

Technische Universität Dresden  
Institut für Holz und Papiertechnik  
Studienrichtung Holz- und Faserwerkstofftechnik

## **Physikalische Grundlagen der HFT**

### **Bestimmung des elastischen und Festigkeitsverhaltens bei Druckbeanspruchung von unterschiedlichen Probekörperabmessungen aus gegebenem Material**

Belegaufgabe

eingereicht von:

Fabian Knorr

05.06.1981

Matrikel: 

## Inhalt

1	Einleitende Betrachtungen .....	4
2	Physikalische Grundlagen für die durchzuführenden Prüfungen.....	5
2.1	Elastische Eigenschaften .....	5
2.2	Rheologische Eigenschaften .....	7
3	Vorbereiten der Versuche.....	9
3.1	Beschreibung des Prüfmaterials.....	9
3.2	Beschreibung der Querdehnungsbegrenzung.....	11
3.3	Beschreibung der Prüfmaschine .....	13
4	Durchführung und Auswertung der Messungen .....	14
4.1	Testprüfung .....	14
4.2	Kalibrierung der Prüfmaschine mit der Querdehnungsbegrenzung .....	15
4.3	Prüfung der Proben von 4mm Höhe mit Querdehnungsbegrenzung.....	17
4.4	Kalibrierung der Prüfmaschine mit den Druckplatten.....	19
4.5	Prüfung der Proben mit 20mm Höhe .....	21
4.6	Prüfung der Proben mit 10mm Höhe .....	24
4.7	Prüfung der Proben mit 4mm Höhe ohne Querdehnungsbegrenzung.....	27
5	Vergleich des Verhaltens bei unterschiedlichen Geometrien .....	29
5.1	Verhalten von nativem Ahorn im Vergleich.....	29
5.2	Verhalten von thermisch modifiziertem Ahorn im Vergleich .....	30
6	Zusammenfassung .....	33
	Verzeichnis der Abbildungen.....	34
	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	36
	Anlagenverzeichnis .....	37

## **1 Einleitende Betrachtungen**

Ziel der Untersuchungen dieser Arbeit war es, eine Abhängigkeit des Druckverhaltens von Materialien mit unterschiedlichen Höhen von 20, 10 sowie 4mm Höhe zu zeigen. Dabei standen Proben aus nativem sowie thermisch modifiziertem Ahorn zur Verfügung. Damit sollte der Einfluss der Probengeometrie auf die mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Es musste beobachtet werden, auf welche Art und Weise sich die Proben verfestigen lassen oder brechen.

Zusätzlich war der Einfluss einer weiteren Randbedingung zu betrachten. Proben der Höhe von 4mm sollten in einem geschlossenen Kasten unter vorheriger thermischer Behandlung verfestigt werden. Dieser Kasten sollte dazu dienen, dass sich die Probe nicht ausdehnen kann. Dadurch sollte sie nicht brechen, sondern ein fester Körper bleiben.

Zunächst werden in dieser Arbeit relevante theoretische Grundlagen beschrieben. Anschließend ist das Probenmaterial sowie der oben genannte Kasten und die Prüfmaschine vorgestellt. Dann erfolgt die Beschreibung der Versuchsdurchführung und die Ergebnisse werden im Vergleich zueinander diskutiert.

## 2 Physikalische Grundlagen für die durchzuführenden Prüfungen

### 2.1 Elastische Eigenschaften

Die Elastizität beschreibt die Eigenschaft von festen Körpern, eine Deformation wieder rückgängig zu machen. Es handelt sich dabei um einen idealelastischen Körper, wenn die Formänderung bei kompletter Entlastung vollständig zurück geht. Beim Holz spricht man von einem viskoelastischem Verhalten. Das bedeutet, dass neben den elastischen Eigenschaften auch eine Zeitabhängigkeit bei den Formänderungen zu beobachten ist.

Wichtige Kenngrößen für die Beschreibung einer Verformung sind die folgenden:

- Die Dehnung beschreibt das Verhältnis der Längenänderung zur Ursprungslänge. Sie ist dimensionslos und berechnet sich nach der Formel  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ .
- Die Spannung beschreibt eine Kraft, die auf eine Fläche senkrecht zur Belastungsrichtung. Sie wird in N/mm<sup>2</sup> angegeben und berechnet sich nach der Formel  $\sigma = \frac{F}{l \cdot b}$ .
- Der Elastizitätsmodul ist die Spannung, die notwendig ist, um einen Körper in seiner Länge zu verdoppeln bzw. zu halbieren. Er wird in N/mm<sup>2</sup> angegeben und berechnet sich unter Vernachlässigung der Querkontraktion nach  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ .
- Die Poissonsche Konstante oder Querkontraktionszahl ist ein Materialkennwert, der die Querkontraktion eines Stoffes beschreibt. Wird ein Körper auf Zug oder Druck beansprucht, ändern sich die Körpermaße sowohl in als auch senkrecht zur Belastungsrichtung. Die Poissonsche Konstante ist dabei das Verhältnis der Querdehnung zur Längsdehnung. Sie ist dimensionslos und berechnet für

Druck sich nach der Formel  $\mu = -\frac{\varepsilon_{\text{quer}}}{\varepsilon_{\text{längs}}}$ .

~ $\varepsilon$	- Dehnung
~ $l$	- Länge
~ $b$	- Breite
~ $\Delta l$	- Längenänderung
~ $\sigma$	- Spannung
~ $E$	- Elastizitätsmodul
~ $\mu$	- Poissonsche Konstante
~ $\varepsilon_{\text{quer}}$	- Querdehnung (Kontraktion)
~ $\varepsilon_{\text{längs}}$	- Längsdehnung (Dehnung)

Die Plastizität beschreibt die Eigenschaft eines Körpers, sich unter Krafteinwirkung zu verformen und diese Verformung nach Entlastung beizubehalten. Man spricht von irreversibler Verformung. Beim so genannten Fließen tritt bei konstanter Spannung und somit konstantem Krafteintrag eine Längenänderung auf.<sup>1</sup>

Die Festigkeit ist die Spannung eines Körpers bei Krafteinfluss, die zum Bruch des Körpers führt. Somit ist sie die Grenzspannung, die ein Körper aushalten kann, ohne zerstört zu werden. Die Druckfestigkeit berechnet sich nach der Formel  $\sigma_{dB} = \frac{F}{A}$ .

- ~ F - Kraft, die zum Bruch führt, bzw. Kraft im Bereich der Fließgrenze
- ~ A - Querschnittsfläche senkrecht zur Belastungsrichtung

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm beschreibt ein Material hinsichtlich seiner Plastizität und Elastizität. Der charakteristische Verlauf für Holz in Faserrichtung ist in der Abb. 2-1 dargestellt.

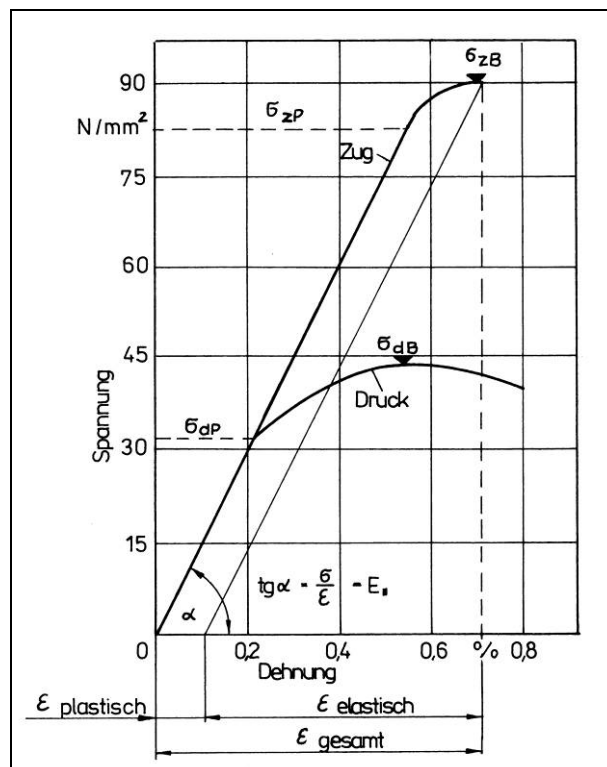


Abb. 2-1 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Holz (Quelle: NIEMZ, S.147)

Gezeigt ist die Dehnung in Abhängigkeit der aufgebrachtten Spannung, man kann den Verlauf auch als Kraft-Verlängerungs-Diagramm bezeichnen<sup>2</sup>. Im elastischen

<sup>1</sup> In Anlehnung an NIEMZ

<sup>2</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungs-Dehnungs-Diagramm>, 09.März 2008

Bereich steigt die Dehnung proportional mit der Spannung an. In diesem Bereich ergibt sich aus dem Anstieg des Verlaufs der Elastizitätsmodul. Dieser Bereich ist mit der Proportionalitätsgrenze (Index „P“) begrenzt. Ist die Proportionalitätsgrenze überschritten, führt jede weitere Krafterhöhung zu einer plastischen Verformung.

In der Abb. 2-1 ist des weiteren zu erkennen, dass die Zugfestigkeit ( $\sigma_{zB}$  - Bruchspannung bei Zugbelastung) von Holz etwa zweimal höher als die Druckspannung ( $\sigma_{dB}$ ) ist.

Folgende Faktoren haben einen zum Teil starken Einfluss auf die elasto-mechanischen Eigenschaften von Holz:

- Die Rohdichte hat einen entscheidenden Einfluss auf die elasto-mechanischen Eigenschaften. Sie ist das Verhältnis der Masse des Holzes im feuchten Zustand zum Volumen des Prüfkörpers und wird in  $\text{kg/m}^3$  angegeben. Mit steigender Rohdichte steigt die Festigkeit.
- Mit zunehmendem Faser-Last-Winkel sinkt die Festigkeit.
- Jede Abweichung der Gefügestruktur (z. B. Äste, Risse) beeinflusst die Festigkeit stark.
- Die Festigkeit sinkt mit zunehmender Feuchte sowie steigender Temperatur.<sup>3</sup>

## 2.2 Rheologische Eigenschaften

Die Rheologie befasst sich mit Verformungs- und Fließverhalten von Werkstoffen. Dafür werden die Teilchenbewegungen eines Materials, die Kräfte, die sie verursachen sowie die dazu benötigten Zeiten erfasst. Es wird also davon ausgegangen, dass die Festigkeit und Verformung eines Materials zeitabhängig sind.

Das Kriechen beschreibt die Zunahme einer Verformung bei konstantem Lasteintrag aber zunehmender Belastungsdauer. Holz besteht als makromolekularer Werkstoff hauptsächlich aus den Komponenten Lignin und Cellulose, die ihr charakteristisches Verhalten haben. Das Kriechen von Holz wird dabei in drei Phasen unterteilt. Bei Belastung richten sich die Moleküle zunächst aus und schließlich kommt es zum gegenseitigen Abgleiten. Je weiter die Dehnung fortschreitet, umso mehr wird die Verstreckung der Moleküle behindert. Schließlich nimmt die Verformung ab (Primärkriechen). Ist eine bestimmte Spannung erreicht, brechen die ersten Bindungen. In der

---

<sup>3</sup> In Anlehnung an NIEMZ

Phase des Sekundärkriechens schließen sich gebildete Risse wieder. Bei weiterer Spannungserhöhung steigt die Verformung progressiv an, es werden mehr Bindungen zerstört, als neue gebildet werden. Schließlich kann es zum Bruch kommen.

Unter der Spannungsrelaxation versteht man die Abnahme einer Spannung mit zunehmender Zeit, die für das Aufrechterhalten einer definierten Verformung nötig ist. Es spielen sich die gleichen Phasen wie beim Kriechen ab. Jedoch bewirken Platzwechselfvorgänge der Moleküle, dass die Spannung zum Aufrechterhalten der Verformung mit der Zeit abnimmt.

Die Dauerstandfestigkeit bezeichnet die Spannung, die ein Körper ohne zerstört zu werden bei unendlicher Belastungsdauer gerade noch aushalten kann.

Folgende Faktoren haben auf die rheologischen Eigenschaften Einfluss:

- Mit zunehmenden Faser-Last-Winkel steigen die rheologischen Eigenschaften. Holz, das in radialer Richtung belastet wird, ist weniger anfällig für rheologische Eigenschaften als Holz, das tangential belastet wird. Der Einfluss der rheologischen Eigenschaften ist des weiteren größer bei Splintholz sowie bei Frühholz.
- Die relative Luftfeuchte beeinflusst die rheologischen Eigenschaften am stärksten. Größere Luftfeuchte erhöht den Einfluss dieser Eigenschaften.
- Einen Einfluss hat des weiteren die Belastungsart (Zug, Druck, konstanter Schub oder zyklische Be- und Entlastung) sowie die Belastungsdauer. Auch der Belastungsgrad führt zu einem größeren Einfluss der rheologischen Eigenschaften.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> In Anlehnung an NIEMZ

### 3 Vorbereiten der Versuche

#### 3.1 Beschreibung des Prüfmaterials

Die Prüfreihe 1 umfasste 14 Prüfkörper mit einer Höhe von 4mm aus unbehandeltem Ahorn (siehe Abb. 3-1).



Abb. 3-1 - Ahorn-Prüfkörper der Höhe 4mm (Versuchsreihe 1)

Die Prüfreihe 2 umfasste 11 Prüfkörper mit einer Höhe von 4mm aus thermisch modifiziertem Ahorn (siehe Abb. 3-2).

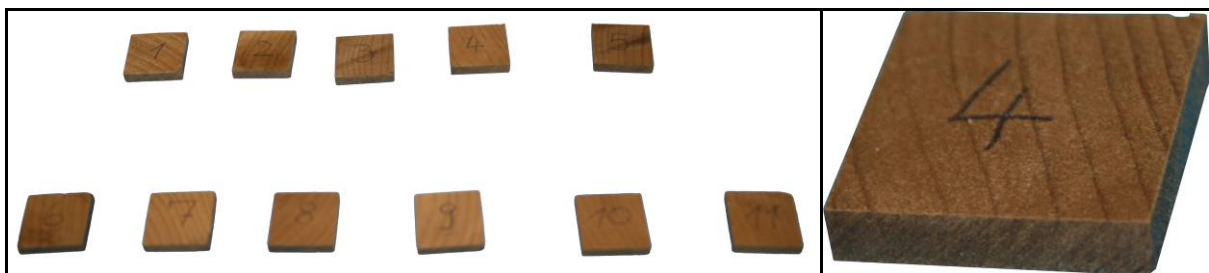


Abb. 3-2 - Proben aus thermisch modifiziertem Ahorn der Höhe 4mm (Versuchsreihe 2)

Alle Proben der Messreihe 1 und 2 hatten die folgenden Nennmaße: Länge x Breite x Dicke = 20 x 20 x 4mm. Die Proben hatten somit gemäß der DIN-Norm 52180-1 eine geometrisch definierte Form und sind sauber und ebenflächig. Alle Maße wurden im Rahmen der Prüfungsvorbereitung genau ermittelt und sind in der Anlage 1 aufgeführt. Da bei einer Nennstärke von 4mm fertigungstechnische Toleranzen zu erwarten waren, die Prüfkörperstärke für die Ermittlung der Längsdehnung aber die wichtigste Kenngröße ist, wurde sie als Mittelwert aus 5 Messpunkten an verschiedenen Stellen des Prüfkörpers ermittelt.

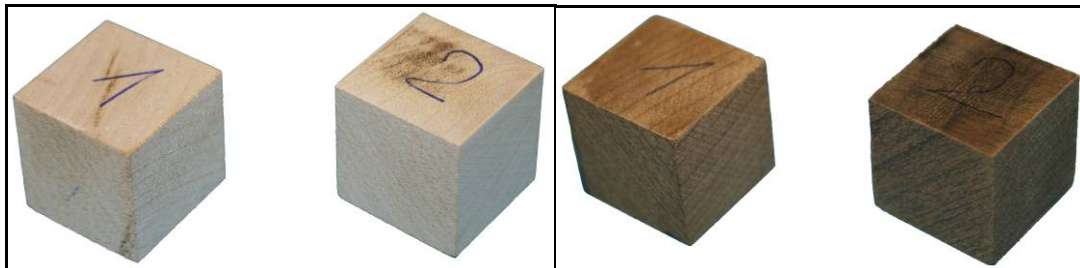
Zusätzlich ist anhand der Masse überschlägig die Rohdichte bestimmt. Aufgrund der kleinen Maße ließ sich die Dichte nur ungefähr berechnen und diente somit nur als grobes Richtmaß. Sie beträgt für die Prüfkörper aus unbehandeltem Ahorn durchschnittlich  $560 \text{ kg/m}^3$  bei einer Standardabweichung von  $11 \text{ kg/m}^3$ . Bei den Prüfkörpern aus thermisch modifiziertem Ahorn ist sie durchschnittlich  $510 \text{ kg/m}^3$  bei einer Standardabweichung von  $11 \text{ kg/m}^3$ .

Die beschriebenen Prüfkörper der Prüfreihe 1 und 2 sollen in ihrer Dicke (4mm) gestaucht bzw. verdichtet werden. Der Faser-Last-Winkel beträgt dabei bei allen Prüf-



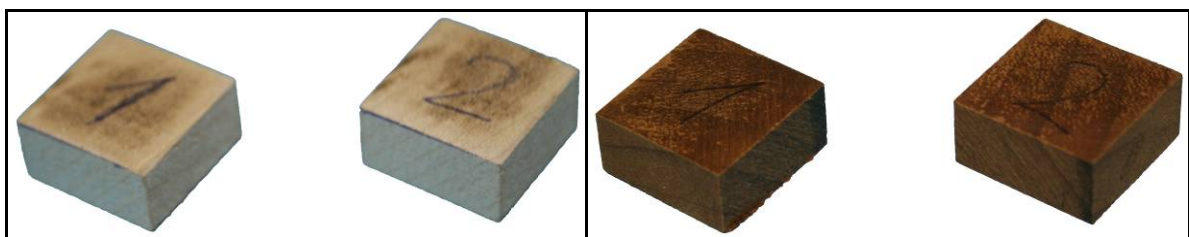
körpern etwa 45° um bei Kraffteinfluss ein Abgleiten der Fasern gegeneinander zu begünstigen. Demzufolge entsprechen die Prüfkörper der Prüfreiheiten 1 und 2 keiner Prüfnorm nach DIN.

Für weitere Betrachtungen standen Proben mit 3 unterschiedlichen Abmessungen in der Dicke zur Verfügung. Dabei war das Verhalten von nativem Holz mit dem Verhalten von thermisch modifiziertem Holz zu vergleichen.



**Abb. 3-3 - Proben der Höhe 20mm aus nativem Ahorn (links, Versuchsreihe 3) und aus thermisch modifiziertem Ahorn (rechts, Versuchsreihe 4)**

In Abb. 3-3 sind die Proben mit der Höhe von 20mm (Versuchsreihen 3 und 4) dargestellt. Die Proben dieser Versuchsreihen hatten die Abmaße 20 x 20 x 20mm, die zwei Proben der Versuchsreihe 3 waren aus nativem Ahorn, die zwei Proben der Versuchsreihe 4 aus thermisch modifiziertem Ahorn. Die genauen Maße sind in der Anlage 2 enthalten. Die nativen Ahorn-Proben hatten eine mittlere Rohdichte von 595 kg/m<sup>3</sup> und die thermisch modifizierten eine mittlere Rohdichte von 509 kg/m<sup>3</sup>.



**Abb. 3-4 - Proben der Höhe 10mm aus nativem Ahorn (links, Versuchsreihe 5) und aus thermisch modifiziertem Ahorn (rechts, Versuchsreihe 6)**

In Abb. 3-4 sind die Proben mit der Höhe von 10mm (Versuchsreihen 5 und 6) zu sehen. Sie hatten die Abmaße 20 x 20 x 10mm, die genauen Maße sind der Anlage 2 zu entnehmen. Die zwei Proben der Versuchsreihe 5 waren aus nativem Ahorn und hatten eine mittlere Rohdichte von 622 kg/m<sup>3</sup>. Die zwei Proben der Versuchsreihe 6 waren aus thermisch modifiziertem Ahorn und hatten eine mittlere Rohdichte von 524 kg/m<sup>3</sup>.

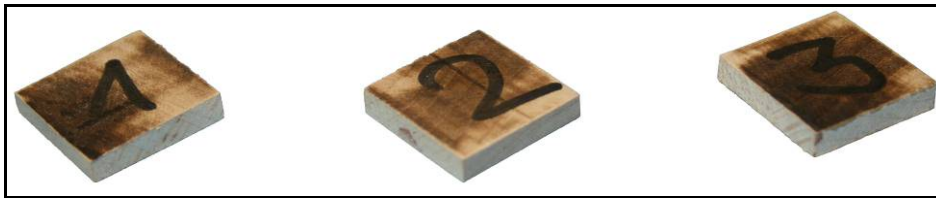


Abb. 3-5 - Proben der Höhe 4mm aus nativem Ahorn (Versuchsreihe 7)



Abb. 3-6 - Proben der Höhe 4mm aus thermisch modifiziertem Ahorn (Versuchsreihe 8)

Die Proben Versuchsreihen 7 und 8 sind auf Abb. 3-5 und Abb. 3-6 dargestellt, sie hatten die Abmaße von 20 x 20 x 4mm. Die genauen Abmaße jeder Probe sind der Anlage 2 zu entnehmen. Die drei Proben der Versuchsreihe 7 sind waren aus nativem Ahorn und hatten eine mittlere Rohdichte von  $639 \text{ kg/m}^3$ . Die Proben der Versuchsreihe 8 sind aus thermisch modifiziertem Ahorn mit einer mittleren Rohdichte von  $545 \text{ kg/m}^3$ .

Alle Proben der Versuchsreihen 3 bis 8 haben gemäß der DIN 52180 eine geometrisch definierte Form. Alle Proben sind sauber, scharfkantig und ebenflächig. Sie sollten mittels Druck gestaucht werden. Der Faser-Last-Winkel betrug bei allen Proben etwa  $45^\circ$ , somit erfolgte die Prüfung nicht gemäß einer Prüfnorm nach DIN.

### 3.2 Beschreibung der Querdehnungsbegrenzung

Die Prüfkörper der Prüfreihen 1 und 2 sollten in Richtung ihrer Höhe verdichtet werden. Als Ergebnis der Messreihen sollte ein Spannungs-Dehnungs-Verlauf entstehen, der unabhängig von der Querkontraktion ist. Da sich mit der Poisson-Zahl bei einer Dehnung, also einer Längenänderung sich auch automatisch die Breite ändert, musste diese Änderung mit Hilfe einer Vorrichtung begrenzt werden. Dafür wurde eine Querdehnungsbegrenzung angefertigt, welche die Breitenänderung aufgrund der Stauchung unterbinden soll. Eine schematische Darstellung ist in der Abb. 3-7 gezeigt, die angefertigte Stauchvorrichtung ist in Abb. 3-8 gezeigt.

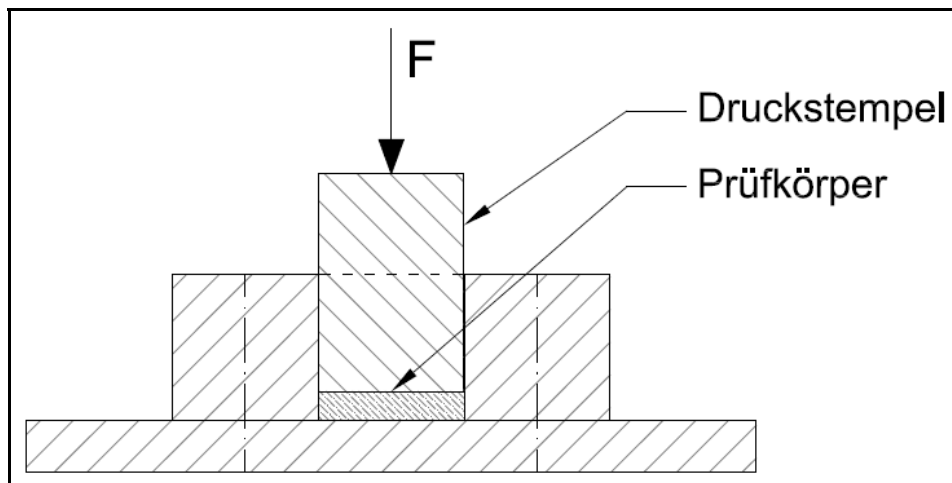


Abb. 3-7 - Schnittdarstellung der Querdehnungsbegrenzung

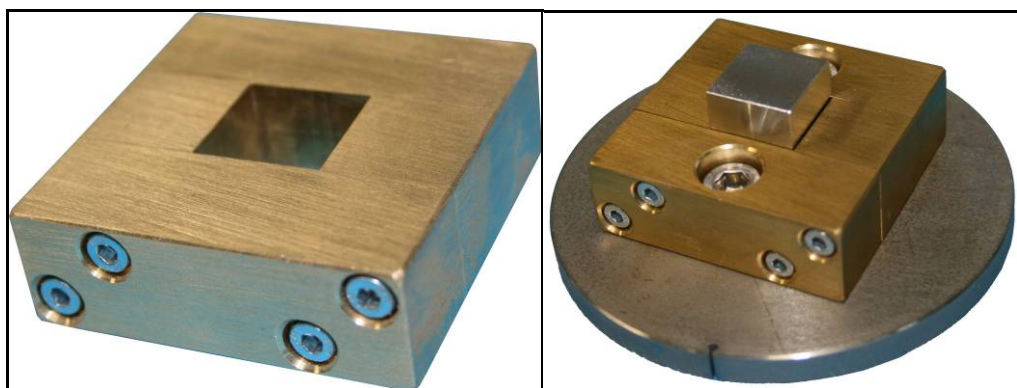


Abb. 3-8 - Querdehnungsbegrenzung ohne (links) und mit Druckstempel sowie Grundplatte (rechts)

Die Prüfkörper wurden für die Verdichtung in diesen Kasten gelegt. Um möglichst jede Querdehnung zu vermeiden, musste jeder Prüfkörper durch Abschleifen der Schmalflächen genau an die Öffnung der Vorrichtung angepasst werden. Durch ein Minimieren des Spaltes zwischen Prüfkörper und Vorrichtung konnte ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm ohne den Einfluss der Querkontraktion erstellt werden. Ein erster Versuch mit dem Prüfkörper 1 der Versuchsreihe 1 (natives Holz mit der Höhe 4mm) zeigte, dass aufgrund der enormen Kräfte der Prüfkörper unter die Querdehnungsbegrenzung gedrückt wurde. Dort war er seitlich nicht mehr begrenzt, der Prüfkörper floss unter die Vorrichtung und drückte sie von unten nach oben. In Folge dessen wurde die Vorrichtung geändert und mit einer abschraubbaren Grundplatte versehen (siehe Abb. 3-7 und Abb. 3-8 rechts). Diese Platte sollte verhindern, dass die Probe sich nach unten unter die Querdehnungsbegrenzung ausdehnen konnte.

### 3.3 Beschreibung der Prüfmaschine

Für die Prüfung stand die Universal-Werkstoffprüfmaschine TIRA Test 28100 zur Verfügung (siehe Abb. 3-9).

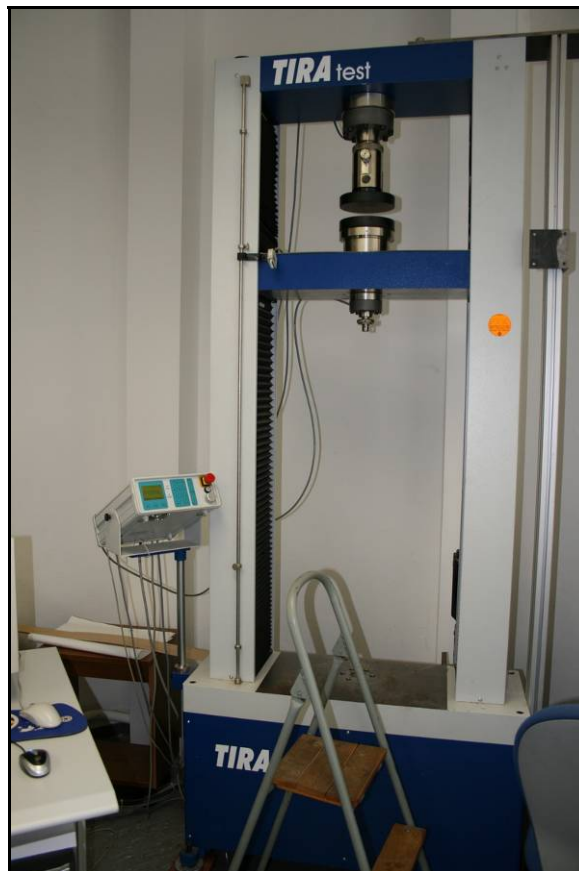


Abb. 3-9 - Werkstoffprüfmaschine TIRA Test 28100

Die Prüfkörper wurden im oberen Prüfraum verdichtet. Hier beträgt die maximale Prüfkraft 100 kN bei einer Prüfgeschwindigkeit von 0,01 bis 500 mm/min. Der Traversenhub dieser Universalprüfmaschine beträgt maximal 970 mm.

## 4 Durchführung und Auswertung der Messungen

### 4.1 Testprüfung

Der erste Versuch sollte dazu dienen, das Verhalten der Querdehnungsbegrenzung sowie die gesamten Prüfbedingungen zu beobachten.

Dafür wurde die Probe 1 aus nativem Holz der Höhe 4mm (Versuchsreihe 1) genommen. Vor dem Test wurde die Stauchvorrichtung etwa 45 Minuten und die Probe etwa 10 Minuten bei 100°C erwärmt. Das soll dazu dienen, dass sich das Lignin im Holz erweicht, um so ein Abgleiten der Fasern untereinander zu begünstigen, und dass sich bei langsamer Abkühlung im gespannten Zustand der Prüfkörper nach Entlastung möglichst wenig zurückfedert.

Die Steuerung der Universalprüfmaschine wurde so eingestellt, dass sie bei einer Kraft von 90 kN verbleibt ohne zu entspannen. Das Beenden des Versuchs erfolgte manuell, wenn sich die Vorrichtung abgekühlt hatte. Zusammenfassend lassen sich alle Prüfbedingungen und -voraussetzungen in folgender Tabelle darstellen:

<b>Prüfkörper</b>	<b>Prüfreihe: 1; Prüfkörper 1</b>
Länge x Breite x Höhe	19,96mm x 19,95mm x 4,47mm
Faser-Last-Winkel	ca. 45°
Erwärmung	ca. 10 min bei 100°C
<b>Stauchvorrichtung</b>	
Erwärmung	ca. 45 min bei 100°C
Bemerkung	ohne verschraubte Grundplatte
<b>Prüfmaschine</b>	
Teststart	100 N Anfangsbelastung
Maximalkraft	90 kN
Druckgeschwindigkeit	5 mm/min
Abbruch	manuell, nach Abkühlen der Stauchvorrichtung
Prüfzeit	ca. 9 min

Bei der Prüfung ergab sich das Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abb. 4-1.

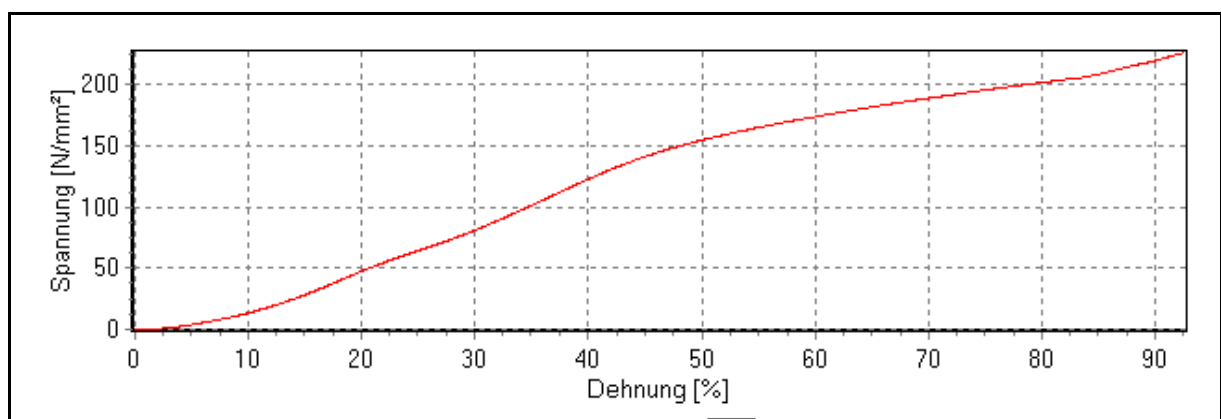


Abb. 4-1 - Spannungs-Dehnungs-Verlauf der Probe 1 aus Prüfreihe 1

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben zeigte sich bei dieser Probestauchung, dass sich der Probekörper bei der großen Kraft von bis zu 90 kN unter die Stauchvorrichtung gedrückt hatte. Dort konnte sich die Probe ausdehnen und drückte die Vorrichtung nach oben. Infolgedessen wurde die Stauchvorrichtung geändert und mit einer Grundplatte versehen.

Weiterhin konnte beobachtet werden, dass die Universalprüfmaschine einen maximalen Verfahrweg (Längenänderung) von 4,11mm angezeigt hat. Das bedeutet bei einer Probenhöhe von 4,47mm eine Dehnung von 92% (siehe Abb. 4-1). Diese Dehnung war unrealistisch, vielmehr konnte davon ausgegangen werden, dass sich bei hohen Kräften die Bauteile der Prüfmaschine verziehen und somit die Längenänderung beeinflussten. Um diesen Fehler zu umgehen, musste die Prüfmaschine bei gleichen Testbedingungen kalibriert werden.

#### 4.2 Kalibrierung der Prüfmaschine mit der Querdehnungsbegrenzung

Um den Fehler der Universalprüfmaschine bei der Längenänderung zu kompensieren, musste die Prüfmaschine kalibriert werden. Dafür wurde die Stauchvorrichtung ohne Prüfkörper bei 5 mm/min und einer Anfangskraft von 100 N bis zu einer Maximalkraft von 90 kN gedrückt. Es ergab sich daraus eine Position der Prüfmaschine in Abhängigkeit von der Kraft nach Abb. 4-2 (IST-Position).

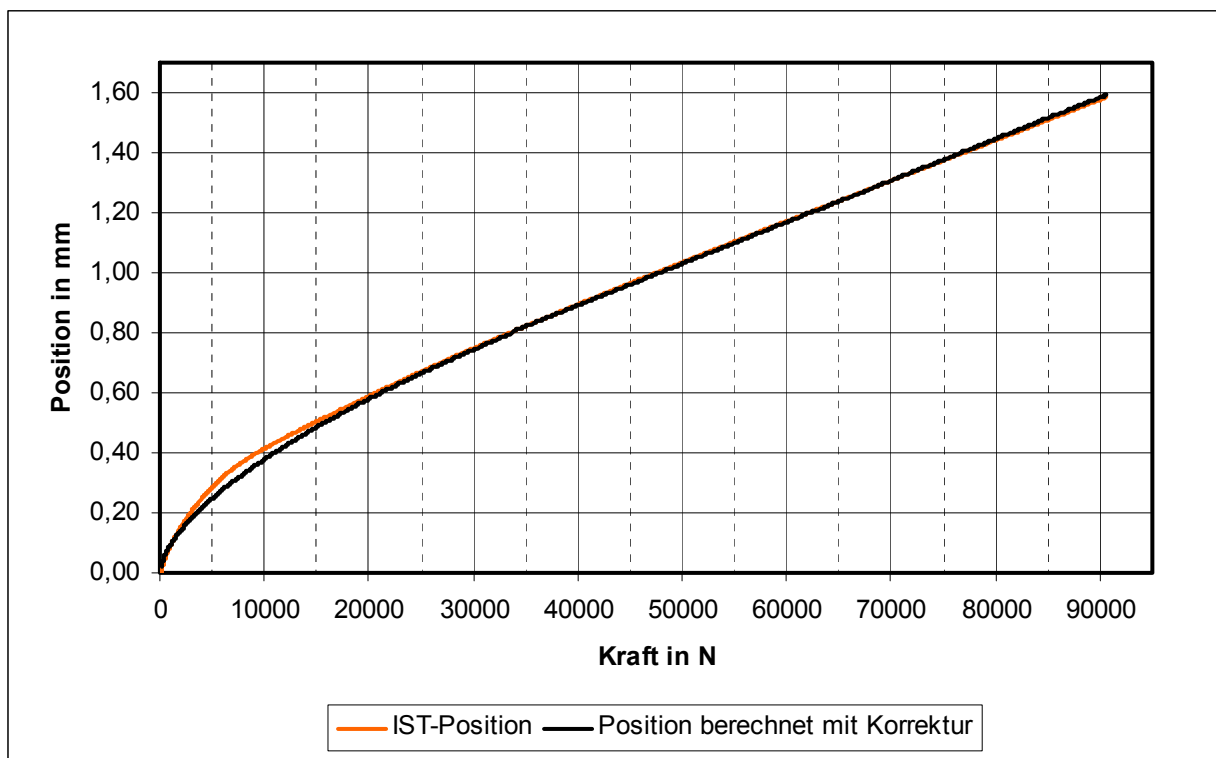


Abb. 4-2 - Position-Kraft-Verlauf der Kalibrierung der Stauchvorrichtung

Es wurde davon ausgegangen, dass diese Position den Fehler der Prüfmaschine darstellt. Jeder Kraft ist durch den Verlauf direkt eine Längenänderung zugeordnet, die bei den Prüfungen mit Probekörper abzuziehen ist, um eine reale Längenänderung zu erhalten. Dafür musste der Position-Kraft-Verlauf funktional beschrieben werden. Der Graph wurde in zwei Teile gesplittet und folgende Funktionen entwickelt:

- $F < 33.826,3 N$ :  $s = 0,013 \cdot \sqrt[1,624]{F}$  (Zahlen wurden durch Probieren ermittelt)
- $F \geq 33.826,3 N$ :  $s = 1,387 \cdot 10^{-5} \cdot F + 0,336$  (Zahlen wurden mittels der Geradengleichung  $s = m \cdot F + b$  und zwei Wertpaaren ermittelt)

- ~ F - Kraft
- ~ s - Position
- ~ m - Anstieg der Gerade
- ~ b - Abstand der Gerade

Der korrigierte Verlauf der Position in Abhängigkeit von der Kraft im Vergleich zum realen Verlauf ist in der Abb. 4-2 zu sehen. Es ist ersichtlich, dass die funktionale Beschreibung besonders bei Kräften über ca. 14 kN sehr genau ist, zwischen 4 und 14 kN weicht die Annäherung lediglich um bis zu 0,02mm ab.

In Abb. 4-3 ist exemplarisch das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Probe 1 der Versuchsreihe 1 (natives Holz mit einer Höhe von 4mm) dargestellt. Es wird der Unterschied der Verläufe mit und ohne die Korrektur aus der Kalibrierung deutlich. Der Graph mit den Echtdaten aus der Maschinenposition zeigt ein deutliche unrealistische Dehnung von nahezu 100%.

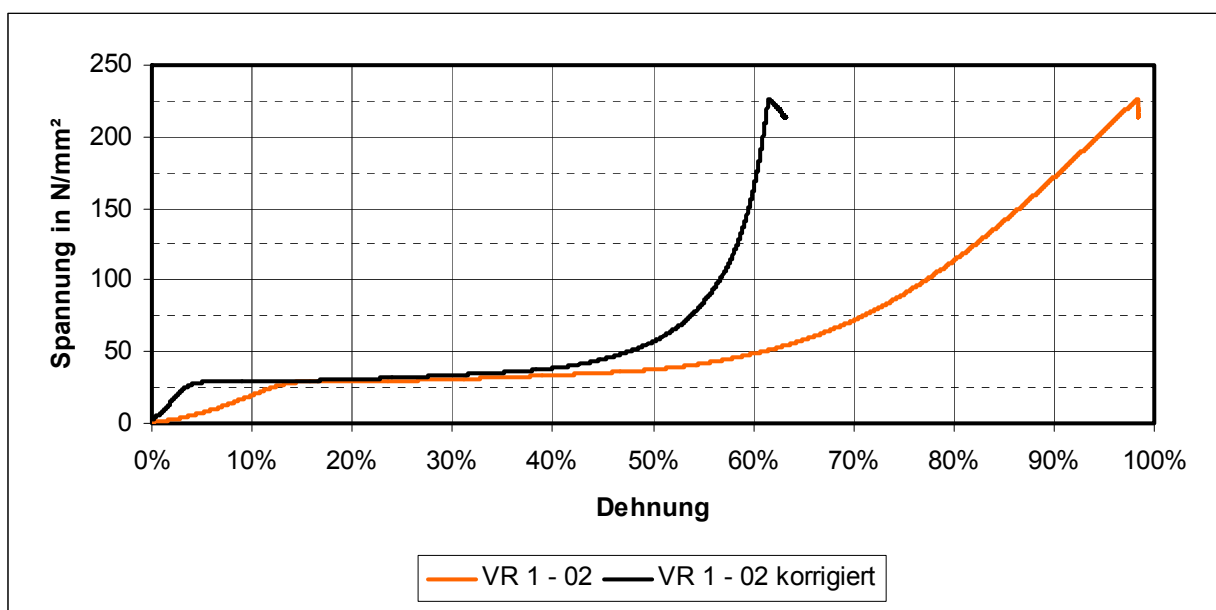


Abb. 4-3 - Gemessener und korrigierter Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Vergleich

### 4.3 Prüfung der Proben von 4mm Höhe mit Querdehnungsbegrenzung

Für die Prüfung der nativen und thermisch behandelten Proben mit 4mm Höhe (Versuchsreihen 1 und 2) wurde die Querdehnungsbegrenzung mit der Grundplatte verwendet. Der Versuch sollte in erwärmten Zustand erfolgen, um das Lignin im Holz zu erweichen. Der Druck sollte so lang aufrecht erhalten werden, bis sich die gesamte Prüfeinrichtung abgekühlt hatte, um ein Zurückfedern zu minimieren. Die Testbedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

<b>Prüfkörper</b>	
1. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 1
2. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 2
Abmaße	20mm x 20mm x 4mm
Faser-Last-Winkel	ca. 45°
Erwärmung	ca. 10 min bei 100°C
<b>Stauchvorrichtung</b>	
Erwärmung	ca. 45 min bei 100°C
<b>Prüfmaschine</b>	
Teststart	100 N Anfangsbelastung
Maximalkraft	90 kN
Druckgeschwindigkeit	5 mm/min
Abbruch	manuell, nach Abkühlen der Stauchvorrichtung
Prüfzeit	ca. 9 min

Bei den Messungen ergab sich der in Abb. 4-4 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Verlauf.

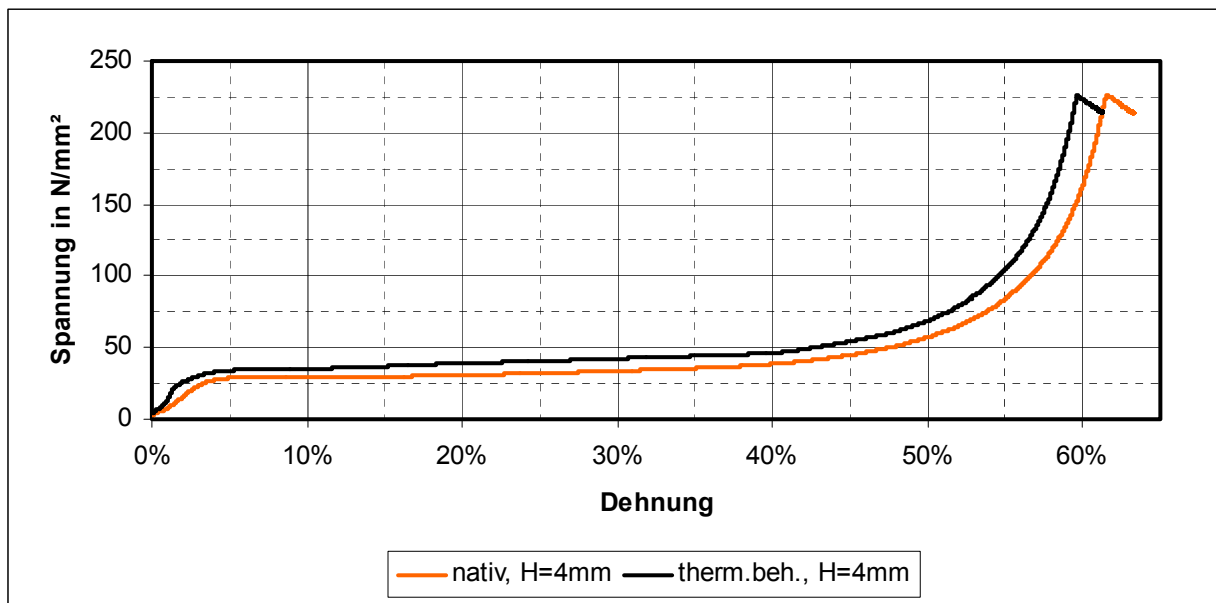


Abb. 4-4 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der nativen und thermisch modifizierten Proben der Höhe 4mm mit Querdehnungsbegrenzung

Beide Verläufe lassen sich anhand der Grafik in drei Phasen einteilen. In der ersten Phase verformte sich das Holz im elastischen Bereich bei zunehmenden Druck, die



Zellwände verspannten sich in sich selbst. In der zweiten Phase fing das Holz an zu fließen, d. h. dass sich bei annähernd konstanter Spannung die Dehnung deutlich erhöhte. Bei dieser Spannung klappten die Zellwände nach und nach ein, somit erhöhte sich die Dehnung. In der dritten Phase waren keine Zellhohlräume mehr vorhanden und es konnte mehr Spannung aufgebaut werden. Bei weiter zunehmender Spannung konnten sich die Zellen nicht weiter ausbreiten und fingen an zu kollabieren. Dieser Zellkollaps trat nach und nach in immer mehr Zellen auf, die Dehnung wuchs allmählich mit zunehmender Spannung.

Es stand für die Messung natives (Probe VR 1 - 02) und thermisch modifiziertes (Probe VR 2 - 01) Holz mit einer Höhe von jeweils 4mm zur Verfügung. Im Vergleich zeigte sich, dass sich die zweite Phase beim nativen sowie beim thermisch modifiziertem Holz bei einer Dehnung von 5% einstellte. Jedoch erreichte das thermisch behandelte Holz mit etwa 35-40 N/mm<sup>2</sup> eine höhere Spannung als das native Holz mit etwa 25-30 N/mm<sup>2</sup> in der zweiten Phase. Die dritte Phase begann beim nativen Holz genau wie beim thermisch behandeltem bei etwa 40% Dehnung, wobei beim thermisch behandeltem Holz die Spannung wieder ca. 10 N/mm<sup>2</sup> höher war. Bei maximaler Spannung von 225 N/mm<sup>2</sup> erreichte das native Holz eine Dehnung von 62%, das thermisch modifizierte Holz erzielte eine Dehnung bei maximaler Spannung von etwa 59%. An diesen Verläufen der Abb. 4-4 zeigt sich deutlich, dass das thermisch modifizierte Holz zwar fester war, und somit auch höhere Spannungen bei gleicher Dehnung aushalten konnte, das native Holz ist dem aber gegenüber zäher und weicher war, und somit eine höhere Dehnung bei gleicher Spannung erzielte.

Bei maximaler Spannung und Dehnung hatte das native Holz eine Dichte von 1.665 kg/m<sup>3</sup>, die thermisch modifizierte Probe lag bei etwa 1.323 kg/m<sup>3</sup>. Dieser Wert ist jedoch fehlerbehaftet. Es konnte nicht genau bestimmt werden, welches Volumen die Proben im gespannten Zustand einnahmen. Zum einen ist Material der Probe in den kleinen Spalt zwischen Druckstempel und Stauchvorrichtung geflossen. Zum anderen dehnte sich die Probe bei Druck geringfügig aus und zog sich bei Entlastung gemäß der Querkontraktion wieder zurück. Die ermittelten Dichten zeigen aber, dass sich das native Holz bei dem Druck von 90 kN bis etwa zur Reindichte (sie liegt für Holz bei durchschnittlich 1.600 kg/m<sup>3</sup>) verdichten ließ. Da das thermisch modifizierte Holz eine höhere Festigkeit hat, reichte dieser Druck nicht aus, um es bis zur Reindichte zu verdichten.

Bei diesen Versuchen zeigte sich an der Stauchvorrichtung, dass sich bei der hohen Last von etwa 90 kN die nur verschraubten Zwischenstücke durch die Querdehnung der Proben verschoben hatte (siehe Abb. 4-5).

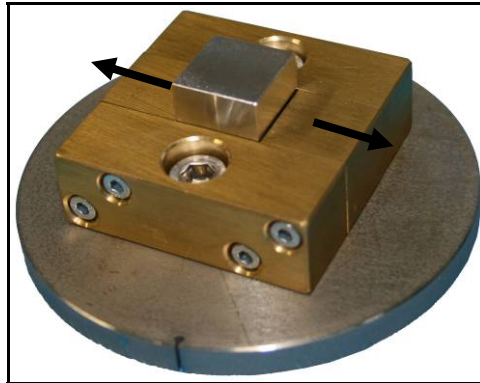
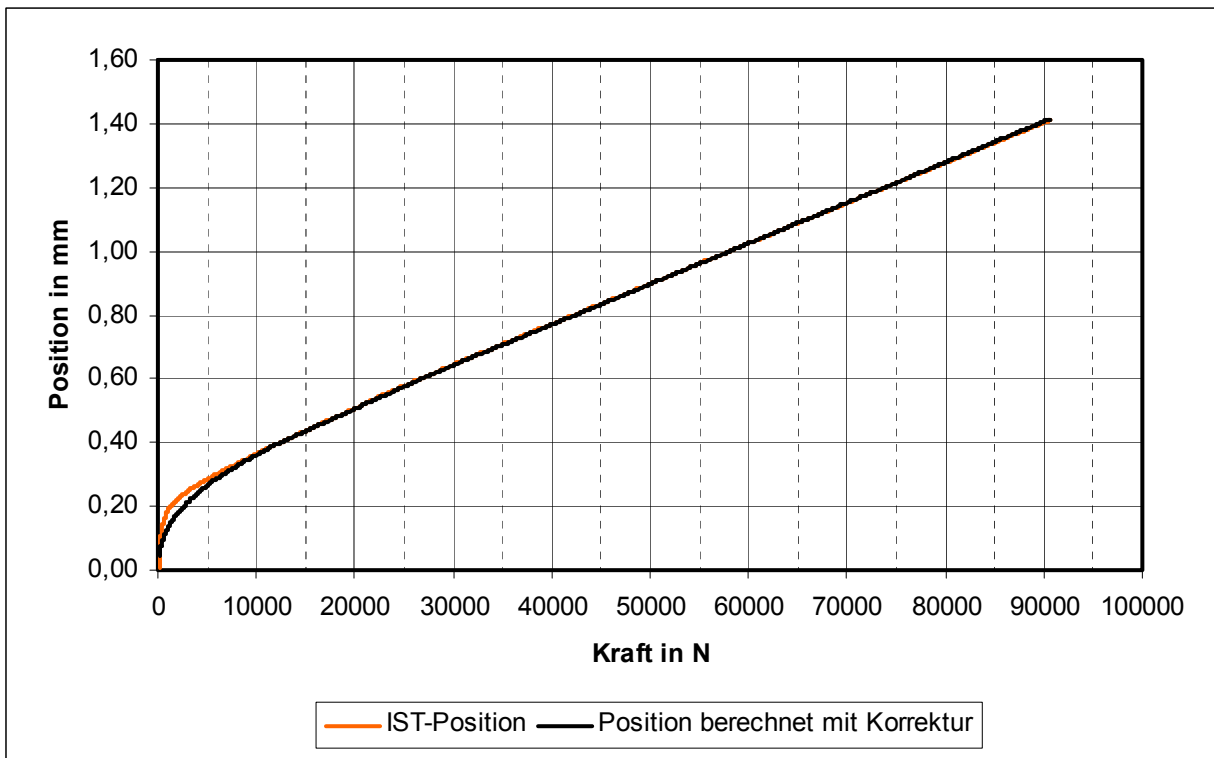


Abb. 4-5 - Fehler der Querdehnungsbegrenzung

Da sich durch diese Verschiebung der zu erwartende Fehler durch die erhöhte Querkontraktion zu groß würde, wurden die restlichen Proben aus nativen und thermisch modifizierten Holz der Höhe 4mm (Prüfreihe 1 und 2) nicht mehr im Rahmen dieser Belegarbeit getestet. Für weitere Prüfungen mit diesen Proben wurde eine neue Querdehnungsbegrenzung angefertigt, die nicht mehr zusammengesetzt ist und sich somit nicht auf diese Weise verziehen kann.

#### 4.4 Kalibrierung der Prüfmaschine mit den Druckplatten

Für weitere Untersuchungen standen die Proben aus nativem und thermisch modifiziertem Holz mit unterschiedlichen Höhen von 20mm, 10mm sowie 4mm (Prüfreihe 3 bis 8) zur Verfügung. Diese Proben sollten verdichtet werden um ihr Verhalten vergleichend zu untersuchen. Die Querkontraktion sollte dabei nicht begrenzt werden. Es erfolgte nur der Einsatz von ebenen und saubereren Druckplatten, die zwischen der Probe und den Drucktellern der Prüfmaschine gelegt wurden. Um auch hier den Fehler der Universalprüfmaschine TIRATest 28100 bei der Längenänderung zu kompensieren, musste sie unter der neuen Bedingung erneut kalibriert werden. Dafür wurden die Druckplatten ohne Prüfkörper bei 5 mm/min und einer Anfangskraft von 100 N bis zu einer Maximalkraft von 90 kN gedrückt. Es ergab sich daraus eine Position der Prüfmaschine in Abhängigkeit von der Kraft nach der Abb. 4-6 (IST-Position).



**Abb. 4-6 - Position-Kraft-Verlauf der Kalibrierung der Stauchplatten**

Diese Position stellt den Fehler der Prüfmaschine bei den gegebenen Bedingungen dar. Jeder Kraft ist durch den Verlauf direkt eine Längenänderung zugeordnet, die bei den Prüfungen mit den Probekörpern abziehen war, um eine reale Längenänderung zu erhalten. Dafür musste der Position-Kraft-Verlauf funktional beschrieben werden. Der Graph wurde in drei Teile gesplittet und folgende Funktionen entwickelt:

- $F < 11.480,7 N$ :  $s = 0,006 \cdot \sqrt[2,25]{F}$  (Zahlen wurden durch Versuchen ermittelt)
- $11.480,7 N \leq F < 27.275,90 N$ :  $s = 1,403 \cdot 10^{-5} \cdot F + 0,225$  (Zahlen wurden mittels der Geradengleichung  $s = m \cdot F + b$  und zwei Wertpaaren ermittelt)
- $F \geq 27.275,90 N$ :  $s = 1,274 \cdot 10^{-5} \cdot F + 0,260$  (Zahlen wurden mittels der Geradengleichung  $s = m \cdot F + b$  und zwei Wertpaaren ermittelt)

- ~ F - Kraft
- ~ s - Position
- ~ m - Anstieg der Gerade
- ~ b - Abstand der Gerade

Der korrigierte Verlauf der Position in Abhängigkeit von der Kraft im Vergleich zum realen Verlauf ist in der Abb. 4-6 zu sehen. Es ist ersichtlich, dass die funktionale Beschreibung besonders bei Kräften über ca. 5 kN sehr genau ist, zwischen 0,5 und 5 kN weicht die Annäherung lediglich bis zu 0,03mm ab.

#### 4.5 Prüfung der Proben mit 20mm Höhe

Für die Prüfung stand natives Holz (Versuchsreihe 3) und thermisch modifiziertes Holz (Versuchsreihe 4) mit einer Höhe von jeweils 20mm zur Verfügung. Die Proben sollten zunächst bis zum Bruch gedrückt und anschließend aus jeder Versuchsreihe eine Probe mit einer Kraft von 90 kN verdichten werden. Die Testbedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Prüfkörper	
1. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 3
2. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 3
3. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 4
4. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 4
5. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 3 aus 1. Messung
6. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 4 aus 4. Messung
Länge x Breite x Höhe	20mm x 20mm x 20mm
Faser-Last-Winkel	ca. 45°
Prüfmaschine	
Teststart	100 N Anfangsbelastung
Maximalkraft	90 kN (nur bei Messungen 5 und 6 erreicht)
Druckgeschwindigkeit	5 mm/min
Abbruch	manuell
Prüfzeit	Messungen 1, 2, 3, 4: ca. 1 min Messungen 5, 6: ca. 3 min

Bei den Messungen ergab sich der in Abb. 4-7 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Verlauf.

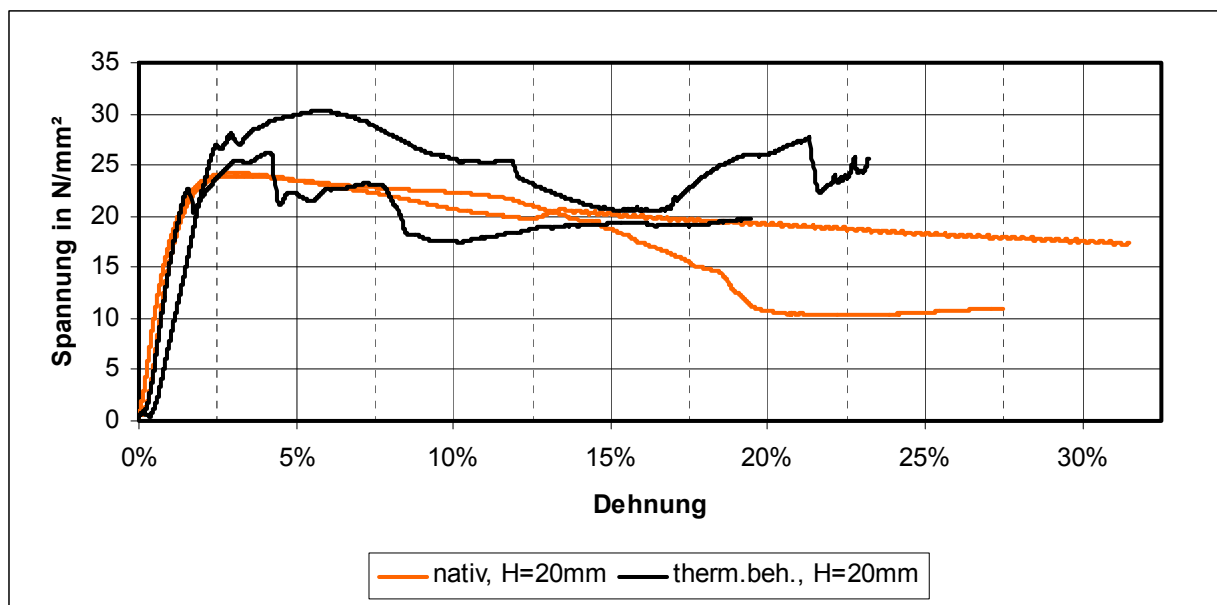


Abb. 4-7 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben aus nativem und thermisch modifiziertem Ahorn der Höhe 20mm (Versuchsreihen 3 und 4)

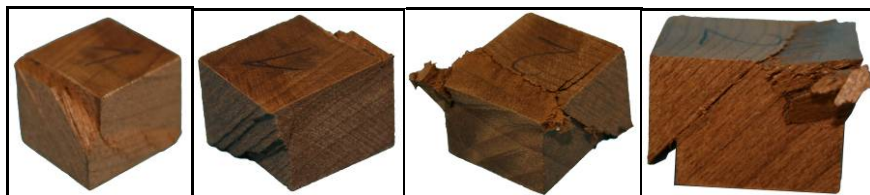
Die Verläufe zeigen, dass sich das thermisch modifizierte Holz bei der Druckbeanspruchung fester verhielt. Die maximale Spannung war bei beiden Proben des ther-

misch behandelten Holzes mit 30 und 26 N/mm<sup>2</sup> höher als bei den Proben aus nativem Holz mit 24 N/mm<sup>2</sup>. Gleichzeitig zeigte sich aber auch, dass sich das thermisch behandelte Holz spröder verhielt, die Verläufe knicken bei zunehmender Kraft mehrfach schlagartig ein, an diesen Stellen ist das Holz jedes mal durch Druck gebrochen. Die ungleichen Verläufe der Proben aus thermisch behandeltem Holz zeigen die starke Strukturabhängigkeit des relativ spröden Materials. Das native Holz verhielt sich weicher und zäher als das thermisch behandelte. Das ist daran zu erkennen, dass die Spannung nach Erreichen des Maximalwertes bei zunehmender Dehnung allmählich und gleichmäßig zurückging. Es sind keine schlagartigen Einbrüche zu erkennen, lediglich bei einer Probe ist der Druckbruch bei der Spannung von 15 N/mm<sup>2</sup> und der Dehnung von etwa 17% deutlich zu erkennen.

Die Aufnahmen der nativen sowie thermisch modifizierten Proben (Versuchsreihen 3 und 4) auf der Abb. 4-8 und Abb. 4-9 zeigen auch deutlich das weichere und zähere Verhalten des nativen Holzes.



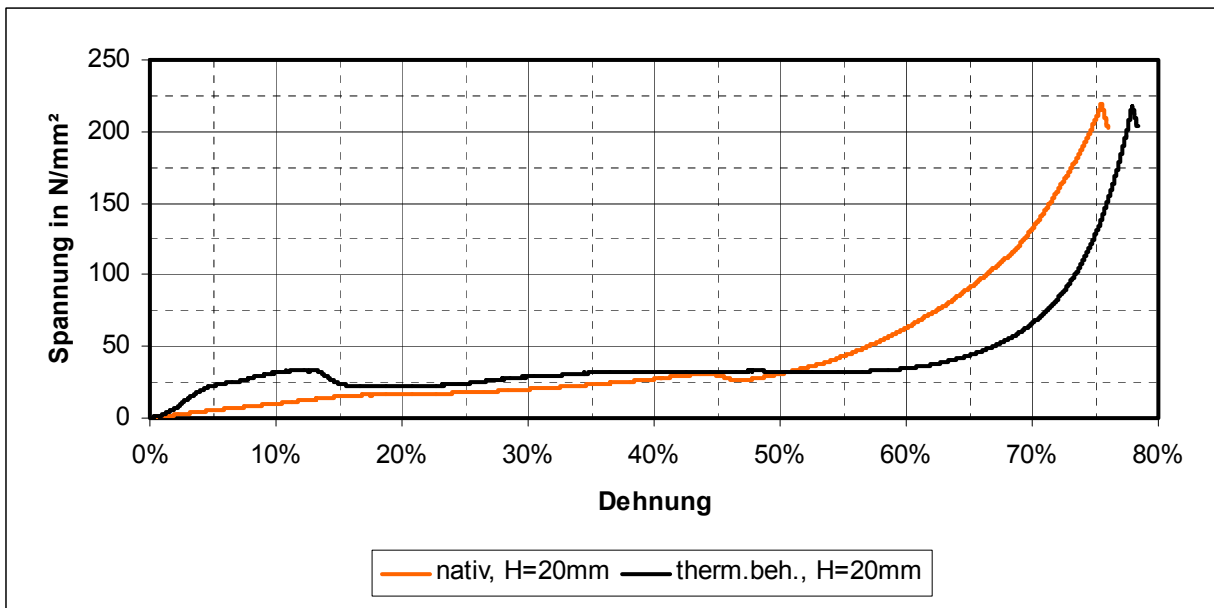
**Abb. 4-8 - Native Proben der Höhe 20mm (Prüfreihe 3) nach der Messung**



**Abb. 4-9 - Thermisch modifizierte Proben der Höhe 20mm (Prüfreihe 4) nach der Messung**

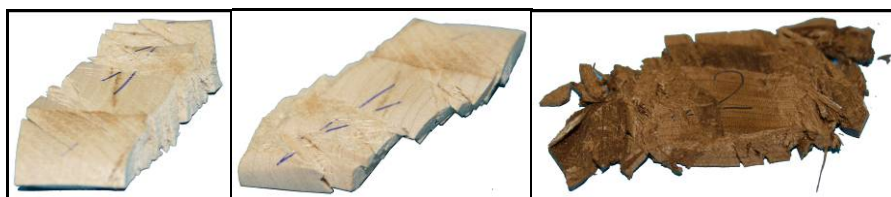
Deutlich ist auf diesen Bildern, dass sich das native Holz zuerst in sich verdreht hat und dann bei weiter zunehmender Spannung in radialer Richtung gebrochen ist. Das thermisch modifizierte Holz hingegen verdreht sich nicht, sondern brach sofort in Faserrichtung durch Abgleiten der Fasern gegeneinander.

In einem weiteren Schritt sollte jeweils eine native und thermisch modifizierte Probe mit einer maximalen Kraft von 90 kN gestaucht werden. Diese Messung wurde mit der Probe 1 der Versuchsreihe 3 (natives Holz) und der Probe 2 der Versuchsreihe 4 (thermisch modifiziertes Holz) durchgeführt. Es ergab sich der Spannungs-Dehnungs-Verlauf in Abb. 4-10.



**Abb. 4-10 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der nativen und thermisch modifizierten Probe bei maximaler Kraftbeanspruchung**

An diesen Verläufen sind wieder die drei Phasen zu erkennen, die in Kapitel 4.3 bereits beschrieben wurden. Zuerst wurden die Proben bis zu einer Spannung von 23 N/mm<sup>2</sup> beim nativen Holz und 25 N/mm<sup>2</sup> beim thermisch behandeltem Holz elastisch gedehnt, hier ist die höhere Festigkeit des thermisch behandeltem Holz ersichtlich. In der zweiten Phase flossen die Proben bei konstanter Spannung bis zu einer Dehnung von 50% bei nativem Holz und 60% bei der thermisch modifizierten Probe. In der letzten Phase kollabierten die Zellen bis zu einer Dehnung bei maximaler Spannung von 75% bei nativem Holz und 78% bei dem thermisch behandeltem Holz. Dadurch, dass die Querdehnung bei diesen Versuchen nicht begrenzt wurde, dehnte sich das thermisch behandelte Holz weiter. Aufgrund seiner Sprödhheit brach die Probe in viele kleine Teile und konnte sich dadurch weiter ausbreiten und somit die Druckstempel weiter zusammenfahren. Die native Holzproben hielten aufgrund ihrer Zähigkeit und Weichheit auch bei maximaler Spannung noch zusammen, das Holz nahm einen kleineren Querschnitt ein. Somit ergibt sich die geringere maximale Dehnung bei gleicher Spannung. Die Aufnahmen in der Abb. 4-11 der Proben nach dem Druck von 90 kN verdeutlichen die größere Sprödhheit des thermisch modifiziertem Holzes (rechtes Bild).



**Abb. 4-11 - Native Proben (links, mitte) und thermisch behandelte Proben (rechts) der Höhe 20mm (Prüfreihe 3 und 4) nach der Maximalkraftbeanspruchung**

#### 4.6 Prüfung der Proben mit 10mm Höhe

Für die Prüfung standen Proben aus nativem sowie thermisch modifiziertem Holz mit einer Höhe von 10mm (Versuchsreihen 5 und 6) zur Verfügung. Die Proben sollten zunächst bis zum Bruch gedrückt und anschließend aus jeder Versuchsreihe eine Probe mit einer Kraft von 90 kN verdichten werden. Die Testbedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

<b>Prüfkörper</b>	
1. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 5
2. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 5
3. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 6
4. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 6
5. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 5 aus 1. Messung
6. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 6 aus 3. Messung
Abmaße	20mm x 20mm x 10mm
Faser-Last-Winkel	ca. 45°
<b>Prüfmaschine</b>	
Teststart	100 N Anfangsbelastung
Maximalkraft	90 kN (nur bei Messungen 5 und 6 erreicht)
Druckgeschwindigkeit	5 mm/min
Abbruch	manuell
Prüfzeit	Messungen 1, 2, 3, 4: ca. 1 min Messungen 5, 6: ca. 3 min

Bei den Messungen ergab sich der in Abb. 4-12 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Verlauf.

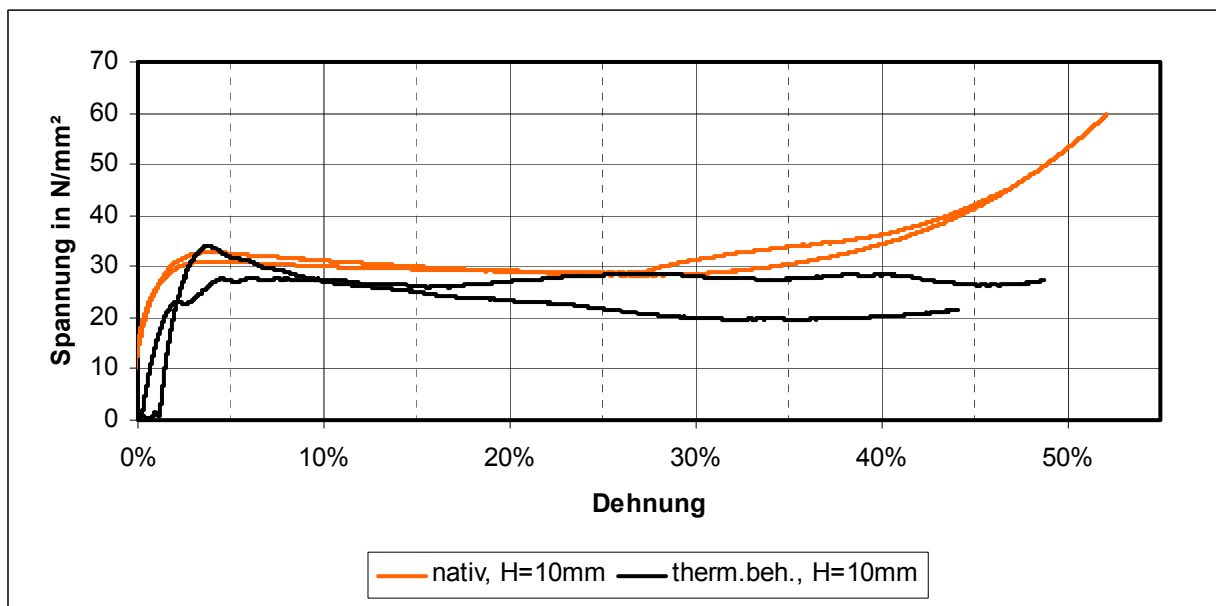


Abb. 4-12 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Versuchsreihen 5 und 6

Dem Verlauf ist zu entnehmen, dass sich das native Holz gegenüber dem thermisch modifizierten Holz gleichmäßiger verhielt. Es sind wieder drei Phasen im Verlauf zu erkennen. Die Proben verformten sich elastisch bis zu einer Spannung von 32 N/mm<sup>2</sup> und hielten diese Spannung während der zweiten Phase des Fließens bis zu einer Dehnung von 30% in etwa konstant. Dann kollabierten die Zellen, das Holz verfestigte sich weiter. Das thermisch behandelte Holz verhielt sich nicht so gleichmäßig. In den Verläufen der thermisch behandelten Proben sind zum Teil nicht unerhebliche Abweichungen untereinander zu verzeichnen. Die maximale Spannung war im Allgemeinen kleiner als beim nativen Holz. Die einzelnen Phasen, besonders die zweite Phase, waren nicht so ausgeprägt wie beim nativen Holz. In den Verläufen sind schlagartige Spannungsabfälle zu beobachten. Hier ist das Holz aufgrund der größeren Sprödhheit gebrochen. Aus diesem Grund ist auch die Spannung kleiner, das Holz brach leichter, splitterte auseinander und nimmt somit eine größere Grundfläche ein. Das native Holz konnte aufgrund der kleineren Höhe von 10mm gegenüber der Versuchsreihe 3 mit einer Höhe von 20mm nicht so gut brechen und verfestigt sich daher besser. Die Form nach der Druckbeanspruchung war nur noch leicht gegenüber der Ursprungsform verschoben. Die Proben nach der Stauchung des nativen Holzes sind auf der Abb. 4-13 und die Proben des thermisch modifizierten Holzes auf der Abb. 4-14 zu sehen.



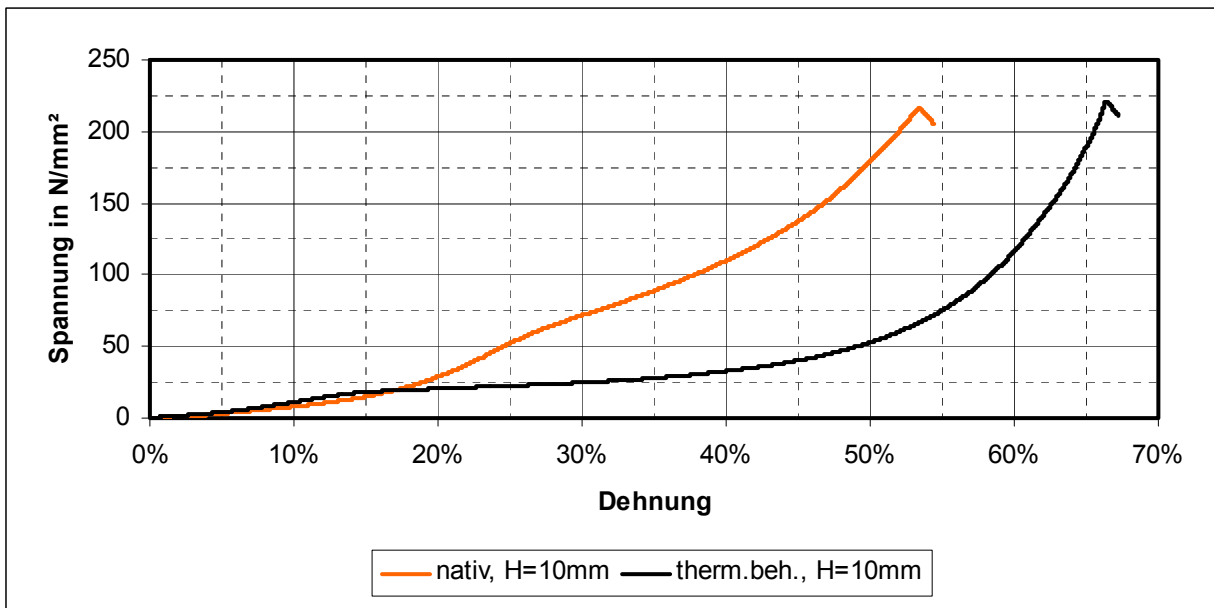
**Abb. 4-13 - Native Proben der Höhe 10mm (Prüfreihe 5) nach der Messung**



**Abb. 4-14 - Thermisch behandelte Proben der Höhe 10mm (Prüfreihe 6) nach der Messung**

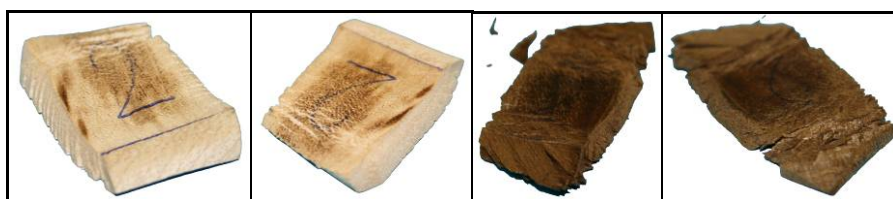
In einem weiteren Schritt sollte eine Probe aus nativem Holz und eine aus thermisch behandelten Holz mit der maximalen Kraft von 90 kN gestaucht werden. Diese Messung wurde mit der Probe 1 der Versuchsreihe 5 und der Probe 1 der Versuchsreihe 6 durchgeführt. Es ergab sich der Spannungs-Dehnungs-Verlauf in Abb. 4-15.





**Abb. 4-15 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm des nativen und thermisch behandelten Holzes bei maximaler Kraftbeanspruchung**

An diesen Verläufen sind zumindest beim thermisch modifiziertem Holz wieder die drei Phasen zu erkennen, die in Kapitel 4.3 bereits beschrieben wurden. Zuerst wurden die Probe bis zu einer Spannung von 23 N/mm<sup>2</sup> elastisch gedehnt. In der zweiten Phase floss die thermisch behandelte Probe bei konstanter Spannung bis zu einer Dehnung von ca. 35%. In der letzten Phase kollabierten die Zellen bis zu einer Dehnung bei maximaler Spannung von 67%. Bei der Probe aus nativem Holz gehen die Phasen entweder langsam ineinander über oder die Probe wurde durch die Vorbeanspruchung bereits so weit gestaucht, dass die ersten beiden Phasen schon abgeschlossen waren. Die Dehnung bei maximaler Spannung lag beim nativen Holz bei etwa 53%. Dadurch, dass die Querdehnung bei diesen Versuchen nicht begrenzt wurde, dehnte sich das thermisch behandelte Holz weiter. Aufgrund seiner Sprödhheit brach die Probe in viele kleine Teile, sie konnte sich dadurch weiter ausbreiten und die Druckstempel konnten weiter zusammenfahren. Die native Holzprobe hielt aufgrund ihrer Zähigkeit und Weichheit auch bei maximaler Spannung noch zusammen, das Holz nahm einen kleineren Querschnitt ein. Somit ergibt sich die geringere maximale Dehnung. Die Aufnahmen in der Abb. 4-16 der Proben nach dem Druck von 90 kN verdeutlichen die größere Sprödhheit des thermisch modifiziertem Holzes.



**Abb. 4-16 - Native Proben (1. und 2. von links) und thermisch behandelte Proben (1. und 2. von rechts) der Höhe 10mm nach der Maximalkraftbelastung**

#### 4.7 Prüfung der Proben mit 4mm Höhe ohne Querdehnungsbegrenzung

Für die Prüfung der standen Proben aus nativem sowie thermisch modifiziertem Holz mit einer Höhe von 4mm (Versuchsreihen 7 und 8) zur Verfügung. Die Proben sollten mit einer Kraft von 90 kN verdichten werden. Die Testbedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Prüfkörper	
1. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 7
2. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 7
3. Messung	Probe 3 der Prüfreihe 7
4. Messung	Probe 1 der Prüfreihe 8
5. Messung	Probe 2 der Prüfreihe 8
6. Messung	Probe 3 der Prüfreihe 8
Abmaße	20mm x 20mm x 4mm
Faser-Last-Winkel	ca. 45°
Prüfmaschine	
Teststart	100 N Anfangsbelastung
Maximalkraft	90 kN
Druckgeschwindigkeit	5 mm/min
Abbruch	manuell
Prüfzeit	ca. 3 min

Bei den Messungen ergab sich der in dargestellte Spannungs-Dehnungs-Verlauf.

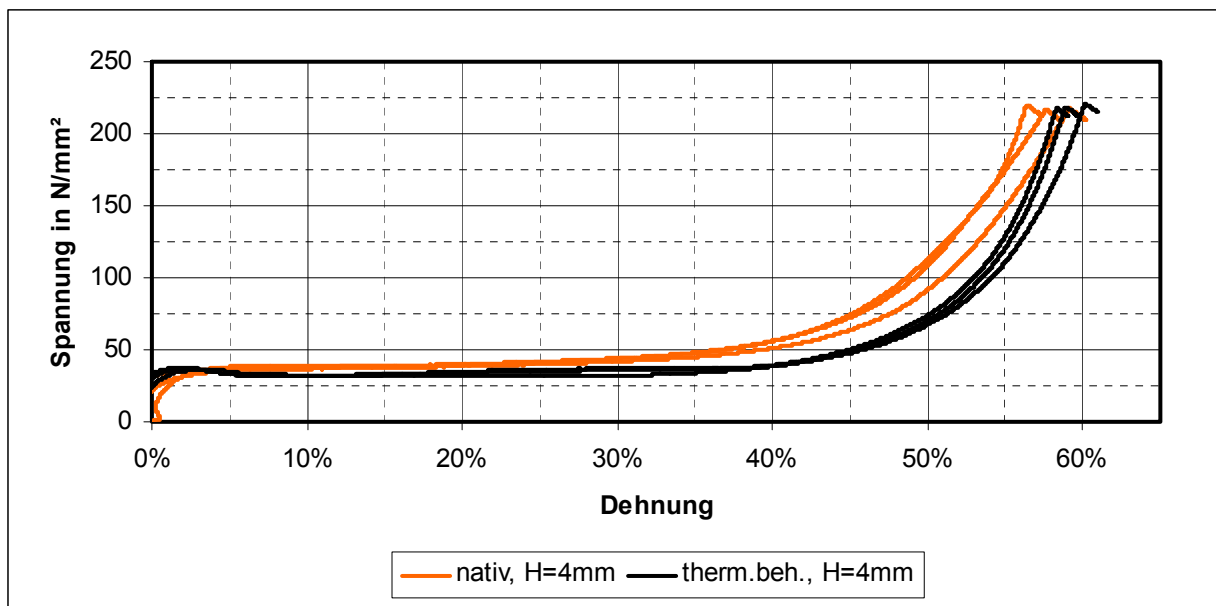


Abb. 4-17 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben mit 4mm Höhe

Den Spannungs-Dehnungs-Verläufen der Proben mit der Höhe von 4mm zeigen deutlich die drei Phasen, die im Kapitel 4.3 beschrieben wurden. Die erste Phase der elastischen Verformung war beim nativem sowie thermisch modifiziertem Holz bei einer Dehnung von etwa 5% abgeschlossen. Auffällig bei allen thermisch behandel-

ten Proben war, dass die Spannung zunächst auf etwa 35 N/mm<sup>2</sup> bei einer Dehnung von 2% anstieg und dann sich während der zweiten Phase auf 30 N/mm<sup>2</sup> bei einer Spannung von 40 N/mm<sup>2</sup> einstellte. Der Grund dafür kann in der größeren Sprödheit des thermisch behandelten Holzes gesehen werden. Das Holz hatte eine größere Festigkeit, somit konnte sich schnell eine relativ hohe Spannung aufbauen. Aufgrund der Sprödheit fing es aber im Randbereich an zu splintern, dadurch sank die Spannung wieder leicht. Die zweite Phase des Fließens beim nativen Holz hielt sich bis zu einer Dehnung von etwa 30%. In der dritten Phase kollabierten die Zellen nun nacheinander und die Dehnung erhöhte sich allmählich bei wachsender Spannung. Dabei war die Dehnung beim nativen Holz im Gegensatz zum thermisch modifiziertem Holz im Allgemeinen kleiner. Das thermisch behandelte Holz splitterte aufgrund seiner Sprödheit im Randbereich auseinander und nahm somit eine größere Grundfläche ein. Somit führen die Druckteller weiter zusammen und es ergab sich eine höhere Spannung. Das native Holz hingegen verhielt sich weicher und nahm bei kleinerer Grundfläche und gleicher Kraft somit eine höhere Spannung bei gleicher Dehnung ein. In der Abb. 4-18 sind die Proben des nativen Holzes und in der Abb. 4-19 die Proben des thermisch behandelten Holzes nach der Prüfung dargestellt. Anhand der größeren Splitterung ist zu erkennen, dass sich das thermisch behandelte Holz spröder verhält, als das native Holz. Die nativen Proben hingegen waren leicht verformt, aber nicht gesplittert oder gebrochen.



**Abb. 4-18 - Native Proben mit der Höhe 4mm nach der Maximalkraftbelastung**



**Abb. 4-19 - Thermisch behandelte Proben mit der Höhe 4mm nach der Maximalkraftbelastung**

## 5 Vergleich des Verhaltens bei unterschiedlichen Geometrien

### 5.1 Verhalten von nativem Ahorn im Vergleich

Die Abb. 5-1 zeigt den Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Verläufe von nativem Ahorn-Proben mit unterschiedlicher Probenhöhe.

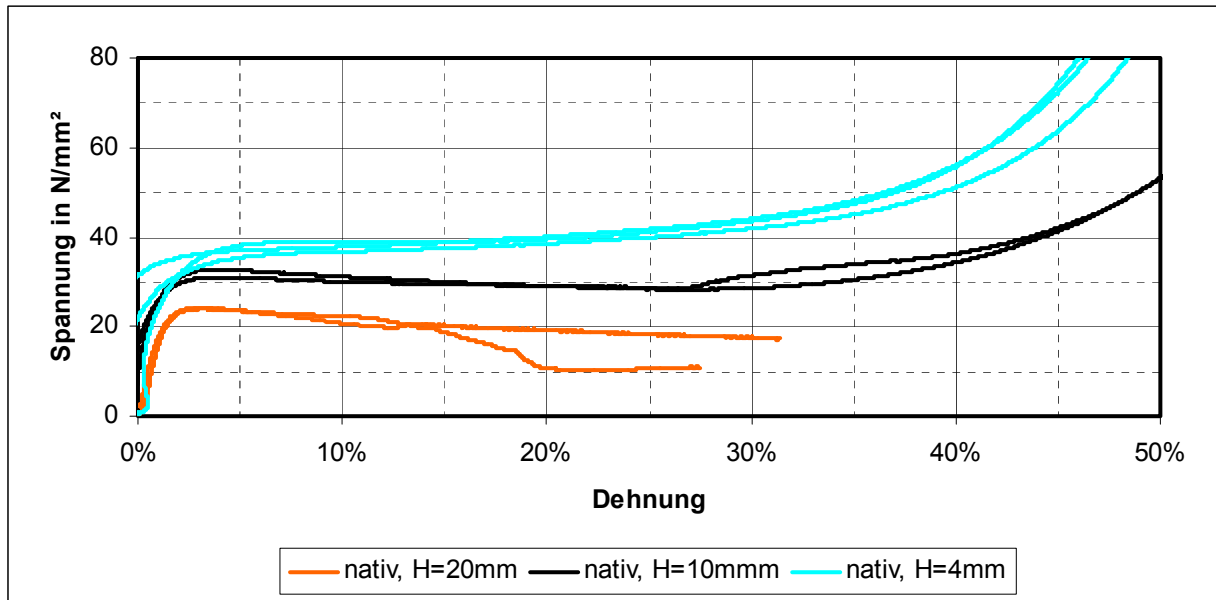
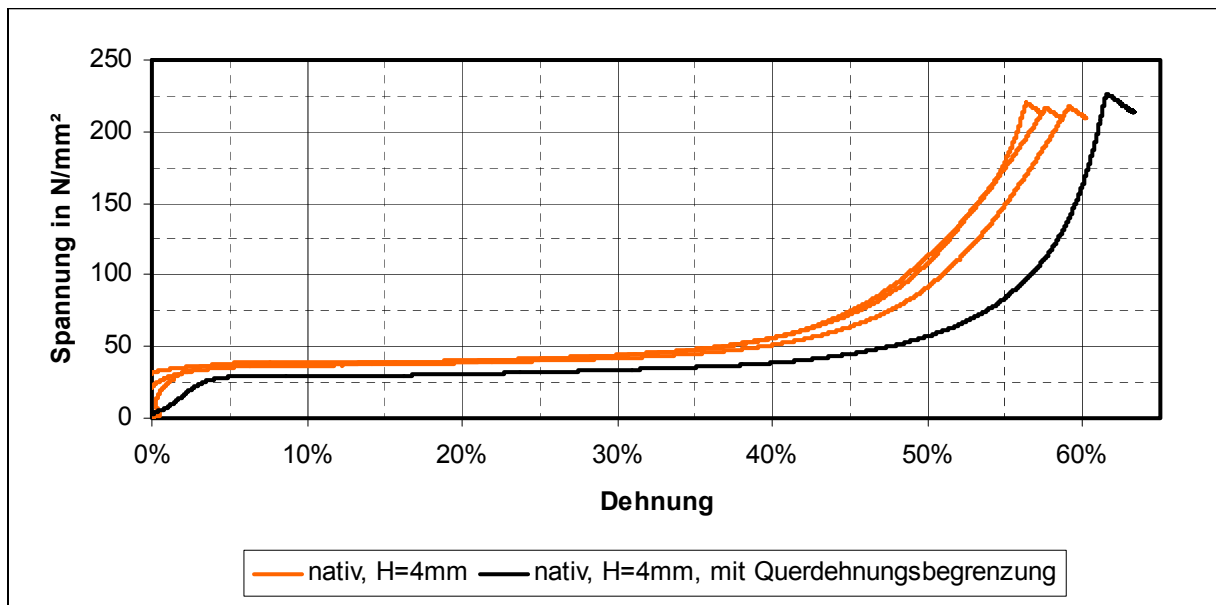


Abb. 5-1 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von nativem Ahorn mit den Höhen 20, 10, und 4mm

Klar zu erkennen ist, dass sich bei zunehmender Probenhöhe die Spannung bei gleicher Dehnung verringerte. Das lag daran, dass die größeren Proben besser gebrochen sind und somit schneller an Festigkeit verloren. Die Fasern konnten besser gegeneinander abgleiten. Außerdem konnten die größeren Proben aufgrund ihrer Höhe besser unter der Last wegkippen, somit erhöhte sich die Grundfläche und bei gleicher Kraft ergab sich somit eine geringere Spannung.

Eine weitere Randbedingung war der Einsatz der Querdehnungsbegrenzung mit Erwärmung, in Abb. 5-2 ist der Spannungs-Dehnungs-Verlauf von Proben mit einer Höhe von 4mm mit und ohne Querdehnungsbegrenzung gezeigt. Es ergab sich ein deutlicher Unterschied im Verlauf. Die erste Phase der elastischen Verformung dauerte bei beiden Proben bis zu einer Dehnung von etwa 5%. Jedoch war die erzielte Spannung bei der Probe mit Querdehnungsbegrenzung mit 30 N/mm² etwa 5 N/mm² kleiner als bei der anderen Probe. Ursache dafür kann die erhöhte Temperatur sein, denn mit höherer Temperatur sinkt die Festigkeit. Die zweite Phase des Fließens, in der die gespannten Zellwände nach und nach zusammenklappten, hielt bei beiden Proben bis zu einer Dehnung von 30%. Dann begannen die Zellen nach und nach zu kollabieren, die Spannung konnte sich weiter erhöhen. Die Dehnung bei der maximalen Spannung von etwa 225 N/mm² betrug bei den Proben ohne Querdehnungsbe-

grenzung zwischen 56 und 59%. Die Probe in der Stauchvorrichtung dehnte sich im Vergleich dazu mehr, bis zu einem Wert von etwa 62%. Die Ursache dafür kann in der vorherigen kurzen Erwärmung der Probe auf ca. 100°C gesehen werden. Dadurch erweichte sich das Lignin im Holz und die Fasern konnten besser gegeneinander abgleiten, es ergab sich eine höhere Dehnung bei gleicher Spannung.



**Abb. 5-2 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von nativem Holz der Höhe 4mm mit und ohne Querdehnungsbegrenzung**

Die Stauchvorrichtung als Querdehnungsbegrenzung hatte nur einen geringen Einfluss auf den Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Verläufe zwischen den Proben. Aufgrund der geringen Höhe von 4mm dehnten sich zwar die Randzonen der Proben ohne Begrenzung zur Seite weg, die Festigkeit in der Mitte der Proben war dennoch ohne großen Einfluss einer Querdehnung.

## 5.2 Verhalten von thermisch modifiziertem Ahorn im Vergleich

Die Abb. 5-3 zeigt den Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Verläufe von thermisch behandeltem Ahorn-Proben mit unterschiedlicher Probenhöhe.

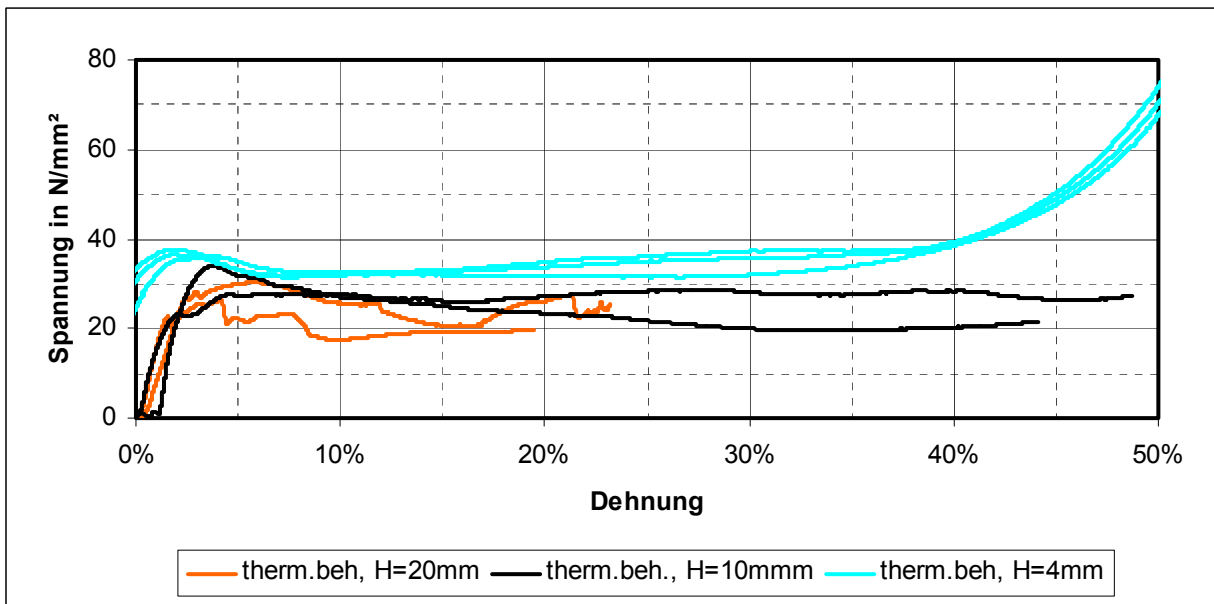


Abb. 5-3 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von thermisch modifiziertem Ahorn mit den Höhen 20, 10, und 4mm

Ein Unterschied zwischen der Probenhöhe von 20 und 10mm ist nicht klar zu erkennen. Auffällig am unregelmäßigen Verlauf mit plötzlichen Spannungseinbrüchen ist nur, dass die Proben mit 20mm Höhe mehr Potenzial hatten zu brechen. Die Fasern hatten mehr Platz gegeneinander abzugleiten. Dennoch konnten die Proben mit 10mm Höhe aufgrund ihrer Sprödhheit auch relativ gut brechen und zersplittern. Die Proben der Höhe von 4mm hingegen konnten nicht oder nur etwas brechen. Somit erzielten sie eine höhere Spannung in der zweiten Phase des Fließens von 30 - 35 N/mm<sup>2</sup>. Auch ist ihr Verlauf im Allgemeinen gleichmäßiger.

Die Abb. 5-4 zeigt den Vergleich des Einsatzes der Stauchvorrichtung mit Erwärmung und die Stauchung ohne Querdehnungsbegrenzung.

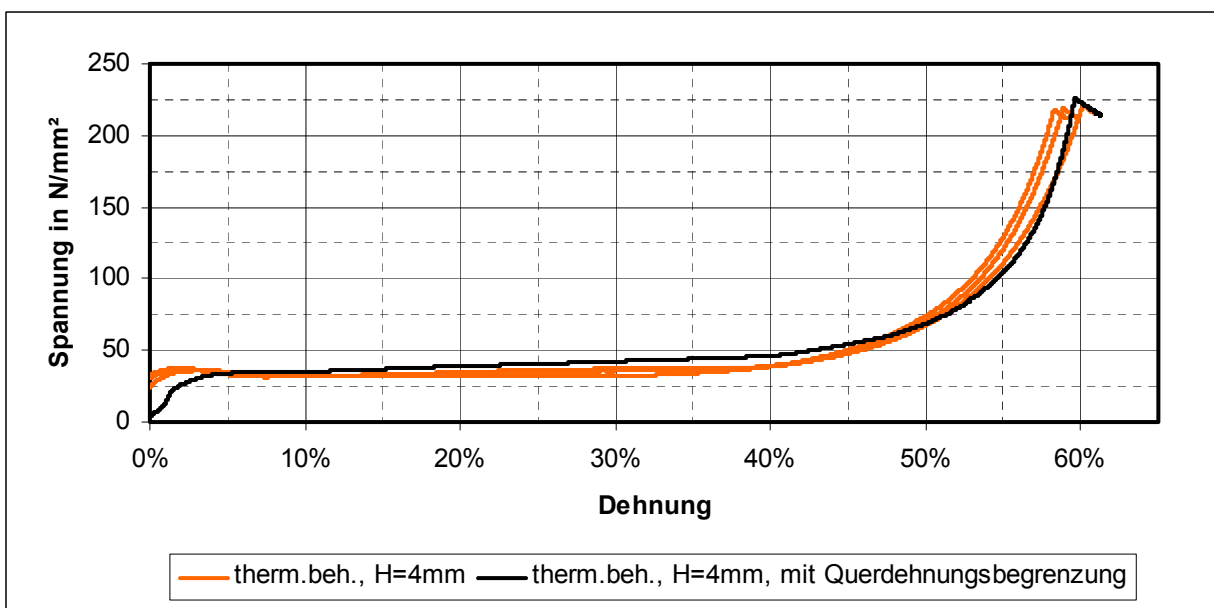


Abb. 5-4 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von nativem Holz der Höhe 4mm mit und ohne Querdehnungsbegrenzung

Die Verläufe beim thermisch modifiziertem Holz hatten sich nahezu angeglichen. Die Spannung in der zweiten Phase des Fließens betrug bei den Proben mit und ohne Querdehnungsbegrenzung gleichermaßen etwa 35 - 40 N/mm<sup>2</sup>. Auch die Dehnung bei Maximalspannung war mit 58-59% in dem selben Bereich. An den sehr ähnlichen Verläufen ist zu erkennen, dass zum einen die Querdehnungsbegrenzung bei der geringen Höhe von 4mm keinen großen Einfluss hatte. Zum anderen übte aber auch die Temperaturerhöhung bei dem thermisch modifiziertem Holz keinen Einfluss aus. Da die thermische Modifizierung bei Temperaturen von 170-230°C<sup>5</sup> vollzogen wird, führte die Temperaturerhöhung von bis zu 100°C vor Testbeginn zu keinen Änderungen im Verhalten bei der Stauchung.

---

<sup>5</sup> <http://www.thermoholz-deutschland.de/html/verfahren.html>

## 6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit sollte der Einfluss der Probengeometrie auf die mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Dabei standen Proben mit unterschiedlichen Höhen von 20, 10 sowie 4mm aus nativem sowie thermisch modifiziertem Ahorn zur Verfügung. Es konnte insgesamt beobachtet werden, dass Proben mit geringerer Größe eine höhere Spannung aufnehmen können. Bei den Proben mit den Höhen von 20 aber auch 10mm haben die Fasern mehr Raum, gegeneinander abzugleiten, das Holz bricht eher. Somit konnte es der angreifenden Kraft weniger Eigenspannung entgegensetzen. Zu beobachten war des weiteren, dass sich das thermisch modifizierte Holz viel spröder verhielt. Besonders die Proben der Höhen 20 aber auch 10mm splitterten bei vergleichsweise kleinen Spannungen auseinander, das führte dazu, dass die Spannung plötzlich abnahm. Aufgrund dieser Sprödheit war bei diesen Proben ein größerer Struktureinfluss zu verzeichnen, die Spannungs-Dehnungs-Verläufe weichen teils stark voneinander ab. Das native Holz verhielt sich insgesamt weicher und zäher. Es splitterte nicht plötzlich auseinander, vielmehr stellte sich ein Bruch, besonders bei der Höhe von 20mm, allmählich ein. Die Verläufe der nativen Proben waren im Allgemeinen gleichmäßiger.

Zusätzlich war der Einfluss einer weiteren Randbedingung zu betrachten. Proben der Höhe von 4mm sollten in einem geschlossenen Kasten unter Querdehnungsbegrenzung und vorheriger thermischer Behandlung verfestigt werden. Es war zu beobachten, dass sich die Proben verfestigten ohne zu brechen. Im Vergleich zu den Proben, die ohne Querdehnungsbegrenzung verdichtet wurden, konnte beobachtet werden, dass dieser geschlossene Kasten bei der geringen Probenhöhe von 4mm keine große Rolle spielt. Auch die Proben, die sich frei ausdehnen konnten brachen nicht, sondern haben sich verfestigt. Lediglich die erhöhte Temperatur hatte einen merklichen Einfluss auf die Festigkeit sowie die Dehnung. Mit ihr sank zwar die Festigkeit, die Dehnung bei Maximalspannung war aber deutlich höher.

Alle Messungen im Rahmen dieser Belegarbeit erfolgten nicht nach der Prüfnorm DIN 52185 (Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser) oder DIN 52192 (Druckversuch quer zur Faserrichtung), da der Faser-Last-Winkel bei allen Proben  $45^\circ$  betrug. Des weiteren wurde nach den Messungen nicht die Feuchte oder Darrdichte bestimmt, da die Proben zum einen eine geometrisch schwer zu beschreibende Form und zum anderen teils zersplittert waren. Für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit war diese Angabe auch nicht primär relevant, da alle Messungen bei gleichen Bedingungen und Normalklima durchgeführt wurden.



## Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2-1 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Holz (Quelle: NIEMZ, S.147) .....	6
Abb. 3-1 - Ahorn-Prüfkörper der Höhe 4mm (Versuchsreihe 1) .....	9
Abb. 3-2 - Proben aus thermisch modifiziertem Ahorn der Höhe 4mm (Versuchsreihe 2).....	9
Abb. 3-3 - Proben der Höhe 20mm aus nativem Ahorn (links, Versuchsreihe 3) und aus thermisch modifiziertem Ahorn (rechts, Versuchsreihe 4).....	10
Abb. 3-4 - Proben der Höhe 10mm aus nativem Ahorn (links, Versuchsreihe 5) und aus thermisch modifiziertem Ahorn (rechts, Versuchsreihe 6).....	10
Abb. 3-5 - Proben der Höhe 4mm aus nativem Ahorn (Versuchsreihe 7) .....	11
Abb. 3-6 - Proben der Höhe 4mm aus thermisch modifiziertem Ahorn (Versuchsreihe 8).....	11
Abb. 3-7 - Schnittdarstellung der Querdehnungsbegrenzung .....	12
Abb. 3-8 - Querdehnungsbegrenzung ohne (links) und mit Druckstempel sowie Grundplatte (rechts).....	12
Abb. 3-9 - Werkstoffprüfmaschine TIRATest 28100 .....	13
Abb. 4-1 - Spannungs-Dehnungs-Verlauf der Probe 1 aus Prüfreihe 1.....	14
Abb. 4-2 - Position-Kraft-Verlauf der Kalibrierung der Stauchvorrichtung .....	15
Abb. 4-3 - Gemessener und korrigierter Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Vergleich.....	16
Abb. 4-4 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der nativen und thermisch modifizierten Proben der Höhe 4mm mit Querdehnungsbegrenzung .....	17
Abb. 4-5 - Fehler der Querdehnungsbegrenzung.....	19
Abb. 4-6 - Position-Kraft-Verlauf der Kalibrierung der Stauchplatten .....	20
Abb. 4-7 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben aus nativem und thermisch modifiziertem Ahorn der Höhe 20mm (Versuchsreihen 3 und 4).....	21
Abb. 4-8 - Native Proben der Höhe 20mm (Prüfreihe 3) nach der Messung .....	22
Abb. 4-9 - Thermisch modifizierte Proben der Höhe 20mm (Prüfreihe 4) nach der Messung.....	22
Abb. 4-10 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der nativen und thermisch modifizierten Probe bei maximaler Kraftbeanspruchung.....	23
Abb. 4-11 - Native Proben (links, mitte) und thermisch behandelte Proben (rechts) der Höhe 20mm (Prüfreihe 3 und 4) nach der Maximalkraftbeanspruchung.....	23
Abb. 4-12 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Versuchsreihen 5 und 6 .....	24
Abb. 4-13 - Native Proben der Höhe 10mm (Prüfreihe 5) nach der Messung .....	25
Abb. 4-14 - Thermisch behandelte Proben der Höhe 10mm (Prüfreihe 6) nach der Messung.....	25
Abb. 4-15 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm des nativen und thermisch behandelten Holzes bei maximaler Kraftbeanspruchung.....	26

Abb. 4-16 - Native Proben (1. und 2. von links) und thermisch behandelte Proben (1. und 2. von rechts) der Höhe 10mm nach der Maximalkraftbelastung .....	26
Abb. 4-17 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben mit 4mm Höhe .....	27
Abb. 4-18 - Native Proben mit der Höhe 4mm nach der Maximalkraftbelastung .....	28
Abb. 4-19 - Thermisch behandelte Proben mit der Höhe 4mm nach der Maximalkraftbelastung .....	28
Abb. 5-1 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von nativem Ahorn mit den Höhen 20, 10, und 4mm .....	29
Abb. 5-2 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von nativem Holz der Höhe 4mm mit und ohne Querdehnungsbegrenzung.....	30
Abb. 5-3 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von thermisch modifiziertem Ahorn mit den Höhen 20, 10, und 4mm.....	31
Abb. 5-4 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm von nativem Holz der Höhe 4mm mit und ohne Querdehnungsbegrenzung.....	31

## **Literatur- und Quellenverzeichnis**

NIEMZ, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag. 1993

DIN 52180-1: 1977. Prüfung von Holz - Probennahme. Grundlagen.

DIN 52185:1976 Prüfung von Holz - Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser.

DIN 52192:1979. Prüfung von Holz - Druckversuch quer zur Faserrichtung.

<http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungs-Dehnungs-Diagramm>, 09.März 2008

<http://www.thermoholz-deutschland.de/html/verfahren.html>, 13.März 2008

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1	Maße der Prüfkörper der Prüfreiheiten 1 und 2.....	9
Anlage 2	Maße der Prüfkörper der Prüfreiheiten 3, 4, 5, 6, 7 und 8.....	10

## Maße der Prüfkörper der Prüfreiheiten 1 und 2

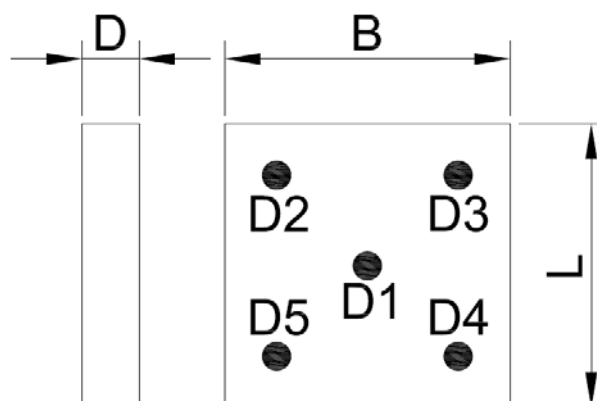
- Prüfreihe 1: Prüfkörper aus Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D1 in mm	D2 in mm	D3 in mm	D4 in mm	D5 in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	19,96	19,95	4,48	4,49	4,47	4,42	4,47	4,47	0,98	551
2	20,03	19,91	4,33	4,27	4,43	4,32	4,25	4,32	0,96	557
3	19,96	19,97	4,56	4,68	4,63	4,50	4,47	4,57	1,02	560
4	20,02	19,95	4,53	4,49	4,58	4,51	4,49	4,52	1,02	565
5	20,01	19,95	4,32	4,35	4,31	4,21	4,31	4,30	0,94	548
6	20,03	19,95	4,50	4,49	4,50	4,50	4,48	4,49	0,99	551
7	20,05	19,98	4,61	4,58	4,54	4,56	4,53	4,56	1,08	591
8	20,08	19,98	4,59	4,57	4,52	4,54	4,63	4,57	1,04	567
9	20,06	19,93	4,48	4,47	4,48	4,44	4,47	4,47	1,00	560
10	20,06	19,94	4,51	4,48	4,49	4,50	4,50	4,50	1,00	556
11	20,01	19,97	4,48	4,49	4,44	4,41	4,47	4,46	0,98	550
12	20,02	19,94	4,48	4,41	4,47	4,49	4,47	4,46	0,99	556
13	20,07	19,95	4,42	4,43	4,36	4,43	4,48	4,42	0,99	559
14	20,08	19,91	4,49	4,48	4,50	4,49	4,48	4,49	1,01	563

- Prüfreihe 2: Prüfkörper aus thermisch modifiziertem Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D1 in mm	D2 in mm	D3 in mm	D4 in mm	D5 in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	20,07	19,96	4,09	4,09	4,11	4,05	4,03	4,07	0,87	533
2	19,91	19,96	4,02	4,09	4,03	3,93	3,95	4,00	0,80	503
3	20,01	19,94	4,19	4,18	4,17	4,11	4,19	4,17	0,84	505
4	19,97	19,93	4,15	4,23	4,39	4,14	4,09	4,20	0,83	497
5	20,03	19,96	4,17	4,16	4,15	4,13	4,16	4,15	0,85	512
6	20,06	19,97	4,09	4,07	4,06	4,06	4,05	4,07	0,82	503
7	20,04	19,95	4,08	4,09	4,09	4,05	3,98	4,06	0,82	505
8	20,01	19,95	4,16	4,20	4,15	4,12	4,13	4,15	0,87	525
9	20,07	19,96	4,11	4,09	4,10	4,07	4,09	4,09	0,85	519
10	20,02	19,95	4,16	4,16	4,21	4,16	4,16	4,17	0,84	504
11	20,07	19,96	4,08	4,11	4,12	4,08	4,08	4,09	0,83	506

- Lage der Maße



**Maße der Prüfkörper der Prüfreiheiten 3, 4, 5, 6, 7 und 8**

- Prüfreihe 3: Prüfkörper aus Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	20,37	20,41	20,43	5,12	603
2	20,24	20,34	20,33	4,92	588

- Prüfreihe 4: Prüfkörper aus thermisch modifiziertem Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	20,01	20,36	20,29	4,10	496
2	20,39	20,37	20,30	4,38	519

- Prüfreihe 5: Prüfkörper aus Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	20,29	20,38	9,91	2,58	630
2	20,39	20,37	9,92	2,53	614

- Prüfreihe 6: Prüfkörper aus thermisch modifiziertem Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	20,34	20,09	9,95	2,16	531
2	20,06	20,36	9,96	2,10	516

- Prüfreihe 7: Prüfkörper aus Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	20,20	20,34	4,11	1,07	633,64
2	20,46	20,30	4,15	1,10	638,18
3	20,49	20,37	4,08	1,09	640,08

- Prüfreihe 8: Prüfkörper aus thermisch modifiziertem Ahorn

NR.	L in mm	B in mm	D in mm	m in g	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
1	20,16	20,32	3,99	0,89	545
2	20,41	20,35	3,93	0,88	539
3	20,31	20,37	3,91	0,89	550