch in aktuellen Arbeiten wurde nur das Längenänderungsverhalten in Plattenrichtung anhand von kleinformatigen Laborproben und nicht das praxisnahe Verformungsverhalten im Bauteil untersucht /5/.

In der Vergangenheit wurden Plattenwerkstoffe im Außenbereich in wenigen und langjährig bewährten Varianten ausgeführt. Hierzu zählen z. B. Plattenwerkstoffe als Beplankungen oder Bekleidungen hinter Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) mit Hartschaumplatten oder hinter be-



lüfteten Vorhangschalen. Die beispielhaft aufgeführten WDVS mit Hartschaumplatten und hinterlüfteten Vorhangschalen, die die Aufgabe des dauerhaften Wetterschutzes für die Plattenwerkstoffe haben, verhinderten oder verminderten aufgrund eines hohen Wasserdampfdiffusionswiderstandes bzw. einer Feuchteabfuhr infolge der Belüftung unzuträgliche Feuchteänderungen in den Plattenwerkstoffen. In der jüngeren Zeit hingegen wurden auch Konstruktionen im Zuge der sicherlich im Holzbau sinnvollen diffusionsoffenen Bauart, wie WDVS mit Holzfaserdämmplatten nach DIN EN 13171 ausgeführt /6/. Diese Konstruktionen haben unvermeidliche Feuchteänderungen bei den Plattenwerkstoffen in einer Größenordnung zur Folge, die bei den zuvor beschriebenen Ausführungsarten nicht aufgetreten ist. Die Belastungen aus bislang nicht vorhandenen Feuchteänderungen sind nicht nur aus der Theorie abgeleitet, sondern auch anhand von Bewitterungssimulationen aus Klimakammeruntersuchungen und Messungen an einem Versuchsobjekt bekannt /7, 8, 9/. Verformungen an Plattenwerkstoffen in Holzwänden mit WDVS während Bewitterungssimulationen führten insbesondere bei hohen Feuchtebelastungen zu deutlich von außen erkennbaren Verformungen auf dem Putzsystem /10/.

WDVS aus Holzfaserdämmplatten oder auch aus mineralischem Faserdämmstoff werden nicht nur bei seit Jahrzehnten baurechtlich geregelten Plattenwerkstoffen, sondern auch häufig bei Neubauten mit erst seit wenigen Jahren erhältlichen Plattenwerkstoffen, wie bautechnische MDF oder OSB, eingesetzt, über die wenig Erfahrungen hinsichtlich des Verformungsverhaltens und somit der Gefährdung infolge Schwindens oder Quellens für die Holzkonstruktion vorhanden sind.

Dies bedeutet für eine Vielzahl von fertig gestellten Holzaußenbauteilen, dass bauaufsichtlich geregelte Plattenwerkstoffe eingebaut sind, die sich bei ebenfalls bauaufsichtlich geregelten Bauarten, wie WDVS im Holzbau, infolge unvermeidlicher Feuchteänderungen in der Art verformen können, dass sowohl die Funktion der Plattenwerkstoffe als auch die des gesamten Bauteils nicht über eine ausreichende Nutzungsdauer sicher gestellt ist. Es besteht somit aus Sicht der Antragsteller eine bauaufsichtliche Notwendigkeit, das mögliche Risiko für die Standsicherheit solcher Holzkonstruktionen zu untersuchen. Weiterhin fehlen grundlegende Kenntnisse des praxisnahen Verformungsverhaltens von Plattenwerkstoffen bei Feuchtebeanspruchung zur rechnerischen Ermittlung des Verformungsverhaltens.

### **3 Ziele des Vorhabens**

Das Ziel des Vorhabens besteht in der Ermittlung der Gefährdung von Holzaußenbauteilen infolge hygrysch bedingter Verformungen von Plattenwerkstoffen. Dabei soll in erster Linie das Verformungsverhalten unterschiedlicher Plattenwerkstoffe qualitativ und quantitativ erfasst werden. Der Einfluss verschiedener Bindemittel, Plattendicken, Befestigungsmittel einerseits und Klimate andererseits soll zwar durch einheitliche und vergleichbare Randbedingungen beachtet werden, steht jedoch nicht im Vordergrund des Vorhabens. Das primäre Ziel besteht in der Beschaffung grundlegender Kenntnisse über das praxisnahe Verformungsverhalten möglichst aller im Holzbau eingesetzten Plattenwerkstoffe. Das Ergebnis soll auch dazu dienen, das Verformungsverhalten bei bekanntem Feuchteverhalten rechnerisch zu ermitteln, um auf zeit- und kostenintensive Versuche verzichten zu können.

## 4 Bauphysikalische Grundlagen

Bei den folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Verformungen der Holzwerkstoffplatten ohne das Einwirken von äußeren Belastungen wie z.B. Wind, Schnee oder Mannlasten erfolgen. Somit hat nur die Kombination von Temperatur und relativer Luftfeuchte und die daraus resultierende Materialfeuchte einen Einfluss auf das Verformungsverhalten.

### 4.1 Einfluss der Temperatur

Jedes im Baubereich eingesetzte Material verformt sich infolge von Temperaturänderungen in Form von Längen- bzw. Dimensionsänderungen. Diese Vorgänge werden allgemein durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\Delta l = \alpha_T \cdot \Delta \vartheta \cdot l_0 \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:

$\Delta l$ :	Längenänderung des Materials	[m]
$\alpha_T$ :	Temperaturausdehnkoeffizient des Materials	[1/K]
$\Delta \vartheta$ :	Temperaturänderung	[K]
$l_0$ :	Ausgangslänge des Materials vor der Temperaturänderung	[m]

Solche Dimensionsänderungen treten auch bei Holz und Holzwerkstoffen auf. Der Temperatureusdehnkoeffizient liegt bei Span- und Faserplatten im Bereich von  $\alpha_T \cong 10 \dots 15 \cdot 10^{-6}$  [1/K] /11/. Diese geringen Werte von  $\alpha_T$  würden bei einer Holzwerkstoffplatte von 1 m Länge und einer Temperaturänderung von 1 K lediglich zu einer Längenänderung von 0,010 mm bis 0,015 mm führen.

Da der Einfluss der Temperatur auf die Verformung sehr klein ist im Verhältnis zu den Verformungen durch das feuchtebedingte Quellen und Schwinden, bekommen die hygroskopischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen einen maßgebenden Einfluss auf das Verformungsverhalten (s. 4.2).

Betrachtet man z.B. das Verhalten von Holzwerkstoffen bei einer Temperaturzunahme, so findet neben der temperaturbedingten Dimensionszunahme in der Regel eine Trocknung des Materials statt. Die Folge dieser Trocknung ist das Schwinden, aus dem eine Dimensionsverringerung resultiert. Es finden somit zwei gegenläufige Prozesse statt. Die Abmessungen des Materials werden kleiner, da der Einfluss des Schwindens i. allg. wesentlich größer ist als der Einfluss aus der Temperaturdehnung. Aus diesen Gründen können die Verformungen infolge Temperaturänderungen bei Holz und Holzwerkstoffen vernachlässigt werden /11/.

Die auf den Werkstoff einwirkende Temperatur hat aber im Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchte des Umgebungsklimas einen Einfluss auf das Verformungsverhalten (s. 4.3.1 und 4.3.2).

## 4.2 Einfluss der Feuchte und hygroskopisches Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen

Wie bereits in 4.1 erwähnt, haben die Materialfeuchte und das daraus resultierende hygroskopische Verhalten einen wesentlich größeren Einfluss auf das Verformungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen als das Temperaturverhalten. Unter den hygroskopischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen versteht man die Aufnahme und Abgabe von Wasser aus der umgebenden Luft im Zusammenhang mit den daraus resultierenden Dimensionsänderungen. Diese Dimensionsänderungen werden als Quellen und Schwinden bezeichnet. Die Quell- und Schwindverformungen werden allgemein durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\Delta l = \alpha_u \cdot \frac{\Delta u}{100\%} \cdot l_0 \quad \text{Gleichung 2}$$

mit:

$\Delta l$ :	Längenänderung des Materials	[m]
$\alpha_u$ :	Feuchteausdehnkoeffizient des Materials	[% / %HF]
$\Delta u$ :	Änderung der Holzfeuchte	[% HF]
$l_0$ :	Ausgangslänge des Materials vor der Holzfeuchteänderung	[m]

Diese Gleichung ähnelt der Gleichung 1 mit dem Unterschied, dass an Stelle der Temperaturänderung die Änderung der Holzfeuchte steht. In der DIN 1052 wird für Holzwerkstoffe folgender Wertebereich für den Feuchteausdehnkoeffizienten  $\alpha_u$  angegeben:  $\alpha_u \cong 0,015 \dots 0,040$  [% / % $\Delta u$ ] /4/. Ein Bauteil mit einer Länge  $l_0 = 1$  m würde demnach infolge einer Änderung der Holzfeuchte um  $\Delta u = 1$  [%] eine Längenänderung von  $\Delta l \cong 0,15 \dots 0,40$  mm erfahren.

## 4.3 Materialfeuchte und Einflussfaktoren

Im Folgenden sollen die für die Materialfeuchte verantwortlichen Einflussfaktoren betrachtet werden. Hierzu zählen u. a. die relative Luftfeuchte  $\varphi$ , Temperatur, Hygroskopizität, der chemische und strukturelle Aufbau des Holzes bzw. der Holzwerkstoffe. Auch zählen verschiedene Mechanismen des Feuchtetransports dazu, welche vor allem auf die Geschwindigkeit der Feuchteaufnahme einen Einfluss haben. Zunächst wird in 4.3.1 die Materialfeuchte definiert und der Begriff der Sorption erläutert. In 4.3.2 werden anschließend die Zusammenhänge von Temperatur und Feuchte der Luft erläutert und in 4.3.3 und 4.3.4 die Mechanismen des Feuchtetransports in Materialien. Bei diesen Mechanismen wird in 4.3.4 besonders auf die Wasserdampfdiffusion und die damit verbundenen Begriffe eingegangen.

### 4.3.1 Materialfeuchte

Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen, kommt es bei einem Wechsel der äußeren Klimabedingungen zu einer Veränderung der Materialfeuchte. Findet eine Zunahme der Materialfeuchte statt, so resultiert daraus eine Dimensionsausdehnung, die als Quellen bezeichnet wird. Der entgegengesetzte Vorgang, das Trocknen bzw. die Abnahme der Materialfeuchte, geht mit einer Dimensionsverringerung einher und wird als Schwinden bezeichnet. Die Materialfeuchte kann entweder nach Gleichung 3 auf die Masse des Materials oder nach Gleichung 4 auf das Materialvolumen bezogen werden:

### Massenbezogener Feuchtegehalt

Der massenbezogene Feuchtegehalt eines Stoffes ist das Verhältnis aus dem Gewicht des in der Probe enthaltenen Wassers und dem Trockengewicht der Probe.

$$u_m = \frac{m_{\text{feucht}} - m_{\text{trocken}}}{m_{\text{trocken}}} * 100[\%] = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{trocken}}} * 100[\%] \quad \text{Gleichung 3}$$

mit:

$u_m$ :	massebezogener Feuchtegehalt	[%]
$m_{\text{feucht}}$ :	Masse der feuchten Proben	[kg]
$m_{\text{trocken}}$ :	Masse der darrtrockenen Proben	[kg]

### Volumenbezogener Feuchtegehalt

Der volumenbezogene Feuchtegehalt eines Stoffes ist das Verhältnis des Volumens des in der Probe enthaltenen Wassers zum Trockenvolumen der Probe.

$$u_v = u_m * \frac{\rho_M}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_M} * 100[\%] \quad \text{Gleichung 4}$$

mit:

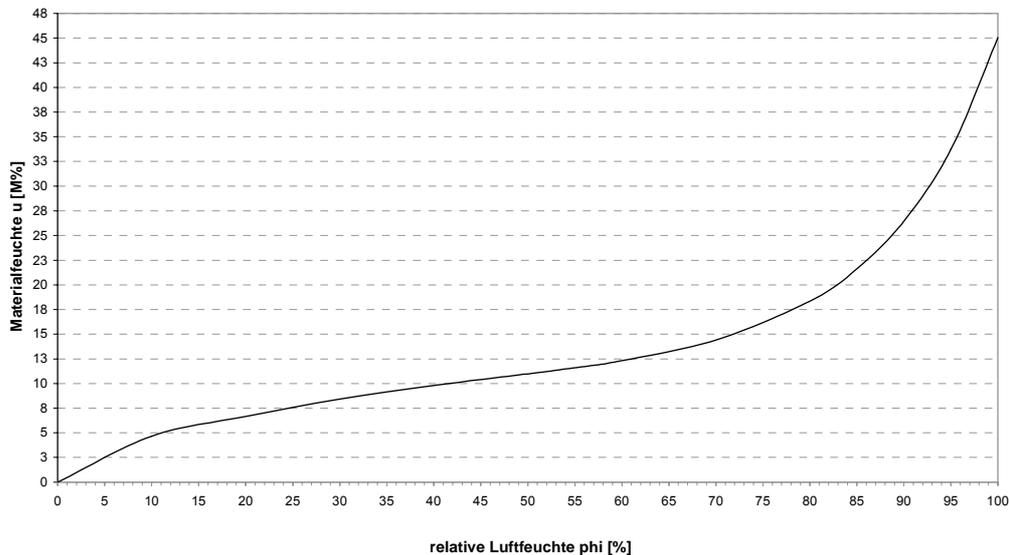
$u_v$ :	volumenbezogener Feuchtegehalt	[%]
$\rho_M$ :	Rohdichte des Stoffes	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ :	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$V_M$ :	Volumen der trockenen Probe	[m <sup>3</sup> ]
$V_{\text{H}_2\text{O}}$ :	Volumen des Wassers	[m <sup>3</sup> ]

Die hygroskopische Wasseraufnahme von Baustoffen bezeichnet man als Sorption. Die Sorption beschreibt den Vorgang der Anlagerung von Wassermolekülen an ein Material. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Luftfeuchte eines bestimmten Klimas und der daraus resultierenden Materialfeuchte, die sog. Ausgleichsfeuchte des Materials, wird mit den sogenannten Sorptionsisothermen beschrieben.

### Sorptionsisotherme

Zwischen dem Feuchtegehalt der Umgebungsluft und der Materialfeuchte besteht ein Zusammenhang, der sich bei konstanten Temperaturverhältnissen durch die materialspezifische Sorptionsisotherme beschreiben lässt. Bei konstanter Temperatur bildet die Sorptionsisotherme also den Verlauf der Materialfeuchte bei sich ändernder Luftfeuchte ab. Die Sorptionsisothermen verlaufen bei verschiedenen Temperaturen nicht gleich. Im allgemeinen stellen sich bei Holz und Holzwerkstoffen bei niedrigeren Temperaturen und ansonsten gleicher relativer Luftfeuchte höhere Materialfeuchten ein als bei höheren Temperaturen. Auch zwischen Adsorptionskurve (Sorptionsisotherme der Auffeuchtungsphase) und der Desorptionskurve (Sorptionsisotherme der Trocknungsphase) gibt es Unterschiede, die als Hysterese bezeichnet werden. In der Praxis werden Hystereseerscheinungen in der Regel vernachlässigt, so dass zwischen Adsorptions- und Desorptionsisotherme gemittelt wird.

Das Diagramm in Abbildung 1 zeigt schematisch ein Beispiel für den Verlauf einer Sorptionsisothermen:



**Abbildung 1: schematische Darstellung einer Sorptionsisotherme**

Solche Sorptionsisothermen bilden die Grundlage für die Berechnungen mit dem FEM-Programm ANSYS. In Kapitel 5.3.2 wird noch einmal auf die Verwendung dieser Diagramme und ihr Zusammenspiel mit ANSYS eingegangen. Ein Vergleich der theoretischen Ausgleichsfeuchte mit den praktisch erreichten wird in Kapitel 5.3.3.1 erfolgen.

Die hygroskopischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen haben eine Feuchteabgabe bzw. Feuchteaufnahme bei entsprechender Änderung der Klimarandbedingungen zur Folge.

### 4.3.2 Luftfeuchte

Eine Benetzung mit flüssigem Wasser wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, d. h. auch keine kondensierende Luftfeuchte an Oberflächen. Damit sind die Temperatur und die Wasserdampfkonzentration bzw. der Wasserdampfpartialdruck der umgebenden Luft die für das Feuchteverhalten der hier betrachteten Materialien maßgebenden Größen des Umgebungsklimas. Luft kann im baupraktischen Bereich als ideales Gas betrachtet werden. Die Zustandsgleichung des idealen Gases (Gleichung 5) setzt die maßgebenden Größen in Beziehung zueinander. Betrachtet man das Verhältnis von Masse und Volumen als Konzentration, kann daraus eine Gleichung für den Dampfdruck (Gleichung 6) bzw. die Wasserdampfkonzentration abgeleitet werden (Gleichung 7).

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

p:	Druck bzw. Partialdruck	[Pa]
V:	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
m:	Gasmasse	[kg]
R:	spezifische Gaskonstante	[J/kgK]
T:	Temperatur	[K]

$$p = c \cdot R \cdot T \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

c:	Feuchtekonzentration aus $c = m / V$	[kg/m <sup>3</sup> ]
----	--------------------------------------	----------------------

$$\text{bzw. } c = \frac{p}{R \cdot T} \quad \text{Gleichung 7}$$

Luft kann bei einer bestimmten Temperatur immer nur eine definierte maximale Menge an Wasserdampf aufnehmen, die sog. Sättigungsmenge bzw. Sättigungskonzentration. Der Wasserdampfgehalt wird i. allg. als Verhältnis von tatsächlich vorhandener Wasserdampfkonzentration bezogen auf diese Sättigungskonzentration bzw. von Partialdampfdruck zu Sättigungsdampfdruck angegeben und dann als relative Luftfeuchte  $\varphi$  bezeichnet (siehe Gleichung 8 bzw. Gleichung 9).

$$\varphi = \frac{c_D}{c_S} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 8}$$

bzw.

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 9}$$

mit:

$\varphi$ :	relative Luftfeuchte	[%]
$c_D$ :	vorhandene Konzentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_S$ :	Sättigungskonzentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
$p_D$ :	Partialdampfdruck	[Pa]
$p_S$ :	Sättigungsdampfdruck	[Pa]
$\vartheta$ :	Bezugstemperatur	[K]

Das Umgebungsklima stellt, wie bereits erwähnt, einen Teil der äußeren Belastungen der Materialien dar und ist für ihren Feuchtezustand verantwortlich. Die Feuchteaufnahmefähigkeit eines Materials und die Dauer des Prozesses der Durchfeuchtung richten sich nach verschiedenen Faktoren und Mechanismen, die im Folgenden näher erörtert werden.

### 4.3.3 Mechanismen des Feuchttransportes

Beim Feuchttransport handelt es sich um eine Stoffübertragung, bei der Wasser in gasförmiger oder flüssiger Phase über eine Grenzfläche hinweg transportiert wird. Die Stoffübertragung lässt sich gliedern in den Stoffübergang  $\beta$  und den Stoffdurchgang. Hier soll nur der Stoffdurchgang in der dampfförmigen Phase, die Wasserdampfdiffusion, betrachtet werden, da der Stoffübergang demgegenüber im allgemeinen klein ist. Andere Transportmechanismen wie die Lösungsdiffusion, die Oberflächendiffusion und die Kapillarleitung werden hier nicht weiter betrachtet, weil ihr Ein-

fluss bei diesen Betrachtungen gering oder nicht relevant ist. Allerdings soll nicht unerwähnt bleiben, dass der Einfluss der Lösungsdiffusion mit zunehmender Materialfeuchte ansteigt.

#### 4.3.4 Wasserdampfdiffusion

Der Transport von Wasser in der gasförmigen Phase, also als Wasserdampf, wird in der Bauphysik verallgemeinert als Diffusion bezeichnet. Dabei beschreibt Diffusion einen Ausgleichsprozess, bei dem sich Wassermoleküle infolge Brown'scher Molekularbewegung von Orten höherer zu Orten niedriger Konzentration bewegen. Für den stationären Vorgang, also Diffusion bei konstantem Konzentrationsgefälle, wird die Diffusion durch das 1. Fick'sche Gesetz beschrieben:

$$i = -D * \frac{dc}{dx} \quad \text{Gleichung 10}$$

mit:

i:	Diffusionsstromdichte	[kg/m <sup>2</sup> h]
D:	Diffusionskoeffizient	[m <sup>2</sup> /h]

Der gerichtete Massenstrom  $i$  ist darin abhängig vom Konzentrationsgefälle  $dc/dx$ , welches das treibende Potential für den Diffusionsvorgang darstellt und dem Diffusionskoeffizienten  $D$ , der das Maß für die Durchlässigkeit eines Mediums gegenüber den darin diffundierenden Teilchen darstellt. Dabei hängt  $D$  sowohl von der Art der diffundierenden Teilchen als auch von der Art des Mediums ab. Das Minuszeichen vor  $D$  berücksichtigt, dass sich der Massenstrom in Richtung des Konzentrationsgefälles bewegt.

Da die Diffusion einen molekularen Ausgleichsvorgang darstellt, also von einem zeitlich veränderlichen Konzentrationsgefälle an einem betrachteten Ort auszugehen ist, ergibt sich folgende mathematische Beschreibung des Prozesses:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Gleichung 11}$$

mit:

i:	Diffusionsstromdichte	[kg/m <sup>2</sup> h]
-D:	Diffusionskoeffizient	[m <sup>2</sup> /h]

Diese, aus der Bilanzierung der Massenströme hergeleitete, Differenzialgleichung wird als 2. Fick'sches Gesetz bezeichnet.

Potentialgröße in den Fick'schen Gesetzen ist die Stoffkonzentration. Im Bereich der Bauphysik ist aber nur der Wasserdampfgehalt bzw. der Wasserdampfdruck  $p_D$  der Luft von Bedeutung. Deshalb wird hier allgemein der Wasserdampfdruck als Potentialgröße eingesetzt. Folgt man den Betrachtungen zur Luftfeuchte in 4.3.2 kann die Konzentration in Gleichung 10 durch den Ausdruck aus Gleichung 7 ersetzt werden. Dann ergibt sich folgende Gleichung für den Diffusionsstrom, mit dem Wasserdampfdruck als Potentialgröße:

$$i_D = \frac{D}{R * T} * \frac{dp_D}{dx} \quad \text{Gleichung 12}$$

Der erste Ausdruck auf der rechten Seite von Gleichung 12 wird als Diffusionsleitkoeffizient  $\delta_L$  für die Wasserdampfdiffusion in Luft bezeichnet und ist dann anzuwenden, wenn ein Wasserdampfdruckgefälle als auslösende Ursache der Diffusion vorliegt.

Bis hierher gelten die Betrachtungen für Wasserdampfdiffusion in Luft. Im baupraktischen Bereich kommt ein Effusion genannter Effekt hinzu, der für den gegenüber Luft erhöhten Widerstand von festen Stoffen gegen Diffusion verantwortlich ist. In den feinen Poren von Baustoffen kommt es zwangsläufig zu Zusammenstößen von diffundierenden Molekülen mit den Porenwänden. Treten die Zusammenstöße mit den Porenwänden häufiger auf als die mit anderen diffundierenden Molekülen, spricht man von Effusion. Bei Porenradien  $< 5 \cdot 10^{-9}$  m tritt reine Effusion auf, d. h. der Molekültransport wird nur noch von den Zusammenstößen mit den Porenwänden bestimmt. In Porenradien  $> 10^{-6}$  m herrscht Fick'sche Diffusion, im Größenbereich dazwischen spricht man von einem Mischtransport. Diese Vorgänge sind allerdings auch temperatur- und druckabhängig. Im bauphysikalischen Bereich wird das Zusammenwirken von Diffusion und Effusion durch die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  ausreichend genau beschrieben. Die Diffusionswiderstandszahl ist ein dimensionsloser Stoffkennwert der experimentell nach DIN EN ISO 12572 bestimmt werden kann /12/. Der Wert gibt an, um welchen Faktor der Massenstrom durch eine Materialschicht kleiner ist als der durch eine gleich dicke Luftschicht. Mit diesem Widerstand ergibt sich für den Diffusionsstrom durch einen Baustoff:

$$i_D = \frac{1}{\mu} * \frac{D}{R * T} * \frac{dp_D}{dx} = \frac{1}{\mu} * \delta_L * \frac{dp_D}{dx} \quad \text{Gleichung 13}$$

mit:

$\mu$ :	Diffusionswiderstandszahl	[-]
$\delta_L$ :	Diffusionsleitkoeffizient der Luft	[kg/mhPa]

Der kleinste mögliche Wert von  $\mu$  ist 1, was dem Diffusionswiderstand ruhender Luft entspricht. Zur Kennzeichnung der Dampfdichtheit von Bauteilschichten reicht der Diffusionswiderstand allein nicht aus, da auch die Dicke der Schichten für die Größe des Widerstandes gegen Wasserdampfdiffusion verantwortlich ist. Deshalb wurde die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  eingeführt:

$$s_d = \mu * s \quad \text{Gleichung 14}$$

mit:

s:	Schichtdicke	[m]
----	--------------	-----

Die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke gibt an, welche Dicke eine ruhende Luftschicht aufweisen müsste, um den gleichen Diffusionswiderstand zu erreichen wie die betrachtete Bauteilschicht.

### Weitere Wasserdampfdiffusionstechnische Kenngrößen

Im Folgenden werden einige weitere Wasserdampfdiffusionstechnische Kenngrößen kurz beschrieben.

#### Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand $1/\Delta$

Mit den bereits eingeführten Größen wird der Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand für die Baustoffe definiert (s. Gleichung 15). Darin entspricht der Kehrwert von  $\delta_L$  dem Wasserdampfdiffusionswiderstand von Luft, der im baupraktischen Bereich hinreichend genau mit  $1/\delta_L = 1,48 * 10^6$  mhPa/kg angegeben werden kann. Dieser Durchlasswiderstand beschreibt die Behinderung des Wasserdampftransports durch ein Bauteil.

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{\delta_L} * \mu * s$$

Gleichung 15

mit:

1 /  $\Delta$ : Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand [m<sup>2</sup>hPa/kg]1 /  $\delta_L$ : Wasserdampfdiffusionswiderstand von Luft [mhPa/kg]

### Wasserdampf-Diffusionsstromdichte $m_D$

Die Dichte des Wasserdampf-Diffusionsstromes durch die Bauteile in Abhängigkeit von der Dampfpartialdruckdifferenz kann mit den nun vorliegenden Größen nach Gleichung 16 berechnet werden. Sie hängt nur noch von der Dampfpartialdruckdifferenz und dem Diffusionsdurchlasswiderstand ab. Die Partialdampfdrücke lassen sich durch Umstellen von Gleichung 9 ermitteln. Der Sättigungsdampfdruck  $p_s$  kann für gegebene Temperaturen vielfach Tabellen, wie z. B. in der DIN 4108-3, entnommen oder mit der sog. Magnus-Formel nach DIN 50010-2 berechnet werden /13, 14/.

$$m_D = \frac{p_{Li} - p_{La}}{\frac{1}{\Delta}} = \frac{\delta_L * (p_{Li} - p_{La})}{\mu * s}$$

Gleichung 16

mit:

 $m_D$ : Dampfstromdichte [kg/(m<sup>2</sup>h)] $p_{Li/La}$ : Partialdrücke Innen- und Außenluft [Pa]

## 4.4 Vergleich wärme- und feuchtetechnischer Kenngrößen

In Kapitel 5.3 werden feuchtetechnische Berechnungen mit dem Programmsystem ANSYS durchgeführt. Da es mit der vorliegenden Version von ANSYS bisher nur möglich ist Wärmeberechnungen durchzuführen, wird im Folgenden ein Vergleich wärme- und feuchtetechnischer Kenngrößen durchgeführt, der zeigen soll, dass die wärmetechnischen Kennwerte durch die feuchtetechnischen ersetzt werden können. Hier wird auch deutlich, welche Materialkennwerte für die Berechnungen mit ANSYS benötigt werden.

### 4.4.1 Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK] ist die Wärmemenge  $Q_L$ , die innerhalb von einer Stunde durch 1,0 m<sup>2</sup> einer 1,0 m dicken Schicht eines Stoffes hindurchgeleitet wird, wenn eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen von  $\Delta\theta = 1$  Kelvin herrscht.

Dichte, Struktur und Stofffeuchte beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit eines Materials. Die Voraussetzung für den Wärmetransport ist Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen.

Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_R$  verschiedener Baustoffe und für die hier betrachteten Holzwerkstoffe finden sich z. B. in DIN EN 12524 /15/.

#### 4.4.2 Spezifische Wärmekapazität c

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  [J/kgK] entspricht der Wärmemenge, die nötig ist, um einen Stoff mit der Masse von 1,0 kg um ein  $\Delta\theta$  von 1,0 Kelvin zu erwärmen. Bei diesen Betrachtungen wird die spezifische Wärmekapazität als konstant angenommen, obwohl auch sie sich mit der Materialfeuchte ändert.

Rechenwerte für die spezifische Wärmekapazität von Baustoffen finden sich ebenfalls in DIN EN 12524 /15/.

Die Sorptionsfähigkeit eines Materials kann in gewisser Weise mit der spezifischen Wärmekapazität verglichen und für die Berechnungen mit ANSYS genutzt werden. Dieser Vergleich erfolgt in Kapitel 5.3 auf den Seiten 35 bis 36 zusammen mit der funktionalen Beschreibung der verwendeten Sorptionsisothermen nach Greubel/Drewes /16/.

Um mit dem Programmsystem ANSYS Diffusionsberechnungen durchführen zu können, müssen die beiden oben beschriebenen Parameter angepasst werden. Für diese Anpassung der Parameter der Diffusionsberechnung an die der Wärmeberechnung wird ein Vergleich zwischen Wärme- und Wasserdampfdiffusionskenngrößen herangezogen.

#### 4.4.3 Kenngrößenvergleich

##### Wärmedurchlasswiderstand $1/\Lambda$ - Diffusionsdurchlasswiderstand $1/\Delta$

$$\frac{1}{\Lambda} = \sum_i \frac{s_i}{\lambda_i} \quad \text{Gleichung 17}$$

mit:

$1/\Lambda$ : Wärmedurchlasswiderstand [m<sup>2</sup>K/W]

$s_i$ : Schichtdicke [m]

$\lambda_i$ : Wärmeleitfähigkeitskoeffizient [W/mK]

$$\frac{1}{\Delta} = \sum_i \frac{s_i \cdot \mu_i}{\delta_i} \quad \text{Gleichung 18}$$

mit:

$1/\Delta$ : Diffusionsdurchlasswiderstand [m<sup>2</sup>hPa/kg]

$s_i$ : Schichtdicke [m]

$\mu_i$ : Diffusionswiderstandszahl [-]

$\delta_i$ : Diffusionsleitkoeffizient [kg/mhPa]

##### Wärmedurchgangskoeffizient U - Diffusionsdurchgangskoeffizient $k_D$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_i \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad \text{Gleichung 19}$$

mit:

U: Wärmedurchgangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

$\alpha_{i/a}$ : Wärmeübergangskoeffizient innen/außen [W/m<sup>2</sup>K]

$$k_D = \frac{1}{\frac{1}{\beta_i} + \sum \frac{s_i}{\delta_i} + \frac{1}{\beta_a}}$$

Gleichung 20

mit:

$k_D$ :	Diffusionsdurchgangskoeffizient	[kg/m <sup>2</sup> hPa]
$\beta_{i/a}$ :	Diffusionsübergangskoeffizient innen/außen	[kg/m <sup>2</sup> hPa]
	vernachlässigbar klein im Verhältnis zu $s_i / \delta_i$	

### Transportierte Wärmemenge Q - Transportierte Wassermasse G

$$Q = A * (\vartheta_1 - \vartheta_2) * t * U$$

Gleichung 21

mit:

Q:	transportierte Wärmemenge	[J]
$\vartheta_{1/2}$ :	Temperatur innen/außen	[K]
t:	Zeit	[h]

$$G = A * (p_1 - p_2) * t * k_D$$

Gleichung 22

mit:

G:	transportierte Wassermasse	[kg]
$p_{1/2}$ :	Dampfdruck innen/außen	[Pa]
t:	Zeit	[h]

Die Gegenüberstellung der Gleichungen für die wärmetechnische Berechnung mit denen für die diffusionstechnische Berechnung zeigt, dass die Kenngrößen unterschiedliche Vorgänge mit vergleichbaren Transportmodellen beschreiben. Welche Bedeutung das im Einzelnen für die Berechnungen mit dem FEM-Programm ANSYS hat, mit dem vergleichende Berechnungen zur Plattenverformung durchgeführt werden, wird in Kapitel 5.3 im Zusammenhang mit der Beschreibung des Programmsystems ANSYS und der Erläuterung der benötigten Materialkenngrößen beschrieben. Die aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den wärme- und feuchtetechnischen Kenngrößen können für die Simulation mit ANSYS genutzt werden.

## 5 Versuche in Doppelklimakammern

### 5.1 Versuch mit zwei Plattenwerkstoffen

Bei diesem Versuch wurden zwei Plattenwerkstoffe verschiedenen Differenzklimaten ausgesetzt und deren Formänderung bis zum Erreichen des Feuchtgleichgewichts gemessen. Hauptsächlich ging es bei diesem Versuch darum, die maximalen Verformungen bei definierten Klimabedingungen und einfachen, definierten Lagerungsbedingungen zu ermitteln.

#### 5.1.1 Versuchsaufbau

Für diese erste Versuchreihe wurde ein einfacher Wandaufbau gewählt. Er bestand aus je zwei Riegeln und zwei unterschiedlichen Holzwerkstoffplatten. Die Verbindung zwischen Riegel und Holzwerkstoffplatten wurde so mit Schrauben realisiert, dass die Platten einachsrig gespannt gelagert waren. Die Belastung des Versuchsaufbaus mit unterschiedlichen Klimaten wurde in der kleinen Doppelklimakammer (KDKK) des WKI durchgeführt. Diese Klimakammer besteht aus zwei getrennten Kammern, in denen sich unabhängig voneinander die gewünschten Klimabedingungen einstellen lassen. Zwischen diesen Kammern wurde ein Rahmen montiert, in dem sich der

Versuchs- bzw. Wandaufbau befand. Die Versuchswände wurden in der KDKK mit verschiedenen Differenzklimaten belastet und ihr Verformungsverhalten aufgezeichnet. Ein Überblick über die verschiedenen Klimate und die Dauer der jeweiligen Belastung findet sich in Kapitel 5.1.2. Die Abbildung Anhang 31 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Versuchswände.

In Tabelle 1 finden sich die Materialkennwerte der beiden Versuchsplatten. Sie wurden für die MDF-Platte soweit vorhanden aus dem technischen Datenblatt des Herstellers entnommen. Die nicht im Datenblatt vorhandenen Werte der MDF-Platte und die Kennwerte der Spanplatte, wurden aus der DIN 1052 und DIN EN 12524 ergänzt /4, 15/. Nach Beendigung des Versuches wurden die Startfeuchte und die Materialfeuchten zu bestimmten Zeitpunkten, die Rohdichte, der Feuchteausdehnkoeffizient  $\alpha_u$  und der E-Modul für jede Platte bestimmt, um die genauen Eigenschaften der Platten zu ermitteln.

Aus jeder der beiden Platten wurden je sechs Referenzproben mit den Abmessungen 300 \* 50 mm angefertigt. Anhand dieser Proben wurden die Masseänderungen während, und die Verformungen am Ende der jeweiligen Klimabelastung gemessen. Dies sollte zum einen eine Aussage über den Fortschritt der Angleichung der Materialfeuchte an das jeweils herrschende Klima ermöglichen, wodurch der Zeitpunkt für den Klimawechsel festgelegt werden konnte (s. u.). Zum zweiten diente die Vermessung der Referenzproben am Ende jeden Teilschrittes der Bestimmung des Feuchteausdehnkoeffizienten  $\alpha_u$  nach Abschluss der Versuchsreihe.

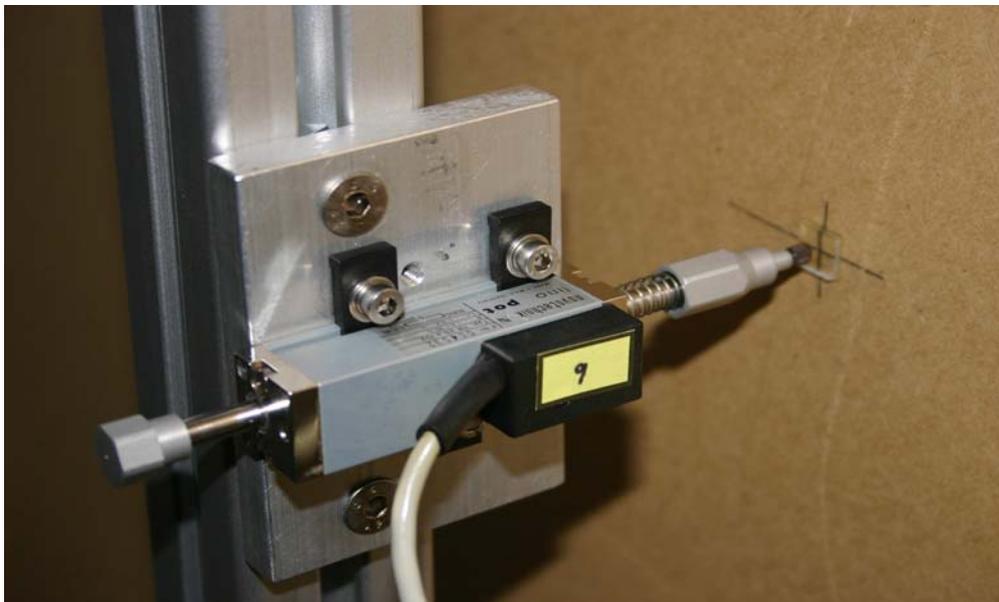
**Tabelle 1: Materialkennwerte der verwendeten Holzwerkstoffplatten**

		MDF-Platte	Phenolharzgebundene Spanplatte
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	625 ± 25	ca. 600
Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]	> 2000	2900 - 4200
Schubmodul [DIN 1052]	[N/mm <sup>2</sup> ]	200	200
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]	0,10	0,14
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl ( $\mu$ -Wert)	[-]	11 / 11	50 / 15
Feuchteausdehnkoeffizient $\alpha_u$	[%/%]	0,035	0,035

Der Einfluss der Temperatur ist, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, im Vergleich zu dem der Feuchte sehr gering. Deshalb wurde während des Versuches die Temperatur in beiden Kammern gleich und über den gesamten Zeitraum auf konstant 20°C gehalten. Dies hatte zudem den Vorteil, dass auf eine Wärmedämmung zwischen den Riegeln verzichtet werden konnte. Die relative Luftfeuchte wurde nur auf der Kaltkammerseite variiert, die von den Riegeln abgewandt war, während sie auf der anderen Seite konstant 65 % betrug. Dadurch wurde die Anzahl der variierten Parameter möglichst gering gehalten und die Gefahr einer Verformung der Riegel minimiert. So konnte die Anzahl von möglichen Fehler- und Störquellen reduziert und zugleich eine Verringerung der Variablen für die rechnerische Simulation erreicht. Mit dem Programmsystem ANSYS kann zwar eine Vielzahl von Materialeigenschaften und Modellformen erfasst werden. Es galt aber vorerst, auf möglichst einfachen Grundlagen für die Berechnung der Verformungen und den Vergleich mit den Messergebnissen aufzubauen, um einen Eindruck der Möglichkeiten der Modellbildung und der Eignung des Programmsystems ANSYS für die Verformungsberechnung infolge Wechselklimabedingungen überhaupt zu erhalten. Dies ließ sich durch die Variablenreduktion und den weitgehenden Ausschluss von Fehlerquellen realisieren.

Die Plattenverformungen wurden im Versuch mit Wegaufnehmern vom Typ „lino pot“ aufgezeichnet. Diese Wegaufnehmer können Verformungen mit einer Genauigkeit von 0,1 mm erfassen. Die Positionierung der Wegaufnehmer erfolgte auf beiden Seiten der Versuchsplatten in den jeweiligen Drittelpunkten. Die Abbildung Anhang 32 zeigt die Positionen der Wegaufnehmer auf einer der Platten. Abbildung 2 zeigt einen der insgesamt 12 verwendeten Wegaufnehmer. Die Daten der Wegaufnehmer wurden in 10 Sekunden Intervallen mit einem Datenlogger aufgezeichnet und an einen Computer übertragen. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in Textdateien, die eine weitere Bearbeitung und Auswertung mit geeigneten Computerprogrammen ermöglichen.

Eine Betrachtung der während des Versuchsablauf auftretenden Verformungen erfolgt in Kapitel 5.1.3.



**Abbildung 2: Wegaufnehmer der Firma „novotechnik“ zur Erfassung der Plattenverformungen**

### 5.1.2 Versuchsablauf

Nach der Fertigstellung der Versuchswände wurden diese zwischen die beiden Klimakammern montiert und die Referenzproben in die Kammern eingelagert. Bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz der Referenzproben wurden die Versuchswände daraufhin mit dem Referenzklima 20 °C / 65 % r. F. vorklimatisiert.

Während dieser Zeit wurden die Wegaufnehmer montiert, justiert und angeschlossen. Nach Abschluss aller Arbeiten und dem Erreichen der Massekonstanz der Referenzproben wurde auf der Kaltkammerseite der 1. Klimawechsel eingeleitet.

Folgende Klimawechsel wurden für die Klimatisierung der Kaltkammerseite vorgesehen:

- |               |                          |                              |
|---------------|--------------------------|------------------------------|
| • Startklima: | 20 °C / 65 % Luftfeuchte | } ein kompletter Klimazyklus |
| • 1.Wechsel:  | 20 °C / 30 % Luftfeuchte |                              |
| • 2.Wechsel:  | 20 °C / 85 % Luftfeuchte |                              |
| • 3.Wechsel:  | 20 °C / 65 % Luftfeuchte |                              |
| • 4.Wechsel:  | 20 °C / 30 % Luftfeuchte |                              |
| • 5.Wechsel:  | 20 °C / 85 % Luftfeuchte |                              |
| • Versuchende |                          |                              |

Die Zeitpunkte der jeweiligen Klimaumstellung wurden vor Versuchsbeginn nicht festgelegt, sondern sollten durch zwei Grenzkriterien bestimmt werden. Zum einen war dies das Erreichen der Massekonstanz der Referenzproben, die das sich einstellende Feuchtegleichgewicht anzeigt. Die Bestimmung erfolgte in Anlehnung an die Vorgaben der DIN EN 322 /17/. Danach wird bei der Darrtrocknung die Massekonstanz als erreicht angesehen, wenn innerhalb von 24 Stunden die Materialfeuchteänderung  $\Delta u \leq 0,1$  M.-% beträgt. Dieses Kriterium wurde in diesem Fall für das Erreichen des Feuchtegleichgewichts festgelegt.

Das zweite Kriterium für eine Klimaumstellung war das Ende der über die Wegaufnehmer gemessenen Verformungen. Analog zur Bewertung der Materialfeuchteänderung wurde das Ende der Verformungen als erreicht angesehen, wenn die Änderung der Verformungen innerhalb von 24 Stunden weniger als 0,1 mm betragen.

Erst wenn beide Grenzkriterien erreicht waren, erfolgte die Klimaumstellung. Tabelle 2 zeigt die Dauer der einzelnen Klimabelastungen bis zum Erreichen der Umstellungskriterien sowie die kumulierte Gesamtlaufzeit der Klimatisierung des Versuchsaufbaus.

**Tabelle 2: Tatsächliche Laufzeit der Wechselklimare und Gesamtlaufzeit des Versuches**  
Klimawechsel

	von	nach	Klimalaufzeit [Std]	Gesamtlaufzeit [Std]
	START	20°C / 65%		0,0
			8,50	
1.Wechsel	20°C / 65%	20°C / 30%		8,50
			140,50	
2.Wechsel	20°C / 30%	20°C / 85%		149,00
			478,50	
3.Wechsel	20°C / 85%	20°C / 65%		627,50
			240,50	
4.Wechsel	20°C / 65%	20°C / 30%		868,00
			241,00	
5.Wechsel	20°C / 30%	20°C / 85%		1109,00
			43,00	
	20°C / 85%	ENDE		1152,00

Die für die Bestimmung der Feuchteausdehnkoeffizienten  $\alpha_u$  benötigten Dimensionsänderungen der Referenzproben wurden am Ende eines jeden Teilzyklus mit einem Präzisionsmessschieber gemessen.

Die Ergebnisse und Auswertungen der Gewichtsmessungen sowie der Verformungsmessungen mittels Wegaufnehmer enthält Kapitel 5.1.3.

## 5.1.3 Ergebnisse und Auswertung

### 5.1.3.1 Ermittlung der Materialfeuchten

Die Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen die aufgenommenen Messwerte der Referenzproben. Jeweils drei Proben von jedem Material befanden sich in jeder der beiden Klimakammern. Die Messungen erfolgten in regelmäßigen Abständen. Dargestellt sind nur die Messwerte die unmittelbar vor den Klimawechseln ermittelt wurden.

**Tabelle 3: Masse [g] der Referenzproben der MDF-Platte**

Laufzeit [Std]			0,00	168,00	648,00	864,00
Klima		trocken	20°C / 65%	20°C / 30%	20°C / 85%	20°C / 65%
Probe 1 KK	KK	117,075	129,217	125,628	132,806	130,328
Probe 2 KK		117,394	129,566	125,973	133,171	130,695
Probe 3 KK		116,980	129,095	125,515	132,680	130,212
Klima			20°C / 65%			
Probe 4 WK	WK	116,331	128,333	128,295	128,223	128,200
Probe 5 WK		117,275	129,314	129,273	129,198	129,175
Probe 6 WK		117,526	129,530	129,489	129,415	129,394

**Tabelle 4: Masse [g] der Referenzproben der Phenolharzgebundenen Spanplatte**

Laufzeit [Std]			0,00	168,00	648,00	864,00
Klima		trocken	20°C / 65%	20°C / 30%	20°C / 85%	20°C / 65%
Probe 1 KK	KK	142,136	158,14	153,806	164,683	160,622
Probe 2 KK		143,248	159,70	155,196	166,027	161,963
Probe 3 KK		144,206	160,64	156,258	167,187	163,092
Klima			20°C / 65%			
Probe 4 WK	WK	142,840	158,99	158,946	158,846	158,820
Probe 5 WK		143,700	159,81	159,775	159,690	159,669
Probe 6 WK		143,358	159,92	159,853	159,710	159,674

Aus den ermittelten Massen, lassen sich die Materialfeuchten in M.-% nach Gleichung 3 zu den jeweiligen Zeitpunkten ermitteln. Dazu wurde nach Beendigung der Versuchsreihe das Trockengewicht der Proben durch Darrtrocknung bei 103 °C in einem Trockenschrank gemäß den Vorgaben der DIN EN 322 bestimmt /17/. Die ermittelten Holzfeuchten sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 5: Holzfeuchte [M.-%] der Referenzproben der MDF-Platte**

Laufzeit [Std]			0,00	168,00	648,00	864,00
Klima		trocken	20°C / 65%	20°C / 30%	20°C / 85%	20°C / 65%
Probe 1 KK	KK	0,00	10,37	7,31	13,44	11,32
Probe 2 KK		0,00	10,37	7,31	13,44	11,33
Probe 3 KK		0,00	10,36	7,30	13,42	11,31
Klima			20°C / 65%			
Probe 4 WK	WK	0,00	10,32	10,28	10,22	10,20
Probe 5 WK		0,00	10,27	10,23	10,17	10,15
Probe 6 WK		0,00	10,21	10,18	10,12	10,10

**Tabelle 6: Holzfeuchte [M%] der Referenzproben der phenolharzgebundenen Spanplatte**

Laufzeit [Std]		0,00	168,00	648,00	864,00
Klima	trocken	20°C / 65%	20°C / 30%	20°C / 85%	20°C / 65%
Probe 1 KK	KK	0,00	11,26	8,21	15,86
Probe 2 KK		0,00	11,48	8,34	15,90
Probe 3 KK		0,00	11,40	8,36	15,94
Klima		20°C / 65%			
Probe 4 WK	WK	0,00	11,31	11,28	11,21
Probe 5 WK		0,00	11,21	11,19	11,13
Probe 6 WK		0,00	11,55	11,51	11,41

### 5.1.3.2 Bestimmung des Feuchteausdehnkoeffizienten $\alpha_u$ und der Rohdichte der Holzwerkstoffplatten

Zur Bestimmung des Feuchteausdehnkoeffizienten  $\alpha_u$  wurden die Dimensionsänderungen der Referenzproben kurz vor jedem Klimawechsel mit einem Präzisionsmessschieber aufgenommen. Die Ablesegenauigkeit des Messschiebers beträgt 0,01 mm. Da die Klimawechsel nur auf der Kaltseite der DKK vollzogen wurden, standen je 3 Proben der MDF-Platte und der phenolharzgebundenen Spanplatte für die Auswertung zur Verfügung.

Mit den so ermittelten Abmessungen, sowohl im feuchten, als auch im darrtrockenen Zustand, kann nicht nur der jeweilige  $\alpha_u$ -Wert bestimmt werden, sondern auch die Trockenrohddichte der Proben, da zur Ermittlung der Dichte das durch Darrtrocknung bestimmte Trockengewicht benötigt wird.

Der Feuchteausdehnkoeffizient wird durch Umstellen von Gleichung 2 nach  $\alpha_u$  berechnet (s. Gleichung 23).

$$\alpha_u = \frac{\Delta l * 100}{l_0 * \Delta u} \quad \text{Gleichung 23}$$

Die Trockenrohddichte wird nach der allgemein bekannten Gleichung 24 ermittelt.

$$\rho_{\text{trocken}} = \frac{m_{\text{trocken}}}{V_{\text{trocken}}} \quad \text{Gleichung 24}$$

mit:

$\rho_{\text{trocken}}$ :	Trockendichte der Referenzproben	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m_{\text{trocken}}$ :	Masse der Proben nach der Darrtrocknung	[g]
$V_{\text{trocken}}$ :	Volumen der darrtrockenen Proben	[cm <sup>3</sup> ]

Die so ermittelten Werte der beiden Größen sind in den Tabellen Anhang 33 bis Anhang 36 dargestellt.

### 5.1.3.3 Bestimmung des E-Moduls mit 3-Punkt-Biegeversuch

Zur Bestimmung des E-Moduls der eingesetzten Holzwerkstoffe wurden 3-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Hierzu wurden Referenzproben der Abmessung 300 \* 50 mm, die im Normalklima 20°C / 65 % r. F.gelagert wurden, mit einer Zwick Prüfmaschine (Typ 1474) einer definierten Biegebelastung ausgesetzt und bis zum Versagen der Proben belastet. Die maximale Druckkraft, die durch den Prüfkopf aufgebracht werden kann, beträgt 100 kN. Ein mittig zwischen den Auflagern unter der Probe und somit auch direkt unter dem Prüfkopf justierter Messarm misst die entstehenden Verformungen mit einer Genauigkeit von 0,0025 mm. Die Ermittlung des E-Moduls erfolgt über die Betrachtung des linearen Bereich des Spannungs-Verformungs-Verlaufes. Zur Berechnung werden die vorhandenen Spannungen von 5 und 25 % der maximalen Biegefestigkeit herangezogen.

Die Ergebnisse der Prüfung wurden über die Zwick PC-Software Z 7005 aufgezeichnet und ausgewertet. Im Folgenden werden die benötigten Eingabeparameter für die Berechnung und die Parameter der Ausgabe aufgeführt:

#### Eingabeparameter

- Probenlänge l [mm]
- Probenbreite b [mm]
- Probenhöhe h [mm]
- Probengewicht m [g]
- Stützweite  $l_v$  [mm]
- E-Modul in % von  $F_{max}$  [%]
- Prüfgeschwindigkeit v [mm/min]
- Vorkraft  $F_v$  [N]

#### Ausgegebene Prüfergebnisse

- Rohdichte  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]
- Maximale Biegekraft  $F_{max}$  [N]
- Maximale Spannung  $\sigma_{max}$  [N/mm<sup>2</sup>]
- E-Modul E [N/mm<sup>2</sup>]
- Prüfzeit [s]
- Spannungs-Verformungs-Diagramm

Die probenbezogenen Eingabeparameter wurden direkt vor der Prüfung der Referenzproben aufgenommen. Da die Proben im Vorlauf dieser Untersuchung im Referenzklima bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert wurden, beziehen sich die Ergebnisse der Prüfung auf eben dieses Klima. Die Tabelle 7 und Tabelle 8 stellen sowohl die ermittelten Eingabeparameter als auch die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeversuche der beiden Holzwerkstoffe dar.

#### Eingabeparameter und Ergebnisse für die MDF-Platte

- Stützweite  $l_v = 260$  [mm]
- E-Modul in % von  $F_{max}$  5 / 25 [%]
- Prüfgeschwindigkeit v = 9 [mm/min]
- Vorkraft  $F_v = 3$  [N]

**Tabelle 7: Ergebnisse der Bestimmung des E-Moduls für die MDF Platte**

Probennummer	Länge	Breite	Dicke	Gewicht	Rohdichte	$F_{max}$	$\sigma(F_{max})$	E-Modul
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	300,6	50,62	13,30	127,85	0,632	533,6	23,24	2405,7
2	300,6	50,68	13,31	128,20	0,632	555,2	24,12	2419,3
3	300,6	50,66	13,31	127,73	0,630	544,0	23,64	2368,1
4	300,6	50,67	13,25	126,92	0,629	522,4	22,90	2358,0
5	300,6	50,66	13,28	127,92	0,633	552,0	24,10	2431,9
6	300,6	50,65	13,28	128,19	0,634	544,0	23,75	2388,2
<b>Mittelwerte</b>	<b>300,6</b>	<b>50,66</b>	<b>13,29</b>	<b>127,80</b>	<b>0,632</b>	<b>541,9</b>	<b>23,62</b>	<b>2395,2</b>

**Eingabeparameter und Ergebnisse für die Span-Platte**

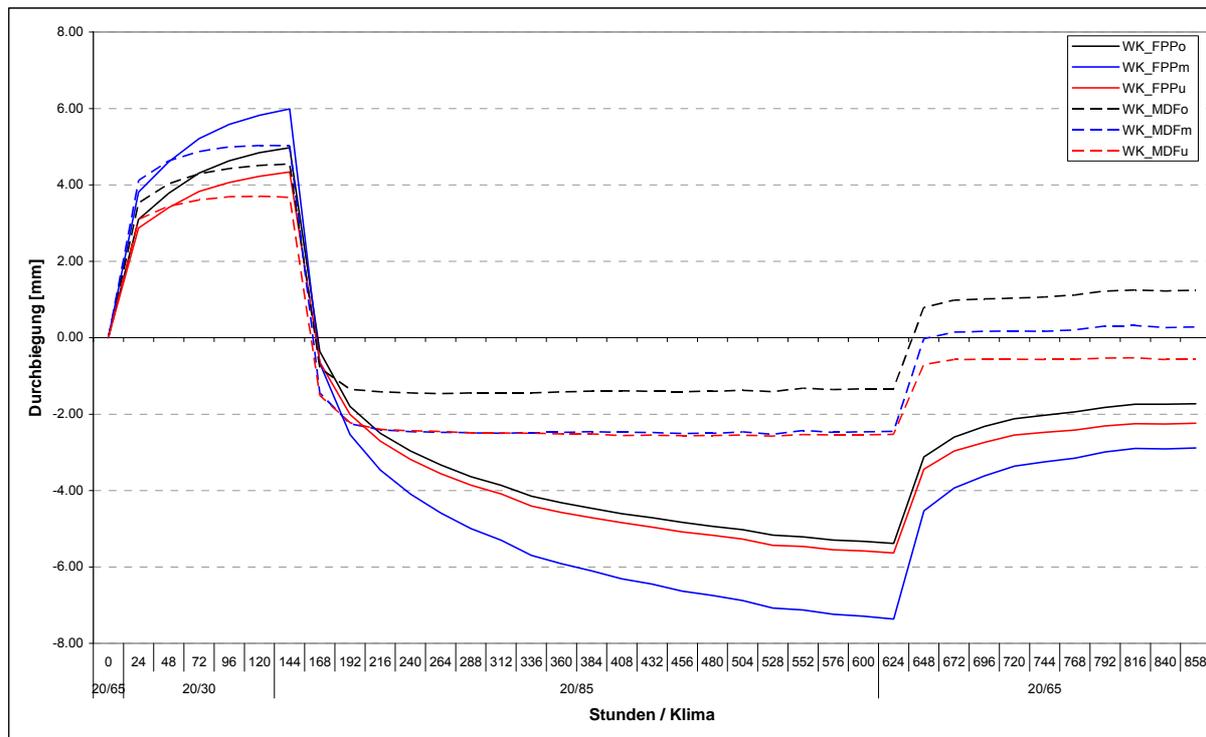
- Stützweite  $l_v = 240$  [mm]
- E-Modul in % von  $F_{max}$  5 / 25 [%]
- Prüfungsgeschwindigkeit  $v = 8$  [mm/min]
- Vorkraft  $F_v = 3$  [N]

**Tabelle 8: Ergebnisse der Bestimmung des E-Moduls für die Span-Platte**

Probennummer	Länge	Breite	Dicke	Gewicht	Rohdichte	$F_{max}$	$\sigma(F_{max})$	E-Modul
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	300,1	50,22	16,48	156,64	0,631	302,4	7,98	1450,1
2	300,1	50,25	16,48	157,81	0,635	300,0	7,91	1570,6
3	300,1	50,28	16,48	158,87	0,639	313,6	8,27	1488,9
4	300,2	50,24	16,36	157,27	0,637	300,0	8,03	1627,8
5	300,0	50,18	16,33	158,15	0,643	343,2	9,23	1740,4
6	300,0	50,14	16,30	157,77	0,644	316,0	9,25	1608,0
<b>Mittelwerte</b>	<b>300,1</b>	<b>50,22</b>	<b>16,41</b>	<b>157,75</b>	<b>0,638</b>	<b>312,5</b>	<b>8,40</b>	<b>1581,0</b>

**5.1.3.4 Darstellung der Plattenverformungen**

Wie im Kapitel 5.1.1 erwähnt, wurden die Verformungen der Holzwerkstoffplatten durch Wegaufnehmer registriert und über einen Datenlogger an den angeschlossenen Computer übertragen und aufgezeichnet. Die sich einstellenden Verformungen auf der Warmkammerseite, d. h. in der Kammer mit den konstanten Klimabedingungen, sind in Abbildung 3 für beide Plattenwerkstoffe dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Verformung der Spanplatte größer ist als die der MDF-Platte. Die Verformungen im Vergleich beider Kammerseiten sind für die MDF-Platte im Diagramm Anhang 37 und für die Spanplatte in Anhang 38 dargestellt. Es zeigen sich Differenzen zwischen den gemessenen Verformungen auf der Warm- und der Kaltkammerseite. Diese Differenzen geben die Dickenquellung der Holzwerkstoffe wieder und sind im Diagramm Anhang 39 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Dickenquellung beider Platten in ähnlichen Größenordnungen bewegt.


**Abbildung 3: Gemessene Verformungen der beiden Prüfplatten auf der Warmkammerseite**

WK: auf der Warmkammerseite gemessene Verformung  
 KK: auf der Kaltkammerseite gemessene Verformung  
 MDF: Mitteldichte Faserplatte  
 FPP: Flachpressplatte (Spanplatte)  
 o, m, u: Wegaufnehmer oben, mittig bzw. unten

### 5.1.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in den Kapiteln 5.1.3.1 bis 5.1.3.4 ermittelten Materialeigenschaften und Verformungsergebnisse werden im Folgenden für jedes Material zusammengefasst. Diese Daten dienen als Eingangsparameter bzw. Vergleichswerte für die numerischen Simulationen mit ANSYS.

#### MDF-Platte

##### Materialeigenschaften:

Rohdichte:	614	[kg/m <sup>3</sup> ]
E - Modul:	2395,2	[N/mm <sup>2</sup> ]
Schubmodul [DIN 1052]	200	[N/mm <sup>2</sup> ]
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$ :	11 / 11	[-]
Ausgleichsfeuchten für Klima:		
20°C / 65%	10,37	[%]
20°C / 30%	7,31	[%]
20°C / 85%	13,44	[%]
20°C / 65% (Zyklusende)	(11,32)	[%]
Feuchtausdehnkoeffizient $\alpha_u$ zw. den Klimaten:		
20°C / 65% und 20°C / 30%	0,047	[%/ %]
20°C / 30% und 20°C / 85%	0,030	[%/ %]
20°C / 85% und 20°C / 65%	0,049	[%/ %]
Mittelwert:	0,042	[%/ %]

### Verformungen als Mittelwert zwischen KK und WK

Verformungen zw. den Klimaten

20°C / 65% und 20°C / 30%	5,05	[mm]
20°C / 30% und 20°C / 85%	7,50	[mm]
20°C / 85% und 20°C / 65%	2,45 (2,73)	[mm]

Bei den Messergebnissen sowohl der Ausgleichsfeuchten als auch der Verformungen zeigen sich im letzten Klimaschritt Hystereseerscheinungen bei der MDF-Platte. Dieser Effekt muss für den späteren Vergleich der Ergebnisse mit dem Programm ANSYS vernachlässigt werden, da er numerisch nicht nachvollziehbar ist. Die auf Hystereseeffekte zurückzuführenden Messwerte werden daher bei den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt. Sie sind in der obigen Übersicht in Klammern mit aufgeführt.

Gleiches gilt für die folgende Übersicht zu den Materialeigenschaften der phenolharzgebundenen Spanplatte. In dieser Übersicht werden für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$ , die für die im Kapitel 5.3.1.1 beschriebene Berechnung mit ANSYS benötigt wird, zwei Werte angegeben. Diese beiden Werte verdeutlichen den Diffusionswiderstand im Trocken- und im Nassbereich, wie er nach DIN EN ISO 12572 ermittelt wird und in der DIN EN 12524 angegeben ist /18, 15/.

### Phenolharzgebundene Spanplatte

#### Materialeigenschaften:

- Rohdichte: 611 [kg/m<sup>3</sup>]
- E - Modul: 1581,0 [N/mm<sup>2</sup>]
- Schubmodul [DIN 1052] 200 [N/mm<sup>2</sup>]
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$ : 50 / 15 [-]
- Ausgleichsfeuchten für Klima:
  - 20°C / 65% 11,38 [%]
  - 20°C / 30% 8,30 [%]
  - 20°C / 85% 15,90 [%]
  - 20°C / 65% (Zyklusende) (13,06) [%]
- Feuchteausdehnkoeffizient  $\alpha_u$  zw. den Klimaten:
  - 20°C / 65% und 20°C / 30% 0,045 [%/%]
  - 20°C / 30% und 20°C / 85% 0,038 [%/%]
  - 20°C / 85% und 20°C / 65% 0,032 [%/%]
  - Mittelwert: 0,042 [%/%]

### Verformungen als Mittelwert zwischen KK und WK

- Verformungen zw. den Klimaten
  - 20°C / 65% und 20°C / 30% 6,03 [mm]
  - 20°C / 30% und 20°C / 85% 13,40 [mm]
  - 20°C / 85% und 20°C / 65% 7,37 (4,48) [mm]

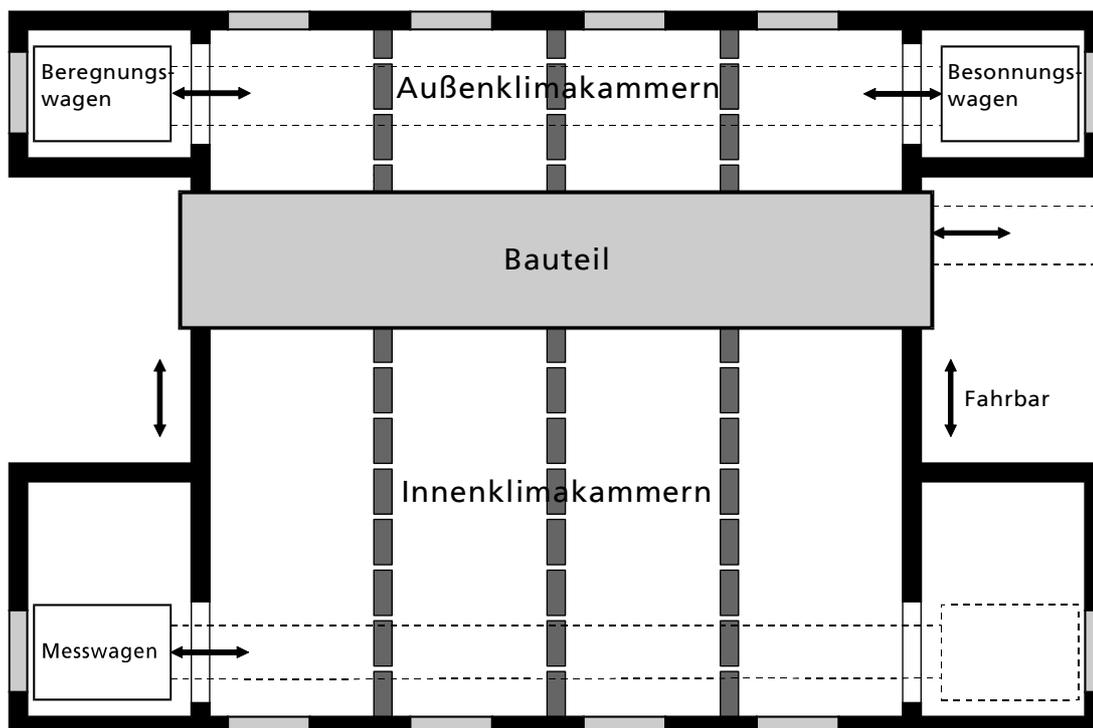
Die oben wiederum eingeklammerten Werte stellen die nicht in Betracht gezogenen durch Hysteresee beeinflussten Messwerte der phenolharzgebundenen Spanplatte dar.

## 5.2 Versuch mit sechs Plattenwerkstoffen

In diesem Versuch wurden insgesamt sechs unterschiedliche Holzwerkstoffplatten verschiedenen Differenzklimaten ausgesetzt. Hierbei ging es nicht wie bei dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuch um die maximalen Verformungen bis zum Erreichen des Feuchtegleichgewichts sondern um grundsätzliche Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Plattenwerkstoffen hinsichtlich des Verformungsverhaltens bei verschiedenen Oberflächenfeuchten. Daher wurde in diesem Versuch darauf verzichtet, jeweils bis zum Erreichen des Feuchtegleichgewichtes zu warten, bis das Klima umgestellt wurde.

### 5.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuch wurde in der großen Doppelklimakammer (GDKK) des WKI durchgeführt. Diese Doppelklimaanlage besteht aus einer Warm- und einer Kaltseite, die jeweils in vier Einzelkammern aufteilbar sind. Für die Klimasimulationen in diesem Forschungsabschnitt wurden die Kammern nicht getrennt. Abbildung 4 zeigt den Querschnitt der GDKK. Die Warmseite ist hier als Innenklimakammer und die Kaltseite als Außenklimakammer bezeichnet. Auf der Warmkammerseite (WK) kann das Klima durch Regelung der Lufttemperaturen und -feuchten in weiten Bereichen eingestellt werden. Hier werden i. allg. Innenklimate gefahren. Auf der Kaltkammerseite (KK) können zusätzlich zur Klimatisierung die Prüfkörper künstlich beregnet und bestrahlt werden, was für diese Untersuchung jedoch nicht notwendig war.



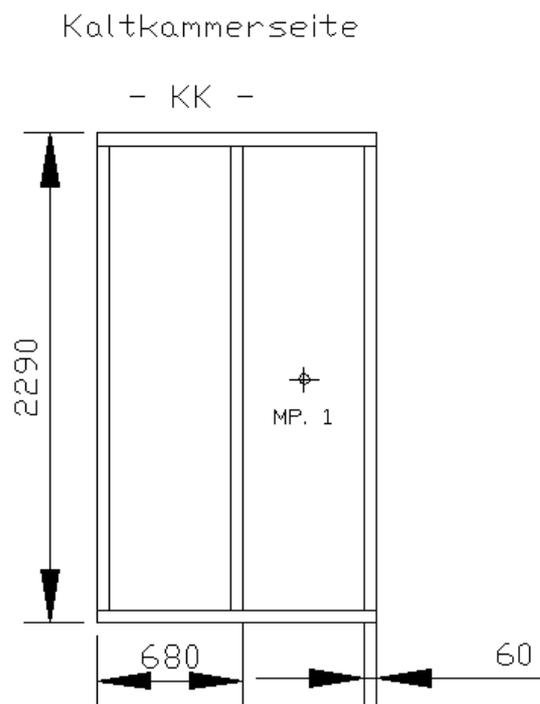
**Abbildung 4: Querschnitt der großen Doppelklimaanlage des WKI**

Für diesen Versuch wurden sechs Holztafelbauwände mit jeweils unterschiedlichen im Holzbau üblichen Plattenwerkstoffen einseitig beplankt. Welche Plattenwerkstoffe im Detail zum Einsatz kamen, kann Tabelle 9 entnommen werden. Die Rippen der Prüfwände waren gemäß Abbildung 5 angeordnet und entsprachen somit einer üblichen Einrastertafel im Holztafelbau. Die Rippen

bestanden aus getrocknetem Konstruktionsvollholz aus Fichte mit einer Materialfeuchte von ca. 15 M.-% und einem Querschnitt von 60 mm auf 120 mm.

Die Plattenwerkstoffe wurden mit handelsüblichen Holzschrauben mit einem Nenndurchmesser von 4,5 mm im Abstand von 150 mm umlaufend auf den Rippen befestigt. Die Platten waren somit zweiachsig gelagert.

Die beplankte Seite der Prüfwände zeigte zur Warmkammerseite der Doppelklimakammer.



**Abbildung 5: Prüfkörper - Abmessungen und Anordnung der Rippen**

Tabelle 9 gibt eine Übersicht der Materialkennwerte der verwendeten Plattenwerkstoffe. Die Werte sind soweit vorhanden den Datenblättern der verwendeten Plattenwerkstoffe entnommen. Fehlende Werte wurden durch Kennwerte aus DIN 1052 und DIN EN 12524 oder durch Versuche ergänzt /4, 15/.

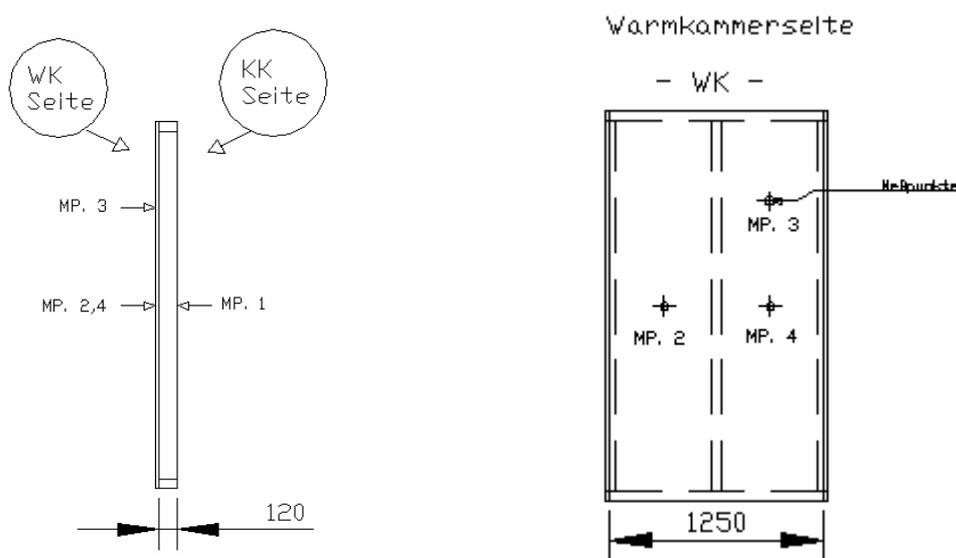
**Tabelle 9: Übersicht der Materialkennwerte für die verwendeten Plattenwerkstoffe**

		OSB geschliffen und unge- schliffen	Gipsfaser- platte	Phenolharz- gebundene Spanplatte	MDF	ultraleichte MDF
Rohdichte	[ kg/m <sup>3</sup> ]	650 (639)	1150 (1217)	ca. 600 (637)	(663)	230 (261)
Elastizitätsmodul	[ N/mm <sup>2</sup> ]	6000– 6500 (5595)	3800 (4316)	2500 – 3000 (1952)	(2783)	(178)
Schubmodul [DIN 1052]	[ N/mm <sup>2</sup> ]	(310)	1600	200	(290)	-
Wärmeleitfähigkeit	[ W/m K ]	0,13	0,32	0,14	0,15	0,047
Wasserdampf- Diffusions- widerstandszahl	[ - ]	50 / 30	40 / 13	50 / 15	10/12	
Feuchteausdehn- koeffizient	[ %/% ]	0,013	0,025	0,035	0,045	0,041

Von den Prüfwänden entkoppelt wurden Aluminiumprofile installiert, auf denen insgesamt 24 Wegaufnehmer angebracht wurden. Zum Einsatz kamen wiederum die Messfühler, die bereits bei dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuch verwendet wurden. Durch die Loslösung von den Prüfkörpern wurde eine von den Eigenverformungen der Prüfkörper unabhängige Verformungsmessung der Plattenwerkstoffe sichergestellt.

Achtzehn Wegaufnehmer wurden für die Messung auf der Warmkammerseite über die einzelnen Plattenwerkstoffe verteilt. Auf der Kaltseite wurde jeweils dem mittleren Messfühler auf der Warmkammerseite gegenüber ein Gegenmessfühler angeordnet. Dies war notwendig, um die zu erwartende Dickenquellung beurteilen zu können.

Die genaue Anordnung der Wegaufnehmer kann Abbildung 6 entnommen werden. Eine Ansicht der Warmkammerseite mit der installierten Messtechnik ist in Abbildung 7 dargestellt.

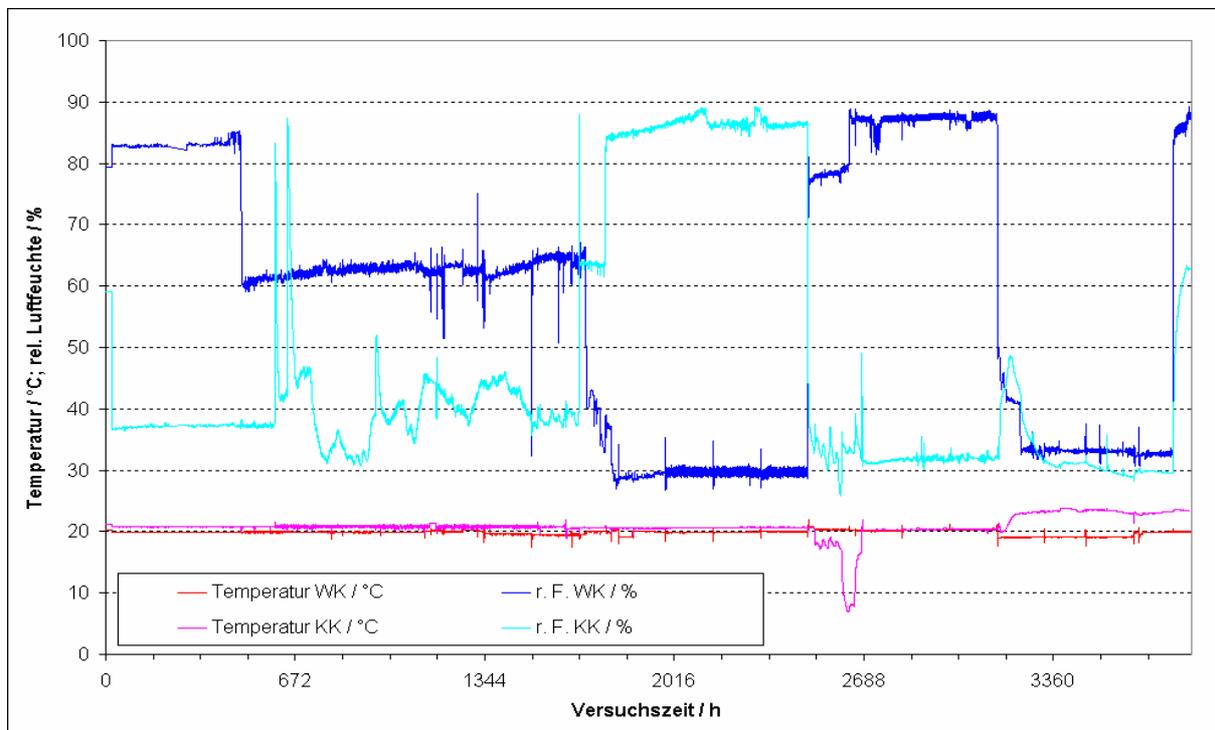

**Abbildung 6: Lage und Anordnung der Messtechnik bei dem Versuch mit sechs Plattenwerkstoffen**



**Abbildung 7: Ansicht der Warmkammerseite mit den Aluminiumprofilen zur Aufnahme der Wegmesstechnik**

Auf der Warm- und der Kaltkammerseite wurde jeweils eine Referenzprobe jeden Plattenwerkstoffs mit den Abmessungen  $300 \times 50 \text{ mm}^2$  positioniert, um, wie schon beim Versuch mit den zwei Plattenwerkstoffen, den Feuchtegehalt sowie das Quell- und Schwindmaß zu ermitteln. Mit jeweils vier Referenzproben jeden Plattenwerkstoffes der Abmessung  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  wurden Rohdichtepprofile nach DIN EN 323 gemessen /19/.

Abbildung 8 zeigt den tatsächlichen Verlauf der Klimabedingungen in den beiden Kammern der Doppelklimaanlage. Die Temperatur konnte in beiden Kammern über den gesamten Zeitraum konstant auf ca.  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  gehalten werden. Aufgrund von technischen Problemen mit der Klimaanlage ist der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit etwa zwischen der 500. und 1700. Versuchsstunde vor allem in der Kaltkammer unstetig und dadurch in diesem Zeitbereich nur eingeschränkt bzw. nicht auswertbar. Nach Behebung der Störungen konnte wieder wie geplant klimatisiert werden.



**Abbildung 8: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur in der Warmkammer (WK) und in der Kaltkammer (KK) über den Versuchszeitraum**

### 5.2.2 Ergebnisse der Verformungsmessungen

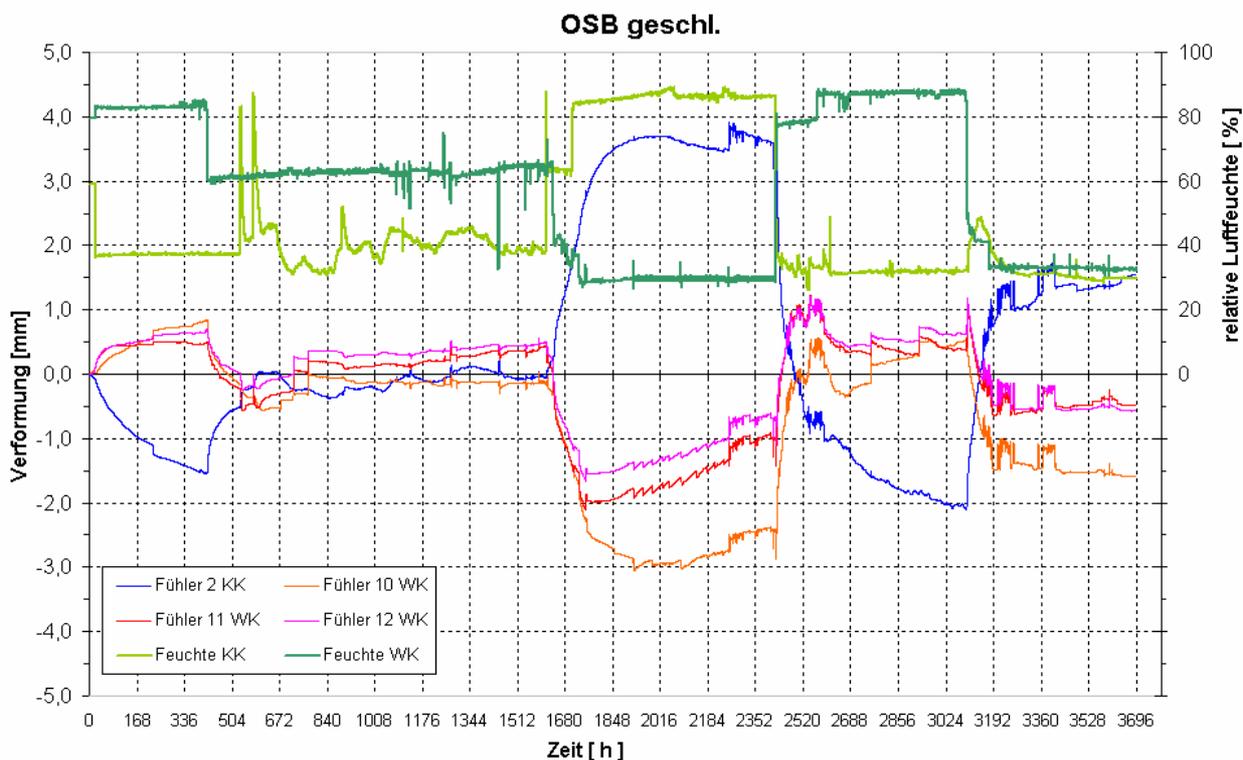
In den Anhängen Anhang 40 bis Anhang 45 sind die Ergebnisse der Verformungsmessungen und die relative Luftfeuchtigkeit in den beiden Klimakammern grafisch über den gesamten Versuchszeitraum dargestellt. Auf der primären (linken) Größenachse sind die Verformungen in mm und auf der sekundären (rechten) Größenachse ist die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent aufgetragen. Alle Plattenwerkstoffe verformen sich im ersten Versuchszeitraum bis ca. 400 Stunden relativ langsam und reagieren danach wesentlich schneller auf Klimaänderungen. Die geschliffene OSB zum Beispiel verformt sich im ersten Versuchszeitraum innerhalb von ca. 400 Stunden um ca. 1,5 mm bei einer Differenz der relativen Luftfeuchtigkeit von einer Plattenoberfläche zur anderen von ca. 45 % bis 50 %. Im Versuchszeitraum zwischen der ca. 1600. bis ca. 1900. Stunde, also innerhalb von ca. 300 Stunden verformt sich die Platte aber um ca. 3,7 mm bei einer Luftfeuchtedifferenz von ca. 55 %. Ein ähnliches Verhalten ist bei allen anderen Platten zu beobachten. Neben der wesentlich schnelleren Reaktion ist zudem noch zu beobachten, dass sich die Platten bei vergleichbarer Feuchtedifferenz mehr verformen.

In Abbildung 9 sind exemplarisch die Verformungen der geschliffenen OSB über den Versuchszeitraum dargestellt. Deutlich sind die relativ großen Verformungen der OSB zu erkennen. Obwohl der Feuchteausdehnungskoeffizient von OSB nur etwa 30 % des Feuchteausdehnungskoeffizienten der Spanplatte beträgt, sind die Verformungen annähernd gleich groß. Wegen des etwa dreimal größeren Biege-Moduls der OSB gegenüber der Spanplatte sind die tatsächlichen Verformungen in etwa gleich. Wie unter anderem im Kapitel 5.4 noch näher beschrieben wird, hat der Grad der Einspannung am Auflager einen erheblichen Einfluss auf die Verformungen. Mit hohem Biege-E-Modul sind auch hohe Einspannmomente erforderlich, um niedrigere Verformun-

gen zu bewirken. Je höher der E-Modul der Platte, um größere Kräfte sind erforderlich, um die Platte wieder in ihren Ursprungszustand zu versetzen.

Der Grad der Einspannung am Auflager hat einen erheblichen Einfluss auf die Plattenverformungen (siehe auch Kapitel 5.4). Innerhalb des Versuches und vor allem auch in der Realität wird sich dieser Grad der Einspannung aber durch Quell- und Schwindbewegungen der Platte und der Rippe verändern, so dass sich dadurch auch unterschiedliche Verformungen einstellen können.

Weiterhin ist zu beobachten, dass die Verformungen der Platten bei gleicher Luftfeuchtedifferenz nach einem längeren Zeitraum geringer werden. Dieser Effekt tritt vor allem bei den Plattenwerkstoffen auf, deren E-Modul relativ stark von der Materialfeuchtigkeit abhängt. Dies sind vor allem die Faserplatten und die Spanplatte. Bei OSB ist auch eine Feuchteabhängigkeit vorhanden. Diese ist aber nicht so ausgeprägt wie z.B. bei Faserplatten.



**Abbildung 9: Verformung der geschliffenen OSB über den Versuchszeitraum**

## 5.3 Untersuchungen mit rechnerischen Methoden

Die Beurteilung der Plattenverformungen kann neben experimentellen Untersuchungen auch mit verschiedenen rechnerischen Methoden erfolgen. Bei den Rechenverfahren ist zu unterscheiden zwischen einfachen Rechenverfahren, wie sie in den Kapiteln 5.3.4.1 bis 5.3.4.3 vorgestellt werden und die auf der Lösung unterschiedlicher Modellansätze beruhen, und den numerischen Rechenverfahren nach der Finite Elemente-, der Finite Differenzen- oder der Finite Volumen Methode. Bei diesen Methoden wird das zu untersuchende Problem in endlich kleine Einheiten zerlegt, auf die jeweils die Ansatzfunktionen definiert werden und anschließend iterativ gelöst. Im folgenden Kapitel 5.3.1 werden Berechnungen zur Plattenverformung nach der Finite Elemente Methode (FEM) beschrieben. Nähere Beschreibungen zur FEM finden sich z. B. in /20/.

### 5.3.1 Berechnungen nach der Finite Elemente Methode

Für die numerischen Untersuchungen zur Plattenverformung wurde das Computerprogramm ANSYS eingesetzt. Es arbeitet nach der Finite-Elemente-Methode (FEM). In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick über die Modellgenerierung in ANSYS gegeben, um eine Nachvollziehbarkeit sicher zu stellen. Andere FEM-Programme arbeiten prinzipiell vergleichbar, wobei natürlich andere Befehle zur Verfügung stehen.

#### 5.3.1.1 Modellgenerierung

Der erste Schritt zur Berechnung eines Bauteils mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ist dessen Idealisierung. Das zu untersuchende Bauteil wird in kleine Elemente zerlegt, deren beispielsweise physikalisches Verhalten durch die zugehörigen Kenngrößen bestimmt wird. Das konkrete Bauteil wird in ein numerisches Modell umgesetzt, das mit Computerprogrammen bearbeitet werden kann und das reale Verhalten hinreichend genau simuliert. Diese Arbeit steht am Anfang jeder FEM-Simulation.

Für die Modellgenerierung bestehen in ANSYS zwei Möglichkeiten. Es können zum einen alle Knoten direkt vorgegeben und diese dann zu Elementen verbunden werden. Dieses Verfahren eignet sich für eher einfache Modelle und zur Modifikation bestehender Modelle.

Werden die Problemstellungen komplexer, bietet es sich jedoch an, das in ANSYS integrierte Mesh-Tool zu verwenden. Dieses Werkzeug benötigt nur sehr wenige markante Punkte des Modells. Der Nutzer kann dann über entsprechende Eingaben die Größe, Form und Art der zu generierenden Elemente vorgeben.

Für die vorliegende Problemstellung wurde, aufgrund der zu erwartenden großen Anzahl von Knoten und Elementen, das Mesh-Tool verwendet.

#### Statische Modelle

Die Betrachtung für die Verformung der Holzwerkstoffplatten erfolgt für diesen Fall im zweidimensionalen Bereich. Als statisches Modell würde hier für die Handrechnung ein statisch bestimmter Einfeldbalken verwendet werden, um die Verformungsberechnung möglichst einfach zu halten. In der Literatur existieren für solch ein statisch bestimmtes Rechenmodell und eine Belastung infolge Temperaturänderung vereinfachte Berechnungsverfahren und Gleichungen (z. B. /21/).

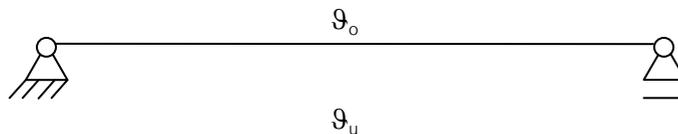
Da jedoch in der Holzbaupraxis eine gelenkige Lagerung der Holzwerkstoffplatten allgemein nicht gegeben ist, ist es notwendig, das Modell des einfach statisch bestimmten Einfeldbalkens anzupassen. Ein erster Schritt hierzu ist die Aufhebung der statischen Bestimmtheit durch eine beidseitig unverschiebliche und gelenkige Lagerung des Balkens. Aufgrund der dadurch gegebenen statischen Unbestimmtheit des Systems, werden Berechnungen der Verformungen nach dem Kraftgrößenverfahren nötig, um zu Ergebnissen zu kommen.

In einem zweiten Anpassungsschritt wäre das Abändern der gelenkigen Lagerung notwendig, um das Modell der Realität weiter anzunähern. Da der Anschluss der Holzwerkstoffplatten in der Regel durch Schrauben, Klammern oder Nägel erfolgt und diese nicht als gelenkige Lagerung aufgefasst werden können, kann dieser Anschluss als eine Drehfeder gedeutet werden. Die Steifigkeit der verwendeten Anschlussart richtet sich nach der Verbindungsmittelart und den Verbindungsmittelabständen. Über die Steifigkeit der Drehfeder im Modell kann die entsprechende Anschluss-situation angepasst werden.

Diese starken Vereinfachungen des realen Systems können mit einem FEM-Programm aufgehoben werden. Hier ist es möglich, eine wesentlich besser angepasste Modellierung vorzunehmen. Der Einfeldbalken wird durch eine beliebige Anzahl von Elementen ersetzt. Die Anzahl der Elemente ist jedoch mit Vorsicht zu wählen, da es bei vielen Elementen sehr schnell zu längeren Rechenzeiten kommen kann. Dies ist doch nur ein Problem der zur Verfügung stehenden Rechnerkapazität, denn die Genauigkeit wird erhöht. Ebenso wie der Einfeldbalken ersetzt wird, wird auch der Auflagerbereich angepasst. Die Abbildung des realen Systems kann sehr detailliert und realitätsnah erfolgen. Eine genauere Modellierung hat jedoch einen größeren Rechenaufwand und natürlich auch einen größeren Programmieraufwand zur Folge. Deshalb sollte sich die Genauigkeit der Modellierung an den Erfordernissen einer konkreten Problemstellung orientieren.

Im Folgenden werden die oben erwähnten statischen Modelle graphisch dargestellt und beschrieben.

#### Statisch bestimmter Einfeldbalken

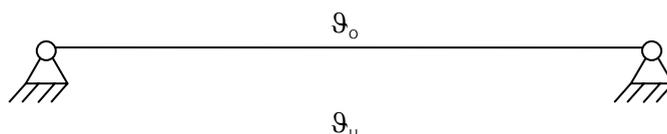


Die Berechnung der Verformungen infolge einer Temperaturbelastung kann nach /21/ mit der Gleichung:

$$w_{\text{mitte}} = \frac{[\alpha_T \times (\vartheta_o - \vartheta_u) / h] x l^2}{8} \quad \text{Gleichung 25}$$

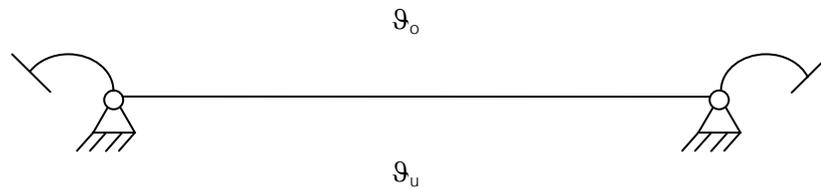
berechnet werden.

#### Statisch unbestimmter Einfeldbalken



Die Berechnung der Verformungen infolge Temperaturbelastung erfolgt wie beim statisch bestimmten Einfeldbalken-Modell.

### Einfeldbalken mit Lagerung am Auflager durch Drehfedern



Durch die Drehfedern wird am Auflager ein definierter Einspanngrad in Abhängigkeit von den Federsteifigkeiten vorgegeben. Mit den bekannten statischen Lösungsverfahren kann dann eine Handrechnung zur Bestimmung der Verformungen durchgeführt werden.

#### **Gewähltes statisches Modell**

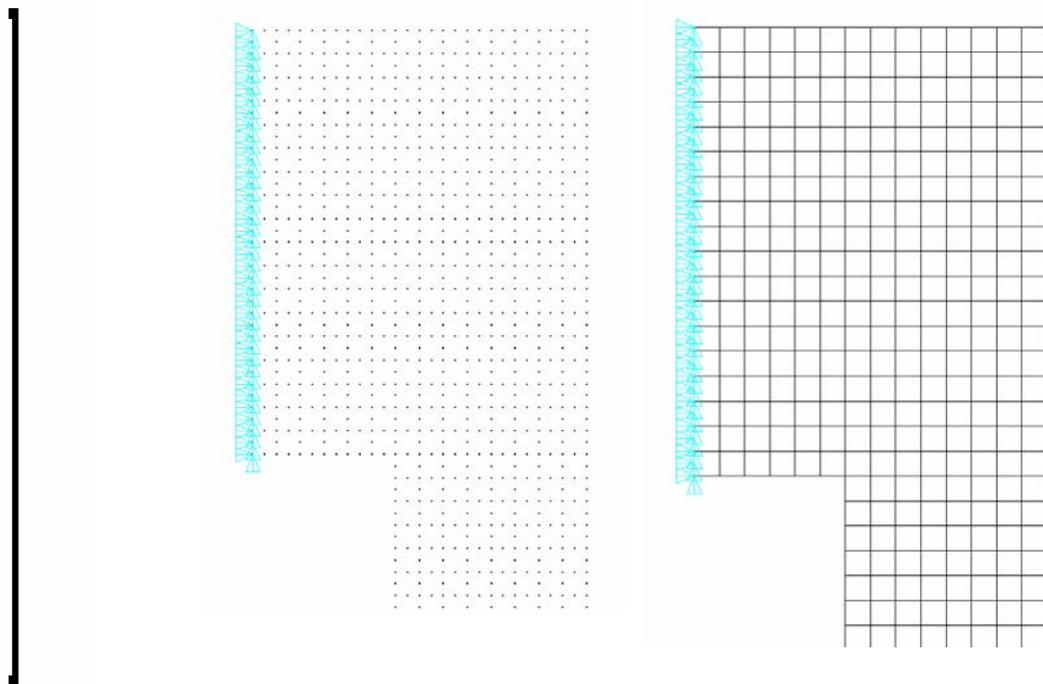
Die Betrachtung unterschiedlicher Modellierungen für die vorliegende Problemstellung führte zu der Feststellung, dass die Auflagerung der Holzwerkstoffplatten am geeignetsten durch einen der Praxis entsprechenden Riegel darstellbar ist. Durch diese Art der Lagerung ist es möglich, den Grad der Steifigkeit der Verbindungen zwischen Platte und Riegel durch Anpassen der Materialkennwerte des Riegels zu erfassen.

Die entscheidenden Kennwerte sind hier:

- E-Modul
- Schubsteifigkeit

Je nach Größe und Verhältnis der beiden Kennwerte zueinander kann eine höhere oder niedrigere Steifigkeit beschrieben werden. Einen weiteren Einfluss auf die Steifigkeit der Verbindung haben die Abmessungen des Riegels. Da zwischen Platte und Riegel im Modell eine komplette Verklebung besteht und die Auflagerung des Riegels über die komplette Höhe als feste Einspannung erfolgt, müssen die Abmessungen des Riegels in der Höhe und Breite angepasst werden. Auf eine genauere Modellierung der Verbindungsmittel wurde verzichtet, um eine zu große Komplexität zu vermeiden, was die erwähnte Anpassung der Riegelabmessungen im Modell zur Folge hat.

Die Abbildung 10 zeigt das gewählte Modell sowie die Knoten- und Elementunterteilung im Auflagerbereich.



Statisches Gesamtmodell

Knoteneinteilung in Auflagerbereich

Elementeinteilung in Auflagerbereich

### Abbildung 10: Statisches Modell und Vernetzung im Auflagerbereich zur Simulation mit ANSYS

Für die Erstellung des Modells wurde eine eigene Batchdatei angelegt. Diese Datei generiert nach Eingabe der erforderlichen Parameter das für die Lösungsphase benötigte Modell und speichert die Knoten und Elemente mit ihren Materialeigenschaften und Koordinaten in zwei weitere Text-Dateien. Dieses Auslesen der Modelleigenschaften und Modellabmessungen vereinfacht das spätere Verwenden der Elemente und verkürzt die Rechenzeit.

#### 5.3.1.2 Materialeigenschaften

Mit dem FEM-Programm ANSYS war es bisher nur möglich Wärmetransporte zu berechnen. Die maßgebende Eigenschaft für die Verformung der Holzwerkstoffplatten ist allerdings die Materialfeuchteverteilung der Baustoffe. Deshalb war es notwendig, die wärmetechnischen Kenngrößen auf den Feuchtetransport zu übertragen.

#### Stoffparameter für die Feuchteanalyse

ANSYS benötigt für die transiente Wärmeanalyse die Eingangsparameter:

- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK]
- spezifische Wärmekapazität  $c$  [J/kgK]
- Rohdichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

Diese Parameter müssen für die Feuchteanalyse angepasst werden. Die Grundlage für die Vergleichbarkeit der Materialeigenschaften bilden die in Kapitel 4.4 beschriebenen Zusammenhänge zwischen den wärme- und feuchtetechnischen Kenngrößen.

### Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient

Um mit ANSYS Diffusionsberechnungen durchführen zu können, wird eine Kenngröße benötigt, die der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bei Wärmeberechnungen entspricht.

Die in Kapitel 4.4.3 hergestellten Vergleiche verdeutlichen, dass die Bedeutung des Diffusionsleitkoeffizienten  $\delta$  in Gleichung 20 zur Berechnung des Diffusionsdurchgangskoeffizienten  $k_D$  der Bedeutung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in Gleichung 19 zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  entspricht.

Der Diffusionsleitkoeffizient  $\delta$  des Stoffes kann aus der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  und dem Diffusionsleitkoeffizienten der Luft  $\delta_L$  wie folgt berechnet werden:

$$\delta = \frac{1}{\delta_L * \mu} \quad \text{Gleichung 26}$$

mit:

$\delta$ :	Wasserdampfdiffusionswiderstand des Stoffes	[mhPa/kg]
$\mu$ :	Diffusionswiderstandszahl des Bauteils	[-]
$1 / \delta_L$ :	Wasserdampfdiffusionswiderstand von Luft	[msPa/kg]
	$1 / \delta_L = 5,40 * 10^9$ [msPa/kg]	

### Die spezifische Feuchtekapazität

Die spezifische Feuchtekapazität  $c_f$  für die angestrebten Diffusionsberechnungen soll der spezifischen Wärmekapazität  $c$  der mit ANSYS möglichen Wärmeberechnungen entsprechen. Im direkten Zusammenhang mit der spez. Wärmekapazität  $c$  stehen die Rohdichte und die Schichtdicke. Der Zusammenhang zwischen spez. Wärme- und Feuchtekapazität kann wie folgend gedeutet werden:

Betrachtet man die im Baustoff gespeicherte Wärmeenergie  $Q$  mit:

$$Q = \rho * c * V * \Delta\theta \quad \text{Gleichung 27}$$

und setzt diese ins Verhältnis zu dem flächenbezogenen Wärmespeichervermögen  $W$  für eine Fläche von  $1,0 \text{ m}^2$ , mit:

$$W = \rho * c * s \quad \text{Gleichung 28}$$

so ergibt sich:

$$W = \frac{Q}{\Delta\theta * 1 \text{ m}^2} \quad \text{Gleichung 29}$$

Also erhält man für die spez. Wärmekapazität  $c$ :

$$c = \frac{Q}{\Delta\theta * \rho * s} \quad \text{Gleichung 30}$$

Um einen Bezug zwischen Wärme- und Feuchtekapazität herzustellen, müssen die diffusionstechnischen Größen auf die wärmetechnischen bezogen werden. Nach Beschreibungen in der Literatur [z.B. /22/] entspricht:

- die treibende Kraft der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  der Partialdruckdifferenz  $\Delta p$
- die gespeicherte Wärmemenge  $Q$  der vorhandenen Materialfeuchte  $u$ .

Da die Materialfeuchte  $u$  einen nicht-linearen Zusammenhang darstellt, muss die spezifische Feuchtekapazität für jedes Intervall zwischen zwei betrachteten Punkten ermittelt werden. Es ergibt sich:

$$c_f = \frac{\Delta u}{\Delta p \cdot \rho \cdot s} \quad \text{Gleichung 31}$$

mit:

$\Delta u$ :	Materialfeuchtedifferenz zw. zwei Punkten	[%]
$\Delta p$ :	Dampfdruckdifferenz zw. zwei Punkten	[Pa]
$s_i$ :	Schichtdicke	[m]
$\rho$ :	Rohdichte des Materials	[kg/m <sup>3</sup> ]

Die spezifische Feuchtekapazität kann demnach für jedes Intervall aus den Sorptionsisothermen der jeweiligen Holzwerkstoffe entwickelt werden. Mit der Steigung der Isotherme  $du / dp$  und somit mit der partiellen Ableitung der für die Sorptionsisothermen verwendeten e-Funktion, die im Folgenden erläutert wird, erhält man die Ersatzwerkstoffeigenschaft für die spezifische Wärmekapazität.

### Sorptionsisothermen nach Greubel / Drewes

Im Kapitel 4.2 wurde die Bedeutung von Sorptionsisothermen beschrieben. Sie bilden die Grundlage für die Berechnung der spezifischen Feuchtekapazität und für die Belastung der Holzwerkstoffe in ANSYS. Für die Modellierung der Sorptionsisothermen in ANSYS wurde von Greubel/Drewes die Gleichung 32 übernommen /16/. Von Greubel/Drewes wurden in /16/ umfangreiche Untersuchungen zu den Ausgleichsfeuchten von Holz- und Holzwerkstoffen vorgenommen. Dadurch steht für die in Gleichung 32 benötigten Regressionsparameter eine Auswahl für unterschiedlichste Holzwerkstoffe zur Verfügung.

Mit den Parametern  $B_0 - B_4$ , der relativen Luftfeuchte  $\varphi$  [%] und der Temperatur  $\vartheta$  [°C] lautet die Gleichung:

$$u = e^{(B_0 + B_1 \times \varphi + B_2 \times \varphi^2 + B_3 \times \varphi^3 + B_4 \times \vartheta)} \quad \text{Gleichung 32}$$

In Anhang 46 und Anhang 47 werden beispielhaft die Ausgleichsfeuchten für die für diese Aufgabenstellung bedeutenden Holzwerkstoffe berechnet bzw. graphisch dargestellt. Die Tabelle Anhang 48 zeigt eine Übersicht der Materialien und einiger Materialeigenschaften sowie der zugehörigen Nummern der Sorptionsisothermen. Die Angaben wurden Greubel/Drewes entnommen /16/.

Für die Berechnung der spezifischen Feuchtekapazität  $c_F$  wird die partielle Ableitung nach dem Dampfdruck  $p$  benötigt. Hierfür wird  $\varphi$  ersetzt durch:

$$\varphi = \frac{p \cdot 100}{p_s} \quad \text{Gleichung 33}$$

mit:

$\varphi$ :	relative Luftfeuchte	[%]
$p$ :	vorhandener Dampfdruck	[Pa]
$p_s$ :	Sättigungsdampfdruck der Luft	[Pa]

Die partielle Ableitung von Gleichung 32 wird damit zu:

$$u'(p) = u(p) \cdot (B1 \cdot 100/p_s + B2 \cdot p \cdot 100^2/p_s^2 + B3 \cdot p^2 \cdot 100^3/p_s^3) \quad \text{Gleichung 34}$$

und für die spezifische Feuchtekapazität ergibt sich somit:

$$c_F = \frac{u'(p)}{\rho \cdot s} \quad \text{Gleichung 35}$$

### **Materialeigenschaften für die Verformungsberechnung**

Die für die Berechnungen mit ANSYS notwendigen Materialparameter werden überwiegend aus den Ergebnissen des unter Kapitel 5.1 beschriebenen Versuches entnommen.

Die Werte für die Parameter sind in Kapitel 5.1.3.5 und den Tabellen Anhang 33 bis Anhang 36 aufgelistet. Die Verwendung dieser Materialparameter ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen den gemessenen und den berechneten Verformungen.

Für die Simulation mussten einige Vereinfachungen getroffen werden. Hierzu zählen u. a.:

- Vernachlässigung der Querdehnzahl  $PRXY = 0$ ;  $PRXZ = 0$ ;  $PRYZ = 0$
- Eingeschränkte Berücksichtigung der Dickenquellung (nach Bedarf)

Die Materialeigenschaften der Auflagerriegel können variiert werden. Hierbei beschränkt sich die Variation auf E-Modul und Schubmodul der Elemente. Eine Anpassung der Parameter für diese Elemente wird über eine statistische Auswertung erfolgen, um für die aus dem Versuch ermittelten Ergebnisse die entscheidende Kombination für die gegebenen Belastungen zu erhalten.

### **Eingabe der Stoffparameter in ANSYS**

ANSYS bietet die Möglichkeit nicht-lineare Materialkennwerte beliebig anzupassen. Es kann somit jeder Temperatur bzw. in diesem Fall jeder Materialfeuchte, ein bestimmter, entsprechender Kennwert zugewiesen werden. Für die vorliegende Problemstellung stellt diese Funktion einen großen Vorteil dar, da das Feuchteverhalten der betrachteten Werkstoffe nicht linear ist. Die Nicht-linearität der spezifischen Feuchtekapazität wird somit bei den Berechnungen berücksichtigt.

In der Verformungsberechnung wird auf eine Variation und Anpassung des Feuchteausdehnungskoeffizienten an die gegebenen Klimabedingungen und Materialfeuchten verzichtet. Für den Nutzer ist es jedoch möglich bei der Auswertung eine Anpassung an die jeweiligen Klimabedingungen durchzuführen, indem in einer Batch-Datei die Ausdehnungskoeffizienten vor der Berechnung des gewählten Zeitpunktes angepasst werden.

Die spezifische Feuchtekapazität wird für Intervalle von jeweils 5% relativer Luftfeuchte berechnet und den zugehörigen Materialfeuchten zugeordnet. Obwohl als treibende Kraft bei der Feuchte-

analyse der Dampfdruck herangezogen wird, können als Bezugswerte für die nicht-lineare Definition des Materialkennwertes  $c_f$  die Materialfeuchten anstelle des Dampfdruckes eingesetzt werden. Entscheidend ist hierbei, dass die spätere Belastung der Knoten und Elemente in der Verformungsberechnung mit der Materialfeuchte und nicht mit dem Dampfdruck als Kenngröße durchgeführt wird.

### 5.3.1.3 Transiente Feuchteverteilungsberechnung

Durch die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Anpassung der Materialeigenschaften ist es möglich eine instationäre Feuchteanalyse durchzuführen.

Nach Einlesen des Modells und Eingabe der benötigten diffusionstechnischen Parameter erfolgt die Belastung der äußeren Knoten mit den Randbedingungen. Es wird mit Lastschritten, deren Anzahl der gewünschten Anzahl der Teil-Zyklen entspricht, gerechnet. Hierbei ist der erste imaginäre Lastschritt die Belastung des Modells durch die Vorklimatisierung zum Zeitpunkt  $t = 1,0 \cdot 10^{-6}$  Zeiteinheiten, um so eine Ausgangsfeuchte für die folgenden Lastschritte zu erhalten.

Die weiteren Lastschrittweiten sind abhängig von der Zeitvorgabe des Nutzers. Das Problem dieser transienten Analyse ist, dass die nicht-linearen Materialeigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit vom Klima nicht für die einzelnen Lastschritte verändert werden können. Die Berechnung der Feuchteverteilung über die Zeit wurde mit mehreren Lastschritten durchgeführt. Somit ist in diesem Fall die Simulation nur für konstante Umgebungstemperaturen möglich. Eine Variation beider Klimaparameter, sowohl der relativen Luftfeuchte, als auch der Temperatur sind für mehrere Lastschritte z.Zt. nicht möglich. Da die relative Luftfeuchte eine Funktion der Temperatur ist, wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes auf die Variation der Temperatur verzichtet und nur die Materialeigenschaften für Luftfeuchteänderungen betrachtet bzw. untersucht.

Nach erfolgreicher Durchführung der Berechnungen werden im Post-Prozessor die gewünschten Ausgaben definiert und visualisiert. Als Vorgabe werden drei Knotenfeuchten auf halber Höhe des Querschnittes in Form eines Diagramms über die Zeit ausgegeben. Es werden der rechte und linke sowie der zentrale Knoten der Platte dargestellt. Anhand der Annäherung des Feuchteverlaufs des Mittelknotens an die Feuchte der Randknoten kann nachvollzogen werden, wann der Baustoff seine Ausgleichsfeuchte erreicht hat. Nähert sich die Steigung der Graphen dem Wert Null, findet keine weitere Zunahme der Feuchte an diesen Knoten statt und die Ausgleichsfeuchte ist erreicht. Mit dem so ermittelten Feuchteverhalten des gegebenen Werkstoffs, kann die Berechnung der Verformung erfolgen.

### 5.3.1.4 Verformungen

Nachdem die transiente Analyse der Feuchteverteilung abgeschlossen und die Ergebnisse der einzelnen Lastschritte in eine Ergebnisdatei gespeichert wurden, kann die statische Analyse der Verformung der Holzwerkstoffplatten durchgeführt werden.

Es besteht die Möglichkeit zu jedem beliebigen Zeitpunkt der vorhergehenden transienten Analyse die Verformung des Systems zu betrachten. Befindet sich der Betrachtungszeitpunkt zwischen zwei von ANSYS berechneten Intervallen, so werden die benötigten Lasten interpoliert.

Durch den Befehl „LDREAD,...“ werden die Ergebnisse der hygri-schen transienten Analyse in die statische Analyse transferiert. So werden aus den vorherigen Feuchtelasten „Body-loads“. Diesen Vorgang der Transferierung nennt man Kopplung. Die beiden unterschiedlichen Analysen werden also gekoppelt, so dass es möglich ist, eine auf die hygri-sche, transiente Analyse aufbauende statische Analyse durchzuführen.



Folgende variable Parameter sind für die Berechnungen vorzugeben:

- Zeitpunkt der zu berechnenden Verformung
- E-Modul der Auflagerelemente
- Schubmodul der Auflagerelemente

Im Auflagerbereich wird eine Parametervariation dieser Werte durchgeführt, um eine gute Anpassung für den Vergleich mit den Ergebnissen des in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuches zu erreichen.

### **5.3.2 Simulation und Auswertung mit ANSYS**

In Anlehnung an den in Kapitel 5.1 beschriebenen praktischen Versuch wird nun eine Auswertung mit den erstellten Batch-Dateien erfolgen. Dies bedeutet, dass die Materialkennwerte für die Simulation aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche entnommen und verwendet werden. Fehlende Kennwerte werden aus der Literatur ergänzt.

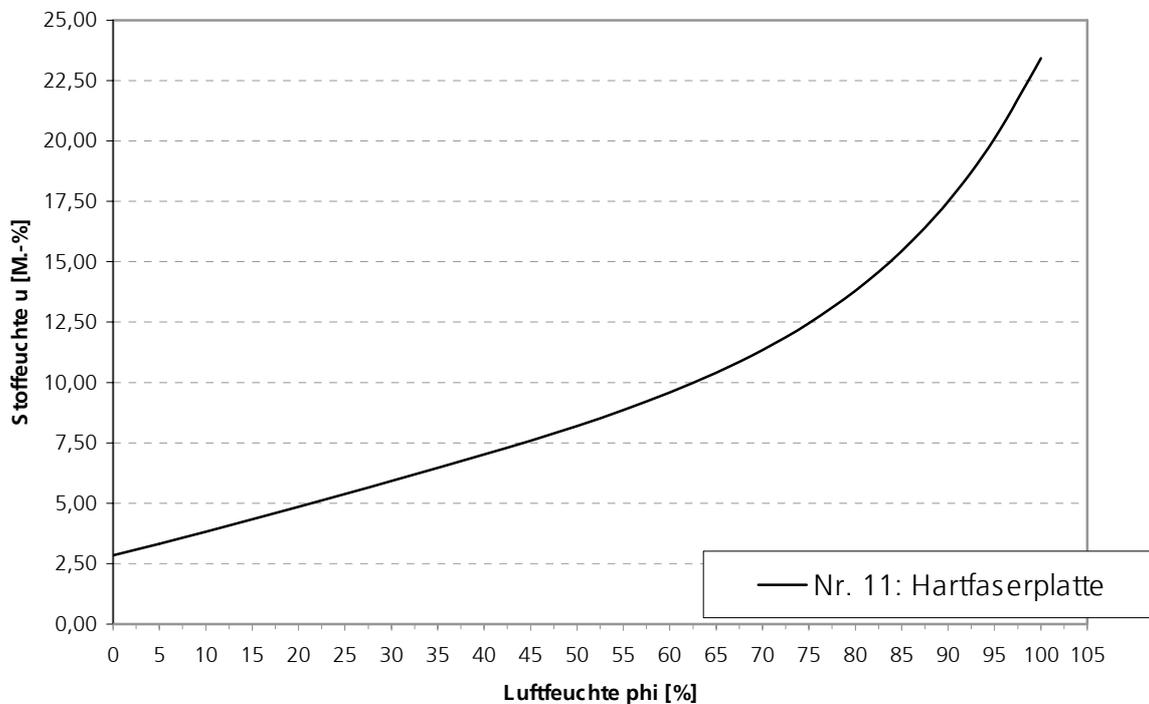
#### **Transiente Feuchteverteilung**

Für die Auswertung der transienten Analyse der Feuchteverteilung in Abhängigkeit von der Zeit wird die Simulation nun für die beiden verwendeten Holzwerkstoffplatten des Versuches durchgeführt. Es werden sowohl die verwendeten nicht-linearen Materialkennwerte in Form von Diagrammen, als auch die simulierte Verteilung der Feuchte über die Zeit dargestellt. Die betrachteten Knoten befinden sich bei  $h/2$ . Dabei wird der linke und rechte Rand der Platte sowie der Knoten in der Mitte des Querschnittes betrachtet. Der Vergleich erfolgt für die Referenzproben des beschriebenen Versuches aus Kapitel 5.1 mit den Anhängen Anhang 1 bis Anhang 3, da eine genauere Auswertung des Feuchteverlaufes für die eingebauten Holzwerkstoffplatten nicht im Rahmen dieses Versuches durchgeführt wurde. Nähert sich die Steigung für den zentralen Knoten Null, ist dies gleichzusetzen mit dem Erreichen der Ausgleichsfeuchte für das anstehende Klima des Zyklus (s. Kapitel 5.3.2.2).

Einen weiteren Eindruck über den Ablauf des Feuchteänderungsprozesses erhält man über die Animation der Feuchteanalyse über die Zeit. Dieses ist mit ANSYS möglich, wobei eine AVI-Datei (Audio Video Interleave) erzeugt wird, die sich mit einem geeigneten Programm abspielen lässt.

#### **Sorptionsisothermen der MDF**

Als Bezug für die ermittelten Ausgleichsfeuchten hat sich die Sorptionsisotherme Nummer 11 für die Hartfaserplatte nach /16/ als geeignet erwiesen. Die Ausgleichsfeuchten bei den gewählten Klimabelastungen entsprechen in etwa denen, die beim praktischen Versuch für die verwendeten Holzwerkstoffe ermittelt wurden.

**Sorptionsisothermen nach GREUBEL / DREWES für Theta = 20 °C**

**Abbildung 11: Sorptionsisotherme von MDF (Material 11 nach Greubel/Drewes /16/)**

### Feuchtespeicherfähigkeit $c_f$ und ermittelte Knotenfeuchten der MDF

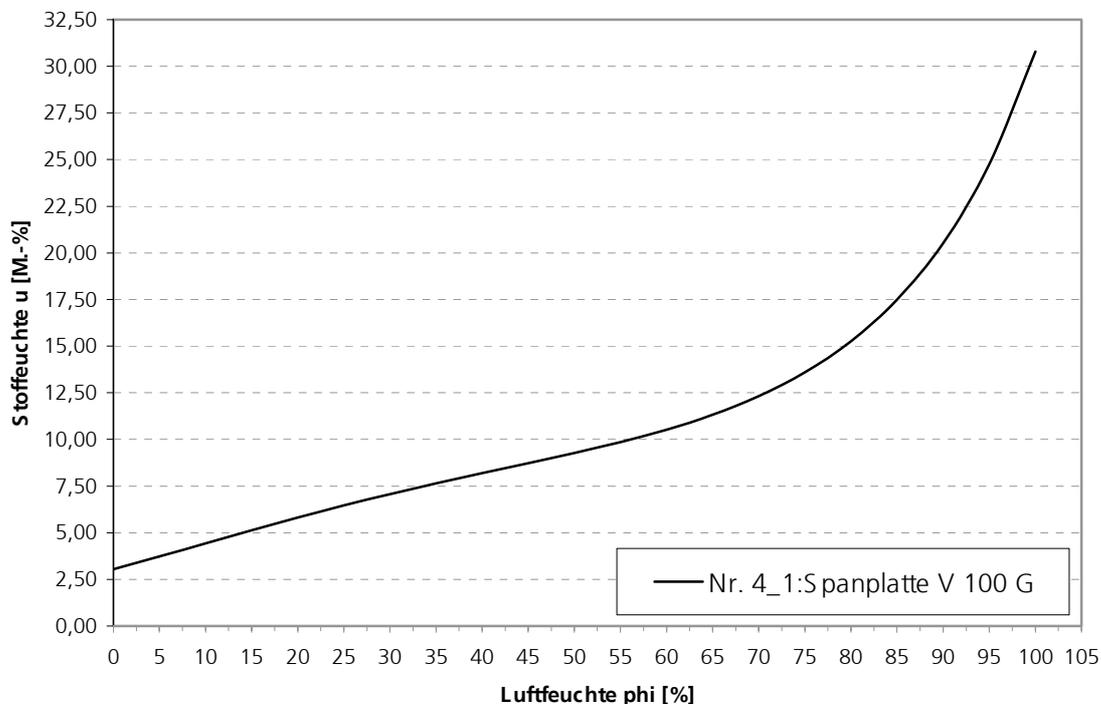
Die mit ANSYS berechneten Materialkennwerte und simulierten Materialfeuchten an den gewählten Positionen werden über die „redirect-plot“ - Funktion als Bilddatei ausgegeben und können dann weiter bearbeitet werden.

Hier wurden die Ergebnisse für die MDF in den Anhängen Anhang 4 bis Anhang 8 dargestellt. Es werden die Feuchtespeicherfähigkeit  $c_f$ , die Knotenfeuchten der MDF-Referenzproben und die Knotenfeuchten der MDF-Platte in den Diagrammen wiedergegeben. Die Materialfeuchte der einzelnen ausgewählten Knoten wird über den zeitlichen Verlauf dargestellt.

Bei den MDF-Referenzproben, wie auch bei den Referenzproben der Spanplatte, verlaufen die Feuchten im linken und rechten Plattenrand aufgrund des allseitig gleichen Klimas deckungsgleich.

### Sorptionsisothermen der phenolharzgebundenen Spanplatte

Für die verwendete Spanplatte werden die Sorptionsisothermen des Werkstoffes Nummer 4\_1 der Spanplatte V 100 G für die Simulation mit ANSYS zu Grunde gelegt. Als Auswahlkriterium gilt in diesem Fall wie schon bei der MDF-Platte eine möglichst gute Annäherung der Ausgleichsfeuchte für die Simulation an den praktischen Versuch.

**Sorptionsisothermen nach GREUBEL / DREWES für Theta = 20 °C**

**Abbildung 12: Sorptionsisotherme einer Spanplatte (Material 4 nach Greubel/Drewes /16/)**

### Feuchtespeicherfähigkeit $c_f$ und ermittelte Knotenfeuchten der Spanplatte

Auch hier wurden wiederum wie schon bei der MDF die Materialkennwerte und Materialfeuchten mittels „redirect-plot“-Funktion als Bilddatei ausgegeben.

Die Ergebnisse für die phenolharzgebundene Spanplatte werden in den Anhängen Anhang 9 bis Anhang 13 dargestellt. Es werden die Feuchtespeicherfähigkeit  $c_f$ , sowie die Knotenfeuchten über den zeitlichen Verlauf der Span-Referenzproben und der Span-Platte in den Diagrammen wiedergegeben.

#### 5.3.2.1 Verformungssimulation

Nachdem die Feuchteverteilung simuliert wurde, werden die ermittelten Materialfeuchten zu einem gewählten Zeitpunkt als Belastung auf das Modell aufgebracht. Die Abbildungen der Anhänge Anhang 14 bis Anhang 21 sollen beispielhaft darstellen, wie sich die Ausgabe der Berechnungen in ANSYS darstellt. Es werden die maximalen Verformungen vor jedem Klimawechsel wiedergegeben. Die Darstellung wird einmal für das gesamte System erfolgen und für den Auflagerbereich am oberen Ende des Systems, um einen Eindruck davon zu bekommen, wie sich die Verformung bis zum gewählten Zeitpunkt der Elemente der Ersatzauflagerung zur Ausgangsstellung verhält.

Da es sich bei dieser Analyse um eine statische handelt, wird die Animation der Verformung nicht zeitbezogen animiert, wie es bei der Berechnung der Feuchteverteilung der Fall war, sondern es wird lediglich die Verformung des Systems und der Elemente vom Ausgangszustand bis zum ge-



wünschten Zeitpunkt der Betrachtung dargestellt. Man hat also zwei Zustände, von denen einer der Nullzustand ist, und ANSYS interpoliert die Verformungen zwischen den Zuständen. Von Art und Form stimmt diese Animation mit der zeitbezogenen Verformung überein, mit dem Unterschied, dass die Geschwindigkeit, die am Anfang schneller ist als zum Ende des Feuchteänderungsprozesses, nicht berücksichtigt wird.

Des Weiteren werden mehrere Simulations-Auswertungen in Anhang 22 tabellarisch dargestellt, bei denen eine Variation der Auflagerelementsteifigkeiten stattfindet. Dadurch soll eine möglichst gute Anpassung dieser Variablen an die vorhandenen gemessenen Ergebnisse der Verformungen aus dem Versuch erreicht werden. Erfahrungswerte für die Ersatzmodellierung des Auflagerbereiches sollen so gewonnen werden und für spätere Simulationen verfügbar sein. Da die beiden Holzwerkstoffplatten auf die gleiche Art und Weise mit dem Riegel verbunden wurden (s. Kapitel 5.1), wird es angestrebt, die gleichen Steifigkeitswerte für beide Auflagerungen zu bestimmen. Eine Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.3.3.3.

### **5.3.3 Betrachtung und Vergleich der ANSYS-Berechnungen mit den Versuchsergebnissen**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Versuch den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Aufgrund der angenommenen Vereinfachungen bei der Simulation mit ANSYS im Bereich der Modellgenerierung und der Materialkenngrößen müssen im Bereich der Auswertung Kompromisse eingegangen werden.

Des Weiteren werden für die Simulation Materialfeuchteverteilungen nach /16/ zu Grunde gelegt, da keine Sorptionsisothermen der verwendeten Werkstoffe bestimmt wurden. Deshalb wurden aus /16/ Sorptionsisothermen mit einer möglichst guten Annäherung an die im Versuch bestimmten Ausgleichsfeuchten verwendet. Diese Wahl der Sorptionsisothermen für die Simulation hat zur Folge, dass gewählte Klimabelastungen und die daraus resultierende Ausgleichsfeuchte des Materials nicht den eigentlichen im Versuch ermittelten Belastungen des Materials durch die Materialfeuchte entsprechen und im Einzelfall angepasst werden müssen.

#### **5.3.3.1 Vergleich der Feuchteverteilungen**

Für die Anpassung der Belastungen an die realen Bedingungen in der Klimakammer und die daraus resultierende Materialfeuchte kann man aus den Anhängen Anhang 23, Anhang 24 und Anhang 25 ersehen, dass es sich anbietet, die Klimabelastungen für die Ausgleichsfeuchtenberechnung der Simulation wie folgend zu variieren:

20°C / 30% rel. LF. ersetzen durch 20°C / 40% rel. LF.

und

20°C / 85% rel. LF. ersetzen durch 20°C / 80% rel. LF.

Durch diese Abänderung der Belastung der Holzwerkstoffplatten erhält man für die Ausgleichsfeuchte der Simulation eine in etwa der Anhänge Anhang 23 und Anhang 24 zu entnehmenden entsprechende Ausgleichsfeuchte für beide Holzwerkstoffplatten und somit gleichwertige Belastung für die Simulation.

Es erfolgt eine kurze Gegenüberstellung der jeweiligen Ausgleichsfeuchte bei den entsprechenden Klimabelastungen:

### Klimabelastungen und Materialfeuchten des durchgeführten Versuches

	Klima	Materialfeuchte [M.-%]
MDF-Platte	20°C / 30% rel. LF.	<b>7,3</b>
	20°C / 65% rel. LF.	<b>10,4</b>
	20°C / 85% rel. LF.	<b>13,4</b>
Phenolharzgebundene Spanplatte	20°C / 30% rel. LF.	<b>8,3</b>
	20°C / 65% rel. LF.	<b>11,4</b>
	20°C / 85% rel. LF.	<b>15,9</b>

### Klimabelastungen und Materialfeuchten für die Simulation aus [Greubel/Drewes]

	Klima	Materialfeuchte [M.-%]
MDF-Platte (Plattenkennziffer 11)	20°C / 30% rel. LF.	<b>5,9</b>
	20°C / 40% rel. LF.	<b>7,0</b>
	20°C / 65% rel. LF.	<b>10,4</b>
	20°C / 80% rel. LF.	<b>13,8</b>
	20°C / 85% rel. LF.	<b>15,4</b>
Phenolharzgebundene V 100 Spanplatte (Plattenziffer 4_1)	20°C / 30% rel. LF.	<b>7,1</b>
	20°C / 40% rel. LF.	<b>8,2</b>
	20°C / 65% rel. LF.	<b>11,3</b>
	20°C / 80% rel. LF.	<b>15,3</b>
	20°C / 85% rel. LF.	<b>17,5</b>

Die Anpassung der Klimabelastungen für diese Simulation an die vorhandenen Sorptionsisothermen für die verwendeten Plattentypen vermeidet Fehler durch Interpolation der Sorptionsisothermenwerte.

Die Auswertung der Berechnungen und Messungen der Materialfeuchte von den ausgewerteten Referenzproben erfolgt in den Anhängen Anhang 3, Anhang 5, Anhang 6, Anhang 10 und Anhang 11. Als Bezug und Orientierung für die simulierten Referenzproben dienen die in Anhang 3 dargestellten Feuchteänderungsdiagramme der im Versuch verwendeten Referenzproben.

Die qualitativen Verläufe der Diagramme aus den Anhängen Anhang 5, Anhang 6, Anhang 10 und Anhang 11 stimmen gut mit denen in Anhang 3 dargestellten gemessenen Werten überein. Ein Unterschied besteht in der Einteilung und Beschriftung der Achsen. Während bei den simulierten Ergebnissen die Zeitachse in Sekunden unterteilt ist, ist die Zeitachse der gemessenen Proben in Stunden gegliedert. Die Zeiten entsprechen jedoch gleicher Zykluslängen.

Der Vergleich der beiden Verläufe verdeutlicht eine gute Annäherung der simulierten Lösung an die Verläufe der gemessenen Werte.

Als weiterer Vergleich und Kontrolle neben den Gewichtsmessungen und den daraus resultierenden Materialfeuchten der Referenzproben wurde eine Berechnung mit der am WKI entwickelten Software „TUN“ durchgeführt. Die Ergebnisse aus dieser Simulation der Feuchteverteilung für die verwendeten Holzwerkstoffe sind in den Anhängen Anhang 26 bis Anhang 29 dargestellt. Bei dem Vergleich zu den schon vorhandenen Ergebnissen der mit ANSYS durchgeführten Simulation und den gemessenen Werten ist auch hier eine qualitativ gute Übereinstimmung zu erkennen.

### 5.3.3.2 Vergleich der Verformungen

Nachdem nun die Materialfeuchteverteilungen ermittelt wurden, werden diese nun im nächsten Schritt als Belastungen für das System betrachtet und die Berechnung der Verformungen durchgeführt.

Wie in Kapitel 5.3.2.1 erwähnt, wird die Art und Steifigkeit bei der gewählten Ersatzlagerung der Platten durch die Variation der Materialkennwerte der Auflagerelemente beeinflusst. Eine Auswertung der verschiedenen Steifigkeitskombinationen ist in Anhang 22 dargestellt. In ihr wurden sowohl unterschiedliche Klimabedingungen, als auch der Einfluss der verschiedenen Feuchteausdehnungskoeffizienten betrachtet. Es wurden für 2 unterschiedliche Klimazyklen je 3 verschiedene Kombinationen der Feuchteausdehnungskoeffizienten für die Bestimmung der maximalen Verformungen in der Mitte des Querschnittes berücksichtigt.

Betrachtet man die Auswertung der Steifigkeitsvariationen in Anhang 22, so erhält man die folgenden Erkenntnisse in Bezug auf die Variationen der Klimate und verschiedenen Feuchteausdehnungskoeffizienten, die für eine möglichst gute Annäherung an den durchgeführten Versuch nötig sind:

- eine Anpassung der Feuchteausdehnungskoeffizienten für die einzelnen Teilzyklen  
z.B.:  $\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}$  (30%)  $\neq$   $\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}$  (85%)
- die Dickenquellung kann vernachlässigt werden, da ihr Einfluss auf die Zunahme der maximale Verformung des System  $< 10\%$  ist.
- die Anpassung der Feuchtebelastung des Systems an die realen gemessenen Belastungen aufgrund der nicht vorhandenen eigenen Sorptionsisotherme für die verwendeten Platten ist nötig, da die Verformungen sich relevant verändern.
  - ⇒ Klimabelastungszyklus für Versuch  
Temperatur:  $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$       Luftfeuchte:  $\varphi = 65\% / 30\% / 85\% / 65\%$
  - ⇒ Klimabelastungszyklus für ANSYS-Simulation  
Temperatur:  $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$       Luftfeuchte:  $\varphi = 65\% / 40\% / 80\% / 65\%$

### Durchschnittliche Verformungen der im Versuch belasteten Platten

Zum direkten Vergleich mit den simulierten Verformungen, sollen an dieser Stelle noch einmal die gemessenen Verformungen tabellarisch dargestellt werden. Die Werte werden als Mittelwert zwischen der Kalt- und Warmseite aufgeführt.

**Tabelle 10: Durchschnittliche gemessene Verformung der Versuchsplatten**

MDF			SPAN		
20°C / 35%	20°C / 85%		20°C / 35%	20°C / 85%	
$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]	$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]
5,05	-2,45	7,50	6,03	-7,37	13,40

### Verformungen aus ANSYS mit Steifigkeitsvariation des Auflagerbereiches

In den folgenden Tabellen werden nun aus Anhang 22 die für den Vergleich mit den Ergebnissen günstigsten Verformungswerte zusammengefasst. Folgende Randbedingungen werden berücksichtigt.

- ⇒  $\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}$  (40%)  $\neq$   $\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}$  (80%)  
 ⇒  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$   $\varphi = 65\% / 40\% / 80\% / 65\%$

Es wird angestrebt, für beide Plattentypen gleiche gemeinsame Ersatzauflagersteifigkeiten zu finden, da die Lagerung, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben und in Anhang 31 dargestellt, bei beiden Platten identisch ist. Für diese Annahme zeigt Tabelle 11 die günstigsten Vergleichswerte für die Verformungen:

**Tabelle 11: Berechnete Verformungen mit Steifigkeitsvariation des Auflagerbereiches**

	MDF			SPAN		
	20°C / 40%	20°C / 80%		20°C / 40%	20°C / 80%	
	$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]	$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]
	$\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}=0.047$	$\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}=0.030$		$\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}=0.045$	$\alpha_{u,l\ddot{a}ngs}=0.038$	
$E_x \& E_y / G_{xy}$						
100 / 10	<b>-4,702</b>	<b>3,089</b>	<b>7,791</b>	-3,813	4,329	8,142
150 / 50	<b>-5,061</b>	<b>3,319</b>	<b>8,380</b>	-3,900	4,454	8,354

Betrachtet man die aus Anhang 22 zusammengefassten Ergebnisse, ist festzustellen, dass die Verformungsberechnung der Spanplatte im Vergleich zur MDF-Platte noch kein zufriedenstellendes Ergebnis liefert.

Es ist zu vermuten, dass aufgrund der geringen Anzahl von Referenzproben die Bestimmung des  $\alpha_u$ -Wertes statistisch nicht ausreichend erfasst wurde. Die somit entstandenen Abweichungen haben eine geringere Verformung der Simulationsergebnisse gegenüber den gemessenen Werten des Versuches zur Folge.

Die Vermutung wird bei einem Vergleich der Feuchteausdehnkoeffizienten mit SATTLER bestätigt /5/. Ermittelt man aus /5/ (Tabellen 7.1 und 7.3) die  $\alpha_u$ -Werte vergleichbarer Holzwerkstoffe (phenolharzgebundene Spanplatte (Nr.2) und Faserplatte MDFi (Nr.12)) mit der Gleichung:

$$\alpha_u = \frac{\Delta l}{\Delta u}$$

Gleichung 36

$\alpha_u$ :	Feuchteausdehnkoeffizient	[% /% HF]
$\Delta l$ :	Längenänderung der Proben	[%]
$\Delta u$ :	Materialfeuchteänderung der Proben	[% HF]

so erhält man für  $\alpha_u$  aus der Spalte C (Bestimmung nach DIN EN 318) der o. g. Tabellen:

#### **MDF-Platte**

Desorption:	$\alpha_u = 0,047$	[%/% HF]
Adsorption:	$\alpha_u = 0,020$	[%/% HF]

#### **Span-Platte**

Desorption:	$\alpha_u = 0,064$	[%/% HF]
Adsorption:	$\alpha_u = 0,056$	[%/% HF]

Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Anhang 23 und Anhang 24 zeigt, dass die Werte für  $\alpha_u$  aus dem Versuch in Kapitel 5.1 für die MDF-Proben eine gute Übereinstimmung zeigen, während für die Spanplatten-Proben geringere Werte ermittelt wurden.

Eine Auswertung mit den nach [SATTLER] berechneten Werten ist in Anhang 30 tabellarisch dargestellt. Bei der Annahme einer gleichen Lagerung beider Platten, sind folgende Ergebnisse mit den zugehörigen Auflagersteifigkeiten maßgebend:

**Tabelle 12: Verformungen aus ANSYS mit Steifigkeitsvariation des Auflagerbereiches nach Modifikation der Feuchteausdehnkoeffizienten**

	MDF			SPAN		
	20°C / 40%	20°C / 80%		20°C / 40%	20°C / 80%	
	$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]	$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]
	$\alpha_{u,\text{längs}}=0.047$	$\alpha_{u,\text{längs}}=0.020$		$\alpha_{u,\text{längs}}=0.064$	$\alpha_{u,\text{längs}}=0.056$	
$E_x \& E_y / G_{xy}$						
100 / 10	<b>-4,702</b>	<b>2,115</b>	<b>6,817</b>	-5,368	6,278	11,646
150 / 50	<b>-5,061</b>	<b>2,269</b>	<b>7,330</b>	-5,492	6,461	11,953

Eine letzte Anpassung der Verformungsergebnisse aus der Simulation für die Spanplatte erfolgt über die Korrektur des E-Modul. Vergleicht man den verwendeten E-Modul von 1581 [N/mm<sup>2</sup>] mit den Anforderungen an Spanplatten nach [DIN EN 312; T. 1-7], so erscheint dieser relativ niedrig. Daher wird eine Erhöhung des E-Modul vorgenommen und mit einem Wert von  $E_x = E_y = 1800$  [N/mm<sup>2</sup>] erhält man bei der Verformungssimulation mit ANSYS folgende auch in Anhang 30 dargestellte Ergebnisse:

**Tabelle 13: Verformungen aus ANSYS mit Steifigkeitsvariation des Auflagerbereiches nach zusätzlicher Modifikation des E-Moduls**

	MDF			SPAN		
	20°C / 40%	20°C / 80%		20°C / 40%	20°C / 80%	
	$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]	$w_{\text{Mitte}}$ [mm]		$\Delta w$ [mm]
	$\alpha_{u,\text{längs}}=0.047$	$\alpha_{u,\text{längs}}=0.020$		$\alpha_{u,\text{längs}}=0.064$	$\alpha_{u,\text{längs}}=0.056$	
$E_x \& E_y / G_{xy}$						
100 / 10	<b>-4,702</b>	<b>2,115</b>	<b>6,817</b>	<b>-5,805</b>	<b>6,701</b>	<b>12,506</b>
150 / 50	<b>-5,061</b>	<b>2,269</b>	<b>7,330</b>	<b>-6,035</b>	<b>7,050</b>	<b>13,085</b>

Die Simulationsergebnisse mit den  $\alpha_u$ -Werten nach [SATTLER] sind zufriedenstellend und erfordern keine Anpassung des E-Moduls.

Zufriedenstellende Ergebnisse für eine einachsige Spannung der Holzwerkstoffplatten werden somit bei folgenden Auflagersteifigkeiten erreicht:

- $E_x = E_y = 100$  [N/mm<sup>2</sup>] bzw. 150 [N/mm<sup>2</sup>]
- $G_{xy} = 10$  [N/mm<sup>2</sup>] bzw. 50 [N/mm<sup>2</sup>]

Aus den Tabellen Tabelle 10 bis Tabelle 13 wird ersichtlich, dass es Abweichungen zu den Werten der Versuchsplatten gibt. Diese entstehen aufgrund der vorhandenen Vereinfachungen und Anpassungen in der Simulation gegenüber der Realuntersuchung.

### 5.3.3.3 Schlussfolgerungen und kritische Betrachtung

Die Simulation der Diffusion durch die Werkstoffe infolge der gewählten Klimabelastungen wurde mit dem unter 5.1 beschriebenen Versuch und einer Simulationsberechnung mit dem Programm „TUN“ verglichen. Gemäß Anhang 3, Anhang 5, Anhang 6, Anhang 10 und Anhang 11, sowie Anhang 26 bis Anhang 29 ist zu erkennen, dass die Umsetzung mit ANSYS gut gelungen und für die Berechnung der Verformungen infolge der sich einstellenden Materialfeuchte geeignet ist. Die Simulation von Diffusionsvorgängen ist in der verwendeten ANSYS Version 8.0 zurzeit noch nicht integriert. Daher stellte es sich als relativ umständlich dar, die Diffusionsvorgänge an die von ANSYS unterstützten Wärmeberechnungen umzuwandeln und anzupassen. Für diese Art von Problemstellung ist ANSYS zwar geeignet, was anhand der Ergebnisse bestätigt wird, aber aufgrund der Einschränkung in Art und Umfang der Umsetzung für Diffusionsvorgänge sollte in Betracht gezogen werden, diese Simulationen mit einer externen Software zu berechnen und dann die Ergebnisse über die integrierte Schnittstelle einzulesen, um dann weiterführende Berechnungen, wie z.B. Verformungsberechnungen durchzuführen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden die Ergebnisse der Diffusionsberechnung mit ANSYS als ausreichend gut befunden und für die Verformungsberechnung verwendet.

Die Ergebnisse der Verformungssimulation konnten mit den vorhandenen Materialfeuchten aus der Diffusionssimulation gut ermittelt werden. Da ANSYS für diese Art der Berechnung, anders als bei den Diffusionsvorgängen, geeignet ist, erfordert es keine außergewöhnlichen Methoden zur Umsetzung der Verformungsberechnungen. Abweichungen bei dem Vergleich der beiden Ergebnisse wurden kritisch betrachtet und beseitigt.

Bei dem derzeitigen Stand der für die Simulation erforderlichen Batch-Dateien, erfordert es momentan noch gewisse Kenntnisse in der APDL von ANSYS, um Randbedingungen und Materialkennwerte zu ändern und somit Simulationen auch für andere Holzwerkstoffe durchzuführen.

Es ist anzumerken, dass mit den vorgestellten Berechnungen eine gute Anpassung an die Problemstellung gefunden wurde, diese aber bei der Anwendung auf andere ähnliche Probleme mit Diffusionsvorgängen und daraus resultierenden Verformungsberechnungen immer kritisch betrachtet werden sollte. So empfiehlt es sich bei der Anwendung dieser Problemlösung eine Variation der Auflagersteifigkeiten durchzuführen, um möglichst Ergebnisse auf der sicheren Seite zu erhalten. Die Anisotropie des Werkstoffes Holz erschwert die Umsetzung in numerischen Simulationen.

### 5.3.4 Betrachtungen mit Hilfe einfacher Rechenverfahren

Neben der numerischen Simulation sollten einfachere Rechenverfahren zur Berechnung von Verformungen infolge einer Feuchtedifferenz untersucht werden. Dazu mussten die Rechenverfahren teilweise modifiziert werden, da sie, ähnlich wie bei der numerischen Simulation, ursprünglich für eine Temperaturdifferenz entwickelt wurden. Es erfolgt auch jeweils ein Vergleich mit den gemessenen Verformungen des unter 5.1 beschriebenen Versuchs. Da die Platten in dem Versuch nicht ideal gelenkig gelagert waren, sind teilweise auch größere Abweichungen der Rechenergebnisse mit den Versuchsergebnissen zu erwarten.

Im Kapitel 5.4.1 wird der Einfluss einer Einspannung am Auflager untersucht und bewertet. Es ist dort deutlich zu erkennen, dass selbst geringe Drehfedersteifigkeiten am Auflager zu Berechnungsergebnissen führen, die eine vergleichbare Größenordnung zu den Versuchsergebnissen aufweisen. Ohne die Berücksichtigung der Einspannung am Auflager ist aber eine Berechnung mit einfachen Rechenmethoden nicht sinnvoll durchführbar, wobei dies auch auf „genauere“ Rechenmethoden zutrifft.

Die Berechnungen mit dem Arbeitssatz und der Biegelinie liefern die gleichen Ergebnisse. Eine Berechnung nach der Bimetall-Theorie liefert andere Ergebnisse, die aber immer um den gleichen Faktor (ca. 1,5) von den Ergebnissen nach dem Arbeitssatz abweichen. Alle einfacheren Rechenverfahren sind somit geeignet, die Verformungen rechnerisch abzuschätzen, wobei zwangsläufig immer die Auflagersituation im Nachgang mit berücksichtigt werden muss, da man ansonsten Ergebnisse erhält, die für ideale Systeme gelten.

### 5.3.4.1 Arbeitssatz

Eine Methode zur Berechnung von Einzelverformungen ist das Prinzip der virtuellen Arbeit. Hierbei wird der Arbeitssatz in Verbindung mit dem Prinzip der virtuellen Kräfte (PVK) benutzt. Unter Arbeit versteht man in der Statik die Formänderungsarbeit. Es gibt die äußere und innere Formänderungsarbeit. Die äußere Formänderungsarbeit  $W_a$  erzeugen hier die Zwangslastfälle Quellen und Schwinden. Bei einer Verformung leisten die inneren Kräfte (Schnittkräfte) eine der äußeren entgegen gesetzte innere Formänderungsarbeit  $W_i$ . Der Arbeitssatz besagt, dass die Summe aus äußerer und innerer Arbeit Null ergibt:  $W_a + W_i = 0$ . Das PVK betrachtet den wirklichen Verschiebungszustand und virtuellen Kräftezustand. Um rechnerisch die wirkliche Verschiebung  $w_m$  an der Stelle  $m$  zu erhalten, setzt man dort in Richtung der gesuchten Verschiebung eine virtuelle Kraft  $F'$  an. Eine Gesamtgleichung zur Ermittlung von Einzelverformungen findet man in /23/. Bei statisch bestimmten Systemen kann diese Gleichung für Durchbiegungen, die durch Feuchtigkeitsänderungen hervorgerufen werden, zu Gleichung 37 vereinfacht werden.

$$w_m = \int \left( M' \cdot \alpha_u \cdot \frac{\Delta u}{d} \right) dx \quad [\text{mm}] \quad \text{Gleichung 37}$$

$w_m$  Durchbiegung [mm]

$M'$  Moment infolge  $F'$

$\Delta u$  Feuchtedifferenz über  $d$

$d$  Dicke der Platte

Nach dem Arbeitssatz ergibt sich nach der ersten Klimaumstellung (Versuch mit den zwei Plattenwerkstoffen) eine rechnerische Durchbiegung bei der MDF von ca. 52 mm gegenüber 5 mm beim Versuch.

Bei der FPP ergibt sich eine rechnerische Verformung von ca. 51 mm, während hier im Versuch 6 mm gemessen wurden.

Die Berechnungsergebnisse sind in der Tabelle 14 zusammengefasst. Auch hier wird keine zufriedenstellende Genauigkeit der Berechnungen erzielt, da hier nicht die Auflagersteifigkeit berücksichtigt wurde.

**Tabelle 14: Verformungsberechnungen mit dem Arbeitssatz**

Eingabewerte					Zwischenrechnungen			Durchbiegung		Klimawechsel
l <sub>0</sub> [mm]	d [mm]	α [%/%]	u <sub>2</sub> [%]	u <sub>1</sub> [%]	delta_u [%]	M'	M	w [mm]	w_ist [mm]	
					delta_u=u <sub>1</sub> -u <sub>2</sub>	M' = F'*l/4	M = α*delta_u/d	w=1/2*M'*M*_l <sub>0</sub>		
1960	13,4	0,047	10,4	7,3	-3,1	490,0	-0,000108	-51,71	-5	MDF 65 -> 30
1960	13,4	0,030	10,4	13,4	3,1	490,0	0,000069	33,00	2,5	MDF 30 -> 85
1960	13,4	0,049	10,4	11,3	1,0	490,0	0,000035	16,68	0,25	MDF 85 -> 65
1960	16,3	0,056	11,4	8,3	-3,1	490,0	-0,000106	-50,81	-6	FPP 65 -> 30
1960	16,3	0,038	11,4	15,9	4,5	490,0	0,000105	50,60	7,5	FPP 30 -> 85
1960	16,3	0,032	11,4	13,1	1,7	490,0	0,000033	15,84	2	FPP 85 -> 65 65 -> 85

### 5.3.4.2 Bi-Metall-Theorie

Das angenäherte Verformungsverhalten von einachsig gespannten Holzwerkstoffplatten kann durch die Balken-Biege-Theorie beschrieben werden. Wenn das Verhältnis von Länge zu Breite deutlich größer ist als zehn ( $l/b \gg 10$ ), kann die Querkontraktionsbehinderung vernachlässigt werden. Daher wird aus Vereinfachungsgründen ein schmaler Plattenstreifen betrachtet.

Stephan Arndt /24/ greift zur Berechnung thermischer Verformungen von unsymmetrischen Mehrschichtverbänden auf die Bi-Metall-Theorie von Timoshenko /25/ zurück. Er hat in dieser Bi-Metall-Theorie Gleichungen für das Verformungsverhalten von Metallen bei Temperaturänderungen aufgestellt. Grundlagen für dieses Berechnungsmodell sind Kräfte- und Momentengleichgewicht, Differentialgleichung der Balkenbiegung und Verträglichkeitsbedingungen der Verformungen der Schichten. Mittels dieser Gleichungen sollen die Durchbiegungen der Holzwerkstoffplatten bei Feuchtedifferenzen berechnet werden. Daher werden die Gleichungen von Timoshenko im Folgenden mathematisch umgeformt und diesem Zweck angepasst.

Als erstes wird das Kräfte- und Momentengleichgewicht in Plattenebene aufgestellt. Nimmt z.B. die untere Schicht Feuchtigkeit auf, so will diese sich ausdehnen. Dieser Ausdehnung setzt dann die obere Schicht aufgrund der Verbindung einen Widerstand entgegen. Es entstehen in diesem Fall unten eine Druckkraft  $F_2$  und oben eine Zugkraft  $F_1$  (Gleichung 38). Weiterhin entsteht durch die Kräfte ein Moment, dem die Momente  $M_1$  und  $M_2$  entgegenwirken (Gleichung 39).

$$F_1 = F_2 = F \quad \text{Gleichung 38}$$

$$\frac{F \cdot d}{2} = M_1 + M_2 \quad \text{Gleichung 39}$$

Nun wird die Differentialgleichung der Balkenbiegung ( Gleichung 40) betrachtet. Bei kleiner Neigung  $w'$  der Balkenachse kann die Krümmung  $\kappa$  annähernd der Differentialgleichung für Balkenbiegung gleichgesetzt werden:  $w'' \approx \kappa = 1/r$  /26/. Daraus ergibt sich durch Einsetzen Gleichung 41

$$w'' = -\frac{M}{EI} \quad \text{Gleichung 40}$$

$$M_i = \frac{E_i I_i}{r} \quad \text{Gleichung 41}$$

Weiterhin müssen an den Berührungspunkten der Schichten die Dehnungen übereinstimmen. So muss hier  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  sein. Die Dehnungen bestehen aus Anteilen der Feuchtedehnung  $\alpha * \Delta u$ , der Längskraft  $F/EA$  und dem Biegemoment  $M/EW$ . Durch weiteres Einsetzen und umformen ergibt sich hieraus Gleichung 42.

$$\alpha_1 * \Delta u_1 + \frac{F_1}{E_1 A_1} + \frac{d_1}{2r} = \alpha_2 * \Delta u_2 - \frac{F_2}{E_2 A_2} - \frac{d_2}{2r} \quad \text{Gleichung 42}$$

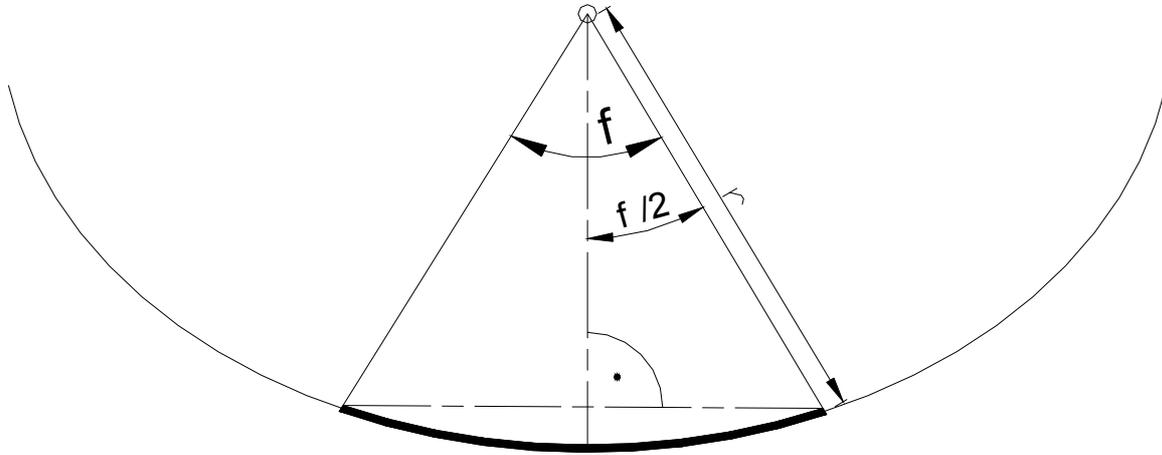
Mittels Gleichung 42 kann mit den vereinfachenden Annahmen  $d_1 = d_2$ ,  $E_1 = E_2$  und  $A_1 = A_2$  die Krümmung und somit der Krümmungsradius bestimmt werden (Gleichung 43).

$$\frac{1}{r} = \frac{3 * (\alpha_2 * \Delta u_2 - \alpha_1 * \Delta u_1)}{d} \quad \text{Gleichung 43}$$

Vereinfachend kann weiterhin angenommen werden, dass  $\alpha_1 = \alpha_2$  ist. In diesem Fall wurden die klimatischen Verhältnisse auf der einen Seite nicht verändert, so dass nur ein  $\Delta u$  existiert. Vereinfachend wird weiterhin ein linearer Feuchteverlauf über die Plattendicke angenommen, so dass sich das in der Berechnung anzusetzende  $\Delta u$  halbiert. Mit diesen Annahmen wird Gleichung 43 zu

$$\frac{1}{r} = \frac{3 * \alpha * \frac{\Delta u}{2}}{d} \quad \text{Gleichung 44}$$

Die Durchbiegung  $w$  erhält man nun aus Geometriebedingungen. Hierzu betrachtet man ein Kreissegment, das sich durch die Verformung des Balkens ergibt. Über das Verhältnis des Kreissegmentes zum Kreis erhält man den Winkel  $\varphi$  ( Gleichung 45). Mit dem Winkel  $\varphi$  und dem Radius  $r$  aus Gleichung 43 eingesetzt in den Kosinussatz ( Gleichung 46) erhält man die gesuchte Durchbiegung  $w$  des Balkens (Gleichung 47).


**Abbildung 13: Kreissegment**

$$\varphi = \frac{l_0}{r}$$

Gleichung 45

$$w = r * \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)$$

Gleichung 46

$$w = \frac{d}{3\alpha * \frac{\Delta u}{2}} \left(1 - \cos \frac{l * 3\alpha * \frac{\Delta u}{2}}{2d}\right)$$

Gleichung 47

Mit dem Bi-Metall-Ansatz errechnet man bei der MDF-Platte nach einer Klimaumstellung von 20 °C / 65 % rel.LF.auf 20°C / 30 % rel.LF. eine Verformung von 78 mm. Der Versuch ergab eine Verformung von ca. 5 mm.

Die Flachpressplatte müsste nach der Berechnung eine Durchbiegung von 76 mm erfahren. Beim durchgeführten Versuch wurden 6 mm gemessen.

Die weiteren Berechnungen der Durchbiegungen mittels der Bi-Metall-Theorie beider Platten sind in Tabelle 15 aufgeführt.

**Tabelle 15: Vorformungsberechnungen nach der Bi-Metall-Theorie**

Eingabewerte							Durchbiegung			Klimawechsel	
l_0	d	$\alpha$	u2_0	u2_t	delta_u2	X	w	w_soll	Abweichung		
[mm]	[mm]	[%/%]	[%]	[%]	[%]		[mm]	[mm]	[%]	[% r.LF.]	
					delta_u2=u2_t-u2_0	X=3*beta*delta_u2/2	$w=2*d/X*(1-\cos(l_0*X/(2*d)))$				
1960	13,4	0,047	10,4	7,3	-3,1	-0,0022	-78,4	-5	-1467%	MDF 65->30	
1960	13,4	0,030	10,4	13,4	3,0	0,0014	48,5	2,5	-1840%	MDF 30->85	
1960	13,4	0,049	10,4	11,3	0,9	0,0007	23,8	0,25	-9409%	MDF 85->65	
1960	16,3	0,056	11,4	8,3	-3,1	-0,0026	-76,6	-6	1176%	FPP 65->30	
1960	16,3	0,038	11,4	15,9	4,5	0,0026	75,4	7,5	-906%	FPP 30->85	
1960	16,3	0,032	11,4	13,1	1,7	0,0008	24,0	2	-1102%	FPP 85->65	
										65->85	

Die Tabelle zeigt, dass man mit diesem einfachen Ansatz basierend auf der Bi-Metall-Theorie keine befriedigenden Ergebnisse erzielen kann.

### 5.3.4.3 Biegelinie

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung von Verformungen ist die Ermittlung der Biegelinie [23]. Mit Hilfe dieser kann die Verformung des gesamten Balkens dargestellt werden. Die Biegelinie kann analytisch mit der Differentialgleichung der Biegelinie (Gleichung 48) oder punktuell mit dem Arbeitssatz ermittelt werden. Hier soll dies analytisch, allerdings nur für die Verformung in Plattenmitte, geschehen.

$$-w'' = \kappa = \frac{M}{EI}$$

Gleichung 48

Mittels Integration kommt man von der Differentialgleichung der Biegelinie zur EI-fachen Biegelinie  $w(x)$  (Gleichung 49).



$$EIw(x) = -\iint M(x)dx^2 \quad \text{Gleichung 49}$$

Die Gleichung 48 gilt nicht für Verformungen durch Feuchtigkeitsänderungen. Da hier diese Verformungen berechnet werden sollen, muss auf ein äquivalentes Ersatzmoment („Feuchtigkeitsmoment“  $M_f$ ) (Gleichung 50) zurückgegriffen werden. Dieses wird anstelle von  $M$  in Gleichung 48 oder Gleichung 49 eingesetzt.

$$M_f = EI\beta \frac{\Delta u}{d} \quad \text{Gleichung 50}$$

Somit ergibt sich aus Gleichung 49 und Gleichung 50 die Biegelinie  $w(x)$  (Gleichung 51)

$$w(x) = -\beta * \frac{\Delta u}{d} * \frac{x^2}{2} - C_1 x - C_2 \quad \text{Gleichung 51}$$

Für den beidseitig gelenkig gelagerten Träger erhält man die Randbedingungen  $w(0)=0$  und  $w(l)=0$ . Somit ergibt sich für die Durchbiegung  $w(x=l/2)$  des Balkens (Gleichung 52).

$$w(x = \frac{l}{2}) = \frac{1}{8} * \beta * \frac{\Delta u}{d} * l^2 \quad \text{Gleichung 52}$$

Für die MDF erhält man eine Durchbiegung von 52 mm gegenüber 5 mm (gemessen).

Bei der FPP berechnet sich eine Durchbiegung von ebenfalls 51 mm gegenüber im Versuch gemessenen 6 mm.

Weitere Berechnungen sind in der Tabelle 16 aufgeführt. Auch hier erreicht man mit einfachen Berechnungsansätzen keine zufriedenstellende Annäherung an die im Versuch ermittelten Werte.

**Tabelle 16: Verformungsberechnungen mittels der Biegelinie**

Eingabewerte		beta [%/%]	u <sub>2</sub> [%]	u <sub>1</sub> [%]	delta_u [%]	Durchbiegung		Klimawechsel
l <sub>0</sub> [mm]	d [mm]					w(x=l/2) [mm]	w_ist [mm]	
1960	13,4	0,047	10,4	7,3	-3,1	-51,7	5	MDF 65 -> 30
1960	13,4	0,030	10,4	13,4	3,1	33,0	2,5	MDF 30 -> 85
1960	13,4	0,049	10,4	11,3	1,0	16,7	0,25	MDF 85 -> 65
1960	16,3	0,056	11,4	8,3	-3,1	-50,8	6	FPP 65 -> 30
1960	16,3	0,038	11,4	15,9	4,5	50,6	7,5	FPP 30 -> 85
1960	16,3	0,032	11,4	13,1	1,7	15,8	2	FPP 85 -> 65
								65 -> 85

## 5.4 Verformungsverhalten unter anderen Lagerungsbedingungen

### 5.4.1 Einfluss und Bewertung einer Einspannung am Auflager

Ein beidseitig ideal eingespannter Plattenbalken weist theoretisch keine Verformungen infolge einer Temperatur- oder Feuchtedifferenz auf. Somit kommt der Abbildung der Auflagersituation bei einer Berechnung einer Verformung infolge einer Feuchtedifferenz große Bedeutung zu. Die Annahme eines ideal gelenkigen Auflagers führt zwar zu Ergebnissen, die auf der sicheren Seite liegen, aber auch wesentlich zu hoch sein können, wie es im Kapitel 5.3.4 bereits dargelegt wurde. In Tabelle 17 sind exemplarisch Verformungsberechnungen ohne Berücksichtigung einer Einspannung am Auflager aufgeführt und den Messergebnissen des Versuches mit den zwei Plattenwerkstoffen aus Kapitel 5.1 gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine in der Regel weit größere Verformung errechnet wird, als gemessen wurde. In Tabelle 18 sind Rechenergebnisse aufgeführt, die eine Einspannung am Auflager in Form einer Drehfeder berücksichtigen. Die errechneten Verformungen stimmen in der Regel wesentlich genauer mit den Messergebnissen überein, wobei aber selbst bei Berücksichtigung einer Einspannung am Auflager teilweise größere prozentuale Abweichungen zwischen Rechnung und Messung vorliegen. Besonders im Holzbau, bei Verwendung von mechanischen Verbindungsmitteln wird sich der Einspanngrad über die Zeit verändern, da die Verbindungsmittel geringfügig gelockert werden können, was für das Tragverhalten an sich nicht negativ sein muss. Andererseits kann durch Quellungen am Auflager die Einspannung auch erhöht werden.

Abgesehen von den relativ großen Schwankungen der relevanten Materialeigenschaften erscheint die Einspannungssituation am Auflager der wichtigste, aber gleichzeitig auch der am wenigsten greifbare Faktor bei der Ermittlung von Verformungen zu sein.

**Tabelle 17: Exemplarische Verformungsberechnung ohne Berücksichtigung einer Einspannung am Auflager**

		Länge	Dicke	Feder	delta_u	w Rechnung	w Messung	Abweichung
		[mm]	[mm]	[kNm/rad]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
MDF	30	1960	13,4	0	3,1	51,7	5	944,1
	85				3,1	33,3	2,5	1232,8
	65				1,0	16,7	0,25	6921,2
FPP	30	1960	16,3	0	3,1	50,8	6	752,5
	85				4,5	50,6	7,5	571,8
	65				1,7	15,8	2	701,4

**Tabelle 18: Exemplarische Verformungsberechnung mit Berücksichtigung einer Einspannung am Auflager**

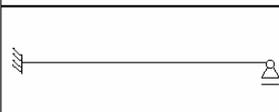
		Länge	Dicke	Feder	delta_u	w Rechnung	w Messung	Abweichung
		[mm]	[mm]	[kNm/rad]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
MDF	30	1960	13,4	0,00057	3,1	5,1	5	1,5
	85				3,1	3,2	2,5	29,6
	65				1,0	1,7	0,25	582,4
FPP	30	1960	16,3	0,00057	3,1	8,3	6	38,4
	85				4,5	8,2	7,5	9,1
	65				1,7	2,6	2	30,1
MDF	30	1960	13,4	0,00082	3,1	3,6	5	27,3
	85				3,1	2,3	2,5	7,2
	65				1,0	1,2	0,25	388,8
FPP	30	1960	16,3	0,00082	3,1	6,1	6	1,2
	85				4,5	6,0	7,5	20,2
	65				1,7	1,9	2	4,9
MDF	30	1960	13,4	0,0007	3,1	4,2	5	15,8
	85				3,1	2,7	2,5	7,4
	65				1,0	1,4	0,25	466,0
FPP	30	1960	16,3	0,0007	3,1	7,0	6	16,2
	85				4,5	6,9	7,5	8,4
	65				1,7	2,2	2	9,3

## 5.4.2 Einfluss und Bewertung der Plattenspannweite und unterschiedlicher statischer Systeme

Aus einfachen Überlegungen wird deutlich, dass die Lagerungssituation einen entscheidenden Einfluss auf die Größe der Verformungen hat. Die Abbildungen Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen jeweils einen Vergleich unterschiedlicher, idealer statischer Systeme hinsichtlich ihrer Verformungen unter einer gleichmäßigen Streckenlast.

Faktoren beim Vergleich der Verformung unterschiedlicher stat. Systeme bei einer Verformung durch  $T_0$  ?  $T_u$

Verformung [mm] / Verformung [mm] = Faktor [-]

			
	$\frac{1000}{1000} = 1$	$\frac{250}{1000} = 0,25$	$\frac{73,5}{1000} = 0,0735$
	$\frac{1000}{250} = 4$	$\frac{250}{250} = 1$	$\frac{73,5}{250} = 0,294$
	$\frac{1000}{73,5} = 13,6$	$\frac{250}{73,5} = 3,4$	$\frac{73,5}{73,5} = 1$

Beispiel:

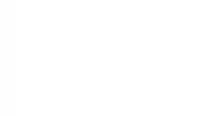
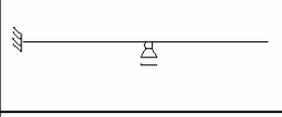
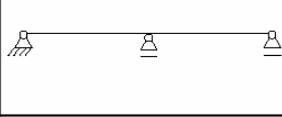
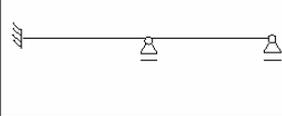
System Spalte 1 im Vergleich mit Zeile 3.

=> maximale Verformungen des Kragarms sind um den Faktor  $1000 / 73,5 = 13,6$  größer als beim einseitig eingespannten Einfeldträger

**Abbildung 14: Faktoren beim Vergleich der Verformungen unterschiedlicher statischer Systeme**

Faktoren beim Vergleich der Verformung unterschiedlicher stat. Systeme bei einer Verformung durch  $T_o$ ?  $T_u$

Verformung [mm] / Verformung [mm] = Faktor [-]

			
	$\frac{1000}{375} = 2,66$	$\frac{250}{375} = 0,66$	$\frac{73,5}{375} = 0,196$
	$\frac{1000}{18,375} = 54,4$	$\frac{250}{18,375} = 13,6$	$\frac{73,5}{18,375} = 4$
	$\frac{1000}{24} = 41,66$	$\frac{250}{24} = 10,42$	$\frac{73,5}{24}$

Beispiel:

System Spalte 1 im Vergleich mit Zeile 3.

=> maximale Verformungen des Kragarms sind um den Faktor **41,66 größer** als beim einseitig eingespannten Zweifeldträger

**Abbildung 15: Faktoren beim Vergleich der Verformungen unterschiedlicher statischer Systeme**

## 6 Übertragung der Ergebnisse auf praxisnahe Anwendungen - Ermittlung eines Gefährdungsrisikos

### 6.1 Übertragung der Ergebnisse auf praxisnahe Anwendungen

Vorab sei erwähnt, dass die in diesem Forschungsvorhaben getroffenen Betrachtungen ausschließlich auf Verformungen basieren, die sich bei einer Feuchtedifferenz von einer Holzwerkstoffplattenoberfläche zur anderen einstellen.

Grundsätzlich können sich Platten aber auch aus Ihrer Plattenebene heraus verformen, wenn keine Feuchtedifferenz vorhanden ist. Dies kann immer dann geschehen, wenn ein Plattenwerkstoff in seiner Ebene quillt, keine freien Quellverformungen durchführen kann und sich somit infolge von Imperfektionen aus der Ebene heraus ausbeult. Dieses Ausbeulen kann unter Umständen zu wesentlich größeren Verformungen führen und ist gesondert zu betrachten.

## 6.1.1 Wärmedämmverbundsysteme

### 6.1.1.1 geklebte Wärmedämmverbundsysteme auf Holzwerkstoffen

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) schützen die dahinter liegende Holzkonstruktion und müssen hohen optischen Anforderungen gerecht werden, da die Außenfassade in der Regel den ersten, optischen Eindruck eines Hauses vermitteln soll. Unplanmäßige Verformungen sind somit in zweierlei Hinsicht zu betrachten. Während die optischen Beeinträchtigungen in der Regel eher auffallen und stören, eigentlich aber nicht sicherheitsrelevant sind, können – eventuell auch unscheinbare – Riss- oder Fugenbildungen in ungünstigen Bereichen dazu führen, dass übermäßig viel Feuchtigkeit in die Konstruktion eindringt und somit zu Schäden führen kann.

Ein weiterer Aspekt ist die Dauerhaftigkeit der Klebeverbindung zwischen Holzwerkstoff und Dämmstoff des WDVS. Durch ständige Quell- und Schwindverformungen wird der in der Regel relativ spröde Kleber einer starken Beanspruchung unterzogen.

Aus den Ergebnissen des Hauptversuchs mit den sechs unterschiedlichen Plattenwerkstoffen kann man deutlich erkennen, dass die Plattenwerkstoffe mit einem hohen E-Modul, der nicht gravierend unter Feuchtigkeitseinwirkung abnimmt, auch zu größeren Verformungen neigen. Ebenso wird die Einspannung am Auflager umso weniger maßgebend, umso größer der E-Modul des Plattenwerkstoffes ist. Je geringer der E-Modul des Plattenwerkstoffes ist, umso geringere Kräfte sind bei gleicher Verformung erforderlich, um diese Verformungen zurück halten zu müssen.

Bisher wurde in der Regel ausschließlich der Feuchteausdehnkoeffizient  $\alpha$  zur Ermittlung einer möglichen Gefährdung berücksichtigt. Die Auflagersituation und der E-Modul des Plattenwerkstoffes haben aber auch einen relevanten Einfluss.

Das Risiko unzuträglicher Verformungen infolge einer Feuchtedifferenz steigt enorm, wenn die Holzwerkstoffe nicht mehr im üblichen Raster von 62,5 cm auf insgesamt drei vertikalen Rippen befestigt werden, sondern z.B. in einem ein-Meter-Raster als Einfeldplatte. Bei gleich bleibender Plattendicke würde sich den Ausführungen aus Kapitel 5.4 folgend nachstehendes Beispiel ergeben:

A

Rastermaß 62,5 cm; Verlegung als Zweifeldplatte; Durchbiegung ca. 1,5 mm

B

Rastermaß 125 cm; Verlegung als Einfeldplatte; Durchbiegung ca. 20,4 mm

Eine gleichmäßige Verformung in vorgenannter Größenordnung wird wahrscheinlich keinen höheren optischen Anforderungen genügen.

Bisher ist man bei der Prüfung von WDVS im Rahmen von z.B. Zulassungsprüfungen immer davon ausgegangen, dass phenolharzgebundene Flachpressplatten den ungünstigsten Holzwerkstoff darstellen. Die Ergebnisse dieses Vorhabens zeigen aber, dass sich OSB teilweise wesentlich ungünstiger verhalten, vermutlich durch den höheren E-Modul der OSB. Durch das teilweise extrem träge Verhalten von OSB hinsichtlich der Einstellung einer Ausgleichsfeuchte ist allerdings zu überprüfen, ob die jetzigen Bewitterungszyklen ausreichend sind, damit sich die entsprechenden Ausgleichsfeuchtigkeiten einstellen können.

Die Erfassung der Querkzugbeanspruchung des Klebers zwischen Holzwerkstoff und Dämmstoff des WDVS ist nur unter sehr stark idealisierten Annahmen mit einfacheren Rechenverfahren möglich, da sie von mehreren Faktoren beeinflusst wird:

Biegesteifigkeit des WDVS  
 Querdehnsteifigkeit des WDVS  
 E-Modul des Holzwerkstoffes  
 Größe der Verformungen

Über die Umstellung der Gleichung zur Ermittlung der maximalen Durchbiegung eines Einfeldträgers unter Gleichstreckenlast bei bekannter Verformung kann die erforderliche, gleichmäßig verteilte Rückstelllast  $q$  ermittelt werden:

$$q_{\text{Platte}} = \frac{\max f_{\text{Platte}} * 384EI_{\text{Platte}}}{5l^4} \quad \text{Gleichung 53}$$

$$q_{\text{WDVS}} = \frac{\max f_{\text{WDVS}} * 384EI_{\text{WDVS}}}{5l^4} \quad \text{Gleichung 54}$$

Mit

$$\max f_{\text{WDVS}} = \max f_{\text{Platte}}$$

ergibt sich die Querkzugbeanspruchung der Klebefuge zwischen WDVS und Holzwerkstoffplatte aus dem Betrag der Differenz der Kehrwerte von  $q_{\text{Platte}}$  und  $q_{\text{WDVS}}$ :

$$\frac{1}{\max q_{\text{Kleber}}} = \left| \frac{5l^4}{384 \max f} \left( \frac{1}{EI_{\text{Platte}}} - \frac{1}{EI_{\text{WDVS}}} \right) \right| \quad \text{Gleichung 55}$$

Wobei der Faktor  $\frac{5l^4}{384 \max f}$  für diesen speziellen Fall des gelenkig gelagerten Einfeldträgers auf zwei Stützen gilt.

Aus Gleichung 55 wird deutlich, dass eine hohe Biegesteifigkeit des WDVS in Verbindung mit einer hohen Biegesteifigkeit der Holzwerkstoffplatte zu einer hohen Querkzugbeanspruchung der Klebefuge führt. Vorgenanntes gilt nur unter der Annahme einer unendlich hohen Querdehnsteifigkeit des WDVS. Diese liegt in der Realität aber nicht vor.

Es treten aber tatsächlich nicht nur in der Klebefuge, sondern auch im WDVS Querkzugspannungen auf. Diese sind im Bereich des Klebers maximal und haben im Bereich des Putzsystems eine Größenordnung nahe 0.

Aus dem Hook'schen Gesetz und dem angenommenen dreiecksförmigen Verlauf der Querzugspannungen über die Dicke des WDVS ergibt sich eine theoretische Querdehnung von

$$\varepsilon_{\text{quer}} = \frac{q_{\text{quer}}}{E_{\text{quer}}} * 0,5 \quad \text{Gleichung 56}$$

mit der WDVS-Dicke  $d_{\text{WDVS}}$  ergibt sich eine Dickenzunahme von

$$\Delta d_{\text{WDVS}} = \varepsilon_{\text{quer}} * d_{\text{WDVS}} \quad \text{Gleichung 57}$$

Somit wird Gleichung 55 zu

$$\frac{1}{\max q_{\text{Kleber}}} = \left| \frac{5l^4}{384 \max f_{\text{Platte}} * EI_{\text{Platte}}} - \left( \frac{5l^4}{384 \max f_{\text{WDVS}} * EI_{\text{WDVS}}} + \frac{1}{q_{\text{quer}}} \right) \right| \quad \text{Gleichung 58}$$

mit der Annahme von

$$f_{\text{Platte}} = f_{\text{WDVS}} + \Delta d_{\text{WDVS}} \quad \text{Gleichung 59}$$

und

$$\frac{1}{q_{\text{WDVS}}} + \frac{1}{q_{\text{quer}}} = \frac{1}{q_{\text{Platte}}} \quad \text{Gleichung 60}$$

wird

$$q_{\text{quer}} = \frac{1}{1 + \frac{f_{\text{Platte}} * 384 EI_{\text{WDVS}}}{E_{\text{quer}} * 5l^4 * q_{\text{Platte}}}} \quad \text{Gleichung 61}$$

Mit der Annahme einer unendlich hohen Querdehnsteifigkeit des Klebers und der Holzwerkstoffplatte wird  $\max f_{\text{WDVS}}$  zu

$$\max f_{\text{WDVS}} = \max f_{\text{Platte}} - \Delta d_{\text{WDVS}} \quad \text{Gleichung 62}$$

$\max f_{\text{WDVS}}$  darf dabei nur einen positiven Wert aufweisen.

Da die Querdehnsteifigkeit eines WDVS aber in der Regel sehr niedrig ist, sind die Querzugbeanspruchungen infolge einer hygrisch bedingten Plattenverwölbung in der Regel vernachlässigbar. Zudem sind die möglichen Verformungen bei sachgerechter Montage und bei üblicher Befeuchtung der Holzwerkstoffplatten sehr gering, so dass bei ordnungsgemäß montierten WDVS von keiner relevanten Gefährdung ausgegangen werden kann. Da die Einspannung am Auflager einen wesentlichen Einfluss auf die Verformungen hat, wird empfohlen, auf die Verformungsmessungen

bei der Durchführung von Zulassungsprüfungen entweder zu verzichten oder die Einspannsituation mit zu erfassen, was aber unverhältnismäßig erscheint.

### **6.1.1.2 Mechanisch befestigte Wärmedämmverbundsysteme**

Mechanisch befestigte WDVS werden ausschließlich zusätzlich beansprucht, wenn sich die Holzwerkstoffplatte nach außen verformt. Durch die in der Regel geringe Steifigkeit in der Dicke des WDVS-Dämmstoffes ist die zusätzliche Beanspruchung der Verbindungsmittel auf Herausziehen üblicherweise vernachlässigbar klein. Bei einer Verformung nach innen bildet sich ein geringfügiger, unplanmäßiger Hohlraum. Da dieser aber nicht mit der Umgebungsluft in Verbindung steht und unter normalen Umständen auch nicht so groß ist, dass innerhalb des Hohlraumes eine Luftzirkulation stattfinden kann, sind die Auswirkungen dieser Hohlraumbildung nach heutigen Erkenntnissen vernachlässigbar.

### **6.1.1.3 Wärmedämmverbundsysteme aus Holzfaserdämmplatten**

Wärmedämmverbundsysteme aus Holzfaserdämmplatten stellen ein besonderes System dar, weil sich sowohl bei dem WDVS, als auch bei der Holzwerkstoffplatte, auf dem das WDVS befestigt ist, Verformungen infolge einer Feuchtedifferenz einstellen können. Diese können in ungünstigen Situationen entgegengesetzt sein und üben somit eine erhöhte Beanspruchung auf einen Kleber zwischen den beiden Holzwerkstoffen aus. Da die Querdehnsteifigkeit von Holzfaserdämmplatten aber in der Regel gering ist, werden die Beanspruchungen wahrscheinlich gering sein, wobei zurzeit noch keine Langzeituntersuchungen durchgeführt wurden, die diese Wechselwirkungen entsprechend berücksichtigen.

Die reinen Verformungen des WDVS-Dämmstoffes infolge einer Feuchtedifferenz werden sich in der Regel aufgrund der großen Dicke des Dämmstoffes, des relativ geringen Befestigungsabstandes und des geringen E-Moduls des Dämmstoffes im Vergleich zum darauf geklebten Putzsystem sehr stark in Grenzen halten.

Aber auch hier wird deutlich, dass eine Gefährdung mit steigender Steifigkeit des Dämmstoffes zunimmt.

## **6.1.2 Belüftete Ebenen, vorgehängte Fassaden**

Durch eine Verformung eines Holzwerkstoffes in eine Belüftungsebene hinein, wird sich der Lüftungsquerschnitt verringern. Aufgrund der relativ geringen zu erwartenden Verformungen bei sachgerechter Montage der Holzwerkstoffe ist eine relevante Beeinträchtigung aber nicht zu erwarten.

Vorgehängte Fassaden werden aber oft aus Sperrholz oder mineralisch gebundenen Holzwerkstoffplatten gefertigt. Diese Materialien haben in der Regel einen relativ hohen Biege-E-Modul und können somit große Kräfte entwickeln. Dieser Fakt ist nicht zu unterschätzen, wie Schäden an vorgehängten Fassaden immer wieder deutlich belegen. Verbindungsmittel, die für das Eigengewicht und Wind bemessen worden sind, können unter Umständen nicht ausreichend sein, wenn es gilt, Kräfte aus einer Feuchtedifferenz zwischen den Plattenoberflächen aufzunehmen. Da solche Fassadenplatten direkt von der Sonne beschienen und mit Niederschlägen beansprucht wer-



den, können die Feuchtedifferenzen zwischen der Vorder- und der Rückseite entsprechend große Werte aufweisen. Dies ist bei der Befestigung zu berücksichtigen.

### **6.1.3 Direktbeschichtungen - Fliesen**

Obwohl Fliesen als Direktbeschichtung von Außenbauteilen aus Holz auf der Außenseite in der Regel nicht durchgeführt werden, wird hier ganz kurz darauf eingegangen. Fliesen sind grundsätzlich ähnlich zu behandeln wie geklebte Wärmedämmverbundsysteme, wobei bei den Fliesen die Annahme einer unendlich hohen Querdehnsteifigkeit wesentlich eher gegeben ist als bei einem WDVS. Abgesehen von diesem Umstand sind Fliesen im Vergleich zu Holzwerkstoffen sehr spröde und weisen keine nennenswerten Dehnungen unter Feuchtigkeitseinfluss auf. Die bekannten Probleme mit Fliesen auf Holzwerkstoffen müssen hier nicht weiter erläutert werden. Es haben sich in diesem Forschungsvorhaben auch keine neuen Erkenntnisse hinsichtlich der Befliesbarkeit von Holzwerkstoffen ergeben. Eine direkte Beschichtung von Holzbauteilen im Außenbereich mit Fliesen bleibt weiterhin sehr kritisch. Es sind auch z.Zt. keine Lösungen erkennbar.

## **7 Berechnungsparameter**

Die Ausführungen der vorangegangenen Kapitel fließen in die nachstehenden Berechnungsparameter zur rechnerischen Abschätzung der Plattenverformungen ein. Es ist dabei wichtig, alle Parameter möglichst genau zu kennen. Nur wenn die Schwankungsbreite der Parameter bekannt ist, kann auch die Fehlerabschätzung der Rechenergebnisse berücksichtigt werden. Eine „genaue“ Berechnung kann selbst mit „genauen“ Berechnungsverfahren wie der Finite-Elemente-Methode nur bei genauer Kenntnis aller Parameter erfolgen. Im Kapitel 5.3 sind diverse Rechenverfahren aufgeführt, mit denen eine rechnerische Abschätzung der Verformungen durchgeführt werden kann.

### **7.1 Materialeigenschaften und geometrische Daten**

Hinsichtlich der Materialeigenschaften müssen folgende Eigenschaften bekannt sein:

Biege-E-Modul

Feuchteabhängiger Biege-E-Modul

Sorptionsisotherme

Diffusionswiderstand

Feuchteausdehnkoeffizient

Plattendicke, Plattenaufbau



## **7.2 Klimabedingungen**

Das Umgebungsklima bewirkt eine Feuchtedifferenz im Holzwerkstoff und muss somit bekannt sein. Mit Hilfe numerischer Methoden kann das Umgebungsklima eines Baustoffes, und unter Zuhilfenahme der Sorptionsisotherme auch die Materialfeuchtigkeit, abgeschätzt werden. Es erscheint zum heutigen Zeitpunkt sinnvoll, die Ermittlung der Materialfeuchtigkeit und die Ermittlung der Verformungen getrennt voneinander vorzunehmen. Bei der Ermittlung der Verformungen sind Parameter wie z.B. die Lagerungssituation von entscheidender Bedeutung, die aber auf den Verlauf der Materialfeuchtigkeit einen nur sehr stark untergeordneten Einfluss haben. Umgekehrt hat der gesamte Wandaufbau mit eventueller bauphysikalischer Funktionsschichten einen sehr starken Einfluss auf die Materialfeuchtigkeit, aber nur sehr stark untergeordnete Bedeutung bei der Ermittlung der Verformungen.

## **7.3 Lagerungssituation**

Neben dem statischen System, welches relativ gut und in der Regel einfach zu ermitteln ist, ist der Grad der Einspannung von großer Bedeutung zur rechnerischen Abschätzung von Verformungen. Der Grad der Einspannung ist aber normalerweise nicht bekannt und kann oft nur sehr grob abgeschätzt werden.



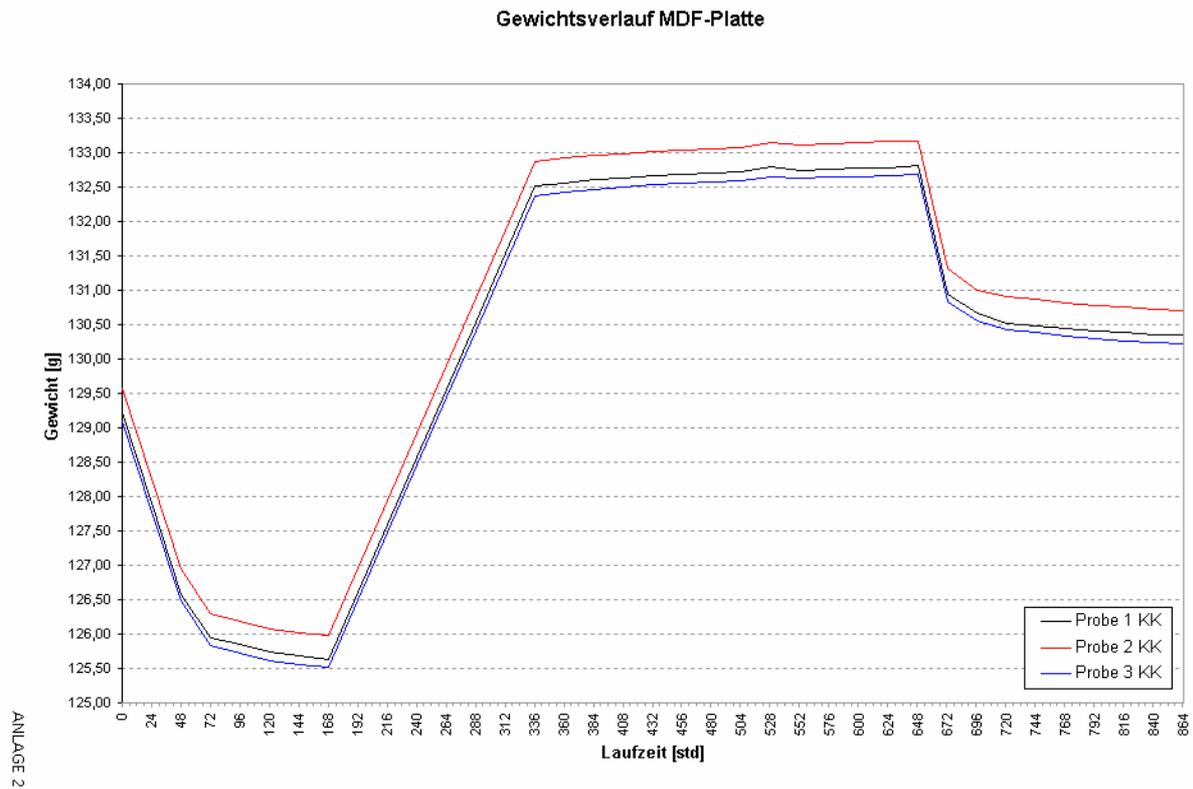
## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde das Verformungsverhalten von Holzwerkstoffen infolge einer Feuchtedifferenz zwischen den beiden Plattenoberflächen untersucht. Dazu wurden diverse, praxisübliche Holzwerkstoffe wie OSB, Spanplatte, MDF, leichte MDF und Gipsfaserplatte mit Differenzklimaten beansprucht und die Verformungen mit Hilfe von Wegaufnehmern ermittelt. Mit Hilfe numerischer Simulationen und einfacher, üblicher Rechenverfahren sollten die Versuchsergebnisse errechnet werden. Die Verwendung ideal gelenkig gelagerter Modelle führte dabei immer zwangsläufig zu wesentlich höheren rechnerischen Verformungen. Da die Einspannung am Auflager einen maßgeblichen Einfluss auf die Verformungen hat, wurde die Auflagersituation bei der numerischen Simulation durch Modellierung des Auflagers und bei einfacheren Rechenverfahren durch Zuweisung einer Drehfedersteifigkeit berücksichtigt. Es lassen sich somit bei vorliegen einer Feuchtedifferenz zwischen den beiden Plattenoberflächen auch Rechenergebnisse erzielen, die den Versuchsergebnissen sehr nahe kommen. Da sich durch eine klimatische Beanspruchung von Holzwerkstoffen auch relevante Eigenschaften wie z.B. der E-Modul, der Feuchteausdehnkoeffizient und die Lagerungsbedingungen ändern, erscheint eine genaue Berechnung der Verformungen zur Zeit nicht möglich, aber auch nicht erforderlich, da es belanglos erscheint, ob sich eine Holzwerkstoffplatte z.B. 15 mm oder 17 mm verformt. Beide Verformungen sind z.B. unter einem WDVS nicht hinnehmbar. Ebenso erscheint es unrelevant, ob sich eine Platte unter einem WDVS um 1,8 mm oder um 3 mm verformt. Trotz der prozentual großen Abweichung ist die Differenz in der Praxis relativ gering. Je nach Dicke und Art des Dämmstoffes können sich solche Verformungen aber vor allem im Streiflicht abzeichnen und einen entsprechenden optischen Mangel darstellen.

Keramische Direktbeschichtungen wie z.B. Fliesen verhalten sich bekanntermaßen wegen ihrer geringen Flexibilität wesentlich weniger gutmütig als WDVS. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens konnten aber keine weiteren Erkenntnisse hinsichtlich der Beschichtung von Holzwerkstoffen mit Fliesen gewonnen werden, so dass dies weiterhin kritisch bleibt.

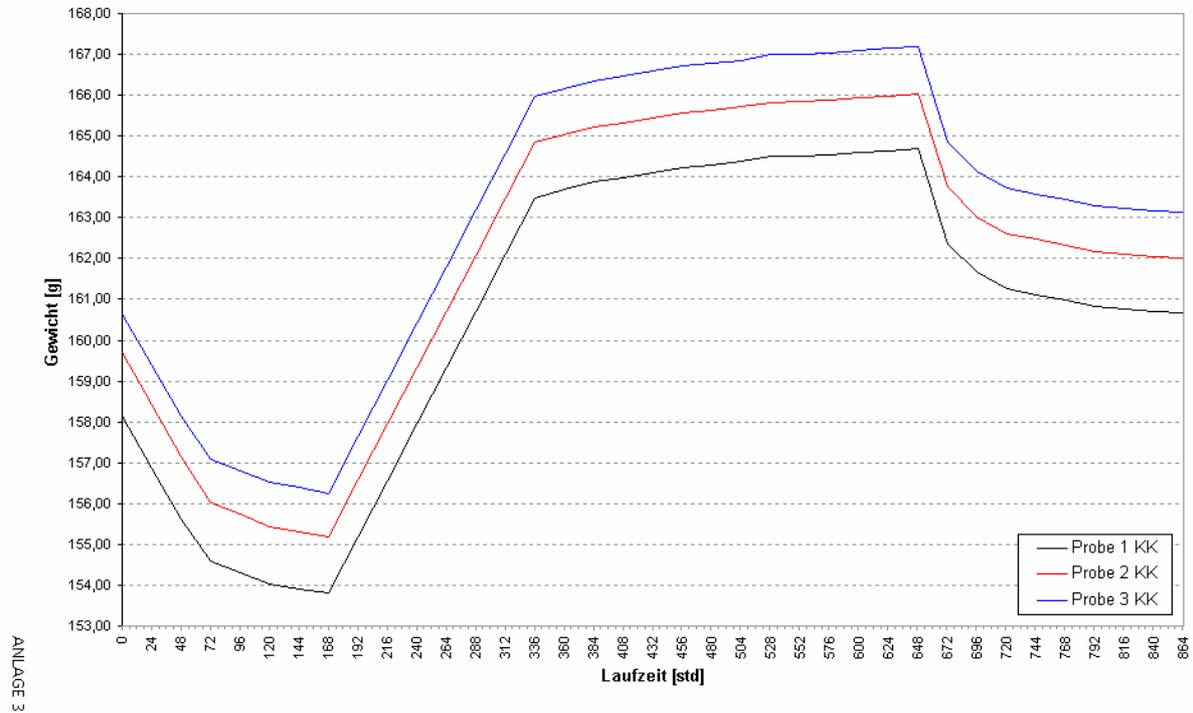
Hinsichtlich des Gefährdungsrisikos kann gesagt werden, dass bei entsprechend sachgerecht ausgeführter Montage der Holzwerkstoffplatten und üblicher Feuchtedifferenz keine besondere Gefährdung durch einen Verzug von Plattenwerkstoffen festgestellt werden kann. Schäden an z.B. vorgehängten Fassaden aus Sperrholz oder an auf Holzwerkstoffen geklebten WDVS zeigen aber, dass eine sachgerechte Ausführung der Montage zwingend erforderlich ist. Die Kräfte können unter ungünstigen Umständen so groß werden, dass Verbindungsmittel heraus gezogen werden, was zu einer anderen statischen Situation führt und dieses wiederum zu in der Regel wesentlich größeren Verformungen. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sollen dazu beitragen, mögliche Kräfte und Verformungen besser abschätzen zu können. Dem Anwender werden Möglichkeiten dargelegt, die bauphysikalischen und statischen Randbedingungen in vereinfachten oder „genauerer“ Berechnungen entsprechend zu berücksichtigen.

## 9 Anhang



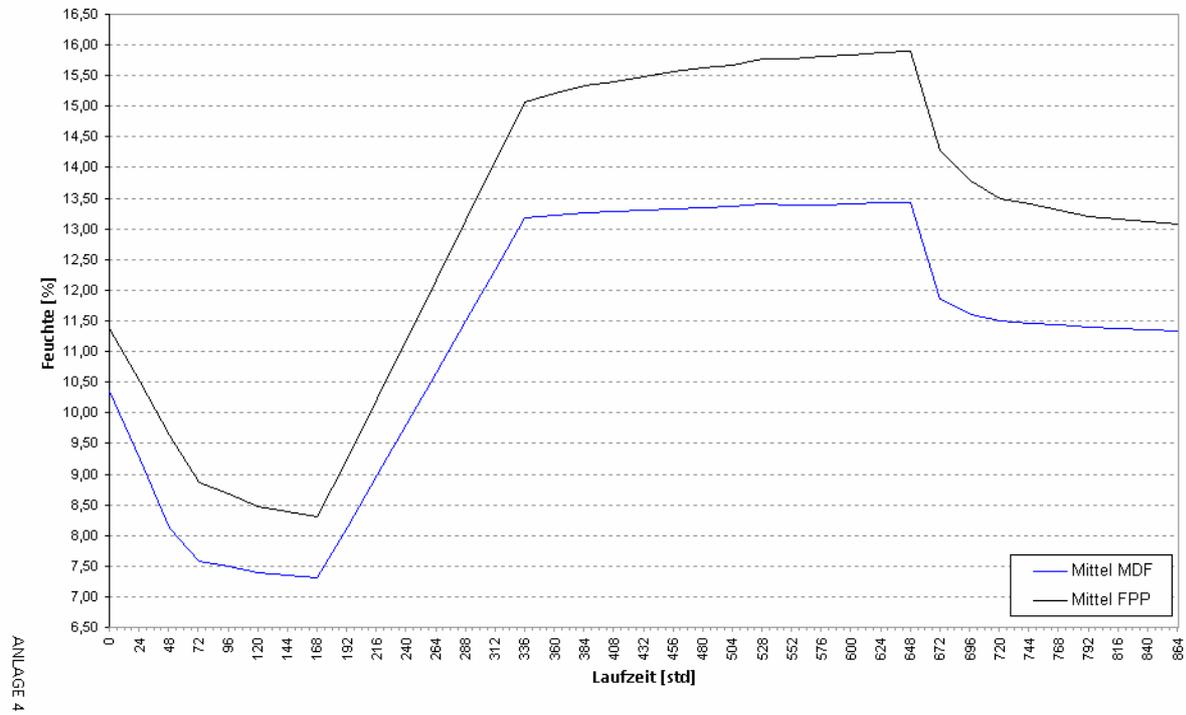
**Anhang 1: Verlauf der Masse der MDF-Platte über den Versuchszeitraum des Versuchs mit den zwei Plattenwerkstoffen**

Gewichtsverlauf phenolharzgebundene Spanplatte

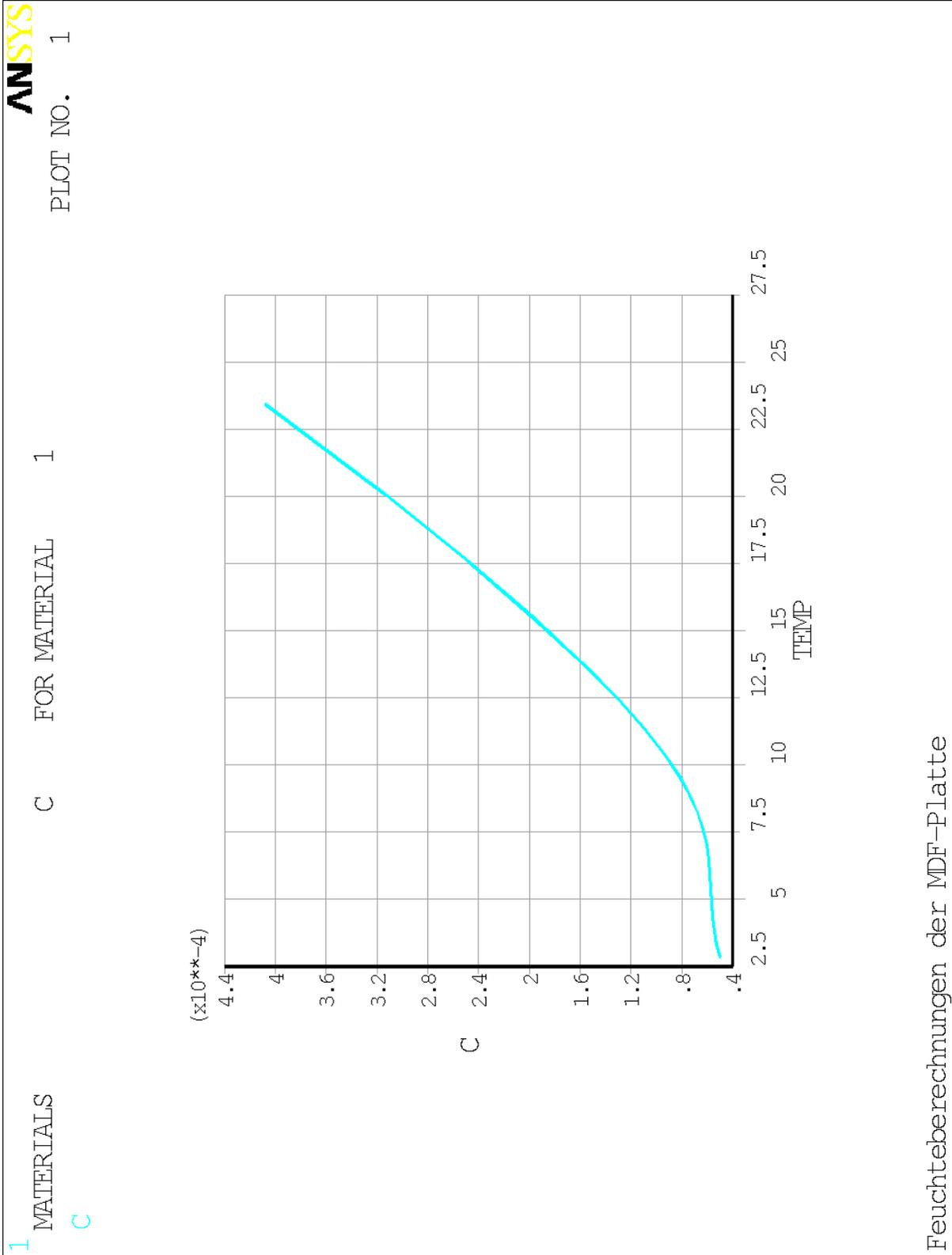


**Anhang 2: Verlauf der Masse der Spanplatte über den Versuchszeitraum des Versuchs mit den zwei Plattenwerkstoffen**

Vergleich der gemittelten Feuchte der je 3 Referenzproben von MDF und FPP

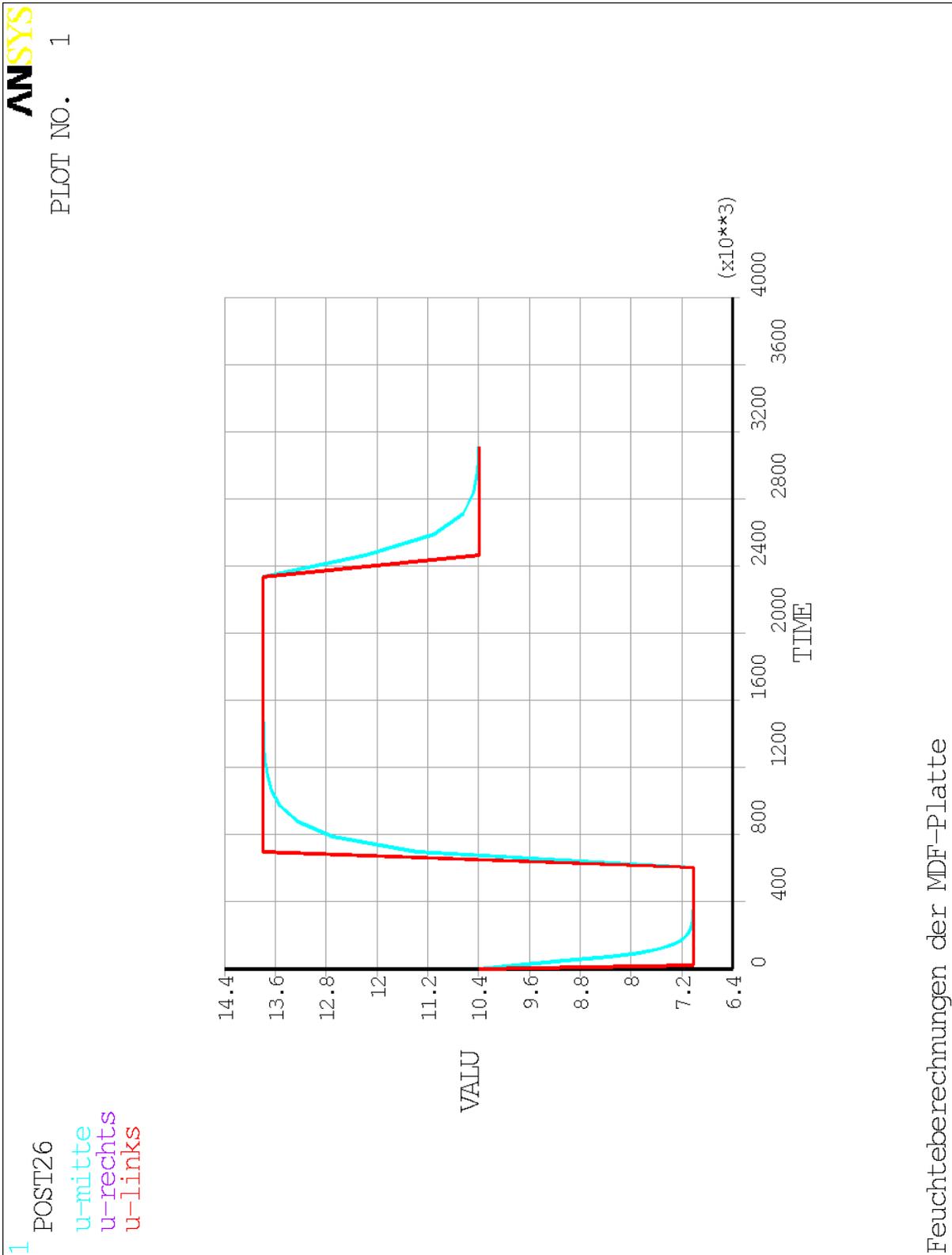


Anhang 3: Vergleich der gemittelten Feuchte der je drei Referenzproben von MDF und Spanplatte (FPP)

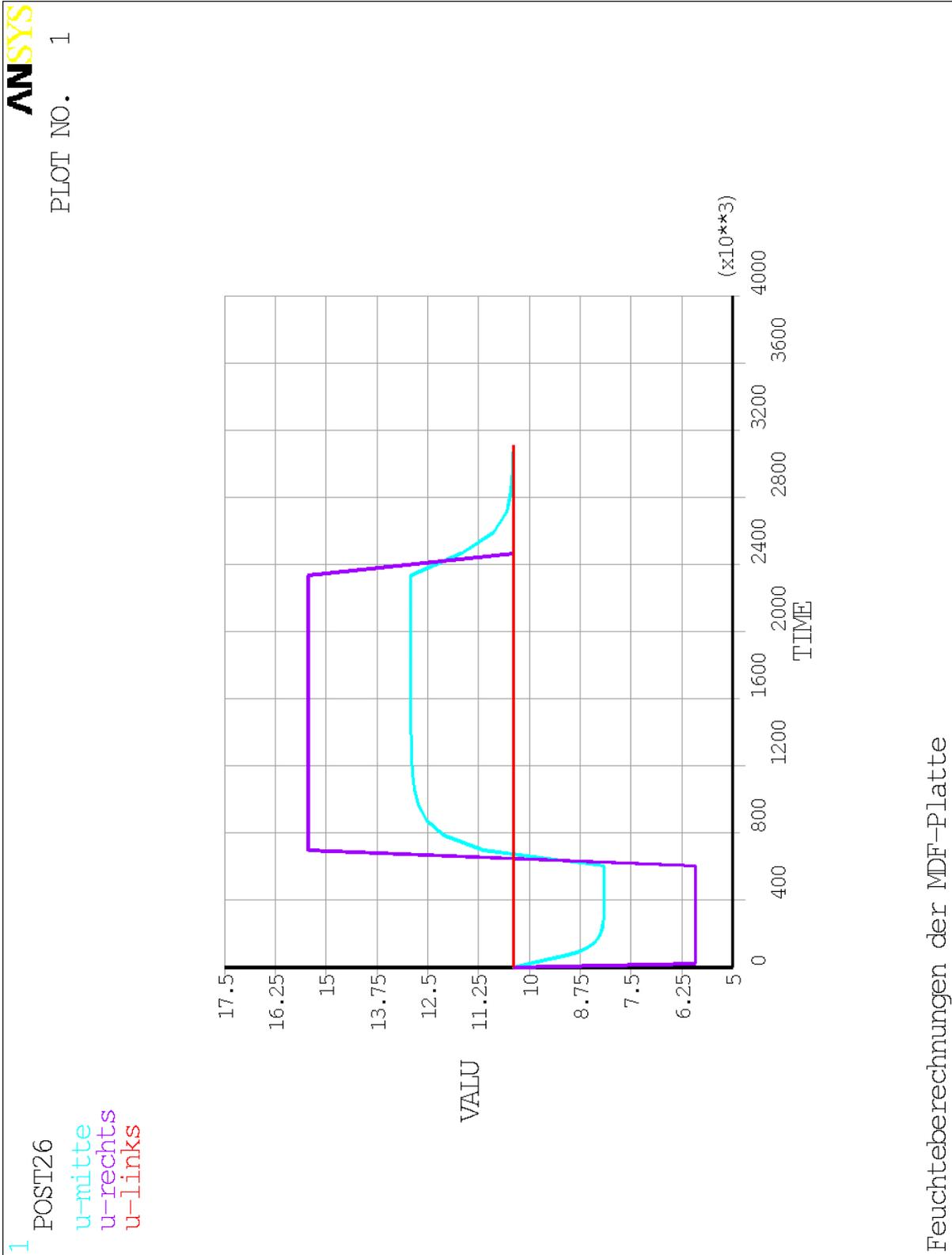


Anhang 4: Feuchtespeicherfähigkeit des MDF-Werkstoffes

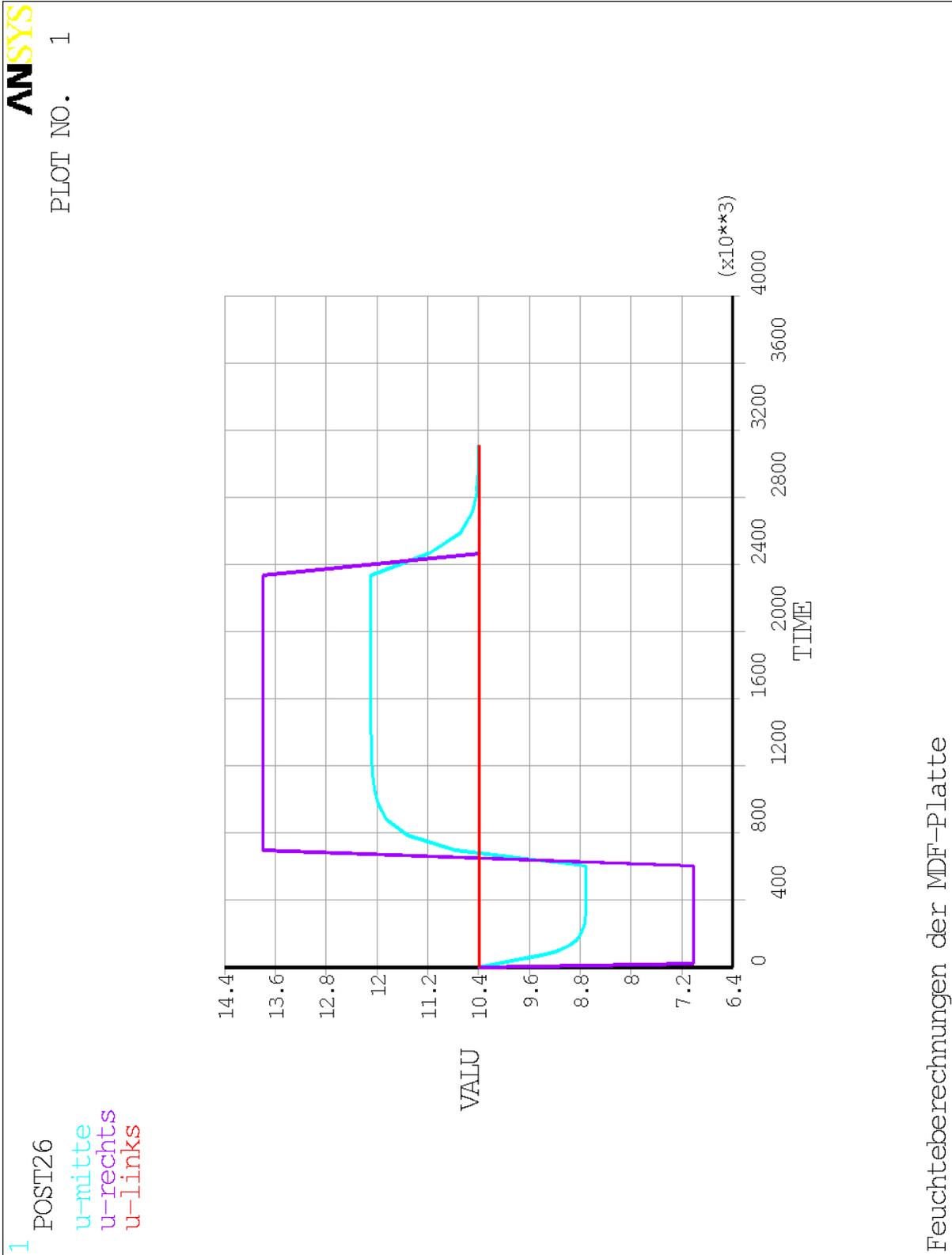




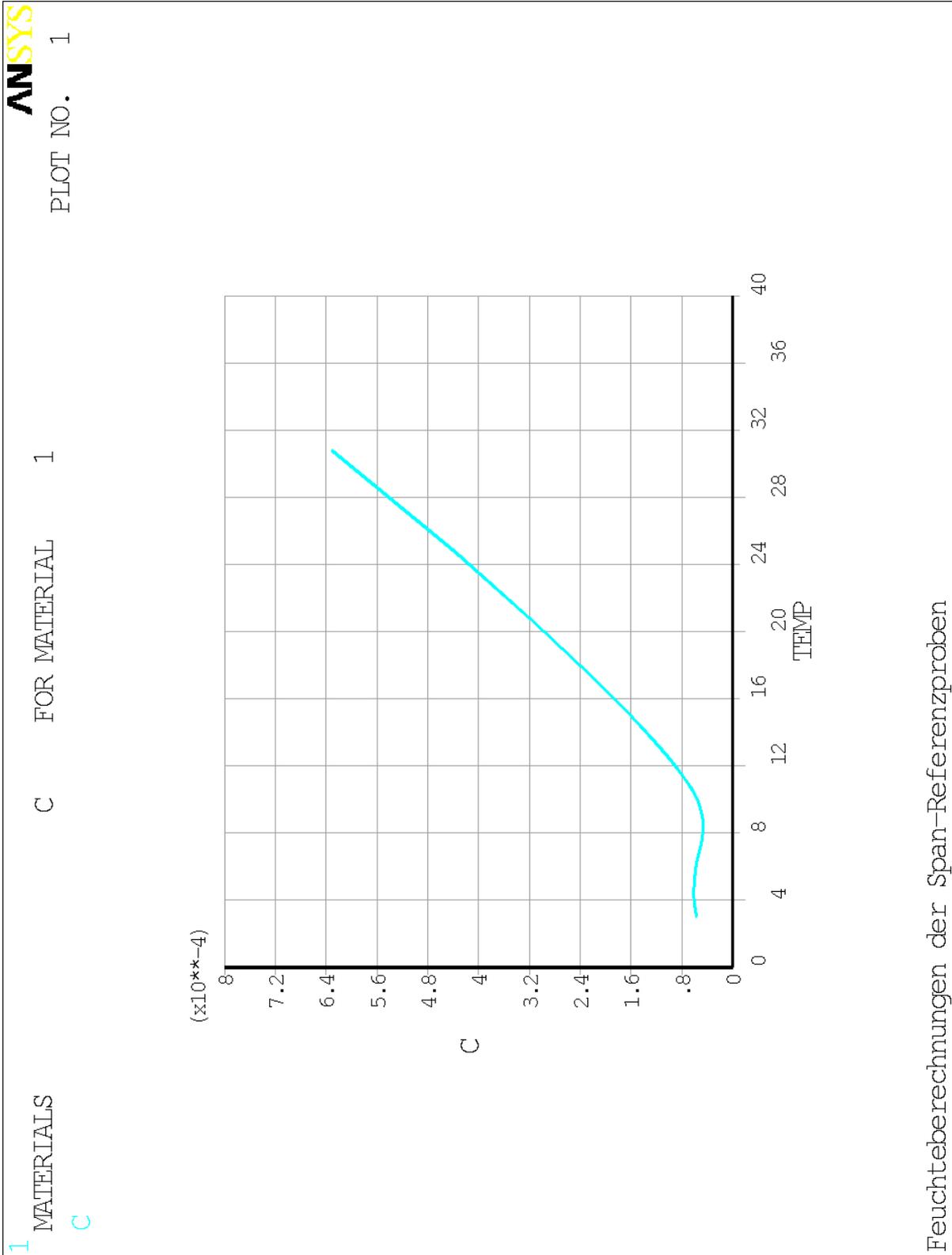
Anhang 6: Knotenfeuchten der MDF-Referenzproben 40 % - 80 % - 65 %



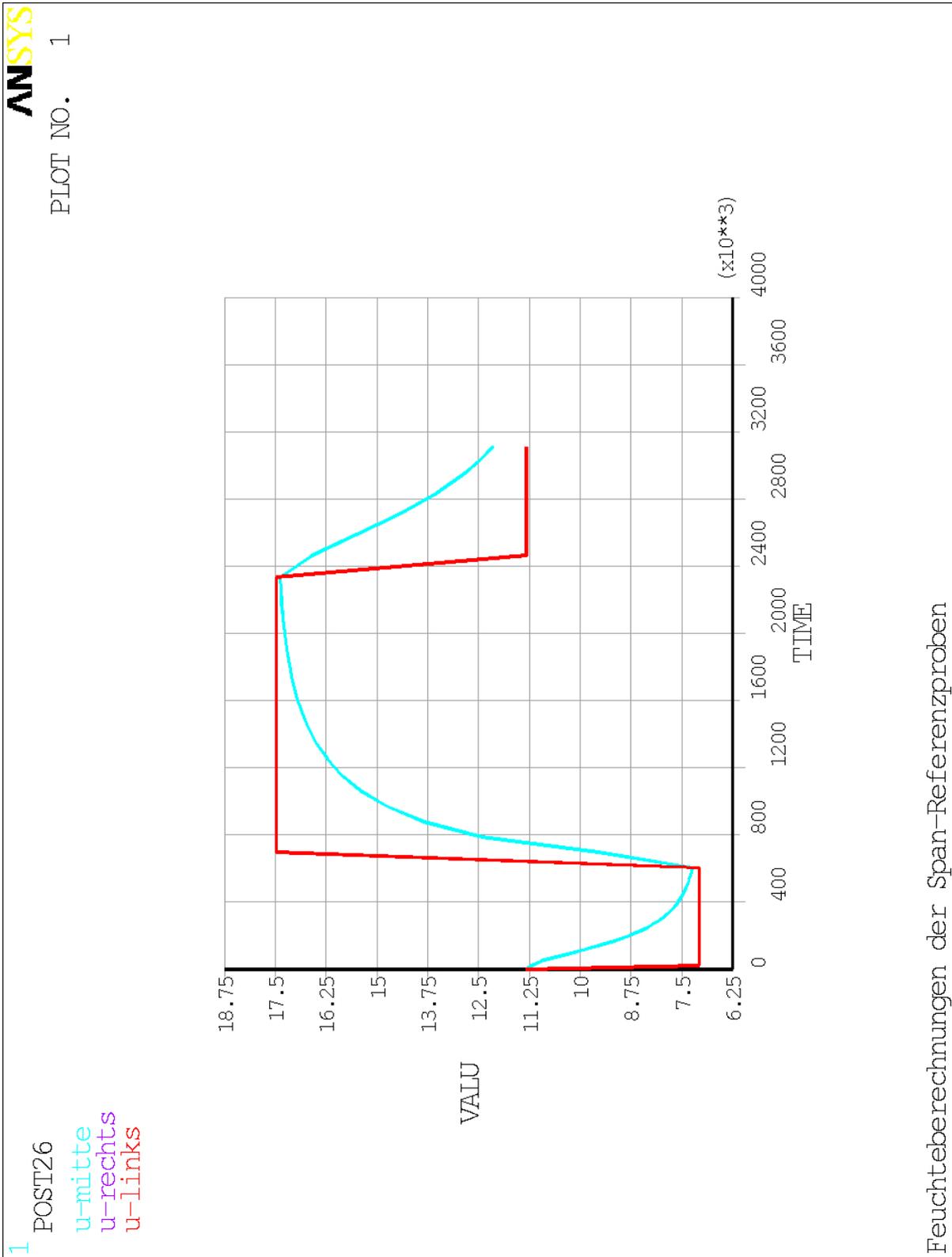
Anhang 7: Knotenfeuchten der MDF-Platte 30 % - 85 % - 65 %



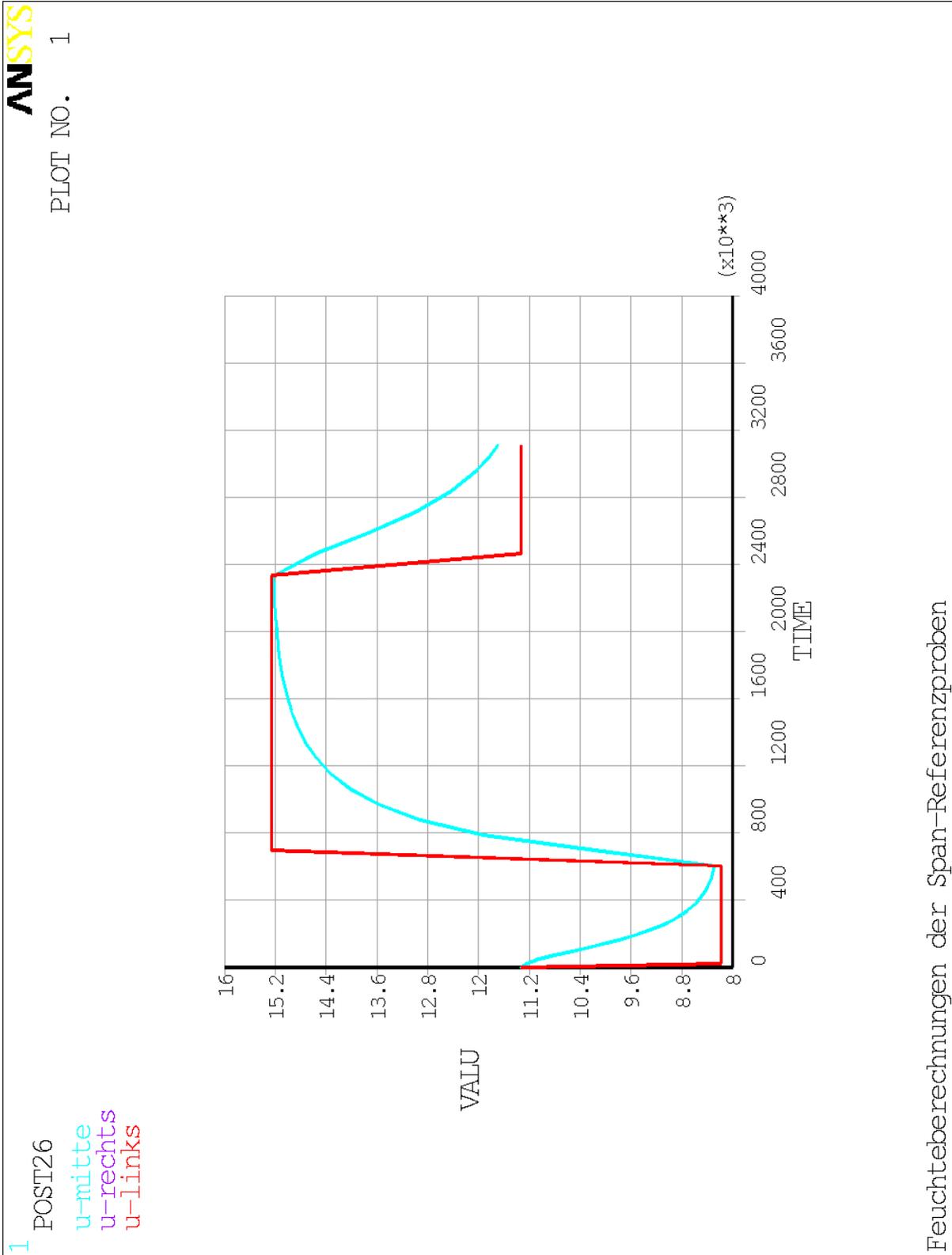
Anhang 8: Knotenfeuchten der MDF-Platten 40 % - 80 % - 65 %



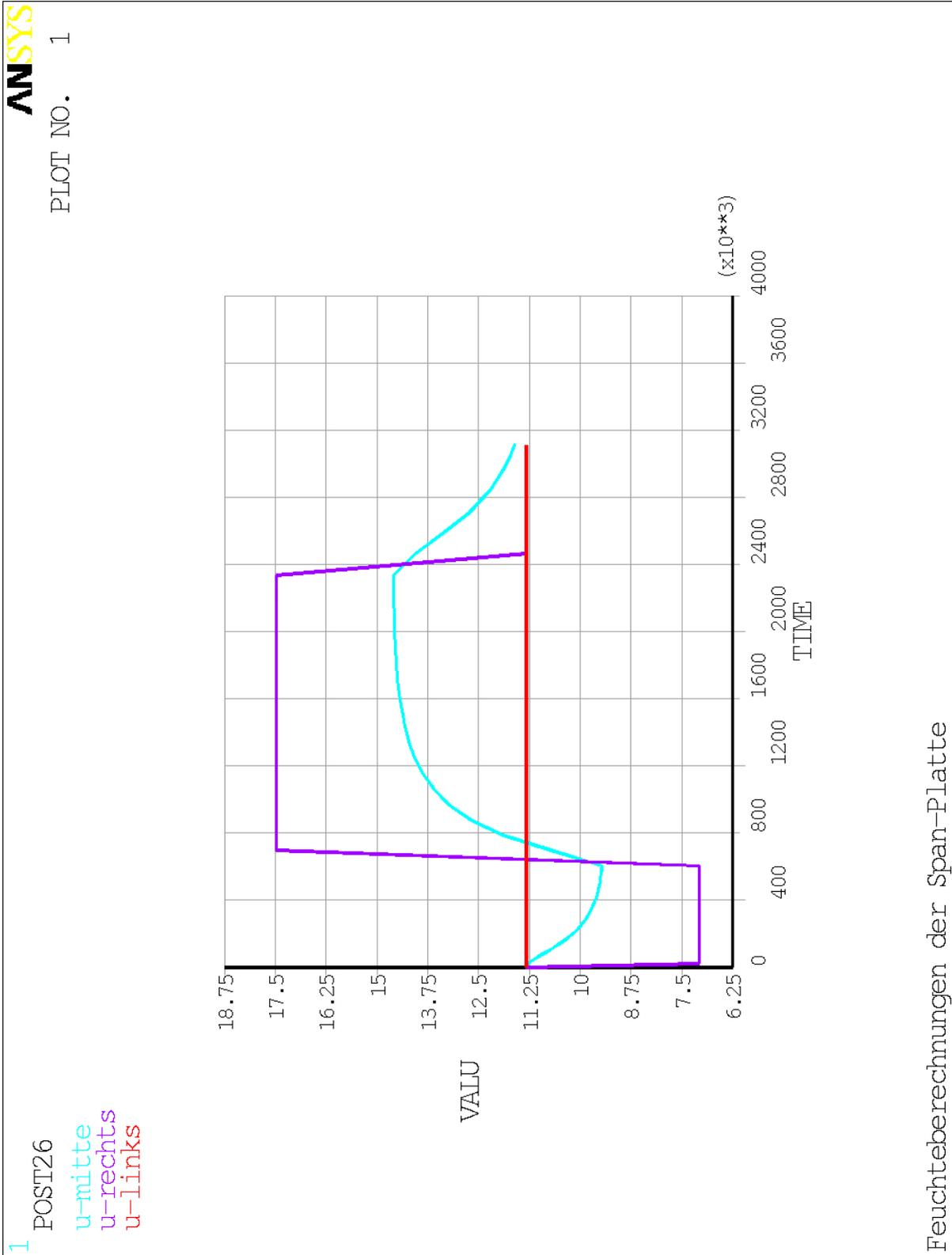
Anhang 9: Feuchtespeicherfähigkeit der Spanplatte



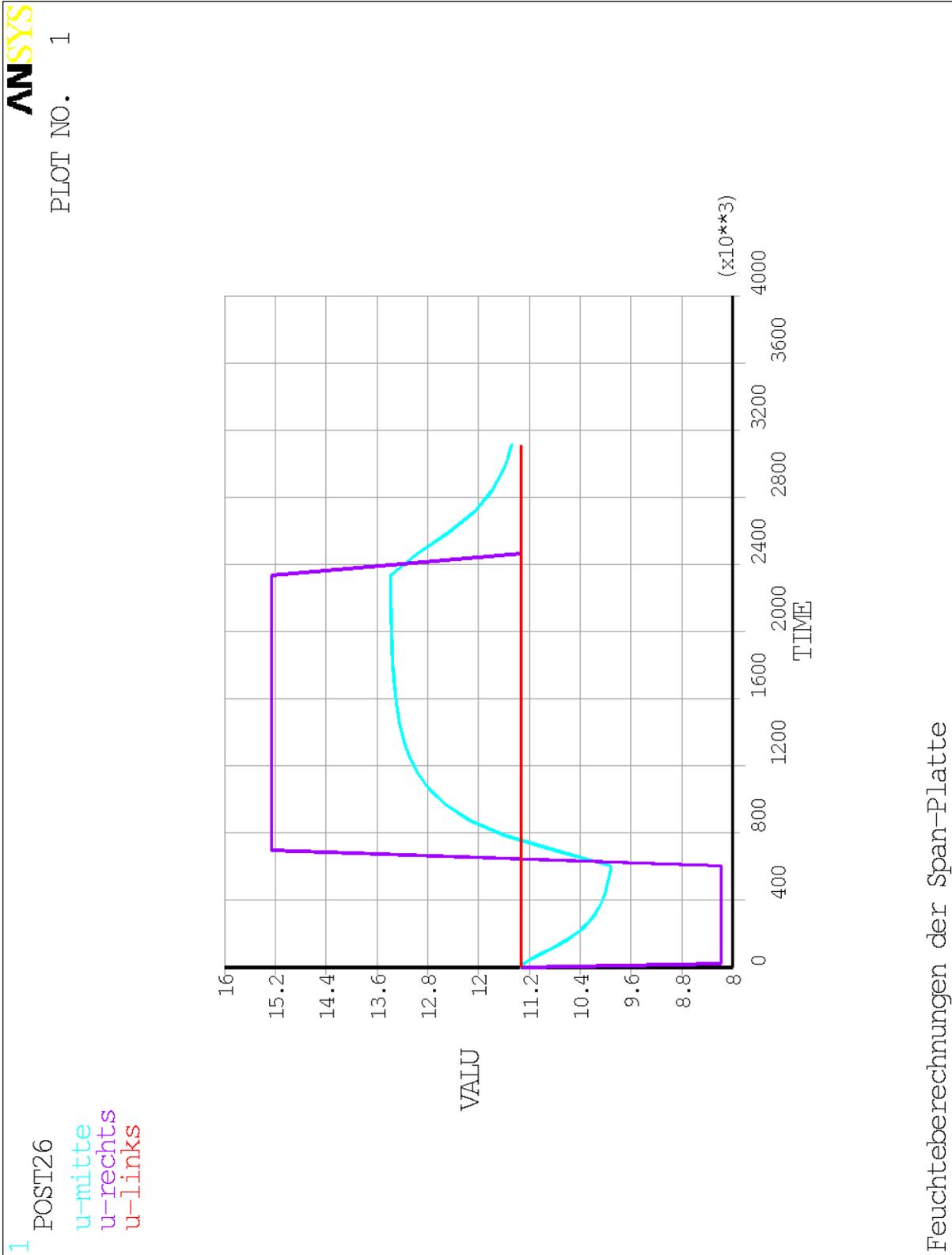
Anhang 10: Knotenfeuchten der Spanplatten-Referenzproben 30 % - 85 % - 65 %



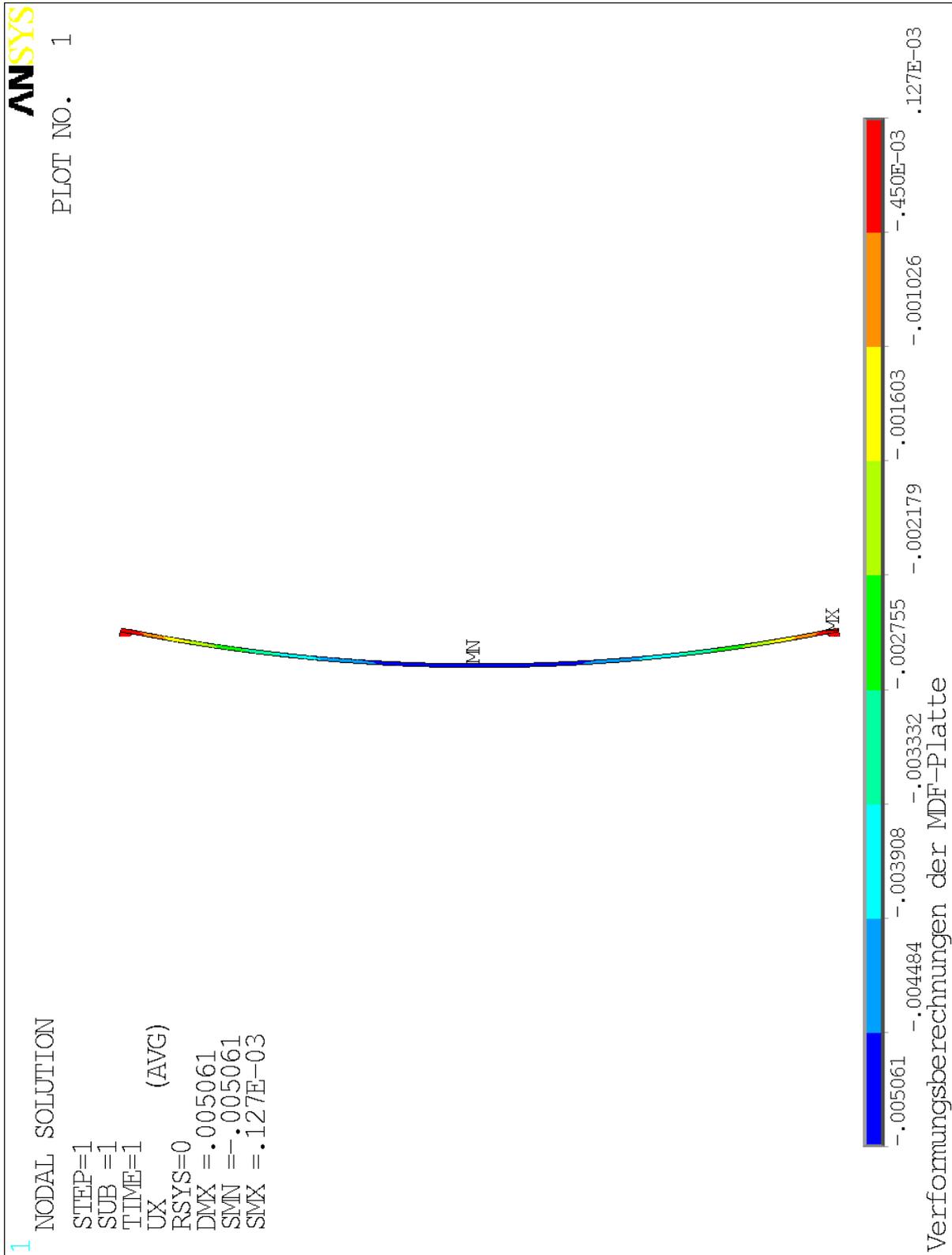
Anhang 11: Knotenfeuchten der Spanplatten- Referenzproben 40 % - 80 % - 65 %



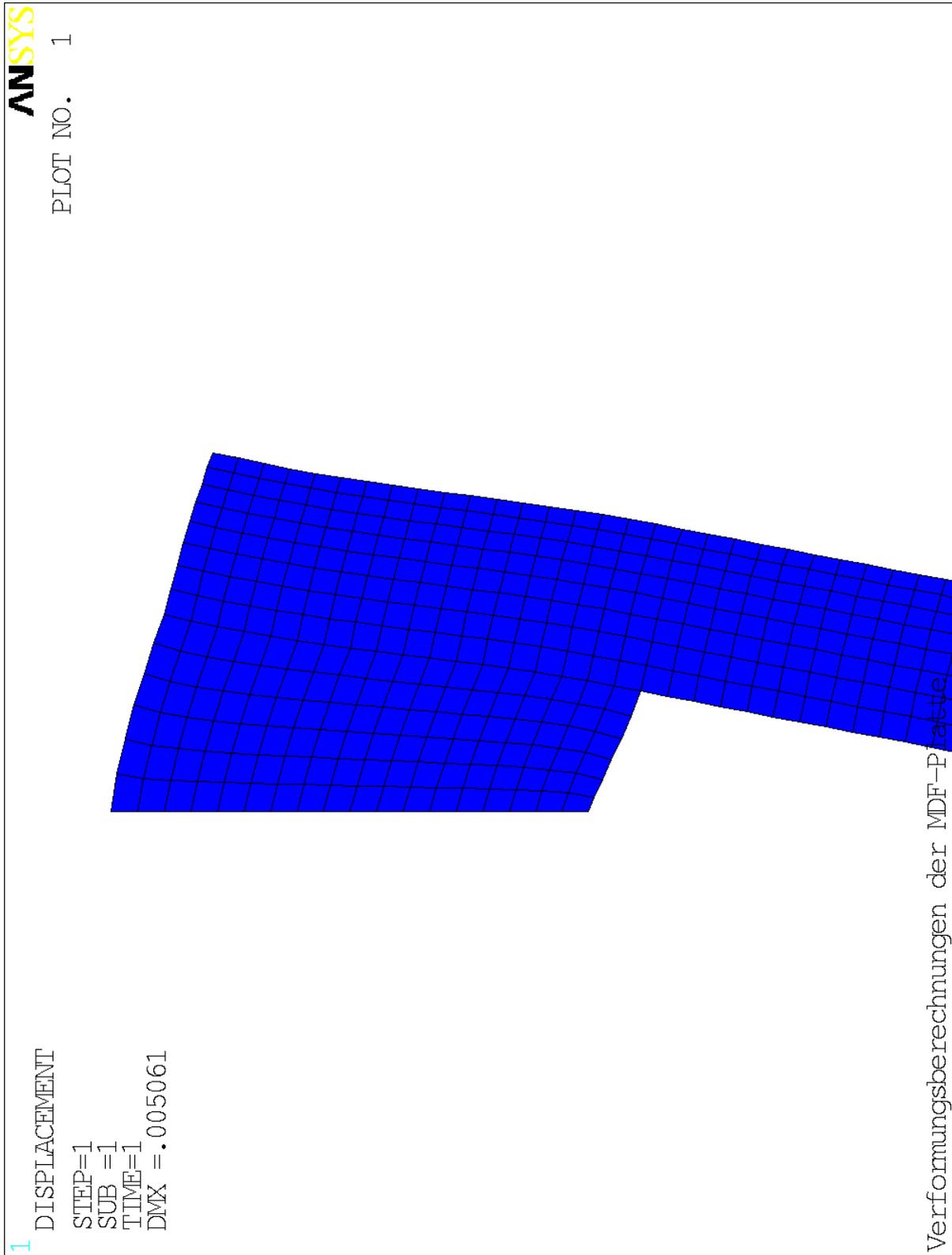
Anhang 12: Knotenfeuchten der Spanplatte 30 % - 85 % - 65 %



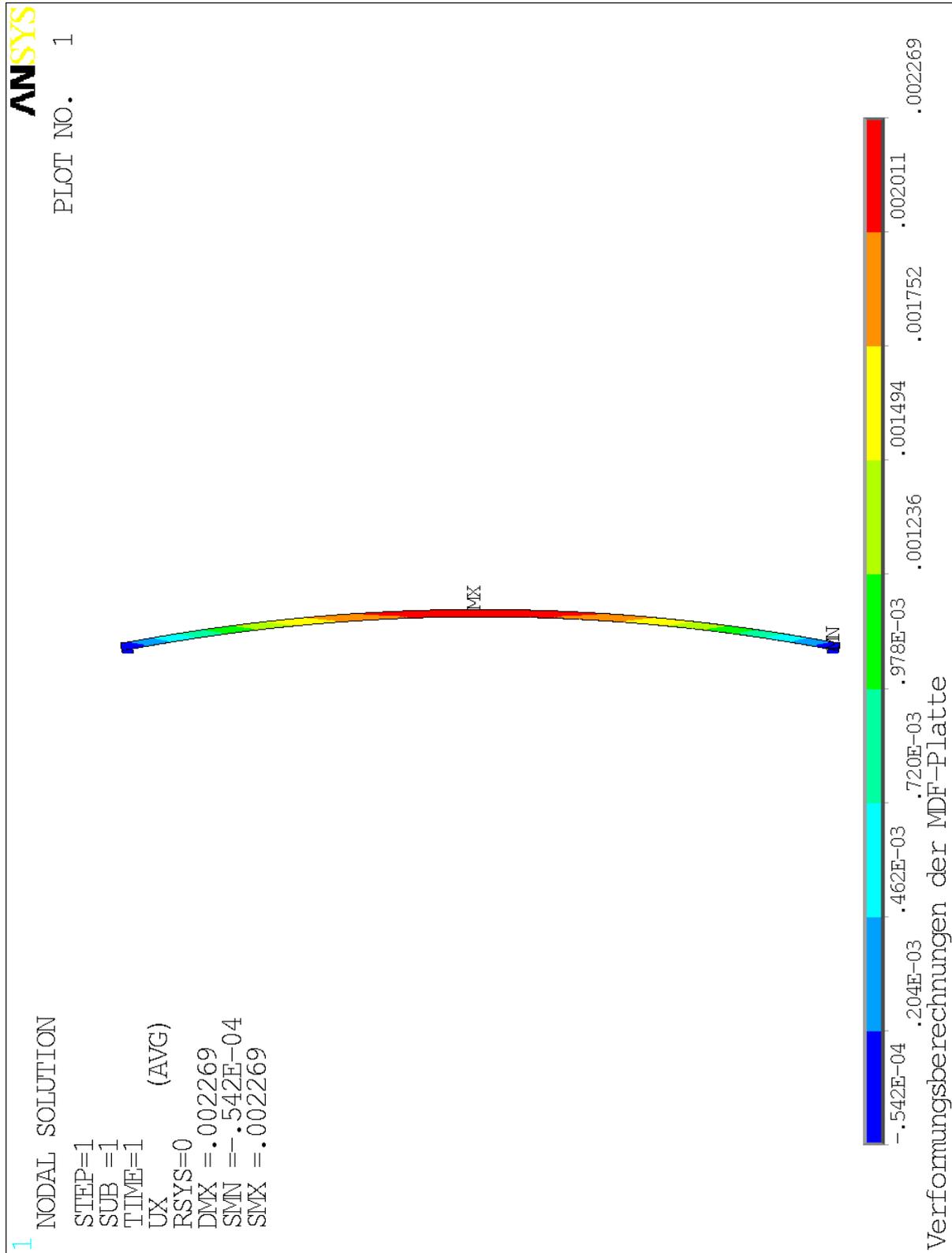
Anhang 13: Knotenfeuchten der Spanplatte 40 % - 80 % - 65 %



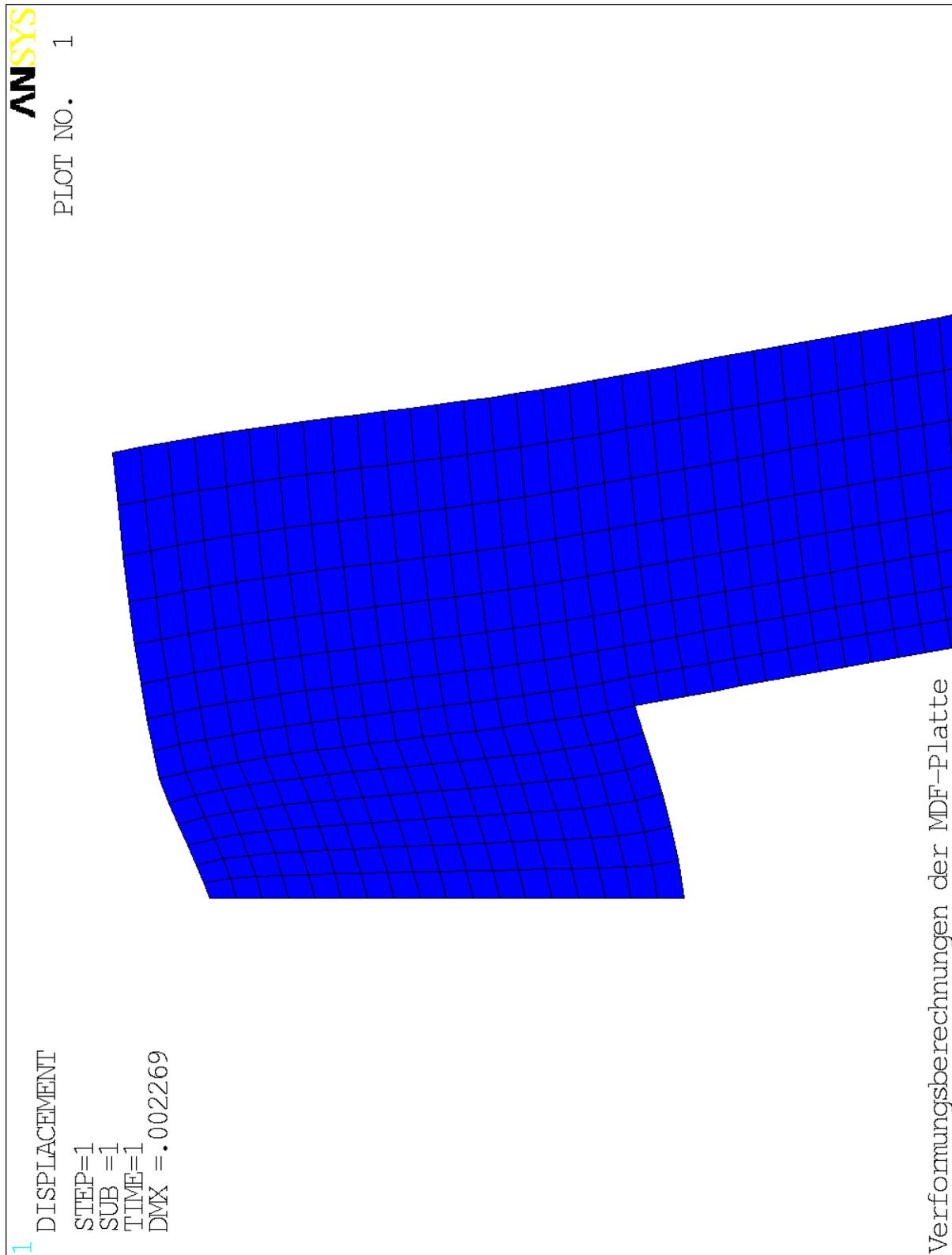
Anhang 14: Maximale Verformungen der MDF-Platte bei 20 °C / 40 % rel. LF



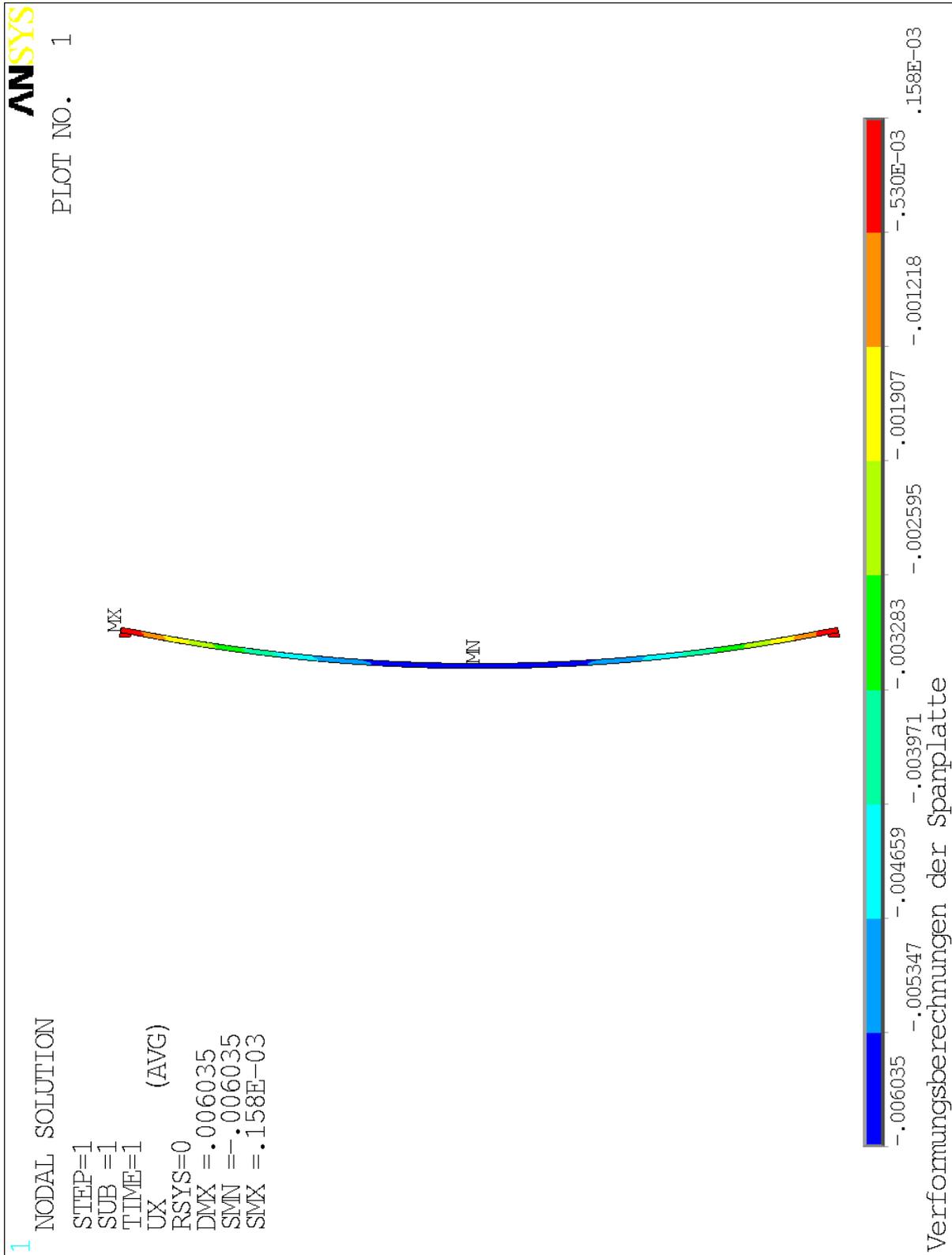
Anhang 15: Maximale Verformungen der MDF-Platte bei 20 °C / 40 % rel. LF / Oberer Auflagerbereich



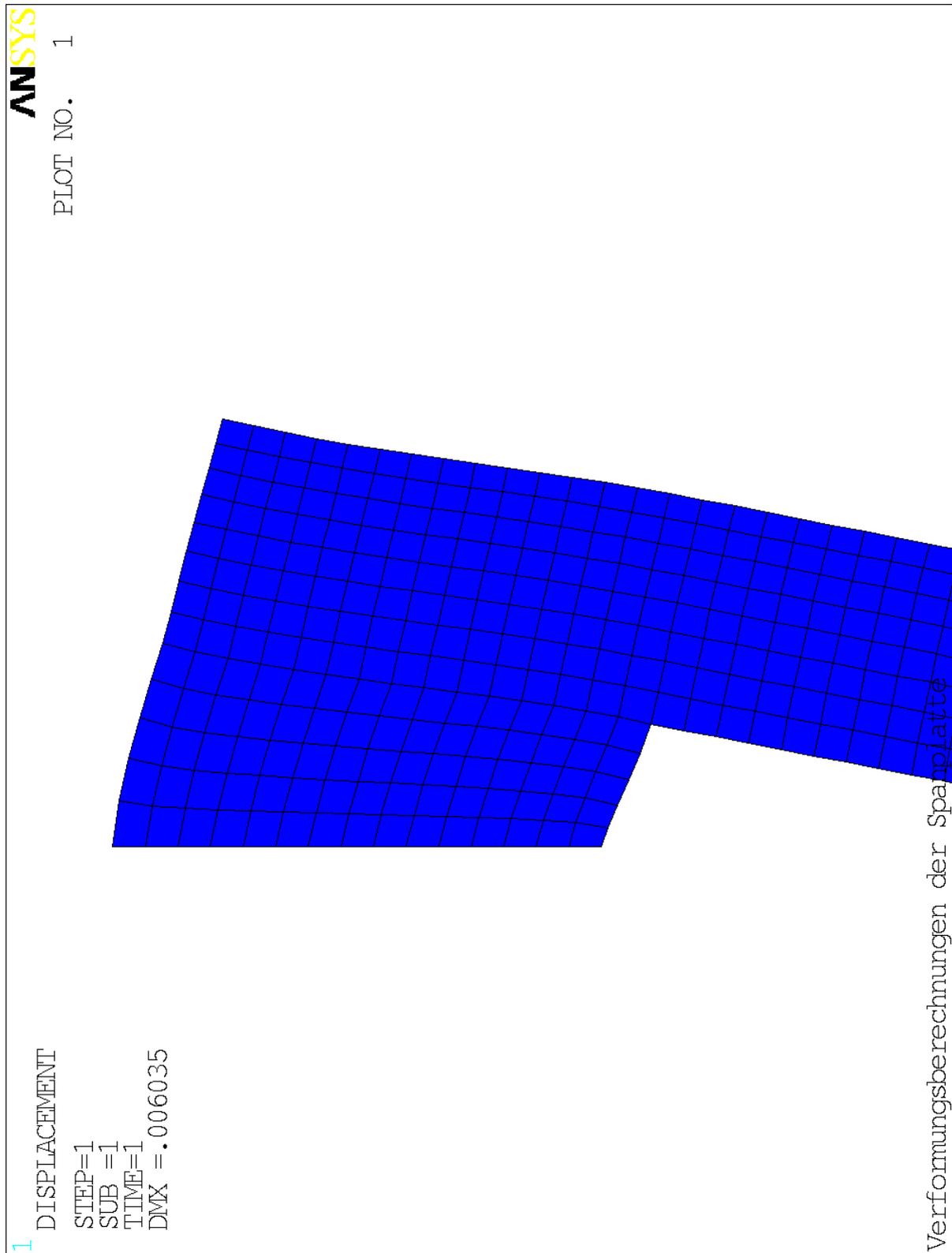
Anhang 16: Maximale Verformungen der MDF-Platte bei 20 °C / 80 % rel. LF



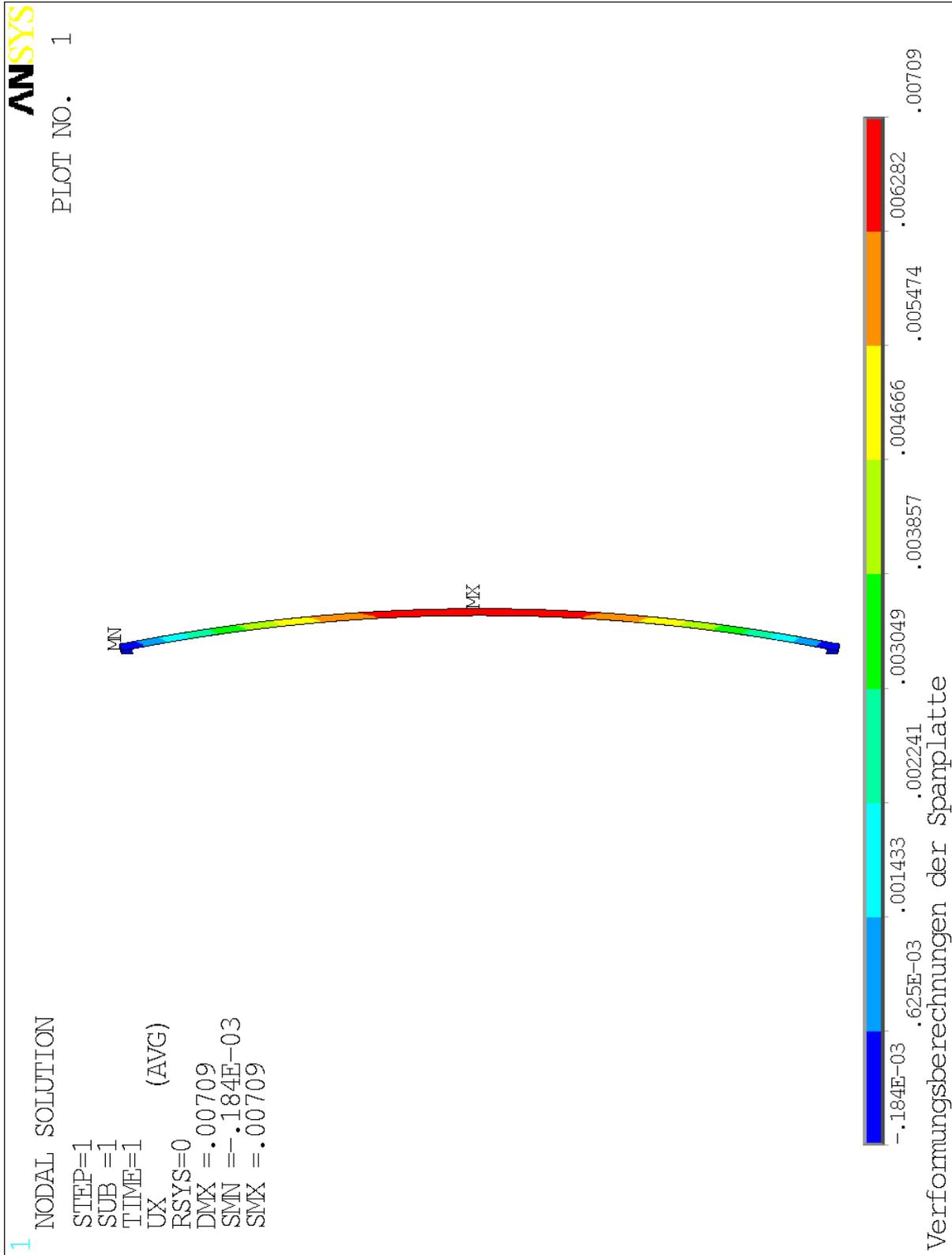
Anhang 17: Maximale Verformungen der MDF-Platte bei 20 °C / 80 % rel. LF / Oberer Auflagerbereich



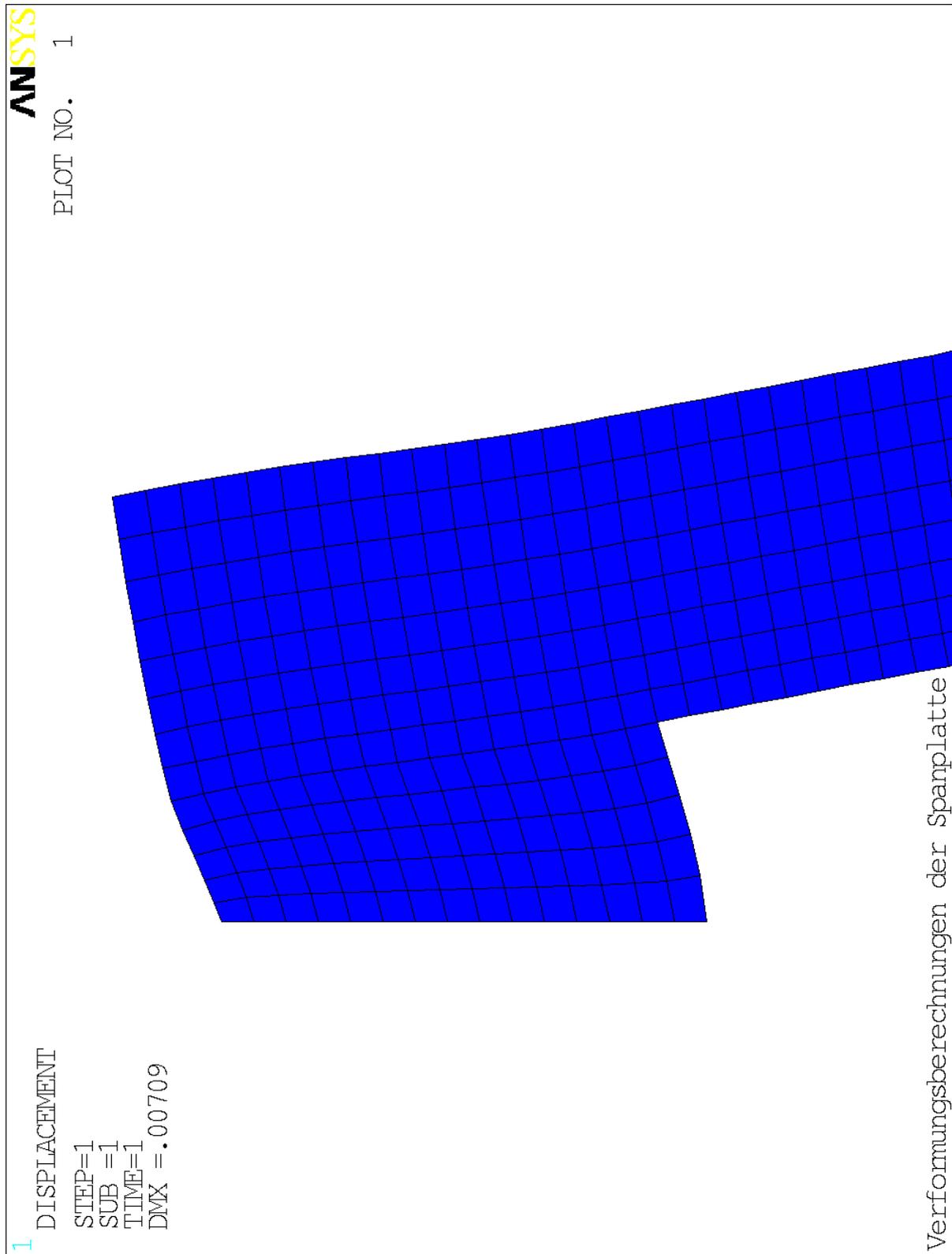
Anhang 18: Maximale Verformungen der Spanplatte bei 20 °C / 40 % rel. LF



Anhang 19: Maximale Verformungen der Spanplatte bei 20 °C / 40 % rel. LF / Oberer Auflagerbereich



Anhang 20: Maximale Verformungen der Spanplatte bei 20 °C / 80 % rel. LF



Anhang 21: Maximale Verformungen der Spanplatte bei 20 °C / 80 % rel. LF / Oberer Auflagerbereich



Verformungsauswertung für unterschiedliche Steifigkeitskombinationen des Auflagerbereiches [mm]													
		Verformung bei 20°C und Feuchte				Verformung bei 20°C und Feuchte				Verformung bei 20°C und Feuchte mit Dickenquellung			
EX/EY	GXY	MDF		SPAN		MDF		SPAN		MDF		SPAN	
		30%	85%	30%	85%	30%	85%	30%	85%	30%	85%	30%	85%
		ou, längs=0.030		ou, längs=0.038		ou, längs=0.047		ou, längs=0.030		ou, längs=0.056		ou, längs=0.038	
50	50	0,008471	0,009544	0,008736	0,013731	0,013271	0,009544	0,010345	0,013731	0,013475	0,009792	0,010518	0,014072
	25	0,007719	0,008697	0,008092	0,012688	0,012093	0,008697	0,009583	0,012688	0,012297	0,008945	0,009756	0,013030
	12,5	0,006863	0,007507	0,007144	0,011150	0,010439	0,007507	0,008459	0,011150	0,010643	0,007755	0,008633	0,011492
	5	0,005046	0,005685	0,005582	0,008618	0,007905	0,005685	0,006610	0,008618	0,008109	0,005933	0,006783	0,008960
100	100	0,005727	0,006452	0,005829	0,009175	0,008972	0,006452	0,006903	0,009175	0,009175	0,006700	0,007077	0,009516
	50	0,005395	0,006079	0,005554	0,008731	0,008453	0,006079	0,006577	0,008731	0,008656	0,006327	0,006750	0,009072
	25	0,004858	0,005473	0,005090	0,007983	0,007610	0,005473	0,006028	0,007983	0,007814	0,005721	0,006201	0,008325
	10	0,003846	0,004334	0,004162	0,006485	0,006026	0,004334	0,004929	0,006485	0,006230	0,004582	0,005102	0,006827
150	150	0,004502	0,005072	0,004546	0,007156	0,007053	0,005072	0,005383	0,007156	0,007257	0,005321	0,005556	0,007498
	100	0,004410	0,004968	0,004470	0,007035	0,008909	0,004968	0,005294	0,007035	0,007112	0,005217	0,005467	0,007377
	50	0,004160	0,004676	0,004255	0,006689	0,006502	0,004676	0,005039	0,006689	0,006705	0,004924	0,005212	0,007030
	15	0,003298	0,0037150	0,003504	0,005479	0,005166	0,0037150	0,004150	0,005479	0,005370	0,003964	0,004323	0,005821
200	200												
	100												
	50												
	20												

Anhang 22: Verformungsauswertung für unterschiedliche Steifigkeitskombinationen des Auflagerbereiches [mm]

Ermittlung des Alpha u-Wertes der Referenzproben ( 300 X 50 mm ) für Plattenverformung									
MDF - Platte									
Klima	20°C / 65%			20°C / 30%					
Datum	13.12.2004			22.12.2004					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	300,58	10,371	300,26	7,306	-0,32	-3,066	0,035	
	Breite oben	50,68		50,56		-0,12		0,077	
	Breite unten	50,64		50,55		-0,09		0,058	
	Dicke	13,36		13,07		-0,29		0,708	
Probe 2	Länge	300,62	10,369	300,31	7,308	-0,31	-3,061	0,034	
	Breite oben	50,71		50,66		-0,05		0,032	
	Breite unten	50,61		50,56		-0,05		0,032	
	Dicke	13,37		13,09		-0,28		0,684	
Probe 3	Länge	300,61	10,356	300,24	7,296	-0,37	-3,060	0,040	
	Breite oben	50,73		50,64		-0,09		0,058	
	Breite unten	50,65		50,56		-0,09		0,058	
	Dicke	13,38		13,09		-0,29		0,708	
						Mittelwert Alpha u längs		0,046	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,700	
Klima	20°C / 30%			20°C / 85%					
Datum	22.12.2004			11.01.2005					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	300,26	7,306	300,76	13,437	0,50	6,131	0,027	
	Breite oben	50,56		50,65		0,09		0,029	
	Breite unten	50,55		50,65		0,10		0,032	
	Dicke	13,07		13,68		0,61		0,761	
Probe 2	Länge	300,31	7,308	300,78	13,439	0,47	6,131	0,026	
	Breite oben	50,66		50,74		0,08		0,026	
	Breite unten	50,56		50,62		0,06		0,019	
	Dicke	13,09		13,69		0,60		0,748	
Probe 3	Länge	300,24	7,296	300,81	13,421	0,57	6,125	0,031	
	Breite oben	50,64		50,76		0,12		0,039	
	Breite unten	50,56		50,70		0,14		0,045	
	Dicke	13,09		13,70		0,61		0,761	
						Mittelwert Alpha u längs		0,030	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,757	
Klima	20°C / 85%			20°C / 65%					
Datum	11.01.2005			21.01.2005					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	300,76	13,437	300,54	11,320	-0,22	-2,117	0,035	
	Breite oben	50,65		50,61		-0,04		0,037	
	Breite unten	50,65		50,61		-0,04		0,037	
	Dicke	13,68		13,47		-0,21		0,725	
Probe 2	Länge	300,78	13,439	300,56	11,330	-0,22	-2,109	0,035	
	Breite oben	50,74		50,69		-0,05		0,047	
	Breite unten	50,62		50,69		0,07		-0,066	
	Dicke	13,69		13,49		-0,20		0,693	
Probe 3	Länge	300,81	13,421	300,56	11,311	-0,25	-2,110	0,039	
	Breite oben	50,76		50,69		-0,07		0,065	
	Breite unten	50,70		50,60		-0,10		0,093	
	Dicke	13,70		13,50		-0,20		0,692	
						Mittelwert Alpha u längs		0,049	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,703	
Klima	20°C / 65%			20°C / 30%					
Datum	21.01.2005			31.01.2005					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	300,54	11,320	300,14	7,447	-0,40	-3,874	0,034	
	Breite oben	50,61		50,59		-0,02		0,010	
	Breite unten	50,61		50,54		-0,07		0,036	
	Dicke	13,47		13,11		-0,36		0,690	
Probe 2	Länge	300,56	11,330	300,16	7,449	-0,40	-3,881	0,034	
	Breite oben	50,69		50,63		-0,06		0,030	
	Breite unten	50,69		50,54		-0,15		0,076	
	Dicke	13,49		13,12		-0,37		0,707	
Probe 3	Länge	300,56	11,311	300,19	7,429	-0,37	-3,882	0,032	
	Breite oben	50,69		50,61		-0,08		0,041	
	Breite unten	50,60		50,55		-0,05		0,025	
	Dicke	13,50		13,12		-0,38		0,725	
						Mittelwert Alpha u längs		0,035	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,707	
				Gesamt		Mittelwert Alpha u längs		0,040	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,717	

**Anhang 23: Ermittlung des Alpha\_u Wertes der Referenzproben MDF**

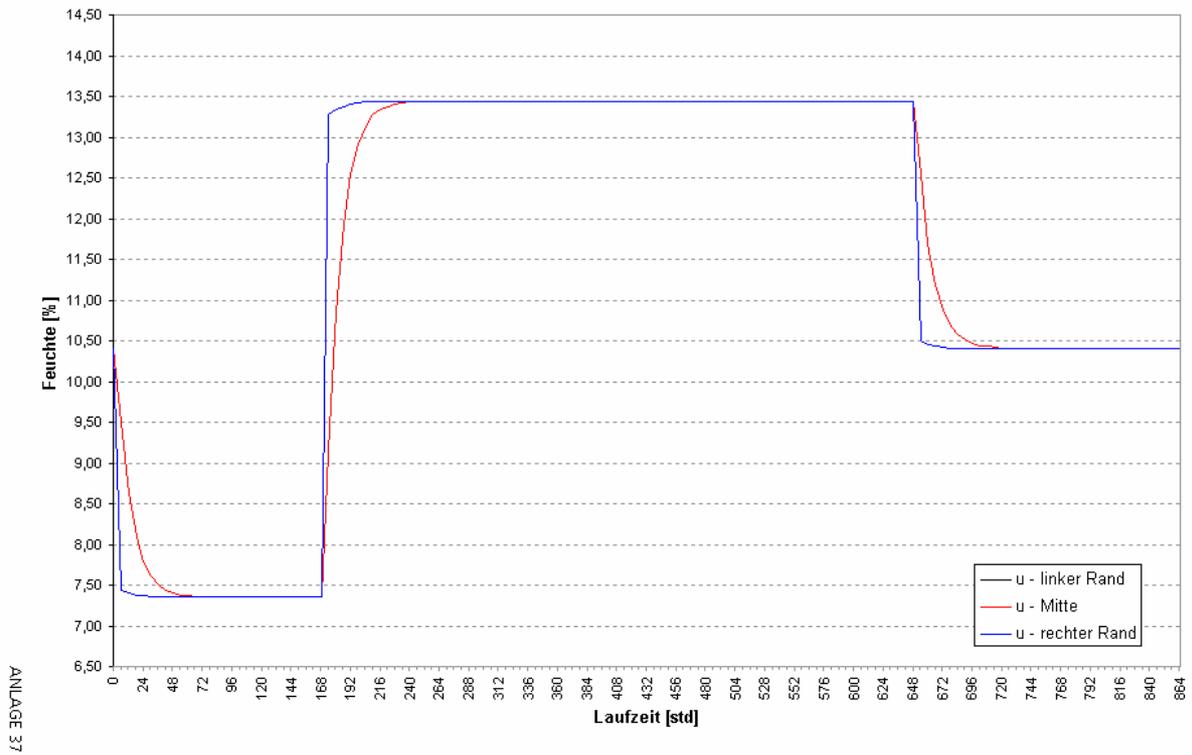
Ermittlung des Alpha u-Wertes der Referenzproben ( 300 X 50 mm ) für Plattenverformung									
Phenolharzverleimte Spanplatte									
Klima	20°C / 65%			20°C / 30%					
Datum	13.12.2004			22.12.2004					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	300,21	11,259	299,80	8,210	-0,41	-3,048	0,045	
	Breite oben	50,20		50,13		-0,07		0,046	
	Breite unten	50,21		50,13		-0,08		0,052	
	Dicke	16,33		16,06		-0,27		0,542	
Probe 2	Länge	300,20	11,481	299,80	8,341	-0,40	-3,141	0,042	
	Breite oben	50,23		50,17		-0,06		0,038	
	Breite unten	50,27		50,19		-0,08		0,051	
	Dicke	16,36		16,09		-0,27		0,525	
Probe 3	Länge	300,14	11,397	299,72	8,357	-0,42	-3,039	0,046	
	Breite oben	50,44		50,22		-0,22		0,144	
	Breite unten	50,27		50,21		-0,06		0,039	
	Dicke	16,35		16,08		-0,27		0,543	
						Mittelwert Alpha u längs		0,045	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,537	
Klima	20°C / 30%			20°C / 85%					
Datum	22.12.2004			11.01.2005					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	299,80	8,210	300,60	15,863	0,80	7,653	0,035	
	Breite oben	50,13		50,30		0,17		0,044	
	Breite unten	50,13		50,28		0,15		0,039	
	Dicke	16,06		16,91		0,85		0,692	
Probe 2	Länge	299,80	8,341	300,73	15,902	0,93	7,561	0,041	
	Breite oben	50,17		50,30		0,13		0,034	
	Breite unten	50,19		50,33		0,14		0,037	
	Dicke	16,09		16,87		0,78		0,641	
Probe 3	Länge	299,72	8,357	300,63	15,936	0,91	7,579	0,040	
	Breite oben	50,22		50,37		0,15		0,039	
	Breite unten	50,21		50,34		0,13		0,034	
	Dicke	16,08		16,89		0,81		0,665	
						Mittelwert Alpha u längs		0,666	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,666	
Klima	20°C / 85%			20°C / 65%					
Datum	11.01.2005			21.01.2005					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	300,60	15,863	300,30	13,006	-0,30	-2,857	0,035	
	Breite oben	50,30		50,25		-0,05		0,035	
	Breite unten	50,28		50,23		-0,05		0,035	
	Dicke	16,91		16,65		-0,26		0,538	
Probe 2	Länge	300,73	15,902	300,40	13,065	-0,33	-2,837	0,039	
	Breite oben	50,30		50,28		-0,02		0,014	
	Breite unten	50,33		50,29		-0,04		0,028	
	Dicke	16,87		16,64		-0,23		0,481	
Probe 3	Länge	300,63	15,936	300,27	13,097	-0,36	-2,840	0,042	
	Breite oben	50,37		50,31		-0,06		0,042	
	Breite unten	50,34		50,31		-0,03		0,021	
	Dicke	16,89		16,66		-0,23		0,480	
						Mittelwert Alpha u längs		0,032	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,499	
Klima	20°C / 65%			20°C / 30%					
Datum	21.01.2005			31.01.2005					
	Dimension	Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]	Delta l	Delta u	Alpha u	
Probe 1	Länge	300,30	13,006	299,79	8,538	-0,51	-4,468	0,038	
	Breite oben	50,25		50,14		-0,11		0,049	
	Breite unten	50,23		50,15		-0,08		0,036	
	Dicke	16,65		16,22		-0,43		0,578	
Probe 2	Länge	300,40	13,065	299,81	8,587	-0,59	-4,478	0,044	
	Breite oben	50,28		50,19		-0,09		0,040	
	Breite unten	50,29		50,20		-0,09		0,040	
	Dicke	16,64		16,23		-0,41		0,550	
Probe 3	Länge	300,27	13,097	299,71	8,640	-0,56	-4,456	0,042	
	Breite oben	50,31		50,23		-0,08		0,036	
	Breite unten	50,31		50,20		-0,11		0,049	
	Dicke	16,66		16,22		-0,44		0,593	
						Mittelwert Alpha u längs		0,041	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,574	
				Gesamt		Mittelwert Alpha u längs		0,040	
						Mittelwert Alpha u dicke		0,569	

**Anhang 24: Ermittlung des Alpha\_u Wertes der Referenzproben Spanplatten**

Übersicht der Regressionsparameter und Berechnung der Sorptionsisothermen nach GREUBEL / DREWES												
B0	1,47	1,66	1,06	1,23	0,6	1,07	1,37	0,7	1,09	1,47	1,22	1,14
B1	3,80E-02	1,72E-02	5,46E-02	4,33E-02	6,46E-02	6,13E-02	3,01E-02	4,99E-02	2,13E-02	2,36E-02	3,96E-02	3,29E-02
B2	-5,43E-04	-1,60E-04	-8,47E-04	-6,41E-04	-8,45E-04	-1,02E-03	-3,27E-04	-4,99E-04	-3,17E-04	-3,59E-04	-5,67E-04	-3,49E-04
B3	3,66E-06	1,67E-06	5,60E-06	4,39E-06	4,91E-06	6,85E-06	2,34E-06	2,61E-06	3,37E-06	3,46E-06	4,19E-06	2,31E-06
B4	-7,72E-03	-6,10E-03	-5,10E-03	-5,75E-03	-4,46E-03	-2,32E-03	-4,36E-03	-1,48E-03	-7,38E-03	-4,30E-03	-6,24E-03	-4,85E-03
Theta [°C]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Nr.	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr. 4 1	Nr.4 2	Nr.5	Nr.6	Nr. 7	Nr. 9	Nr. 10 1	Nr. 10 2	Nr. 11
phi [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]
0	3,727	4,655	2,606	3,050	1,667	2,783	3,607	1,955	2,566	3,991	2,990	2,838
5	4,448	5,055	3,355	3,729	2,255	3,689	4,160	2,479	2,833	4,452	3,595	3,317
10	5,181	5,456	4,157	4,430	2,936	4,671	4,728	3,071	3,087	4,892	4,215	3,817
15	5,905	5,858	4,980	5,130	3,692	5,679	5,305	3,726	3,327	5,306	4,834	4,331
20	6,604	6,267	5,789	5,811	4,500	6,662	5,887	4,436	3,556	5,698	5,441	4,854
25	7,268	6,688	6,561	6,459	5,336	7,581	6,472	5,190	3,779	6,072	6,027	5,384
30	7,892	7,127	7,279	7,069	6,177	8,412	7,061	5,982	4,003	6,438	6,593	5,920
35	8,478	7,596	7,938	7,641	7,009	9,147	7,660	6,803	4,238	6,810	7,144	6,463
40	9,037	8,106	8,545	8,186	7,823	9,799	8,275	7,651	4,495	7,205	7,692	7,018
45	9,582	8,671	9,119	8,721	8,621	10,393	8,919	8,525	4,789	7,644	8,255	7,594
50	10,136	9,310	9,687	9,267	9,414	10,972	9,607	9,429	5,137	8,154	8,860	8,202
55	10,725	10,047	10,288	9,857	10,224	11,588	10,361	10,373	5,562	8,767	9,537	8,858
60	11,384	10,910	10,968	10,528	11,085	12,306	11,208	11,372	6,096	9,526	10,331	9,581
65	12,153	11,936	11,787	11,329	12,041	13,209	12,180	12,449	6,778	10,488	11,296	10,398
70	13,087	13,172	12,825	12,324	13,154	14,405	13,322	13,635	7,665	11,731	12,506	11,343
75	14,252	14,683	14,186	13,595	14,505	16,041	14,691	14,969	8,840	13,363	14,064	12,458
80	15,741	16,552	16,018	15,260	16,203	18,337	16,363	16,506	10,424	15,545	16,117	13,799
85	17,680	18,894	18,544	17,487	18,404	21,626	18,439	18,317	12,596	18,513	18,879	15,444
90	20,251	21,864	22,100	20,524	21,335	26,450	21,061	20,496	15,641	22,631	22,676	17,493
95	23,719	25,684	27,231	24,754	25,334	33,721	24,424	23,170	20,006	28,470	28,016	20,089
100	28,486	30,664	34,834	30,781	30,929	45,047	28,809	26,515	26,427	36,955	35,716	23,430

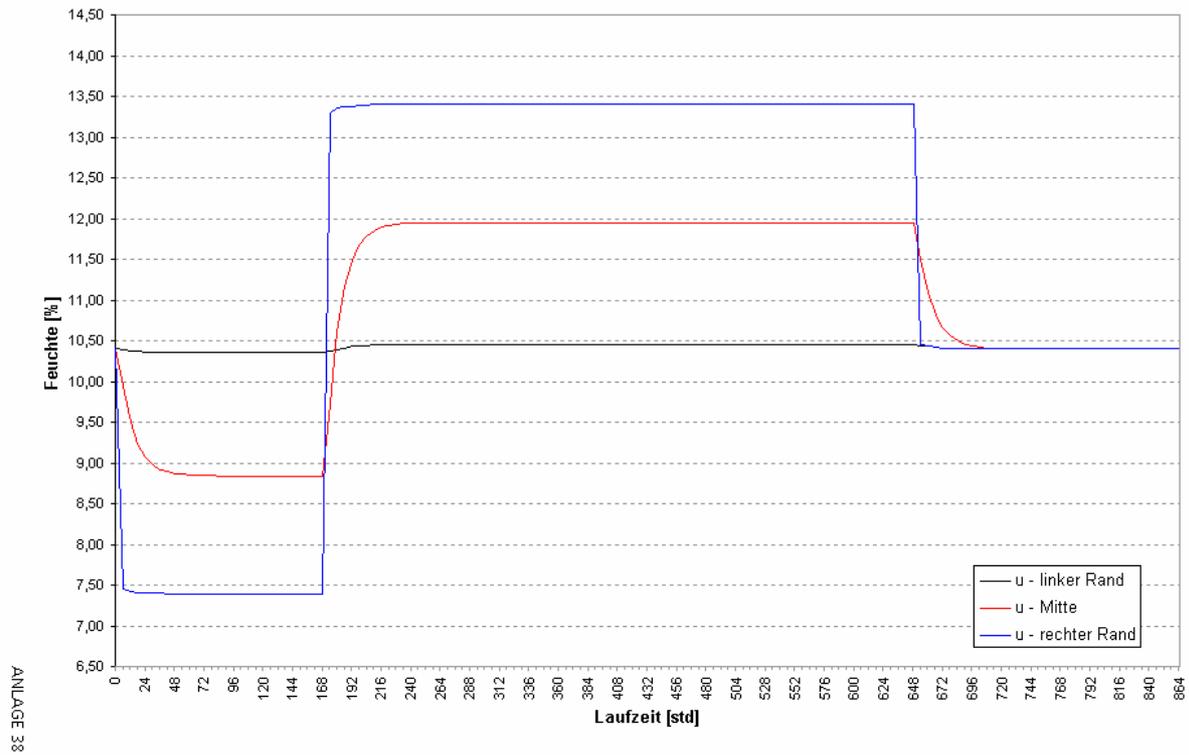
## Anhang 25: Übersicht der Regressionsparameter und der Sorptionsisothermen nach Greubel / Drewes

Feuchteverlauf der MDF - Referenzproben berechnet mit TUN

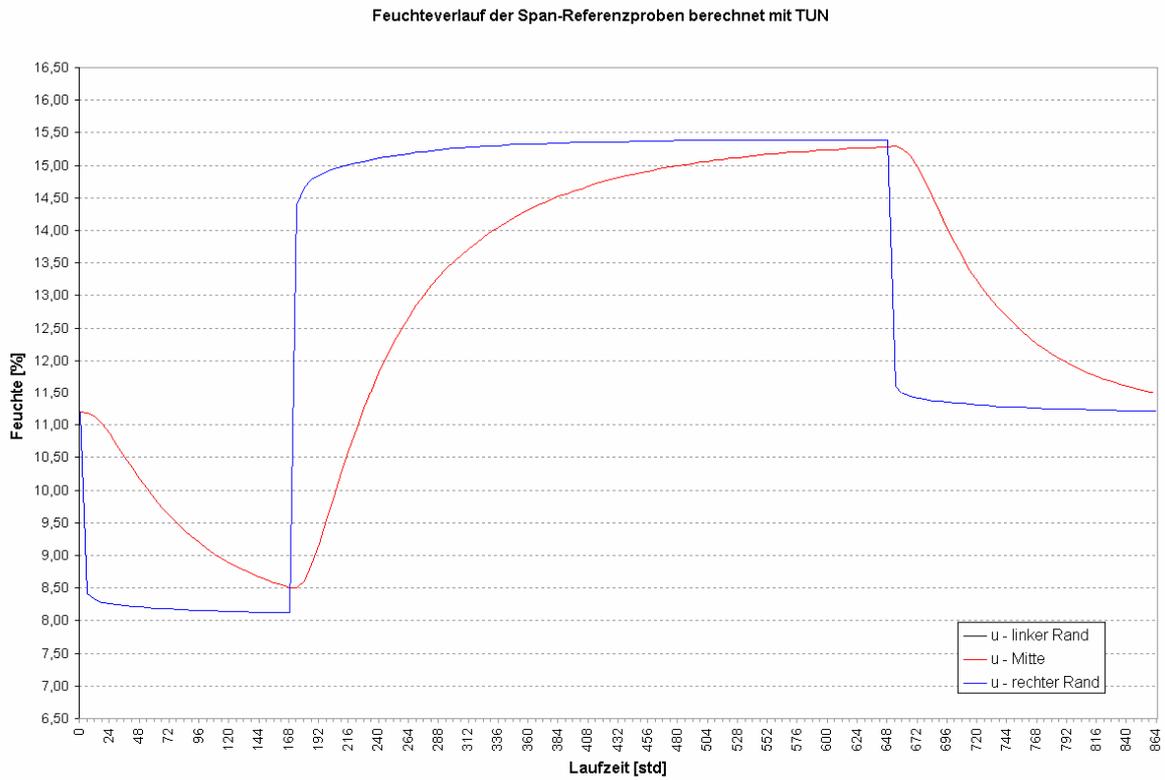


Anhang 26: Feuchteverlauf der MDF - Referenzproben berechnet mit TUN

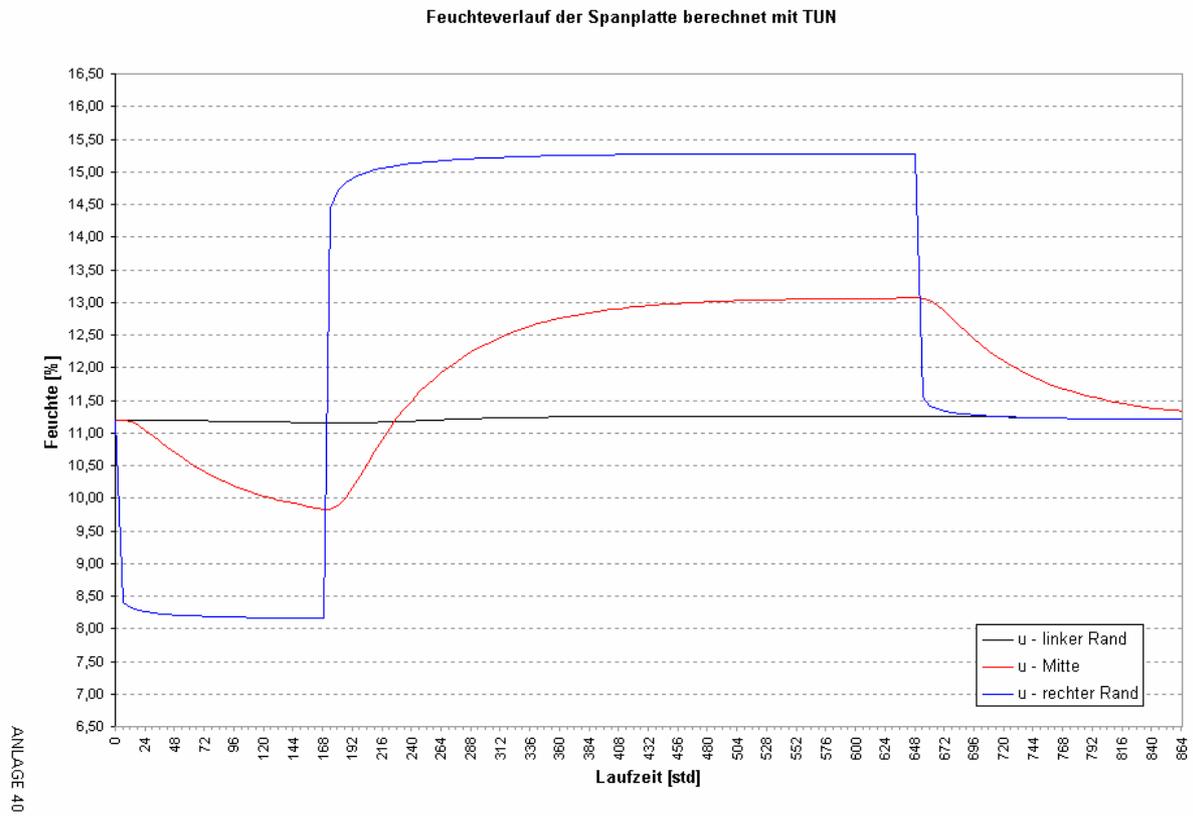
Feuchteverlauf der MDF - Platte berechnet mit TUN



Anhang 27: Feuchteverlauf der MDF - Platte berechnet mit TUN



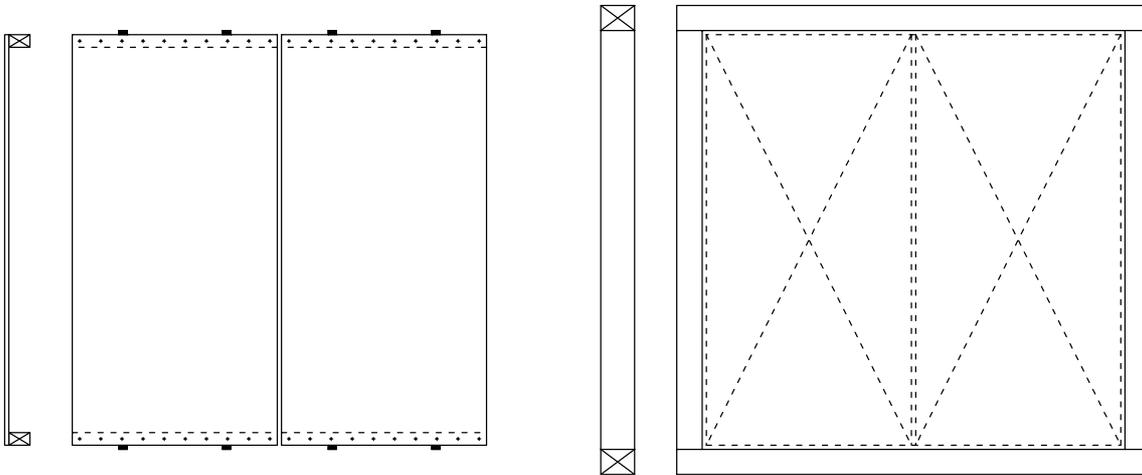
Anhang 28: Feuchteverlauf der Span - Referenzproben berechnet mit TUN



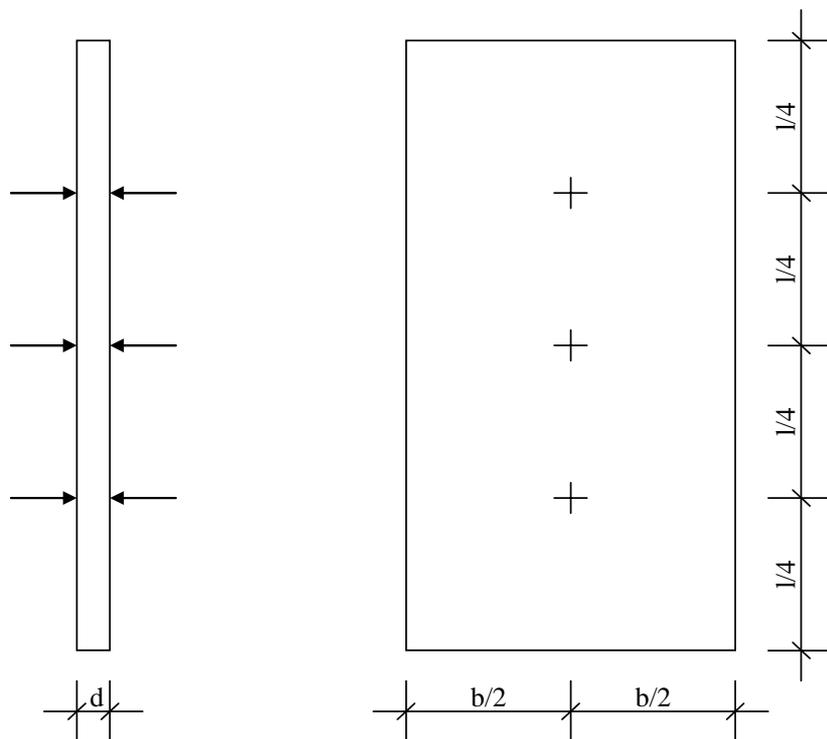
Anhang 29: Feuchteverlauf der Spanplatte berechnet mit TUN

<b>Simulationsergebnisse mit den <math>\alpha</math>-Werten nach [SATTLER]</b>					
		MDF		SPAN	
		40%	80%	40%	80%
		$\alpha$ ,dicke=0.700	$\alpha$ ,dicke=0.757	$\alpha$ ,dicke=0.543	$\alpha$ ,dicke=0.666
		$\alpha$ ,längs=0.047	$\alpha$ ,längs=0.020	$\alpha$ ,längs=0.064	$\alpha$ ,längs=0.056
EX/EY	GXY	$\alpha$ ,längs nach Bericht [Sattler]		$\alpha$ ,längs nach Bericht [Sattler]	
100	100	0,006925	0,003067	0,007478	0,008781
	50	0,006533	0,002899	0,007129	0,008368
	25	0,005898	0,002627	0,006542	0,007672
	10	0,004702	0,002115	0,005368	0,006278
150	150	0,005477	0,002447	0,005860	0,006896
	100	0,005368	0,002400	0,005765	0,006784
	50	0,005061	0,002269	0,005492	0,006461
	15	0,004053	0,001837	0,004592	0,005335
200	200	0,004652	0,002093	0,004942	0,005827
	100	0,004519	0,002037	0,004828	0,005692
	50	0,004262	0,001927	0,004601	0,005423
	20	0,003655	0,001667	0,004038	0,004757
Anpassung E-Modul					
E-Modul = 1800 [N/mm <sup>2</sup> ]					
100	10			0,005805	0,006701
150	50			0,006035	0,007090

**Anhang 30: Simulationsergebnisse mit den  $\alpha$ -Werten nach [SATTLER]**



Anhang 31: Prinzipskizze des Aufbaus der Versuchswände und deren Einbau in den Rahmen der kleinen Doppelklimakammer



Anhang 32: Positionsplan der Wegaufnehmer auf einer der Holzwerkstoffplatten

Klima Datum	Dimension	20°C / 65% 13.12.2004		20°C / 30% 22.12.2004		Delta l	Delta u	Alpha u	
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]				
Probe 1	Länge	300.58	10.371	300.26	7.306	-0.32	-3.066	0.035	
	Breite oben	50.68		50.56		-0.12		0.077	
	Breite unten	50.64		50.55		-0.09		0.058	
	Dicke	13.36		13.07		-0.29		0.708	
Probe 2	Länge	300.62	10.369	300.31	7.308	-0.31	-3.061	0.034	
	Breite oben	50.71		50.66		-0.05		0.032	
	Breite unten	50.61		50.56		-0.05		0.032	
	Dicke	13.37		13.09		-0.28		0.684	
Probe 3	Länge	300.61	10.356	300.24	7.296	-0.37	-3.060	0.040	
	Breite oben	50.73		50.64		-0.09		0.058	
	Breite unten	50.65		50.56		-0.09		0.058	
	Dicke	13.38		13.09		-0.29		0.708	
Mittelwert Alpha u längs								0.046	
Mittelwert Alpha u dicke								0.700	
Klima Datum	Dimension	20°C / 30% 22.12.2004		20°C / 85% 11.01.2005		Delta l	Delta u	Alpha u	
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]				
Probe 1	Länge	300.26	7.306	300.76	13.437	0.50	6.131	0.027	
	Breite oben	50.56		50.65		0.09		0.029	
	Breite unten	50.55		50.65		0.10		0.032	
	Dicke	13.07		13.68		0.61		0.761	
Probe 2	Länge	300.31	7.308	300.78	13.439	0.47	6.131	0.026	
	Breite oben	50.66		50.74		0.08		0.026	
	Breite unten	50.56		50.62		0.06		0.019	
	Dicke	13.09		13.69		0.60		0.748	
Probe 3	Länge	300.24	7.296	300.81	13.421	0.57	6.125	0.031	
	Breite oben	50.64		50.76		0.12		0.039	
	Breite unten	50.56		50.70		0.14		0.045	
	Dicke	13.09		13.70		0.61		0.761	
Mittelwert Alpha u längs								0.030	
Mittelwert Alpha u dicke								0.757	
Klima Datum	Dimension	20°C / 85% 11.01.2005		20°C / 65% 21.01.2005		Delta l	Delta u	Alpha u	
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]				
Probe 1	Länge	300.76	13.437	300.54	11.320	-0.22	-2.117	0.035	
	Breite oben	50.65		50.61		-0.04		0.037	
	Breite unten	50.65		50.61		-0.04		0.037	
	Dicke	13.68		13.47		-0.21		0.725	
Probe 2	Länge	300.78	13.439	300.56	11.330	-0.22	-2.109	0.035	
	Breite oben	50.74		50.69		-0.05		0.047	
	Breite unten	50.62		50.69		0.07		0.066	
	Dicke	13.69		13.49		-0.20		0.693	
Probe 3	Länge	300.81	13.421	300.56	11.311	-0.25	-2.110	0.039	
	Breite oben	50.76		50.69		-0.07		0.065	
	Breite unten	50.70		50.60		-0.10		0.093	
	Dicke	13.70		13.50		-0.20		0.692	
Mittelwert Alpha u längs								0.049	
Mittelwert Alpha u dicke								0.703	
Klima Datum	Dimension	20°C / 65% 21.01.2005		20°C / 30% 31.01.2005		Delta l	Delta u	Alpha u	
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]				
Probe 1	Länge	300.54	11.320	300.14	7.447	-0.40	-3.874	0.034	
	Breite oben	50.61		50.59		-0.02		0.010	
	Breite unten	50.61		50.54		-0.07		0.036	
	Dicke	13.47		13.11		-0.36		0.690	
Probe 2	Länge	300.56	11.330	300.16	7.449	-0.40	-3.881	0.034	
	Breite oben	50.69		50.63		-0.06		0.030	
	Breite unten	50.69		50.54		-0.15		0.076	
	Dicke	13.49		13.12		-0.37		0.707	
Probe 3	Länge	300.56	11.311	300.19	7.429	-0.37	-3.882	0.032	
	Breite oben	50.69		50.61		-0.08		0.041	
	Breite unten	50.60		50.55		-0.05		0.025	
	Dicke	13.50		13.12		-0.38		0.725	
Mittelwert Alpha u längs								0.035	
Mittelwert Alpha u dicke								0.707	
Gesamt:								Mittelwert Alpha u längs	0.040
								Mittelwert Alpha u dicke	0.717

**Anhang 33: Feuchteausdehnkoeffizienten der Referenzproben der MDF-Platte**

Klima Datum	Dimension	20°C / 65% 13.12.2004		20°C / 30% 22.12.2004		Delta l	Delta u	Alpha u
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]			
Probe 1	Länge	300.21	11.259	299.80	8.210	-0.41	-3.048	0.045
	Breite oben	50.20		50.13		-0.07		0.046
	Breite unten	50.21		50.13		-0.08		0.052
	Dicke	16.33		16.06		-0.27		0.542
Probe 2	Länge	300.20	11.481	299.80	8.341	-0.40	-3.141	0.042
	Breite oben	50.23		50.17		-0.06		0.038
	Breite unten	50.27		50.19		-0.08		0.051
	Dicke	16.36		16.09		-0.27		0.525
Probe 3	Länge	300.14	11.397	299.72	8.357	-0.42	-3.039	0.046
	Breite oben	50.44		50.22		-0.22		0.144
	Breite unten	50.27		50.21		-0.06		0.039
	Dicke	16.35		16.08		-0.27		0.543
Mittelwert Alpha u längs								0.045
Mittelwert Alpha u dicke								0.537
Klima Datum	Dimension	20°C / 30% 22.12.2004		20°C / 85% 11.01.2005		Delta l	Delta u	Alpha u
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]			
Probe 1	Länge	299.80	8.210	300.60	15.863	0.80	7.653	0.035
	Breite oben	50.13		50.30		0.17		0.044
	Breite unten	50.13		50.28		0.15		0.039
	Dicke	16.06		16.91		0.85		0.692
Probe 2	Länge	299.80	8.341	300.73	15.902	0.93	7.561	0.041
	Breite oben	50.17		50.30		0.13		0.034
	Breite unten	50.19		50.33		0.14		0.037
	Dicke	16.09		16.87		0.78		0.641
Probe 3	Länge	299.72	8.357	300.63	15.936	0.91	7.579	0.040
	Breite oben	50.22		50.37		0.15		0.039
	Breite unten	50.21		50.34		0.13		0.034
	Dicke	16.08		16.89		0.81		0.665
Mittelwert Alpha u längs								0.032
Mittelwert Alpha u dicke								0.666
Klima Datum	Dimension	20°C / 85% 11.01.2005		20°C / 65% 21.01.2005		Delta l	Delta u	Alpha u
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]			
Probe 1	Länge	300.60	15.863	300.30	13.006	-0.30	-2.857	0.035
	Breite oben	50.30		50.25		-0.05		0.035
	Breite unten	50.28		50.23		-0.05		0.035
	Dicke	16.91		16.65		-0.26		0.538
Probe 2	Länge	300.73	15.902	300.40	13.065	-0.33	-2.837	0.039
	Breite oben	50.30		50.28		-0.02		0.014
	Breite unten	50.33		50.29		-0.04		0.028
	Dicke	16.87		16.64		-0.23		0.481
Probe 3	Länge	300.63	15.936	300.27	13.097	-0.36	-2.840	0.042
	Breite oben	50.37		50.31		-0.06		0.042
	Breite unten	50.34		50.31		-0.03		0.021
	Dicke	16.89		16.66		-0.23		0.480
Mittelwert Alpha u längs								0.032
Mittelwert Alpha u dicke								0.499
Klima Datum	Dimension	20°C / 65% 21.01.2005		20°C / 30% 31.01.2005		Delta l	Delta u	Alpha u
		Abmessungen	Feuchte [%]	Abmessungen	Feuchte [%]			
Probe 1	Länge	300.30	13.006	299.79	8.538	-0.51	-4.468	0.038
	Breite oben	50.25		50.14		-0.11		0.049
	Breite unten	50.23		50.15		-0.08		0.036
	Dicke	16.65		16.22		-0.43		0.578
Probe 2	Länge	300.40	13.065	299.81	8.587	-0.59	-4.478	0.044
	Breite oben	50.28		50.19		-0.09		0.040
	Breite unten	50.29		50.20		-0.09		0.040
	Dicke	16.64		16.23		-0.41		0.550
Probe 3	Länge	300.27	13.097	299.71	8.640	-0.56	-4.456	0.042
	Breite oben	50.31		50.23		-0.08		0.036
	Breite unten	50.31		50.20		-0.11		0.049
	Dicke	16.66		16.22		-0.44		0.593
Mittelwert Alpha u längs								0.041
Mittelwert Alpha u dicke								0.574
<b>Gesamt:</b>								
Mittelwert Alpha u längs								0.040
Mittelwert Alpha u dicke								0.569

**Anhang 34: Feuchteausdehnkoeffizienten der Referenzproben der phenolharzgebundenen Spanplatte**

Klima Datum	Dimension	20°C / 65%	20°C / 30%	20°C / 85%	20°C / 65%	20°C / 30%	trocken 07.02.2005	Gewicht [g]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
		13.12.2004	22.12.2004	11.01.2005	21.01.2005	31.01.2005			Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
		Abmessungen [mm]							
Probe 1	Länge	300.58	300.26	300.76	300.54	300.14	299.56	117.08	190.40
	Breite oben	50.68	50.56	50.65	50.61	50.59	50.45		614.88
	Breite unten	50.64	50.55	50.65	50.61	50.54	50.44		
	Dicke	13.36	13.07	13.68	13.47	13.11	12.60		
Probe 2	Länge	300.62	300.31	300.78	300.56	300.16	299.60	117.39	191.16
	Breite oben	50.71	50.66	50.74	50.69	50.63	50.53		614.10
	Breite unten	50.61	50.56	50.62	50.69	50.54	50.43		
	Dicke	13.37	13.09	13.69	13.49	13.12	12.64		
Probe 3	Länge	300.61	300.24	300.81	300.56	300.19	299.63	116.98	191.22
	Breite oben	50.73	50.64	50.76	50.69	50.61	50.47		611.75
	Breite unten	50.65	50.56	50.70	50.60	50.55	50.43		
	Dicke	13.38	13.09	13.70	13.50	13.12	12.65		
Klima		20°C / 65%				trocken			
Probe 4	Länge	300.61	300.60		300.53	300.53	299.67	116.33	190.76
	Breite oben	50.69	50.68		50.70	50.68	50.48		609.84
	Breite unten	50.72	50.71		50.67	50.68	50.48		
	Dicke	13.33	13.33		13.33	13.32	12.61		
Probe 5	Länge	300.57	300.57		300.56	300.55	299.69	117.28	190.92
	Breite oben	50.63	50.64		50.60	50.60	50.44		614.26
	Breite unten	50.71	50.69		50.68	50.63	50.44		
	Dicke	13.36	13.36		13.35	13.35	12.63		
Probe 6	Länge	300.57	300.58		300.54	300.53	299.63	117.53	190.30
	Breite oben	50.66	50.66		50.67	50.65	50.43		617.60
	Breite unten	50.68	50.67		50.63	50.65	50.46		
	Dicke	13.36	13.36		13.34	13.34	12.59		

Mittelwert Dichte

613.74 kg/m<sup>3</sup>

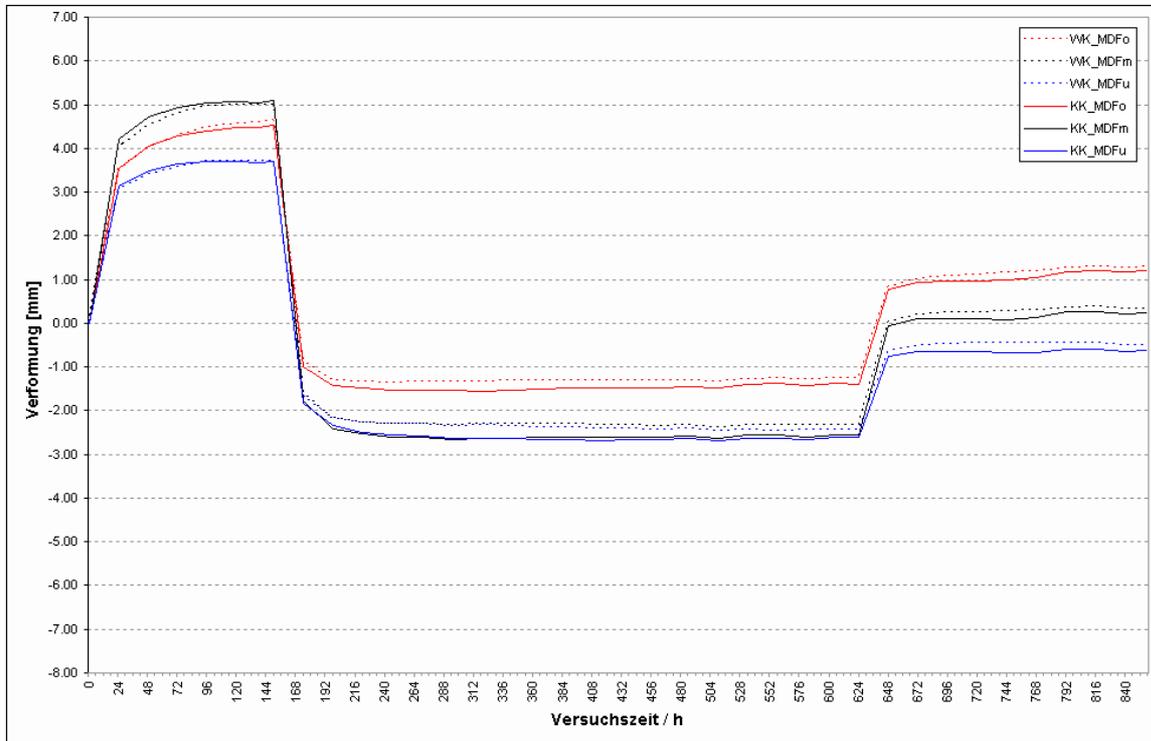
### Anhang 35: Trockenrohichten der Referenzproben der MDF-Platte

Klima Datum	Dimension	20°C / 65%	20°C / 30%	20°C / 85%	20°C / 65%	20°C / 30%	trocken 07.02.2005	Gewicht [g]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]
		13.12.2004	22.12.2004	11.01.2005	21.01.2005	31.01.2005			Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
		Abmessungen [mm]							
Probe 1	Länge	300.21	299.80	300.60	300.30	299.79	299.00	142.14	235.89
	Breite oben	50.20	50.13	50.30	50.25	50.14	49.99		602.56
	Breite unten	50.21	50.13	50.28	50.23	50.15	50.00		
	Dicke	16.33	16.06	16.91	16.65	16.22	15.78		
Probe 2	Länge	300.20	299.80	300.73	300.40	299.81	298.91	143.25	235.82
	Breite oben	50.23	50.17	50.30	50.28	50.19	50.06		607.44
	Breite unten	50.27	50.19	50.33	50.29	50.20	50.06		
	Dicke	16.36	16.09	16.87	16.64	16.23	15.76		
Probe 3	Länge	300.14	299.72	300.63	300.27	299.71	298.82	144.21	235.57
	Breite oben	50.44	50.22	50.37	50.31	50.23	50.11		612.15
	Breite unten	50.27	50.21	50.34	50.31	50.20	50.06		
	Dicke	16.35	16.08	16.89	16.66	16.22	15.74		
Klima		20°C / 65%				trocken			
Probe 4	Länge	300.22	300.24		300.22	300.22	298.93	142.84	233.90
	Breite oben	50.29	50.27		50.28	50.27	50.05		610.68
	Breite unten	50.23	50.23		50.23	50.26	50.01		
	Dicke	16.36	16.35		16.34	16.35	15.64		
Probe 5	Länge	300.00	300.01		300.00	300.00	298.81	143.70	233.38
	Breite oben	50.21	50.21		50.23	50.20	49.99		615.73
	Breite unten	50.20	50.20		50.20	50.19	49.95		
	Dicke	16.31	16.31		16.31	16.31	15.63		
Probe 6	Länge	300.03	300.02		300.02	300.00	298.79	143.36	232.47
	Breite oben	50.18	50.18		50.18	50.16	49.95		616.68
	Breite unten	50.22	50.21		50.23	50.20	49.99		
	Dicke	16.30	16.30		16.29	16.30	15.57		

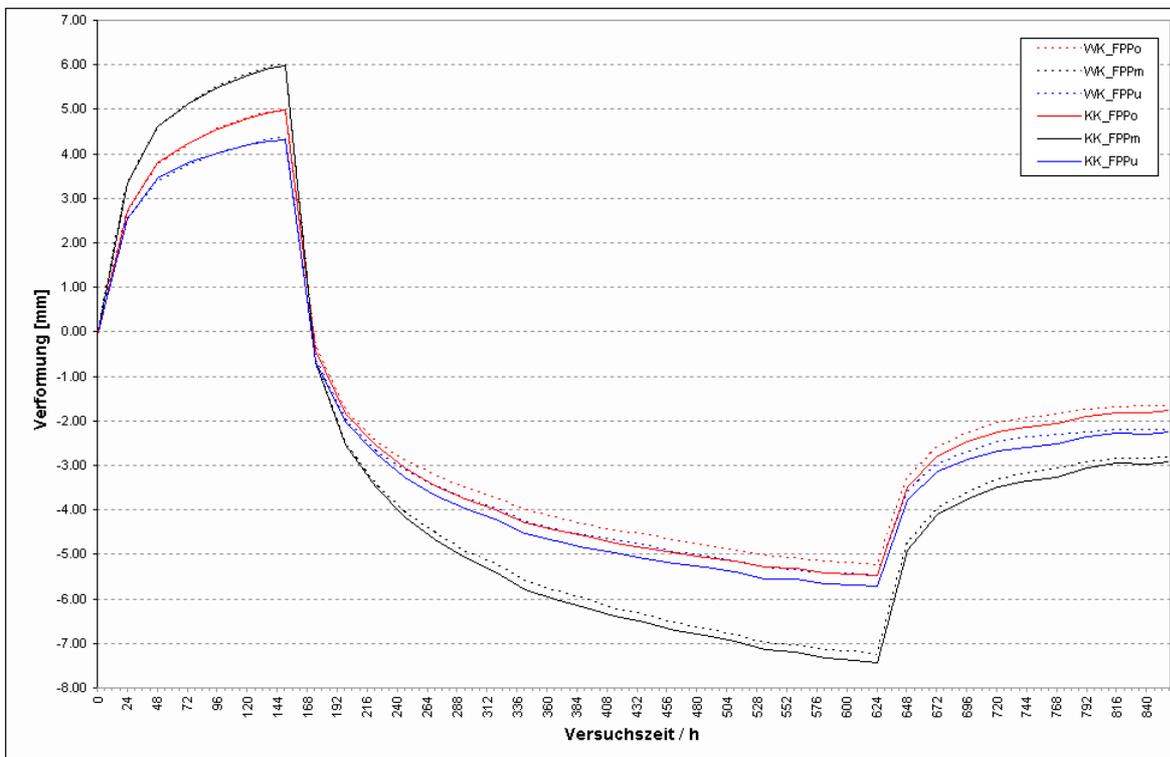
Mittelwert Dichte

610.87 kg/m<sup>3</sup>

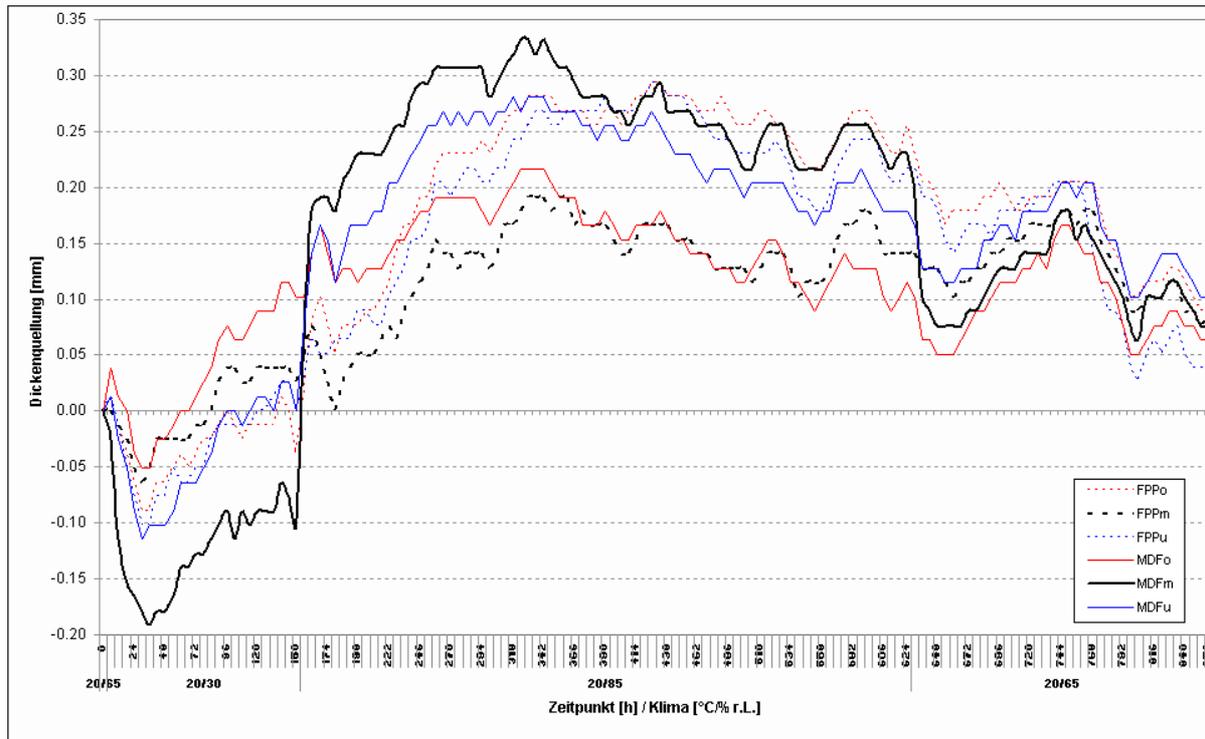
### Anhang 36: Trockenrohichten der Referenzproben der phenolharzgebundenen Spanplatte



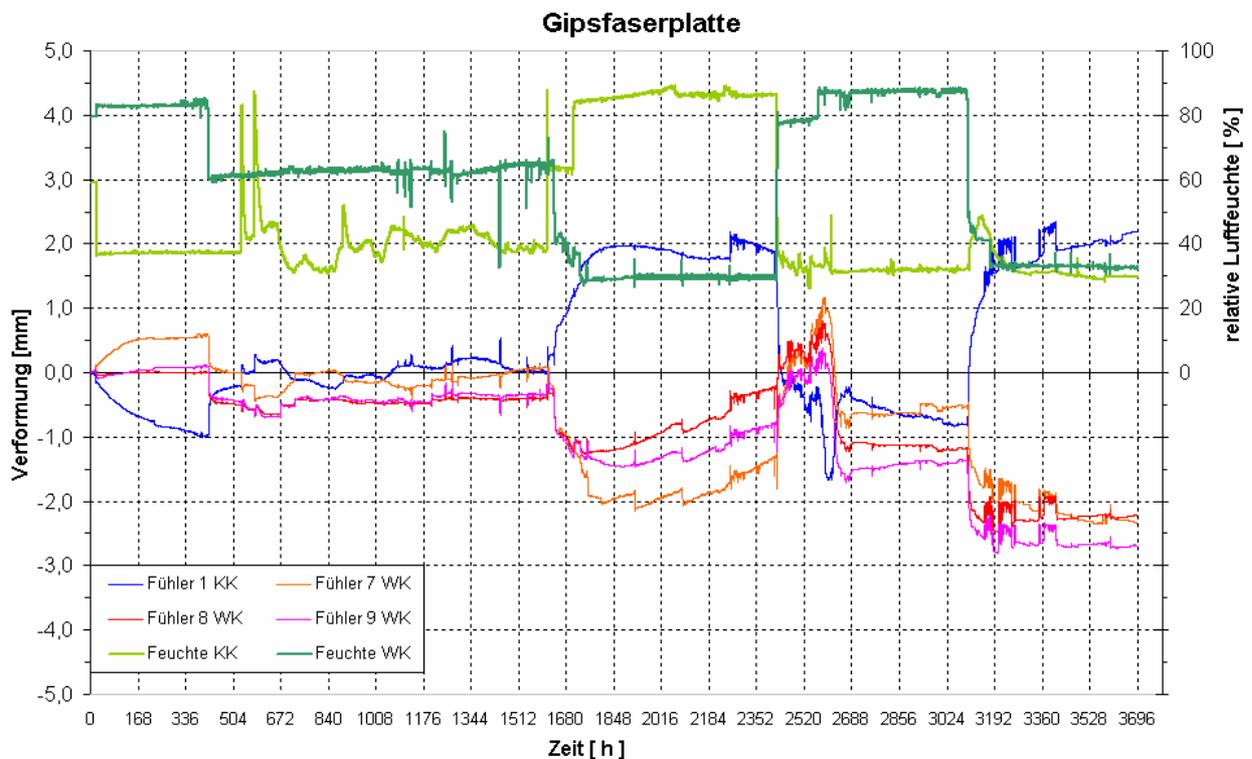
Anhang 37: Verformungen der MDF-Platte gemessen auf der Warm- und der Kaltkammerseite



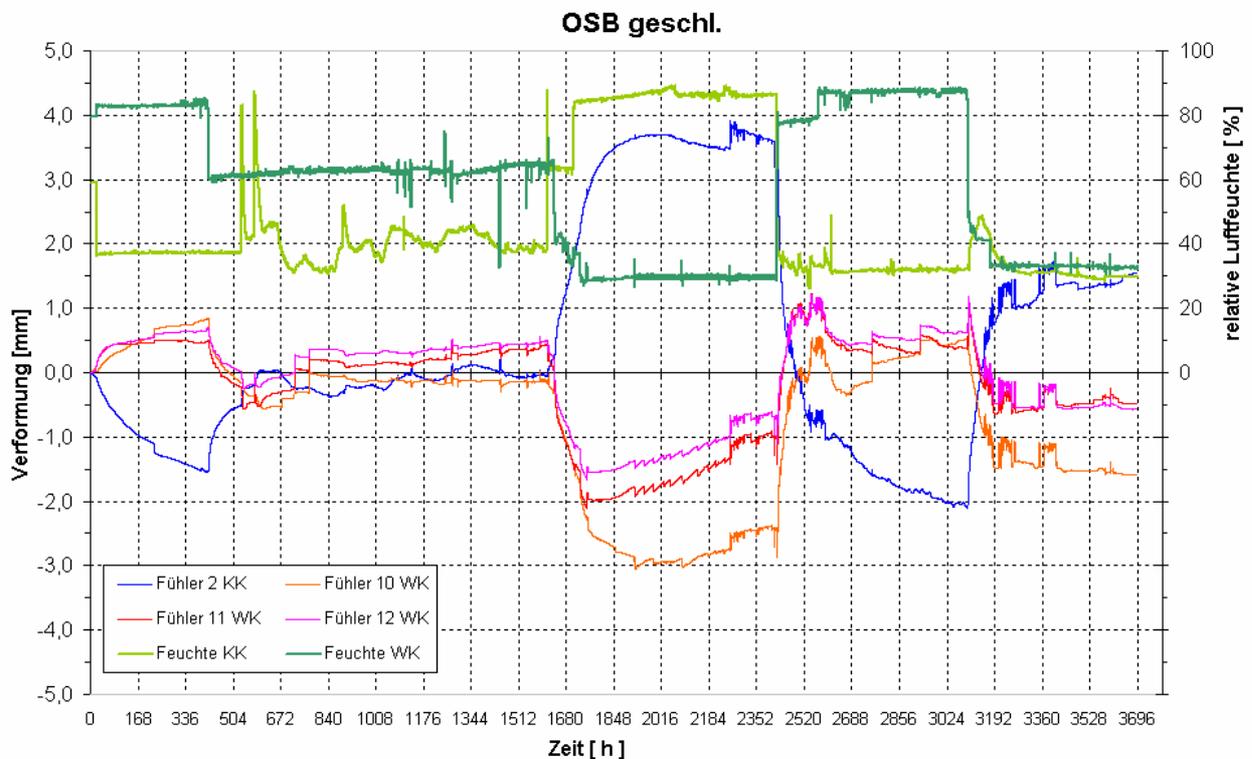
Anhang 38: Verformungen der Spanplatte gemessen auf der Warm- und der Kaltkammerseite



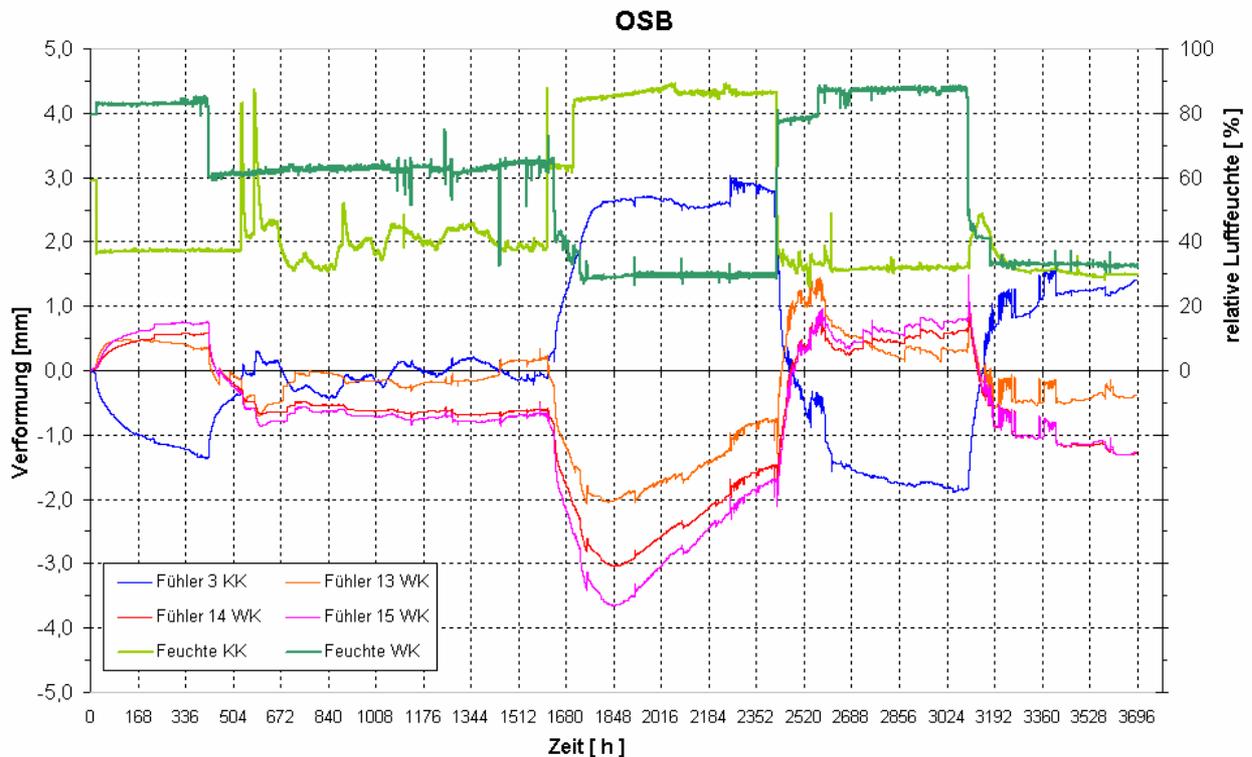
**Anhang 39: Dickenquellung der MDF- und der Spanplatte berechnet aus den Differenzen der in der Warm- und der Kaltkammer gemessenen Verformungen**



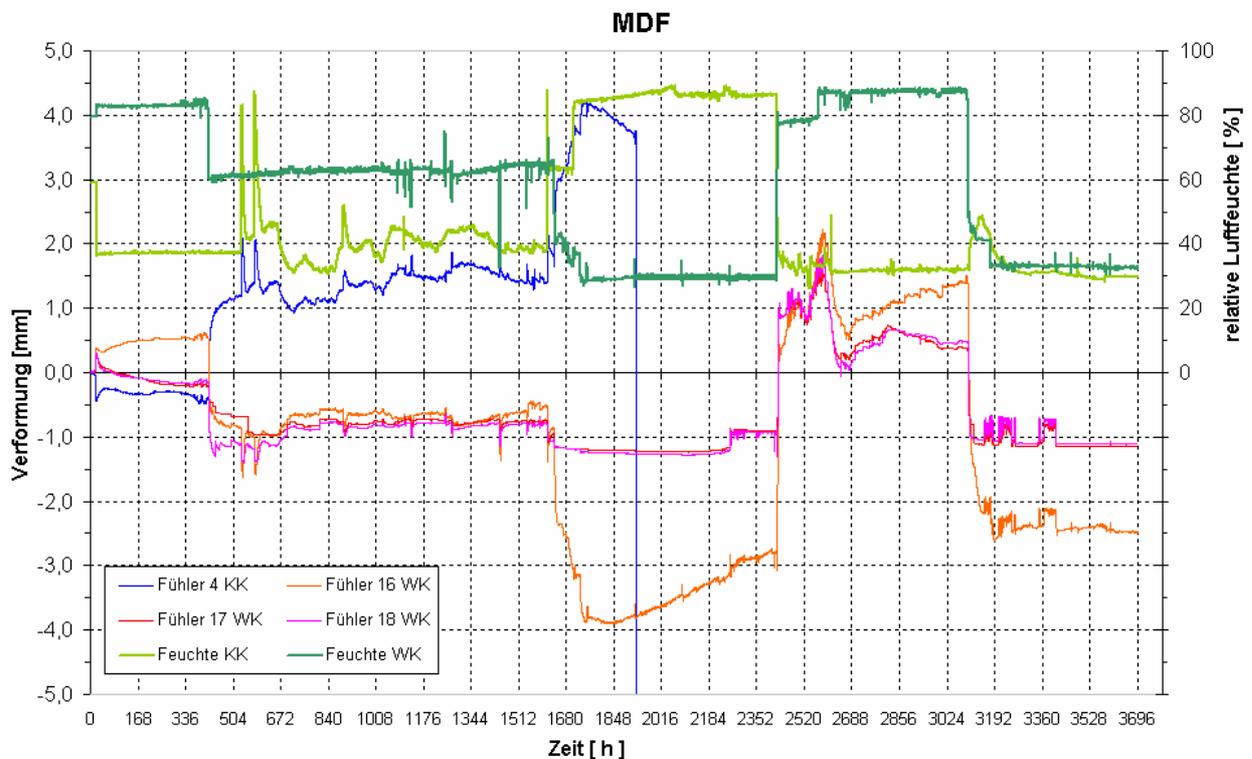
**Anhang 40: Verformungen der Gipsfaserplatte über den Versuchszeitraum – Fühler 1 KK (blau) und Fühler 7 (orange) sind direkt gegenüber angeordnet, Fühler 7 (orange) und Fühler 9 (magenta) sind auf gleicher Höhe, aber in unterschiedlichen Felder (rechts und links von der Mittelrippe), Fühler 9 (magenta) und Fühler 8 (rot) sind im gleichen Feld übereinander (magenta in der Mitte – rot im oberen Dreiteilspunkt)**



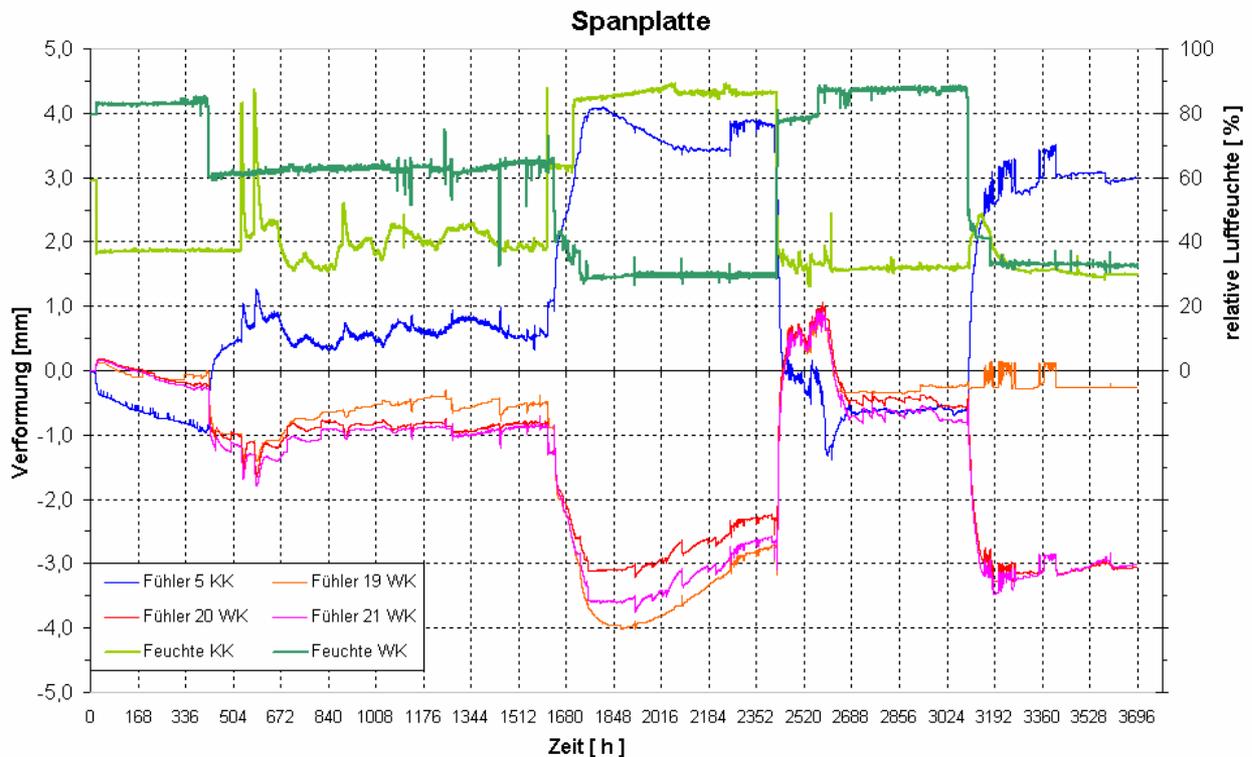
**Anhang 41: Verformungen der geschliffenen OSB über den Versuchszeitraum – Fühler 2 KK (blau) und Fühler 10 (orange) sind direkt gegenüber angeordnet, Fühler 10 (orange) und Fühler 12 (magenta) sind auf gleicher Höhe, aber in unterschiedlichen Felder (rechts und links von der Mittelrippe), Fühler 12 (magenta) und Fühler 11 (rot) sind im gleichen Feld übereinander (magenta in der Mitte – rot im oberen Drittelpunkt)**



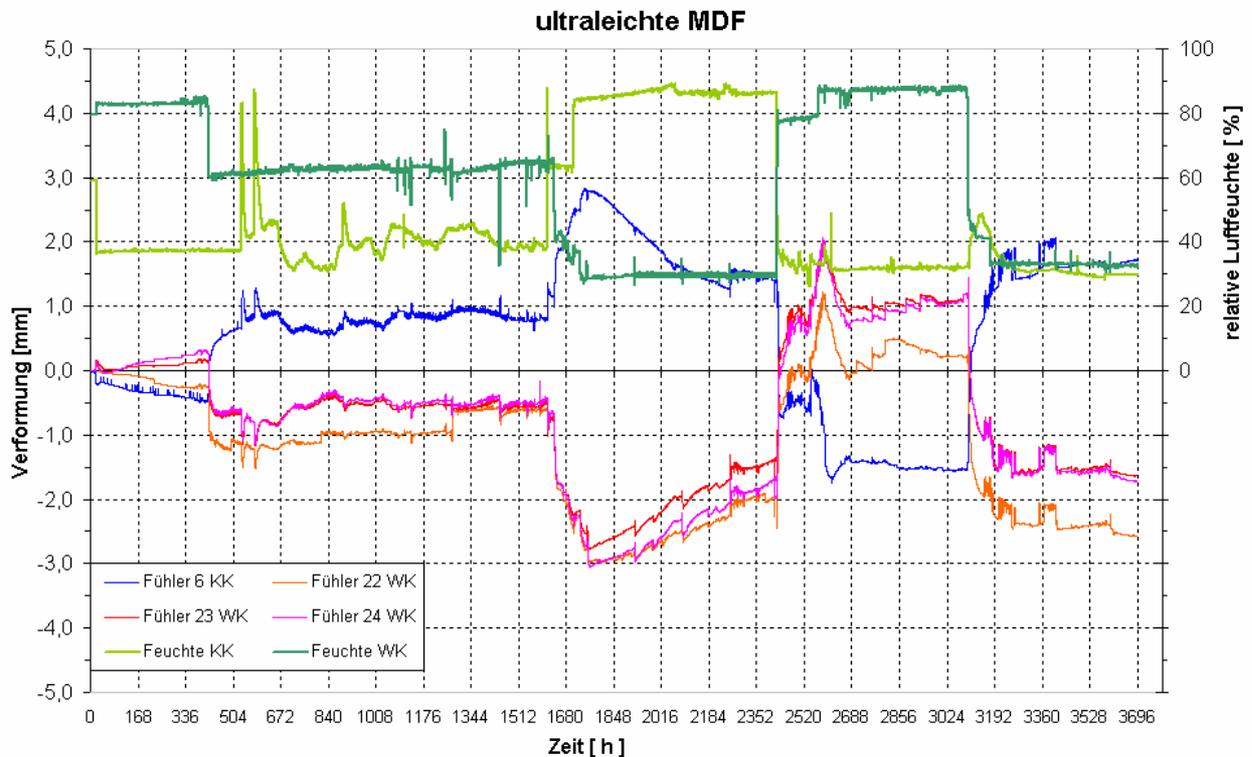
**Anhang 42: Verformungen der ungeschliffenen OSB über den Versuchszeitraum – Fühler 3 KK (blau) und Fühler 13 (orange) sind direkt gegenüber angeordnet, Fühler 13 (orange) und Fühler 15 (magenta) sind auf gleicher Höhe, aber in unterschiedlichen Felder (rechts und links von der Mittelrippe), Fühler 15 (magenta) und Fühler 14 (rot) sind im gleichen Feld übereinander (magenta in der Mitte – rot im oberen Drittelspunkt)**



**Anhang 43: Verformungen der Gipsfaserplatte über den Versuchszeitraum – Fühler 4 KK (blau) und Fühler 16 (orange) sind direkt gegenüber angeordnet, Fühler 16 (orange) und Fühler 18 (magenta) sind auf gleicher Höhe, aber in unterschiedlichen Felder (rechts und links von der Mittelrippe), Fühler 18 (magenta) und Fühler 17 (rot) sind im gleichen Feld übereinander (magenta in der Mitte – rot im oberen Drittelpunkt)**



**Anhang 44: Verformungen der Spanplatte über den Versuchszeitraum – Fühler 5 KK (blau) und Fühler 19 (orange) sind direkt gegenüber angeordnet, Fühler 19 (orange) und Fühler 21 (magenta) sind auf gleicher Höhe, aber in unterschiedlichen Felder (rechts und links von der Mittelrippe), Fühler 21 (magenta) und Fühler 20 (rot) sind im gleichen Feld übereinander (magenta in der Mitte – rot im oberen Drittelpunkt)**



**Anhang 45: Verformungen der ultraleichten MDF über den Versuchszeitraum – Fühler 6 KK (blau) und Fühler 22 (orange) sind direkt gegenüber angeordnet, Fühler 22 (orange) und Fühler 24 (magenta) sind auf gleicher Höhe, aber in unterschiedlichen Felder (rechts und links von der Mittelrippe), Fühler 24 (magenta) und Fühler 23 (rot) sind im gleichen Feld übereinander (magenta in der Mitte – rot im oberen Drittelspunkt)**

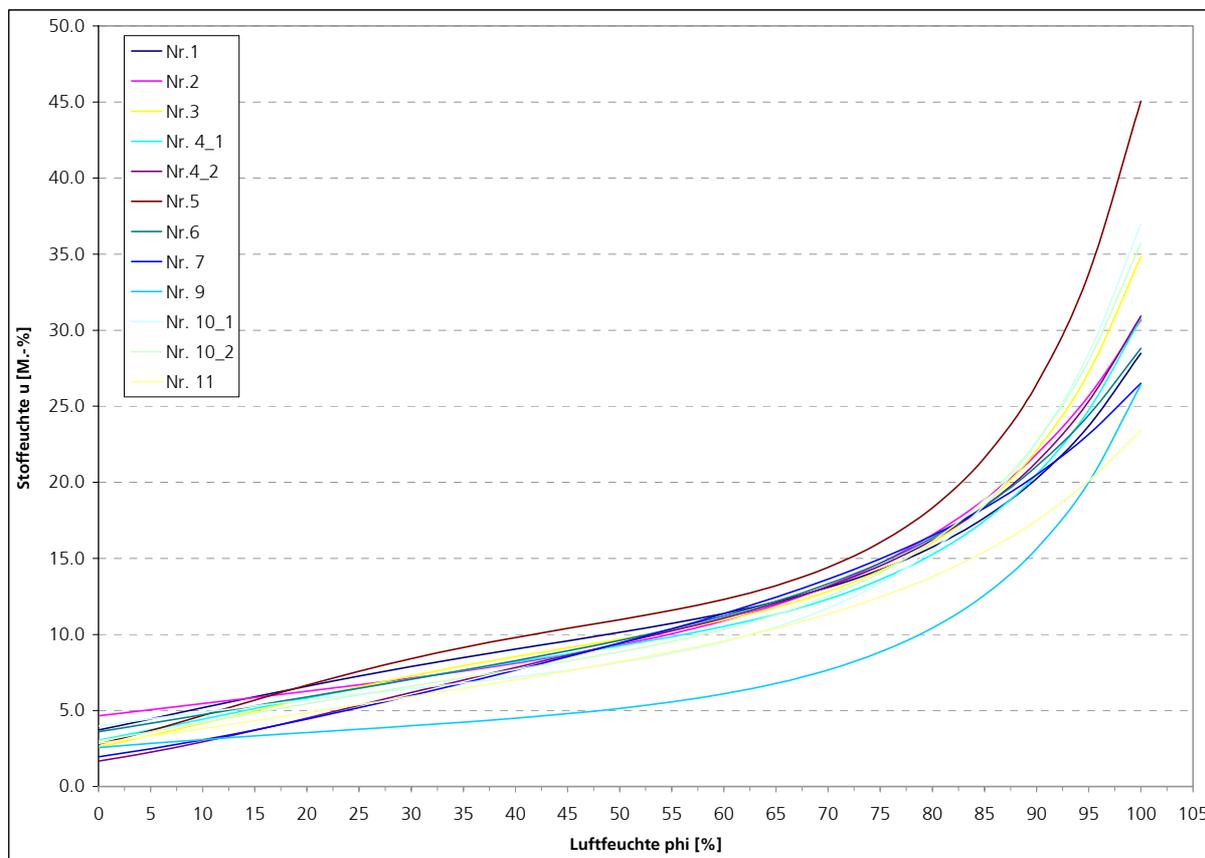


Parameter	Nummer der Sorptionsisotherme nach Greubel/Dreves											
	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr. 4_1	Nr.4_2	Nr.5	Nr.6	Nr. 7	Nr. 9	Nr. 10_1	Nr. 10_2	Nr. 11
B0	1.47	1.66	1.06	1.23	0.6	1.07	1.37	0.7	1.09	1.47	1.22	1.14
B1	3.80E-02	1.72E-02	5.46E-02	4.33E-02	6.46E-02	6.13E-02	3.01E-02	4.99E-02	2.13E-02	2.36E-02	3.96E-02	3.29E-02
B2	-5.43E-04	-1.50E-04	-8.47E-04	-6.41E-04	-8.45E-04	-1.02E-03	-3.27E-04	-4.99E-04	-3.17E-04	-3.59E-04	-5.67E-04	-3.49E-04
B3	3.66E-06	1.67E-06	5.60E-06	4.39E-06	4.91E-06	6.85E-06	2.34E-06	2.61E-06	3.37E-06	3.46E-06	4.19E-06	2.31E-06
B4	-7.72E-03	-6.10E-03	-5.10E-03	-5.75E-03	-4.46E-03	-2.32E-03	-4.36E-03	-1.48E-03	-7.38E-03	-4.30E-03	-6.24E-03	-4.85E-03
Theta [°C]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

phi [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]	u [%]
0	3.727	4.655	2.606	3.050	1.667	2.783	3.607	1.955	2.566	3.991	2.990	2.838	
5	4.448	5.055	3.355	3.729	2.255	3.689	4.160	2.479	2.833	4.452	3.595	3.317	
10	5.181	5.456	4.157	4.430	2.936	4.671	4.728	3.071	3.087	4.892	4.215	3.817	
15	5.905	5.858	4.980	5.130	3.692	5.679	5.305	3.726	3.327	5.306	4.834	4.331	
20	6.604	6.267	5.789	5.811	4.500	6.662	5.887	4.436	3.556	5.698	5.441	4.854	
25	7.268	6.688	6.561	6.459	5.336	7.581	6.472	5.190	3.779	6.072	6.027	5.384	
30	7.892	7.127	7.279	7.069	6.177	8.412	7.061	5.982	4.003	6.438	6.593	5.920	
35	8.478	7.596	7.938	7.641	7.009	9.147	7.660	6.803	4.238	6.810	7.144	6.463	
40	9.037	8.106	8.545	8.186	7.823	9.799	8.275	7.651	4.495	7.205	7.692	7.018	
45	9.582	8.671	9.119	8.721	8.621	10.393	8.919	8.525	4.789	7.644	8.255	7.594	
50	10.136	9.310	9.687	9.267	9.414	10.972	9.607	9.429	5.137	8.154	8.860	8.202	
55	10.725	10.047	10.288	9.857	10.224	11.588	10.361	10.373	5.562	8.767	9.537	8.858	
60	11.384	10.910	10.968	10.528	11.085	12.306	11.208	11.372	6.096	9.526	10.331	9.581	
65	12.153	11.936	11.787	11.329	12.041	13.209	12.180	12.449	6.778	10.488	11.296	10.398	
70	13.087	13.172	12.825	12.324	13.154	14.405	13.322	13.635	7.665	11.731	12.506	11.343	
75	14.252	14.683	14.186	13.595	14.505	16.041	14.691	14.969	8.840	13.363	14.064	12.458	
80	15.741	16.552	16.018	15.260	16.203	18.337	16.363	16.506	10.424	15.545	16.117	13.799	
85	17.680	18.894	18.544	17.487	18.404	21.626	18.439	18.317	12.596	18.513	18.879	15.444	
90	20.251	21.864	22.100	20.524	21.335	26.450	21.061	20.496	15.641	22.631	22.676	17.493	
95	23.719	25.684	27.231	24.754	25.334	33.721	24.424	23.170	20.006	28.470	28.016	20.089	
100	28.486	30.664	34.834	30.781	30.929	45.047	28.809	26.515	26.427	36.955	35.716	23.430	

Anhang 46: Regressionsparameter und Berechnung der Sorptionsisothermen nach Greubel/ Dreves



Anhang 47: Sorptionsisothermen verschiedener Holzwerkstoffe berechnet nach Greubel/Dreves (Zuordnung der Nummern der Sorptionsisothermen s. Anhang 46 und Anhang 48)

Nummer	Bezeichnung	Dicke [mm]	Rohdichte [kg/m³]	Bindemittel	Bindemittelanteil [%]	Holzart
1	Vollholz	16	443	-	-	Fichte
2	Tischlerplatte	22	420	-	-	Mittellage: Fichte (16mm) Decklage Gabun (3mm)
3	Spanplatte V 20	13	735	UF	DS11	50% Nadelholz
					MS 9	50% Laubholz
4_1	Spanplatte V 100 G	13	726	MDI	DS 7	50% Nadelholz
					MS 5	50% Laubholz
4_2	Spanplatte V 100 G	13	729	MDI	DS 7	50% Nadelholz
					MS 5	50% Laubholz
5	Spanplatte V 100 G	16	661	PF	DS 10	50% Nadelholz
					MS 8	50% Laubholz
6	Spanplatte V 100 G	16	645	MDI PF	DS 10	50% Nadelholz
					MS 5	50% Laubholz
7	OSB-Platte	13	676	MUF	ca. 9	Nadelholz
8	Dünnspanplatte	4	655	UF	ca. 10	50% Nadelholz 50% Laubholz
9	Spanplatte	16	813	Sulfitablauge	6	50% Nadelholz 50% Laubholz
10_1	Mittelharte Faserplatte	16	664	MUF	8	50% Nadelholz
10_2	Mittelharte Faserplatte	16	664	MUF	8	50% Laubholz
11	Hartfaserplatte	3	897	PF	3	50% Nadelholz 50% Laubholz

**Anhang 48: Materialparameter der Holzwerkstoffe zur ANSYS-Simulation**



## 10 Literatur / Endnoten

---

- /1/ DIN 68763 Spanplatten; Flachpreßplatten für das Bauwesen; Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Überwachung; 1990-09
- /2/ DIN EN 312 Spanplatten - Anforderungen ; 2003-11
- /3/ DIN 1052 Holzbauwerke Berechnung und Ausführung; 1988-04
- /4/ DIN 1052 Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau; Entwurf 2004-07
- /5/ Sattler, H., Marutzky R.: Praxisnahe Untersuchungen zur Quantifizierung hygriisch bedingter Dimensionsänderungen einschließlich ihrer Relevanz für die Anwendung von Holzwerkstoffen. Abschlussbericht AiF-Vorhaben 10795 N, Braunschweig, 1999
- /6/ DIN EN 13171 Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) – Spezifikation; Ausgabe 2001-10
- /7/ Herlyn, J.W., Marutzky R.: Kurzzeitbewitterung an einer Kleinprobe mit dem WDVS „Inthermo“ zur Ermittlung des Materialfeuchteverhaltens. WKI Prüfbericht Nr. U 2541/01 v. 19.12.2001
- /8/ Messungen zum Holzfeuchteverhalten beim WDVS „Unger-Diffutherm“ während einer Bewitterungssimulation an einem Prüfstand der MPA Leipzig, WKI, unveröffentlicht, 2000
- /9/ Messungen zum Materialfeuchteverhalten beim WDVS „Inthermo“ In-Situ-Messungen in einem Testobjekt unter Praxisbedingungen, WKI, unveröffentlicht, 2004
- /10/ Herlyn, J.W., Marutzky R.: Bewitterungssimulationen zum Nachweis des dauerhaften Wetterschutzes von außenseitig verputzten Holzwolleleichtbauplatten für eine Anwendung in der Gefährdungsklasse 0 der DIN 68000-3. WKI Prüfbericht Nr. U 415/2004 v. 07.04.2004
- /11/ Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen, 1993
- /12/ DIN EN ISO 12572 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit; Ausgabe 2001-10
- /13/ DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, 2001-07
- /14/ DIN 50010 Teil 2 Klimabegriffe - Physikalische Begriffe, Ausgabe 1981-08



- 
- /15/ DIN EN 12524 Baustoffe und -produkte - Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte, Ausgabe 2000-07
- /16/ Greubel, D., Drewes, H. Ermittlung der Sorptionsisothermen von Holzwerkstoffen bei verschiedenen Temperaturen mit einem neuen Messverfahren, WKI-Mitteilung 433 / 1987, Braunschweig 1987 (Holz als Roh- und Werkstoff 45, S. 289 – 295)
- /17/ DIN EN 322 Holzwerkstoffe: Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes, Ausgabe 1993-08
- /18/ DIN EN ISO 12572 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Ausgabe 2001-09
- /19/ DIN EN 323 Holzwerkstoffe, Bestimmung der Rohdichte, Ausgabe 1993-08;
- /20/ Müller, G., Groth, C.: FEM für Praktiker – Band 1 Grundlagen, expert verlag, Renningen 2002
- /21/ Schneider Bautabellen; 13. Auflage, Werner Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf 1998
- /22/ Lohmeyer, G.: Praktische Bauphysik, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1995
- /23/ Meskouris ; Hake: Statik der Stabtragwerke : Einführung in die Tragwerkslehre. Berlin; Heidelberg : Springer 1999
- /24/ Stephan, A.: Thermische Verformungen von unsymmetrischen Mehrschichtverbunden. Düsseldorf : VDI 1999
- /25/ Timoshenko, S.: Analysis of Bi-metal Thermostats. In: Journal of the Optical Society of America, Vol. 2, pp. 233-255, September 1925
- /26/ Schnell et.al.: Technische Mechanik : Elastostatik. Bd. 2. 4. Aufl. Berlin : Springer 1992